МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ «Образование»

ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

И. Е. Скалецкая

ВВЕДЕНИЕ В ПРИКЛАДНУЮ ЭЛЛИПСОМЕТРИЮ

Учебное пособие по курсу «ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ»
Часть 2. **Свойства решений ОУЭ для однородных слоёв**

ИТМО
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Санкт-Петербург

2007

И. Е. Скалецкая, ВВЕДЕНИЕ В ПРИКЛАДНУЮ ЭЛЛИПСОМЕТРИЮ. Учебное пособие по курсу «ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ». Часть 2. Свойства решений ОУЭ для однородных слоёв. СПб: СПБГУИТМО. 2007 г. – 172 с.

Учебное пособие имеет следующие цели: ознакомление с принципами экспериментальной работы на приборах ручного управления типа ноль-эллипсометров серии ЛЭФ-3М-1 от юстировки и калибровки до измерений и статистической обработки первичных данных; пополнение банка данных новыми измерениями оптических систем для анализа гипотезы об индивидуальности калибровочных процедур и нахождения их констант по независимым объектам измерений (ОИ); накопления данных по кинетике состояния ОИ, например, эволюции их памяти в приповерхностных слоях жидких сред, индуцированной из вне путём реструктуризации нанокластеров среды, наблюдаемых непосредственно по изменениям величин азимутов поляризаторов ($P_к$, $A_к$) прибора в оптимальных измерительных зонах, выявляемых с помощью предварительной юстировки по рабочим мерам на основе прецизионно отполированных оптических стёкол марки НС; освоение методики прецизионных измерений амплитудно-фазовых (Ψ_φ, Δ_φ) характеристик поля световой волны после взаимодействия с исследуемым веществом при косом падении ($0^0 < \varphi < 90^0$) методом многоугловых развёрток; ознакомление с программным обеспечением компьютерной обработки первичной измерительной информации и модельной оценки (d, n, k) косвенно измеряемых оптических параметров исследуемых материалов на примере гель-золь покрытий стёкол и фото реструктуризации стеклокерамических ОИ.

Учебное пособие рассчитано на студентов и аспирантов оптических специальностей высшей школы

Утверждено к печати Советом Инженерно-Физического Факультета, протокол № 2 от 09.10.2007 г.

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский Государственный
Университет Информационных Технологий
Механики и Оптики
© Скалецкая И. Е., 2007.

Аннотация

Первая часть монографии авторского коллектива каф. ТТОЭ ГУ ИТМО, как учебное пособие по курсу оптических измерений «Введение в прикладную эллипсометрию», базировалась на анализе свойств решений основного уравнения эллипсометрии (ОУЭ) для объектов исследования (ОИ) с идеальной зеркальной границей раздела сред.

Эта модель стала основой для метрологической проработки корректности методов эллипсометрии при определении компонент комплексного показателя преломления оптических систем, поверхность которых подвергалась обработке методами сверхглубокой шлифовки-полировки (СГШП) косвенно с помощью непосредственно измеряемых параметров поляризации поля световой волны.

При численном моделировании решений ОУЭ для прямой и обратной задач эллипсометрии с повышенной точностью (двойной разрядностью) была выявлена уникальная зависимость поправок к точным значениям констант регулярного характера от углов падения света на ОИ. Причём с увеличением пробных значений экстинкции эти поправки перекочёвывали из области малых в область значительных даже при обычной разрядности представления машинных чисел. Для ОИ из класса сильно поглощающих металлов характер регулярности поправок стал идентичен угловым зависимостям этих констант, известным в металловедении как научно одиозная проблема Васичека.

Физическая трактовка решения этой проблемы аппелировала к гипотезе о двояком смысле экстинкции – трактовке её как полного светоослабления по двум реальным механизмам взаимодействия света с веществом поглощения и рассеяния.

Поскольку индикатриссы рассеяния всегда обладают естественной угловой зависимостью, то в эллипсометрических измерениях требовалось найти способ разделения констант на независящие от углов падения величины (показатели преломления и дисперсионного поглощения) и естественные индикатриссные функции рассеянного светоослабления.

Настоящая работа посвящена анализу свойств решений ОУЭ для ОИ в виде модели однородных плоскопараллельных слоёв между идеальными границами Френеля.

Подобная модель является наиболее распространённой в прикладных задачах материаловедения и так же метрологически важной для проработки корректности методов традиционной эллипсометрии и её программного обеспечения для численного решения нелинейных проблем ОУЭ как простого математического свойства в выбранной модели ОИ.

Экспериментальные методы эллипсометрического контроля сверхмалых толщин в изделиях современных нанотехнологий, являются актуальными и их дальнейшее развитие и совершенствование – важным и своевременным.

По существу эта работа относится к классу справочных пособий по точным численным решениям ОУЭ для однослойных оптических систем в виде

табулограмм и номограмм для широкого класса материалов подложек и всевозможных типов их покрытий по трём характерным параметрам:

- толщине слоёв в широком диапазоне от нуля до нескольких микрон;
- показателям преломления покрытий для известных подложек и сред;
- показателям экстинкции, включающим как поглощение, так и рассеяние в ОИ.

Работа может служить базовым пособием для организации лабораторной работы в учебном практикуме студентов ВУЗов по методам поляризационно-оптической амплитудно-фазовой диагностики гомогенных сред с помощью эллипсометрических приборов ручного управления. Эти приборы конкурируют разве что с туннельными микроскопами сверхлокального наблюдения, использование которых для сверхтонких однородных сред – иррационально.

Современный прогресс в развитии всевозможных направлений нано- и пико- технологий (от изделий квантовой радиоэлектроники до биомедицинских объектов генной инженерии) во многом зависит также и от развития научно-технической и метрологической базы материаловедения, линейные размеры рабочих элементов в котором достигают нанометрового уровня в объёмах, соизмеримых с масштабами квантовых точек – объектов квазимолекулярного уровня самоорганизации сложных систем, обладающих при этом собственными макрохарактеристиками гомогенных сред, доступными эллипсометрическому наблюдению, управлению, контролю, диагностики и интерпретации.

Ключевые слова и обозначения.

ОИ – объект исследования,
ОУЭ – основное уравнение эллипсометрии: $R = |R|e^{i\delta} = tg(\Psi)e^{i\Delta}$,
Ψ – амплитудный параметр состояния поляризации $|R| = tg(\Psi)$,
Δ – фазовый параметр состояния поляризации $\delta = \Delta$ – аргумент комплексного R,
ПВО – полное внутреннее отражение,
НПВО – нарушенное полное внутреннее отражение,
ФЭУ – фотоэлектронный умножитель (U – индикаторный сигнал),
ЛЭФ – лазерный эллипсофотометр (3М – третья модификация),
ИФА – иммуноферментный анализ,
ЭМП – электромагнитное поле (ЭМК – ЭМ колебания, ЭМВ – ЭМ волны),
$m = n - ik$ – комплексный показатель преломления,
n – показатель рефракции,
k – показатель светоослабления (экстинкция).

Содержание

	Стр.
Аннотация	3
Введение.	6
Глава 1. Теоретические аспекты прикладных методов классической эллипсометрии	8
1.1. Поляризованный свет и характер взаимодействия его с ОИ . .	-
1.2. Планарные матмодели ОИ в традиционной эллипсометрии . .	28
1.2.1. Свойства решений ОУЭ для простой оптической модели ОИ .	-
1.2.2. Свойства решений ОУЭ для слоистой оптической модели ОИ .	33
1.2.3. Связь ОУЭ для идеальных границ с однослойной системой .	35
1.3. Развитие нетрадиционных методов прикладной эллипсометрии .	37
1.3.1. НПВО–эллипсометрия	39
1.3.2. Спекл $U_{фэу}$ –эллипсометрия	43
1.3.3. Трансформация инвариантов Френеля–Брюстера . . . в модели однородного слоя.	45
1.3.4. Эллипсометрия скрытых азимутальных девиаций . . .	55
1.3.5. Релаксационная $U_{фэу}$ – эллипсометрия	67
1.4. Компьютерное моделирование свойств решений прямой задачи эллипсометрии для однородного слоя	77
1.4.1. Типовые решения прямой задачи ОУЭ для однородного слоя .	-
1.4.2. Контрольные примеры решений ОУЭ для однослойной модели	82
1.4.3 Свойства решений обратной задачи эллипсометрии для слоя .	83
Глава 2. Экспериментальные аспекты прикладной эллипсометрии и её методологические недостатки.	85
2.1. Описание прогрессивной модели ЛЭФ-3.М.1.	-
2.1.1. Модификация блока регистрации спекл-картин . . .	90
2.1.2. Автокалибровка эллипсометрических измерений по методу многоуглового сканирования	91
2.1.3. Принципиальная схема ромбоидного эллипсометра для спектроскопии НПВО	98
2.2. Измерительная информация	104
2.2.1. Измерения констант фотомодифицированной стеклокерамики .	-
2.2.2. Измерительная первичная иинформация гель-зольных систем .	115
2.2.3. Вторичная информация для гель-зольных покрытий . .	119
2.3. Сглаживание первичных данных при многоугловых измерениях .	122
Глава 3. Таблицы Ψ-Δ решений ОУЭ в однослойной модели ОИ . .	125
Заключение	167
Литература	169

Введение

Методы прикладной эллипсометрии относятся к не до конца освоенным и поэтому постоянно обновляемым прогрессивным научно-экспериментальным технологиям в поляризационно-оптическом наноматериаловедении, благодаря физической простоте экспериментальной работы с естественными формами поляризованного когерентного света при эллиптической аппроксимации его состояния поляризации для плоских волн ($E = |E| e^{i\delta}$) с помощью амплитудно-фазовых (Ψ, Δ) характеристик.

Принципиальное преимущество этих методов перед энергетическими (E^2) состоит в очень высокой чувствительности измерений самих амплитудно-фазовых соотношений поля световых волн, испытавших взаимодействие со средами оптической системы. Так, для идеальных коэффициентов $r = E_{отр}/E_{пад}$ Френеля фазовые соотношения проектируются на круг от нуля до 360^0, а соотношения амплитуд (через тангенс их угловой меры $tg(\Psi) = |r|$) в интервал до 90^0. При этом линейные и угловые измерения в современной метрологии считаются наиболее продвинутыми.

Цена деления нониусов на оптических лимбах Свиташова при измерениях P- и A- азимутов поляризаторов и двойного угла (2φ) падения-отражения на эллипсометрах серии ЛЭФ-3М составляет величину 60”, переходящую в систематическую погрешность ±30”. Более того, неустранимая её личностная часть – гораздо ниже, если острота своего или технически улучшенного зрения оператора гарантирует отсчёты в долях указанной цены деления.

Микрометрическая точность локальности измерений в различных точках объектов измерений (ОИ) на 3-х координатном столике имеет неустранимую составляющую $\Delta_{x,y} = \pm 0.005$мм.

Значительным недостатком эллипсометрических измерений является требование к планарности зеркально отражающих приповерхностных структур ОИ в апертуре световых лучей. Однако он компенсируется возможностью диафрагмирования этой апертуры снизу до дифракционного предела около $3\lambda \approx 1.8$ мкм, а так же сверху – апертурой пучков лазерных излучателей или их коллимационных формирователей.

Таким образом, эллипсометрия опирается на френелевскую информацию о константах ОИ и, в частности, даёт сведения о линейных размерах толщины их планарных структур.

Оптические константы входят в комплексный коэффициент преломления однородной среды $m=n–ik$ ($i^2 = -1$), где n - показатель рефракции (вещественный показатель преломления) и k - показатель ослабления света (экстинкция), обусловленный механизмами поглощения и рассеяния. Диапазон толщин слоёв начинается с нуля ($d \to 0$) для идеальных границ раздела фаз с электронным рельефом их атомных или молекулярных переизлучателей в решётке реальных физических границ и простирается до сколь угодно больших толщин. Их же вариации для сколь угодно тонких дисперсионно активных слоёв, связанные,

например, с вариациями температуры, теоретически могут доходить до долей Ангстрема (1Å=10^{-8} см = 0.1 нм) – в пикометрический диапазон.

Долгое время в микроэлектронном материаловедении эллипсометрия служила для определения толщин покрытий существенно меньших длины световой волны, конкурируя с многолучевой интерферометрией, принятой за базовые методы метрологии ГОСТ. Однако для контроля современных изделий нанотехнологий с пико- разрешением, таких например, как для рентгеновских фильтров в десятки Ангстрем толщиной, эллипсометрия выдвигается на передовые рубежи исследования макроскопически гомогенных материалов.

Эллипсометрия применима так же для точного определения макро толщин прозрачных ОИ при просвечивании их под малыми углами падения-отражения ($\varphi \to 0$) и дополнительной информации о её приближённом значении, кратном эллипсометрическому периоду $d_0(\varphi)$ измерения толщин прозрачных материалов $d_0 = 0.5\,\lambda / \sqrt{n^2 - \sin^2(\varphi)}$.

В основе метода эллипсометрии лежит теория бесконечно кратной интерференции поляризованного света в средах их распространения безотносительно значений размеров их толщин между границами раздела фаз от атомарно малых (идеальных границ Френеля) до макроскопически больших размеров в системе плоскопараллельных слоёв. При этом не следует эффекты пленения [1,2] света тонкослойными ловушками отождествлять с волновыми явлениями ПВО и его нарушениями, используемыми в эллипсометрии НПВО.

Теория эллипсометрии восходит к решениям задач максвелловской электродинамики в краевой постановке для плоских волн с помощью классических коэффициентов Френеля и их обобщённых соотношений в виде уравнения Друде, которое связывает амплитуды и фазы планарных (p) и сагитальных (s) компонент поля [3]:

$$R = (E_{отр}^{(p)}/E_{пад}^{(p)})/(E_{отр}^{(s)}/E_{пад}) = \mathrm{tg}\Psi\, e^{i\Delta} = F(\lambda,\varphi;d,n,k). \qquad (1)$$

Это комплексное в общем случае уравнение (1) называется основным уравнением эллипсометрии (ОУЭ), связывающим оптические параметры (d, n, k) отражающего материала с Ψ, Δ амплитудно-фазовыми характеристиками поля отражённой световой волны $E = (E^{(p)}, E^{(s)})$.

Глава 1. Теоретические аспекты прикладных методов классической эллипсометрии

Теорию современной прикладной эллипсометрии можно рассматривать в двояком аспекте её традиционной и нетрадиционной физических постановках.

§ 1.1. Поляризованный свет и характер его взаимодействия с ОИ

В квантовой оптике электромагнитное излучение рассматривают как поток фотонов. Состояния поляризации с квантовой точки зрения [4] определяются тем, каким *моментом количества движения* обладают фотоны в потоке. Так, фотоны с круговой поляризацией (правой, левой) обладают моментом $\pm\hbar/(2\pi)$ в постоянных М.Планка [5]. Любое состояние поляризации света может быть выражено всего через два [6] так называемых базисных состояния. Выбор пары исходных базисных состояний неоднозначен – ими могут служить, например, любые две взаимно-ортогональные линейные поляризации, правая и левая круговые поляризации света и т. д., причём в каждом случае от одной пары базисных состояний можно по определённым правилам перейти к другой паре.

Эта неоднозначность имеет в квантовом подходе принципиальный характер, однако "произвол" обычно ограничивают конкретные физические условия: наиболее удобно выбирать за базисную пару такие состояния, которые преобладают в актах испускания фотонов элементарными излучателями либо определяют рассматриваемый процесс взаимодействия света и вещества. Определение состояния поляризации света на опыте осуществляется с помощью прямых взаимодействий по общим правилам квантовой механики. Подобный эксперимент всегда меняет – иногда пренебрежимо мало, иногда существенно – исходную поляризацию света. Базисные состояния и состояния, описываемые любой линейной комбинацией базисных в рамках принципа суперпозиции, называют чистыми. Они соответствуют полной поляризации света со степенью 100%.

Однако фотоны могут находиться не только в чистых, но и так называемых смешанных [7] состояниях, в которых степень их поляризации меньше 100% и может доходить до нуля (естественный свет). Смешанные состояния также выражаются через базисные, но более сложным образом, чем линейная суперпозиция (их называют некогерентной смесью чистых состояний). Взаимодействие света и вещества может в определённых условиях приводить к полному или частичному "выделению" чистых состояний из смешанных (за счёт упомянутого выше изменения поляризации света при таком взаимодействии).

Это явление используется для получения полностью поляризованного света или увеличения степени поляризации во многих поляризационных приборах. Если за базисные состояния выбраны две круговые (правая и левая) поляризации, то при их наложении (когерентной суперпозиции) в равных долях наблюдается линейная поляризация; суперпозиции их в различных других соотношениях дают эллиптические состояния поляризации со всевозможными

характеристиками. Через эти же базисные состояния могут быть выражены любые смешанные состояния. Т. о., тот или иной выбор всего двух базисных состояний даёт возможность описать все состояния поляризации света.

Эксперименты подтверждают теоретический постулат о том, что каждый фотон, поляризованный по кругу, численно обладает моментом количества движения равным ħ [8] (эксперименты по оптической ориентации и эффекту Садовского). Характер поляризации фотонов определяется законом сохранения момента количества движения системы, в которой элементарный излучатель – испущенный фотон (при условии, что взаимодействием отдельных излучателей между собой можно пренебречь).

Кроме особенностей элементарных актов излучения, к частичной (а иногда и полной) поляризации света приводит множество физических процессов. К ним относятся, например, отражение света и преломление света, при которых эта поляризация света обусловлена различием оптических характеристик границы раздела двух сред [9] для компонент светового пучка, поляризованных параллельно и перпендикулярно плоскости падения (как при эффекте Брюстера). Свет может поляризоваться при прохождении через среды, обладающие естественной или вызванной внешними воздействиями оптической (индуцированной) анизотропией (вследствие неодинаковости коэффициентов поглощения света при различных состояниях, например, при правой и левой круговых поляризациях – так называемом круговом дихроизме, являющимся частным случаем плеохроизма, вследствие различия показателей преломления среды для лучей различных линейных поляризаций – двойного лучепреломления). Излучение лазеров часто является полностью поляризовано. Одной из основных (хотя не единственной) причиной поляризации света в лазерах является специфический характер вынужденного излучения, при котором поляризации испускаемого фотона и фотона, вызвавшего акт испускания, абсолютно тождественны. Таким образом, при лавинообразном умножении числа испускаемых фотонов в лазерном импульсе их поляризации могут быть совершенно одинаковыми. Поляризация света возникает при резонансном излучении в парах, жидкостях и твёрдых телах. Поляризация при рассеянии света столь характерна, что её исследование – один из основных способов изучения как особенностей и условий самого рассеяния, так и свойств рассеивающих центров, в частности их структуры и взаимодействия между собой (атмосферная оптика, поляризация небосвода, комбинационное рассеяние). При рассеянии поляризованного света происходит и его деполяризация – уменьшение степени поляризации.

В определённых условиях сильно поляризовано люминесцентное свечение, особенно при возбуждении его поляризованным светом. Поляризация света весьма чувствительна к величине напряжённости и ориентации электрических и магнитных полей; в сильных полях компоненты, на которые расщепляются спектральные линии испускания, поглощения и люминесценции газообразных и конденсированных систем, оказываются поляризованными (эффекты Зеемана, Штарка в магнитооптике)[8].

Волновая теория поляризации представляется более простой и понятной [10]. Действительно, поле вакуума с абсолютными диэлектрической ε_0= $8.8542\cdot10^{-12}$ (Ф/м) и магнитной $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ (Гн/м) проницаемостями, задающими скорость света в пустоте $c=1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ =$2.9979\cdot10^{8}$ (м/с), является пространственно-временным R(t) носителем связанных колебаний E(R(t)) и H(R(t)) компонент электромагнитного поля. Эти колебания типа $Ae^{-i(\omega t+\delta)}$ распространяются в виде плоских упругих волн, описываемых теми же колебаниями с запаздыванием на время прихода возбуждения τ = R(t)/c вида $A(R(t))e^{i(\omega(t-\tau)+\delta o)}$ =$Ae^{i(\omega t-2\pi R/(Tc)+\delta o)}$ =$Ae^{i(\omega t-kR+\delta o)}$, где к – волновое число. Эти волны являются решениями системы уравнений Максвелла:

Äèôôåðåíöèàëüíàÿôîðìà : *Èíòåãðàëüíàÿ (Ñòîêñà – Ãàóññà-Îñòðîãðàäñêîãî)*:

$$\begin{cases} rot\vec{E} = -\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t} \\ rot\vec{B} = \mu_0\vec{j} + \mu_0\varepsilon_0\dfrac{\partial\vec{E}}{\partial t} \\ div\vec{E} = \dfrac{\rho}{\varepsilon_0} \\ div\vec{B} = 0 \end{cases} \qquad \begin{cases} \oint\limits_L \vec{E}d\vec{l} = -\dfrac{d}{dt}\oiint\limits_S \vec{B}d\vec{s} \\ \dfrac{1}{\mu_0}\oint\limits_L \vec{B}d\vec{l} = \oiint\limits_S \vec{j}d\vec{s} + \dfrac{d}{dt}\oiint\limits_S (\varepsilon_0\vec{E})d\vec{s} \\ \oiint\limits_S \vec{E}d\vec{s} = \dfrac{1}{\varepsilon_0}\iiint\limits_V \rho dV \quad \leftrightarrow \quad \oiint\limits_S \vec{D}d\vec{s} = \iiint\limits_V \rho dV \\ \oiint\limits_S \vec{B}d\vec{s} = 0 \end{cases} \tag{2}$$

Решения системы (2) имеют вид запаздывающих потенциалов. При введении скалярного потенциала (φ) и векторного потенциала Герца (A) все эти компоненты поля могут быть записаны в общем виде B=rot(A) и E=–grad(φ)–A'_t. По формальным законам матфизики эти потенциалы имеют калибровочные инварианты A* = A + grad(χ) и $\varphi^* = \varphi - \chi'_t$. При выполнении калибровочного тождества Лоренца div(A) + $c^{-2}\varphi'_t = 0$ эти потенциалы отвечают уравнениям Даламбера, которые без правых частей являются волновыми операторами:

$$\begin{aligned} &\Delta\vec{A} - \frac{1}{\tilde{n}^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{A} = -\mu_0\vec{j} \\ &\Delta\varphi - \frac{1}{\tilde{n}^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \end{aligned} \tag{3}$$

Общие решения (3) в запаздывающих потенциалах имеют вид:

$$\vec{A}(\vec{R},t) = \frac{\mu_0}{4\pi}\iiint \frac{\vec{j}\left(\vec{R}^*, t - \dfrac{\left|\vec{R}-\vec{R}^*\right|}{c}\right)dV^*}{\left|\vec{R}-\vec{R}^*\right|}$$

$$\varphi(\vec{R},t) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\iiint \frac{\rho\left(\vec{R}^*, t - \dfrac{\left|\vec{R}-\vec{R}^*\right|}{c}\right)dV^*}{\left|\vec{R}-\vec{R}^*\right|}$$

Эвристическая ценность системы (2) состоит в том, что в изящной форме она, во-первых, описывает гениальное открытие явления электромагнитной

индукции М. Фарадея (об ЭДС как скорости убыли потока магнитной индукции по механизму противодействий магнитных и электрических вихревых полей). Во-вторых, она описывает уникальное явление высокочастотной проводимости пустоты, когда токи высокой частоты проходят по разрыву цепи, например, по цепочке воздушных конденсаторов. Максвелл назвал их токами смещения, понимая под смещением – вектор электрической индукции (D), где $D = \varepsilon_{abs}E$ и $\varepsilon_{abs} = \varepsilon_{rel}\,\varepsilon_0$. При $\varepsilon_{rel} = 1$ (для вакуума) материальное уравнение, описывающее вектор смещения $D=D_0$ электрического поля в пустоте, принимает вид $D_0 = \varepsilon_0 E$.

Аналогично вводится вектор реальной магнитной индукции $B = \mu_{abs}H = \mu_{rel}\mu_0 H$ через абстрактную напряжённость магнитного поля H. Для вакуума $B_0 = \mu_0 H$. Эти соотношения, наряду с законом Ома в дифференциальной форме $j=\sigma E$, записанной через проводимость (σ), и законом рефракции Лорентц-Лоренца, выраженным через поляризуемость (α), дополняют систему (2) так называемой системой материальных уравнений.

Если на пути волны встретится хотя бы один атом, или их мономолекулярный слой или целая полубесконечная среда, то каждый электрон (с зарядом $e = 1.6022\cdot10^{-19}$ Кл и массой $m_e = 9.1095\cdot10^{-33}$ кг) этих веществ станет вынужденным переизлучателем вторичных волн по механизму поляризуемости $p=e\xi$, где ξ – решение дисперсионного уравнения с затуханием (β):

$$\frac{d^2}{dt^2}\xi + 2\beta\frac{d}{dt}\xi + \omega_0^2\xi = \frac{e}{m}E_0 \mathring{a}^{i\omega t} \qquad (4)$$

Решение этого неоднородного уравнения (4) складывается из общего однородного и частного неоднородного. При отсутствии затухания ($\beta=0$) однородное уравнение имеет гармоническое решение с собственной частотой колебаний ω_0. В общем случае полный интеграл однородного уравнения можно искать в виде $\xi = ae^{-\gamma t}$. Простая подстановка его в уравнение приводит к характеристическому уравнению для γ вида: $\gamma^2 - 2\beta\gamma + \omega_0^2 = 0$ с комплексными решениями $\gamma_{1,2} = \beta \pm i\Omega$, где $\Omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$. Следовательно, общее решение принимает вид затухающей волны с частотой Ω: $\xi = a_0\, e^{-\beta t} e^{i\Omega t}$.

Это затухание собственных колебаний означает окончание переходного режима (4) и переход к частным решениям вынужденных колебаний вида $\xi = A\, e^{i(\omega t+\delta)}$. После второй подстановки искомого решения в (4) его параметры принимают известный типовой вид резонансной амплитуды и фазы:

$$\grave{A} = \frac{\mathring{a}\mathring{A}_0}{m_e\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}$$
$$tg(\delta) = -\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2-\omega^2} \qquad (5)$$

При резонансной раскачке осциллятора в (5) $A=A_{мах}$, $\delta=\pi/2$ и полная суперпозиция решений $\xi = A_{мах}(1-e^{-\beta t})e^{i\omega t}$ с течением времени асимптотически релаксирует на стационарную синусоиду $e^{i\omega t}$.

Таким образом, отклик в среде с известной концентрацией N идентичных электронных осцилляторов на поле волны приведёт к его смещению по дипольному механизму поляризованности $pN=e\xi N=D-D_0=\varepsilon_0(\varepsilon_{rel}-1)E$ и тогда макроскопическая диэлектрическая проницаемость среды $\varepsilon_{rel}=\varepsilon$ примет вид:

$$\varepsilon = 1 + \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\beta\omega)} \qquad (6)$$

Из (6) показатель преломления $\sqrt{\varepsilon}$ =n – ik оказывается тоже комплексным числом. Его вещественная и мнимая части являются дисперсионными функциями частоты, в общем случае описываемые аномальными переходами в крючках Рождественского [12].

У полярных молекул, типа H_2O, полоса аномальной дисперсии (спад от частоты) приходится на СВЧ диапазон, где амплитуда вращательных колебаний диполей, стремящихся повернуться вслед за напряженностью поля, настолько сильно зависит от частоты, что именно в этой области происходит смена низкочастотного значения статического показателя преломления с большего (9 $=\sqrt{81}$) на меньшее (1.333 = 4/3).

Физический смысл понятия диэлектрической проницаемости среды далеко не прост. Для малого ансамбля частиц он теряет атрибут однородности и приобретает интегральный (2) смысл для локальных точек, коррелирующих со всем окружением. То есть ε- реакция среды всегда задаётся атомами или молекулами и не зависит от толщин слоёв вещества, имея простой смысл дисперсионного отклика его зарядов на поле внешней волны.

Волновая теория Гюйгенса-Френеля легко объясняет поведение света при переходе его через границу раздела сред.

Рассмотрим механику движения кванта по лучу из точки в точку в разных средах с разными скоростями за наименьшее t = τ время. Введём обозначения: y_v, y_c – высоты от границы в средах со скоростями v и c ; L – базовая длина между проекции точек; r_v, r_c- пути в соответствующих средах до точки пересечения границы (x). Время (t) складывается из промежутков нахождения в средах:

$$t = \frac{\sqrt{y_c^2 + x^2}}{c} + \frac{\sqrt{y_v^2 + (l-x)^2}}{v} \Rightarrow \frac{d}{dx}\tau = 0 = \frac{2x}{c2\sqrt{y_c^2 + x^2}} - \frac{2(l-x)}{v2\sqrt{y_v^2 + (l-x)^2}} \Rightarrow$$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{x\sqrt{y_v^2 + (l-x)^2}}{(l-x)\sqrt{y_c^2 + x^2}} = \frac{\sqrt{\dfrac{y_v^2 + (l-x)^2}{(l-x)^2}}}{\sqrt{\dfrac{y_c^2 + x^2}{x^2}}} = \frac{\sqrt{1 + ctg^2(\theta_\tau)}}{\sqrt{1 + ctg^2(\theta_i)}} = \frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_\tau)}. \qquad (7)$$

Закон Снеллиуса (7) описывает взаимодействие света с границей раздела сред и устанавливает физический смысл вещественной части показателя

преломления n = c/v>1 в полном соответствии с принципом наименьшего действия Мопертюи.

Для слоистых j-ых сред (7) имеет ковариантный (неизменный по форме) вид: $n_j \sin(\theta_j) = \text{const}$.

Важно понять, что свет в среде распространяется, как и в пустоте по тем же обобщённым ковариантным законам для интегральных и дифференциальных форм системы Максвелла (2):

Äèôôåðåíöèàëüíàÿ ôîðìà : *Èíòåãðàëüíàÿ* (*Ñòîêñà – Ãàóññà-Îñòðîãðàäñêîãî*):

$$\begin{cases} rot\vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ rot\vec{H} = \vec{j} + \dfrac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ div\vec{D} = \rho \\ div\vec{B} = 0 \end{cases} \qquad \begin{cases} \oint\limits_L \vec{E}d\vec{l} = -\dfrac{d}{dt}\oiint\limits_S \vec{B}d\vec{s} \\ \oint\limits_L \vec{H}\,d\vec{l} = \oiint\limits_S \vec{j}d\vec{s} + \dfrac{d}{dt}\oiint\limits_S \vec{D}d\vec{s} \\ \oiint\limits_S \vec{D}d\vec{s} = \iiint\limits_V \rho dV \\ \oiint\limits_S \vec{B}d\vec{s} = 0 \end{cases} \qquad (8)$$

Система уравнений Максвелла (8) остаётся так же и релятивистки ковариантной.

Если плоская поляризованная волна падает на анизотропную среду ОИ с двойным лучепреломлением, то из-за различия по различным направлениям в показателях преломления на выходе образуются две разные волны. Эти волны распространяются в кристалле с различными фазовыми скоростями, и поэтому между ними существует некоторая разность фаз, пропорциональная разности показателей преломления и толщине ОИ. Кроме того, этим двум различным фазовым скоростям (нормальные скорости) соответствуют и два разных значения лучевой скорости, причем, фазовая скорость равняется проекции лучевой скорости на направление волновой нормали.

Оптическая анизотропия объектов (в большинстве случаев, кристаллов) бывает одноосной и двухосной.

В первом случае имеется одно направление, а во втором – два, по которым лучи распространяются с собственной скоростью. Эти направления называют оптическими осями, а сечение, проходящее через падающий луч и оптическую ось – главным.

Различают два типа лучей: обыкновенный (ординарный – «о») и, наоборот, необыкновенный (экстраординарный – «е»). У обыкновенного электрический вектор перпендикулярен главному сечению и имеет неизменный показатель преломления по всем направлениям. Он подчиняется классическому закону преломления Снеллиуса (7). У необыкновенного луча электрический вектор лежит в плоскости главного сечения, показатель преломления его зависит от направления, и он подчиняется более сложному закону преломления, так как направление его распространения, например, в кристалле, меняется по мере самого процесса распространения.

Знак кристалла определяется из соотношения показателей преломления для обыкновенного (*o*) и необыкновенного (*e*) лучей. Если n_o по величине

меньше n_e, то кристалл имеет положительный знак, а если n_o больше n_e – отрицательный знак.

После прохождения плоско поляризованной световой волны через анизотропные объекты в общем случае различают два вида поляризации света: круговую и эллиптическую. Оба вида, в данном случае, являются результатом интерференции двух когерентных световых волн. Характер результирующей волны зависит от амплитуды интерферирующих волн, от разности фаз между ними и от угла, образованного плоскостями колебания волн.

При интерференции двух волн образуется результирующая волна и плоскость колебания её электрического вектора может измениться в пространстве, даже тогда, когда плоскости колебания электрического вектора обыкновенного и необыкновенного лучей стабилизированы.

Если плоскость колебаний результирующего электрического вектора в оптически активных средах изменяется винтообразно по оси, а конец вектора движется во времени и в пространстве по поверхности цилиндра с эллиптическим сечением, то это распределение называют эллиптической поляризацией (рис.I.1).

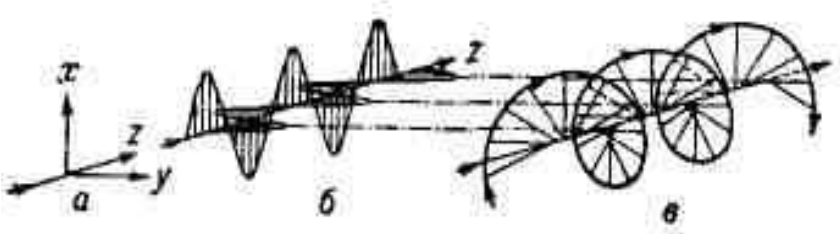


Рис. I.1. Колебания светового вектора *E*.

Здесь свет падает на взаимно перпендикулярные оси *x* и *y* (*г* – направление распространения волны, перпендикулярное как *x,* так и *y*); *б* и *в* – моментальные изображения колебаний и соответствующей огибающей концов полного вектора *E* в разных точках волны для случая, когда вертикальные (по оси *x)* колебания на четверть периода (90°) опережают горизонтальные (по оси *y).* В каждой одной точке конец *E* в этом случае описывает окружность. Стрелки на *в* нанесены для того, чтобы яснее показать вид правого винта. Винтовая поверхность отнюдь не вращается вокруг оси *z* при прохождении волны. Напротив, следует представлять, что вся винтовая поверхность как целое, не вращаясь, переносится вдоль *z* со скоростью волны.

Т. о., полную поляризацию монохроматического света характеризуют проекцией траектории конца вектора *E* в каждой точке луча на плоскость, перпендикулярную лучу. В самом общем случае так называемой эллиптической поляризации такая проекция – эллипс, что легко понять, учитывая постоянство разности фаз между взаимно перпендикулярными компонентами *E* и одинаковость частоты их колебаний в монохроматической волне. Для полного описания эллиптической поляризации необходимо знать направление вращения *E* по эллипсу (правое или левое), ориентацию осей эллипса и его эксцентриситет (см., напр., рис. 1.2*, б, г, е).* Наибольший интерес представляют

предельные случаи – линейная поляризация (разность фаз 0, *к*п, где *к* - целое число, рис. I.2, а и *д),* когда эллипс вырождается в отрезок прямой, и круговая, или циркулярная, когда разность фаз ±*(2к* + 1)п/2 и эллипс поляризации превращается в окружность. Определяя состояние линейно- или плоско-поляризованного света, достаточно указать положение плоскости поляризации света, поляризованного по кругу, – направление вращения (правое на рис. I.2.*в,* или левое). В сложных неоднородных световых волнах (например, в металлах или при полном внутреннем отражении) мгновенные направления векторов E и H уже не связаны простым соотношением ортогональности, и для полного описания поляризации света в таких волнах требуется знание поведения каждого из этих векторов по отдельности.

Плоскость рисунков на рис.I.2 перпендикулярна направлению распространения света: здесь *а* и д - линейные поляризации; *в* - правая круговая поляризация; *б, г* и *е* - эллиптические поляризации различной ориентации. Приведённые рисунки соответствуют положительным разностям фаз δ (опережению вертикальных колебаний по сравнению с горизонтальными).

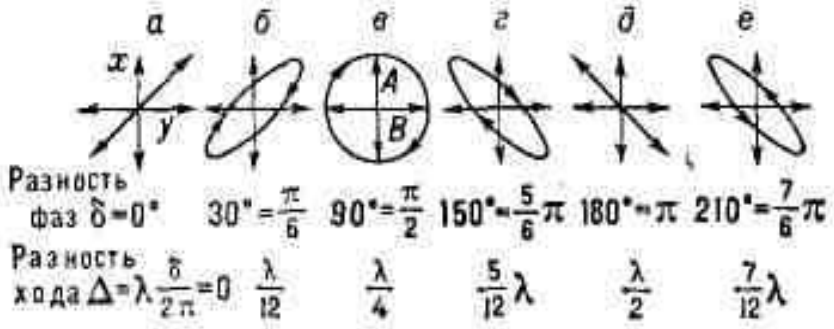


Рис. I.2. Примеры поляризаций света.

Если фазовое соотношение между компонентами (проекциями) E меняется за времена, много меньшие времени наблюдения, то нельзя говорить о полной поляризации. Однако может случиться, что в составляющих пучок света монохроматических волнах вектор E меняется не совершенно хаотически и между взаимно перпендикулярными компонентами E существует некоторый преимущественный фазовый сдвиг (фазовая корреляция), сохраняющийся в течение достаточно длительного времени. Физически это означает, что в поле световой волны амплитуда проекции E на одно из взаимно перпендикулярных направлений всегда больше, чем на другое. Степень подобной фазовой корреляции в таком частично поляризованном свете описывают степенью поляризации. Так, если преимущественный фазовый сдвиг равен 0, свет частично линейно поляризован; если же ± п/2, он – частично поляризован по кругу. Частично поляризованный свет можно рассматривать как "смесь" двух крайних видов – полностью поляризованного и естественного. Их соотношение численно и определяет степень поляризации, которую обычно (но не всегда) определяют как $\gamma = |I_1-I_2|/(I_1+I_2)$. Где индексы 1 и *2* относятся к интенсивностям *I* света двух ортогональных" поляризаций, например, линейных во взаимно

перпендикулярных плоскостях или соответствующих правой и левой круговым поляризациям; этот параметр может меняться от 0% до 100%, отражая количественные градации состояния поляризации света.

При определенных условиях эллиптическое вращение может переходить в круговое или в линейное. Тогда говорят о круговой или линейной частной поляризациях света от естественной – 100% неполяризованного света и, наоборот, 100% поляризованного света. Для последнего выполняются законы сохранения ориентации плоскостей, натянутых на направление распространения луча (волновой вектор) и линию направленных колебаний электрической (E) или магнитной (H в плоскости поляризации) компонент ЭМ волны. Отдельные кванты, естественно, 100% линейно поляризованы. Их потоки и создают поляризованные (идентичные) или неполяризованные (хаотично испущенные) излучения.

Заметим, что эти классические определения противоречат интуитивным представлениям об эллиптической поляризации активных сред, поскольку поляризация (неизменная ориентация) либо есть, либо нет (но есть активность).

Для поляризации света используются различные кристаллы, обладающие двойным лучепреломлением. К таким кристаллам относятся: кварц и исландский шпат. Из этих материалов чаще всего и изготавливают поляризационные элементы. Наиболее [11] распространенной является призма Николя. Применяются также призмы Глана-Томпсона, Аренса, Ротона, Сенармона и Волластона. Отличие их заключается в числе отдельных призм, склеенных в блок, и ориентации их осей друг относительно друга.

На рис. I.3 - I.9 представлены схемы перечисленных поляризаторов.

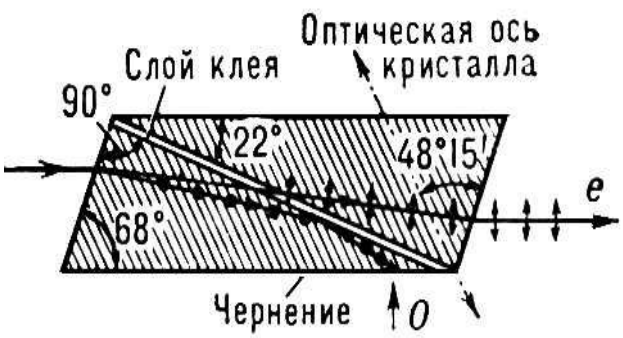
Конструктивно они выполняются так, что проходящее через них излучение должно преодолеть наклонную границу раздела 2 сред, на которой условия преломления света для компонент светового пучка, поляризованных в 2 взаимно перпендикулярных плоскостях, резко различаются. В частности, для одной из этих компонент на границе раздела могут выполняться условия полного внутреннего отражения – ПВО вывода одной из компонент и прохождения для другой. Таковы широко распространённые поляризаторы Николя (часто именуемые просто николями, рис. I.3) и Фуко (рис. I.4), в которых проходит *e* – луч, а отсекается (поглощается или выводится в сторону) обыкновенный *o*– луч.

Подобные кристаллические поляризаторы называют однолучевыми.

Двулучевые поляризаторы пропускают обе взаимно-перпендикулярные линейно поляризованные компоненты исходного пучка, пространственно разделяя их. Чаще всего они изготовляются из исландского шпата $CaCO_3$, прозрачного в диапазоне длин волн λ от 0,2 мкм до 2 мкм, или кристаллического кварца SiO_2, прозрачного до 3,5 мкм.

Трёхгранные призмы однолучевых поляризаторов часто склеивают прозрачным веществом с показателем преломления n, близким к среднему значению обыкновенного (n_o) и необыкновенного (n_e) лучей. Склеивающими веществами служат канадский бальзам, глицерин, касторовое и льняное масла и

др. Во многих призмах их части разделены не клеем, а воздушной прослойкой, что снижает потери на поглощение при высоких плотностях излучения и даёт ряд преимуществ при работе в ультрафиолетовой (УФ) области спектра. Используют также прослойки из плавленого кварца.



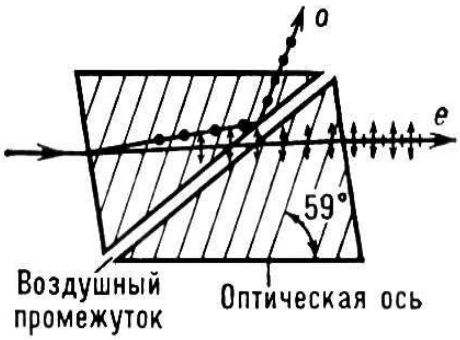
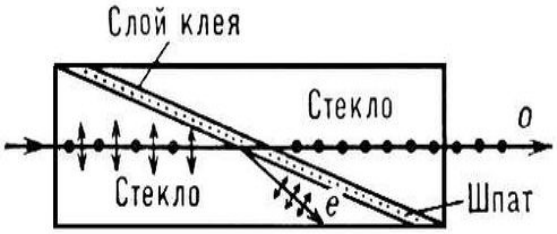
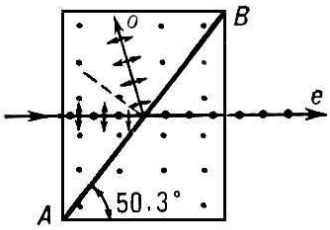


Рис. I.3. Конструкция призмы Николя. Рис. I.4. Конструкция призмы Фуко.

Применяют призмы, в которых кристаллическая пластинка вклеена между двумя призмами из стекла, n которого близка к большему $n_{o,e}$ кристалла (рис. I.5). В них проходит обыкновенный луч, а отражается необыкновенный. Для того чтобы один из лучей претерпевал на границе раздела (склейки) полное внутреннее отражение, выбираются определённые значения преломляющих углов трёхгранных призм и определённые ориентации оптических осей кристаллов, из которых они вырезаны.





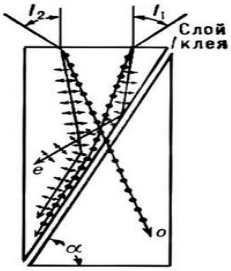


Рис. I.5. Стеклянная призма со шпатом. Рис. I.6. Призма Глана – Томсона.

Такое отражение происходит, если углы падения лучей на грани не превышают некоторых предельных углов i_1 и i_2 (рис. I.6 призмы Глана – Томсона). Сумма $i_1 + i_2$ называется апертурой полной поляризации призмы; её величина существенна при работе со сходящимися пучками излучения. Сечение АВ – воздушный слой, оптический контакт.

Следует отметить, что в призмах со скошенными гранями (Николя, Фуко и др.) лучи испытывают параллельное смещение и поэтому при вращении призмы вокруг оптической оси вращается также и сам луч. От этого (и иных недостатков) свободны призмы в форме прямоугольных параллелепипедов: Глана – Томсона (рис. I.6), Глазебрука (рис. I.7), Франка – Риттера (рис. I.8) и пр.

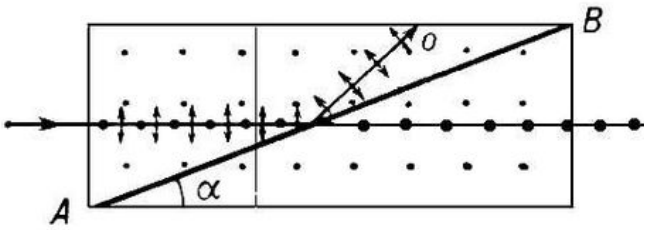


Рис. I.7. Призма Глазебрука.
Угол α = 12,1° при склейке бальзамом, льняным маслом –14°, глицерином – 17,3°.

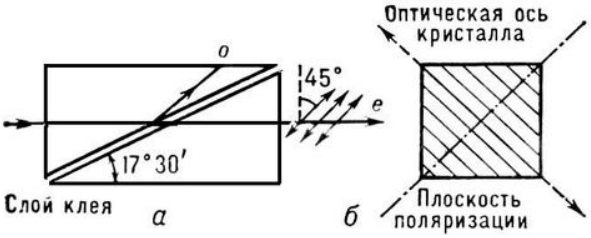


Рис. I.8. Призма Франка – Риттера.
а – вид сбоку; б – вид по ходу луча.

Из двулучевых кристаллических поляризаторов наиболее распространены призмы Рошона, Сенармона, Волластона и некоторые др. (рис. I.9).

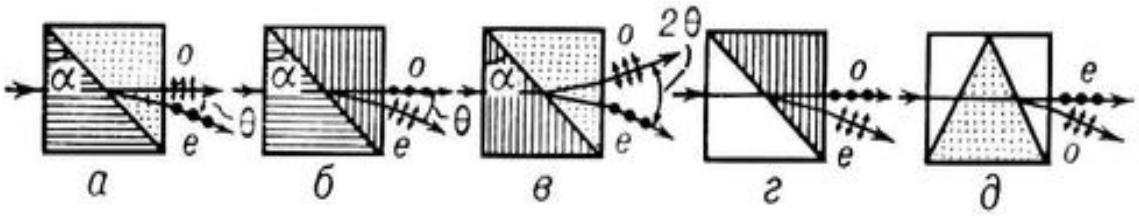


Рис. I.9. Призмы Рошона «а»; Сенармона «б»; Волластона «в»; призма из исландского шпата и стекла «г»; Аббе «д».

Один из двух пропускаемых лучей в призмах Рошона и Сенармона не меняет своего направления, другой (необыкновенный) отклоняется на угол θ (его величина ~ 5° – 6°), зависящий от длины волны света: $\theta = (n_0 — n_e)\ \mathrm{tg}\alpha$, где α – преломляющий угол близкий к 30° для исландского шпата и к 60° для кристаллического кварца.

Трёхгранные призмы Волластона имеют удвоенный угол расхождения лучей 2θ (около 10°), причём при перпендикулярном падении отклонения лучей симметричны.

Для этих поляризаторов, как правило, характерна незначительная апертура полной поляризации, высокая стоимость и относительно большие размеры. Они требуют аккуратного обращения, практически лишены хроматической аберрации, незаменимы при работе в УФ области спектра и в мощных потоках оптического излучения, позволяя получать однородно поляризованные пучки, степень поляризации которых лишь на $\sim 10^{-5}$ отличается от 1.

Кроме кристаллических поляризаторов в последнее время часто применяются тонкие пластинки различных оптически активных веществ (турмалина, геропатита и др.).

Толщина пластинок колеблется от 1*мм* до 0,1*мм*. Наиболее часто используют тонкие пленки на основе поливинилового спирта, полученные путем растяжения их в одном направлении и обработки йодом. Степень поляризации таких пленок зависит от длины волны света. Такие пленки принято называть поляроидами.

Вращение плоскости поляризации света, поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света при его прохождении через вещество наблюдается так же в средах, обладающих двойным круговым лучепреломлением, т. е. различными показателями преломления для право- и лево- поляризованных по кругу лучей.

Линейно поляризованный пучок света можно представить как результат сложения двух лучей, распространяющихся в одном направлении и поляризованных по кругу с противоположными направлениями вращения. Если такие два луча распространяются в теле с различными скоростями, то это приводит к повороту плоскости поляризации суммарного луча. Это может быть обусловлено либо особенностями структуры вещества, либо внешним магнитным полем (эффект Фарадея). Вращение наблюдается, как правило, и в оптически изотропных телах (кубические кристаллы, жидкости, растворы и газы).

Среды, обладающие оптической анизотропией, по-разному поглощают лучи различных поляризаций. В частности, в областях собственных и примесных полос поглощения света двулучепреломляющие среды неодинаково поглощают обыкновенный и необыкновенный лучи, что и составляет их линейный дихроизм. Если толщина пластинки, вырезанной из анизотропного кристалла (с полосами поглощения в нужной области спектра) параллельно его оптической оси, достаточна, чтобы один из лучей поглотился практически нацело, то прошедший через пластинку свет будет полностью поляризован. Такие поляризаторы называют дихроичными. К дихроичным относятся и поляроиды, поглощающее вещество которых может быть как кристаллическим, так и нет.

Рассмотрим процесс преломления света в анизотропных кристаллах.

Свет, падающий на кристалл, преломляясь, создает не один преломлённый луч, как в изотропных средах, а два, идущие в различных направлениях (рис.1.9). В этом и состоит явление, именуемое двойным лучепреломлением. Если через такой кристалл посмотреть на окружающие предметы, то каждый предмет будет раздваиваться.

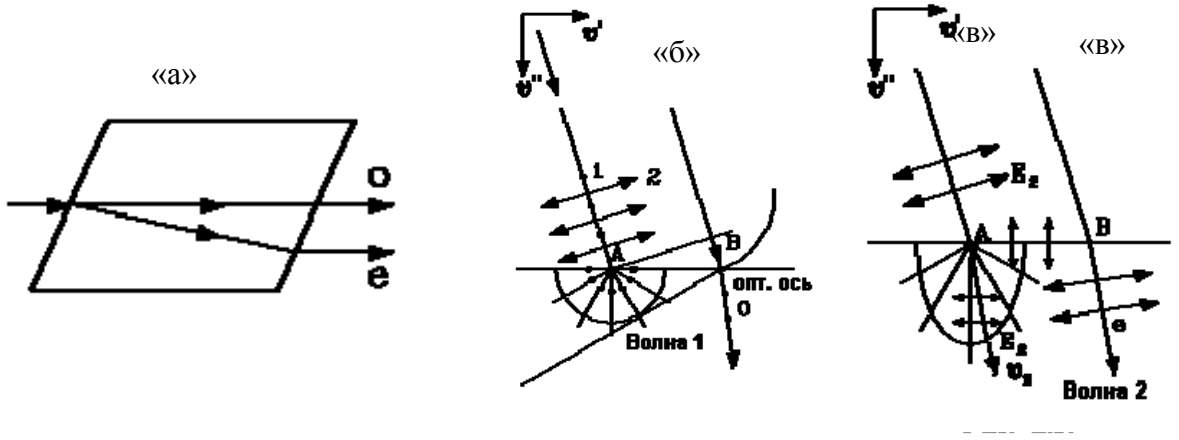


Рис. I.9. Двулучепреломление.

Особенность двойного лучепреломления состоит в том, что один из преломленных лучей подчиняется закону преломления (его показатель преломления как обычно не зависит от угла падения). Другой луч этому закону не подчиняется. Оба преломленных луча плоскополяризованы, и их плоскости колебаний взаимно перпендикулярны.

Ради определенности (и простоты) рассмотрим случай, когда оптическая ось лежит в плоскостях падения и отражения светового луча.

Пусть падающий луч естественный, неполяризованный. Тогда его всегда можно мысленно разложить на два луча, идущих в одном направлении. Пусть плоскость колебаний у одного луча совпадает с плоскостью падения, а у другого - перпендикулярна плоскости падения. Проследим за поведением каждого луча в отдельности (рис. I.9.«б, в»). Точками изображены сагиттальные векторы $E^{(s)}$, перпендикулярные к плоскости падения.

Из-за анизотропии кристалла свет, распространяющийся в нем, имеет две фазовые скорости. Если колебания в световой волне происходят параллельно оптической оси, то свет распространяется с одной скоростью $v^{\cdot}$. Если же колебания осуществляются в другой плоскости, перпендикулярной оптической оси, то свет распространяется с другой - $v^{\cdot}$. Проследим за волной, у которой колебания вектора $E^{(s)}$ происходят перпендикулярно к плоскости падения (рис. I.9.«б»). Применим к ней принцип Гюйгенса. От точки А в кристалле "бежит" цилиндрическая волна. Во всех направлениях эта волна "бежит" со скоростью $v^{\cdot}$(вектор E_1 перпендикулярен оси), т.е. она цилиндрическая. Объяснение ее преломления ничем не будет отличаться от объяснения в изотропном случае. Для нее выполняется закон преломления. Эта волна называется обыкновенной (и её луч - то же).

Проследим теперь за поведением волны, колебания которой лежат в плоскости падения (Рис.I.9.«в»). Для получения единой картины рис. «б» и «в» следует совместить. Во все стороны от точки А тоже "бегут" лучи, но у лучей, которые распространяются вдоль отражающей поверхности (вдоль оптической оси), колебания вектора E_1 перпендикулярны к оси. У лучей, распространяющихся перпендикулярно к отражающей плоскости (перпендикулярно оптической оси), колебания вектора E_2 параллельны оси.

Следовательно, от точки А волна "бежит" в разных направлениях с разными фазовыми скоростями. Ее волновая поверхность будет эллипсоидальной, а не цилиндрической, как в первом случае. Построение преломленного луча теперь будет иным, и направление его не совпадет с первым лучом. Такой луч становится не ординарным - необыкновенным (и соответствующая ему волна – то же).

Луч необыкновенен только в том отношении, что не подчиняется закону Снеллиуса.

Явление двулучепреломления позволяет построить совершенные поляризаторы. Один из вариантов такого поляризатора (николь) состоит из двух прямоугольных призм из исландского шпата. Углы призм равны 68^0 и 22^0. Призмы склеены слоем канадского бальзама, как показано на рис. 1.3.

Оптическая ось лежит в плоскости чертежа под углом 48^0 к грани призмы. Падающий луч разбивается на обыкновенный (о) и необыкновенный (е). Первый сильнее преломляется, чем второй, и на границе исландский шпат - канадский бальзам испытывает полное внутреннее отражение, т.е. целиком отклоняется в сторону. Только необыкновенный луч проходит призму. На выходе получаем луч поляризованный линейно (вторая призма в николе имеет вспомогательное значение: она лишь спрямляет образованный плоскополяризованный луч).

Круговую поляризацию формируют четвертьволновые кристаллические пластины.

Пластинки из оптически анизотропных материалов, вносящие сдвиг фазы между двумя взаимно перпендикулярными компонентами электрического вектора $E=(E^{(p)}, E^{(s)})$ проходящего через них излучения (соответствующими двум линейным поляризациям), называют фазовыми, или волновыми пластинками, которые предназначены для изменения состояния поляризации излучения. Так, циркулярные или эллиптические поляризаторы обычно представляют собой совокупность линейного и фазового. Для получения света, поляризованного по кругу (циркулярно), применяют пластины, вносящую сдвиг фазы в 90° (пластинка четверть длины волны). Двулучепреломляющие фазовые пластины изготовляют как из материалов с естественной оптической анизотропией (например, кристаллов), так и из веществ, анизотропия которых индуцируется приложенным извне воздействием – электрическим полем, механическим напряжением и пр. Применяются также отражательные фазовые пластины (например, ромб Френеля, см. рис.I.10); принцип действия которых основан на изменении состояния поляризации света при его полном внутреннем отражении. Преимуществом отражательных перед двупреломляющими фазовыми пластинами является почти полное отсутствие зависимости фазового сдвига от длины волны.

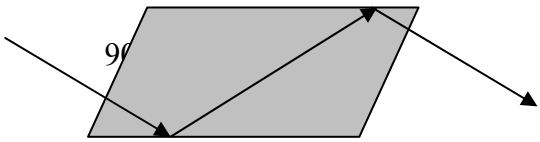


Рис. I.10. Ромб Френеля.

Ромб Френеля вырезан из оптического стекла. При близком к нормальному падении луча света, поляризованного линейно под углом 45° к плоскости падения, линейные составляющие луча, поляризованные параллельно и перпендикулярно этой плоскости, при каждом из двух полных внутренних отражений приобретают разность фаз в 1/8 периода световой волны. Итоговая разность фаз в 1/4 периода (90°) даёт луч, поляризованный по кругу (циркулярно).

На рис. I.11 представлен прибор - полярископ Савара, который состоит из двух склеенных пластинок кристаллического кварца одинаковой толщины d, вырезанных так, что их оптические оси составляют с осью полярископа углы в 45°, и жестко связанного с пластинкой Савара анализатора, плоскость поляризации которого направлена под 45° к главным сечениям этой пластинки. На рис. I.11 изображена только пластинка Савара. При падении частично поляризованного света в поле зрения наблюдаются интерференционные полосы. В случае полностью неполяризованного света полосы отсутствуют при любой ориентации полярископа.

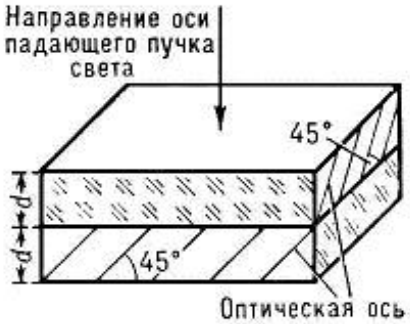


Рис. I.11. Полярископ Саварра.

Все поляризаторы (линейные, циркулярные, эллиптические) могут использоваться не только для получения света требуемой поляризации, но и для анализа этого состояния поляризации света, т. е. как анализаторы. Анализ эллиптически поляризованного света производят с помощью компенсаторов разности хода, простейшим из которых являются четвертьволновые фазовые пластины. Часто возникающую проблему деполяризации частично поляризованного излучения обычно решают не истинной деполяризацией (это исключительно сложная задача), а сводят её к созданию тонкой пространственной, спектральной или временной поляризационной структуры светового пучка.

Оптический компенсатор – это устройство, с помощью которого двум лучам света сообщается определённая разность хода, либо уже имеющаяся разность хода сводится к нулю или некоторому постоянному значению.

Обычные компенсаторы-полярископы снабжаются отсчётными приспособлениями, превращающими их в измерители разности хода. Общий принцип их конструкций состоит в возможности введения малых разностей хода посредством сравнительно грубых перемещений. Это достигается двумя способами.

Интерферометрические компенсаторы применяются в двулучевых приборах для уравнивания разностей хода интерферирующих лучей. Примером такого типа является плоскопараллельная пластинка, в которой оптическая длина пути луча зависит от угла его падения на пластинку. Обычно на пути каждого из двух интерферирующих лучей помещают по пластинке одинаковой толщины; если они строго параллельны друг другу, то вносимая ими дополнительная разность хода равна нулю. Одна из пластинок снабжается приспособлением, позволяющим поворачивать ее на небольшой угол

относительно другой; сообщаемая при этом разность хода может быть измерена по углу поворота. Имеется ряд более сложных конструкций – с передвижным клином и т.п.

Компенсаторы применяются для анализа эллиптически поляризованного света, т. е. для определения ориентации осей эллипса поляризации и отношения их численных величин. В таких компенсаторах используется свойство двояко лучепреломляющих кристаллов разделять падающий на них луч света на два луча, поляризованные во взаимно перпендикулярных направлениях. Скорости этих лучей в кристалле (а следовательно, и оптические длины их путей) различны; поэтому, проходя через кристалл, они приобретают разность хода, определяемую его толщиной. Простейший из компенсаторов такого типа называют пластинкой четверть длины волны (по вносимой ею разности хода). Они изменяют характер поляризации пропускаемого через них света, превращая эллиптически поляризованный свет в поляризованный линейно или по кругу. Точность измерения разности хода с их помощью достигает $10^{-5}\ 2\pi$.

На многих из перечисленных явлений основаны принципы действия разнообразных поляризационных приборов, с помощью которых не только анализируют состояние поляризации света, испускаемого внешними источниками, но и получают требуемую поляризацию света и преобразуют одни её виды в другие.

Особенности взаимодействия поляризованного света с веществом обусловили его исключительно широкое применение в научных исследованиях кристаллохимической и магнитной структуры твёрдых тел, строения биологических объектов (например, в поляризационной микроскопии), состояний элементарных излучателей и их отдельных центров, ответственных за квантовые переходы, для получения информации о сильно удалённых (в частности, астрофизических) объектах. В целом поляризация света, как существенно анизотропное свойство излучения, позволяет изучать все виды анизотропии вещества – поведение газообразных, жидких и твёрдых тел в полях анизотропных возмущений (механических, звуковых, электрических, магнитных, световых), в кристаллооптике – структуру кристаллов (в подавляющем большинстве – оптически анизотропных), в технике (машиностроении) – упругие напряжения в конструкциях (поляризационно-оптический метод исследования напряжений) и т. д.

Нижеследующие рисунки (Рис. I.12, I.13) демонстрируют эффект использования поляризационных фильтров для фотографирования в атмосферном или космическом смоге природных объектов.

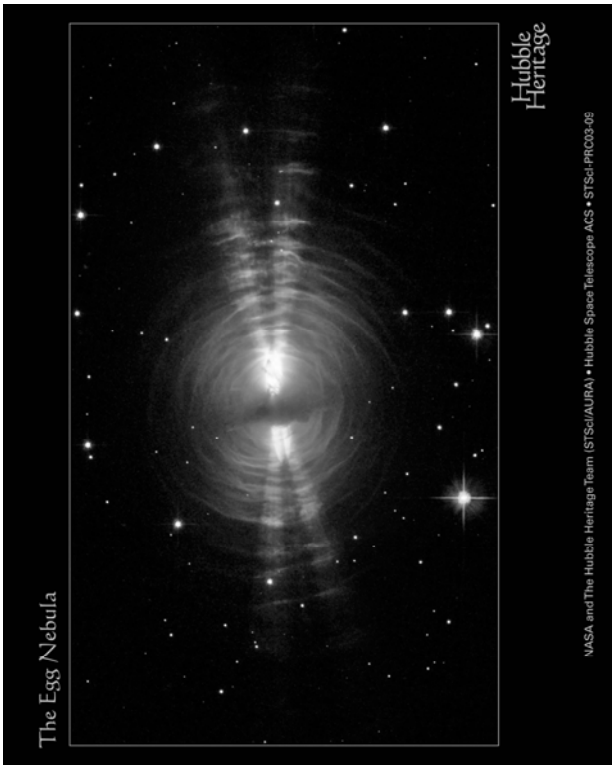


Рис. I.12. Галактика через поляризатор.

Рис. I.13. Поляризатор сквозь смог.

В используемых для этих целей фазоконтрастных микроскопах, позволяющих увидеть в, казалось бы, совершенно прозрачных системах с близкими показателями преломления оптически активные компоненты, в качестве двух поляризаторов используются призмы Аренса. Анализирующая призма предназначена для анализа интерференционной картины, т.е. для приведения плоскостей колебания электрических векторов в одну плоскость.

Призма (рис. I.14) пропускает свет с колебаниями электрического вектора только в плоскости главного сечения и поэтому, если на призму падает поляризованный свет, и плоскость поляризации не совпадает с главным сечением, то из нее выходит свет, поляризованный в ее главном сечении.

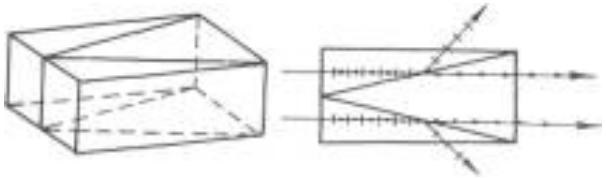


Рис. I.14. призма Аренса.

Если призма стоит на пути двух лучей, поляризованных в различных направлениях (в частности под углом 90°), то обе плоскости колебаний приводятся к ее главному сечению, где колеблется электрический вектор уже новой волны.

Рассмотрим поведение анизотропной пластины в поляризованном свете, например, компенсатора в эллипсометрах или собственно анизотропных ОИ.

На рис. I.15 пластинка анизотропного кристалла (*A*) помещена между поляризатором N_1 и анализатором N_2.

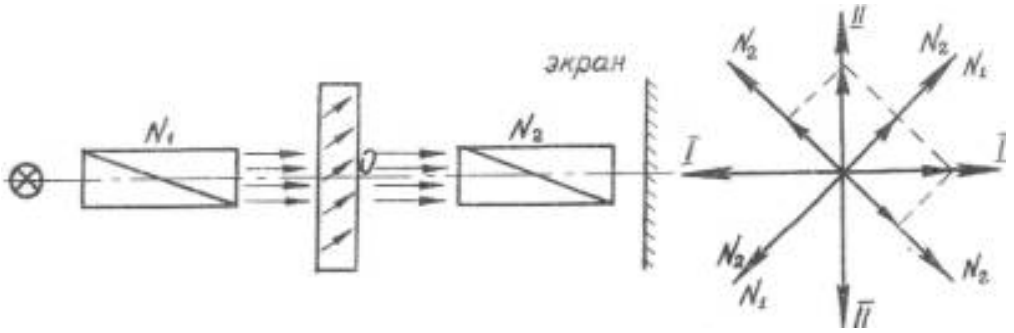


Рис. I.15. Анизотропный ОИ в скрещенных поляризаторах.

Ось кристалла *A* ориентирована произвольно и на него падает параллельный пучок лучей.

Из поляризатора N_1 выходит плоско поляризованный свет, который попадает на пластинку *A* и в результате двойного лучепреломления разлагается на две когерентные волны. Эти волны проходят пластинку с разной скоростью и в зависимости от толщины пластинки приобретают некоторую разность хода и разность фаз. Анализатор N_2 сводит эти волны в одну плоскость и на выходе из него получается интерференционная картина с ярко выраженной цветовой окраской, если на поляризатор падал белый свет. При вращении N_2 относительно N_1 меняется цветовая картина, т.к. происходит изменение величин проекций электрических векторов двух волн на главное сечение анализатора и изменение разности фаз.

Если через «1» и «2» обозначить направления, по которым совершаются колебания двух лучей в кристаллической пластине *A*, то из рис. I.15 можно понять значение вращения анализатора N_2 или поляризатора N_1.

Если оси N_1 и N_2 параллельны, то из N_2 оба луча выходят с той разностью фаз, какую они приобрели в пластине *A*. Если оси N_1 и N_2 перпендикулярны, то при проецировании «1» и «2» на главную плоскость N_2 лучам сообщается разность фаз, равная π, т.е. на месте максимума на интерференционной картине образуются минимумы. Если между скрещенными поляроидами N_1 и N_2 поместить вещество даже со слабыми признаками анизотропии, то поле отчасти просветляется при освещении монохроматическим светом (или приобретает цветовую окраску при белом свете). Таким методом можно обнаружить наведённую анизотропию в стекле и других материалах, которые в обычных условиях изотропны, а при деформациях или неравномерном нагреве приобретают анизотропию. Если в рассмотренном нами случае ось кристалла *A* параллельна, а ось шлифа перпендикулярна оптической оси системы, то интерференционная картина не будет наблюдаться, т.к. в параллельном пучке лучей любой луч идёт параллельно оптической оси и не будет испытывать

двойного лучепреломления. Иначе обстоят дела, когда на кристалл *A* падает сильно сходящийся пучок лучей (рис. I.16).

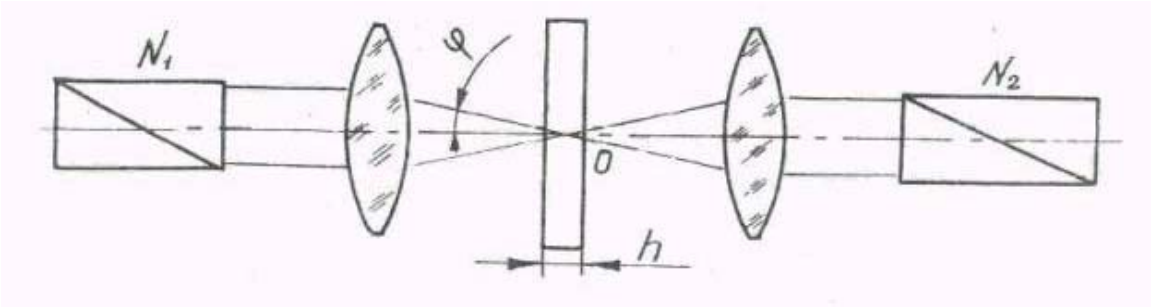


Рис. I.16. Анизотропные ОИ в сходящихся лучах.

В этом случае разность фаз между двумя лучами, приобретаемая при прохождении через пластинку, описывается выражением: $\delta=2\pi h/(\lambda\cos\varphi)\times(n_o-n_\varphi)$, где h – толщина пластинки А, φ – угол скоса лучей на А, λ – длина волны и n_o, n_φ - показатели преломления обоих лучей по данному направлению.

Разность фаз δ постоянна для определенного значения φ, т.к. (n_o-n_φ) является функцией φ, и при выходе из кристалла положение лучей будет соответствовать окружностям, соответствующим заданному углу. В зависимости от разности фаз эти окружности будут темными (в монохроматическом свете) или окрашены (в белом свете). Кроме того, картина концентрических окружностей оказывается разрезанной в двух взаимно - перпендикулярных направлениях. Одно из направлений совпадает с осью поляризатора N_1. Если оси N_1 и N_2 ортогонально скрещены, то крест будет темным, а если параллельны - светлым.

Если (рис. I.17) главные сечения N_1 и N_2 будут взаимно перпендикулярны, то плоско поляризованный свет, выйдя из поляризатора N_1 и пройдя пластину *A,* будет по разному ориентировать в пространстве плоскости поляризации для обыкновенного и необыкновенного лучей в зависимости от положения его на поверхности конуса.

Если I и II плоскости поляризации необыкновенного и обыкновенного лучей, то через анализатор N_2 проходит лишь составляющая электрического вектора, спроецированного из плоскости I для необыкновенного луча на плоскость главного сечения N_2. В зоне *A* эта составляющая отлична от нуля, а в зоне *B* - равна нулю. Поэтому зона *B* представляет собой темную область, постепенно переходящую в светлую, образуя концентрические окружности.

Плоскость поляризации необыкновенного луча I в зоне *C* совпадет с главным сечением и электрический вектор необыкновенного луча, пройдя кристалл, не изменяет ни плоскости колебания, ни своей величины. На плоскости главного сечения его проекция равна нулю и область будет темной.

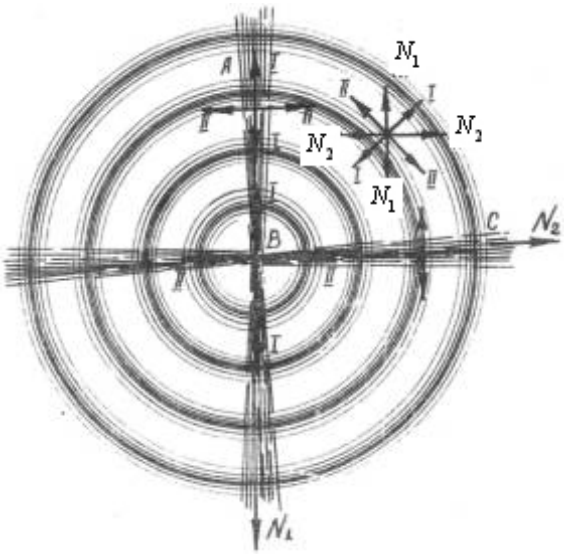


Рис. I.17. Коноскопическая картина.

В зоне *B* плоскость поляризации необыкновенного луча I совпадает с главным сечением N_2 и этот луч должен пройти, не изменяя своей величины и ориентации, но плоскость поляризации его электрического вектора перпендикулярна главному сечению поляризатора N_1, и поэтому его величина равна нулю. Таким образом, в направлениях главных сечений скрещенных поляризатора N_1 и анализатора N_2 наблюдаются темные области в виде креста, который называется изогирой. При параллельных N_1 и N_2 этот крест будет светлым.

При использовании белого света картина будет светлая и при повороте анализатора N_2 относительно поляризатора N_1, окраска колец будет изменяться на дополнительную. Расстояние между светлыми и темными кольцами для красного цвета больше, чем для синего, что связано с длиной волны света. Чем толще пластинка *A*, тем больше величина двойного лучепреломления кристалла и тем ближе друг к другу будут лежать изохроматические линии.

При наблюдении кристаллов исландского шпата в белом свете видны только темные кольца без цветового разложения. Это объясняется большим двойным лучепреломлением данного кристалла и поэтому очень малым расстоянием между цветовыми кольцами, которые глаз не в состоянии различить. Для разрешения цветовых колец необходимо значительно уменьшить толщину пластинки.

Взаимодействие поляризованного света с веществом может приводить к оптической ориентации или выстраиванию атомов, генерации мощного поляризованного излучения в лазерах и других явлений.

Напротив, исследование деполяризации света при фотолюминесценции даёт сведения о взаимодействии поглощающих и излучающих центров в частицах вещества, при рассеянии света – ценные данные о структуре и свойствах рассеивающих молекул или иных частиц, в других случаях – о протекании фазовых переходов и т. д.

Поляризация света широко применяется в технике, например, при необходимости плавной регулировки интенсивности светового пучка (по закону Малюса в той же эллипсометрии), для усиления контраста и устранения световых бликов в фотографии, при создании светофильтров, модуляторов излучения, служащих одними из основных элементов систем оптической локации и оптической связи, для изучения протекания химических реакций, изучения строения молекул, определения концентраций сложных растворов (поляриметрия, сахарометрия) и многое другое.

Поляризация света играет заметную роль в живой природе. Многие живые существа более чувствительны к свету в поляризованном состоянии, а некоторые насекомые (пчёлы, муравьи) ориентируются в пространстве по поляризованному (в результате рассеяния в атмосфере) свечению голубого неба. При определённых условиях к поляризации света становится чувствительным и человеческий глаз (явление Хайдингера).

Всё рассмотренное многообразие качественных проявлений физических свойств поляризованного состояния плоских световых волн имеет столь же простое теоретическое объяснение.

§ 1.2. Планарные матмодели ОИ в традиционной эллипсометрии

Рассмотрим две обобщённые модели отражающих оптических систем с границами Френеля, являющимися основополагающими в традиционной прикладной эллипсометрии.

Первая из них – эллипсометрически измеримая модель идеальной в геометрическом смысле границы Френеля.

Вторая – модель однородного слоя с плоскопараллельными идеальными границами, описываемыми классическими коэффициентами Френеля в обобщённом комплексном виде.

§ 1.2.1. Свойства решений ОУЭ для простой оптической модели ОИ

Граница Френеля, разделяющая две среды, определяет и простейшую оптическую модель отражающей системы. Однако, как было рассмотрено в первой части этой монографии, и в простом достаточно сложных проблем.

Физическим аналогом такой границы являются первые мономолекулярные слои на стыке двух сред, свойства объёма которых не скрыты переходными приповерхностными структурами типа трещин от распиловки или свилей на сколах идеальных граней кристаллов, диффузных структур, или термо-капиллярных флуктуаций на границах несмешивающихся жидкостей и т. д.

Эта модель служит для оценки пары оптических констант подложек (n – показателя преломления и k – показателя экстинкции, светоослабления), являющихся обычно зеркальным основанием для нанесения тонкослойных (нанотехнологических) покрытий. Зеркальная гладкость поверхностей достигается механической обработкой методами высокого класса шлифовки и полировки (так называемой глубокой – ГШП и сверхглубокой СГШП), в

частности – ионной и комбинированной физико-химической. Аналитическими оценками этих констант в первом приближении могут служить решения ОУЭ в модели идеальной границы Френеля для системы ОИ в воздушной среде. Основная неприятность методов эллипсометрии состоит в том, что в решениях многих её обратных задач эти константы оказываются зависящими от углов падения лучей света на исследуемые объекты [15].

Классические комплексные коэффициенты Френеля R для «p» и «s» компонент в этой модели при использовании обозначения $m_j = n_j - ik_j$ для j, j +1 границ имеют вид:

$$R_p = R^p_{j-1,j} = \frac{m_j \cos(\varphi_{j-1}) - m_{j-1}\cos(\varphi_j)}{m_j \cos(\varphi_{j-1}) + m_{j-1}\cos(\varphi_j)} = -\frac{\sin(\varphi_{j-1} - \varphi_j)}{\sin(\varphi_{j-1} + \varphi_j)}$$

$$R_s = R^s_{j-1,j} = \frac{m_{j-1}Cos(\varphi_{j-1}) - m_j Cos(\varphi_j)}{m_{j-1}Cos(\varphi_{j-1}) + m_j Cos(\varphi_j)} = \frac{tg(\varphi_{j-1} - \varphi_j)}{tg(\varphi_{j-1} + \varphi_j)} \qquad (9)$$

Общепринятое в эллипсометрии отношение компонент (9) приводит к ОУЭ (1) для этой модели идеальной границы вида

$$R = tg(\Psi)\exp\{i\Delta\} = R_p / R_s = -\frac{\cos(\varphi_j + \varphi_{j-1})}{\cos(\varphi j - \varphi_{j-1})}, \qquad (10)$$

где $\cos(\theta) = \sqrt{1 - \sin^2(\theta)}$ находится через синус соответствующего угла θ, определяемого по ковариантному закону Снеллиуса (7) $\sin(\theta_{прел}) = \sin(\theta_{пад}) = \frac{m_{пад}}{m_{прел}}$. При введении относительного показателя преломления $N = \frac{m_{ïðåë}}{m_{ïàä}}$, можно записать $\sin(\theta_{прел}) = N^{-1}\sin(\theta_{пад})$ и $\cos(\theta_{прел}) = = N^{-1}\sqrt{N^2 - \sin^2(\theta_{ïàä})}$. Тогда уравнение (10) может быть записано в двойственном представлении:

$$R = \frac{1-P}{1+P} = \frac{Q-1}{Q+1} = \grave{A} + i\hat{A}, \qquad (10.а)$$

где комплексные функции от углов падения (φ) PQ = 1 имеют вид:

$$\begin{cases} P = Ctg(\varphi)\sqrt{N^2 Co\sec^2(\varphi) - 1} \Rightarrow \lim P(\varphi) = \begin{cases} 0, & åñëè\ \varphi \to 90^0 \\ \infty, & åñëè\ \varphi \to 0^0 \end{cases} \\ Q = \dfrac{Sin^2(\varphi)}{Cos(\varphi)\sqrt{N^2 - Sin^2(\varphi)}} \Rightarrow \lim Q(\varphi) = \begin{cases} 0, & åñëè\ \varphi \to 0^0 \\ \infty, & åñëè\ \varphi \to 90^0 \end{cases} \end{cases} \qquad (10.в)$$

Из ассимптотик P и Q в (10.в) следует асимптотическое поведение R (10):

$$R \Rightarrow \begin{cases} -1 & ïðè \quad \varphi \to 0^0 \\ +1 & ïðè \quad \varphi \to 90^0 \end{cases}$$

Поскольку эллипсометрические измерения обычно проводят при углах φ> 45^0, то для определенности можно выбрать функцию P(φ) = Ctg(φ) $\sqrt{Ó(\varphi)}$.

