

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**Л.П. Амосова, Е.А. Коншина,  
Д.С. Костомаров, М.А. Федоров**

**ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМОЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ  
В НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург**

**2010**

Амосова Л.П., Коншина Е.А., Костомаров Д.С., Федоров М.А. Электроуправляемое двулучепреломление в нематических жидких кристаллах. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.– 63 с.

Учебное пособие содержит описание работ к дисциплинам «Оптика наноструктур» и «Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур».

Пособие предназначено для бакалавров и магистров факультета Фотоники и оптоинформатики, а также может быть рекомендовано при подготовке студентов старших курсов физико-технических специальностей и аспирантов, специализирующихся в области физической оптики.

Рекомендовано к изданию Ученым Советом факультета Фотоники и оптоинформатики. Протокол Совета № 5 от 10.02.2010.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2010  
© Амосова Л.П., Коншина Е.А., Костомаров Д.С., Федоров М.А., 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения.....	4
Введение.....	6
<b>Раздел I Явление двулучепреломления в конденсированных средах</b>	
1.1 Двулучепреломление в кристаллах.....	7
1.2 Анизотропные среды.....	9
1.3 Оптические свойства анизотропной среды.....	11
1.4 Двулучепреломление в нематических жидких кристаллах.....	14
1.5 Анизотропия свойств жидких кристаллов.....	15
1.6 Электрооптические эффекты в нематических жидких кристаллах	17
1.7. Деформация слоя жидкого кристалла электрическим полем.....	18
Лабораторные работы	
№1 Определение толщины слоя жидкого кристалла.....	22
№2 Фазовая модуляция света в слое жидкого кристалла.....	26
№3 Определение начального угла наклона директора жидкого кристалла.....	32
№4 Определение переходной частоты двухчастотного нематического жидкого кристалла.....	37
№5 Дисперсия оптической анизотропии жидкого кристалла в ближней ИК области спектра.....	40
<b>Раздел II Жидкокристаллические пространственные модуляторы света</b>	
2.1 Устройство и принцип работы .....	43
2.2 Чувствительность к записываемому излучению.....	47
2.3 Быстродействие.....	50
Лабораторные работы	
№6 Исследование жидкокристаллических пространственных модуляторов света по проекционной методике.....	52
№7 Измерение фотоиндуцированной задержки фазы в оптически управляемых модуляторах света.....	55
№8 Исследование быстродействия оптически управляемых жидкокристаллических структур.....	58
Литература.....	60

## Обозначения и сокращения

$D$  – вектор электрической индукция

$E$  – вектор электрической напряженности

$H$  – вектор магнитной напряженности

$B$  – вектор магнитной индукции

$A$  – амплитуда падающей волны

$a, b$  – амплитуды обыкновенной и необыкновенной волн

$N$  – нормаль к волновой поверхности (направление распространения фазы волны)

$S$  – направление распространения энергии волны

$\Sigma$  – волновая поверхность

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – компоненты тензора диэлектрической проницаемости

$q$  – скорость распространения фазы волны

$v$  – скорость распространения световой энергии волны

НЖК – нематический жидкий кристалл

$S_{op}$  – параметр ориентационного порядка

$\varphi$  – угол между осью индивидуальной молекулы жидкого кристалла и преимущественным направлением всего ансамбля

$\theta$  – угол наклона *директора* ЖК относительно оси  $Z$

$\Delta n$  – анизотропия показателя преломления

$n_o, n_e$  – показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн

$\Delta\varepsilon$  – анизотропия диэлектрической проницаемости

$\varepsilon_o, \varepsilon_e$  – диэлектрическая анизотропия для обыкновенной и необыкновенной волн

$\Delta\sigma$  – анизотропия электропроводности

$\sigma_o, \sigma_e$  – электропроводность для обыкновенной и необыкновенной волн

