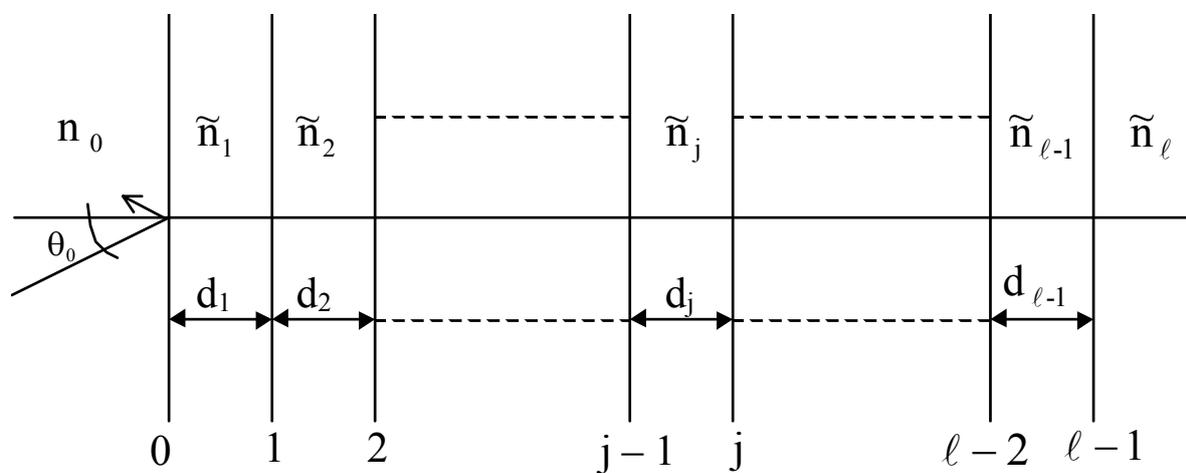


Андреев С.В., Губанова Л.А., Путилин Э.С.

Методические указания к лабораторному практикуму
по курсу

«Оптические покрытия»



Санкт-Петербург
2006

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное агентство по образованию

Санкт-Петербургский государственный университет информационных
технологий, механики и оптики.

Андреев С.В., Губанова Л.А., Путилин Э.С.

Методические указания к лабораторному практикуму по курсу

«Оптические покрытия»



**Санкт-Петербург
2006**

УДК 29.33.39

Андреев С.В., Губанова Л.А., Путилин Э.С.

Оптические покрытия. Учебное пособие по курсу «Оптические покрытия». СПб:СПбГУИТМО, 2006

Методические пособия к лабораторному практикуму по курсу «Оптические покрытия» содержит методы определения оптических постоянных металлических и диэлектрических слоёв, а также влияние на них технологических факторов, определяемых условиями осаждения слоёв, в частности чистоты исходных материалов, скорости испарения и угла поступления паров на поверхность подложки, температуры подложки. Кроме того, в работе содержится описание методов измерения оптических параметров тонких слоёв, как в процессе осаждения, так и в процессе эксплуатации.

Пособие может быть полезно при изучении курсов «Оптические покрытия», «Оптические материалы и технология их обработки».

Пособие предназначено для студентов оптических и оптико-электронных специальностей приборостроительных вузов.

Допущено УМО по оптическому и приборостроительному образованию для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 200200 «Оптотехника», дипломированных специалистов 654000 «Оптотехника»; специальностям 200201 «Оптико-электронные приборы и системы», в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 200200 «Оптотехника», дипломированных специалистов 654000 «Оптотехника»; специальностям 200201 «Оптико-электронные приборы и системы», 200204 «Оптические технологии и материалы», решение

© Санкт-Петербургский
государственный университет
информационных технологий,
механики и оптики, 2006

© Андреев С.В., Губанова Л.А., Э.С.Путилин,
2006

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
ВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1. Влияние технологических факторов на оптические постоянные металлов	7
1.1. Оптические постоянные металлов	7
1.2. Влияние технологических факторов на оптические характеристики тонких металлических пленок	14
1.2.1. Зависимость коэффициента отражения от чистоты алюминия	14
1.2.2. Скорость испарения и старение	15
1.2.3. Температура подложки	19
1.2.4. Влияние неровностей поверхности	22
1.2.5. Влияние угла поступления паров	23
1.2.6. Адгезия металлов к подложкам	24
РАЗДЕЛ 2. Определение оптических постоянных металлических слоев и расчет интерференционных систем содержащих слои металлов	26
2.1. Расчет оптических характеристик тонкопленочных систем содержащих слои металлов	26
2.2. Методы контроля оптических постоянных и толщины пленок во время осаждения слоя	35
2.2.1. Рентгенографические методы	35
2.2.2. Радиочастотный метод контроля толщины слоя	37
2.2.3. Фотометрические методы контроля	37
2.2.4. Обработка фотометрического сигнала с использованием производной по толщине и оценка точности контроля	41
2.2.5. Контроль оптических параметров слоя во время осаждения пленки в вакууме	47
2.3. Методы измерения оптических параметров (n , k , d) тонких пленок	56
2.3.1. Измерения при нормальном падении света	56
2.3.2. Фотометрические и интерферометрические измерения	58
2.3.3. Эллипсометрические измерения	59
2.3.3.1. Оптимальные условия эллипсометрических измерений...	63
2.3.3.2. Методы точного решения	63
2.3.3.3. Идеальная граница между полубесконечными средами	65
2.3.3.4. Однородный изотропный слой на изотропной подложке	66
2.3.3.5. Аналитическое решение обратной эллипсометрической задачи для однослойной системы	69
2.3.3.6. Теоретические и методические основы проведения эллипсометрических измерений на ЛЭФ-3М	72
2.3.4. Методы, основанные на измерении разности фаз поляризованных компонент, возникающей при отражении ..	74

	стр.
РАЗДЕЛ 3. Постановка эксперимента при исследовании тонких пленок металлов	77
3.1. Оценка величины погрешности при проведении экспериментальных исследований	77
3.2. Технологические подходы при проведении исследований тонких пленок металлов	79
3.2.1. Никель	79
3.2.2. Медь	80
3.2.3. Алюминий	81
3.2.4. Хром	82
3.2.5. Серебро	83
РАЗДЕЛ 4. Оптические свойства металлических пленок при различных технологических параметрах	84
4.1. Никель	84
4.2. Медь	86
4.3. Алюминий	88
4.4. Хром	90
4.5. Серебро	92
РАЗДЕЛ 5. Лабораторный практикум	95
Лабораторная работа №1. Определение показателя преломления и толщины диэлектрических интерференционных покрытий	95
Лабораторная работа №2. Определение оптических постоянных тонких пленок металлов по спектрофотометрическим измерениям и толщине	97
Лабораторная работа №3. Исследование тонких пленок металлов. Зависимость оптических постоянных от толщины и скорости осаждения	98
Лабораторная работа №4. Сравнительное исследование оптических характеристик пленок двух металлов	101
Лабораторная работа №5. Исследование оптических постоянных покрытий из смесей металла с диэлектриком	102
Лабораторная работа №6. Исследование зависимости скорости осаждения и оптических постоянных металлов от тока эмиссии электронно-лучевого или тока накала резистивного испарителей	104
Лабораторная работа №7. Создание покрытий с переменными оптическими постоянными по толщине	106
Приложение 1. Программа расчета оптических характеристик многослойных интерференционных систем	108
Приложение 2. Пример расчета трехслойного интерференционного покрытия в Microsoft Excel	114
Приложение 3. Методика определения нулевых положений эллипсометра ЛЭФ-3М	117

	стр.
Приложение 4. Краткий типовой технологический процесс нанесения металлических покрытий	119
Приложение 5. Оптические характеристики тонких пленок металлов	122
Приложение 6. Температура испарения и скорость осаждения металлов .	134
Приложение 7. Расчет оптических постоянных керметных пленок	136
Приложение 8. Проведение измерений на ЛЭФ-3М с приставкой автоматического определения эллипсометрических параметров исследуемых покрытий	138
Приложение 9. Пример программ для определения оптических постоянных слоя по спектрофотометрическим измерениям	140
ЛИТЕРАТУРА	144

ВВЕДЕНИЕ

На характеристики ряда оптических элементов, в состав которых входят интерференционные покрытия, включающие в себя слой металла, оказывают значительное влияние параметры тонких металлических слоев (показатель преломления, главный показатель поглощения и толщина). К этой группе оптических элементов относятся: зеркала, как металлические, так и металлodieлектрические, ослабляющие светофильтры для широкого спектрального диапазона, градиентные ослабители (оттенители) и металлodieлектрические узкополосные светофильтры. Этот тип светофильтров обладает рядом достоинств по сравнению с другими: широкая полоса гашения в нерабочей зоне спектра, относительная простота в изготовлении, возможность получения светофильтров для ультрафиолетовой области спектра. На характеристики каждого из перечисленных элементов (пропускание, отражение) в той или иной степени влияют оптические параметры металлических слоев, которые в свою очередь зависят не только от чистоты осаждаемого материала, но и от условий формирования покрытия.

Наиболее существенное влияние параметры металлических слоев оказывают на характеристики металлodieлектрических светофильтров, т. е. фильтров сформированных из тонких слоев металла (алюминий, серебро) и диэлектрика. Пропускание в максимуме, степень гашения в нерабочей области (фон) и полуширина этих фильтров определяются не только оптическими параметрами диэлектрика и металла, но и скачком фаз на границе раздела — металл–диэлектрик. Этот скачок определяется значением показателя преломления диэлектрика и оптическими постоянными металлических слоев. Оценка значения этих величин и определение их связи с характеристиками технологического процесса позволят получить светофильтры с характеристиками, близкими к теоретическим.

Зависимость оптических постоянных металлических слоев от толщины оказывает существенное влияние на распределение коэффициента пропускания градиентных ослабителей (оттенителей), используемых в телевизионных камерах, работающих в условиях значительного перепада освещенности. Знание истинного значения этого распределения позволит улучшить надежность и качество объективов, обеспечивающих работу камер слежения.

Настоящее пособие посвящено: 1) систематическому анализу данных в области исследования оптических покрытий на основе металлов; 2) рассмотрению математических зависимостей оптических характеристик (коэффициенты пропускания и отражения) многослойных интерференционных покрытий содержащих поглощающие слои (слои металлов) от параметров слоев (показатель преломления, главный показатель поглощения и толщина); 3) методике определения оптических

постоянных металлических слоев; 4) рассмотрению технологических особенностей нанесения металлических покрытий.

РАЗДЕЛ 1. Влияние технологических факторов на оптические постоянные металлов

1.1. Оптические постоянные металлов

При расчете оптических покрытий на основе металлов возникает вопрос, какие справочные данные по оптическим постоянным металлов использовать и насколько они являются достоверными.

Так на рисунках 1.1–1.5 приведены оптические постоянные серебра, меди, золота и алюминия, соответственно, по данным авторов. Из этих зависимостей видны значительные расхождения в значениях показателя преломления и главного показателя поглощения. Хотя у алюминия эти расхождения не так заметны, как у других приведенных металлов (рис. 1.4) при увеличении масштаба (рис. 1.5) видно, что оптические постоянные отличаются друг от друга. Это может быть связано с различными причинами, такими, например как способы и условия получения покрытий, а также и с методами определения оптических постоянных разными авторами.

Но, к сожалению, не у всех авторов приводятся или приводятся не полностью условия изготовления покрытий и методы определения их оптических постоянных. Приведем эти данные для некоторых зависимостей оптических постоянных указанных металлов. Для оптических постоянных серебра приведенных на рис. 1.1 кривая 3, меди на рис. 1.2 кривая 6, золота на рис. 1.3 кривая 7 и алюминия на рис. 1.5 кривая 1 [1,2] осаждение слоев проводилось резистивным методом на гипотенузную грань прямоугольной призмы со скоростью ≈ 3 нм/с при давлении в вакуумной камере $\sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Толщина покрытий контролировалась по весу с погрешностью ± 5 нм, последующий отжиг проводился за 30 часов с дискретным повышением температуры на 20°C в час и давлении $\sim 1,3 \cdot 10^{-4}$ Па. Но для определения показателя преломления покрытия изготавливались толщиной 150 – 200 нм, а для определения главного показателя поглощения толщиной ~ 50 нм. Для серебра на рис. 1.1 кривая 1 и золота рис. 1.3 кривая 2 образцы после напыления были отожжены и выдержаны в вакууме при давлении $< 1,3 \cdot 10^{-7}$ Па. Оптические постоянные определялись по измерениям коэффициента отражения методом Крамерса–Кронига (относительная погрешность измерений $\Delta R/R = \pm 0,03$).

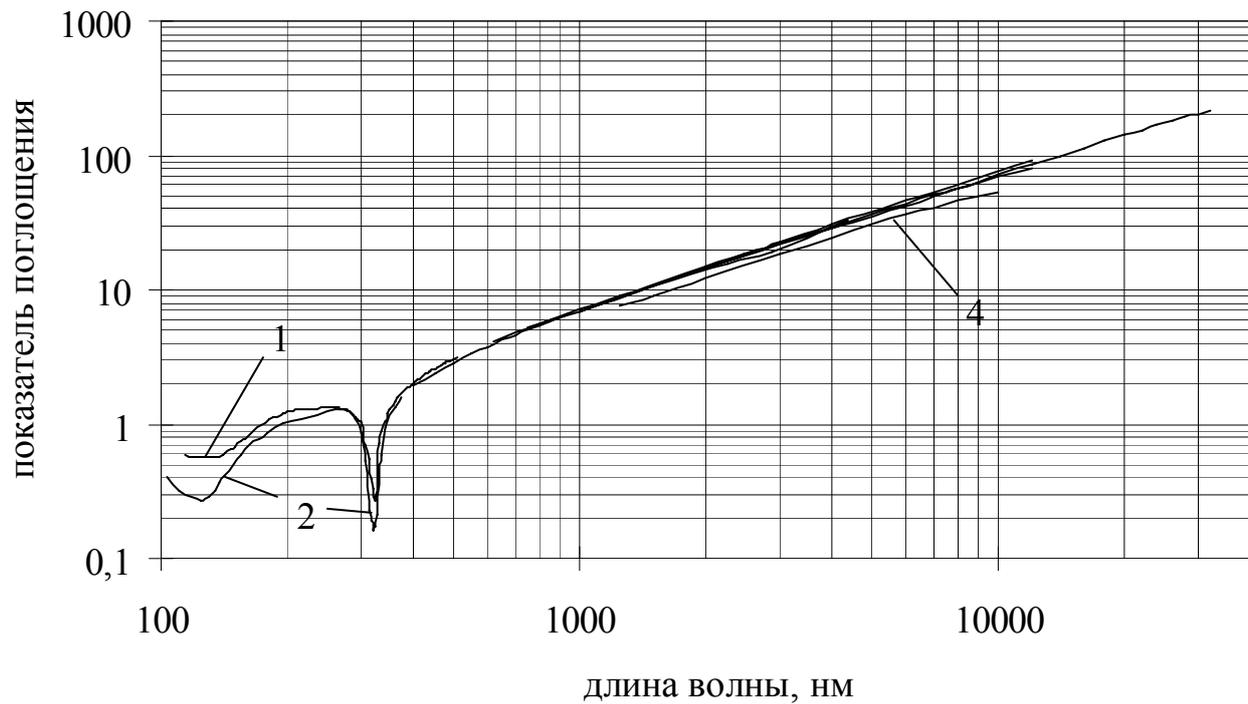
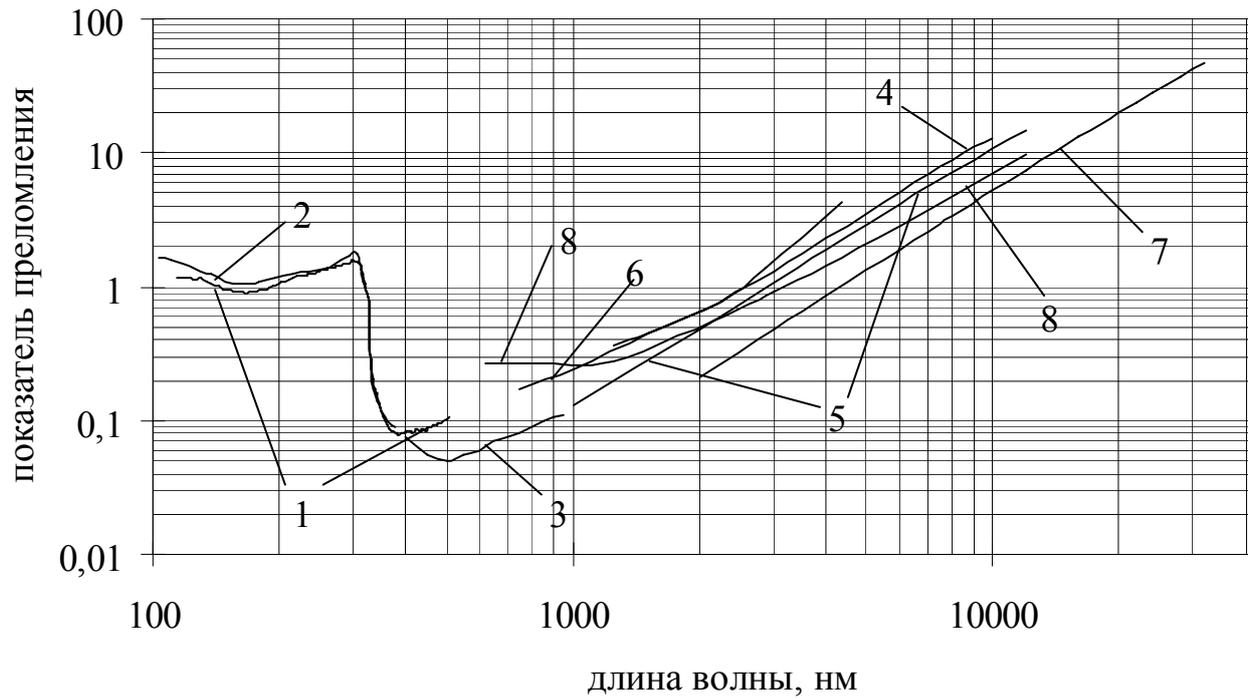
Оптические постоянные алюминия (кривая 1 рис. 1.5) по работам [3] и [4] совпадают с данными [1, 2], но из условий изготовления указывается только, что осаждение проводилось скоростью ≈ 3 нм/с при давлении в вакуумной камере $\sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па и чистота алюминия составляла 99,99 %. Для кривой 2 рис. 1.5 известно, что покрытия изготавливались

резистивным методом при давлении в вакуумной камере $\sim 2,6 \cdot 10^{-3}$ Па с максимально большой скоростью осаждения и чистота алюминия 99,999 % [5]. Оптические постоянные определялись по данным поляриметрических измерений, и погрешность определения для показателя преломления не превышала 4%, а для главного показателя поглощения 3%.

При изготовлении частично прозрачных металлических покрытий необходимо рассчитать их оптические свойства. Для этого надо точно знать оптические постоянные металлов. Так при расчетах частично прозрачных покрытий серебра на длине волны $\lambda = 2000$ нм по данным рис. 1.1 кривая 4 ($n = 0,65$; $k = 12,2$) и кривая 5 ($n = 0,48$; $k = 14,4$) возможно получение различных значений коэффициентов отражения R и пропускания T при одинаковой толщине слоя. При толщине слоя серебра $d = 20$ нм возможно получение $R = 90,97 \div 95,50$ % и $T = 5,09 \div 2,53$ % , при толщине 15 нм $R = 85,91 \div 92,60$ % и $T = 9,25 \div 4,87$ % и при толщине 10 нм $R = 74,91 \div 85,54$ % и $T = 19,09 \div 10,89$ %. Это приводит к затруднениям при расчетах металлических светоделителей и тем более металлodieлектрических систем.

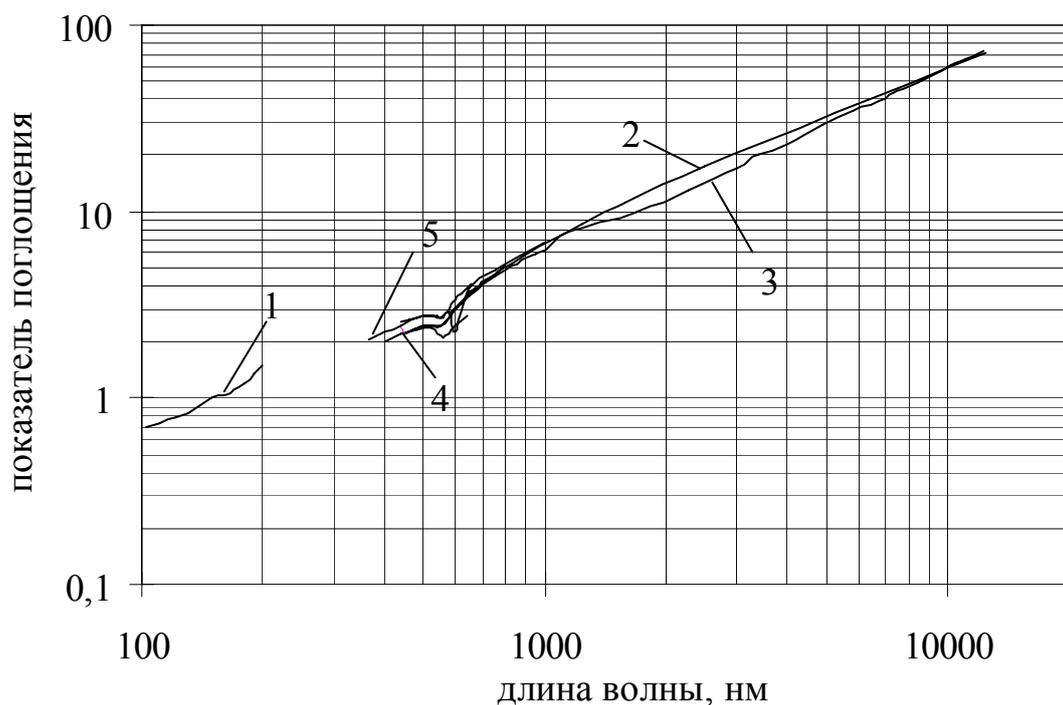
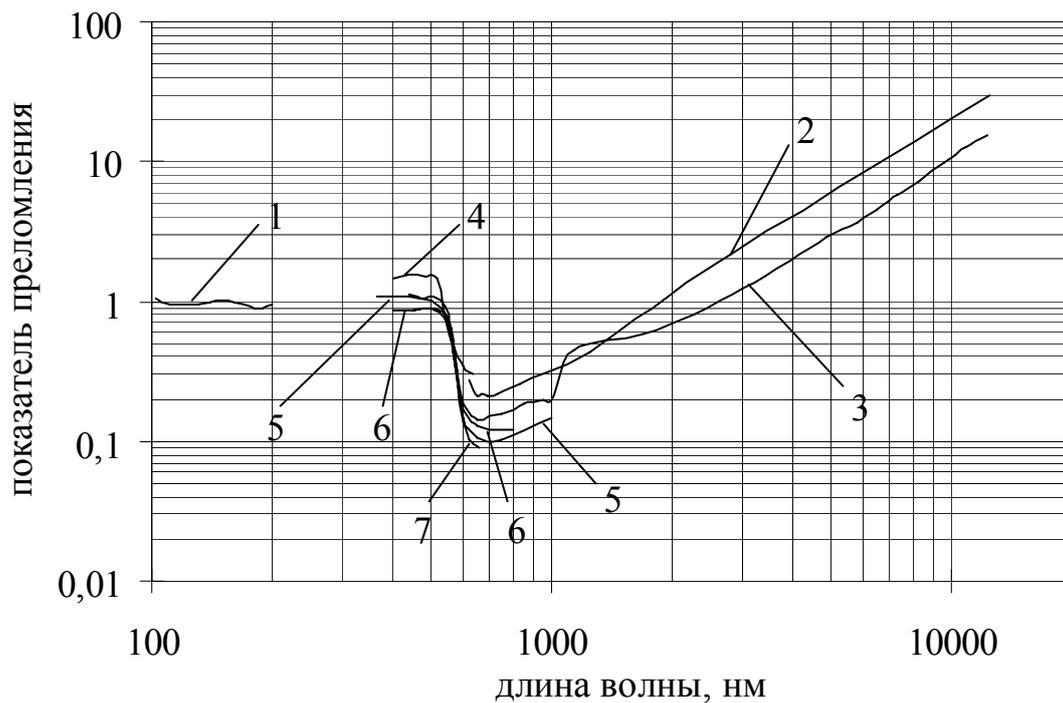
На рисунке 1.6а приведены расчетные спектральные характеристики металлodieлектрического фильтра $Ag(7\text{нм})-SiO_2-(560\text{нм})-Ag(7\text{нм})$ на подложке из стекла марки К8 при использовании оптических постоянных серебра $n=0,48$; $k=14,4$ (кривая 1) и $n=0,65$; $k=12,2$ (кривые 2 – 4). Расчет проводился в предположении, что контроль осаждения может проводиться тремя методами: 1) по контролю толщины (кривая 2) (контроль по массе); 2) по контролю коэффициента пропускания (кривая 3); 3) по контролю коэффициента отражения (кривая 4). При контроле процесса осаждения по изменению коэффициентов отражения и пропускания нельзя получить требуемые значения окончания осаждения последнего слоя серебра, поскольку экстремум наступает раньше, и приходится заканчивать осаждение на экстремуме, но эти методы позволяют выдержать оптическую толщину разделительного слоя диэлектрика. Хотя заканчивать осаждение разделительного слоя необходимо не по второму экстремуму, а при том же значении коэффициента пропускания или отражения (рис. 1.6б). Но это справедливо для симметричной системы. Из приведенных спектральных характеристик видно, что наиболее схожая характеристика фильтра получается при контроле осаждения по коэффициенту отражения (кривая 4), но максимум пропускания на 12% ниже расчетного значения (кривая 1).

Для определения влияния технологических факторов на оптические постоянные тонких металлических покрытий, достаточно рассмотреть их влияние на коэффициент отражения металлических покрытий. Далее рассмотрим это влияние на примере пленок алюминия.



- | | |
|----------------------|---------------------------------|
| 1– напыленное [6] | 5– напыленное [10, 11] |
| 2– массив [7, 8] | 6– химически осажденное [8, 12] |
| 3– напыленное [1, 2] | 7– [8, 13] |
| 4– напыленное [8, 9] | 8– [8, 14] |

Рис. 1.1. Оптические постоянные серебра.



1– напыленная [8, 15, 16]

2– [8, 14]

3– напыленная [8, 11, 17]

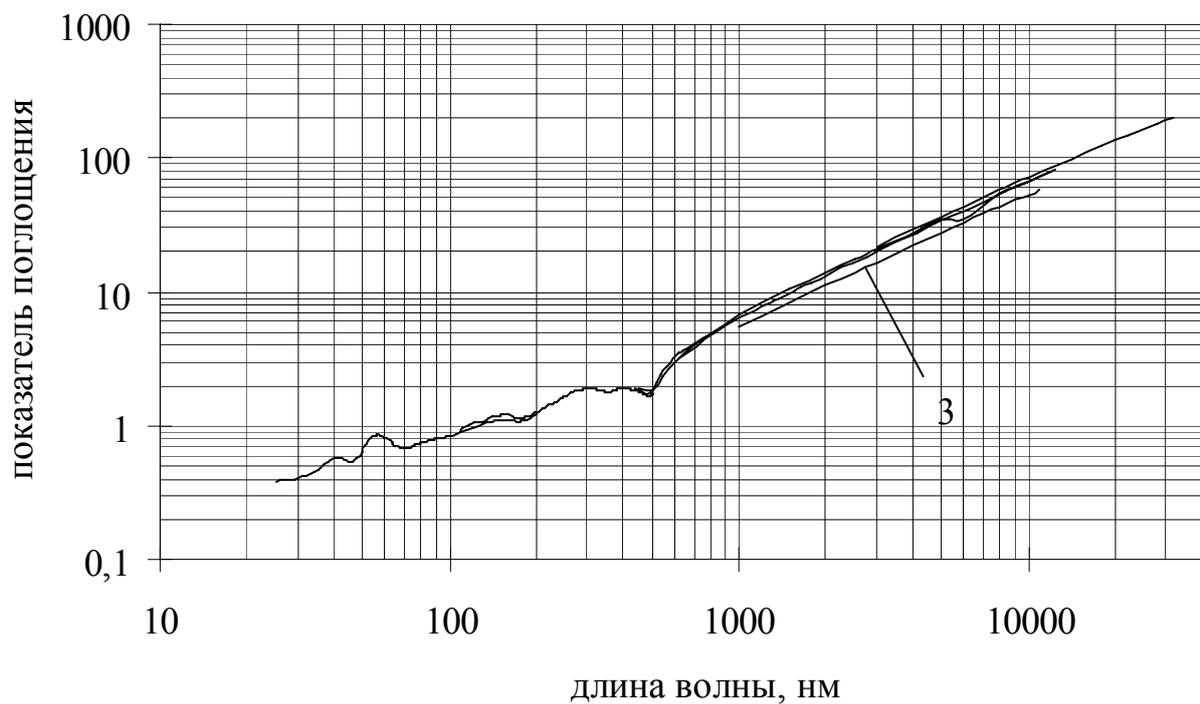
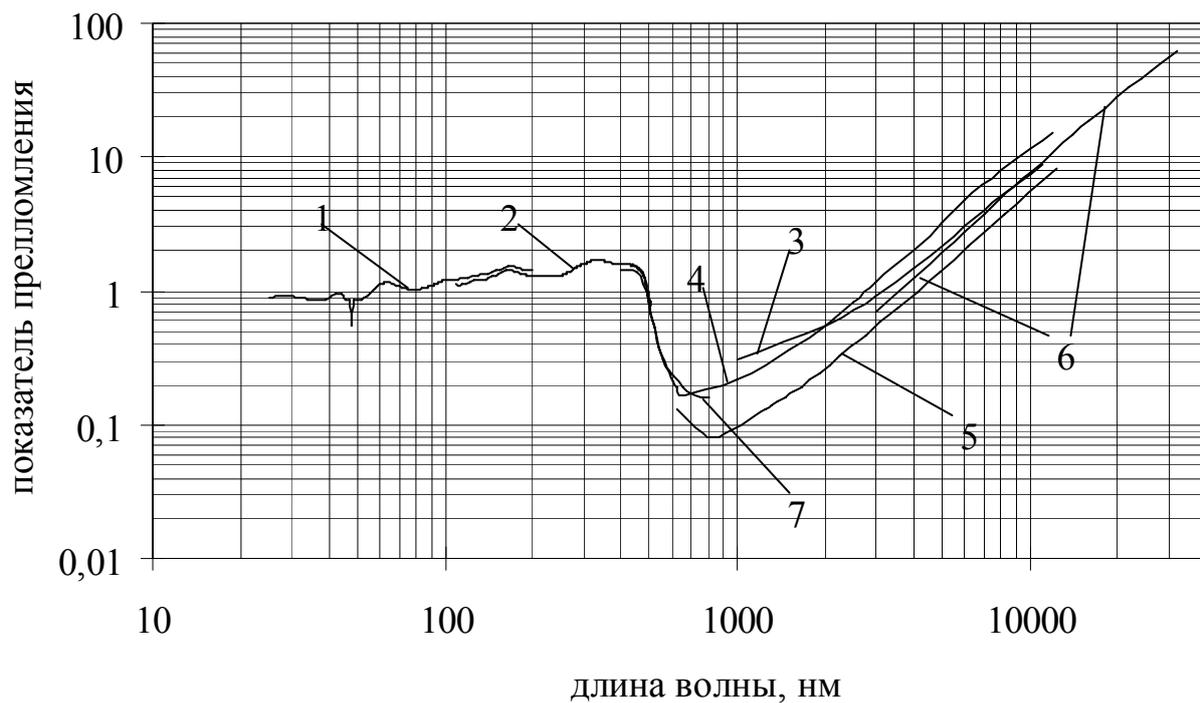
7– монокристаллическая [8, 18]

4– [8, 19]

5– массив [8, 20]

6– напыленная [1, 2]

Рис. 1.2. Оптические постоянные меди.



- 1– напыленное [8, 11, 21]
- 2– напыленное [6]
- 3– кристаллическое [8, 22]
- 4– кристаллическое [8, 18, 23]

- 5– [8, 24]
- 6– массив [8, 13]
- 7– напыленное [1, 2]

Рис. 1.3. Оптические постоянные золота.

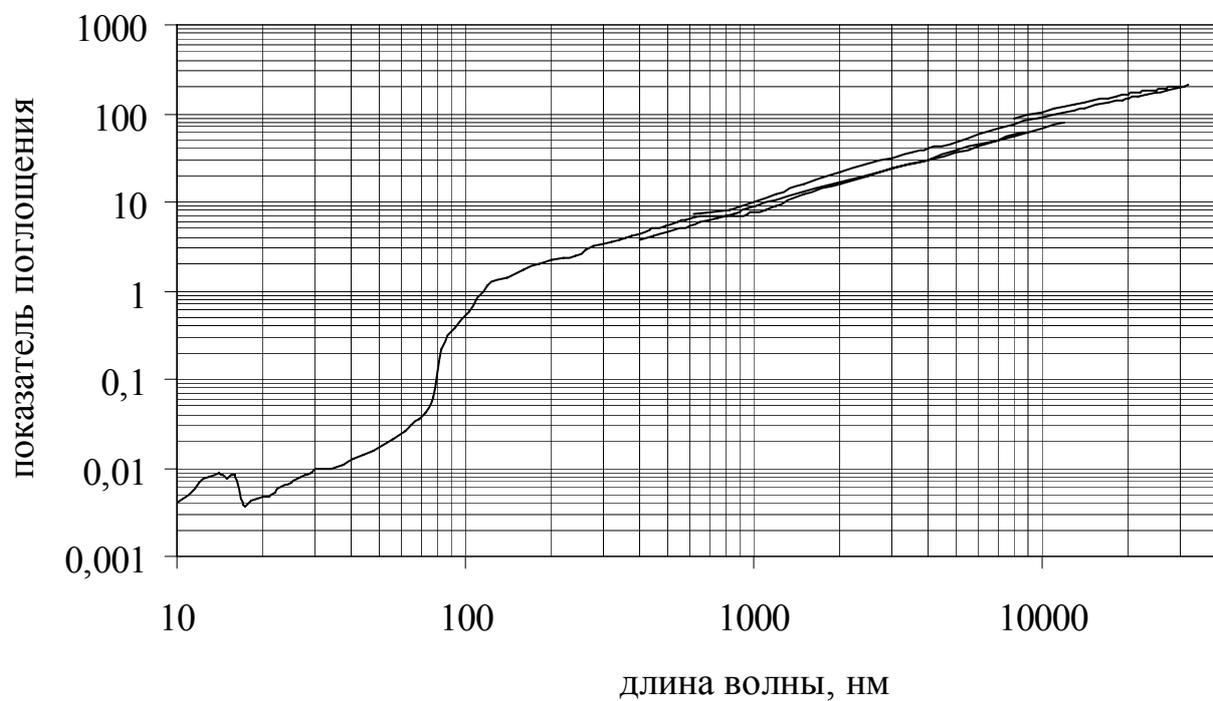
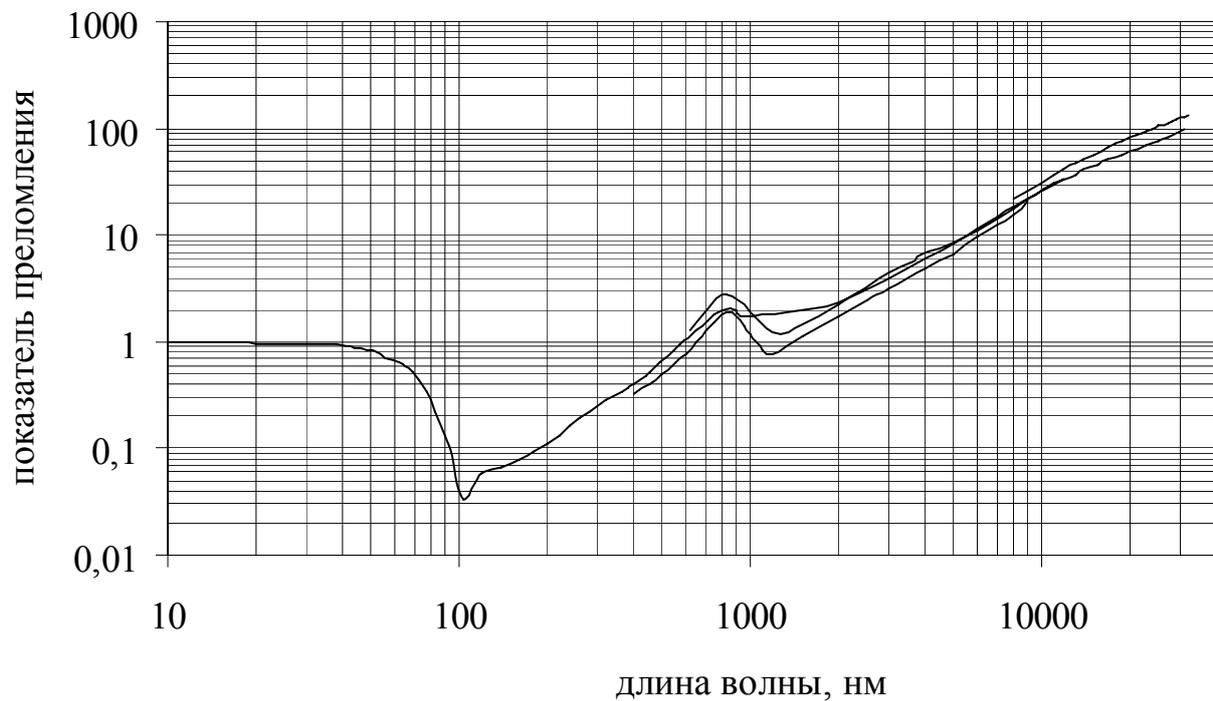
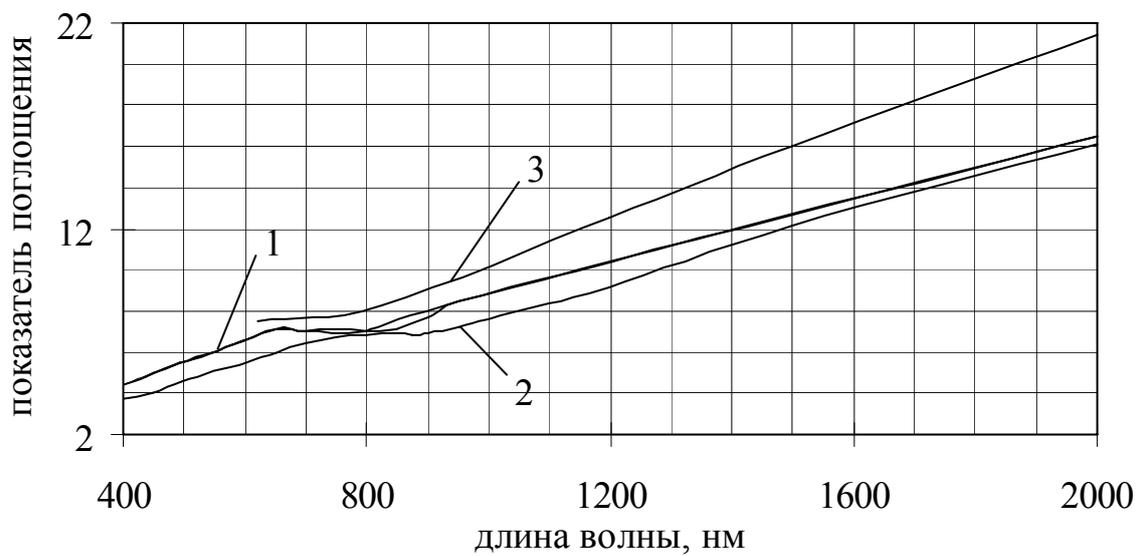
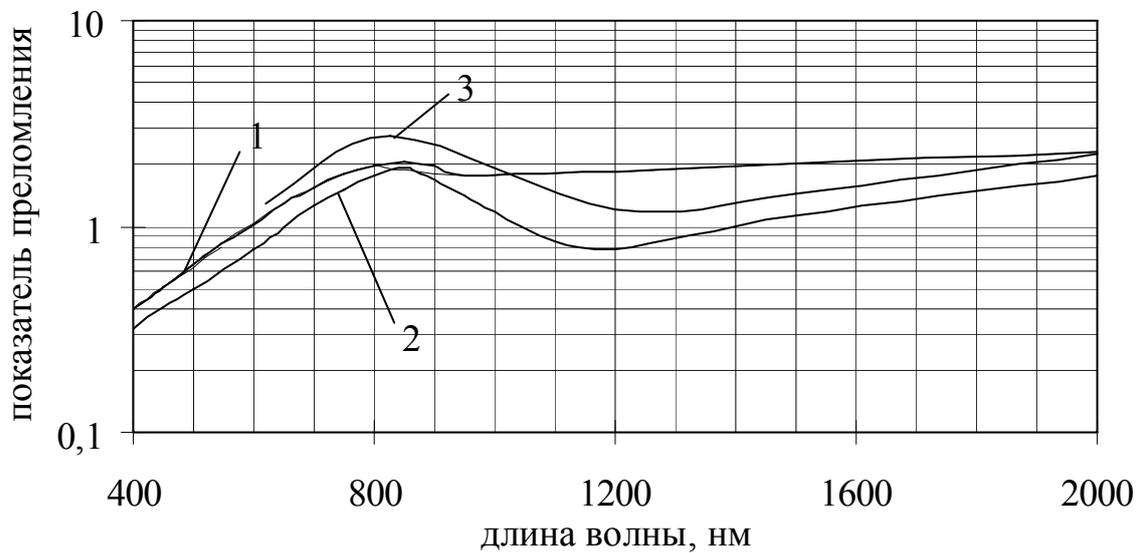
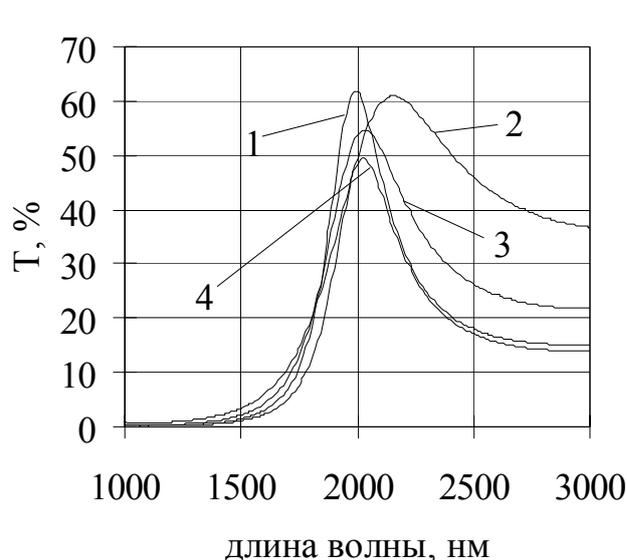


Рис. 1.4. Оптические постоянные алюминия.



- 1– напыленный [1, 2, 3, 4, 8]
- 2– напыленный [5, 26, 28]
- 3– напыленный [8, 25]

Рис. 1.5. Оптические постоянные алюминия.



1 – расчетная характеристика фильтра
 2 – 4 – характеристики фильтров при несоответствии оптических постоянных серебра (2–контроль по толщине; 3–по пропусканию; 4–по отражению)

Рис. 1.6а. Спектральные характеристики металлодиэлектрического фильтра полученного при различных методах контроля осаждения.

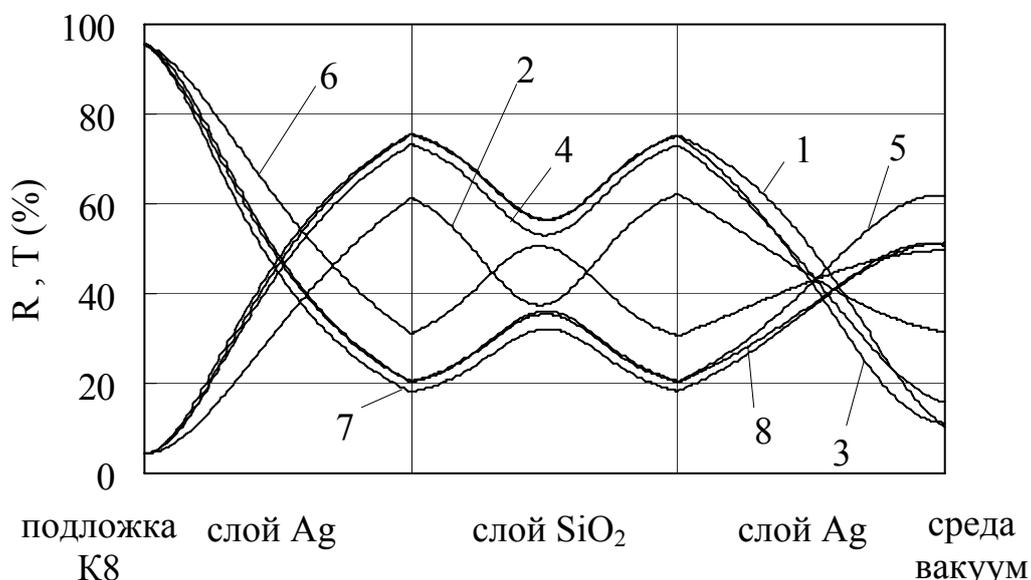


Рис. 1.6б. Расчетные зависимости изменения R (кривые 1 – 4) и T (кривые 5 – 8) при осаждении металлодиэлектрической системы Ag – SiO₂ – Ag.

При соответствии оптических постоянных серебра – 1, 5

При несоответствии оптических постоянных серебра:

2, 6 – с контролем осаждения по толщине (по массе)

3, 7 – с контролем осаждения по коэффициенту отражения

4, 8 – с контролем осаждения по коэффициенту пропускания

1.2. Влияние технологических факторов на оптические характеристики тонких металлических пленок

1.2.1. Зависимость коэффициента отражения от чистоты алюминия

Зеркала с нанесенными испарением в вакууме алюминиевыми покрытиями на лицевой поверхности широко применяются в оптических

приборах вследствие того, что они не тускнеют и имеют высокий коэффициент отражения. Эти свойства присущи не только испаренным алюминиевым пленкам; прочные зеркала с высоким коэффициентом отражения могут быть получены также путем электролитической полировки массивного металла. Однако для получения высокого отражения этим способом необходимо, чтобы металл высокую степень чистоты [28]. Алюминий, испаряемый налицевую поверхность зеркал, также должен обладать высокой степенью чистоты. В настоящее время для оптических целей выпускается алюминий с чистотой $99,999 \div 99,9999$ %. Для выяснения влияния чистоты алюминия на качество зеркал приведем данные по характеристикам зеркал с чистотой алюминия 99% и 99,99% [29]. Первый может содержать примесь Cu, Si, Mn, Fe, и Zn, причем количество примесей Si и Fe может достигать до 0,5% и выше. Алюминий с чистотой 99,99% и 99% испарялся одновременно в одной вакуумной установке из двух вольфрамовых испарителей, обеспечивавших попадание алюминия на каждую из подложек только из одного испарителя. Значения коэффициентов отражения покрытий, приведенные в таблице 1.1, измерены непосредственно после удаления зеркал из вакуумной камеры (I) и после 8-дневного воздействия атмосферы (II). Данные представляют собой средние значения коэффициента отражения трех зеркал. Изменение коэффициента отражения вызвано образованием оксидного слоя Al_2O_3 толщиной $3 \div 7$ нм.

Таблица 1.1.

Влияние чистоты алюминия на коэффициент отражения.

λ , нм	Al (99,99%)		Al (99%)	
	R, % (I)	R, % (II)	R, % (I)	R, % (II)
460	92	89,5	89	86
530	92	89,5	89	86
570	93	88,5	91	85
600	93	88,0	90	86

1.2.2. Скорость испарения и старение

Известно, что металлические пленки, полученные при малой скорости испарения, имеют тенденцию образовывать зернистую структуру, что приводит к увеличению электрического сопротивления и оптического поглощения пленок. Для таких металлов, как алюминий, который интенсивно поглощает остаточные газы в процессе испарения, малая скорость осаждения приводит также к увеличению загрязнения пленки металла оксидами.

Испарение алюминия всегда сопровождается уменьшением давления остаточного газа вследствие поглощения кислорода осаждающимся испаряемым веществом. В непрерывно откачиваемой системе с масляным диффузионным насосом без ловушек с жидким азотом атмосфера

остаточных газов все время пополняется парами воды, выделяющимися из стенок системы. Поэтому, кроме непосредственного поглощения молекул кислорода из атмосферы остаточных газов, алюминий может также реагировать с парами воды, образуя оксид алюминия и водород:



Водород, выделяющийся при этой реакции, откачивается диффузионным насосом быстрее, чем пары воды и давление в камере падает. Известно, что алюминий образует устойчивые нитриды, которые могут загрязнять пленки, если в атмосфере остаточных газов присутствует азот. Однако в литературе по электронно-графическим исследованиям пленок алюминия сообщений на этот счет нет; смеси нитридов и оксидов наблюдались, например, в случае титана, испаряемого в плохом вакууме. [30]

Скорость осаждения и вакуум, при которых изготавливаются пленки, имеют большое влияние на отражение в видимой и ультрафиолетовой области спектра. Однако, отражение в инфракрасной области спектра менее чувствительно к этим параметрам, чем отражение более коротких длин волн. Однако отсюда нельзя сделать вывод, что слой оксида алюминия и молекулярный газ, содержащийся в пленке, попавший туда во время осаждения, не влияют на отражение в инфракрасной области. Для этого необходимо достигнуть более высокого вакуума, чтобы можно было исключить влияние этих факторов. При давлении $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па, расчеты кинетической теории показывают, что $4 \cdot 10^{15}$ молекул газа ударяются в каждый квадратный сантиметр подложки в секунду. Это число является одной десятой частью атомов алюминия, которые ударяются в подложку и прилипают к ней при скорости осаждения 7 нм в секунду. Оксид алюминия может образовываться не только из-за взаимодействия атомов алюминия и небольшого количества кислорода содержащегося в вакуумной системе, но также из-за взаимодействия алюминия с парами воды, которые являются главной составляющей остаточного газа. Эксперименты по полевому излучению показывают, что осязательный оксидный слой появляется на чистом алюминии после выдержки в кислороде в течение одной минуты при давлении $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па. Есть один метод, который может уменьшить скорость роста оксидного слоя в течение осаждения, который заключается в использовании жидкого гелия перед осаждением. Но в инфракрасной области осязательной разницы коэффициента отражения алюминиевой пленки изготовленной с использованием жидкого гелия и без него не было. Поэтому наилучшим для алюминия остается быстрое осаждение при сверхвысоком вакууме. [31]

Опыт показывает, что отражение только что изготовленных зеркал всегда больше, чем отражение у зеркал, которые хранились или использовались в течение долгого времени. Таблица 1.2 показывает влияние старения на отражение двух алюминиевых зеркал толщиной 60–70 нм изготовленных в различных условиях. Большое изменение в

Таблица 1.2.

Влияние старения на отражение двух алюминиевых пленок изготовленных в различных условиях.

Условия осаждения	время осаждения 7 с., давление $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па			время осаждения 60 с., давление $2,6 \cdot 10^{-3}$ Па		
	30 мин.	1 месяц	1 год	30 мин.	1 месяц	1 год
Выдержка на воздухе						
Длина волны, нм	R, %			R, %		
220	91,5	90,1	89,9	83,5	74,2	72,5
360	92,4	92,0	91,9	91,0	90,3	90,1
550	91,6	91,4	91,4	90,9	90,6	90,5

отражении обусловлено окислением алюминия на воздухе и обычно рост оксидной пленки завершается в течение месяца. Оксидная пленка, формирующаяся на алюминии, который находится на воздухе в нормальных условиях, достигает от 4 до 10 нм. Такой тонкий окисный слой сильнее влияет на отражение алюминия в ультрафиолетовой области спектра, чем в длинноволновой.

Уменьшение отражения алюминия при старении вызывается не только формированием оксидного слоя на поверхности пленки, потому что этот слой достигает своей предельной толщины в 4–10 нм в течение одного месяца, тогда как отражение продолжает уменьшаться даже через три года после осаждения. Причиной этого эффекта может быть рассеивание на поверхности слоя. [32]

Алюминиевые пленки, изготовленные быстрым осаждением при низком давлении, имеют более компактную структуру и испытывают меньшее окисление на воздухе и меньшее изменение коэффициента отражения в ультрафиолетовой области, чем пленки, которые осаждались медленно. Значения отражения в таблице 1.2 были измерены после выдержки в воздухе при влажности от 30 до 60%. Если алюминиевые пленки хранились в эксикаторе изменение коэффициента отражения в ультрафиолетовой области незначительно. Для того чтобы изучить влияние длительного ультрафиолетового излучения на коэффициент отражения алюминия в ультрафиолетовой области, различные алюминиевые зеркала были помещены под 300-ваттную ртутно-кварцевую лампу на расстоянии 15 сантиметров на несколько суток. Результаты измеренного отражения на длине волны 220 нм до и после обработки ультрафиолетовым излучением представлены в таблице 1.3. Влияние длительного ультрафиолетового излучения на отражение алюминиевых пленок может быть объяснено увеличением скорости окисления. [33]

Увеличение скорости испарения алюминия уменьшает загрязнение покрытия оксидами и обеспечивает получение мелкозернистой пленки.

Алюминиевые покрытия, изготовленные последовательным испарением из нескольких испарителей, отличаются по оптическим

Таблица 1.3.

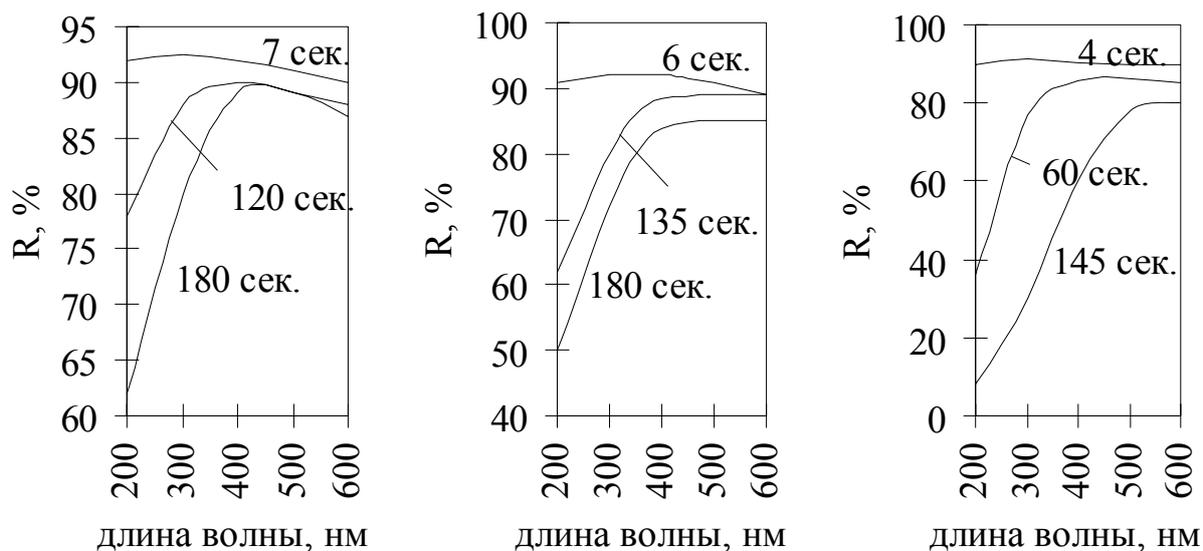
Влияние длительного ультрафиолетового облучения на отражение двух алюминиевых пленок осажденных в различных условиях.