Квадрат комплексного показателя преломления среды m на воздухе (или вакууме, а в общем случае относительного ($N=m_{внутр.}/m_{внешн}$) $m^2 = n^2 - k^2 - i\,2nk$ позволяет записать P (φ) в виде двойственного по значению комплексного радикала:

$$\mathrm{P} = Ctg(\varphi)\sqrt{|\,Y\,|\exp\{i\arg(Y)\}}\,, \qquad (10.c)$$

где Y = a + ib = (|Y|, arg(Y)) – является ядром функции P, представимое либо алгебраической парой компонент (a, в), либо аналогичной парой модуля и аргумента тригонометрической (или экспоненциальной) форм.

Величину У в (10.c) можно описать явными выражениями вида:

$$Y = m^2 Co\sec^2(\varphi) - 1 = [(n^2 - k^2)Co\sec^2 - 1] - i[2nkCo\sec^2(\varphi)],$$

$$ãäå \qquad \begin{cases} a = (n^2 - k^2)Co\sec^2(\varphi) - 1, \\ b = -2nkCo\sec^2(\varphi), \end{cases} \qquad \alpha = arctg\left(\frac{b}{a}\right).$$

$$\begin{cases} |\,Y\,| = \sqrt{[(n^2 - k^2)Co\sec^2(\varphi) - 1]^2 + 4n^2k^2Co\sec^2(\varphi)}, \\ \arg(Y) = \begin{cases} \alpha, & \leftrightarrow \quad a, b > 0 \\ \pi + a, & \leftrightarrow \quad a < 0 \\ 2\pi + a, & \leftrightarrow \quad a > 0, b < 0 \end{cases} \end{cases}$$

Решения так называемой прямой задачи (10) в эллипсометрии состоят в определении амплитудно-фазовых Ψ-Δ функций от углов падения света (φ).

ОУЭ (10) при $\varphi_{пад} = \varphi_{прел}$ имеет очевидное аналитическое (вещественное) решение (N→1) следующего вида

$$\mathrm{R}(\varphi) = -\,\mathrm{Cos}(2\varphi). \qquad (11)$$

График этой функции R(φ) качественно представлен на следующих рисунках 1.18:

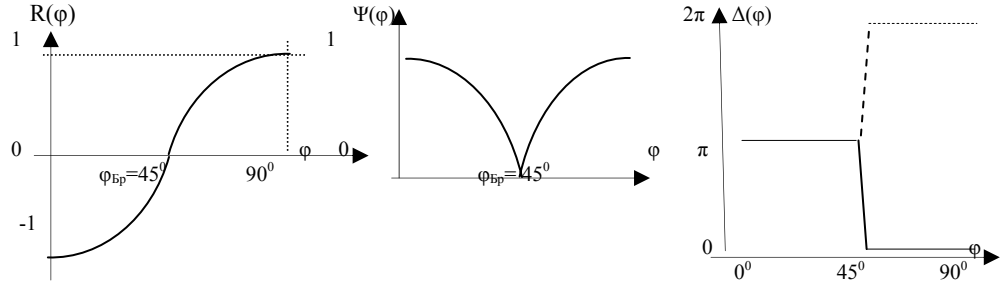


Рис. 1.18. Представление вещественной функции в комплексном виде.

Таким образом, аналитическая интерпретация скачков фазы от π до 0 или от π до 2π состоит в том, что он отражает знаковый характер вещественных решений ОУЭ (10) при переходе через ноль – точку корня.

В общем случае решения (10, 10.а) описываются выражениями вида:

$$\Psi = arctg\sqrt{\grave{A}^2 + \hat{A}^2} \qquad (11.а)$$

$$\Delta = \begin{cases} arctg\left(\dfrac{\hat{A}}{\grave{A}}\right) & если \quad \grave{A}, \hat{A} > 0 \\ arctg\left(\dfrac{\hat{A}}{\grave{A}}\right) + \pi & если \quad \grave{A} < 0 \\ arctg\left(\grave{A}\right) + 2\pi & если \quad \grave{A} > 0, \hat{A} < 0. \end{cases} \qquad (11.в)$$

Аналитические решения соответствующей обратной задачи для модели ОУЭ (10) сводятся к определению оптических констант подложки или комплексного в общем случае относительного показателя преломления сред и будут рассмотрены в разделе свойств решений ОУЭ (1).

Вещественные функции косинусов в соотношении (10) содержит ещё одно физическое следствие – предпосылку к закону Брюстера: при сумме углов падения и преломления точно равных 90^0, амплитудная функция имеет корень (обращается в ноль из-за отсутствия планарной составляющей в поле падающей световой волны), откуда следует, что $\sin(\theta_{прел})=\sin(90^0 - \theta_{пад}) = \cos(\theta_{пад})$. В этом случае закон Снеллиуса (7) переходит в закон Брюстера: $tg(\theta_{пад}) = \dfrac{m_{ïðåë}}{m_{ïàä}}$.

Рассмотрим наиболее существенные свойства решений обратной задачи эллипсометрии (10) для комплексного m = n - i k в комплексном виде:

$$\left(\frac{n-ik}{1}\right)^2 = Sin^2(\varphi)\left[tg(\varphi)\left(\frac{1-tg(\Psi)e^{i\Delta}}{1+tg(\Psi)e^{i\Delta}}\right)^2+1\right] \Rightarrow n^2-k^2-i2nk = q-ir, \quad (12)$$

или в расщеплённом виде вещественных уравнений системы Кеттелера:

$$\begin{cases} n^2-k^2=q \\ 2nk=r, \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} n^2=k^2+q \\ (k^2+q)k^2=\left(\frac{r}{2}\right)^2 \end{cases} \quad (12.1)$$

с единственными положительно определёнными аналитическими решениями (n^2, $k^2 > 0$):

$$\begin{cases} k^2=-\frac{q}{2}+\sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2+\left(\frac{r}{2}\right)^2} \\ n^2=\frac{q}{2}+\sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2+\left(\frac{r}{2}\right)^2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k=\sqrt{-\frac{q}{2}+\sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2+\left(\frac{r}{2}\right)^2}} \\ n=\sqrt{\frac{q}{2}+\sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2+\left(\frac{r}{2}\right)^2}} \end{cases} \quad (12.2)$$

$$q = Sin^2(\varphi)\left\{1+\frac{tg^2(\varphi)\left[Cos^2(2\psi)-Sin^2(2\psi)Sin^2(\Delta)\right]}{\left(1+Sin(2\psi)Cos(\Delta)\right)^2}\right\}$$

$$r = Sin^2(\varphi)\left\{\frac{tg^2(\varphi)Sin(4\psi)Sin(\Delta)}{\left(1+Sin(2\psi)Cos(\Delta)\right)^2}\right\}.$$

При замене переменных $x = n^2$ и $y = k^2$ система (12.1) принимает вид:

$$\begin{cases} x-y=q \\ (y+q)y=c, \end{cases}$$

где, при введении обозначений $c = r^2/4$ и $\tau = r/q$, решения (12.2) принимают вид:

$$\begin{cases} k=\sqrt{y}=\sqrt{\frac{|q|}{2}}\sqrt{\sqrt{1+\tau^2}-Sign(q)} \\ n=\sqrt{x}=\sqrt{\frac{|q|}{2}}\sqrt{\sqrt{1+\tau^2}+Sign(q)}. \end{cases}$$

Эти формулы при $q \to 0$, т.е. при $n = k$, обладают неопределённостью типа $0\cdot\infty$ и не могут быть использованы без особого внимания при программировании.

Наиболее важным оказывается разложение решений по малому параметру ($\tau \to 0$) возможное при условии $n = tg(\varphi)$ в пренебрежении $tg(\psi) \to 0$ в области минимума амплитудной функции $\Psi(\varphi_{мин})$ при углах псевдо Брюстера $\varphi_{мин}$.

В этом случае допустима аналитическая оценка экстинкции в виде:

$$k=\frac{r}{2n}=\frac{4n^3}{n^2+1}\left\{\frac{\psi\delta}{1+\vartheta}\right\}, \quad (12.3)$$

где при $\varphi < \varphi_{кб}$ $\begin{cases} \delta = |\pi - \Delta| \\ \vartheta = -4\psi \end{cases}$; и $\varphi = \varphi_{кб}$ $\begin{cases} \delta = 1 \\ \vartheta = 0 \end{cases}$, а при $\varphi > \varphi_{кб}$

$$\begin{cases} \delta = \left[\begin{array}{c} |2\pi - \Delta| \to 0 \\ \Delta \to 0 \end{array} \right. \\ \vartheta = 4\psi \end{cases}.$$

Таким образом, из (12.3) следует, что угловое поведение экстинкции k(φ) сложное: экстинкция квадратично мала при малом значении произведения Ψδ, обладает свойством роста в области до углов псевдо Брюстера из-за знака θ вплоть до сильного роста при $\Psi \to 15^0$ и дробно-линейным ростом от Ψ после углов Брюстера в случае слабого уменьшения величины Δ(φ).

Другим важным следствием из формулы (12.3) для прикладной оптики оказывается постоянство (инвариантность) величины отношения $\Psi_{мин} / k$ при фиксированном значении вещественного показателя преломления:

$$\frac{\Psi_{\text{ìèí}}}{k} = \frac{(1+\vartheta)(n^2+1)}{4n^3\delta} \xrightarrow{\text{ïñåâäîí Áðþñòåð}} \frac{n^2+1}{4n^3} = const(n). \qquad (13)$$

Аналитическая оценка инварианта (13) задачи Друде (10) в модели границ Френеля для углов псевдо Брюстера, были названы в первой части монографии эллипсометрическим инвариантом Ψ/k= const(n) Френеля-Брюстера. Формула (13) показывает обратную зависимость величины значения этого инварианта от показателя преломления n, начиная со значения 0.5 при n = 1.

Таким образом, формулы (11), (12) представляют однозначные решения обратной задачи Друде в модели Френеля для ОУЭ (10) строго аналитического вида.

§1.2.2. Свойства решений ОУЭ для слоистой оптической модели ОИ

Вторая, аналитически описываемая модель приповерхностной структуры ОИ, это – модель однородного слоя с определённой толщиной (d_j) и более сложными обобщёнными коэффициентами Френеля (R_p,R_s), выражаемых через коэффициенты Френеля (9):

$$\delta_m = d_m \frac{2\pi}{\lambda} N_m Cos(\varphi_m)$$

$$R_p = \frac{r^p_{m-1,m} + r^p_{m,m+1} \exp\{-2i\delta_m\}}{1 + r^p_{m-1,m} r^p_{m,m+1} \exp\{-2i\delta_m\}} \qquad (14.1)$$

$$R_s = \frac{r^s_{m-1,m} + r^s_{m,m+1} \exp\{-2i\delta_m\}}{1 + r^s_{m-1,m} r^s_{m,m+1} \exp\{-2i\delta_m\}}$$

Отношение R_p/R_s определяет вид ОУЭ (10) для однослойной модели ОИ:

$$tg(\Psi)e^{i\Delta} = \frac{\dfrac{r^p_{j-1,j} + r^p_{j,j+1}e^{-i\delta_j}}{1 + r^p_{j-1,j}r^p_{j,j+1}e^{-i\delta_j}}}{\dfrac{r^s_{j-1,j} + r^s_{j,j+1}e^{-i\delta_j}}{1 + r^s_{j-1,j}r^s_{j,j+1}e^{-i\delta_j}}}. \qquad (14.2)$$

Для более сложных оптических моделей ОИ существуют так же более общие представления комплексных коэффициентов Френеля (14.1) от двух и более слоёв [3]:

$$R_p = \frac{R^p_{m-1,m} + R^p_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\} + R^p_{m-1,m}R^p_{m,m+1}R^p_{m+1,m+2}\exp\{-2i\delta_{m+1}\} + R^p_{m,m+1}\exp\{-(\delta_{m-1}+\delta_m)\}}{1 + R^p_{m-1,m}R^p_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\} + R^p_{m-1,m}R^p_{m,m+1}R^p_{m+1,m+2}\exp\{-2i\delta_{m+1}\} + R^p_{m,m+1}\exp\{-(\delta_{m-1}+\delta_m)\}}$$

$$(14.3)$$

$$R_s = \frac{R^s_{m-1,m} + R^s_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\} + R^s_{m-1,m}R^s_{m,m+1}R^s_{m+1,m+2}\exp\{-2i\delta_{m+1}\} + R^s_{m,m+1}\exp\{-(\delta_{m-1}+\delta_m)\}}{1 + R^s_{m-1,m}R^s_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\} + R^s_{m-1,m}R^s_{m,m+1}R^s_{m+1,m+2}\exp\{-2i\delta_{m+1}\} + R^s_{m,m+1}\exp\{-(\delta_{m-1}+\delta_m)\}}$$

В общем случае большого числа плоско-параллельных слоёв (14.1) часто используют рекуррентные формулы Бернинга [14] для $R^\nu(\lambda,\varphi)$ для последовательной свёртки слоёв снизу от подложки до внешней среды (с номером L+1) для ν = p, s:

$$R_\nu = \frac{\rho^\nu_{j+1,j} + \rho^\nu_{j,j-1}\exp\{-2i\delta_j\}}{1 + \rho^\nu_{j+1,j}\rho^\nu_{j,j-1}\exp\{-2i\delta_j\}}, \qquad (14.4)$$

где $\rho^\nu_{j,j+1} = \dfrac{Z_{j+1}}{M_{j+1}}$

при $\begin{cases} Z_{j+1} = (g^\nu_{j+1} - g^\nu_j)M_j e^{i\delta_j} + (g^\nu_{j+1} + g^\nu_j)Z_j e^{-i\delta_j} \\ M_{j+1} = (g^\nu_{j+1} + g^\nu_j)M_j e^{i\delta_j} + (g^\nu_{j+1} - g^\nu_j)Z_j e^{-i\delta_j} \end{cases}$ è $g^\nu_j = \begin{cases} g^s_j = N_j\cos\varphi_j \\ g^p_j = N_j^{-1}\cos\varphi_j \end{cases}$.

Однако, резонно использовать вместо (14.4) описание обобщённых коэффициентов R^ν многослойных систем с помощью цепных дробей (здесь малые литеры «r» обозначают классические коэффициенты Френеля (9) с соответствующими индексами (ν = p, s):

$R^\nu(\lambda,\varphi) =$

$$= r_{1,2}^{\nu} + \cfrac{1-(r_{1,2}^{\nu})^2}{r_{1,2}^{\nu} + \cfrac{\exp\{\delta_2\}}{r_{2,3}^{\nu} + \cfrac{1-(r_{2,3}^{\nu})^2}{r_{2,3}^{\nu} + \cfrac{\exp\{\delta_3\}}{----}}}}$$

$$.....----... + \cfrac{\exp\{\delta_j\}}{r_{j,j+1}^{\nu} + \cfrac{1-(r_{j,j+1}^{\nu})^2}{r_{j,j+1}^{\nu} + \cfrac{\exp\{\delta_{j+1}\}}{----}}} \qquad (14.5)$$

$$.....------... + \frac{\exp\{\delta_{l-1}\}}{r_{l-1,l}^{\nu}}$$

С помощью этих обобщённых комплексных коэффициентов Френеля (14. 4, 5) для ортогональных компонент (ν) в рекуррентной форме можно весьма эффективно проводить численное моделирование любых неоднородных по глубине $n(d_j)$, $k(d_j)$ систем модельных или реалистичных многослойных приповерхностных структур ОИ.

Градиентное сканирование по поверхности может использовать подобное описание неоднородного распределения оптических констант для сколь угодно сложных реалистических или эмпирически модельных ОИ.

Рассмотрим математические свойства решений однослойных моделей ОИ.

§1.2.3. Связь ОУЭ для идеальных границ с однослойной системой

Из уравнения (14.2) при подстановке (14.1) после вынесения классических коэффициентов Френеля для внешней или внутренней границ следует ОУЭ для однослойной модели вида:

$$tg(\Psi)e^{i\Delta} = \frac{r_{j-1,j}^{p}}{r_{j-1,j}^{s}} \frac{\cfrac{1+\cfrac{r_{j,j+1}^{p}}{r_{j-1,j}^{p}}e^{-i\delta_j}}{1+r_{j-1,j}^{p}r_{j,j+1}^{p}e^{-i\delta_j}}}{\cfrac{1+\cfrac{r_{j,j+1}^{s}}{r_{j-1,j}^{s}}e^{-i\delta_j}}{1+r_{j-1,j}^{s}r_{j,j+1}^{s}e^{-i\delta_j}}} = \frac{r_{j,j+1}^{p}}{r_{j,j+1}^{s}} \frac{\cfrac{\cfrac{1}{r_{j,j+1}^{p}}+e^{-i\delta_j}}{1+r_{j-1,j}^{p}r_{j,j+1}^{p}e^{-i\delta_j}}}{\cfrac{\cfrac{1}{r_{j,j+1}^{s}}+e^{-i\delta_j}}{1+r_{j-1,j}^{s}r_{j,j+1}^{s}e^{-i\delta_j}}}. \qquad (15.1)$$

Возникает естественное желание сравнить степень искажения решений прямой задачи эллипсометрии для этих двух моделей друг с другом.

Это легко сделать аналитически, выделив в (15.1) сомножители либо внешней среды (out), либо подложки (sub):

$$tg(\Psi)e^{i\Delta} = tg(\Psi_{out})e^{i\Delta_{out}} \frac{\dfrac{1+\dfrac{r^p_{j,j+1}}{r^p_{j-1,j}}e^{-i\delta_j}}{1+r^p_{j-1,j}r^p_{j,j+1}e^{-i\delta_j}}}{\dfrac{1+\dfrac{r^s_{j,j+1}}{r^s_{j-1,j}}e^{-i\delta_j}}{1+r^s_{j-1,j}r^s_{j,j+1}e^{-i\delta_j}}} = tg(\Psi_{sub})e^{i\Delta_{sub}} \frac{\dfrac{\dfrac{1}{r^p_{j,j+1}}+e^{-i\delta_j}}{1+r^p_{j-1,j}r^p_{j,j+1}e^{-i\delta_j}}}{\dfrac{\dfrac{1}{r^s_{j,j+1}}+e^{-i\delta_j}}{1+r^s_{j-1,j}r^s_{j,j+1}e^{-i\delta_j}}}. \qquad (15.2)$$

Связь модельных решений прямой задачи (14.2) по формулам (15.2) может быть представлена в виде произведения решений задачи Друде в модели Френеля с некоторыми поправочными комплексными коэффициентами со своим модулем и фазой (Ae^{ib}):

$$tg(\Psi)e^{i\Delta} = tg(\Psi_{out})e^{i\Delta_{out}} A_{out}e^{ib_{out}} = tg(\Psi_{sub})e^{i\Delta_{sub}} A_{sub}e^{ib_{sub}}. \qquad (15.3)$$

Формула (15.3) показывает, что амплитудная функция умножается на коэффициент А, а фаза аддитивно меняется на величину фактора «b».

Следовательно, можно ожидать, что решения однослойной модели могут повторять свойства решений ОУЭ для идеальной внешней или внутренней границ этого слоя.

Однако в общем случае это не совсем так, поскольку в (15.3) комплексный множитель или его аддитивно мультипликативные поправки для искомых $\Psi = \Psi(\varphi; A,в)$ и $\Delta = \Delta(\varphi; A,в)$ функций могут сильно исказить результат, например, решений Брюстера для одной из границ с диэлектрической средой под этой границей без поглощения (с корнем у умножаемой амплитудной функции для выбранной идеальной границы) за счёт развития возможной неопределённости типа $0\cdot\infty$, разрешаемой в пользу минимума, а не нуля искомой результирующей амплитудной функции.

Понятно, что методами численного моделирования эту неопределённость исследовать невозможно, поскольку при корнях амплитудной функции $\Psi_{ид.гр.} = 0$ поправочный множитель А приведёт к срыву работы программы, если не будут предусмотрен контроль его ухода за пределы разрядной сетки представления машинных чисел.

Таким образом, можно ожидать выполнения тенденции возникновения эллипсометрических инвариантов Френеля-Брюстера в решениях ОУЭ и для модели однородного слоя, но с коррекцией на свойства мультипликативно-аддитивных поправок к этим решениям. В общем случае инварианты в модели идеальной границы должны трансформироваться в некие новые для модели однородного слоя с чётко определёнными областями своего постоянства.

§1.3. Развитие нетрадиционных методов прикладной эллипсометрии

Рассмотрим физический смысл вывода эллипсометрических инвариантов Френеля-Брюстера для ОИ с идеальными границами раздела сред.

Согласно рассмотренным выше аналитическим представлениям формулы (13), понятно, что минимум амплитудной функции $\Psi(\varphi_{Бр})$ должен монотонно расти с ростом показателя поглощения (экстинкции) k, а фазовая функция Δ – монотонно убывать от 180^0, меняя характер кривизны при этих углах псевдо Брюстера $\varphi_{Бр}$.

Детальный анализ этих тенденций выполнен для системы с n = 1.3 на воздухе. На рис.1.18 представлена программная выборка значений минимума амплитудной функции $\Psi(\varphi_{мин})$ на соответствующих углах $\varphi_{мин}$ в зависимости от пробного значения аргумента экстинкции.

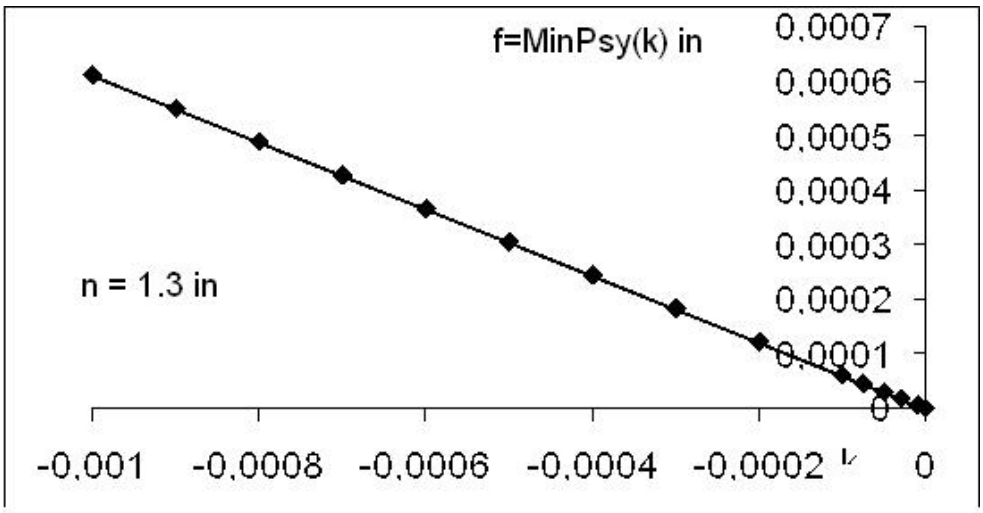


Рис.1.18. Поведение минимума $\Psi(\varphi_{мин})$ для модели идеальной границы.

Зависимость между экстинкцией и высотой подъёма амплитудной функции в минимуме является прямой пропорциональной для широкой области значений экстинкции. Следовательно, сам коэффициент пропорциональности в области своего постоянства можно назвать эллипсометрическим инвариантом модельной оптической системы с идеальной отражающей границей Френеля при углах псевдо Брюстера или инвариантами Френеля-Брюстера.

Поведение этого инварианта $C = \min\Psi/k$ для рассмотренного на рис. 1.18 ОИ показано на рис. 1.19.

Поскольку инвариант $C = \min\Psi/k$ находится в обратном отношении к параметру экстинкции, то при $k \to 0$ значение C может неустойчиво устремиться к ∞. При $k \to \infty$ возможен завал этого отношения по совсем другой физической причине, связанной с явлением аномального отражения (АО) на скользящих углах падения на ОИ.

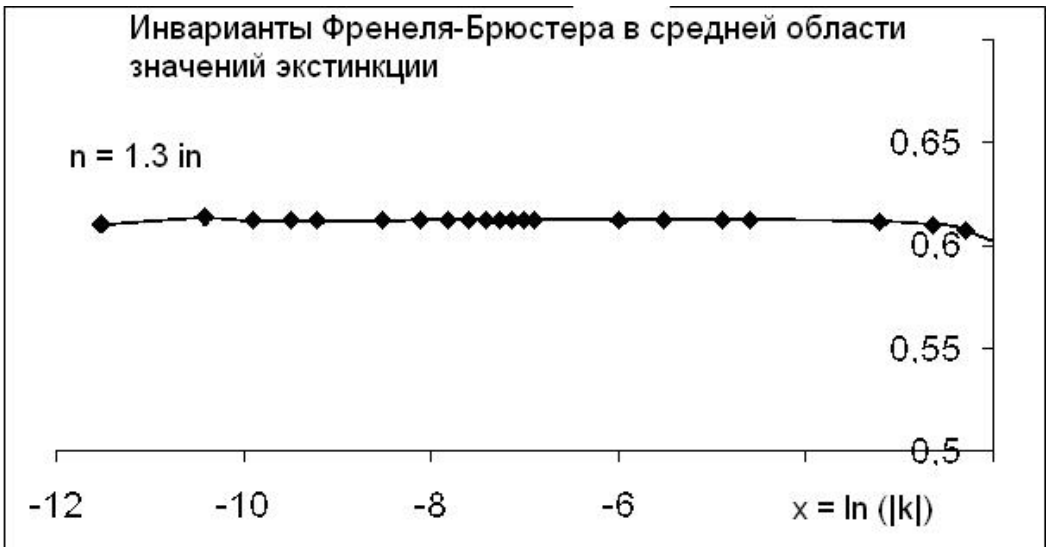


Рис.1.19. Инвариант Френеля-Брюстера для зеркала с n=1.3 на воздухе.

На рис.1.20 представлено полное семейство значений инвариантов Френеля-Брюстера, расчитанное для всевозможных реалистичных значений показателя преломления $1 < n < 5$ (вещественной рефракции n комплексного в общем случае показателя преломления n-ik).

Из представленного на рис.1.20 семейства кривых по параметру n видно, что область устойчивости расширяется с ростом n вещественного показателя преломления.

На основании теоретических (расчетных) данных, использованных при получении кривых рис.1.20, в дополнение к открытым в 1875 году инвариантам Кеттелера для металлооптических ОИ (с большими значениями k >0.m) можно говорить о новом классе эллипсометрических инвариантов $C = \Psi(\varphi_{мин}) / k = const(n)$ для большого ряда веществ от диэлектрических (слабо поглощающих) материалов до полупроводников и металлов.

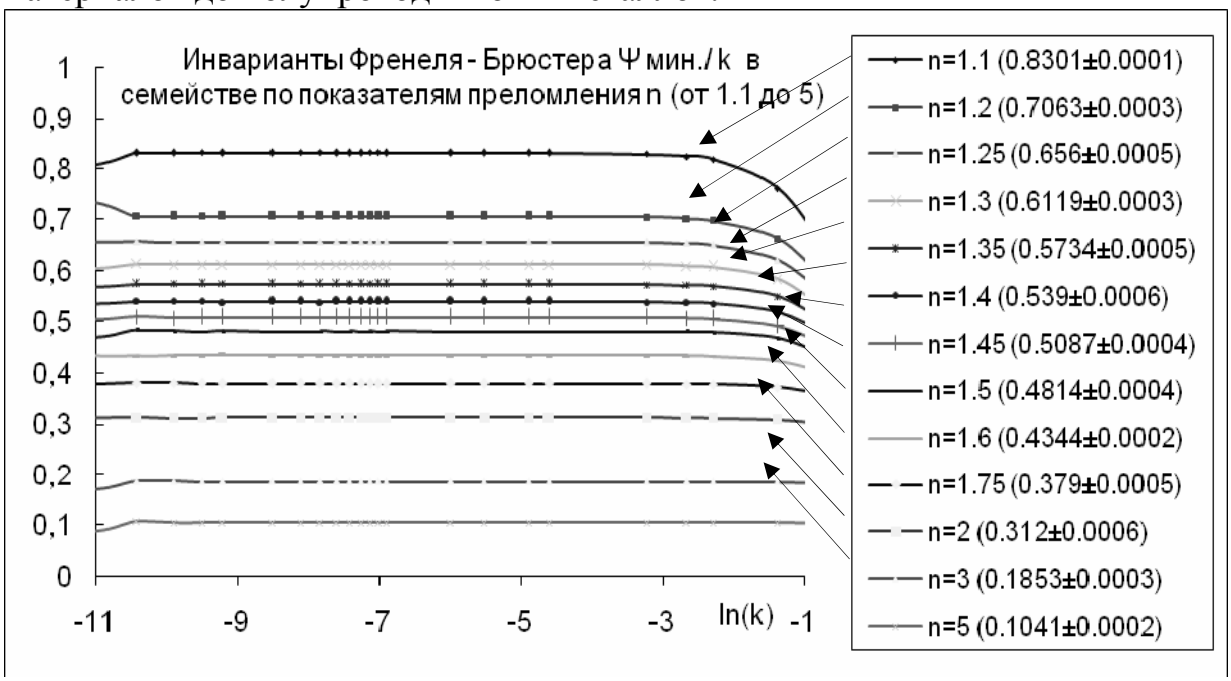


Рис.1.20. Инварианты Френеля-Брюстера в модели идеальной границы.

Эти инвариантные величины логично называть инвариантами Френеля – Брюстера.

§1.3.1. НПВО - эллипсометрия

Эмпирические свойства решений прямой задачи эллипсометрии можно легко систематизировать и теоретически обосновать, например, в виде системы поляризационных характеристик отражённого света для подобных друг другу материалов, отличающихся показателем преломления, или одного материала с разными преломляющими свойствами на ортогональных срезах ОИ, представленных рисунках 1.21, 1.22.

На рисунке I.21 представлены экспериментально измеренные типовые значения амплитудных и фазовых функций от углов падения для трёх веществ (кварцевого и технического стекла и кристалла ниобата лития).

Из представленных данных видно, что минимум амплитудной функции $\Psi_м$ сдвигается вправо по мере возрастания оптической плотности ОИ (показателя преломления). Теоретически так и должно быть, начиная с ОИ, на границах раздела которых, относительный показатель преломления близок к 1, и их ОУЭ описывается формулой вида (11), что реалистично для несмешивающихся газов с углом Брюстера около 45^0. Аналогичный минимум для парафазного кварца оказывается между амплитудной функцией для воды (n = 4/3), представленной на рис. 1.22, и стекла (n = 3/2).

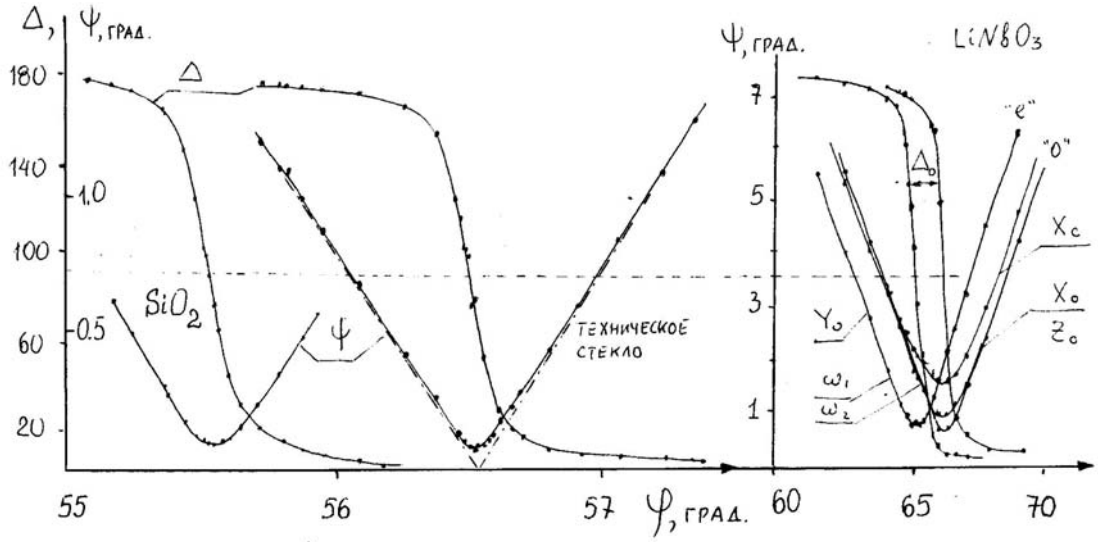


Рис. 1.21. Система поляризационных характеристик ряда ОИ.

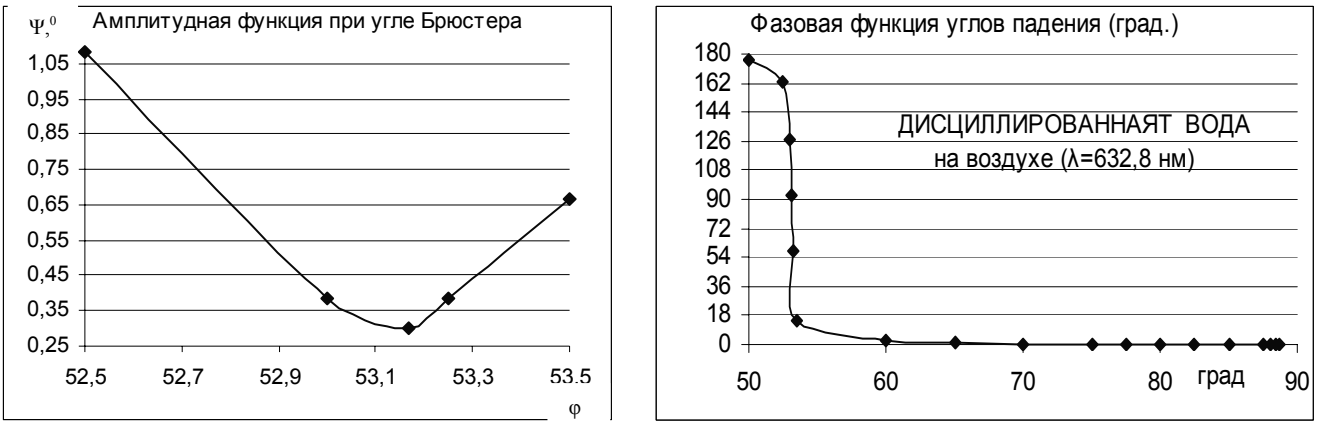


Рис. 1.22. Поляризационные характеристики света, отражённого от воды.

На рис. I.23 представлены теоретические данные, рассчитанные по модели ОУЭ (10) для ОИ с большим поглощением (существенно не прозрачных). Здесь совершенно чётко отражается тенденция брюстеровского сдвига минимума амплитудной функции вправо с ростом показателя преломления n (большего 1 при постоянном значении металлоподобного поглощения к=1). Значение минимума амплитудной функции убывает с уменьшением относительного вклада экстинкции, нормированной на показатель преломления материала, то есть ведет себя подобно диэлектрику при малом относительном вкладе светоослабления. Это легко объяснить асимптотическим поведением функции $\Psi_м$ из формулы (13) при больших значениях n:

$$\Psi_м = 0.25\ k / n\ (1+1/ n^2) \sim 0.25\ k / n.$$

Поведение фазовой функции Δ(φ) при отражении на воздухе обладает классическим свойством вещественной функции (11) в комплексном виде записи – знакового скачка от 180^0 до 0^0 при переходе через угол Брюстера (высоких значений для больших n) для как бы идеальных «диэлектриков» при малых величинах относительного светоослабления или углов псевдо- Брюстера для реалистичных псевдо металлических ОИ. Таким образом, аналогично с тенденцией как бы «диэлектрического» поведения амплитудных функций Ψ(φ), при малом относительном вкладе экстинкции фазовая функция всё также стремится к скачку от 180^0 до 0^0.

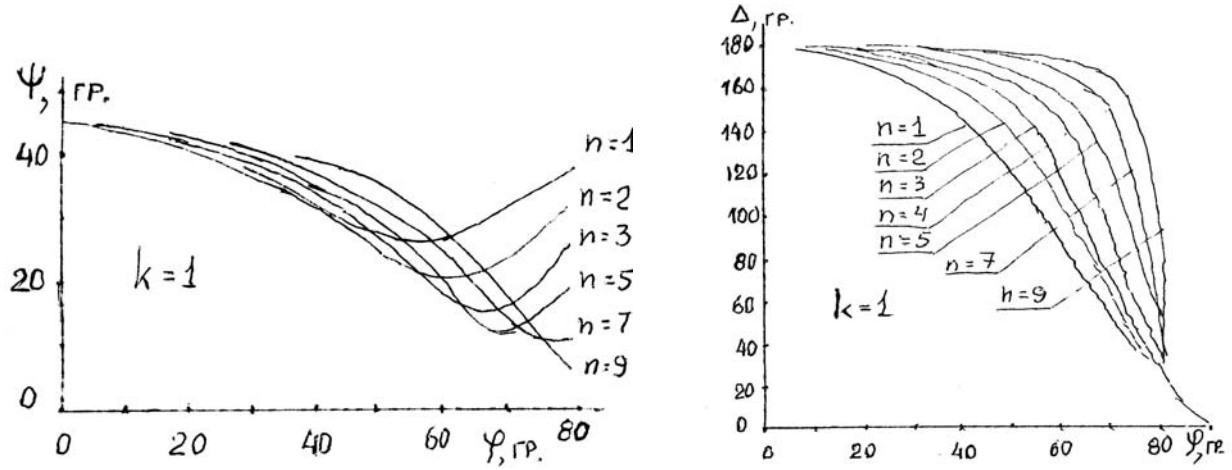


Рис. I.23. Расчётные Ψ_φ–Δ_φ характеристики света для идеальных границ.

Рассмотренные типовые свойства нарушаются либо в явлениях ПВО, либо при более сложных оптических моделях системы типа толстых покрытий зеркально гладких подложек, когда фаза начинает расти от 180^0 до 360^0, если толщина слоя больше её эллипсометрического периода порядка $\lambda/2$.

В условиях ПВО развиваются свои новые типовые свойства поведения поляризационных параметров отражённого от ОИ света.

Непосредственный расчёт соответствующих прямых решений ОУЭ (10) в этих системах показывает определённое нарушение ожидаемого классического полного отражения, переводя его в разряд явлений НПВО.

Для типовых оптических стёкол с показателем преломления около n = 3/2 явление ПВО наблюдается, начиная с критического угла arctg(1/n) > 33^0 на границе с воздухом или $\theta_{крит} = 41^0 48'$ при контакте со стеклом марки НС-6, т.е. при углах существенно меньше 45^0 (наименьший угол измерений на приборах серии ЛЭФ). Следовательно, столь актуальная для нанотехнологического производства задача контроля оптического контакта деталей (сверх тонкого слоя сил молекулярного поверхностного притяжения) на обычных приборах является плохо обеспеченной. Рассмотрим причины этого положения.

При контроле шероховатости зеркальных поверхностей, как некоторого эффективного пористого сверх тонкого слоя, резонно описывать его более гладким или родственным по обработке покрытием, зазор, между идеальными границами которого можно считать разве лишь вдвое большим уровня средней шероховатости. Для сверх гладких плоскостей это как раз и соответствует постановке деталей на молекулярный оптический контакт, контроль которого имеет определённый производственный интерес.

На рис. 1.24 представлена схема возможного измерения тонкого слоя между стеклянной остроугольной призмой и родственной ей по обработке подложкой (НС-6) с прецизионно гладкими входными и выходными гранями в этой оптической системе.

Контрольные измерения показателя преломления по методу Брюстера для призмы из стекла К-8 представлены на рис. 1.25 данными поведения амплитудной функции вблизи её минимума.

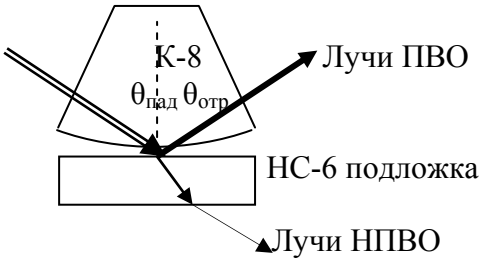


Рис. 1.24. Оптическая схема измерений по методу эллипсометрии НПВО.

Результаты графического определения оптических констант К-8 оказались весьма удовлетворительными: n = tg(56.56) =1,514211 при завышенных оценках поглощения (реальной экстинкции) k= 0,005.

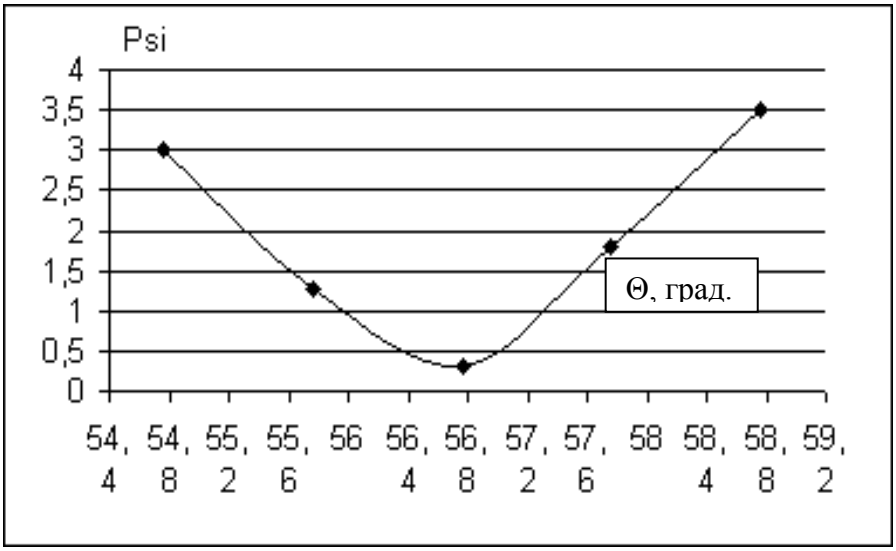
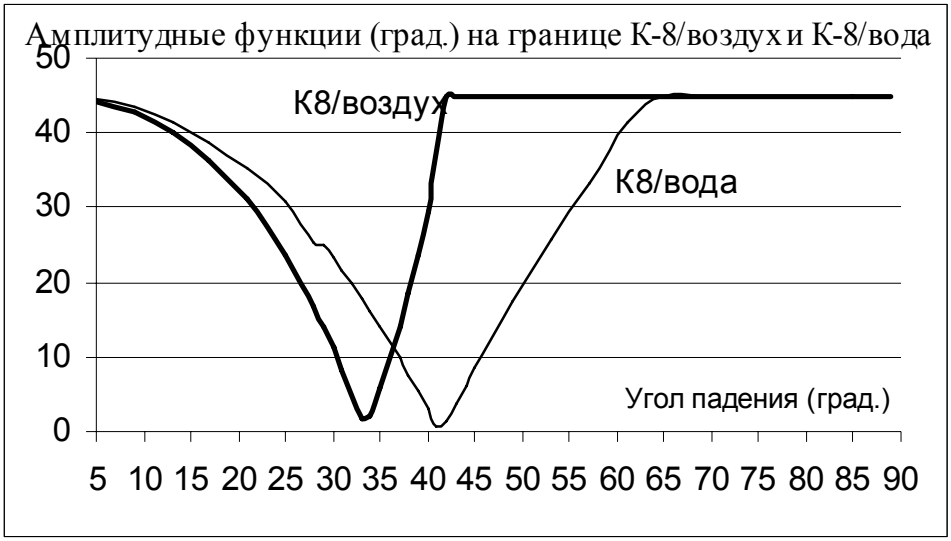


Рис.1.25. Измерение угла Брюстера при внешнем отражении от призмы.

На рис. 1.26 представлены поляризационные амплитудные (Ψ_θ) и фазовые (Δ_θ) параметры решения прямой задачи эллипсометрии по ОУЭ (10) в модели отражения на идеальных границах Френеля.



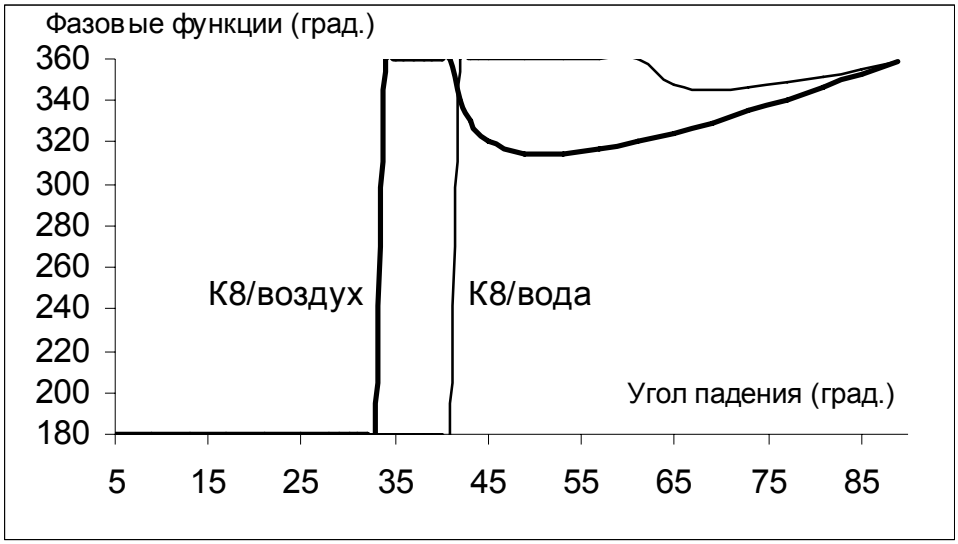


Рис.1.26. Поляризационные углы Ψ_θ–Δ_θ при НПВО на призме от воздуха.

Экспериментальные измерения поляризационных углов при отражении на воздухе от нижней грани призмы из стекла К-8 (без подложки НС-6, т.е. в воздушной и жидкой средах) дали значения $\Psi_{экп} = 44.99889^0$ и $\Delta_{эксп} = 324.5781^0$ для воздуха (вакуума) и значения $\Psi_{экп} = 44.99994^0$ и $\Delta_{эксп} = 347.401^0$ для жидкой среды, которые хорошо укладываются на расчётные кривые НПВО рис. 1.26.

Представленные на рис. 1.26 данные показывают, что лучи ПВО имеют асимптотически вырождающиеся значения $\Psi(\theta) \rightarrow 45^0$ для амплитудных функций при углах падения больших критического ($\theta_{пад}>\theta_{крит}$) и теоретически предсказываемое поведение кусочно-непрерывной фазовой функции $\Delta(\theta)$ [3]. В области малых углов падения решения основного уравнения эллипсометрии (10) имеют простой без какого-либо вырожденного поведения вид.

Это означает, что классическое явление ПВО в приповерхностной зоне даже для идеального отражения на границах Френеля сопровождается проникающей за её границу световой волной. При попадании её в тонкий инородный слой она проявляется переходящим в третью среду, нарушающими явление ПВО, реальными лучами НПВО, схематично представленными на рис.1.24.

Из сказанного следует, что в эллипсометрических приборах надо либо значительно повышать точность угловых азимутальных измерений ориентации поляризаторов вплоть до секундного диапазона для скользящих углов падения, либо конструировать приборы для малоугловых измерений ($\theta_{крит} > \theta_{пад}$).

Для более общей модели слоистых систем необходимо знать основные аналитические свойства физически допустимых значений амплитудно-фазовых углов Ψ, Δ поля световой волны, взаимодействующей с этой системой.

§1.3.2. Спекл $U_{фэу}$ - эллипсометрия

Особое место в методах нетрадиционной эллипсометрии занимает слабо развитое спекл спектроскопическое направление.

С появлением когерентных лазерных источников возникло негативное для наблюдения изображений свойство зернистости изображений, названное спекл-картиной, т.е. дифракционной картиной интерферирующих когерентных лучей. Однако эти недостатки легли в основу нового направления – оптики спеклов, источниками которой стали слабо рассеивающие микронеоднородности в объёме или на поверхности (шероховатости) ОИ.

Аналогом спекл-картины может служить солнечная или лунная дорожка, на воде с волнистой рябью. Она тоже состоит из бликов, сдвинутых от зеркального хода лучей на некоторые небольшие углы рассеяния, искажающие истинные размеры источника.

При изменении угла падения θ на малую величину Δθ вся спекл-картина также сдвинется в плоскости изображения, удалённого от отражающего транспоранта на расстояние D, соответственно, на величину δ согласно выражению:

$$\delta = D\,\mathrm{Cos}(\theta)\,\Delta\theta.$$

Однако подобные отклонения могут быть более значительными при дополнительном рассеянии хода лучей от шероховатостей. В результате меняется оптический контраст γ яркости всей картины, зависящий как от длины волны излучателя λ, так и от характерной средней шероховатости σ:

$$\gamma = exp\left\{-\left[\frac{2\pi\sigma}{\lambda}Sin(\vartheta)\Delta\vartheta\right]^2\right\}.$$

При относительно медленном вращательном движении транспоранта θ = Ωt во времени развиваются динамические шумы двоякого типа:

- трансляция теневого движения случайных световых пятен в картине;
- вскипание световых пятен в виде замороженной (неподвижной) структуры.

Методы оптики спеклов хорошо работают для статистически развитых спекл-картин. Следовательно, они приспособлены для измерения значительных по величине (σ >1 мкм) шероховатостей микронного диапазона.

Шероховатость – генетическое свойство межфазных границ вещества. Наношероховатость определяется атомарным уровнем формирования реальных физических границ в виде ионно-электронного Фурье-ландшафта распределения соответствующих волновых функций в адиабатических или релаксационных моделях термо-локализации среднего положения узловых точек – ядер атомов.

Исследование подобных наноразмерных эффектов возможно только на базе методов поляризационно-оптической спектроскопии с помощью приборов модифицированного эллипсометрического типа. Специфической областью работы спеклэллипсометров при этом становится диапазон скользящих углов падения-отражения света, в котором сигнал гашения $U_{фэу}$ испытывает известное [18] аномальное поведение при больших углах падения. На рис. 1.27 приведены примеры этих спектров, полученных на приборе ЛЭФ-3М при анализе тонких слоёв (3 нм и 30 нм) вакуумного напыления хрома на сапфировую подложку.

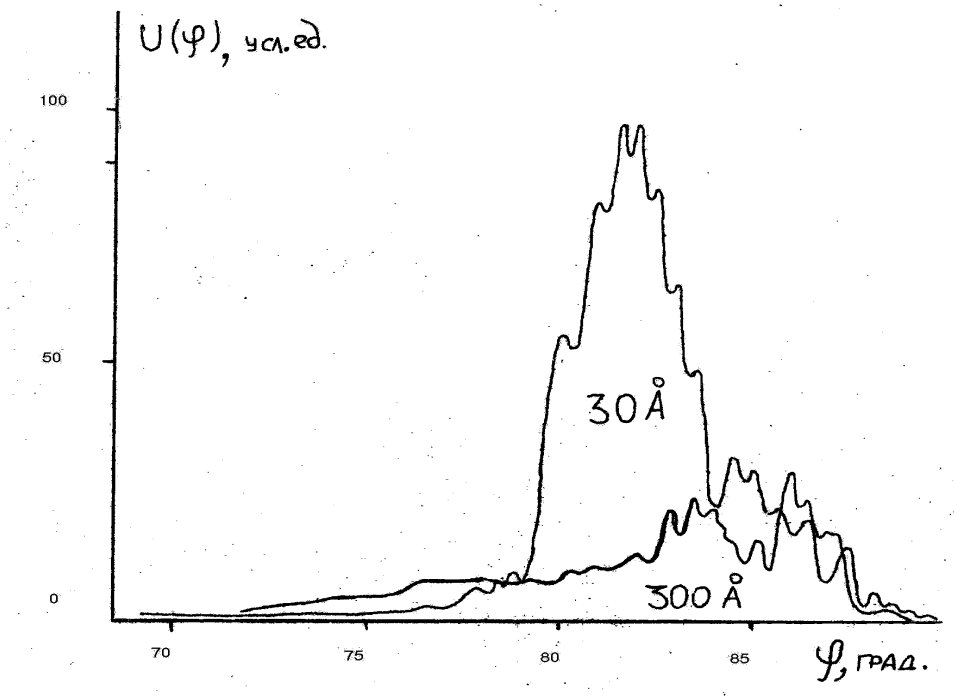


Рис. 1.27. Спекл-спектры отражения от тонких плёнок хрома.

Эти данные говорят о прямом экспериментальном подтверждении существования аномального (по Ионеде [19]) отражения в оптическом диапазоне в виде спектро-угловых индикатрис деполяризованного света, выделенного из общего светового пучка простым способом гашения поляризованной составляющей.

Для детального исследования подобных теневых картин требуется разработка дополнительного тандем-анализатора в зеркальном канале эллипсофотометров.

§1.3.3. Трансформация инвариантов Френеля-Брюстера для модели однородного слоя

Известные в металлооптике инварианты Кеттелера, как показал строгий анализ решений обратной задачи эллипсометрии для модели отражающей системы в виде идеальной границы Френеля, являются меняющимися псевдо постоянными величинами. Для этой задачи удалось так же показать линейную связь между минимумом амплитудного параметра поляризации поля световой волны и показателем экстинкции материала (13).

Коэффициент пропорциональности был назван инвариантом Френеля-Брюстера, который в более сложных моделях отражающих систем изменяется, модифицируется и трансформируется в другие относительно устойчивые величины, детально рассмотренные для модели однородного слоя.

Расчеты по формуле (15.1) для амплитудной $\Psi(\varphi)$ и фазовой $\Delta(\varphi)$ функций от углов падения-отражения φ приводят к типичным картинам их свойств. При отражении света от слоя на воздухе амплитудная функция так же, как и при

отражении от идеальной границы Френеля, дважды меняет кривизну и имеет минимум при углах псевдо Брюстера, а фаза – монотонно убывает от 180^0.

На рис.1.28 представлены более сложные выборки этих решений от |k|.

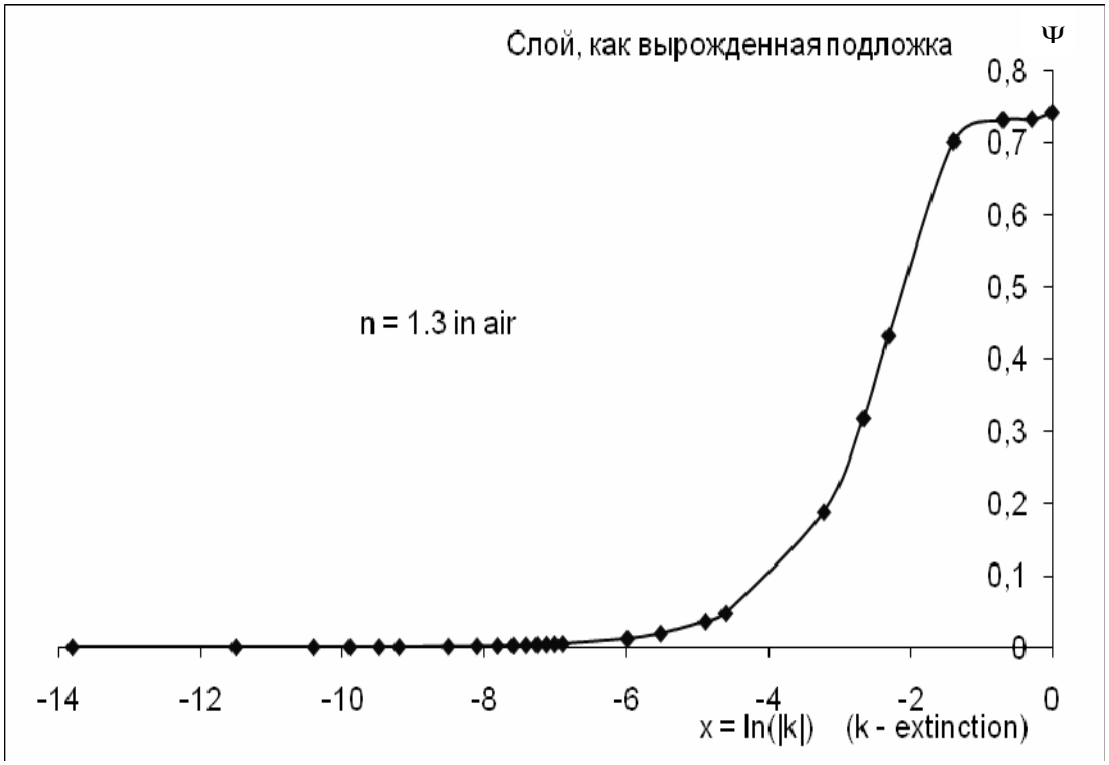


Рис. 1.28. Минимум амплитудной функции для плёнки на воде в функции от логарифма |k|.

На следующих рисунках показано влияние двух типов выделений (15.3) среды и подложки на примере вырожденных слоёв с нулевой толщиной, но с константами среды или подложки при вариации показателя светоослабления.

Эти же данные в другом масштабе показаны на рис.1.29.б, в для ничтожно малой толщины слоя.

Из представленных на рис.1.29 данных видно, что инварианты Френеля-Брюстера для этих вырожденных по толщине слоёв на водной подложке в воздушной среде нарушают поведение инвариантов Френеля-Брюстера для идеальных (без слоёв) границ в двояком аспекте: с одной стороны, для малых экстинкций (до сотых долей единицы) - они существуют, с другой стороны, для значений экстинкции более десятых - перерождаюся так, что инвариантной величиной становится сам минимум амплитудной функции (см. рис.1.29.б).

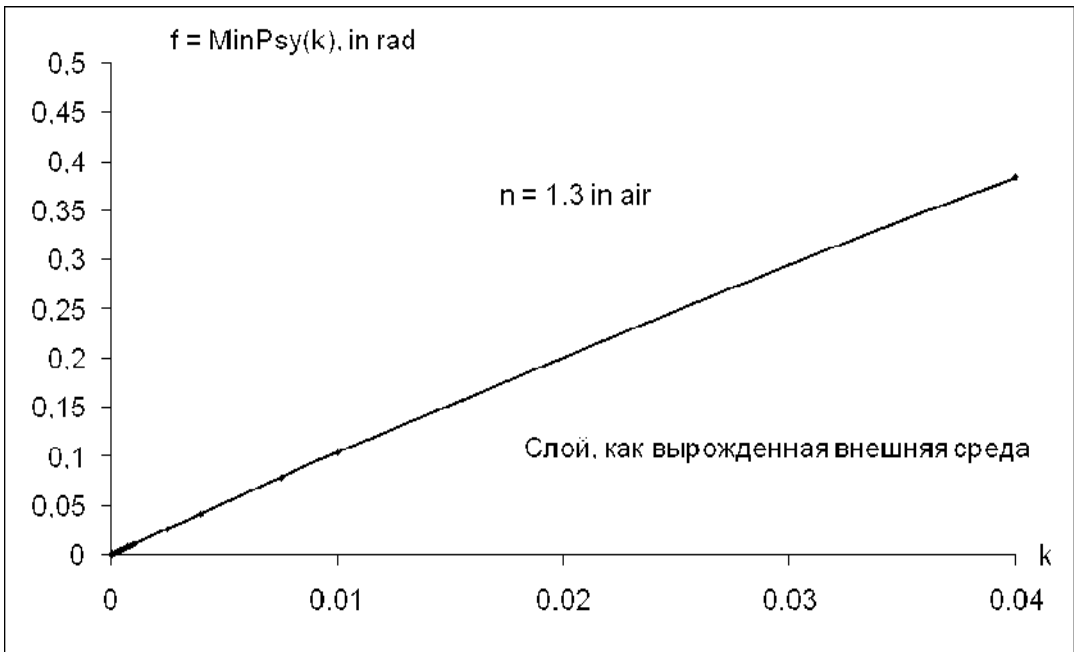
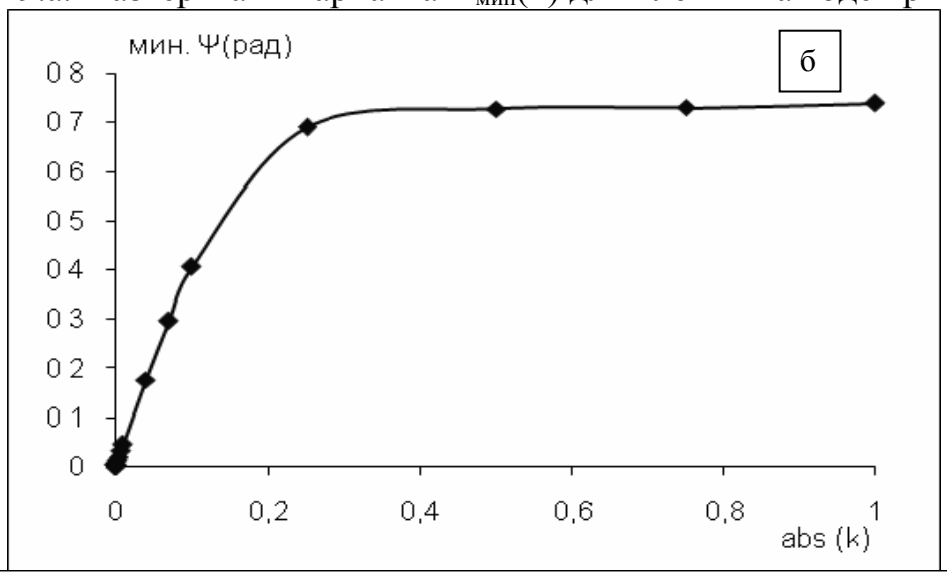


Рис.1.29.а. Развёртка инварианта $\Psi_{мин}(k)$ для плёнки на воде при k<0,04.



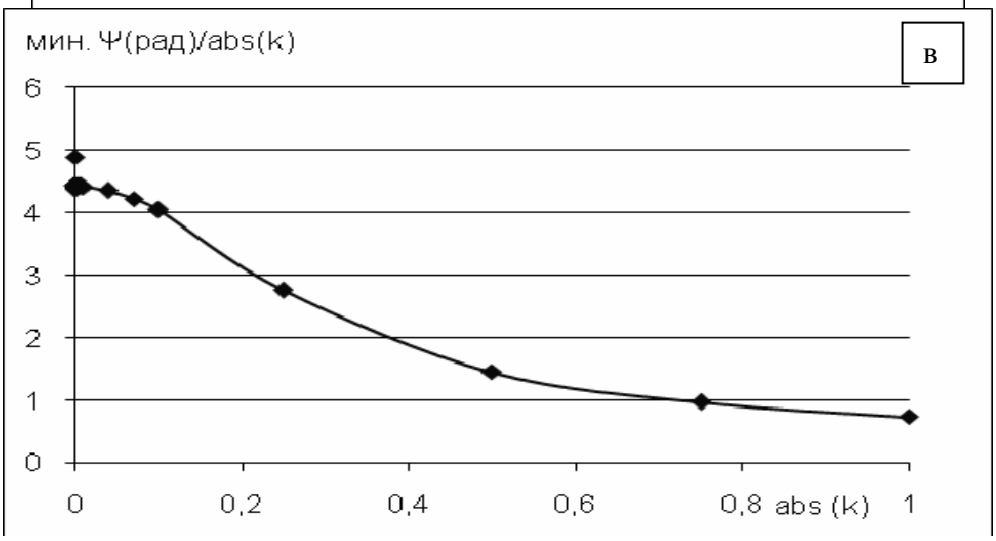


Рис.1.29.б,в. Слой n = 1,3 на воде в воздухе ($d_{слоя}$ = 0,0001 нм).

Нижеследующие рисунки 1.30 показывают линейную развёртку минимума амплитудных функций для тонких слоёв (масло на воде около 0.9 мкм). Для экстинкции металлоподобных веществ (большие значения экстинкции) эта линейность в малом, естественно теряется, но может для некоторого типа систем перейти в другого типа линейную зависимость, что следует из рис.1.31.

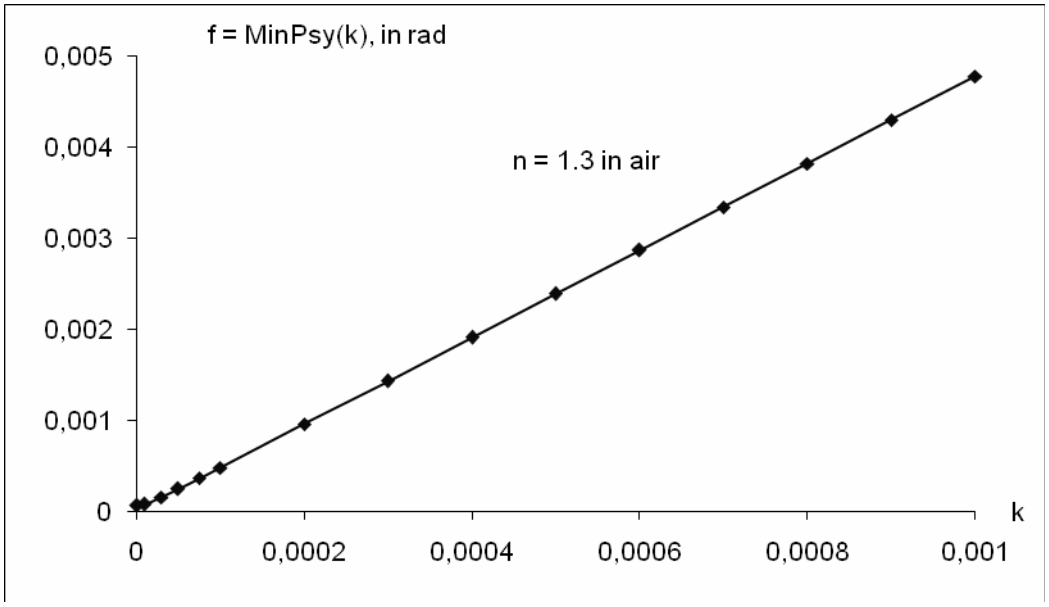
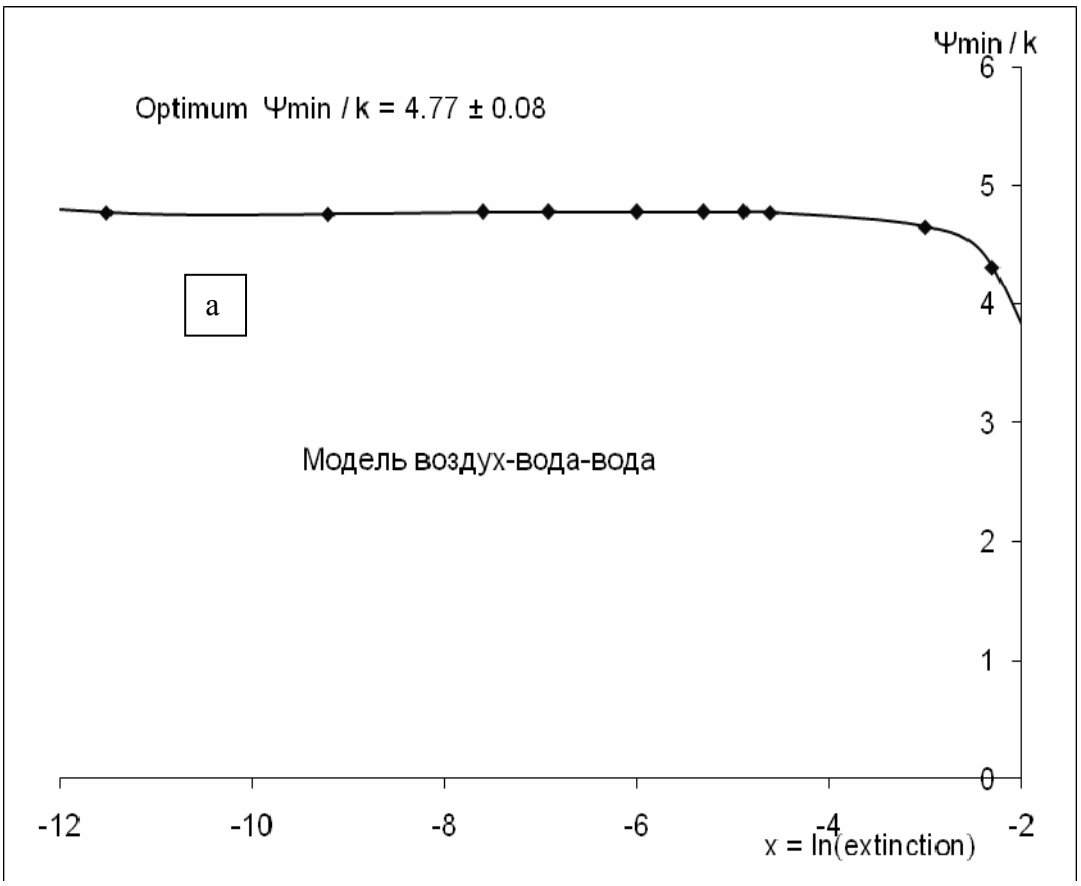


Рис. 1.30. Минимум Ψ для масла на воде при малых значениях |k|.

Поведение вырожденных по толщине «слоёв», идентичных по показателю преломления внешней среде или подложке показано на рис.1.31.а,б.

Более полная по численным значениям экстинкции развёртка поведения минимума амплитудной функции для тех же вырожденных слоёв на воде (смог воздуха) представлена на рис.1.31.в. Здесь начинает проявляться численная математическая сингулярность при делении на машинный ноль для физически малых экстинкций и смена области стабильности инвариантов Френеля-Брюстера для рассматриваемых диэлектрических ОИ.



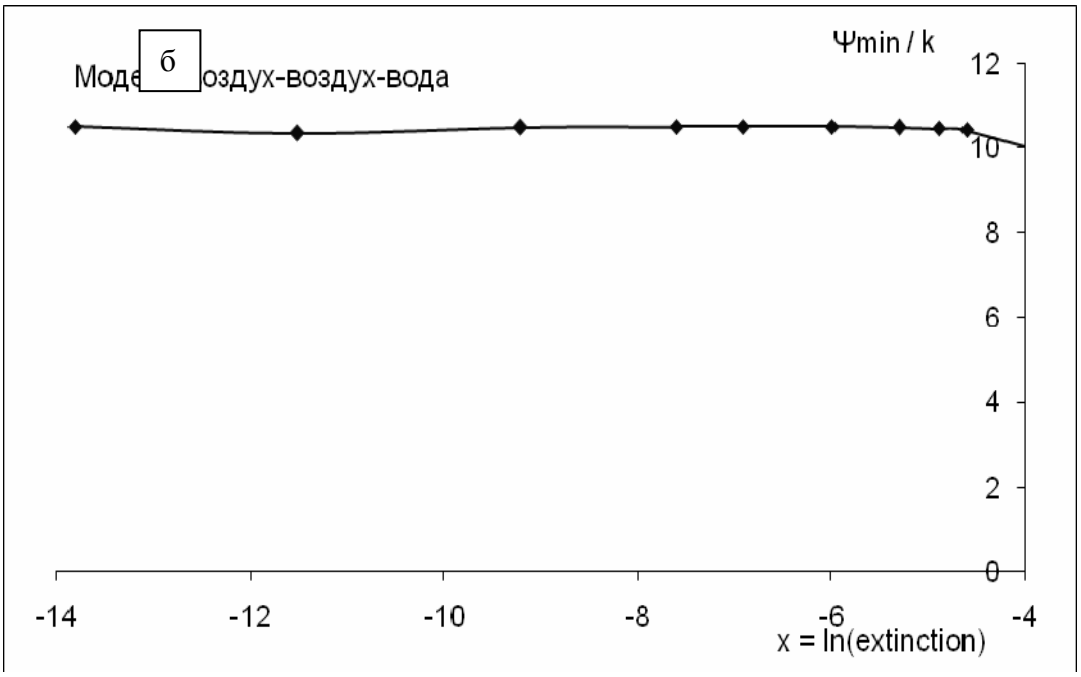


Рис.1.31.а,б. Псевдо-инварианты вырожденных слоёв на воде в воздухе.

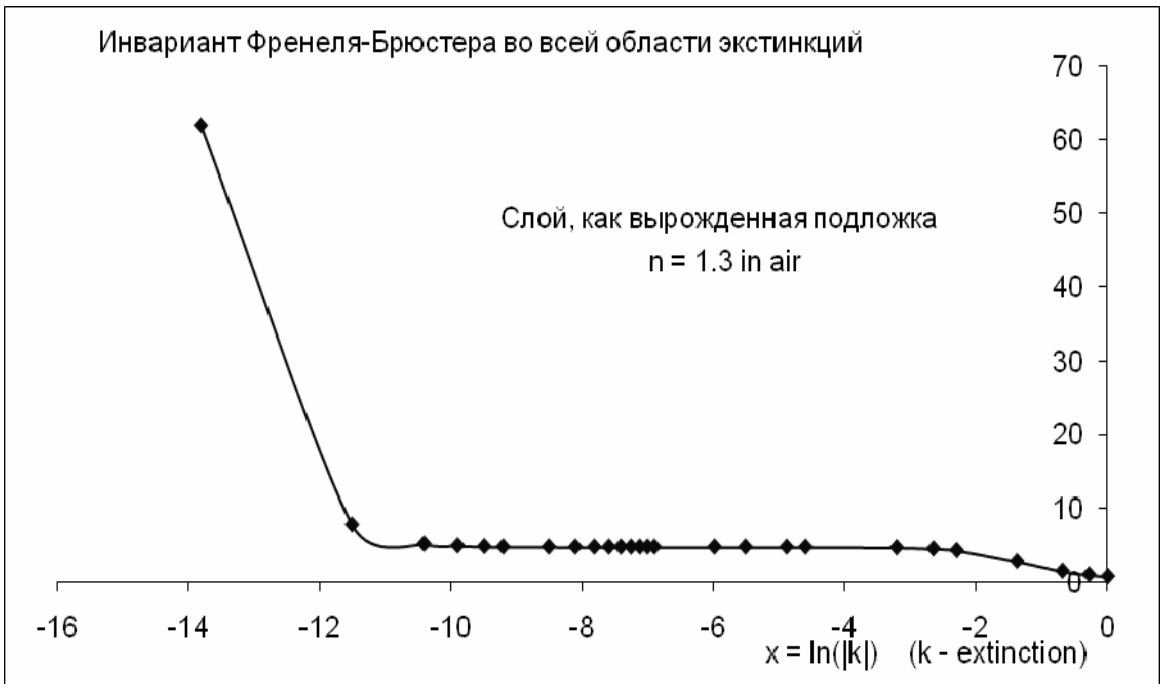


Рис.1.31.в. «Инварианта» отношения $\Psi_{мин}/k$ для водной плёнки на воздухе.

На рисунках 1.32. представлены формальные свойства поведения $\Psi_м(n,k,d)$ минимума амплитудной функции от показателя преломления n (при k = 0) для диэлектрических плёнок двух типовых толщин (d = 0.9 нм и d = 250 нм) на кремнии. Из этих данных видно, что формула (13), справедливая для модели идеальной границы раздела сред, перестаёт работать – теряется асимптотическая обратная зависимость от вещественной части комплексного показателя m (n,k) преломления, которая для вырожденных диэлектриков (см. рис.1.29.в) ещё выполнялась в области больших значений экстинкции (правда, за счёт постоянства в этой области самой функции $\Psi_м$).

Точные численные решения, представленные на рис.1.33, раскрывают характер всех поправочных величин в формуле (15.3). Так, мультипликативный коэффициент – линейно растёт с k и можно ожидать, что постоянной величиной должно быть не отношение минимума амплитудной функции к экстинкции, а сам этот минимум, изображаемый рисунками 1.34.

Общее свойство, которое бросается в глаза при взгляде на семейство по n типовых для инвариантных параметров Френеля-Брюстера отношений $\Psi_м(k,d)/k$ в решениях ОУЭ для однослойных систем на воздухе, состоит в разделении их хода на две группы – псевдо линейных спадов и слабо инвариантных участков.

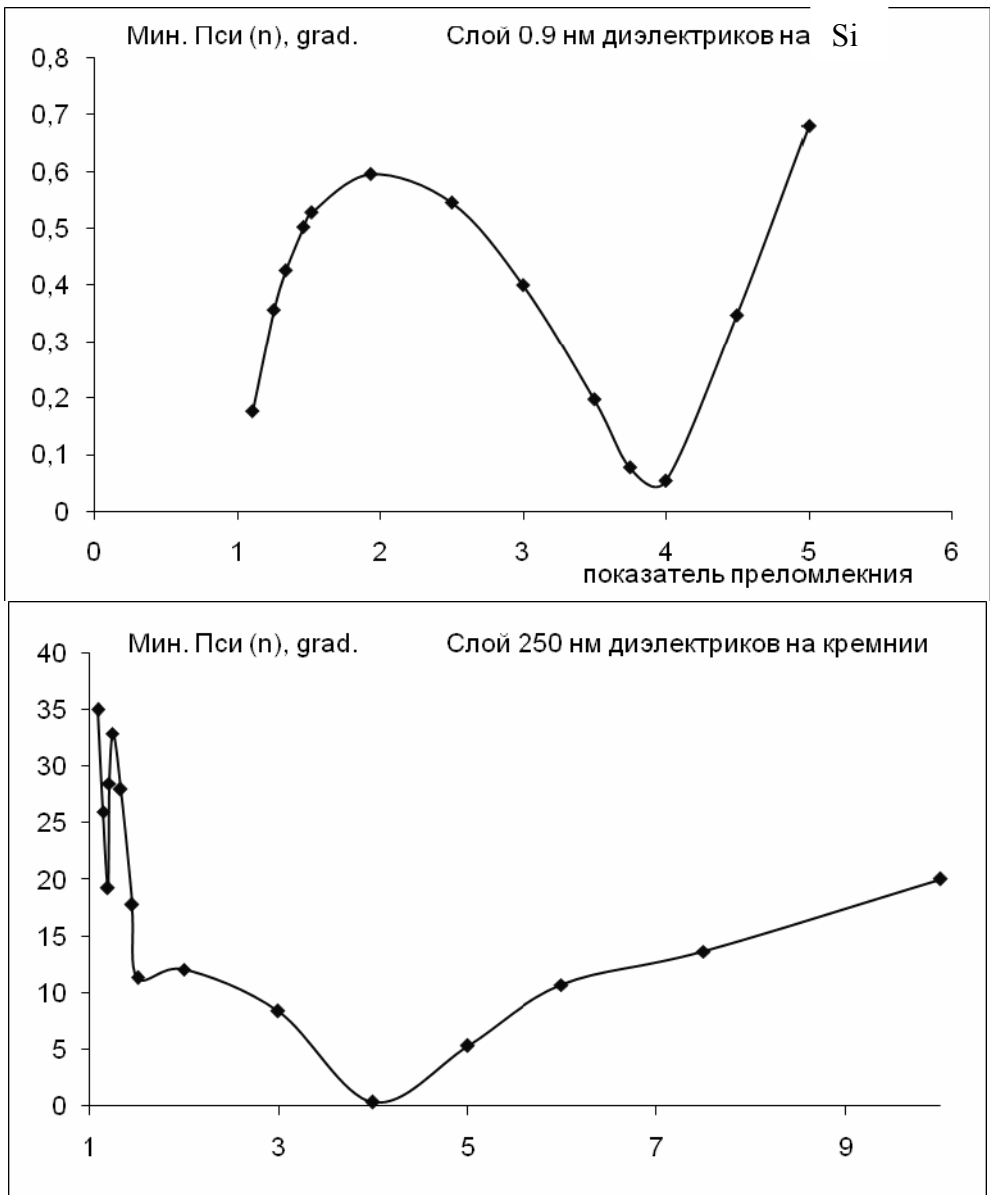


Рис.1.32.а,б. Зависимость минимума амплитудной функции от n.

Если последние отвечают ожидаемому проявлению мультипликативного выделения в ОУЭ для однослойных систем блоков ОУЭ для идеальных границ с доминированием как бы собственных инвариантов Френеля-Брюстера, но в более узкой области интервалов значений экстинкций, то линейные участки наводят на мысль, что произведение этих параметров инвариантности на экстинкцию может привести к инвариантным величинам нового типа в своей области интервалов экстинкций: $k\,\Psi_м(k,d)/k = \Psi_м$.