$\psi$  – угол между дипольным моментом и длинной молекулярной осью

$L$  – директор жидкого кристалла

$d$  – толщина слоя жидкого кристалла  
 $K_{11}, K_{22}, K_{33}$  – константы упругости Франка для S-, В- и Т-деформаций  
 $U$  – напряжение электрического поля  
 $U_{th}$  – пороговое напряжение электрооптического эффекта  
 $\Delta\Phi$  – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами  
 $\lambda$  – длина волны излучения  
 $C$  – емкость конденсатора  
 $\epsilon_0$  – электрическая постоянная  
 $S$  – площадь пластины конденсатора  
 $\beta$  – угол между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора ЖК  
 $\theta_p$  – начальный угол наклона директора ЖК  
 $\Delta\Phi_{max}$  – максимальная фазовая задержка  
 $f$  – частота подаваемого напряжения  
 $f_c$  – переходная частота двухчастотного ЖК  
ЖК ПМС – жидкокристаллический пространственный модулятор света  
ФП – фотопроводник  
 $K=I_0/I_{max}$  – контрастное отношение  
 $I_0$  – интенсивность считывающего излучения в отсутствие света записи  
 $I_{max}$  – максимальная интенсивность прошедшего излучения  
ЧКХ – частотно-контрастная характеристика  
ДЭ – дифракционная эффективность

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие разработано с учетом специфики подготовки магистрантов по направлению «Фотоника и оптоинформатика», магистерской программе «Оптика наноструктур» 2 этап «Технологии», модулю «Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур».

Основная цель настоящего учебного пособия – ознакомить студентов с оснащением научной лаборатории и правилами проведения экспериментальных исследований и привить им навыки самостоятельной научно-исследовательской работы.

Описанию лабораторных работ предшествуют краткие теоретические сведения о явлении двулучепреломления в конденсированных средах, включая жидкие кристаллы, и его использовании в жидкокристаллических устройствах. В основу лабораторных работ положены разработанные методики и результаты исследований электрооптических характеристик электрически и оптически управляемых жидкокристаллических модуляторов света, выполненных в лаборатории «Нелинейная оптика конденсированных сред» (ЦИОТ) в 2006 – 2009 г.г.

В настоящее время широкое распространение получили дисплеи на жидких кристаллах: мониторы компьютеров, плоские ТВ-экраны и самые разнообразные индикаторные и информационные табло. Вместе с тем, жидкие кристаллы находят и другие применения. Они используются в оптических модуляторах для различных схем адаптивной оптики и коррекции волнового фронта, для когерентной обработки изображений, а также в устройствах для телекоммуникационных систем, таких как переключатели, аттенюаторы и т.д. Такие устройства могут работать в просветной и отражательной моде, а по принципу управления оптическим сигналом они делятся на электроуправляемые и оптически управляемые. В основе работы жидкокристаллических устройств лежит явление двулучепреломления, управляемое внешним электрическим полем, либо электрическим полем фотоиндуцированного объемного заряда, возникающим при записи изображения в оптически управляемых устройствах.

I раздел пособия, посвященный исследованию характеристик жидкокристаллических электроуправляемых модуляторов света, подготовлен при участии кандидата техн. наук, доцента кафедры ОФ и СЕ Коншиной Е.А., аспиранта кафедры ОФ и СЕ Костомарова Д.С. и научного сотрудника лаборатории «Нелинейная оптика конденсированных сред» Федорова М.А.

II раздел пособия, посвященный исследованию характеристик жидкокристаллических светоуправляемых пространственно-временных модуляторов света, подготовлен кандидатом физ.-мат. наук, доцентом кафедры ОФ и СЕ Амосовой Л.П.

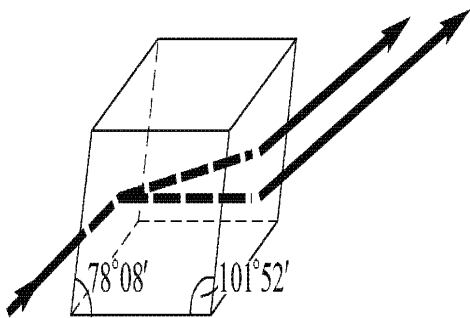
## Раздел I

# ЯВЛЕНИЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

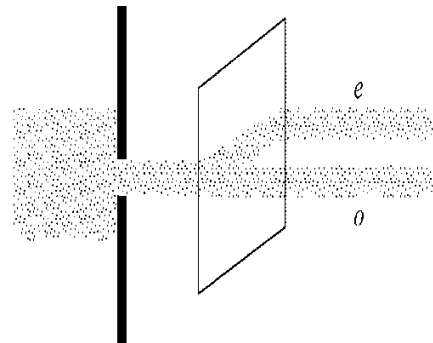
### 1.1. Двулучепреломление в кристаллах

Если на кристалл исландского шпата падает узкий пучок света, то, преломляясь, он разделяется на два пучка разного направления. Если падающий пучок узок, а толщина кристалла значительная, то из него выходят два пучка, параллельных первоначальному направлению (как при прохождении через плоскопараллельную пластинку), и разделенных пространственно (рис. 1).