Условия осаждения	время осаждения 6 с., давление $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па	Время осаждения 55 с., давление $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па
Отражение до обработки УФ излучением	91,5%	86,9%
Отражение после 24 часов обработки УФ излучением	90,3%	82,5%
Отражение после 68 часов обработки УФ излучением	89,5%	80,2%

свойствам от пленок, полученных непрерывным испарением из одного тигля: первые состоят из чередующихся слоев металла и оксида.

Пленки с высоким отражением в ультрафиолете (от 91,5% до 92,5%) могут быть изготовлены только быстрым осаждением при низком давлении. Такие пленки, к тому же, обладают большей плотностью, чем медленно осажденные и поэтому у них меньше окисление и очень малое уменьшение отражения при выдержке в воздухе. На 220 нм, где эффект старения резко выражен, зеркало изготовленное год назад все еще показывает около 90% отражения. Полупроцентное уменьшение отражения на длине волны 220 нм в период больше года может быть объяснено формированием тонкой оксидной пленки толщиной 2,5 – 3,0 нм. Такая тонкая оксидная пленка мало влияет на отражение алюминия в видимой области спектра (коэффициент отражения на длине волны 550 нм уменьшается менее чем 0,3%). [4]

Тот факт, что высокая скорость осаждения является более важным основным фактором для изготовления алюминиевых пленок с высоким коэффициентом отражения в ультрафиолете, иллюстрирует рисунок 1.7. Данные представлены для трех групп пленок осажденных при разных давлениях. Первая группа была осаждена при давлении $(1,3 \div 2,6) \cdot 10^{-3}$ Па, вторая при $(1,3 \div 2,6) \cdot 10^{-2}$ Па и третья при $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па. Все пленки были почти непрозрачны с толщиной 60 – 70 нм. Значения коэффициента отражения были измерены в пределах одного часа после изготовления покрытий. Кривые на рисунке 1.7 ясно показывают, что скорость осаждения больше влияет на отражение алюминия в ультрафиолете и существенно меньше влияет на его отражение в длинноволновом диапазоне. Увеличение времени осаждения для непрозрачных покрытий от 7 секунд (которое еще не является оптимальной скоростью осаждения) до 180 секунд при давлении $P = (1,3 \div 2,6) \cdot 10^{-3}$ Па, приводит к уменьшению коэффициента отражения на 220 нм от 91% до 62%, но на 550 нм отражение уменьшается только на 1%. Влияние скорости отжига даже больше, чем высокого давления. Однако пленки с очень высоким отражением в ультрафиолетовой области могут быть также изготовлены при $P = 1,3 \cdot 10^{-2}$ Па и даже при $P = 1,3 \cdot 10^{-1}$ Па. При больших давлениях,



а) $P=(1,3 \div 2,6) \cdot 10^{-3}$ Па б) $P=(1,3 \div 2,6) \cdot 10^{-2}$ Па в) $P=1,3 \cdot 10^{-1}$ Па
 Рис. 1.7. Влияние скорости осаждения на коэффициент отражения алюминиевых покрытий толщиной 60 – 70 нм.

однако, отражение в ультрафиолете уменьшается быстрее с увеличением времени осаждения, чем это происходит при более низких давлениях. Непрозрачное покрытие, осажденное за 180 секунд при давлении $P=1,3 \cdot 10^{-2}$ Па имеет коэффициент отражения 40% на 220 нм, а покрытие изготовленное при $P=1,3 \cdot 10^{-1}$ Па имеет коэффициент отражения 12% на той же длине волны. [4]

Следовательно, быстрое осаждение при низком давлении является более важным для изготовления алюминиевых пленок с высоким коэффициентом отражения в УФ, и только такие пленки могут быть использованы для определения оптических постоянных алюминия.

1.2.3. Температура подложки

Высокая скорость осаждения не единственный фактор, влияющий на коэффициент отражения напыленного алюминия. Температура подложки во время напыления, толщина пленки, и угол падения осаждаемого алюминия имеют также влияют на коэффициент отражения осажденных покрытий, особенно в коротковолновой области спектра.

Хотя большинство материалов содержащих алюминий имеют лучшую адгезию, если они осаждаются на разогретую подложку, с увеличением температуры подложки, размер зерна и отсюда неровность поверхности увеличивается, и это приводит к уменьшению зеркального отражения, особенно в коротковолновой области.

Таблица 1.4.

Влияние температуры подложки на оптические свойства пленок алюминия.

Температура, °С	30	50	100	150	200	30	50	100	150	200
длина волны, нм	R, %					A, %				
$P=1,3 \cdot 10^{-3}$ Па, скорость осаждения 30 нм/сек										
220	91,5	91,3	90,0	87,9	83,8	8,5	8,7	10,0	12,1	16,2
260	92,2	92,1	91,5	90,4	88,4	7,8	7,9	8,5	9,6	11,6
300	92,3	92,3	91,9	91,2	90,2	7,7	7,7	8,1	8,8	9,8
400	92,4	92,3	92,0	91,7	91,5	7,6	7,7	8,0	8,3	8,5
500	91,7	91,7	91,5	91,4	91,3	8,3	8,3	8,5	8,6	8,7
600	91,0	90,9	90,8	90,7	90,5	9,0	9,1	9,2	9,3	9,5
$P=1,3 \cdot 10^{-2}$ Па, скорость осаждения 10 нм/сек										
220	89,0	88,9	86,0	65,2	46,6	11,0	11,1	14,0	34,8	53,4
260	91,2	91,0	89,9	73,5	56,7	8,8	9,0	10,1	26,5	43,3
300	91,8	91,7	91,2	79,2	64,9	8,2	8,3	8,8	20,8	35,1
400	92,0	91,9	91,7	87,4	77,9	8,0	8,1	8,3	12,6	22,1
500	91,6	91,5	91,5	89,5	83,9	8,4	8,5	8,5	10,5	16,1
600	90,9	90,9	90,8	89,6	86,7	9,1	9,1	9,2	10,4	13,3

Таблица 1.4 показывает воздействие температуры подложки на отражение почти непрозрачных алюминиевых пленок осажденных при давлении $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Результаты приведены для двух групп пленок; одна осаждалась со скоростью около 30 нм/с, другая при 1,0 - 1,5 нм/с. [4] Для подложек с температурами выше 50°C коэффициент отражения всех пленок уменьшается с увеличением температуры. Воздействие более резко выражено в ультрафиолетовой области для пленок изготовленных с низкой скоростью осаждения. Для пленок изготовленных с высокой скоростью осаждения (примерно 30 нм/с) с увеличением температуры подложки с 30° до 200°C , коэффициент отражения снизился с 91,5% до 83,8% на длине волны 220 нм, а на длине волны 500 нм с 91,7 до 91,3% (табл. 1.4). Для пленок, изготовленных с более низкими скоростями осаждения, наблюдается большее снижение коэффициента отражения с увеличением температуры подложки. У пленок осажденных со скоростью 1 – 1,5 нм/с, на длине волны 220 нм коэффициент отражения уменьшается с 89% до 46,6%, а на длине волны 500 нм с 91,6% до 83,9%, при увеличении температуры подложки с 30° до 200°C (табл. 1.4). Из этого следует, что для получения алюминиевых пленок с высоким отражением в ультрафиолете, температура подложки во время осаждения не должна быть выше 50°C , и если необходима большая температура подложки для увеличения адгезии, пленки должны быть осаждены с максимально возможной скоростью.

Коэффициент отражения алюминиевых пленок на стекле снижается при уменьшении скорости испарения и при росте температуры подложки в

процессе нанесения. Известно, что при давлении газа $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па слои алюминия, медленно испаренные на стеклянные подложки, имеющие температуру выше 200°C , окрашены в проходящем свете в коричневатый цвет вместо серо-голубого характерного для нормальных алюминиевых покрытий. Несмотря на то, что такие пленки обнаруживают металлическое отражение, они неэлектропроводны до толщин ~ 20 нм. [34]

При повышении температуры подложки в процессе нанесения, получается более агломерированная структура, но отсутствие проводимости нельзя объяснить только агломерацией слоя. Когда алюминиевая пленка, нанесенная при нормальной температуре подложки, длительно нагревается до 200°C в вакууме, чтобы вызвать зернистость, слой остается проводящим, а его оптическое поглощение уменьшается лишь незначительно. Слои, медленно нанесенные на горячую подложку при средних давлениях, по-видимому, представляют собой смесь алюминия и его окиси. Наиболее вероятным является образование оксида на границах кристаллитов.

Сильное уменьшение коэффициента отражения и рост оптического поглощения алюминиевых пленок, полученных при низкой скорости испарения и высокой температуре подложки, показаны в таблице 1.5. В каждом из режимов два зеркала изготавливались при различных температурах подложки 15 и 200°C . Плохие оптические качества свойственны медленно нанесенным на горячие подложки слоям алюминия при использовании как ртутных (с вымораживанием паров Hg жидким воздухом), так и масляных диффузионных насосов. Влияние скорости испарения на оптические свойства алюминиевых слоев сильнее, чем влияние температуры подложки.

Из таблицы 1.5 видно, что даже при высокой температуре подложки $\sim 200^{\circ}\text{C}$ весьма большая скорость испарения давала слои с высоким коэффициентом отражения. Незначительное уменьшение отражения в этом случае вызвано, видимо, ростом зерен, а не загрязнением слоя оксидами, поскольку значения коэффициента отражения близки к коэффициенту отражения пленок, полученных при низких температурах подложки и

Таблица 1.5.

Влияние технологических параметров осаждения на оптические свойства пленок алюминия.

λ , нм			460	530	570	600	460	530	570	600
d, нм	$t_{\text{исп}}$, мин	$T_{\text{подл}}$, $^{\circ}\text{C}$	R, %				A, %			
55	10	15	73.5	76	76	77.5	26	23.5	23.5	22
55	10	200	44	59	63	65.5	54.5	39	35.5	33
44	10	15	64.5	67	68	68	32	30	29	29
44	10	200	56	60	61	62	39.5	36	35	34
50	<0.05	15	92	92	93	93	8	8	7	7
50	<0.05	200	88	87	84	87	12	13	16	13

отожженных в вакууме. [34]

1.2.4. Влияние неровностей поверхности

Хорошо известно, что для получения зеркально отражающей поверхности высота ее неровностей не должно превышать десятую долю длины волны падающего света. Световая волна, падающая на неполированную поверхность, например стекла, вначале встречается с ее возвышающимися частями, и возникающие при этом вторичные волны, отражаясь, распространяются в пространстве впереди волн отраженных от впадин поверхности. В результате фронт отраженной волны уже не является плоским, так как каждая точка поверхности действует как источник света, излучающий во всех направлениях. Можно показать, что разность хода волн, отраженных от выпуклостей и впадин поверхности, равна $2h\cos\theta$ где h – высота выпуклостей в направлении нормали к поверхности и θ – угол падения. Таким образом, разность хода уменьшается при увеличении угла падения и зеркальное отражение получается, когда угол падения настолько велик, что величина $2h\cos\theta$ становится малой долей длины волны. Эта доля всегда будет больше для меньших длин волн, и поэтому поверхность, диффузно отражающая в определенном спектральном участке, в то же время может отражать зеркально большие длины волн. Например, пленки олова, нанесенные на стекло при комнатной температуре, имеют грубую поверхность, рассеивающую падающий свет. Тонкие пленки олова, имеющие небольшие размеры зерен, более направленно отражают зеленый, желтый и красный свет, чем синий, так что при рассматривании в белом свете при нормальном падении заметно зеркальное отражение желтого света. Если такие покрытия рассматривать под большими углами падения света, цвет отраженного света — белый. [34]

Алюминиевые пленки, нанесенные испарением в хорошем вакууме ($1,3 \cdot 10^{-3}$ Па и менее) на полированную поверхность стекла, имеют в отличие от пленок олова сильное зеркальное отражение при толщинах 50 – 200 нм благодаря очень малому размеру зерна. Эта область толщин обычно используется для покрытия лицевой поверхности зеркал, так как она обеспечивает получение непрозрачных пленок с высоким коэффициентом отражения. Алюминиевые покрытия толще 1 мкм, если считать, что плотность равна плотности массивного металла, имеют грубую поверхностную структуру, что приводит к рассеянию падающего света. Предельная толщина, при которой покрытие начинает рассеивать свет, уменьшается при увеличении угла, под которым атомы испаряемого вещества поступают на приемную поверхность. Рассеивающие свет структуры алюминиевых покрытий при обычных применяемых толщинах возникают при скользящих углах падения паров. Это влияние угла

поступления паров на отражательные свойства алюминиевых пленок подробно описывается ниже. [35]

1.2.5. Влияние угла поступления паров

В таблице 1.6 показаны более полные данные описывающие влияние угла падения осаждаемого вещества на коэффициент отражения в видимой и ультрафиолетовой области спектра алюминиевых пленок при двух различных толщинах. [4] Приведены данные для двух групп пленок: одна изготавливалась в оптимальных условиях (скорость осаждения 30 нм/с, $P=1,3 \cdot 10^{-3}$ Па), а другая осаждалась в плохих условиях (скорость осаждения 1 нм/с, $P=1,3 \cdot 10^{-2}$ Па). В каждой группе рассматриваются пленки с толщиной 60 нм и 200 нм. Результаты показывают, что отражение уменьшается с увеличением угла поступления вещества, длины волны, толщины пленки и условий осаждения. Влияние слабо выражено в коротковолновой области для углов поступления паров до 30° , при больших углах это влияние становится более существенным, а для пленок изготовленных в плохих условиях и увеличивается во всех случаях с увеличением толщины пленки.

Таблица 1.6.

Влияние угла падения осаждаемого вещества на коэффициент отражения в видимой и ультрафиолетовой области спектра алюминиевых пленок.

угол поступления паров	0°		30°		60°	
	D~60нм	d~200нм	d~60нм	d~200нм	d~60нм	d~200нм
длина волны, нм						
$P=1,3 \cdot 10^{-3}$ Па, скорость осаждения 30 нм/сек						
220	91,5	91,2	91,4	90,7	90,4	75
260	92,2	91,9	92	91,7	91,5	82,2
300	92,3	92,2	92,1	91,8	91,8	85,5
400	92,4	92,2	92,1	91,9	91,8	88,5
500	91,7	91,7	91,6	91,6	91,5	90
600	91	90,9	90,9	90,8	90,8	89,6
$P=1,3 \cdot 10^{-2}$ Па, скорость осаждения 10 нм/сек						
220	83,5	65,9	82,6	60,5	81,4	31,8
260	88,4	74,1	88,2	70,5	87,6	42,5
300	90,5	79,5	90,4	75,9	89,6	53,2
400	91,3	86,8	91,3	83,2	91	72
500	91	88,8	90,1	87,5	90,8	81,3
600	90,3	89,3	90,2	89	90	84,7

1.2.6. Адгезия металлов к подложкам

Прочность сцепления нанесенных слоев со стеклом, металлами и другими подложками зависит не только от чистоты поверхности, но также от типа пары покрытие-подложка.

Структура наносимой пленки также зависит от межповерхностных сил на границе пленка-подложка. Когда эти силы меньше сил сцепления в пленке, она приобретает зернистую структуру; при обратном соотношении тех и других сил структура получается однородной. Таким образом, меры, принимаемые для получения прочных покрытий, одновременно влияют также на структуру а, следовательно, на физические свойства наносимых слоев. Совершенно иной тип сцепления с подложкой имеет место при нанесении пленки на шероховатую поверхность, который здесь не рассматривается.

Изменения в силах адгезии в случае различных пар пленка-подложка являлись предметом многих догадок и предположений, однако, вследствие недостаточности исследований и ограниченности методов получение желаемых результатов все еще является предметом “искусства”. Некоторые фактические данные об адгезионных свойствах некоторых пар металл–диэлектрик приведены ниже.

Метод оценки прочности связи нанесенной пленки с подложкой состоит в установлении того, может ли пленка быть отделена от подложки при отрывании от нее полоски липкого пластыря. Этот простой, но вполне эффективный метод впервые был применен Стронгом для испытания сцепляемости алюминиевых пленок со стеклом.

Металлы, склонные к образованию оксидов (такие как хром, алюминий и др.) обычно хорошо сцепляются, со стеклом, в то время как серебро и золото связываются со стеклом слабо и легко удаляются с его поверхности.

В таблице 1.7 приведены данные о сопротивлении отрыву для ряда металлических покрытий на стекле при отрыве посредством пленки коллодия, предварительно прижатой к металлу [36]; все покрытия наносились в вакууме, создаваемом масляным диффузионным насосом. Из данных этой таблицы следует, что в этих условиях родий слабо сцепляется со стеклом. Однако он дает прочное покрытие при нанесении в установках с ртутными диффузионными насосами, снабженными ловушками с жидким воздухом. Причина непрочности родиевых покрытий неясна; она может состоять как в наличии углеродородных покрытий на подложке (масляный диффузионный насос), так и в том, что в данной установке отсутствовала ловушка с жидким воздухом.

На адгезию металлических пленок так же оказывает влияние химическое состояние поверхности стекла, поскольку поверхность стекла непосредственно после изготовления покрыта нейтральным слоем гидроксида ОН, образовавшимся в результате реакции атмосферной влаги со свежей поверхностью стекла. Предполагается, что связывание металла происходит в результате его химической реакции с этим слоем. [37]

Таблица 1.7.

Сцепляемость металлических пленок со стеклом.

Элемент	Степень легкости отделения от стекла*	Элемент	Степень легкости отделения от стекла*
Be	—	Ag	±
Al	—	In	±
Cr	—	W	—
Mg	—	Pt	+
Ni	±	Au	+
Cu	±	Pb	—
Rh	+	U	—
Pd	+		

+ — легко; ± — в зависимости от определенных условий;
 — — не отделяется

Платиновые пленки, полученные катодным распылением в атмосфере кислорода, загрязнены PtO_2 и поэтому связываются со стеклом прочнее.

Слабая связь благородных металлов со стеклом легко обнаруживается по образованию трещин после воздействия на покрытие влажной атмосферы. Возможно, что пары воды проникают в пленку сквозь мелкие отверстия и, смачивая стекло, отделяют и отрывают слой от его поверхности. Известно, что золото хорошо сцепляется со стеклом, обладающим плохой смачиваемостью водой, а также что пленка золота, защищенная слоем окиси кремния (непроницаемой для воды при толщине ~10 нм), с трудом отрывается от стекла. [36] Связь пленок благородных металлов со стеклом также может быть улучшена путем предварительного нанесения на подложку окиси металла.

Обычно сцепление испаренных металлических пленок с металлической основой весьма сильно, и неудачи здесь всегда связаны с плохой очисткой. Наилучшей является ионная очистка, приводящая к удалению внешнего слоя с металлической поверхности. Можно думать, что теории сцепления, развитые для электрофизического осаждения металлов, применимы также к слоям, наносимым в вакууме, если только слои и подложки находятся в тесном контакте, и не разделены окисной пленкой.

Сцепление металлических пленок с пластифицированными пластмассами обычно оказывается плохим вследствие наличия тонкой разделяющей жидкой пленки пластификатора, выступившего из пластмассы. Так, например, сцепление испаренного алюминия с такими целлюлозными материалами, как бумага и ткани, получается весьма сильным, тогда как с целлофана они легко снимаются из-за присутствия на поверхности пленки глицеринового пластификатора. Удаление

пластификатора не всегда приводит к улучшению сцепления. В частности, алюминиевая пленка умеренно сцепляется как с пластифицированным, так и с депластифицированным хлорвинилом. Металлы, склонные к окислению, также хорошо сцепляются с пластмассами, но в этом случае сцепляемость их заметно меньше, чем со стеклом и с металлами.

РАЗДЕЛ 2. Определение оптических постоянных металлических слоев и расчет интерференционных систем содержащих слои металлов

2.1. Расчет оптических характеристик тонкопленочных систем содержащих слои металлов

В настоящее время наиболее удовлетворительным образом оптика тонких пленок может быть построена на основе электромагнитной теории, которая обеспечивает относительно полный и последовательный учет интерференционных и поляризационных эффектов в многослойных пленочных системах всех типов. [38]

На рис. 2.1 схематически изображена многослойная система, состоящая из $\ell-1$ слоев, с обеих сторон, к которым примыкают полубесконечные среды. Оптические свойства каждого слоя полностью описываются комплексным показателем преломления $\tilde{n} = n - ik$ (где n и k – главные показатели преломления и поглощения соответственно) и геометрической толщиной d . Предполагается, что показатель преломления n_0 среды, со стороны которой происходит падение света, является вещественной величиной. Среда, в которую свет распространяется, характеризуется комплексным показателем преломления $\tilde{n}_\ell = n_\ell - ik_\ell$, где n_ℓ и k_ℓ – главные показатели преломления и поглощения подложки. Падающий свет описывается плоской линейно-поляризованной монохроматической волной бесконечной ширины (по сравнению с длиной волны λ), что исключает дифракционные эффекты.

Для расчета оптических свойств тонких пленок наиболее удобным является матричный метод описания оптических свойств многослойных интерференционных систем. В этой системе записи система может быть

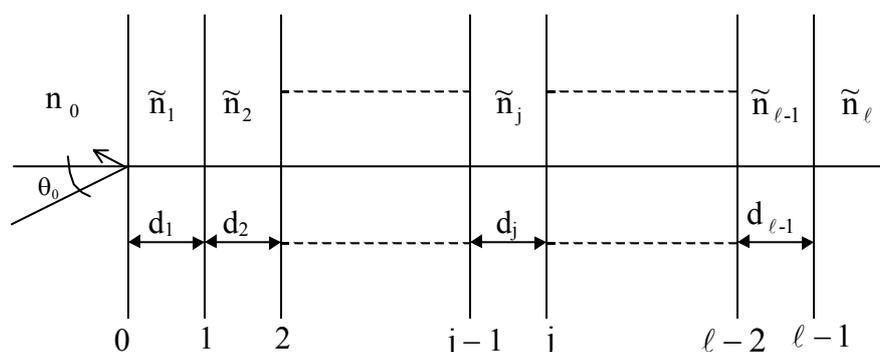


Рис. 2.1. Схема многослойной пленочной системы.

описана произведением матриц содержащихся слоев. В этом случае компоненты E , H вектора в среде, из которой падает свет, связаны с компонентами E , H вектора в среде, в которую свет распространяется, соотношением

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = [M_1][M_2][M_3] \dots [M_{\ell-1}] \begin{bmatrix} E_{\ell-1} \\ H_{\ell-1} \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} E_{\ell-1} \\ H_{\ell-1} \end{bmatrix}, \text{ здесь (1)}$$

M_1 – $M_{\ell-1}$ – матрицы интерференции слоев многослойной системы вида:

$$M_j = \begin{bmatrix} m_{11} & i m_{12} \\ i m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \text{ где}$$

$$m_{11} = \cos \frac{2\pi n d}{\lambda}, \quad m_{12} = \frac{1}{n} \sin \frac{2\pi n d}{\lambda}, \quad m_{22} = \cos \frac{2\pi n d}{\lambda}, \quad m_{21} = n \sin \frac{2\pi n d}{\lambda}.$$

Учитывая граничные условия на нулевой и $(\ell-1)$ – границах раздела:

$$E_0 = E_{0^-}^{(t)} + E_{0^-}^{(r)}; \quad E_{(\ell-1)} = E_{(\ell-1)^+}^{(t)} = 1 \quad (2)$$

$$H_0 = n_0 E_{0^-}^{(t)} - n_0 E_{0^-}^{(r)}; \quad H_{(\ell-1)} = n_{\ell} E_{(\ell-1)^+}^{(t)} = n_{\ell},$$

выражение (1) можно записать в виде

$$\begin{bmatrix} E_{0^-}^{(t)} + E_{0^-}^{(r)} \\ n_0 E_{0^-}^{(t)} - n_0 E_{0^-}^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & i m_{12} \\ i m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_{\ell} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Амплитудные коэффициенты отражения и пропускания интерференционной системы равны:

$$r_{0^-} = \frac{E_{0^-}^{(r)}}{E_{0^-}^{(t)}}; \quad t_{0^-} = \frac{1}{E_{0^-}^{(t)}}. \quad (4)$$

Из (4) вытекают следующие определения энергетических коэффициентов отражения и пропускания

$$R = \left| \frac{E_{0^-}^{(r)}}{E_{0^-}^{(t)}} \right|^2; \quad T = \frac{\operatorname{Re} [\tilde{n}_{\ell}]}{n_0} \left| \frac{E_{m^+}^{(t)}}{E_{0^-}^{(t)}} \right|^2. \quad (5)$$

Если в системе нет поглощения, то $T+R=1$, при наличии поглощающих слоев это выражение принимает вид: $R+T+\Sigma A_j=1$, где A_j – коэффициент поглощения в j -том слое (в дальнейшем будет использоваться коэффициент поглощения $A=\Sigma A_j$).

Второй важный набор величин, необходимых при расчете оптических свойств тонких пленок, – относительные изменения фазы, играющие существенную роль в интерферометрии и в задачах проектирования многослойных фильтров. Изменение фазы при отражении определяется как разность фаз отраженной и падающей волн на границе раздела двух сред,

$$\rho = \arg \left[\frac{E_{0^-}^{(r)}}{E_{0^-}^{(t)}} \right]^2 . \quad (6)$$

Аналогично изменение фазы при прохождении определяется

$$\tau = \arg \left[\frac{1}{E_{0^-}^{(t)}} \right]^2 . \quad (7)$$

Приведенные выше выражения (3) могут быть использованы для расчетов не поглощающей пленочной системы. При наличии поглощающих пленок элементы матриц становятся комплексными числами. Тогда матрица интерференции слоя принимает вид:

$$\begin{bmatrix} \tilde{m}_{11} & i \tilde{m}_{12} \\ i \tilde{m}_{21} & \tilde{m}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\varphi} & \frac{i}{\tilde{n}} \sin \tilde{\varphi} \\ i \tilde{n} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\varphi} \end{bmatrix} , \text{ где} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{m}_{km} &= m_{km} + im'_{km} - \text{комплексный элемент матрицы, где } k, m = 1, 2. \\ \tilde{\varphi} &= \varphi - i\varphi' - \text{фазовая толщина слоя, где} \\ \varphi &= 2\pi n d / \lambda ; \quad \varphi' = 2\pi k d / \lambda . \end{aligned} \quad (9)$$

Для упрощения последующих расчетов проведем разделение действительных и мнимых компонент матричных элементов, что позволит избавиться от комплексных значений при вычислениях. При таком представлении

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos \varphi \operatorname{ch} \varphi' ; \quad m_{22} = \cos \varphi \operatorname{ch} \varphi' \\ m'_{11} &= \sin \varphi \operatorname{sh} \varphi' ; \quad m'_{22} = \sin \varphi \operatorname{sh} \varphi' \\ m_{12} &= \frac{n \sin \varphi \operatorname{ch} \varphi' + k \cos \varphi \operatorname{sh} \varphi'}{n^2 + k^2} \\ m'_{12} &= \frac{k \sin \varphi \operatorname{ch} \varphi' - n \cos \varphi \operatorname{sh} \varphi'}{n^2 + k^2} \\ m_{21} &= n \sin \varphi \operatorname{ch} \varphi' - k \cos \varphi \operatorname{sh} \varphi' \\ m'_{21} &= -k \sin \varphi \operatorname{ch} \varphi' - n \cos \varphi \operatorname{sh} \varphi' \end{aligned} \quad (10)$$

Поскольку в ходе измерений определяются энергетические коэффициенты отражения и пропускания, то формулы для амплитудных коэффициентов отражения и пропускания опустим. Энергетические коэффициенты отражения и пропускания определяются по следующим формулам:

$$R = \frac{V^2 + Z^2}{X^2 + Y^2} ; \quad T = \frac{4n_0 n_\ell}{X^2 + Y^2} , \text{ где} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V &= n_0 m_{11} + m'_{21} - n_\ell (n_0 m'_{12} + m_{22}) + k_\ell (n_0 m_{12} - m'_{22}) \\ Z &= n_0 m'_{11} - m_{21} + n_\ell (n_0 m_{12} - m'_{22}) + k_\ell (n_0 m'_{12} + m_{22}) \\ X &= n_0 m_{11} - m'_{21} - n_\ell (n_0 m'_{12} - m_{22}) + k_\ell (n_0 m_{12} + m'_{22}) \\ Y &= n_0 m'_{11} + m_{21} + n_\ell (n_0 m_{12} + m'_{22}) + k_\ell (n_0 m'_{12} - m_{22}) \end{aligned}$$

Для расчета многослойных систем удобно использовать следующие формулы последовательного перемножения матриц слоев интерференционной системы (при $j=2 \dots \ell-1$):

$$m_{11} = m_{11}(j-1) m_{11}(j) - m'_{11}(j-1) m'_{11}(j) - m_{12}(j-1) m_{21}(j) + m'_{12}(j-1) m'_{21}(j)$$

$$m_{22} = m_{22}(j-1) m_{22}(j) - m'_{22}(j-1) m'_{22}(j) - m_{21}(j-1) m_{12}(j) + m'_{21}(j-1) m'_{12}(j)$$

$$m_{12} = m_{11}(j-1) m_{12}(j) - m'_{11}(j-1) m'_{12}(j) + m_{12}(j-1) m_{22}(j) - m'_{12}(j-1) m'_{22}(j)$$

$$m_{21} = m_{22}(j-1) m_{21}(j) - m'_{22}(j-1) m'_{21}(j) + m_{21}(j-1) m_{11}(j) - m'_{21}(j-1) m'_{11}(j)$$

$$m'_{11} = m_{11}(j-1) m'_{11}(j) + m'_{11}(j-1) m_{11}(j) - m_{12}(j-1) m'_{21}(j) - m'_{12}(j-1) m_{21}(j)$$

$$m'_{22} = m_{22}(j-1) m'_{22}(j) + m'_{22}(j-1) m_{22}(j) - m_{21}(j-1) m'_{12}(j) - m'_{21}(j-1) m_{12}(j)$$

$$m'_{12} = m_{11}(j-1) m'_{12}(j) + m'_{11}(j-1) m_{12}(j) + m_{12}(j-1) m'_{22}(j) + m'_{12}(j-1) m_{22}(j)$$

$$m'_{21} = m_{22}(j-1) m'_{21}(j) + m'_{22}(j-1) m_{21}(j) + m_{21}(j-1) m'_{11}(j) + m'_{21}(j-1) m_{11}(j)$$

При рассмотрении наклонного падения света на оптические системы, содержащие слои металлов, следует учитывать, что ввиду комплексности показателя преломления угол преломления тоже становится комплексным и лишь формально может рассматриваться как направление луча во второй среде. При этом физический интерес представляет соотношение между действительным углом падения и действительным углом преломления. Под последним понимают угол между нормалью к плоскости постоянной фазы и нормалью к поверхности металла. Поскольку плоскость постоянной амплитуды параллельна границе раздела, то действительный угол преломления равен углу χ между плоскостью постоянной фазы и плоскостью постоянной амплитуды (рис. 2.2).

Тогда нетрудно определить косинус действительного угла преломления



Рис. 2.2

$$\cos \chi = \frac{\sqrt{n^2 - k^2 - \sin^2 \theta} + \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 k^2}}{\sqrt{n^2 - k^2 + \sin^2 \theta} + \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 k^2}} \quad (12)$$

а, следовательно, синус этого угла

$$\sin \chi = \frac{\sqrt{2} \sin \theta}{\sqrt{n^2 - k^2 + \sin^2 \theta} + \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 k^2}}. \quad (13)$$

Из выражений (12, 13) следует, что показатель преломления можно представить в виде:

$$n_\theta = \frac{\sin \theta}{\sin \chi} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{n^2 - k^2 + \sin^2 \theta} + \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 k^2} \quad (14)$$

и соответственно выражение для показателя поглощения имеет вид:

$$k_\theta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{-n^2 + k^2 + \sin^2 \theta} + \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 k^2} \quad (15)$$

Полагая в уравнениях (14, 15) $\theta = 0$, то есть, рассматривая нормальное падение лучей видим, что $(n_\theta)_{\theta=0} = n$, $(k_\theta)_{\theta=0} = k$, то есть главные показатели преломления и поглощения являются частными значениями n_θ и k_θ , определяющими скорость распространения и степень поглощения при произвольном направлении распространения.

Таким образом, n_θ и k_θ зависят от угла падения, но инвариантными при этом остаются величины определяемые по формулам Кеттелера [39]:

$$\left. \begin{aligned} n_\theta^2 - k_\theta^2 &= n^2 - k^2 \\ n_\theta k_\theta \cos \chi &= nk \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

Если рассматривать показатели преломления и поглощения как функции угла χ между плоскостью равных фаз и плоскостью равных амплитуд $n(\chi)$ и $k(\chi)$, то, подставляя в соотношения (16) $n_\theta = n(\chi)$ и $k_\theta = \frac{k(\chi)}{\cos \chi}$ будем иметь [40]:

$$\left. \begin{aligned} n^2(\chi) - \frac{k^2(\chi)}{\cos^2 \chi} &= n^2(0) - k^2(0) = n^2 - k^2 \\ n(\chi) k(\chi) &= n(0) k(0) = nk \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

При наклонном падении света происходит затухание не только вдоль нормали к волне, но и в самой плоскости волны. Затухание вдоль волны будет тем больше, чем больше угол χ , то есть чем больше угол падения θ . Таким образом, затухание вдоль поверхности волны определяется коэффициентом $k_\theta \sin \chi$, тогда как затухание по нормали к волне пропорционально $\cos \chi$ и определяется коэффициентом $k_\theta \cos \chi$.

В таблице 2.1 приведены зависимости n_θ и k_θ от угла падения и оптических характеристик n , k для различных металлов рассчитанные по формулам (14, 15). Из таблицы 2.1 видно, что для железа и платины

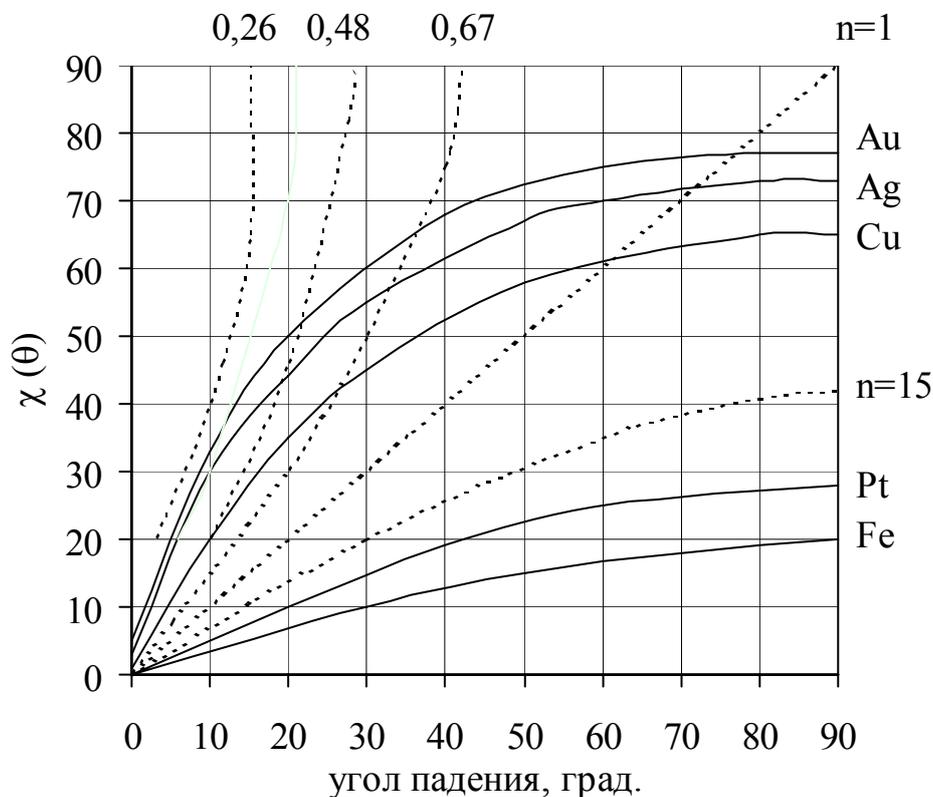
Таблица 2.1.

Зависимость оптических постоянных металлов от угла падения.

Металл	n	k	n_θ							
			$\theta=10^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=70^\circ$	$\theta=80^\circ$
Железо	3,03	1,78	3,04	3,04	3,04	3,05	3,06	3,06	3,07	3,07
Платина	1,99	2,03	2,00	2,01	2,02	2,04	2,07	2,09	2,11	2,12
Медь	0,48	2,61	0,51	0,59	0,69	0,79	0,89	0,98	1,04	1,08
Серебро	0,35	1,79	0,39	0,49	0,60	0,72	0,83	0,92	0,99	1,03
Золото	0,26	2,16	0,31	0,43	0,56	0,69	0,80	0,90	0,97	1,01

изменения n_θ от угла падения хотя и заметны, но не слишком значительны. Следовательно, в этом случае приближенно справедлив обычный закон Снеллиуса. В случае же меди, серебра и золота изменения n_θ от угла падения гораздо значительнее, причем у этих металлов главный показатель преломления меньше единицы.

Зная n_θ для указанных веществ, можно из закона преломления вычислить действительные углы преломления χ , соответствующие различным углам падения θ . Строя на одном графике углы ψ (по закону Снеллиуса) и χ как функцию угла падения можно наглядно определить отклонения от закона Снеллиуса (рис. 2.3). Таким образом, каждому показателю преломления соответствуют две кривые – сплошная определяет действительное поведение металла; пунктирная представляет соотношения для прозрачного тела с таким же главным показателем

Рис. 2.3. Зависимость истинного угла падения χ от угла падения.

преломления. Кривые для железа и платины практически совпадают, так что пунктирные кривые для них не показаны.

Прямая закона Снеллиуса для $n=1$, соответствующая $\theta=\psi$ пересекает сплошные кривые для меди, серебра и золота следовательно для этих металлов существует отличный от нуля угол падения, при котором угол преломления равен углу падения, то есть луч в двух случаях проходит через металл не испытывая преломления [41]. Значение этого замечательного угла можно определить по формуле:

$$\sin^2 \theta = 1 + \frac{n^2 k^2}{n^2 - k^2 - 1}. \quad (18)$$

Подставляя сюда значения n и k для рассматриваемых металлов, находим соответствующие углы падения $\theta_{Cu}=62.9^\circ$, $\theta_{Al}=71.9^\circ$, $\theta_{Au}=76.2^\circ$. Из этого следует, что для металлов с $n < 1$ явления полного внутреннего отражения не возникает, так как для них угол преломления не достигает значения $\chi=90^\circ$.

Приведенные выше соотношения для расчета оптических характеристик тонкопленочных систем (11) можно использовать для расчетов и при наклонном падении света, если ввести представления об эффективном показателе преломления \hat{n} и эффективной фазовой толщине $\hat{\phi}$. Эти понятия не имеют физического смысла, и их введение в определенной степени подменяет строгое последовательное рассмотрение реальной структуры электромагнитного поля в многослойной пленочной системе. Однако их использование приводит к математически корректным результатам, а также полезно в том отношении, что позволяет ввести сравнительно простую форму записи и сформировать одну компактную систему уравнений, к решению которой сводится расчет любых свойств тонких пленок. При наклонном падении необходимо учитывать также направление колебаний векторов поля. При этом следует рассматривать только два независимых направления, поскольку все остальные в силу принципа суперпозиции можно представить как линейную комбинацию этих двух. Будем рассматривать: 1) p -поляризацию, при которой вектор напряженности электрического поля находится в плоскости падения и 2) s -поляризацию, при которой это вектор расположен перпендикулярно плоскости падения.

Пусть угол падения равен θ_0 . Тогда косинус угла падения на каждую границу раздела между слоями многослойной системы определяется по следующей формуле:

$$\cos \theta_j = \sqrt{1 - \frac{n_0^2 \sin^2 \theta_0}{\tilde{n}_j^2}}. \quad (19)$$

Исходя из представления об эффективном показателе преломления \hat{n} и эффективной фазовой толщине $\hat{\phi}$, вводятся следующие соотношения:

$$\hat{n}_j = \tilde{n}_j \cos \theta_j \quad - \text{ для } s\text{-поляризации,} \quad (20)$$

$$\hat{n}_j = \frac{\tilde{n}_j}{\cos\theta_j} \quad - \text{ для } p\text{-поляризации и} \quad (21)$$

$$\hat{\phi}_j = \tilde{\phi}_j \cos\theta_j \quad - \text{ как для } s\text{-, так и для } p\text{-поляризации.} \quad (22)$$

Отметим, что если θ_j превышает значение критического угла для случая вещественного показателя преломления, то величина $\cos\theta_j$ и, следовательно, \hat{n} и $\hat{\phi}$ будут чисто мнимыми. Это – случай слоя с нарушенным полным внутренним отражением, который может рассматриваться в рамках той же формальной схемы.

При этом выражение для $\cos\theta_j$ имеет следующий вид:

$$\cos\theta_j = \sqrt{\frac{\sqrt{p_j^2 + q_j^2} + p_j}{2}} - i\sqrt{\frac{\sqrt{p_j^2 + q_j^2} - p_j}{2}}, \quad \text{где} \quad (23)$$

$$p_j = 1 + (k_j^2 - n_j^2) \left(\frac{n_0 \sin\theta_0}{k_j^2 + n_j^2} \right)^2, \quad q_j = -2n_j k_j \left(\frac{n_0 \sin\theta_0}{k_j^2 + n_j^2} \right)^2.$$

Раскладывая приведенные выражения для \hat{n} и $\hat{\phi}$ на действительную и мнимую части можно подставить их значения в приведенные выше выражения для элементов матриц интерференции слоев и формулы R, T.

Пример программы расчета оптических свойств многослойных интерференционных покрытий приведен в приложении 1. В программе рассчитывается энергетический коэффициент отражения R, энергетический коэффициент пропускания T и коэффициент поглощения A, а также изменение фазы при отражении ρ и пропускании τ . Расчет этих величин может производиться в зависимости как от длины волны, так и от оптических постоянных любого слоя (n , k и d). Также предусмотрен расчет оптических постоянных при наклонном падении света (для s - и p -поляризации) с возможностью рассмотрения выходных данных как функций от угла падения. В программу может вводиться как геометрическая d , так и оптическая толщина слоев nd/λ_0 (где λ_0 – центральная длина волны). Для расчетов покрытий имеющих высокую дисперсию предусмотрена возможность учета линейной дисперсии главного показателя преломления и главного показателя поглощения слоев.

Данные расчетов представляются в графическом и табличном виде. Для упрощения последующей обработки результатов расчетов данные расчетов сохраняются в формате совместимом с Microsoft Excel. Программа имеет простой dos интерфейс позволяющий задавать и изменять как конструкцию системы, так и параметры расчета. Конструкции систем могут быть сохранены или вызваны из файла. Результаты расчетов помимо сохранения в *.dif файле и естественно просмотра на мониторе могут быть выведены на печать в виде таблицы или графика (при использовании дополнительной программы печати).

Для использования данной программы достаточно перенести ее текст в среду Qbasic, или компилировать с помощью turbobasic v1.0. Однако по приведенным выше формулам расчет можно проводить и в Microsoft Excel. Пример расчета для трехслойного интерференционного покрытия приведен в приложении 2.

Однако здесь следует осветить некоторые специальные вопросы, возникающие при практическом применении теории тонких пленок. Так для некоторых применений в случае наклонного падения света желательно знать полные относительные интенсивности падающего, отраженного и прошедшего пучков света. Коэффициент отражения при этом будет одним и тем же независимо от того, определен ли он через полные поля или через их тангенциальные компоненты. Тогда как коэффициенты пропускания будут различаться, если показатели преломления полубесконечных сред по обе стороны многослойной системы не одинаковы. Если ввести для коэффициента пропускания, выраженного через полные поля, обозначение T' , то для любого состояния поляризации в практически важном случае правой полубесконечной среды (рис 2.1) с вещественным показателем преломления n_ℓ , можно воспользоваться следующими формулами [38]:

$$T' = \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_\ell} T = \frac{n_\ell \cos \theta_0}{\sqrt{n_\ell^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0}} T . \quad (24)$$

В большинстве практических случаев наклонного падения плоскость поляризации света не совпадает с плоскостью падения и не перпендикулярна ей. Тогда необходимо рассчитывать интенсивности отраженного и прошедшего лучей для s - и p -поляризаций, а затем уже по ним определять истинные коэффициенты отражения и пропускания. Представляют интерес следующие случаи:

1) плоскость поляризации падающего света расположена под углом δ к плоскости падения, при этом $R = R_p \cos^2 \delta + R_s \sin^2 \delta$, (25)

$$T = T_p \cos^2 \delta + T_s \sin^2 \delta . \quad (26)$$

2) падающий свет эллиптически поляризован; относительные амплитуды s - и p -компонент составляют ϖ_p и ϖ_s , тогда

$$R = \frac{\varpi_p^2 R_p + \varpi_s^2 R_s}{\varpi_p^2 + \varpi_s^2} , \quad T = \frac{\varpi_p^2 T_p + \varpi_s^2 T_s}{\varpi_p^2 + \varpi_s^2} . \quad (27)$$

2.2. Методы контроля оптических постоянных и толщины пленок во время осаждения слоя

В настоящее время для контроля толщины оптических покрытий в процессе их осаждения в вакууме используются различные методы. Наиболее широко применяются два метода контроля – радиочастотный (по изменению массы) и фотометрический (по изменению коэффициента пропускания или отражения).

2.2.1. Рентгенографические методы.

Насколько известно, наиболее точные измерения толщины для тонких металлических пленок можно, провести, используя рентгеновские лучи.

Наиболее ранним методом измерения толщины был метод поглощения, который основан на измерении ослабления в пленке соответствующего пучка рентгеновских лучей, дифрагированных кристаллической подложкой. Имеются серьезные ограничения этого метода, так как на измерение интенсивности оказывают влияние характеристики пленки, такие как: размер кристаллитов, напряжения и предпочтительная ориентация. Он может быть применен тогда, когда подложка содержит значительное количество элементов присутствующих в пленке.

Видоизмененный метод поглощения заключается в измерении ослабления в пленке характеристического излучения материала подложки. Ослабление для данной длины волны является экспоненциальной функцией толщины пленки и зависит от коэффициента объемного поглощения материала пленки. Он не подвержен влиянию не основных примесей. Интервал измеряемых толщин зависит от энергии излучения подложки и коэффициента поглощения пленки. Обычно он используется для толстых однокомпонентных пленок (от 100 нм до 1000 мкм) с точностью $\pm 5\%$. Этот метод не обладает избирательностью в том смысле, что может быть измерена любая пленка, если ее подложка имеет характеристическое излучение, измеряемое после ослабления пленкой.

В случае поликристаллических пленок можно использовать интерференционные полосы, получаемые при отражении рентгеновских лучей при почти скользящем падении [42]. Этот метод можно использовать только в случае относительно тонких пленок ($d < 60$ нм), но зато он дает точность до 1% и нечувствителен к кристаллической структуре пленок, но зависит от качества поверхности и от изменения толщины пленки вдоль ее длины.

Другой метод основан на дифракции рентгеновских лучей. Если металлическая пленка является кристаллической и хорошо ориентирована, то вокруг дифракционного пятна, соответствующего плоскостям, параллельным подложке, появляется система полос с очень малой интенсивностью, меняющейся как $(\sin x/x)^2$ [43, 44]. Этот метод очень чувствителен к ориентации и размеру кристаллитов и к вариациям

толщины, поэтому им можно пользоваться только в случае высококачественных пленок. Если тщательно приготовленная металлическая пленка представляет собой плоскопараллельную пластинку, то ее толщина может быть определена с точностью до $\pm 0,1$ нм.

Метод эмиссии рентгеновских лучей интенсивно используется с момента его первого применения. Материал пленки возбуждается источником высокой энергии, таким как: рентгеновские лучи, пучок электронов или радиоактивный источник. При этом измеряется интенсивность селективной длины волны характеристического излучения, эмиттируемого материалом пленки. Интенсивность эмиттируемого излучения прямо пропорциональна толщине для тонких пленок и растет экспоненциально для более толстых пленок, достигая максимальной величины.

Метод применяется более широко, чем метод поглощения, так как требует одного условия, чтобы материал подложки не содержал ни одного элемента, имеющегося в пленке. Могут быть также измерены многокомпонентные пленки. В общем, значения толщин, подсчитанные из рентгеновских данных, используются для целей анализа состава пленок. Метод ограниченно селективен, так как элементы легче, чем $Z=11(\text{Na})$ не могут быть легко определены. Элементы от $Z=11$ до 22 (от Na до Ti) требуют использования вакуумных или гелиевых спектрометров. Метод применим для пленок толщиной от 2 до 1000 нм с площадью от 0,2 до 5 см². При этом может быть достигнута точность $\pm 2\%$.

Рентгенографический метод требует использования приборов, дорогостоящих, но легких в управлении. Кроме того, необходимо иметь эталоны, которые должны быть прокалиброваны другими методами измерения толщины. Полученные данные являются усредненными по измеряемой площади. Если эталоны для применяемого типа материала пленки имеются, то измерения проводятся достаточно быстро. Этот метод является одним из лучших неразрушающих методов для непрозрачных пленок.

Толщина пленки может быть также измерена посредством оценки отраженных от пленки β -частиц, эмиттируемых радиоактивным источником. Интенсивность отраженных частиц зависит от толщины пленки и увеличивается с атомным номером материала пленки, который должен быть отличен от атомного номера материала подложки. Метод этот не дорогостоящий, очень простой, быстрый и неразрушающий. Он применим как для непрозрачных пленок, так и для прозрачных пленок. При соответствующем выборе источника может быть получена точность измерения толщины $\pm 5\%$ для пленок от 100 нм до 50 мкм с площадью ≈ 1 см². Этот метод наиболее пригоден для осуществления контроля, при котором систематически измеряются определенный состав пленка – подложка и требуются меньшие точности, чем в лабораторных исследованиях.

2.2.2. Радиочастотный метод контроля толщины слоя.

Радиочастотный метод основан на измерении изменения частоты колебаний кварцевого кристалла при осаждении на нем пленки напыляемого вещества. [45]

Как известно, изменение частоты колебаний кварцевого кристалла пропорционально изменению его массы. Следовательно, если известна масса осаждаемой пленки, ее плотность и площадь на которую она осаждается, тогда ее толщина легко определяется. Однако допущение, что плотность пленки постоянна по мере ее роста справедливо для металлических пленок, имеющих толщину более 20-30 нм, а при меньших толщинах плотность пленки является функцией толщины.

Выбор рабочей частоты зависит от диапазона толщин измеряемых пленок. Если требуется измерять очень тонкие пленки с высокой чувствительностью, то выбирают высокую рабочую частоту. Если же требуется проводить контроль осаждения в большом диапазоне измеряемых толщин, требующий широкой области линейной зависимости изменения частоты от толщины напыляемой пленки, то выбирают относительно низкую рабочую частоту. Чувствительность метода в основном определяется стабильностью частоты измерительного кварцевого генератора и эталона частоты. Обычно чувствительность кварцевого резонатора $\Delta m/\Delta f = 10^{-7}$ г/кГц. Используемые приборы при рабочей частоте 20 МГц дают возможность определить сдвиг частоты на 2 Гц, что позволяет измерять приращение массы 10^{-10} г/см.

Поскольку кристаллы кварца чувствительны к изменениям температуры, а при напылении испарители выделяют значительное количество тепла, то необходимо применение системы охлаждения для датчиков. Диапазон измеряемых толщин для серийных приборов лежит в диапазоне от 10 до 10000 нм с точностью 10%. Так же необходимо учитывать различия коэффициента конденсации пленкообразующего вещества на образце и кристалле кварца.

2.2.3. Фотометрические методы контроля

Фотометрический метод основан на контроле изменения коэффициента пропускания или отражения на контрольной длине волны или на нескольких длинах волн. Точностные возможности и диапазон контролируемых толщин пленок зависит не только от точности измерения коэффициентов пропускания и отражения, но и от методологии проведения контроля. В отличие от предыдущего метода данный метод позволяет контролировать и оптические постоянные слоя.

В обоих выше изложенных методах контроля толщины слоя на существующем уровне развития техники легко реализуется автоматическое окончание осаждения слоя, что позволяет исключить ошибку оператора. Это особенно важно при изготовлении многослойных покрытий и покрытий, изготавливаемых с высокой скоростью осаждения (единицы секунд), например полупрозрачных слоев металлов.

Однако фотометрические методы позволяют не только контролировать толщину слоя, но и отслеживать изменение оптических постоянных слоя в процессе его роста.

На практике при контроле оптических постоянных и толщины слоя в процессе осаждения пленки в вакууме наиболее приемлемыми являются фотометрические измерения, проводимые по нормали к поверхности образца.

В настоящее время существуют различные схемы проведения фотометрических измерений [46, 47]. Наиболее универсальной системой контроля (рис. 2.4) можно считать схему, позволяющую проводить автоматический контроль осаждения, с использованием двух источников излучения и двух пар фотоприемников, реализующую одновременный контроль коэффициентов пропускания и отражения на двух длинах волн или коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения на одной длине волны [48]. Тип контроля выбирается согласно установке источников излучения и соответствующих им пар фотоприемников. Схема реализована таким образом, что с каждым источником синхронизирована пара фотоприемников (один для измерения коэффициента отражения, другой коэффициента пропускания). При отработанном технологическом процессе данная схема позволяет заканчивать осаждение слоев не по контролю экстремума, а по заданному коэффициенту отражения или пропускания, что позволяет изготавливать неравнотолщинные системы без расчета контрольных длин волн для каждого слоя.