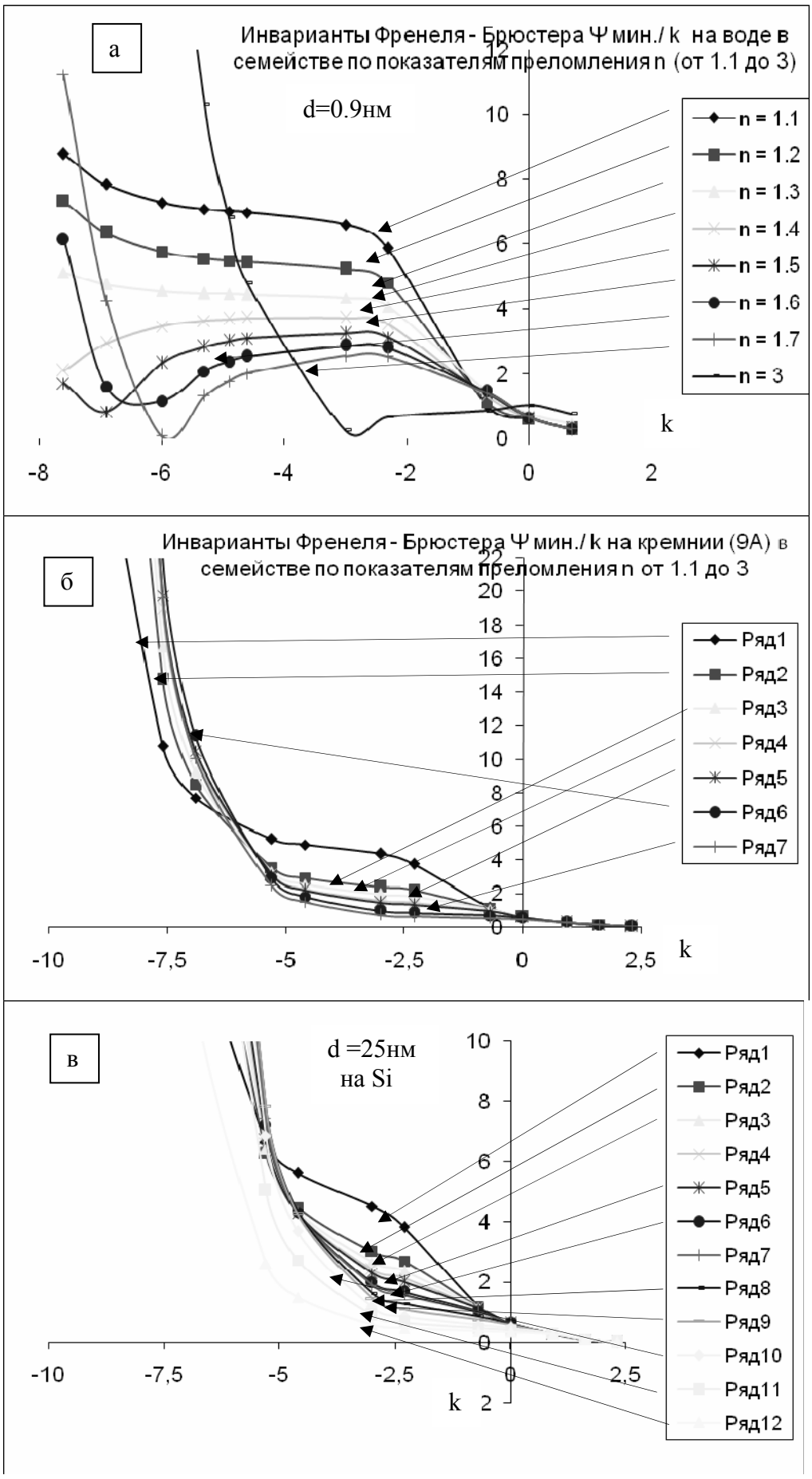
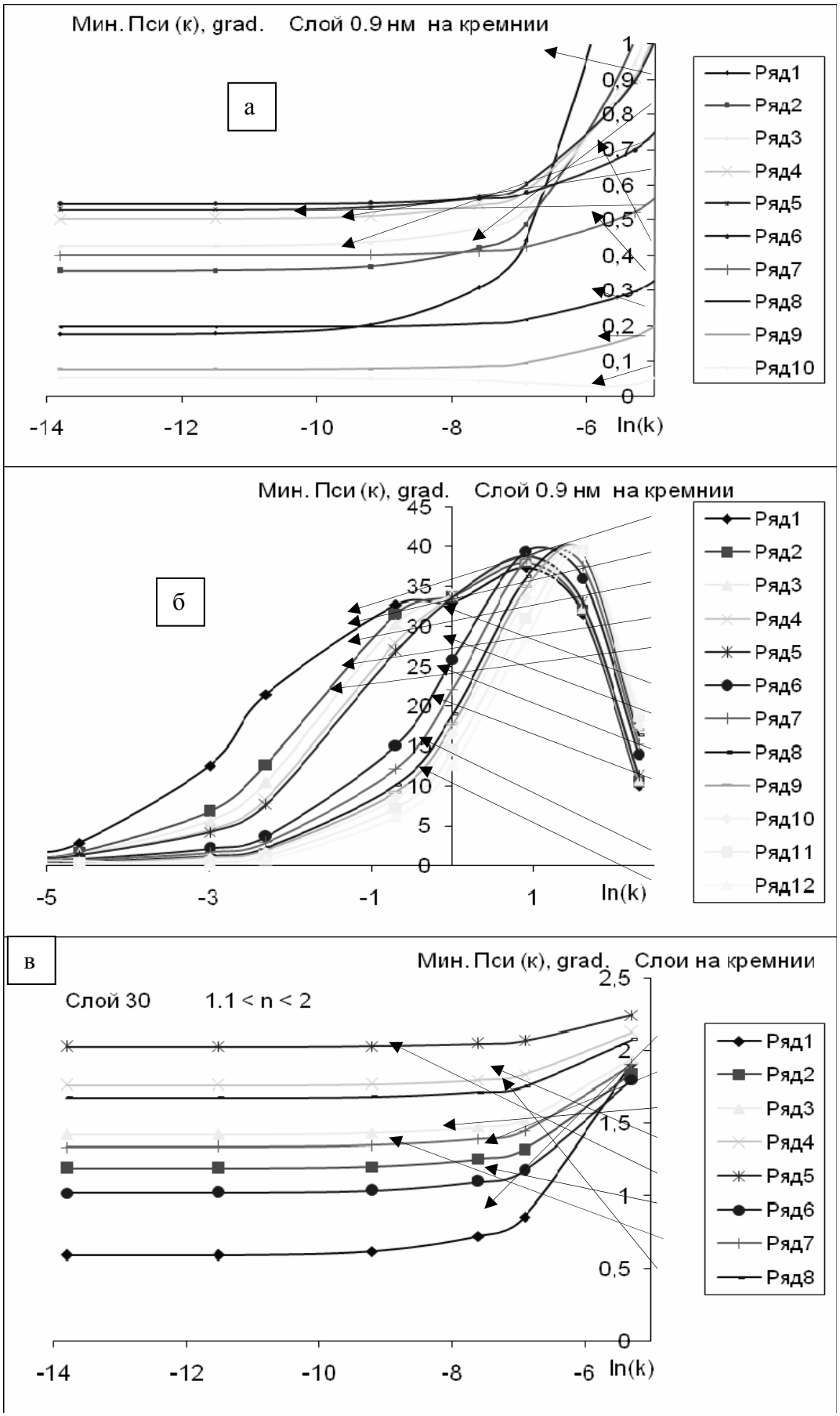
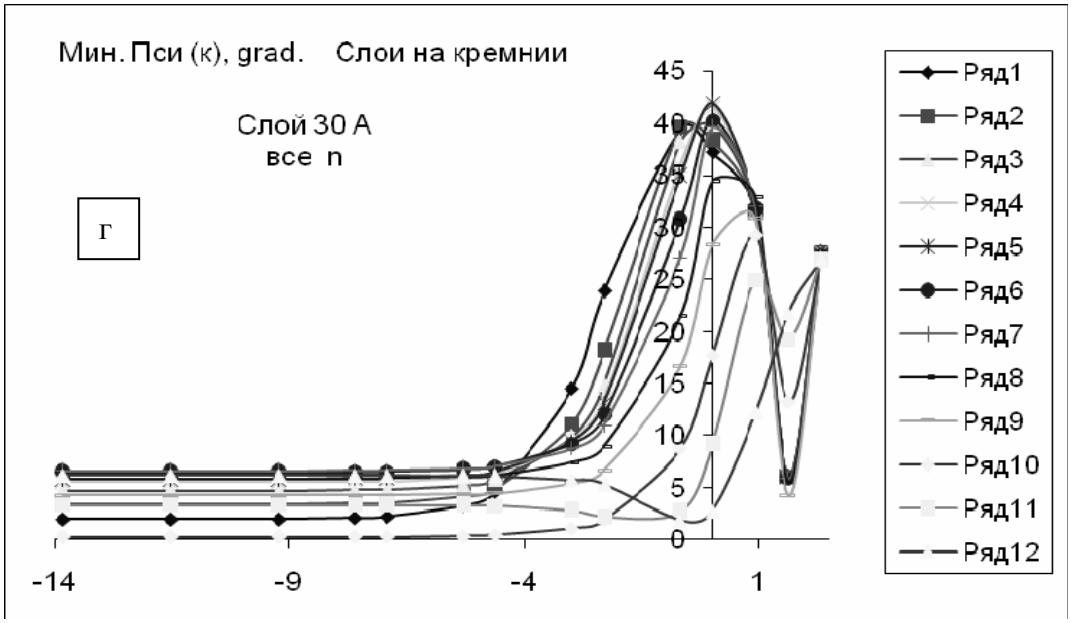


Рис.1.33.а.б.в. Семейство $\Psi_м(n,k,d)/k$ по n от k для слоёв на воде и кремнии.

Соответствующее семейство $\Psi_м(k,d)$ представлено на рисунках 1.34.





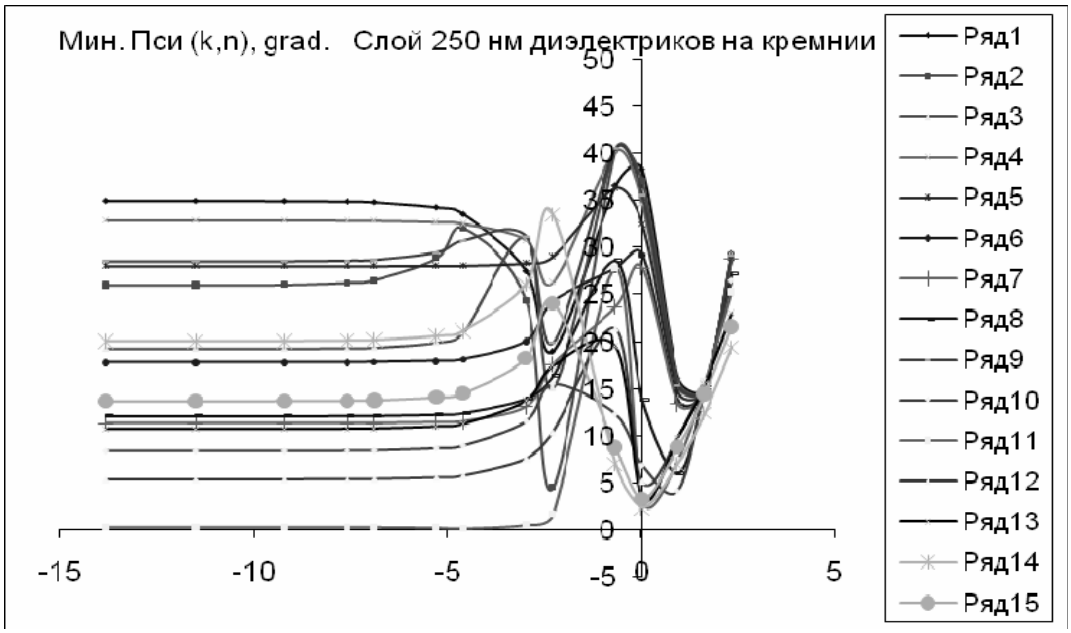


Рис. 1.34.а,б,в,г,д. Семейство $\Psi_м(n,k,d)$ по n от k для слоёв d на кремнии.

Полученные кривые оправдывают в (15) высказанное выше ожидание: корректировочные мультипликативные множители в ОУЭ для слоя вне зон действия инвариантов Френеля-Брюстера имеют в качестве новых постоянных величин – инвариантное значение самой функции минимума амплитудной характеристики состояния поляризации поля отраженного на слое света (экви высотные амплитудные характеристики на углах псевдо Брюстера) для слабо рассеивающих и поглощающих веществ (относительно малых k). Так ведут себя амплитудные функции на разных срезах одного и того же кристалла, например, ниобата лития (см. рис. 1.21) при разных n_o, n_e, k_o, k_e.

Детальный анализ рассмотренных свойств решений прямой задачи эллипсометрии однослойных систем по параметру толщины слоёв показывает теоретически ожидаемый эффект квазипериодических изменений ширины

интервалов обнаруженной двоякой псевдоинвариантности по параметру экстинкции этих слоёв.

§1.3.4. Эллипсометрия скрытых азимутальных девиаций

При оценке оптических констант воды методом эллипсометрии НПВО обнаружилось совершенно новое для традиционных методов измерений в эллипсометрии явление девиации измеряемых азимутов поляризаторов прибора при сохранении, тем не менее, значений амплитудно-фазовых характеристик состояния поляризации отражённого от воды света, являющихся линейной комбинацией этих первично измеряемых азимутов.

Рассмотренные возможности подобного метода поляризационно-оптической диагностики свойств воды интересны с точки зрения получения и анализа дополнительной информации о мало изученных проблемах в современной биомедицине. Такая диагностика позволяет находить значение показателя преломления чистой воды с точностью до пятого знака после запятой, что позволяет провести надёжную интерпретацию транспортных и реструктуризационных свойств воды.

В оптическом материаловедении вода является одним из первых и наиболее полно изученных объектов исследования. Однако, при использовании поляризационно-оптических методов диагностики, она раскрывает новые грани своих аномальных отражательных свойств – экстремально высокие значения экстинкции в окнах слабого поглощения и аномальную угловую зависимость интенсивности гашения на скользящих углах падения.

Чистая вода (H_2O), с одной стороны, это хорошо изученный широко распространённый в природе объект с уникальным набором аномальных, а с другой стороны, не всегда объяснимых свойств.

Хорошо изучена химическая природа и, в частности, квантовая структура чистой воды. Однако физхимия неподелённых пар электронов кислорода в тетраэдрической координации атомов её молекулы не находит своего строгого модельного объяснения. Алогичной на первый взгляд представляется сама связь кислорода с двумя электронами водорода, обеспечивающая молекуле воды конфигурацию легчайшего инертного газа неона с AO(Ne) = $1s^2\ 2s^2\ 2p^6$. Энтальпийные (ΔH_0) свойства воды так же обладают энергетической аномалией образования (- 285.83 кДж/моль) из простых газов H_2 и O_2 по сравнению с более выгодным образованием пергидрата (-187.7 кДж/моль).

Молекулярная вода – аномально полярное вещество, способное силами полей Ван-дер-Ваальса осуществлять реакции растворения, электролитической диссоциации, сольватацию и нанокластерной самоорганизации.

Рекордно высокое значение имеет её электростатическая диэлектрическая (ε_0 = 81) проницаемость. Это означает, что вода может служить ловушкой электростатических полей (E) с высокой индукцией $D = \varepsilon_0 E$. Однако, для высокочастотных электромагнитных полей дисперсионное значение $\varepsilon_\infty = 16/9$, описываемое квадратом показателя преломления $n^2 = \varepsilon_\infty$, теряет подобную аномалию (n=4/3).

Таким образом, на современном уровне знаний всё больший интерес вызывают вторичные (кристаллоагрегатные) и третичные (полимерные) модификации структуры воды, отвечающие за её поведение в слабых электромагнитных полях с эффектами стабилизации состояний, т.е. памяти к ним, имеющие важное медико-биологическое значение в экозащите человека от индустриально патогенных образований в среде его обитания.

Перспективность рассматриваемого метода исследования обусловлена высокой чувствительностью этих приборов эллипсометрического типа ручного управления не только к амплитудно-фазовым $\Psi(\varphi)$ – $\Delta(\varphi)$ характеристикам поля отражённой световой волны, но и к определяющим их первично измеряемым азимутам поляризаторов приборов, отвечающими за многие свойства изучаемых ОИ, в частности индуцированных их взаимодействиями с внешней средой и не обнаруживаемых прямыми энергетическими способами.

Картина широкополосных свойств линейного отклика воды на воздействие слабых ЭМ полей, включая тепловой ИК-диапазон, представлена на рис.1.35 дисперсионными спектрами [20] компонент $m = n - ik$ комплексного показателя преломления, состоящего из показателя рефракции $n(\lambda)$ и поглощения $k(\lambda)$.

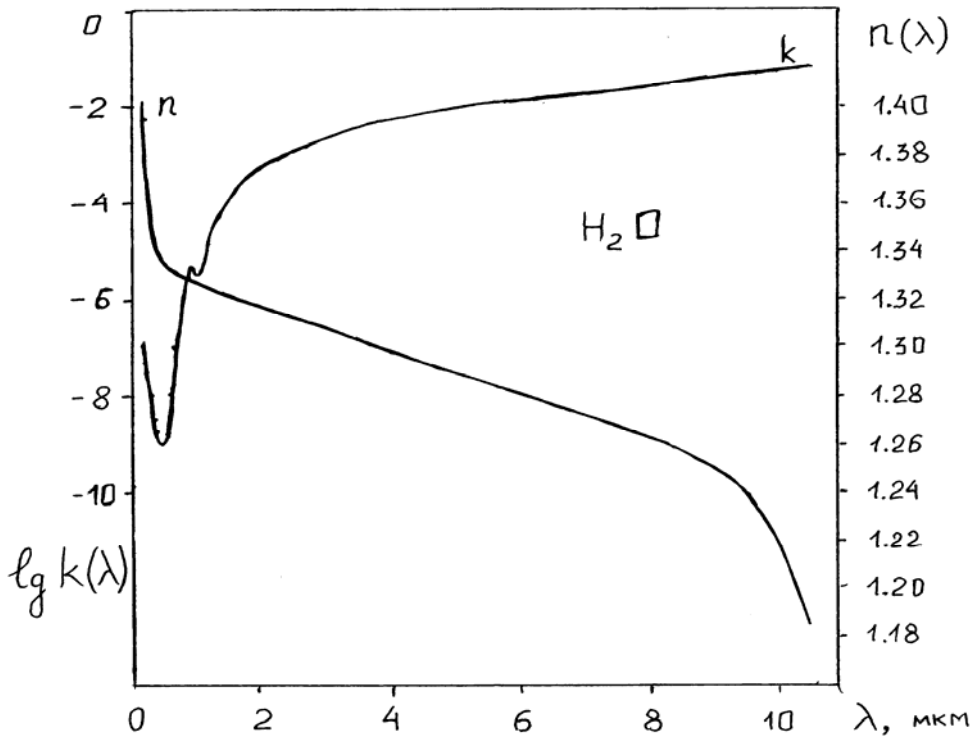


Рис.1.35. Спектры компонент комплексного показателя преломления воды.

Из приведённых на рис. 1.35 данных видно, что чистая вода представляет собой сложную систему многоэлектронной конфигурации атомного, молекулярного и кристаллического порядков с характерным всепоглощающим откликом на внешние воздействия всюду кроме окон прозрачности в видимом и рентгеновском диапазонах.

Дипольный отклик электронов структуры на гармоническое силовое поле ЭМ волны описывается дисперсионными рядами или интегралами Крамерса-Кронига вида

$$\vec{D} = \frac{1}{V}\sum_{j=1}^{N_a N_i} \alpha_j \vec{A}_j = \frac{\mathring{a}^2}{mV}\sum_{N=1}^{N_{\text{ïîëåê}}}\sum_{j=1}^{N_{\text{àòîì}}} \frac{\chi_j \vec{A}_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_j} =$$

$$= \frac{1}{V}\vec{A}_j \sum_{N=1}^{N_{\text{ïîëåê}}} \alpha_{\text{ïîëåê}} = \frac{N_{\text{ïîëåê}}}{V}\vec{\partial}_{\text{ïîëåê}} = n_{\text{ïîëåê}}\vec{A}_j \alpha_{\text{ïîëåê}} \quad .$$

Введённая в этих формулах поляризуемость (α), описывается законом Клаузиуса-Мосотти и приобретает понятный простой микроскопический смысл в параметрах сил осцилляторов (χ):

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{4}{3}\pi n_{\text{ïîë}}\,\alpha_{\text{ïîë}} = \frac{4}{3}\pi n_{\text{ïîë}}\,\frac{\mathring{a}^2}{\grave{o}}\sum_{j=1}^{N_{\text{àòîì}}} \frac{\chi_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_j}. \qquad (16)$$

Важно подчеркнуть, что (16) предполагает динамическую (дисперсионную), а не статическую интерпретацию ε, и содержащуюся в ней молекулярную поляризуемость $\alpha_{\text{мол}}$ на частотах порядка 10^{14} Гц.

Прямыми экспериментами с дистиллированной водой в поляризованном свете обнаружено явление гистерезиса восстановления оптических свойств её приповерхностных структур на границе со стеклом при введении на некоторую глубину и удалении индуцирующего эти свойства кремниевого экрана.

Обнаруженное явление гистерезиса оптических свойств воды может служить механизмом феномена её «оптической памяти», широко используемой в медико-биологической психотропной практике.

Строгий количественный анализ совокупности оптических характеристик воды мог бы пролить свет на аналоги механизмов квантования естественных термодинамических взаимодействий в большом ансамбле наноструктур квантовых «точек» из молекул жидких конденсатов ближнего порядка.

Поскольку оптические методы в принципе – безинерционны, постольку они могут дать информацию о высокочастотных составляющих этих процессов, нижний предел времён релаксации в которых на каждую молекулярную степень свободы можно оценить из соотношения

$$\frac{kT}{2}\tau = \hbar,$$

где k – постоянная Больцмана, ħ – постоянная Планка и τ – неопределённость времени терморелаксации. Порядок величины $\tau = 5\cdot 10^{-12}$ (с).

Для того, чтобы время коллективной релаксации молекул возросло до микросекунд, т.е. $\tau = N\cdot 10^{-12} = 10^{-6}$ (с), их число должно представлять группу из миллионов частиц $N=10^6$, упакованных в куб с рёбрами из сотен молекул. Релаксациям в секундном диапазоне τ=1 с соответствовали бы пикомольные (10^{-12} моль) агрегации молекул жидкости.

Наблюдения межблочных границ с помощью методов поляризационно-оптического материаловедения на приборах эллипсометрического типа можно реализовать способом сканирования световых лучей по поверхности и по

вариациям её оптических параметров судить о координатах и протяжённостях этих границ.

Кинетические исследования времён перестройки ($\tau_к$) межблочных границ можно проводить и в режиме ожидания случайного пересечения луча этими областями со значимыми вариациям амплитудно-фазовых (Ψ-Δ) параметров стационарных зон и по скорости перестройки на них судить о линейных размерах блоков и их границ. Однако для наномольных агрегаций блоков время «ожидания» может оказаться большим: от десятков минут и нескольких часов.

Таким образом, при стационарных наблюдениях надповерхностных структур воды могут возникать случайные флуктуации её оптических констант (m=n-ik) в соответствии с законами термодинамической кинетики.

Анализ физико-химических свойств воды показывает, что оптической моделью её приповерхностных структур на воздухе может служить оптимальная и наиболее адекватная трёхслойная система в пяти средах от полубесконечной воздушной до полубесконечной чистой водной подложки:

- внешний – паровой молекулярный слой;
- средний – слой сил поверхностного натяжения воды;
- внутренний – тонкий газовый слой аут- диффузии растворённых в воде газов.

На рис. 1.36 приводится схема распределения веществ в этой трёхслойной модели приповерхностных структур чистой воды при нормальных условиях.

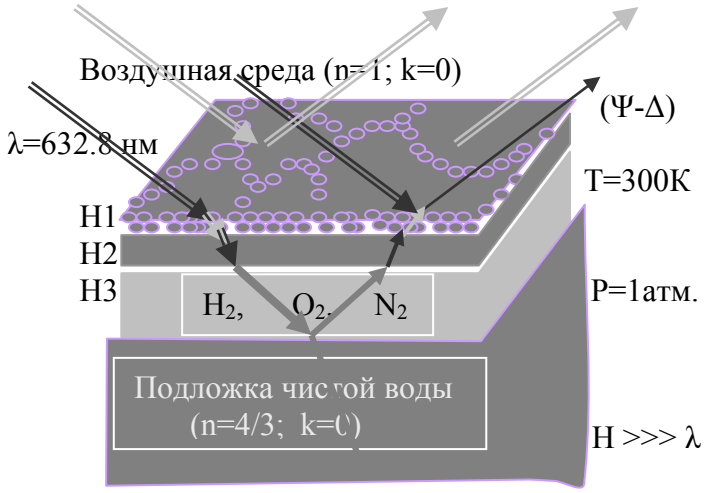


Рис.1.36 Трёхслойная приповерхностная структура воды:
H1 – паровой мономолекулярный слой;
H2 – собственный слой сил молекулярного натяжения;
H3 – слой аут-диффузии растворённых в воде газов.

Оптическая модель, представленная на рис.1.36, может быть существенно упрощена при замене воздушной среды на прозрачную призму из высокооднородного оптического кварцевого или близкого к нему стекла, например, марки К-8 с высоким содержанием окиси кремния. В этом случае исчезает паровой слой (H_1), уменьшается слой адгезионного контакта сил поверхностного натяжения (H_2) на границе вода-стекло и газы третьего слоя

(H_3) могут подняться вне зоны контакта призмы с водой. Следовательно, оптическая система переходит в однослойную структуру (H_2) с оптическим доступом контроля её оптических параметров при падении света под фиксированным углом призмы ($\varphi=65^0$) с нормальным входом и выходом лучей через её боковые грани.

Схема поляризационно-оптической диагностики измерения амплитудно-фазовых параметров $\Psi(\varphi)$-$\Delta(\varphi)$ отражённого света представлена на рис. 1.37.

В рассмотренной на рис.1.37 схеме опыта, вода находится между двумя экранами из диэлектрика (SiO_2) и полупроводника (Si). Следовательно, она входит в некий конденсатор, на пластинах которой существует контактная с нею разность $U_{Si\text{-}SiO2}$ электрохимических потенциалов. Действительно, ни кремний Si, ни его оксид SiO_2 не растворимы в воде и обладают стандартными электродными потенциалами U_{Si}=+0.102 В и U_{SiO2} = - 1.7 В по реакции $SiO_3^{2-} + 3H_2O + 4e^- = Si + 6OH^-$ или U_{SiO2} = - 0.857 В по реакции $SiO_2 + 4H^+ + 4e^- = Si + 2H_2O$ [20]. То есть, вода между экранами образует электролитический конденсатор и может аккумулировать и сохранять энергию внешнего ЭМ поля. Если на кремниевом экране создать микродисперсный Фурье-транспорант с помощью современных нанотехнологий, то он будет резонансно переизлучать в противофазе (отражение от более плотной среды в воздушную) эффективные волновые поля, способные погасить внешние потоки порождающих его слабых ЭМП.

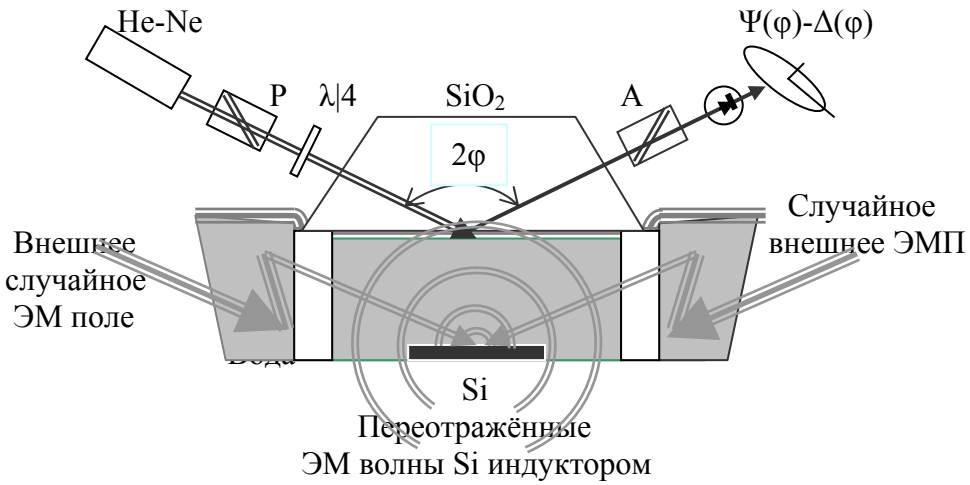


Рис. 1.37. Измерительная схема слоя поверхностного натяжения воды.

При удалении кремниевого экрана поле конденсатора, составленного из трёх последовательно соединённых, может сохраниться только в тонком (ёмком) контактном слое на границе со вторым диэлектрическим экраном призмы. Заметим, что при таком соединении полная емкость уменьшается – оказывается меньше меньшей.

Молекулярные электрофоретические силы в этих структурах воды определяют её дисперсионные диэлектрические, а, следовательно, и оптические константы, по вариациям которых можно судить о реструктуризации блочно-

доменной мозаики ближнего и дальнего порядков, как в объёме, так и на поверхности чистой воды.

На длине волны He-Ne лазера (λ=632.8 нм) вода [21] имеет показатель преломления порядка n = 4/3 и поглощения k = $\frac{\lambda}{4\pi}\alpha \approx 0.00304(6.328/12.56)10^{-5}$ $=1.5\cdot10^{-8}$. Показатель преломления прозрачного, как и вода, оптического стекла марки К-8 близок к 3/2. Его точные измерения представлены ниже.

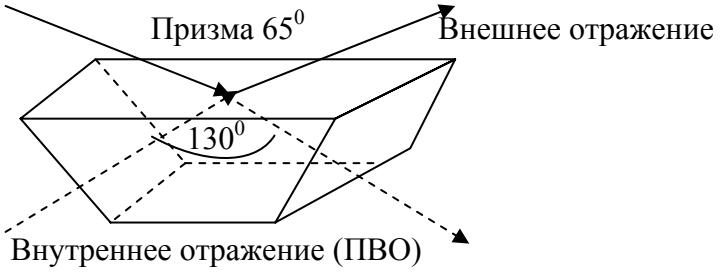


Рис.1.38. Контрольные измерения на призме из оптического стекла К-8.

На рис.1.39 представлены азимуты измерений ориентации поляризаторов «Р» и «А» в двух измерительных зонах эллипсометра ЛЭФ-2 (рис.1.37) для ряда углов падения φ.

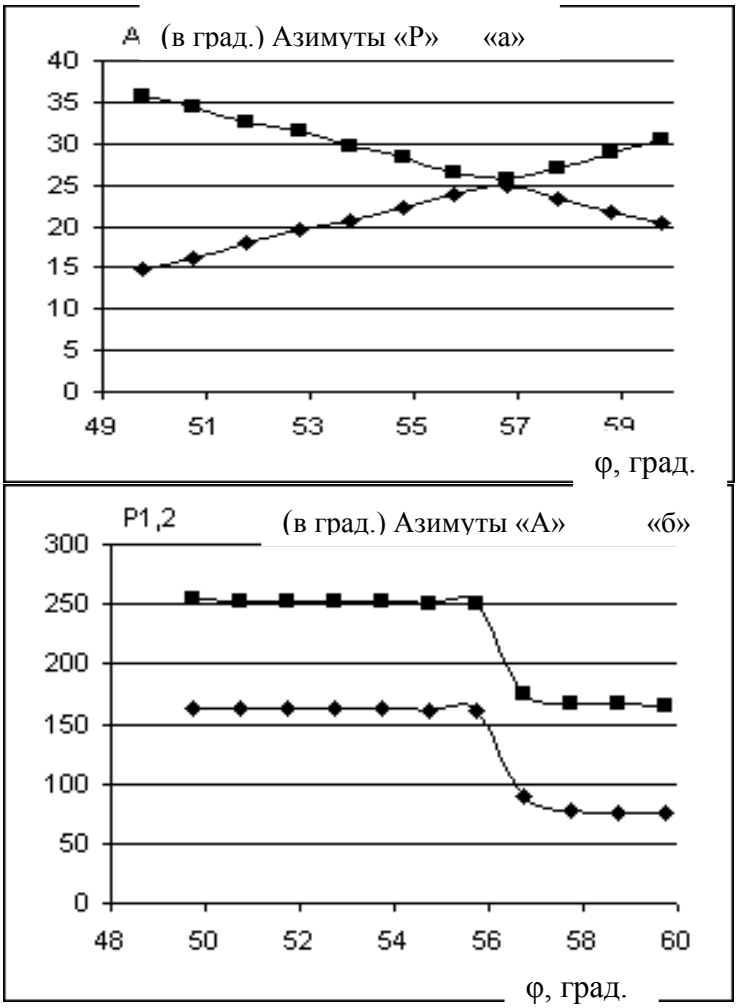


Рис.1.39. Зонные измерения на приборе ЛЭФ-2.

Измерения, представленные на рис.1.39.б, позволяют определить P_0=-241.12^0 – юстировочную константу прибора, а данные рис.1.39.а позволяют построить амплитудную функцию эллипса поляризации отражённого света, представленную на рис.1.40.

По графическим данным рис.1.40 угол Брюстера составляет величину $\varphi_{бр}$ = 56.56^0. Следовательно, оценка показателя преломления К-8: n = 1.51421.

Аналогичные оценки оптических констант (n, k) К-8 по модели идеальной границы Френеля приводят к усреднённому по углам показателю экстинкции k = 0.0087 ± 0.0040. Очевидно, что в экстинкции превалирует не механизм светопоглощения, а механизм светорассеяния на воздухе.

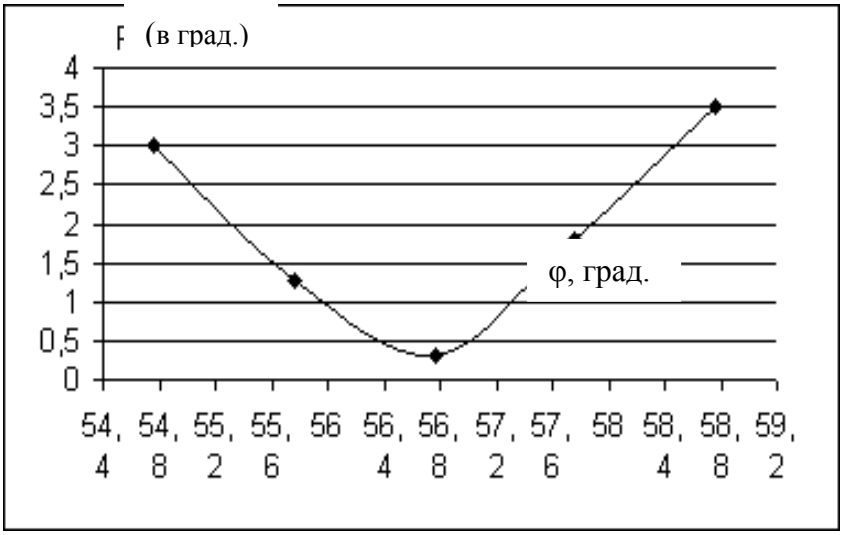


Рис.1.40. Амплитудная функция в окрестности угла Брюстера стекла К-8.

Рассмотрим данные эллипсометрических измерений на призме 65^0 в режиме НПВО, поскольку критический угол ПВО для К-8 имеет значение порядка 33^{0}11', т.е. много меньше углов падения 65^0 > 33^0. Физически это означает, что закон Снеллиуса перестаёт работать, т.к. синус угла преломления при этом угле падения из призмы на воздух должен принимать значение $3\sqrt{3}/4 \geq 1$. То же самое следует ожидать и на границе с водой.

Тем не менее, приборы выдают реальные значения амплитудно-фазовых параметров воздуха при угле φ=65^0**:** Ψ_{65}=44.999^0 и Δ=324.58^0, определяемой в виде линейной комбинации $\Delta = P_0 - (A_1+A_2)$.

Решение по этим данным обратной задачи эллипсометрии для модели идеальной границы стекло/воздух хорошо воспроизводит обратный показатель преломления 0.6604 с близкой к нулю экстинкцией. Т.о., оценка констант К-8 в модели идеальной френелевской границы с воздухом совпадает с данными брюстеровских измерений.

Аналитический алгоритм расчётов по методу эллипсометрии НПВО может состоять в следующих рабочих формулах.

Рассмотрим границу раздела конденсированной среды с комплексным показателем $m_1=n_1-ik_1$ преломления и газовой $m_2=n_2-ik_2$. Закон Снеллиуса для углов падения φ_1 и преломления φ_2 имеет вид:

$$\sin(\varphi_2)=\frac{\sin(\varphi_1)}{n_2^2+k_2^2}(n_1-ik_1)(n_2+ik_2)=s_1+is_2,$$

где введены обозначения $s_1=\dfrac{\sin(\varphi_1)}{n_2^2+k_2^2}(n_1n_2+k_2k_2);\ s_2=\dfrac{\sin(\varphi_1)}{n_2^2+k_2^2}(n_1k_2+n_2k_1).$

В этих обозначениях $\cos(\varphi_2)=\sqrt{1-\sin^2(\varphi_2)}=\sqrt{1-s_1^2+s_2^2-i2s_1s_2}=c_1+ic_2.$

Вводя так же дополнительные обозначения:

$$a=1-s_1^2+s_2^2,$$

$$b=-2s_1s_2,$$

$$\gamma=\begin{cases} arctg(b/a); & a,b>0 \\ \pi+arctg(b/a); & a<0 \\ 2\pi+arctg(b/a); & b<0,a>0 \end{cases}$$

комплексные составляющие косинуса мнимого угла преломления примут вид:

$$\begin{cases} \tilde{n}_1=\sqrt[4]{\grave{a}^2+\hat{a}^2}\cos(\gamma/2) \\ \tilde{n}_{21}=\sqrt[4]{\grave{a}^2+\hat{a}^2}\sin(\gamma/2). \end{cases}$$

Основное уравнение эллипсометрии (10) через обобщённые комплексные коэффициенты Френеля R^p и R^s можно записать в виде комплексной функции их отношения:

$$tg(\Psi(\varphi))\exp\{i\Delta(\varphi)\}=\frac{R^p}{R^s}=\rho+i\delta,\quad \tilde{a}\ddot{a}\mathring{a}\begin{cases} R^p=\dfrac{r_1+ir_2}{r_3+ir_4}=\rho_1+i\delta_1 \\ R^s=\dfrac{rs_1+irs_2}{rs_3+irs_4}=\rho_2+i\delta_2. \end{cases} \tag{17}$$

Здесь $\begin{cases} \rho=\dfrac{\rho_1\rho_2+\delta_1\delta_2}{\rho_2^2+\delta_2^2} \\ \delta=\dfrac{\delta_1\rho_2-\rho_1\delta_2}{\rho_2^2+\delta_2^2} \end{cases}$ при $\begin{cases} \rho_1=\dfrac{r_1r_3+r_2r_4}{r_3^2+r_4^2} \\ \delta_1=\dfrac{r_2r_3-r_1r_4}{r_3^2+r_4^2} \end{cases}$ и $\begin{cases} \rho_2=\dfrac{rs_1rs_3+rs_2rs_4}{rs_3^2+rs_4^2} \\ \delta_2=\dfrac{rs_2rs_3-rs_1rs_4}{rs_3^2+rs_4^2}, \end{cases}$

где $\begin{cases} r_1=n_2\cos(\varphi_1)-n_1c_1-k_1c_2 \\ r_2=k_1c_1-n_1c_2-k_2\cos(\varphi_1) \\ r_3=n_2\cos(\varphi_1)+n_1c_1+k_1c_2 \\ r_4=-k_1c_1+n_1c_2-k_2\cos(\varphi_1) \end{cases}$ и $\begin{cases} rs_1=n_1\cos(\varphi_1)-n_2c_1-k_2c_2 \\ rs_2=k_2c_1-n_2c_2-k_1\cos(\varphi_1) \\ rs_3=n_1\cos(\varphi_1)+n_2c_1+k_2c_2 \\ rs_4=-k_2c_1+n_2c_2-k_1\cos(\varphi_1). \end{cases}$

Решения прямой задачи эллипсометрии для уравнения (17) имеют вид:

$$\Psi(\varphi) = arctg\sqrt{\rho^2 + \delta^2},$$
$$\Delta = \begin{cases} arctg(\delta/\rho); & \delta, \rho > 0 \\ \pi + arctg(\delta/\rho); & \rho < 0 \\ 2\pi + arctg(\delta/\rho); & \delta < 0, \rho > 0 \end{cases} \qquad (18)$$

На рис.1.26.а,в представлены аналитические решения (18) для (17) в воздушной и водной средах под призмой из кварцевого стекла марки К-8. Эти решения не противоречат эксперименту при $k_{SiO2} > k_{H2O}$ и подтверждают теоретическую гипотезу [22] о расположении аномальной части фазовой функции на высоте углов 2π, а не 0, как это предполагалось в [3].

Задача экспериментального исследования принципиального положения о реструктуризации воды в присутствии внешних генераторов или пассивных индукторов (Г) состоит в том, чтобы обнаружить статистически значимые различия параметров чистой воды в отсутствие и присутствии этих индукторов при прочих равных условиях измерений (температуре, давлении, углах падения света и пр.) и единой методологии анализа экспериментальных данных.

Для уменьшения влияния газовых прослоек под зеркальной поверхностью воды измерения резонно проводить либо на каплях воды малого объёма, либо в объеме путём погружения экрана на разную глубину под отражающей поверхностью воды, схематично представленной на рис. 1.41.

Пассивные генераторы (Г) индуктивного реструктурирования воды представлены четырьмя образцами кремниевых пластин с нанесёнными на них рисунками в виде недоброкачественных (затёртых) регулярных Фурье-решёток для построения сложных интерференционных полей ЭМ волн.

Опыты проводились с 6 образцами Si пластин, одна из которых (№6) не имела Фурье-транспоранта на своей полированной поверхности в отличие от остальных, из которых только пластина под № 5 имела чётко выраженную структуру покрытия, а остальные – только затёртые следы, изображённые на рис.1.42.1.

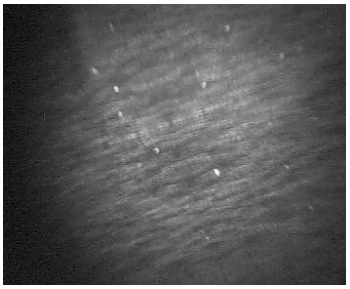
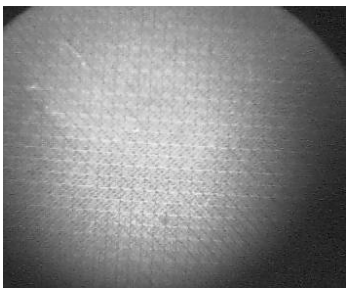
№1  №5 

Рис. 1.42. Образцы индукторов пассивной защиты от слабого ЭМ поля.

На рис.1.42 схематично представлены ОИ в виде зеркал H_2O, горизонтальные отражающие участки поверхности которых имеют разный клиренс высот от точек расположения генераторов её структурирования (Г).

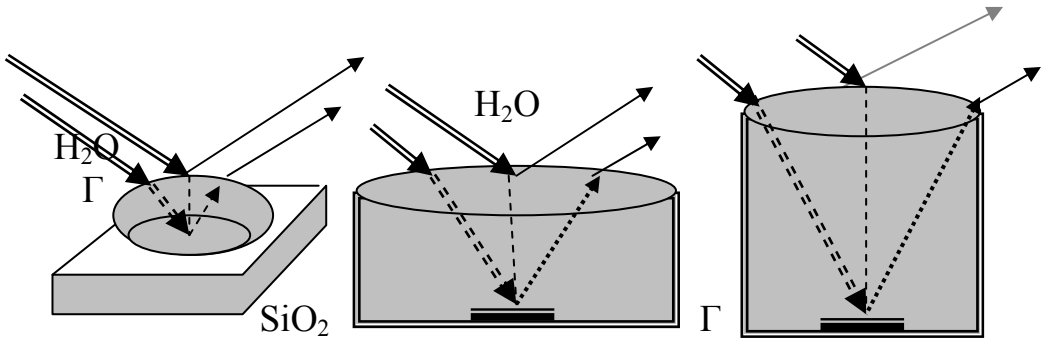


Рис. 1.41. Схема опыта с вариациями высот положения Г под водой.

В сводной таблице № 1 представлен протокол работы с Si- экранами.

Воспроизводимость первичных измерений азимутов поляризаторов без сбоя юстировки пучка на диафрагме ФЭУ поддерживалась на уровне ±30″.

Личностная ошибка разовых измерений при визуальных отсчётах А и Р составляла ±15 угловых секунд. Статистика измерений понижала её до ±10″.

Согласно расчётным данным (см. рис. 1.26.а), фазовые функции Δ эллипса поляризации отражённого света при угле падения $\varphi = 65^0$ для воды и воздуха по методу НПВО отличаются более, чем на 20^0, тогда как амплитудные функции Ψ при этих углах ПВО практически неразличимы.

Эксперимент хорошо согласуется с этим теоретическим положением.

Действительно, по данным измерений в п.1,2 эта разность «фаз» составляет $22^0$45'. При повторных измерениях (п.17,18) на свежей порции воды для исследования образца №4 в дополнительных эллипсометрических зонах, эта разность оказалась равной $22^0$52'. Семь минут разницы между ними можно объяснить разницей объёмов этих порций воды.

Введение чистой кремниевой пластины (п.3) не изменило стартовое значение фазовой характеристики чистой воды ($A_1+A_2=249^0$20'), хотя азимуты анализатора сильно перестроились (±15')!

Выведение этой пластины (п.4 измерений в сводной таблице №1) не значительно изменило азимуты (до момента переюстировки луча на диафрагме ФЭУ) – около 6', однако это отразилось и на сдвиге фазовой функции, которая после переюстировки всё-таки изменилась на 13'. Скорее всего, неустойчивость этих измерений связана с кинетикой (за время около 3 мин) перестройки внутренних конденсаторов системы после удаления пассивного экрана.

Введение (п.5) новой пластины №1 с затёртым (шероховатым) Фурье-узором не существенно модифицировало фазовую функцию на 3'. Шаги по п.6 и п.7 показывают реактивность системы на движение экрана (пластины №1) в воде с размахами перестройки и восстановления до 7', причём наиболее амплитудная перестройка возникает при расположении диэлектрического и полупроводникового экранов друг против друга. Боковые модификации слабее – до 4', но они говорят о проявлении коллективного дальнодействия в воде

даже при нахождении кремниевого экрана на плаву (на слое аномально высоких сил поверхностного натяжения воды).

Таблица № 1. Протокол первичных азимутальных измерений на призме К8.

№п/п	Объект измерения	P_1	A_1	P_2	A_2	Примечания
1	контроль воздуха	$71^0 40'0''$	$180^0 4'0''$	$341^0 46'0''$	$92^0 1'0''$	$\Psi_0 \approx 45^0, \Delta_0 = 325^0$
2	контроль воды	$70^0 47'$	$169^0 30'$	$341^0 05'$	$79^0 50'$	$\Psi^0 \approx 45^0, \Delta^0 = 347^0$
						$\Delta = 596^0 41' - A_1 - A_2$
3	пластина № 6 в воде	$70^0 46'30''$	$169^0 45'$	$340^0 48'$	$79^0 35'$	$A_1 + A_2 = 249^0 20'$
4	вода без пласт. №6			$340^0 45'$	$79^0 31'$	юстировка
				$340^0 49'$	$79^0 24'$	юстировка
		$70^0 46'$	$169^0 47'$			юстировка
		$70^0 43'30''$	$169^0 41'15''$			юстировка
		$70^0 44'30''$	$169^0 42'30''$	$340^0 40'$	$79^0 25'$	$A_1 + A_2 = 249^0 07'$
5	модификация воды пластиной №1 вне К-8	$70^0 40'30''$	$169^0 49'0''$	$340^0 32'$	$79^0 15'$	$A_1 + A_2 = 249^0 04'$
6	вода+пласт. №1 под К8	$70^0 35'15''$	$169^0 55'0''$	$341^0 34'$	$79^0 14'30''$	$A_1 + A_2 = 249^0 09'$
7	пласт. №1 снова вне К-8	$70^0 36'30''$	$169^0 49'$	$340^0 31'30''$	$79^0 12'$	$A_1 + A_2 = 249^0 01'$
8	вода без пласт. № 1			$340^0 30'$	$79^0 08'$	
						переюстировка
9	вода с №2 вне К-8	$70^0 37'$	$169^0 49'$	$340^0 40'$	$79^0 03'30''$	$A_1 + A_2 = 248^0 53'$
10	вода+пласт. №2 под К8	$70^0 36'$	$169^0 48'$	$340^0 38'$	$79^0 05'15''$	$A_1 + A_2 = 248^0 53'$
11	контроль воды без №2	$70^0 38'45''$	$169^0 50'30''$	$340^0 39'$	$79^0 12'15''$	$A_1 + A_2 = 249^0 03'$
						№3 плавает
12	пластинка №3 вне К-8	$70^0 39'30''$	$169^0 52'$	$340^0 42'$	$79^0 02'$	$A_1 + A_2 = 248^0 54'$
13	пластинка №3 под К-8	$70^0 43'$	$169^0 51'$	$340^0 38'30''$	$79^0 11'$	$A_1 + A_2 = 249^0 02'$
14	контроль воды без №3	$70^0 44'30''$	$169^0 53'$	$340^0 48'$	$79^0 04'$	$A_1 + A_2 = 248^0 57'$
						№5 плавает
15	пластинка №5 вне К-8	$70^0 47'$	$169^0 56'30''$	$340^0 49'$	$79^0 08'$	$A_1 + A_2 = 249^0 04'$
16	пластинка №5 под К-8	$70^0 35'$	$169^0 56'30''$	$340^0 47'$	$79^0 09'$	$A_1 + A_2 = 249^0 05'$
						смена зон
17	контроль воздуха в смежных зонах	$71^0 18'$	$182^0 08'$	$161^0 09'$	$90^0 56'30''$	измерений $\Delta_0 = 323^0 37'$
18	контроль воды	$70^0 41'$	$170^0 27'$	$160^0 39'$	$79^0 45'$	$\Delta^0 = 346^0 29'$
19	пластинка №4 вне К-8	$70^0 47'$	$170^0 24'$	$160^0 41'$	$79^0 30'30''$	$A_1 + A_2 = 249^0 54'$
20	пластинка №4 под К-8	$70^0 41'$	$170^0 21'$	$160^0 45'$	$79^0 35'$	$A_1 + A_2 = 249^0 52'$

Пункты 9 и 10 показывают, что вода как бы насытилась воздействиями родственных экранов, на объекте №2 фаза минимизировалась, уменьшившись на очередные 8', и не меняясь в зависимости от положения его в воде.

Общее свойство, которое следует из количественного анализа всех этих вариаций наиболее информативной для интерпретации поведения фазовой функции под влиянием шести экранов Г, включая п.11 – п.16, состоит в том, что среднее значение $(10.4 \pm 3.6)'$ размахов её вариаций (максимум до 18') при введении экранов вдвое выше средних значений $(5 \pm 1)'$ размахов её вариаций при выведении этих экранов. Исходя из этого, можно сделать статистически значимый вывод о том, что в воде существует гистерезис восстановления

оптических свойств приповерхностных слоёв воды на границе с кварцевой призмой при удалении индуцирующих их вариации кремниевых экранов.

Выполнение этих постановочных экспериментов с водой в поляризованном свете при нормальных внешних условиях раскрывает сложную картину динамических свойств воды, главное среди которых состоит в открытии гистерезиса запаздывающего восстановления оптического состояния поляризационных параметров воды при удалении индуктора внешнего для поверхностных слоёв воды ЭМП.

Обнаруженный здесь гистерезис восстановления оптических параметров воды на поверхности может служить физическим механизмом её так называемой «памяти» к ЭМ воздействиям.

Убедительным подтверждением этой гипотезы служит тот факт, что коэрцитивная интенсивность вариаций первичных поляризационно-оптических характеристик света характерно убывает по степенному закону с увеличением расстояния от источника ЭМП до контролируемых ППС воды (см. рис.1.41).

Важно подчеркнуть, что вторичная информация – значения показателей преломления и экстинкции – смазывают эффект гистерезиса, оставаясь в среднем неизменными при чёткой релаксации азимутов самих поляризаторов прибора, в связи с чем мы рекомендуем при поляризационно-оптических измерениях публиковать так же данные о первичных измерениях всех азимутов поляризаторов прибора в измерительных зонах.

Детальное изучение этих эффектов требует дополнительного планирования кинетического, термодинамического и поляризационно-оптического комплексного эксперимента.

Можно так же учитывать дополнительную корреляцию вариаций оптических параметров воды на границе с прозрачной призмой, позволяющей использовать модель идеальной границы Френеля для оценки показателя преломления с практически нулевой экстинкцией на внутренней границе стекла, однако более корректнными являются модели с эффективной толщиной переходного контактного слоя воды на стекле.

В электрохимии методы эллипсометрии [23] широко использовались для определения толщины контактного слоя и контроля пассивации электродов по вариациям оптических констант поверхности. Используется следующий линейный алгоритм:

$$\begin{cases} \Delta = \Delta_0 - \alpha d \\ \Psi = \Psi_0 + \beta d, \end{cases} \tag{19}$$

где n – слоя при к≈0:

$$\begin{cases} \alpha = \dfrac{4\pi}{\lambda} \dfrac{(1/n^2 - 1)(\cos^2(\varphi_1) - a)\cos(\varphi_1)\sin^2(\varphi_1)}{(\cos^2(\varphi_1) - a)^2 + a_1^2} \\ \beta = \dfrac{2\pi}{\lambda} \dfrac{a_1(1/n^2 - 1)(1 - n_1^2\cos^2(\varphi_1))\cos(\varphi_1)\sin^2(\varphi_1)\sin(2\Psi)}{(\cos^2(\varphi_1) - a)^2 + a_1^2}, \end{cases}$$

причём в принятых ранее обозначениях $\begin{cases} a = \dfrac{n_1^2 + k_2^2}{(n_2^2 + k_2^2)^2} \\ a_1 = \dfrac{2n_2 k_2}{(n_2^2 + k_2^2)^2}. \end{cases}$

В формулах (19) слагаемые Ψ_0 и Δ_0 могут быть рассчитаны по формулам (10), как параметры идеальной границы без значительного слоя ($d \approx 0$). Слабым местом этой линеаризации (19) по толщине слоя является предпосылка $d<\lambda$ и полное пренебрежение поглощением в этом слое ($к \approx 0$). Безо всяких ограничений следует решать задачу (15) для модели однородного слоя численными методами на ЭВМ (ПК). Однако из формул (19) следует, что малые вариации (δ) фазовой функции $\delta\Delta = \alpha(\delta d)$ прямо пропорциональны вариациям толщины переходного контактного слоя, о которых можно судить по рассмотренным вариациям уменьшения или возрастания фазовых функций.

Строгий алгоритм решения прямой задачи эллипсометрии в однослойной модели показывает, что порядок толщины контактного слоя на границе с кварцевым экраном составляет величину между 70 – 90 нм с рыхлым показателем преломления (существенно ниже объёмных значений) и слабой экстинкцией.

§1.3.5. Релаксационная $U_{фэу}$ – эллипсометрия

Многие биологические взаимодействия на клеточно-физиологическом уровне в силу низкоэнергетического характера определяющих их биохимических реакций являются каталитическими. Ферментативная кинетика в классе молекулярно-иммунологических процессов по существу регулируется нанотехнологическими механизмами, поскольку взаимодействия высоких структурных порядков (вплоть до третичных и четвертичных) в комплементарных процессах по ключевой специфике локализуются на их наноразмерных фрагментах в активных группах атомов больших молекул в очагах зональных квантовых точек (КТ).

Диагностика физико-химических и медико-биологических свойств био-материалов в нано- масштабе их линейных размеров порядка сотен нанометров в отличие от масштаба макроскопических длин в биосредах или их физиологических растворах может привести к открытию принципиально новых явлений и свойств исследуемых материалов. Это связано с тем, что фундаментальные квантово-механические свойства атомных взаимодействий в активных зонах КТ могут иметь специфические особенности невидимые или в среднем невилируемые в масштабе макросистем. Локальные КТ биосистем являются донорами (источниками, генераторами) энергии, механизмы диссипации которой также не являются классическими.

В целях сокращения количества смертей и страданий от рака и ему подобных вирусных заболеваний типа ВИЧ Национальный институт рака (NCI) усиливает к 2015 году программу нанотехнологических исследований в части радикального изменения способов диагностики, визуального наблюдения и лечения рака.

В программах NCI предполагаются разработки новейших наноприборов, способных обнаруживать рак на самых ранних стадиях, локализовать его в организме и обеспечивать транспортировку лекарств, отслеживая его уничтожение.

Поляризационно-оптические приборы типа лазерных эллипсометров, естественно, относятся к приборам нанотехнологического класса, поскольку даже френелевское отражение на идеальных границах раздела сред происходит в физических поверхностях субнанометрового диапазона. Конкурирующие механизмы молекулярного релеевского рассеяния и другие эффекты линейной и нелинейной оптической спектроскопии также формируются в масштабах энергетических ям соответствующих зон КТ.

Следовательно, использование прецизионных эллипсометров (ручного управления) для исследования кинетики автоволновых процессов в биосистемах является весьма перспективным и актуальным направлением новых нанобиологических исследований.

Рассмотрим эффекты, сопровождающие наблюдения тест-систем на ВИЧ.

При специальной настройке эллипсометра обнаружены взаимодействия отдельных компонент ВИЧ-тест-системы с элементами оптической ячейки наблюдения в поляризованном свете за кинетикой гетерофазных реакций, в результате которых вскрылась система автоколебательных процессов адгезии биополимеров системы в поле дисперсионных сил прозрачного экрана ячейки.

Обнаруженные эффекты интерпретируются как классическое явление Белоусова-Жеботинского в кинетике адсорбции молекул иммуно-глобулинов тест-системы ВИЧ на измерительную ячейку, которые сопровождают основной механизм сложной клеточной релаксационной динамики вирусного транспорта в реакциях образования комплекса антиген-антитело во времени с собственной биоритмикой иммуноферментных взаимодействий.

Наиболее непосредственную информацию о геометрии расположения молекул и атомов в квантовых точках дают рентгено- и электроно- графия.

Ценную информацию о микропараметрах подобных систем дают также методы определения дипольных моментов полярных связей, в частности, эллипсометрия [34].

Более опосредованную, но тоже ценную информацию получают методами спектроскопии [25]. Наиболее интересную спектромолекулярную информацию дают методы исследования химических сдвигов и констант спин-спинового взаимодействия, такие как ЭПР- и ЯМР- спектроскопии.

Энергетические данные, кроме того, дают прямые термохимические [26], [27] методы исследования материалов.

В комплексе хирально-оптических методов используются исследования дисперсии оптического вращения (ДОВ) и кругового дихроизма (КД), которые совместно с классической поляриметрией позволяют различать энантиомеры молекул и их фрагментов, чувствительных к динамике пространственных реконфигураций в процессе эволюции внутренних взаимодействий.

Информация подобного рода обычно собирается в специализированных банках справочно-научных данных, среди которых наиболее представительным является Кембриджский банк структурных данных [28].

Системный анализ термодинамических условий в ансамбле квантовых точек показывает, что все возможные релаксационные процессы эволюции её подсистем могут развиваться только по монотонным экспонентам без каких-либо колебаний, как это и положено для параболических дифференциальных уравнений, описывающих основные механизмы теплопроводности в краевой постановке задач математической физики.

Объектом исследования послужила оригинальная продукция тест-систем на СПИД Санкт-Петербургского филиала московской фирмы «АВИЦЕНА», в которой используются синтетические гаптены 160, 120, 41, HCV-core, NS4 с около часовым временем диагностики.

Фирма успешно внедряет так же систему АВИЦЕНА-НСМУ СКРИН ТМ ПЦР, предназначенную для качественного выявления ДНК цитомегаловируса в плазме крови, цельной крови, моче и слюне испытуемого с анализом их на принадлежность группе риска методами полимеразной цепной реакции.

В обычной эллипсометрии сигнал гашения $U_{фэу}$ в фоторегистрирующей системе прибора считается индикаторным. В то же время он содержит важную дополнительную информацию, в частности, об энергетической кинетике $U_{фэу}$ (t) развития исследуемой системы во времени. В общем случае этот сигнал несёт количественную информацию о спектрах аномального отражения в скользящих лучах ($\varphi \to \pi/2$), аналогичного известному в рентгеновской оптике эффекту Ионеды [19]. На рис.1.42 представлены спектры АО от зеркал воды и кремния.

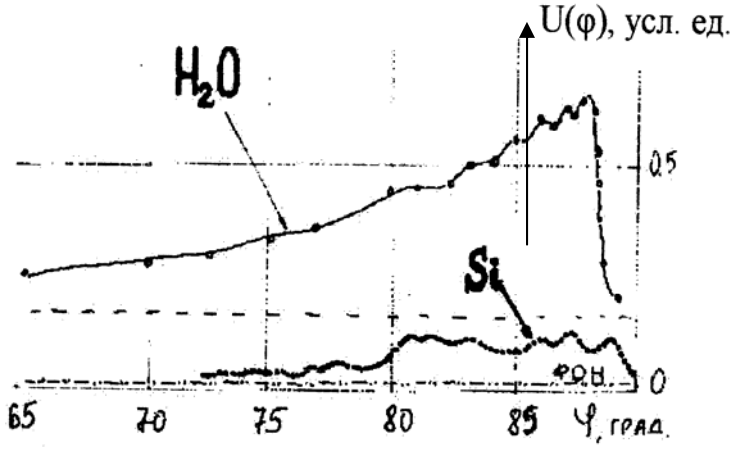


Рис.1.42. Сигнал $U_{фэу}$ гашения света в скрещенных поляризаторах ЛЭФ.

Физический смысл угловой зависимости $U_{фэу}$ остаточного негашения поляризованного света в скрещенных поляризаторах чрезвычайно прост. Дело в том, что поле отражённой волны формируется всеми реальными механизмами взаимодействия света с веществом. Гашение света линейными поляризаторами (до фонового уровня $U_{фон}$) действует на волны идеального френелевского отражения с эллиптической в общем случае поляризацией. Следовательно, все остальные лучи, формируемые механизмами диффузного переизлучения и описываемые индикатрисами направленного рассеяния, естественно, и определяют эту остаточную интенсивность с характерным для эллипсометров профилем $U_{фэу}$ (φ) огибающей индикатрис на околозеркальных углах отражения. В коротковолновой рентгенооптике лучи аномального отражения сдвинуты в сторону скользящих траекторий по сравнению с зеркальным отражением. В видимом диапазоне они перекрываются, но на скользящих углах при отражении от сильно диффузных ОИ зеркальные лучи теряются, и АО может скачком слегка изменить угол своей пеленгации.

Контрольная проверка характеристик Ψ-Δ, представленная на рис.1.43 и 1.44, показала их типовой характер для кюветы из кубического кристалла CaF_2 и испытуемых жидкостей на основе физиологических растворов поваренной соли. Из рис.1.43 видно, что амплитудные функции имеют характерный минимум при углах псевдо Брюстера, наиболее глубокий для чистого диэлектрика – кристалла CaF_2 (в идеале равный 0) и характерными сдвигами в область больших углов для веществ с большим показателем рефракции ($n = tg\ \varphi_{min}$).

В работе регистрировалась кинетика процессов, реально происходящих в тест-системах на СПИД фирмы «Авиценна».

С целью исследования этой кинетики при всевозможных вирусологических атаках живых клеток была изготовлена герметизированная проточная кювета Ван-дер-Ваальса с электрооптическим доступом контроля и управления жизнедеятельностью клеток in vitro.

Её размеры ($\pi r^2 h$ при r порядка 10 – 15 мм) соизмеримы с клеточными форменными элементами биологических тканей. Ожидалось, что прохождение вируса через клетки в этой кювете могут сопровождаться химическими изменениями значения диэлектрической проницаемости (ε) жидкостной системы клетки.

Она в свою очередь должна непосредственно коррелировать с кинетикой изменения показателя преломления системы $\varepsilon = (n - ik)^2$. Здесь компоненты комплексного показателя преломления характеризуют показатель рефракции n (вещественная часть) и показатель экстинкции или светоослабления k (мнимая часть), который зависит как от поглощения $\alpha=4\pi\kappa/\lambda$ вещества, так и от реального светорассеяния на его поверхности или в объёме. Показатели рефракции и экстинкции легко регистрируются на эллипсометрах. Следовательно, можно полагать, что изменения показателя преломления тождественны процессам иммуноферментных реакций РНК вируса при его продвижении в клетке.

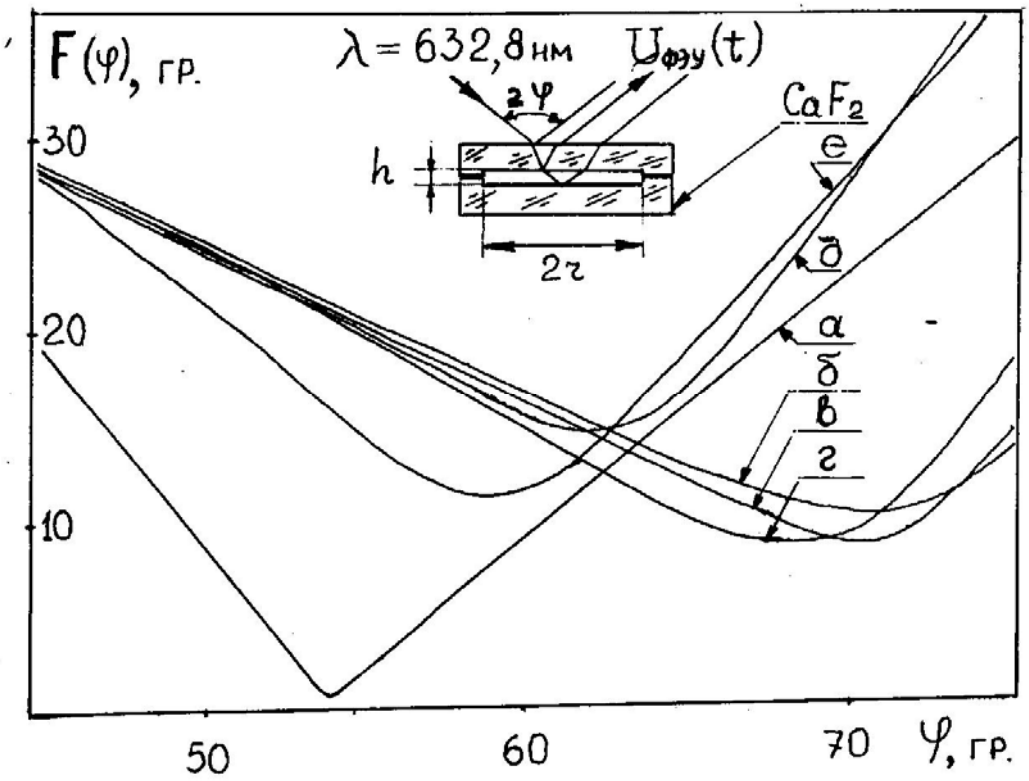


Рис.1.43. Амплитудная функция Ψ при отражении от слабых растворов: на диэлектрике (кривая «а» - от верхней части оптической ячейки из CaF_2); на физрастворе (кривая «е» - от верхней части кюветы и «д» - нижней); на растворах aB и aG сверху («г» ~ aB , «в» ~ от aG и «б» ~ смеси aB+aG).

На рис. 1.44 представлены кривые, объясняющие значительное увеличение погрешности эллипсометрических измерений на концентрированных растворах aG+aB тест-системы, когда за минуты регистрации (±30″) при стационарных измерениях азимутов поляризаторов параметры состояния света могли отклониться на доли градуса для ОИ.

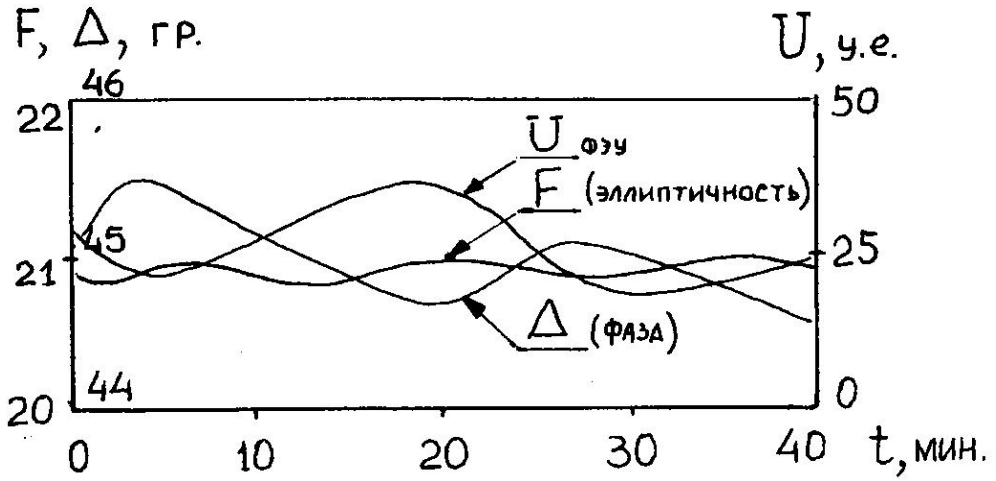


Рис.1.44. Наблюдение во времени $U_{фэу}(t)$ и Ψ-Δ параметров при $\varphi=45^0$.

Вариации во времени размахов измеряемых величин, представленных на рис.1.44, оказались не погрешностями измерений, а кинетической развёрткой процессов комплексообразования в тест-системе aG + aB = GB-complex(t).

Более детальный анализ и длительные суточные измерения поведения одного и того же раствора (aG + aB) позволили установить автоволновые режимы в этой системе, представленные на рис.1.45.

Представленные на рис.1.44 данные длительных наблюдений говорят о самобытном характере поведения компонент реакции aG + aB = BG-complex(t), идентичного автоволновым процессам взаимодействия биополимеров, известного в науке как эффект Белоусова-Жеботинского [29]. Высокочастотные компоненты спектра $U_{фэу}(t)$ здесь приходятся на околоминутный диапазон, а низкочастотные – на порядок выше.

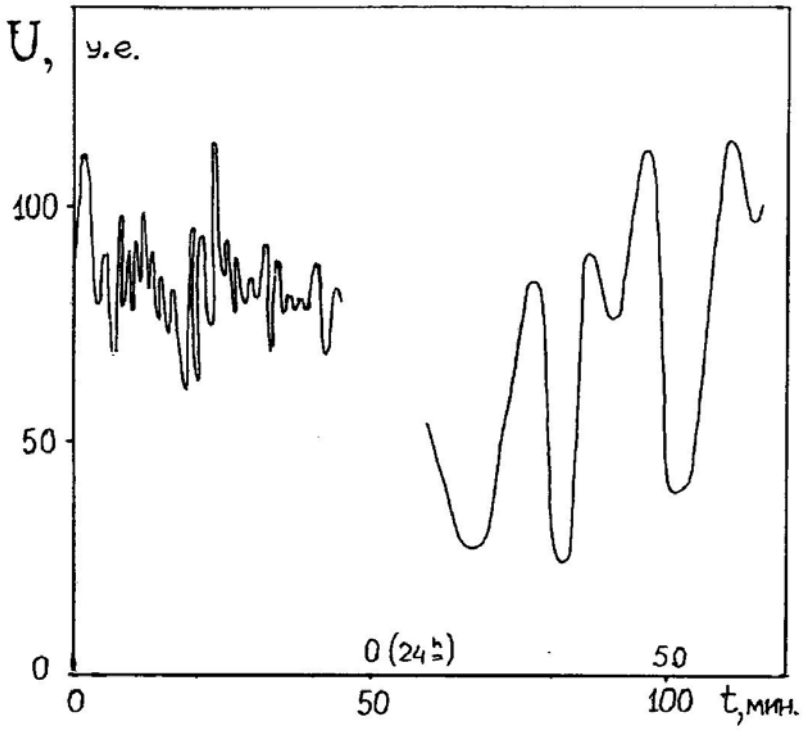


Рис.1.45. Обертоны сигнала $U_{фэу}(t)$ в растворе aG+aB.

Наблюдения кинетического поведения компонент тест-системы под прозрачным гладко отполированным окном оптической ячейки наблюдения позволили выявить детали аналогичных авторелаксационных феноменов на рис.1.46 и 1.47.

Концентрированный солевой раствор козьего альбумина (белок-А) с момента (t=0) приведения его в контакт с оптической ячейкой наблюдения из CaF_2, согласно данным рис.6, демонстрирует асимптотическое уменьшение амплитуды и частоты атак адгезии биополимеров с поверхностью диэлектрика – наслоение с блочным экранированием за своеобразный околочасовой период.

Высокочастотные компоненты спектра $U_{фэу}(t)$ здесь, так же как и на рис.5 приходятся на околоминутный диапазон, а низкочастотные – на порядок больше.

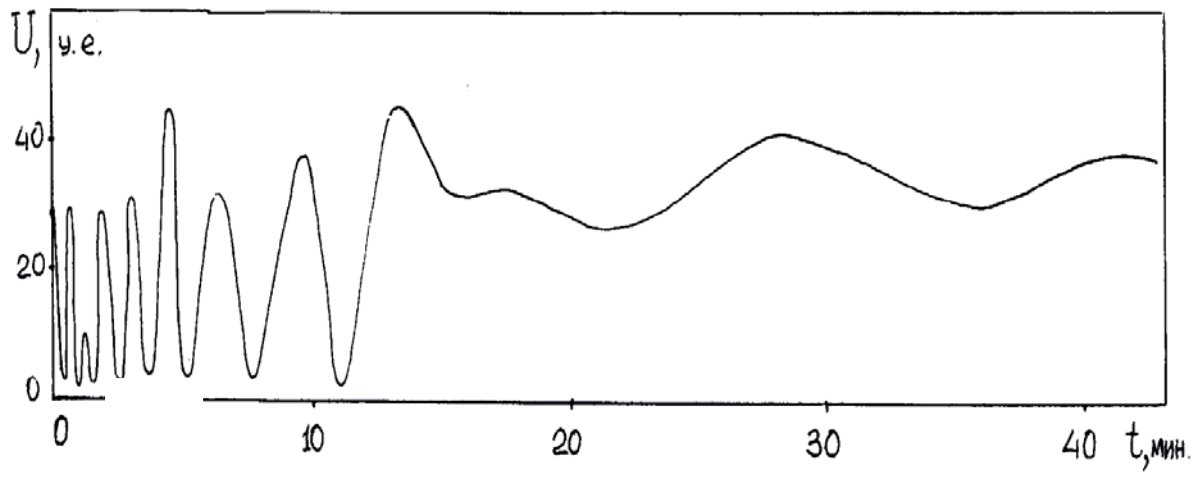


Рис.1.46. Поведение во времени aB- компонента ВИЧ-тест-системы.

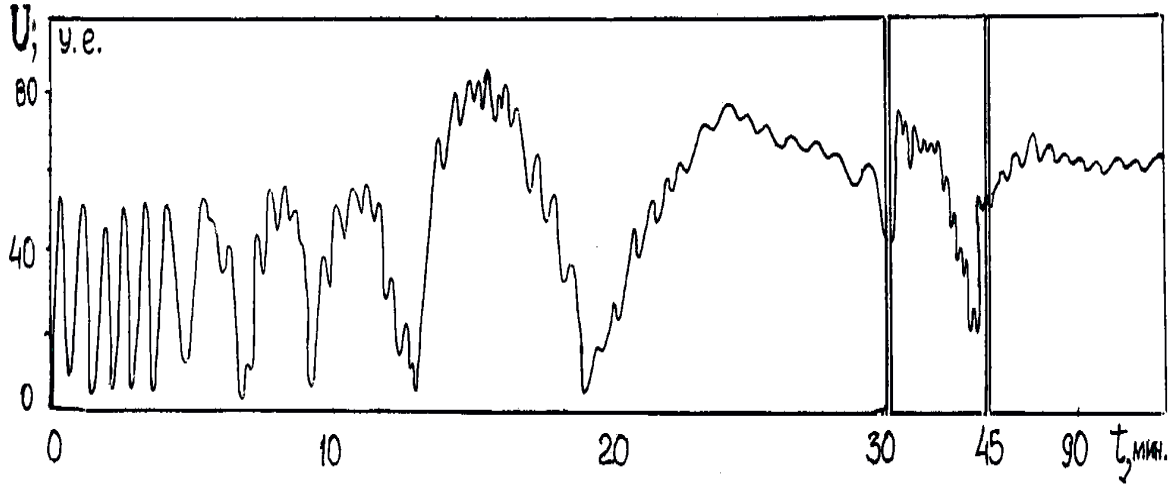


Рис.1.47. Поведение во времени aG- компонента ВИЧ-тест-системы.

Поведение во времени aG- компонента ВИЧ-тест-системы представлено на рис.1.47. Оно выглядит сложнее адгезии белка-А: просматривается эстафетный механизм перехода высокочастотных интенсивных атак в более инерционные атаки целых блоков без асимптотического уменьшения их амплитуды, но с заметным уменьшением амплитуд атак высокочастотных составляющих. Однако, в конце концов, адгезия, по-видимому, релаксационно устанавливается в приповерхностном слое этого ОИ.

Высокочастотные компоненты спектра $U_{фэу}(t)$ здесь почти удвоились по сравнению с процессами на рис.1.45 и 1.46 (до полуминутного диапазона в блоках), а низкочастотные – прогрессивно уменьшились.

Рассмотрим интерпретацию полученным кинетическим данным.

Поскольку реактивность сложных систем обычно ранжируется на быстродействие наиболее медленных составляющих, постольку совместное поведение растворов aG и aB вблизи диэлектрического экрана логично происходит с околоминутной ритмикой высокочастотных компонент, но без заметного затухания - авторелаксационно.

Спектрально-временной анализ компонент смеси растворов представлен на рис.1.48 и 1.49. Данные на рис.1.48 показывают кинетическое распределение во времени $\delta U(t)$ энергетических амплитуд деполяризации светового сигнала в разбалансировке гашения $U_{фэу}(\tau)$ на периодах осцилляции $\tau(t) = t_{i+1}(U_{min}) - t_i(U_{min})$, типичное для статистики Ферми-Дирака: $\delta U(t) = \dfrac{U_{max} - U_{min}}{e^{\frac{t-t_0}{\tau(t_0)}} + 1}$, где $\tau(t_0)$ – полуширина зоны перегиба в окрестности точки перегиба t_0 . Характерное перевалочное время для aG составляет величину $t_0 = 24$ мин при полуширине перевалочного периода $\tau(t_0) = 2$ мин.

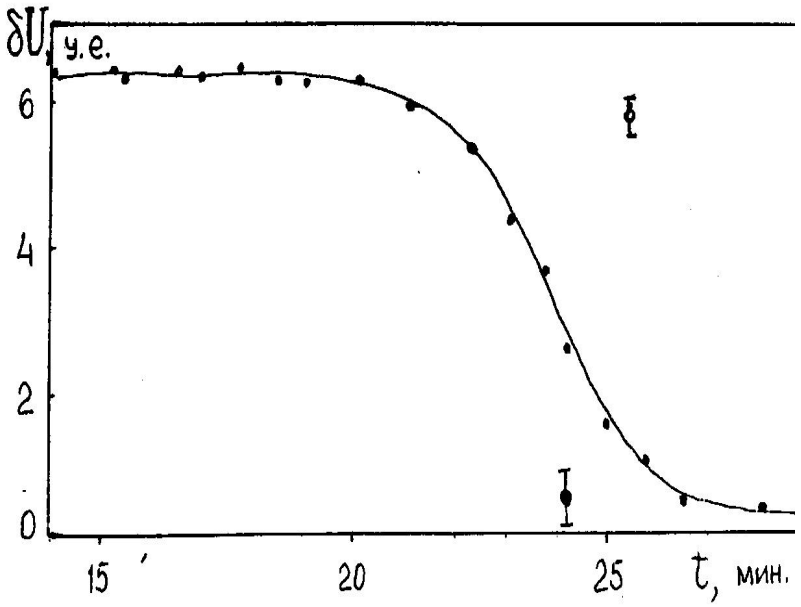


Рис.1.48. Убывание амплитуд перепадов $\delta U(t)$ аналогового сигнала $U_{фэу}(t)$

На рис.1.49 представлены темпы прогрессивного нарастания периодов $\tau(t) = t_{i+1}(U_{min}) - t_i(U_{min})$ глобулизации aG вблизи диэлектрического экрана контроля поляризационных осцилляций $U_{фэу}(t)$ раствора в логарифмическом масштабе.