Даже в том случае, когда первичный пучок падает по нормали к естественной грани кристалла, т.е. угол падения равен нулю, преломленный пучок разделяется на два, причем один из них представляет продолжение первичного, а второй отклоняется так, что угол преломления отличен от нуля (рис. 2).



**Рис. 1.** Прохождение света через кристалл (двойное лучепреломление).



**Рис. 2.** Двойное лучепреломление света, падающего нормально к грани кристалла.

Это обстоятельство, равно как и ряд других отступлений от обычных законов преломления, дали повод назвать второй из этих лучей **необыкновенным** (e), сохраняя за первым название **обыкновенного луча** (o). Различие в отклонении обоих лучей показывает, что по отношению к ним кристалл обладает разными показателями преломления. Исследуя это явление при различных направлениях преломленных лучей внутри кристалла, можно обнаружить, что **обыкновенный луч** в кристалле имеет одно и то же значение показателя преломления для всех направлений, показатель же преломления **необыкновенного луча** зависит от направления.

В кристалле существует одно определенное направление, вдоль которого оба преломленных луча распространяются, не раздваиваясь и с

одной скоростью, как в обычной изотропной среде, которое называют *оптической осью* кристалла. Оптическая ось представляет собой определенное направление в кристалле, а не какую-то избранную линию, что вполне понятно, ибо отдельные участки кристалла должны обладать идентичными свойствами. Итак, через любую точку кристалла можно провести оптическую ось. Плоскость, проходящая через оптическую ось и волновую нормаль распространяющихся волн, носит название *плоскости главного сечения* или *главной плоскости*.

Рассмотрим несколько детальнее опыт, при котором световой пучок падает по нормали к естественной грани кристалла. Как показывает опыт, внутри кристалла идут два луча, из которых один *обыкновенный* есть продолжение падающего, а второй *необыкновенный* отклонен, но лежит вместе с первым в главной плоскости. Таким образом, из кристалла выходят два луча, лежащих в главной плоскости и параллельных падающему лучу, но смещенных друг относительно друга. При вращении кристалла вокруг направления падающего луча один из преломленных лучей будет неподвижным, а второй будет перемещаться вокруг первого.

Если исследовать оба выходящих пучка при помощи поляризатора, то обнаруживается, что оба они поляризованы, и притом во взаимно перпендикулярных плоскостях. Колебания вектора  $D$  обыкновенной волны происходят перпендикулярно к главной плоскости, а необыкновенной – в главной плоскости. Свойства обоих лучей на выходе из кристалла, за исключением направления поляризации, конечно, ничем друг от друга не отличаются, так что название *необыкновенный луч* имеет смысл только внутри кристалла. Интенсивности обоих лучей одинаковы в общем случае, если на кристалл падает естественный свет.

Если один из пучков на выходе из первого кристалла направить по нормали к грани второго кристалла, то мы опять получим два пучка, лежащих в главной плоскости второго кристалла и поляризованных так же, как и раньше, по отношению к главной плоскости второго кристалла. Таким образом, направление поляризации зависит только от ориентации кристалла и не зависит от того, поляризован ли падающий на него свет или же он является естественным. Интенсивности обоих пучков будут, однако, в случае поляризованного падающего луча зависеть от угла  $\alpha$  между направлением колебаний в падающем поляризованном луче и главной плоскостью второго кристалла. Действительно, во втором кристалле направление колебаний в необыкновенном луче, лежащих в главной плоскости второго кристалла, составит угол  $\alpha$  с направлением колебаний в падающем поляризованном свете, а направление колебаний в обыкновенном луче образует с ним угол  $\pi/2 - \alpha$ .



Если амплитуда падающей на второй кристалл волны равна  $A$ , то амплитуды обеих волн, выходящих из кристалла, будут равны соответственно: для обыкновенной волны  $a = A \sin \alpha$ , а для необыкновенной волны  $b = A \cos \alpha$ .