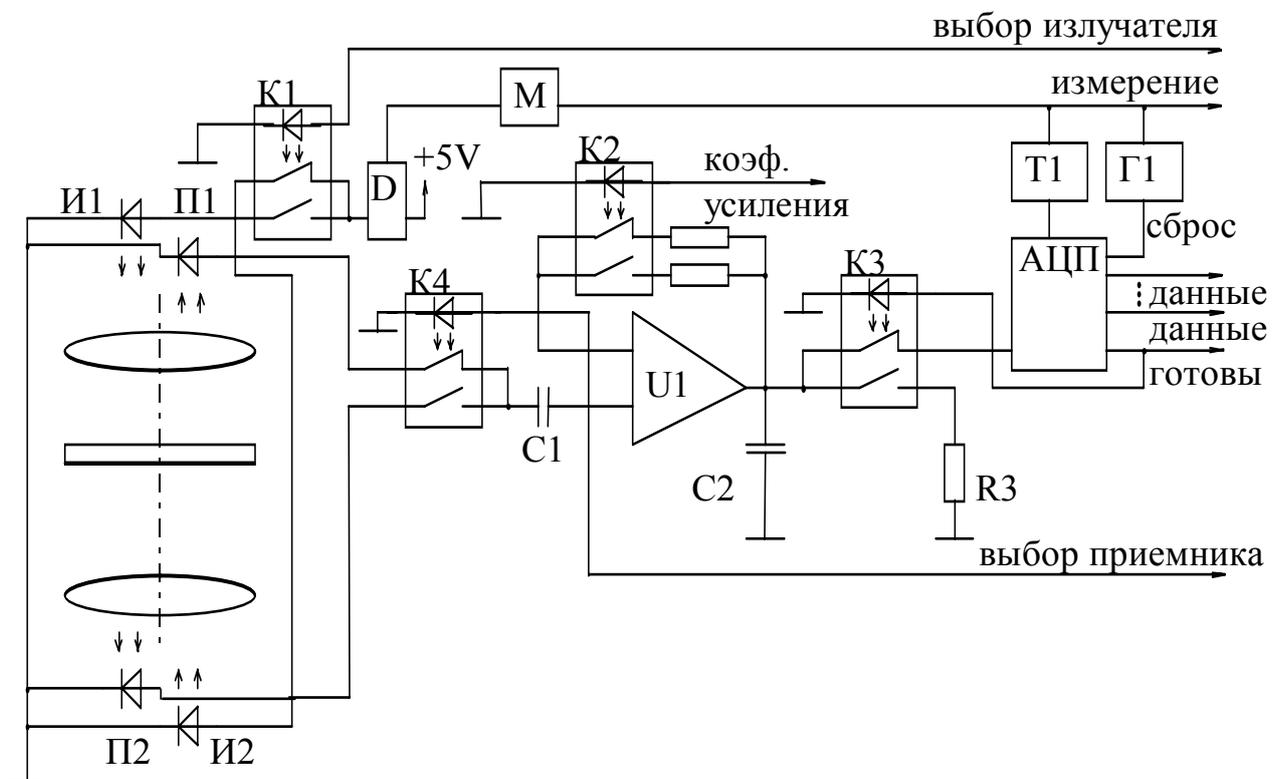


Рис. 2.4а. Функциональная схема измерения коэффициентов отражения пропускания и обратного отражения в процессе нанесения покрытия.

Поскольку во время испарения происходит постоянная фоновая засветка фотоприемников излучением испарителей, то измерения необходимо проводить модулируя излучение источников света. Поскольку необходимо проводить 10 и более измерений в секунду необходима

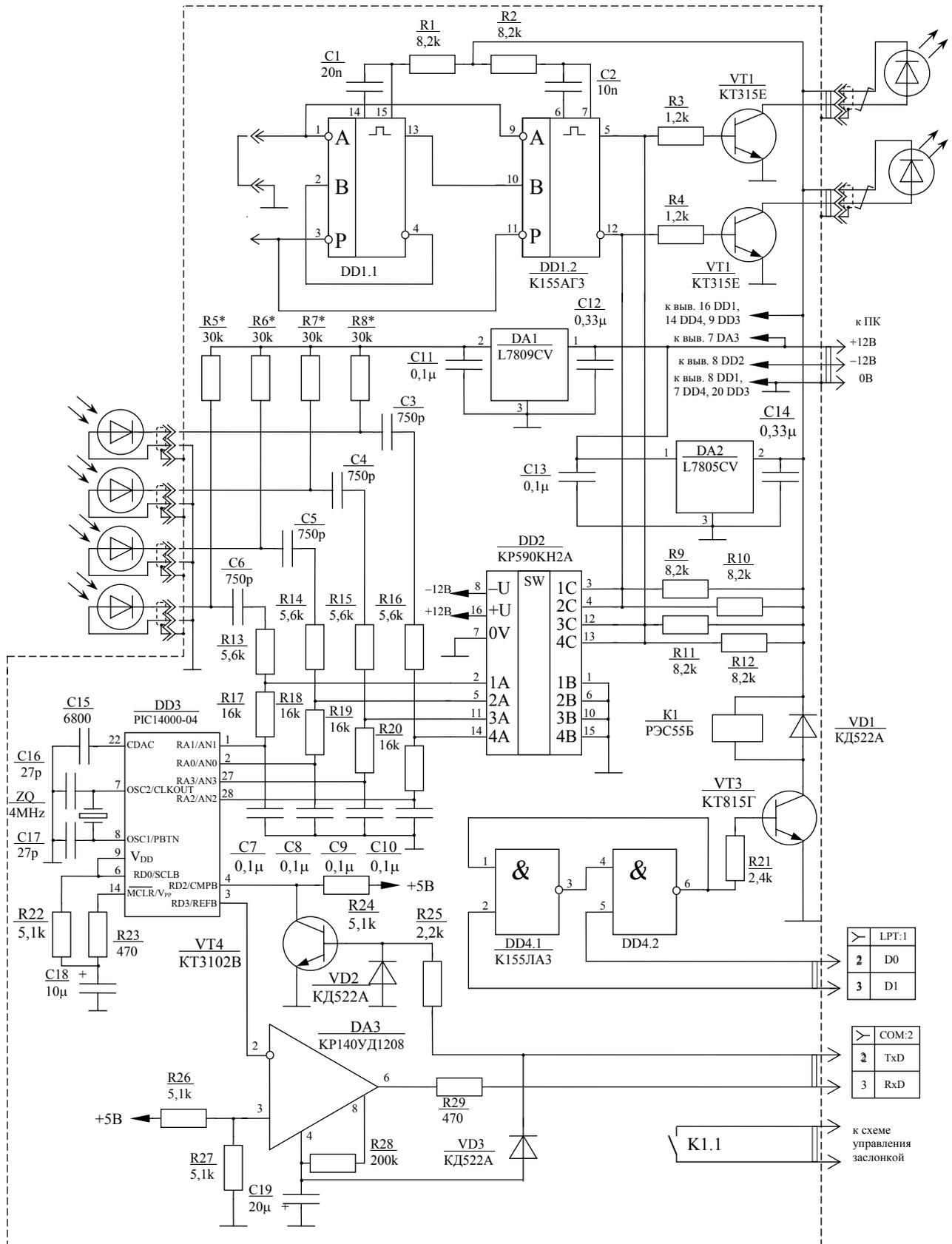


Рис. 2.46. Принципиальная схема автоматического контроля осаждения.

частота модуляции $\sim 10 \div 30$ кГц. Механическими модуляторами такой частоты не достигнуть, поэтому применима электрическая модуляция источника света. По быстродействию из источников света подходят светодиоды и полупроводниковые лазеры, поскольку лампы накаливания обладают большой инерционностью и при электрической модуляции не достигают полной модуляции светового потока, и для повышения уровня переменной составляющей необходимо повышение мощности, а газоразрядные лампы (неоновые) имеют малую яркость и требуют сложной схемы управления. Из фотоприемников по быстродействию удовлетворяют фотоэлементы вакуумные с коаксиальным выходом предназначенные для регистрации коротких световых импульсов, фотодиоды и фототранзисторы, а также некоторые типы фоторезисторов (например, германиевые и на основе антимонида индия) и фотоэлектронных умножителей.

Для примера на рис. 2.5 приведены спектральные характеристики светодиодов отечественного производства (Протон) типа КИПМ15Т30-1/К2-ПЗ (кривая 4), КИПМ15Т30-1/Ж-ПЗ (кривая 3), КИПМ15Т30-1/Л-ПЗ (кривая 2), КИПМ15Т30-1/С-ПЗ (кривая 1), КИПМ15Т30-1/Б-ПЗ (кривая 5) имеющие силу света 3,5 Кд и угол свечения 30° .

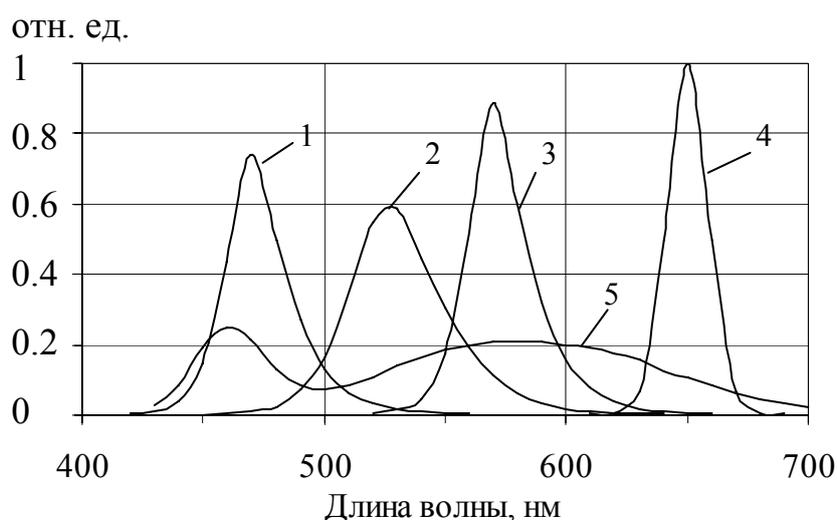


Рис. 2.5. Спектральные характеристики светодиодов.

Модулирование осуществляется с помощью ждущего мультивибратора с перезапуском 'М', который запускается с получением сигнала 'измерение' и управляет драйвером лазера 'D'. Драйвер лазера также преобразует питающее напряжение до напряжения работы лазера со стабилизацией тока проходящего через лазер. Конденсатор С1 отделяет постоянную составляющую сигнала фотодиода. После усиления переменной составляющей сигнала на усилителе 'U' происходит накопление на конденсаторе С2. Подключение С2 ко входу аналогово-цифрового преобразователя 'АЦП' осуществляется с помощью оптоэлектронного ключа К3. После оцифровки данные сохраняются в выходном регистре АЦП и устанавливается сигнал 'данные готовы' по которому они считываются через контроллер и одновременно происходит

переключение выхода усилителя на резистор R3 для разряда С2. После передачи данных контроллером подается новый сигнал ‘измерение’, который поступает на генератор одиночных импульсов ‘Г1’, таймер задержки ‘Т2’ и мультивибратор. Генератор одиночных импульсов формирует импульс сброса на АЦП с задержкой 5 мкс, по которому происходит очистка выходного регистра АЦП и снятие сигнала ‘данные готовы’. Таймер задержки обеспечивает выдержку 20 мс для заряда С2 и подает сигнал начала оцифровки по которому активизируется вход АЦП.

Быстродействия системы достаточно для контроля коэффициентов отражения и пропускания, но для определения оптических постоянных явно будет недостаточно. Толщину слоев можно контролировать по заданным значениям измеряемых параметров. Расчет оптических постоянных возможен только после осаждения.

2.2.4. Обработка фотометрического сигнала с использованием производной по толщине и оценка точности контроля

С помощью описанной выше системы контроля можно точно фиксировать производные коэффициентов отражения и пропускания по времени. Рассматривая процесс роста толщины пленки можно полагать, что ее оптическая толщина $n_j d_j = V_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2 + \dots$. Допустимо принять скорость роста пленки постоянной $V_0 = \text{const}$ и $n_j d_j = V_0 t$ поскольку

$$\varphi_j = \frac{2\pi n_j d_j}{\lambda}, \text{ то } \frac{\partial \varphi}{\partial (n_j d_j)} = \frac{2\pi}{\lambda_0} V_0 \text{ и}$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\partial R}{\partial (n_j d_j)} \cdot \frac{\partial (n_j d_j)}{\partial t} = \frac{\partial R}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial (n_j d_j)} \cdot \frac{\partial (n_j d_j)}{\partial t} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot V_0 \cdot \frac{\partial R}{\partial \varphi}. \quad (28)$$

Из чего видно, что производная коэффициента отражения по времени пропорциональна производной по фазовой толщине. При осаждении диэлектрических пленок производные $\frac{\partial R}{\partial \varphi_j}$ и $\frac{\partial T}{\partial \varphi_j}$ при толщинах пленки кратных $\frac{\lambda_0}{4}$ обращаются в нуль.

Сравнительная оценка точности различных методов оптического контроля осаждения приведена на рис. 2.6. Где интервал МЗР (младший значащий разряд) погрешность измерения сигнала. Как видно при контроле по экстремуму коэффициента отражения погрешность измерения приводит к большей ошибке по оптической толщине слоя, чем при контроле по заданному значению отражения и по нулю производной. Контроль по заданному значению коэффициента отражения применим только при отработанном технологическом процессе, поскольку условия осаждения влияют на оптические характеристики покрытия. Отсюда следует, что метод контроля осаждения по изменению знака производной

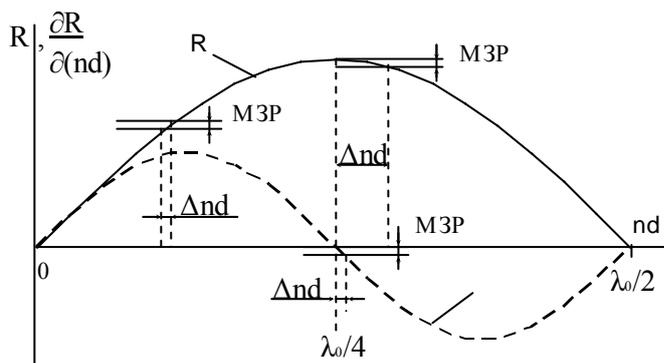


Рис. 2.6. Точность контроля осаждения различными методами.

(переходу через ноль) является более точным и технологичным, так как осаждение заканчивается на экстремуме и достаточно контролировать ноль сигнала, а не оцифровывать весь диапазон от 0 до 100% коэффициента отражения.

Для детального рассмотрения возможностей метода рассмотрим контроль

осаждения диэлектрического интерференционного фильтра с конструкцией ВНВНВНВ4НВНВНВНВ, где В - четвертьволновой слой с “высоким” показателем преломления $n=1,92$, Н - четвертьволновой слой с “низким” показателем преломления $n=1,45$. Подложка и свидетели из стекла К8 — $n=1,52$. Спектральная характеристика интерференционного фильтра приведена на рис. 2.7.

Расчетный и экспериментальный графики контроля осаждения по изменению коэффициента пропускания приведены на рисунках 2.8 и 2.9. Контроль симметричных систем проводится по двум сменным свидетелям, первое зеркало и разделительный слой (ВНВНВНВ4Н) по первому свидетелю, а второе зеркало (ВНВНВНВ) по второму, что дает возможность сравнения контроля осаждения зеркал. На расчетном графике приведен контроль осаждения по первому свидетелю (по второму тоже самое до 1,75), а на экспериментальном по обоим свидетелям (смена свидетеля указана). Из приведенных графиков видно, что практическая зависимость не имеет полного сходства с расчетной, что вызвано как температурным дрейфом измерительной системы, так и загрязнением

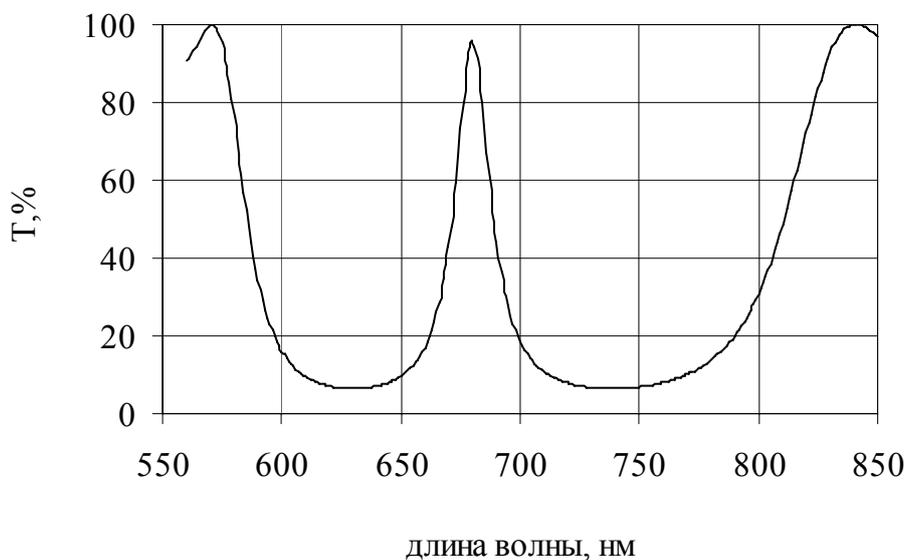


Рис. 2.7. Спектральная характеристика интерференционного фильтра.

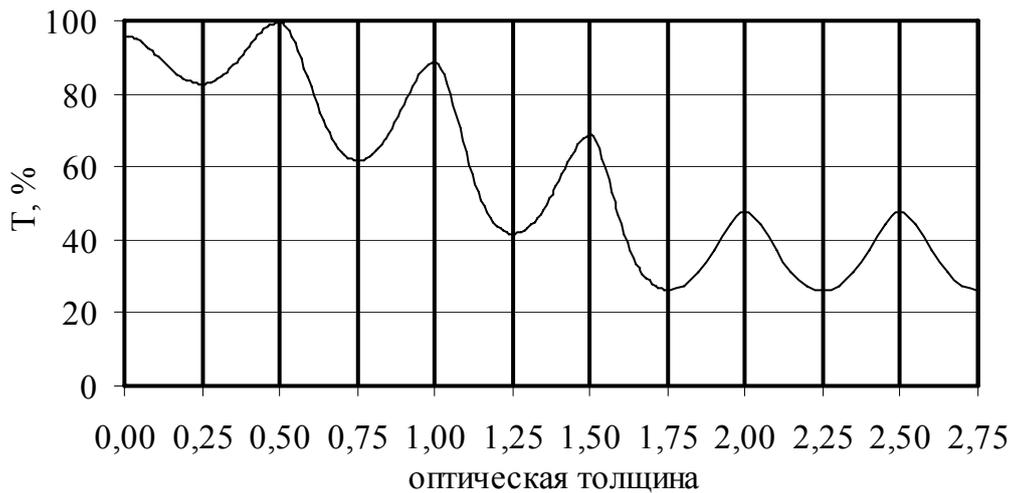


Рис. 2.8. Расчетный контроль осаждения (запылением) окон вакуумной камеры. Однако на контроль по экстремуму (по смене знака первой производной) это не влияет.

Как видно из рисунка 2.9 в процессе напыления слоев скорость осаждения не была постоянной, что чаще всего и приводит к ошибке оператора, который, ожидая наступления экстремума, может “не вовремя” прекратить осаждение. Для снижения утомляемости оператора при выводе измеренного значения коэффициента пропускания необходима фильтрация шума на уровне МЗР (рис. 2.10) по условию $X_j = \text{ЕСЛИ}(\text{ABS}(X_j - X_{j-1}) \leq 0,001; X_j; (X_j + X_{j-1})/2)$.

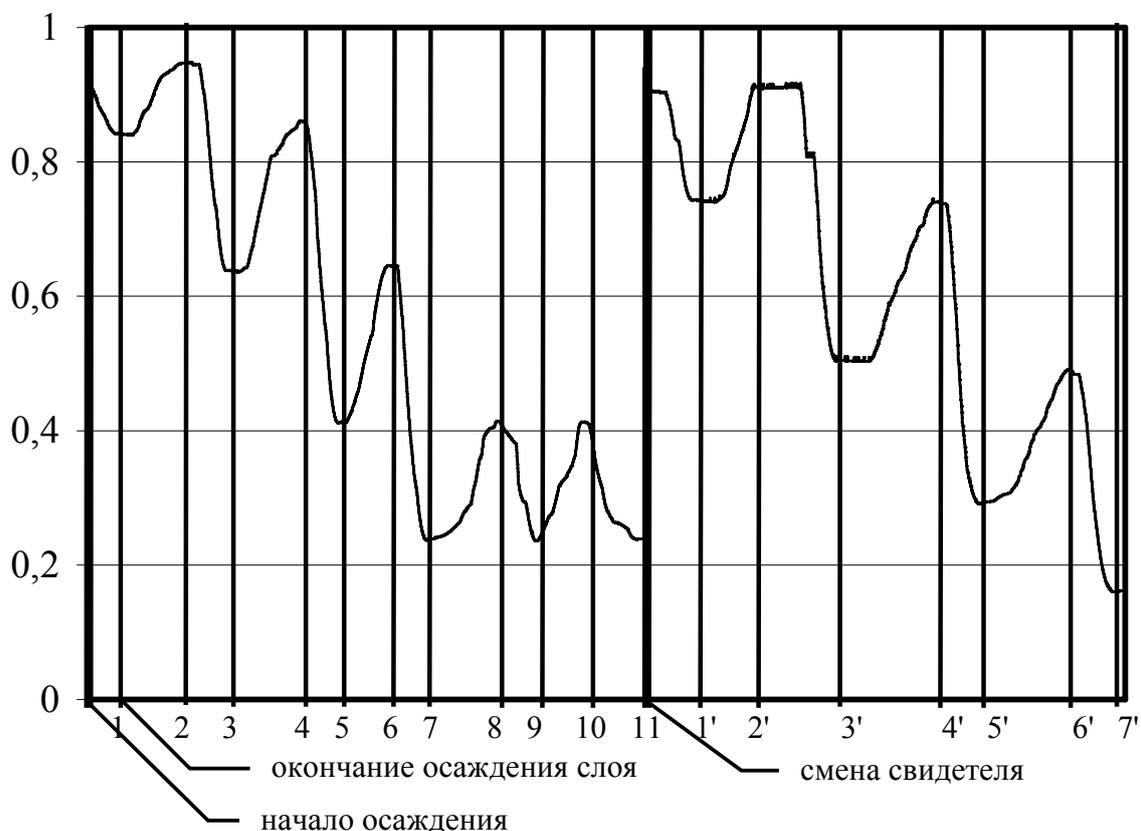


Рис. 2.9. Экспериментальные данные по контролю осаждения.

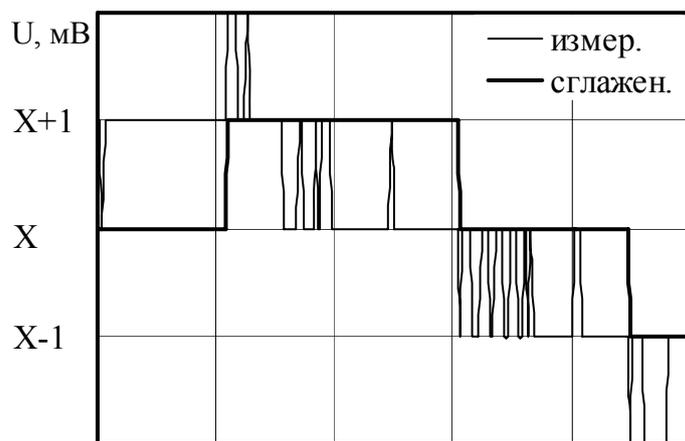


Рис.2.10. Сглаживание шума на уровне МЗР.

Поскольку для диэлектрических покрытий осаждение проводится с низкой скоростью ($3-5 \text{ \AA}/\text{с}$), а данные снимаются 10 раз в секунду, контроль проводится по производной с усреднением по 20-ти измерениям. Срабатывание заслонки испарителей устанавливается выше уровня шумов на величине $0,0018 \text{ В}$ (что составляет $\sim 0,2\%$ коэффициента пропускания), чтобы избежать ошибочного (ложного) срабатывания. На рисунке 2.11 приведены снятые во время эксперимента значения первой производной коэффициента пропускания по времени с усреднением по 10 и 20-ти измерениям. Вертикальными “жирными” линиями обозначены точки смены знака производной и срабатывания заслонки, а “тонкими” линиями выделены участки, на которых значение производной превышает установленное пороговое значение шума. Как видно из рисунка скорость осаждения была далеко непостоянной из-за сканирования лучом по веществу и снижения тока накала при повышении давления (десорбция газов при разогреве вещества).

Во время осаждения слоев значение производной несколько раз приближается к «0», но смены знака не происходит. Поскольку при усреднении по 10-ти измерениям вычисляемое значение производной меньше, чем при усреднении по 20-ти измерениям, то и приближение к «0» наблюдаются чаще, однако смены знака тоже не фиксируется, что говорит о том, что контроль можно вести и с большей точностью. Как видно на слоях с низким показателем наблюдается более неравномерное изменение значения производной коэффициента пропускания по времени. Для оценки “вклада” в изменение коэффициента пропускания, изменения скорости осаждения и величины показателя преломления осаждаемого вещества.

Рассмотрим влияние показателя преломления контролируемого слоя на точность контроля по первой производной коэффициента пропускания. Так для любого осаждаемого слоя коэффициент пропускания можно

записать в виде
$$T = \frac{A}{B + C \cos 2\varphi}$$
, где A, B, C — константы определяемые предшествующей системой слоев. Принимая длину волны постоянной

($\lambda = \text{const}$) фазовая толщина слоя $\varphi = \frac{2\pi nd}{\lambda}$, где n – показатель преломления слоя, d – толщина слоя.

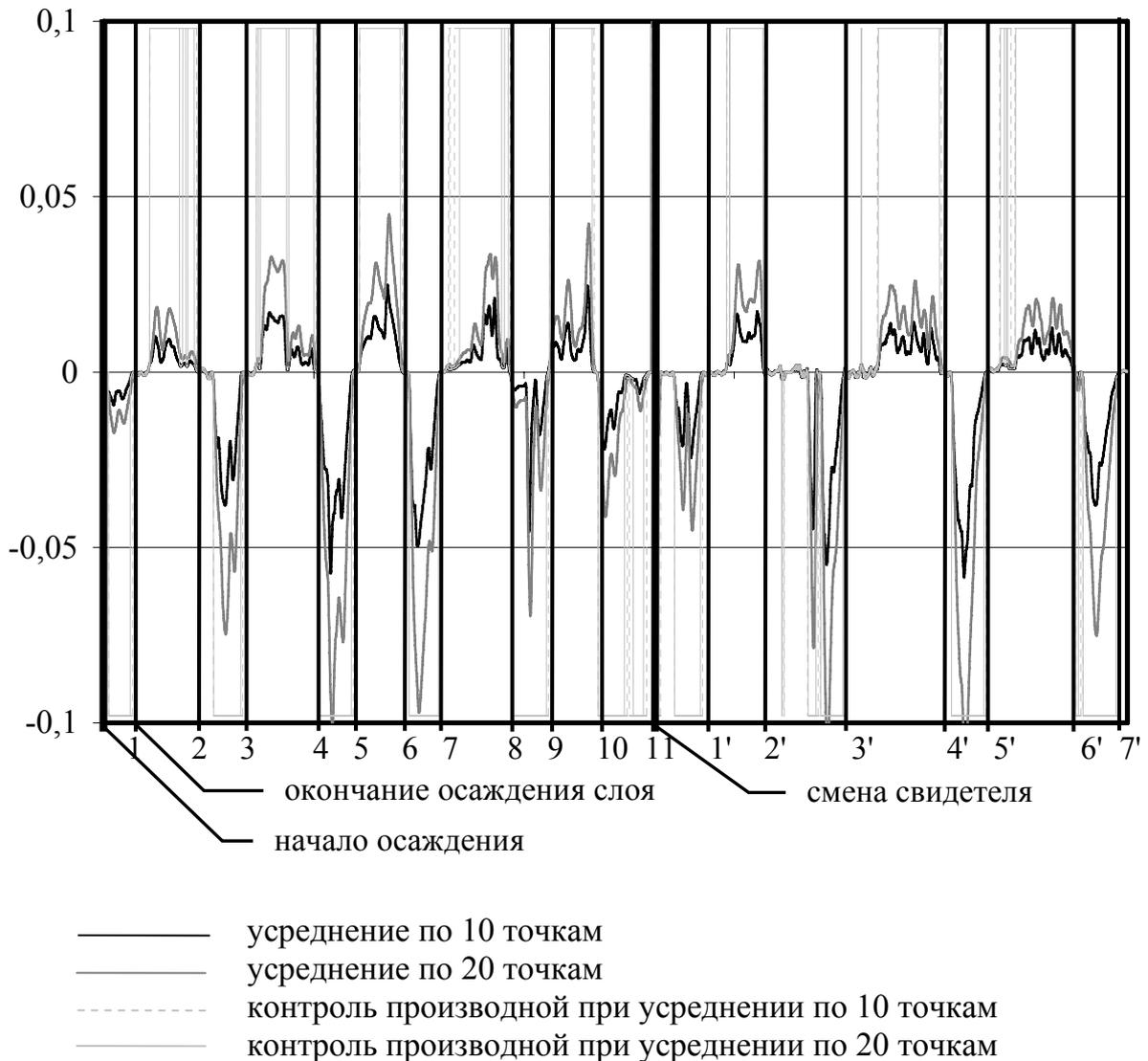


Рис. 2.11. Значения первой производной коэффициента пропускания по времени.

Если оптическую толщину слоя записать в виде $nd = V_0 t + \frac{\beta t^2}{2}$, то при $\beta \neq 0$ производная фазовой толщины по времени будет $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = V_0 + \beta t$.

В экстремуме $\left. \frac{\partial \Gamma}{\partial \varphi} \right|_{\varphi = \frac{\pi}{2}} = 0$, и следовательно $\frac{\partial \Gamma}{\partial \varphi} \cdot (V_0 + \beta t) = 0$.

Для одного слоя амплитудный коэффициент пропускания равен:

$t = \frac{2n_0}{n_0 m_{11} + n_\ell m_{22} + i(n_0 n_\ell m_{12} + m_{21})}$, где n_0 и n_ℓ показатели преломления среды и подложки соответственно.

Энергетический коэффициент пропускания

$$T = \frac{n_s}{n_0} |t|^2 = \frac{4n_0 n_\ell}{(n_0 m_{11} + n_\ell m_{22})^2 + (n_0 n_\ell m_{12} + m_{21})^2} \quad (29)$$

Элементы матрицы интерференции слоя, осаждаемого на подложку:

$$m_{11} = m_{22} = \cos\varphi; \quad m_{12} = \frac{1}{n} \sin\varphi; \quad m_{21} = n \sin\varphi.$$

С учетом этого

$$T = \frac{4n_0 n_\ell}{(n_0 + n_\ell)^2 \cos^2\varphi + \left(\frac{n_0 n_\ell}{n} + n\right)^2 \sin^2\varphi}; \quad (30)$$

$$\varphi = \frac{2\pi \left(V_0 t + \beta \frac{t^2}{2} \right)}{\lambda} \quad \text{при постоянной скорости осаждения} \quad \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} V_0 t \quad (31)$$

Текущая толщина слоя $d = \frac{\bar{V}}{n} t_{oc}$, где \bar{V} – средняя скорость осаждения, t_{oc} – время осаждения.

$$\frac{\partial T}{\partial V} = - \frac{8n_0 n_\ell \left[-(n_0 + n_\ell)^2 + \left(\frac{n_0 n_\ell}{n} + n\right)^2 \right] \sin\varphi \cos\varphi}{\left[(n_0 + n_\ell)^2 \cos^2\varphi + \left(\frac{n_0 n_\ell}{n} + n\right)^2 \sin^2\varphi \right]^2} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} t_{oc} \quad (32)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = - \frac{8n_0 n_\ell [n^4 - n_0^2 n_\ell^2] \sin^2\varphi}{n^4 \left[(n_0 + n_\ell)^2 \cos^2\varphi + \left(\frac{n_0 n_\ell}{n} + n\right)^2 \sin^2\varphi \right]^2} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \bar{V} t \quad (33)$$

если принять (для четвертьволновых слоев):

$$\lambda = \lambda_0; \quad nd = \frac{\lambda_0}{4}; \quad \text{т.е. } \lambda_0 = 4nd$$

изменение пропускания за счет вариаций скорости осаждения и показателя преломления осаждаемого вещества:

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial T}{\partial n} \Delta n; \quad (34)$$

$$\frac{\Delta T}{T} = -T \frac{\sin \frac{\pi}{2} \frac{Vt}{\bar{V}t_{oc}}}{2n^2 n_0 n_\ell} \times$$

$$\times \left[(n^2 - n_0 n_\ell)(n^2 + n_0 n_\ell) \sin \frac{\pi}{2} \frac{Vt}{\bar{V}t_{oc}} \cdot \frac{\Delta n}{n} + \frac{\pi}{2} \frac{t}{t_{oc}} (n^2 - n_\ell^2)(n^2 - n_0^2) \cos \frac{\pi}{2} \frac{Vt}{\bar{V}t_{oc}} \cdot \frac{\Delta V}{V} \right]$$

Как видно при $n < (n_0 n_\ell)^{1/2}$ оба слагаемых отрицательны, при $n > n_\ell$ – положительны, т. е. в этих случаях компенсация влияния невозможна. При $(n_0 n_\ell)^{1/2} < n < n_\ell$ первое слагаемое положительно, а второе отрицательно это позволяет осуществить компенсацию влияния вариаций показателя преломления и скорости осаждения. Когда $n^2 = n_0 n_\ell$ то на изменение пропускания влияет только изменение скорости осаждения.

2.2.5. Контроль оптических параметров слоя во время осаждения пленки в вакууме.

Поскольку воздействие атмосферы приводит к изменениям структуры покрытия наиболее точные измерения можно получить, проводя измерения в вакууме непосредственно в процессе изготовления покрытия, что позволит отследить изменение параметров слоя металла по мере увеличения толщины пленки, а так же последующие изменения во время повышения давления. Наиболее легко реализуемы фотометрические методы контроля при нормальном падении лучей. Существует два метода контроля удовлетворяющих выше сказанному — это измерение коэффициентов отражения и пропускания при формировании покрытия на двух подложках с различным показателем преломления и измерение коэффициентов отражения и пропускания на двух длинах волн. Поскольку при решении прямой задачи для контроля на двух длинах волн необходимо учитывать различие фазовых толщин во всех матричных элементах, а при расчете для подложек с разным показателем преломления матричные элементы одинаковы, показатель преломления подложки учитывается только в конечных формулах расчета R и T. Этот подход позволяет практически вдвое уменьшить время расчета. В качестве базовой системы контроля удобно воспользоваться системой описанной в разделе 2.2.3., и увеличить как ее возможности, так и быстродействие. Для удобства юстировки и снятия ограничений в количестве измеряемых сигналов в качестве фотоприемника можно использовать монохромную ПЗС матрицу, имеющую высокую чувствительность в широкой области спектра (включая ближнюю ИК). На ней фокусируются все четыре пучка (два прошедших через контрольные образцы и два отраженных от них), а также снимается сигнал фоновой засветки. Зона снимаемой для обработки области изображения для каждого сигнала указывается оператором с помощью ручного манипулятора (мышка). Поскольку нет необходимости обрабатывать все изображение захватывается массив вокруг указанной области размером 10 на 10 точек и проводится усреднение сигнала. Оцифрованные сигналы корректируются по массиву с данными градуировки спектральной чувствительности ПЗС матрицы. В качестве источников излучения использовались полупроводниковые лазеры EL65LM8 с мощностью излучения 2 мВт на длине волны 650 нм, для контроля на двух длинах волн можно установить второй лазерный модуль на 940 нм. На объектив видеокамеры был установлен узкополосный светофильтр, обладающих полушириной $\delta\lambda \sim 2$ нм, что значительно

ослабляет фоновую засветку от испарителей в неиспользуемой части спектрального диапазона.

Такой подход позволяет при незначительных изменениях оптической схемы (изменение типа и расположения источников излучения) реализовывать несколько методов контроля, изменяя алгоритм расчета в программе. Определенные интенсивности отраженных и прошедших пучков пересчитываются с учетом второй поверхности по следующим формулам:

$$R_{\text{э}1} = \left(\frac{n_{\ell 1} - n_0}{n_{\ell 1} + n_0} \right)^2; \quad R_{\text{э}2} = \left(\frac{n_{\ell 2} - n_0}{n_{\ell 2} + n_0} \right)^2 - \text{коэффициенты отражения от}$$

передней поверхности подложки (используется для калибровки схемы), где $n_0 = 1$; $n_{\ell 1} = 1.44$ (ЛК1); $n_{\ell 2} = 2.18$ (СТФ3) – показатели преломления используемых сред,

$T_{\text{э}1} = 1 - R_{\text{э}1}$; $T_{\text{э}2} = 1 - R_{\text{э}2}$ – коэффициенты пропускания от передней поверхности подложки (используется для калибровки схемы),

$$R_{\text{и}1} = R_{\text{э}1} \frac{I_{R1} - I_0}{I_{\text{э}1} - I_{\text{о}3}}; \quad R_{\text{и}2} = R_{\text{э}2} \frac{I_{R2} - I_0}{I_{\text{э}2} - I_{\text{о}3}} - \text{измеренные коэффициенты}$$

отражения,

где I_{R1} , I_{R2} , I_0 – измеренные интенсивности отраженного излучения от обеих подложек и фоновой засветки, а $I_{\text{о}3}$, $I_{\text{э}1}$, $I_{\text{э}2}$ – фоновый сигнал и интенсивности излучения от чистой подложки.

$$T_{\text{и}1} = T_{\text{э}1} \frac{I_{T1} - I_0}{I_{\text{э}1} - I_{\text{о}3}}; \quad T_{\text{и}2} = T_{\text{э}2} \frac{I_{T2} - I_0}{I_{\text{э}2} - I_{\text{о}3}} - \text{измеренные коэффициенты}$$

пропускания,

где I_{T1} , I_{T2} , I_0 – измеренные интенсивности прошедшего излучения от обеих подложек и фоновой засветки, а $I_{\text{о}3}$, $I_{\text{э}1}$, $I_{\text{э}2}$ – фоновый сигнал и интенсивности излучения от чистой подложки.

$$T_1 = \frac{T_{\text{и}1}}{T_{\text{э}1}}; \quad T_2 = \frac{T_{\text{и}2}}{T_{\text{э}2}} - \text{коэффициенты пропускания от поверхности}$$

плоскопараллельных подложек с учетом отражения от второй поверхности,

$$R_1 = R_{\text{и}1} - R_{\text{э}1} T_1^2; \quad R_2 = R_{\text{и}2} - R_{\text{э}2} T_2^2 - \text{коэффициенты отражения от}$$

поверхности плоскопараллельных подложек с учетом второй поверхности.

Эти данные измерений отображаются на дисплее и сохраняются для последующей обработки.

В общем, задача сводится к определению значений параметров $n \pm \Delta n$, $k \pm \Delta k$ и $d \pm \Delta d$ при удовлетворении следующих условий:

$$\begin{aligned} T_1 - \Delta T_1 < T_1 < T_1 + \Delta T_1; \\ T_2 - \Delta T_2 < T_2 < T_2 + \Delta T_2; \\ R_1 - \Delta R_1 < R_1 < R_1 + \Delta R_1; \\ R_2 - \Delta R_2 < R_2 < R_2 + \Delta R_2, \end{aligned}$$

где $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta R_1, \Delta R_2$ – погрешность измерения значений соответствующих величин.

Решая одновременно четыре системы уравнений, мы получаем значения физически реализуемых параметров определяющих осаждаемый слой. Другими словами, в общем виде это есть задача минимизации определенной целевой функции. Вид этой функции выбирается из физических соображений так, чтобы в пространстве искомых параметров координаты ее минимума соответствовали решению. Из-за невозможности получения аналитических решений для всех параметров отражающей системы, состоящей из однородного изотропного слоя, находящегося на изотопной подложке рассмотрим возможный алгоритм поиска решения с помощью численных методов.

И так, мы имеем три неизвестных (n, k, d) и четыре системы зависящих от них уравнений. При этом имеются измеренные величины T_1, T_2, R_1, R_2 , удовлетворяющие неравенствам. Поскольку, система может иметь несколько решений, введем дополнительные условия, накладывающие определенные рамки на диапазон решений. Во-первых, введем диапазон, в котором ожидается нахождение n и k , а во-вторых, примем условие, что d возрастает от измерения к измерению, начиная с нуля и далее с некоторым конечным приращением.

Можно использовать следующие численные методы:

1. Метод Ньютона.
2. Метод простой итерации.
3. Метод спуска.

Наиболее подходящий в данном случае метод – метод Ньютона. Он оптимально находит решения системы неоднородных трансцендентных уравнений с периодичностью множества решений, если известны начальные значения неизвестных и дает высокую точность решений.

Рассмотрим метод Ньютона для решения систем нелинейных алгебраических уравнений.

Пусть известно некоторое приближение $x^{(s)}$ к корню \bar{x} . Запишем исходную систему нелинейных уравнений в виде

$$f(x^{(s)} - \Delta x) = 0,$$

где $\Delta x = x - x^{(s)}$. Разлагая эти уравнения в ряды и ограничиваясь первыми дифференциалами, т.е. линеаризуя функцию, получим

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial f_k(x^{(s)})}{\partial x_i} \Delta x_i^{(s)} = -f(x^{(s)}), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Это система уравнений, линейных относительно приращений $\Delta x_i^{(s)}$; все коэффициенты системы выражаются через последнее приближение $x^{(s)}$. Решив эту систему, например, методом исключения найдем новое приближение $x^{(s+1)} = x^{(s)} + \Delta x^{(s)}$.

Отметим, что система в матричной форме имеет вид:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \Delta x_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -f_1 \\ -f_2 \\ \dots \\ -f_n \end{vmatrix}$$

где значения производных в матрице коэффициентов и функций в векторе свободных членов вычислены при текущем приближении корня $x^{(s)}$.

Матрица частных производных носит название матрицы Якоби. Для ее формирования возможны два пути: а) получить аналитические выражения для всех частных производных и вычислить их значение при $x^{(s)}$ – прием предпочтительный в смысле корректности подхода, но зачастую трудоемкий, особенно при большом числе аргументов; б) заменить частные производные в матрице Якоби их приближенными конечно-разностными значениями

$$\frac{\partial f_i}{\partial c_j} = \frac{f_i(c_j + h_j) - f_i(c_j)}{h_j},$$

где h_j – малое приращение c_j .

Алгоритм решения системы нелинейных уравнений методом Ньютона складывается из следующих этапов:

- 1) задают относительную погрешность вычисления аргументов ε , вектор начальных приближений $x^{(0)}$, максимальное число итераций M для выхода из алгоритма в случае медленной сходимости или программных ошибок пользователя;
- 2) вычисляют матрицу Якоби по аналитическим выражениям или конечно-разностным методом, причем в последнем случае можно принять $h_j = \varepsilon |x_j|$, $j = 1, 2, \dots, n$;
- 3) решают систему линейных алгебраических уравнений относительно приращений Δx_j ;
- 4) вычисляют уточненное значение аргументов – новое приближение $x^{(s+1)}$ по формуле $x_{j,s+1} = x_{j,s} + \Delta x_j$, $j = 1, 2, \dots, n$;
- 5) проверяют выполнение условий $\left| \frac{\Delta x_j}{x_j} \right| > \varepsilon$ по всем аргументам и если хотя бы одно выполняется, то возвращаются к п.2 для новой итерации; в противном случае полученный вектор $x^{(s+1)}$ считают решением.

Описанный алгоритм можно оформить в виде процедуры, тогда вектор значений функций $f(x)$ целесообразно вычислять в процедуре, а имя этой процедуры передавать через список параметров. Опишем процедурный тип:

Type

```
Newton_proc = Procedure(x : vector_30;  
                        var f : vector_30);
```

Здесь vector_30 – это тип, описанный в библиотеке Mathlib и указывающий на вектор из 30 вещественных чисел.

Если матрицу Якоби вычислять по конечно-разностной схеме, то процедура для решения системы нелинейных алгебраических или трансцендентных уравнений может иметь вид:

```
{Решение систем нелинейных уравнений по методу Ньютона}  
Procedure Newton (neq : word; {Число уравнений}  
                 eps : real; {Относительная погрешность}  
                 var x : vector_30; {Вектор корней}  
                 fct : Newton_proc); {}
```

var

```
h : real;  
i, j, n, ks : word;  
Jacoby : matrix_30_30;  
xh, xr, dx, f, fh : vector_30;  
Ok : boolean;
```

begin

```
xr := x;  
{Уточнение корня по методу Ньютона}  
Repeat  
  x := xr; {Новое приближение}  
  {Приближенное вычисление матрицы частных производных  
  J -матрицы Якоби конечно-разностным методом}  
  fct(x,f); {Вычисление вектора функции}  
  for j := 1 to neq do begin  
    xh := x; {Восстановление значений аргументов}  
    h := eps*abs(x[j]); {Приращение j-го аргумента}  
    xh[j] := x[j]+h; {Модифицированный вектор x}  
    fct(xh, fh); {Расчет вектора функций с учетом  
                 приращения j-го аргумента}  
    {Приближенное значение производных в j-ом столбце}  
    for i := 1 to neq do  
      Jacoby[i,j] := (fh[i]-f[i])/h  
    end;  
    {Вычисление свободных членов системы линейных уравнений}  
    for i := 1 to neq do  
      dx[i] := -f[i];  
    {Решение системы линейных уравнений относительно dx}  
    Simq(Jacoby,dx,neq,ks);  
    Ok := true;  
    for i := 1 to neq do begin  
      xr[i] := x[i]+dx[i];
```

```

Ok := Ok and (abs(dx[i]/x[i]) < eps)
end;
until Ok; {Условие окончания счета}
end;

```

Алгоритм поиска решений методом Ньютона обычно входит в основные библиотеки языков программирования высокого уровня.

Рассмотрим еще один способ определения значений параметров (n , k , d). Суть метода сводится к последовательному подбору значений этих параметров с учетом указанных условий. В целях оптимизации введем изменение приращения шага при подстановке аргументов функции. Из результатов решения прямой задачи проводим определение максимального и минимального значения параметров слоя, то есть $n+\Delta n$, $k+\Delta k$, $d+\Delta d$ и $n-\Delta n$, $k-\Delta k$, $d-\Delta d$. Этот способ ввиду больших вычислительных затрат имеет низкую скорость поиска решения.

В нашем случае наиболее эффективным будет разделение процесса расчета и определения искомых параметров во времени, поскольку имеется достаточно большое время при подготовке вакуумной камеры к осаждению. К тому же данные расчета можно сохранить и использовать неоднократно. Для процесса поиска необходимого решения, можно заранее рассчитать все значения T_1 , T_2 , R_1 , R_2 в возможном диапазоне изменения n , k , d организовав массив искомых параметров с адресацией прямо связанной со значениями измеряемых параметров. Это конечно приведет к излишним расчетам, но это освободит время при контроле осаждения. При таком подходе реализуется высокая скорость поиска необходимого решения, при хранении больших объемов информации.

В приложении 9 приведен пример программы (PR1) для создания массива данных. Программа состоит из двух частей: 1-ая часть собственно создает массив файлов с n , k , d имеющий адресацию прямо связанную с измеряемыми R_1 , R_2 , T_1 , T_2 , а вторая часть перерабатывает массив организуя запись в файлах $n_{ср}$, $k_{ср}$, $d_{ср}$ и Δn , Δk , Δd . Поскольку переработка всех файлов занимает длительное время, было решено выделить $n_{ср}$, $k_{ср}$, $d_{ср}$ и Δn , Δk , Δd сразу в программе поиска решений (приложение 9, PR2).

Для сравнения по скорости и точности обработки различных методов был проведен расчет контроля осаждения пленки никеля с $n=1.99$, $k=3.2$ и конечной толщиной $d_k=75$ нм (рис. 2.12 и 2.13). В каждом случае рассматривалось 1500 измерений по мере увеличения толщины пленки. При выборке из массива, за счет предварительного расчета массива (время расчета массива более двух часов), программа позволяет определить более 180 точек измерений в секунду. Если использовать алгоритм последовательного спуска то даже с применением динамического цикла (пример программы приведен в приложении 9, PR3) определение одной точки вычисляется более 4-х секунд, но при увеличении шага приращения можно добиться определения одной точки в секунду с достаточной точностью результата.



Рис. 2.12.а. Контроль толщины слоя методом выборки из массива.

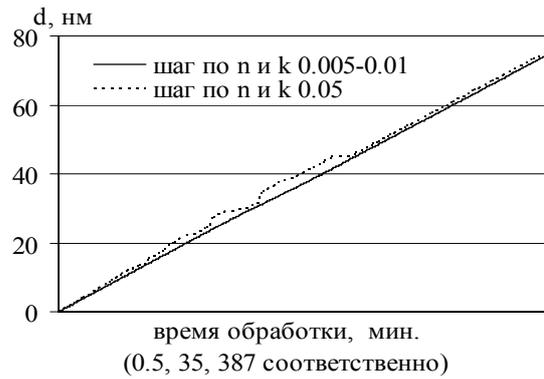


Рис. 2.13.а. Контроль толщины слоя методом последовательного спуска.

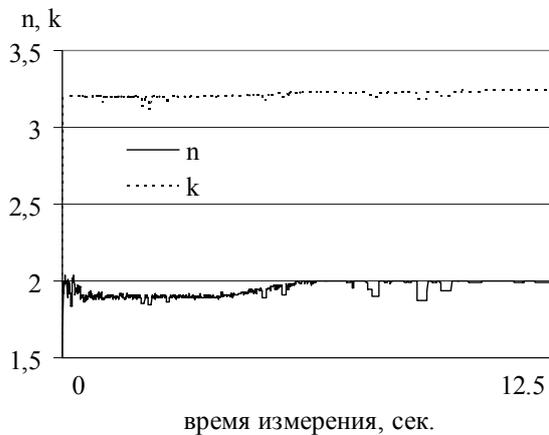


Рис. 2.12.б. Контроль показателя преломления и коэффициента поглощения слоя методом выборки из массива.

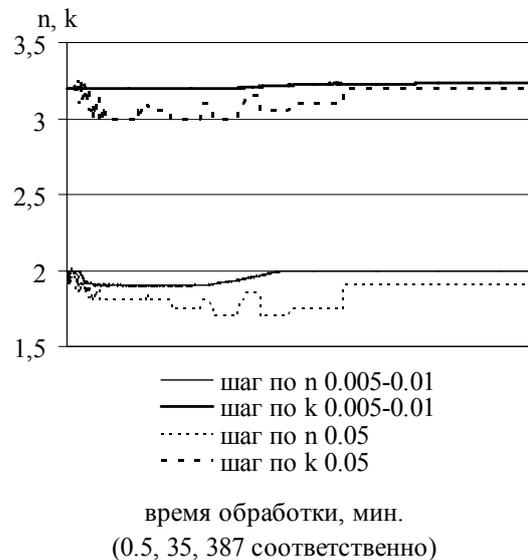


Рис. 2.13.б. Контроль показателя преломления и коэффициента поглощения слоя методом последовательного спуска.

Как видно из рисунков 2.12 и 2.13 метод выборки из массива значительно быстрее проводит обработку с высокой точностью, при методе последовательного спуска даже при снижении точности не добиться высокой скорости обработки.

Рассмотрим основные форматы цветности при оцифровке видеопотока. К ним относятся режимы RGB24, RGB32, RGB555 (16bit) и YUV.

Если мы находимся в цветовом пространстве RGB, то каждый пиксель изображения представляется тремя байтами: первый байт – интенсивность синего цвета, затем по байту на зеленый и красный цвет. Этот формат цвета называется RGB24 (RGB888). Растровые данные, соответствующие одной строке пикселей изображения, вне зависимости от формата цвета должны быть выровнены на границу двойного слова DWORD, т.е. каждая строка пикселей должна описываться целым числом двойных слов. Например, строка из 5 пикселей по 24 бита (3 байта) на

пиксель может быть описана 15 байтам, но длина строки растровых данных (в формате BMP, например) должна быть 16 байтов. Последний байт будет служить лишь для целей выравнивания.

При глубине цвета в 16 битов для хранения цвета пикселя отводится по два байта (слово - WORD), каждому компоненту цвета отводится по 5 битов (формат цвета RGB555). Младшие 5 битов задают интенсивность синего цвета, затем по 5 битов на зеленый и красный цвет. Старший бит в слове не используется.

Для 16-битовых растровых данных часто применяют формат RGB565, который задается следующей маской:

```
RedMask = 0xF8000000; //1111 1000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
GreenMask = 0x07E00000; //0000 0111 1110 0000 0000 0000 0000 0000
BlueMask = 0x001F0000; //0000 0000 0001 1111 0000 0000 0000 0000
```

С помощью этой маски из значения WORD, задающего цвет пикселя, извлекается значение каждого цветового компонента. В формате RGB565 красному и синему цветам отводится по 5 битов, а зеленому – 6 битов. Такое неравноправие обосновывают тем, что человеческий глаз более восприимчив к зеленому цвету, поэтому тщательная запись его градаций позволяет повысить качество изображения.

Для 32-битовых растровых данных используют формат RGB101010, определяющий по 10 битов на каждый цвет, который задается следующей маской:

```
RedMask = 0xFFC00000; //1111 1111 1100 0000 0000 0000 0000 0000
GreenMask = 0x003FF000; //0000 0000 0011 1111 1111 0000 0000 0000
BlueMask = 0x00000FFC; //0000 0000 0000 0000 0000 1111 1111 1100
```

По сравнению с форматом RGB888 такое представление позволяет описать большее количество цветов.

Формат YUV представляет собой структуру, согласно которой происходит распределение на два соседних пикселя по одному сигналу яркости Y – 16 бит, и одна общая информация о цветности UV (также два байта). Т.е. 32 битами можно описать два пикселя.

В итоге получается, что RGB32 быстрее, чем RGB24 вследствие выравнивания, а YUV еще быстрее RGB32, так как тут 32 бита (4 байта) уже описывают две точки, т.е. в среднем 16 бит на пиксель. Поскольку используется черно-белая видеокамера, формат YUV является наиболее подходящим и по скорости и по точности оцифровки, т.к. используется только сигнал яркости и допустимо его объединение по двум соседним точкам.

При отсутствии специализированной видео камеры или платы обработки видео изображения позволяющих оцифровывать сигнал с достаточной точностью можно использовать USB-камеру поддерживающую RGB-32 (пример результата обработки сигналов с 10-битной оцифровкой приведен на рис. 2.12 и 2.13 для Ni с $n=1.99$, $k=3.2$ и конечной толщиной $d_k=75$ нм). При использовании цветных видео камер с низким разрешением по глубине цветности точность измерения можно

повысить путем использования сигналов элементов ПЗС-матрицы не основного спектра. При этом необходимо отключить автоматическую подстройку белого и яркости. Т.е. при использовании источника излучения с длиной волны в области максимальной чувствительности красного, при мощности излучения приводящей к насыщению красного, начинает повышаться сигнал с элементов зеленого, при дальнейшем повышении мощности излучения работают элементы синего. Массив данных градуировки легко создать с использованием градиентных оттенителей или систему из двух поляризаторов регулируя интенсивность проходящего пучка путем поворота одного поляризатора относительно другого.

Метод последовательного спуска можно использовать при контроле покрытий осаждаемых с низкой скоростью, а метод выборки из массива, если необходим контроль слоев с высокой скоростью осаждения.

Программное обеспечение позволяет визуально контролировать точность юстировки оптической системы, проводить запись потока данных прямых измерений, графически отображать изменение коэффициентов отражения и пропускания и контролировать параметры слоя. Для упрощения контроля толщины слоев диэлектрика отображается знак первой производной коэффициента пропускания и контролируется число прошедших экстремумов.

Рассматриваемая система контроля осаждения определяет показатель преломления, главный показатель поглощения и толщину слоя в процессе осаждения по измерениям коэффициентов отражения и пропускания слоя на двух подложках с различным показателем преломления.

В программе также может задаваться алгоритм управления заслонками испарителей. Коды команд передаются на параллельный порт. Для расширения возможностей управления вакуумной установкой была разработана отдельная плата выходов, обеспечивающая гальваническую развязку параллельного порта компьютера от вакуумной установки.

Данная система контроля осаждения имеет ограничение по толщине поглощающих слоев связанное с ухудшением точности измерений больших коэффициентов отражения и малых коэффициентов пропускания, однако, это является не существенным недостатком, поскольку в основном необходимо контролировать частично прозрачные слои металлов.