Из приведённых на рис.1.49 данных видно, что поляризационная активность aG в растворе на границе с диэлектрическим экраном, действительно, состоит из двух этапов с переломом при переходе от высокочастотных к низкочастотным режимам релаксаций в точке t_0=24 мин.

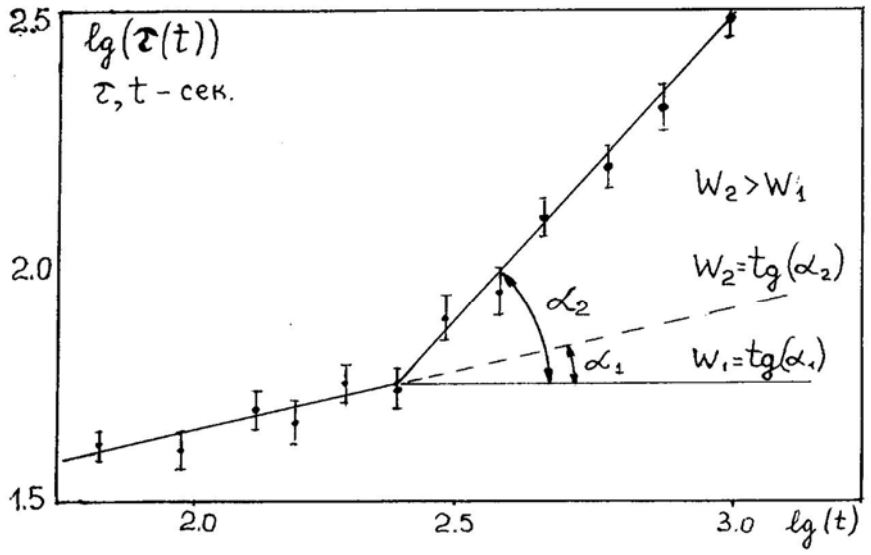


Рис.1.49. Нарастания темпов $\tau(t)=t_{i+1}(U_{min})-t_i(U_{min})$ осцилляции $U_{фэу}(t)$.

Выводы.

Методами эллипсометрии НПВО при специальной настройке в приборах ручного управления сигнала гашения $U_{фэу}$ на стартовый минимум $U_{фэу}=U_{фон}$ удаётся проследить за релаксационной кинетикой взаимодействий в сложных биополимерных растворах aB+aG и в составляющих их оптически активных компонентах (физрастворах aB и aG) вблизи диэлектрического экрана ячейки наблюдения.

По сравнению с релаксационными кривыми адгезии биополимеров к экрану ячейки наблюдения компонентов тест-системы на СПИД фирмы «АВИЦЕНА» реакция aB+aG = BG комплексообразования оказалась вопреки законам термодинамики растворов не релаксационного, а автоколебательного типа с характерными временами высоко- и низкочастотных составляющих, индуцированных компонентами этой комплементарной реакции между aB и aG. По-видимому, энергетика этих взаимодействий выше адсорбционной к экрану, а колебательный механизм предсказуем по частотному спектру составляющих компонент комплексообразующей системы.

Остаётся рассмотреть обоснование этого эффекта Белоусова-Жеботинского для иммуноферментной реакции. Более семидесяти семи лет тому назад Лотка [30] сформулировал гипотезу о колебательном характере ступенчатых реакций с положительной обратной связью во внутреннем звене: $A \rightarrow B \leftrightarrow C \rightarrow D$.

Избыточное вещество (A) задаёт реакцию нулевого порядка на первой ступени со скоростью $к_0$ образования продукта (B) с распадом на смесь BC со скоростью $к_1$. На второй ступени генерации продукта (C) из смеси BC (со скоростью $к_1$) наблюдается также и его деградация со скоростью $к_2$. На третьей ступени образуется конечный продукт цепочки (D) из C с той же скоростью генерации $к_2$. Эти процессы можно описать системой:

$$\begin{cases} \dfrac{dB}{dt} = k_0 - k_1 BC \\ \dfrac{dC}{dt} = k_1 BC - k_2 C \\ \dfrac{dD}{dt} = k_2 C \end{cases} \qquad (20)$$

Конечный продукт (D) не входит в первые два уравнения системы (20), поэтому её точки стационарности можно анализировать по частям, решая систему первых двух уравнений отдельно от третьего. Обращение скоростей образования B и C в ноль даёт два алгебраических уравнения связи коэффициентов равновесных концентраций B_0 и C_0:

$$\begin{cases} \kappa_0 = \kappa_1 B_0 C_0 \\ \kappa_1 B_0 C_0 = \kappa_2 C_0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C_0 = \dfrac{\kappa_0}{\kappa_2} \\ B_0 = \dfrac{\kappa_2}{\kappa_1} \end{cases} \qquad (21)$$

Для анализа конфликтных механизмов нарушения устойчивости этих решений в (21) зададим малые (x, y) вариации концентраций $A(t) = A_0 + x(t)$ и $B(t) = B_0 + y(t)$. При подстановке этих форм в первые два уравнения системы (20) получаем новую систему с квадратично малым членом ($xy \to 0$):

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = -k_2 y - k_1 xy - \dfrac{k_1 k_0}{k_2} x \\ \dfrac{dy}{dt} = k_1 xy + \dfrac{k_1 k_0}{k_2} x \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = -k_2 y - \dfrac{k_1 k_0}{k_2} x \\ \dfrac{dy}{dt} = +\dfrac{k_1 k_0}{k_2} x \end{cases} \qquad (22)$$

Вводя обозначения $\omega^2 = \kappa_1 \kappa_0$ и $2\delta = \omega^2_0/\kappa_2$, систему (2) можно записать одним уравнением второго порядка:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 ..... \Rightarrow x(t) = e^{-\delta t}[c_1 Cos(\omega t) + c_2 Sin(\omega t)], \qquad (23)$$

где параметры корней характеристического уравнения операторов (λ) дифференцирования этого уравнения $\lambda^2 + 2\delta\lambda + \omega^2_0 = 0$ ($\lambda_{12} = -\delta \pm i\omega$ при $\omega^2 = \omega^2_0 - \delta^2$ и $i^2 = -1$), во-первых, определяют затухающий характер релаксационных решений (23) к устойчивому фокусу (21) при отличных от нуля положительных декрементах затухания δ или, наоборот, к катастрофически неустойчивому фокусу (∞) при отрицательном декременте ($\delta < 0$, $e^{-\delta t} \to \infty$) и, во-вторых, объясняют гармонические устойчивые резонансные ($\omega = \omega_0$) колебания при $\delta = 0$.

§1.4. Компьютерное моделирование свойств решений прямой задачи эллипсометрии для однородного слоя

Свойства обратных решений ОУЭ для второй оптической модели ОИ не могут быть описаны аналитически. Поэтому для демонстрации их свойств можно использовать номограммы. На рис. 1.50 представлен пример типичной номограммы решений прямой задачи ОУЭ для прозрачных покрытий на техническом стекле.

Для методов компьютерного моделирования по авторским программам составлены табулограммы численных решений ОУЭ для модели однородного слоя при всевозможных параметрах толщины и показателях поглощения и экстинкции, входящих в комплексный показатель преломления этих слоёв.

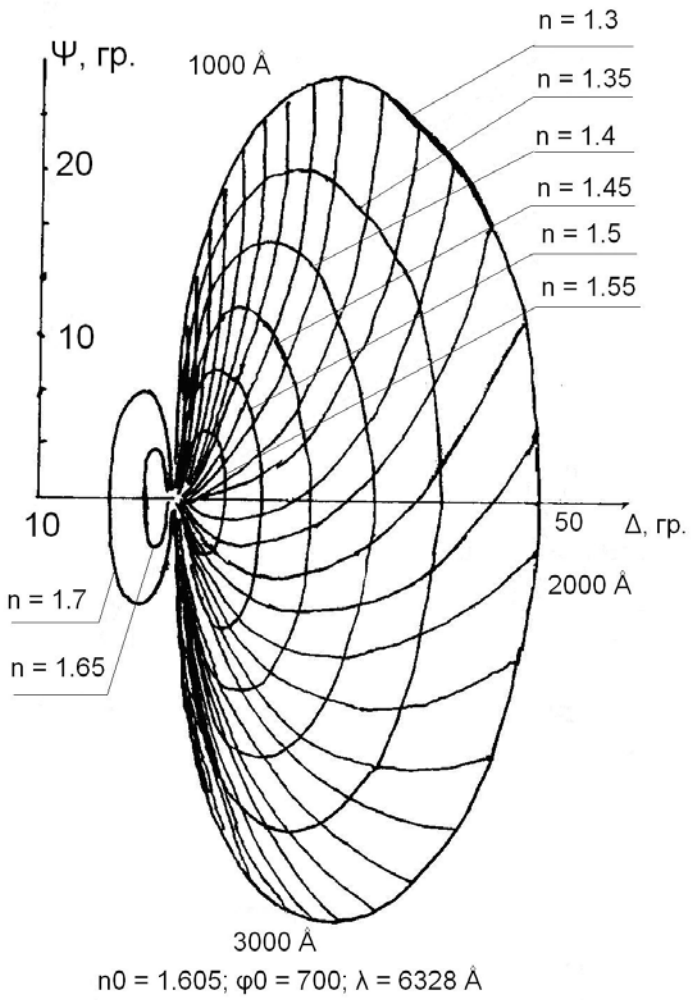


Рис. 1.50. Номограмма Ψ_φ-Δ_φ характеристик ОИ от d и n прозрачных слоёв.

§1.4.1. Типовые решения прямой задачи ОУЭ для однородного слоя.

Для оптических систем, описываемых в приближении эффективных однородных слоёв постоянной толщины (d=const) и оптических констант (n,k),

ОУЭ (15) имеет достаточно сложную трансцендентную конфигурацию с чувствительными к числовым режимам комплексными экспонентами.

Прямые решения ОУЭ для этой оптической модели (15) могут вывести фазовую функцию $\Delta(\varphi)$ вне экспериментально допустимого интервала от 0^0 до 360^0. Традиционный переход на первый лист Римана может привести к разрыву непрерывности при графическом представлении этих решений. Амплитудная функция Ψ также может выйти за привычный интервал измерения от 0^0 до 45^0.

Если $\Psi(\varphi)$ от углов падения в так называемом обычном P-представлении развивается в интервале от 45^0 до 90^0, то её легко перевести в двойственно сопряжённое Q-представление простым вычитанием $\Psi_Q=90^0-\Psi_P$. В этом случае экстремум амплитудной функции, вместо максимума вблизи 90^0, принимает вид локального минимума в окрестности углов псевдо Брюстера.

На нижеследующих рисунках, отражающих типовые свойства решений прямой задачи эллипсометрии для однослойной оптической модели, можно увидеть все эти замечания.

Полный набор строгих численных решений прямой задачи для ОУЭ (15) представлен соответствующими таблицами для наиболее часто встречающихся оптических систем в третьей главе настоящего пособия.

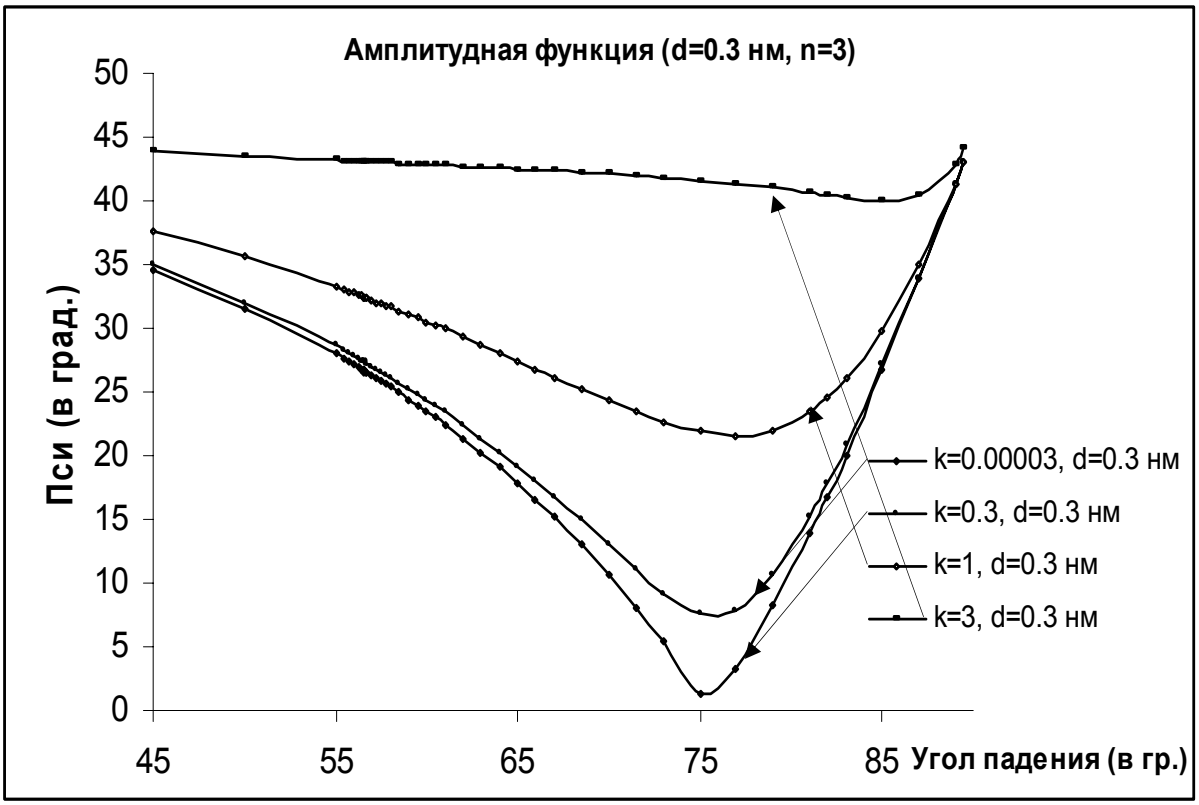


Рис. 1.51. Семейство $\Psi_p(\varphi)$ по параметру k для слоя 3Å (n=3) на SiO_2.

Интерпретация данных рис.1.51 проста. Слой молекулярной толщины в 0.3 нм с большой оптической плотностью, вдвое превышающей подложку (n=3), оказывается достаточно оптически активным, чтобы отражать как среда, угол

Брюстера для которой (около 75^0) много больше кремнезёмной (около 55^0). Рост экстинкции при этом приводит к типовому повышению минимума $\Psi(\varphi_{бр})$ вплоть до металлически высокого уровня (под 45^0). При этом характерно вправо сдвигаются углы псевдо Брюстера.

Фазовая функция $\Delta(\varphi)$, представленная на рис. 1.52 для этой же системы, имеет типовую тенденцию перехода от 180^0 до 0^0 за исключением сверхмалой экстинкции, для которой просматривается эффект проникновения из более плотной в менее оптически плотную среду с явлением ПВО (со скачком фазы до 360^0). Сдвиг углового положения точек перегиба фазовых функций вправо синхронно отражает аналогичное поведение амплитудных функций с ростом значений параметра экстинкции k слоя, как доминирующих по активности частей всей оптической системы. При этом углы псевдо Брюстера закономерно больше 75^0.

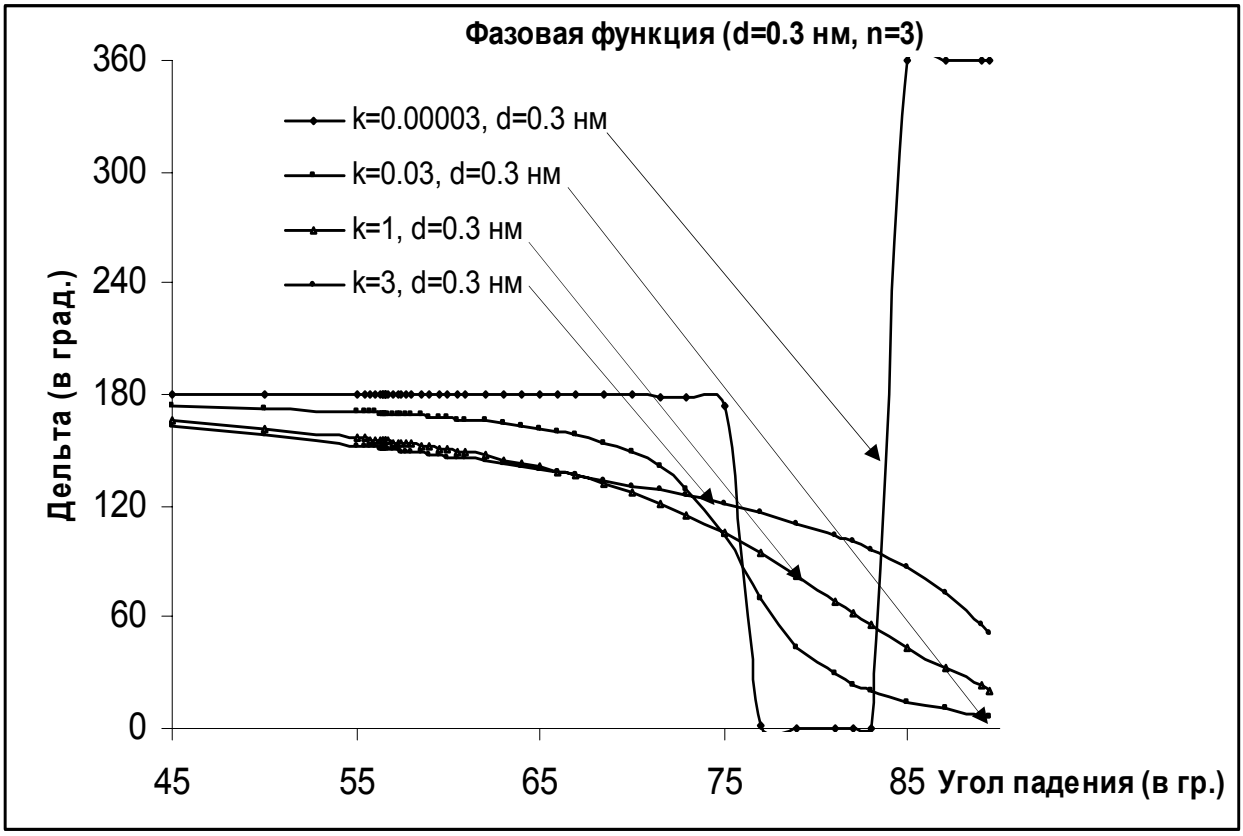


Рис. 1.52. Семейство $\Delta(\varphi)$ по параметру k для слоя 3Å (n=3) на SiO_2.

На рис. 1.53 представлены аналогичные рис.1.51 $\Psi_Q(\varphi)$ данные для подобного слоя (n=3) с на порядок большей толщиной (3 нм).

Особенность экранирующего эффекта слоя повышенной толщины (десяток мономолекулярных слоёв) состоит в том, что в этой среде с ростом экстинкции от самых малых значений направление сдвига углов псевдо Брюстера меняется на противоположное – влево. Получается как будто эффективное уменьшение комплексного показателя преломления m = n – ik (не по модулю, а по фазе) в относительно контрастных по оптической плотности средах регулирует и сдвиг углов псевдо Брюстера. Однако при больших экстинкциях (n = k = 3) типовое

поведение направления рассматриваемого сдвига восстанавливается. Кроме того, удивительным представляется и тот факт, что повышенное значение параметра толщины слоя так же приводит к существенному уменьшению стартового (по экстинкции) значению углов псевдо Брюстера (около 55^0 справа – как бы через относительно толстый слой становится виднее относительно менее оптически плотная подложка).

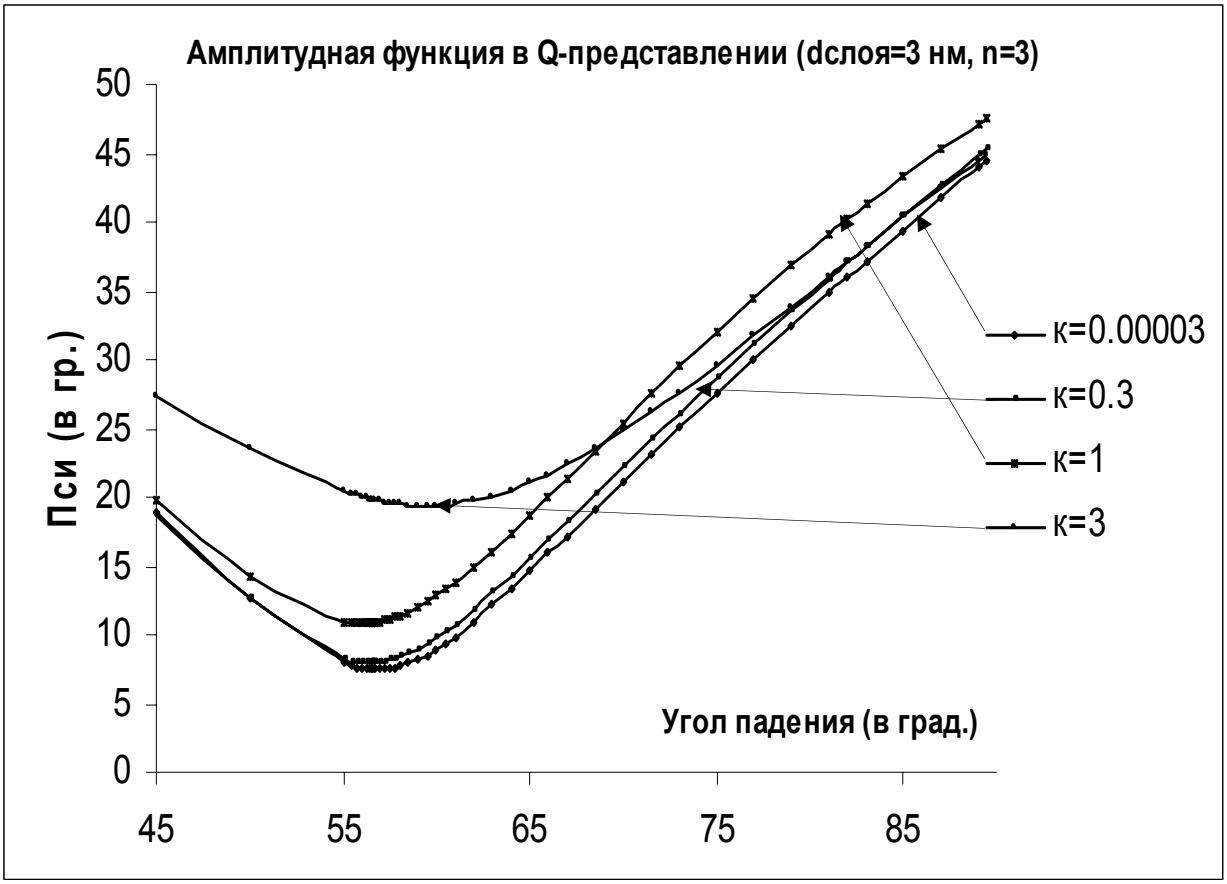


Рис. 1.53. Семейство $\Psi_Q(\varphi)$ по параметру k для слоя 30Å (n=3) на SiO_2.

Семейство фазовых функций $\Delta(\varphi)$ для этой системы, представленное на рис. 1.54, имеет характерный для относительно толстых слоёв ход от 180^0 до 360^0 с характерным перегибом в окрестности 270^0.

Поведение амплитудно-фазовых характеристик состояния поляризации света, отражённого от однослойных оптических систем с разными толщинами (до половины длины волны), представлены на рис. 1.55.

Из рис. 1.55 видно, что толстые слои сдвигают углы Брюстера вправо (80^0).

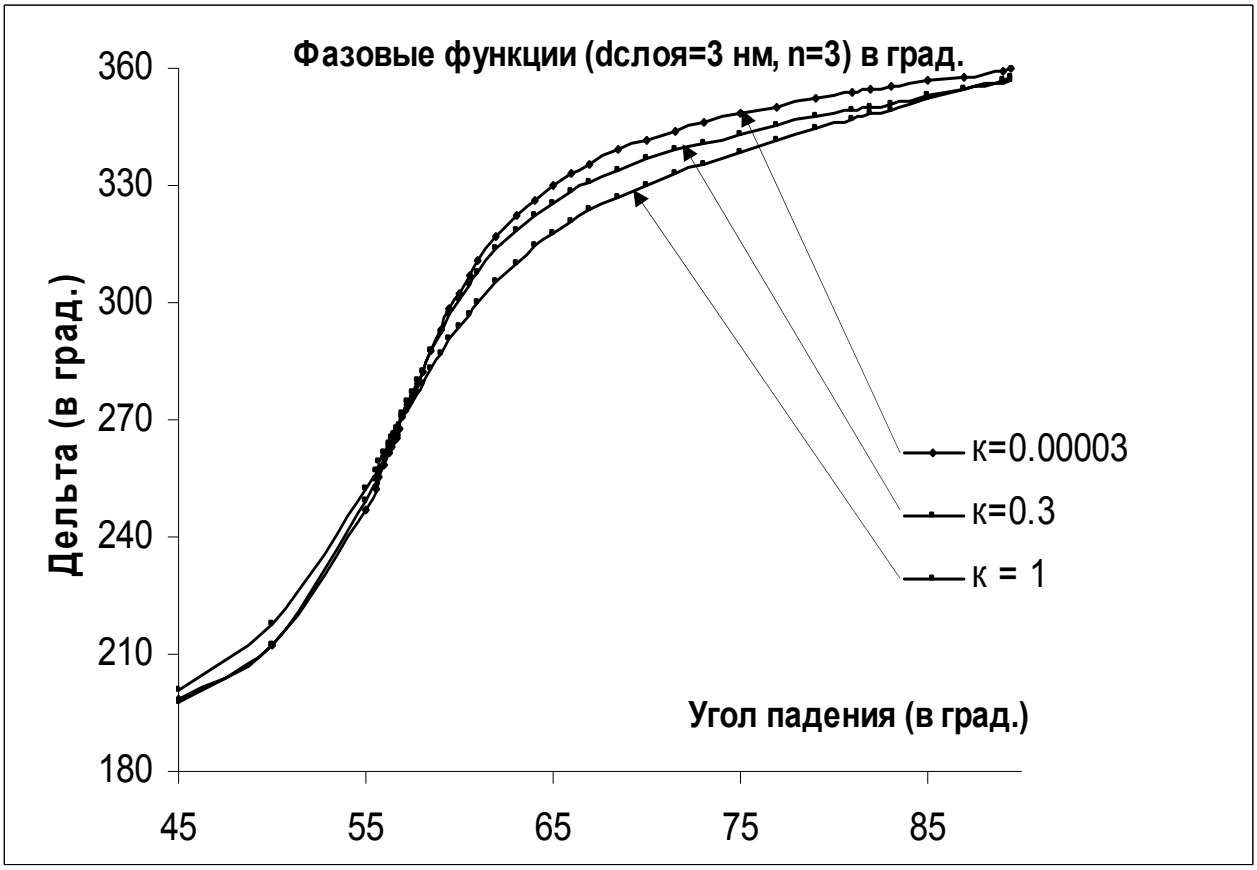


Рис. 1.54. Семейство Δ(φ) по параметру k для слоя 3Å (n=3) на SiO_2.

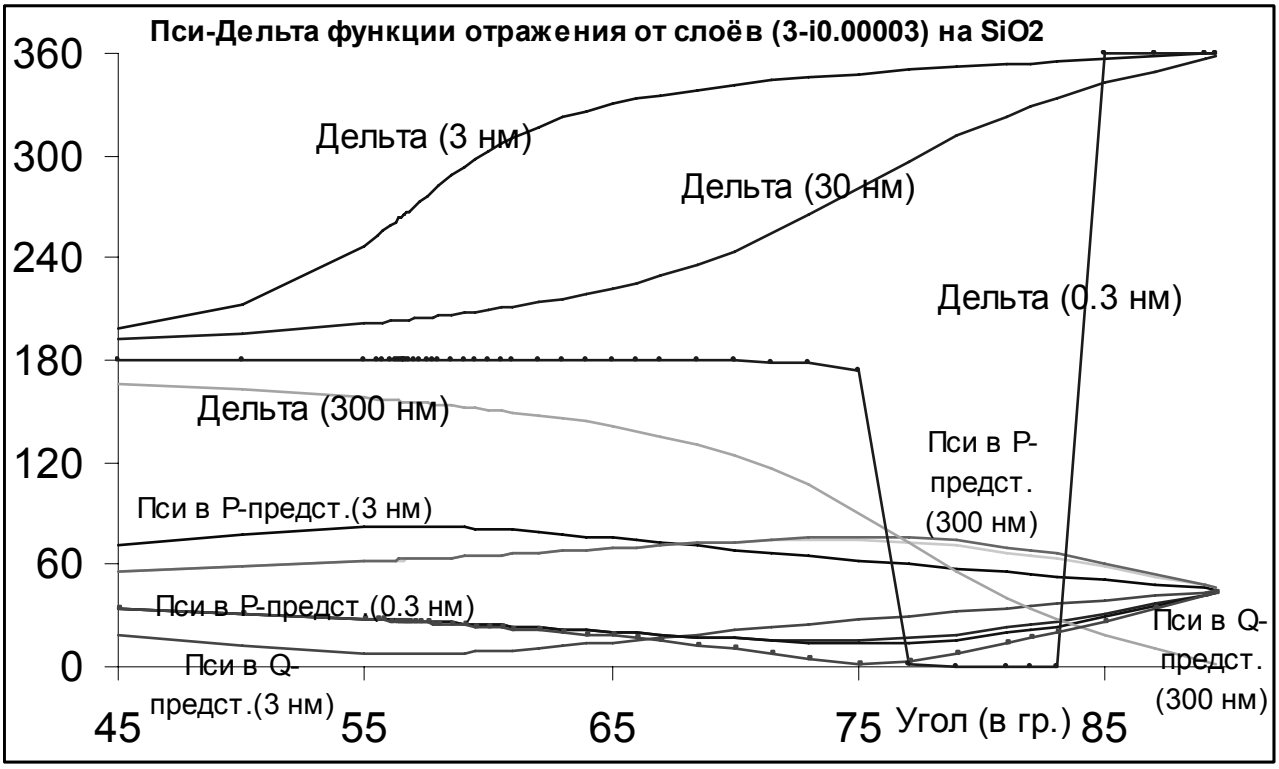


Рис. 1.55. Семейство Ψ-Δ от φ по параметрам k и d для слоёв на SiO_2.

§1.4.2. Контрольные примеры решений ОУЭ для однослойной модели.

Проверка данных для этих диаграмм полностью отвечает расчётным критериям, что позволяет доверять им и для не апробированных систем.

a). $\theta = 70^0$
Si; m=3.0+i0.02

b). $\theta=70^0$
Ge; m=5.4+i0.77

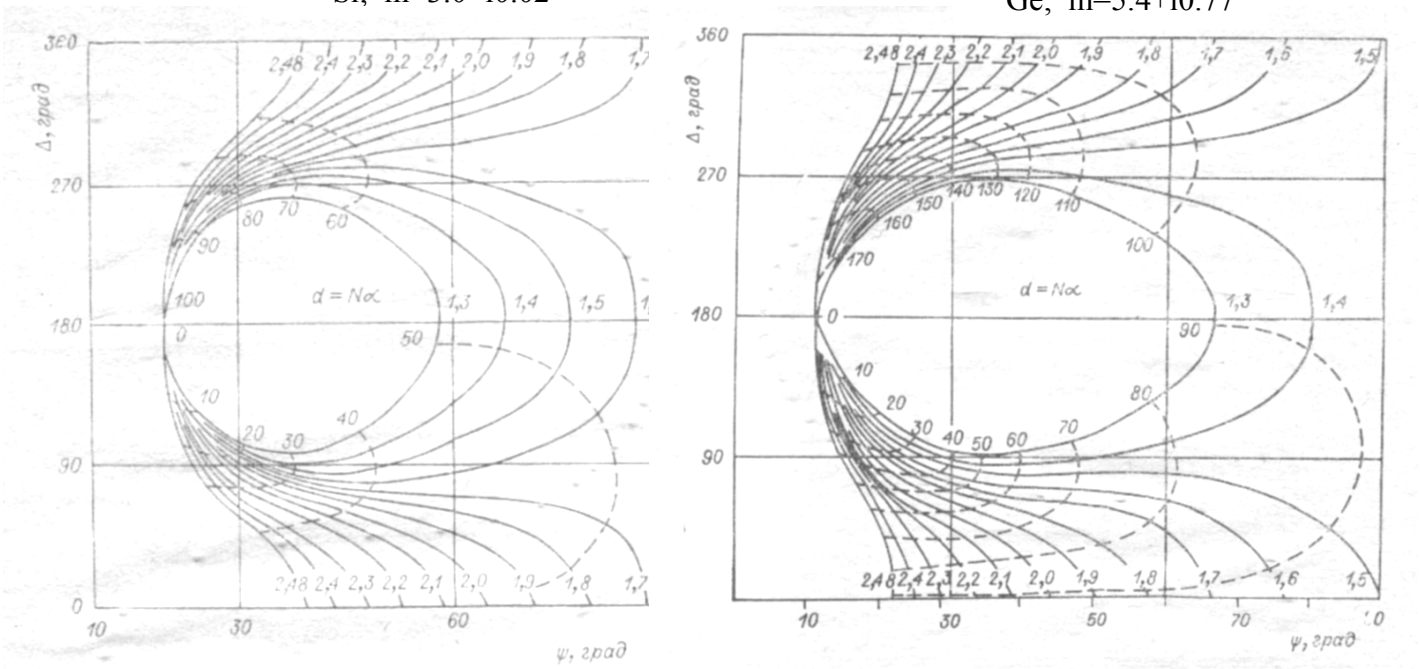


Рис.1.56. Типовой вид функций Ψ, Δ(φ) для Si и Ge ($1.3 \le n \le 2.48$).

Для сравнения на рис 1.57 представлены контрольные расчёты номограмм Ψ-Δ для однослойных покрытий на германии, подобные типовым на рис. 1.56.б.

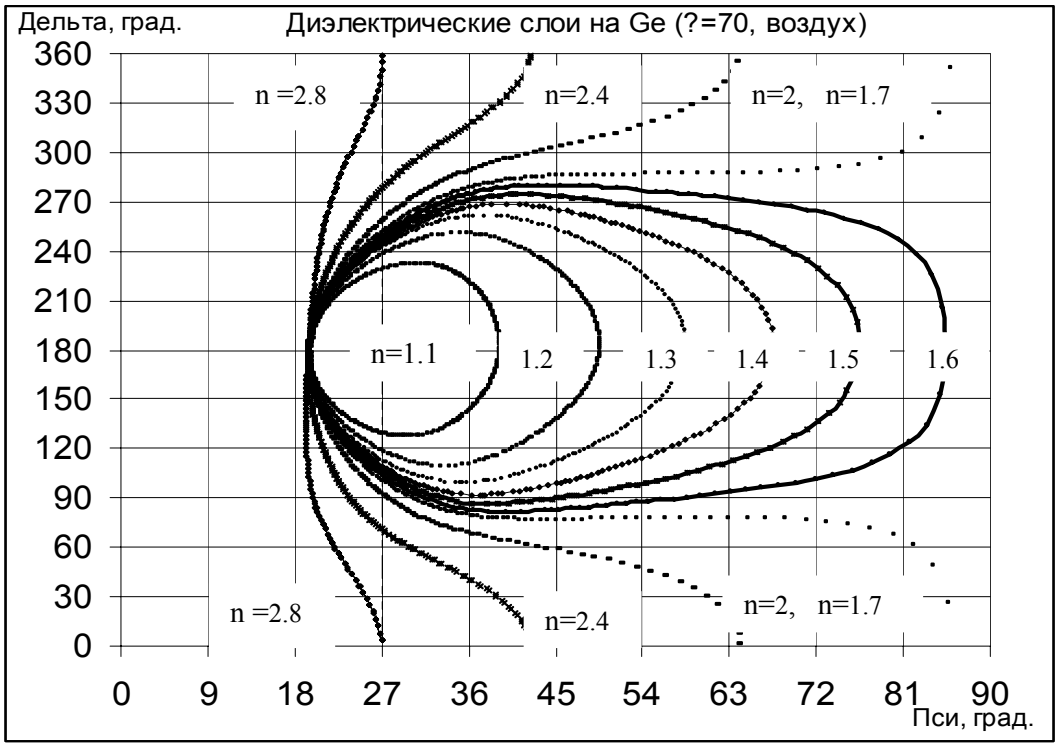


Рис.1.57. Контрольные расчёты Ψ, Δ(φ) углов для германия ($1.3 \le n \le 2.48$).

Аналогичная Рис.1.57 картина получается и для кремниевых зеркал с тонкими слоями прозрачных диэлектрических покрытий, пространственная периодичность которых описывается формулой

$$d_0^{(\varphi,n)} = \frac{\lambda/2}{nCos(\varphi_{ïðåë})} \xrightarrow[n\to\infty]{} 0 \qquad (24)$$

§1.4.3. Свойства решений обратной задачи эллипсометрии для слоя.

Экспоненциальная форма представления комплексных чисел $m=|m|e^{i\alpha} = |m|(\cos(\alpha) + i\cdot\sin(\alpha))$ подчёркивает их основное свойство периодической зависимости от параметра α. Более того, аддитивно-мультипликативные операции с тригонометрическими функциями возвращают нас к этому свойству, например, для $\sin(\alpha\pm\delta)$ или дробно-рациональной функции $tg(\alpha\pm\delta)$. Решения прямой задачи эллипсометрии для однослойной модели в зависимости от изменения значения показателя преломления ($n \to \infty$), так же как и по d в (15), обладают апериодическими свойствами, в чём легко убедиться, используя компьютерное моделирование этих решений, представленных на рис. 1.58, 1.59.

Из этих рисунков видно, что семейство параметрических кривых обходит точку сингулярности при малых значениях Ψ и постепенно возвращаются к эллиптичности чистой подложки.

Действительно, из формулы (15) следует, что оптически сверхплотное покрытие ($n \to \infty$) эквивалентно отсутствию слоя ($d < d_0 \to 0$) всюду, за исключением больших значений критических углов ПВО, когда $\varphi \to \pi/2$, т.е. $\cos(\varphi)\to 0$ и $d_0\to\infty$ когда эта область эквивалентна полубесконечной среде.

Если не рассматривать наноразмерные области $d_0 \to 0$, где в малом есть все допустимые вариации эллипсометрических углов Ψ и Δ, то значительные толщины $d_0 << d$ могут вывести фазовые решения за границы ($0^0 - 360^0$) листа комплексного Риманова пространства, которые невозможно увидеть на этих проективных рисунках.

Рис.1.58. Апериодическое свойство решений ОУЭ для диэлектрических слоёв на Ge.

Поглощающие плёнки на поглощающей подложке испытывают по мере роста d квазипериодические изменения по спиралеобразным кривым, для германия с кварцевой плёнкой (n = 4.45, φ = 70^0) представленных на рис. 1.56.

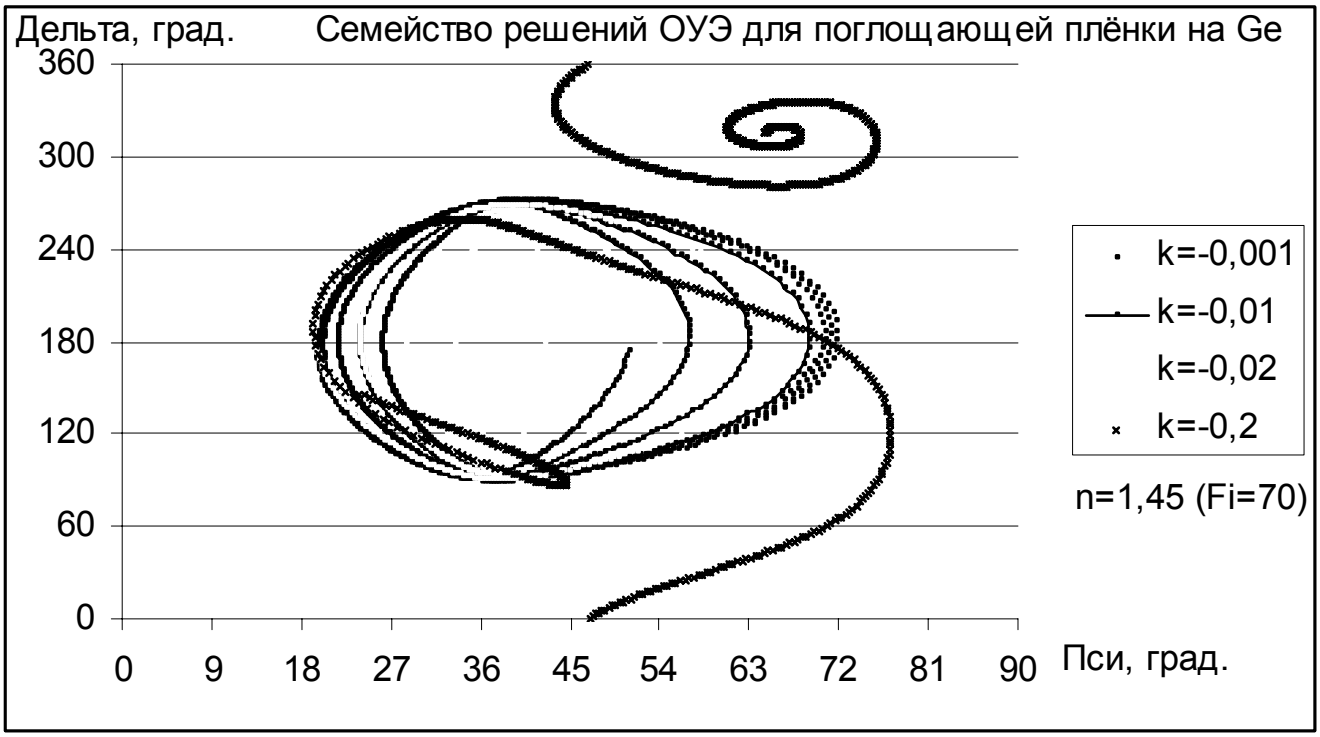


Рис. 1.59. Апериодические свойства решений ОУЭ по параметрам экстинкции на Ge подложке.

Из представленных на этих рисунках данных можно увидеть нелинейные разрывные свойства параметрических по n, k и d прямых решений основного комплексного трансцендентного экспоненциально чувствительного к числовым режимам значений параметров уравнения эллипсометрии (1). Для слоёв со значительным поглощением (0.2) эти решения релаксационно приближаются к своей предельной точке на больших толщинах слоёв (около 10 мкм). Однако на всей римановой поверхности эти картины, естественно, выглядят непрерывно, расслаиваясь для всевозможных параметров Δ с периодом 360^0.

По показателю преломления эти слои на германиевой подложке под призмой К-8, условно изображённых на этих рисунках могут моделировать как влажный воздух (n→1), так и полупроводниковые моно слои с n→ 3 или n→ 5.

Параметрические семейства по показателям экстинкции (k→50) представляют как прозрачные, так и металлические слои.

Глава 2. Экспериментальные аспекты прикладной эллипсометрии и её методологические недостатки

§2.1. Описание прогрессивной модели ЛЭФ-3.М.1

На четырёх слайдах (рис.II.1, 2, 3 и 4) представлены три проекции прибора, который состоит из механического, оптического и электронного узлов с элементами управления.

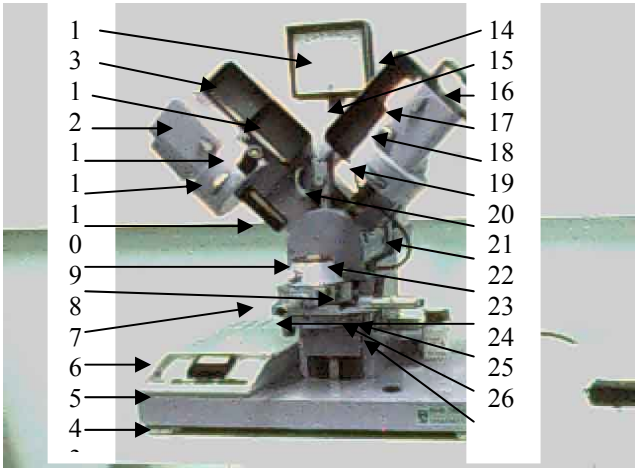


Рис.II.1. Планарная проекция ЛЭФ-3М.1

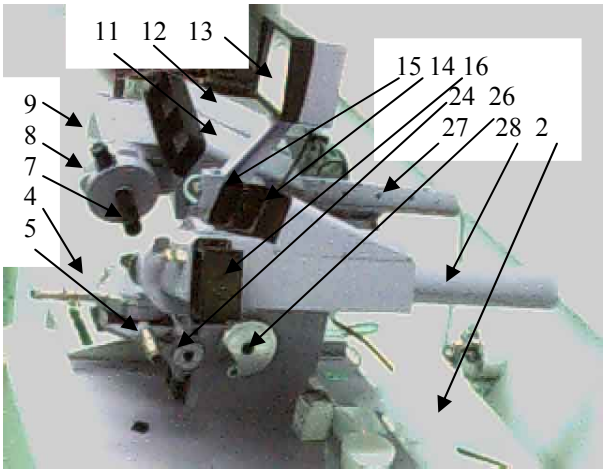


Рис.II.2. Сагиттальная проекция ЛЭФ-3М.1

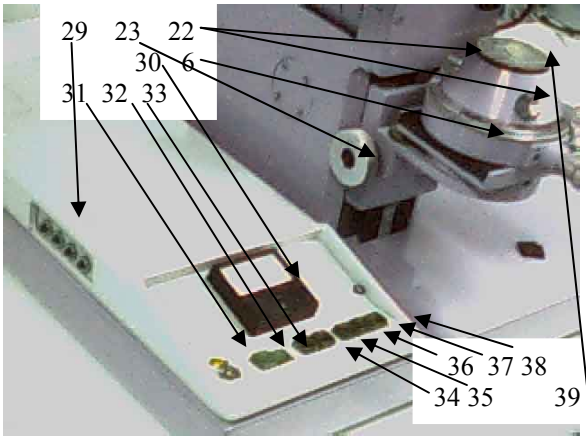


Рис.II.3. Узлы электроники ЛЭФ-3М.1

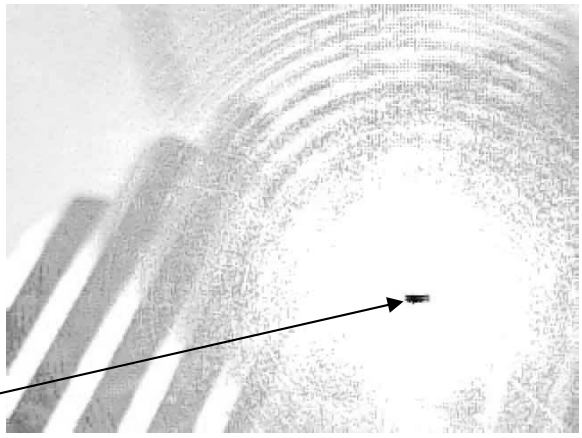


Рис.II.4. Вид по лучу отражения.

На этих рисунках обозначены следующие элементы управления прибором:
1. винты для юстировки горизонтального расположения основания прибора 2;
2. основание эллипсометра со скрытой проводкой к узлам электроники блока 3;
3. блок электроники с микроамперметром (30) второго класса 2% точности для контроля 4-х напряжений (29);
4.1 микрометр линейного перемещения объектного столика (6) в плоскости ХУ;
5.2 микрометр линейного перемещения объектного столика (6) в плоскости ХУ;
6.3-х координатный столик для расположения объектов измерений (ОИ) 39;
7. насадка с диафрагмой формирования луча падения на подъёмном плече 27;

8. шайба кинематического редуктора азимутального вращения поляризатора (Р);
9. окуляр азимутов установки компенсатора С на оптической оси (ОО) прибора;
10. оптическая муфта зеркального разворота лазерного пучка с модулятором (М);
11. экран индикатора углов падения-отражения (2φ), подсвечиваемый при нажатии кнопки 38 на передней панели электронного блока 3;
12. экран индикатора азимутов поляризатора (Р), подсвечиваемый при нажатии кнопки 36 на передней панели электронного блока 3;
13. регистратор относительного уровня гашения – микроамперметр 2 класса с автоблокировкой размаха сигнала до ⅓ его шкалы измерений;
14. экран индикатора азимутов анализатора (А), подсвечиваемый при нажатии кнопки 37 на передней панели электронного блока 3;
15. экран визуализации лучей от ОИ (39) на оптической оси плеча отражения 27;
16. крепёж на съёмной крышке прямого доступа к лучам в зеркальном канале 27;
17. 2-х позиционный рычаг направления пучка на экран 15 или прямой выход 16;
18. 2-х позиционный рычаг направления пучка на экран 15 или прямо на ФЭУ 28;
19. шайба кинематического редуктора азимутального вращения анализатора (А);
20. шток для установки микроскопа и регистратора, компланарный с нормалью к поверхности ОИ в точке пересечения оптических осей плеч прибора;
21. единственные наружные провода от выходного гнезда 13;
22. 3 головки регуляторов ориентации столика для юстировки ОИ;
23. подъёмный механизм столика с клиренсом от 3 см до излома лучей ОО;
24. двухсторонний винт подъёма объектного столика;
25. фиксатор вертикального положения объектного столика;
26. ручка управления вращательно-поступательного механизма пальцевых толкателей плеч прибора в синхронном изменении углов падения-отражения;
27. узел юстировки лазерного генератора (Г);
28. герметичный узел размещения ФЭУ;
29. боковая панель кнопок контроля напряжений в электронном блоке 3;
30. контрольный микроамперметр, показывающий коэффициент АРУ регистратора 13 после сброса кнопкой 34 и нажатии кнопки запуска АРУ 35;
31. тумблер включения сетевого питания прибора после подключения его к внешнему источнику 220В (50 Гц) кабелем с евро-вилкой под евро-розетку;
32. использование постоянной времени T_1 для сглаживания высокочастотных шумов на регистраторе 13 сигнала гашения с ФЭУ;
33. использование постоянной времени T_2 для более сильного, чем с T_1, сглаживания шумов на регистраторе 13 сигнала гашения ФЭУ;
34. кнопка сброса перегрузки регистратора 13 сигналами с ФЭУ;

35. кнопка запуска автоматической регулировки усиления сигнала ФЭУ;
36. подсветка шкалы лимба измерения азимута поляризатора (Р);
37. подсветка шкалы оптического лимба измерения азимута анализатора (А);
38. подсветка шкалы лимба измерения углов падения-отражения 2φ;
39. объект исследования (кварцевая пластинка от спектрометрической кюветы) на рис. 4 с видом зон Френеля на матрице веб-камеры этого ОИ.

Механическая часть прибора состоит из горизонтально расположенной станины (2), жёстко связанной с нормально расположенными к ней толкателями плеч падения (27) и отражения (28) с углом 2φ между ними. Этот угол отображается на оптическом лимбе (11) при нажатой кнопке (38). Установка этих углов производится вращением штурвала 26.

Точная установка линий горизонта на станине или 3-х координатном (6) подъёмном объектном столике производится винтами (1) под станиной (2).

Ориентация столика для объектов исследования (ОИ) регулируется тремя винтами (22). Его подъём-опускание производятся двусторонним винтом (23, 24) с поджимным язычком (25), расположенном справа. Рекомендуется эту регулировку производить двумя руками с откинутым вниз стопорным язычком во избежание удара столика о станину.

Крепёжное устройство 16 может служить при установке, например, веб-камеры для передачи на монитор компьютера отражённого от ОИ света при открытой заслонке (17) или дополнительной к ФЭУ (28) фотокалибровки.

На вертикальном штоке (20) может быть установлена микроскопическая приставка для наблюдения поверхности ОИ и регистрирующий микроамперметр (13) для индикации гашения светового луча от лазера (27).

Конструктивно механическая часть прибора выполнена в лучших классических традициях – с высокой инерционностью (масса около 100 кг) для виброзащиты на фоне индустриальных помех. Поэтому располагать его на шатких столах нецелесообразно.

Оптическими конструктивами прибора ЛЭФ-3М.1 являются He-Ne лазер Г (27) с λ = 6328 Å, система поворотных зеркал в плечах падения-отражения, поляризаторы (8, 19), компенсаторы (9) и фотоприёмник ФЭУ (28).

Основной принцип работы оптического тракта соответствует классическому закону Малюса, описывающему гашение поляризованного света при прохождении скрещенных (Р, А) поляризаторов при косом (φ) падении на ОИ с размещенной перед ним пластиной λ/4 (С - компенсатором). Эта схема – Г, Р, С, ОИ, А, У (ФЭУ) - представлена на рис.II.5.

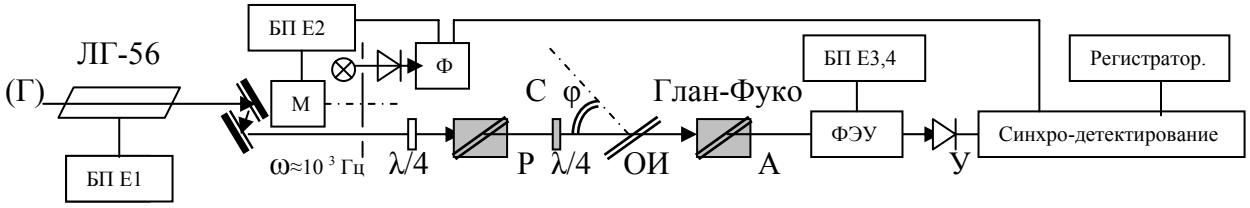


Рис.II.5. Принципиальная схема работы ноль-эллипсометра ЛЭФ-3М.1.

Азимуты поляризаторов 8, 19 можно отсчитывать с оптических лимбов К.К. Свиташова 12 и 14 (11) при включённой подсветке кнопками 36, 37, 38. В поле наблюдения попадает пара упорядоченных крупноформатных цифр текущих значений градусов со шкалой 60 минут между ними, сгруппированная десятками в шесть интервалов. Т. о., цена делений на этих оптических лимбах составляет 1'= 60". Значение углов $a = a^0 + a'/60 + a''/3600$ в градусной мере складывается из младшей цифры градусов (a^0), меньшего из значений окружающих риску градусов минут (a'), делённых на 60 (долю градуса), и глазомерной добавки секунд (a''), делённых на их градусную долю. Перевод в радианы обычный - $a\pi/180$. Значение π с наибольшим числом значащих цифр резонно калькулировать по формуле $\pi = 4\ \mathrm{arctg}(1.0)$.

В измерительных схемах 0-эллипсометрии (на полное гашение) с фиксированным компенсатором (С) азимут его положения ($c = C_0$) выбирается при юстировке оптического тракта эллипсометра. В приборах серии ЛЭФ-3М-1 используется полихроматический компенсатор для видимого диапазона световых волн и ряд $\lambda/4$ пластин из кристаллов кварца, служащих для исключения поляризации лазерного излучения источника Г за счёт однородного распределения световой энергии в пучках поляризованных по кругу лучей.

Оптическая ось прибора (ОО) от входной диафрагмы источника Г до выходной на ФЭУ физически представляет собой 3-х мерно изломанный световой луч значительной длины (около 1000 мм), несмотря на кажущуюся миниатюрность эллипсометра. В центре этого луча размещается ОИ. При диафрагме на ФЭУ порядка 0.5 мм расходимость лучей от ОИ будет не выше $0.5/500 = 10^{-3}$ одного миллирадиана, что соизмеримо с собственной расходимостью лазерного генератора. Следовательно, ОО проходит в центре его лучей и состоит из совмещённых (то же 3-х мерно изломанных) полуосей двух механических плеч падения и отражения эллипсометра.

Оптические оси отдельных элементов оптического тракта прибора (Р, А, С) обычно стремятся при азимутальных вращениях вывести луч с главной ОО на свою коническую развёртку. Поэтому при всех измерениях следует единообразно корректировать текущее положение светового пучка на диафрагме выхода на ФЭУ с помощью визуального экрана (15). Критерием правильной юстировки положения луча может служить монотонное поведение средних значений показаний регистратора (13) при измерениях под разными углами падения-отражения φ: ($0^0 \le \varphi \le 90^0$).

Электронный блок прибора (3) размещён в малогабаритном плоском электрически безопасном металлическом корпусе слева на станине (2). Два стрелочных индикаторных микроамперметра (13, 30) эстетично вписываются в строгий грамотно выполненный инженерный дизайн прибора. Этот блок совмещает в себе два высоковольтных источника питания для лазерного генератора Г и ФЭУ (порядка 1500 В) и рабочих напряжений для мотора механического модулятора (М) и синхронизирующего фотодиода (Ф). Контроль этих напряжений производится по показания токов на индикаторе 39

при нажатии ряда кнопок на боковом (слева) пульте 29 блока 3. На лицевом пульте этого блока размещён сетевой тумблер (31), кнопки установки постоянных времени $T_{1,2}$ (32, 33) сглаживания высокочастотных шумов сигнала гашения на ФЭУ, кнопок включения подсветок (36, 37, 38) на оптических лимбах (11, 12, 14) и двух кнопок для сброса перегрузки ФЭУ (34) и включения (35) автоматической регулировки усиления (АРУ) сигнала гашения ФЭУ в отсчётном поле (до 50% размаха шкалы) регистратора (13).

Методология решения задач АРУ, по-видимому, основывается на привязке к максимуму шкалы регистрирующего микроамперметра (13) и сводится к установке динамического коэффициента усиления К, который регистрируется микроамперметром (30) и с помощью которого в условных единицах показаний регистратора U (13) относительные значения сигнала гашения можно рассчитать по формуле $U_{ФЭУ} = U/К$ (в мкА). Абсолютные значения этого сигнала можно получить дополнительной калибровкой прибора.

К недостаткам такого изящного схемотехнического решения задач автоматического управления высоким напряжением на ФЭУ и случайным выходным сигналом на нём с регистрацией усиления на паре не перестраиваемых микроамперметров можно отнести:

- случайные переходы к режиму самовозбуждения, которые никак не связаны с установкой постоянных времени сглаживания высокочастотных шумов на полезном сигнале, частота селекции которого синхронизирована с оборотами вращения механического модулятора в КГц диапазоне;
- случайное зашкаливание (ослепление, перегорание) регистратора $U \to 0$ при слишком резком сбрасывании уровня гашения ФЭУ человеком-оператором, управляющим вручную азимутами поляризаторов прибора;
- случайное перегорание защитных узлов электроники при экстратоках резкого зашкаливания регистратора при возможных оплошностях оператора, если время срабатывания защиты окажется более инерционным.

Включение прибора производится одним тумблером 31 при включении в сеть 220 В.

Требования техники безопасности при работе на настроенном ЛЭФ-3М-1 сводится к паре общеизвестных моментов:

- Нельзя при подключении прибора в сеть касаться пальцами усиков евровилки.
- Недопустимо прямое попадание лазерного излучения на сетчатку глаз.
- При включённом питании нельзя вскрывать блок электроники.

§2.1.1. Модификация блока регистрации спекл-картин

В связи с развитием натонотехнологий наиболее жёсткие метрологические требования предъявляются и к приборам наноразмерностного контроля, к которым естественно относятся и эллипсометры всевозможных типов и классов (безинерционные, автоматические, прецизионные ручного управления и т.д.).

Для спекл-эллипсометрии в канале регистрации приборов необходимо предусмотреть возможность дополнительного наблюдения и регистрации всего поля зеркального отражения от планарного ОИ падающего коллимированного пучка. Поскольку стандартные ФЭУ приборов точно пеленгуют зеркальное отражение света через узкую диафрагму на нём, постольку этот блок не годится для контроля множества протяжённых зернистых спекл-структур в отражённых лучах света.

Модифицировать канал приёма отражённого пучка лучей логично хорошо разработанными фоточувствительными матрицами с телевизионной аналоговой и цифровой регистрациями, например, веб-камерами с числовой компьютерной обработкой.

На рис. II.6. демонстрируется пример подобной регистрации на ЛЭФ 3М.1.

«а» «б» «в» «г»

Рис. II.6. Визуализация картин гашения отражённого света с помощью веб-камеры:
«а» - спекл-картина отражённого от стеклокерамики луча вблизи царапины;
«б» - гашение отражённого от стеклокерамики света в паре световых пучков:
«в» - спекл-картина отражённого от облучённой стеклокерамики луча;
«г» - гашение отражённых от облучённой стеклокерамики трёх пучков света.

На этих снимках видно, что веб-камера регистрирует, во-первых, не полное гашение света в скрещенных поляризаторах эллипсометра (рис. II.6.б,г) и, во-вторых, расщепление отражённого луча на пару (рис. II.6.б) и более (рис. II.6.г) пучков.

Изображения на рис. II.6.а, в соответствуют спекл-картинам поля зон Френеля в дальней области дифракции Фраунгофера. Царапина – факел.

Поскольку гашение света наблюдается либо сразу в паре расщеплённых пучков с непогашаемым третьим, либо наоборот (одном при непогашаемых двух), то можно сделать вывод о непосредственном проявлении эффектов двулучепреломления ($n_o \neq n_e$) от мелкодисперсных поликристаллических внутренних структур ОИ, подобной интегральным рентгеновским спектрам на

мелкодисперсных порошковых формах ОИ. Более того, положение этих пучков чувствительно к азимутам поляризаторов прибора.

Таким образом, модифицированный нами метод эллипсометрических наблюдений позволяет ставить и решать задачу определения анизотропии микроблоков разной этиологии и природы от кристаллов до объектов с наведённой анизотропией от механической полировки до спекания материалов. Типовое использование ФЭУ для достижения минимума сигнала гашения в луче, состоящем из нескольких пучков, может дать только усредненную информацию о значении эффективного показателя преломления между $n_{o,e}$.

§2.1.2. Автокалибровка эллипсометрических измерений по методу многоуглового сканирования

При хорошей заводской юстировке ОО эллипсометра развёртка углов (2φ) падения-отражения (узел 14) на 180^0 приводит к прямому попаданию пучка на выходную диафрагму ФЭУ при вертикальном положении рычага 18 для визуализации картины на экране 15.

В противном случае можно вывести пучок на диафрагму ФЭУ (в центре экрана 15) путём юстировки лазера в тубусе 27 соответствующими установочными винтами на нём.

Максимальную яркость пучка можно достичь корректировкой положения диафрагм на выходном тубусе плеча падения и входном плеча отражения.

Симметричное расположение пучка на диафрагме ФЭУ даёт максимально большое значение минимального уровня сигнала гашения $U_{ФЭУ}$ при повёрнутом горизонтально (от вертикального - вправо) рычага 18.

Эту картину на экране либо следует зрительно запомнить и при необходимости воспроизводить, либо добиваться максимума минимального сигнала регистратора U при многократном его измерении при разных юстировках пучка, устанавливаемых вслепую.

Второй наиболее трудоёмкий и по началу капризный момент работы с прибором состоит в совмещении отдельных осей оптического тракта с его главной ОО при косом падении пучка на ОИ, соответствующему прямому попаданию на диафрагму ФЭУ.

Здесь надо исходить из жёсткого механического решения конструктивной задачи симметричности хода (2φ) лучей в плечах падения-отражения, показанного на рис.II.7.

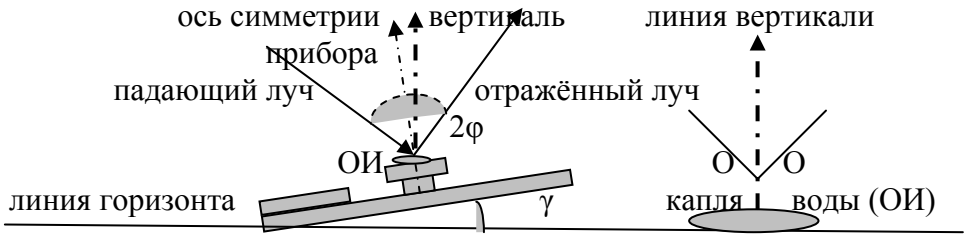


Рис.II.7. Юстировка оси симметрии прибора с вертикалью падения на ОИ.

Из представленного на рис. II.7 хода лучей видно, что существует единственная точка пересечения оптических осей плеч падения и отражения (ОО). Именно здесь и должна оказаться точка локальных измерений на ОИ. Этого можно достичь простым подъёмом или опусканием объектного столика винтами регулировки высоты (24 на рис. II.1,2) ОИ и выставлением его отражающей поверхности перпендикулярно оси симметрии прибора с помощью 3-х координатных установочных винтов (22) на столике (6).

Ось симметрии прибора является строгой биссектрисой двойного угла 2φ падения-отражения, отсчитываемого по оптическому лимбу К.К. Свиташова (11 на рис. II.1).

Поскольку механизм подъёма столика перемещает его строго вдоль оси симметрии прибора, а сам столик круглый (имеет ось симметрии и отсчётный лимб углов поворота) то целесообразно совместить все рассмотренные нормали в одной точке ОО. При виде сверху ось столика должна проходить через точку излома оптической оси ОО на ОИ.

Эта юстировка положения ОИ сохранит локальность измерений в одной и той же точке ОИ на осях при случайной юстировочной коррекции пучка на выходную диафрагму ФЭУ или специфических вращениях объекта на все 360^0 вокруг вертикали.

Решения этой юстировочной задачи достигаются с помощью микрометров (4, 5 на рис.II.1) линейного перемещения столика в горизонтальной плоскости.

Истинное горизонтальное положение поверхности отражения ОИ достигается только при сведении угла γ на рис.II.7 к нулю, что легко сделать с помощью жидкости свободно принимающей свой лапласовский профиль в поле тяжести земли. В точках экстремума эта поверхность всегда строго горизонтальна и именно через неё (ОО) должна проходить ось вращения столика и ось симметрии прибора.

Важно отметить, что при $\gamma \neq 0$ вращения столика вокруг своей оси, даже при сохранении локальности измерений в одной и той же точке поверхности ОИ, будет выводить пучок из выходной диафрагмы ФЭУ весьма существенным образом.

Подобные конические развёртки оказываются чрезвычайно информативными при изучении тонких анизотропных покрытий зеркально гладких плоских подложек.

Последним наиболее трудоёмким этапом в алгоритмах юстировочной настройки прибора является установка компенсатора в таком фиксированном положении $C = c_o$, при котором его оптическая ось симметрично распределяет интенсивности падающих компонент светового поля ($\pm\ 45^0$ к плоскости падения). Эмпирическим критерием такой установки компенсатора является картина замораживания поля освещения экрана, расположенного перед анализатором сразу после компенсатора при всевозможных азимутах поляризатора, подобная той, что представлена на рис. II.7.г.

Для установленных на приборе ЛЭФ-3М-1 заводских элементов оптического тракта прибора юстировочный параметр выбран равным $c_o = 52^0 02' \pm 1'$.

Далее следует определиться с юстировочными константами измерения азимутов.

Непосредственно измеряемыми величинами в 0-эллипсометрии являются азимуты положения поляризатора (P) и анализатора (A) при самом глубоком (глобальном) гашении сигнала на ФЭУ. По паре этих азимутов, полученных в независимых измерительных зонах гашения, простыми линейными преобразованиями, т.е. косвенно, определяют два $\Psi(\varphi)$ и $\Delta(\varphi)$ амплитудно-фазовых параметра эллипса поляризации отражённого от ОИ света:

$$\Psi = \frac{|A_1 - A_2|}{2}$$

$$\Delta = P_0 - (P_1 + P_2)$$

Согласно этим формулам, амплитудная функция от углов падения $\Psi(\varphi)$ должна при углах Брюстера для идеальных диэлектриков стать равной нулю, т.е. азимуты $A_{1,2}$ должны идти на сближение друг к другу. Этого всегда можно достичь, поскольку зоны измерений при добавлении 180^0 к любым азимутам, задающим полное гашение, повторяют это гашение с достаточно хорошей точностью, зависящей от совершенства оптических элементов прибора.

Фазовая функция (11) должна воспроизводить для диэлектриков скачёк от 180^0 до 0^0.

Важным фактором при нахождении калибровочной константы P_0 является оговорка о глубоком гашении сигнала на регистраторе прибора, который относится к категории индикаторных, а не измерительных сигналов в 0-эллипсометрах.

В классической схеме скрещенных поляризаторов при косом падении когерентного излучения (λ=632.8 нм) на поверхность ОИ под углами $0^0 < \varphi < 90^0$ при фиксированном азимуте 45^0 компенсатора (λ /4) для нулевых эллипсометрических приборов типа “ЛЭФ – 2”, “ЛЭФ – 3” и др. первичной измерительной информацией являются азимуты $P_j(\varphi)$ и $A_j(\varphi)$ при ситуации «абсолютного гашения» светового пучка на фотоприёмнике

$$U_j(\varphi) = U_{фэу} - U_{фон} \rightarrow U_0.$$

Фоновый сигнал $U_{фон}$ легко находится при развёртке плеч прибора на 180^0 для совмещения их с оптической осью.

При отражении от идеальных диэлектрических зеркал с характерным эффектом брюстеровской (100%) поляризации этот сигнал гашения должен достигать абсолютного для конкретных поляризаторов минимума

$$U_0 = U_{МАЛЮССА} - U_{ФОНА},$$

где $U_{МАЛЮССА}$ - сигнал полного гашения скрещенных поляризаторов при $\varphi=90^0$ (на просвет) без ОИ. Поскольку явление Брюстера состоит в том, что при

определённом угле φ = $\varphi_{БР}$ в отражённом свете ($\vec{E} = \vec{E}_p + \vec{E}_s$) полностью исчезает электрическая составляющая поля световой волны, лежащая в плоскости падения (E_p=0), и остаётся 100% поляризованная её часть E_s, то и гашение её кристаллом анализатора, действительно, может быть самым глубоким (вплоть до уровня собственных шумов ФЭУ ~ $U_{ФОН}$) по сравнению с другими углами с большей суммарной интенсивностью света. Помешать этому могут разве лишь поляризационно-активные дефекты на поверхности ОИ типа – энтропийных флуктуаций, различных классов шероховатостей, свилей, следовых или точечных загрязнений и т.д.

На рис. II.8 представлены примеры калибровочных кривых гашения $U^{\gamma}_{фэу}$ в зависимости от азимута γ = A - P взаимной ориентации поляризующих кристаллов (A, P), снятых на ЛЭФ-2 с высоко чувствительным ФЭУ типа «кульбит», разработанного в НПО «Электрон», и на обычном ЛЭФ-2 (ГОИ).

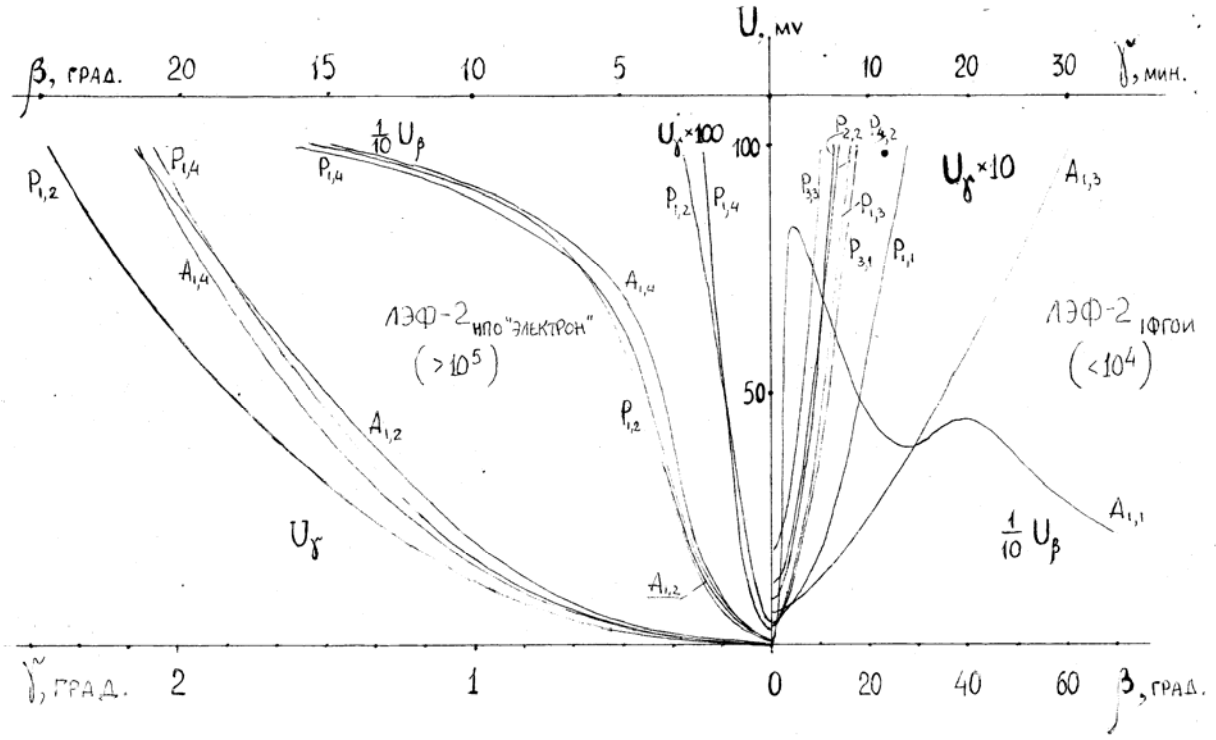


Рис. II.8. Характерные кривые сигналов $U_{фэу}(\gamma)$ ЛЭФ-2 на просвет.

Из этих данных видно, что самое глубокое гашение локализуется в очень узком интервале углов скрещивания поляризаторов – до 10% полной шкалы регистратора при относительном угле расстройки азимутов гашения – менее 5 угловых минут.

В разных измерительных зонах эллипсометров подобные калибровочные кривые значимо отличаются друг от друга и, естественно, для разных эллипсометров, каждый из которых имеет собственную аппаратную функцию юстировки своего оптического тракта.

Реальная не идеальность поляризаторов задаёт динамический диапазон гашения, логарифмический порядок которого равен $\log_2(10^{5\div6\div7}:1)=15\div23$дБ. Для ФЭУ с усилением до нескольких Вольт реальный уровень возможного гашения должен быть в среднем на шесть порядков ниже и находиться в микровольтовом диапазоне.

Практическая не идеальность диэлектрических зеркал ($k \neq 0$) даже вдали от линий их собственного поглощения может на порядки увеличить этот фон.

Т.о., параметр фонового гашения U_0 определяет чувствительность эллипсометров, которые могут сильно разниться друг от друга.

Рассмотрим пример калибровочных измерений азимутов А и Р для стекла НС-1, представленных в таблице №1.

Таблица №1. Калибровочные зонные измерения на светофильтре НС-1.

φ, град.	ФЭУ_1 μА	Р_1, град.	А_1, град.	ФЭУ_2 μА	Р_2, град.	А_2, град.
45	0,742857	45,61944	106,1875	0,529412	135,6556	71,7
46	0,914286	45,82222	104,8	0,457143	135,85	73,07083
47	1	46,05	103,4167	0,571429	136,0833	74,45278
48	0,657143	46,23611	101,95	0,685714	136,3375	75,88611
49	0,771429	46,58333	100,4806	1,257143	136,7083	77,3
50	0,628571	47,03194	99,01667	1,371429	137,15	78,75139
51	1	47,63056	97,51667	1,914286	137,7708	80,24444
52	1	48,55833	96,0375	1,823529	138,7111	81,71667
53	1,257143	50	94,65	1,2	140	83,78333
54	1,6	51,95	93,025	1,029412	142	84,78333
55	1,828571	56,5625	91,57083	1,411765	146,6833	86,2
56	1,942857	72,3	90,31667	1,588235	162,3	87,43333
57	1,485714	92	90,28333	3,6	182	88,17778
60	1,625	127,45	94,43472	1,75	217,4833	83,35833
70	2,4	133	109,4167	3,125	223	68,51667

Типовое поведение азимутов для этого ОИ представлено на рис. II.9.

При определении фазового параметра $\Delta=P_0-(P_1+P_2)$ выбор P_0 становится совершенно очевидным для этого диэлектрического материала $\approx 2\pi$. Точное значение $P_0 = 357{,}43^0$.

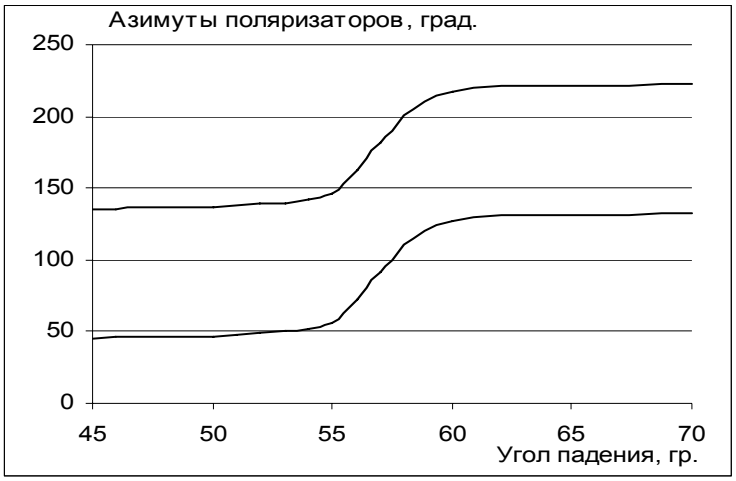
Разность же азимутов всюду близка к значению $\pi/2$. На рис. II.9.д показан ход азимутов анализатора при этой калибровке.

Амплитудно-фазовые функции для НС-1 имеют классическое поведение от углов φ.

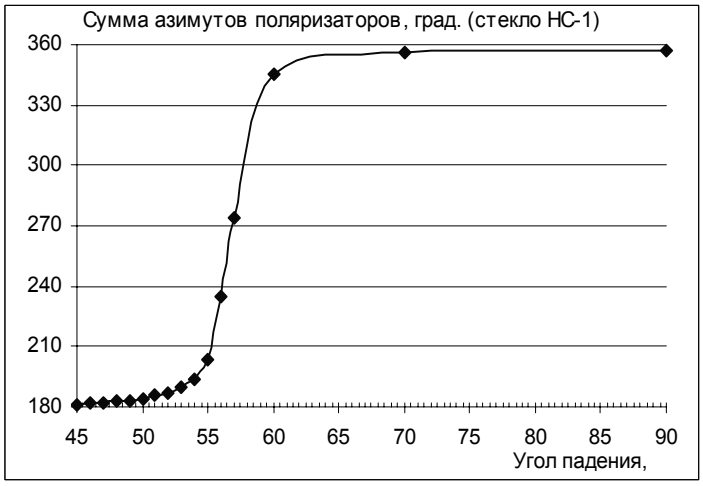
Из графика амплитудной функции на рис.II.9.д определяем угол Брюстера $\varphi_{мин}=56^0 45'$. Следовательно, показатель преломления $n_{нс}= tg(\varphi_{мин}) = 1{,}5071$.

Оценки оптических констант этого ОИ по модели идеальной границы (14.в) сведены в таблице №2. Их разброс (регулярного типа) по углам падения представлен на рис. II.10.