Их интенсивности относятся как

$$\frac{I_0}{I_e} = \frac{a^2}{b^2} = \operatorname{tg}^2(\alpha). \quad (1)$$

## 1.2. Анизотропные среды

Анизотропия реальной среды обусловлена особенностями составляющих ее атомов или молекул. Однако надо помнить, что их свойства еще не определяют свойств среды. Соединяясь в некоторое целое, например, образуя кристалл, атомы (или молекулы) могут превратиться в соответствующие ионы (или молекулярные группы), которые располагаются в узлах кристаллической решетки. Каждая такая частица (атом, ион и т.д.) находится в поле окружающих ее частиц, которое зависит от расположения последних. Поэтому свойства кристалла зависят от его структуры. Изотропная среда может быть построена из анизотропных частиц, а анизотропная среда – из частиц изотропных, равным образом возможны и иные комбинации.

Возможно сохранение изотропных свойств у кристаллических тел при некотором регулярном расположении атомных групп. Причина состоит в том, что ионы, из которых построена решетка, сами по себе обладают изотропными свойствами, а благодаря их симметричному расположению в узлах кубической решетки воздействие окружающих частиц также оказывается не зависящим от направления. Если деформировать такой кристалл, например, сжимая его в одном направлении, то нарушается симметрия в расположении ионов и кристалл становится двулучепреломляющим.

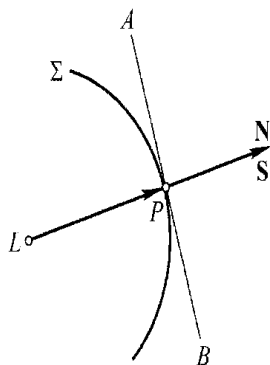
С другой стороны, известно много случаев, когда анизотропию кристалла можно полностью объяснить различием по разным направлениям междумолекулярных сил, обусловленных анизотропным расположением ионов в кристаллической решетке. Иногда анизотропия может возникать под влиянием внешних воздействий (искусственная анизотропия).

Оптически анизотропия среды характеризуется различной по разным направлениям способностью среды реагировать на действие падающего света. Реакция эта состоит в смещении электрических зарядов под действием поля световой волны. Для оптически анизотропных сред величина смещения в поле заданной напряженности зависит от направления, т.е. диэлектрическая

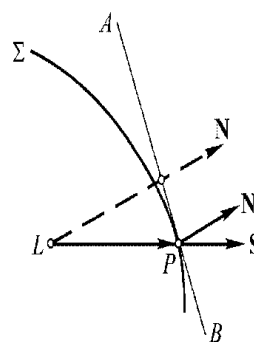
проницаемость и показатель преломления среды различны для разных направлений электрического вектора световой волны. Другими словами, показатель преломления, а, следовательно, и скорость света зависят от направления распространения световой волны и плоскости ее поляризации. Для анизотропной среды волновая поверхность, до которой распространяется световое возбуждение, исходящее из точки  $L$ , за время  $t$ , отлична от сферической, как в случае изотропной среды, у которой скорость распространения  $v$  не зависит от направления.

Волновой фронт характеризуется в каждой точке плоскостью, касательной к поверхности волны, а направление распространения волны – нормалью к этой поверхности. В случае изотропной среды, когда волновая поверхность имеет форму сферы, нормаль совпадает с лучом, т.е. линией, вдоль которой распространяется световое возбуждение и которая представлена радиус-вектором, проведенным из точки  $L$  к соответствующей точке  $P$  волновой поверхности  $\Sigma$  (рис. 3). Но для анизотропной среды волновая поверхность и направление распространения поверхности постоянной фазы (нормаль  $N$  к волновой поверхности  $\Sigma$ ) не совпадает с лучом  $S$ , указывающим направление распространения энергии (радиус-вектор  $LP$ ) (рис. 4).

Таким образом, для анизотропной среды надо различать направление распространения фазы (нормаль  $N$ ) и направление распространения энергии (луч  $S$ ).



**Рис. 3.** Взаимное расположение луча  $S$  и нормали  $N$  волны в изотропной среде.



**Рис. 4.** Взаимное расположение луча  $S$  и нормали  $N$  волны в анизотропной среде.

Вследствие анизотропии диэлектрической проницаемости связь между векторами электрической напряженности  $E$  и электрической индукции  $D$  оказывается более сложной, чем для изотропных сред. Для изотропного тела связь эта определяется соотношением  $D = \epsilon E$ , где  $\epsilon$  – диэлектрическая

проницаемость, являющаяся в этом случае скалярной величиной. При этом вектор  $\mathbf{D}$  совпадает по направлению с вектором  $\mathbf{E}$ .