2.3. Методы измерения оптических параметров (n , k , d) тонких пленок

Для определения оптических постоянных металлических слоев разработано и успешно применяется большое число различных методов, которые можно разделить на две основные группы по принципу проведения измерений: 1) измерения, проводимые при нормальном падении света и 2) при наклонном падении света.

2.3.1. Измерения при нормальном падении света

Можно использовать несколько методов для определения оптических постоянных поглощающих пленок нанесенных на прозрачную подложку в зависимости от типа покрытия и необходимости получения заданной точности.

Для оценки оптических постоянных непрозрачных металлических покрытий простейшим является метод, основанный на измерении коэффициентов отражения R и R' исследуемого металлического зеркала, при нормальном падении, дважды — в случаях, когда внешней средой для него служат прозрачные среды n_0 и n_ℓ соответственно. Тогда из двух уравнений

$$R = \frac{(n - n_0)^2 + k^2}{(n + n_0)^2 + k^2} \quad \text{и} \quad R' = \frac{(n - n_\ell)^2 + k^2}{(n + n_\ell)^2 + k^2} \quad (35)$$

легко получить значения n и k в зависимости от известных n_0 и n_ℓ .

Метод с успехом может быть применен к сравнительно слабопоглощающим веществам (красителям) с показателем поглощения k , не превышающим единицу [49]. В случае металлов, изменения отражательной способности которых в зависимости от показателя преломления внешней среды невелики, малейшие ошибки при измерении R и R' ведут к колебаниям в величинах n и k на десятки процентов. Некоторого улучшения точности можно достичь, применив здесь многократные отражения, однако это неизбежно потребует отхода от строго нормального падения света и, следовательно, учета угловой зависимости.

Фотометрические измерения при нормальном падении представляют собой наиболее распространенные оптические измерения на тонких металлических пленках. По измеренным R , R' и T можно вычислить три неизвестных параметра пленки n , k и d . Измерение коэффициента обратного отражения проводится для сужения диапазона решений [50]. Для этого необходимо использование ЭВМ, либо таблиц значений R , R' и T при различных n , k и d [51]. Линейное приближение обычно оказывается не вполне удовлетворительным, так как интервалы между значениями переменных не достаточно малы, и потому необходима графическая интерполяция. Точность, которой при этом можно достигнуть, является переменной и зависит от \tilde{n} и d . Практика показывает, что указанные три

параметра можно определить таким путем с относительной погрешностью в несколько процентов.

Рассмотрим суть метода предложенного Абелесом на графическом примере (рис. 2.14). Сплошными черными линиями показаны комбинации n и k соответствующие измеряемым значениям коэффициентов пропускания и отражения, а пунктирной линией коэффициенту обратного отражения. На их пересечении находятся искомые значения оптических постоянных. Поскольку измерения коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения измеряются с погрешностью, то на этом же графике можно оценить и погрешность определения оптических постоянных отложив линии комбинаций значений n и k для $T+\Delta T$, $R+\Delta R$, $R'+\Delta R'$ и $T-\Delta T$, $R-\Delta R$, $R'-\Delta R'$. При этом наглядно виден диапазон

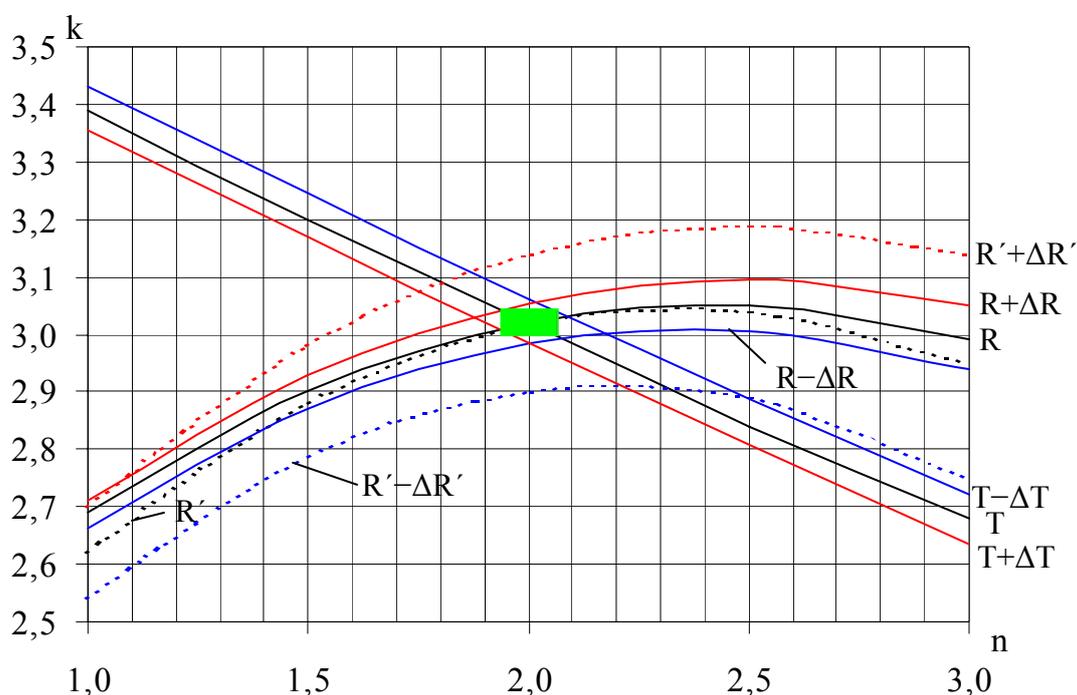


Рис. 2.14. Определение оптических постоянных по спектрофотометрическим измерениям. решений (выделенный прямоугольник).

Один из наиболее употребительных методов состоит в измерении толщины пленки, а также R и T в выбранной области спектра. Необходимо, конечно, чтобы толщина была известна достаточно точно, и это порождает вполне реальные проблемы.

В тех случаях, когда пленку можно напылить на часть поверхности наиболее пригодными являются интерферометрические методы измерения толщины. Широкое применение получили три типа интерферометров: поляризационный интерферометр Дайсона со сдвигом волнового фронта [52]; многолучевой интерферометр Физо [54]; многолучевой интерферометр Майкельсона, использующий полосы равного хроматического порядка [53, 55]. Рассматривая точностные возможности

данных методов можно отметить, что интерферометр Физо хотя и наиболее широко применяется для измерения толщины пленок, но может обеспечить точность в пределах от 0,5 до 4 нм в зависимости от гладкости подложки и других экспериментальных условий [56]. Метод полос равного хроматического порядка имеет большую точность, чем метод полос Физо, так как на его точность слабее влияют неровности пластин интерферометра. Этот метод позволяет определять толщины превышающие $\lambda/2$ и при тщательных измерениях может обеспечить точность определения толщины пленок до 0,1–0,2 нм. Интерферометр Дайсона хотя и редко применяется, но обладает очень высокой точностью $\pm 0,01$ нм.

Имея возможность измерения толщины тонкой металлической пленки неразрушающими методами или разрушающими при использовании дополнительного образца, кратко обсудим расчет n и k по измеренным значениям R и T . Если имеются таблицы зависимости R и T от n и k для различных $\varphi = 2\pi d/\lambda$ при фиксированном значении n_0 , можно прибегнуть к графической интерполяции. Пока, однако, этот метод вычисления по разным причинам оказывается недостаточно удовлетворительным.

Другой полностью численный метод был описан в работах [57, 58, 59]. При помощи ЭВМ решается система уравнений $R(n,k) = R_{\text{эксп.}}$, $T(n,k) = T_{\text{эксп.}}$, где $R_{\text{эксп.}}$ и $T_{\text{эксп.}}$ — измеренные значения. Эта математическая задача оказывается не очень сложной, хотя уравнения, как правило, являются трансцендентными и неалгебраическими. Важно отметить, что измеренным значениям $R_{\text{эксп.}}$ и $T_{\text{эксп.}}$ может соответствовать до четырех значений (n, k) , если установить пределы $0 < n < 12$, $0 < k < 12$. При выборе правильных значений руководствуются физическими соображениями. В некоторых случаях вообще невозможно найти решения. Это связано с тем фактом, что очень малые ошибки при определении $R_{\text{эксп.}}$ и $T_{\text{эксп.}}$ могут весьма сильно влиять на значения n и k . Этот вопрос обсуждался в работах [60, 61, 62]. Однако, исследования показывают, что возможно определение n и k металлических пленок с точностью 2% при измерении толщины с погрешностью ± 2 нм, и коэффициентов отражения и пропускания с погрешностью 1% от измеренной величины [50].

2.3.2. Фотометрические и интерферометрические измерения

Определение \tilde{n} и d возможно при одновременном измерении шести величин — трех интенсивностей R , R' , T и трех фазовых сдвигов ρ , ρ' и τ . [63] Преимущество этого метода состоит в том, что он связан со сравнительно простыми численными расчетами. Можно показать, что

$$\tilde{n}^2 = n_0 n_0 \frac{n_0 R^{1/2} e^{j\rho} \left(1 - R'^{1/2} e^{j\rho'}\right)^2 + T e^{j2\tau} \left[n_0 - n_0 \left(1 - R'^{1/2} e^{j\rho'}\right)\right]}{n_0 R^{1/2} e^{j\rho} \left(1 + R'^{1/2} e^{j\rho'}\right)^2 - T e^{j2\tau} \left[n_0 - n_0 \left(1 + R'^{1/2} e^{j\rho'}\right)\right]} \quad (36)$$

Толщину пленки можно найти, пользуясь одним из следующих соотношений:

$$e^{i4\pi n_0 d \lambda} = R^{1/2} e^{i\rho} \frac{n_\ell (\tilde{n}^2 - n_0^2)}{\tilde{n}^2 \left[n_\ell - n_0 \left(1 + R'^{1/2} e^{i\rho'} \right) \right] + n_0 n_\ell \left[n_0 - n_\ell \left(1 - R'^{1/2} e^{i\rho'} \right) \right]}, \quad (37)$$

$$e^{i4\pi n_0 d \lambda} = \frac{n_\ell}{n_0} \frac{T(\tilde{n}^2 - n_0^2) e^{i2\tau}}{\tilde{n}^2 \left(1 + R'^{1/2} e^{i\rho'} \right)^2 - n_\ell^2 \left(1 - R'^{1/2} e^{i\rho'} \right)^2}. \quad (38)$$

В принципе для определения n , k и d достаточно измерить фазовые сдвиги ρ , ρ' и τ при нормальном падении, но на практике этот метод не нашел применения. Причина недостаточного интереса к этому методу, возможно, состоит в том, что измерение фазовых сдвигов в различных областях спектра более сложно и менее надежно, чем фотометрические измерения.

2.3.3. Эллипсометрические измерения

Хотя измерения пропускания и отражения в принципе проще и распространены более широко, эллипсометрические методы открывают большие возможности при проведении прецизионных измерений на тонких пленках. Отличительная черта этих методов состоит в том, что измеряемой величиной является не интенсивность прошедшего и отраженного света, а углы, разности фаз и отношения амплитуд компонент световой волны.

В отличие от случая нормального падения на границу раздела, когда в поглощающей среде распространяется однородная волна, у которой плоскости постоянной амплитуды параллельны плоскостям постоянной фазы, при наклонном падении луча прошедшая волна неоднородна и плоскости равной фазы в ней наклонены относительно плоскостей равной амплитуды. Если в случае прозрачной среды распространение волны при всех углах падения описывается двумя постоянными коэффициентами: волновым вектором и показателем преломления, не зависящим от угла, то в случае поглощающей среды прошедшую волну описать таким образом нельзя. Форма волны в поглощающей среде — периодическая вдоль поверхности раздела и экспоненциально затухающая в направлении, перпендикулярном к поверхности раздела — такова, что ее нельзя описать с помощью только двух параметров, не зависящих от угла. Точные выражения, описывающие прошедшую и отраженную волны, чрезвычайно сложны. Можно, однако, получить соотношения, связывающие величины n и k с измеряемыми характеристиками отраженного пучка. Чисто формальное соотношение $n_0 \sin \theta_0 = n \sin \theta$, является просто определением комплексной величины θ . Приписывать θ смысл комплексного угла преломления было бы неправильно, так как реальный угол между плоскостями постоянной фазы и постоянной амплитуды не связан каким-либо простым образом с действительной или мнимой частями θ .

Если толщина поглощающей пленки достаточно велика, так, что пленка в целом непрозрачна, то ее оптические константы также можно определить, проводя эллипсометрические измерения на единственном образце. Смысл различных эллипсометрических параметров, включая Δ и Ψ , иллюстрирует рис. 2.15. Параметры, характеризующие отраженный пучок, удобно выразить через отношение осей эллипса поляризации отраженного луча и разность фаз компонент, электрические векторы которых параллельны и перпендикулярны плоскости падения [64]:

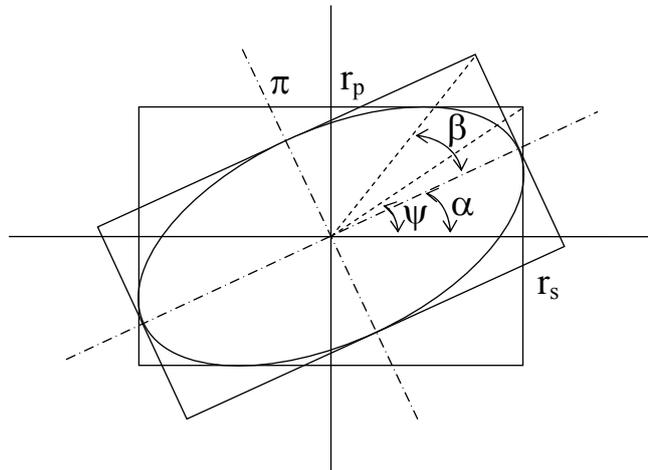


Рис. 2.15. Эллипс поляризации при отражении от металла.

$$\frac{r_p}{r_s} = e^{i\Delta} \operatorname{tg} \psi \quad (39)$$

Следовательно, связь между углами α и β (рис. 2.15), и Ψ , Δ определяется равенствами

$$\cos 2\psi = \cos 2\alpha \cos 2\beta \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \Delta = \frac{\operatorname{tg} 2\beta}{\sin 2\alpha} \quad (40)$$

Из этих соотношений получаем:

$$n^2 - k^2 = n_0^2 \sin^2 \theta_0 \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \theta_0 (\cos^2 2\psi - \sin^2 2\psi \sin^2 \Delta)}{(1 + \sin 2\psi \cos \Delta)^2} \right) \quad (41)$$

$$nk = \frac{n_0^2 \sin^2 \theta_0 \operatorname{tg}^2 \theta_0 \sin 2\psi \cos 2\psi \sin \Delta}{(1 + \sin 2\psi \cos \Delta)^2} \quad (42)$$

Следовательно, n и k можно определить по измеренным значениям Δ и Ψ для любого угла падения θ_0 . Анализ эллиптичности проводится одним из стандартных методов, в которых обычно используется компенсатор для преобразования эллиптически поляризованного отраженного луча в плоскополяризованный. При измерениях главного угла падения $\bar{\theta}$ (т.е. угла, при котором одна ось эллипса поляризации отраженного луча лежит в плоскости падения, а другая — перпендикулярна ей) одновременно с главным азимутом $\bar{\Psi}$ [65, 66] выражения (41, 42) упрощаются, поскольку для главного угла падения разность фаз $\Delta = \pi/2$. При оптимальных условиях углы $\bar{\theta}$ и $\bar{\Psi}$ можно определить с точностью до

одной дуговой минуты. Относительная ошибка в n и k связана с абсолютной ошибкой в определении $\bar{\Psi}$ простыми соотношениями:

$$\frac{\delta n}{n} = \operatorname{tg} \bar{\theta} \delta \bar{\theta},$$

$$\frac{\delta k}{k} = 2 \operatorname{sec}^2 2\bar{\theta} \delta \bar{\theta} \quad (43)$$

Из этих формул видно, что для области значений n и k , соответствующих большинству материалов в оптической области спектра, чувствительность эллипсометрического метода позволяет реализовать точность около 1%.

Хотя практически существует неограниченное число способов проведения эллипсометрических измерений, любой из них можно отнести к одному из следующих пяти классов:

1. Изменяется вносимая компенсатором оптическая разность хода, и либо поляризатор, либо анализатор поворачиваются до момента гашения луча. Тогда положение компенсатора определяет величину Δ , а положение анализатора (или поляризатора) — величину Ψ [67]. Точность измерений этим методом при использовании компенсатора Бабине–Солейля невелика, но, если в качестве компенсатора использовать электрооптическую ячейку, точность метода повышается.

2. Ориентация поляризатора соответствует $\gamma_{\text{п}}=45^\circ$, а вращением компенсатора и анализатора добиваются гашения луча. Главный недостаток этого метода заключается в трудности определения момента гашения луча, поскольку ориентация компенсатора и анализатора взаимно зависимы. В связи с этим необходимо использовать строго четвертьволновый компенсатор. Измерения могут проводиться при любом угле падения, но наибольшую чувствительность метод имеет при углах близких к главному. При этом ориентация быстрой оси компенсатора относительно плоскости падения и главной плоскости анализатора определяется углами $\gamma_{\text{к}}$ и $\gamma_{\text{а}}$ соответственно. Тогда параметры Ψ и Δ определяются уравнениями $\cos 2\Psi = \cos 2\gamma_{\text{к}} \cos 2\gamma_{\text{а}}$; $\operatorname{tg} \Delta = \operatorname{tg} 2\gamma_{\text{к}} / \operatorname{tg} 2\gamma_{\text{а}}$. Компенсатор в этом случае располагается между поляризатором и образцом, а не между образцом и анализатором (рис. 2.16).

3. Быстрая ось компенсатора (четвертьволновой пластинки) ориентируется под углом 45° (либо 135°) к плоскости падения, а поляризатор и анализатор поворачиваются до момента гашения луча [68]. Преимущество этого метода состоит в том, что он

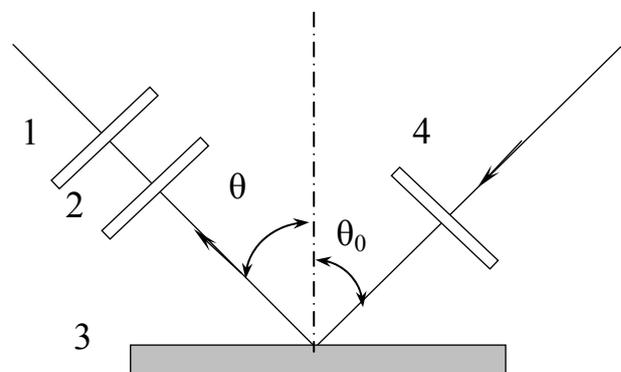


Рис. 2.16. Схема эллипсометра.
1-анализатор; 2-компенсатор;
3-образец; 4-поляризатор

не требует точно четвертьволнового компенсатора и компенсатор может располагаться с любой стороны от образца. Если ось компенсатора проходит под углом 45° к плоскости падения, то Ψ и Δ определяются $\text{tg}\Psi = \text{ctg}\beta \text{tg}(-\gamma_a)$, $\text{tg}\Delta = \sin\delta \text{tg}(90^\circ - 2\gamma_n)$, $\cos 2\beta = -\cos\delta \cos 2\gamma_n$, где γ_n и γ_a – угловые ориентации поляризатора и анализатора отсчитанные от плоскости падения, δ – разность фаз вносимая компенсатором.

4. Поляризатор или анализатор и компенсатор в виде четверть волновой пластины ориентируются таким образом, что гашение луча происходит под главным углом падения, когда $\Delta = \pi/2$. При этом угол падения изменяется до тех пор, пока не будет достигнут главный угол.

5. Значения Ψ и Δ определяются по отношениям интенсивностей отраженного и прошедшего света для различных взаимных ориентаций поляризатора и анализатора. Этот метод предпочтительнее методов, основанных на гашении луча. Он не требует компенсатора, что позволяет использовать его в инфракрасной области спектра, для которой сложно изготовить четвертьволновые пластинки из-за отсутствия прозрачных в этой области спектра материалов обладающих большим двойным лучепреломлением, и наиболее чувствителен при угле падения, равном главному углу, но может применяться также и при других углах падения. Первоначально метод использовался в инфракрасной области спектра [69, 70] и его использование возможно на длинах волн вплоть до 22 мкм [71].

Использование эллипсометрии для определения оптических постоянных металлов, при соответствующей коррекции результатов, позволяет учитывать наличие поверхностных пленок [72]. Параметр Δ , в частности, очень чувствителен к наличию пленок на поверхности исследуемого вещества. Пленки окислов толщиной 3–4 нм, которые обычно образуются на поверхности металлов, вызывают изменение Δ на несколько градусов [73]. Но эти пленки нельзя обнаружить, проводя измерения при различных углах падения [74]. Таким образом, если не измерена толщина окисного слоя и не введены соответствующие поправки, оптические постоянные металла, полученные из эллипсометрических измерений в воздухе, почти определенно ошибочны.

При введении поправок, обусловленных окисными пленками, при определении оптических констант из эллипсометрических измерений следует использовать не линейные приближения [73], а точные эллипсометрические уравнения. Толщину и показатель преломления поверхностной окисной пленки можно определить, погружая образец в жидкости с различными показателями преломления [75]. Если показатель преломления пленки известен, ее влияние на результаты измерений можно исключить, если погрузить образец в жидкость с таким же показателем преломления [76]. Хотя одним из очень чувствительных методов измерения толщины окисных пленок все же является эллипсометрия, но при этом необходимы начальные измерения на поверхности, свободной от окисной пленки [77]. Но даже если поверхность образца не окисляется на

воздухе, на результаты измерений могут влиять адсорбированные пленки воды и масла [69]. Наиболее изящный метод эллипсометрического определения оптических постоянных металлических пленок состоит в измерениях непосредственно после изготовления пленок в условиях сверхвысокого вакуума. Например, если измерения проводятся в вакууме $1,3 \cdot 10^{-7}$ Па, то для образования на свеженапыленной пленке или сколотой поверхности образца монослоя загрязнений требуется по крайней мере 30 мин. Однако при вакууме $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па пленка загрязнения может образовываться всего за 2 секунды [78]. Это время слишком мало для проведения серии измерений. Эллипсометрические измерения в вакууме связаны с трудностями, обусловленными двойным лучепреломлением в механически напряженных оптических окнах вакуумной системы, находящихся под воздействием атмосферного давления.

2.3.3.1. Оптимальные условия эллипсометрических измерений

Под оптимальными понимают такие условия, которые обеспечивают наибольшую точность определяемых величин. Естественно, эти условия зависят от самих определяемых величин.

Для каждого конкретного случая необходимо хотя бы качественно проанализировать уравнения, обеспечивающие оптимальность решения поставленной задачи.

Покажем, как это можно сделать на примере классического эллипсометрического объекта – оксида кремния на кремнии. Пусть поставлена задача определения показателя преломления оксидного слоя, причем оптические константы кремния заранее известны: $\tilde{n} = 3.865 - i0.023$ для $\lambda = 632,8$ нм.

Обычно рекомендуется проводить измерения слоев на кремнии при угле падения 70° . Вычислим для этого угла падения значение производных $|\partial n_1 / \partial \Delta|$ и $|\partial n_1 / \partial \psi|$, считая, что $n_1 = 1,46$ и задаваясь различными значениями толщины слоя d . Для получения таких производных можно воспользоваться прямой программой и произвести численное дифференцирование. После вычисления Δ_1 и Ψ_1 при $n_1 = 1,46$ в последнее вводится вариация, например, на $\delta n_1 = 0,001$ и снова вычисляются Δ_2 и Ψ_2 . Если выразить $\delta \Delta = \Delta_1 - \Delta_2$ и $\delta \psi = \psi_1 - \psi_2$ в минутах, то отношения $|\partial n_1 / \partial \Delta|$ и $|\partial n_1 / \partial \psi|$ будут показывать, на какую величину изменится n_1 при изменении Δ и ψ на одну минуту.

Для полноты картины можно выяснить: действительно ли угол падения 70° является оптимальным, т.е. построить такие же производные для различных углов падения.

Проведение подобного анализа позволяет экспериментатору быть уверенным в полной реализации метрологических возможностей эллипсометрического метода.

2.3.3.2. Методы точного решения

Основное уравнение отражательной эллипсометрии имеет вид:

$$P = \operatorname{tg} \Psi \exp(i\Delta) = r_p / r_s \quad (44)$$

Где P – относительный коэффициент отражения; Δ и Ψ – эллипсометрические параметры; r_p и r_s – амплитудные коэффициенты отражения для p- и s-компонент электрического вектора.

Это уравнение определяет физический смысл параметров Δ и Ψ . Коэффициенты отражения r_p и r_s , как правило, суть величины комплексные. Таким образом, Δ есть разность аргументов этих величин, в $\operatorname{tg} \Psi$ – отношение их модулей.

Следует подчеркнуть, что величины Δ и Ψ (или комплексная величина относительного коэффициента отражения P) не могут служить полной характеристикой отражательных свойств исследуемой поверхности для некоторого угла падения. Полностью эти свойства описываются двумя величинами r_p и r_s или двумя другими величинами поверхностных адмиттансов Y_p и Y_s .

Выражения для Δ и Ψ применительно к наиболее важным видам отражающих систем известны и приводятся далее. Они являются, функцией структуры отражающей системы, оптических характеристик всех ее элементов и их геометрических размеров.

Вычисление значений Δ и Ψ для конкретного вида отражающей системы при всех известных ее параметрах составляет содержание прямой задачи эллипсометрии. В математическом плане это относительно простая задача – вычисление по известной формуле. Осложнение состоит лишь в том, что необходимо пользоваться комплексной алгеброй и тригонометрией, так как показатели преломления в общем случае – величины комплексные.

Обратная задача эллипсометрии – определение всех или некоторых параметров отражающей системы по измеренным при одном или нескольких углах падения значениям Δ и Ψ . Эта задача существенно сложнее математически, так как она не имеет аналитического решения. Для ее решения привлекаются разнообразные численные нелинейные методы. Их основа – многократное решение прямой задачи с выбранным по некоторым правилам искомым параметрам системы и сравнение полученных расчетных значений Δ и Ψ с экспериментальными; такая процедура продолжается до тех пор, пока разница между вычисленными и экспериментальными значениями Δ и Ψ не станет меньше некоторого заданного значения.

Другими словами, в общем виде это есть задача минимизации определенной целевой функции. Вид этой функции выбирается из физических соображений так, чтобы в пространстве искомых параметров координаты ее минимума соответствовали решению.

Следует отметить, что в последнее время появилась возможность получения аналитических решений для всех параметров отражающей системы, состоящей из однородного изотропного слоя, находящегося на

изотопной подложке. Эта возможность реализуется при проведении специальных эллипсометрических измерений в двух различных средах.

2.3.3.3. Идеальная граница между полубесконечными средами

Рассмотрим отражающую систему, состоящую из границы раздела между двумя полубесконечными средами. Эту границу будем считать идеальной. Практически всегда в эллипсометрическом эксперименте оптические характеристики внешней среды известны и, более того, эта среда является диэлектрической, т.е. не поглощает падающее излучение. Угол падения световой волны считается также известным, так как он задается условиями эксперимента и устанавливается с помощью соответствующих отсчетных устройств эллипсометра.

В нашем случае r_p и r_s есть известные амплитудные коэффициенты отражения Френеля:

$$\begin{aligned} r_p &= (n_\ell \cos \theta_0 - n_0 \cos \theta_\ell) / (n_\ell \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_\ell) \\ r_s &= (n_0 \cos \theta_0 - n_\ell \cos \theta_\ell) / (n_0 \cos \theta_0 + n_\ell \cos \theta_\ell) \end{aligned} \quad (45)$$

При этом

$$P = \frac{r_p}{r_s} \leq 1$$

$$P = \frac{n_\ell \cos \theta_0 - n_0 \cos \theta_\ell}{n_\ell \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_\ell} \cdot \frac{n_0 \cos \theta_0 + n_\ell \cos \theta_\ell}{n_0 \cos \theta_0 - n_\ell \cos \theta_\ell}$$

$$P + 1 = \frac{2n_\ell n_0 (\cos^2 \theta_0 - \cos^2 \theta_\ell)}{n_\ell n_1 (\cos^2 \theta_0 - \cos^2 \theta_\ell) - (n_\ell^2 - n_0^2) \cos \theta_0 \cos \theta_\ell}$$

$$P - 1 = \frac{2(n_\ell^2 - n_0^2) \cos \theta_0 \cos \theta_\ell}{n_\ell n_1 (\cos^2 \theta_0 - \cos^2 \theta_\ell) - (n_\ell^2 - n_0^2) \cos \theta_0 \cos \theta_\ell}$$

$$\frac{P - 1}{P + 1} = \frac{(n_\ell^2 - n_0^2) \cos \theta_0 \cos \theta_\ell}{n_\ell n_0 (\cos^2 \theta_0 - \cos^2 \theta_\ell)}$$

$$\left(\frac{P - 1}{P + 1} \right)^2 = \frac{n_\ell^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0}{\operatorname{tg}^2 \theta_0 \cdot n_0^2 \sin^2 \theta_0} \quad (46)$$

Здесь n_ℓ , n_0 – показатели преломления нижней и верхней сред θ_0 и θ_ℓ углы падения и преломления.

Таким образом, прямая задача состоит в вычислении Δ и Ψ по уравнению (46).

Обратная задача – определение показателя преломления нижней среды n_ℓ по измеренному P . В этом простейшем случае обратная задача имеет аналитическое решение:

$$n_\ell^2 = n_0^2 \sin^2 \theta_0 \left[\left(\frac{P - 1}{P + 1} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \theta_0 + 1 \right] \quad (47)$$

Из двух решений, даваемых выражением (47) выбираем, то которое имеет отрицательную мнимую часть в соответствии с принятой в эллипсометрии записью показателя преломления в виде $\tilde{n} = n - ik$.

2.3.3.4. Однородный изотропный слой на изотропной подложке

Пусть на подложке с оптическими характеристиками: $\tilde{n}_\ell = n_\ell - ik_\ell$ находится слой толщиной d и $\tilde{n}_1 = n_1 - ik_1$. Однородность слоя означает, что оптические характеристики остаются неизменными по его толщине; в противном случае слой называется неоднородным.

Выражения для r_p и r_s следующие:

$$\begin{aligned} r_p &= (r_{01p} + r_{1\ell p} \exp(-2i\hat{\phi}_1)) / (1 + r_{01p} r_{1\ell p} \exp(-2i\hat{\phi}_1)) \\ r_s &= (r_{01s} + r_{1\ell s} \exp(-2i\hat{\phi}_1)) / (1 + r_{01s} r_{1\ell s} \exp(-2i\hat{\phi}_1)) \end{aligned} \quad (48)$$

где r_{01p} , $r_{1\ell p}$, r_{01s} , $r_{1\ell s}$ – амплитудные коэффициенты Френеля для соответствующих границ раздела;

$$r_{01p} = (n_1 \cos\theta_0 - n_0 \cos\theta_1) / (n_1 \cos\theta_0 + n_0 \cos\theta_1)$$

$$r_{01s} = (n_0 \cos\theta_0 - n_1 \cos\theta_1) / (n_0 \cos\theta_0 + n_1 \cos\theta_1)$$

$$r_{1\ell p} = (n_\ell \cos\theta_1 - n_1 \cos\theta_\ell) / (n_\ell \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_\ell)$$

$$r_{1\ell s} = (n_1 \cos\theta_1 - n_\ell \cos\theta_\ell) / (n_1 \cos\theta_1 + n_\ell \cos\theta_\ell),$$

$\hat{\phi}_1 = 2\pi \tilde{n}_1 d_1 / \lambda \cdot \cos\theta_1$ – фазовая толщина слоя; λ – длина волны используемого излучения в вакууме.

Менее известны в эллипсометрии выражения для r_p и r_s через адмиттансы, введенные Альбе. По определению, адмиттанс есть поверхностная высокочастотная проводимость – отношение тангенциальных компонент магнитного и электрического векторов:

$$r_p = -(\hat{n}_{0p} - Y_p) / (\hat{n}_{0p} + Y_p)$$

$$r_s = (\hat{n}_{0s} - Y_s) / (\hat{n}_{0s} + Y_s) \quad (49)$$

где Y_p и Y_s – обобщенные адмиттансы, равные:

$$Y_p = \hat{n}_{1p} \cdot ((\hat{n}_{\ell p} + \hat{n}_{1p} itg\hat{\phi}_1) / (\hat{n}_{1p} + \hat{n}_{\ell p} itg\hat{\phi}_1))$$

$$Y_s = \hat{n}_{1s} \cdot ((\hat{n}_{\ell s} + \hat{n}_{1s} itg\hat{\phi}_1) / (\hat{n}_{1s} + \hat{n}_{\ell s} itg\hat{\phi}_1)), \quad (50)$$

Величины \hat{n}_{jp} и \hat{n}_{js} есть адмиттансы для соответствующей j -той среды.

$$\hat{n}_{js} = \tilde{n}_j \cos\theta_j ; \quad \hat{n}_{jp} = \frac{\tilde{n}_j}{\cos\theta_j} .$$

По поводу выражений (49) и (50) следует заметить, что оба они являются результатом строгого и последовательного применения уравнения Максвелла к рассмотрению отражения света. Естественно, оба

выражения дают одинаковые численные результаты для одинаковых моделей отражающей системы.

Однако использование адмиттансов представляет некоторые преимущества: прежде всего, обобщенные адмиттансы являются абсолютной характеристикой отражающей системы безотносительно к среде, в которой она находится, что непосредственно следует из (49) и (50).

Рассмотрим два частных случая, предполагая, что параметры подложки известны и искомыми являются параметры слоя.

Ниже изложены методы решения, в которых толщина слоя d отделяется от его оптических характеристик n_1 и k_1 . Методиками поиска определяются только эти последние, а толщина d_1 просто вычисляется по соответствующим формулам.

1. Примем, что в веществе слоя поглощение отсутствует, т.е. $k_1=0$; на практике такая ситуация реализуется, если $k_1 \leq 0,001$. Этот случай рассмотрел Холмс. Он воспользовался выражением Мак-Кракина для толщины d : если обозначить $\exp(-2i\hat{\phi}_1)=X$, то:

$$X = - (B \pm (B^2 - 4AC)^{0.5}) / 2A, \quad (51)$$

где

$$A = Pr_{01p}r_{1lp}r_{1ls} - r_{01p}r_{1lp}r_{1ls}$$

$$B = P(r_{1ls} + r_{01p}r_{01s}r_{1lp}) - r_{01p}r_{12s}r_{1ls} - r_{1lp}$$

$$C = Pr_{01s} - r_{01p}$$

В рассматриваемом случае предполагается $k_1=0$ поэтому X есть экспонент с чисто мнимым показателем; это означает, что $|X|=1$. Поскольку d_1 не входит в правую часть выражения (51), следует считать, что уравнение $|X| - 1 = 0$, (52) есть нелинейное уравнение относительно только неизвестной величины n_1 . В результате его решение определяется и величина $X \equiv g - ih$. После этого толщина слоя d_1 вычисляется по формуле:

$$d_1 = \frac{\lambda \arctg \frac{h}{g}}{4\pi \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0}}, \quad (53)$$

а период толщины d_0 – по формуле:

$$d_0 = \frac{\lambda}{2} \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0}. \quad (54)$$

На языке адмиттансов аналог выражений (51) – (54) имеет вид (при условии $itg \hat{\phi} = x$):

$$x = (-b \pm (b^2 - 4ac)^{0.5}) / 2a \quad (55)$$

где

$$a = (\tilde{n}_l^2 \tilde{n}_0^2 - \tilde{n}_1^4)(P+1) + (\hat{n}_{0s} \hat{n}_{1p}^2 \hat{n}_{1s} - \hat{n}_{0p} \hat{n}_{1s}^2 \hat{n}_{1p})(P-1)$$

$$b = (\tilde{n}_1^2 \tilde{n}_0^2) (\hat{n}_{1p} \hat{n}_{1s} + \hat{n}_{1s} \hat{n}_{1p})(P-1) + (\tilde{n}_l^2 \tilde{n}_1^2) (\hat{n}_{1p} \hat{n}_{0s} - \hat{n}_{1s} \hat{n}_{0p})(P-1)$$

$$c = \hat{n}_1^2 [(\hat{n}_0^2 - \hat{n}_l^2) (P+1) (\hat{n}_{lp} \hat{n}_{os} - \hat{n}_{ls} \hat{n}_{op}) (P-1)]$$

$$\operatorname{Re} [x] = 0 \quad (56)$$

$$d = \lambda \operatorname{arctg}(\operatorname{Im} x / 2\pi \hat{n}_{1s}) \quad (57)$$

$$d_0 = \lambda / 2 \cdot \hat{n}_{1s} \quad (58)$$

Изложенные результаты можно дополнить следующими комментариями.

Во-первых, поскольку эллипсометрическое измерение при одном угле падения дает величины Δ и Ψ , а искомыми являются также две величины n_1 и d_1 , весь анализ такой модели может быть проведен при одном угле падения. Измерения же при двух или более углах падения позволяют установить адекватность модели и реального объекта по сходимости результатов при разных углах падения.

Во-вторых, поскольку Δ и Ψ являются периодическими функциями толщины слоя d_1 , такой анализ дает однозначный результат только в пределах первого периода. Принято считать, что если толщина превышает период d_0 , необходима дополнительная, правда грубая, информация о толщине. На самом деле это общепринятое представление не является верным. Как видно из выражений (54) и (58), период d_1 , есть функция угла падения. Поэтому измерения при нескольких углах падения в принципе позволяет определить толщину и в том случае, когда она превышает d_0 . Однако зависимость d_0 от θ_0 является слабой, поэтому для проведения подобного анализа требуется высокая точность эллипсометрических измерений. Кроме того, отступление реального объекта от принятой модели является еще одной причиной ошибок расчета. В результате указанные принципиальные возможности редко реализуются на практике.

Наконец, в-третьих, как видно из (51) и (55) имеются две ветви решения, отличающиеся знаком перед радикалом. Машинный эксперимент показал, что, в заданных пределах по n_1 , если по ветви со знаком “+” имеется решение, то по ветви со знаком “-” его нет, и наоборот. Далее, для этих уравнений в общем случае существуют три математических решения, первое при $n_1 \approx 1.1-1.3$, третье при $n_1 > 3$. Эти решения не имеют физического смысла – конденсированных сред с такими коэффициентами преломления не существует. Второе, среднее решение есть искомый корень рассматриваемых уравнений. Оно легко определяется путем задания разумных пределов поиска по параметру n_1 .

2. В этом случае предполагается, что $k_1 \neq 0$, т.е. вещество слоя обладает поглощением. Число искомых параметров равно трем, поэтому необходимо провести измерения минимум при двух углах падения. И в этом случае путем отделения переменной d можно упростить систему поиска и улучшить “качество” решения. Для этой цели предлагается два алгоритма.

Первый является непосредственным обобщением метода Холмса: X и x уже обладают свойствами $|X|=1$ и $\text{Re } x=0$, однако из (51) и (55) можно выразить толщины:

$$d_1=i(\lambda \ln X)/(4\pi \hat{n}_{1s} \cos \theta_1) \text{ и } d_1=(\lambda \text{Arctg}(-ix))/(2\pi \hat{n}_{1s}) \quad (59)$$

Вычисленное таким образом значение толщины должно обладать нулевой мнимой частью; кроме того, реальные части, вычисленные по данным разных углов падения, должны совпадать. Поэтому поиск n_1 и k_1 должен минимизировать целевую функцию вида:

$$F=\sum((\text{Re } d_1 - \text{Re } d_{1+1})^2 + (\text{Im } d_1)^2 + (\text{Im } d_{1+1})^2)^{0,5} \quad (60)$$

где суммирование ведется по разным углам падения,

возможен и второй вариант алгоритма решения.

Как уже отмечалось, в рассматриваемом случае величины X и x являются комплексными, поэтому можно записать, например;

$$i \text{tg}[2\pi d (\text{Re } \hat{n}_{1s} + i \text{Im } \hat{n}_{1s})/\lambda] = \text{Re } x + i \text{Im } x \quad (61)$$

Приравняв вещественные и мнимые части (61), получим два выражения, каждое из которых можно решить относительно d :

$$d=\lambda(S+2m\pi)/(4\pi \text{Re } \hat{n}_{1s}); d=(\lambda \ln T)/(4\pi \text{Im } \hat{n}_{1s}) \quad (62)$$

Вещественные величины T и S находятся из соотношения:

$$(1+x)/(1-x)=T \exp i(S+2m\pi) \quad (63)$$

Где m – положительное натуральное число, включая нуль.

Приравнявая правые части (62), получим вещественное нелинейное уравнение. Поступив аналогично с данными другого угла падения, получим систему нелинейных уравнений, корнями которого являются искомые n_1 и k_1 :

$$\text{Re } \hat{n}_{1s}^{(1)} \cdot \ln T^{(1)} + \text{Im } \hat{n}_{1s}^{(1)} \cdot [S^{(1)} + 2m\pi] = 0$$

$$\text{Re } \hat{n}_{1s}^{(2)} \cdot \ln T^{(2)} + \text{Im } \hat{n}_{1s}^{(2)} \cdot [S^{(2)} + 2m\pi] = 0 \quad (64)$$

(верхние индексы указывают номер угла падения)

В начале решения полагают $m=0$. Если не будет найдено решение в заданных пределах по n_1 и k_1 , m увеличивают на единицу и т.д. После определения $\hat{n}_1=n_1-ik_1$, толщина определяется выражением (62) однозначно.

В настоящее время, к сожалению, не исследован вид целевых функций, используемых описанными алгоритмами. Поэтому пока ничего нельзя сказать об относительных достоинствах методов и о влиянии экспериментальных ошибок в Δ и Ψ на точность полученных результатов.

Рассмотрим случай, когда неизвестны и оптические параметры подложки: искомыми являются величины d , n_1 , k_1 , n_ℓ , k_ℓ . Для анализа такой ситуации необходимо измерить эллипсометрические параметры Δ и Ψ минимум при трех углах падения.

Практика показала, что традиционные методы поиска применительно к такой задаче приводят к неустойчивым и многозначным решениям.[79] В следующем параграфе изложен метод, позволяющий получить единственное решение в аналитическом виде. Возможно, объединение поисковых и аналитических методов, их усовершенствование позволит добиться более высокого “качества” решений.

2.3.3.5. Аналитическое решение обратной эллипсометрической задачи для однослойной системы

Обратимся к уравнениям (48) и (49), В них входит изменяемая величина P – отношение r_p и r_s . Именно в силу этого получаются нелинейные уравнения для искомых величин. Естественно надеяться, что, если бы удалось экспериментально определить Y_p и Y_s (иными словами r_p и r_s) независимо каждое, математические трудности стали бы существенно меньшими.

Для этой цели предложен метод изменения среды, суть которого состоит в измерении эллипсометрических углов Δ и Ψ на объекте, помещаемом в две среды с различными показателями преломления $n_0^{(1)}$ и $n_0^{(2)}$. Потребуем, чтобы углы падения в этих были связаны законами Снелиуса:

$$n_0^{(1)} \sin \theta_0^{(1)} = n_0^{(2)} \sin \theta_0^{(2)} = \Phi \quad (65)$$

Выполнение этого требования обеспечивает вхождение светового луча в исследуемую систему под одним и тем же углом преломления; это, в свою очередь, обеспечивает равенство адмиттансов в двух рассматриваемых измерительных ситуациях, как это легко увидеть из определения адмиттансов.

Обозначим $(P-1)/(P+1)=r$. Из основного уравнения эллипсометрии $P=\text{tg}\Psi \exp(i\Delta)=r_p/r_s$, легко получить систему уравнений:

$$\begin{aligned} Y_p Y_s &= n_0^{(1)2} - r^{(1)} (\hat{n}_{0p}^{(1)} Y_s - \hat{n}_{0s}^{(1)} Y_p) \\ Y_p Y_s &= n_0^{(2)2} - r^{(2)} (\hat{n}_{0p}^{(2)} Y_s - \hat{n}_{0s}^{(2)} Y_p) \end{aligned} \quad (66)$$

Как было отмечено выше, левые части этих уравнений равны, поэтому, приравняв правые части получаем следующие решения для адмиттансов

$$Y_p \text{ и } Y_s: \quad Y_s = (\eta \pm (\eta^2 + 4\mu\varepsilon)^{0,5}) / (2\mu); \quad Y_p = \mu Y_s - \nu, \quad (67)$$

где

$$\eta = r^{(1)} (\hat{n}_{0s}^{(1)} \mu - \hat{n}_{0p}^{(1)}) + \nu;$$

$$\varepsilon = n_0^{(1)2} - r^{(1)} \hat{n}_{0s}^{(1)} \nu$$

$$\mu = (r^{(1)} \hat{n}_{0p}^{(1)} - r^{(2)} \hat{n}_{0p}^{(2)}) / (r^{(1)} \hat{n}_{0s}^{(1)} - r^{(2)} \hat{n}_{0s}^{(2)})$$

$$v=(n_0^{(1)2}-n_0^{(2)2})/(r^{(1)}\hat{n}_{0s}^{(1)}-r^{(2)}\hat{n}_{0s}^{(2)})$$

Для выбора физического решения из двух, определяемых (67) обратимся к физическому смыслу адмиттанса. Это есть проводимость, поэтому его вещественная часть определяется активной проводимостью, а мнимая – реактивной. Активная проводимость для пассивных систем, распространение света в которых не сопровождается усилением его интенсивности, положительна. Поэтому из двух решений (67) выбирается то, которое имеет положительную вещественную часть.

Таким образом, метод изменения среды позволяет однозначно определить адмиттансы отражающей системы Y_p и Y_s .

В изложенном выше рассмотрении нет никаких предположений о структуре отражающей системы; выражения (67) справедливы для любой структуры, если в ней нет элементов с анизотропными оптическими свойствами.

Вернемся к однослойной системе и предположим, что оптические константы подложки n_ℓ и k_ℓ известны. Из каждого выражения (16) для Y_p и Y_s можно определить $itg\hat{\phi}_1$:

$$itg\hat{\phi}_1 = \hat{n}_{1p}(\hat{n}_{\ell p}-Y_p)/(\hat{n}_{\ell p}Y_p - \hat{n}_{1p}^2);$$

$$itg\hat{\phi}_1 = \hat{n}_{1s}(\hat{n}_{\ell s}-Y_s)/(\hat{n}_{\ell s}Y_s - \hat{n}_{1s}^2) \quad (68)$$

откуда:

$$\hat{n}_{1p}(\hat{n}_{\ell p}-Y_p)/(\hat{n}_{\ell p}Y_p - \hat{n}_{1p}^2) = \hat{n}_{1s}(\hat{n}_{\ell s}-Y_s)/(\hat{n}_{\ell s}Y_s - \hat{n}_{1s}^2) \quad (69)$$

После несложных преобразований последнего выражения получается биквадратное уравнение относительно n_1^2 :

$$An_1^4 + Bn_1^4 + C=0 \quad (70)$$

$$A=\hat{n}_{\ell s}-\hat{n}_{\ell p}+Y_p-Y_s$$

$$B=(\hat{n}_{\ell p}-Y_p)(\Phi^2+Y_s\hat{n}_{\ell s})-Y_p\hat{n}_{\ell p}(\hat{n}_{\ell s}-Y_s)$$

$$C=Y_p\hat{n}_{\ell p}(\hat{n}_{\ell s}-Y_s)\Phi^2$$

Подставим в (69), из которого получено (70), n_0 вместо n_1 . Тогда (69) переходит в тождество $-1=-1$; это означает, что n_0 есть один из корней квадратного уравнения, пользуясь свойствами корней квадратного уравнения, можно получить однозначное выражение для искомой величины:

$$n_1^2 = Y_p(\hat{n}_{\ell s}-Y_s)\cdot\Phi^2/(\hat{n}_{\ell s}(Y_p-Y_s)\cdot\Phi^2) \quad (71)$$

Из двух значений для n_1 даваемых формулой (71), выбирается то у которого мнимая часть отрицательна.

В конечном результате метод изменения среды позволяет однозначно вычислить n_1 по аналитической формуле, если известно n_ℓ .

Рассмотрим теперь случай, когда неизвестны параметры подложки. Измерим Δ и Ψ (т.е. P) также в двух средах на двух парах связанных законом Снеллиуса углов падения:

$$\begin{aligned} n_0^{(1)} \sin \theta_0^{(11)} &= n_0^{(2)} \sin \theta_0^{(21)} = \Phi_1 \\ n_0^{(1)} \sin \theta_0^{(12)} &= n_0^{(2)} \sin \theta_0^{(22)} = \Phi_2 \end{aligned} \quad (72)$$

Далее по соотношениям (69) определим Y_{p1} , Y_{s1} , Y_{p2} , Y_{s2} . По формуле (71) можно выразить n_1 через результаты измерений при каждой паре углов. По определению n_1 не зависит от угла падения. Поэтому можно приравнять правые части (71), относящиеся к каждой паре углов падения. В результате получаем уравнение относительно адмиттансов подложки:

$$\beta \hat{n}_{\ell s}^{(1)} \hat{n}_{\ell s}^{(2)} - \gamma \hat{n}_{\ell s}^{(1)} + \tau \hat{n}_{\ell s}^{(2)} + \varepsilon = 0 \quad (73)$$

Коэффициенты которого есть функция только измеренных адмиттансов и условий измерения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= Y_{p1} \Phi_1^2; & \alpha_2 &= Y_{p2} \Phi_2^2; \\ z_1 &= \alpha_1 Y_s^{(1)}; & z_2 &= \alpha_2 Y_s^{(2)}; \\ Y^{(1)} &= Y_p^{(1)} - Y_s^{(1)}; & Y^{(2)} &= Y_p^{(2)} - Y_s^{(2)}; \\ \beta &= \alpha_1 - Y_2 - \alpha_2 Y^{(1)}; & \gamma &= \alpha_1 \Phi_2^2 - z_2 Y^{(1)}; \\ \tau &= \alpha_1 \Phi_1^2 - z_1 Y^{(2)}; & \varepsilon &= z_1 \Phi_2^2 - z_2 \Phi_1^2 \end{aligned}$$

Обозначим $\Theta = \Phi_2^2 - \Phi_1^2$, после несложных преобразований получаем уравнение четвертой степени относительно y

$$y^4 + Fy^3 + Gy^2 + Hy + L = 0 \quad (74)$$

коэффициенты, которого также функции только измеренных адмиттансов и условий измерения:

$$\begin{aligned} F &= -2\gamma/\beta; & G &= \Theta - (\tau^2 - \gamma^2)/\beta^2 \\ H &= -2(\varepsilon\tau + \beta\gamma\Theta)/\beta^2; & L &= (\Theta\gamma^2 - \varepsilon^2)/\beta^2 \end{aligned}$$

После определения y из (74) n_ℓ вычисляется так

$$n_\ell = (y^2 + \Phi_2^2)^{0,5} \quad (75)$$

Зная n_ℓ и n_1 из (69), можно вычислить $V = itg \hat{\phi}$

$$V = \hat{n}_{1p} (\hat{n}_{\ell p} - Y_p) / (\hat{n}_{\ell p} Y_p - \hat{n}_{1p}) = \hat{n}_{1s} (\hat{n}_{\ell s} - Y_s) / (\hat{n}_{\ell s} Y_s - \hat{n}_{1s}) \quad (76)$$

$$\text{Обозначим } (1+V)/(1-V) = k \exp i(\xi + 2m\pi) \quad (77)$$

где m – натуральное число, включая 0, тогда:

$$d = \lambda(\xi + 2m\pi - i \ln k) / 4\pi \hat{n}_{1s} \quad (78)$$

Сразу отметим, что d вычисляется как отношение двух компенсированных чисел, в результате чего тоже получается компенсированное число.

Из теории алгебраических уравнений следует, что уравнение (69) имеет четыре корня, следовательно (70) дает восемь значений n_ℓ . Как уже было сформулировано выше, из этой совокупности решений отбрасывают те, которые не удовлетворяют формальным требованиям $\text{Re } n_\ell > 0$, $\text{Im } n_\ell < 0$.

Каждое из оставленных решений используется для вычисления толщины при обоих углах преломления. Поскольку значение толщины не должно зависеть от этого угла, из всей совокупности значений d выбирается, то у которого отклонение толщины δd , полученное для двух углов преломления, минимально. Соответствующие значения n_0 , n_1 , $\text{Re } d$ принимаем за решение: величину $\text{Im } d$ можно рассматривать как меру влияния экспериментальных ошибок или отклонения принятой модели от реальной структуры.

2.3.3.6. Теоретические и методические основы проведения эллипсометрических измерений на ЛЭФ-ЗМ.

Эллипсометр представляет собой поляризационный гониометр, на подвижных плечах которого расположены поляризационные элементы: поляризатор, анализатор и компенсатор, а также источник света и фотодетектор. [80] Лимб гониометра обеспечивает установку заданного угла падения. Поляризационные элементы помещаются в собственные лимбы, и могут свободно вращаться.

Источник света должен обеспечивать получение рабочего светового пучка с высокой степенью монохроматичности и узкой диаграммой направленности с тем, чтобы можно было считать волновой фронт плоским.

В качестве поляризатора и анализатора в исследовательских эллипсометрах используются призмы из исландского шпата типа Глана-Фуко или Глана-Томпсона. Нулевому отсчету азимута этих элементов соответствует плоскость с наибольшей степенью поляризации.

Компенсатор представляет собой пластину из двулучепреломляющего кристалла, вырезанную и подобранную по толщине так, чтобы сдвиг фаз между необыкновенным и обыкновенным лучами составлял 90° . Нулевому отсчету азимута компенсатора соответствует плоскость, вдоль которой свет распространяется с наибольшей скоростью – так называемая быстрая ось компенсатора. Следует заметить, что для кристаллического компенсатора значения коэффициентов пропускания вдоль быстрой и медленной осей не совпадают, поэтому реальный компенсатор характеризуется, по крайней мере, двумя параметрами: сдвигом фаз δ_c и отношением коэффициентов пропускания вдоль быстрой и медленной осей ρ_c .

Образец устанавливается так, чтобы ось вращения плеч проходила через отражающую поверхность, а плоскость падения была ей перпендикулярна. Угол падения отсчитывается от перпендикуляра к отражающей поверхности; положительное направление углов поворота поляризационных элементов определяется правилом винта; отсчет начинается от плоскости падения.