А



Б



В

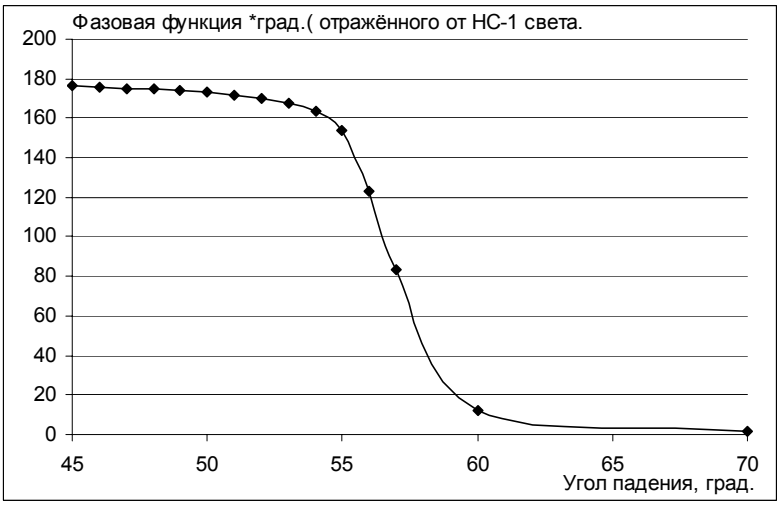
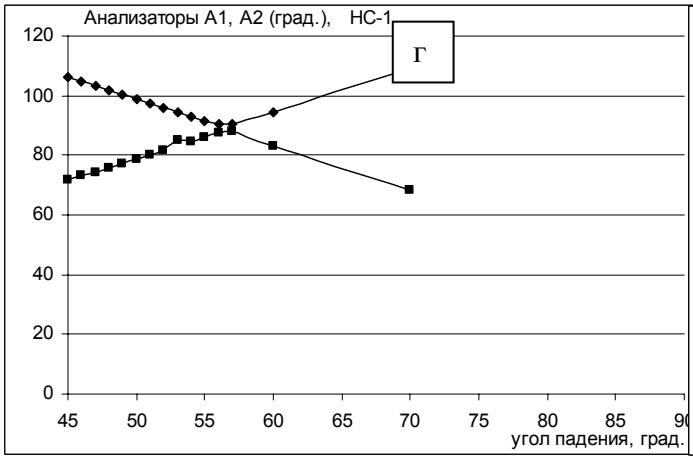


Рис. II.9. Методология калибровки приборов для определения Δ(φ).

А – азимуты поляризаторов ЛЭФ-3М-1 (компенсатор – в плече падения);

Б – линейная комбинация азимутов А в виде непосредственной суммы;

В – фазовая функция эллипса поляризации поля отражённого света.



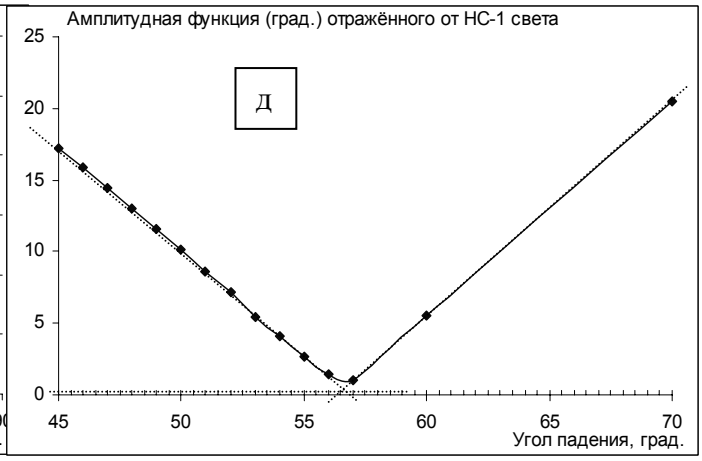


Рис.II.9.г,д. Азимуты анализаторов и калибровка амплитудной функции Ψ(φ).

Таблица №2. Решения обратной задачи ОУЭ для НС-1.

φ, гр.	Ψ(φ), гр.	Δ(φ), гр.	n	k
45	17,24375	176,155	1,514582	0,054581
46	15,86458	175,7578	1,513837	0,053632
47	14,48194	175,2967	1,514294	0,052719
48	13,03194	174,8564	1,513076	0,050367
49	11,59028	174,1383	1,513093	0,049731
50	10,13264	173,2481	1,513346	0,048884
51	8,636111	172,0286	1,512696	0,048034
52	7,160417	170,1606	1,513227	0,048138
53	5,433333	167,43	1,512653	0,045174
54	4,120833	163,48	1,511944	0,044632
55	2,685417	154,1842	1,5126	0,043787
56	1,441667	122,83	1,51163	0,044646
57	1,052778	83,43	1,512392	0,039316
60	5,538194	12,49667	1,511821	0,043052
70	20,45	1,43	1,5094	0,019943

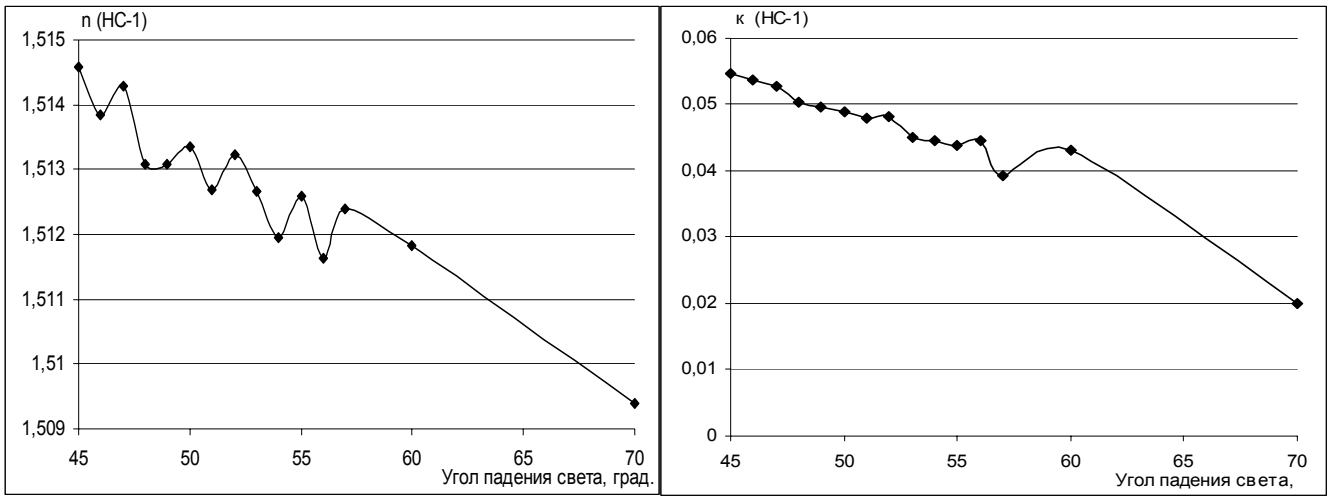


Рис. II.10. Характер разброса оптических констант НС-1 по углам падения.

Средние угловые значения оптических констант материала светофильтра марки НС-1 по определяющим их в модели идеальной границы ОИ на воздухе имеют величины:

$$n_{ср} = 1.51271 \pm 0.00103$$
$$k_{ср} = 0.0458 \pm 0.0053$$
$$n_{корр} = 1.5129 \pm 0.0007.$$

В таблице №3 приведены справочные данные для ряда светофильтров марки НС.

Таблица №3. Оптические константы стёкол марки НС.

НС№	α, мм$^{-1}$	k_α(633нм)	k_{exp}	n_α(633нм)	n_{exp}
НС-1	0.08	$4\ 10^{-7}$	0.02126	1.5210	1.5205
НС-2	0.26	$1.2\ 10^{-6}$	0.01998	1.5230	1.5220
НС-9	0.55	$2.5\ 10^{-6}$	0.01797	1.5050	1.5052
НС-11	1.80	$2\ 10^{-5}$	0.0094	1.514	1.5160

Представленные данные показывают, что эллипсометрический метод определения оптических констант некоторых стёкол марки НС противоречит справочным данным [31].

Присутствие личностных ошибок измерений легко выясняется при рассмотрении поведения сигнала гашения U(φ) при потере им свойств монотонности и гладкости, что может означать нарушение локальной юстировки пучка на выходной диафрагме ФЭУ, если не феномен аномального отражения (сильного рассеяния на скользящих углах φ).

Однако калибровочные измерения таят более существенные методологические противоречия в способах определения калибровочной постоянной P_0.

§2.1.3. Принципиальная схема ромбоидного эллипсометра для спектроскопии НПВО

Для развития приборной базы поляризационно-оптической спектроскопии НПВО требуется решить всего лишь одну проблему – всемерного углового доступа к ОИ от нормального до скользящего лучей падения и регистрации.

Рассмотрим принципиальную формулу следующего устройства для многоуглового сканирования при поляризационно-оптических измерениях.

Устройство сопряжения углов падения/отражения/преломления единым линейным перемещением для поляризационно-оптических измерений по классической схеме скрещенных линейных поляризаторов с ОИ и круговым поляризатором между ними, обеспечивающим эллиптическую аппроксимацию амплитудно-фазовых соотношений в поле световой волны, отличающееся тем, что с целью повышения степени универсальности измерительных задач одновременно на просвет и отражение каркас его подвижных элементов в одном из сечений является сдвоенным разноплечим ромбом типа регулятора Уайта, схематично изображенном на рис.II.11, с четырьмя осями связанного вращения, три из которых разнесены в объеме на постоянную длину (с) в перпендикулярном направлении сдвоенным ромбам, образуя ромбоид Уайта с характерными размерами (а,в,с) достаточными для расположения и охвата в его объеме объекта исследования плоско-параллельного типа, зеркальная грань падения света на который располагается на невидимой четвертой оси неподвижного основания ромбоида так, что углы падения/отражения $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$ равны друг другу, образуя в сумме угол раствора симметричных элементов основания каркаса ромбоида $2\varphi = \angle\ O_1OO_3$, на несущих плечах (боковых гранях) которого по центральным линиям параллельно образующим лучам

углов падения/отражения размещаются источник когерентного монохроматического излучения (типа λ = 632.8 нм) и приемник излучения соосно поляризатору (П), анализатору (А), модулятору (М) и компенсатору ($\lambda/4$) оптического тракта прибора, линейные размеры которого удовлетворяют оценкам:

$$l < e < a < b < d,$$

где l - характерные размеры окружения объекта исследования (радиус охвата), d=a+в и e=в-а на основных элементах каркаса (а и в), причем об углах падения судят исключительно по высоте (у) между верхней подвижной и нижней неподвижной осями в большом диагональном сечении каркаса ромбоида Уайта по формуле:

$$\mathbf{Cos(\varphi) = (a^2 + y^2 - b^2)/(2ay),} \qquad (25)$$

отличающееся тем, что с целью достижения высокой точности линейно-угловых перемещения каркаса он крепится на выносной штанге(ах) таким образом, чтобы неподвижная ось основания ромбоида Уайта находилась над автономным трехкоординатным столиком объекта исследования, а управление высотой (у) подвижной оси производилось микрометрическим узлом перемещения, допускающего автоматизацию двухкоординатных перемещений с помощью микропроцессорной техники,

отличающееся тем, что для обеспечения высокой технологичности измерений на просвет плоскости отражения / преломления могут компланарно перемещаться относительно плоскости падения с достаточной микрометрической точностью за счет обеспечения подвижек в гранях платформам, несущим оптические детали устройства, по трем степеням свободы:

- “l” перемещением вдоль (а) направляющих каркаса, параллельно лучу падения вплоть до их выносного продолжения; по соответствующим пазам цанговых защелок;

- “l” перекидыванием приемной платформы при разблокировке цанговых защелок вокруг цапф-отростков на невидимой неподвижной оси OO′ в сопряженное пространство преломления до продолжения направляющих плеч падения с последующей фиксацией ее тем же цанговым механизмом;

- обеспечением дополнительной второй степени свободы путем коллениарного перемещения оптической оси приемного узла в плоскости его платформы с достаточной микрометрической точностью;

- обеспечением третьей степени, достигающейся компланарным микрометрическим перемещением всей приемной платформы в ортогональном ее плоскости направлении,

что в совокупности позволяет изучать и анизотропные объекты исследования, освещаемые как сверху, так и снизу при задании углов падения “более” 90 градусов.

Формула (25) отражает предельные случаи линейно-угловых соотношений. Так, при $\varphi = 0 \leftrightarrow Cos(\varphi) = 1 \rightarrow y = a \pm b$: при $\varphi = \pm \pi/2 \leftrightarrow Cos(\varphi) = 0 \rightarrow y$

$= в^2 - а^2$, что иллюстрируется на частных композициях сочетания элементов “а” и “в” рис. II.11.

При снабжении рассматриваемого устройства уровнемерами линий горизонта возможны измерения на полубесконечных по толщине жидких биосредах.

Схема вида спереди НПВО-эллипсометра представлена на рис. Рис. II.11.а.

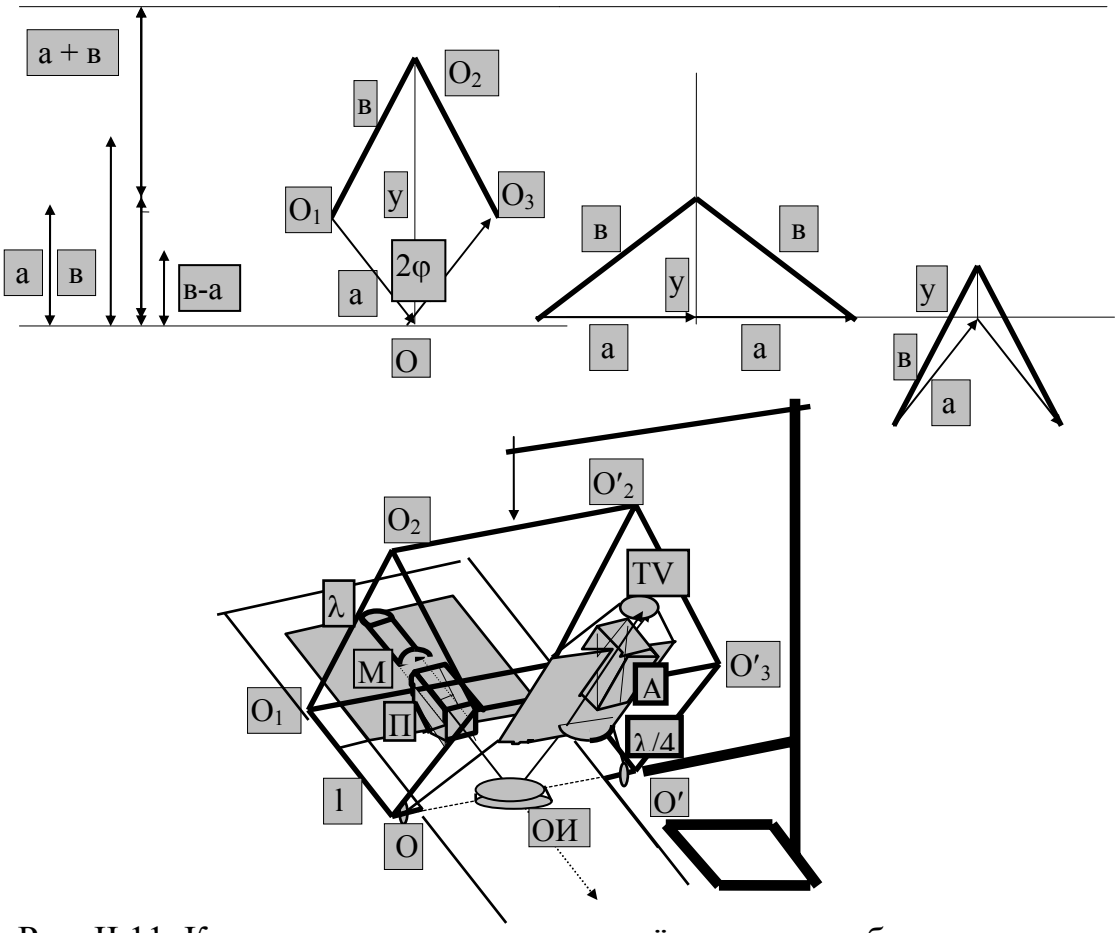


Рис. II.11. Кинематическая схема четырёхосного ромбоида многоуглового сканирования.

Схема вида сбоку НПВО-эллипсометра представлена на рис. II.11.б.

Схема вида сверху НПВО-эллипсометра представлена на рис. II.11.в. На этом рисунке показана кинематическая схема установки плеч прибора на малые углы падения-отражения, на развернутые 90+90 углы (эллипсометрия напросвет) и освещение ОИ снизу. Подобные измерения в сдвоенных полуромбах-эллипсометрах возможны благодаря тому, что верхние плечи одного из ромбоидов длиннее другого.

Для медико-биологических исследований размеры НПВО-эллипсометра могут быть такими, чтобы его ходовая часть микрометрических перемещений по вертикали осуществлялась на любом длинноходовом микрометре (см. вид сбоку). Плечи для оптических деталей на платформах углов падения и приёма с регистрацией на ПЗС-матрицах с беспроводной связью с ПК миниатюрного

типа могут быть съёмными и вся конструкция – прибором карманного типа при использовании полупроводниковых сверхминиатюрных лазеров.

Такие приборы могли бы получить широкое применение для проведения массового допускового контроля на соответствующие вирусные поражения.

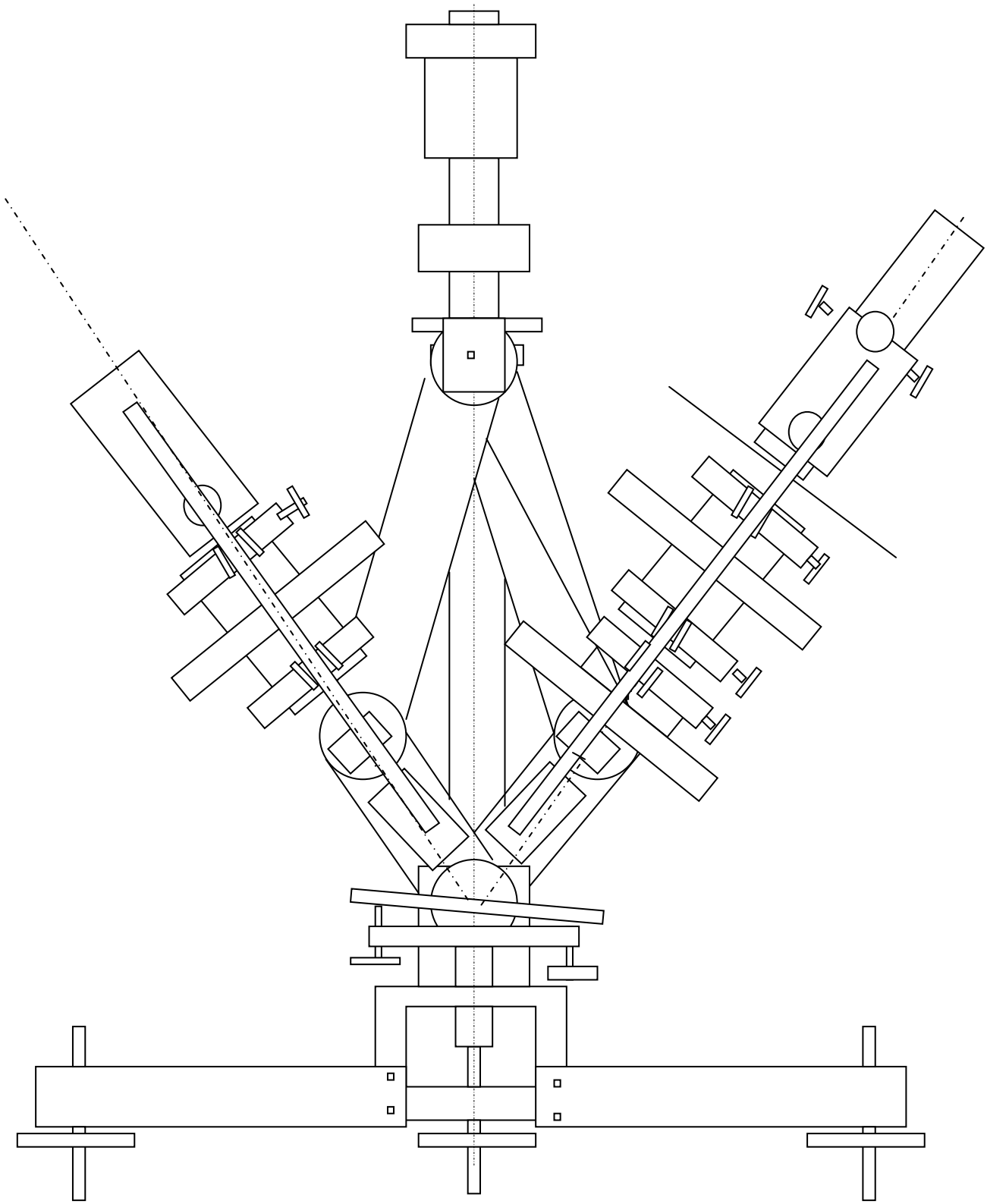


Рис. II.11.а. Схема вида спереди эллипсометра НПВО.

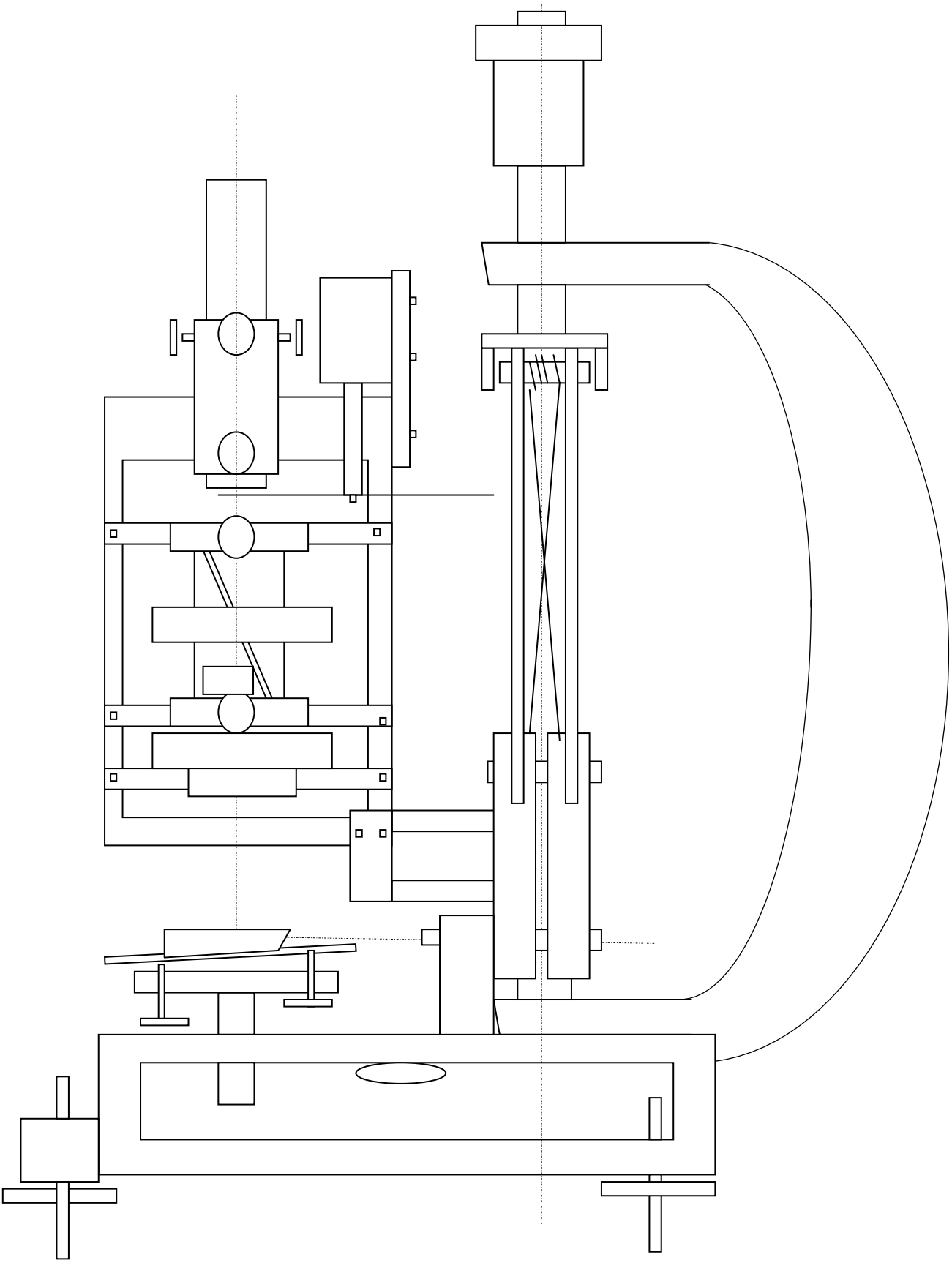


Рис. II.11.б. Схема вида сбоку НПВО-эллипсометра.

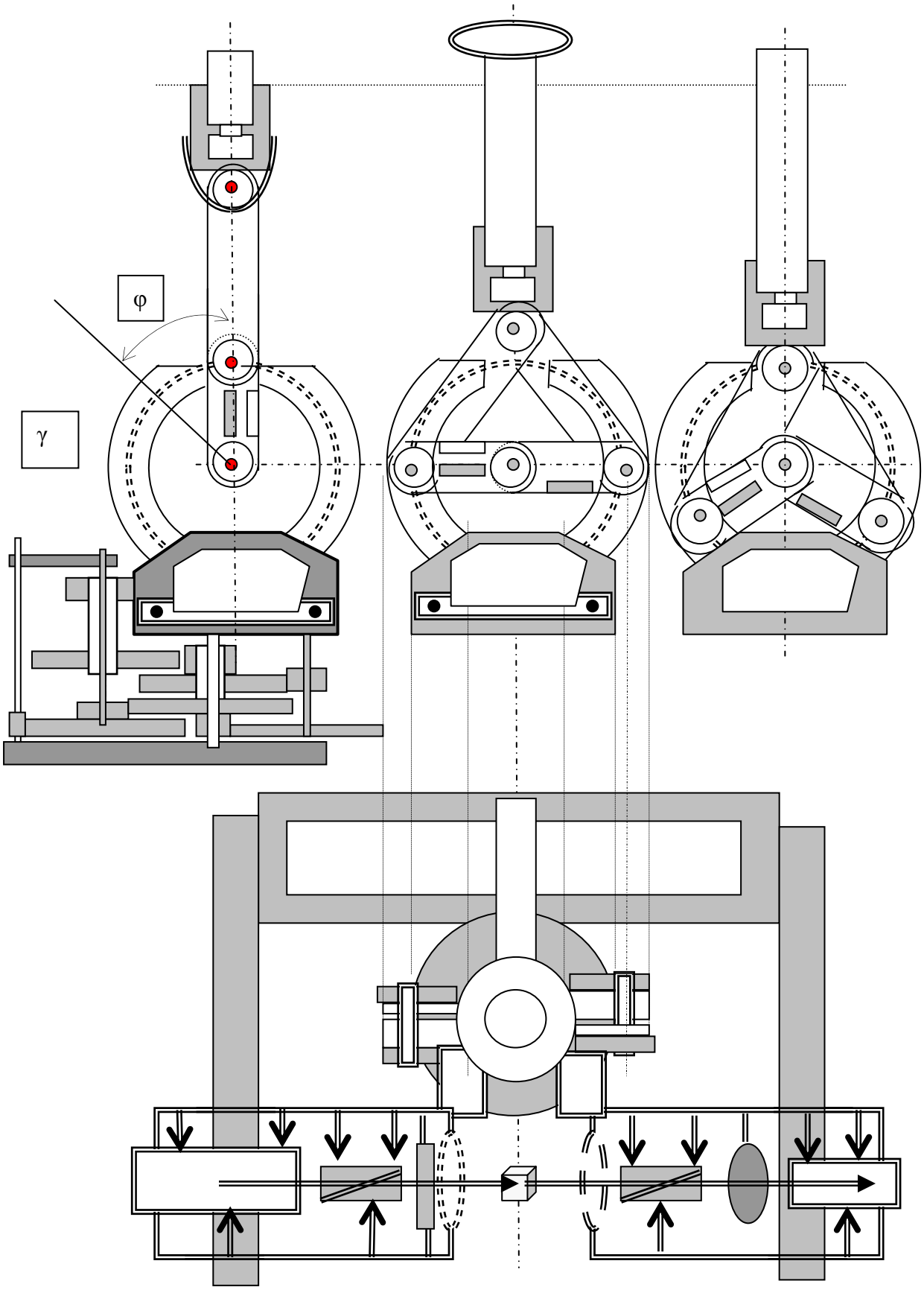


Рис. II.11.в. Схема вида сверху НПВО-эллипсометра.

§2.2. Измерительная информация

§2.2.1. Измерения констант фотомодифицированной стеклокерамики

Для измерения оптических параметров новых стеклокерамических материалов по старой методике амплитудно-фазовой эллипсометрии на модифицированном приборе ЛЭФ-3М -1 за счёт применения веб-камеры для наблюдения на экране ПК картины соответствующей спекл-структуры отражённого света.

При спектроугловом мониторинге этих ОИ в поляризованном свете He-Ne лазера (633 нм) наблюдалось расщепление информационного луча на три оптически активных ($n_{o,e}$) пучка, положение которых и гашение на экране визуализации зависело от азимутов задающих и анализирующих поляризаторов прибора.

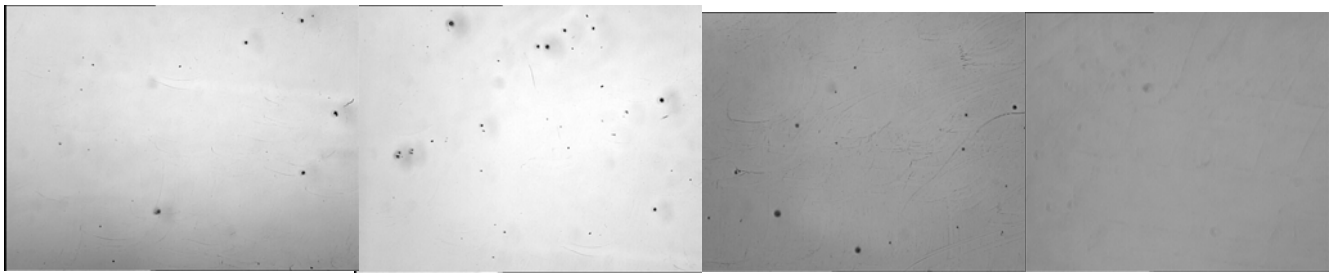
Спектроугловое сканирование ОИ по методу Брюстера позволило оценить величину сдвига в показателях преломления материалов, модифицированных воздействием ультрафиолетового излучения (УФ), порядка $\Delta n = 0{,}02$. Решения обратной задачи эллипсометрии для чистой границы подтвердило это различие.

Множество материалов с оптическими функциями включают оптически прозрачную керамику, керамику с люминесцентными и электрохромными свойствами, а также светочувствительные керамические материалы. Первые сообщения о прозрачном керамическом материале на основе оксида алюминия "лукаллокс" появились 40 лет назад. В настоящее время известно несколько десятков и сотен видов прозрачных керамик, создаваемых на основе индивидуальных оксидов, их соединений друг с другом, а также ряда бескислородных соединений. Стеклокерамика относится к группе новых мало изученных перспективных оптических материалов с высокой объемной дифракционной способностью. Технология их изготовления на основе силикатных стекол, допированных светочувствительными элементами серебра, брома, фтора и церия, позволяет получить мелкодисперсный зернисто-блочный материал с регулярной объемной брегговской решеткой для световых волн видимого диапазона. Когерентные световые лучи испытывают в подобной фото-стекло-керамике объемную дифракцию, что может широко использоваться в прикладной спектральной голографии. Процесс их изготовления включает в себя обработку фото-термо-преломляющего (ФТП) стекла ультрафиолетовым излучением He-Cd лазером на длине волны 325 нм, и термическое воздействие: изменение температуры от 480^0 С до 580^0 С, с задержкой на температуре 520^0 С от нескольких минут до нескольких часов [32].

Максимальная блочность спекания в этих материалах достигает линейных размеров порядка 50 мкм, соизмеримых с длинами волн среднего и дальнего инфракрасного диапазона на парах воды. Показатели фото-термо-преломления (n) такой стеклокерамики (ФТП-стекол) отличаются от базового стекла их

матрицы, как ожидается, в третьем, четвертом знаках после запятой. Поэтому типовая точность измерений $\Delta n = \pm 0{,}001$ становится критической.

Состояние поверхности ОИ, зарегистрированное с помощью поляризационного микроскопа до 40- кратного увеличения, представлено на рис. II.12.а – 12.г.



«а» «б» «в» «г»

Рис. II.12. Виды поверхностей ОИ в поляризационном микроскопе:
«а» - граница между стеклокерамикой и зоной её облучения УФ (2.5х);
«б» - дефекты макровключений на поверхности стеклокерамики (увел. 2.5х);
«в» - дефекты макровключений в зоне облучения УФ (увеличение – 2.5х);
«г» - дефекты макровключений в зоне облучения УФ (увеличение – 40х).

Из этих снимков видно, что зеркальность поверхности вне зон свилей материала (г) далека от совершенства для эллипсометрических прецизионных измерений. Это значит, что оценка оптических параметров ОИ может отражать только их эффективные локальные значения.

Следовательно, достоверность значимости различий в показателях преломления Δn между стеклокерамическими ОИ и их рузупрочнёнными модификациями при облучении УФ должна удовлетворять критерию превышения различий между значениями их средних величин $\Delta n_{ср}$ над вариациями локальных измерений – размахами $\delta n_{лок}$:

$$\Delta n_{ср} > \delta n_{лок}.$$

Трудоёмкость таких измерений значительна при соизмеримости подобных различий.

На рис. II.6.а, б, в, г представлены фотографии с веб-камеры визуального наблюдения гашения светового пучка (ЛГ-57) двух ОИ перед и после вывода его на фоторегистрацию (ФЭУ-86).

На этих снимках видно, что веб-камера регистрирует, во-первых, не полное гашение света в скрещенных поляризаторах эллипсометра (рис. II.11.б,г) и, во-вторых, расщепление отражённого луча на пару (рис. II.11.б) и более (рис. II.11.г) пучков.

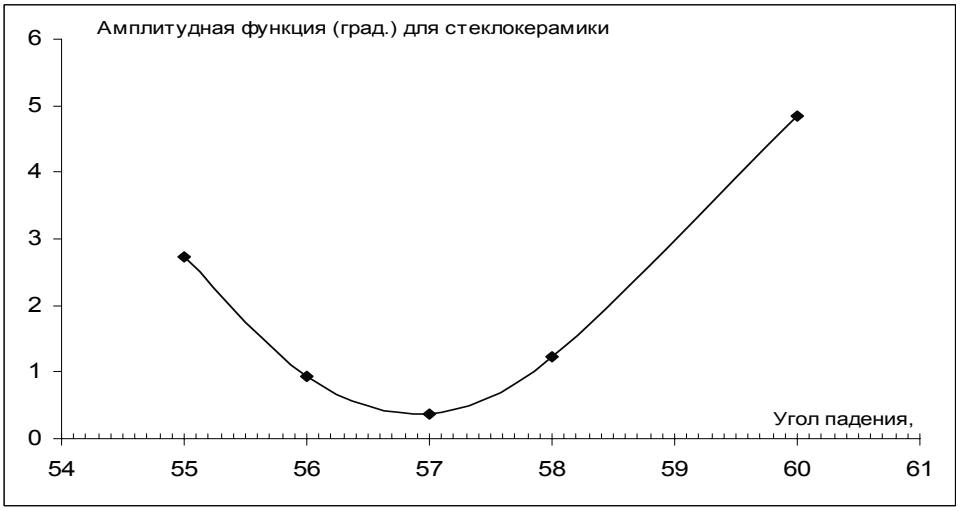
Изображения на рис. II.11.а, в соответствуют спекл-картинам поля зон Френеля в дальней области дифракции Фраунгофера.

Поскольку гашение света наблюдается либо сразу в паре расщеплённых пучков с непогашаемым третьим, либо наоборот (одном при непогашаемых двух), то можно сделать вывод о непосредственном проявлении эффектов

двулучепреломления ($n_o \neq n_e$) от мелкодисперсных поликристаллических внутренних структур стеклокерамики, подобной интегральным рентгеновским спектрам на мелкодисперсных порошковых формах ОИ. Более того, положение этих пучков оказывается чувствительным к азимутам поляризаторов прибора.

На рис. II.12.а,б представлены обработанные результаты измерения амплитудной Ψ(φ) функции от углов падения света на поверхность ОИ в двух зонах – чистой и облученной.

а)



б)

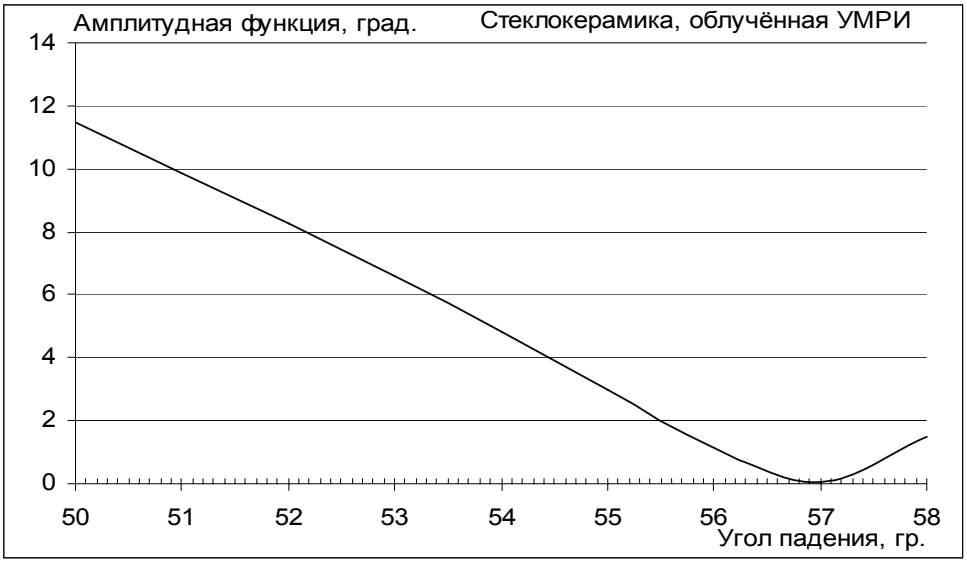


Рис. II.12. Амплитудные функции отражённого света от чистых и облучённых ОИ.

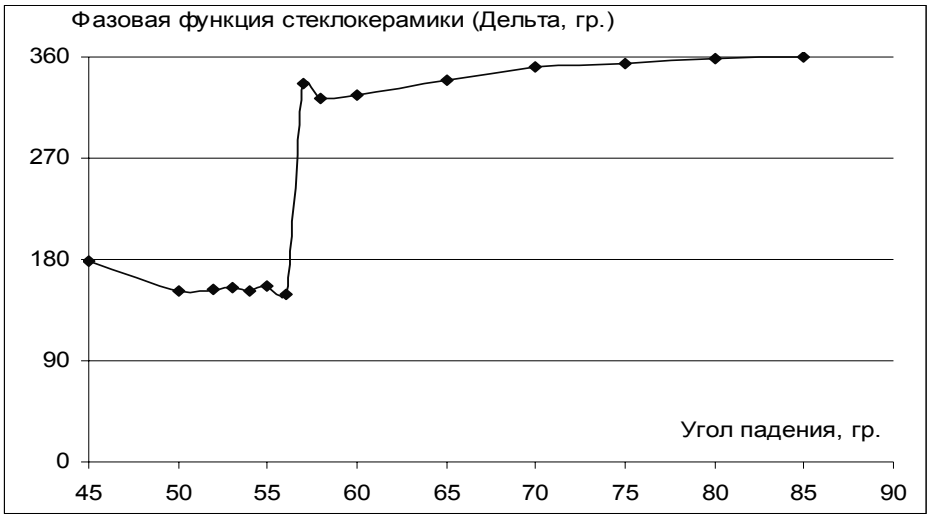
Из представленных данных видно, что стеклокерамика в ОИ – высококачественный диэлектрик, т.к. минимум этих функций чрезвычайно мал ($\Psi_м$ - несколько угловых минут).

Это позволяет рассчитать показатель ослабления света (экстинкцию k) этих ОИ и, при дополнительном измерении α коэффициента поглощения материала на длине волны λ=623,8 нм независимыми спектроскопическими методами,

оценить степень $\chi=k-\lambda\alpha/(4\pi)$ светорассеяния материала ОИ, т.е. индикатрису светорассеяния при разных углах φ.

На рис. II.13.а,б представлены обработанные результаты косвенного измерения фазовой функции $\Delta(\varphi)$ от углов падения света на поверхность ОИ в двух зонах – чистой и тёмной, которая образовалась после облучения материала разупорядочивающим решётку УФ.

а)



б)

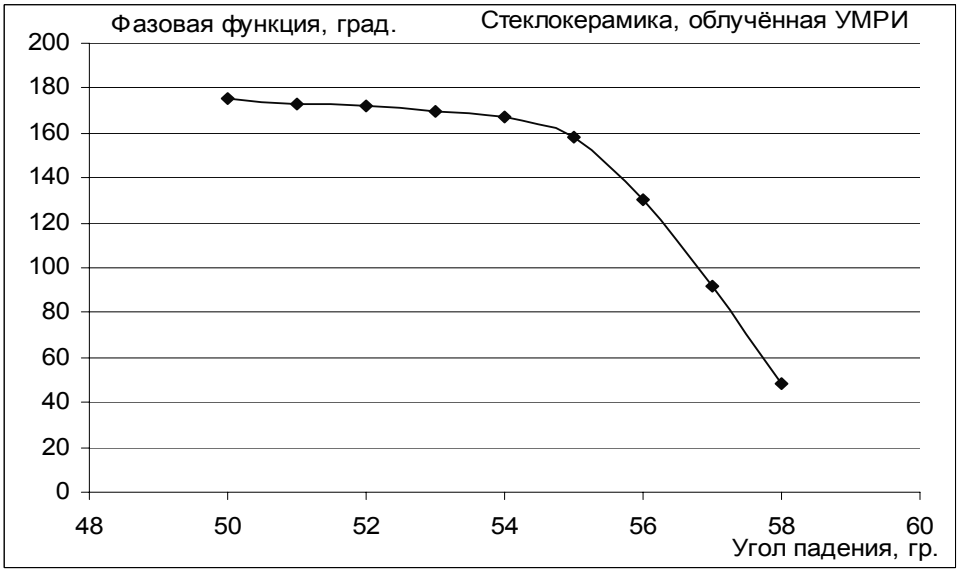


Рис. II.13. Фазовые функции света, отражённого от необлучённых и облучённых ОИ.

Из представленной кривой (а) видно, что поверхность стеклокерамических ОИ имеет переходную приповерхностную слоистую структуру, т.к. скачёк этой функций $\Delta(\varphi)$ после углов псевдо Брюстера стремится не к 0, а к 2π. При этом облучённая поверхность этих же ОИ имеет типовой вид спада от π к 0.

Следовательно, для решений обратных задач эллипсометрии по определению ряда оптических параметров (толщин d и компонент комплексного показателя преломления ОИ n – ik), начиная от их значений на поверхности, резонно использовать кроме модели идеальной границы Френеля раздела сред на воздухе, так же и модель эффективного приповерхностного переходного слоя на этих ОИ.

Однако для подобных точных расчётов необходимо знать $n_{ои}$, $k_{ои}$ – их истинные значения комплексного показателя преломления в объёме материала этих ОИ.

При допустимости оценок измерений, резонно использовать итерационные методы.

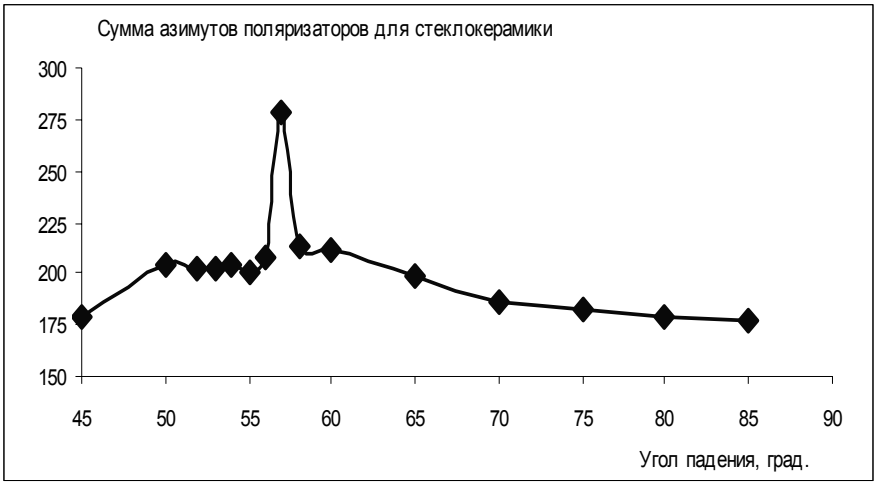
В таблицах №4.а, б, в представлены непосредственно измеримые параметры азимутов ориентации поляризаторов прибора А и Р при установке компенсатора на $\pm 45^0$.

Попытка применения этой же формулы для стеклокерамических ОИ оказалась не совсем удачной с точки зрения основного методологического требования к свойству гладкости и монотонности функции $\Delta(\varphi)$. Действительно, по экспериментальным данным, представленным в таблице №4.б, для стеклокерамического необлучённого ОИ сумма P_1+P_2 азимутов поляризаторов имеет не типичный для диэлектрика в отличие от линейной комбинации $P + (P_2 - P_1)$ вид, изображённый на рис. II.14.

Таблица № 4.б. Зонные измерения на стеклокерамическом ОИ.

φ, гр.	P1, гр.	A1, гр.	P2, гр.	A2, гр.
45	223,6333	285,8708	315,0986	252,5
50	231,7306	279,1	333,1722	259,5
52	229,7069	276,3	333,3722	262
53	229,0167	274,75	332,9081	263,55
54	225,7139	273,1861	338,8833	265,0889
55	217,9	271,6653	342,5	266,2167
56	211,2528	270,2417	357	268,3667
57	294,8167	269,95	342,95	269,2
58	296,0333	270,75	277,95	268,3
60	317,05	274,3333	254,1167	264,6667
65	323,7167	282,1	234,7167	256
70	317,1667	289,1167	228,1	248,3333
75	316,6667	296	226,6667	241,1833
80	314,45	302	224,8833	234
85	313,6333	308,8167	223,6	228

а



б

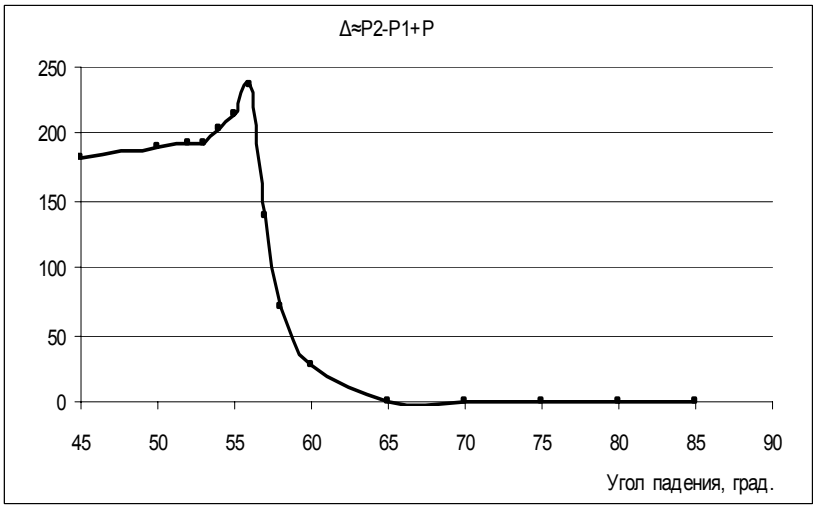


Рис. II.14. Калибровочные комбинации азимутов поляризатора.

Из данных, представленных на рис. II.14.а, следует факт существования инварианта для разностей азимутов поляризатора порядка $P = 90^0$. Именно эта инварианта оказывается достаточной для правильного описания свойств фазовой функции $\Delta(\varphi)$ от углов падения эллипсов поляризации света, отражённого от недиэлектрических ОИ (спад от π до 0 на рис. II.14.б).

В традиционной эллипсометрии сложилось, оказывается, ошибочное представление об инвариантности калибровочной постоянной P_0. Метрологической проблемой считался выбор материала и приготовления из него рабочих мер (ОИ) калибровки эллипсометров. Эти меры выполнялись из высоко прозрачного оптического стекла марки К-8 или КВ, КУ марок кварца с обработкой поверхности по методу сверх глубокой шлифовки-полировки (СГШП). Однако метод эллипсометрии для контроля оптических параметров материалов не смог в своё время пройти Государственные испытания.

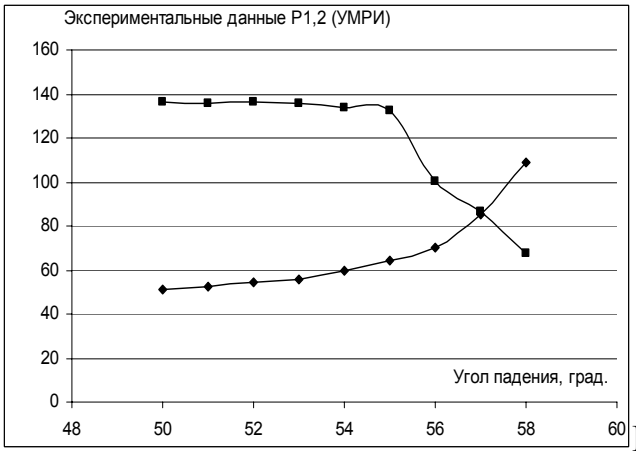
Таким образом, тезис о калибровочной инвариантности индивидуальных ОИ имеет свой большой резон.

В таблице №4.в представлены непосредственно измеренные азимуты поляризаторов на стеклокерамических ОИ, подвергнутых радиационному разупорядочиванию решётки материала УФ. Калибровка фазовой функции для них, выполненная по новой методологии и изображённая на рис. II.14.б, имеет физически правильный характер, хотя поведение самих азимутов (рис. II.14.а) далеко от диэлектрических ОИ (рис. II.8).

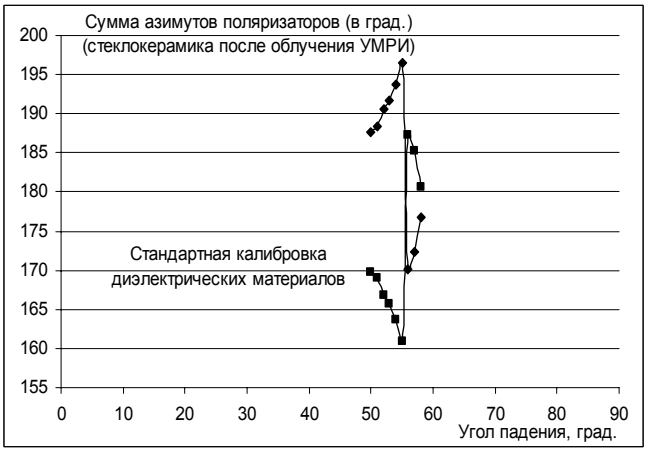
Таблица №4.в. Измерения азимутов для стеклокерамики, облучённой УФ.

φ, гр.	P1, гр.	A1, гр.	P2, гр.	A2, гр.
50	51,23333	100,4167	136,5	77,48333
51	52,5	98,8	135,8333	79,01667
52	54,33333	97,1	136,25	80,55
53	56	95,5	135,7333	82,26667
54	59,95	93,71667	133,8667	84,06667
55	64,25	92	132,2833	86,05
56	70,03333	90,08333	100,05	87,8
57	85,4	89	86,85	88,85
58	109,02	90,2	67,71667	87,18333

А



Б



В

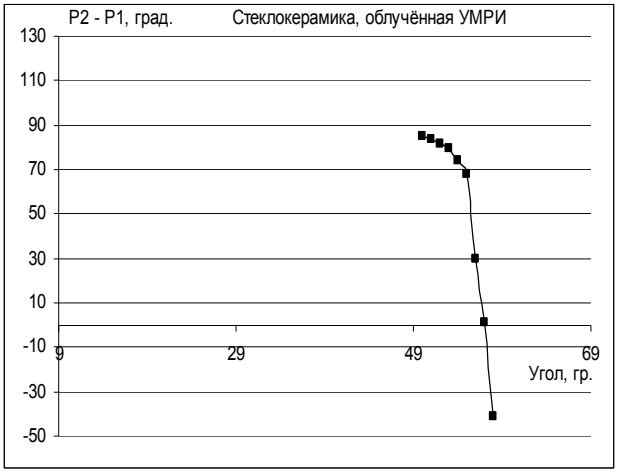


Рис.II.15. Свойства комбинаций азимутов поляризатора для облучённой стеклокерамики.

Путём графического увеличения значений амплитудных функции Ψ(φ) рис. II.12.а,б, представленного на рис. II.16, и линейной аппроксимации их крыльев в зоне минимума получаем следующие значения углов псевдо Брюстера: $\varphi_{ст.кер}$= $56^0 33'$, $\varphi_{умри}$= $56^0 57'$.

Следовательно, тангенсы этих углов $\varphi_{пс.бр}$ позволяют оценить вещественную часть показателей преломления этих ОИ:

$$n_{ст.кер} = 1{,}5165798, \quad n_{обл.\ ст.\ кер.} = 1{,}533997.$$

Абсолютная разница между показателями преломления ОИ составляет величину Δn = 0,017, т.е. они отличаются во втором знаке после запятой при относительном различии около 1%.

Погрешность оценки показателя преломления по методу Брюстера определяется по формуле $\Delta n = (1 + n^2)\ \Delta\varphi$ и при графической погрешности локализации углов Брюстера $\Delta\varphi \approx 3' = 0.001$ составляет величину порядка ± 0.003 и менее (теоретически до ±0.0001).

Т. о., различие показателей преломления ОИ является статистически значимым.

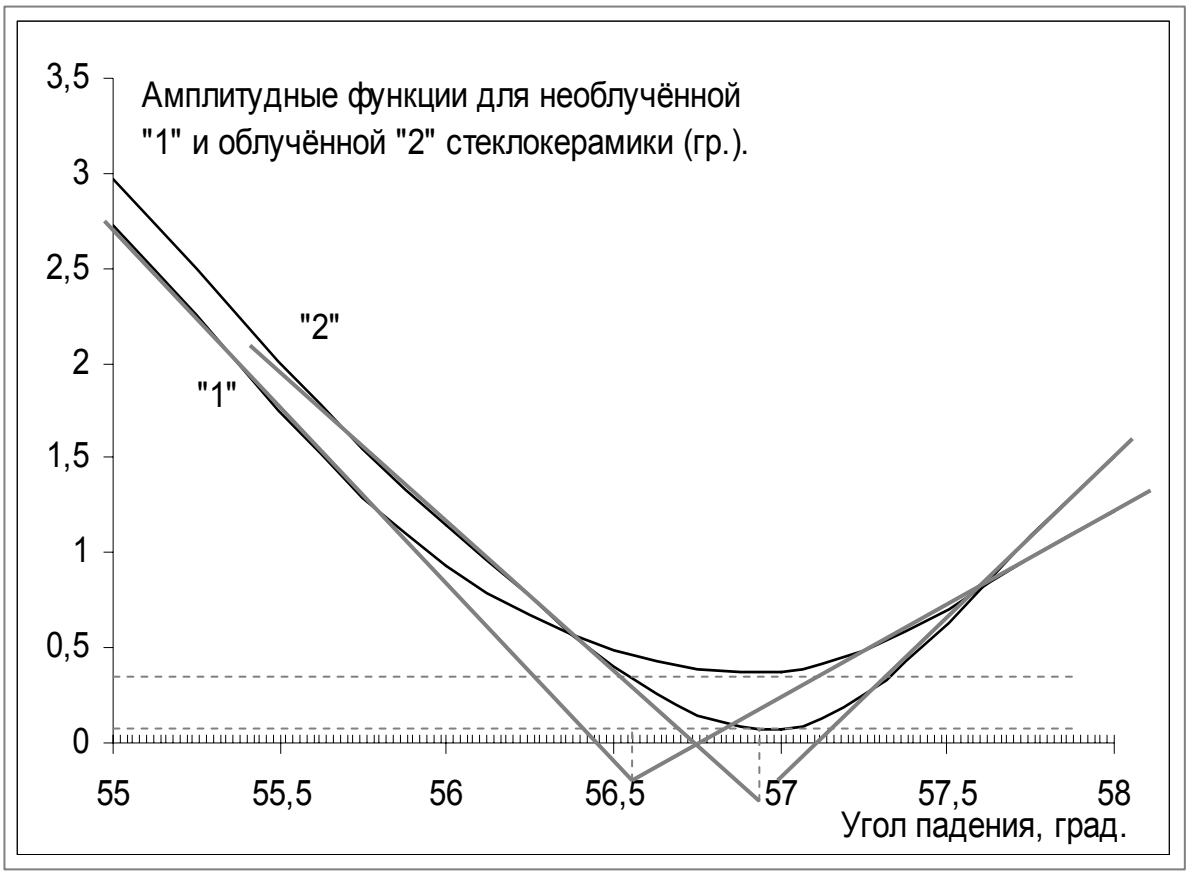


Рис. II.16. Графическое определение углов псевдо Брюстера по $\Psi_{минимум}(\varphi)$.

Измерения в необлучённой зоне стеклокерамики представлены данными таблицы №5.

Таблица №5. Сводные данные эллипсометрических измерений на стеклокерамике.

φ, гр.	Ψ(φ), гр.	Δ(φ), гр.	n	k	Δ≈ΔP+P	n	k
45	16,68542	178,6981	1,490411	0,017286	181,4993	1,490282	0,019903
50	9,8	152,5272	1,440459	0,170984	191,4757	1,492058	0,077943
52	7,15	154,3508	1,482024	0,11769	193,6993	1,507267	0,066088
53	5,6	155,5052	1,493171	0,087683	193,9255	1,509367	0,05182
54	4,048611	152,8328	1,497015	0,068929	203,2034	1,502236	0,059839
55	2,724306	157,03	1,516217	0,039982	214,634	1,505159	0,057477
56	0,9375	149,1772	1,511539	0,017728	235,7812	1,501041	0,028244
57	0,375	79,66333	1,537209	0,013906	138,1673	1,550442	0,009576
58	1,225	323,4467	1,561194	0,028051	71,95067	1,584016	0,045991
60	4,833333	326,2633	1,558503	0,10219	27,10067	1,549759	0,082858
65	13,05	338,9967	1,528365	0,175866	1,034	1,513524	0,008587
70	20,39167	352,1633	1,511358	0,109632	0,967333	1,510411	0,013483
75	27,40833	354,0967	1,494691	0,128117	0,034	1,496452	0,000731
80	34	358,0967	1,46475	0,06618	0,467333	1,4657	0,016232
85	40,40833	360,1967	1,352208	0,013142	0,000667	21,17771	0,538773

Среднее угловое значение показателя преломления на полной выборке из 15 точек со средним разбросом в норме Чебышева $n^{(1)}_{ср}(\varphi) = 1{,}496 \pm 0{,}077$, тогда как при улучшенной калибровке $n^{(2)}_{ср}(\varphi) = 1{,}5127 \pm 0{,}0385$ по всей совокупности углов. Это значение всего на 0.004 отличается от брюстеровской оценки (1,517).

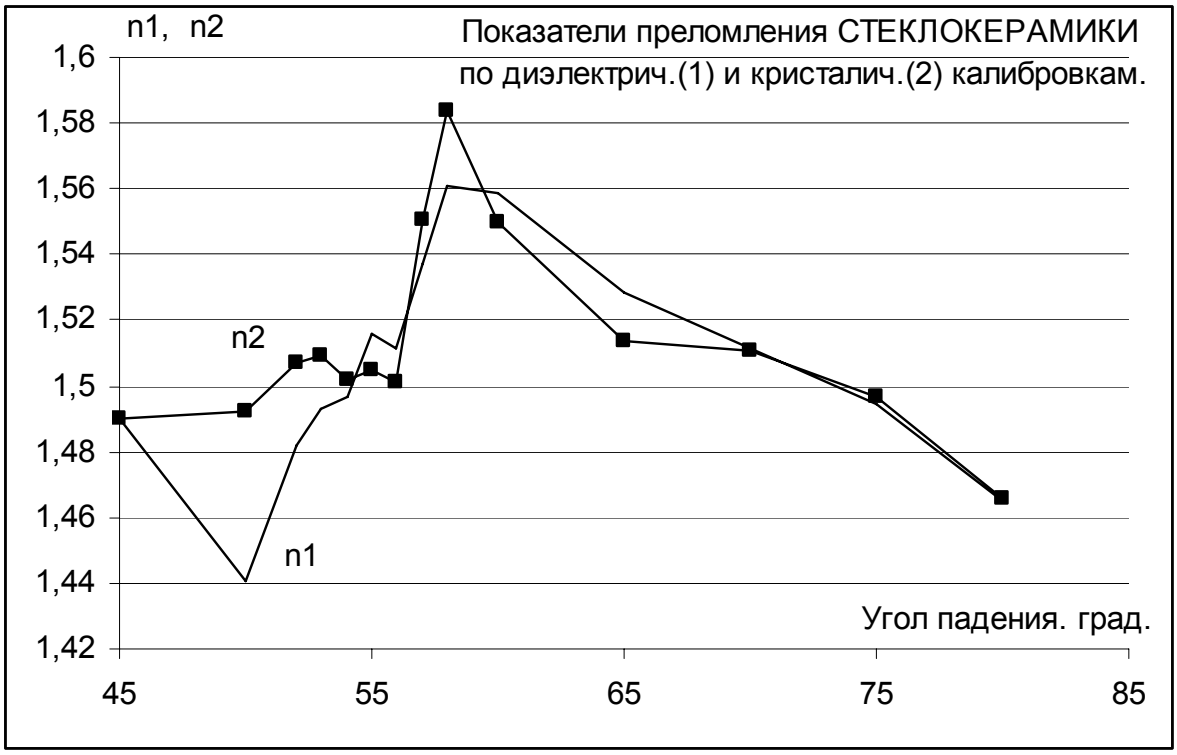


Рис.II.17. Значения компонент комплексного показателя преломления на стеклокерамике.

После статистической обработки экспериментальной совокупности по гипотезам отброса промашек, оценка показателя преломления по десяти точкам принимает значение

$n_{ср}$ = 1,5028 ± 0,0073.

Среднее угловое значение показателя экстинкции на полной выборке из 15 точек со средним разбросом в норме Чебышева $k_{ср}(\varphi)$ = 0,077 ± 0,009 для грубой калибровке по диэлектрической методологии. При улучшенной калибровке показатель экстинкции принимает значение $k_{ср}(\varphi)$ = 0,038 ± 0,004.

Измерения в облучённой зоне стеклокерамики представлены данными таблицы №6.

Таблица №6. Сводные эллипсометрические данные на облучённой стеклокерамике.

φ, гр.	Ψ(φ), гр.	Δ(φ), гр.	n	k
50	11,46667	175,2667	1,573435	0,041925
51	9,891667	173,3333	1,56646	0,049334
52	8,275	171,9167	1,559955	0,048572
53	6,616667	169,7333	1,552498	0,047873
54	4,825	166,9167	1,541133	0,04299
55	2,975	158,0333	1,525611	0,04235
56	1,141667	130,0167	1,508475	0,03216
57	0,075	91,45	1,539932	0,002838
58	1,508333	48,69667	1,560104	0,043534

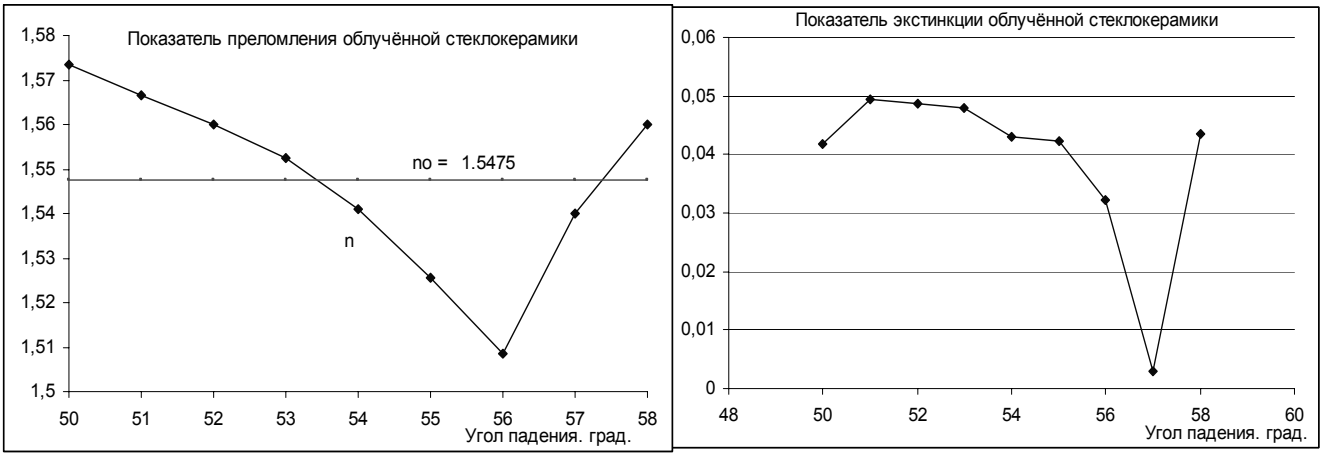


Рис. II.18. Значения компонент показателя преломления на облучённой стеклокерамике.

Среднее угловое значение показателя преломления на полной выборке из 9 точек со средним разбросом в норме Чебышева по данным таблицы №6 составляет величину $n^{(обл)}_{ср}(\varphi)$ = 1,5475 ± 0,0391. Аналогичное среднее значение экстинкции по этим данным имеет величину $k^{(обл)}_{ср}(\varphi)$ = 0,0166 ± 0,0096. На рис. II.18 представлен угловой ход этих компонент комплексного показателя преломления облучённой стеклокерамики.

По совокупности рассмотренных проблем калибровочных измерений можно сделать ряд определённых выводов, главный из которых состоит в том, что авторы публикаций по эллипсометрии кроме результатов должны бы представлять всю совокупность данных непосредственно измеряемых азимутов для всего ряда многоугловых измерений (какой бы трудоёмкой эта работа не была).

Решения обратной задачи эллипсометрии для простой модели идеальной границы Френеля измеренных ОИ выявляют слабую, но характерную угловую зависимость их оптических констант. Значит, следует использовать более корректную модель оптической системы для этих ОИ в виде хотя бы однородного переходного приповерхностного слоя.

Средние значения вещественных составляющих комплексного показателя ($n_{с\text{-}к}$ и $n_{умри}$) преломления для облучённой УМРИ и необлучённой стеклокерамики статистически значимо отличаются друг от друга, причём у облучённых ОИ он выше.

Эти значения качественно и количественно не противоречат аналогичным оценкам, выполненным по методу Брюстера.

Это может означать, что радиация при разупрочнении кристаллических компонент стеклокерамики уменьшает её пористость и гомогенизирует материал, увеличивая его оптическую плотность ($n_{обл.\ ст.кер.} > n_{ст.кер.}$).

Более того, радиация уменьшает толщину переходного приповерхностного слоя, что следует из поведения фазовой функции, изменившей подъём от π до 2π, наблюдаемой для чистой стеклокерамики, на спад до 0. Для такого спада характерны тонкослойные ($d \to 0$) решения двойственной по толщине эллипсометрической задачи Холмса [2].

В пользу гомогенизации материала при радиационном разупорядочивании его кристаллических структур и заполнении дефектами разрушения пор материала говорит тот опытный факт, что минимум амплитудной функции существенно ниже у облучённых ОИ, чем у исходного материала.

Измерения выполнены при усреднённом гашении луча, чётко разделяющегося на три моды в зеркальном канале отражения, хотя можно применить к каждому из этих пучков и метод Брюстера и модели идеальной или переходной тонкослойной границы. По-видимому, именно с этим усреднением связана яркая угловая зависимость $n(\varphi)$ и $k(\varphi)$ вещественных компонент комплексного показателя преломления для облучённых ОИ, обладающих анизотропией составляющих их мелкодисперсных кристаллов.

Действительно, картина угловой зависимости показателя преломления для чистой стеклокерамики имеет как бы три угла зрения:

- При малых (крутых) углах зрения лучи проникают глубже в материал и «видят» его более пористым, чем плотным (n_φ имеют заниженные значения);
- При средних углах Брюстера поверхность ОИ рассматривается только сагиттальными компонентами поля и свет «видит» его

активно отражающие компоненты кристаллических фаз материала (n_φ - максимальны);

- На скользящих лучах свет не так глубоко входит в объём материала, но «видит», в частности, его слоистость, о которой говорит фазовая функция, имеющая характерный для такой модели подъём после угла псевдо Брюстера и возвращает показатель преломления снова к менее плотным показателям преломления материала.

Для облучённого ОИ картина обратная:

- При малых (крутых) углах зрения лучи проникают глубже в материал и «видят» его гомогенизированные мелкодисперсные кристаллы с плотной (без пористости) упаковкой;
- При средних углах Брюстера поверхность ОИ рассматривается только сагиттальными компонентами поля и свет, расщеплённый на обыкновенные и необыкновенные лучи «видит» среду как бы одним глазом и со стороны отрицательной кристаллической активности с минимальной компонентой n_φ;
- На скользящих лучах свет не так глубоко входит в объём материала, но «видит» вклад всех компонент кажущегося более плотно сложенными кристаллитами материала (n_φ – опять возрастают).

В целом метод эллипсометрии правильно описывает основные качественные и количественные характеристики ОИ, информативность которых может быть утаена только из-за не адекватного выбора оптических моделей ОИ и описывающих их основных уравнений эллипсометрии.

Таким образом, перед исполнителем эксперимента возникают две проблемы – либо отказаться от случайных погрешностей в данных и провести измерения в таких точках сбоя повторно или в родственных (однородных по свойствам материала) точках ОИ, либо переложить проблемы корректировки измерений на статистическую обработку измерений с помощью численных методов и эффективных ЭВМ программ.

§2.2.2. Первичная измерительная информация гель-зольных слоёв

Дополнительные измерения первичных калибровочных азимутов $P(\varphi)$ и $A(\varphi)$, выполненные по двухзонной методике, когда $U(P,A)=U(P+\pi,A)=$ $=U(P+\pi,A+\pi)=U(P,A+\pi)$, представлены на рис. II.19.

По представленным первичным $P_{1,2}$ и $A_{1,2}$ данным строятся вторичные амплитудно-фазовые Ψ-Δ параметры эллиптичности поля световой волны, отражённой от стекла НС-7.

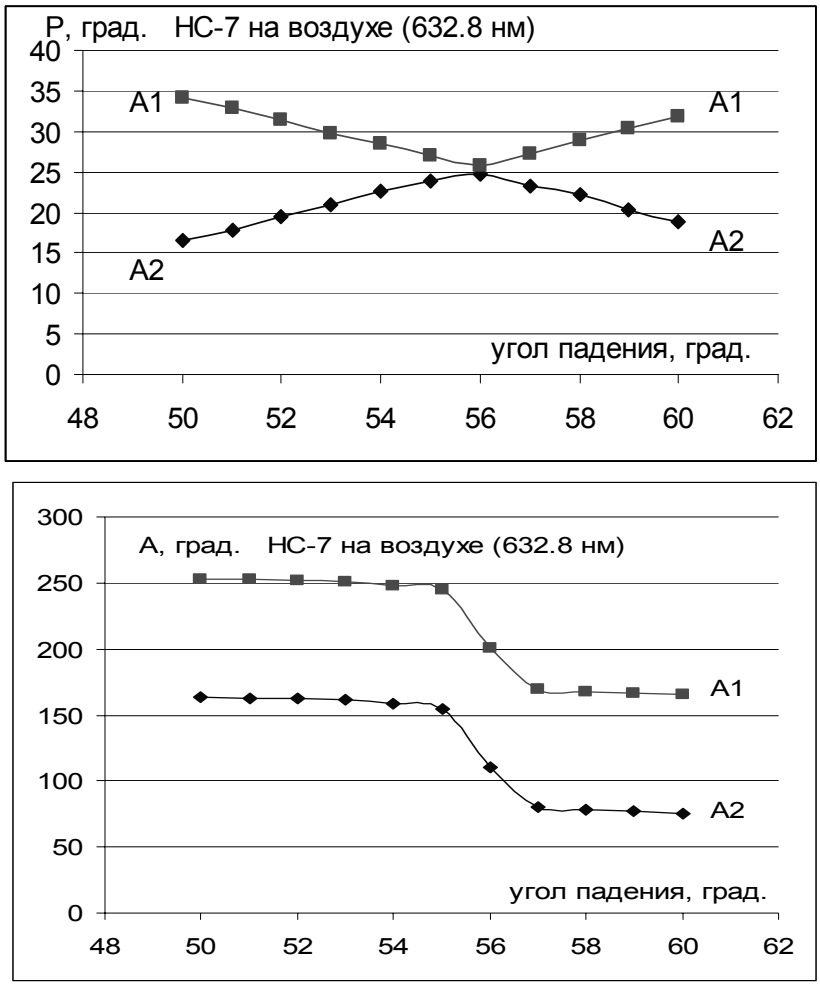


Рис. II.19. Развёртка азимутов для НС-7.

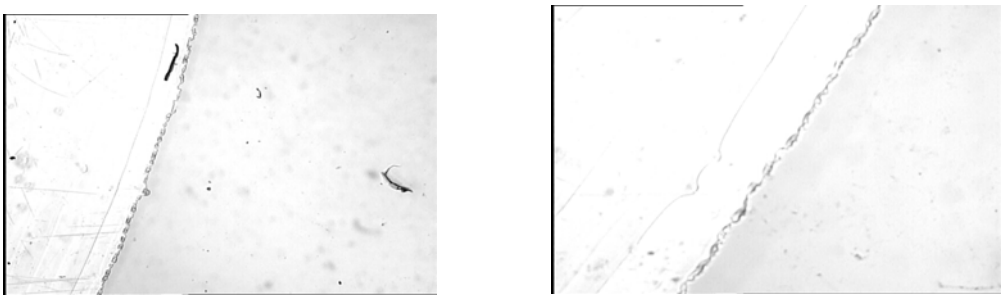


Рис. II.20. Поверхность технического стекла 2.5^X и 5^X увеличения.

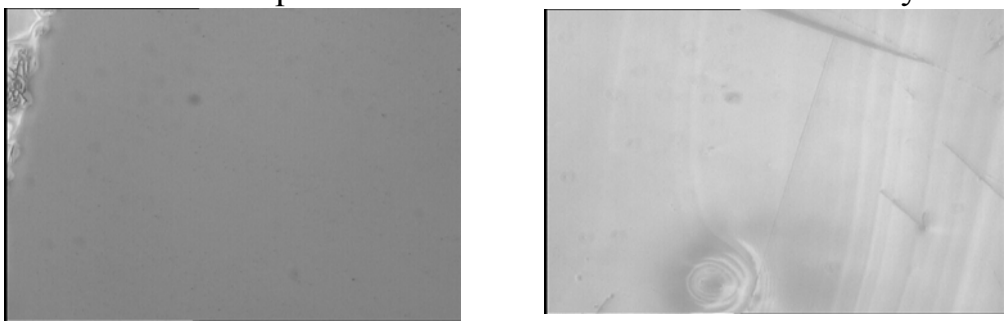


Рис. II. 21. Золь-гельные покрытия при 20^X и 40^X увеличении.

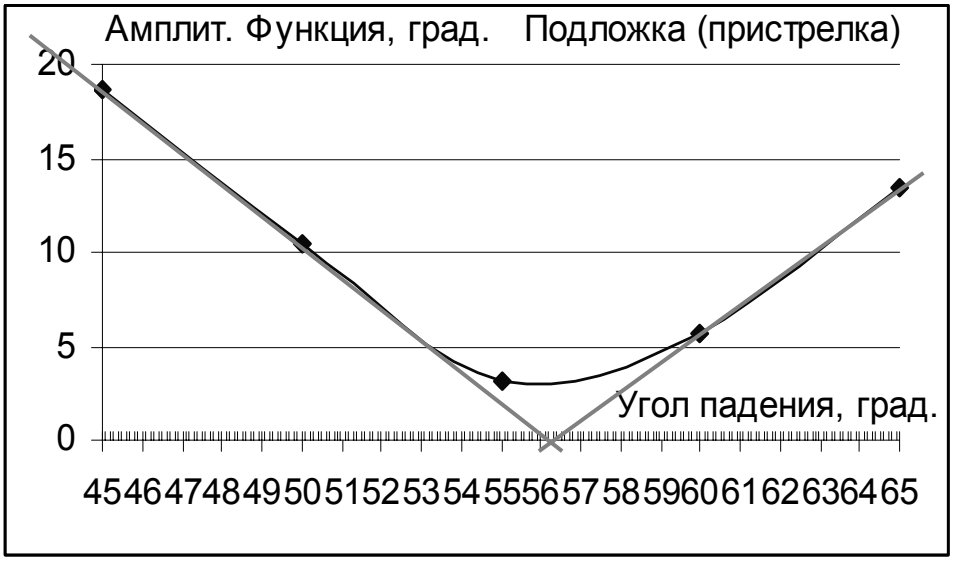


Рис. II.22. Подложки для гель-золь покрытий

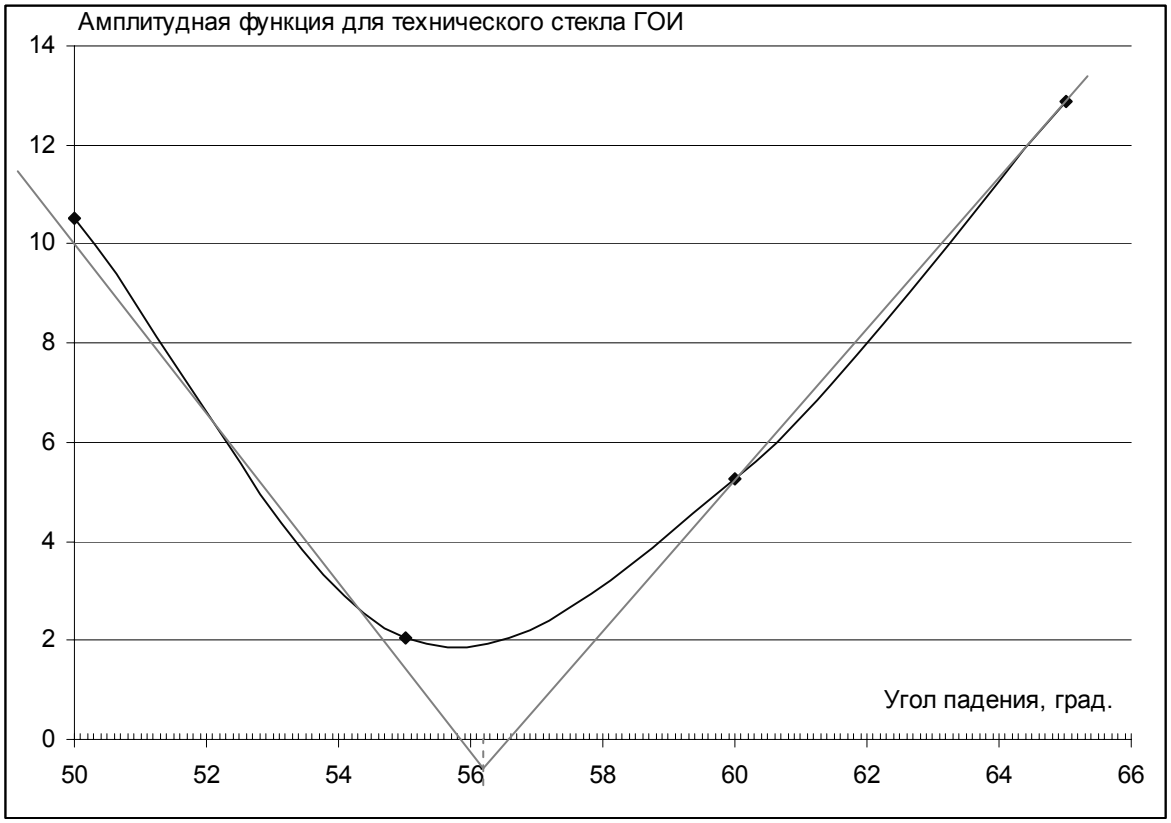


Рис. II.23. Графическая оценка показателя преломления.