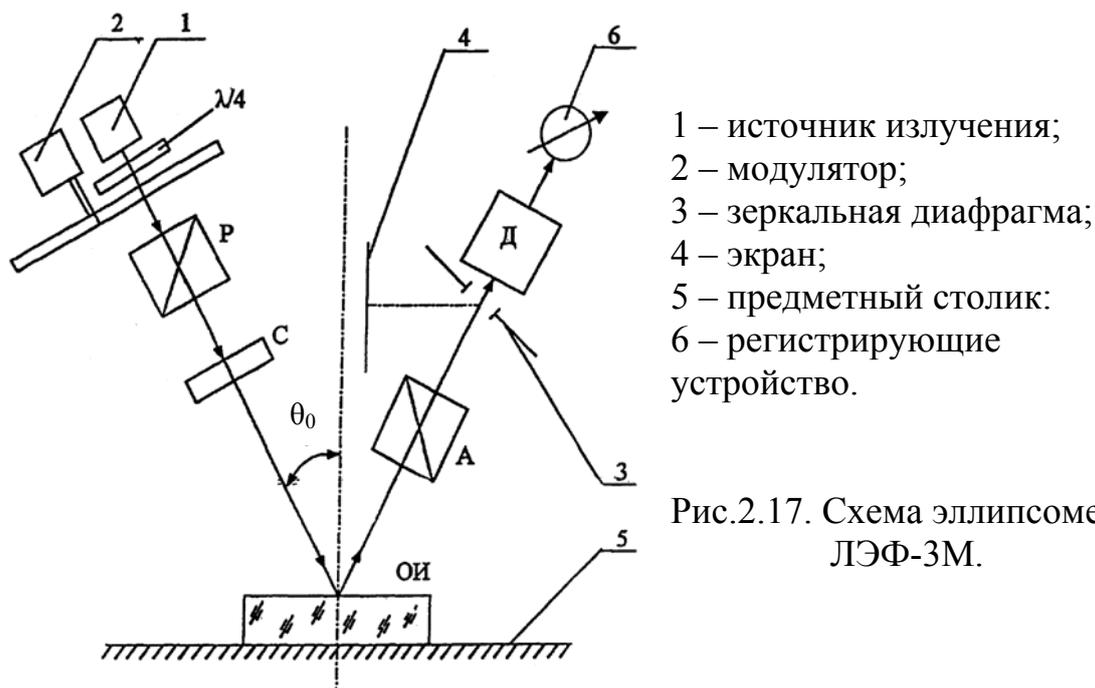


Рис.2.17. Схема эллипсометра ЛЭФ-3М.

Принцип проведения эллипсометрического измерения состоит в следующем: поворотом поляризатора добиваются такой эллиптической поляризации при выходе компенсатора, т.е. в падающем на образец световом пучке, чтобы после отражения свет стал линейно поляризованным. В этом случае он может быть погашен путем соответствующего поворота анализатора и на выходе эллипсометра (на фотодетекторе) будет наблюдаться нулевая (или минимальная) интенсивность излучения. На отражающую поверхность подается линейно поляризованный свет с такой ориентацией плоскости поляризации, при которой после отражения свет стал так эллиптически поляризован, чтобы, пройдя компенсатор, он имел бы линейную поляризацию. Следовательно, и в этом случае отраженное излучение может быть погашено с помощью поворота анализатора. В силу этого обстоятельства описанная выше схема получила название нулевой эллипсометрической схемы. Ее главное достоинство состоит в том, что с помощью фотодетектора определяются положения поляризатора и анализатора, приводящие к минимуму интенсивности света на выходе прибора; сама по себе величина этой интенсивности не представляет интереса.

Как показал сравнительный анализ, нулевой метод обладает наивысшими метрологическими характеристиками.

Наибольшая точность метода обеспечивается при ориентации быстрой оси компенсатора $\pm 45^\circ$. Именно так его устанавливают на эллипсометре. Изготовить идеальный компенсатор не удастся; у реального компенсатора $\delta_c \neq 90^\circ$ и $p_c \neq 1,0$.

Обозначим азимуты поляризатора и анализатора в информативном положении (положение гашения) через P и A. Если повернуть поляризатор или анализатор на 180° , то вновь достигается положение гашения. Все

возможные положения поляризационных элементов, приводящие к гашению света на выходе эллипсометра, образует так называемые эллипсометрические зоны. Если такие положения разбить по угловым интервалам, в которые попадают азимуты поляризационных элементов, то образуется 8 зон, каждая из которых состоит из 4 подзон.

Наиболее важными выводами из такого рассмотрения является следующее: если измерены P и A в какой либо подзоне то состояние поляризации отраженного света может быть однозначно определено только в том случае, если известны параметры компенсатора δ_c и ρ_c . Методика определения нулевых положений эллипсометра ЛЭФ-3М приведена в приложении 3.

Немонотонный характер измерения δ_c и ρ_c указывает на существование нескольких причин нестабильности: кроме собственного изменения температуры в результате прогрева прибора, возможно, происходит незначительный поворот компенсатора из-за неравномерного нагревания плеч эллипсометра. Эти результаты показывают, что использование однозонной методики возможно только при условии тщательной температурной стабильности компенсатора и, по-видимому, всего прибора в целом. В противном случае необходимо измерять положение гашения в двух разных зонах.

2.3.4. Методы, основанные на измерении разности фаз поляризованных компонент, возникающей при отражении

К этой группе относятся интерференционные методы измерения оптических постоянных металлов, пригодные, в принципе, для любой области спектра.

Один из методов, состоит в том, что в одно из плеч интерферометра Майкельсона помещается испытуемое зеркало (или пара параллельных зеркал – для многократных отражений) под соответствующим углом падения, большим 45° . Отклоненный испытуемым зеркалом пучок (рис. 2.18) возвращается зеркалом интерферометра обратно, и поэтому отражается в образце дважды, испытывая двойное смещение фазы 2Δ . В силу того, что скачки фазы при отражении p - и s -компонент различны, положения интерференционных полос в поле зрения интерферометра при освещении светом, поляризованным параллельно или перпендикулярно плоскости падения, не совпадают. Таким образом, смещение интерференционных полос при повороте поляризатора на 90° позволяет определить величину $\Delta = \delta_s - \delta_p$. Формулы (79–81) показывают, что для вычисления n и k достаточно получить значения Δ_1 и Δ_2 при двух углах падения $\theta_{0(1)}$ и $\theta_{0(2)}$:

$$\operatorname{tg}\Delta_1 = \frac{2k \sin\theta_{0(1)} \operatorname{tg}\theta_{0(1)}}{n^2 + k^2 - \sin^2\theta_{0(1)} \operatorname{tg}^2\theta_{0(1)}}, \quad \operatorname{tg}\Delta_2 = \frac{2k \sin\theta_{0(2)} \operatorname{tg}\theta_{0(2)}}{n^2 + k^2 - \sin^2\theta_{0(2)} \operatorname{tg}^2\theta_{0(2)}} \quad (79)$$

Отсюда

$$n^2 + k^2 = \frac{\sin\theta_{0(1)} \operatorname{tg}\theta_{0(1)} \operatorname{tg}\Delta_1 - \sin\theta_{0(2)} \operatorname{tg}\theta_{0(2)} \operatorname{tg}\Delta_2}{\frac{\operatorname{tg}\Delta_1}{\sin\theta_{0(1)} \operatorname{tg}\theta_{0(1)}} - \frac{\operatorname{tg}\Delta_2}{\sin\theta_{0(2)} \operatorname{tg}\theta_{0(2)}}} \quad \text{и} \quad (80)$$

$$2k = \frac{\operatorname{tg}\Delta_1}{\sin\theta_{0(1)} \operatorname{tg}\theta_{0(1)}} (n^2 + k^2 - \sin^2\theta_{0(1)} \operatorname{tg}^2\theta_{0(1)}) . \quad (81)$$

Если ограничиваться схемой с одним испытуемым зеркалом, то есть двумя отражениями, то двойное смещение фазы 2Δ ни при каком угле падения не превышает 2π , иначе говоря, — наблюдаемое смещение интерференционных полос остается меньше одного интервала между полосами и приближается к нему при $\varphi \rightarrow 90^\circ$.

При измерениях в монохроматическом видимом или ультрафиолетовом свете такого рода смещения полос довольно точно измеряются на фотографиях методом микрофотометрирования или использованием в качестве регистрирующего элемента ПЗС-матрицы. В инфракрасной области, при непрерывном спектре источника света, можно воспользоваться так называемыми полосами равного хроматического порядка, которые выявляются с помощью диспергирующей системы монохроматора.

В интерференционном методе, предложенном Шкляревским [81], исследуемый образец вместе с параллельным ему полупрозрачным серебряным зеркалом образует интерферометрическую пару пластин. Используется явление расщепления линий равного хроматического порядка на поляризованные компоненты при косом падении лучей. Получаемые на основании промера интерферограмм кривые относительной дисперсии фазового скачка для p - и s -компонент отраженной волны, дают возможность определить необходимые для вычисления оптических постоянных значения Δ_1 и Δ_2 . Некоторым неудобством является необходимость при этом проводить специальный опыт с двумя полупрозрачными зеркалами, чтобы исключить систематическую ошибку, возникающую из-за разности фаз в основном опыте при отражении света от полупрозрачной пластины.

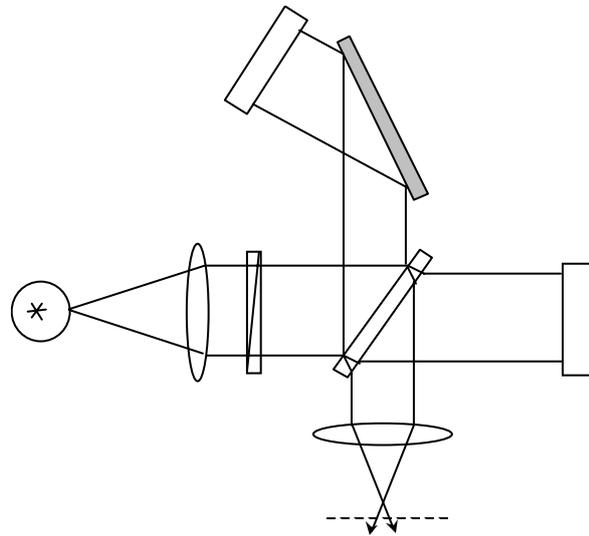


Рис. 2.18. Применение интерферометра Майкельсона для измерения оптических постоянных металлов.

РАЗДЕЛ 3. Постановка эксперимента при исследовании тонких пленок металлов

3.1. Оценка величины погрешности при проведении экспериментальных исследований

В ходе экспериментов измеряются следующие величины:

1. спектральный коэффициент пропускания
2. спектральный коэффициент отражения (со стороны покрытия);
3. спектральный коэффициент обратного отражения (со стороны подложки);
4. толщина слоя металла;
5. эллипсометрические параметры ψ и Δ
6. давление
7. токи: ионизации и эмиссии
8. напряжения

В измерениях существует принципиальная проблема контроля размеров единицы измерений, и эта задача решается только в мере достигнутого развития науки и техники [82]. Невозможно обеспечить абсолютную идентичность характеристик даже однотипных средств измерений, и, следовательно, при измерениях одной и той же физической величины могут получиться различные данные. Очевидно, что никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно или можно утверждать – при измерениях неизбежно допускаются некоторые ошибки. Поэтому результат измерений должен характеризовать не только величину исследуемого параметра, но также и допущенные отклонения экспериментальных данных от истинного значения. Попытки проводить измерения с большей точностью (меньшей ошибкой), чем это необходимо в данной технической задаче, приводит к неоправданной растрате сил и средств. Погрешности измерений классифицируют по характеру и причинам их появления. Простейшей причиной возникновения ошибок может явиться недосмотр экспериментатора, связанный с субъективными обстоятельствами или недостатком квалификации. Различают четыре основные группы – три систематические погрешности и одну случайную. Не все систематические ошибки могут быть учтены в виде поправок. Поэтому желательно так строить эксперимент, чтобы исключить погрешность в процессе измерения. При выполнении измерений необходима целенаправленная работа по выявлению систематических ошибок. Могут быть систематические ошибки, о существовании которых мы можем даже не догадываться. Случайные погрешности обнаруживаются при повторных измерениях фиксированной физической величины. Причина этого разброса – многообразие и взаимосвязь физических факторов, определяющих условия измерения, невозможность их абсолютно точного воспроизведения и контроля при повторных измерениях. Изменение этих факторов, а также неинформативных

параметров измеряемой физической величины и приводит к изменению итогов повторных опытов. При описании погрешностей измерений целесообразно систематическую и случайную погрешности указывать по отдельности. Измерения могут быть прямыми, когда результат выражается непосредственно в тех же единицах, что и измеряемая величина, и косвенными, когда искомая величина определяется по результатам измерений других величин, связанных с измеряемой определенными зависимостями [83].

Прямые измерения, в свою очередь, делятся на абсолютные и относительные. Абсолютные измерения дают непосредственно измеряемую величину, а относительные только отклонения измеряемой величины от эталонной.

Приборы предназначенные для измерения величин характеризуются определенными параметрами:

1. Предел измерения – наибольшее и наименьшее значения, которые могут быть измерены на данном приборе.
2. Диапазон измерения – разность между пределами.
3. Цена деления шкалы – значение измеряемой величины, соответствующая одному делению шкалы.
4. Интервал деления шкалы – расстояние между осями двух соседних штрихов шкалы.
5. Чувствительность прибора – возможность прибора реагировать на изменение измеряемой величины.
6. Порог чувствительности – изменение измеряемой величины, способное вызывать наименьшее заметное изменение показания прибора.

За истинную величину принимают среднее арифметическое значение, полученное за несколько повторных измерений:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}; \Delta x_i = x_i - \bar{x}, \text{ где } x_i - \text{ значение отдельного измерения; } n - \text{ число}$$

измерений; Δx_i – случайная ошибка. Оценка среднего квадратического

отклонения производится по формуле: $S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}}$. Доверительные

границы случайной погрешности результата измерения находят по формуле $\varepsilon = tS$, где t – коэффициент Стьюдента, который выбирается в зависимости от доверительной вероятности P и числа результатов наблюдений n . [84]

Измерения спектрального коэффициента пропускания можно проводить с помощью спектрофотометров СФ-26 и СФ-46. Измерения спектрального коэффициента отражения на спектрофотометре СФ-46 с приставкой ПЗО. Перед измерением приборы должны быть отградуированы по линейчатому спектру ртути. Точность, с которой выставлялась длина волны, составляет 0,5 нм (от 250 до 600 нм) и 1 нм (от 600 до 2000 нм). При доверительной вероятности $P=0,95$ количество

измерений должно быть не менее пяти. Коэффициент пропускания определен с точностью $\Delta x_{\text{случ.}}=1\%$, $\Delta x_{\text{сист.}}=0,5\%$.

Измерения толщины покрытий проводятся на микроинтерферометрах МИИ - 4, МИИ - 9 с использованием узкополосного фильтра. Для повышения коэффициента отражения непокрытой части поверхности она вместе со ступенькой покрывается тонким слоем алюминия, что также исключает ошибку, вызываемую отличием оптических постоянных стекла и металлов. Использование цифровой видеокамеры дает возможность определять толщину слоя с погрешностью ± 1 нм.

Эллипсометрические измерения проводятся на ЛЭФ-3М, оборудованном АЦП, подключенным к ПК. Измерения эллипсометрических параметров состоят из трех серий по 50 циклов. Расчет эллипсометрических параметров осуществлялся с помощью специального программного обеспечения. Погрешность определения ψ и Δ равна $\pm 0,005$.

Параметры, контролируемые в процессе откачки и осаждения, определяются с помощью стандартных измерительных приборов, входящих в комплект вакуумной установки ВУ-1А. Точностные параметры указаны в паспорте вакуумной установки [85].

3.2. Технологические подходы при проведении исследований тонких пленок металлов

3.2.1. Никель

Для проведения экспериментов предлагается никель с чистотой 99,8% (указанные производителем примеси: Fe – 0,01%, S – 0,001%, C – 0,08%, O – 0,15%). Осаждение пленок никеля проводится на плоскопараллельные подложки из стекла марки К8 электроннолучевым испарением при остаточном давлении в вакуумной камере $P=(10^{-3}-7 \cdot 10^{-4})$ Па. Приведем пример проведения исследований. Образцы Ni1–Ni3 и Ni4–Ni6 были напылены за две откачки вакуумной камеры, что позволило получить покрытия с различными толщинами, скоростями осаждения и углами поступления паров (приложение 3, табл. 3) при прочих идентичных параметрах. Исследования процесса старения тонких пленок никеля показали, что в течение месяца у всех образцов (Ni1–Ni6) не наблюдалось изменения оптических характеристик покрытий.

При проверке адгезии на отрыв липкой лентой повреждения покрытий на всех образцах не произошло. Испытания на механическую прочность проведенные по ОСТ 3-1901-85 показали, что все образцы выдерживают более 1000 оборотов.

Для проверки влияния скорости осаждения на механическую прочность и оптические характеристики были изготовлены образцы Ni7 и Ni8 со скоростью осаждения 0,18 и ~ 1 нм/с с остаточным коэффициентом пропускания 17%. Осаждение пленки Ni7 проводилось

электроннолучевым испарением из улеродного тигля. Поскольку данным методом получить большую скорость осаждения не удалось, осаждение Ni8 было проведено методом резистивного испарения, что позволило получить высокую скорость осаждения за счет большой площади испарителя. В обоих экспериментах по напылению Ni7 и Ni8 остаточное давление в вакуумной камере составляло $8 \cdot 10^{-4}$ Па.

Исследования процесса старения пленки никеля (Ni8) показали, что в течение года у образца не наблюдалось изменения оптических характеристик покрытия.

Проверка на механическую прочность и адгезию приведенными выше методами отличий от предыдущих образцов не выявила. Но проведенная проверка механической прочности путем сцарапывания покрытия бритвой показала, что прочность повышается с увеличением скорости осаждения и толщины покрытия. При этом на покрытии образца Ni8 видимых повреждений нанести не удалось.

Измерения спектрального коэффициента пропускания образца Ni8 в видимой области спектра (400 – 800 нм) показали практически линейную характеристику с перепадом от 16,5 до 17,5%. Покрытия с такой линейной спектральной характеристикой и высокой механической прочностью представляют большой интерес в качестве нейтральных светоделителей.

3.2.2. Медь

В экспериментах использовалась электротехническая гранулированная медь с чистотой 99,99 %. Осаждение пленок меди проводилось электроннолучевым испарением с остаточным давлением в вакуумной камере $P=(10^{-3}-8 \cdot 10^{-4})$ Па. Осаждение пленок меди проводилось на плоскопараллельные подложки из стекла марки К8. Образцы Cu1 – Cu4 изготавливались в едином технологическом цикле, что позволило рассмотреть спектральные зависимости коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения, а так же показателя преломления и показателя поглощения для пленок с различными толщинами, скоростями осаждения и углами поступления паров (приложение 3, табл. 5 и табл. 6) при прочих идентичных параметрах.

Образцы Cu1 – Cu4 изготавливались методом электроннолучевого испарения при токе эмиссии 150 мА и ускоряющем напряжении 6 кВ. Для исследования влияния скорости осаждения на оптические и механические характеристики были проведены эксперименты по напылению пленок меди с током эмиссии 250 и 400 мА (образцы Cu6 и Cu5, соответственно). А также был проведен эксперимент по осаждению Cu7 методом резистивного испарения с вольфрамовой лодочки. Данные по скорости осаждения, толщине и углу поступления паров для образцов Cu5–Cu7 приведены в приложении 3, табл. 5.

Исследования процесса старения тонких пленок меди по измерениям коэффициентов пропускания и отражения в течение месяца показали, что у

покрытий полученных с высокой скоростью осаждения и большей толщиной слоя (Cu1, Cu4–Cu7) изменений R и T не наблюдалось. Спектральные зависимости коэффициентов пропускания и отражения покрытий Cu2 и Cu3 измеренные сразу после напыления и через месяц приведены на рисунке 3.1 (кривые 1, 2 – коэффициент пропускания сразу после напыления, кривая 3 – коэффициент пропускания Cu3 через месяц, кривые 5, 6 – коэффициент отражения сразу после напыления образцов Cu3 и Cu2, соответственно и кривые 4, 7 – коэффициент отражения этих покрытий через месяц). У образца Cu2 изменения коэффициента пропускания еще не наблюдалось.

При проверке адгезии на отрыв липкой лентой повреждения покрытий на всех образцах не произошло. Испытания на механическую прочность проведенные по ОСТ 3-1901-85 показали, что все образцы выдерживают более 1000 оборотов.

3.2.3. Алюминий

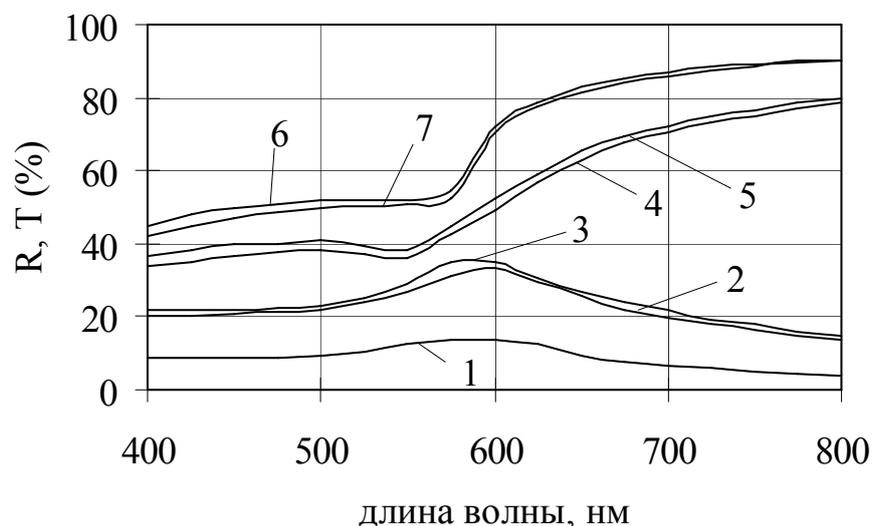


Рис. 3.1 Спектральные характеристики коэффициентов отражения и пропускания пленок меди после напыления и через месяц.

В экспериментах был использован гранулированный алюминий с чистотой 99,99%. Осаждение пленок алюминия проводилось электроннолучевым испарением при токе эмиссии 220 мА, ускоряющем напряжении 6 кВ и остаточном давлении в вакуумной камере $P=(10^{-3} - 4 \cdot 10^{-4})$ Па. Образцы Al1 – Al3 изготавливались в едином технологическом цикле, что позволило рассмотреть спектральные зависимости коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения в видимой области спектра, а так же показателя преломления и показателя поглощения для пленок с разными толщинами, скоростями осаждения и углами поступления паров (приложение 3, табл. 7) при одинаковых прочих параметрах. Контроль осаждения проводился по

изменению коэффициента пропускания образца Al2 на длине волны 632,8 нм.

При проверке адгезии на отрыв липкой лентой на образцах Al2 и Al3 сорвалось порядка 90% площади, а на образце Al1 порядка 80%. Испытания механической прочности по ОСТ 3-1901-85 не проводились, хотя все образцы алюминия выдерживают читку батистовой салфеткой.

Исследования процесса старения тонких пленок алюминия по измерениям коэффициентов пропускания и отражения в течение месяца показали, что у покрытия Al1 изменения коэффициента пропускания практически не наблюдается, у покрытия Al2 заметно незначительное повышение коэффициента пропускания (приложение 5, рис. 6), а у покрытия Al3 повышение коэффициента пропускания составляет ~ 2%. При этом у всех образцов происходит сильное снижение спектрального коэффициента отражения, причем основные изменения спектральных характеристик покрытий происходят в течение первых двух суток.

Попытка повысить скорость осаждения при испарении алюминия электроннолучевым методом положительных результатов не дала, поскольку при больших токах эмиссии происходит выброс расплавленного металла из тигля, а испарение со сканированием луча не привело к значительному увеличению скорости осаждения.

3.2.4. Хром

В экспериментах был использован гранулированный хром с чистотой 99,99%. Осаждение пленок хрома проводилось электроннолучевым испарением при токе эмиссии 20 мА, ускоряющем напряжении 6 кВ и остаточном давлении в вакуумной камере $P=10^{-3}$ Па. Образцы Cr1 – Cr3 изготавливались в едином технологическом цикле, что позволило рассмотреть спектральные зависимости коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения в видимой области спектра, а так же показателя преломления и показателя поглощения для пленок с разными толщинами, скоростями осаждения и углами поступления паров (приложение 3, табл. 8) при одинаковых прочих параметрах. Контроль осаждения проводился по изменению коэффициента пропускания образца Cr2 на длине волны 632,8 нм.

При проверке адгезии на отрыв липкой лентой на образцах Cr1 – Cr3 сорвалось порядка 70 – 80% площади. Испытания механической прочности по ОСТ 3-1901-85 показали, что все образцы пленок хрома выдерживают 600 – 650 оборотов.

Исследования процесса старения тонких пленок хрома по измерениям коэффициентов пропускания и отражения в течение месяца показали, что у всех образцов хрома изменения коэффициентов пропускания и отражения не происходит.

Поскольку хром сублимируется, ограничений в повышении скорости осаждения при испарении электроннолучевым методом нет, но при

больших скоростях осаждения покрытия имеют рыхлую структуру и легко удаляются с подложки.

3.2.5. Серебро

В экспериментах использовалось гранулированное серебро с чистотой 99,99%. Осаждение пленок серебра во всех экспериментах проводилось электроннолучевым испарением с остаточным давлением в вакуумной камере $P=(10^{-3}-7\cdot 10^{-4})$ Па. В ходе экспериментов было выяснено, что тонкие пленки серебра имеют низкую адгезию (при проверке на отрыв липкой лентой отрывалось более 90% площади покрытия) и низкую химическую устойчивость к воздействию атмосферы (через месяц на образцах проявляются видимые повреждения пленок). Исследования адгезии на подложках из стекла К8 и лейкосапфира (Al_2O_3), а также на этих же подложках с четвертьволновыми подслоями SiO_2 и ZrO_2 увеличения адгезии не наблюдалось (срыв более 90% площади покрытия), а на адгезионном подслое Cr адгезия немного улучшается (отрыв происходит за счет разрушения самого слоя серебра).

Для защиты серебряных покрытий от воздействия атмосферы были изготовлены образцы пленок серебра на подложках из К8 и сапфира с защитным слоем SiO_2 . Исследования процесса старения данных образцов показали, что в течение месяца изменений оптических характеристик не происходит. Однако проверка адгезии на отрыв липкой лентой показала, что покрытия на подложках из сапфира срываются полностью, а с покрытий на К8 срывается защитный слой SiO_2 и при повторном наклеивании и отрыве снимается более 95% слоя серебра. Это говорит о том, что адгезия между слоем серебра и SiO_2 меньше, чем у серебра с К8 и выше, чем у серебра с сапфиром. Испытания на механическую прочность не проводились, так как при протирке покрытие разрушается.

Поскольку во многих системах необходимо высокое внутреннее отражение был проведен ряд экспериментов по повышению адгезии между защитным слоем SiO_2 и слоем серебра. Для этого перед слоем SiO_2 на слой серебра наносился тонкий адгезивный слой хрома. Исследования на отрыв липкой лентой показали, что такие системы со стекла марки К8 не срываются, а на подложках из лейкосапфира наблюдаются незначительные повреждения на краю.

РАЗДЕЛ 4. Оптические свойства металлических пленок при различных технологических параметрах

Определение оптических постоянных металлических пленок проводится по данным измерений коэффициентов пропускания, отражения, обратного отражения и толщины в видимой области спектра (400 – 800 нм) и по данным эллипсометрических измерений на длине волны гелий-неонового лазера 632,8 нм.

4.1. Никель

Спектральные характеристики коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения образцов пленок никеля (Ni1 – Ni6) представлены в приложении 5 на рисунках 1, 2 и 3, соответственно. Номера кривых на рисунках соответствуют номерам образцов. Данные эллипсометрических измерений указанных покрытий приведены в приложении 5, таблицы 1 и 2. Данные рассчитанных оптических постоянных пленок никеля (Ni1 – Ni6) представлены в таблице 3 приложения 5. На рисунке 4.1. изображены спектральные зависимости показателя преломления и показателя поглощения пленок никеля.

Определение оптических постоянных пленок никеля по данным спектрофотометрических измерений и толщине проводились в предположении, что относительная погрешность определения коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения составляла 5% (при их значениях более 10%) и 10% при значениях менее 10%, а абсолютная погрешность измерения толщины ± 1 нм. При этом погрешность определения показателя преломления составила $\pm 0,05$, а показателя поглощения $\pm 0,03$. Погрешность определения эллипсометрических параметров ψ и $\Delta - 10'$. Оптические постоянные определенные методом эллипсометрии имеют погрешность $\pm 0,02$.

Из таблицы 3 (приложение 5) видно, что оптические постоянные определенные по спектрофотометрическим измерениям сходятся с данными, полученными по эллипсометрическим измерениям. Из графиков (рис. 4.1) видно, что значения показателя поглощения различных пленок никеля имеют не такой большой разброс, как значения показателей преломления слоев. Эти различия связаны как с толщиной пленок, так и с условиями осаждения.

На рисунке 4.2 приведены зависимости показателя преломления и показателя поглощения от толщины (пунктирные линии для длины волны 600 нм; сплошные – 400 нм). Зависимости представлены в виде прямых, поскольку в таком представлении меньше влияет погрешность определения n и k и лучше виден характер зависимости. Из рисунка 4.2 видно, что у пленок никеля осажденных с более высокой скоростью (образцы Ni1–Ni3) наклон характеристик показателя преломления меньше, чем у пленок полученных с меньшей скоростью осаждения. Наклон характеристики $k=f(d)$ у обеих серий практически одинаковый. При

сравнении зависимостей $n=f(d)$ на различных длинах волн, например, 600 и 400 нм видно, что их характер для образцов различных серий сохраняется, только происходит параллельное смещение (рис. 4.2). Зависимость $k=f(d)$ этих образцов имеет ту же тенденцию, что и у показателя преломления (приложение 5, табл. 3).

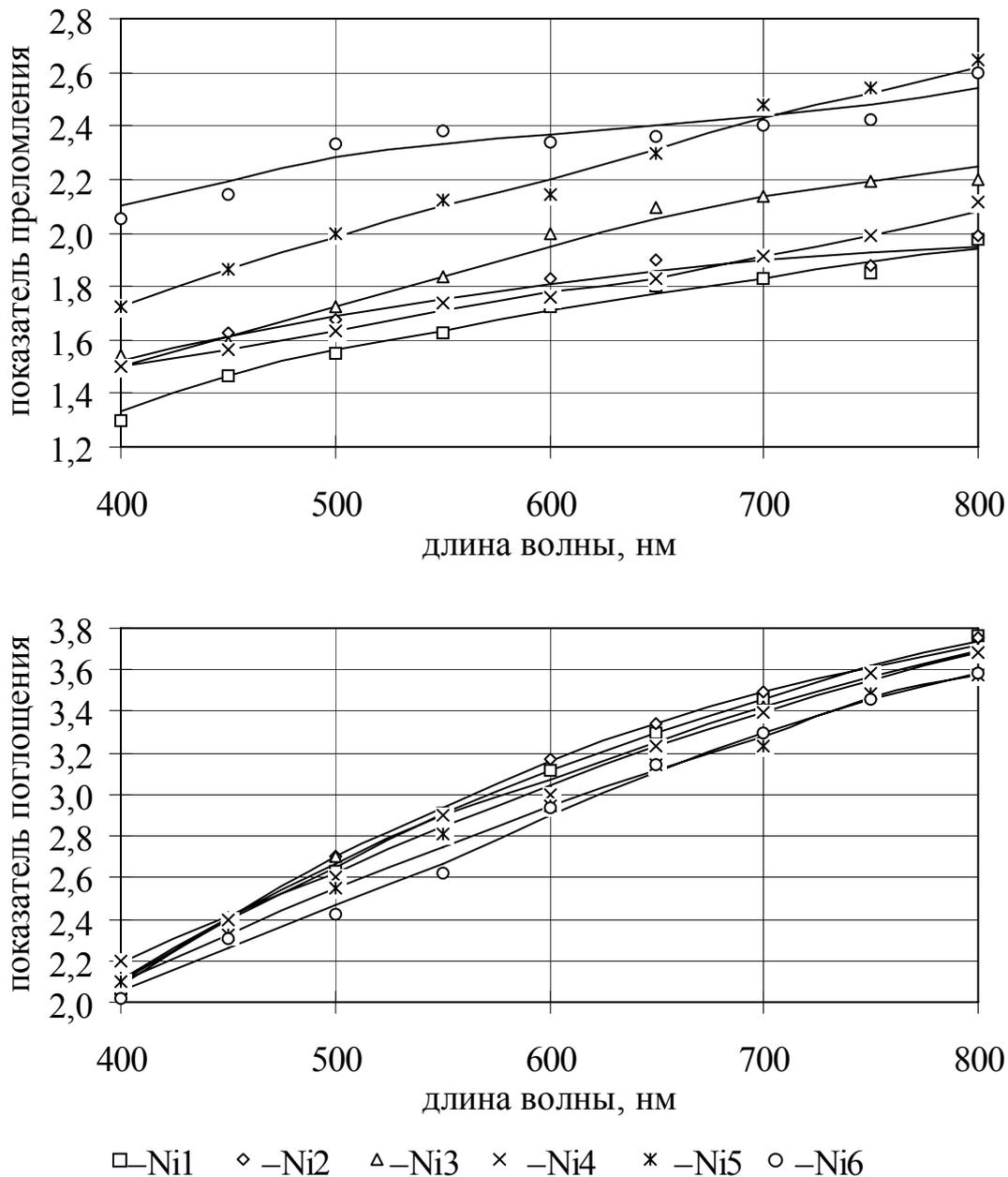
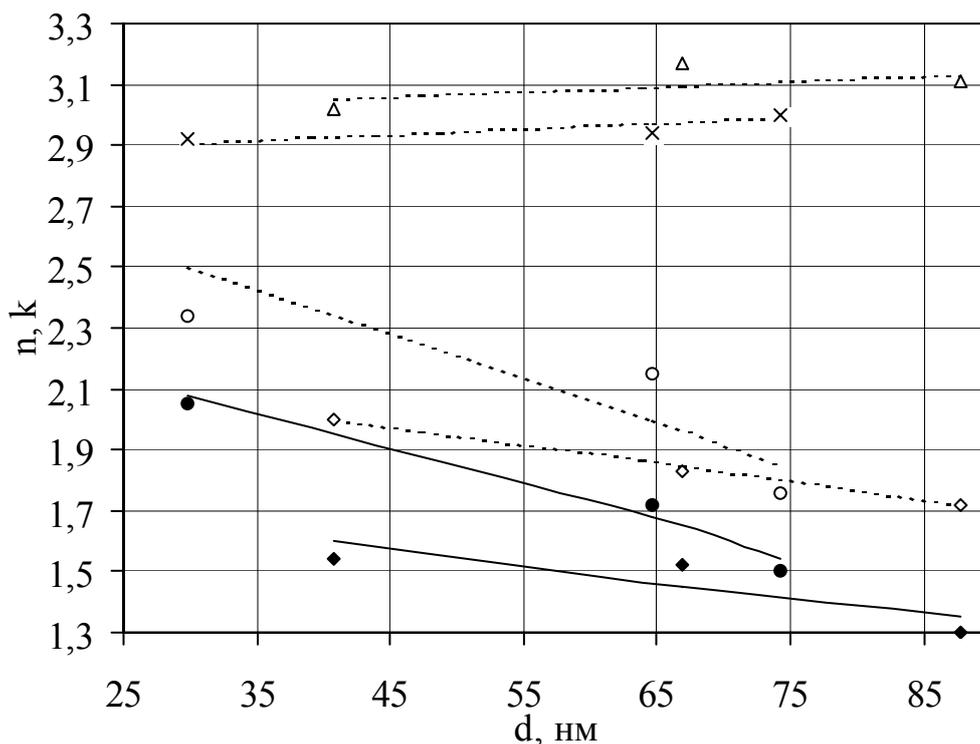


Рис. 4.1. Спектральные зависимости показателя преломления и показателя поглощения пленок никеля.

Описанное поведение зависимостей оптических постоянных от толщины при различных скоростях осаждения можно было прогнозировать, так как на рисунках 2 и 3 приложения 5 видно, что покрытия из различных серий имеют различный наклон спектральных характеристик R и R' .



◊ ◊ – n (Ni1–Ni3) ○ ● – n (Ni4–Ni6)
 △ – k (Ni1–Ni3) × – k (Ni4–Ni6)

Рис. 4.2. Зависимость показателей преломления и поглощения от толщины пленок никеля. (пунктирные линии $\lambda=600$ нм, сплошные – $\lambda=400$ нм)

4.2. Медь

На рисунке 5 приложения 5 представлены спектральные зависимости коэффициента отражения (сплошные линии) и коэффициента пропускания (пунктирные линии) образцов пленок меди Cu1 – Cu3. Спектральные зависимости коэффициента обратного отражения приведены в приложении 5, на рисунке 5. На обоих рисунках номера кривых соответствуют номерам образцов. Данные эллипсометрических измерений покрытий меди (Cu1 – Cu3) приведены в приложении 5, таблице 4. В таблице 5 приложения 5 приведены данные эллипсометрических измерений покрытий меди (Cu4 – Cu7), а также их оптические постоянные рассчитанные на длине волны 632,8 нм. Рассчитанные для видимой области спектра оптические постоянные тонких пленок меди (Cu1 – Cu3) приведены в приложении 5, таблица 6 и на рисунке 4.3 изображены их спектральные зависимости.

Расчет оптических постоянных пленок меди по данным спектрофотометрических измерений и толщине проводился в предположении, что относительная погрешность определения коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения

составляла 5% (при их значениях более 10%) и 10% при значениях меньше 10%, а абсолютная погрешность измерения толщины – ± 1 нм. При этом погрешность определения показателя преломления и показателя поглощения составила $\pm 0,03$. Погрешность определения эллипсометрических параметров ψ и $\Delta - 10'$. Оптические постоянные определенные методом эллипсометрии имеют погрешность $\pm 0,02$.

Из таблицы 6 (приложение 5) видно, что оптические постоянные определенные по спектрофотометрическим измерениям близки (с учетом погрешностей) к данным полученным по эллипсометрическим измерениям. Из графиков (рис. 4.3) видно, что значения показателя поглощения пленок меди с различными толщинами имеют большие различия между собой, чем значения показателя преломления. Однако ближе к ультрафиолетовой области ($\lambda = 400$ нм) разброс оптических постоянных различных пленок увеличивается, но можно предположить, что из-за неточности измерений при расчете оптических постоянных Cu_3Z

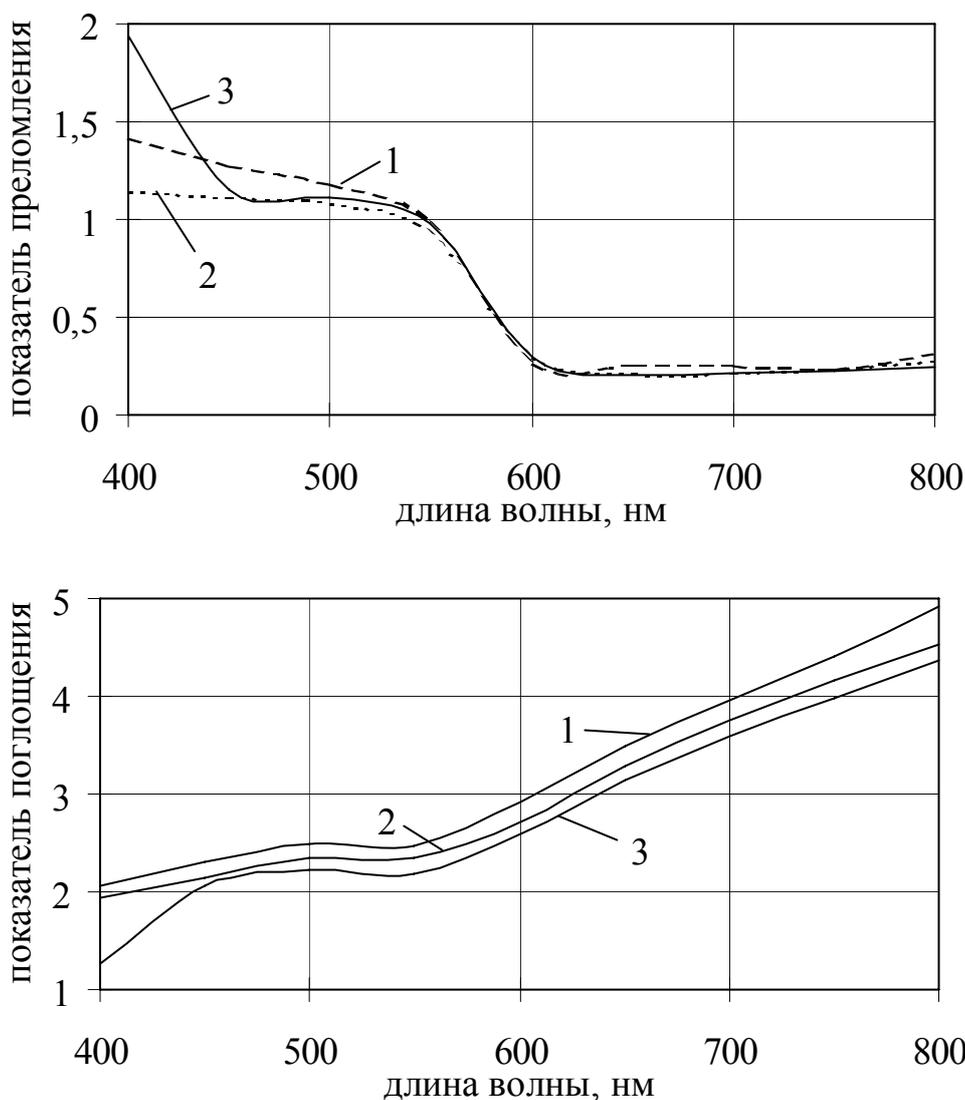


Рис. 4.3. Спектральные зависимости показателя преломления и показателя поглощения пленок меди.

локализация произошла на другом решении. Эти различия связаны как с толщиной пленок, так и может быть в большей степени с условиями осаждения, поскольку пленки Cu1 и Cu7 при практически одинаковых толщинах имеют значительные различия оптических постоянных (приложение 5, табл. 5 и табл. 6).

На рисунке 4.4 приведены зависимости показателя преломления и показателя поглощения от толщины. Для большей наглядности зависимости $n=f(d)$ и $k=f(d)$ разделены по скоростям осаждения, с низкими скоростями осаждения (Cu1–Cu4) и с высокими скоростями осаждения (Cu5–Cu7). Из рисунка 4.4 видно, что при больших скоростях осаждения зависимость $n=f(d)$ имеет другой наклон, чем при низких скоростях осаждения, а зависимости $k=f(d)$ мало, чем отличаются друг от друга.

Следует также отметить, что медь имеет отличительную особенность в видимой области спектра, а именно перегиб спектральных характеристик

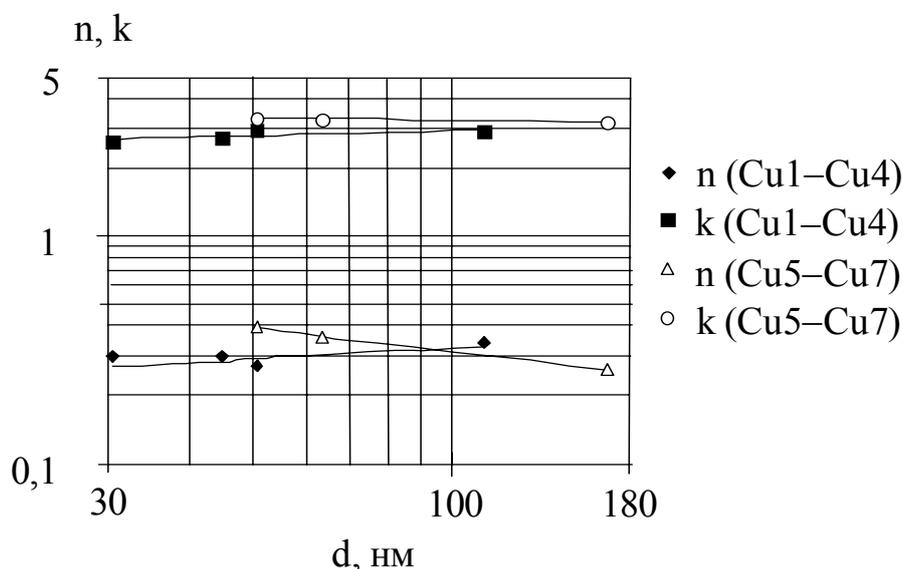


Рис. 4.4. Зависимости оптических постоянных пленок меди от толщины.

оптических постоянных в диапазоне 500 – 600 нм (рис. 4.3). Причем этот перегиб у показателя преломления и показателя поглощения похож на как бы параллельное смещение характеристики, тогда как спектральные характеристики коэффициента пропускания в этом диапазоне имеют просто экстремум (приложение 5, рис. 4). Такая особенность может давать оригинальные решения при синтезе металлодиэлектрических систем.

4.3. Алюминий

Спектральные зависимости оптических постоянных пленок алюминия изображены на рисунке 4.5 и приведены в приложении 5, таблица 7. Спектральные характеристики коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения образцов пленок алюминия (A11 – A13) представлены в приложении 5 на рисунках 6, 7 (сплошные линии) и 8,

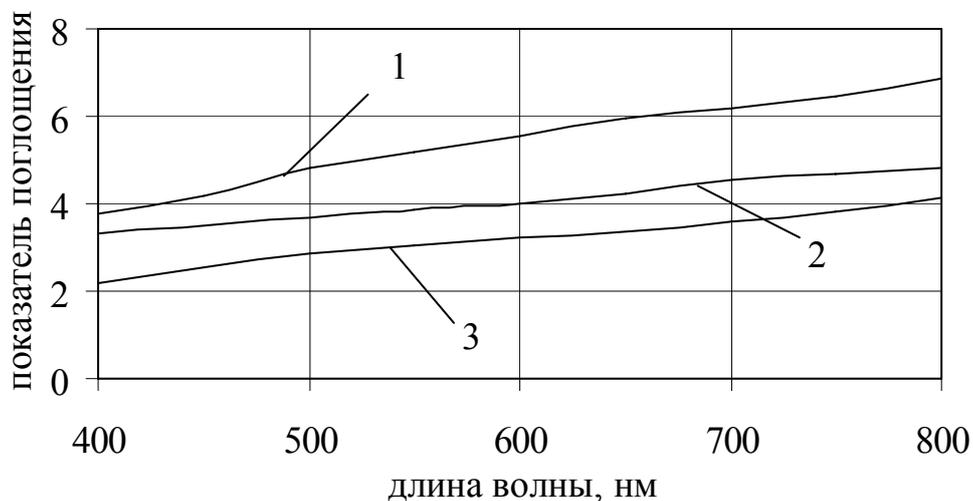
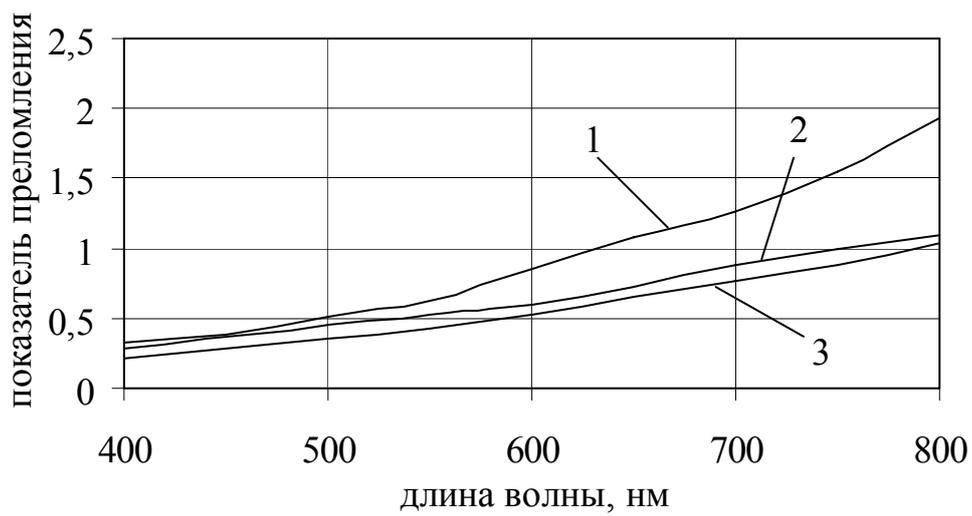


Рис. 4.5. Спектральные зависимости показателя преломления и показателя поглощения пленок алюминия. Соответственно. Номера кривых на рисунках соответствуют номерам образцов.

Из графиков (рис. 4.5) видно, что значения показателя преломления различных пленок алюминия имеют не значительный разброс в области 400 – 600 нм, а дальше в красной области наблюдается более резкое увеличение показателя преломления образца А11, чем у образцов А12, А13. У спектральных зависимостей показателя поглощения пленок алюминия наблюдается практически параллельное смещение с увеличением толщины.

На рисунке 4.6 приведены зависимости показателя преломления и показателя поглощения от толщины на 600 и 800 нм. Зависимости представлены в виде интерполированных кривых, поскольку с увеличением толщины рост значений оптических постоянных явно происходит не по линейному закону. Из рисунка 4.6 видно, что на разных

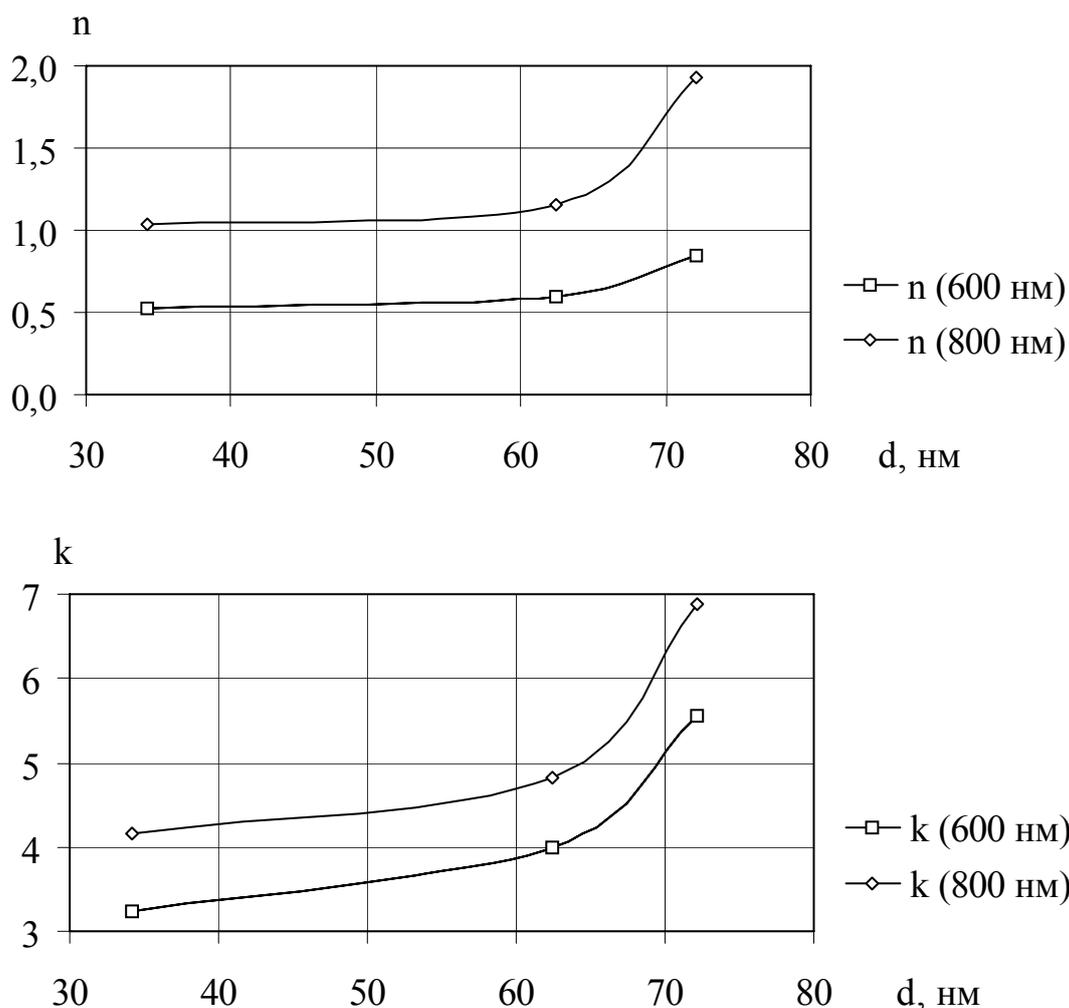


Рис. 4.6. Зависимость оптических постоянных пленок алюминия от толщины.

длинах волн характер зависимости $k=f(d)$ пленок алюминия сохраняется, а у зависимости $n=f(d)$ наблюдается более резкий рост, на длине волны 800 нм, с увеличением толщины. Описанное поведение зависимостей оптических постоянных от толщины слоя, на рассмотренных длинах волн вполне закономерно исходя из спектральных зависимостей показателя преломления и показателя поглощения (рис. 4.5).

4.4. Хром

Спектральные характеристики коэффициентов отражения и обратного отражения образцов пленок хрома (Cr1 – Cr3) представлены в приложении 5 на рисунках 9 и 10, соответственно. Спектральные характеристики коэффициентов пропускания образцов пленок хрома (Cr2 и Cr3) представлены на рисунке 11 приложения 5. Номера кривых на рисунках соответствуют номерам образцов. На рисунке 4.7. изображены спектральные зависимости показателя преломления и показателя поглощения пленок хрома (Cr1 – Cr3). В таблице 8 приложения 5 приведены данные эллипсометрических измерений пленок хрома

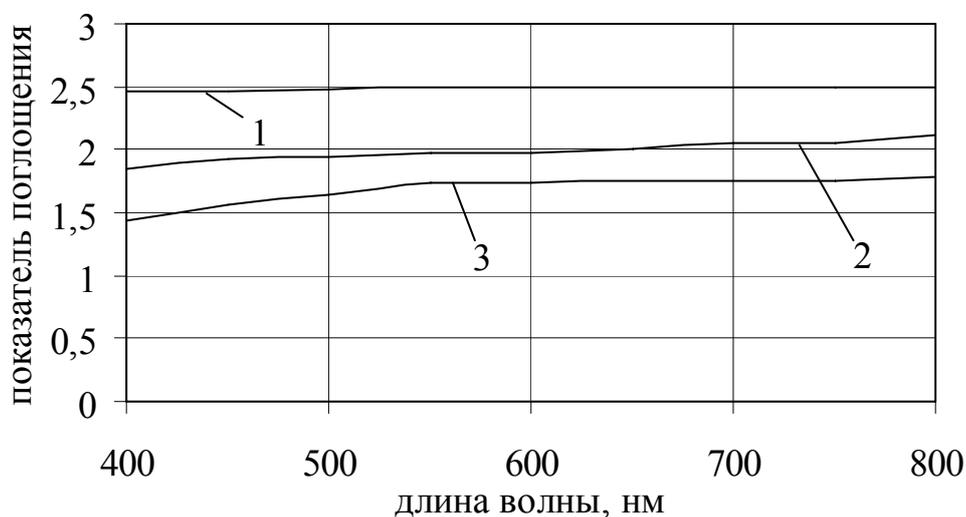
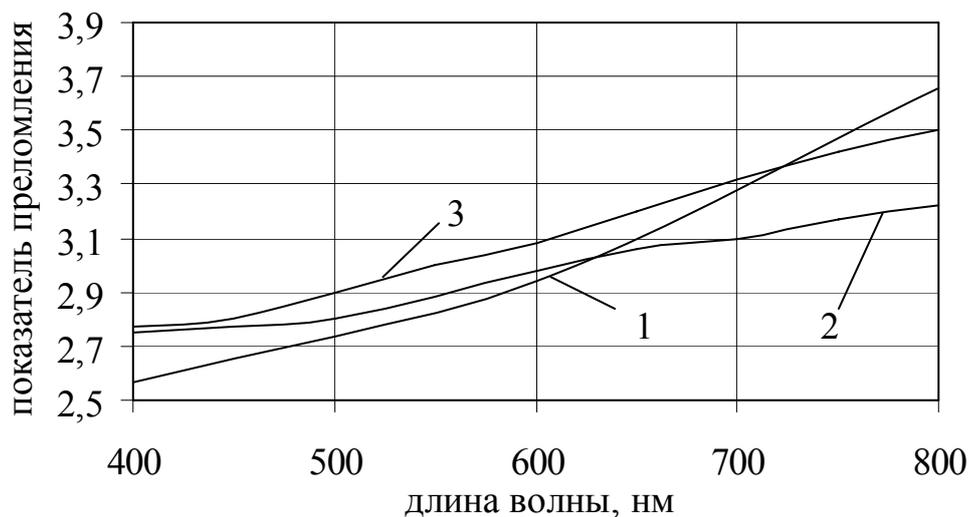


Рис. 4.7. Спектральные зависимости показателя преломления и показателя поглощения пленок хрома.

(Cr1 – Cr3), а также их оптические постоянные рассчитанные на длине волны 632,8 нм.

Определение оптических постоянных пленок хрома по данным спектрофотометрических измерений и толщине проводились в предположении, что относительная погрешность определения коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения составляла 5% (при их значениях более 10%) и 10% при значениях менее 10%, а абсолютная погрешность измерения толщины ± 1 нм. При этом погрешность определения показателя преломления составила $\pm 0,06$, а показателя поглощения $\pm 0,03$. Погрешность определения эллипсометрических параметров ψ и $\Delta - 10'$. Оптические постоянные определенные методом эллипсометрии имеют погрешность $\pm 0,02$.

Из таблицы 8 (приложение 5) и рисунка 4.7 видно, что оптические постоянные определенные по спектрофотометрическим измерениям с учетом погрешности сходятся с данными, полученными по эллипсометрическим измерениям. Из графиков (рис. 4.7) видно, что значения показателей преломления и показателей поглощения различных пленок хрома имеют некоторый разброс, который может быть связан как с условиями осаждения (скорость осаждения и угол поступления паров), так и с разницей в толщине слоев. Однако можно предположить, что значения показателей преломления имеют, на самом деле, близкие значения поскольку, как видно из рисунка 4.7 кривые спектральных зависимостей образцов Cr2 и Cr3 пересекаются спектральной кривой образца Cr1, хотя вполне возможна и другая природа данного явления (это или действительно изменение дисперсии с толщиной слоя, или ошибка измерений в красной области). Но, скорее всего это связано с ошибкой измерений и расчетов, так как образец Cr3 непрозрачен и в расчет проводился по данным измерений коэффициентов отражения, обратного отражения и толщины.

4.5. Серебро

Спектральные характеристики коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения образцов пленок серебра (Ag1 – Ag6) представлены в приложении 5 на рисунках 12, 13 и 14, соответственно. Номера кривых на рисунках соответствуют номерам образцов. Данные эллипсометрических измерений указанных покрытий приведены в приложении 5, таблицы 9 и 10. Данные рассчитанных оптических постоянных пленок серебра (Ag1 – Ag6) представлены в таблице 11 приложения 5. На рисунке 4.8 изображены спектральные зависимости показателя преломления и показателя поглощения пленок серебра.

Определение оптических постоянных пленок серебра по данным спектрофотометрических измерений и толщине проводилось в предположении, что относительная погрешность определения коэффициентов пропускания, отражения и обратного отражения составляла 5% (при их значениях более 10%) и 10% при значениях менее 10%, а абсолютная погрешность измерения толщины ± 1 нм. При этом погрешность определения показателя преломления составила $\pm 0,0005$, а показателя поглощения $\pm 0,05$. Погрешность определения эллипсометрических параметров ψ и $\Delta - 10'$. Оптические постоянные определенные методом эллипсометрии имеют погрешности $\Delta n = \pm 0,0002$ и $\Delta k = \pm 0,02$.

Из таблицы 11 приложения 5 видно, что оптические постоянные определенные по спектрофотометрическим измерениям сходятся с данными, полученными по эллипсометрическим измерениям. Из графиков (рис. 4.8) видно, что значения показателя поглощения различных пленок серебра полностью накладываются друг на друга, тогда как значения

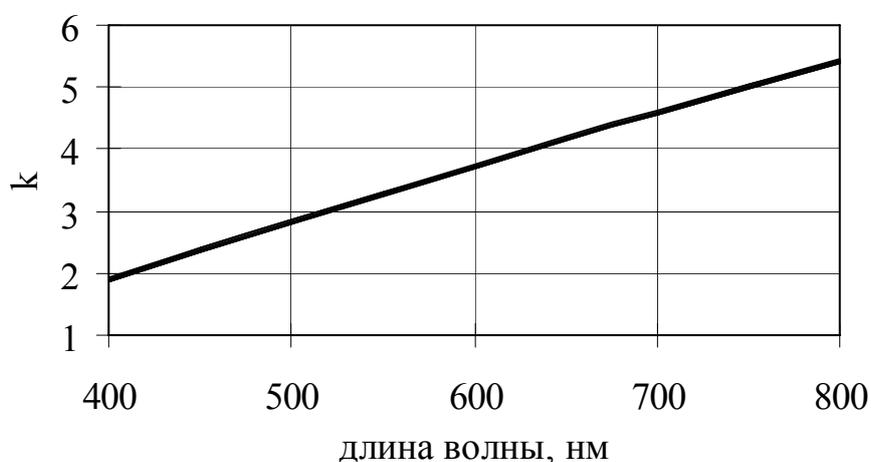
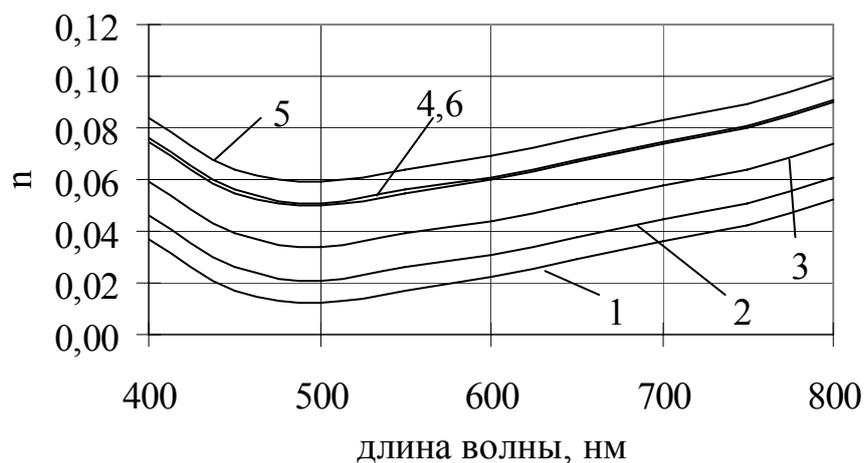


Рис. 4.8. Спектральные зависимости показателя преломления и показателя поглощения пленок серебра.

показателей преломления у разных пленок значительно отличаются, но характер спектральных зависимостей показателя преломления при разных толщинах слоев сохраняется. Эти различия показателей преломления связаны как с толщиной пленок, так и со скоростью осаждения и с углом поступления паров испаряемого вещества.

На рисунке 4.9 рассмотрены зависимости оптических постоянных пленок серебра от толщины на длине волны 632,8 нм, сплошными линиями изображены аппроксимированные зависимости показателя преломления и показателя поглощения от толщины по данным образцов серебра Ag1 – Ag5 (квадратики) и отдельно данные n и k образца Ag6 (ромбики), поскольку он напылялся отдельно. Из рисунка 4.9 видно, что точки оптических постоянных Ag6 не попадают на прямые построенные по данным Ag1 – Ag5. Это можно объяснить только отличием условий осаждения, то есть давлением в вакуумной камере, поскольку угол

поступления паров близок к углу поступления паров образца Ag3, а скорость осаждения больше.

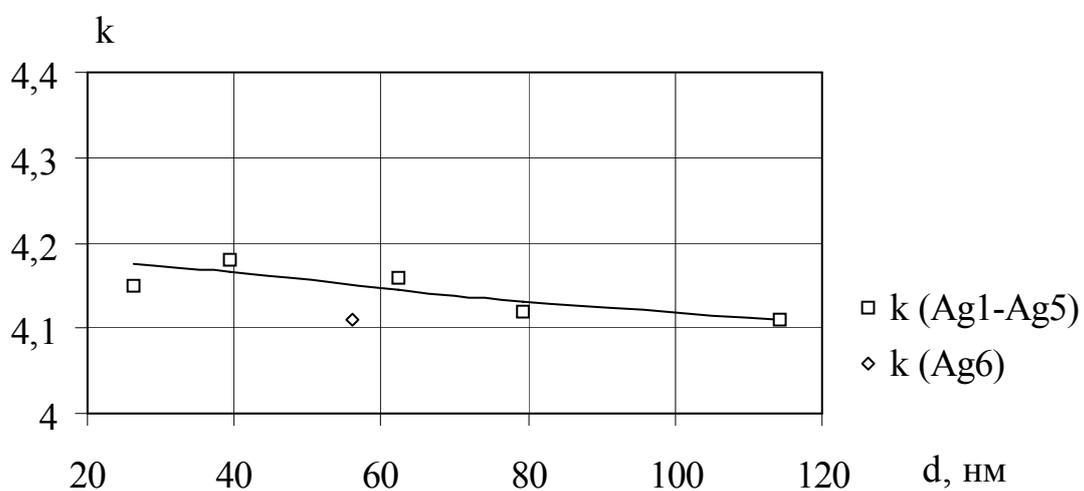
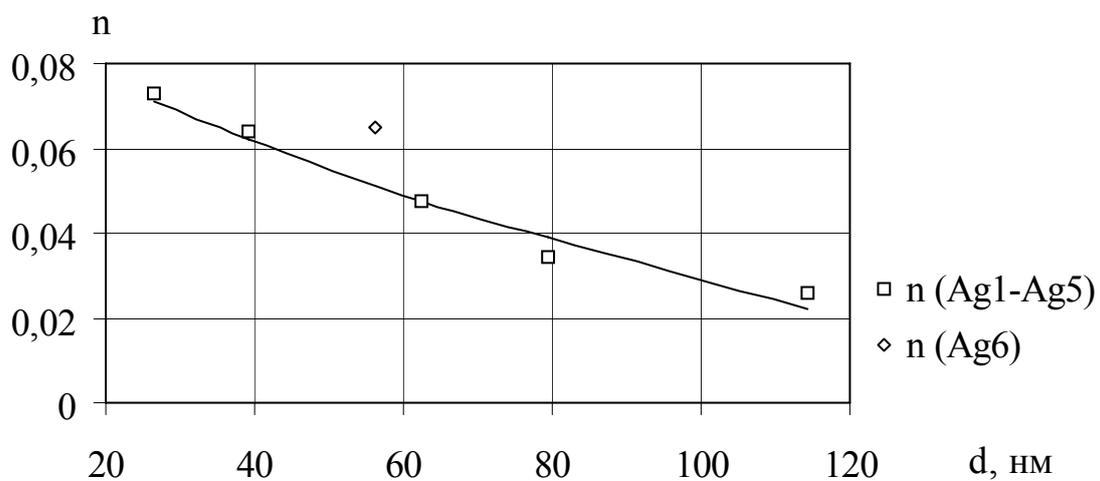


Рис. 4.9. Зависимость оптических постоянных серебра от толщины.

РАЗДЕЛ 5. Лабораторный практикум.

Для получения допуска к лабораторной работе студенту необходимо знать:

- технику безопасности при работе на вакуумном оборудовании и других приборах используемых им в процессе выполнения работы (указать опасные и вредные фактора, а так же необходимые меры безопасности);
- приборы и оборудование, используемые в работе представив порядок проведения работ на каждом из них;
- теорию проводимого исследования (подготовленная теоретическая часть отчета).

Подготовить:

- технологическую проработку проводимого исследования, в которой четко указать перечень приборов и оборудования необходимого для работы, список основных и вспомогательных материалов, приспособлений, а так же подробную маршрутную карту технологического процесса.

Лабораторная работа №1.

Определение показателя преломления и толщины диэлектрических интерференционных покрытий.

Цель работы: Определение показателя преломления и толщины диэлектрического покрытия, изготовленного методом испарения в вакууме. Получение навыков в работе на стандартной вакуумной установке и приборах спектрофотометрического контроля. Освоение методики подбора материала подложек для контроля толщины слоев в процессе их формирования в вакууме. Практическое освоение лабораторного оборудования и приборов, приобретение навыков определения показателя преломления и толщины однослойных диэлектрических интерференционных покрытий.

Содержание работы.

1. Выбрать материал подложки для контроля толщины слоя фторида магния – n_{c1} .
2. Выбрать подложку для контроля толщины слоя оксида циркония – n_{c2} .
3. Сформировать диэлектрический слой фторида магния толщиной $\lambda_0/4$, на обеих подложках измерить его спектральные характеристики: коэффициенты отражения и пропускания, сравнить их с расчетными спектральными кривыми.
4. Сформировать диэлектрический слой оксида циркония толщиной $\lambda_0/4$, на обеих подложках измерить его спектральные характеристики: коэффициенты отражения и пропускания, сравнить их с расчетными спектральными кривыми.

5. По полученной спектральной кривой определить оптическую и геометрическую толщину слоя, а так же показатель преломления пленкообразующего материала.

6. Проанализировать полученные результаты и объяснить различия в точности воспроизведения геометрической толщины.

7. Дополнить технологический процесс изготовления четвертьволновых покрытий, заполнив следующую таблицу 5.1.

Таблица 5.1.

Технологические условия осаждения покрытия.

№ п/п	Название операции	Испаритель	Пленкообразующий материал	t, сек.	Параметры осаждения

Под параметрами осаждения подразумеваются мощность резистивного испарителя, ток накала (I_n), ускоряющее напряжение (U), ток эмиссии (I_0), время прогрева испаряемого вещества, время осаждения испаряемого вещества, изменение отсчетов на СФКТ-751, давление в вакуумной камере до начала осаждения слоя, во время формирования слоя и после окончания осаждения вещества, температура подложки.

Методические указания и порядок выполнения работы.

Для работы предлагается выбор подложки и пленкообразующего вещества из списка представляемого преподавателем.

Необходимо провести исследования в следующих комбинациях:

- плоскопараллельная подложка с $n_{\ell 1}$ и пленкообразующие вещества с различающимися показателями преломления;
- плоскопараллельная подложка с $n_{\ell 2}$ и пленкообразующие вещества с различающимися показателями преломления, возможно использование подложки с матированной второй поверхностью.

Выбор материалов по области прозрачности и метод осаждения пленки в вакууме и ее толщина предоставляется исполнителю.

Произвести осаждение слоев согласно методике, изложенной в методическом указании «Оптические покрытия», Л.А. Губанова, ИТМО 2003г. Работа выполняется с использованием вакуумной установки ВУ-1А, спектрофотометров СФ-26, СФ-46, СФ-46 с приставкой ПЗО-2, рефлектометра, рефрактометра, эллипсометра.

Оформление отчета.

Отчет помимо основной (обязательной) части должен содержать:

1. Спектральные кривые всех измеренных образцов.
2. Длину волны, на которой производился контроль толщины слоев осаждаемого покрытия.

3. Расчет толщины и оптических постоянных слоя.
4. Оценку точности определения показателя преломления и толщины слоя.
5. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Методы получения диэлектрических покрытий, достоинства и недостатки?
2. Факторы, влияющие на величину показателя преломления диэлектрических пленок.
3. Принцип работы испарителей, оценка отдаваемой мощности и КПД.
4. Методы контроля диэлектрических пленок.
5. Факторы, влияющие на точность изготовления диэлектрических слоев.

Лабораторная работа №2.

Определение оптических постоянных тонких пленок металлов по спектрофотометрическим измерениям и толщине.

Цель работы: Определение толщины и оптических постоянных тонкого металлического слоя, изготовленного методом термического испарения в вакууме. Получение навыков в работе на стандартной вакуумной установке и приборах спектрофотометрического контроля. Практическое освоение лабораторного оборудования и приборов, приобретение навыков определения показателя преломления, коэффициента поглощения и толщины покрытий, сформированных тонким слоем металла.

Содержание работы.

1. По заданию преподавателя рассмотреть особенности оптических характеристик пленок предложенного металла (алюминий, титан, хром, никель, медь, серебро).
2. Выбрать материал подложки для контроля толщины тонких слоев металла в процессе осаждения.
3. Определить диапазон толщин слоев, подходящих для проведения измерений.
4. Выбрать метод контроля толщины слоев в процессе осаждения.
5. Сформировать слой металла с постоянной скоростью осаждения.
6. Измерить спектральные характеристики полученных покрытий.
7. Определить оптические постоянные слоя металла, используя измерения на эллипсометре.
8. Удалить часть покрытия и напылить на полученную ступеньку слой алюминия.
9. Измерить толщину покрытия на микроинтерферометре.
10. Определить оптические постоянные изготовленного слоя металла по спектрофотометрическим измерениям и толщине в заданном спектральном диапазоне.
11. Сравнить полученные данные с эллипсометрическими измерениями на длине волны 632,8 нм.

12. Дополнить технологический процесс изготовления металлических покрытий, заполнив таблицу 5.1.

Методические указания и порядок выполнения работы.

Для работы предлагается выбор подложки и пленкообразующего вещества из списка представляемого преподавателем.

Осаждение рекомендуется проводить на три одинаковых подложки одновременно.

Выбор материалов и метод осаждения пленки в вакууме и ее толщина предоставляется исполнителю.

Произвести осаждение слоев согласно методике, изложенной в методическом указании «Оптические покрытия», Л.А. Губанова, ИТМО 2003г. Работа выполняется с использованием вакуумной установки ВУ-1А, спектрофотометров СФ-26, СФ-46, СФ-46 с приставкой ПЗО-2, рефлектометра, рефрактометра, эллипсометра, микроинтерферометров МИИ-4, МИИ-9.

Оформление отчета.

Отчет помимо основной (обязательной) части должен содержать:

1. Спектральные кривые коэффициентов отражения, обратного отражения, и пропускания.
2. Длину волны, на которой производился контроль толщины слоев осаждаемого покрытия.
3. Результаты расчета и измерения толщины слоя.
4. Спектральные характеристики оптических постоянных слоя с выделенной точкой на длине волны 632,8 нм полученной по эллипсометрическим измерениям.
5. Оценку точности определения показателя преломления и толщины слоя.
6. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Методы получения металлических покрытий, достоинства и недостатки?
2. Факторы, влияющие на величину показателя преломления и коэффициента поглощения пленок металлов.
3. Принцип работы испарителей, оценка отдаваемой мощности и КПД.
4. Методы контроля оптических постоянных пленок металлов.
5. Факторы, влияющие на точность изготовления металлических слоев.

Лабораторная работа №3.

Исследование тонких пленок металлов.

Зависимость оптических постоянных от толщины и скорости осаждения.

Цель работы: Определение оптических постоянных тонких металлических слоев, изготовленных методом термического испарения в

вакууме в зависимости от скорости осаждения и толщины. Получение навыков в работе на стандартной вакуумной установке и приборах спектрофотометрического контроля. Практическое освоение лабораторного оборудования и приборов, приобретение навыков определения показателя преломления, коэффициента поглощения и толщины покрытий, сформированных тонким слоем металла.

Содержание работы.

1. По заданию преподавателя рассмотреть особенности оптических характеристик пленок предложенного металла (алюминий, титан, хром, никель, медь, серебро).
2. Выбрать материал подложки для контроля толщины тонких слоев металлов.
3. Определить диапазон толщин и скоростей осаждения слоев, необходимых для проведения измерений.
4. Выбрать метод контроля толщины и скорости осаждения слоев в процессе формирования покрытия.
5. Сформировать слой металла на подложках с различной толщиной, но с постоянной скоростью осаждения.
6. Сформировать слой металла на подложках с различной скоростью осаждения и одинаковой конечной толщиной.
7. Измерить спектральные характеристики полученных покрытий.
8. Определить оптические постоянные слоя металла, используя измерения на эллипсометре.
9. Удалить часть покрытия и напылить на полученную ступеньку слой алюминия.
10. Измерить толщину покрытия на микроинтерферометре.
11. Определить оптические постоянные изготовленного слоя металла по спектрофотометрическим измерениям и толщине в заданном спектральном диапазоне.
12. Сравнить полученные данные с эллипсометрическими измерениями на длине волны 632,8 нм.
13. Дополнить технологический процесс изготовления металлических покрытий, заполнив таблицу 5.1 для каждого эксперимента (образца).

Методические указания и порядок выполнения работы.

Для работы предлагается выбор подложки и пленкообразующего вещества из списка представляемого преподавателем.

Подложки устанавливаются в приспособление для смены свидетелей по четыре образца на каждую часть исследования. Сначала при полной загрузке испарителя провести прогрев вещества до необходимой скорости осаждения под заслонкой. Далее проводить осаждение на первый свидетель и потом на последующие три, проводя только смену свидетелей и поддерживая скорость испарения, параметрами испарителя контролируя толщину по измеряемому параметру (коэффициент отражения,

коэффициент пропускания, частота, время). Таким образом, получается четыре образца с различной толщиной слоя металла и постоянной скоростью осаждения.

Во второй части работы осаждение также проводится на четыре сменных свидетеля. Равенство толщин слоев на образцах обеспечивается совпадением контролируемого параметра (коэффициент отражения, коэффициент пропускания, частота, время). Скорость осаждения изменяется от образца к образцу.

Выбор материалов и метод осаждения пленки в вакууме и ее толщина предоставляется исполнителю.

Произвести осаждение слоев согласно методике, изложенной в методическом указании «Оптические покрытия», Л.А. Губанова, ИТМО 2003г. Работа выполняется с использованием вакуумной установки ВУ-1А, спектрофотометров СФ-26, СФ-46, СФ-46 с приставкой ПЗО-2, рефлектометра, рефрактометра, эллипсометра, микроинтерферометров МИИ-4, МИИ-9.

Оформление отчета.

Отчет помимо основной (обязательной) части должен содержать:

1. Спектральные кривые коэффициентов отражения, обратного отражения, и пропускания.
2. Длину волны, на которой производился контроль толщины слоев осаждаемого покрытия.
3. Результаты расчета и измерения толщины слоя.
4. Спектральные характеристики оптических постоянных слоя с выделенной точкой на длине волны 632,8 нм полученной по эллипсометрическим измерениям.
5. Оценку точности определения показателя преломления и толщины слоя.
6. Оптические постоянные пленок металлов в зависимости от толщины и скорости осаждения.
7. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Методы получения металлических покрытий, достоинства и недостатки?
2. Факторы, влияющие на величину показателя преломления и коэффициента поглощения пленок металлов.
3. Методы контроля пленок металлов.
4. Факторы, влияющие на точность изготовления металлических слоев.
5. Факторы, влияющие на скорость испарения пленок металлов.

Лабораторная работа №4.

Сравнительное исследование оптических характеристик пленок двух металлов.

Цель работы: Сравнение спектральных зависимостей оптических постоянных и спектральных характеристик коэффициентов пропускания и отражения пленок двух металлов, полученных при одинаковых условиях осаждения (давлении остаточных газов, скоростях осаждения и одинаковом остаточном пропускании) методом термического испарения в вакууме. Получение навыков в работе на стандартной вакуумной установке и приборах спектрофотометрического контроля. Практическое освоение лабораторного оборудования и приборов, приобретение навыков определения показателя преломления, коэффициента поглощения и толщины покрытий, сформированных тонким слоем металла.

Содержание работы.

1. По заданию преподавателя рассмотреть особенности оптических характеристик пленок пары предложенных металлов из набора: алюминий, титан, хром, никель, медь, серебро для выбранных скоростей осаждения и толщин слоев.
2. Выбрать материал подложки.
3. Выбрать метод контроля толщины и скорости осаждения слоев в процессе формирования покрытия.
4. Сформировать слои пары металлов при условиях, определенных в пункте 1.
5. Измерить спектральные характеристики полученных покрытий.
6. Определить оптические постоянные слоя металла, используя измерения на эллипсометре.
7. Удалить часть покрытия и напылить на полученную ступеньку слой алюминия.
8. Измерить толщину покрытия на микроинтерферометре.
9. Определить оптические постоянные изготовленных слоев металлов по спектрофотометрическим измерениям и толщине в заданном спектральном диапазоне.
10. Сравнить полученные данные с эллипсометрическими измерениями на длине волны 632,8 нм.
11. Проанализировать полученные результаты.
12. Дополнить технологический процесс изготовления металлических покрытий, заполнив таблицу 5.1 для каждого эксперимента (образца).

Методические указания и порядок выполнения работы.

Для работы предлагается выбор подложки и пленкообразующего вещества из списка представляемого преподавателем.

Подложки устанавливаются в приспособление смены свидетелей по два образца для каждого металла.

Выбор материалов и метод осаждения пленки в вакууме и ее толщина предоставляется исполнителю.

Произвести осаждение слоев согласно методике, изложенной в методическом указании «Оптические покрытия», Л.А. Губанова, ИТМО 2003г. Работа выполняется с использованием вакуумной установки ВУ-1А, спектрофотометров СФ-26, СФ-46, СФ-46 с приставкой ПЗО-2, рефлектометра, рефрактометра, эллипсометра, микроинтерферометров МИИ-4, МИИ-9.

Оформление отчета.

Отчет помимо основной (обязательной) части должен содержать:

1. Спектральные кривые коэффициентов отражения, обратного отражения, пропускания и поглощения для обоих металлов.
2. Длину волны, на которой производился контроль толщины слоев осаждаемого покрытия.
3. Результаты расчета и измерения толщины слоя.
4. Спектральные характеристики оптических постоянных слоя с выделенной точкой на длине волны 632,8 нм полученной по эллипсометрическим измерениям.
5. Оценку точности определения показателя преломления и толщины слоя.
6. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Методы получения металлических покрытий, достоинства и недостатки?
2. Факторы, влияющие на величину показателя преломления и коэффициента поглощения пленок металлов.
3. Принцип работы испарителей, оценка отдаваемой мощности и КПД.
4. Методы контроля пленок металлов.
5. Факторы, влияющие на точность изготовления металлических слоев.
6. Дисперсия оптических постоянных металлов.
7. Чем обусловлено различие коэффициента отражения и коэффициента обратного отражения.

Лабораторная работа №5.

Исследование оптических постоянных покрытий из смесей металла с диэлектриком.

Цель работы: Определение оптических постоянных тонких керметных слоев, изготовленных методом термического испарения в вакууме при совместном испарении металла и диэлектрика в зависимости от концентрации компонентов. Получение навыков в работе на стандартной вакуумной установке и приборах спектрофотометрического контроля. Практическое освоение лабораторного оборудования и приборов, приобретение навыков определения показателя преломления,

коэффициента поглощения и толщины покрытий, сформированных при совместном испарении металла и диэлектрика вакууме.

Содержание работы.

1. Из списка предоставленного преподавателем выбрать диэлектрик и металл из набора: алюминий, титан, хром, никель, медь, серебро, фторид магния, оксид магния, оксид циркония, оксид кремния.
 2. Выбрать материал подложки.
 3. Выбрать метод контроля толщины и скорости осаждения слоев в процессе формирования покрытия.
 4. Сформировать покрытие из смеси металла с диэлектриком методом совместного испарения из двух испарителей с рассчитанной концентрацией металла.
 5. Измерить спектральные характеристики коэффициентов отражения, обратного отражения и пропускания полученных покрытий.
 6. Определить оптические постоянные слоя, используя измерения на эллипсометре.
 7. Удалить часть покрытия и напылить на полученную ступеньку слой алюминия.
 8. Измерить толщину покрытия на микроинтерферометре.
 9. Определить оптические постоянные изготовленных слоев по спектрофотометрическим измерениям и толщине в заданном спектральном диапазоне.
 10. Сравнить полученные данные с эллипсометрическими измерениями на длине волны 632,8 нм.
 11. Проанализировать полученные результаты.
- Дополнить технологический процесс изготовления металлodieлектрических покрытий, заполнив таблицу 5.1 для каждого эксперимента (образца), указав также расстояние до испарителей.

Методические указания и порядок выполнения работы.

Для работы предлагается выбор подложки и пленкообразующих веществ из списка представляемого преподавателем.

Подложки на подложкодержателе таким образом, чтобы два вспомогательных образца были защищены экранами от паров пленкообразующего вещества одного из испарителей. После осаждения на всех трех образцах проводятся измерения толщины слоя и спектральных зависимостей оптических постоянных каждого из пленкообразующих веществ и смеси.

Выбор материалов, метод осаждения и толщина слоя предоставляется исполнителю.

Произвести осаждение слоев согласно методике, изложенной в методическом указании «Оптические покрытия», Л.А. Губанова, ИТМО 2003г. Работа выполняется с использованием вакуумной установки ВУ-1А, спектрофотометров СФ-26, СФ-46, СФ-46 с приставкой ПЗО-2,

рефлектометра, рефрактометра, эллипсометра, микроинтерферометров МИИ-4, МИИ-9.

Оформление отчета.

Отчет помимо основной (обязательной) части должен содержать:

1. Спектральные кривые коэффициентов отражения, обратного отражения, пропускания и поглощения для обоих пленкообразующих веществ и смеси металла с диэлектриком.
2. Длину волны, на которой производился контроль толщины слоев осаждаемого покрытия.
3. Измерения толщины слоев, концентрацию металла в смеси.
4. Спектральные характеристики оптических постоянных слоев с выделенной точкой на длине волны 632,8 нм полученной по эллипсометрическим измерениям.
5. Оценку точности определения показателя преломления и толщины слоев.
6. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Методы получения покрытий из смеси металла с диэлектриком, достоинства и недостатки?
2. Факторы, влияющие на выбор пленкообразующих веществ при изготовлении покрытий из смесей.
3. Методы контроля толщины оптических покрытий из смесей в процессе осаждения.

Лабораторная работа №6.

Исследование зависимости скорости осаждения и оптических постоянных металлов от тока эмиссии электронно-лучевого или тока накала резистивного испарителей.

Цель работы: Определение скоростей осаждения и оптических постоянных тонких металлических слоев, изготовленных методом термического испарения в вакууме в зависимости от тока эмиссии электронно-лучевых или тока накала резистивных испарителей. Получение навыков в работе на стандартной вакуумной установке и приборах спектрофотометрического контроля. Практическое освоение лабораторного оборудования и приборов, приобретение навыков определения показателя преломления, коэффициента поглощения и толщины покрытий, сформированных тонким слоем металла.

Содержание работы.

1. Из списка предоставленного преподавателем выбрать металл из набора: алюминий, титан, хром, никель, медь, серебро.
2. Выбрать материал подложки.

3. Выбрать метод контроля толщины и скорости осаждения слоев в процессе формирования покрытия.
4. Сформировать покрытия при различных токах испарителей.
5. Измерить спектральные характеристики коэффициентов отражения, обратного отражения и пропускания полученных покрытий.
6. Определить оптические постоянные слоя металла, используя измерения на эллипсометре.
7. Удалить часть покрытия и напылить на полученную ступеньку слой алюминия.
8. Измерить толщину покрытия на микроинтерферометре.
9. Определить оптические постоянные изготовленных слоев по спектрофотометрическим измерениям и толщине в заданном спектральном диапазоне в зависимости от скорости осаждения (тока испарителя).
10. Сравнить полученные данные с эллипсометрическими измерениями на длине волны 632,8 нм.
11. Проанализировать полученные результаты и объяснить различия в значениях оптических постоянных при разных скоростях осаждения.
12. Дополнить технологический процесс изготовления металлических покрытий, заполнив таблицу 5.1 для каждого эксперимента (образца).

Методические указания и порядок выполнения работы.

Для работы предлагается выбор подложки и пленкообразующего вещества из списка представляемого преподавателем.

Подложки устанавливаются в приспособление смены свидетелей для получения покрытий на шести значениях тока испарителя.

Выбор материалов и метод осаждения пленки в вакууме и ее толщина предоставляется исполнителю.

Произвести осаждение слоев согласно методике, изложенной в методическом указании «Оптические покрытия», Л.А. Губанова, ИТМО 2003г. Работа выполняется с использованием вакуумной установки ВУ-1А, спектрофотометров СФ-26, СФ-46, СФ-46 с приставкой ПЗО-2, рефлектометра, рефрактометра, эллипсометра, микроинтерферометров МИИ-4, МИИ-9.

Оформление отчета.

Отчет помимо основной (обязательной) части должен содержать:

1. Спектральные кривые коэффициентов отражения, обратного отражения, пропускания и поглощения в зависимости от скорости осаждения (тока испарителя).
2. Длину волны, на которой производился контроль толщины слоев осаждаемого покрытия.
3. Результаты расчета и измерения толщины слоев.
4. Зависимости оптических постоянных слоев от скорости осаждения, для нескольких длин волн включая значения на длине волны 632,8 нм полученной по эллипсометрическим измерениям.

5. Оценку точности определения показателя преломления и толщины слоев.
6. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Методы получения металлических покрытий, достоинства и недостатки?
2. Факторы, влияющие на величину показателя преломления и коэффициента поглощения пленок металлов.
3. Принцип работы испарителей, оценка отдаваемой мощности и КПД.
4. Методы контроля толщины пленок металлов во время осаждения, чем могут быть вызваны ошибки в толщине при различных методах контроля.
5. Факторы, влияющие на точность изготовления металлических слоев.

Лабораторная работа №7.

Создание покрытий с переменными оптическими постоянными по толщине.

Цель работы: Исследование слоев с оптическими постоянными переменными по толщине, изготовленных методом термического испарения в вакууме при совместном испарении металла и диэлектрика с концентрацией компонентов изменяющейся по заданному закону. Получение навыков в работе на стандартной вакуумной установке и приборах спектрофотометрического контроля. Практическое освоение лабораторного оборудования и приборов, приобретение навыков формирования слоев при совместном испарении металла и диэлектрика в вакууме.

Содержание работы.

1. Из списка предоставленного преподавателем выбрать диэлектрик и металл из набора: алюминий, титан, хром, никель, медь, серебро, фторид магния, оксид магния, оксид циркония, оксид кремния.
2. Выбрать материал подложки.
3. Выбрать метод контроля толщины и скорости осаждения слоев в процессе формирования покрытия.
4. Сформировать покрытие из смеси металла с диэлектриком методом совместного испарения из двух испарителей с заданным распределением концентрации металла по толщине.
5. Измерить спектральные характеристики коэффициентов отражения, обратного отражения и пропускания полученных покрытий.
6. Определить оптические постоянные слоя, используя измерения на эллипсометре.
7. Удалить часть покрытия и напылить на полученную ступеньку слой алюминия.
8. Измерить толщину покрытия на микроинтерферометре.
9. Провести эллипсометрические измерения на длине волны 632,8 нм.

10. Проанализировать полученные результаты.

11. Дополнить технологический процесс изготовления металлических покрытий, заполнив следующую таблицу 5.1 для каждого эксперимента (образца).

Методические указания и порядок выполнения работы.

Для работы предлагается выбор подложки и пленкообразующего вещества из списка представляемого преподавателем.

Выбор материалов и метод осаждения компонентов пленки в вакууме и ее толщина предоставляется исполнителю. Закон изменения концентрации задается исполнителем с учетом результатов предыдущей работы. Изготавливаются два образца с увеличением и со снижением концентрации металла.

Произвести осаждение слоев согласно методике, изложенной в методическом указании «Оптические покрытия», Л.А. Губанова, ИТМО 2003г. Работа выполняется с использованием вакуумной установки ВУ-1А, спектрофотометров СФ-26, СФ-46, СФ-46 с приставкой ПЗО-2, рефлектометра, рефрактометра, эллипсометра, микроинтерферометров МИИ-4, МИИ-9.

Оформление отчета.

Отчет помимо основной (обязательной) части должен содержать:

1. Спектральные кривые коэффициентов отражения, обратного отражения, пропускания и поглощения.
2. Длину волны, на которой производился контроль толщины слоев осаждаемого покрытия.
3. Зависимость концентрации металла от толщины слоя, распределение оптических постоянных слоя от толщины.
4. Результаты расчета и измерения толщины слоев.
5. Зависимости оптических постоянных слоев по толщине на длине волны 632,8 нм полученные по эллипсометрическим измерениям.
6. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Методы получения покрытий из смеси металла с диэлектриком, достоинства и недостатки?
2. Факторы, влияющие на выбор пленкообразующих веществ при изготовлении покрытий из смесей.
3. Методы контроля толщины оптических покрытий из смесей в процессе осаждения.
4. Особенности спектральных характеристик слоев с переменными оптическими постоянными по толщине.
5. Факторы, влияющие на точность изготовления слоев с переменными оптическими постоянными по толщине.

Приложение 1.

Программа расчета оптических характеристик многослойных интерференционных систем

```
CLEAR
10=600:lr=10:ra=108:xn=400:xk=800:xc=20:di$="N":jc=2
thi$="O":xx$="1":f0=0:sp$="S":gr$="R":yn=0:yk=100:PI=3.141592654#
DIM dateT(5,551),dateK(5,102),n1(102),k1(102),n(102),k(102),d(102),n2(102),k2(102)
DIM a11(102),a12(102),a21(102),a22(102),b11(102),b12(102),b21(102),b22(102)
DIM am11(102),am12(102),am21(102),am22(102),bm11(102),bm12(102),bm21(102),bm22(102)
FOR i=0 TO 102:dateK(1,i)=1:dateK(0,i)=i:NEXT i
ucon1$="#####   ##.#####   ##.#####   среда   ##.#####   ##.#####   ##.#####   "
ucon2$="   S   ##.#####   ##.#####   подложка   ##.#####   ##.#####   ##.#####   "
ucon$="#####   ##.#####   ##.#####   #####.#####   ##.#####   ##.#####   ##.#####   "
it=1:ik=5
0 SCREEN 0,1:COLOR 7,1,1:CLS :nl=4:vl=4:fl=4:pl=3
ON ERROR GOTO 101:pk$=">>>"
LOCATE 20,5:PRINT " "
IF jc<2 THEN jc=2
IF jc>102 THEN jc=102
IF jc>15 THEN jk=17 ELSE jk=jc+4
22 IF it>jc-12 THEN it=jc-12
IF it<1 THEN it=1
LOCATE 5,1:j=jc-1
FOR jcon=5 TO jk
i=it+jcon-6:kkk=it
PRINT USING ucon$; dateK(0,i); dateK(1,i); dateK(2,i); dateK(3,i); dateK(4,i); dateK(5,i)
IF i=0 THEN y7=CSRLIN:LOCATE y7-1,38:PRINT " среда "
IF i=jc-1 THEN y7=CSRLIN:LOCATE y7-1,4:PRINT " S ":LOCATE y7-1,38:PRINT " подложка "
NEXT jcon
21 FOR i=5 TO 18:LOCATE i,10:PRINT " ":NEXT i
IF ik<5 THEN ik=5
IF ik>17 THEN ik=17
IF ik>jc+4 THEN ik=jc+4
LOCATE ik,10:PRINT pk$:COLOR 7,1,1
LOCATE 1,1:PRINT "-----"
LOCATE 2,1:PRINT " СЛОЙ      n(i)      k(i)      d(i)      дисп.n(i)      дисп.k(i)"
LOCATE 3,1:PRINT "-----"
LOCATE 4,1:PRINT ""
LOCATE 18,1:PRINT "-----"
'LOCATE 19,5:PRINT 10; " / "; lr; " ( "; f0; " )"
COLOR 8,nl,1:LOCATE 23,6:PRINT " ПЕЧАТЬ ":COLOR 8,pl,1:LOCATE 23,26:PRINT
"ПАРАМЕТРЫ"
COLOR 8,fl,1:LOCATE 23,49:PRINT " ФАЙЛ ":COLOR 8,vl,1:LOCATE 23,68:PRINT " ВЫХОД "
COLOR 7,1,1
23 tb$="":WHILE tb$="":tb$=INKEY$:WEND
IF LEN(tb$)>1 THEN zt=ASC(RIGHT$(tb$,1)) ELSE zt=ASC(tb$)
IF zt=77 AND pl=3 THEN fl=3:pl=4:GOTO 21
IF zt=75 AND pl=3 THEN nl=3:pl=4:GOTO 21
IF zt=77 AND nl=3 THEN pl=3:nl=4:GOTO 21
IF zt=75 AND fl=3 THEN pl=3:fl=4:GOTO 21
IF zt=77 AND fl=3 THEN vl=3:fl=4:GOTO 21
IF zt=75 AND vl=3 THEN fl=3:vl=4:GOTO 21
IF zt=80 AND ik>16 THEN it=it+1:GOTO 22
IF zt=72 AND ik<6 THEN it=it-1:GOTO 22
IF zt=80 THEN ik=ik+1:GOTO 21
IF zt=72 THEN ik=ik-1:GOTO 21
IF zt=13 AND nl=3 THEN GOTO 25
IF zt=13 AND pl=3 THEN GOTO 2
IF zt=13 AND fl=3 THEN GOTO 16
IF zt=13 AND vl=3 THEN CLS :SYSTEM
LOCATE 20,5:PRINT " "
IF zt=82 THEN LOCATE 20,5:INPUT "Добавить слоев ":sli:jc=jc+sli:GOTO 0
IF zt=83 THEN LOCATE 20,5:INPUT "Удалить слоев ":sld:jc=jc-sld:GOTO 0
IF zt=32 THEN LOCATE 20,5:js=ik-6+it:GOTO 24
GOTO 23
24 LOCATE 19,5:PRINT "n=":LOCATE 20,5:PRINT "k="
IF js>0 AND js<j THEN LOCATE 21,5:PRINT "d="
IF di$="Y" THEN LOCATE 19,30:PRINT "дисп. n=":LOCATE 20,30:PRINT "дисп. k="
LOCATE 19,9:INPUT nn$:IF LEN(nn$)>=1 THEN dateK(1,js)=VAL(nn$)
LOCATE 20,9:INPUT kn$:IF LEN(kn$)>=1 THEN dateK(2,js)=VAL(kn$)
IF js>0 AND js<j THEN LOCATE 21,9:INPUT dn$:IF LEN(dn$)>=1 THEN dateK(3,js)=VAL(dn$)
IF di$="Y" THEN LOCATE 19,39:INPUT dnn$:IF LEN(dnn$)>=1 THEN dateK(1,js)=VAL(dnn$)
IF di$="Y" THEN LOCATE 20,39:INPUT dkn$:IF LEN(dkn$)>=1 THEN dateK(2,js)=VAL(dkn$)
IF dateK(1,js)<=0 OR dateK(1,js)>20 THEN dateK(1,js)=1
```

```

IF dateK(2,js)<0 OR dateK(2,js)>20 THEN dateK(2,js)=0
IF dateK(3,js)<0 THEN dateK(3,js)=0
IF dateK(4,js)<-1 OR dateK(4,js)>1 THEN dateK(4,js)=0
IF dateK(5,js)<-1 OR dateK(5,js)>1 THEN dateK(5,js)=0
GOTO 0
25 LPRINT 10; " / "; lr; " ( "; f0; " )"
LPRINT "-----"
LPRINT " СЛОЙ      n(i)      k(i)      d(i)      дисп.n(i)      дисп.k(i)"
LPRINT "-----"
LPRINT ""
LPRINT USING ucon1$; dateK(0,0); dateK(1,0); dateK(2,0); dateK(3,0); dateK(4,0)
FOR i=1 TO jc-2
LPRINT USING ucon$; dateK(0,i); dateK(1,i); dateK(2,i); dateK(3,i); dateK(4,i); dateK(5,i)
NEXT i
LPRINT USING ucon2$; dateK(1,jc-1); dateK(2,jc-1); dateK(4,jc-1); dateK(5,jc-1)
LPRINT "-----"
n1=4:vl=4:fl=4:pl=3:GOTO 22
101 IF ERR=57 OR ERR=25 OR ERR=27 THEN LOCATE 21,25:PRINT "ПРИНТЕР НЕ ГОТОВ !!!":
RESUME 0
COLOR 0,4,4:CLS :LOCATE 15,20:БЕЕР:БЕЕР:PRINT "ОШИБКА "; ERR; " / ";
ERL:БЕЕР:o$=INPUT$(1):RESUME 110

'РАБОТА С ФАЙЛАМИ
16 SCREEN 0,1:COLOR 7,1,1:CLS :ON ERROR GOTO 102
it=1:kt=3:nt=4:FILES "*.kon"
15 LOCATE 21,1:PRINT " "
COLOR 8,kt,1:LOCATE 23,14:PRINT " СЧИТАТЬ "
COLOR 8,nt,1:LOCATE 23,44:PRINT " ЗАПИСАТЬ "
COLOR 7,1,1
8 tb$="":WHILE tb$="" :tb$=INKEY$:WEND
IF LEN(tb$)>1 THEN zt=ASC(RIGHT$(tb$,1)) ELSE zt=ASC(tb$)
IF zt=77 AND kt=3 THEN kt=4:nt=3:GOTO 15
IF zt=75 AND kt=4 THEN kt=3:nt=4:GOTO 15
IF zt=13 AND kt=3 THEN GOTO 10
IF zt=13 AND kt=4 THEN GOTO 9
IF zt=27 THEN GOTO 0
GOTO 8
10 LOCATE 21,10:INPUT " Введите имя файла :"; ff$
ff$=ff$+".kon"
OPEN ff$ FOR INPUT AS #2
INPUT #2,j,10,lr,di1,thi1,jc
di$=CHR$(di1):thi$=CHR$(thi1)
FOR i=0 TO j
INPUT #2,dateK(0,i),dateK(1,i),dateK(2,i),dateK(3,i),dateK(4,i),dateK(5,i)
NEXT i
IF EOF(2) THEN БЕЕР
CLOSE #2
GOTO 0
9 LOCATE 21,10:INPUT " Введите имя файла :"; ff$
ff$=ff$+".kon"
OPEN ff$ FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1,j,10,lr,ASC(di$),ASC(thi$),jc
FOR i=0 TO j
PRINT #1,dateK(0,i),dateK(1,i),dateK(2,i),dateK(3,i),dateK(4,i),dateK(5,i)
NEXT i
CLOSE #1
GOTO 0
102 LOCATE 21,9:PRINT " "
IF ERR=53 THEN LOCATE 21,25:PRINT "НЕТ ФАЙЛА В КАТАЛОГЕ !!!":o$=INPUT$(1):RESUME
15
IF ERR=14 AND ERL=30 THEN LOCATE 21,25:PRINT "ПОПРОБУЙ ЕЩЕ РАЗ":o$=INPUT$(1):
RESUME 15
IF ERR>0 THEN LOCATE 21,25:PRINT "ОШИБКА "; ERR,ERL:o$=INPUT$(1):RESUME 0

'ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТА
2 SCREEN 0,1:COLOR 15,1,1:CLS :tr=4:gr=4:kr=4:nr=4:ON ERROR GOTO 103
ip=5:pp$=">>>>"
1 FOR i=5 TO 18:LOCATE i,45:PRINT " " :NEXT i
IF ip=18 AND tr=4 AND gr=4 AND kr=4 AND nr=4 THEN gr=3
IF ip<5 THEN ip=5
IF ip>18 THEN ip=18
LOCATE ip,45:PRINT pp$
IF ip <> 18 THEN tr=4:gr=4:kr=4:nr=4
LOCATE 2,5:PRINT "ПАРАМЕТРЫ              ЗНАЧЕНИЕ"
LOCATE 3,5:PRINT "-----"
LOCATE 4,5:PRINT ""
LOCATE 18,5:PRINT "-----"

```

```

LOCATE 19,5:PRINT ""
COLOR 8,tr,1:LOCATE 23,4:PRINT " ТАБЛИЦА ":COLOR 8,gr,1:LOCATE 23,24:PRINT "ГРАФИК"
COLOR 8,kr,1:LOCATE 23,43:PRINT " КОНСТРУКЦИЯ ":COLOR 15,1,1
LOCATE 5,5:PRINT "Расчет с учетом дисперсии (Y или N)":LOCATE 5,52:PRINT di$
LOCATE 6,5:PRINT "Оптическая или геометрическая толщина":LOCATE 6,52:PRINT thi$
LOCATE 7,5:PRINT "Центральная длина волны":LOCATE 7,51:PRINT l0
LOCATE 8,5:PRINT "Расчетная длина волны":LOCATE 8,51:PRINT lr
LOCATE 9,5:PRINT "Расчет по n(i),k(i),d(i),f или l":LOCATE 9,52:PRINT xx$
LOCATE 10,5:PRINT "Расчет -- от":LOCATE 10,51:PRINT xn
LOCATE 11,5:PRINT " -- до":LOCATE 11,51:PRINT xk
LOCATE 12,5:PRINT " -- интервал":LOCATE 12,51:PRINT xc
LOCATE 13,5:PRINT "Угол падения луча":LOCATE 13,51:PRINT f0
LOCATE 14,5:PRINT "Тип поляризации S или P":LOCATE 14,52:PRINT sp$
LOCATE 15,5:PRINT "График R,T или A":LOCATE 15,52:PRINT gr$
LOCATE 16,5:PRINT "График -- от":LOCATE 16,51:PRINT yn
LOCATE 17,5:PRINT " -- до":LOCATE 17,51:PRINT yk
3  tb$="":WHILE tb$="":tb$=INKEY$:WEND
   IF LEN(tb$)>1 THEN zt=ASC(RIGHT$(tb$,1)) ELSE zt=ASC(tb$)
   IF zt=79 THEN ip=18:GOTO 1
   IF zt=77 AND ip=18 AND gr=3 THEN kr=3:gr=4:GOTO 1
   IF zt=75 AND ip=18 AND gr=3 THEN tr=3:gr=4:GOTO 1
   IF zt=77 AND ip=18 AND tr=3 THEN gr=3:tr=4:GOTO 1
   IF zt=75 AND ip=18 AND kr=3 THEN gr=3:kr=4:GOTO 1
   IF zt=80 THEN ip=ip+1:GOTO 1
   IF zt=72 THEN ip=ip-1:GOTO 1
   IF zt=77 AND ip <> 18 OR zt=75 AND ip <> 18 THEN GOTO 4
   jt=1+(xk-xn) / xc:IF jt-INT(jt)>.2*xc THEN jt=INT(jt)+1 ELSE jt=INT(jt)
   IF zt=13 AND tr=3 THEN ggg=1:GOTO 5
   IF zt=13 AND gr=3 THEN xcc=xc:jt=550:xc=(xk-xn) / 550:GOTO 5
   IF zt=13 AND kr=3 THEN GOTO 0
   GOTO 3
4  LOCATE 21,5:PRINT "Введите новое значение:                ":LOCATE 21,30
   IF ip=5 THEN INPUT di$:IF di$="y" OR di$="Y" THEN di$="Y" ELSE di$="N"
   IF ip=6 THEN INPUT thi$:IF thi$="g" OR thi$="G" THEN thi$="G" ELSE thi$="O"
   IF ip=7 THEN INPUT l10:IF l10<=0 THEN GOTO 4 ELSE l0=l10
   IF ip=8 THEN INPUT lr:IF lr<=0 THEN GOTO 4 ELSE lr=lr
   IF ip=9 THEN INPUT xx1$:IF LEN(xx1$)>3 OR LEN(xx1$)<1 THEN GOTO 4 ELSE
xx$=LCASE$(xx1$):ra=ASC(xx$)
   IF ip=10 THEN INPUT xn:IF xn<0 OR xn>=xk THEN GOTO 4 ELSE IF xc>xk-xn THEN xc=(xk-
xn)/10
   IF ip=11 THEN INPUT xk:IF xk<=xn THEN GOTO 4 ELSE IF xc>xk-xn THEN xc=(xk-xn) / 10
   IF ip=12 THEN INPUT xc:IF xc<=0 OR xc>xk-xn THEN xc=(xk-xn) / 10
   IF ip=13 THEN INPUT f10:IF f10<0 OR f10>90 THEN GOTO 4 ELSE f0=f10
   IF ip=14 THEN INPUT sp1$:IF sp1$="P" OR sp1$="S" OR sp1$="p" OR sp1$="s" THEN
sp$=UCASE$(sp1$) ELSE sp$=""
   IF ip=15 THEN INPUT gr1$:IF gr1$="T" OR gr1$="t" OR gr1$="a" OR gr1$="A" THEN
gr$=UCASE$(gr1$) ELSE gr$="R"
   IF ip=16 THEN INPUT yn1:IF yn1<0 OR yn1>=100 OR yn1>=yk THEN GOTO 4 ELSE yn=yn1
   IF ip=17 THEN INPUT yk1:IF yk1<=0 OR yk1>100 OR yk1<=yn THEN GOTO 4 ELSE yk=yk1
   IF LEN(xx1$)>2 THEN rb=VAL(RIGHT$(xx1$,2)) ELSE rb=VAL(RIGHT$(xx1$,1))
   IF rb<0 OR rb>j THEN GOTO 4
   IF (xk-xn) / xc>500 THEN xc=(xk-xn) / 500:xc=(INT(xc*1000)) / 1000
   IF ra=110 THEN IF xn>20 OR xk>20 OR xn=0 THEN xn=1:xk=4:xc=.2
   IF ra=107 THEN IF xn>20 OR xk>20 OR xn<0 THEN xn=0:xk=3:xc=.2
   IF LEN(xx$)<2 AND ra=110 THEN GOTO 4
   IF LEN(xx$)=3 AND rb=0 THEN GOTO 4
   IF xx$="ns" OR xx$="ks" THEN rb=j
   IF ra=100 AND rb=0 OR ra=100 AND rb=j THEN GOTO 4
   IF ra=110 AND rb=j THEN xx$="ns"
   IF ra=107 AND rb=j THEN xx$="ks"
   IF ra=102 THEN xx$="f"
   IF ra=108 THEN xx$="l"
   IF ra=107 AND rb=0 THEN GOTO 4
   IF xx$="f" THEN IF xn>=90 OR xk>=90 THEN xn=0:xk=20:xc=1
   IF xx$="l" THEN IF xn=0 THEN xn=400:xk=600:xc=10
   IF ra=110 OR ra=107 OR ra=102 OR ra=100 OR ra=108 THEN ff=ff1 ELSE GOTO 4
   LOCATE 21,1:PRINT "
   FOR kk=5 TO 17:LOCATE kk,50:PRINT "
   ":NEXT kk:GOTO 1
103 COLOR 0,4,4:CLS :LOCATE 15,20:BEEP:BEEP:PRINT "ОШИБКА "; ERR; " / "; ERL:BEEP:
o$=INPUT$(1):RESUME l10
'РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ
5  FOR k=0 TO jt
   IF ra=108 THEN l=xn+xc*k ELSE l=lr
   FOR i=0 TO j
   IF di$="Y" THEN n(i)=dateK(1,i)+(1-l0)*dateK(4,i) / 100 ELSE n(i)=dateK(1,i)
   IF di$="Y" THEN k(i)=dateK(2,i)+(1-l0)*dateK(5,i) / 100 ELSE k(i)=dateK(2,i)
   IF thi$="O" THEN d(i)=dateK(3,i)*10 / dateK(1,i) ELSE d(i)=dateK(3,i)