Угол псевдо Брюстера $\varphi_{мин} = 56^0 21'$. Тангенс этого угла $n = tg(\varphi_{мин}) = 1.50228 \approx 1.502$

Исходная информация первой пристрелки:

φ, гр.	P1, гр.	A1, гр.	P2, гр.	A2, гр.	Ψ(φ), гр	Δ(φ), гр	n	k
45	44,11	106,25	134,35	71,38	17,435	178,97	1,52776	0,01504
50	44,49	99,35	135,38	78,3	10,525	177,56	1,534	0,0189
55	51,57	90,49	140,29	86,37	2,06	165,57	1,4979	0,0184
60	40,45	83,57	129,42	94,09	5,26	7,56	1,5197	0,0261
65	42,09	75,54	132,5	101,28	12,87	2,84	1,5206	0,0234
70	43,2	68,42	133,07	108,54	20,06	1,16	1,5247	0,0162
75	43,21	62,01	133,3	115,56	26,775	0,92	1,5303	0,02

Средние значения этих компонент: n=1.5221±0.0081; k = 0.0197 ± 0.00295.
Исходная информация второй (грубой) пристрелки:

Угол φ,	P1,град.	A1,град.	P2,град	A2,град	Ψ(φ),гр.	Δ(φ), гр	n	k
45	43,18	107,16	137,09	70,03	18,60833	176,98	1,5878	0,051
50	45,11	99,29	137,36	78,28	10,50833	174,6467	1,53075	0,0411
55	55,16	91,15	144,07	85,01	3,116667	158,0467	1,52878	0,04
60	45,47	83,22	125,1	92,45	4,691667	8,9	1,5424	0,027
65	44,11	73,05	130,05	101,53	14,4	5,433333	1,4646	0,0171
70	45,12	68,35	131,52	109,23	20,4	2,633333	1,5101	0,0361
75	43,32	61,37	133,07	116,08	27,25833	3,05		
80	43,52	55,45	133,15	122,15	33,25	2,583333		
85	43,46	49,57	133,54	128,18	39,175	2,033333		

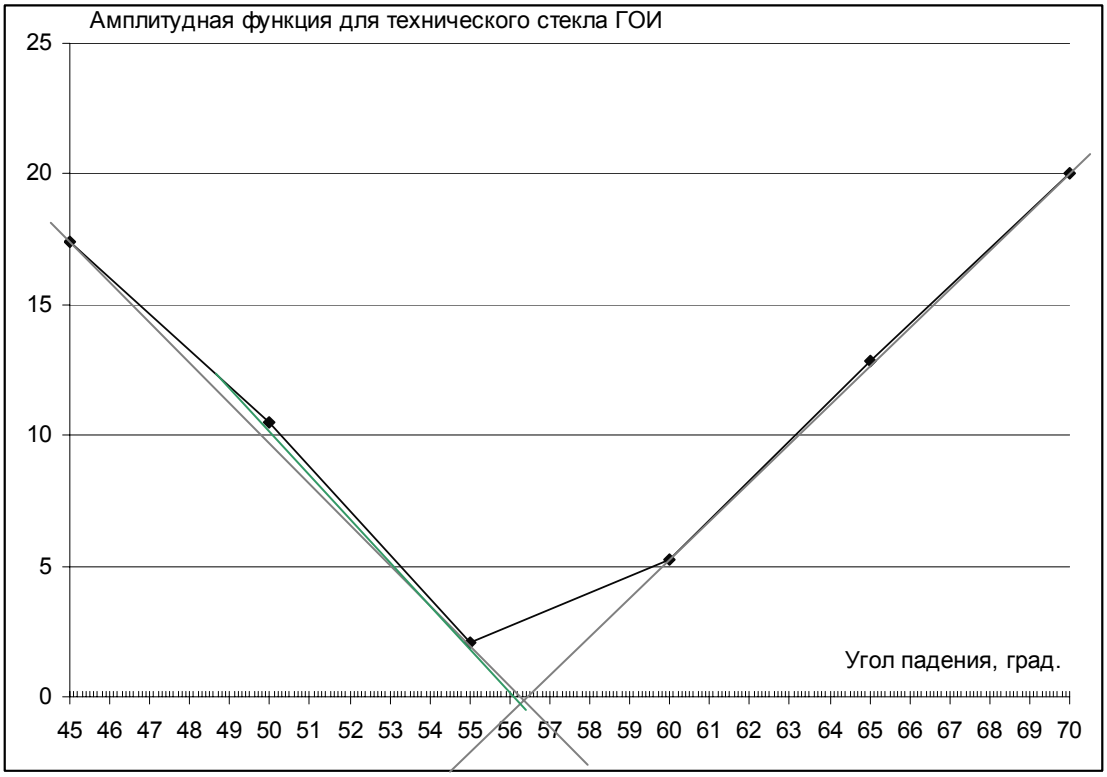
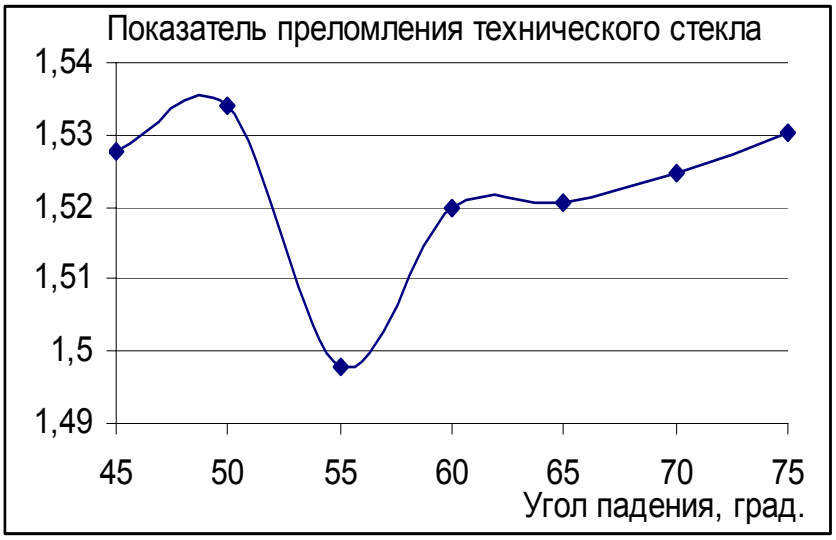


Рис. II.24. Графическая оценка показателя преломления.

Угол корректировки псевдо Брюстера $\varphi_{мин} = 56.45^0$; $n = tg(\varphi_{мин}) = 1.50797 \approx 1.508$.

Разброс – в третьем знаке после запятой – менее процента (по методу Брюстера).



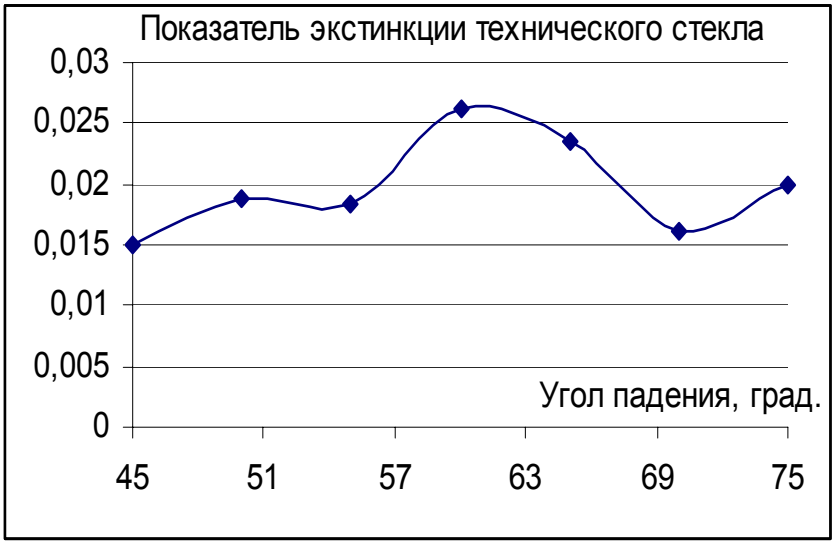


Рис. II.25. Угловой разброс компонент комплексного показателя преломления ТС.

Поскольку среднее значение по углам падения n = 1.5221 ± 0.0081 при значительном светоослаблении (0.02), которое не учитывается в методе Брюстера, то модельное различие по показателям преломления оказывается более значительным:

1.5221 - 1.50797 ≈ 0.0141

1.5221 - 1.50228 ≈ 0.0198.

§2.2.3. Вторичная информация для гель-зольных ОИ

Физически информативные параметры поля световой волны – это её амплитудная $0^0 \le \Psi(\varphi) < 45^0$:

$$\Psi(\varphi) = arctg\left[\left(E^p_{refr} / E^p_{ins}\right) / \left(E^s_{refr} / E^s_{ins}\right)\right] = \left|P_1 - P_2\right| / 2$$

и фазовая $0^0 < \Delta(\varphi) < 360^0$ функции от углов падения φ:

$$\Delta(\varphi) = A_1(\varphi) + A_2(\varphi) + A_0 ,$$

где A_0 – калибровочная константа юстировки эллипсометра.

Для ОИ, подобных идеальным диэлектрикам, калибровочные кривые P_1 и P_2 как бы переходят друг в друга, по точке пересечения которых можно судить о угле Брюстера. Однако в общем случае реальных ОИ экстремумы этих калибровочных кривых не совпадают ни по угловому положению, ни по высоте. В этом легко убедиться простой линеаризацией их кусочно-ломаными кривыми, точки излома которых находятся простым решением СЛАУ. Опыт подобной обработки эллипсометрических данных показывает, что одна из точек экстремума приходится на минимум амплитудной функции $\Psi(\varphi_{пс.Брюст.})$, а вторая отвечает за перегиб фазовой функции $\Delta(\varphi)$ в симметричном случае её хода на полувысоте π-скачка (90^0).

При близком значении этих экстремальных углов, определяющих зону неопределённости угла псевдо- Брюстера, их среднее значение φ_0 может дать оценку показателя преломления согласно известному соотношению:

$$n_0 = tg(\varphi_0),$$

с погрешностью, определяемой их полуразмахом $\Delta\varphi_0$ согласно соотношению:

$$\Delta n_0 = (1 + n^2)\, \Delta\varphi_0 \rightarrow 0.$$

Примеры вторичной измерительной информации представлены ниже.

Fi, deg.	U, mkV	P1, deg.	A1, deg.	P2, deg.	A2, deg.	Psi, deg.	Delta, deg.
50	77	15,20833	162,1833	35,35	71,58333	10,07083	176,3
55	77	22,96667	155,5833	28	64,83333	2,516667	162,95
60	72	20,05833	78,48333	31	168,9333	5,470833	9,95
65	75	12,25	75,45	38,45	165,5833	13,1	3,566667
70	80,5	5,116667	74,96667	45,85	164,85	20,36667	2,35
75	80	-1,475	74,65833	52,55833	164,6167	27,01667	1,808333
80	69	-7,93333	74,36667	58,96667	164,2167	33,45	1,116667
85	76	-13,6333	74,16667	64,81667	164,1333	39,225	0,833333

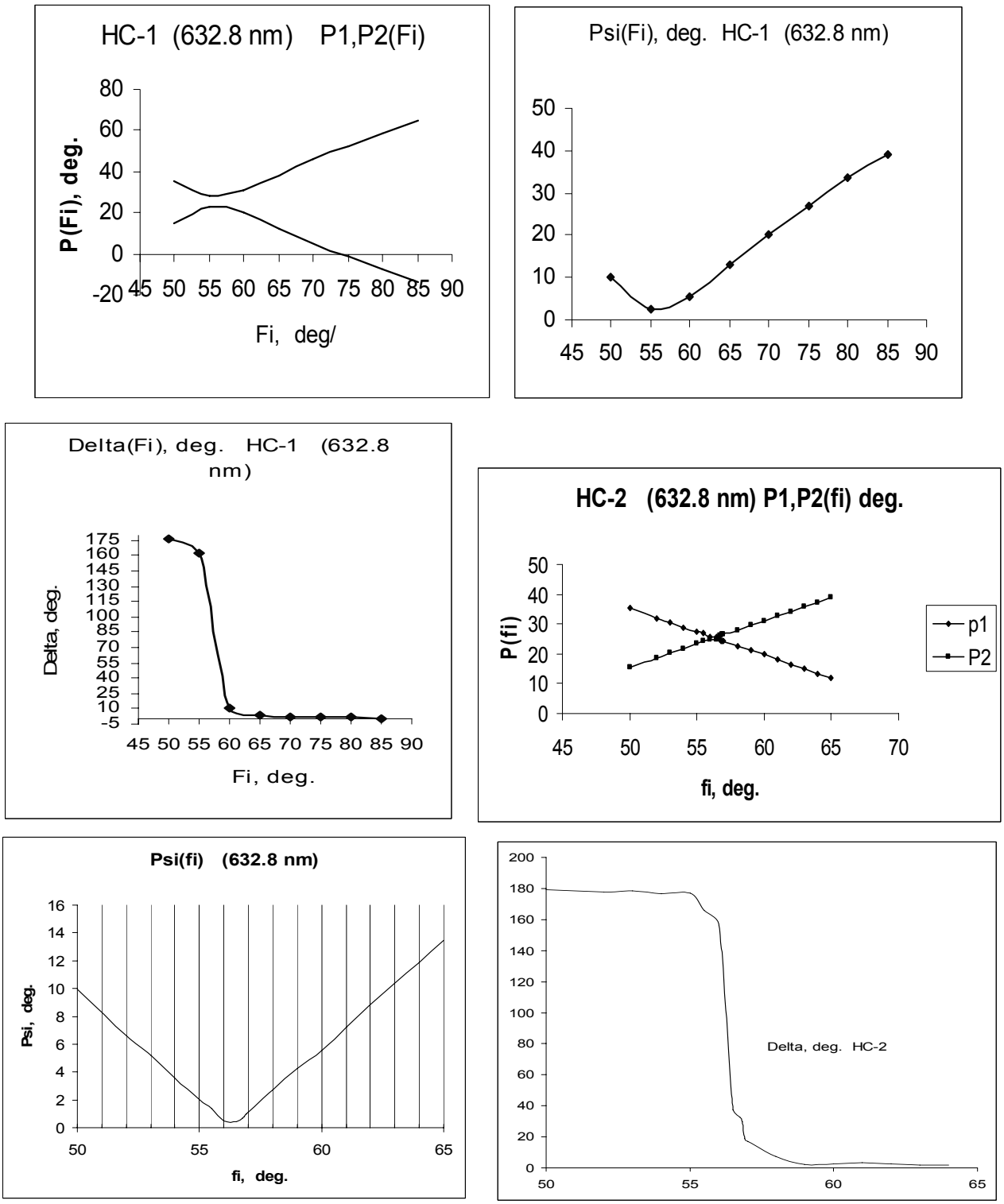


Рис. II.26. Вторичная измерительная информация.

Калибровочные функции A_1 и A_2 от угла падения на рис.6 круто переходят с одной пологой линии на другую. Легко убедиться в том, что при точных измерениях модуль разности $|A_1-A_2|$=Const этих кривых остаётся постоянной величиной, позволяющей выполнить 0-π – калибровку эллипсометра так, чтобы до углов Брюстера фаза $\Delta(\varphi_{мин}) \approx \pi$, а после, соответственно, стремилась к нулю $\Delta(\varphi_{макс}) \approx 0$. Более того, рассмотренное свойство оправдывает однозонную методику измерений и возможность

корректировки промахов не точных измерений (все Δ(φ) лежат на одной из трёх определённых кусочно-линейных кривых, уход от которых всегда может быть откорректирован).

§2.3. Сглаживание первичных данных при многоугловых измерениях

Физический смысл 0-π-ого перехода многопараметрической фазовой функции Δ(φ) по классическим формулам Френеля, которые будут рассмотрены ниже, обстоятельно разобран в монографии И. М. Нагибиной [12].

Интуитивно понятно, что при отражении фаза движения меняется на 180^0, подобно отражению баскетбольного мяча при ударе. Однако для световых корпускул этот сброс фазы понять сложнее.

В прикладной эллипсометрии принято считать подобный фазовый спад до нуля естественным при отражении от идеальной границы, а обратный скачёк до 360^0 связывают с приповерхностными переходными структурами ОИ. Всё это имеет своё аналитическое обоснование при анализе соответствующих оптических моделей приповерхностных структур ОИ в виде либо эффективных однородных, либо неоднородных слоёв.

Для прозрачных и слабо поглощающих диэлектриков показатель поглощения мал (k→0). В идеальном случае отношение комплексных коэффициентов отражения Френеля, определяющее основное уравнение эллипсометрии (ОУЭ) Друде (1),

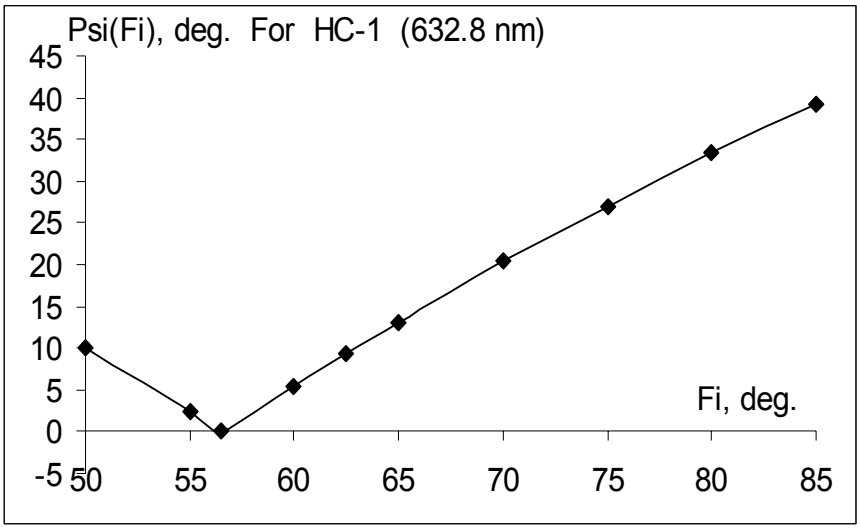
$$F = \frac{R^p}{R^s} = \left[F\left[e^{i\Delta}\right.\right. ,$$

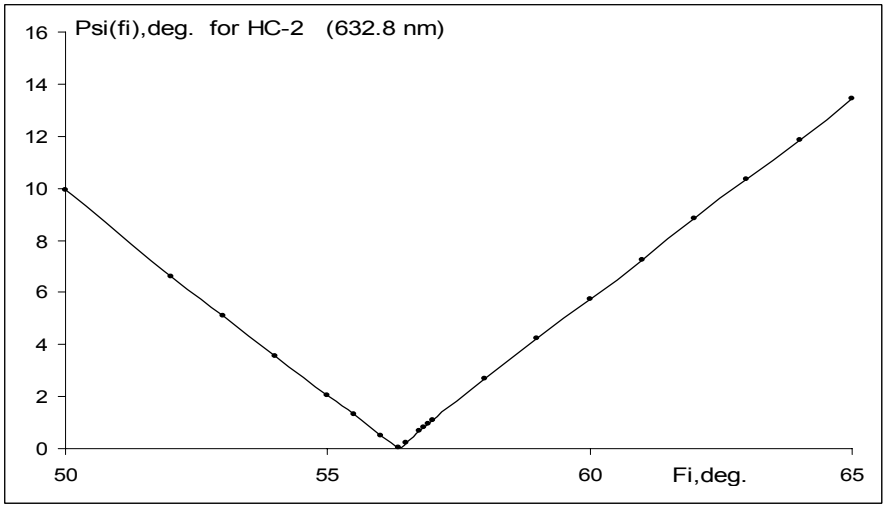
где $R = \frac{E_{refr}}{E_{ins}} = \frac{\left|E_{refr}\right|}{\left|E_{ins}\right|} e^{i(\Delta refr - \Delta ins)}$ в амплитудно-фазовых компонентах поля световой волны, оказываются вещественной функцией.

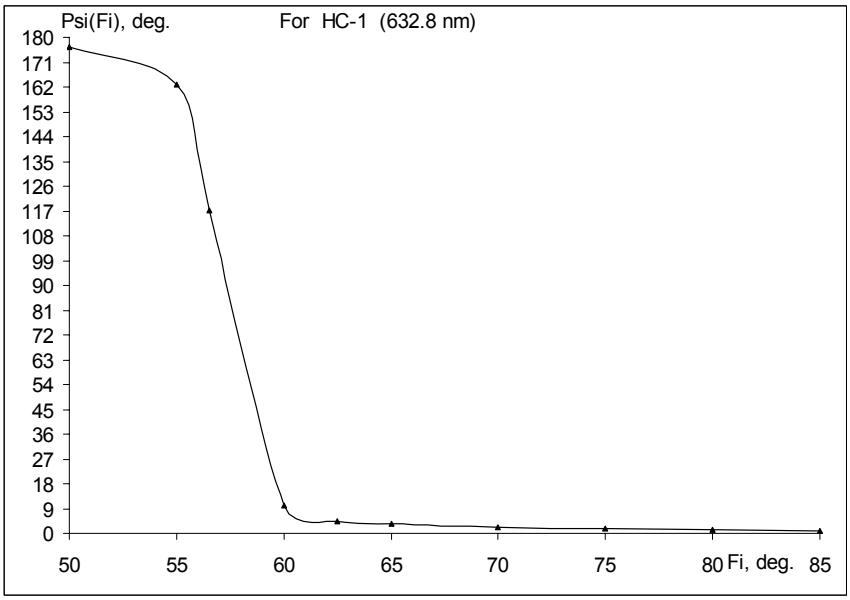
Таким образом, аналитическая интерпретация 0-π-ого скачка состоит в том, что он отражает знаковый характер вещественных решений ОУЭ.

Программная корректировка значительно улучшает свойства монотонности Ψ-Δ амплитудно-фазовых функций от углов падения-отражения. Об этом можно судить по нижеследующим рисункам.

Сглаживание значений при обработке первично измеренной информации значительно уменьшает разброс определяемых оптических констант даже в модели идеальной границы Френеля.


Psi(Fi), deg. For HC-1 (632.8 nm)
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
50
55
60
65
70
75
80
85
Fi, deg.


Psi(fi),deg. for HC-2 (632.8 nm)
16
14
12
10
8
6
4
2
0
50
55
60
Fi,deg.
65


Psi(Fi), deg.
For HC-1 (632.8 nm)
180
171
162
153
144
135
126
117
108
99
90
81
72
63
54
45
36
27
18
9
0
50
55
60
65
70
75
80
Fi, deg.
85

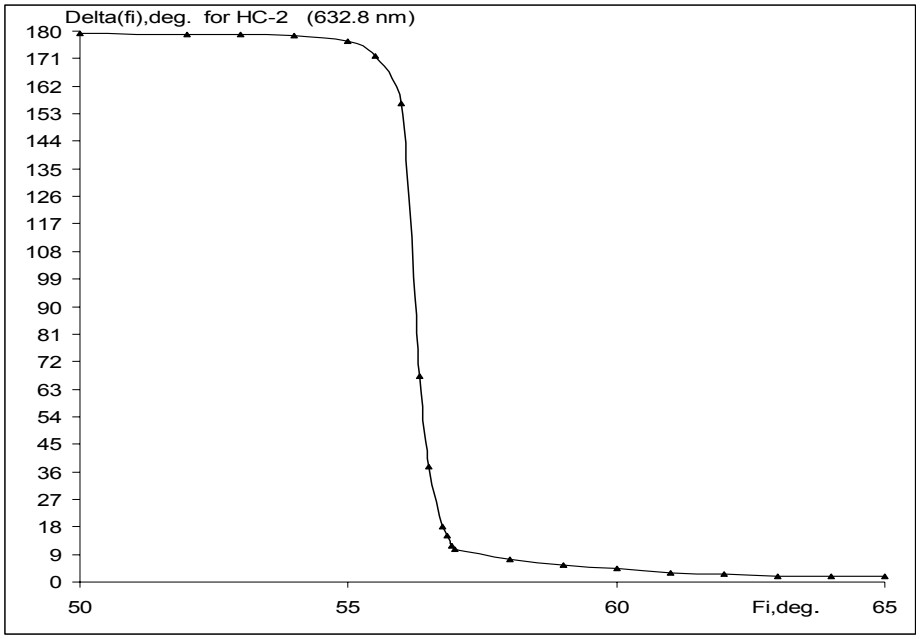
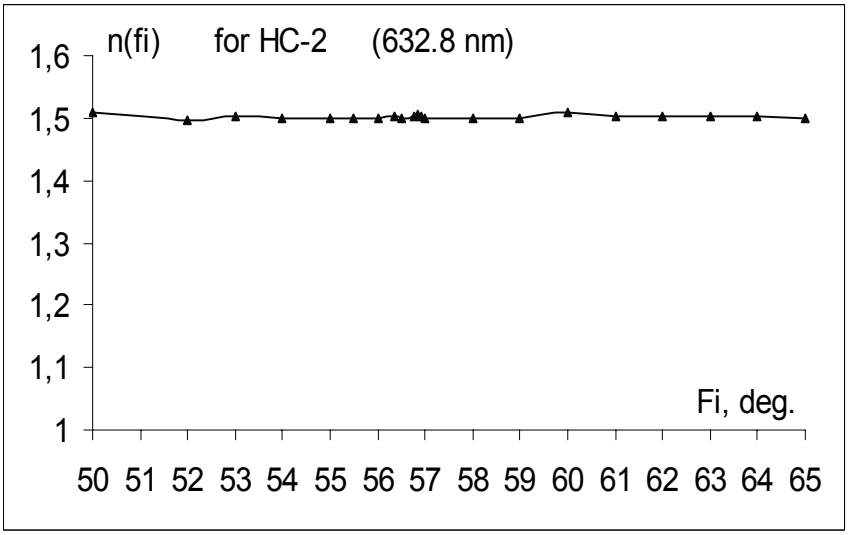


Рис. II.27. Типовое поведение поляризационных углов.



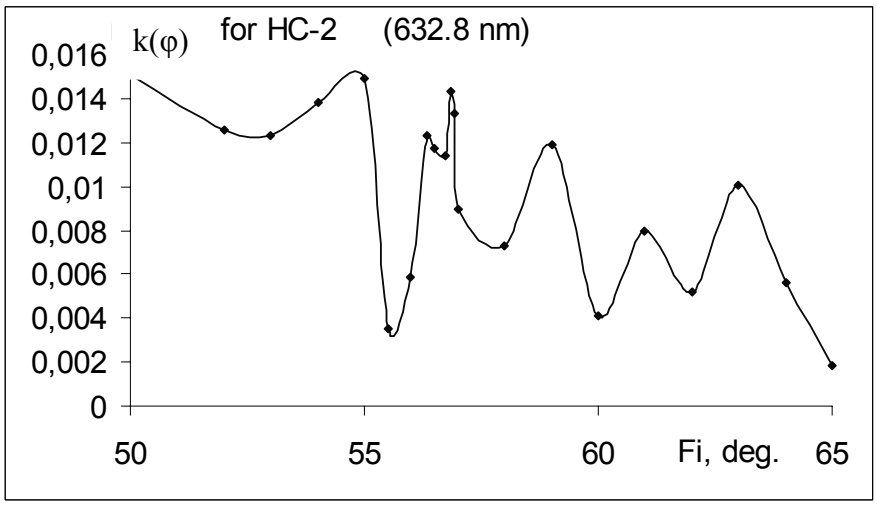


Рис. II.28. Вариации n. Рис. II.29. Вариации k.

ГЛАВА 3. Таблицы Ψ-Δ решений ОУЭ в однослойной модели ОИ

§ 3.1. Поляризационно-оптические свойства плёнок на H_2O

3.1.1. Плёнки толщиной d = 0.3 нм.

3.1.1.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	12.962	179.943	15.098	151.479	49.037	131.303	51.999	166.310	49.683	183.614
50.000	5.074	179.845	9.243	125.193	48.818	119.321	53.026	161.957	51.006	183.675
52.000	1.828	179.564	7.849	105.195	48.573	114.313	53.372	159.905	51.601	183.570
52.500	1.014	179.212	7.670	99.283	48.497	113.048	53.451	159.360	51.756	183.528
53.000	0.200	175.995	7.572	93.157	48.415	111.779	53.526	158.802	51.914	183.481
53.100	0.039	159.112	7.562	91.917	48.398	111.524	53.541	158.689	51.946	183.470
53.110	0.025	145.511	7.561	91.793	48.397	111.499	53.543	158.678	51.949	183.469
53.120	0.015	106.127	7.560	91.669	48.395	111.473	53.544	158.667	51.952	183.468
53.125	0.015	73.599	7.560	91.607	48.394	111.460	53.545	158.661	51.953	183.468
53.130	0.019	48.755	7.560	91.545	48.393	111.448	53.545	158.655	51.955	183.467
53.150	0.047	17.317	7.558	91.296	48.390	111.397	53.548	158.632	51.961	183.465
53.200	0.127	6.315	7.556	90.675	48.381	111.270	53.556	158.576	51.977	183.460
53.250	0.208	3.850	7.554	90.053	48.372	111.142	53.563	158.519	51.993	183.454
53.500	0.615	1.303	7.557	86.945	48.328	110.505	53.598	158.231	52.074	183.426
54.000	1.427	0.561	7.627	80.782	48.234	109.228	53.666	157.646	52.236	183.364
55.000	3.049	0.262	8.007	69.109	48.029	106.666	53.789	156.433	52.568	183.217
57.000	6.262	0.126	9.537	50.300	47.551	101.518	53.981	153.827	53.263	182.821
58.000	7.847	0.100	10.564	43.295	47.280	98.938	54.045	152.428	53.625	182.564
58.500	8.633	0.091	11.119	40.301	47.137	97.647	54.069	151.703	53.810	182.419
59.000	9.414	0.083	11.696	37.600	46.989	96.357	54.086	150.960	53.997	182.263
59.500	10.189	0.076	12.290	35.160	46.836	95.067	54.097	150.200	54.187	182.094
60.000	10.959	0.070	12.898	32.950	46.679	93.777	54.102	149.422	54.378	181.913
60.500	11.724	0.065	13.516	30.944	46.518	92.488	54.099	148.625	54.572	181.718
61.000	12.482	0.061	14.143	29.117	46.353	91.200	54.090	147.810	54.769	181.509
62.000	13.979	0.053	15.413	25.920	46.011	88.626	54.048	146.120	55.167	181.046
63.000	15.449	0.047	16.694	23.222	45.656	86.055	53.974	144.350	55.574	180.518
64.000	16.890	0.043	17.976	20.918	45.290	83.487	53.866	142.496	55.987	179.917
65.000	18.302	0.038	19.251	18.928	44.916	80.921	53.721	140.554	56.406	179.237
66.000	19.682	0.035	20.514	17.193	44.537	78.357	53.537	138.521	56.829	178.469
67.000	21.031	0.032	21.762	15.667	44.154	75.792	53.312	136.392	57.254	177.602
68.500	22.996	0.028	23.596	13.691	43.583	71.938	52.890	133.010	57.892	176.096
70.000	24.888	0.024	25.382	12.014	43.024	68.070	52.364	129.385	58.520	174.304
71.500	26.711	0.022	27.114	10.570	42.490	64.178	51.728	125.498	59.127	172.176
73.000	28.465	0.019	28.793	9.313	41.995	60.253	50.978	121.324	59.696	169.652
75.000	30.704	0.016	30.948	7.865	41.421	54.953	49.805	115.260	60.362	165.544
77.000	32.837	0.013	33.014	6.624	40.982	49.566	48.455	108.542	60.861	160.392
79.000	34.875	0.011	34.998	5.546	40.718	44.089	46.977	101.061	61.111	153.931
81.000	36.831	0.009	36.911	4.597	40.673	38.533	45.465	92.697	61.014	145.832
82.000	37.783	0.008	37.845	4.162	40.745	35.735	44.740	88.150	60.806	141.044
83.000	38.719	0.007	38.766	3.750	40.888	32.930	44.067	83.351	60.482	135.690
85.000	40.552	0.005	40.575	2.985	41.403	27.332	42.992	73.007	59.508	123.043
87.000	42.347	0.004	42.352	2.286	42.249	21.805	42.485	61.830	58.322	107.506
89.000	44.118	0.002	44.113	1.636	43.448	16.428	42.770	50.223	57.561	89.266
89.500	44.559	0.002	44.559	0.148	44.553	1.479	43.804	15.116	42.982	80

3.1.1.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.4

N_{out} = 1.000276 K_{out} =0.0000005 N_{sub} = 1.333333 K_{sub} =0.000001 $N_{film's}$ = 1.4 $d_{film's}$ =.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.00	12.96	180.036	14.611	154.927	45.911	132.459	51.630	164.685	49.681	182.794
50.000	5.074	180.106	8.373	129.403	45.202	120.621	52.592	159.887	50.998	182.640
52.000	1.828	180.306	6.798	107.570	44.805	115.606	52.912	157.641	51.589	182.439
52.500	1.014	180.557	6.592	100.789	44.696	114.331	52.984	157.047	51.743	182.372
53.000	0.200	182.850	6.479	93.676	44.584	113.048	53.053	156.439	51.899	182.299
53.100	0.038	195.175	6.468	92.231	44.561	112.790	53.066	156.316	51.931	182.284
53.110	0.023	205.986	6.467	92.086	44.558	112.765	53.068	156.303	51.934	182.282
53.120	0.011	247.565	6.466	91.941	44.556	112.739	53.069	156.291	51.937	182.281
53.125	0.011	292.062	6.466	91.869	44.555	112.726	53.070	156.285	51.939	182.280
53.130	0.016	320.737	6.466	91.796	44.554	112.713	53.070	156.279	51.940	182.279
53.150	0.046	347.452	6.464	91.506	44.549	112.661	53.073	156.254	51.946	182.276
53.200	0.127	355.485	6.461	90.781	44.538	112.532	53.080	156.192	51.962	182.268
53.250	0.208	357.250	6.459	90.056	44.526	112.404	53.086	156.130	51.978	182.260
53.500	0.614	359.067	6.465	86.429	44.467	111.757	53.118	155.817	52.058	182.219
54.000	1.427	359.596	6.550	79.266	44.347	110.460	53.179	155.181	52.219	182.131
55.000	3.048	359.809	6.999	65.967	44.097	107.844	53.290	153.865	52.548	181.930
57.000	6.261	359.905	8.732	45.854	43.560	102.538	53.455	151.047	53.237	181.421
58.000	7.847	359.924	9.857	38.855	43.276	99.853	53.507	149.541	53.595	181.104
58.500	8.632	359.931	10.458	35.944	43.130	98.503	53.524	148.762	53.778	180.929
59.000	9.413	359.936	11.076	33.356	42.983	97.148	53.535	147.965	53.963	180.742
59.500	10.189	359.941	11.710	31.049	42.835	95.789	53.540	147.151	54.151	180.542
60.000	10.959	359.945	12.354	28.983	42.685	94.426	53.539	146.319	54.340	180.328
60.500	11.724	359.949	13.006	27.125	42.534	93.059	53.530	145.468	54.532	180.101
61.000	12.482	359.952	13.664	25.449	42.382	91.688	53.515	144.598	54.725	179.858
62.000	13.979	359.958	14.989	22.547	42.078	88.936	53.462	142.799	55.119	179.328
63.000	15.449	359.962	16.318	20.127	41.775	86.172	53.378	140.921	55.519	178.729
64.000	16.890	359.965	17.642	18.080	41.474	83.395	53.261	138.960	55.926	178.056
65.000	18.302	359.968	18.954	16.327	41.180	80.608	53.108	136.912	56.337	177.301
66.000	19.682	359.971	20.250	14.807	40.895	77.811	52.918	134.775	56.752	176.455
67.000	21.031	359.973	21.526	13.477	40.622	75.006	52.688	132.544	57.168	175.510
68.500	22.995	359.976	23.399	11.765	40.241	70.784	52.265	129.015	57.789	173.881
70.000	24.888	359.979	25.216	10.319	39.905	66.549	51.744	125.252	58.399	171.962
71.500	26.711	359.981	26.977	9.079	39.624	62.306	51.122	121.238	58.984	169.704
73.000	28.465	359.983	28.680	8.004	39.409	58.058	50.399	116.951	59.527	167.050
75.000	30.704	359.986	30.863	6.770	39.244	52.402	49.284	110.763	60.151	162.775
77.000	32.837	359.988	32.952	5.716	39.239	46.771	48.022	103.964	60.598	157.473
79.000	34.875	359.990	34.955	4.802	39.419	41.190	46.666	96.461	60.786	150.900
81.000	36.831	359.993	36.883	3.998	39.802	35.687	45.309	88.154	60.618	142.749
82.000	37.783	359.993	37.824	3.631	40.076	32.974	44.672	83.675	60.373	137.967
83.000	38.719	359.995	38.750	3.282	40.407	30.293	44.091	78.972	60.011	132.644
85.000	40.552	359.996	40.568	2.636	41.250	25.037	43.200	68.917	58.965	120.145
87.000	42.347	359.998	42.352	2.045	42.342	19.951	42.853	58.148	57.723	104.867
89.000	44.118	0.000	44.117	1.495	43.694	15.061	43.247	47.028	56.936	86.957
89.500	44.559	0.001	44.557	1.363	44.073	13.872	43.477	44.254	56.917	82.208

3.1.1.3. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out} =0.0000005 N_{sub} = 1.333333 K_{sub} =0.000001 $N_{film's}$ = 1.5 $d_{film's}$ =.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	12.963	180.163	14.267	157.670	43.252	133.180	51.209	163.258	49.681	181.996
50.000	5.075	180.461	7.745	133.061	42.123	121.259	52.092	158.065	50.991	181.632
52.000	1.828	181.314	6.019	109.703	41.597	116.142	52.379	155.646	51.579	181.336
52.500	1.015	182.381	5.790	102.084	41.460	114.834	52.444	155.007	51.732	181.245
53.000	0.204	191.975	5.666	93.993	41.321	113.515	52.504	154.354	51.887	181.147
53.100	0.056	228.974	5.655	92.342	41.293	113.250	52.516	154.222	51.918	181.127
53.110	0.047	244.072	5.654	92.177	41.290	113.224	52.517	154.209	51.921	181.125
53.120	0.043	264.175	5.654	92.011	41.288	113.197	52.518	154.196	51.924	181.123
53.125	0.043	275.156	5.653	91.928	41.286	113.184	52.519	154.189	51.926	181.122
53.130	0.044	285.764	5.653	91.846	41.285	113.170	52.520	154.182	51.927	181.121
53.150	0.061	316.387	5.651	91.515	41.279	113.117	52.522	154.156	51.934	181.116
53.200	0.133	341.378	5.649	90.686	41.265	112.985	52.528	154.089	51.949	181.106
53.250	0.212	348.428	5.647	89.857	41.251	112.852	52.533	154.023	51.965	181.095
53.500	0.616	356.038	5.657	85.716	41.181	112.186	52.561	153.687	52.044	181.041
54.000	1.428	358.286	5.761	77.582	41.039	110.846	52.615	153.006	52.204	180.928
55.000	3.049	359.193	6.281	62.837	40.753	108.135	52.709	151.597	52.531	180.674
57.000	6.261	359.605	8.195	41.947	40.173	102.599	52.844	148.590	53.213	180.054
58.000	7.847	359.685	9.398	35.118	39.884	99.779	52.880	146.987	53.568	179.679
58.500	8.632	359.714	10.034	32.339	39.741	98.357	52.890	146.160	53.749	179.474
59.000	9.413	359.738	10.684	29.898	39.599	96.927	52.894	145.314	53.932	179.256
59.500	10.189	359.759	11.346	27.743	39.459	95.489	52.892	144.451	54.117	179.025
60.000	10.959	359.776	12.016	25.829	39.320	94.045	52.884	143.570	54.305	178.780
60.500	11.724	359.791	12.692	24.121	39.183	92.594	52.868	142.670	54.494	178.520
61.000	12.482	359.805	13.371	22.589	39.049	91.137	52.847	141.750	54.685	178.246
62.000	13.979	359.827	14.735	19.957	38.790	88.206	52.781	139.854	55.073	177.648
63.000	15.449	359.846	16.096	17.779	38.544	85.254	52.686	137.878	55.468	176.980
64.000	16.890	359.861	17.447	15.949	38.315	82.284	52.559	135.819	55.867	176.236
65.000	18.302	359.873	18.783	14.389	38.106	79.302	52.397	133.676	56.271	175.408
66.000	19.682	359.885	20.100	13.042	37.918	76.309	52.201	131.444	56.678	174.486
67.000	21.031	359.894	21.394	11.867	37.756	73.311	51.967	129.120	57.085	173.463
68.500	22.995	359.907	23.289	10.359	37.563	68.812	51.544	125.457	57.690	171.714
70.000	24.888	359.917	25.127	9.090	37.440	64.323	51.031	121.566	58.281	169.672
71.500	26.711	359.927	26.904	8.004	37.393	59.861	50.427	117.434	58.844	167.290
73.000	28.465	359.935	28.620	7.064	37.428	55.441	49.734	113.041	59.362	164.511
75.000	30.704	359.945	30.819	5.987	37.613	49.639	48.682	106.738	59.945	160.076
77.000	32.837	359.954	32.920	5.068	37.964	43.973	47.513	99.864	60.342	154.635
79.000	34.875	359.962	34.933	4.272	38.488	38.471	46.283	92.341	60.472	147.958
81.000	36.831	359.970	36.870	3.572	39.189	33.158	45.083	84.093	60.239	139.765
82.000	37.783	359.974	37.813	3.252	39.608	30.578	44.532	79.679	59.959	134.992
83.000	38.719	359.977	38.743	2.948	40.073	28.050	44.041	75.069	59.564	129.703
85.000	40.552	359.984	40.565	2.385	41.141	23.154	43.328	65.288	58.457	117.349
87.000	42.347	359.991	42.352	1.870	42.399	18.474	43.133	54.902	57.170	102.319
89.000	44.118	359.998	44.119	1.390	43.851	14.004	43.629	44.231	56.364	84.721
89.500	44.559	359.999	44.559	1.275	44.245	12.920	43.876	41.572	56.346	80.053

3.1.1.4. Плёнки с оптической плотностью n = 3.0

N_{out} = 1.000276 K_{out} =0.0000005 N_{sub} = 1.333333 K_{sub} =0.000001 $N_{film's}$ = 3 $d_{film's}$ =.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	13.049	184.514	12.978	175.423	24.661	136.009	44.184	149.386	49.587	172.301
50.000	5.248	192.451	5.154	168.246	21.029	117.887	43.575	140.217	50.797	169.225
52.000	2.207	211.669	2.078	149.991	19.998	108.911	43.277	136.055	51.327	167.703
52.500	1.578	227.562	1.430	133.586	19.795	106.528	43.198	134.968	51.463	167.292
53.000	1.196	257.912	1.045	99.448	19.617	104.098	43.117	133.863	51.601	166.868
53.100	1.173	265.719	1.030	90.489	19.584	103.606	43.100	133.639	51.629	166.781
53.110	1.172	266.513	1.030	89.583	19.581	103.557	43.099	133.617	51.632	166.773
53.120	1.171	267.308	1.030	88.678	19.578	103.508	43.097	133.595	51.635	166.764
53.125	1.171	267.706	1.030	88.225	19.576	103.483	43.096	133.584	51.636	166.760
53.130	1.171	268.104	1.031	87.773	19.575	103.459	43.096	133.572	51.637	166.756
53.150	1.170	269.698	1.032	85.967	19.568	103.360	43.092	133.528	51.643	166.738
53.200	1.173	273.675	1.040	81.491	19.553	103.113	43.084	133.415	51.657	166.695
53.250	1.182	277.616	1.055	77.112	19.537	102.866	43.076	133.303	51.671	166.651
53.500	1.302	295.651	1.210	57.961	19.464	101.625	43.034	132.739	51.741	166.431
54.000	1.811	319.469	1.777	35.048	19.338	99.115	42.950	131.596	51.881	165.979
55.000	3.223	338.479	3.237	18.147	19.168	94.013	42.777	129.254	52.167	165.034
57.000	6.324	349.197	6.364	8.844	19.174	83.691	42.416	124.343	52.752	162.957
58.000	7.887	351.372	7.931	6.961	19.350	78.600	42.230	121.775	53.050	161.817
58.500	8.665	352.166	8.710	6.276	19.480	76.098	42.137	120.463	53.201	161.220
59.000	9.440	352.828	9.486	5.704	19.636	73.635	42.043	119.132	53.351	160.604
59.500	10.210	353.390	10.257	5.220	19.819	71.216	41.948	117.783	53.503	159.969
60.000	10.976	353.874	11.023	4.805	20.026	68.847	41.854	116.416	53.654	159.313
60.500	11.736	354.295	11.783	4.445	20.258	66.532	41.760	115.032	53.806	158.637
61.000	12.491	354.664	12.538	4.130	20.512	64.274	41.667	113.629	53.958	157.940
62.000	13.983	355.285	14.030	3.603	21.082	59.943	41.483	110.773	54.260	156.479
63.000	15.449	355.787	15.495	3.182	21.726	55.868	41.303	107.850	54.560	154.925
64.000	16.887	356.204	16.932	2.837	22.435	52.053	41.131	104.864	54.856	153.272
65.000	18.296	356.557	18.340	2.550	23.196	48.495	40.967	101.818	55.144	151.516
66.000	19.674	356.860	19.718	2.307	24.002	45.186	40.815	98.717	55.423	149.651
67.000	21.022	357.126	21.064	2.099	24.842	42.112	40.677	95.565	55.690	147.670
68.500	22.985	357.470	23.024	1.839	26.150	37.909	40.500	90.755	56.060	144.470
70.000	24.877	357.763	24.914	1.627	27.498	34.147	40.367	85.862	56.382	140.979
71.500	26.699	358.019	26.734	1.452	28.866	30.774	40.284	80.908	56.641	137.179
73.000	28.454	358.247	28.486	1.306	30.241	27.739	40.260	75.914	56.821	133.052
75.000	30.694	358.517	30.722	1.147	32.069	24.140	40.327	69.229	56.904	127.012
77.000	32.828	358.758	32.853	1.021	33.877	20.970	40.520	62.557	56.765	120.321
79.000	34.867	358.977	34.889	0.920	35.658	18.152	40.849	55.935	56.358	112.923
81.000	36.824	359.182	36.844	0.840	37.410	15.619	41.323	49.387	55.647	104.726
82.000	37.776	359.279	37.794	0.806	38.277	14.441	41.618	46.144	55.176	100.280
83.000	38.713	359.374	38.730	0.776	39.137	13.314	41.955	42.921	54.632	95.563
85.000	40.548	359.559	40.562	0.725	40.847	11.185	42.763	36.528	53.391	85.144
87.000	42.345	359.737	42.356	0.684	42.549	9.185	43.775	30.179	52.184	73.076
89.000	44.117	359.913	44.127	0.649	44.259	7.264	45.035	23.835	51.581	59.107
89.500	44.559	359.957	44.568	0.640	44.690	6.790	45.397	22.245	51.624	55.355

3.1.2. Плёнки толщиной d = 3 нм.

3.1.2.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

N_{out} = 1.000276 K_{out} =0.0000005 N_{sub} = 1.333333 K_{sub} =0.000001 $N_{film's}$ = 1.3 $d_{film's}$ = 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	12.961	179.714	14.985	150.907	49.609	130.201	53.224	167.838	51.904	193.437
50.000	5.073	179.201	9.203	124.005	49.474	118.097	54.548	163.813	53.866	196.092
52.000	1.827	177.732	7.876	103.793	49.259	113.064	55.023	161.888	54.756	197.147
52.500	1.014	175.895	7.716	97.882	49.190	111.795	55.134	161.375	54.989	197.408
53.000	0.211	159.751	7.637	91.791	49.116	110.523	55.243	160.848	55.225	197.667
53.100	0.081	115.452	7.631	90.562	49.100	110.268	55.264	160.741	55.273	197.719
53.110	0.075	104.190	7.631	90.439	49.098	110.243	55.266	160.730	55.278	197.724
53.120	0.073	91.686	7.631	90.316	49.097	110.217	55.268	160.719	55.283	197.729
53.125	0.073	85.295	7.630	90.254	49.096	110.204	55.269	160.714	55.285	197.732
53.130	0.074	79.030	7.630	90.193	49.095	110.192	55.270	160.709	55.288	197.734
53.150	0.087	57.377	7.630	89.947	49.092	110.141	55.274	160.687	55.297	197.745
53.200	0.147	29.665	7.629	89.331	49.084	110.013	55.285	160.633	55.321	197.770
53.250	0.222	19.208	7.629	88.716	49.076	109.886	55.295	160.579	55.346	197.796
53.500	0.621	6.763	7.641	85.645	49.035	109.248	55.348	160.307	55.467	197.925
54.000	1.431	2.934	7.728	79.576	48.948	107.971	55.449	159.752	55.712	198.180
55.000	3.051	1.380	8.137	68.142	48.755	105.411	55.640	158.597	56.216	198.683
57.000	6.264	0.673	9.698	49.796	48.302	100.285	55.971	156.100	57.280	199.652
58.000	7.849	0.535	10.730	42.957	48.041	97.723	56.106	154.751	57.840	200.113
58.500	8.635	0.485	11.286	40.028	47.903	96.444	56.165	154.050	58.127	200.335
59.000	9.416	0.444	11.863	37.383	47.761	95.167	56.218	153.331	58.420	200.552
59.500	10.191	0.409	12.457	34.989	47.613	93.891	56.265	152.593	58.717	200.763
60.000	10.961	0.378	13.064	32.819	47.460	92.617	56.305	151.836	59.020	200.967
60.500	11.726	0.352	13.681	30.846	47.303	91.345	56.338	151.060	59.328	201.165
61.000	12.484	0.329	14.306	29.047	47.142	90.074	56.364	150.264	59.641	201.354
62.000	13.981	0.291	15.572	25.893	46.809	87.541	56.394	148.612	60.283	201.707
63.000	15.451	0.259	16.848	23.225	46.461	85.016	56.391	146.875	60.947	202.020
64.000	16.892	0.233	18.124	20.942	46.101	82.499	56.352	145.051	61.633	202.287
65.000	18.303	0.212	19.393	18.967	45.732	79.990	56.275	143.137	62.341	202.499
66.000	19.684	0.193	20.650	17.243	45.356	77.487	56.157	141.129	63.072	202.648
67.000	21.033	0.176	21.891	15.723	44.977	74.988	55.995	139.024	63.825	202.721
68.500	22.997	0.155	23.717	13.753	44.405	71.242	55.663	135.675	64.997	202.661
70.000	24.890	0.137	25.493	12.079	43.842	67.491	55.216	132.086	66.219	202.342
71.500	26.712	0.121	27.217	10.635	43.300	63.723	54.646	128.241	67.490	201.688
73.000	28.467	0.107	28.887	9.375	42.790	59.928	53.945	124.120	68.805	200.591
75.000	30.705	0.091	31.031	7.924	42.188	54.806	52.805	118.152	70.615	198.174
77.000	32.838	0.076	33.087	6.678	41.707	49.593	51.437	111.570	72.462	194.164
79.000	34.876	0.063	35.063	5.593	41.391	44.279	49.878	104.268	74.281	187.703
81.000	36.832	0.050	36.968	4.637	41.283	38.864	48.209	96.116	75.936	177.470
82.000	37.783	0.044	37.898	4.198	41.321	36.126	47.375	91.680	76.620	170.407
83.000	38.719	0.039	38.815	3.783	41.427	33.372	46.572	86.985	77.137	161.781
85.000	40.553	0.028	40.617	3.011	41.868	27.844	45.186	76.802	77.388	139.783
87.000	42.347	0.017	42.389	2.303	42.643	22.343	44.329	65.659	76.231	113.668
89.000	44.118	0.006	44.145	1.644	43.781	16.947	44.287	53.922	73.968	87.595
89.500	44.559	0.004	44.583	1.485	44.124	15.624	44.429	50.967	73.371	81.448

3.1.2.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.4

N_{out} = 1.000276 K_{out} =0.0000005 N_{sub} = 1.333333 K_{sub} =0.000001 $N_{film's}$ = 1.4 $d_{film's}$ = 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	12.969	180.605	14.343	154.857	46.555	130.732	53.021	166.037	52.089	192.745
50.000	5.083	181.705	8.118	128.526	45.950	118.722	54.313	161.502	54.096	195.212
52.000	1.841	184.832	6.605	105.786	45.591	113.674	54.774	159.352	55.006	196.180
52.500	1.032	188.684	6.423	98.773	45.491	112.395	54.882	158.781	55.243	196.418
53.000	0.259	217.211	6.339	91.470	45.388	111.109	54.986	158.195	55.485	196.654
53.100	0.162	254.547	6.334	89.993	45.367	110.852	55.007	158.076	55.534	196.701
53.110	0.159	260.209	6.334	89.846	45.364	110.826	55.009	158.064	55.539	196.706
53.120	0.157	266.080	6.334	89.698	45.362	110.800	55.011	158.052	55.544	196.711
53.125	0.157	269.052	6.334	89.624	45.361	110.787	55.012	158.046	55.547	196.713
53.130	0.157	272.028	6.334	89.550	45.360	110.774	55.013	158.040	55.549	196.715
53.150	0.161	283.665	6.334	89.254	45.356	110.723	55.017	158.016	55.559	196.725
53.200	0.197	307.319	6.334	88.515	45.345	110.594	55.027	157.957	55.583	196.748
53.250	0.255	322.023	6.335	87.777	45.334	110.464	55.037	157.897	55.608	196.771
53.500	0.628	345.505	6.356	84.095	45.280	109.818	55.087	157.595	55.732	196.888
54.000	1.429	353.669	6.474	76.881	45.169	108.521	55.185	156.979	55.982	197.119
55.000	3.046	357.019	6.982	63.684	44.935	105.911	55.369	155.703	56.497	197.572
57.000	6.257	358.544	8.801	44.137	44.429	100.640	55.682	152.955	57.583	198.433
58.000	7.842	358.840	9.951	37.412	44.160	97.983	55.808	151.478	58.155	198.834
58.500	8.628	358.948	10.561	34.619	44.021	96.649	55.862	150.712	58.448	199.027
59.000	9.408	359.037	11.188	32.139	43.881	95.314	55.911	149.928	58.747	199.212
59.500	10.184	359.113	11.827	29.927	43.738	93.975	55.953	149.126	59.050	199.391
60.000	10.954	359.178	12.476	27.947	43.594	92.635	55.988	148.304	59.359	199.563
60.500	11.719	359.234	13.132	26.167	43.449	91.292	56.017	147.462	59.673	199.726
61.000	12.477	359.284	13.793	24.559	43.302	89.948	56.038	146.601	59.992	199.880
62.000	13.974	359.367	15.122	21.774	43.008	87.254	56.058	144.818	60.647	200.160
63.000	15.444	359.434	16.452	19.450	42.712	84.554	56.045	142.951	61.323	200.395
64.000	16.886	359.490	17.775	17.481	42.418	81.849	55.996	140.998	62.021	200.578
65.000	18.297	359.537	19.085	15.793	42.128	79.141	55.910	138.957	62.742	200.701
66.000	19.678	359.578	20.378	14.329	41.845	76.428	55.783	136.824	63.485	200.753
67.000	21.027	359.614	21.651	13.046	41.571	73.713	55.614	134.597	64.251	200.722
68.500	22.991	359.660	23.517	11.394	41.186	69.636	55.273	131.075	65.440	200.487
70.000	24.884	359.699	25.328	9.998	40.839	65.554	54.822	127.324	66.678	199.969
71.500	26.707	359.733	27.081	8.801	40.540	61.469	54.255	123.332	67.962	199.082
73.000	28.462	359.764	28.776	7.761	40.302	57.384	53.568	119.083	69.285	197.711
75.000	30.701	359.800	30.950	6.569	40.094	51.942	52.465	112.980	71.094	194.844
77.000	32.835	359.833	33.029	5.551	40.036	46.517	51.165	106.314	72.916	190.253
79.000	34.873	359.862	35.023	4.668	40.151	41.124	49.710	98.995	74.668	183.048
81.000	36.830	359.890	36.944	3.893	40.463	35.783	48.183	90.916	76.181	171.937
82.000	37.781	359.903	37.880	3.539	40.699	33.140	47.433	86.557	76.754	164.457
83.000	38.718	359.916	38.803	3.204	40.992	30.519	46.721	81.972	77.130	155.523
85.000	40.551	359.941	40.614	2.582	41.758	25.359	45.520	72.116	77.028	133.658
87.000	42.347	359.965	42.392	2.014	42.778	20.331	44.830	61.444	75.546	108.866
89.000	44.118	359.989	44.152	1.486	44.064	15.462	44.898	50.276	73.129	84.426
89.500	44.559	359.995	44.590	1.359	44.428	14.273	45.056	47.469	72.525	78.624

3.1.2.3. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out} =0.0000005 N_{sub} = 1.333333 K_{sub} =0.000001 $N_{film's}$ = 1.5 $d_{film's}$ = 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	12.994	181.828	13.850	158.517	43.897	130.757	52.784	164.410	52.287	192.090
50.000	5.122	185.119	7.239	133.366	42.889	118.597	54.032	159.407	54.343	194.375
52.000	1.914	194.160	5.531	108.085	42.411	113.433	54.473	157.050	55.274	195.259
52.500	1.143	204.303	5.326	99.745	42.286	112.119	54.576	156.425	55.518	195.475
53.000	0.524	244.277	5.239	90.942	42.159	110.796	54.676	155.786	55.765	195.688
53.100	0.477	262.196	5.236	89.159	42.133	110.530	54.695	155.656	55.815	195.730
53.110	0.475	264.141	5.236	88.981	42.131	110.504	54.697	155.643	55.820	195.735
53.120	0.474	266.100	5.236	88.802	42.128	110.477	54.699	155.630	55.825	195.739
53.125	0.473	267.085	5.236	88.713	42.127	110.464	54.700	155.623	55.828	195.741
53.130	0.473	268.070	5.236	88.624	42.126	110.451	54.701	155.617	55.830	195.743
53.150	0.473	272.011	5.237	88.267	42.120	110.397	54.705	155.591	55.840	195.751
53.200	0.483	281.703	5.238	87.375	42.108	110.264	54.715	155.525	55.866	195.773
53.250	0.506	290.757	5.241	86.485	42.095	110.131	54.724	155.460	55.891	195.794
53.500	0.754	321.033	5.275	82.060	42.030	109.465	54.772	155.131	56.017	195.898
54.000	1.478	341.225	5.431	73.500	41.900	108.125	54.864	154.460	56.274	196.106
55.000	3.058	351.011	6.058	58.502	41.636	105.422	55.037	153.071	56.800	196.510
57.000	6.252	355.604	8.137	38.373	41.099	99.932	55.329	150.093	57.910	197.264
58.000	7.834	356.499	9.392	32.016	40.830	97.149	55.443	148.498	58.494	197.609
58.500	8.619	356.824	10.048	29.451	40.696	95.749	55.492	147.674	58.794	197.771
59.000	9.399	357.094	10.715	27.206	40.563	94.344	55.535	146.830	59.099	197.926
59.500	10.174	357.323	11.391	25.229	40.431	92.934	55.571	145.968	59.409	198.074
60.000	10.944	357.519	12.073	23.478	40.301	91.520	55.600	145.086	59.724	198.213
60.500	11.708	357.690	12.759	21.917	40.172	90.102	55.623	144.185	60.045	198.342
61.000	12.465	357.840	13.448	20.518	40.046	88.680	55.638	143.264	60.370	198.462
62.000	13.962	358.092	14.824	18.118	39.800	85.826	55.646	141.361	61.038	198.669
63.000	15.432	358.295	16.194	16.135	39.565	82.960	55.621	139.375	61.728	198.826
64.000	16.873	358.464	17.551	14.469	39.345	80.087	55.562	137.304	62.439	198.926
65.000	18.285	358.607	18.890	13.049	39.141	77.207	55.465	135.147	63.173	198.959
66.000	19.666	358.730	20.208	11.823	38.957	74.326	55.329	132.901	63.929	198.914
67.000	21.015	358.837	21.502	10.755	38.794	71.445	55.151	130.564	64.708	198.778
68.500	22.980	358.976	23.396	9.384	38.596	67.131	54.801	126.884	65.915	198.366
70.000	24.874	359.095	25.229	8.232	38.459	62.838	54.347	122.988	67.169	197.643
71.500	26.697	359.198	27.001	7.248	38.390	58.575	53.785	118.865	68.465	196.518
73.000	28.453	359.290	28.712	6.397	38.396	54.355	53.113	114.502	69.795	194.864
75.000	30.693	359.400	30.903	5.426	38.530	48.813	52.052	108.281	71.600	191.529
77.000	32.828	359.497	32.996	4.600	38.819	43.392	50.824	101.547	73.391	186.334
79.000	34.867	359.586	35.002	3.888	39.272	38.113	49.475	94.226	75.064	178.364
81.000	36.825	359.669	36.931	3.266	39.897	32.995	48.089	86.228	76.421	166.395
82.000	37.777	359.708	37.871	2.983	40.276	30.501	47.420	81.949	76.878	158.542
83.000	38.714	359.747	38.797	2.716	40.701	28.051	46.794	77.475	77.110	149.378
85.000	40.549	359.822	40.614	2.222	41.690	23.288	45.769	67.939	76.672	127.815
87.000	42.345	359.894	42.395	1.773	42.872	18.708	45.232	57.714	74.902	104.317
89.000	44.118	359.966	44.157	1.359	44.255	14.310	45.400	47.079	72.358	81.333
89.500	44.559	359.983	44.596	1.260	44.633	13.238	45.573	44.409	71.750	75.837

3.1.2.4. Плёнки с оптической плотностью n = 3

N_{out} = 1.000276 K_{out} =0.0000005 N_{sub} = 1.333333 K_{sub} =0.000001 $N_{film's}$ = 3 $d_{film's}$ = 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	18.450	206.193	17.065	203.52	14.449	134.670	49.391	135.65	57.797	186.523
50.000	12.924	225.376	11.186	223.61	10.457	101.525	49.369	123.626	61.235	186.805
52.000	11.213	238.129	9.394	238.339	10.146	83.495	49.235	118.428	62.762	186.679
52.500	10.874	241.907	9.054	242.859	10.216	78.970	49.190	117.098	63.158	186.618
53.000	10.580	245.917	8.770	247.705	10.344	74.542	49.141	115.758	63.559	186.544
53.100	10.527	246.745	8.720	248.710	10.376	73.672	49.130	115.489	63.640	186.527
53.110	10.522	246.828	8.716	248.811	10.379	73.585	49.129	115.462	63.648	186.526
53.120	10.517	246.912	8.711	248.913	10.383	73.498	49.128	115.435	63.656	186.524
53.125	10.514	246.953	8.708	248.964	10.384	73.455	49.127	115.421	63.660	186.523
53.130	10.511	246.995	8.706	249.014	10.386	73.412	49.127	115.408	63.664	186.522
53.150	10.501	247.162	8.697	249.217	10.393	73.239	49.125	115.354	63.680	186.519
53.200	10.476	247.582	8.673	249.727	10.410	72.807	49.119	115.219	63.721	186.510
53.250	10.451	248.003	8.651	250.240	10.428	72.378	49.114	115.084	63.762	186.501
53.500	10.335	250.140	8.548	252.842	10.526	70.254	49.086	114.407	63.966	186.455
54.000	10.144	254.550	8.394	258.213	10.760	66.142	49.028	113.046	64.378	186.351
55.000	9.935	263.767	8.304	269.331	11.366	58.541	48.898	110.296	65.220	186.091
57.000	10.248	282.283	8.991	290.447	13.010	46.024	48.590	104.701	66.968	185.329
58.000	10.748	290.753	9.703	299.342	13.984	41.021	48.413	101.866	67.873	184.799
58.500	11.072	294.669	10.129	303.283	14.498	38.791	48.321	100.441	68.333	184.490
59.000	11.438	298.352	10.594	306.895	15.025	36.725	48.225	99.012	68.798	184.148
59.500	11.844	301.799	11.093	310.197	15.564	34.810	48.127	97.580	69.267	183.771
60.000	12.283	305.013	11.619	313.210	16.112	33.033	48.026	96.145	69.741	183.356
60.500	12.752	308.001	12.169	315.961	16.668	31.382	47.923	94.708	70.218	182.898
61.000	13.246	310.777	12.738	318.474	17.230	29.847	47.818	93.269	70.699	182.395
62.000	14.299	315.741	13.923	322.881	18.366	27.087	47.605	90.390	71.671	181.236
63.000	15.418	320.022	15.150	326.602	19.511	24.684	47.387	87.512	72.652	179.840
64.000	16.581	323.731	16.403	329.777	20.658	22.579	47.168	84.641	73.638	178.159
65.000	17.776	326.965	17.671	332.517	21.800	20.728	46.950	81.781	74.623	176.135
66.000	18.988	329.807	18.943	334.908	22.934	19.093	46.737	78.937	75.598	173.696
67.000	20.209	332.325	20.213	337.017	24.056	17.642	46.530	76.112	76.554	170.754
68.500	22.043	335.615	22.102	339.764	25.711	15.758	46.237	71.922	77.919	165.164
70.000	23.863	338.445	23.961	342.126	27.328	14.166	45.973	67.799	79.142	157.794
71.500	25.657	340.921	25.781	344.196	28.906	12.815	45.747	63.752	80.131	148.276
73.000	27.418	343.122	27.559	346.042	30.442	11.664	45.564	59.791	80.765	136.559
75.000	29.707	345.730	29.859	348.241	32.427	10.388	45.400	54.652	80.865	118.769
77.000	31.925	348.056	32.079	350.215	34.346	9.356	45.340	49.684	80.015	101.595
79.000	34.073	350.173	34.222	352.026	36.204	8.523	45.395	44.881	78.338	87.530
81.000	36.156	352.137	36.297	353.718	38.013	7.852	45.579	40.228	76.052	76.710
82.000	37.176	353.075	37.311	354.530	38.902	7.568	45.724	37.950	74.740	72.189
83.000	38.183	353.988	38.313	355.324	39.783	7.314	45.906	35.698	73.340	68.042
85.000	40.164	355.759	40.281	356.869	41.527	6.878	46.397	31.247	70.354	60.225
87.000	42.112	357.476	42.215	358.375	43.258	6.516	47.084	26.818	67.330	52.021
89.000	44.040	359.162	44.128	359.859	44.994	6.196	48.015	22.339	64.787	42.413
89.500	44.520	359.582	44.605	0.228	45.430	6.118	48.294	21.204	64.330	39.743

3.1.3. Плёнки толщиной d = 30 нм.

3.1.3.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.333333 K_{sub}= 0.000001 $N_{film's}$= 1.3 $d_{film's}$= 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	12.818	177.508	13.503	146.012	55.613	115.310	67.719	196.034	49.093	242.742
50.000	4.941	172.853	8.495	111.921	55.952	101.822	72.100	199.679	50.422	257.421
52.000	1.770	159.151	7.895	89.385	55.876	96.553	73.876	201.088	51.023	263.701
52.500	1.052	142.995	7.938	83.511	55.839	95.257	74.321	201.426	51.180	265.308
53.000	0.636	92.304	8.059	77.765	55.795	93.972	74.766	201.756	51.339	266.928
53.100	0.651	77.828	8.092	76.640	55.785	93.716	74.855	201.820	51.371	267.254
53.110	0.654	76.437	8.095	76.528	55.784	93.690	74.864	201.827	51.374	267.287
53.120	0.659	75.060	8.099	76.416	55.783	93.665	74.873	201.833	51.377	267.319
53.125	0.661	74.378	8.101	76.360	55.782	93.652	74.877	201.837	51.379	267.336
53.130	0.663	73.701	8.102	76.304	55.782	93.639	74.882	201.840	51.380	267.352
53.150	0.673	71.043	8.110	76.081	55.780	93.588	74.899	201.853	51.387	267.417
53.200	0.704	64.770	8.128	75.525	55.775	93.460	74.944	201.885	51.403	267.580
53.250	0.742	59.087	8.147	74.971	55.770	93.333	74.989	201.917	51.419	267.744
53.500	1.014	38.992	8.253	72.246	55.743	92.697	75.211	202.076	51.500	268.563
54.000	1.724	21.793	8.515	67.031	55.685	91.433	75.657	202.385	51.663	270.212
55.000	3.285	11.290	9.216	57.685	55.549	88.941	76.548	202.962	51.997	273.554
57.000	6.464	5.728	11.124	43.366	55.204	84.112	78.328	203.883	52.688	280.410
58.000	8.040	4.595	12.237	38.042	54.997	81.781	79.216	204.171	53.045	283.924
58.500	8.822	4.180	12.818	35.739	54.886	80.637	79.659	204.256	53.225	285.703
59.000	9.600	3.833	13.412	33.641	54.770	79.507	80.100	204.294	53.407	287.496
59.500	10.372	3.537	14.014	31.726	54.650	78.392	80.541	204.275	53.590	289.304
60.000	11.139	3.283	14.624	29.972	54.525	77.292	80.980	204.192	53.774	291.127
60.500	11.900	3.061	15.239	28.363	54.396	76.206	81.418	204.032	53.959	292.965
61.000	12.656	2.866	15.858	26.881	54.262	75.135	81.854	203.784	54.145	294.817
62.000	14.147	2.537	17.100	24.246	53.985	73.036	82.718	202.952	54.518	298.567
63.000	15.611	2.270	18.342	21.978	53.694	70.992	83.569	201.520	54.891	302.378
64.000	17.046	2.049	19.577	20.005	53.391	69.003	84.400	199.214	55.262	306.252
65.000	18.451	1.860	20.799	18.272	53.077	67.064	85.199	195.604	55.630	310.189
66.000	19.826	1.698	22.006	16.738	52.756	65.174	85.946	190.005	55.990	314.191
67.000	21.169	1.556	23.194	15.368	52.427	63.328	86.603	181.380	56.341	318.261
68.500	23.123	1.372	24.937	13.567	51.924	60.632	87.270	160.339	56.841	324.496
70.000	25.007	1.214	26.629	12.010	51.414	58.009	87.288	132.555	57.297	330.894
71.500	26.820	1.076	28.270	10.649	50.904	55.439	86.626	110.710	57.690	337.461
73.000	28.565	0.953	29.859	9.445	50.399	52.901	85.559	98.450	57.997	344.203
75.000	30.792	0.807	31.899	8.036	49.747	49.526	83.838	90.872	58.223	353.463
77.000	32.912	0.677	33.857	6.807	49.138	46.102	81.923	88.035	58.150	3.010
79.000	34.938	0.558	35.740	5.719	48.597	42.563	79.858	87.355	57.646	12.761
81.000	36.882	0.447	37.561	4.745	48.160	38.838	77.631	87.648	56.514	22.515
82.000	37.828	0.394	38.452	4.292	47.994	36.882	76.447	87.931	55.629	27.267
83.000	38.758	0.342	39.331	3.860	47.871	34.853	75.208	88.207	54.474	31.821
85.000	40.581	0.242	41.063	3.046	47.788	30.545	72.543	88.431	51.166	39.712
87.000	42.364	0.144	42.770	2.286	47.983	25.862	69.619	87.617	46.351	44.159
89.000	44.124	0.049	44.468	1.567	48.543	20.781	66.570	84.821	40.890	41.443
89.500	44.562	0.025	44.892	1.391	48.752	19.449	65.842	83.687	39.808	39.196

3.1.3.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.4

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.333333 K_{sub}= 0.000001 $N_{film's}$= 1.4 $d_{film's}$= 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	13.572	185.139	11.920	159.98	52.533	104.38	70.451	197.758	48.865	242.101
50.000	5.847	193.415	5.316	127.740	52.419	91.180	75.198	202.085	50.176	256.653
52.000	2.821	209.665	4.187	90.392	52.232	86.176	77.103	203.870	50.775	262.882
52.500	2.158	220.599	4.248	79.470	52.174	84.956	77.579	204.314	50.932	264.475
53.000	1.636	239.687	4.453	69.223	52.112	83.748	78.055	204.756	51.091	266.083
53.100	1.561	244.874	4.510	67.304	52.099	83.508	78.150	204.844	51.124	266.406
53.110	1.555	245.418	4.516	67.115	52.098	83.484	78.159	204.852	51.127	266.438
53.120	1.548	245.968	4.522	66.926	52.096	83.460	78.169	204.861	51.130	266.470
53.125	1.545	246.245	4.525	66.832	52.096	83.448	78.173	204.866	51.132	266.487
53.130	1.542	246.523	4.528	66.738	52.095	83.436	78.178	204.870	51.133	266.503
53.150	1.529	247.645	4.541	66.363	52.092	83.388	78.197	204.887	51.140	266.567
53.200	1.501	250.528	4.572	65.435	52.086	83.269	78.245	204.931	51.156	266.729
53.250	1.476	253.514	4.605	64.520	52.079	83.149	78.292	204.975	51.172	266.892
53.500	1.419	269.500	4.784	60.146	52.046	82.553	78.530	205.193	51.253	267.704
54.000	1.635	299.323	5.215	52.413	51.976	81.372	79.004	205.626	51.418	269.340
55.000	2.817	329.364	6.286	40.619	51.825	79.049	79.952	206.469	51.754	272.655
57.000	5.828	345.631	8.856	26.761	51.485	74.566	81.838	207.994	52.455	279.456
58.000	7.382	348.694	10.231	22.556	51.299	72.407	82.777	208.615	52.818	282.943
58.500	8.158	349.787	10.926	20.856	51.202	71.347	83.244	208.868	53.002	284.708
59.000	8.932	350.691	11.624	19.363	51.103	70.302	83.711	209.069	53.188	286.487
59.500	9.703	351.450	12.323	18.042	51.002	69.269	84.176	209.205	53.376	288.282
60.000	10.471	352.098	13.022	16.865	50.899	68.249	84.640	209.257	53.565	290.090
60.500	11.234	352.658	13.718	15.809	50.795	67.243	85.102	209.200	53.756	291.914
61.000	11.992	353.147	14.413	14.858	50.689	66.249	85.563	208.999	53.947	293.752
62.000	13.493	353.963	15.790	13.210	50.473	64.298	86.477	207.931	54.333	297.475
63.000	14.969	354.617	17.150	11.833	50.254	62.395	87.378	205.204	54.721	301.258
64.000	16.420	355.156	18.489	10.664	50.032	60.537	88.248	198.326	55.108	305.103
65.000	17.842	355.611	19.803	9.659	49.809	58.722	89.014	177.268	55.494	309.013
66.000	19.236	356.000	21.093	8.784	49.587	56.946	89.242	116.768	55.875	312.989
67.000	20.599	356.340	22.356	8.015	49.366	55.206	88.636	78.673	56.248	317.033
68.500	22.587	356.777	24.199	7.022	49.040	52.655	87.368	64.990	56.786	323.231
70.000	24.506	357.151	25.980	6.181	48.725	50.165	86.031	61.860	57.284	329.596
71.500	26.355	357.476	27.699	5.460	48.427	47.722	84.676	61.482	57.724	336.135
73.000	28.138	357.764	29.360	4.834	48.152	45.310	83.309	62.187	58.085	342.857
75.000	30.415	358.106	31.486	4.120	47.830	42.116	81.468	63.886	58.391	352.106
77.000	32.587	358.412	33.521	3.514	47.576	38.912	79.597	65.965	58.412	1.669
79.000	34.665	358.692	35.474	2.994	47.409	35.656	77.681	68.134	58.014	11.474
81.000	36.659	358.952	37.358	2.544	47.354	32.306	75.697	70.171	57.002	21.334
82.000	37.630	359.077	38.279	2.341	47.378	30.583	74.673	71.069	56.183	26.164
83.000	38.586	359.198	39.187	2.150	47.441	28.820	73.624	71.839	55.096	30.815
85.000	40.458	359.434	40.972	1.801	47.705	25.157	71.446	72.812	51.927	38.981
87.000	42.290	359.664	42.730	1.488	48.190	21.279	69.188	72.614	47.215	43.836
89.000	44.100	359.889	44.474	1.201	48.946	17.154	67.014	70.583	41.715	41.663
89.500	44.550	359.945	44.910	1.133	49.184	16.081	66.531	69.703	40.587	39.547

3.1.3.3. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.333333 K_{sub}= 0.000001 $N_{film's}$= 1.5 $d_{film's}$= 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	15.207	191.500	12.40	176.878	46.868	90.081	73.801	203.297	48.601	241.349
50.000	8.019	205.334	4.605	173.090	46.783	77.482	78.827	210.761	49.886	255.760
52.000	5.390	221.242	1.458	160.432	46.706	72.863	80.797	214.677	50.481	261.931
52.500	4.833	227.788	0.741	140.594	46.683	71.747	81.284	215.793	50.637	263.509
53.000	4.353	235.905	0.507	63.313	46.659	70.646	81.768	216.980	50.797	265.102
53.100	4.268	237.738	0.593	49.203	46.654	70.428	81.864	217.227	50.829	265.423
53.110	4.260	237.925	0.603	48.031	46.654	70.406	81.874	217.252	50.832	265.455
53.120	4.252	238.113	0.614	46.897	46.653	70.384	81.884	217.277	50.835	265.487
53.125	4.248	238.207	0.619	46.345	46.653	70.373	81.888	217.290	50.837	265.503
53.130	4.244	238.302	0.625	45.803	46.653	70.362	81.893	217.302	50.838	265.519
53.150	4.228	238.681	0.647	43.726	46.652	70.319	81.913	217.352	50.845	265.583
53.200	4.188	239.643	0.706	39.125	46.649	70.210	81.961	217.478	50.861	265.743
53.250	4.150	240.623	0.768	35.253	46.647	70.101	82.009	217.604	50.877	265.904
53.500	3.978	245.787	1.115	22.918	46.634	69.560	82.249	218.250	50.958	266.709
54.000	3.740	257.309	1.872	12.824	46.608	68.490	82.727	219.617	51.123	268.331
55.000	3.772	282.225	3.438	6.302	46.553	66.394	83.673	222.718	51.461	271.616
57.000	5.497	317.171	6.576	2.606	46.435	62.378	85.506	231.342	52.169	278.359
58.000	6.771	326.363	8.128	1.830	46.372	60.454	86.375	237.946	52.537	281.816
58.500	7.451	329.743	8.898	1.545	46.340	59.513	86.790	242.305	52.725	283.566
59.000	8.149	332.553	9.663	1.306	46.308	58.586	87.185	247.727	52.915	285.331
59.500	8.860	334.916	10.424	1.105	46.276	57.671	87.553	254.627	53.107	287.111
60.000	9.578	336.929	11.179	0.932	46.244	56.769	87.880	263.559	53.301	288.905
60.500	10.302	338.661	11.928	0.783	46.212	55.879	88.146	275.125	53.496	290.713
61.000	11.029	340.166	12.672	0.653	46.180	55.002	88.324	289.578	53.693	292.537
62.000	12.486	342.655	14.142	0.439	46.116	53.283	88.323	322.469	54.092	296.230
63.000	13.938	344.630	15.586	0.272	46.055	51.610	87.889	348.097	54.494	299.984
64.000	15.379	346.241	17.004	0.141	45.996	49.979	87.226	3.696	54.898	303.801
65.000	16.803	347.584	18.394	0.038	45.941	48.388	86.468	13.432	55.301	307.683
66.000	18.207	348.726	19.755	359.958	45.889	46.834	85.669	20.103	55.703	311.631
67.000	19.587	349.713	21.087	359.896	45.844	45.315	84.852	25.084	56.098	315.648
68.500	21.612	350.974	23.031	359.833	45.787	43.095	83.616	30.792	56.674	321.808
70.000	23.577	352.039	24.910	359.799	45.749	40.936	82.378	35.305	57.215	328.140
71.500	25.482	352.960	26.724	359.789	45.732	38.827	81.144	39.123	57.705	334.651
73.000	27.324	353.774	28.477	359.801	45.742	36.760	79.917	42.497	58.121	341.353
75.000	29.688	354.734	30.722	359.846	45.804	34.048	78.288	46.514	58.510	350.593
77.000	31.952	355.588	32.872	359.920	45.934	31.363	76.662	50.101	58.626	0.176
79.000	34.124	356.367	34.937	0.021	46.147	28.678	75.030	53.291	58.336	10.040
81.000	36.216	357.091	36.929	0.145	46.459	25.964	73.383	56.036	57.447	20.014
82.000	37.236	357.436	37.902	0.215	46.659	24.587	72.551	57.206	56.693	24.927
83.000	38.240	357.774	38.862	0.290	46.891	23.192	71.711	58.209	55.676	29.684
85.000	40.211	358.429	40.750	0.453	47.466	20.328	70.019	59.583	52.646	38.137
87.000	42.142	359.065	42.608	0.634	48.211	17.339	68.355	59.795	48.040	43.415
89.000	44.050	359.690	44.449	0.830	49.161	14.189	66.884	58.338	42.509	41.801
89.500	44.525	359.845	44.909	0.882	49.435	13.372	66.588	57.650	41.335	39.820

3.1.3.4. Плёнки с оптической плотностью n = 3

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.333333 K_{sub}= 0.000001 $N_{film's}$= 3 $d_{film's}$= 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.619	192.070	34.521	192.188	33.670	193.969	33.507	205.192	45.551	218.189
50.000	31.791	196.154	31.673	196.318	30.672	198.743	30.856	213.373	46.126	228.065
52.000	30.527	198.152	30.402	198.341	29.349	201.094	29.765	217.309	46.447	232.434
52.500	30.198	198.692	30.071	198.888	29.007	201.731	29.492	218.364	46.537	233.567
53.000	29.865	199.250	29.736	199.453	28.661	202.390	29.220	219.448	46.632	234.715
53.100	29.797	199.364	29.668	199.568	28.591	202.525	29.166	219.669	46.651	234.947
53.110	29.791	199.375	29.662	199.580	28.584	202.538	29.160	219.691	46.653	234.970
53.120	29.784	199.386	29.655	199.591	28.577	202.552	29.155	219.713	46.655	234.993
53.125	29.780	199.392	29.651	199.597	28.573	202.558	29.152	219.724	46.656	235.005
53.130	29.777	199.398	29.648	199.603	28.570	202.565	29.150	219.736	46.657	235.017
53.150	29.764	199.421	29.634	199.626	28.556	202.592	29.139	219.780	46.661	235.063
53.200	29.730	199.478	29.600	199.684	28.521	202.660	29.112	219.891	46.671	235.179
53.250	29.696	199.536	29.566	199.742	28.486	202.728	29.084	220.003	46.681	235.296
53.500	29.526	199.826	29.396	200.037	28.310	203.072	28.949	220.565	46.731	235.880
54.000	29.182	200.423	29.050	200.641	27.955	203.778	28.679	221.714	46.834	237.062
55.000	28.479	201.679	28.344	201.914	27.232	205.269	28.145	224.114	47.056	239.477
57.000	27.011	204.483	26.870	204.757	25.738	208.608	27.112	229.358	47.561	244.518
58.000	26.246	206.055	26.104	206.352	24.969	210.487	26.623	232.223	47.848	247.149
58.500	25.857	206.890	25.713	207.200	24.580	211.487	26.387	233.720	48.001	248.493
59.000	25.462	207.761	25.318	208.083	24.189	212.530	26.158	235.261	48.160	249.856
59.500	25.063	208.669	24.919	209.005	23.795	213.621	25.937	236.849	48.325	251.239
60.000	24.660	209.618	24.515	209.969	23.398	214.761	25.724	238.483	48.498	252.642
60.500	24.252	210.610	24.107	210.976	23.001	215.954	25.522	240.164	48.677	254.066
61.000	23.840	211.648	23.695	212.031	22.602	217.204	25.329	241.894	48.863	255.510
62.000	23.006	213.878	22.861	214.297	21.804	219.889	24.981	245.500	49.258	258.463
63.000	22.161	216.338	22.018	216.798	21.010	222.852	24.687	249.302	49.684	261.505
64.000	21.308	219.065	21.168	219.570	20.228	226.130	24.459	253.299	50.141	264.639
65.000	20.454	222.100	20.319	222.656	19.467	229.767	24.305	257.482	50.632	267.870
66.000	19.607	225.493	19.479	226.107	18.739	233.808	24.236	261.839	51.158	271.204
67.000	18.777	229.301	18.659	229.979	18.060	238.299	24.262	266.349	51.718	274.647
68.500	17.599	235.928	17.500	236.712	17.176	245.961	24.503	273.346	52.624	280.031
70.000	16.559	243.840	16.489	244.734	16.523	254.792	25.013	280.522	53.609	285.708
71.500	15.750	253.192	15.719	254.184	16.196	264.710	25.815	287.752	54.667	291.715
73.000	15.290	263.963	15.308	265.010	16.291	275.418	26.926	294.914	55.788	298.105
75.000	15.434	279.899	15.526	280.903	17.201	290.030	28.894	304.176	57.350	307.335
77.000	16.645	296.072	16.808	296.894	19.072	303.819	31.406	312.961	58.917	317.571
79.000	18.974	310.766	19.190	311.346	21.858	315.951	34.420	321.213	60.353	329.076
81.000	22.311	323.193	22.561	323.555	25.441	326.272	37.876	328.973	61.417	342.124
82.000	24.304	328.575	24.562	328.847	27.488	330.832	39.746	332.704	61.691	349.272
83.000	26.481	333.478	26.744	333.674	29.681	335.056	41.696	336.364	61.697	356.807
85.000	31.300	342.126	31.563	342.208	34.433	342.712	45.783	343.574	60.518	12.555
87.000	36.589	349.683	36.841	349.691	39.548	349.657	50.022	350.863	56.921	27.279
89.000	42.164	356.626	42.397	356.590	44.870	356.275	54.268	358.588	50.160	36.301
89.500	43.580	358.316	43.807	358.272	46.213	357.923	55.309	0.641	48.089	36.791

3.1.4. Плёнки толщиной d = 3000 нм.