```

```

NEXT i
IF ra=102 THEN f0=xn+xc*k
w7=SIN(PI*f0 / 180):w8=0
IF ra=110 THEN n(rb)=xn+xc*k
IF ra=107 THEN k(rb)=xn+xc*k
IF thi$="O" THEN d(rb)=dateK(3,rb)*10 / n(rb)
IF ra=100 THEN d(rb)=xn+xc*k
IF ra=100 AND thi$="O" THEN d(rb)=(xn+xc*k)*10 / dateK(1,rb)
IF f0=0 THEN GOTO 17
FOR i=0 TO j:n1(i)=n(i):k1(i)=k(i):NEXT i
IF sp$="S" THEN n(0)=n1(0)*COS(f0*PI / 180):k(0)=k1(0)*COS(f0*PI / 180)
IF sp$="P" THEN n(0)=n1(0) / COS(f0*PI / 180):k(0)=k1(0) / COS(f0*PI / 180)
FOR i=1 TO j
w1=n1(i-1)*n1(i)+k1(i-1)*k1(i)
w2=-n1(i-1)*k1(i)+k1(i-1)*n1(i)
w3=n1(i)*n1(i)+k1(i)*k1(i)
w9=(w1*w7-w2*w8) / w3:w10=(w1*w8+w2*w7) / w3
w11=1-w9*w9+w10*w10:w12=-2*w9*w10
w13=SQR(w11*w11+w12^2)
w14=w12 / w13:w14=ATN(w14 / SQR(-w14^2+1))
w15=COS(w14 / 2)*SQR(w13):w16=SIN(w14 / 2)*SQR(w13)
w7=w9:w8=w10
w17=n(i)*w15-k(i)*w16:w18=n(i)*w16+k(i)*w15
n(i)=w17:k(i)=w18
IF sp$="S" THEN GOTO 19
n2(i)=(w17*w11+w18*w12) / (w12^2+w11^2)
k2(i)=(w18*w11-w17*w12) / (w12^2+w11^2)
19 REM
NEXT i
17 IF j=1 THEN a11(0)=1:a22(0)=1:a12(0)=0:a21(0)=0:b11(0)=0:b22(0)=0:b12(0)=0:b21(0)=0:GOTO 18
i=1
f1=2*PI*n(i)*d(i) / 1
f2=2*PI*k(i)*d(i) / 1
IF sp$="P" AND f0>0 THEN n(i)=n2(i):k(i)=k2(i)
chb=(EXP(f2)+EXP(-f2)) / 2 : shb=(EXP(f2)-EXP(-f2)) / 2
a11(i)=COS(f1)*chb :a22(i)=COS(f1)*chb
b11(i)=SIN(f1)*shb :b22(i)=SIN(f1)*shb
a12(i)=n(i)*SIN(f1)*chb / (n(i)^2+k(i)^2)+k(i)*COS(f1)*shb / (n(i)^2+k(i)^2)
b12(i)=k(i)*SIN(f1)*chb / (n(i)^2+k(i)^2)-n(i)*COS(f1)*shb / (n(i)^2+k(i)^2)
a21(i)=n(i)*SIN(f1)*chb-k(i)*COS(f1)*shb
b21(i)=-k(i)*SIN(f1)*chb-n(i)*COS(f1)*shb
IF j=2 THEN GOTO 18
FOR i=2 TO j-1 STEP 1
f1=2*PI*n(i)*d(i) / 1:f2=2*PI*k(i)*d(i) / 1
IF sp$="P" AND f0>0 THEN n(i)=n2(i):k(i)=k2(i)
chb=(EXP(f2)+EXP(-f2)) / 2
shb=(EXP(f2)-EXP(-f2)) / 2
am11(i)=COS(f1)*chb :am22(i)=COS(f1)*chb
bm11(i)=SIN(f1)*shb :bm22(i)=SIN(f1)*shb
am12(i)=n(i)*SIN(f1)*chb / (n(i)^2+k(i)^2)+k(i)*COS(f1)*shb / (n(i)^2+k(i)^2)
bm12(i)=k(i)*SIN(f1)*chb / (n(i)^2+k(i)^2)-n(i)*COS(f1)*shb / (n(i)^2+k(i)^2)
am21(i)=n(i)*SIN(f1)*chb-k(i)*COS(f1)*shb
bm21(i)=-k(i)*SIN(f1)*chb-n(i)*COS(f1)*shb
a11(i)=a11(i-1)*am11(i)-b11(i-1)*bm11(i)-a12(i-1)*am21(i)+b12(i-1)*bm21(i)
a22(i)=a22(i-1)*am22(i)-b22(i-1)*bm22(i)-a21(i-1)*am12(i)+b21(i-1)*bm12(i)
b11(i)=a11(i-1)*bm11(i)+b11(i-1)*am11(i)-a12(i-1)*bm21(i)-b12(i-1)*am21(i)
b22(i)=a22(i-1)*bm22(i)+b22(i-1)*am22(i)-a21(i-1)*bm12(i)-b21(i-1)*am12(i)
a12(i)=a11(i-1)*am12(i)-b11(i-1)*bm12(i)+a12(i-1)*am22(i)-b12(i-1)*bm22(i)
a21(i)=a22(i-1)*am21(i)-b22(i-1)*bm21(i)+a21(i-1)*am11(i)-b21(i-1)*bm11(i)
b12(i)=a11(i-1)*bm12(i)+b11(i-1)*am12(i)+a12(i-1)*bm22(i)+b12(i-1)*am22(i)
b21(i)=a22(i-1)*bm21(i)+b22(i-1)*am21(i)+a21(i-1)*bm11(i)+b21(i-1)*am11(i)
NEXT i
18 i=j-1
a11=a11(i):a22=a22(i):a12=a12(i):a21=a21(i)
b11=b11(i):b22=b22(i):b12=b12(i):b21=b21(i)
IF sp$="P" AND f0>0 THEN n(j)=n2(j):k(j)=k2(j)
r1=n(0)*a11-n(j)*a22-n(0)*n(j)*b12+b21-k(j)*b22+k(j)*n(0)*a12+k(0)*b11+k(0)*n(j)*a12+k(0)*k(j)*b12
r2=n(0)*b11-n(j)*b22+n(0)*n(j)*a12-a21+k(j)*a22+k(j)*n(0)*b12-k(0)*a11+k(0)*n(j)*b12-k(0)*k(j)*a12
r3=n(0)*a11+n(j)*a22-n(0)*n(j)*b12-b21+k(j)*b22+k(j)*n(0)*a12+k(0)*b11+k(0)*n(j)*a12+k(0)*k(j)*b12
r4=n(0)*b11+n(j)*b22+n(0)*n(j)*a12+a21-k(j)*a22+k(j)*n(0)*b12-k(0)*a11+k(0)*n(j)*b12-k(0)*k(j)*a12
R=(r1^2+r2^2) / (r3^2+r4^2):R=R*100
T=n(0)*n(j)^4 / (r3^2+r4^2):T=T*100
A=100-R-T
rr=r1*r3+r2*r4:ri=r2*r3-r1*r4
IF rr=0 AND ri>0 THEN Fr=90:GOTO 90
IF rr=0 AND ri<0 THEN Fr=270:GOTO 90
IF ri=0 AND rr>=0 THEN Fr=0:GOTO 90

```

```

IF ri=0 AND rr<0 THEN Fr=180:GOTO 90
Fr=ATN(ri / rr):Fr=Fr*180 / PI
IF ri>0 AND rr<0 THEN Fr=180+Fr
IF ri<0 AND rr<0 THEN Fr=180+Fr
IF ri<0 AND rr>0 THEN Fr=2*180+Fr
90 tr=4*n(0)*n(j)*r3:ti=-4*n(0)*n(j)*r4
IF tr=0 AND ti>0 THEN Ft=90:GOTO 91
IF tr=0 AND ti<0 THEN Ft=270:GOTO 91
IF ti=0 AND tr>=0 THEN Ft=0:GOTO 91
IF ti=0 AND tr<0 THEN Ft=180:GOTO 91
Ft=ATN(ti / tr):Ft=Ft*180 / PI
IF ti>0 AND tr<0 THEN Ft=180+Ft
IF ti<0 AND tr<0 THEN Ft=180+Ft
IF ti<0 AND tr>0 THEN Ft=2*180+Ft
91 IF A<.00002 AND A>-.00002 THEN A=0
IF Fr<.00002 AND Fr>-.00002 THEN A=0
IF Ft<.00002 AND Ft>-.00002 THEN A=0
IF R<.00001 THEN R=0
IF T<.00001 THEN T=0
REM Ft=360-Ft:Fr=360-Fr
dateT(1,k+1)=R:dateT(2,k+1)=T:dateT(5,k+1)=A:dateT(3,k+1)=Fr:dateT(4,k+1)=Ft
NEXT k
IF ggg=1 THEN ggg=0:GOTO 7 ELSE xc=xcс:GOTO 6

'ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ "TABLE"
7 SCREEN 0,1:COLOR 7,1,1:CLS :it=1:kt=3:nt=4:ON ERROR GOTO 104
12 COLOR 8,kt,1:LOCATE 23,14:PRINT " КОНСТРУКЦИЯ ":COLOR 8,nt,1:LOCATE 23,44:PRINT
"ПЕЧАТЬ"
COLOR 7,1,1
FOR i=1 TO jT:dateT(0,i)=xn-xc+xc*i:NEXT i
LOCATE 1,1:PRINT "-----"
LOCATE 2,7:PRINT xx$
LOCATE 2,15:PRINT " R ,(%) T ,(%) Fr,(град) Ft,(град) A ,(%)"
LOCATE 3,1:PRINT "-----"
LOCATE 4,1:PRINT ""
LOCATE 21,1:PRINT "-----"
11 IF it>jT-15 THEN it=jT-15
IF it<1 THEN it=1
LOCATE 5,1
FOR jtab=5 TO 20
i=it+jtab-5
PRINT USING "#####.#####"; dateT(0,i); dateT(1,i); dateT(2,i); dateT(3,i); dateT(4,i); dateT(5,i)
IF i>jT-1 THEN jtab=21
NEXT jtab
13 tb$="":WHILE tb$="" :tb$=INKEY$:WEND
IF LEN(tb$)>1 THEN zt=ASC(RIGHT$(tb$,1)) ELSE zt=ASC(tb$)
IF zt=80 THEN it=it+1:GOTO 11
IF zt=72 THEN it=it-1:GOTO 11
IF zt=77 AND kt=3 THEN kt=4:nt=3:GOTO 12
IF zt=75 AND kt=4 THEN kt=3:nt=4:GOTO 12
IF zt=13 AND kt=3 THEN GOTO 0
IF zt=13 AND kt=4 THEN GOTO 14
IF zt=60 THEN GOTO 20
GOTO 13
20 LOCATE 22,10:INPUT " Введите имя файла :"; ff$
IF LEN(ff$)>8 OR LEN(ff$)<1 THEN GOTO 16
ff$=ff$+".dif"
OPEN ff$ FOR OUTPUT AS #3
PRINT #3,"TABLE":PRINT #3,"0,1":PRINT #3,STRING$(1,34); "EXCEL"; STRING$(1,34)
PRINT #3,"VECTOR":PRINT #3,"0,"; jT+1:PRINT #3,STRING$(2,34):PRINT #3,"TUPLES"
PRINT #3,"0,6":PRINT #3,STRING$(2,34):PRINT #3,"DATA":PRINT #3,"0,0"
PRINT #3,STRING$(2,34):PRINT #3,"-1,0":PRINT #3,"BOT":PRINT #3,"1,0"
PRINT #3,STRING$(1,34);xx$;STRING$(1,34):PRINT #3,"1,0":PRINT #3,STRING$(1,34); "R,(%)";
STRING$(1,34)
PRINT #3,"1,0":PRINT #3,STRING$(1,34); "T,(%)"; STRING$(1,34):PRINT #3,"1,0"
PRINT #3,STRING$(1,34); "Fr,(град)"; STRING$(1,34):PRINT #3,"1,0"
PRINT #3,STRING$(1,34); "Ft,(град)"; STRING$(1,34):PRINT #3,"1,0"
PRINT #3,STRING$(1,34); "A ,(%)"; STRING$(1,34):PRINT #3,"-1,0"
FOR i=1 TO jT
PRINT #3,"BOT"
FOR j=0 TO 5
ex1=dateT(j,i):ex1$=STR$(FIX(ex1)):ex2=(ex1-FIX(ex1))*10:ex2$=STR$(FIX(ex2))
ex3=(ex2-FIX(ex2))*10:ex3$=STR$(FIX(ex3)):ex4=(ex3-FIX(ex3))*10:ex4$=STR$(FIX(ex4))
ex5=(ex4-FIX(ex4))*10:ex5$=STR$(FIX(ex5)):ex6=(ex5-FIX(ex5))*10:ex6$=STR$(FIX(ex6))
ex7=(ex6-FIX(ex6))*10:ex7$=STR$(FIX(ex7))
ex$=RIGHT$(ex2$,1)+RIGHT$(ex3$,1)+RIGHT$(ex4$,1)+RIGHT$(ex5$,1)+RIGHT$(ex6$,1)+
RIGHT$(ex7$,1)

```

```

PRINT #3,"0,"; ex1$; ","; ex$:PRINT #3,"V"
NEXT j
PRINT #3,"-1,0"
NEXT i
PRINT #3,"EOD"
CLOSE #3
GOTO 7
14 LPRINT 10; " / "; lr; " ( "; f0; " / "; sp$; " )",ff$
LPRINT "-----"
LPRINT ""
stab$=" "+xx$+" R ,(%) T ,(%) Fr,(град) Ft,(град) A ,(%)"
LPRINT stab$
LPRINT "-----"
LPRINT ""
FOR i=1 TO jt
LPRINT USING "#####.#####"; dateT(0,i); dateT(1,i); dateT(2,i); dateT(3,i); dateT(4,i); dateT(5,i)
NEXT i
LPRINT "-----"
kt=3:nt=4:GOTO 12
104 IF ERR=57 OR ERR=25 OR ERR=27 THEN LOCATE 22,25:PRINT "ПРИНТЕР НЕ ГОТОВ !!!":
RESUME 0
COLOR 0,4,4:CLS :LOCATE 15,20:БЕЕР:БЕЕР:PRINT "ОШИБКА "; ERR; " / "; ERL:БЕЕР:
o$=INPUT$(1):RESUME 110

'ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ "PLOT"
6 SCREEN 9,2:COLOR 15,1:CLS :ON ERROR GOTO 105
IF xx$="1" OR xx$="f" THEN xx$=" "+xx$
IF gr$="T" THEN yy$="T":ip=2
IF gr$="R" THEN yy$="R":ip=1
IF gr$="A" THEN yy$="A":ip=5
yp=(yk-yn) / 5:xp=(xk-xn) / 5:yp$=yy$+",(%)"
LOCATE 3,1:PRINT USING "###.###"; yk
LOCATE 7,1:PRINT USING "###.###"; yk-yp
LOCATE 11,1:PRINT USING "###.###"; yk-2*yp
LOCATE 15,1:PRINT USING "###.###"; yn+2*yp
LOCATE 19,1:PRINT USING "###.###"; yn+yp
LOCATE 23,1:PRINT USING "###.###"; yn
COLOR 14,1:LOCATE 2,8:PRINT yp$:yp=290 / (yk-yn):COLOR 15,1
LINE (70,29)-(620,29):LINE (68,30)-(68,320):LINE (622,30)-(622,320):LINE (70,321)-(620,321)
LINE (69,30)-(69,320):LINE (621,30)-(621,320)
LINE (70,30)-(620,30):LINE (70,30)-(70,320):LINE (620,30)-(620,320):LINE (70,320)-(620,320)
LINE (70,88)-(620,88):LINE (180,30)-(180,320):LINE (70,146)-(620,146):LINE (290,30)-(290,320)
LINE (70,204)-(620,204):LINE (400,30)-(400,320):LINE (70,262)-(620,262):LINE (510,30)-(510,320)
LOCATE 24,1:PRINT USING "#####.#####"; xn; xn+xp; xn+xp*2; xk-xp*2; xk-xp; xk
COLOR 14,1:LOCATE 23,77:PRINT xx$:x=70:COLOR 15,1
FOR jp=1 TO 550
y=dateT(ip,jp):y=306-(y-yn)*yp
y0=dateT(ip,jp-1):y0=306-(y0-yn)*yp
IF y>306 THEN y=306
IF y<16 THEN y=16
IF y0>306 THEN y0=306
IF y0<16 THEN y0=16
IF x=70 THEN PSET (x,y),2:y0=y
x=x+1:LINE (x-1,y0)-(x,y),12
NEXT jp
plot$=INPUT$(1):GOTO 2
105 COLOR 0,4,4:CLS :LOCATE 15,20:БЕЕР:БЕЕР:PRINT "ОШИБКА "; ERR; " / "; ERL:БЕЕР
o$=INPUT$(1):RESUME 110
110 SYSTEM

```

Приложение 2.

Пример расчета трехслойного интерференционного покрытия в Microsoft Excel

n0	1,0000							
n1	1,4500	k1	0,00	nd	0,250			
n2	0,0055	k2	3,32	nd	0			
n3	1,9600	k3	0,00	nd	0,002			
ns	1,5200				0			
λ0	550,00				0,250			
					0			
1-ый слой								
			1,570					
φ	90,0000		8					
			0,000					
φ'	0,0000		0					
m11	0,0000							
m12	0,6897							
m21	1,4500							
m22	0,0000							
m11'	0,0000							
m12'	0,0000							
m21'	0,0000							
m22'	0,0000							
2-ой слой								
			0,012					
φ	0,7200		6					
			7,585					
φ'	434,6182		5					
m11	984,6560	m11	2254,4					$m_{11}(j-1)m_{11}(j) - m'_{11}(j-1)m'_{11}(j) - m_{12}(j-1)m_{21}(j) + m'_{12}(j-1)m'_{21}(j)$
m12	296,5884	m12	7					$m_{11}(j-1)m_{12}(j) - m'_{11}(j-1)m'_{12}(j) + m_{12}(j-1)m_{22}(j) - m'_{12}(j-1)m'_{22}(j)$
			679,07					$m_{22}(j-1)m_{21}(j) - m'_{22}(j-1)m'_{21}(j) + m_{21}(j-1)m_{11}(j) - m'_{21}(j-1)m'_{11}(j)$
			1427,7					$m_{22}(j-1)m_{22}(j) - m'_{22}(j-1)m'_{22}(j) - m_{21}(j-1)m_{12}(j) + m'_{21}(j-1)m'_{12}(j)$
m21	-3268,9883	m21	5					$m_{11}(j-1)m'_{11}(j) + m'_{11}(j-1)m_{11}(j) - m_{12}(j-1)m'_{21}(j) - m'_{12}(j-1)m_{21}(j)$
m22	984,6560	m22	-430,05					$m_{11}(j-1)m'_{12}(j) + m'_{11}(j-1)m_{12}(j) + m_{12}(j-1)m'_{22}(j) + m'_{12}(j-1)m_{22}(j)$
			32,067					$m_{22}(j-1)m'_{21}(j) + m'_{22}(j-1)m_{21}(j) + m_{21}(j-1)m'_{11}(j) + m'_{21}(j-1)m_{11}(j)$
m11'	12,3742	m11'	6					$m_{22}(j-1)m'_{22}(j) + m'_{22}(j-1)m_{22}(j) - m_{21}(j-1)m'_{12}(j) - m'_{21}(j-1)m_{12}(j)$
			8,5339					
m12'	3,2358	m12'	3					
			17,942					
m21'	-46,4980	m21'	6					
m22'	12,3742	m22'	-4,692					
3-ий слой								
			1,570					
φ	90,0000		8					
			0,000					
φ'	0,0000		0					
m11	0,0000	m11	-1331					$m_{11}(j-1)m_{11}(j) - m'_{11}(j-1)m'_{11}(j) - m_{12}(j-1)m_{21}(j) + m'_{12}(j-1)m'_{21}(j)$
			1150,2					$m_{11}(j-1)m_{12}(j) - m'_{11}(j-1)m'_{12}(j) + m_{12}(j-1)m_{22}(j) - m'_{12}(j-1)m'_{22}(j)$
m12	0,5102	m12	4					$m_{22}(j-1)m_{21}(j) - m'_{22}(j-1)m'_{21}(j) + m_{21}(j-1)m_{11}(j) - m'_{21}(j-1)m'_{11}(j)$
m21	1,9600	m21	-842,9					$m_{22}(j-1)m_{22}(j) - m'_{22}(j-1)m'_{22}(j) - m_{21}(j-1)m_{12}(j) + m'_{21}(j-1)m'_{12}(j)$
m22	0,0000	m22	-728,44					$m_{11}(j-1)m'_{11}(j) + m'_{11}(j-1)m_{11}(j) - m_{12}(j-1)m'_{21}(j) - m'_{12}(j-1)m_{21}(j)$
m11'	0,0000	m11'	-16,727					$m_{11}(j-1)m'_{12}(j) + m'_{11}(j-1)m_{12}(j) + m_{12}(j-1)m'_{22}(j) + m'_{12}(j-1)m_{22}(j)$
m12'	0,0000	m12'	16,361					$m_{22}(j-1)m'_{21}(j) + m'_{22}(j-1)m_{21}(j) + m_{21}(j-1)m'_{11}(j) + m'_{21}(j-1)m_{11}(j)$
m21'	0,0000	m21'	-9,1962					$m_{22}(j-1)m'_{22}(j) + m'_{22}(j-1)m_{22}(j) - m_{21}(j-1)m'_{12}(j) - m'_{21}(j-1)m_{12}(j)$

m22' 0,0000 **m22' -9,1544**

V	-257,8126	$\frac{n_0 m_{11} + m'_{21} - n_\ell (n_0 m'_{12} + m_{22}) + k_\ell (n_0 m_{12} - m'_{22})}{n_0 m'_{11} - m_{21} + n_\ell (n_0 m_{12} - m'_{22}) + k_\ell (n_0 m'_{12} + m_{22})}$
Z	2588,4604	$\frac{n_0 m'_{11} - m_{21} + n_\ell (n_0 m_{12} - m'_{22}) + k_\ell (n_0 m'_{12} + m_{22})}{n_0 m_{11} - m'_{21} - n_\ell (n_0 m'_{12} - m_{22}) + k_\ell (n_0 m_{12} + m'_{22})}$
X	-2453,8915	$\frac{n_0 m_{11} - m'_{21} - n_\ell (n_0 m'_{12} - m_{22}) + k_\ell (n_0 m_{12} + m'_{22})}{n_0 m'_{11} + m_{21} + n_\ell (n_0 m_{12} + m'_{22}) + k_\ell (n_0 m'_{12} - m_{22})}$
Y	874,8229	$\frac{n_0 m'_{11} + m_{21} + n_\ell (n_0 m_{12} + m'_{22}) + k_\ell (n_0 m'_{12} - m_{22})}{n_0 m_{11} - m'_{21} - n_\ell (n_0 m'_{12} - m_{22}) + k_\ell (n_0 m_{12} + m'_{22})}$

R	0,9970	$\frac{V^2 + Z^2}{X^2 + Y^2}$
T	8,96E-07	$\frac{4n_0 n_\ell}{X^2 + Y^2}$

	A	B	C	D	E	F
1	n0	1				
2	n1	1,45	k1	0	nd	0,25
3	n2	0,0055	k2	3,32	nd	0,002
4	n3	1,96	k3	0	nd	0,25
5	ns	1,52				
6	λ0	550				
7	1-ый слой					
8	φ	=2*180*F2	=2*ПИ()*F2			
9	φ'	=2*180*F2/B2*D2	=2*ПИ()*F2/B2*D2			
11	m11	=COS(C8)*COSH(C9)	2			
12	m12	=(B2*SIN(C8)*COSH(C9)+D2*COS(C8)*SINH(C9))/(B2*B2+D2*D2)				
13	m21	=B2*SIN(C8)*COSH(C9)-D2*COS(C8)*SINH(C9)				
14	m22	=B11				
15	m11'	=SIN(C8)*SINH(C9)				
16	m12'	=(D2*SIN(C8)*COSH(C9)-B2*COS(C8)*SINH(C9))/(B2*B2+D2*D2)				
17	m21'	=-D2*SIN(C8)*COSH(C9)-B2*COS(C8)*SINH(C9)				
18	m22'	=B15				
19	2-ой слой					
20	φ	=2*180*F3	=2*ПИ()*F3			
21	φ'	=2*180*F3/B3*D3	=2*ПИ()*F3/B3*D3			
23	m11	=COS(C20)*COSH(C21)	m11	=B11*B23-B15*B27-B12*B25+B16*B29		
24	m12	=(B3*SIN(C20)*COSH(C21)+D3*COS(C20)*SINH(C21))/(B3*B3+D3*D3)	m12	=B11*B24-B15*B28+B12*B26-B16*B30		
25	m21	=B3*SIN(C20)*COSH(C21)-D3*COS(C20)*SINH(C21)	m21	=B14*B25-B18*B29+B13*B23-B17*B27		
26	m22	=B23	m22	=B14*B26-B18*B30-B13*B24+B17*B28		
27	m11'	=SIN(C20)*SINH(C21)	m11'	=B11*B27+B15*B23-B12*B29-B16*B25		
28	m12'	=(D3*SIN(C20)*COSH(C21)-B3*COS(C20)*SINH(C21))/(B3*B3+D3*D3)	m12'	=B11*B28+B15*B24+B12*B30+B16*B26		
29	m21'	=-D3*SIN(C20)*COSH(C21)-B3*COS(C20)*SINH(C21)	m21'	=B14*B29+B18*B25+B13*B27+B17*B23		
30	m22'	=B27	m22'	=B14*B30+B18*B26-B13*B28-B17*B24		
31	3-ий слой					
32	φ	=2*180*F4	=2*ПИ()*F4			
33	φ'	=2*180*F4/B4*D4	=2*ПИ()*F4/B4*D4			

35	m11	=COS(C32)*COSH(C33)	4	m11	=D23*B35-D27*B39-D24*B37+D28*B41
36	m12	=(B4*SIN(C32)*COSH(C33)+D4*COS(C32)*SINH(C33))/(B4*B4+D4*D4)		m12	=D23*B36-D27*B40+D24*B38-D28*B42
37	m21	=B4*SIN(C32)*COSH(C33)-D4*COS(C32)*SINH(C33)		m21	=D26*B37-D30*B41+D25*B35-D29*B39
38	m22	=B35		m22	=D26*B38-D30*B42-D25*B36+D29*B40
39	m11'	=SIN(C32)*SINH(C33)		m11'	=D23*B39+D27*B35-D24*B41-D28*B37
40	m12'	=(D4*SIN(C32)*COSH(C33)-B4*COS(C32)*SINH(C33))/(B4*B4+D4*D4)		m12'	=D23*B40+D27*B36+D24*B42+D28*B38
41	m21'	=-D4*SIN(C32)*COSH(C33)-B4*COS(C32)*SINH(C33)		m21'	=D26*B41+D30*B37+D25*B39+D29*B35
42	m22'	=B39		m22'	=D26*B42+D30*B38-D25*B40-D29*B36
45	V	=B1*D35+D41-B5*(B1*D40+D38)			
46	Z	=B1*D39-D37+B5*(B1*D36-D42)			
47	X	=B1*D35-D41-B5*(B1*D40-D38)			
48	Y	=B1*D39+D37+B5*(B1*D36+D42)			
50	R	=(B45*B45+B46*B46)/(B47*B47+B48*B48)			
52	T	=4*B1*B5/(B47*B47+B48*B48)			

Приложение 3.

Методика определения нулевых положений эллипсометра ЛЭФ-3М

1. Установить на предметный столик эллипсометра юстировочную пластину из комплекта прибора.
2. Механизм подъема плеч установить на угол падения 70° .
3. Вращением поляризатора, анализатора и компенсатора добиться минимума интенсивности света на выходе анализатора и зафиксировать соответствующие углы P_1, A_1, C_1 .
4. Перевести анализатор из положения A_1 в положение $A_2 = A_1 \pm 90^\circ$.

5. Вращением поляризатора и компенсатора добиться гашения света на выходе анализатора. Зафиксировать азимутальные углы P_2 и C_2 .

Таблица 1.

Пример определения нулевых положений.

P	C	A
180°00′	359°42′	94°12′
81°02′	8°46′	184°12′
171°02′	8°46′	116°58′
37°24′	321°53′	206°58′
127°24′	322°09′	165°15′
187°03′	352°35′	75°15′
97°03′	352°28′	358°10′
182°11′	357°27′	88°10′
92°11′	357°27′	00°00′
181°32′	358°06′	90°00′
91°32′	358°06′	0°14′
181°25′	358°13′	90°14′
91°25′	358°13′	0°16′
181°26′	358°13′	90°16′
91°26′	358°13′	0°16′
181°26′	358°13′	90°16′

6. Перевести поляризатор в положение $P_3 = P_2 \pm 90^\circ$.

7. Вращением анализатора и компенсатора получить минимум света, зафиксировав при этом углы A_3 и C_3 .

8. Повторить пункты 4÷7, каждый раз фиксируя значения азимутов углов P_n, A_n, C_n до тех пор, пока значения этих углов не будут отличаться от значений $P_{n-2}, A_{n-2}, C_{n-1}$ более, чем на цену деления угломерного устройства.

9. Установить угол падения, равный углу Брюстера для материала юстировочной пластины.

10. Установить на лимбах поляризатора и компенсатора значения P_n и C_n . Если гашение света наблюдается при любом положении анализатора, то $P_0 = P_n, C_0 = C_n, A_0 = A_n \pm 90^\circ$. Если гашение света наблюдается при определенном положении анализатора A_n , то $P_0 = P_{n-1} \pm 90^\circ, C_0 = C_n, A_0 = A_n$.

В результате имеем: $P_0 = 181^\circ 26'$ или $1^\circ 26', A_0 = 0^\circ 16', C_0 = 358^\circ 13'$.

В положении C_0 оптическая ось компенсатора (быстрая или медленная) лежит в плоскости падения. Для проведения измерений необходимо установить компенсатор в положение быстрой оси $\pm 45^\circ$ по отношению к плоскости падения, выяснив предварительно ее ориентацию по отношению к плоскости падения.

Для этого установить угол падения 70° , на столик эллипсометра положить свежую кремниевую шайбу. Применительно к ЛЭФ-3М установить $P = P_0 + 45^\circ$, $C = C_0$.

Если в положении гашения $A - A_0$ лежит между 0 и -45° , то в плоскости падения находится быстрая ось; если $A - A_0$ находится между 0 и $+45^\circ$, то в плоскости падения находится медленная ось.

В результате такой юстировки A_0 и P_0 соответствуют таким положениям на лимбах, когда плоскости пропускания поляризационных призм совпадают с плоскостью падения. После определения азимута быстрой оси и поворота компенсатора на $+45^\circ$ или -45° можно пользоваться общеупотребительными формулами для точного и однозначного вычисления эллипсометрических параметров.

В соответствии с международными правилами отсчет углов на лимбах эллипсометра производится по правилу винта. В эллипсометре ЛЭФ-3М на лимбе поляризатора это направление обратное по отношению к принятому.

Для проверки юстировки в просветленном состоянии установить по лимбам $P = P_0 + 45^\circ$; $A = A_0 + 45^\circ$. Должно быть гашение. Добиться наиболее глубокого гашения покачиванием P и A . Если отклонения от указанных азимутов не более $1'$, можно считать, что юстировка сохранилась. Компенсатор в рабочем положении.

Приложение 4.

Краткий типовой технологический процесс нанесения металлических покрытий

1. Характеристика и технические требования

1.1. На оптические детали из К-8 наносятся однослойные металлические покрытия с остаточным коэффициентом пропускания $\approx 5\%$.

1.2. Чистота полированной поверхности детали (подложки), на которую наносят покрытие, по ГОСТ 11141-76.

1.3. По механической прочности покрытия, нанесенные на оптические детали, следует относить к 1 группе по ОСТ 3-1901-85.

1.4. Покрытия, нанесенные на оптические детали, должны выдерживать перепад температур от $18 \div 60$ °С.

1.5. Покрытия, нанесенные на оптические детали, должны быть устойчивы к влажной атмосфере при температуре 30 ± 2 °С и относительной влажности $75 \div 80$ %.

2. Оборудование и материалы

2.1. Нанесение покрытий производят в помещениях, удовлетворяющих требованиям РТМ 3-677-75.

2.2. Нанесение покрытий осуществляют в вакуумной установке, обеспечивающей давление в рабочей камере в процессе испарения не более $0,8 \div 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па.

2.3. Рекомендуются вакуумные установки типа ВУ-1А (или ВУ-1), оборудованные металлическими камерами, фотометрическим контролем толщин слоев или резонансным контролем по массе, электронно-лучевыми испарителями, снабженные ионными источниками и нагревателями.

2.4. Материалы, применяемые для проведения технологического процесса, приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Наименование материала	Назначение
Дистиллированная вода	Для чистки деталей
Специальные моющие растворы	Для чистки деталей
Спирт этиловый ректификованный технический, высший сорт	Для чистки арматуры
Вата хлопчатобумажная для оптической промышленности	Для чистки деталей
Салфетки хлопчатобумажные обезжиренные	Для чистки арматуры

3. Технологический процесс

3.1. Технологический процесс нанесения металлических покрытий в вакууме должен состоять из следующих операций: а) подготовка оборудования и деталей; б) нанесения покрытия и контроля.

3.2. Подготовка оборудования и деталей

3.2.1. Подготовку вакуумной аппаратуры производят по РТМ 3-529-74. Поверхности экранов арматуры очищают от загрязнений пленкообразующими веществами механическим способом. Очистку тигля электронно-лучевого испарителя производят после каждого процесса испарения механическим способом с последующей промывкой этиловым ректифицированным спиртом.

3.2.2. В качестве исходных веществ используют: “таблетки” металлов изготовленные для оптических целей или заранее спеченные электроннолучевым методом в высоком вакууме слитки из порошков или гранул необходимых металлов.

3.2.3. Перед тем как поместить детали в вакуумную камеру, их чистят, отдельные пылинки удаляются сухим сжатым воздухом или беличьей кисточкой. Рекомендуются использование газа “fis micro duster” фирмы Fiber Instrument Sales Inc (1,1,1,2,-Tetrafluoroethane).

3.2.5. Вычищенные детали крепят на держателе в вакуумной камере.

3.3. Нанесение покрытий и контроль

3.3.1. Вакуумную камеру откачивают до давления $4 \div 6$ Па.

3.3.2. Включают привод вращения деталей.

3.3.3. Производят ионную очистку подложек ($I_{\text{ион}}=50 \div 75$ мА, $U_{\text{уск}}=2,2$ кВ, $S_{\text{ион}}=120$ см², время обработки 10 минут).

3.3.4. Вакуумную камеру откачивают до давления $0,8 \div 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па.

3.3.5. Под экраном производят дегазацию испаряемых веществ так, чтобы давление при испарении не превышало $0,8 \div 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па.

3.3.6. После дегазации веществ открывают экран и производят испарение металла, не допуская разбрызгивания испаряемого вещества, до требуемого коэффициента пропускания.

Режим работы испарителей для каждого вещества (металла) подбирают экспериментально.

3.3.7. После окончания процесса испарения выключают вакуумную установку в установленном порядке; напуск воздуха в камеру производят не ранее, чем через 1 час после окончания испарения.

4. Методы контроля

4.1. Контроль чистоты поверхности деталей с нанесенными покрытиями производят визуально по ГОСТ 11141-76.

4.2. Контроль спектрального коэффициента пропускания деталей с нанесенным покрытием производят на спектрофотометрах СФ-26, СФ-46 или на других приборах, обеспечивающих необходимую точность измерения. При необходимости коэффициент отражения измеряют на

контрольных образцах – клиньях. Рефлексометр должен обеспечивать погрешность измерения не более $\pm 0,1$ %.

4.3. Контроль механической прочности производят по ОСТ 3-1901-85.

4.4. Испытания на лучевую прочность производят по методике описанной в А.С. СССР №1370531 от 01.10.87.

4.5. Испытание на влагоустойчивость производят при необходимости по ОСТ 3-1901-85, время выдержки в камере влажности не менее 10 суток.

Приложение 5.

Оптические характеристики тонких пленок металлов.

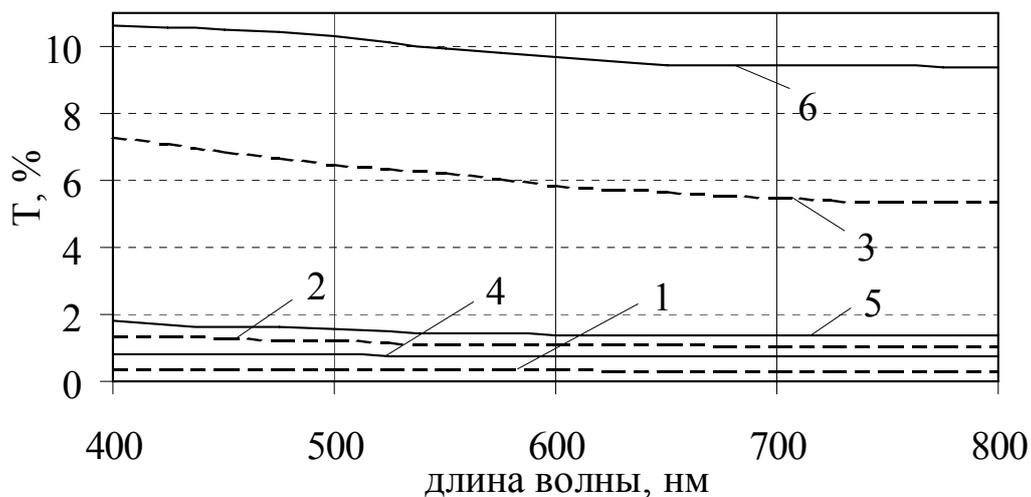


Рис. 1. Спектральные характеристики коэффициента пропускания пленок никеля.

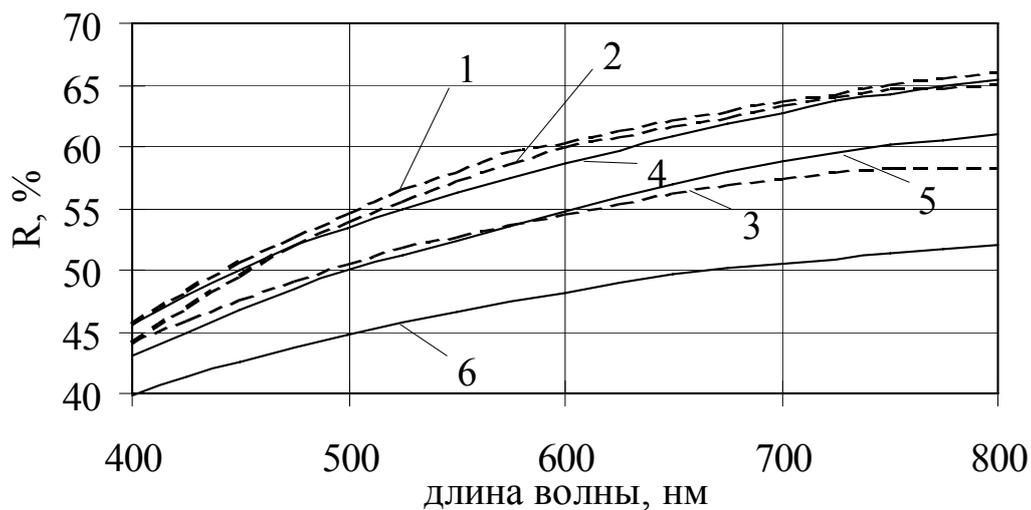


Рис. 2. Спектральные характеристики коэффициента отражения пленок никеля.

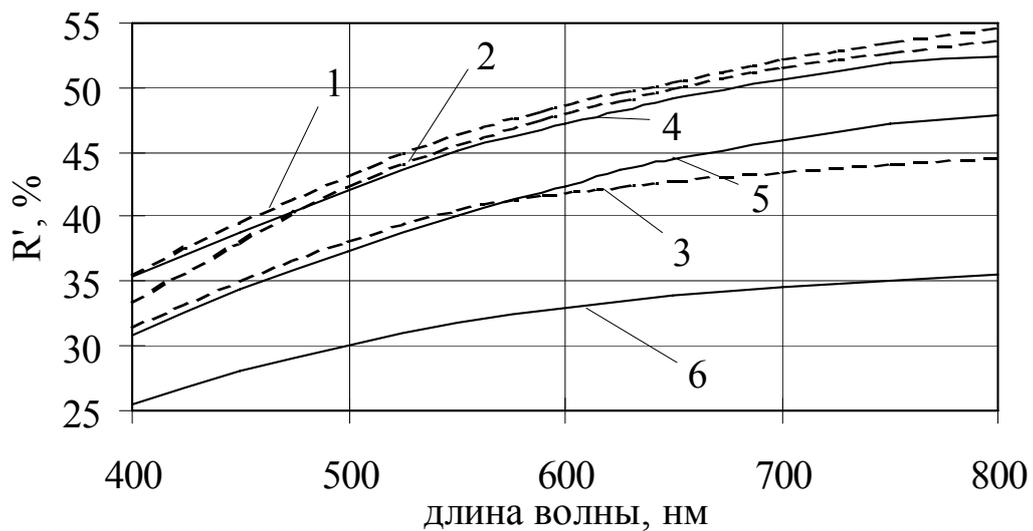


Рис. 3. Спектральные характеристики коэффициента обратного отражения пленок никеля.

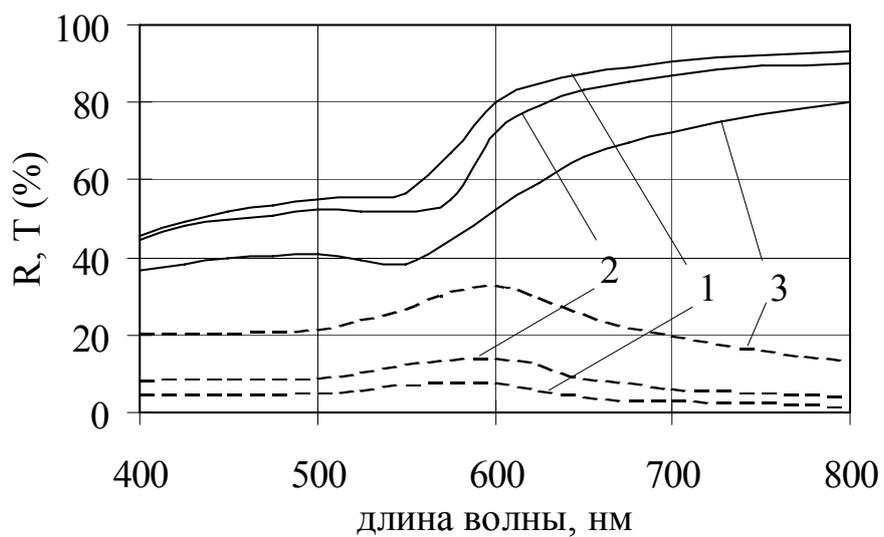


Рис. 4. Спектральные характеристики коэффициентов отражения и пропускания пленок меди.

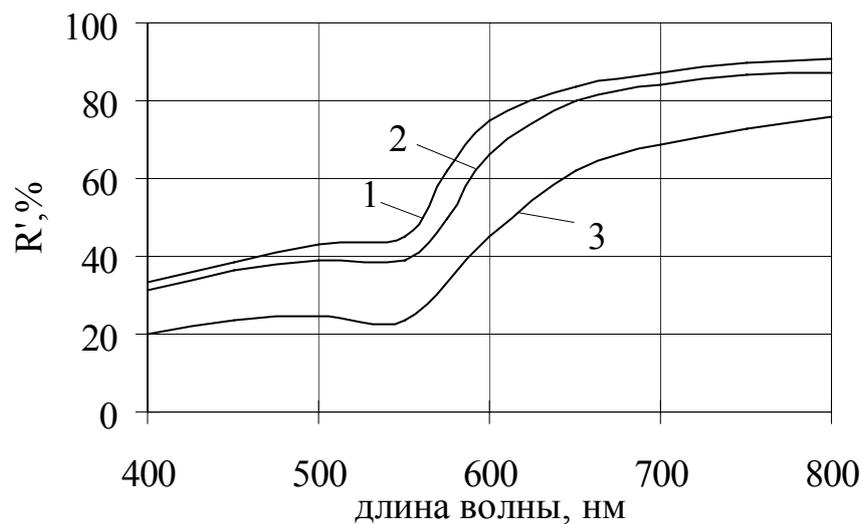


Рис. 5. Спектральные характеристики коэффициента обратного отражения пленок меди.

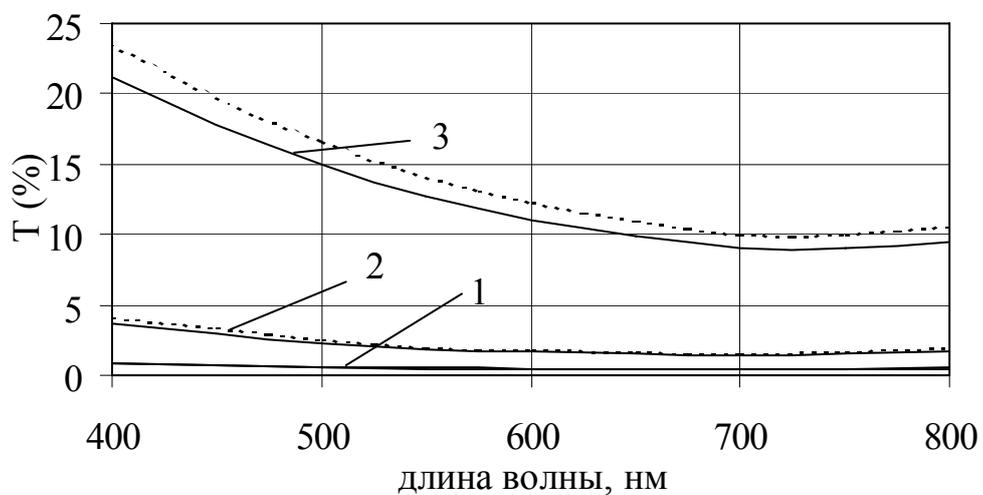


Рис. 6. Спектральные характеристики коэффициента пропускания пленок алюминия после напыления (сплошные линии) и через месяц (пунктирные).

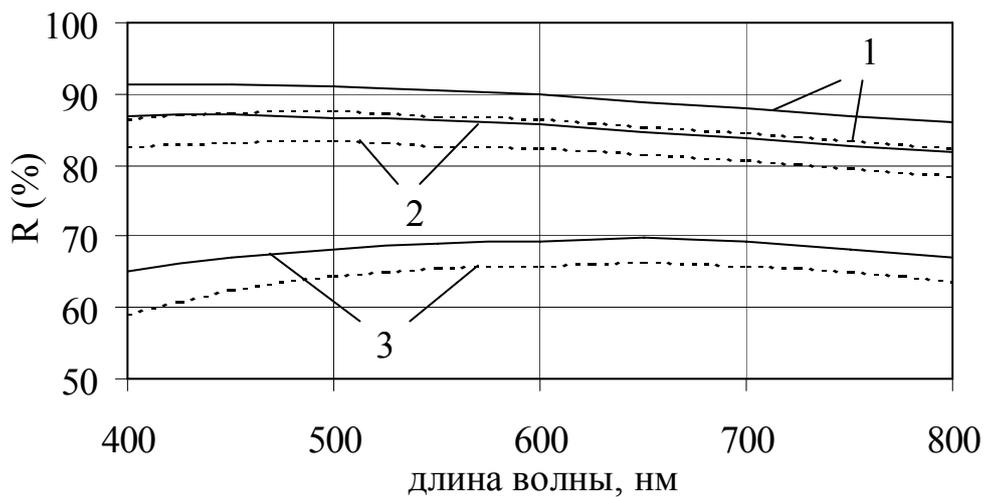


Рис. 7. Спектральные характеристики коэффициента отражения пленок алюминия после напыления (сплошные линии) и через месяц (пунктирные).

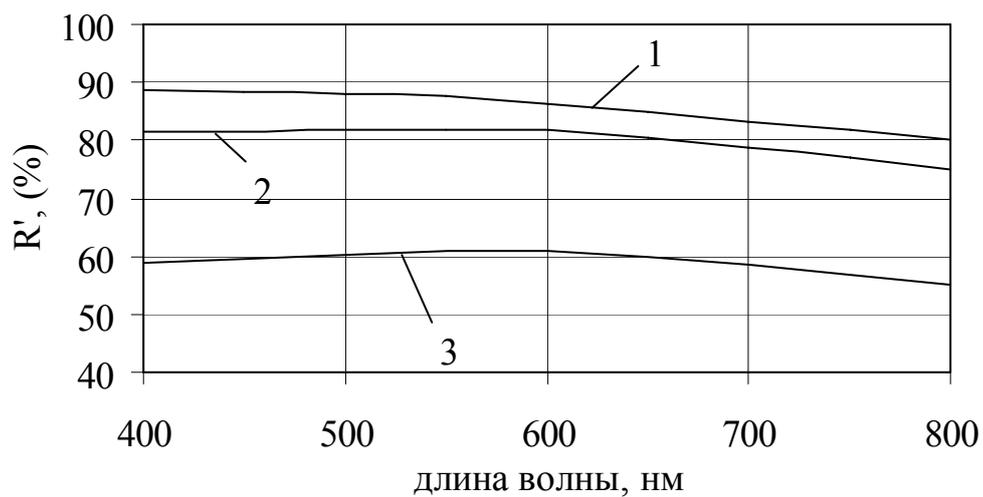


Рис. 8. Спектральные характеристики коэффициента обратного отражения пленок алюминия.

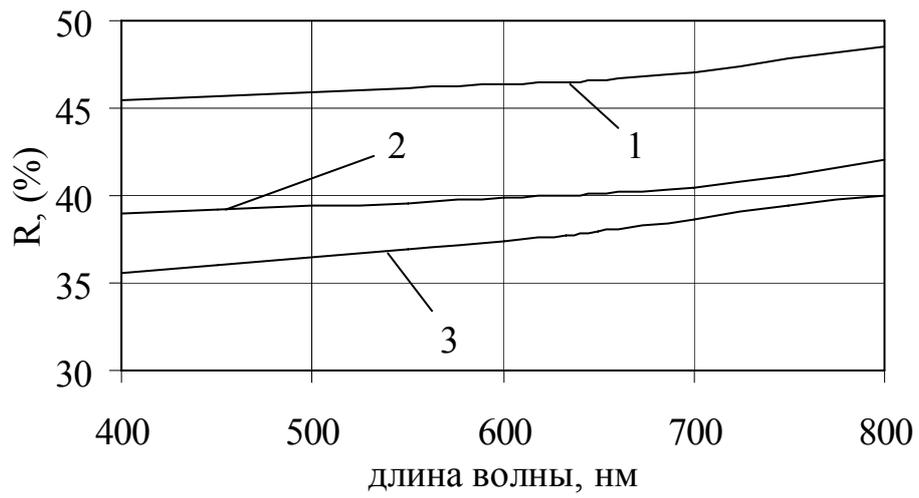


Рис. 9. Спектральные характеристики коэффициента отражения пленок хрома.

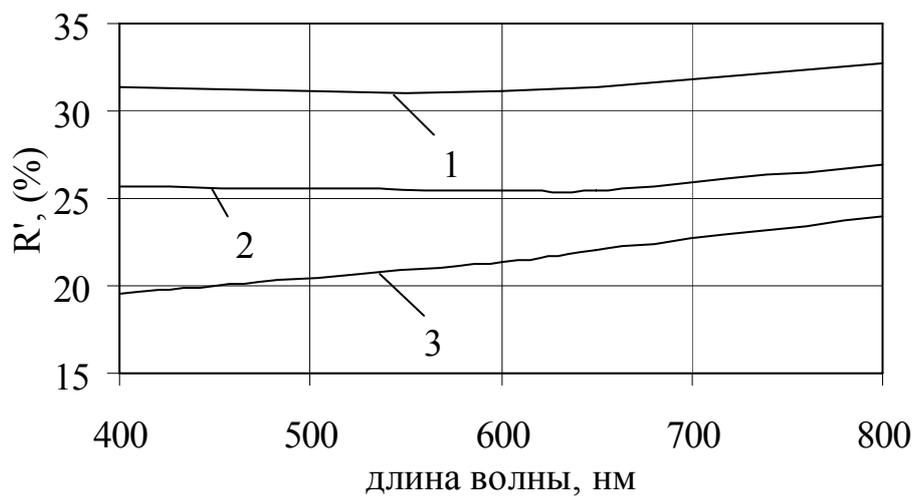


Рис. 10. Спектральные характеристики коэффициента обратного отражения пленок хрома.

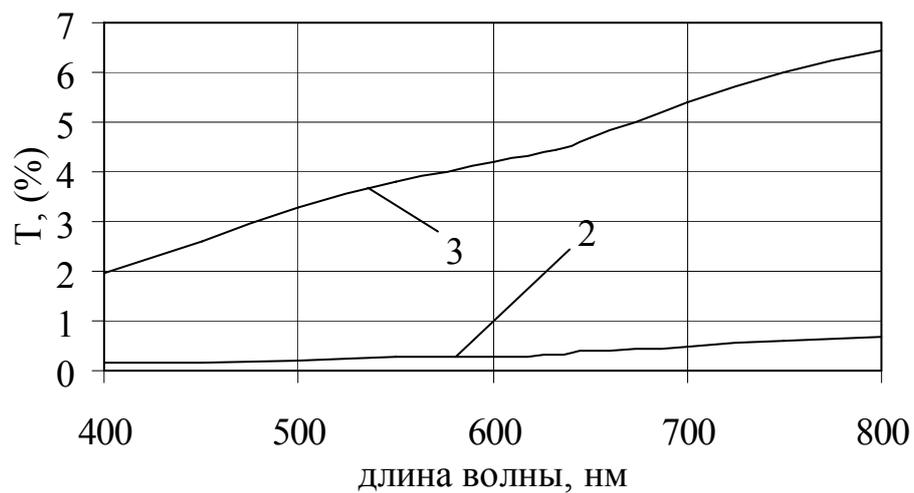


Рис. 11. Спектральные характеристики коэффициента пропускания пленок хрома.

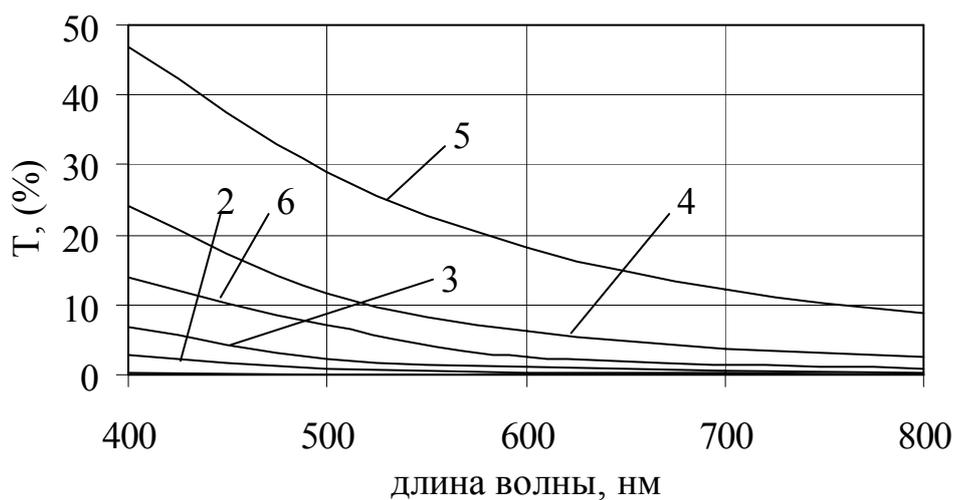


Рис. 12. Спектральные характеристики коэффициента пропускания пленок серебра.

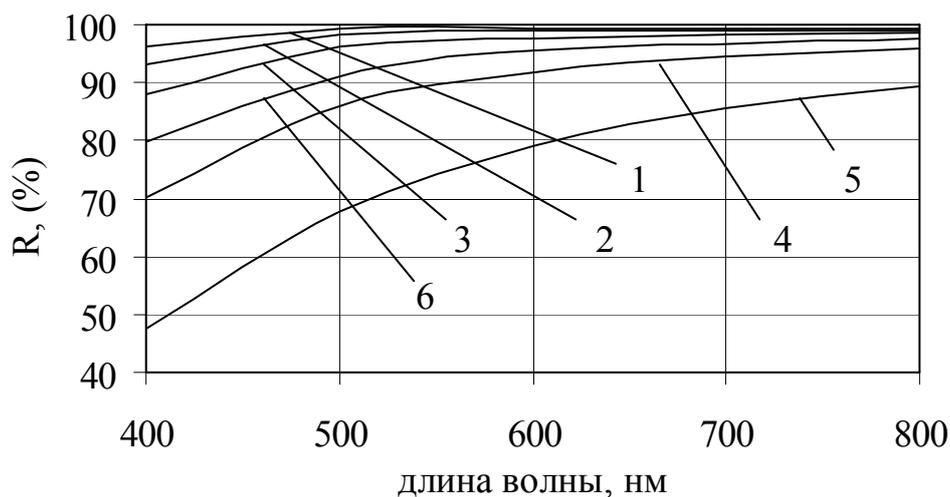


Рис. 13. Спектральные характеристики коэффициента отражения пленок серебра.

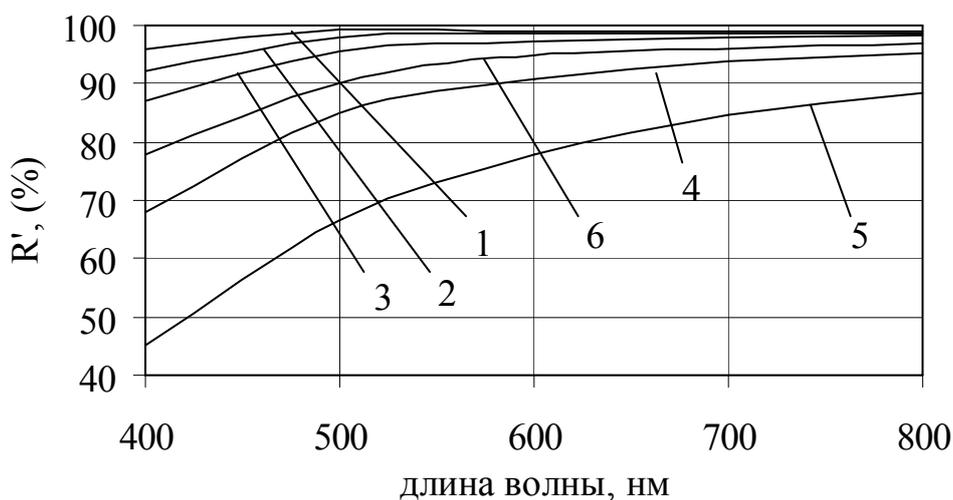


Рис. 14. Спектральные характеристики коэффициента обратного отражения пленок серебра.

Таблица 1.

Образец	Ni 1		Ni 2		Ni 3	
	Ψ	Δ	Ψ	Δ	Ψ	Δ
Угол падения, θ_0						
50°	38°40'	155°13'	38°39'	156°04'	36°47'	160°38'
52°	38°04'	152°40'	38°06'	153°37'	35°58'	158°34'
54°	37°26'	149°52'	37°30'	150°52'	35°11'	156°12'
56°	36°49'	146°47'	36°51'	147°56'	34°21'	153°32'
58°	36°11'	143°25'	36°08'	144°41'	33°27'	150°37'
60°	35°29'	139°40'	35°25'	141°00'	32°25'	147°22'

Таблица 2.

Образец	Ni 4		Ni 5		Ni 6	
	Ψ	Δ	Ψ	Δ	Ψ	Δ
Угол падения, θ_0						
50°	38°38'	155°43'	38°12'	157°21'	37°52'	160°05'
55°	37°25'	148°57'	36°26'	150°52'	35°53'	154°01'
60°	35°41'	140°27'	34°31'	142°44'	33°57'	146°52'
65°	33°57'	129°17'	32°30'	131°58'	31°28'	136°48'
70°	32°16'	114°11'	30°18'	116°56'	28°47'	122°17'

Таблица 3.

Образец	Ni 1		Ni 2		Ni 3		Ni 4		Ni 5		Ni 6	
	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
длина волны, нм												
400	1,30	2,06	1,52	2,10	1,54	2,08	1,50	2,20	1,72	2,10	2,05	2,02
450	1,46	2,40	1,63	2,41	1,59	2,40	1,56	2,40	1,86	2,32	2,14	2,31
500	1,55	2,63	1,68	2,70	1,73	2,70	1,63	2,60	2,00	2,55	2,33	2,42
550	1,63	2,91	1,72	2,91	1,84	2,90	1,74	2,90	2,12	2,81	2,38	2,62
600	1,72	3,11	1,83	3,17	2,00	3,02	1,76	3,00	2,15	2,94	2,34	2,94
632,8	1,80	3,18	1,88	3,22	2,04	3,22	1,82	3,23	2,15	3,15	2,30	3,15
650	1,80	3,30	1,90	3,34	2,10	3,23	1,83	3,23	2,30	3,15	2,36	3,14
700	1,83	3,46	1,90	3,49	2,14	3,42	1,91	3,39	2,48	3,23	2,40	3,30
750	1,85	3,58	1,88	3,58	2,19	3,56	1,99	3,59	2,54	3,49	2,42	3,46
800	1,98	3,76	1,99	3,76	2,2	3,69	2,12	3,68	2,65	3,58	2,6	3,58
толщина, нм	87,7		66,9		40,7		74,3		64,7		29,8	
скорость осаждения, нм/с	0,0974		0,0743		0,0452		0,0495		0,0431		0,0199	
угол поступления паров	4,9°		27,1°		43,1°		11,6°		31,6°		45,7°	

Таблица 4.

Образец	Cu 1		Cu 2		Cu 3	
	Ψ	Δ	Ψ	Δ	Ψ	Δ
Угол падения, θ_0						
50°	43°20'	149°34'	42°39'	149°30'	39°53'	148°05'
55°	43°01'	141°39'	42°11'	141°35'	38°51'	139°38'
60°	42°40'	131°59'	41°40'	131°54'	37°51'	129°17'
65°	42°19'	120°06'	41°11'	119°54'	36°54'	116°25'
70°	42°02'	105°09'	40°45'	104°51'	36°40'	100°19'

Таблица 5.

Образец	Cu 4		Cu 5		Cu 6		Cu 7	
	Ψ	Δ	Ψ	Δ	Ψ	Δ	Ψ	Δ
Угол падения, θ_0								
50°	43°16'	146°16'	43°52'	148°45'	43°10'	149°49'	43°04'	150°11'
55°	42°56'	137°42'	43°37'	140°42'	42°47'	141°58'	42°39'	142°24'
60°	42°36'	127°23'	43°22'	130°57'	42°22'	132°25'	42°13'	132°56'
65°	42°16'	114°51'	43°07'	118°58'	41°58'	120°36'	41°46'	121°12'
70°	42°02'	99°28'	42°56'	103°59'	41°38'	105°43'	41°24'	106°23'
толщина, нм	112,3		173,6		63,5		50,5	
скорость осаждения, нм/с	0,622		17,36		2,12		5,05	
угол поступления паров	1,91°		1,91°		1,91°		2°	
n	0,34		0,26		0,36		0,40	
k	2,88		3,16		3,25		3,29	

Таблица 6.

Образец	Cu 1		Cu 2		Cu 3	
	n	k	n	k	n	k
длина волны, нм						
400	1,42	2,06	1,14	1,94	1,94	1,26
450	1,28	2,3	1,11	2,15	1,15	2,07
500	1,18	2,48	1,08	2,34	1,11	2,23
550	0,99	2,47	0,94	2,34	0,98	2,19
600	0,27	2,92	0,30	2,72	0,30	2,59
632,8	0,20	3,27	0,27	3,25	0,35	3,03
650	0,26	3,48	0,21	3,29	0,20	3,14
700	0,26	3,96	0,21	3,75	0,21	3,59
750	0,23	4,40	0,23	4,16	0,22	3,97
800	0,32	4,92	0,28	4,54	0,24	4,37
толщина, нм	50,6		44,7		30,5	
скорость осаждения, нм/с	0,281		0,248		0,169	
Угол поступления паров	1,91°		26,56°		44,03°	

Таблица 7.

Образец	Al 1		Al 2		Al 3	
	n	k	n	K	n	k
длина волны, нм						
400	0,32	3,78	0,29	3,28	0,22	2,19
450	0,38	4,18	0,35	3,50	0,29	2,56
500	0,51	4,84	0,46	3,69	0,35	2,87
550	0,62	5,16	0,53	3,85	0,43	3,05
600	0,85	5,56	0,59	4,00	0,52	3,24
650	1,08	5,96	0,72	4,25	0,65	3,35
700	1,26	6,16	0,88	4,56	0,76	3,58
750	1,55	6,45	0,99	4,67	0,88	3,8
800	1,93	6,88	1,1	4,82	1,04	4,15
толщина, нм	72,1		62,4		34,2	
скорость осаждения, нм/с	0,08		0,07		0,037	
Угол поступления паров	11,6°		31,6°		45,7°	

Таблица 8.

Образец	Cr 1		Cr 2		Cr 3	
	Ψ	Δ	Ψ	Δ	Ψ	Δ
Угол падения, θ ₀						
50°	35°19'	161°28'	33°24'	162°44'	32°47'	164°42'
52°	34°23'	159°24'	32°18'	160°44'	31°36'	162°55'
54°	33°25'	157°08'	31°07'	158°31'	30°21'	160°53'
56°	32°22'	154°32'	29°51'	155°54'	29°02'	158°30'
58°	31°15'	151°37'	28°31'	153°00'	27°36'	155°48'
60°	30°03'	148°19'	27°07'	149°37'	26°03'	152°38'
толщина, нм	241,6		132,3		77,9	
n	2,93		3,00		3,35	
k	2,54		2,00		1,71	
скорость осаждения, нм/с	0,20		0,11		0,07	
Угол поступления паров	11,6°		31,6°		45,7°	

Таблица 9.

Образец	Ag 1		Ag 2		Ag 3	
	Ψ	Δ	Ψ	Δ	Ψ	Δ
Угол падения, θ_0						
50°	44°56'	155°20'	44°53'	155°22'	44°46'	155°31'
52°	44°56'	152°52'	44°53'	152°55'	44°45'	152°04'
54°	44°55'	150°11'	44°52'	150°15'	44°44'	150°24'
56°	44°55'	147°18'	44°51'	147°19'	44°43'	147°33'
58°	44°54'	144°07'	44°50'	144°11'	44°41'	144°23'
60°	44°53'	140°40'	44°48'	140°45'	44°39'	140°55'
толщина, нм	114,2		79,4		62,4	
скорость осаждения, нм/с	0,20		0,066		0,052	
Угол поступления паров	4,9°		16,3°		27,1°	

Таблица 10.

Образец	Ag 4		Ag 5		Угол падения, θ_0	Ag 6	
	Ψ	Δ	Ψ	Δ		Ψ	Δ
Угол падения, θ_0							
50°	44°09'	155°00'	42°37'	153°24'	50°	44°38'	155°11'
52°	44°05'	152°31'	42°28'	150°46'	55°	44°32'	148°35'
54°	44°00'	149°48'	42°16'	147°50'	60°	44°28'	140°26'
56°	43°55'	146°50'	42°04'	144°44'	65°	44°21'	130°06'
58°	43°50'	143°39'	41°51'	141°19'	70°	44°16'	116°38'
60°	43°46'	140°09'	41°36'	137°36'			
толщина, нм	39,3		26,4			56,1	
скорость осаждения, нм/с	0,033		0,022			0,076	
угол поступления паров	35,4°		43,1°			26,6°	

Таблица 11.

Образец	Ag 1		Ag 2		Ag 3		Ag 4		Ag 5		Ag 6	
	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
400	0,037	1,86	0,046	1,87	0,059	1,91	0,075	1,93	0,084	1,90	0,076	1,86
450	0,017	2,35	0,026	2,36	0,039	2,40	0,055	2,42	0,064	2,39	0,056	2,35
500	0,012	2,80	0,021	2,81	0,034	2,85	0,050	2,87	0,059	2,84	0,051	2,80
550	0,017	3,25	0,026	3,26	0,039	3,30	0,055	3,32	0,064	3,29	0,056	3,25
600	0,022	3,68	0,031	3,69	0,044	3,73	0,060	3,75	0,069	3,72	0,061	3,68
632,8	0,026	4,11	0,035	4,12	0,048	4,16	0,064	4,18	0,073	4,15	0,065	4,11
650	0,029	4,13	0,038	4,14	0,051	4,18	0,067	4,20	0,076	4,17	0,068	4,13
700	0,036	4,55	0,045	4,56	0,058	4,60	0,074	4,62	0,083	4,59	0,075	4,55
750	0,042	4,98	0,051	4,99	0,064	5,03	0,080	5,05	0,089	5,02	0,081	4,98
800	0,052	5,38	0,061	5,39	0,074	5,43	0,090	5,45	0,099	5,42	0,091	5,38

Приложение 6.

Температура испарения и скорость осаждения

МЕТАЛЛОВ

Наименование материала	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Давление паров при температуре плавления, мм рт. ст.	Температура испарения (при давлении паров 10^{-2} мм рт. ст.), °С	Скорость испарения, 10^{-4} г/см ² ·сек
Алюминий	660	2060	$1,2 \cdot 10^{-6}$	996	0,85
Барий	717	1540	$7,6 \cdot 10^{-2}$	629	2,3
Бериллий	1284	2970	$1,95 \cdot 10^{-2}$	1246	0,45
Бор	2300	2550	—	1365	4,75
Ванадий	1697	3527	—	1888	—
Висмут	271	1560	$1,2 \cdot 10^{-10}$	698	2,7
Вольфрам	3382	5900	$1,7 \cdot 10^{-2}$	3309	1,45
Галлий	30	2050	0	1093	1,32
Германий	959	2700	$4,5 \cdot 10^{-5}$	1251	1,27
Железо	1535	2740	$3,7 \cdot 10^{-2}$	1447	1,02
Золото	1063	2960	$6 \cdot 10^{-6}$	1465	1,95
Индий	157	—	—	952	—
Иридий	2454	3527	—	2556	—
Итрий	1477	3227	—	1649	—
Кадмий	321	765	10^{-5}	264*	2,65
Калий	63,6	765	$9,8 \cdot 10^{-7}$	207	1,67
Кальций	810	1440	$8,7 \cdot 10^{-5}$	605	1,25
Кобальт	1478	3000	$0,8 \cdot 10^{-3}$	1649	1,02
Кремний	1414	2360	$3,2 \cdot 10^{-2}$	1342	0,77
Лантан	885	2727	—	1381	—
Литий	179	1367	—	514	—
Магний	651	1110	$2,2 \cdot 10^{-6}$	443*	1,08
Марганец	1244	2100	$9,0 \cdot 10^{-5}$	980	1,22
Медь	1083	2590	$3,0 \cdot 10^{-4}$	1273	1,18
Молибден	2622	4750	$2,2 \cdot 10^{-2}$	2533	1,05
Мышьяк	616	—	—	280	—
Натрий	97,7	885	$8,0 \cdot 10^{-8}$	282	1,18
Никель	1455	2730	$4,4 \cdot 10^{-3}$	1510	1,06
Ниобий	1950	—	—	2700	—
Олово	232	2400	0	1189	1,65
Осмий	2700	4600	—	2667	—
Палладий	1555	4000	$8,7 \cdot 10^{-3}$	1566	1,4
Платина	1774	4400	$1,6 \cdot 10^{-4}$	2090	1,68
Родий	1967	3877	—	2149	—
Ртуть	-38,8	357	$2,5 \cdot 10^{-6}$	48	4,6
Рубидий	39	679	—	165	—
Рутений	2500	4227	—	2430	—

Наименование материала	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Давление паров при температуре плавления, мм рт. ст.	Температура испарения (при давлении паров 10 ⁻² мм рт. ст.), °С	Скорость испарения, 10 ⁻⁴ г/см ² ·сек
Свинец	328	1740	5,4·10 ⁻⁸	718	2,65
Селен	217	680	—	234	—
Серебро	961	2210	1,8·10 ⁻³	1047	1,67
Стронций	771	1384	—	549	—
Сурьма	630	1635	2,8·10 ⁻³	678	2,95
Таллий	304	1650	—	606	—
Тантал	2996	5300	5,6·10 ⁻²	3070	1,35
Теллур	452	1390	—	~670	—
Титан	1727	3300	8,4·10 ⁻²	1546	0,95
Торий	1827	3000	—	2196	—
Углерод	3700±100	3500	—	2681	0,37
Уран	1132	3527	—	1898	—
Хром	1900	2200	6,4·10 ⁻⁷	1205	1,1
Цезий	29	670	1,5·10 ⁻⁶	153	3,18
Церий	785	—	—	1305	—
Цинк	419	900	1,6·10 ⁻⁵	343*	1,9
Цирконий	2127	5000	4,1·10 ⁻²	2001	1,52

* — сублимация

Данилин Б.С. Вакуумное нанесение тонких пленок. Изд-во “Энергия”, 1967

Приложение 7.

Расчет оптических постоянных керметных пленок

Экспериментально замечено, что при нанесении металлических слоев с низкой скоростью испарения наблюдаются экстремумы пропускания (рис. 1) на меди, алюминии, хrome, серебре, но анализ показывает, что они вызваны не интерференционными явлениями во время увеличения оптической толщины слоя, а являются следствием изменения состава и структуры покрытия. [86, 87] Это можно рассмотреть, как увеличение количества и размеров островков металла.

Оптические постоянные керметных пленок могут быть определены с помощью модельного представления Гарнетта для среды содержащей в единице объема N хаотически распределенных сфер металла, радиус которых значительно меньше длины волны возбуждающего излучения. [88, 89] Исходя из такой модели комплексный показатель преломления смеси $\tilde{n}_{см}$ имеет следующий вид:

$$\frac{\tilde{n}_{см}^2 - 1}{\tilde{n}_{см}^2 + 2} = (1 - C) \frac{n_d^2 - 1}{n_d^2 + 2} + C \frac{\tilde{n}_m^2 - 1}{\tilde{n}_m^2 + 2}$$

где $\tilde{n}_{см} = n_{см} - ik_{см}$, $\tilde{n}_m = n_m - ik_m$;

$n_{см}$ – показатель преломления смеси; $k_{см}$ – главный показатель поглощения смеси; n_d – показатель преломления диэлектрика; n_m – показатель преломления металла; k_m – главный показатель поглощения металла; C – концентрация металла в смеси.

Из этого уравнения следуют следующие зависимости главного показателя поглощения смеси и показателя преломления смеси от оптических постоянных металла и диэлектрика:

$$k_{см} = \frac{3b}{\sqrt{2(d^2 + b^2) \left(\sqrt{9b^2 + (2b^2 + 2d^2 + 3d)^2} - (2b^2 + 2d^2 + 3d) \right)}},$$

$$n_{см} = \sqrt{\frac{\sqrt{9b^2 + (2b^2 + 2d^2 + 3d)^2} - (2b^2 + 2d^2 + 3d)}{2(b^2 + d^2)}},$$

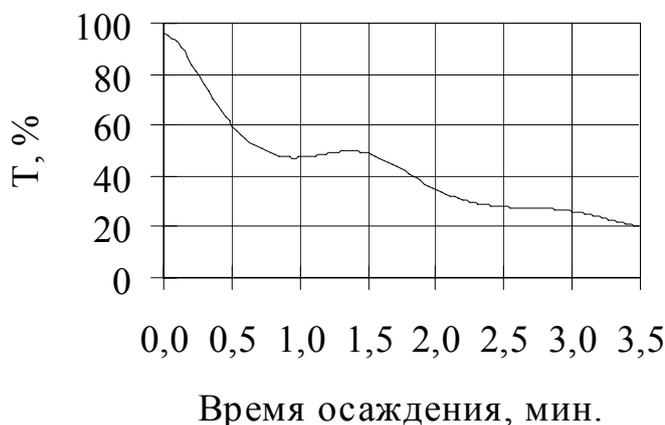


Рис. 1. Изменение коэффициента пропускания во время осаждения слоя меди ($\lambda=620$ нм).

где $d = a - 1$

$$a = (1 - C) \frac{n_d^2 - 1}{n_d^2 + 2} + C \frac{(n_M^2 - k_M^2 - 1)(n_M^2 - k_M^2 + 2) + 4n_M^2 k_M^2}{(n_M^2 - k_M^2 + 2)^2 + 4n_M^2 k_M^2},$$

$$b = C \frac{6n_M k_M}{(n_M^2 - k_M^2 + 2)^2 + 4n_M^2 k_M^2}.$$

На рисунке 2 приведены расчетные зависимости показателя преломления и главного показателя поглощения керметной пленки меди по мере увеличения концентрации.

Из рисунка 2 видно, что при увеличении концентрации металла кривые показателя преломления и главного показателя поглощения имеют ярко выраженные экстремумы. Причем экстремум показателя преломления наступает пока еще у смеси относительно низкое поглощение, что и объясняет наличие экстремумов в процессе осаждения слоя.

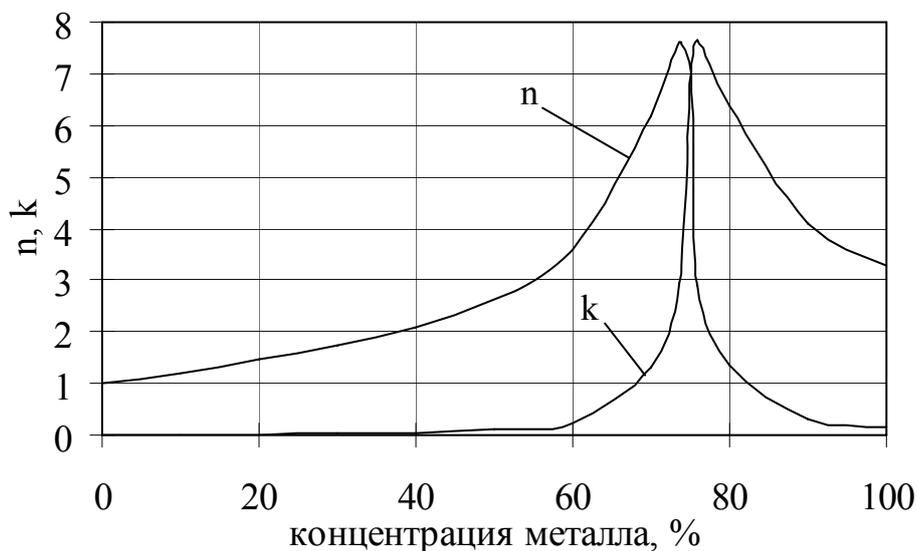


Рис. 2. Зависимость показателя преломления и главного показателя поглощения смеси от концентрации меди.

Приложение 8.

Проведение измерений на ЛЭФ-3М с приставкой автоматического определения эллипсометрических параметров исследуемых покрытий.

1. Включить в сеть лабораторную установку.
2. Включить гелий-неоновый лазер.
3. Включить ПК.
4. Создать папку для сохранения базы данных проведенных экспериментов.
5. Скопировать в эту папку основной дистрибутив программы edipfull.exe, состоящий из основных файлов: measure.cp, stem.exe, edipfull.exe, ediphelp.hlp.
6. Запустить программу stem.exe, которая создает архив базы измерений.
7. Запустить edipfull.exe.
8. Найти в меню «Настройка» пункт «Пределы»; ввести значения величин в таблицу. После чего, программа готова к серии экспериментов.
9. Включить блок питания прибора ЛЭФ – 3М.
10. Включить окна подсветки шкал анализатора, поляризатора, компенсатора, а также угла между плечами (угол падения пучка света на образец вдвое меньше – 180 градусов).
11. Выставить плечи эллипсометра на просвет.
12. Повернуть переключатель в положение «ПВ» для визуального наблюдения блика.
13. Включить в меню «Настройка» пункт «Калибровка»; будет слышен запуск двигателя модулятора, дождаться равномерного вращения. Убедиться в наличии блика в перекрестии.
14. Переключатель в положение «ПН», контролируются углы анализатора, поляризатора, компенсатора, указанные в программе. Подождать примерно 10 секунд. Если калибровка прошла успешно, то приступаем к дальнейшему выполнению инструкции.
15. Заходим в пункт меню «Все эксперименты», выбираем в пункте «Добавить» «Новое название групп экспериментов» и создаем папку.
16. Установить исследованный образец на рабочий столик прибора.
17. Кнопкой F5 выбираем в пункте меню «Добавить» «Номер образца», а кнопкой F3 - «Обороты»; находим в меню «Угол падения» и вводим его.

18. Повернуть плечи в положение «ПВ», убедиться в наличии блика в перекрестии, переключить ручку в положение «ПН».
19. Выбрать в пункте меню «Измерить». Провести серию из 3 – 4 измерений, которые отображаются на экране.
20. Нажатием кнопки Esc – остановка измерений; Ctrl + Enter – выход из измерения.
21. Установить следующий угол между плечами, произвести измерения в соответствии с пунктами 17 – 19.
22. В меню программы находим пункт «Записать».
23. Либо выходим из программы и отключаем прибор, либо устанавливаем новый образец.

Приложение 9.

Пример программ для определения оптических постоянных слоя по спектрофотометрическим измерениям.

PR1

```
0  SCREEN 0, 1: COLOR 7, 1, 1: CLS
   n0 = 1: l = 650: PI = 3.141592653589793#
   nj1 = 1.52: nj2 = 1.78
   dRn1% = 0: dTn1% = 0: dRn2% = 0
   oRn1% = 3000: oTn1% = 3000: oRn2% = 3000
   LOCATE 21, 10: INPUT "начать создание массива"; yy
   IF yy = -1 THEN GOTO 16
   COLOR 14, 2, 2: LOCATE 19, 20: PRINT " ПОДОЖДИТЕ ИДЕТ РАСЧЕТ "
   FOR d = .1 TO 80 STEP .1
   LOCATE 3, 18: PRINT d
   FOR k = 3 TO 3.4 STEP .005
   FOR n = 1.7 TO 2.3 STEP .005
   f1 = 2 * PI * n * d / l
   f2 = 2 * PI * k * d / l
   chb = (EXP(f2) + EXP(-f2)) / 2
   shb = (EXP(f2) - EXP(-f2)) / 2
   a11 = COS(f1) * chb
   b11 = SIN(f1) * shb
   a12 = n * SIN(f1) * chb / (n*n + k*k) + k * COS(f1) * shb / (n*n + k*k)
   b12 = k * SIN(f1) * chb / (n*n + k*k) - n * COS(f1) * shb / (n*n + k*k)
   a21 = n * SIN(f1) * chb - k * COS(f1) * shb
   b21 = -k * SIN(f1) * chb - n * COS(f1) * shb
   r1 = a11 - nj1 * a11 - nj1 * b12 + b21
   r2 = b11 - nj1 * b11 + nj1 * a12 - a21
   r3 = a11 + nj1 * a11 - nj1 * b12 - b21
   r4 = b11 + nj1 * b11 + nj1 * a12 + a21
   Rn1% = 1000 * (r1 * r1 + r2 * r2) / (r3 * r3 + r4 * r4) + 1000
   Tn1% = nj1 * 4000 / (r3 * r3 + r4 * r4) + 1000
   r12 = a11 - nj2 * a11 - nj2 * b12 + b21
   r22 = b11 - nj2 * b11 + nj2 * a12 - a21
   r32 = a11 + nj2 * a11 - nj2 * b12 - b21
   r42 = b11 + nj2 * b11 + nj2 * a12 + a21
   Rn2% = 1000 * (r12 * r12 + r22 * r22) / (r32 * r32 + r42 * r42)
   IF Rn1% >= dRn1% THEN dRn1% = Rn1%
   IF Tn1% >= dTn1% THEN dTn1% = Tn1%
   IF Rn2% >= dRn2% THEN dRn2% = Rn2%
   IF Rn1% <= oRn1% THEN oRn1% = Rn1%
   IF Tn1% <= oTn1% THEN oTn1% = Tn1%
   IF Rn2% <= oRn2% THEN oRn2% = Rn2%
   Rk1$ = STR$(Rn1%)
   Rk2$ = STR$(Rn2%)
   Tk$ = STR$(Tn1%)
   ff$ = RIGHT$(Rk1$, 4) + RIGHT$(Tk$, 4) + "." + RIGHT$(Rk2$, 3)
   OPEN ff$ FOR APPEND AS #1
   PRINT #1, USING "###.### ###.### ###.###"; n; k; d
   CLOSE #1
   NEXT n, k, d
   LOCATE 4, 10: PRINT dRn1%, dTn1%, dRn2%
   LOCATE 5, 10: PRINT oRn1%, oTn1%, oRn2%
   LOCATE 21, 10: INPUT "создание массива окончено"; yy
   IF yy = -1 THEN GOTO 12

16 SCREEN 0, 1: COLOR 7, 1, 1: CLS : ON ERROR GOTO 102
9  LOCATE 21, 10: INPUT " начать переработку"; yy
   IF yy = -1 THEN GOTO 12
5  COLOR 14, 2, 2: LOCATE 19, 20: PRINT " ПОДОЖДИТЕ ИДЕТ РАСЧЕТ "
   FOR Rn1% = oRn1% TO dRn1% STEP 1
   LOCATE 3, 18: PRINT Rn1%
   FOR Rn2% = oRn2% TO dRn2% STEP 1
   FOR Tn1% = oTn1% TO dTn1% STEP 1
   Rk1$ = STR$(Rn1%)
```

```

Rk2$ = STR$(Rn2%)
Tk$ = STR$(Tn1%)
ff$ = RIGHT$(Rk1$, 4) + RIGHT$(Tk$, 4) + "." + RIGHT$(Rk2$, 3)
ff$ = "10461935.127"
OPEN ff$ FOR INPUT AS #1
ns = 0: ks = 0: ds = 0: s = 0: dn = 0: dk = 0: dd = 0
7 INPUT #1, n, k, d
s = s + 1: ns = ns + n: ks = ks + k: ds = ds + d
IF n > dn THEN dn = n
IF k > dk THEN dk = k
IF d > dd THEN dd = d
IF EOF(1) THEN ELSE GOTO 7
CLOSE #1
ns = ns / s: ks = ks / s: ds = ds / s
dn = dn - ns: dk = dk - ks: dd = dd - ds
OPEN ff$ FOR OUTPUT AS #2
PRINT #2, USING "###.### ###.### ###.###"; ns; ks; ds
PRINT #2, USING "###.### ###.### ###.###"; dn; dk; dd
CLOSE #2
11 NEXT Tn1%, Rn2%, Rn1%
12 LOCATE 21, 10: PRINT "переработка закончена"
END

102 IF ERR = 53 THEN LOCATE 21, 25: RESUME 11
IF ERR = 14 AND ERL = 30 THEN LOCATE 21, 25: PRINT "ПОПРОБУЙ ЕЩЕ РАЗ":
o$ = INPUT$(1): RESUME
IF ERR > 0 THEN LOCATE 21, 25: PRINT "ОШИБКА :"; ERR, ERL: o$ =
INPUT$(1): RESUME 0

```

PR2

```

16 SCREEN 0, 1: COLOR 7, 1, 1: CLS : ON ERROR GOTO 102
9 LOCATE 21, 10: INPUT "начать работу"; yy
n1 = 1: k1 = 0: d1 = 0
IF yy = -1 THEN GOTO 12
5 COLOR 14, 2, 2: LOCATE 19, 20: PRINT " ПОДОЖДИТЕ ИДЕТ РАСЧЕТ "
OPEN "2.rt" FOR INPUT AS #4
s! = TIMER
OPEN "7.nkd" FOR OUTPUT AS #2
6 INPUT #4, t1, t2, r1, r2, t
Rn1% = 1000 * r1 + 1000
Tn1% = t1 * 1000 + 1000
Rn2% = 1000 * r2
Tn2% = t2 * 1000 + 1000
Rn1% = Rn1%
Tn1% = Tn1%
Rk1$ = STR$(Rn1%)
Rk2$ = STR$(Rn2%)
Tk$ = STR$(Tn1%)
ff$ = RIGHT$(Rk1$, 4) + RIGHT$(Tk$, 4) + "." + RIGHT$(Rk2$, 3)
OPEN ff$ FOR INPUT AS #1
nmax = 0: kmax = 0: dmax = 0
nmin = 10: kmin = 10: dmin = 10000
7 INPUT #1, n, k, d
IF n > nmax THEN nmax = n
IF k > kmax THEN kmax = k
IF d > dmax THEN dmax = d
IF n <= nmin THEN nmin = n
IF k <= kmin THEN kmin = k
IF d <= dmin THEN dmin = d
IF EOF(1) THEN CLOSE #1 ELSE GOTO 7
ns = (nmax + nmin) / 2: ks = (kmax + kmin) / 2: ds = (dmax + dmin) / 2
dn = (nmax - nmin) / 2: dk = (kmax - kmin) / 2: dd = (dmax - dmin) / 2
IF ABS(ns - n1) > .05 THEN ns = (n1 + ns) / 2
IF ABS(ks - k1) > .05 THEN ks = (k1 + ks) / 2
IF d1 > ds THEN ds = d1: ns = n1: ks = k1
n1 = ns: k1 = ks: d1 = ds

```

```

COLOR 14, 2, 2: LOCATE 10, 20: PRINT USING "###.###   ###.###
###.###"; ns; ks; ds
COLOR 7, 1, 1: LOCATE 13, 20: PRINT USING "###.###   ###.###
###.###"; dn; dk; dd
t! = TIMER: t! = t! - s!
PRINT #2, USING "#.### #.### ###.### #####.##### #.### #.### ###.###";
ns; ks; ds; t!; dn; dk; dd
11 IF EOF(4) THEN CLOSE #4 ELSE GOTO 6
CLOSE #2
12 LOCATE 21, 10: PRINT "работа закончена"
END

102 IF ERR = 53 THEN LOCATE 21, 25: yyy = yyy + 1: PRINT yyy: RESUME 11
IF ERR = 14 AND ERL = 30 THEN LOCATE 21, 25: PRINT "ПОПРОБУЙ ЕЩЕ
PA3": o$ = INPUT$(1): RESUME
IF ERR > 0 THEN LOCATE 21, 25: PRINT "ОШИБКА : "; ERR, ERL: o$ =
INPUT$(1): RESUME 16

```

PR3

```

0 SCREEN 0, 1: COLOR 7, 1, 1: CLS
n0 = 1: l = 650: PI = 3.141592653589793#
nj1 = 1.52
nj2 = 1.78
n1 = 1: k1 = 0: d1 = 0
dmin = d1: kmin = k1: nmin = n1
16 SCREEN 0, 1: COLOR 7, 1, 1: CLS : ON ERROR GOTO 102
9 LOCATE 21, 10: INPUT "начать работу"; yy
IF yy = -1 THEN GOTO 12
5 COLOR 14, 2, 2: LOCATE 19, 20: PRINT " ПОДОЖДИТЕ ИДЕТ РАСЧЕТ "
OPEN "2.rt" FOR INPUT AS #4
s! = TIMER
OPEN "10.nkd" FOR OUTPUT AS #2
6 INPUT #4, ti1, ti2, ri1, ri2, ti
uu = 0
FOR d = dmin TO dmax + 3 STEP .1
FOR k = 3 TO 3.4 STEP .001
FOR n = 1.7 TO 2.3 STEP .001
f1 = 2 * PI * n * d / l
f2 = 2 * PI * k * d / l
chb = (EXP(f2) + EXP(-f2)) / 2
shb = (EXP(f2) - EXP(-f2)) / 2
a11 = COS(f1) * chb
b11 = SIN(f1) * shb
a12 = n * SIN(f1) * chb / (n*n + k*k) + k * COS(f1) * shb / (n*n + k*k)
b12 = k * SIN(f1) * chb / (n*n + k*k) - n * COS(f1) * shb / (n*n + k*k)
a21 = n * SIN(f1) * chb - k * COS(f1) * shb
b21 = -k * SIN(f1) * chb - n * COS(f1) * shb
r1 = a11 - nj1 * a11 - nj1 * b12 + b21
r2 = b11 - nj1 * b11 + nj1 * a12 - a21
r3 = a11 + nj1 * a11 - nj1 * b12 - b21
r4 = b11 + nj1 * b11 + nj1 * a12 + a21
Rn1 = (r1 * r1 + r2 * r2) / (r3 * r3 + r4 * r4)
IF Rn1 < ri1 - .0005 OR Rn1 > ri1 + .0005 THEN GOTO 10
Tn1 = nj1 * 4 / (r3 * r3 + r4 * r4)
IF Tn1 < ti1 - .0005 OR Tn1 > ti1 + .0005 THEN GOTO 10
r12 = a11 - nj2 * a11 - nj2 * b12 + b21
r22 = b11 - nj2 * b11 + nj2 * a12 - a21
r32 = a11 + nj2 * a11 - nj2 * b12 - b21
r42 = b11 + nj2 * b11 + nj2 * a12 + a21
Rn2 = (r12 * r12 + r22 * r22) / (r32 * r32 + r42 * r42)
IF Rn2 < ri2 - .0005 OR Rn2 > ri2 + .0005 THEN GOTO 10
Tn2 = nj2 * 4 / (r32 * r32 + r42 * r42)
IF Tn2 < ti2 - .0005 OR Tn2 > ti2 + .0005 THEN GOTO 10
uu=uu+1
IF n > nmax THEN nmax = n
IF k > kmax THEN kmax = k

```

```

IF d > dmax THEN dmax = d
IF n <= nmin THEN nmin = n
IF k <= kmin THEN kmin = k
IF d <= dmin THEN dmin = d
if uu=1 then kmax=k: kmin=k: nmax=n: nmin=n: dmax=d: dmin=d
ns = (nmax + nmin) / 2: ks = (kmax + kmin) / 2: ds = (dmax + dmin) / 2
dn = (nmax - nmin) / 2: dk = (kmax - kmin) / 2: dd = (dmax - dmin) / 2
IF d1 > ds THEN ds = d1: ns = n1: ks = k1
n1 = ns: k1 = ks: d1 = ds
10 NEXT n, k, d
COLOR 14, 2, 2: LOCATE 10, 20: PRINT USING "###.###   ###.###
###.###"; ns; ks; ds
COLOR 7, 1, 1: LOCATE 13, 20: PRINT USING "###.###   ###.###
###.###"; dn; dk; dd
t! = TIMER: t! = t! - s!
PRINT #2, USING "#.### #.### ###.### #####.##### #.### #.### ###.###";
ns; ks; ds; t!; dn; dk; dd
11 IF EOF(4) THEN CLOSE #4 ELSE GOTO 6
CLOSE #2
12 LOCATE 21, 10: PRINT "работа закончена"
END

102 IF ERR = 53 THEN LOCATE 21, 25: yyy = yyy + 1: PRINT yyy: RESUME 11
IF ERR = 14 AND ERL = 30 THEN LOCATE 21, 25: PRINT "ПОПРОБУЙ ЕЩЕ
ПАЗ": o$ = INPUT$(1): RESUME
IF ERR > 0 THEN LOCATE 21, 25: PRINT "ОШИБКА : "; ERR, ERL: o$ =
INPUT$(1): RESUME 0

```

ЛИТЕРАТУРА:

1. Schulz L. G., Tangherlini F. R., Optical Constants of Silver, Copper, and Aluminium. II. The Index of Refraction n . — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1954, v. 44, p.362.
2. Schulz L. G., Tangherlini F. R., Optical Constants of Silver, Copper, and Aluminium. I. The Absorption Coefficient k . — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1954, v. 44, p.357.
3. Hass G., Waylonis J. E., Optical Constants of Evaporated Aluminum in the Visible and Ultraviolet — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1960, v. 50, p. 1133.
4. Hass G., Waylonis J.E., Optical Constants and Reflectance and Transmittance of Evaporated Aluminum in the Visible and Ultraviolet. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1961, v. 51, №7, p. 719.
5. Шкляревский И. Н., Яровая Р. Г., Квантовое поглощение в алюминии и индии. — *Опт. и спектр.*, 1964, т. 16, с. 85.
6. Irani G. B., Huen T., Wooten F., Optical Constants of Silver and Gold in the Visible and Vacuum Ultraviolet. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1971, v. 61, № 1, p.128.
7. Taft E. A., Phillip H. P. — *Phys. Rev.*, 1961, v. 121, p. 1100.
8. Золотарев В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В., Оптические постоянные природных и технических сред, Справочник, Л.: Химия, 1984.
9. Dold B., Merke R. — *Optik*, 1965, Bd. 22, p. 435.
10. Beattie J. R. — *Physica*, 1957, v. 23, p. 898.
11. Weiss K. — *Z. Naturforsch.*, 1948, Bd. 3a, p. 143.
12. Ingersoll L. R. — *Astrophys. J.*, 1910, v. 32, p. 282.
13. Bennett H. E., Bennett J. M., Optical Properties and Electronic Structure of Metals and Alloys / Ed. F. Abeles, Amsterdam: North-Holland, 1966.
14. Hagemann H. J., Gudat W., Kunz C., Optical constants from the far infrared to the x-ray region: Mg, Al, Cu, Ag, Au, Bi, and Al₂O₃. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1975, v. 65, p. 742.
15. Beattie J. R., Canu G. K. T. — *Phil. Mag.*, 1955, v. 46, p. 989.
16. Canfield L. R., Hass G., Reflectance and Optical Constants of Evaporated Copper and Silver in the Vacuum Ultraviolet from 1000 to 2000 Å. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1965, v. 55, №1, p. 61.
17. Шкляревский И. Н., Падалка В. Г. — *Опт. и спектр.*, 1959, т. 6, с. 78.
18. Otter M. — *Z. Physik*, 1961, Bd. 161, p. 163.
19. Robusto P. F., Braunstein R. — *Phys. Stat. Sol. (B)*, 1981, v. 107, p. 443.
20. Roberts S. — *Phys. Rev.*, 1960, v. 118, p. 1509.
21. Canfield L. R., Hass G., Hunter W. R. — *J. Phys.*, 1964, v. 25, p. 124.
22. Падалка В. Г., Шкляревский И. Н. — *Опт. и спектр.*, 1961, т. 11, с. 285.
23. Мотулевич Г. П., Шубин А. А. — *ЖЭТФ*, 1964, т. 47, вып. 9, с. 840.
24. Weaver J. H., Krafska C., Lynch D. W. et al. Physics Data, Optical Properties of Metals. Karlsruhe: Fach-Information Zentrum, 1981.

25. Shiles E., Sasaki T., Inokuti M., Smith D. Y. — *Phys. Rev. (B)*, 1980, v. 22, p. 1612.
26. Головашкин Ф. И., Мотулевич П. П., Шубин А. А. — *ЖЭТФ*, 1960, 38, с. 51.
27. Шкляревский И. Н., Яровая Р. Г. — *Опт. и спектр.*, 1963, т. 14, с. 252.
28. Wernick S., *Electrolitic polishing and bright plating of metals*, Alvin Redman, London, 1948, p. 67.
29. Holland L., Williams B.J. — *J. Sci. Instrum.*, v. 32, 1955, p. 287.
30. Hass G., *Vacuum*, v. 2, 1952, p. 331.
31. Bennet H.E., Bennet J.M., Ashley E.J. — *J. Opt. Soc. Amer.*, v. 52, № 11, 1962, p. 1245-1250.
32. Hass G., Hunter W.R., Tousey R., *Reflectance of Evaporated Aluminum in the Vacuum Ultraviolet.*— *J. Opt. Soc. Amer.*, v. 46, № 12, 1956, p. 1009-1012.
33. Hass G., *Filmed Surface for Reflecting Optics.* — *J. Opt. Soc. Amer.*, v. 45, № 11, 1955, p. 945-952.
34. Л. Холлэнд, *Нанесение тонких пленок в вакууме*, М.:, 1963, 608 с.
35. Holland L. — *J. Opt. Soc. Amer*, v. 43, 1953, p. 376.
36. Williams R.C., Backus R.C. — *J. Appl. Phys.*, v. 20, 1949, p. 98.
37. Appleyard E.T.S., Lovel A.C.B. — *Proc. Roy. Soc.*, v. A 158, 1937, p. 718.
38. Г. Хасс, *Физика тонких пленок*, т. 1, М.:, мир, 1967, с. 343.
39. К. Шефер, *Теоретическая физика*, т. III и II, ГОНТИ, 1938.
40. A. I. Mahan, *J. Opt. Soc. Amer.*, 46, 1956, p 913.
41. А. В. Соколов, *Оптические свойства металлов*, 1961.
42. Umrath W., *Z. Angew. Phys.*, 22, 1967, p. 406.
43. Croce P., Gandais M., Marraud A., *Rev. Opt. Theor. Instrum.*, 40, 1961, p 555.
44. Croce P., Devant G., Gandais M., Marraud A., *Acta Crystalogr.*, 15, 1962, p. 424.
45. Данилин Б.С. *Вакуумное нанесение тонких пленок*. Изд-во «Энергия», 1967.
46. Баринов Ю.А., *Простое устройство ввода аналогового сигнала в компьютер*, Приборы и техника эксперимента, 2003, № 5, с. 64-67.
47. Архипкин А.Н., Бровченко В.Г., Кириченко А.М., Петров Н.А., Толпекин И.Г., Федоренко В.В., *Спектрометрический усилитель. Гибридный микроузел.*, Приборы и техника эксперимента, 2003, № 3, с. 84-87.
48. Андреев С.В., Карасев Н.Н., Путилин Э.С., Шакин А.О., *Автоматизация фотометрического контроля толщины осаждаемых слоев*, Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА, № 6, 2003.
49. Н.Н. Прибыткова, *Оптика и спектроскопия* 11, 1957, с. 623.
50. Андреев С.В., Карасев Н.Н., *Определение оптических постоянных тонких металлических покрытий по спектрофотометрическим*

- измерениям, НТКППС, СПБИТМО (ТУ), тезисы докладов, часть 1, Санкт-Петербург, 2000, с. 41-42.
51. Malé D., *C.R. Acad. Sci.*, 230, 1950, p. 1349.
 52. Dyson F., *Physica*, 24, 1958, p. 532.
 53. Крылова Т.Н., Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973, 224с.
 54. Scott G.D., McLauchlan T.A., Sennett R.S., *J. Appl. Phys.*, 21, 1950, p.843.
 55. Г. Хасс, Р.Э. Тун, Физика тонких пленок, т. 4, М.: Мир, 1970, 440с.
 56. Б.М. Комраков, Б.А. Шапочкин, Измерение параметров оптических покрытий, М.: Машиностроение, 1986, с. 132.
 57. Hass G., Waylonis J.E., Optical Constants and Reflectance and Transmittance of Evaporated Aluminum in the Visible and Ultraviolet. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1961, v. 51, №7, p. 719.
 58. Bennett J.M., Booty M.J., *Appl. Opt.*, 5, 1966, p. 41.
 59. Abelés F., Théye M.L., *Surface Sci.*, 5, 1966, p. 325.
 60. Bazin C., *C. R. Acad. Sci.*, 260, 1965, p. 83.
 61. Ward L., Nag A., *Brit. J. Appl. Phys.*, 18, 1967, p. 277.
 62. Nilsson P.O., *Appl. Opt.*, 7, 1968, p. 435.
 63. Schopper H., *Z. Phys.*, 131, 1952, p. 215.
 64. Г. Хасс, Р.Э. Тун, Физика тонких пленок, т. 2, М.: Мир, 1967, 396с.
 65. Bor J., *Proc. Phys. Soc. (London)*, 65, 1952, p. 753.
 66. Archard J.F., Clegg P.L., Taylor A. M., *Proc. Phys. Soc. (London)*, 65, 1952, p. 758.
 67. Hartman R.E., *J. Opt. Soc. Amer.*, 41, 1951, p. 244.
 68. McCrackin F.L., Passaglia E., Stromberg R.R., Steinberg H.L., *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 76A, 1963, p. 363.
 69. Beattie J.R., *Phil. Mag.*, 46, 1955, p. 235.
 70. Roberts S., в кн. “Ellipsometry in the Measurement of Surfaces and Thin Films”, Passaglia E., Stromberg R.R., Kruger J., eds., *Natl. Bur. Std. Misc. Publ. 256 U. S. Govt. Printing Office, Washington, D. C.*, 1964, p. 119.
 71. Lenham A.P., Treherne D.M., *J. Opt. Soc. Amer.*, 56, 1966, p. 752.
 72. Hass G., Waylonis J.E., *J. Opt. Soc. Amer.*, 51, 1961, p. 619.
 73. Burge D.K., Bennett H.E., *J. Opt. Soc. Amer.*, 54, 1964, p. 1428.
 74. McCrackin F.L., Colson J.P., в кн. “Ellipsometry in the Measurement of Surfaces and Thin Films”, Passaglia E., Stromberg R.R., Kruger J., eds., *Natl. Bur. Std. Misc. Publ. 256 U. S. Govt. Printing Office, Washington, D. C.*, 1964, p. 61.
 75. Archer R.J., *J. Electrochem. Soc.*, 104, 1957, p. 619.
 76. Barrett M.A., в кн. “Ellipsometry in the Measurement of Surfaces and Thin Films”, Passaglia E., Stromberg R.R., Kruger J., eds., *Natl. Bur. Std. Misc. Publ. 256 U. S. Govt. Printing Office, Washington, D. C.*, 1964, p. 213.
 77. Kruger J., Yolken H.T., *Corrosion*, 20, 1964, p. 29.
 78. Roberts R.W., Vanderslice T.A., *Ultrahigh Vacuum and Its Applications*, Prentice–Hall, Engewood Cliffs, Nev Jersey, 1963, p. 4.

79. Пшеницын В.И., Абаев М.И., Лызлов Н.Ю., Эллипсометрия в физико-химических исследованиях, Л., Химия, 1986.
80. Майссел Л., Гленг Р., Технология тонких пленок, спр., М., Советское радио, 1977.
81. И.Н. Шкляревский, Оптика и спектроскопия 3, 1957, с. 638
82. Карасев А.С., Основы оценки погрешности измерений, уч. пособие, С-Пб, ИПЦ, С-Пб ГТУ, 1995, с. 4.
83. Зайдель А.Н., Погрешности измерений физических величин, Ленинград, Наука, 1985, с. 67.
84. Федотов Г.И., Ильина Р.С., Новицкий Л.А., Гоменюк А.С., Лабораторные оптические приборы, Уч-ное пособие для приборостроительных и машиностроительных вузов, 2-ое изд., Москва, Машиностроение, 1979.
85. Паспорт, Установка вакуумная модели ВУ-1А, 1984-84, 00.00.000.ПС.
86. Андреев С.В., Исследование оптических постоянных металлических покрытий, Сборник научных трудов молодых ученых и специалистов, вып. 1, часть 1, СПбИТМО (ТУ), 2000, с. 14-15.
87. Андреев С.В., Губанова Л.А., Исследование оптических постоянных металлов, Оптические и лазерные технологии, сборник статей, Санкт-Петербург, 2001, с. 74-83.
88. Андреев С.В., Антистатические покрытия из смесей металла с диэлектриком на оптических деталях из полимерных материалов, Сборник научных трудов молодых ученых и специалистов, вып. 1, часть 1, СПбИТМО (ТУ), 2000, с. 15-17.
89. Хасс Г., Франкомб М., Гофман Р., Физика тонких пленок, т. 8, Москва, Мир, 1978, 359 с.



Кафедра Оптических Технологий

В соответствии с приказом Главного управления кадров промышленности Высшего Совета народного хозяйства СССР от 05.04.1930 N 12/87 образован Учебный комбинат точной механики и оптики. В состав комбината входил Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО). В числе первых кафедр в 1932 году была образована Кафедра технологии оптического стекла заведующий кафедрой, профессор Л.Г. Титов, задачей которой была подготовка кадров для развивающегося отечественного приборостроения. При кафедре образована научно-исследовательская лаборатория (обработки оптического стекла), решавшая задачи создания отечественных оптических и обрабатываемых материалов. В тридцатые годы лекции по технологии оптического стекла читал член корреспондент АН СССР Н.Н. Качалов.

В 1975 образована кафедра Технологии оптических деталей и покрытий. Её возглавил д.т.н., профессор Кузнецов Сергей Михайлович.

С 1988 года кафедру возглавляет д.т.н., профессор Путилин Эдуард Степанович.

Важным вкладом в фундаментальную оптику является создание и развитие научной школы по формированию волнового фронта излучения с помощью многослойных систем, участие в выполнении проекта UNIDO по созданию оптического производства в Сирийском национальном научно-исследовательском центре (Дамаск).

В научных лабораториях кафедры прошли обучение более 10 стажеров из вузов России и СНГ, ГДР, Китая, Кореи и Сирии, а также аспиранты из Болгарии, Кореи и Сирии.

За время существования кафедры подготовлено более 500 инженеров оптиков-технологов, более 10 кандидатов наук, в том числе граждане Кореи, Болгарии, Израиля, Сирии, 1 доктор наук. С 1996 года кафедра переименована в кафедру Оптических технологий.

Кафедра проводит подготовку:

- бакалавров по направлению «Оптотехника», срок обучения – 4 года.
- магистров по специальности «Оптотехника», срок обучения – 6 лет.
- дипломированных специалистов по специальности «Оптические технологии и материалы», специализациям «оптические технологии» и «оптические покрытия». Срок обучения – 5,5 лет.

На кафедре обучаются аспиранты по специальности 05.11.07 «Оптико-электронные приборы и системы».

Для подготовки специалистов кафедра располагает учебно-производственными лабораториями:

- механической обработки оптических материалов,
- вакуумных методов изготовления оптических покрытий,
- методов и средств контроля параметров оптических элементов и покрытий.

На кафедре имеются учебные лаборатории, позволяющие закрепить практические навыки по курсам дисциплин, читаемых преподавателями кафедры в рамках учебных планов специальностей: Лазерная техника и лазерная технология, Оптико-электронные приборы и системы и Оптические технологии и материалы.

Преподаватели кафедры:

Профессор - Путилин Эдуард Степанович;

доценты: Лисицын Юрий Васильевич, Губанова Людмила Александровна, Старовойтов Сергей Федорович, Нужин Андрей Владимирович, Андреев Сергей Викторович, Карасёв Никита Николаевич, Рудин Ярослав Вадимович, Черезова Людмила Адамовна;

старший преподаватель: Погумирский Максим Викторович.

Сергей Викторович Андреев
Людмила Александровна Губанова
Эдуард Степанович Путилин

Методические указания к лабораторному практикуму по курсу

Оптические покрытия

В авторской редакции

Компьютерная верстка

Дизайн обложки

Зав.редакционно-изд. отделом

Лицензия 14ДН2 00408 от 0511.99

Подписано к печати

Заказ № 817 Тираж 100экз

Отпечатано на ризографе ,

С.В.Андреев

С.В.Андреев

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий,
механики и оптики

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр.д.49