3.1.4.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.333333 K_{sub}= 0.000001 $N_{film's}$= 1.3 $d_{film's}$= 300

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	12.818	177.51	13.50	146.012	55.613	115.31	67.719	196.034	49.093	242.742
50.000	4.941	172.853	8.495	111.921	55.952	101.822	72.100	199.679	50.422	257.421
52.000	1.770	159.151	7.895	89.385	55.876	96.553	73.876	201.088	51.023	263.701
52.500	1.052	142.995	7.938	83.511	55.839	95.257	74.321	201.426	51.180	265.308
53.000	0.636	92.304	8.059	77.765	55.795	93.972	74.766	201.756	51.339	266.928
53.100	0.651	77.828	8.092	76.640	55.785	93.716	74.855	201.820	51.371	267.254
53.110	0.654	76.437	8.095	76.528	55.784	93.690	74.864	201.827	51.374	267.287
53.120	0.659	75.060	8.099	76.416	55.783	93.665	74.873	201.833	51.377	267.319
53.125	0.661	74.378	8.101	76.360	55.782	93.652	74.877	201.837	51.379	267.336
53.130	0.663	73.701	8.102	76.304	55.782	93.639	74.882	201.840	51.380	267.352
53.150	0.673	71.043	8.110	76.081	55.780	93.588	74.899	201.853	51.387	267.417
53.200	0.704	64.770	8.128	75.525	55.775	93.460	74.944	201.885	51.403	267.580
53.250	0.742	59.087	8.147	74.971	55.770	93.333	74.989	201.917	51.419	267.744
53.500	1.014	38.992	8.253	72.246	55.743	92.697	75.211	202.076	51.500	268.563
54.000	1.724	21.793	8.515	67.031	55.685	91.433	75.657	202.385	51.663	270.212
55.000	3.285	11.290	9.216	57.685	55.549	88.941	76.548	202.962	51.997	273.554
57.000	6.464	5.728	11.124	43.366	55.204	84.112	78.328	203.883	52.688	280.410
58.000	8.040	4.595	12.237	38.042	54.997	81.781	79.216	204.171	53.045	283.924
58.500	8.822	4.180	12.818	35.739	54.886	80.637	79.659	204.256	53.225	285.703
59.000	9.600	3.833	13.412	33.641	54.770	79.507	80.100	204.294	53.407	287.496
59.500	10.372	3.537	14.014	31.726	54.650	78.392	80.541	204.275	53.590	289.304
60.000	11.139	3.283	14.624	29.972	54.525	77.292	80.980	204.192	53.774	291.127
60.500	11.900	3.061	15.239	28.363	54.396	76.206	81.418	204.032	53.959	292.965
61.000	12.656	2.866	15.858	26.881	54.262	75.135	81.854	203.784	54.145	294.817
62.000	14.147	2.537	17.100	24.246	53.985	73.036	82.718	202.952	54.518	298.567
63.000	15.611	2.270	18.342	21.978	53.694	70.992	83.569	201.520	54.891	302.378
64.000	17.046	2.049	19.577	20.005	53.391	69.003	84.400	199.214	55.262	306.252
65.000	18.451	1.860	20.799	18.272	53.077	67.064	85.199	195.604	55.630	310.189
66.000	19.826	1.698	22.006	16.738	52.756	65.174	85.946	190.005	55.990	314.191
67.000	21.169	1.556	23.194	15.368	52.427	63.328	86.603	181.380	56.341	318.261
68.500	23.123	1.372	24.937	13.567	51.924	60.632	87.270	160.339	56.841	324.496
70.000	25.007	1.214	26.629	12.010	51.414	58.009	87.288	132.555	57.297	330.894
71.500	26.820	1.076	28.270	10.649	50.904	55.439	86.626	110.710	57.690	337.461
73.000	28.565	0.953	29.859	9.445	50.399	52.901	85.559	98.450	57.997	344.203
75.000	30.792	0.807	31.899	8.036	49.747	49.526	83.838	90.872	58.223	353.463
77.000	32.912	0.677	33.857	6.807	49.138	46.102	81.923	88.035	58.150	3.010
79.000	34.938	0.558	35.740	5.719	48.597	42.563	79.858	87.355	57.646	12.761
81.000	36.882	0.447	37.561	4.745	48.160	38.838	77.631	87.648	56.514	22.515
82.000	37.828	0.394	38.452	4.292	47.994	36.882	76.447	87.931	55.629	27.267
83.000	38.758	0.342	39.331	3.860	47.871	34.853	75.208	88.207	54.474	31.821
85.000	40.581	0.242	41.063	3.046	47.788	30.545	72.543	88.431	51.166	39.712
87.000	42.364	0.144	42.770	2.286	47.983	25.862	69.619	87.617	46.351	44.159
89.000	44.124	0.049	44.468	1.567	48.543	20.781	66.570	84.821	40.890	41.443
89.500	44.562	0.025	44.892	1.391	48.752	19.449	65.842	83.687	39.808	39.196

3.1.4.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.4

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.333333 K_{sub}= 0.000001 $N_{film's}$= 1.4 $d_{film's}$= 300

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	13.572	185.139	11.920	159.976	52.533	104.383	70.451	197.758	48.865	242.101
50.000	5.847	193.415	5.316	127.740	52.419	91.180	75.198	202.085	50.176	256.653
52.000	2.821	209.665	4.187	90.392	52.232	86.176	77.103	203.870	50.775	262.882
52.500	2.158	220.599	4.248	79.470	52.174	84.956	77.579	204.314	50.932	264.475
53.000	1.636	239.687	4.453	69.223	52.112	83.748	78.055	204.756	51.091	266.083
53.100	1.561	244.874	4.510	67.304	52.099	83.508	78.150	204.844	51.124	266.406
53.110	1.555	245.418	4.516	67.115	52.098	83.484	78.159	204.852	51.127	266.438
53.120	1.548	245.968	4.522	66.926	52.096	83.460	78.169	204.861	51.130	266.470
53.125	1.545	246.245	4.525	66.832	52.096	83.448	78.173	204.866	51.132	266.487
53.130	1.542	246.523	4.528	66.738	52.095	83.436	78.178	204.870	51.133	266.503
53.150	1.529	247.645	4.541	66.363	52.092	83.388	78.197	204.887	51.140	266.567
53.200	1.501	250.528	4.572	65.435	52.086	83.269	78.245	204.931	51.156	266.729
53.250	1.476	253.514	4.605	64.520	52.079	83.149	78.292	204.975	51.172	266.892
53.500	1.419	269.500	4.784	60.146	52.046	82.553	78.530	205.193	51.253	267.704
54.000	1.635	299.323	5.215	52.413	51.976	81.372	79.004	205.626	51.418	269.340
55.000	2.817	329.364	6.286	40.619	51.825	79.049	79.952	206.469	51.754	272.655
57.000	5.828	345.631	8.856	26.761	51.485	74.566	81.838	207.994	52.455	279.456
58.000	7.382	348.694	10.231	22.556	51.299	72.407	82.777	208.615	52.818	282.943
58.500	8.158	349.787	10.926	20.856	51.202	71.347	83.244	208.868	53.002	284.708
59.000	8.932	350.691	11.624	19.363	51.103	70.302	83.711	209.069	53.188	286.487
59.500	9.703	351.450	12.323	18.042	51.002	69.269	84.176	209.205	53.376	288.282
60.000	10.471	352.098	13.022	16.865	50.899	68.249	84.640	209.257	53.565	290.090
60.500	11.234	352.658	13.718	15.809	50.795	67.243	85.102	209.200	53.756	291.914
61.000	11.992	353.147	14.413	14.858	50.689	66.249	85.563	208.999	53.947	293.752
62.000	13.493	353.963	15.790	13.210	50.473	64.298	86.477	207.931	54.333	297.475
63.000	14.969	354.617	17.150	11.833	50.254	62.395	87.378	205.204	54.721	301.258
64.000	16.420	355.156	18.489	10.664	50.032	60.537	88.248	198.326	55.108	305.103
65.000	17.842	355.611	19.803	9.659	49.809	58.722	89.014	177.268	55.494	309.013
66.000	19.236	356.000	21.093	8.784	49.587	56.946	89.242	116.768	55.875	312.989
67.000	20.599	356.340	22.356	8.015	49.366	55.206	88.636	78.673	56.248	317.033
68.500	22.587	356.777	24.199	7.022	49.040	52.655	87.368	64.990	56.786	323.231
70.000	24.506	357.151	25.980	6.181	48.725	50.165	86.031	61.860	57.284	329.596
71.500	26.355	357.476	27.699	5.460	48.427	47.722	84.676	61.482	57.724	336.135
73.000	28.138	357.764	29.360	4.834	48.152	45.310	83.309	62.187	58.085	342.857
75.000	30.415	358.106	31.486	4.120	47.830	42.116	81.468	63.886	58.391	352.106
77.000	32.587	358.412	33.521	3.514	47.576	38.912	79.597	65.965	58.412	1.669
79.000	34.665	358.692	35.474	2.994	47.409	35.656	77.681	68.134	58.014	11.474
81.000	36.659	358.952	37.358	2.544	47.354	32.306	75.697	70.171	57.002	21.334
82.000	37.630	359.077	38.279	2.341	47.378	30.583	74.673	71.069	56.183	26.164
83.000	38.586	359.198	39.187	2.150	47.441	28.820	73.624	71.839	55.096	30.815
85.000	40.458	359.434	40.972	1.801	47.705	25.157	71.446	72.812	51.927	38.981
87.000	42.290	359.664	42.730	1.488	48.190	21.279	69.188	72.614	47.215	43.836
89.000	44.100	359.889	44.474	1.201	48.946	17.154	67.014	70.583	41.715	41.663
89.500	44.550	359.945	44.910	1.133	49.184	16.081	66.531	69.703	40.587	39.547

3.1.4.3. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.333333 K_{sub}= 0.000001 $N_{film's}$= 1.5 $d_{film's}$= 300

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	15.207	191.500	12.400	176.878	46.868	90.081	73.801	203.297	48.601	241.349
50.000	8.019	205.334	4.605	173.090	46.783	77.482	78.827	210.761	49.886	255.760
52.000	5.390	221.242	1.458	160.432	46.706	72.863	80.797	214.677	50.481	261.931
52.500	4.833	227.788	0.741	140.594	46.683	71.747	81.284	215.793	50.637	263.509
53.000	4.353	235.905	0.507	63.313	46.659	70.646	81.768	216.980	50.797	265.102
53.100	4.268	237.738	0.593	49.203	46.654	70.428	81.864	217.227	50.829	265.423
53.110	4.260	237.925	0.603	48.031	46.654	70.406	81.874	217.252	50.832	265.455
53.120	4.252	238.113	0.614	46.897	46.653	70.384	81.884	217.277	50.835	265.487
53.125	4.248	238.207	0.619	46.345	46.653	70.373	81.888	217.290	50.837	265.503
53.130	4.244	238.302	0.625	45.803	46.653	70.362	81.893	217.302	50.838	265.519
53.150	4.228	238.681	0.647	43.726	46.652	70.319	81.913	217.352	50.845	265.583
53.200	4.188	239.643	0.706	39.125	46.649	70.210	81.961	217.478	50.861	265.743
53.250	4.150	240.623	0.768	35.253	46.647	70.101	82.009	217.604	50.877	265.904
53.500	3.978	245.787	1.115	22.918	46.634	69.560	82.249	218.250	50.958	266.709
54.000	3.740	257.309	1.872	12.824	46.608	68.490	82.727	219.617	51.123	268.331
55.000	3.772	282.225	3.438	6.302	46.553	66.394	83.673	222.718	51.461	271.616
57.000	5.497	317.171	6.576	2.606	46.435	62.378	85.506	231.342	52.169	278.359
58.000	6.771	326.363	8.128	1.830	46.372	60.454	86.375	237.946	52.537	281.816
58.500	7.451	329.743	8.898	1.545	46.340	59.513	86.790	242.305	52.725	283.566
59.000	8.149	332.553	9.663	1.306	46.308	58.586	87.185	247.727	52.915	285.331
59.500	8.860	334.916	10.424	1.105	46.276	57.671	87.553	254.627	53.107	287.111
60.000	9.578	336.929	11.179	0.932	46.244	56.769	87.880	263.559	53.301	288.905
60.500	10.302	338.661	11.928	0.783	46.212	55.879	88.146	275.125	53.496	290.713
61.000	11.029	340.166	12.672	0.653	46.180	55.002	88.324	289.578	53.693	292.537
62.000	12.486	342.655	14.142	0.439	46.116	53.283	88.323	322.469	54.092	296.230
63.000	13.938	344.630	15.586	0.272	46.055	51.610	87.889	348.097	54.494	299.984
64.000	15.379	346.241	17.004	0.141	45.996	49.979	87.226	3.696	54.898	303.801
65.000	16.803	347.584	18.394	0.038	45.941	48.388	86.468	13.432	55.301	307.683
66.000	18.207	348.726	19.755	359.958	45.889	46.834	85.669	20.103	55.703	311.631
67.000	19.587	349.713	21.087	359.896	45.844	45.315	84.852	25.084	56.098	315.648
68.500	21.612	350.974	23.031	359.833	45.787	43.095	83.616	30.792	56.674	321.808
70.000	23.577	352.039	24.910	359.799	45.749	40.936	82.378	35.305	57.215	328.140
71.500	25.482	352.960	26.724	359.789	45.732	38.827	81.144	39.123	57.705	334.651
73.000	27.324	353.774	28.477	359.801	45.742	36.760	79.917	42.497	58.121	341.353
75.000	29.688	354.734	30.722	359.846	45.804	34.048	78.288	46.514	58.510	350.593
77.000	31.952	355.588	32.872	359.920	45.934	31.363	76.662	50.101	58.626	0.176
79.000	34.124	356.367	34.937	0.021	46.147	28.678	75.030	53.291	58.336	10.040
81.000	36.216	357.091	36.929	0.145	46.459	25.964	73.383	56.036	57.447	20.014
82.000	37.236	357.436	37.902	0.215	46.659	24.587	72.551	57.206	56.693	24.927
83.000	38.240	357.774	38.862	0.290	46.891	23.192	71.711	58.209	55.676	29.684
85.000	40.211	358.429	40.750	0.453	47.466	20.328	70.019	59.583	52.646	38.137
87.000	42.142	359.065	42.608	0.634	48.211	17.339	68.355	59.795	48.040	43.415
89.000	44.050	359.690	44.449	0.830	49.161	14.189	66.884	58.338	42.509	41.801
89.500	44.525	359.845	44.909	0.882	49.435	13.372	66.588	57.650	41.335	39.820

3.1.4.4. Плёнки с оптической плотностью n = 3

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.333333 K_{sub}= 0.000001 $N_{film's}$= 3 $d_{film's}$= 300

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.619	192.070	34.521	192.188	33.670	193.969	33.507	205.192	45.551	218.189
50.000	31.791	196.154	31.673	196.318	30.672	198.743	30.856	213.373	46.126	228.065
52.000	30.527	198.152	30.402	198.341	29.349	201.094	29.765	217.309	46.447	232.434
52.500	30.198	198.692	30.071	198.888	29.007	201.731	29.492	218.364	46.537	233.567
53.000	29.865	199.250	29.736	199.453	28.661	202.390	29.220	219.448	46.632	234.715
53.100	29.797	199.364	29.668	199.568	28.591	202.525	29.166	219.669	46.651	234.947
53.110	29.791	199.375	29.662	199.580	28.584	202.538	29.160	219.691	46.653	234.970
53.120	29.784	199.386	29.655	199.591	28.577	202.552	29.155	219.713	46.655	234.993
53.125	29.780	199.392	29.651	199.597	28.573	202.558	29.152	219.724	46.656	235.005
53.130	29.777	199.398	29.648	199.603	28.570	202.565	29.150	219.736	46.657	235.017
53.150	29.764	199.421	29.634	199.626	28.556	202.592	29.139	219.780	46.661	235.063
53.200	29.730	199.478	29.600	199.684	28.521	202.660	29.112	219.891	46.671	235.179
53.250	29.696	199.536	29.566	199.742	28.486	202.728	29.084	220.003	46.681	235.296
53.500	29.526	199.826	29.396	200.037	28.310	203.072	28.949	220.565	46.731	235.880
54.000	29.182	200.423	29.050	200.641	27.955	203.778	28.679	221.714	46.834	237.062
55.000	28.479	201.679	28.344	201.914	27.232	205.269	28.145	224.114	47.056	239.477
57.000	27.011	204.483	26.870	204.757	25.738	208.608	27.112	229.358	47.561	244.518
58.000	26.246	206.055	26.104	206.352	24.969	210.487	26.623	232.223	47.848	247.149
58.500	25.857	206.890	25.713	207.200	24.580	211.487	26.387	233.720	48.001	248.493
59.000	25.462	207.761	25.318	208.083	24.189	212.530	26.158	235.261	48.160	249.856
59.500	25.063	208.669	24.919	209.005	23.795	213.621	25.937	236.849	48.325	251.239
60.000	24.660	209.618	24.515	209.969	23.398	214.761	25.724	238.483	48.498	252.642
60.500	24.252	210.610	24.107	210.976	23.001	215.954	25.522	240.164	48.677	254.066
61.000	23.840	211.648	23.695	212.031	22.602	217.204	25.329	241.894	48.863	255.510
62.000	23.006	213.878	22.861	214.297	21.804	219.889	24.981	245.500	49.258	258.463
63.000	22.161	216.338	22.018	216.798	21.010	222.852	24.687	249.302	49.684	261.505
64.000	21.308	219.065	21.168	219.570	20.228	226.130	24.459	253.299	50.141	264.639
65.000	20.454	222.100	20.319	222.656	19.467	229.767	24.305	257.482	50.632	267.870
66.000	19.607	225.493	19.479	226.107	18.739	233.808	24.236	261.839	51.158	271.204
67.000	18.777	229.301	18.659	229.979	18.060	238.299	24.262	266.349	51.718	274.647
68.500	17.599	235.928	17.500	236.712	17.176	245.961	24.503	273.346	52.624	280.031
70.000	16.559	243.840	16.489	244.734	16.523	254.792	25.013	280.522	53.609	285.708
71.500	15.750	253.192	15.719	254.184	16.196	264.710	25.815	287.752	54.667	291.715
73.000	15.290	263.963	15.308	265.010	16.291	275.418	26.926	294.914	55.788	298.105
75.000	15.434	279.899	15.526	280.903	17.201	290.030	28.894	304.176	57.350	307.335
77.000	16.645	296.072	16.808	296.894	19.072	303.819	31.406	312.961	58.917	317.571
79.000	18.974	310.766	19.190	311.346	21.858	315.951	34.420	321.213	60.353	329.076
81.000	22.311	323.193	22.561	323.555	25.441	326.272	37.876	328.973	61.417	342.124
82.000	24.304	328.575	24.562	328.847	27.488	330.832	39.746	332.704	61.691	349.272
83.000	26.481	333.478	26.744	333.674	29.681	335.056	41.696	336.364	61.697	356.807
85.000	31.300	342.126	31.563	342.208	34.433	342.712	45.783	343.574	60.518	12.555
87.000	36.589	349.683	36.841	349.691	39.548	349.657	50.022	350.863	56.921	27.279
89.000	42.164	356.626	42.397	356.590	44.870	356.275	54.268	358.588	50.160	36.301
89.500	43.580	358.316	43.807	358.272	46.213	357.923	55.309	0.641	48.089	36.791

§ 3.2. Поляризационно-оптические свойства плёнок на SiO_2

3.2.1. Плёнки толщиной d = 0.3 нм.

3.2.1.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.458 K_{sub}= 2.5E-07 $N_{film's}$= 1.3 $d_{film's}$= 0.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	74.020	179.95	72.676	199.03	59.897	189.187	72.149	232.51	76.270	189.445
50.000	81.361	179.88	80.168	205.34	70.531	191.474	80.078	237.76	82.967	196.111
55.000	89.137	178.46	88.952	212.32	88.112	195.977	89.259	275.87	88.572	256.192
55.500	89.921	162.34	89.924	192.06	89.686	2.722	89.377	9.857	88.658	281.208
55.750	89.680	4.324	89.571	39.340	88.566	11.995	88.969	31.109	88.603	293.559
56.000	89.286	1.965	89.068	37.721	87.424	13.284	88.499	39.836	88.491	304.454
56.250	88.892	1.284	88.558	37.595	86.266	13.889	88.008	44.391	88.335	313.524
56.400	88.656	1.067	88.248	37.700	85.563	14.144	87.709	46.199	88.226	318.117
56.500	88.498	0.960	88.041	37.807	85.092	14.291	87.509	47.168	88.148	320.859
56.550	88.419	0.914	87.937	37.868	84.855	14.359	87.408	47.598	88.107	322.141
56.600	88.341	0.874	87.832	37.934	84.618	14.425	87.307	47.996	88.066	323.368
56.650	88.262	0.837	87.727	38.004	84.380	14.487	87.206	48.366	88.024	324.542
56.750	88.104	0.771	87.517	38.152	83.902	14.607	87.003	49.035	87.938	326.741
57.000	87.710	0.648	86.986	38.566	82.699	14.879	86.492	50.378	87.712	331.479
57.250	87.317	0.561	86.447	39.022	81.483	15.127	85.979	51.393	87.477	335.333
57.500	86.923	0.496	85.900	39.507	80.255	15.359	85.462	52.187	87.235	338.509
57.750	86.530	0.447	85.345	40.012	79.016	15.583	84.943	52.825	86.988	341.160
58.000	86.137	0.407	84.780	40.535	77.768	15.801	84.421	53.350	86.739	343.401
58.500	85.353	0.349	83.624	41.622	75.248	16.229	83.371	54.161	86.236	346.976
59.000	84.570	0.308	82.428	42.754	72.707	16.653	82.314	54.756	85.734	349.702
59.500	83.790	0.278	81.188	43.926	70.155	17.080	81.250	55.208	85.236	351.855
60.000	83.012	0.256	79.899	45.133	67.604	17.513	80.180	55.558	84.745	353.605
60.500	82.236	0.239	78.556	46.372	65.066	17.954	79.105	55.832	84.262	355.063
61.000	81.464	0.225	77.156	47.643	62.551	18.405	78.026	56.046	83.788	356.305
62.000	79.930	0.206	74.156	50.273	57.634	19.340	75.856	56.340	82.872	358.329
63.000	78.411	0.195	70.850	53.009	52.926	20.326	73.675	56.499	82.001	359.941
64.000	76.910	0.189	67.182	55.839	48.480	21.366	71.488	56.553	81.180	1.288
65.000	75.428	0.188	63.098	58.749	44.332	22.464	69.297	56.522	80.409	2.458
66.000	73.966	0.190	58.549	61.720	40.498	23.623	67.107	56.418	79.692	3.507
67.000	72.526	0.198	53.502	64.731	36.980	24.843	64.918	56.246	79.028	4.473
68.500	70.409	0.220	45.023	69.272	32.271	26.786	61.641	55.871	78.135	5.825
70.000	68.344	0.260	35.690	73.764	28.188	28.858	58.371	55.352	77.368	7.114
71.500	66.333	0.334	26.056	78.111	24.651	31.042	55.107	54.681	76.729	8.386
73.000	64.375	0.494	16.846	82.191	21.578	33.312	51.840	53.831	76.217	9.675
75.000	61.839	1.539	6.260	86.719	18.069	36.410	47.464	52.346	75.736	11.472
77.000	59.398	358.60	1.841	276.289	15.076	39.485	43.045	50.297	75.489	13.422
79.000	57.043	359.49	7.563	277.439	12.453	42.409	38.570	47.388	75.480	15.613
81.000	54.753	359.67	11.357	280.483	10.076	45.048	34.077	43.109	75.721	18.174
82.000	53.631	359.71	12.676	281.842	8.948	46.225	31.861	40.207	75.939	19.662
83.000	52.522	359.74	13.676	283.057	7.845	47.293	29.710	36.610	76.224	21.350
85.000	50.338	359.78	14.884	285.031	5.679	49.096	25.859	26.620	76.989	25.625
87.000	48.189	359.79	15.245	286.386	3.521	50.615	23.323	12.018	77.944	31.921
89.000	46.061	359.79	14.949	287.121	1.336	53.663	23.223	354.056	78.830	41.468
89.500	45.530	359.79	14.788	287.207	0.784	56.896	23.675	349.587	78.985	44.428

3.2.1.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.4

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.458 K_{sub}= 2.5E-07 $N_{film's}$= 1.4 $d_{film's}$= 0.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	74.020	180.01	68.190	211.488	82.116	168.437	66.236	223.57	76.093	189.957
50.000	81.361	179.99	76.622	219.168	87.716	169.074	76.530	229.06	82.855	196.832
55.000	89.137	179.36	88.460	226.857	89.955	292.767	88.986	266.95	88.532	257.520
55.500	89.924	171.77	89.893	218.033	89.990	107.095	89.170	0.990	88.614	282.347
55.750	89.681	2.047	89.368	50.623	89.945	126.087	88.621	22.737	88.556	294.552
56.000	89.287	0.964	88.618	50.096	89.884	130.932	87.988	31.612	88.441	305.319
56.250	88.892	0.654	87.855	50.239	89.809	133.938	87.329	36.230	88.282	314.300
56.400	88.656	0.555	87.390	50.405	89.756	135.299	86.927	38.062	88.170	318.856
56.500	88.498	0.506	87.078	50.531	89.718	136.079	86.658	39.044	88.090	321.580
56.550	88.420	0.486	86.921	50.598	89.698	136.435	86.523	39.480	88.049	322.855
56.600	88.341	0.467	86.763	50.667	89.677	136.772	86.387	39.885	88.006	324.076
56.650	88.262	0.451	86.605	50.737	89.655	137.092	86.252	40.261	87.963	325.245
56.750	88.104	0.422	86.287	50.881	89.610	137.682	85.980	40.941	87.875	327.436
57.000	87.711	0.366	85.482	51.259	89.486	138.916	85.298	42.309	87.645	332.163
57.250	87.317	0.328	84.663	51.652	89.344	139.880	84.613	43.345	87.405	336.019
57.500	86.923	0.298	83.830	52.055	89.184	140.639	83.926	44.160	87.157	339.203
57.750	86.530	0.276	82.982	52.465	89.005	141.239	83.237	44.819	86.905	341.865
58.000	86.138	0.260	82.121	52.879	88.808	141.713	82.548	45.364	86.649	344.120
58.500	85.353	0.236	80.356	53.717	88.354	142.367	81.166	46.214	86.135	347.727
59.000	84.570	0.219	78.534	54.561	87.819	142.733	79.785	46.845	85.620	350.486
59.500	83.790	0.208	76.655	55.409	87.196	142.889	78.405	47.331	85.109	352.672
60.000	83.012	0.199	74.723	56.259	86.483	142.888	77.028	47.713	84.604	354.456
60.500	82.236	0.194	72.737	57.110	85.675	142.762	75.655	48.017	84.107	355.947
61.000	81.464	0.190	70.702	57.960	84.766	142.538	74.290	48.259	83.619	357.221
62.000	79.930	0.187	66.496	59.653	82.634	141.853	71.583	48.601	82.674	359.310
63.000	78.411	0.187	62.141	61.333	80.054	140.922	68.916	48.795	81.775	0.987
64.000	76.910	0.191	57.685	62.994	77.006	139.799	66.296	48.872	80.923	2.400
65.000	75.428	0.195	53.187	64.632	73.483	138.513	63.731	48.849	80.122	3.637
66.000	73.966	0.203	48.708	66.241	69.500	137.085	61.223	48.737	79.373	4.756
67.000	72.526	0.213	44.312	67.817	65.106	135.530	58.774	48.540	78.677	5.796
68.500	70.409	0.232	38.002	70.110	57.932	132.981	55.215	48.090	77.735	7.265
70.000	68.344	0.254	32.172	72.304	50.422	130.198	51.789	47.448	76.916	8.681
71.500	66.333	0.284	26.926	74.387	43.041	127.210	48.490	46.598	76.221	10.092
73.000	64.375	0.320	22.303	76.347	36.186	124.052	45.305	45.509	75.649	11.533
75.000	61.846	0.383	17.104	78.748	28.255	119.644	41.221	43.599	75.078	13.556
77.000	59.405	0.468	12.920	80.890	21.803	115.119	37.304	40.995	74.723	15.761
79.000	57.043	0.581	9.624	82.754	16.648	110.607	33.561	37.412	74.580	18.227
81.000	54.751	0.736	7.081	84.331	12.499	106.219	30.046	32.417	74.647	21.058
82.000	53.628	0.832	6.052	85.012	10.711	104.089	28.417	29.209	74.759	22.657
83.000	52.519	0.941	5.166	85.621	9.069	101.992	26.913	25.414	74.921	24.414
85.000	50.333	1.191	3.773	86.643	6.113	97.698	24.468	15.777	75.388	28.568
87.000	48.180	1.453	2.809	87.444	3.441	91.941	23.205	3.410	75.996	33.964
89.000	46.049	1.628	2.197	88.097	0.971	67.327	23.662	349.659	76.604	41.144
89.500	45.518	1.656	2.091	88.245	0.546	28.356	24.085	346.312	76.728	43.251

3.2.1.3. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.458 K_{sub}= 2.5E-07 $N_{film's}$= 1.5 $d_{film's}$= 0.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	74.020	179.978	66.458	148.941	32.688	179.918	62.196	209.079	75.901	190.383
50.000	81.360	179.990	75.372	141.919	37.872	187.592	73.629	214.731	82.732	197.455
55.000	89.137	180.521	88.310	135.135	80.793	208.431	88.718	253.128	88.487	258.682
55.500	89.925	186.916	89.880	143.171	88.644	356.879	88.976	346.122	88.565	283.286
55.750	89.681	358.257	89.312	311.712	83.335	22.006	88.303	8.564	88.505	295.337
56.000	89.287	359.168	88.492	312.230	77.859	25.840	87.520	17.747	88.387	305.976
56.250	88.892	359.430	87.659	312.125	72.448	28.052	86.702	22.535	88.224	314.871
56.400	88.656	359.513	87.153	311.987	69.280	29.133	86.204	24.440	88.109	319.393
56.500	88.498	359.553	86.813	311.881	67.215	29.801	85.870	25.464	88.027	322.102
56.550	88.420	359.570	86.642	311.824	66.198	30.122	85.703	25.919	87.985	323.370
56.600	88.341	359.586	86.470	311.766	65.192	30.438	85.535	26.341	87.942	324.586
56.650	88.262	359.600	86.298	311.707	64.198	30.748	85.367	26.735	87.898	325.750
56.750	88.104	359.625	85.952	311.584	62.248	31.355	85.030	27.448	87.808	327.935
57.000	87.711	359.672	85.079	311.262	57.608	32.810	84.185	28.891	87.573	332.657
57.250	87.317	359.704	84.192	310.926	53.330	34.207	83.337	29.995	87.327	336.517
57.500	86.924	359.728	83.292	310.582	49.424	35.565	82.487	30.872	87.073	339.712
57.750	86.530	359.747	82.379	310.231	45.884	36.894	81.637	31.589	86.815	342.389
58.000	86.138	359.761	81.453	309.877	42.691	38.199	80.787	32.190	86.553	344.659
58.500	85.353	359.781	79.565	309.163	37.245	40.744	79.090	33.146	86.025	348.300
59.000	84.570	359.795	77.628	308.443	32.856	43.201	77.400	33.879	85.496	351.093
59.500	83.790	359.805	75.648	307.722	29.309	45.563	75.721	34.463	84.971	353.312
60.000	83.012	359.811	73.626	307.001	26.421	47.817	74.057	34.940	84.451	355.128
60.500	82.237	359.815	71.569	306.281	24.048	49.956	72.410	35.336	83.939	356.651
61.000	81.464	359.819	69.480	305.565	22.077	51.967	70.784	35.667	83.436	357.956
62.000	79.930	359.823	65.229	304.140	19.023	55.588	67.602	36.179	82.459	0.104
63.000	78.411	359.822	60.926	302.734	16.785	58.659	64.527	36.530	81.527	1.840
64.000	76.910	359.820	56.624	301.348	15.077	61.183	61.569	36.749	80.642	3.311
65.000	75.428	359.817	52.380	299.988	13.725	63.193	58.736	36.853	79.807	4.608
66.000	73.966	359.813	48.246	298.656	12.616	64.730	56.030	36.850	79.023	5.788
67.000	72.526	359.807	44.270	297.357	11.677	65.838	53.451	36.744	78.292	6.891
68.500	70.409	359.796	38.680	295.474	10.486	66.791	49.815	36.391	77.295	8.457
70.000	68.344	359.782	33.613	293.680	9.467	67.006	46.441	35.798	76.418	9.976
71.500	66.333	359.767	29.106	291.984	8.555	66.576	43.310	34.946	75.662	11.496
73.000	64.376	359.750	25.157	290.396	7.713	65.552	40.401	33.805	75.025	13.053
75.000	61.847	359.725	20.713	288.461	6.656	63.259	36.831	31.754	74.357	15.239
77.000	59.405	359.695	17.111	286.746	5.644	59.729	33.589	28.960	73.888	17.613
79.000	57.044	359.666	14.240	285.268	4.661	54.439	30.671	25.214	73.608	20.238
81.000	54.753	359.632	11.987	284.035	3.718	46.164	28.121	20.254	73.504	23.186
82.000	53.631	359.617	11.063	283.514	3.277	40.158	27.014	17.230	73.515	24.806
83.000	52.522	359.601	10.257	283.057	2.873	32.236	26.045	13.804	73.564	26.540
85.000	50.338	359.573	8.962	282.337	2.297	8.283	24.629	5.721	73.769	30.415
87.000	48.188	359.555	8.030	281.879	2.307	336.133	24.127	356.258	74.095	34.979
89.000	46.060	359.545	7.398	281.687	2.994	310.608	24.786	346.284	74.485	40.460
89.500	45.529	359.545	7.280	281.681	3.244	306.088	25.151	343.863	74.582	41.998

3.2.1.4. Плёнки с оптической плотностью n = 3

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.458 K_{sub}= 2.5E-07 $N_{film's}$= 3 $d_{film's}$= 0.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	73.983	182.468	73.990	182.197	73.935	179.950	73.305	177.926	73.902	190.070
50.000	81.302	185.071	81.309	184.753	81.298	182.172	80.926	180.509	81.247	199.062
55.000	88.794	222.570	88.800	222.480	88.824	222.568	88.676	231.188	87.508	261.146
55.500	89.176	263.035	89.176	263.233	89.149	265.162	88.862	270.714	87.574	279.520
55.750	89.130	289.753	89.126	289.872	89.067	290.430	88.731	290.132	87.515	288.596
56.000	88.929	310.000	88.923	309.938	88.845	308.753	88.486	304.614	87.399	297.051
56.250	88.641	322.815	88.634	322.620	88.545	320.379	88.173	314.621	87.234	304.639
56.400	88.446	328.077	88.438	327.833	88.345	325.218	87.965	319.070	87.115	308.734
56.500	88.310	330.895	88.302	330.626	88.206	327.832	87.821	321.553	87.028	311.274
56.550	88.241	332.139	88.233	331.860	88.136	328.991	87.747	322.674	86.983	312.489
56.600	88.171	333.288	88.163	332.999	88.064	330.066	87.672	323.724	86.936	313.667
56.650	88.100	334.353	88.092	334.055	87.993	331.063	87.597	324.708	86.888	314.809
56.750	87.956	336.259	87.948	335.946	87.847	332.856	87.445	326.501	86.789	316.992
57.000	87.590	340.019	87.582	339.679	87.476	336.420	87.055	330.157	86.525	321.886
57.250	87.217	342.779	87.209	342.422	87.098	339.058	86.655	332.946	86.241	326.073
57.500	86.839	344.885	86.830	344.514	86.715	341.081	86.250	335.133	85.942	329.667
57.750	86.458	346.539	86.449	346.159	86.329	342.676	85.839	336.888	85.631	332.767
58.000	86.075	347.871	86.066	347.484	85.941	343.964	85.426	338.325	85.311	335.461
58.500	85.305	349.882	85.296	349.484	85.162	345.910	84.593	340.529	84.652	339.893
59.000	84.532	351.328	84.523	350.921	84.380	347.306	83.755	342.136	83.976	343.381
59.500	83.759	352.416	83.750	352.002	83.597	348.353	82.915	343.357	83.291	346.201
60.000	82.987	353.265	82.978	352.845	82.815	349.164	82.074	344.314	82.602	348.535
60.500	82.217	353.947	82.208	353.522	82.034	349.811	81.234	345.084	81.912	350.510
61.000	81.448	354.506	81.439	354.076	81.255	350.337	80.395	345.718	81.223	352.211
62.000	79.920	355.373	79.911	354.934	79.706	351.140	78.726	346.701	79.858	355.028
63.000	78.406	356.014	78.396	355.567	78.170	351.721	77.071	347.434	78.516	357.312
64.000	76.908	356.510	76.898	356.055	76.651	352.161	75.436	348.009	77.203	359.249
65.000	75.428	356.907	75.418	356.445	75.151	352.506	73.823	348.481	75.925	0.952
66.000	73.968	357.233	73.958	356.765	73.670	352.785	72.235	348.884	74.685	2.495
67.000	72.529	357.507	72.519	357.033	72.212	353.018	70.676	349.243	73.484	3.927
68.500	70.413	357.846	70.403	357.366	70.067	353.309	68.395	349.731	71.761	5.938
70.000	68.349	358.125	68.339	357.640	67.977	353.555	66.189	350.191	70.135	7.850
71.500	66.339	358.360	66.328	357.871	65.943	353.775	64.063	350.647	68.604	9.713
73.000	64.382	358.563	64.371	358.073	63.965	353.984	62.020	351.116	67.166	11.559
75.000	61.853	358.797	61.842	358.310	61.414	354.263	59.428	351.784	65.387	14.025
77.000	59.411	359.001	59.400	358.521	58.959	354.556	56.986	352.519	63.749	16.513
79.000	57.049	359.183	57.038	358.715	56.592	354.877	54.694	353.332	62.232	19.016
81.000	54.758	359.349	54.747	358.900	54.305	355.236	52.544	354.230	60.810	21.491
82.000	53.635	359.428	53.624	358.990	53.189	355.432	51.520	354.709	60.129	22.693
83.000	52.526	359.504	52.515	359.079	52.088	355.639	50.530	355.208	59.463	23.851
85.000	50.341	359.651	50.330	359.257	49.930	356.091	48.643	356.255	58.182	25.948
87.000	48.191	359.792	48.180	359.435	47.820	356.590	46.876	357.343	57.003	27.563
89.000	46.061	359.931	46.051	359.615	45.743	357.131	45.225	358.423	56.049	28.435
89.500	45.531	359.965	45.521	359.660	45.228	357.272	44.831	358.685	55.875	28.512

3.2.2. Плёнки толщиной d = 3 нм.

3.2.2.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.458 K_{sub}= 2.5E-07 $N_{film's}$= 1.3 $d_{film's}$= 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	74.022	179.299	72.853	198.401	62.625	190.123	74.846	250.307	69.896	220.938
50.000	81.362	178.542	80.368	204.019	74.268	193.540	82.371	276.433	74.423	239.124
55.000	89.109	164.570	89.127	194.849	87.205	358.842	83.730	6.848	77.492	266.027
55.500	89.751	106.556	89.672	96.872	85.026	5.776	83.062	13.669	77.672	269.170
55.750	89.598	36.468	89.285	59.455	83.903	7.482	82.697	16.614	77.753	270.762
56.000	89.244	18.463	88.806	50.126	82.766	8.722	82.315	19.286	77.827	272.367
56.250	88.863	12.190	88.306	46.456	81.614	9.680	81.918	21.712	77.894	273.983
56.400	88.631	10.113	88.000	45.254	80.917	10.163	81.673	23.061	77.931	274.958
56.500	88.475	9.081	87.794	44.683	80.450	10.455	81.507	23.918	77.954	275.609
56.550	88.397	8.640	87.690	44.449	80.216	10.594	81.423	24.336	77.966	275.935
56.600	88.319	8.241	87.587	44.244	79.981	10.729	81.339	24.745	77.977	276.261
56.650	88.241	7.877	87.482	44.064	79.746	10.858	81.255	25.146	77.987	276.587
56.750	88.085	7.236	87.273	43.767	79.275	11.106	81.085	25.928	78.008	277.241
57.000	87.694	6.017	86.743	43.310	78.091	11.668	80.652	27.762	78.055	278.881
57.250	87.302	5.151	86.205	43.128	76.898	12.165	80.211	29.439	78.096	280.524
57.500	86.910	4.505	85.659	43.126	75.699	12.613	79.762	30.977	78.129	282.171
57.750	86.518	4.005	85.104	43.248	74.493	13.024	79.306	32.390	78.156	283.818
58.000	86.126	3.606	84.540	43.460	73.283	13.405	78.844	33.691	78.177	285.465
58.500	85.343	3.010	83.384	44.076	70.854	14.104	77.904	36.004	78.199	288.752
59.000	84.561	2.585	82.187	44.867	68.423	14.744	76.947	37.990	78.196	292.017
59.500	83.781	2.268	80.946	45.779	65.998	15.345	75.977	39.710	78.169	295.250
60.000	83.004	2.022	79.657	46.783	63.591	15.922	74.995	41.209	78.119	298.439
60.500	82.229	1.825	78.314	47.858	61.210	16.484	74.004	42.523	78.047	301.575
61.000	81.457	1.664	76.912	48.993	58.865	17.036	73.007	43.682	77.956	304.650
62.000	79.923	1.418	73.912	51.411	54.312	18.134	70.997	45.619	77.718	310.595
63.000	78.405	1.238	70.605	53.989	49.985	19.242	68.976	47.158	77.418	316.239
64.000	76.904	1.103	66.939	56.696	45.920	20.376	66.949	48.391	77.067	321.573
65.000	75.423	0.998	62.859	59.505	42.138	21.547	64.923	49.382	76.678	326.603
66.000	73.961	0.915	58.315	62.392	38.644	22.763	62.900	50.176	76.259	331.344
67.000	72.521	0.851	53.280	65.330	35.436	24.026	60.882	50.807	75.820	335.824
68.500	70.404	0.784	44.826	69.777	31.130	26.014	57.867	51.498	75.136	342.115
70.000	68.340	0.751	35.531	74.184	27.378	28.112	54.863	51.927	74.439	347.981
71.500	66.329	0.763	25.943	78.444	24.111	30.304	51.866	52.122	73.737	353.516
73.000	64.372	0.870	16.779	82.420	21.257	32.567	48.864	52.091	73.033	358.804
75.000	61.836	1.854	6.243	86.636	17.975	35.628	44.833	51.668	72.087	5.580
77.000	59.395	358.864	1.833	277.955	15.158	38.633	40.736	50.710	71.106	12.137
79.000	57.041	359.707	7.537	278.006	12.675	41.438	36.546	48.994	70.050	18.508
81.000	54.751	359.843	11.326	280.899	10.414	43.889	32.261	46.101	68.860	24.626
82.000	53.629	359.864	12.644	282.218	9.336	44.932	30.100	43.996	68.197	27.534
83.000	52.521	359.872	13.645	283.403	8.280	45.825	27.954	41.272	67.481	30.291
85.000	50.337	359.868	14.855	285.334	6.200	47.072	23.881	33.196	65.893	35.145
87.000	48.188	359.847	15.220	286.661	4.118	47.364	20.673	20.090	64.191	38.734
89.000	46.060	359.817	14.927	287.381	1.999	45.685	19.481	1.611	62.679	40.777
89.500	45.530	359.808	14.767	287.466	1.461	44.292	19.643	356.599	62.386	41.070

3.2.2.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.4

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.458 K_{sub}= 2.5E-07 $N_{film's}$= 1.4 $d_{film's}$= 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	74.023	179.76	68.390	211.221	82.938	168.86	69.238	240.400	69.455	221.480
50.000	81.363	179.38	76.873	218.604	88.175	170.09	79.320	266.448	73.967	239.747
55.000	89.134	172.89	88.748	219.282	89.944	94.732	81.565	357.009	77.028	266.619
55.500	89.870	123.44	89.728	91.070	89.845	118.658	80.696	4.101	77.207	269.752
55.750	89.660	18.75	89.043	60.055	89.773	124.580	80.220	7.169	77.287	271.339
56.000	89.275	8.737	88.299	55.616	89.686	128.721	79.720	9.956	77.359	272.938
56.250	88.884	5.700	87.536	54.123	89.583	131.740	79.200	12.487	77.425	274.548
56.400	88.648	4.723	87.072	53.702	89.513	133.175	78.881	13.895	77.462	275.519
56.500	88.491	4.241	86.759	53.526	89.463	134.011	78.664	14.790	77.485	276.168
56.550	88.413	4.036	86.602	53.461	89.437	134.396	78.556	15.225	77.496	276.493
56.600	88.334	3.850	86.444	53.410	89.410	134.763	78.446	15.653	77.506	276.818
56.650	88.255	3.683	86.286	53.369	89.383	135.111	78.336	16.072	77.517	277.143
56.750	88.098	3.387	85.968	53.317	89.326	135.758	78.114	16.889	77.537	277.795
57.000	87.705	2.824	85.162	53.312	89.172	137.124	77.552	18.805	77.582	279.428
57.250	87.311	2.427	84.342	53.426	89.000	138.206	76.980	20.558	77.621	281.066
57.500	86.918	2.131	83.508	53.617	88.811	139.068	76.399	22.167	77.653	282.706
57.750	86.525	1.902	82.660	53.860	88.602	139.757	75.812	23.645	77.678	284.348
58.000	86.133	1.721	81.798	54.139	88.374	140.308	75.218	25.008	77.697	285.990
58.500	85.349	1.450	80.031	54.772	87.860	141.091	74.017	27.431	77.714	289.266
59.000	84.566	1.259	78.209	55.468	87.263	141.558	72.804	29.515	77.706	292.523
59.500	83.786	1.116	76.331	56.204	86.580	141.795	71.584	31.322	77.673	295.747
60.000	83.008	1.005	74.399	56.966	85.806	141.859	70.362	32.898	77.616	298.930
60.500	82.233	0.917	72.415	57.745	84.938	141.788	69.140	34.282	77.537	302.061
61.000	81.460	0.847	70.383	58.535	83.972	141.607	67.923	35.504	77.437	305.133
62.000	79.926	0.740	66.185	60.136	81.729	140.989	65.507	37.548	77.181	311.076
63.000	78.408	0.663	61.843	61.746	79.052	140.105	63.130	39.171	76.858	316.726
64.000	76.907	0.608	57.404	63.352	75.926	139.012	60.800	40.467	76.482	322.069
65.000	75.425	0.565	52.925	64.944	72.351	137.745	58.522	41.501	76.063	327.110
66.000	73.963	0.533	48.469	66.514	68.351	136.327	56.299	42.318	75.612	331.866
67.000	72.523	0.511	44.098	68.056	63.982	134.774	54.132	42.950	75.136	336.359
68.500	70.406	0.489	37.825	70.302	56.925	132.214	50.984	43.600	74.393	342.667
70.000	68.341	0.478	32.032	72.454	49.620	129.406	47.952	43.934	73.629	348.542
71.500	66.331	0.480	26.817	74.496	42.494	126.378	45.024	43.974	72.853	354.074
73.000	64.373	0.491	22.222	76.413	35.902	123.164	42.186	43.721	72.068	359.339
75.000	61.844	0.526	17.050	78.751	28.280	118.653	38.516	42.886	71.003	6.050
77.000	59.403	0.587	12.887	80.814	22.064	113.984	34.951	41.366	69.893	12.488
79.000	57.042	0.679	9.605	82.576	17.080	109.267	31.481	38.927	68.697	18.676
81.000	54.750	0.813	7.071	84.012	13.056	104.585	28.133	35.182	67.363	24.536
82.000	53.627	0.900	6.046	84.601	11.318	102.259	26.531	32.640	66.628	27.286
83.000	52.518	1.001	5.162	85.101	9.723	99.917	25.008	29.528	65.842	29.869
85.000	50.332	1.233	3.773	85.839	6.855	94.929	22.349	21.179	64.130	34.336
87.000	48.180	1.478	2.811	86.256	4.275	88.127	20.599	9.555	62.339	37.518
89.000	46.049	1.636	2.201	86.449	1.915	69.899	20.362	355.402	60.786	39.164
89.500	45.518	1.660	2.095	86.481	1.409	56.839	20.601	351.768	60.491	39.359

3.2.2.3. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.458 K_{sub}= 2.5E-07 $N_{film's}$= 1.5 $d_{film's}$= 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	74.017	180.229	66.647	149.229	34.729	181.371	65.228	224.815	68.982	221.847
50.000	81.357	180.508	75.614	142.518	42.453	191.682	76.576	250.789	73.476	240.143
55.000	89.129	185.977	88.589	142.870	77.704	347.936	79.528	340.751	76.531	266.922
55.500	89.879	229.531	89.724	264.370	68.509	7.542	78.486	348.173	76.709	270.039
55.750	89.671	343.581	88.990	301.269	63.827	12.726	77.910	351.405	76.788	271.617
56.000	89.284	352.477	88.178	306.257	59.324	16.678	77.305	354.349	76.860	273.208
56.250	88.892	355.108	87.347	307.959	55.083	19.901	76.676	357.033	76.925	274.810
56.400	88.656	355.949	86.841	308.463	52.684	21.600	76.288	358.529	76.961	275.776
56.500	88.499	356.362	86.501	308.685	51.148	22.658	76.025	359.482	76.983	276.421
56.550	88.421	356.538	86.330	308.771	50.400	23.168	75.893	359.946	76.994	276.744
56.600	88.342	356.697	86.159	308.843	49.665	23.667	75.760	0.401	77.005	277.068
56.650	88.263	356.842	85.987	308.903	48.943	24.154	75.626	0.848	77.015	277.391
56.750	88.106	357.095	85.641	308.993	47.537	25.100	75.358	1.720	77.035	278.040
57.000	87.712	357.576	84.767	309.083	44.248	27.318	74.676	3.769	77.079	279.665
57.250	87.319	357.915	83.880	309.046	41.269	29.371	73.982	5.649	77.117	281.294
57.500	86.926	358.167	82.979	308.929	38.580	31.295	73.280	7.378	77.147	282.927
57.750	86.533	358.362	82.066	308.757	36.157	33.116	72.570	8.972	77.171	284.561
58.000	86.140	358.517	81.140	308.546	33.975	34.852	71.854	10.445	77.187	286.196
58.500	85.356	358.747	79.251	308.050	30.241	38.112	70.412	13.075	77.201	289.458
59.000	84.573	358.910	77.316	307.488	27.201	41.133	68.964	15.351	77.188	292.702
59.500	83.793	359.032	75.337	306.887	24.709	43.946	67.519	17.336	77.149	295.915
60.000	83.015	359.126	73.318	306.259	22.649	46.562	66.081	19.080	77.087	299.089
60.500	82.239	359.200	71.263	305.615	20.930	48.991	64.657	20.621	77.001	302.213
61.000	81.467	359.261	69.178	304.961	19.483	51.236	63.251	21.990	76.893	305.280
62.000	79.933	359.353	64.939	303.635	17.195	55.192	60.502	24.306	76.618	311.218
63.000	78.414	359.417	60.649	302.301	15.476	58.470	57.853	26.173	76.274	316.868
64.000	76.913	359.466	56.365	300.974	14.134	61.116	55.313	27.685	75.872	322.217
65.000	75.431	359.503	52.140	299.661	13.049	63.191	52.886	28.910	75.424	327.267
66.000	73.969	359.532	48.027	298.370	12.142	64.757	50.573	29.892	74.940	332.033
67.000	72.529	359.554	44.072	297.105	11.359	65.871	48.370	30.664	74.429	336.536
68.500	70.411	359.577	38.514	295.268	10.344	66.811	45.262	31.475	73.627	342.854
70.000	68.347	359.592	33.477	293.515	9.455	67.002	42.371	31.907	72.796	348.731
71.500	66.335	359.600	28.995	291.857	8.644	66.549	39.674	31.983	71.948	354.251
73.000	64.378	359.605	25.068	290.306	7.884	65.516	37.148	31.702	71.086	359.487
75.000	61.848	359.603	20.647	288.420	6.915	63.257	34.012	30.735	69.910	6.126
77.000	59.407	359.594	17.062	286.759	5.975	59.868	31.112	28.992	68.682	12.447
79.000	57.045	359.583	14.202	285.339	5.054	54.959	28.439	26.293	67.363	18.464
81.000	54.754	359.566	11.959	284.171	4.159	47.648	26.021	22.383	65.906	24.099
82.000	53.632	359.559	11.037	283.685	3.733	42.580	24.933	19.874	65.113	26.718
83.000	52.523	359.550	10.234	283.264	3.334	36.130	23.946	16.943	64.273	29.160
85.000	50.338	359.538	8.943	282.622	2.695	17.348	22.377	9.702	62.468	33.328
87.000	48.189	359.534	8.014	282.244	2.481	350.199	21.564	0.694	60.615	36.216
89.000	46.060	359.538	7.385	282.130	2.891	323.421	21.792	350.615	59.033	37.592
89.500	45.529	359.541	7.268	282.143	3.083	318.047	22.039	348.083	58.735	37.721

3.2.3. Плёнки толщиной d = 30 нм.

3.2.3.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.458 K_{sub}= 2.5E-07 $N_{film's}$= 1.3 $d_{film's}$= 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	74.239	172.677	74.920	192.206	73.777	293.760	40.529	320.745	45.750	211.696
50.000	81.455	164.823	82.521	188.949	64.495	332.774	41.452	339.406	46.349	220.746
55.000	87.586	100.746	86.926	87.010	51.317	351.523	41.614	356.248	47.156	231.647
55.500	87.597	81.912	86.219	76.145	50.011	352.865	41.577	357.828	47.247	232.852
55.750	87.507	72.915	85.813	72.248	49.363	353.513	41.554	358.610	47.293	233.463
56.000	87.362	64.725	85.383	69.112	48.720	354.148	41.529	359.388	47.340	234.080
56.250	87.169	57.519	84.931	66.580	48.081	354.769	41.500	0.161	47.387	234.702
56.400	87.034	53.680	84.652	65.299	47.700	355.136	41.482	0.622	47.415	235.079
56.500	86.937	51.315	84.462	64.530	47.447	355.378	41.470	0.929	47.434	235.331
56.550	86.887	50.188	84.366	64.169	47.321	355.498	41.463	1.082	47.443	235.457
56.600	86.836	49.098	84.270	63.822	47.195	355.618	41.457	1.235	47.453	235.584
56.650	86.783	48.043	84.173	63.490	47.069	355.737	41.450	1.388	47.462	235.711
56.750	86.675	46.034	83.977	62.865	46.818	355.975	41.437	1.692	47.481	235.965
57.000	86.390	41.555	83.478	61.514	46.194	356.561	41.401	2.451	47.529	236.605
57.250	86.086	37.751	82.965	60.418	45.576	357.136	41.362	3.204	47.577	237.251
57.500	85.768	34.506	82.441	59.533	44.963	357.702	41.321	3.953	47.626	237.903
57.750	85.438	31.722	81.904	58.825	44.356	358.258	41.277	4.696	47.674	238.561
58.000	85.100	29.317	81.356	58.265	43.755	358.806	41.230	5.435	47.723	239.225
58.500	84.404	25.393	80.225	57.508	42.571	359.877	41.129	6.899	47.822	240.572
59.000	83.690	22.345	79.047	57.130	41.413	0.918	41.017	8.342	47.921	241.944
59.500	82.964	19.920	77.820	57.043	40.281	1.935	40.894	9.767	48.020	243.341
60.000	82.231	17.950	76.542	57.183	39.175	2.928	40.761	11.173	48.119	244.765
60.500	81.494	16.318	75.208	57.508	38.097	3.902	40.617	12.560	48.219	246.214
61.000	80.755	14.947	73.816	57.984	37.046	4.859	40.463	13.928	48.318	247.690
62.000	79.275	12.769	70.835	59.296	35.028	6.732	40.123	16.608	48.513	250.725
63.000	77.800	11.115	67.556	60.980	33.119	8.563	39.742	19.217	48.702	253.870
64.000	76.336	9.815	63.933	62.943	31.320	10.368	39.320	21.757	48.882	257.131
65.000	74.887	8.763	59.922	65.118	29.627	12.156	38.858	24.231	49.048	260.508
66.000	73.456	7.892	55.486	67.450	28.037	13.939	38.357	26.643	49.196	264.005
67.000	72.044	7.159	50.606	69.893	26.545	15.723	37.816	28.996	49.321	267.622
68.500	69.965	6.254	42.501	73.665	24.482	18.410	36.931	32.427	49.451	273.275
70.000	67.937	5.528	33.692	77.432	22.614	21.118	35.957	35.754	49.492	279.197
71.500	65.961	4.952	24.675	81.014	20.923	23.840	34.894	38.993	49.416	285.377
73.000	64.037	4.547	16.074	84.124	19.392	26.559	33.738	42.165	49.191	291.793
75.000	61.544	4.938	6.139	85.681	17.565	30.124	32.042	46.323	48.599	300.647
77.000	59.145	1.429	1.686	293.971	15.938	33.521	30.156	50.442	47.585	309.713
79.000	56.831	1.807	7.153	283.048	14.459	36.614	28.056	54.571	46.049	318.768
81.000	54.581	1.517	10.876	284.558	13.073	39.250	25.714	58.756	43.901	327.474
82.000	53.478	1.337	12.188	285.518	12.398	40.346	24.441	60.883	42.579	331.548
83.000	52.389	1.149	13.193	286.434	11.728	41.267	23.093	63.042	41.091	335.330
85.000	50.244	0.767	14.431	287.990	10.373	42.506	20.154	67.471	37.680	341.597
87.000	48.132	0.381	14.837	289.084	8.970	42.790	16.850	72.077	33.971	345.250
89.000	46.041	359.999	14.588	289.685	7.489	41.887	13.137	76.877	30.680	345.236
89.500	45.520	359.897	14.439	289.758	7.104	41.433	12.141	78.104	30.050	344.617

3.2.3.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.4

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.458 K_{sub}= 2.5E-07 $N_{film's}$= 1.4 $d_{film's}$= 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	74.260	176.868	70.628	210.289	85.596	242.657	29.996	296.555	45.538	210.234
50.000	81.601	173.403	79.664	215.814	87.607	273.416	30.947	319.529	46.077	219.000
55.000	88.828	118.144	87.726	69.737	88.420	146.310	31.874	340.419	46.821	229.631
55.500	88.936	77.228	86.306	62.256	87.829	141.213	31.935	342.365	46.906	230.811
55.750	88.785	58.817	85.563	60.500	87.508	139.594	31.962	343.327	46.949	231.410
56.000	88.540	45.510	84.804	59.349	87.170	138.350	31.987	344.283	46.992	232.014
56.250	88.240	36.365	84.030	58.583	86.816	137.379	32.010	345.231	47.036	232.624
56.400	88.044	32.281	83.558	58.254	86.597	136.895	32.023	345.797	47.063	232.993
56.500	87.909	29.991	83.241	58.077	86.447	136.607	32.031	346.173	47.080	233.241
56.550	87.840	28.954	83.082	58.000	86.371	136.472	32.035	346.360	47.089	233.365
56.600	87.771	27.982	82.922	57.930	86.294	136.343	32.039	346.547	47.098	233.489
56.650	87.701	27.069	82.762	57.866	86.217	136.218	32.042	346.734	47.107	233.613
56.750	87.559	25.400	82.439	57.755	86.061	135.984	32.050	347.107	47.125	233.863
57.000	87.198	21.974	81.624	57.568	85.659	135.476	32.066	348.035	47.170	234.491
57.250	86.829	19.337	80.795	57.482	85.240	135.054	32.080	348.955	47.215	235.125
57.500	86.456	17.252	79.953	57.473	84.805	134.699	32.091	349.868	47.260	235.766
57.750	86.079	15.566	79.099	57.527	84.353	134.396	32.100	350.775	47.306	236.412
58.000	85.699	14.178	78.232	57.629	83.884	134.134	32.106	351.674	47.352	237.065
58.500	84.936	12.026	76.460	57.947	82.896	133.696	32.112	353.451	47.445	238.390
59.000	84.170	10.439	74.640	58.374	81.837	133.333	32.107	355.199	47.538	239.740
59.500	83.402	9.221	72.772	58.880	80.708	133.011	32.091	356.919	47.633	241.116
60.000	82.635	8.255	70.860	59.442	79.506	132.707	32.065	358.611	47.727	242.519
60.500	81.869	7.473	68.906	60.047	78.233	132.407	32.027	0.274	47.821	243.949
61.000	81.105	6.825	66.913	60.683	76.886	132.099	31.979	1.909	47.916	245.407
62.000	79.586	5.813	62.826	62.019	73.981	131.433	31.850	5.096	48.102	248.406
63.000	78.080	5.058	58.638	63.409	70.803	130.671	31.676	8.172	48.284	251.520
64.000	76.592	4.472	54.394	64.824	67.378	129.795	31.458	11.142	48.457	254.752
65.000	75.121	4.002	50.146	66.244	63.744	128.795	31.195	14.007	48.619	258.105
66.000	73.672	3.617	45.946	67.654	59.955	127.665	30.889	16.773	48.764	261.581
67.000	72.243	3.296	41.848	69.044	56.075	126.406	30.540	19.441	48.887	265.183
68.500	70.144	2.901	35.992	71.065	50.232	124.275	29.935	23.273	49.018	270.821
70.000	68.097	2.584	30.594	72.984	44.567	121.865	29.235	26.915	49.063	276.740
71.500	66.104	2.325	25.731	74.772	39.270	119.195	28.441	30.382	48.997	282.929
73.000	64.165	2.111	21.434	76.402	34.467	116.294	27.551	33.693	48.786	289.366
75.000	61.661	1.885	16.574	78.273	28.920	112.134	26.213	37.889	48.221	298.269
77.000	59.244	1.718	12.639	79.724	24.331	107.744	24.693	41.866	47.245	307.407
79.000	56.908	1.604	9.518	80.648	20.583	103.258	22.979	45.642	45.763	316.558
81.000	54.641	1.551	7.099	80.909	17.519	98.809	21.054	49.212	43.689	325.392
82.000	53.530	1.549	6.118	80.739	16.193	96.633	20.005	50.909	42.412	329.546
83.000	52.433	1.563	5.274	80.340	14.980	94.501	18.895	52.533	40.978	333.425
85.000	50.271	1.629	3.949	78.788	12.824	90.374	16.479	55.471	37.689	339.956
87.000	48.143	1.713	3.042	76.253	10.933	86.353	13.786	57.707	34.105	344.030
89.000	46.037	1.714	2.481	73.133	9.214	82.159	10.808	58.414	30.879	344.654
89.500	45.512	1.699	2.387	72.358	8.802	81.017	10.022	58.134	30.246	344.222

3.2.3.3. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 1.458 K_{sub}= 2.5E-07 $N_{film's}$= 1.5 $d_{film's}$= 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	73.711	182.336	67.804	154.189	35.478	238.254	27.530	263.947	45.411	208.748
50.000	80.995	184.790	76.961	152.938	23.956	284.276	26.272	288.253	45.906	217.212
55.000	88.538	213.824	86.971	234.031	11.765	345.068	25.803	313.420	46.600	227.549
55.500	89.077	242.439	86.311	258.437	11.153	351.658	25.781	315.871	46.680	228.701
55.750	89.179	267.693	85.776	267.049	10.891	354.922	25.771	317.088	46.721	229.286
56.000	89.102	293.705	85.151	273.612	10.657	358.153	25.762	318.299	46.762	229.876
56.250	88.882	312.499	84.462	278.611	10.449	1.341	25.753	319.504	46.803	230.473
56.400	88.710	320.233	84.024	281.033	10.336	3.228	25.747	320.224	46.828	230.834
56.500	88.584	324.296	83.724	282.453	10.266	4.474	25.744	320.703	46.845	231.076
56.550	88.520	326.066	83.571	283.111	10.232	5.093	25.742	320.941	46.853	231.197
56.600	88.453	327.686	83.417	283.737	10.199	5.710	25.740	321.180	46.862	231.319
56.650	88.386	329.171	83.262	284.334	10.168	6.324	25.738	321.418	46.870	231.440
56.750	88.248	331.796	82.948	285.444	10.106	7.544	25.735	321.894	46.887	231.685
57.000	87.892	336.826	82.142	287.800	9.968	10.541	25.726	323.079	46.930	232.299
57.250	87.525	340.383	81.310	289.678	9.851	13.457	25.717	324.256	46.972	232.920
57.500	87.150	343.015	80.456	291.188	9.751	16.287	25.707	325.427	47.015	233.548
57.750	86.771	345.032	79.583	292.412	9.668	19.024	25.698	326.589	47.059	234.181
58.000	86.390	346.625	78.692	293.408	9.600	21.664	25.688	327.743	47.103	234.822
58.500	85.621	348.974	76.864	294.887	9.502	26.641	25.667	330.028	47.191	236.121
59.000	84.849	350.620	74.980	295.871	9.446	31.207	25.644	332.278	47.280	237.447
59.500	84.075	351.839	73.049	296.511	9.422	35.364	25.618	334.494	47.370	238.799
60.000	83.302	352.775	71.077	296.902	9.421	39.126	25.588	336.674	47.460	240.179
60.500	82.530	353.518	69.070	297.109	9.436	42.514	25.554	338.817	47.551	241.586
61.000	81.760	354.123	67.034	297.177	9.462	45.554	25.516	340.922	47.641	243.021
62.000	80.227	355.048	62.902	297.013	9.527	50.698	25.423	345.016	47.821	245.979
63.000	78.707	355.722	58.733	296.579	9.591	54.774	25.307	348.952	47.996	249.055
64.000	77.202	356.238	54.579	295.972	9.641	57.970	25.164	352.730	48.165	252.254
65.000	75.714	356.647	50.493	295.255	9.669	60.447	24.992	356.350	48.323	255.577
66.000	74.246	356.979	46.524	294.469	9.673	62.334	24.789	359.812	48.465	259.029
67.000	72.799	357.255	42.712	293.642	9.651	63.733	24.554	3.120	48.587	262.610
68.500	70.669	357.593	37.359	292.373	9.572	65.093	24.139	7.801	48.720	268.229
70.000	68.590	357.865	32.506	291.116	9.443	65.747	23.646	12.157	48.771	274.142
71.500	66.563	358.089	28.182	289.908	9.268	65.846	23.074	16.204	48.714	280.338
73.000	64.589	358.280	24.386	288.781	9.052	65.497	22.420	19.960	48.518	286.799
75.000	62.036	358.493	20.099	287.448	8.708	64.458	21.418	24.534	47.979	295.757
77.000	59.571	358.672	16.612	286.353	8.307	62.858	20.264	28.630	47.039	304.980
79.000	57.184	358.828	13.820	285.535	7.856	60.736	18.950	32.240	45.606	314.246
81.000	54.868	358.964	11.622	285.022	7.362	58.062	17.469	35.311	43.598	323.232
82.000	53.733	359.030	10.717	284.885	7.101	56.490	16.664	36.608	42.362	327.480
83.000	52.611	359.092	9.927	284.828	6.832	54.734	15.815	37.710	40.973	331.469
85.000	50.402	359.215	8.654	284.948	6.278	50.555	13.987	39.151	37.789	338.291
87.000	48.227	359.342	7.735	285.357	5.717	45.207	12.000	39.050	34.306	342.801
89.000	46.072	359.475	7.109	286.018	5.179	38.226	9.916	36.168	31.125	344.057
89.500	45.535	359.509	6.992	286.217	5.053	36.159	9.396	34.752	30.485	343.810

§ 3.3. Поляризационно-оптические свойства плёнок на Si

3.3.1. Плёнки толщиной d = 0.3 нм.

3.3.1.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 3.9 K_{sub}= 0.02 $N_{film's}$= 1.3 $d_{film's}$= 0.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.551	179.884	34.614	177.207	38.726	159.965	45.842	161.884	47.543	167.785
50.000	31.569	179.845	31.656	176.299	37.094	154.583	45.746	157.750	48.115	164.562
55.000	27.939	179.792	28.062	175.066	35.238	148.252	45.481	153.213	48.711	160.880
55.500	27.534	179.785	27.661	174.917	35.039	147.558	45.443	152.735	48.771	160.486
55.750	27.328	179.782	27.458	174.841	34.939	147.207	45.423	152.495	48.801	160.287
56.000	27.120	179.778	27.252	174.762	34.839	146.853	45.402	152.253	48.830	160.087
56.250	26.909	179.775	27.044	174.683	34.737	146.495	45.380	152.011	48.860	159.886
56.400	26.782	179.773	26.919	174.634	34.676	146.279	45.367	151.865	48.878	159.765
56.500	26.697	179.771	26.834	174.601	34.636	146.135	45.358	151.767	48.890	159.684
56.550	26.654	179.771	26.792	174.585	34.615	146.062	45.354	151.718	48.895	159.644
56.600	26.611	179.770	26.750	174.568	34.595	145.990	45.349	151.669	48.901	159.603
56.650	26.568	179.769	26.707	174.551	34.574	145.917	45.345	151.620	48.907	159.562
56.750	26.482	179.768	26.622	174.518	34.533	145.771	45.336	151.522	48.919	159.481
57.000	26.265	179.764	26.408	174.433	34.430	145.404	45.312	151.275	48.948	159.276
57.250	26.046	179.760	26.191	174.346	34.327	145.034	45.288	151.028	48.978	159.071
57.500	25.824	179.757	25.972	174.258	34.222	144.660	45.263	150.779	49.007	158.864
57.750	25.600	179.753	25.751	174.167	34.118	144.283	45.238	150.529	49.036	158.656
58.000	25.373	179.749	25.527	174.074	34.012	143.902	45.211	150.278	49.065	158.446
58.500	24.912	179.740	25.073	173.883	33.800	143.130	45.156	149.771	49.122	158.025
59.000	24.441	179.731	24.608	173.681	33.585	142.343	45.098	149.259	49.179	157.598
59.500	23.960	179.722	24.134	173.470	33.368	141.541	45.037	148.742	49.235	157.166
60.000	23.467	179.713	23.649	173.248	33.149	140.724	44.972	148.218	49.290	156.730
60.500	22.964	179.702	23.153	173.014	32.928	139.890	44.904	147.689	49.345	156.290
61.000	22.449	179.692	22.646	172.766	32.704	139.039	44.832	147.154	49.398	155.844
62.000	21.382	179.668	21.598	172.227	32.249	137.282	44.676	146.063	49.501	154.938
63.000	20.265	179.641	20.502	171.616	31.786	135.448	44.504	144.944	49.598	154.014
64.000	19.093	179.611	19.354	170.917	31.314	133.528	44.313	143.793	49.687	153.069
65.000	17.864	179.576	18.152	170.106	30.834	131.515	44.103	142.608	49.768	152.105
66.000	16.573	179.534	16.894	169.150	30.347	129.397	43.872	141.384	49.839	151.120
67.000	15.215	179.485	15.575	168.001	29.853	127.163	43.617	140.115	49.897	150.113
68.500	13.044	179.387	13.481	165.752	29.105	123.563	43.186	138.117	49.955	148.559
70.000	10.696	179.241	11.243	162.465	28.353	119.614	42.690	135.981	49.971	146.947
71.500	8.152	178.998	8.876	157.166	27.611	115.246	42.119	133.672	49.930	145.266
73.000	5.393	178.491	6.449	147.275	26.896	110.375	41.463	131.145	49.818	143.499
75.000	1.346	174.091	3.775	111.452	26.037	102.927	40.439	127.326	49.523	140.962
77.000	3.190	2.349	4.699	48.120	25.393	94.161	39.223	122.791	49.001	138.120
79.000	8.234	0.815	8.865	22.764	25.145	83.877	37.809	117.209	48.169	134.779
81.000	13.833	0.395	14.156	13.458	25.564	72.086	36.239	110.066	46.916	130.586
82.000	16.844	0.274	17.078	10.789	26.130	65.735	35.439	105.680	46.097	127.979
83.000	19.994	0.180	20.161	8.776	26.996	59.198	34.679	100.597	45.136	124.868
85.000	26.683	0.034	26.758	5.913	29.790	46.069	33.580	87.855	42.831	116.346
87.000	33.811	359.914	33.833	3.929	34.173	33.704	33.887	71.329	40.546	102.816
89.000	41.235	359.801	41.231	2.425	40.134	22.818	36.942	52.386	40.360	82.253
89.500	43.115	359.773	43.108	2.098	41.842	20.367	38.255	47.669	41.066	76.236

3.3.1.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out}= 0.0000005 N_{sub}= 3.9 K_{sub}= 0.02 $N_{film's}$= 1.5 $d_{film's}$= 0.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.551	179.850	34.588	177.976	37.207	164.389	44.253	161.142	47.147	166.860
50.000	31.569	179.800	31.619	177.346	35.083	160.051	43.847	156.680	47.627	163.414
55.000	27.939	179.732	28.008	176.500	32.597	154.712	43.280	151.696	48.127	159.476
55.500	27.534	179.724	27.605	176.398	32.327	154.108	43.212	151.166	48.177	159.055
55.750	27.328	179.720	27.400	176.346	32.190	153.800	43.177	150.898	48.202	158.842
56.000	27.120	179.715	27.193	176.293	32.052	153.488	43.142	150.629	48.227	158.628
56.250	26.909	179.711	26.984	176.238	31.914	153.173	43.106	150.359	48.252	158.413
56.400	26.782	179.708	26.858	176.205	31.830	152.981	43.084	150.196	48.267	158.283
56.500	26.697	179.706	26.773	176.182	31.774	152.853	43.070	150.087	48.277	158.197
56.550	26.654	179.705	26.730	176.171	31.746	152.788	43.063	150.032	48.282	158.153
56.600	26.611	179.705	26.688	176.160	31.718	152.724	43.055	149.977	48.287	158.110
56.650	26.568	179.704	26.645	176.148	31.690	152.659	43.048	149.923	48.292	158.066
56.750	26.482	179.702	26.560	176.126	31.633	152.529	43.033	149.813	48.301	157.979
57.000	26.265	179.697	26.344	176.068	31.492	152.201	42.995	149.538	48.326	157.760
57.250	26.046	179.692	26.126	176.008	31.349	151.868	42.957	149.261	48.350	157.540
57.500	25.824	179.687	25.905	175.948	31.205	151.532	42.918	148.982	48.375	157.318
57.750	25.600	179.682	25.683	175.886	31.060	151.190	42.879	148.702	48.399	157.095
58.000	25.373	179.677	25.457	175.822	30.914	150.844	42.839	148.419	48.423	156.871
58.500	24.912	179.667	25.000	175.691	30.620	150.137	42.757	147.850	48.471	156.419
59.000	24.441	179.655	24.532	175.554	30.321	149.410	42.672	147.273	48.519	155.961
59.500	23.960	179.644	24.054	175.409	30.017	148.662	42.584	146.688	48.566	155.499
60.000	23.467	179.631	23.565	175.257	29.710	147.891	42.494	146.096	48.612	155.031
60.500	22.964	179.618	23.065	175.097	29.399	147.097	42.400	145.496	48.657	154.558
61.000	22.449	179.605	22.554	174.928	29.083	146.277	42.303	144.888	48.701	154.079
62.000	21.382	179.575	21.497	174.558	28.440	144.557	42.100	143.644	48.786	153.107
63.000	20.265	179.541	20.390	174.138	27.781	142.717	41.883	142.363	48.866	152.112
64.000	19.094	179.502	19.230	173.657	27.108	140.742	41.651	141.041	48.940	151.096
65.000	17.864	179.457	18.013	173.097	26.422	138.615	41.403	139.673	49.006	150.057
66.000	16.573	179.404	16.737	172.433	25.725	136.313	41.138	138.255	49.063	148.995
67.000	15.215	179.341	15.398	171.633	25.019	133.813	40.854	136.781	49.108	147.908
68.500	13.044	179.215	13.264	170.052	23.955	129.629	40.390	134.451	49.150	146.228
70.000	10.696	179.029	10.969	167.707	22.903	124.818	39.874	131.949	49.154	144.482
71.500	8.153	178.718	8.512	163.823	21.893	119.246	39.303	129.239	49.106	142.659
73.000	5.394	178.065	5.924	156.123	20.973	112.761	38.669	126.270	48.994	140.741
75.000	1.350	172.410	2.774	119.518	20.008	102.456	37.722	121.790	48.711	137.989
77.000	3.192	3.043	3.967	37.278	19.564	90.134	36.656	116.503	48.221	134.913
79.000	8.235	1.069	8.532	16.028	19.946	76.159	35.500	110.076	47.446	131.322
81.000	13.834	0.533	13.984	9.312	21.465	61.578	34.344	102.027	46.290	126.862
82.000	16.845	0.379	16.954	7.440	22.723	54.494	33.830	97.203	45.539	124.119
83.000	19.994	0.261	20.073	6.038	24.330	47.750	33.418	91.732	44.663	120.874
85.000	26.683	0.079	26.720	4.051	28.585	35.632	33.209	78.601	42.597	112.121
87.000	33.811	359.932	33.826	2.670	34.131	25.490	34.558	62.707	40.658	98.534
89.000	41.235	359.798	41.238	1.612	40.751	17.131	38.431	45.586	40.853	78.361
89.500	43.115	359.764	43.117	1.380	42.538	15.279	39.860	41.418	41.631	72.522

3.3.1.3. Плёнки с оптической плотностью n = 3

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 3 $d_{film's}$ = 0.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.551	179.874	34.554	179.327	34.912	174.554	37.624	165.943	43.821	162.638
50.000	31.569	179.833	31.574	179.114	32.051	172.860	35.606	161.898	43.512	158.038
55.000	27.938	179.777	27.945	178.824	28.590	170.569	33.246	156.804	43.174	152.690
55.500	27.533	179.770	27.540	178.788	28.205	170.293	32.990	156.220	43.139	152.110
55.750	27.327	179.767	27.334	178.770	28.009	170.150	32.861	155.922	43.122	151.817
56.000	27.119	179.764	27.126	178.752	27.812	170.005	32.731	155.619	43.104	151.521
56.250	26.909	179.760	26.916	178.733	27.613	169.857	32.599	155.313	43.086	151.224
56.400	26.781	179.758	26.789	178.721	27.493	169.767	32.520	155.127	43.076	151.044
56.500	26.696	179.756	26.704	178.713	27.412	169.706	32.467	155.002	43.069	150.924
56.550	26.653	179.756	26.661	178.709	27.371	169.675	32.441	154.939	43.065	150.864
56.600	26.610	179.755	26.618	178.705	27.331	169.644	32.414	154.877	43.062	150.804
56.650	26.567	179.754	26.575	178.701	27.290	169.613	32.388	154.814	43.058	150.743
56.750	26.481	179.753	26.489	178.693	27.209	169.551	32.334	154.687	43.051	150.622
57.000	26.264	179.749	26.272	178.673	27.003	169.394	32.200	154.367	43.033	150.318
57.250	26.045	179.745	26.053	178.652	26.796	169.232	32.065	154.043	43.016	150.011
57.500	25.823	179.741	25.831	178.631	26.587	169.068	31.929	153.714	42.998	149.703
57.750	25.599	179.737	25.607	178.609	26.375	168.899	31.793	153.380	42.980	149.392
58.000	25.372	179.733	25.381	178.587	26.161	168.727	31.655	153.041	42.962	149.078
58.500	24.911	179.724	24.920	178.541	25.727	168.371	31.377	152.348	42.927	148.445
59.000	24.440	179.715	24.450	178.493	25.284	167.998	31.095	151.633	42.891	147.801
59.500	23.959	179.706	23.968	178.442	24.832	167.606	30.810	150.896	42.855	147.149
60.000	23.466	179.696	23.476	178.388	24.371	167.194	30.521	150.135	42.819	146.486
60.500	22.963	179.686	22.973	178.331	23.900	166.760	30.229	149.350	42.783	145.814
61.000	22.448	179.675	22.459	178.271	23.420	166.303	29.933	148.538	42.747	145.131
62.000	21.381	179.651	21.393	178.139	22.428	165.306	29.332	146.830	42.675	143.735
63.000	20.264	179.624	20.277	177.989	21.396	164.183	28.718	144.999	42.603	142.296
64.000	19.093	179.594	19.107	177.817	20.320	162.904	28.094	143.029	42.531	140.812
65.000	17.863	179.559	17.879	177.615	19.201	161.432	27.462	140.906	42.458	139.283
66.000	16.572	179.517	16.589	177.374	18.038	159.718	26.823	138.609	42.385	137.704
67.000	15.214	179.467	15.234	177.083	16.831	157.691	26.182	136.119	42.312	136.075
68.500	13.043	179.370	13.067	176.503	14.946	153.846	25.227	131.965	42.200	133.528
70.000	10.695	179.227	10.725	175.632	12.992	148.557	24.297	127.228	42.084	130.848
71.500	8.151	178.987	8.193	174.155	11.027	140.903	23.425	121.805	41.962	128.018
73.000	5.392	178.488	5.457	171.053	9.189	129.269	22.654	115.590	41.830	125.017
75.000	1.345	174.163	1.591	147.225	7.507	103.781	21.890	105.921	41.629	120.697
77.000	3.191	2.272	3.303	15.155	7.892	69.880	21.605	94.628	41.385	115.912
79.000	8.235	0.765	8.278	5.907	10.744	43.889	22.042	81.971	41.080	110.486
81.000	13.834	0.352	13.859	3.396	15.238	28.938	23.450	68.628	40.703	104.125
82.000	16.845	0.233	16.865	2.707	17.897	24.004	24.584	61.983	40.494	100.449
83.000	19.994	0.140	20.010	2.189	20.775	20.112	26.028	55.499	40.285	96.328
85.000	26.682	359.995	26.693	1.445	27.079	14.340	29.879	43.322	39.999	86.280
87.000	33.810	359.877	33.818	0.911	33.974	10.176	35.004	32.432	40.412	72.892
89.000	41.234	359.765	41.239	0.479	41.276	6.896	41.312	22.811	42.870	55.670
89.500	43.114	359.737	43.119	0.380	43.141	6.163	43.053	20.583	44.030	50.951

3.3.1.4. Плёнки с оптической плотностью n = 5

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 5 $d_{film's}$ = 0.3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.552	180.145	34.550	179.867	34.618	177.375	35.471	171.486	39.904	162.912
50.000	31.571	180.194	31.568	179.825	31.660	176.521	32.805	168.789	38.593	158.051
55.000	27.941	180.262	27.937	179.767	28.067	175.339	29.619	165.157	37.139	152.112
55.500	27.536	180.270	27.532	179.760	27.666	175.194	29.268	164.721	36.987	151.447
55.750	27.330	180.274	27.326	179.756	27.462	175.119	29.090	164.497	36.910	151.109
56.000	27.122	180.279	27.118	179.753	27.257	175.043	28.911	164.269	36.834	150.768
56.250	26.911	180.283	26.907	179.749	27.049	174.964	28.730	164.036	36.757	150.423
56.400	26.784	180.286	26.780	179.747	26.923	174.917	28.621	163.894	36.711	150.214
56.500	26.699	180.288	26.695	179.745	26.839	174.885	28.547	163.799	36.680	150.074
56.550	26.656	180.289	26.652	179.744	26.797	174.869	28.511	163.751	36.665	150.003
56.600	26.613	180.290	26.609	179.743	26.754	174.852	28.474	163.702	36.649	149.933
56.650	26.570	180.291	26.566	179.743	26.712	174.836	28.437	163.654	36.634	149.862
56.750	26.484	180.293	26.480	179.741	26.627	174.803	28.363	163.557	36.603	149.721
57.000	26.267	180.298	26.263	179.737	26.413	174.720	28.178	163.310	36.526	149.364
57.250	26.048	180.302	26.043	179.733	26.196	174.634	27.990	163.058	36.449	149.003
57.500	25.826	180.308	25.822	179.728	25.977	174.547	27.801	162.801	36.371	148.639
57.750	25.602	180.313	25.597	179.724	25.756	174.457	27.610	162.539	36.293	148.270
58.000	25.375	180.318	25.371	179.720	25.532	174.365	27.418	162.271	36.215	147.897
58.500	24.914	180.329	24.910	179.710	25.078	174.175	27.028	161.719	36.059	147.139
59.000	24.443	180.341	24.439	179.700	24.613	173.974	26.632	161.141	35.903	146.364
59.500	23.962	180.353	23.957	179.690	24.139	173.763	26.229	160.538	35.747	145.571
60.000	23.470	180.366	23.465	179.679	23.654	173.540	25.819	159.907	35.590	144.759
60.500	22.966	180.380	22.961	179.668	23.158	173.304	25.402	159.245	35.434	143.929
61.000	22.451	180.395	22.446	179.655	22.652	173.053	24.978	158.550	35.278	143.079
62.000	21.385	180.427	21.380	179.628	21.604	172.504	24.110	157.053	34.967	141.320
63.000	20.268	180.464	20.262	179.598	20.509	171.877	23.215	155.390	34.660	139.475
64.000	19.096	180.507	19.091	179.562	19.362	171.155	22.294	153.531	34.358	137.540
65.000	17.867	180.558	17.861	179.521	18.162	170.310	21.349	151.439	34.063	135.509
66.000	16.576	180.618	16.570	179.471	16.906	169.306	20.384	149.069	33.777	133.377
67.000	15.218	180.692	15.212	179.410	15.591	168.093	19.402	146.363	33.504	131.138
68.500	13.047	180.840	13.041	179.290	13.504	165.700	17.918	141.515	33.123	127.564
70.000	10.700	181.066	10.693	179.108	11.281	162.180	16.458	135.438	32.787	123.712
71.500	8.157	181.451	8.149	178.798	8.940	156.495	15.091	127.732	32.510	119.563
73.000	5.399	182.273	5.390	178.140	6.565	145.977	13.933	117.964	32.308	115.093
75.000	1.361	189.465	1.347	172.355	4.051	110.117	13.016	101.367	32.185	108.599
77.000	3.191	355.811	3.196	3.257	5.008	51.357	13.276	81.897	32.278	101.451
79.000	8.232	358.320	8.239	1.261	9.086	25.997	15.054	63.016	32.645	93.593
81.000	13.830	358.973	13.838	0.733	14.331	16.210	18.319	47.559	33.359	84.951
82.000	16.841	359.148	16.849	0.588	17.237	13.357	20.433	41.289	33.875	80.299
83.000	19.990	359.277	19.998	0.479	20.305	11.188	22.824	35.863	34.520	75.398
85.000	26.679	359.457	26.686	0.320	26.876	8.056	28.327	26.995	36.294	64.715
87.000	33.807	359.579	33.814	0.202	33.925	5.807	34.630	19.945	38.999	52.588
89.000	41.232	359.669	41.237	0.101	41.300	3.987	41.565	13.924	43.263	38.778
89.500	43.112	359.689	43.117	0.076	43.173	3.565	43.379	12.504	44.685	35.092

3.3.2. Плёнки толщиной d = 3 нм.

3.3.2.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 1.3 $d_{film's}$ = 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.553	178.981	34.673	176.314	39.152	159.519	46.543	162.234	48.729	168.892
50.000	31.573	178.644	31.735	175.113	37.646	154.032	46.643	158.222	49.590	165.965
55.000	27.945	178.181	28.170	173.481	35.942	147.602	46.611	153.850	50.506	162.644
55.500	27.540	178.124	27.772	173.284	35.760	146.900	46.598	153.392	50.599	162.291
55.750	27.334	178.095	27.571	173.182	35.669	146.544	46.591	153.162	50.646	162.113
56.000	27.126	178.065	27.367	173.079	35.577	146.186	46.583	152.931	50.693	161.934
56.250	26.916	178.035	27.161	172.973	35.484	145.824	46.575	152.699	50.739	161.754
56.400	26.789	178.016	27.036	172.908	35.429	145.606	46.570	152.559	50.767	161.646
56.500	26.704	178.004	26.953	172.865	35.392	145.460	46.566	152.465	50.786	161.574
56.550	26.661	177.998	26.911	172.843	35.373	145.386	46.564	152.419	50.795	161.537
56.600	26.618	177.991	26.869	172.821	35.354	145.313	46.562	152.372	50.804	161.501
56.650	26.575	177.985	26.827	172.799	35.336	145.240	46.561	152.325	50.814	161.465
56.750	26.489	177.972	26.743	172.755	35.298	145.092	46.557	152.231	50.832	161.392
57.000	26.272	177.940	26.530	172.642	35.204	144.721	46.547	151.996	50.879	161.209
57.250	26.053	177.907	26.316	172.527	35.110	144.347	46.536	151.759	50.925	161.026
57.500	25.832	177.873	26.099	172.410	35.015	143.970	46.525	151.522	50.972	160.842
57.750	25.608	177.838	25.879	172.290	34.920	143.590	46.513	151.283	51.018	160.656
58.000	25.381	177.803	25.658	172.167	34.824	143.206	46.501	151.044	51.064	160.470
58.500	24.921	177.729	25.208	171.913	34.631	142.428	46.474	150.562	51.157	160.095
59.000	24.451	177.652	24.748	171.647	34.436	141.636	46.444	150.075	51.249	159.717
59.500	23.970	177.570	24.279	171.367	34.239	140.829	46.412	149.583	51.340	159.335
60.000	23.478	177.485	23.799	171.073	34.040	140.008	46.377	149.087	51.431	158.949
60.500	22.975	177.394	23.309	170.763	33.839	139.171	46.339	148.586	51.521	158.561
61.000	22.461	177.298	22.808	170.436	33.636	138.318	46.297	148.080	51.610	158.169
62.000	21.396	177.088	21.773	169.723	33.225	136.561	46.205	147.051	51.786	157.375
63.000	20.281	176.850	20.691	168.917	32.806	134.731	46.097	145.999	51.956	156.569
64.000	19.112	176.575	19.561	167.996	32.381	132.822	45.974	144.922	52.120	155.751
65.000	17.886	176.255	18.379	166.930	31.949	130.827	45.834	143.816	52.276	154.921
66.000	16.598	175.876	17.143	165.679	31.512	128.735	45.674	142.679	52.422	154.079
67.000	15.245	175.417	15.852	164.182	31.069	126.538	45.494	141.506	52.557	153.226
68.500	13.083	174.507	13.811	161.278	30.399	123.016	45.180	139.670	52.730	151.924
70.000	10.750	173.147	11.649	157.108	29.727	119.180	44.806	137.720	52.862	150.593
71.500	8.233	170.858	9.398	150.601	29.063	114.969	44.362	135.631	52.939	149.228
73.000	5.528	166.118	7.165	139.268	28.422	110.309	43.837	133.363	52.945	147.820
75.000	1.873	134.471	4.915	106.290	27.648	103.247	42.990	129.970	52.807	145.844
77.000	3.477	22.408	5.655	56.210	27.054	95.000	41.944	125.984	52.437	143.682
79.000	8.361	8.835	9.396	29.349	26.797	85.351	40.671	121.118	51.741	141.185
81.000	13.913	4.952	14.479	17.733	27.119	74.211	39.168	114.912	50.582	138.054
82.000	16.909	3.864	17.338	14.245	27.598	68.133	38.350	111.089	49.776	136.083
83.000	20.047	3.036	20.372	11.570	28.353	61.796	37.519	106.626	48.787	133.689
85.000	26.717	1.818	26.902	7.690	30.876	48.746	36.047	95.170	46.203	126.845
87.000	33.829	0.903	33.933	4.924	34.992	35.990	35.616	79.414	43.092	114.996
89.000	41.236	0.119	41.304	2.749	40.784	24.352	37.850	59.740	41.515	94.580
89.500	43.112	359.932	43.176	2.262	42.472	21.677	39.031	54.580	41.930	88.120

3.3.2.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 1.5 $d_{film's}$ = 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.551	178.672	34.634	176.803	37.592	163.541	44.961	161.133	48.392	167.700
50.000	31.571	178.233	31.683	175.788	35.590	158.976	44.756	156.707	49.178	164.488
55.000	27.944	177.630	28.097	174.415	33.261	153.385	44.427	151.793	50.017	160.846
55.500	27.539	177.556	27.697	174.249	33.009	152.755	44.386	151.273	50.102	160.459
55.750	27.333	177.518	27.494	174.163	32.882	152.434	44.364	151.011	50.145	160.263
56.000	27.126	177.480	27.289	174.076	32.754	152.109	44.343	150.747	50.188	160.067
56.250	26.916	177.440	27.081	173.987	32.624	151.780	44.320	150.482	50.231	159.870
56.400	26.788	177.416	26.956	173.933	32.547	151.581	44.307	150.322	50.256	159.751
56.500	26.703	177.400	26.872	173.896	32.494	151.448	44.298	150.216	50.274	159.671
56.550	26.661	177.391	26.830	173.878	32.468	151.381	44.293	150.162	50.282	159.632
56.600	26.618	177.383	26.788	173.860	32.442	151.313	44.288	150.109	50.291	159.592
56.650	26.575	177.375	26.745	173.841	32.416	151.246	44.284	150.055	50.299	159.552
56.750	26.489	177.358	26.660	173.804	32.364	151.111	44.274	149.948	50.317	159.472
57.000	26.272	177.316	26.446	173.709	32.232	150.770	44.251	149.679	50.359	159.271
57.250	26.053	177.273	26.230	173.612	32.099	150.424	44.227	149.408	50.402	159.070
57.500	25.831	177.229	26.012	173.514	31.965	150.075	44.202	149.135	50.445	158.868
57.750	25.608	177.184	25.791	173.412	31.831	149.720	44.177	148.862	50.488	158.664
58.000	25.381	177.138	25.568	173.309	31.695	149.361	44.151	148.586	50.531	158.460
58.500	24.921	177.042	25.115	173.095	31.422	148.629	44.098	148.031	50.616	158.048
59.000	24.451	176.941	24.651	172.870	31.145	147.877	44.043	147.469	50.701	157.632
59.500	23.971	176.836	24.178	172.635	30.864	147.104	43.985	146.901	50.786	157.212
60.000	23.479	176.724	23.694	172.386	30.580	146.310	43.925	146.325	50.870	156.788
60.500	22.977	176.606	23.200	172.125	30.292	145.492	43.863	145.743	50.954	156.361
61.000	22.463	176.482	22.695	171.848	30.001	144.650	43.798	145.154	51.037	155.929
62.000	21.399	176.209	21.650	171.244	29.409	142.887	43.660	143.952	51.200	155.055
63.000	20.285	175.898	20.557	170.560	28.804	141.011	43.510	142.718	51.359	154.167
64.000	19.118	175.542	19.414	169.777	28.187	139.007	43.348	141.448	51.513	153.264
65.000	17.893	175.125	18.217	168.867	27.561	136.859	43.172	140.140	51.660	152.346
66.000	16.608	174.632	16.965	167.795	26.926	134.550	42.981	138.789	51.799	151.415
67.000	15.258	174.035	15.654	166.506	26.286	132.059	42.774	137.391	51.927	150.469
68.500	13.103	172.853	13.574	163.987	25.326	127.929	42.429	135.192	52.095	149.022
70.000	10.780	171.090	11.360	160.319	24.381	123.241	42.039	132.850	52.226	147.540
71.500	8.280	168.135	9.033	154.463	23.479	117.886	41.596	130.332	52.308	146.016
73.000	5.613	162.085	6.678	143.787	22.662	111.745	41.094	127.597	52.326	144.442
75.000	2.164	126.435	4.197	108.499	21.807	102.144	40.322	123.511	52.217	142.230
77.000	3.674	28.040	5.094	51.110	21.406	90.806	39.420	118.742	51.898	139.817
79.000	8.457	11.423	9.116	25.204	21.726	77.924	38.392	112.998	51.280	137.052
81.000	13.976	6.449	14.341	14.991	23.059	64.196	37.285	105.833	50.242	133.639
82.000	16.963	5.045	17.244	11.988	24.186	57.341	36.744	101.526	49.518	131.525
83.000	20.092	3.976	20.311	9.693	25.648	50.672	36.256	96.606	48.629	128.991
85.000	26.747	2.401	26.882	6.359	29.609	38.280	35.700	84.527	46.327	121.901
87.000	33.845	1.220	33.934	3.955	34.912	27.469	36.440	69.110	43.636	109.994
89.000	41.239	0.212	41.307	2.025	41.386	18.230	39.700	51.262	42.545	90.097
89.500	43.112	359.971	43.177	1.585	43.154	16.139	41.035	46.724	43.047	83.888

3.3.2.3. Плёнки с оптической плотностью n = 3

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 3 $d_{film's}$ = 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.522	178.971	34.525	178.423	34.881	173.588	37.734	164.635	45.015	160.863
50.000	31.533	178.632	31.538	177.911	32.024	171.578	35.782	160.219	45.034	155.887
55.000	27.896	178.166	27.905	177.209	28.578	168.858	33.527	154.678	45.089	150.186
55.500	27.490	178.109	27.500	177.123	28.196	168.529	33.285	154.044	45.097	149.574
55.750	27.284	178.080	27.294	177.079	28.002	168.360	33.163	153.721	45.101	149.266
56.000	27.076	178.050	27.086	177.034	27.806	168.188	33.040	153.393	45.106	148.955
56.250	26.865	178.019	26.876	176.988	27.608	168.012	32.916	153.061	45.111	148.642
56.400	26.738	178.001	26.748	176.960	27.489	167.904	32.841	152.860	45.113	148.454
56.500	26.652	177.988	26.663	176.941	27.409	167.832	32.791	152.725	45.115	148.327
56.550	26.609	177.982	26.620	176.932	27.368	167.796	32.766	152.657	45.116	148.264
56.600	26.567	177.976	26.577	176.922	27.328	167.759	32.741	152.589	45.117	148.201
56.650	26.524	177.969	26.534	176.913	27.288	167.723	32.716	152.520	45.118	148.138
56.750	26.437	177.956	26.448	176.893	27.207	167.649	32.666	152.383	45.121	148.011
57.000	26.220	177.924	26.231	176.844	27.004	167.462	32.540	152.038	45.126	147.692
57.250	26.000	177.891	26.012	176.794	26.798	167.270	32.413	151.687	45.131	147.372
57.500	25.778	177.857	25.790	176.743	26.590	167.075	32.286	151.331	45.137	147.049
57.750	25.554	177.822	25.566	176.690	26.381	166.875	32.158	150.971	45.143	146.725
58.000	25.327	177.786	25.339	176.636	26.169	166.671	32.029	150.605	45.149	146.398
58.500	24.865	177.712	24.879	176.525	25.740	166.249	31.769	149.857	45.161	145.739
59.000	24.394	177.634	24.408	176.407	25.302	165.807	31.507	149.087	45.175	145.073
59.500	23.912	177.553	23.927	176.284	24.855	165.342	31.242	148.294	45.189	144.398
60.000	23.419	177.467	23.436	176.154	24.400	164.855	30.974	147.477	45.204	143.714
60.500	22.915	177.376	22.933	176.016	23.935	164.341	30.704	146.634	45.220	143.023
61.000	22.400	177.279	22.418	175.871	23.462	163.800	30.432	145.765	45.236	142.324
62.000	21.333	177.069	21.354	175.552	22.486	162.623	29.881	143.940	45.273	140.900
63.000	20.216	176.829	20.240	175.189	21.473	161.299	29.324	141.992	45.313	139.443
64.000	19.045	176.554	19.072	174.771	20.420	159.795	28.762	139.907	45.357	137.952
65.000	17.816	176.232	17.848	174.282	19.329	158.071	28.198	137.670	45.405	136.426
66.000	16.526	175.851	16.564	173.703	18.200	156.070	27.635	135.265	45.456	134.865
67.000	15.171	175.389	15.215	173.000	17.035	153.720	27.076	132.675	45.511	133.268
68.500	13.007	174.473	13.064	171.606	15.232	149.306	26.260	128.400	45.600	130.802
70.000	10.671	173.101	10.750	169.522	13.394	143.348	25.490	123.592	45.694	128.247
71.500	8.152	170.784	8.266	166.024	11.595	134.997	24.795	118.180	45.790	125.595
73.000	5.447	165.949	5.635	158.893	9.989	122.968	24.219	112.094	45.885	122.833
75.000	1.811	132.734	2.379	120.260	8.686	99.144	23.726	102.854	45.995	118.948
77.000	3.550	21.769	3.912	31.658	9.248	70.095	23.700	92.343	46.068	114.761
79.000	8.435	8.672	8.613	13.515	11.962	46.728	24.334	80.787	46.071	110.140
81.000	13.980	4.865	14.100	7.827	16.256	31.842	25.827	68.653	45.969	104.847
82.000	16.972	3.792	17.075	6.215	18.827	26.630	26.952	62.555	45.869	101.822
83.000	20.103	2.975	20.195	4.990	21.624	22.406	28.352	56.533	45.738	98.441
85.000	26.756	1.768	26.830	3.201	27.791	15.955	32.024	44.937	45.442	90.122
87.000	33.847	0.861	33.909	1.884	34.565	11.145	36.891	34.141	45.472	78.570
89.000	41.231	0.084	41.284	0.789	41.761	7.244	42.923	24.180	47.117	62.414
89.500	43.101	359.898	43.153	0.532	43.601	6.355	44.601	21.809	48.057	57.695

3.3.2.4. Плёнки с оптической плотностью n = 5

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 5 $d_{film's}$ = 3

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.705	181.628	34.673	181.368	34.459	178.943	34.597	172.406	38.811	158.494
50.000	31.767	182.165	31.725	181.821	31.454	178.604	31.687	169.938	37.342	152.341
55.000	28.189	182.901	28.136	182.442	27.797	178.125	28.206	166.531	35.836	144.827
55.500	27.790	182.991	27.735	182.517	27.389	178.066	27.823	166.115	35.688	143.988
55.750	27.587	183.037	27.531	182.556	27.182	178.035	27.629	165.900	35.615	143.562
56.000	27.382	183.085	27.326	182.596	26.972	178.004	27.433	165.681	35.542	143.131
56.250	27.174	183.133	27.118	182.637	26.761	177.971	27.235	165.457	35.470	142.696
56.400	27.049	183.162	26.992	182.661	26.633	177.952	27.116	165.321	35.427	142.433
56.500	26.965	183.182	26.908	182.678	26.547	177.938	27.036	165.229	35.398	142.257
56.550	26.923	183.192	26.865	182.687	26.504	177.932	26.995	165.182	35.383	142.168
56.600	26.880	183.202	26.823	182.695	26.460	177.925	26.955	165.136	35.369	142.080
56.650	26.838	183.212	26.780	182.703	26.417	177.918	26.915	165.089	35.355	141.991
56.750	26.753	183.233	26.695	182.720	26.330	177.904	26.834	164.995	35.326	141.813
57.000	26.539	183.284	26.480	182.764	26.112	177.870	26.631	164.756	35.255	141.364
57.250	26.323	183.337	26.264	182.808	25.891	177.834	26.426	164.512	35.184	140.911
57.500	26.104	183.390	26.044	182.853	25.668	177.798	26.220	164.262	35.114	140.453
57.750	25.883	183.445	25.822	182.900	25.442	177.760	26.011	164.006	35.045	139.990
58.000	25.660	183.502	25.598	182.947	25.214	177.722	25.801	163.744	34.976	139.523
58.500	25.206	183.618	25.143	183.045	24.750	177.642	25.375	163.202	34.840	138.574
59.000	24.742	183.741	24.677	183.149	24.276	177.557	24.942	162.632	34.707	137.605
59.500	24.267	183.870	24.201	183.257	23.792	177.468	24.501	162.034	34.578	136.616
60.000	23.782	184.006	23.714	183.371	23.297	177.373	24.053	161.403	34.452	135.606
60.500	23.286	184.149	23.216	183.492	22.790	177.272	23.597	160.739	34.329	134.576
61.000	22.778	184.301	22.706	183.620	22.272	177.164	23.133	160.036	34.212	133.525
62.000	21.728	184.633	21.652	183.899	21.200	176.926	22.185	158.506	33.990	131.359
63.000	20.627	185.010	20.547	184.216	20.077	176.651	21.207	156.781	33.790	129.106
64.000	19.473	185.443	19.388	184.580	18.900	176.330	20.202	154.821	33.615	126.764
65.000	18.263	185.947	18.173	185.003	17.666	175.949	19.172	152.573	33.468	124.333
66.000	16.993	186.542	16.896	185.504	16.370	175.490	18.123	149.974	33.355	121.811
67.000	15.658	187.260	15.555	186.108	15.010	174.925	17.060	146.939	33.278	119.201
68.500	13.528	188.672	13.413	187.298	12.838	173.780	15.469	141.329	33.241	115.120
70.000	11.234	190.752	11.103	189.057	10.498	172.018	13.937	134.011	33.310	110.851
71.500	8.769	194.159	8.614	191.962	7.981	168.963	12.573	124.375	33.501	106.407
73.000	6.151	200.811	5.954	197.742	5.302	162.414	11.555	111.880	33.828	101.805
75.000	2.798	232.525	2.448	228.582	1.965	119.733	11.162	91.157	34.495	95.457
77.000	3.597	321.766	3.439	327.853	4.013	26.934	12.329	69.562	35.449	88.909
79.000	8.183	344.472	8.170	347.372	8.862	12.611	15.096	51.841	36.703	82.179
81.000	13.671	351.176	13.702	352.916	14.416	8.197	19.154	39.064	38.264	75.237
82.000	16.662	353.028	16.705	354.447	17.417	6.977	21.566	34.157	39.161	71.650
83.000	19.805	354.423	19.855	355.602	20.559	6.073	24.191	29.989	40.140	67.951
85.000	26.507	356.440	26.567	357.281	27.233	4.816	29.990	23.260	42.373	60.026
87.000	33.677	357.916	33.738	358.519	34.340	3.968	36.385	17.917	45.118	50.912
89.000	41.160	359.145	41.215	359.559	41.732	3.327	43.230	13.296	48.859	39.810
89.500	43.056	359.434	43.110	359.805	43.603	3.185	44.995	12.191	50.063	36.645

3.3.3. Плёнки толщиной d = 30 нм.

3.3.3.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 1.3 $d_{film's}$ = 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.792	170.164	35.442	167.784	43.032	155.242	54.013	165.877	61.015	187.171
50.000	31.952	166.934	32.813	163.847	42.690	148.681	56.141	163.045	64.496	188.571
55.000	28.569	162.554	29.711	158.608	42.411	141.159	58.477	160.207	68.057	190.020
55.500	28.198	162.027	29.373	157.986	42.388	140.352	58.722	159.928	68.411	190.168
55.750	28.010	161.755	29.202	157.667	42.378	139.945	58.845	159.789	68.588	190.242
56.000	27.820	161.479	29.029	157.342	42.367	139.535	58.969	159.651	68.764	190.317
56.250	27.628	161.197	28.855	157.011	42.357	139.122	59.093	159.513	68.940	190.391
56.400	27.513	161.025	28.750	156.810	42.351	138.873	59.168	159.430	69.046	190.436
56.500	27.435	160.909	28.680	156.674	42.347	138.707	59.218	159.375	69.116	190.466
56.550	27.397	160.851	28.645	156.606	42.346	138.624	59.243	159.348	69.151	190.480
56.600	27.358	160.793	28.610	156.538	42.344	138.540	59.268	159.320	69.186	190.495
56.650	27.319	160.734	28.575	156.469	42.342	138.457	59.293	159.293	69.221	190.510
56.750	27.241	160.616	28.504	156.332	42.338	138.289	59.343	159.238	69.291	190.540
57.000	27.044	160.317	28.326	155.983	42.329	137.869	59.469	159.101	69.466	190.615
57.250	26.846	160.012	28.147	155.627	42.320	137.446	59.595	158.965	69.641	190.691
57.500	26.647	159.700	27.967	155.265	42.312	137.020	59.722	158.830	69.815	190.766
57.750	26.445	159.382	27.785	154.896	42.304	136.592	59.850	158.695	69.989	190.842
58.000	26.242	159.057	27.602	154.520	42.297	136.161	59.978	158.561	70.162	190.917
58.500	25.831	158.385	27.232	153.745	42.283	135.291	60.235	158.294	70.507	191.070
59.000	25.414	157.683	26.857	152.939	42.271	134.410	60.495	158.030	70.849	191.223
59.500	24.989	156.949	26.477	152.101	42.261	133.518	60.757	157.770	71.189	191.378
60.000	24.558	156.180	26.092	151.227	42.253	132.615	61.021	157.512	71.527	191.534
60.500	24.121	155.374	25.701	150.315	42.247	131.701	61.287	157.258	71.861	191.692
61.000	23.676	154.526	25.307	149.363	42.243	130.775	61.556	157.008	72.192	191.851
62.000	22.769	152.696	24.504	147.327	42.241	128.890	62.100	156.521	72.844	192.176
63.000	21.836	150.659	23.685	145.092	42.248	126.956	62.654	156.053	73.481	192.510
64.000	20.882	148.376	22.854	142.629	42.266	124.972	63.218	155.607	74.100	192.857
65.000	19.909	145.799	22.014	139.901	42.294	122.936	63.792	155.186	74.700	193.218
66.000	18.923	142.870	21.171	136.867	42.334	120.845	64.377	154.794	75.279	193.599
67.000	17.932	139.515	20.334	133.477	42.386	118.695	64.975	154.436	75.835	194.004
68.500	16.463	133.484	19.114	127.602	42.491	115.353	65.895	153.973	76.620	194.671
70.000	15.072	125.914	17.985	120.592	42.630	111.852	66.848	153.619	77.338	195.433
71.500	13.860	116.383	17.024	112.247	42.807	108.172	67.839	153.401	77.982	196.326
73.000	12.977	104.579	16.336	102.453	43.028	104.284	68.874	153.357	78.539	197.397
75.000	12.651	85.720	16.067	87.368	43.402	98.709	70.338	153.666	79.124	199.210
77.000	13.666	65.852	16.814	71.098	43.887	92.578	71.922	154.585	79.485	201.641
79.000	16.115	48.417	18.749	55.455	44.516	85.724	73.661	156.481	79.550	204.933
81.000	19.791	34.748	21.850	41.759	45.342	77.913	75.598	160.094	79.185	209.371
82.000	22.002	29.178	23.795	35.766	45.854	73.553	76.649	163.002	78.769	212.115
83.000	24.419	24.279	25.972	30.304	46.450	68.824	77.749	167.111	78.127	215.262
85.000	29.764	15.995	30.924	20.717	47.976	58.015	79.930	181.820	75.767	222.927
87.000	35.622	9.049	36.505	12.435	50.129	44.907	80.876	212.646	70.385	232.888
89.000	41.792	2.814	42.503	4.908	53.182	28.774	76.662	250.914	55.344	247.672
89.500	43.359	1.307	44.041	3.085	54.116	24.172	74.277	257.862	47.562	253.766

3.3.3.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 1.5 $d_{film's}$ = 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.656	166.959	35.182	165.277	41.153	155.290	52.611	160.706	62.153	185.504
50.000	31.840	162.712	32.537	160.583	40.309	148.598	54.509	156.405	65.820	186.417
55.000	28.544	156.993	29.467	154.362	39.460	140.710	56.649	151.797	69.533	187.238
55.500	28.186	156.308	29.137	153.625	39.377	139.847	56.877	151.322	69.900	187.313
55.750	28.006	155.956	28.970	153.247	39.336	139.410	56.992	151.083	70.083	187.349
56.000	27.824	155.598	28.802	152.863	39.295	138.969	57.107	150.844	70.266	187.386
56.250	27.641	155.233	28.633	152.472	39.255	138.525	57.224	150.604	70.448	187.422
56.400	27.531	155.010	28.531	152.234	39.231	138.256	57.294	150.460	70.557	187.444
56.500	27.457	154.861	28.463	152.075	39.214	138.077	57.341	150.364	70.629	187.458
56.550	27.420	154.785	28.428	151.994	39.206	137.986	57.364	150.315	70.666	187.465
56.600	27.383	154.710	28.394	151.914	39.198	137.896	57.388	150.267	70.702	187.472
56.650	27.346	154.634	28.360	151.833	39.190	137.806	57.411	150.219	70.738	187.479
56.750	27.271	154.482	28.292	151.670	39.174	137.624	57.458	150.123	70.810	187.493
57.000	27.085	154.095	28.119	151.258	39.135	137.169	57.577	149.881	70.991	187.528
57.250	26.897	153.701	27.946	150.839	39.095	136.709	57.696	149.639	71.171	187.563
57.500	26.708	153.300	27.772	150.411	39.056	136.245	57.815	149.397	71.350	187.597
57.750	26.517	152.890	27.597	149.977	39.017	135.778	57.936	149.153	71.529	187.631
58.000	26.326	152.472	27.421	149.534	38.978	135.306	58.057	148.910	71.707	187.664
58.500	25.939	151.610	27.067	148.622	38.902	134.351	58.301	148.421	72.062	187.730
59.000	25.548	150.711	26.709	147.676	38.827	133.379	58.548	147.930	72.413	187.794
59.500	25.153	149.774	26.347	146.692	38.754	132.390	58.798	147.437	72.762	187.856
60.000	24.753	148.795	25.983	145.669	38.683	131.384	59.051	146.942	73.107	187.917
60.500	24.350	147.772	25.616	144.603	38.613	130.360	59.307	146.445	73.449	187.977
61.000	23.943	146.701	25.246	143.493	38.546	129.319	59.567	145.946	73.787	188.035
62.000	23.120	144.403	24.501	141.127	38.419	127.179	60.094	144.944	74.451	188.147
63.000	22.287	141.870	23.751	138.547	38.302	124.961	60.635	143.934	75.097	188.256
64.000	21.450	139.067	23.001	135.723	38.197	122.662	61.189	142.918	75.724	188.363
65.000	20.616	135.953	22.258	132.623	38.106	120.277	61.757	141.895	76.330	188.470
66.000	19.792	132.479	21.530	129.214	38.031	117.801	62.341	140.867	76.912	188.581
67.000	18.990	128.592	20.826	125.457	37.975	115.230	62.940	139.832	77.469	188.700
68.500	17.862	121.864	19.845	119.085	37.930	111.183	63.873	138.268	78.253	188.910
70.000	16.885	113.898	19.006	111.729	37.941	106.890	64.848	136.687	78.968	189.182
71.500	16.151	104.581	18.382	103.326	38.019	102.329	65.874	135.089	79.606	189.559
73.000	15.770	93.979	18.058	93.922	38.178	97.475	66.958	133.467	80.158	190.098
75.000	16.007	78.497	18.255	80.222	38.540	90.502	68.512	131.254	80.741	191.206
77.000	17.272	62.910	19.331	66.093	39.117	82.886	70.224	128.950	81.114	192.991
79.000	19.598	48.721	21.367	52.618	39.959	74.541	72.151	126.491	81.217	195.769
81.000	22.880	36.607	24.329	40.501	41.131	65.364	74.383	123.743	80.938	199.903
82.000	24.828	31.315	26.123	35.018	41.862	60.426	75.656	122.179	80.593	202.589
83.000	26.952	26.466	28.103	29.899	42.702	55.230	77.069	120.401	80.051	205.739
85.000	31.639	17.848	32.541	20.600	44.749	43.980	80.481	115.548	78.022	213.536
87.000	36.769	10.256	37.478	12.241	47.330	31.407	85.105	103.918	73.333	223.498
89.000	42.168	3.245	42.735	4.430	50.463	17.231	87.053	326.473	59.839	236.796
89.500	43.539	1.537	44.076	2.518	51.326	13.396	84.759	311.489	52.504	241.515

3.3.3.3. Плёнки с оптической плотностью n = 3

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 3 $d_{film's}$ = 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	31.583	171.482	31.523	170.832	31.125	164.260	32.792	139.232	72.038	232.290
50.000	27.912	168.436	27.850	167.554	27.539	158.656	31.055	126.840	75.839	248.386
55.000	23.601	164.002	23.551	162.784	23.527	150.584	30.125	112.019	78.706	268.437
55.500	23.132	163.441	23.085	162.180	23.108	149.575	30.097	110.417	78.934	270.643
55.750	22.896	163.150	22.849	161.867	22.898	149.053	30.088	109.609	79.044	271.758
56.000	22.657	162.851	22.612	161.546	22.687	148.519	30.083	108.796	79.152	272.880
56.250	22.417	162.545	22.373	161.216	22.476	147.972	30.081	107.979	79.256	274.009
56.400	22.272	162.358	22.229	161.014	22.349	147.638	30.081	107.487	79.318	274.689
56.500	22.175	162.231	22.133	160.878	22.265	147.413	30.083	107.158	79.359	275.144
56.550	22.126	162.167	22.084	160.809	22.222	147.299	30.083	106.993	79.379	275.372
56.600	22.077	162.103	22.036	160.740	22.180	147.185	30.084	106.828	79.399	275.600
56.650	22.029	162.038	21.988	160.671	22.138	147.071	30.085	106.663	79.419	275.829
56.750	21.931	161.908	21.891	160.531	22.053	146.840	30.088	106.332	79.458	276.286
57.000	21.685	161.577	21.647	160.175	21.841	146.253	30.097	105.503	79.555	277.434
57.250	21.438	161.236	21.402	159.809	21.629	145.652	30.111	104.670	79.650	278.587
57.500	21.190	160.886	21.155	159.432	21.416	145.037	30.128	103.833	79.741	279.746
57.750	20.939	160.526	20.907	159.046	21.204	144.405	30.149	102.993	79.831	280.910
58.000	20.687	160.155	20.657	158.648	20.992	143.758	30.174	102.150	79.918	282.078
58.500	20.178	159.381	20.153	157.816	20.568	142.415	30.236	100.455	80.084	284.427
59.000	19.662	158.559	19.643	156.933	20.146	141.001	30.315	98.748	80.241	286.790
59.500	19.140	157.684	19.127	155.994	19.726	139.511	30.411	97.033	80.389	289.163
60.000	18.612	156.751	18.606	154.993	19.310	137.941	30.525	95.310	80.529	291.544
60.500	18.079	155.753	18.080	153.924	18.898	136.285	30.656	93.581	80.660	293.929
61.000	17.540	154.684	17.550	152.779	18.492	134.538	30.805	91.847	80.783	296.316
62.000	16.449	152.297	16.479	150.228	17.703	130.744	31.158	88.373	81.007	301.084
63.000	15.345	149.511	15.400	147.258	16.957	126.511	31.585	84.900	81.206	305.826
64.000	14.236	146.219	14.322	143.764	16.269	121.793	32.086	81.441	81.384	310.528
65.000	13.133	142.282	13.258	139.608	15.660	116.555	32.663	78.005	81.545	315.177
66.000	12.056	137.518	12.229	134.619	15.152	110.781	33.313	74.604	81.694	319.768
67.000	11.031	131.694	11.263	128.589	14.770	104.486	34.037	71.244	81.834	324.300
68.500	9.681	120.386	10.024	117.116	14.490	94.217	35.256	66.295	82.038	331.002
70.000	8.740	105.390	9.213	102.385	14.629	83.343	36.628	61.468	82.246	337.629
71.500	8.465	87.286	9.058	85.193	15.237	72.459	38.143	56.764	82.469	344.254
73.000	9.042	68.806	9.704	67.963	16.321	62.150	39.787	52.177	82.716	350.985
75.000	11.070	48.543	11.739	48.899	18.454	49.937	42.158	46.214	83.095	0.400
77.000	14.155	34.527	14.784	35.323	21.261	39.683	44.697	40.364	83.538	10.848
79.000	17.942	24.987	18.520	25.824	24.610	31.164	47.360	34.532	84.037	23.283
81.000	22.223	18.163	22.749	18.891	28.386	23.988	50.096	28.582	84.534	39.394
82.000	24.508	15.405	25.009	16.057	30.402	20.782	51.471	25.508	84.732	49.649
83.000	26.874	12.954	27.350	13.523	32.489	17.772	52.839	22.329	84.835	61.877
85.000	31.808	8.711	32.231	9.108	36.828	12.185	55.502	15.513	84.358	92.359
87.000	36.945	5.039	37.313	5.256	41.317	6.949	57.957	7.761	81.714	124.734
89.000	42.207	1.668	42.516	1.700	45.867	1.812	59.997	358.541	72.877	149.537
89.500	43.532	0.848	43.825	0.832	47.003	0.514	60.404	355.926	68.007	153.901

3.3.3.4. Плёнки с оптической плотностью n = 5

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 5 $d_{film's}$ = 30

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	38.592	180.623	38.612	180.615	38.842	180.686	39.953	182.320	47.966	195.903
50.000	36.743	180.838	36.769	180.827	37.064	180.918	38.494	183.019	48.937	200.069
55.000	34.457	181.122	34.490	181.108	34.864	181.225	36.687	183.911	50.208	204.927
55.500	34.199	181.155	34.233	181.141	34.615	181.261	36.482	184.015	50.356	205.455
55.750	34.067	181.172	34.102	181.158	34.489	181.280	36.378	184.067	50.432	205.723
56.000	33.934	181.190	33.969	181.175	34.361	181.299	36.273	184.121	50.509	205.992
56.250	33.800	181.207	33.835	181.193	34.231	181.318	36.166	184.175	50.587	206.263
56.400	33.718	181.218	33.754	181.203	34.153	181.330	36.101	184.208	50.634	206.427
56.500	33.663	181.225	33.699	181.210	34.100	181.338	36.058	184.230	50.666	206.537
56.550	33.636	181.229	33.672	181.214	34.074	181.342	36.036	184.241	50.682	206.592
56.600	33.609	181.233	33.645	181.218	34.047	181.346	36.015	184.253	50.698	206.647
56.650	33.581	181.236	33.617	181.221	34.020	181.350	35.993	184.264	50.714	206.702
56.750	33.526	181.244	33.562	181.228	33.967	181.358	35.949	184.286	50.747	206.812
57.000	33.386	181.262	33.423	181.247	33.833	181.378	35.838	184.343	50.828	207.090
57.250	33.245	181.281	33.282	181.266	33.697	181.399	35.726	184.401	50.911	207.370
57.500	33.102	181.300	33.140	181.285	33.559	181.420	35.612	184.460	50.995	207.652
57.750	32.957	181.320	32.995	181.304	33.419	181.441	35.497	184.519	51.081	207.936
58.000	32.811	181.340	32.849	181.324	33.278	181.463	35.381	184.580	51.168	208.223
58.500	32.512	181.381	32.551	181.364	32.990	181.507	35.144	184.704	51.346	208.802
59.000	32.206	181.423	32.246	181.406	32.695	181.554	34.900	184.832	51.529	209.391
59.500	31.891	181.467	31.932	181.450	32.392	181.602	34.650	184.965	51.719	209.989
60.000	31.569	181.513	31.611	181.495	32.081	181.652	34.393	185.102	51.914	210.597
60.500	31.237	181.560	31.280	181.542	31.761	181.704	34.129	185.244	52.116	211.214
61.000	30.897	181.610	30.941	181.591	31.433	181.758	33.857	185.392	52.325	211.840
62.000	30.187	181.715	30.234	181.696	30.748	181.874	33.290	185.705	52.765	213.124
63.000	29.437	181.829	29.485	181.809	30.023	182.001	32.690	186.043	53.235	214.448
64.000	28.641	181.955	28.692	181.934	29.255	182.140	32.052	186.411	53.739	215.815
65.000	27.797	182.093	27.850	182.071	28.438	182.294	31.373	186.814	54.281	217.225
66.000	26.898	182.246	26.953	182.223	27.568	182.466	30.649	187.258	54.863	218.680
67.000	25.939	182.417	25.997	182.393	26.640	182.659	29.874	187.750	55.491	220.180
68.500	24.375	182.716	24.437	182.691	25.124	182.998	28.606	188.599	56.529	222.518
70.000	22.637	183.082	22.703	183.056	23.437	183.417	27.190	189.623	57.699	224.961
71.500	20.694	183.547	20.764	183.519	21.547	183.953	25.599	190.888	59.025	227.508
73.000	18.509	184.161	18.583	184.133	19.417	184.667	23.800	192.504	60.536	230.151
75.000	15.135	185.398	15.216	185.370	16.121	186.110	21.009	195.536	62.905	233.788
77.000	11.112	187.738	11.198	187.708	12.176	188.809	17.682	200.444	65.789	237.453
79.000	6.293	194.258	6.384	194.188	7.444	195.797	13.784	209.683	69.367	240.849
81.000	1.571	266.442	1.607	263.282	2.489	242.118	9.774	231.172	73.915	243.045
82.000	3.734	335.396	3.670	334.287	3.284	315.766	8.486	252.156	76.682	242.741
83.000	7.418	348.177	7.346	347.667	6.704	339.190	8.718	279.319	79.854	239.654
85.000	16.270	355.223	16.209	354.917	15.624	350.569	14.886	318.335	85.693	180.311
87.000	26.836	357.885	26.805	357.603	26.517	354.112	26.005	333.263	73.446	113.248
89.000	38.748	359.556	38.761	359.249	38.927	355.795	39.798	338.605	40.503	106.271
89.500	41.848	359.923	41.874	359.604	42.166	356.074	43.422	339.073	27.989	102.221

3.3.4. Плёнки толщиной d = 300 нм.

3.3.4.1. Плёнки с оптической плотностью n = 1.3

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 1.3 $d_{film's}$ = 300

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	34.576	176.674	36.289	174.409	54.093	179.423	52.358	208.716	60.849	205.038
50.000	31.572	180.550	33.718	177.420	55.636	185.708	54.026	217.163	64.397	211.162
55.000	28.071	187.982	30.631	183.524	56.840	195.282	55.522	227.086	68.066	218.273
55.500	27.699	188.993	30.296	184.361	56.928	196.434	55.652	228.160	68.433	219.048
55.750	27.512	189.521	30.127	184.798	56.969	197.023	55.715	228.703	68.617	219.441
56.000	27.325	190.063	29.956	185.247	57.009	197.621	55.778	229.250	68.800	219.837
56.250	27.137	190.621	29.785	185.709	57.046	198.227	55.839	229.800	68.983	220.236
56.400	27.025	190.963	29.682	185.992	57.067	198.595	55.874	230.132	69.093	220.477
56.500	26.949	191.194	29.613	186.183	57.081	198.842	55.898	230.354	69.166	220.638
56.550	26.912	191.311	29.578	186.280	57.088	198.967	55.910	230.466	69.203	220.719
56.600	26.874	191.428	29.544	186.377	57.094	199.091	55.922	230.577	69.239	220.800
56.650	26.836	191.546	29.509	186.475	57.101	199.216	55.933	230.689	69.276	220.882
56.750	26.761	191.784	29.440	186.672	57.114	199.466	55.957	230.912	69.349	221.045
57.000	26.572	192.390	29.266	187.173	57.145	200.099	56.014	231.473	69.531	221.454
57.250	26.383	193.013	29.091	187.689	57.173	200.739	56.069	232.038	69.713	221.867
57.500	26.194	193.653	28.916	188.218	57.200	201.389	56.124	232.607	69.895	222.284
57.750	26.006	194.311	28.740	188.762	57.223	202.046	56.177	233.179	70.077	222.704
58.000	25.817	194.987	28.563	189.321	57.245	202.712	56.228	233.755	70.258	223.128
58.500	25.441	196.394	28.208	190.485	57.280	204.068	56.326	234.918	70.618	223.987
59.000	25.067	197.879	27.851	191.711	57.306	205.455	56.418	236.095	70.977	224.862
59.500	24.696	199.444	27.494	193.003	57.320	206.873	56.503	237.285	71.334	225.752
60.000	24.329	201.093	27.136	194.363	57.323	208.321	56.581	238.490	71.689	226.659
60.500	23.969	202.829	26.779	195.794	57.315	209.797	56.652	239.709	72.042	227.583
61.000	23.615	204.655	26.423	197.300	57.295	211.300	56.715	240.941	72.391	228.524
62.000	22.937	208.591	25.720	200.545	57.218	214.382	56.818	243.445	73.082	230.461
63.000	22.308	212.921	25.036	204.120	57.091	217.557	56.887	246.001	73.759	232.473
64.000	21.745	217.658	24.383	208.048	56.911	220.811	56.919	248.608	74.422	234.566
65.000	21.266	222.804	23.773	212.346	56.677	224.134	56.914	251.264	75.068	236.743
66.000	20.889	228.346	23.220	217.028	56.389	227.512	56.868	253.968	75.694	239.011
67.000	20.633	234.251	22.741	222.097	56.048	230.936	56.779	256.718	76.301	241.372
68.500	20.513	243.666	22.197	230.407	55.437	236.136	56.562	260.929	77.167	245.101
70.000	20.747	253.515	21.913	239.484	54.711	241.392	56.236	265.243	77.976	249.064
71.500	21.354	263.491	21.940	249.160	53.877	246.692	55.796	269.665	78.719	253.273
73.000	22.326	273.309	22.314	259.204	52.942	252.038	55.234	274.203	79.389	257.729
75.000	24.126	285.807	23.370	272.733	51.550	259.266	54.286	280.466	80.151	264.045
77.000	26.390	297.447	25.033	285.965	50.006	266.689	53.097	287.030	80.734	270.742
79.000	28.982	308.258	27.221	298.616	48.329	274.444	51.659	293.998	81.092	277.723
81.000	31.782	318.395	29.827	310.627	46.543	282.724	49.975	301.516	81.143	284.869
82.000	33.230	323.267	31.253	316.414	45.622	287.137	49.049	305.544	81.005	288.484
83.000	34.696	328.039	32.746	322.074	44.692	291.782	48.074	309.791	80.713	292.152
85.000	37.659	337.355	35.886	333.086	42.859	301.927	46.031	319.090	79.389	300.080
87.000	40.634	346.471	39.171	343.789	41.200	313.494	44.000	329.712	76.024	311.404
89.000	43.608	355.483	42.540	354.289	39.968	326.745	42.252	341.898	68.037	338.854
89.500	44.351	357.728	43.390	356.891	39.767	330.330	41.902	345.195	65.751	351.976

3.3.4.2. Плёнки с оптической плотностью n = 1.5

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 1.5 $d_{film's}$ = 300

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	35.913	154.378	37.683	154.561	59.325	140.663	55.411	202.765	61.180	204.684
50.000	33.045	149.423	35.477	149.245	63.795	138.276	57.695	210.355	64.810	210.790
55.000	29.768	144.181	32.968	143.815	68.862	136.949	59.767	219.851	68.564	217.927
55.500	29.414	143.626	32.696	143.259	69.408	136.896	59.950	220.914	68.940	218.709
55.750	29.235	143.346	32.559	142.980	69.684	136.877	60.039	221.454	69.128	219.105
56.000	29.055	143.063	32.421	142.700	69.962	136.862	60.127	221.999	69.315	219.505
56.250	28.873	142.778	32.282	142.419	70.242	136.852	60.213	222.550	69.502	219.908
56.400	28.763	142.606	32.198	142.249	70.411	136.849	60.264	222.883	69.615	220.151
56.500	28.690	142.491	32.141	142.136	70.524	136.848	60.297	223.105	69.689	220.314
56.550	28.653	142.433	32.113	142.080	70.580	136.847	60.314	223.217	69.727	220.396
56.600	28.616	142.376	32.085	142.023	70.637	136.847	60.331	223.329	69.764	220.478
56.650	28.579	142.318	32.057	141.966	70.694	136.848	60.347	223.441	69.801	220.560
56.750	28.505	142.201	32.000	141.853	70.807	136.849	60.380	223.667	69.876	220.725
57.000	28.320	141.909	31.857	141.568	71.093	136.855	60.461	224.233	70.063	221.138
57.250	28.132	141.614	31.713	141.281	71.381	136.867	60.540	224.804	70.249	221.556
57.500	27.943	141.316	31.568	140.994	71.671	136.886	60.617	225.381	70.435	221.978
57.750	27.753	141.014	31.422	140.704	71.963	136.911	60.693	225.964	70.620	222.404
58.000	27.562	140.710	31.275	140.414	72.258	136.942	60.766	226.551	70.805	222.833
58.500	27.174	140.090	30.976	139.826	72.852	137.026	60.907	227.742	71.174	223.704
59.000	26.780	139.454	30.672	139.231	73.456	137.141	61.040	228.953	71.541	224.592
59.500	26.380	138.802	30.363	138.627	74.068	137.290	61.163	230.184	71.906	225.497
60.000	25.973	138.130	30.049	138.013	74.689	137.478	61.277	231.436	72.269	226.420
60.500	25.560	137.438	29.729	137.388	75.318	137.708	61.382	232.708	72.629	227.360
61.000	25.141	136.722	29.403	136.750	75.957	137.986	61.476	233.999	72.986	228.320
62.000	24.282	135.210	28.733	135.432	77.261	138.718	61.633	236.638	73.692	230.298
63.000	23.397	133.569	28.039	134.044	78.599	139.751	61.745	239.350	74.384	232.360
64.000	22.486	131.771	27.318	132.570	79.971	141.205	61.808	242.129	75.061	234.509
65.000	21.550	129.778	26.571	130.991	81.374	143.288	61.820	244.970	75.721	236.753
66.000	20.593	127.544	25.796	129.282	82.800	146.378	61.777	247.869	76.362	239.095
67.000	19.618	125.011	24.995	127.413	84.233	151.234	61.677	250.820	76.982	241.543
68.500	18.140	120.487	23.745	124.229	86.295	166.226	61.413	255.332	77.869	245.423
70.000	16.679	114.807	22.450	120.444	87.654	207.897	61.007	259.935	78.698	249.569
71.500	15.308	107.561	21.132	115.845	86.810	261.615	60.449	264.618	79.463	253.991
73.000	14.143	98.302	19.834	110.151	84.570	283.245	59.731	269.379	80.156	258.695
75.000	13.225	82.431	18.278	100.269	80.982	294.375	58.513	275.865	80.954	265.388
77.000	13.513	63.756	17.232	87.103	77.045	300.075	56.979	282.562	81.586	272.495
79.000	15.359	45.796	17.209	70.771	72.816	304.160	55.111	289.584	82.017	279.867
81.000	18.713	31.395	18.768	53.202	68.289	307.834	52.897	297.116	82.185	287.273
82.000	20.870	25.684	20.245	44.872	65.906	309.708	51.663	301.156	82.133	290.908
83.000	23.295	20.826	22.192	37.215	63.439	311.681	50.350	305.437	81.955	294.471
85.000	28.808	13.091	27.376	24.232	58.243	316.136	47.537	314.946	80.985	301.575
87.000	34.988	7.134	33.973	13.934	52.712	321.672	44.641	326.151	78.207	310.739
89.000	41.577	2.126	41.511	5.310	46.943	328.923	42.040	339.569	70.288	335.614
89.500	43.256	0.944	43.479	3.287	45.492	331.102	41.504	343.302	67.569	349.513

3.3.4.3. Плёнки с оптической плотностью n = 3

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 3 $d_{film's}$ = 300

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	32.458	187.711	32.892	188.450	42.106	193.974	60.706	175.532	62.125	208.063
50.000	28.616	190.888	29.145	192.019	40.994	200.007	64.652	175.627	66.021	215.466
55.000	23.967	195.608	24.604	197.311	39.515	207.912	68.954	176.812	70.055	224.424
55.500	23.455	196.212	24.105	197.986	39.344	208.820	69.399	177.029	70.459	225.428
55.750	23.196	196.526	23.852	198.336	39.257	209.283	69.622	177.146	70.661	225.938
56.000	22.935	196.849	23.598	198.695	39.169	209.751	69.845	177.269	70.862	226.455
56.250	22.672	197.180	23.341	199.063	39.079	210.225	70.069	177.399	71.064	226.977
56.400	22.513	197.383	23.186	199.289	39.025	210.512	70.203	177.480	71.184	227.293
56.500	22.406	197.520	23.082	199.442	38.989	210.705	70.293	177.536	71.265	227.505
56.550	22.353	197.589	23.030	199.519	38.971	210.802	70.338	177.564	71.305	227.611
56.600	22.299	197.659	22.978	199.596	38.952	210.899	70.383	177.592	71.345	227.718
56.650	22.246	197.729	22.926	199.674	38.934	210.996	70.428	177.621	71.385	227.825
56.750	22.139	197.870	22.822	199.830	38.897	211.191	70.518	177.679	71.466	228.039
57.000	21.869	198.230	22.559	200.230	38.805	211.683	70.742	177.830	71.666	228.580
57.250	21.598	198.601	22.295	200.640	38.711	212.181	70.968	177.989	71.866	229.127
57.500	21.324	198.982	22.029	201.062	38.616	212.685	71.193	178.155	72.066	229.680
57.750	21.049	199.375	21.761	201.497	38.520	213.195	71.418	178.330	72.265	230.241
58.000	20.771	199.780	21.491	201.944	38.423	213.712	71.644	178.513	72.464	230.808
58.500	20.211	200.629	20.946	202.879	38.226	214.764	72.096	178.907	72.861	231.963
59.000	19.643	201.533	20.394	203.872	38.024	215.842	72.548	179.340	73.255	233.148
59.500	19.068	202.500	19.837	204.930	37.817	216.945	73.000	179.815	73.647	234.364
60.000	18.486	203.535	19.273	206.059	37.606	218.076	73.451	180.337	74.037	235.612
60.500	17.898	204.648	18.705	207.267	37.391	219.233	73.902	180.909	74.424	236.893
61.000	17.305	205.846	18.133	208.561	37.171	220.419	74.351	181.537	74.808	238.210
62.000	16.106	208.544	16.980	211.451	36.719	222.875	75.242	182.980	75.566	240.957
63.000	14.897	211.733	15.823	214.822	36.250	225.449	76.121	184.714	76.309	243.867
64.000	13.691	215.556	14.678	218.796	35.766	228.147	76.982	186.798	77.034	246.958
65.000	12.507	220.200	13.563	223.522	35.268	230.973	77.817	189.304	77.741	250.249
66.000	11.372	225.908	12.505	229.186	34.757	233.934	78.617	192.316	78.426	253.764
67.000	10.326	232.979	11.542	235.987	34.235	237.037	79.370	195.930	79.087	257.526
68.500	9.058	246.776	10.390	248.683	33.437	241.973	80.376	202.704	80.029	263.698
70.000	8.393	264.515	9.781	264.290	32.632	247.271	81.171	211.357	80.903	270.602
71.500	8.588	284.086	9.914	281.358	31.830	252.962	81.668	221.915	81.699	278.363
73.000	9.695	301.759	10.852	297.412	31.050	259.078	81.772	233.851	82.403	287.118
75.000	12.281	319.226	13.167	314.502	30.079	267.955	81.187	249.952	83.175	300.565
77.000	15.688	330.783	16.338	326.647	29.245	277.726	79.747	263.911	83.713	316.239
79.000	19.604	338.663	20.064	335.301	28.631	288.450	77.471	274.869	83.955	334.117
81.000	23.861	344.387	24.162	341.750	28.336	300.135	74.293	283.489	83.803	353.795
82.000	26.085	346.730	26.314	344.422	28.346	306.317	72.292	287.305	83.528	4.086
83.000	28.360	348.828	28.520	346.827	28.482	312.702	69.941	291.039	83.070	14.541
85.000	33.034	352.496	33.062	351.053	29.198	325.963	63.823	299.254	81.269	35.524
87.000	37.826	355.704	37.728	354.765	30.609	339.621	55.007	311.277	76.612	55.625
89.000	42.688	358.669	42.469	358.197	32.816	353.326	43.793	334.755	56.510	68.065
89.500	43.909	359.393	43.660	359.033	33.501	356.720	41.389	343.946	39.979	60.630

3.3.4.4. Плёнки с оптической плотностью n = 5

N_{out} = 1.000276 K_{out} = 0.0000005 N_{sub} = 3.9 K_{sub} = 0.02 $N_{film's}$ = 5 $d_{film's}$ = 300

φ, град.	Ψ (k=.00003)	Δ	Ψ (k=0.03)	Δ	Ψ (k=0.3)	Δ	Ψ (k=1)	Δ	Ψ (k=3)	Δ
45.000	37.755	176.569	38.013	175.957	44.002	171.230	54.101	196.435	53.803	205.203
50.000	35.769	175.646	36.111	174.887	43.745	169.340	56.679	200.519	56.264	211.654
55.000	33.344	174.493	33.793	173.559	43.413	167.134	59.788	205.234	59.169	219.184
55.500	33.072	174.360	33.533	173.407	43.374	166.889	60.133	205.746	59.486	220.007
55.750	32.934	174.293	33.400	173.329	43.354	166.765	60.308	206.005	59.646	220.424
56.000	32.794	174.224	33.267	173.250	43.333	166.640	60.485	206.266	59.808	220.844
56.250	32.652	174.154	33.131	173.170	43.313	166.513	60.663	206.529	59.971	221.268
56.400	32.567	174.112	33.049	173.121	43.300	166.436	60.771	206.688	60.069	221.524
56.500	32.509	174.083	32.994	173.089	43.292	166.385	60.843	206.795	60.135	221.696
56.550	32.480	174.069	32.967	173.072	43.287	166.359	60.879	206.848	60.168	221.782
56.600	32.451	174.055	32.939	173.056	43.283	166.333	60.916	206.902	60.201	221.868
56.650	32.422	174.040	32.911	173.040	43.279	166.307	60.952	206.955	60.235	221.954
56.750	32.364	174.011	32.856	173.006	43.270	166.255	61.025	207.062	60.301	222.127
57.000	32.218	173.938	32.716	172.923	43.249	166.124	61.209	207.332	60.468	222.563
57.250	32.070	173.864	32.574	172.838	43.227	165.991	61.394	207.605	60.636	223.002
57.500	31.920	173.789	32.431	172.752	43.204	165.857	61.582	207.879	60.805	223.445
57.750	31.768	173.712	32.285	172.664	43.181	165.721	61.771	208.156	60.976	223.893
58.000	31.614	173.634	32.139	172.575	43.158	165.584	61.962	208.436	61.148	224.344
58.500	31.301	173.474	31.840	172.393	43.111	165.304	62.350	209.002	61.496	225.260
59.000	30.981	173.309	31.533	172.204	43.061	165.017	62.745	209.578	61.850	226.193
59.500	30.653	173.138	31.219	172.009	43.010	164.722	63.149	210.166	62.208	227.144
60.000	30.316	172.960	30.897	171.807	42.957	164.419	63.561	210.765	62.573	228.115
60.500	29.970	172.776	30.567	171.597	42.902	164.108	63.981	211.375	62.942	229.105
61.000	29.616	172.584	30.228	171.379	42.845	163.788	64.410	211.998	63.318	230.116
62.000	28.879	172.176	29.522	170.916	42.724	163.119	65.295	213.285	64.084	232.204
63.000	28.100	171.731	28.778	170.414	42.592	162.407	66.217	214.631	64.873	234.387
64.000	27.278	171.243	27.991	169.864	42.449	161.647	67.178	216.044	65.685	236.677
65.000	26.407	170.704	27.157	169.258	42.294	160.833	68.181	217.536	66.518	239.085
66.000	25.483	170.103	26.273	168.587	42.123	159.958	69.228	219.120	67.373	241.628
67.000	24.501	169.429	25.332	167.835	41.936	159.013	70.321	220.814	68.250	244.323
68.500	22.907	168.238	23.806	166.520	41.619	157.441	72.053	223.616	69.602	248.706
70.000	21.150	166.757	22.122	164.899	41.249	155.648	73.902	226.850	70.996	253.589
71.500	19.204	164.848	20.257	162.840	40.813	153.579	75.877	230.738	72.421	259.121
73.000	17.047	162.273	18.189	160.113	40.295	151.161	77.980	235.697	73.862	265.514
75.000	13.806	156.957	15.085	154.670	39.437	147.219	80.951	245.642	75.754	275.925
77.000	10.180	146.736	11.614	144.869	38.322	142.128	83.883	265.518	77.484	289.533
79.000	6.684	121.510	8.196	123.454	36.851	135.315	85.420	311.839	78.751	307.763
81.000	6.239	65.874	7.019	77.489	34.907	125.782	82.996	359.265	78.984	331.019
82.000	8.237	43.028	8.424	53.514	33.730	119.472	80.606	11.286	78.458	343.619
83.000	11.248	29.150	11.044	36.767	32.432	111.692	77.693	18.739	77.361	355.825
85.000	19.117	14.870	18.609	18.568	29.822	89.729	70.347	26.149	73.004	16.141
87.000	28.725	7.495	28.247	9.171	29.061	56.103	60.549	26.477	64.461	27.808
89.000	39.508	2.419	39.236	2.779	33.756	15.259	48.285	16.862	49.307	22.555
89.500	42.304	1.288	42.098	1.361	35.858	5.549	45.240	11.817	45.055	15.560

Заключение

В современной эллипсометрии всё ещё встречается много спекулятивных теоретических и экспериментальных работ, в которых стремятся уменьшить число модельных параметров за счёт полного пренебрежения величиной малой экстинкции, особенно в классе высоко прозрачных материалов. Этого на самом деле в принципе нельзя делать, поскольку кроме механизмов реального дисперсионного поглощения в материалах действует механизм светоослабления за счет рассеяния.

Однако в некоторых публикациях по эллипсометрии подобные тенденции к «развешиванию флагов» и «застолблению первенства» непонятного смысла и качества, к сожалению, имеют место быть и процветать. При решении ряда актуальных прикладных обратных задач эллипсометрии число неизвестных не может быть меньше двух – по числу компонент (n, k) комплексного показателя преломления. При однослойной аппроксимации оптическим систем их не может быть меньше трёх. И так далее, но принимать значение k=0 совершенно недопустимо в прецизионной эллипсометрии, поскольку чувствительность эллипсометрических приборов не исчерпала своих пределов для подобного пренебрежения. Определение экстинкции с высокой точностью здесь всегда возможно, а интерпретация зависит от уровня теоретического (и достаточно классического) моделирования исследуемых оптических систем.

В традиционных прикладных эллипсометрических работах пока нет самого главного – ни идеологического, ни метрологически методологического единства, направленного на разрешение актуальных в наш век нанотехнологий научно-прикладных общеизвестных недостатков и проблем в методах традиционной эллипсометрии.

Вторая монография по прикладной эллипсометрии для студентов ВУЗов продолжает последовательный системный анализ достоинств и недостатков её классических традиционных методов, детально рассмотренных в первой части для модели идеальной границы Френеля авторов кафедры ТТОЭ ИФФ ИТМО.

Математически обосновано удаётся развить предложенный ранее метод инвариантов Френеля-Брюстера при исследовании оптических параметров однородных тонкослойных покрытий произвольных материалов в столь же произвольных средах.

Показана необходимость разработки эллипсометрических приборов, углы падения которых могли бы приблизиться к нормальным (нулевым) для внедрения нового прикладного направления – эллипсометрии НПВО.

Обоснована также необходимость модификации ноль-эллипсометров ручного управления для наблюдения и обработки спекл-картин отражения от шероховатых зеркал во втором новаторском направлении развития прикладной спекл-эллипсометрии.

В работе рассмотрена ещё пара новаций развития традиционных методов поляризационно-оптического материаловедения:

– $U_{фэу}$-эллипсометрия незеркального (аномального) отражения и кинетической эллипсометрии стационарного или динамического режимов;

– тандем-эллипсометрия анализа теневых полей аномального отражения, чрезвычайно важных для эффективного решения метрологических проблем современных нано- и пико- технологий.

Основной результат работы состоит в разработке справочных материалов по точным решениям прямой задачи эллипсометрии для однородных слоёв при всевозможных толщинах в семействе по углам падения и параметрам их комплексного показателя преломления. Эти амплитудно-фазовые Ψ-Δ(d; φ, n, k) характеристики состояния эллиптической деполяризации отражённого от слоя линейно поляризованного света представлены в виде листинга табулограмм и иллюстрирующих их номограмм.

Литература

1. D.F.Phillips et al.//Phys. Rev. Lett. 2001, **86**, 783
2. Е.Б.Александров, В.С.Запасский // УФН 2004, **174**, 1105
3. М.М.Горшков, Эллипсометрия. /М. Радио. 1974, 200 с.
4. А.И.Ахиезер, В.Б.Берестецкий, Квантовая электродинамика. /М., 1969.
5. Р.В.Поль, Оптика и атомная физика. / М., пер. с нем., 1966.
6. М.Борн, Э.Вольф. Основы оптики. / М., пер. с англ., 2 изд., 1973
7. У.Шерклифф. Поляризованный свет. / М., пер. с англ., 1965
8. П.П.Феофилов. Поляризованная люминесценция атомов, молекул и кристаллов. /М., 1959.
9. Г.С. Ландсберг. Оптика, 4 изд., М., 1957 (Общий курс физики, т. 3);
10. А.Н.Захарьевский. Интерферометры /М., 1952;
11. В.С.Запасский http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/091/306.htm
12. И.М.Нагибина. Прикладная оптика./
13. А.И.Семененко. Основы эллипсометрии. /Н.ИФПП СОАНСССР
14. П.Х.Бернинг. Теория и методы расчёта оптических свойств тонких плёнок./М.,Мир, «Физика тонких плёнок» т.1, 1967.
15. С.А.Алексеев, В.Т.Прокопенко,Е.К.Скалецкий и др. Введение в прикладную эллипсометрию./С-Пб, ГУ ИТМО, 2005, 200 с.
16. В.В.Соболев. Рассеяние света в атмосферах планет./М., 1972
17. United States Patent /Process for production of high efficiency in photo-thermo-refractive glass. Inventors: O.M. Efimov, L.B. Glebov, V.I. Smirnov, L.Glebova. Patent № US 6,586,141 B1. Date of Patent: Jul. 1, 2003.
18. I.Skaletskaja, N.Varkentina, E.Skaletskij. Optical analogue of effect Yonede.// ISIST, Harbin IT, 2004, file 2-1040.
19. Yonede Y. Nomalous surface reflaction of X-rays // Phys.Rev., 1963, v.131, n.5, p.2010-17.
20. Физические величины. Справочник. /М.Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
21. В.М.Золотарёв, В.Н.Морозов, Е.В.Смирнова. Оптические постоянные прозрачных технических сред. Справочник./Л., Химия, 1984 г., 215 с.
22. М.И.Скалецкая, Г.Т.Петровский и др. О нетрадиционной интерпретации решений прямой задачи эллипсометрии для двух простейших моделей. // ДАН СССР, т.249, № 2, с. 355-358, 1979 г.
23. Б.Б.Дамаскин, О.А.Петрий. Введение в электрохимическую кинетику./ М. ВШ, 1983г., 400 с.
24. Эллипсометрическое определение сродства моноклональных антител к антигенам. //J. Immunolog. methods, 52 (1986)
25. Б.Н.Никольский, Е.К.Скалецкий, А.А.Тулуб. Определение констант ионного обмена по данным спектрофотометрии./ДАН СССР, т. 274, №1, 1979, с. 156-158.
26. В.Е.Холмогоров, В.А.Крыленков, Д.А.Свистуненко. Фотоиндуцированные парамагнитные центры в крови человека. В кн.: Физикохимические свойства водных систем. /Ред. М.Ф. Вукс,

О.Ф. Безруков //С-Петербург, 1991, с. 141-163.
27. A.Dadd, S.Croft. A new UV/Visible spectrophotometer for method development and quality control in the pharmaceutical industry//Science Tools from Pharmacia Biotech, n 1, 1996, p.3.
28. A. Boiteux, B. Hess. Visualization of dynamic spetial structures. In Froutiers in Biological Energetics, p. 789-798, Ac. Press, New York, 1978.
29. А.М.Жаботинский. Колебательные химические реакции в гомогенной среде и смежные проблемы.//В сб.»Колебательные процессы в биологических и химических системах»/М.»Наука».1967, 149 с.
30. A.J.Lotka. Elements of physical biology. Baltimora. 1925.
31. Цветные стёкла. /Справочник под ред. Г.Т.Петровского, Л. 1990.
32. United States Patent. Efimov et al. Process for production of high efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass. Patent No.: US 6,586,141, B1. Date of Patent: ul. 1, 2003.

Скалецкая Ирина Евгеньевна

ВВЕДЕНИЕ В ПРИКЛАДНУЮ ЭЛЛИПСОМЕТРИЮ

Учебное пособие по курсу «ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ»
Часть 2. **Свойства решений ОУЭ для однородных слоёв**

В авторской редакции
Компьютерная верстка и дизайн **Е. К. Скалецкий**
Зав. редакционно-издательским отделом **Н. Ф. Гусарова**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ И ОПТИКИ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Подписано к печати 25.10.2007 г.
Отпечатано на ризографе Тираж 100 экз. Заказ № 1079

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА

Кафедра ТТОЭ ИФФ прочно занимает ведущие позиции среди наиболее быстро развивающихся направлений в области физики, оптики, электроники и лазерных технологий.

Кафедра готовит выпускников по трем специализациям:
- твердотельная оптоэлектроника;
- оптика светового дизайна;
- системы охранной безопасности.

Программа подготовки предполагает изучение технических и гуманитарных дисциплин, таких как:

- теоретическая и экспериментальная физика;
- лазерная и вычислительная техника;
- менеджмент, компьютерная графика.

Имея в своих рядах высококвалифицированный состав преподавателей, кафедра выпускает специалистов, востребованных на рынке труда, как в нашей стране, так и за рубежом.

На кафедре реализована многоуровневая система образования: инженеры, бакалавры, магистры.

Учебные лаборатории оснащены современным оборудованием и вычислительной техникой.