Общие закономерности, касающиеся диэлектрической проницаемости анизотропной среды, сводятся к возможности представить всю совокупность ее значений при помощи трехосного эллипсоида. Величины диэлектрической проницаемости для любого направления выражаются длиной радиус-вектора такого эллипсоида, проведенного из его центра, по выделенному направлению. Три значения диэлектрической проницаемости, соответствующие осям эллипсоида, выделяют три взаимно перпендикулярных *главных направления* в кристалле, характеризующиеся тем, что для них направления векторов электрической индукции  $\mathbf{D}$  и электрической напряженности  $\mathbf{E}$  совпадают. Эти главные направления выбираются в качестве осей координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , а соответствующие им значения диэлектрической проницаемости удобно обозначить через  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$ . Если обозначить соответствующие компоненты векторов  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$  через  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  и  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ , то в силу совпадения направлений этих векторов соотношение между ними можно выразить как

$$D_x = \varepsilon_x E_x, \quad D_y = \varepsilon_y E_y, \quad D_z = \varepsilon_z E_z.$$

Поскольку  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_z$  не равны между собой, то для всех направлений в кристалле, кроме главных,  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$  не параллельны. Осью  $x$  принято считать ось, соответствующую наименьшей диэлектрической проницаемости, осью  $z$  – ось, соответствующую наибольшей, а осью  $y$  – промежуточной диэлектрической проницаемости. Таким образом, оси координат выбраны в соответствии с условием:

$$\varepsilon_x \leq \varepsilon_y \leq \varepsilon_z.$$

Используя связь между  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$ , характеризующую анизотропную среду, можно в дальнейшем применить теорию Максвелла. Решение уравнений Максвелла для анизотропной среды, в отличие от решения для изотропной среды, характеризуется рядом особенностей, которые будут рассмотрены ниже.

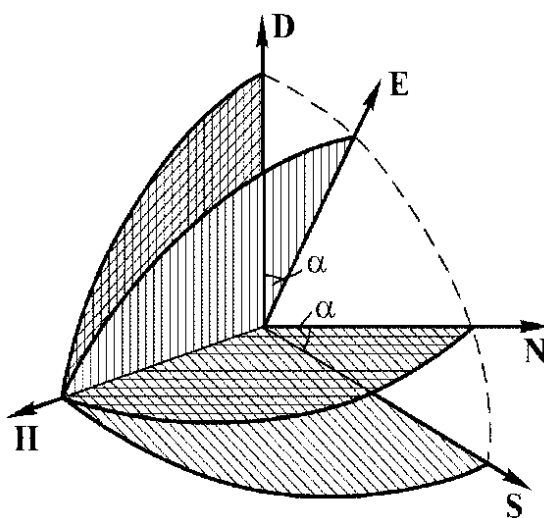
### 1.3. Оптические свойства анизотропной среды

1. В заданном направлении  $N$  могут распространяться две плоскополяризованные волны с различными фазовыми скоростями, соответствующими двум различным направлениям вектора индукции  $\mathbf{D}$ .

Эти два особенных направления колебаний определяются свойствами среды (кристалла) и взаимно перпендикулярны между собой. Поляризованная

волна с колебаниями, параллельными одному из этих двух направлений, распространяется через кристалл с определенной скоростью, оставаясь плоскополяризованной. Если направление первоначального колебания составляет угол с указанными особенными направлениями, то можно разложить его на два, распространяющихся с разными скоростями и, следовательно, приобретающих разность фаз. Наличие двух особенных направлений колебаний, соответствующих двум разным скоростям, обуславливает явление *двойного лучепреломления*.

2. В плоскости волнового фронта, т.е. в плоскости, перпендикулярной к  $N$ , расположены вектор  $D$  электрической индукции и вектор  $H$  напряженности магнитного поля, который совпадает с вектором магнитной индукции  $B = \mu H$ , так как магнитная проницаемость  $\mu$  в оптике для большинства сред равна 1. Вектор же  $E$  (напряженность электрического поля), не совпадающий с  $D$ , образует с  $N$  угол, отличный от прямого. Оба вектора  $E$  и  $D$  всегда перпендикулярны к  $H$ , так что общее расположение векторов соответствует рис. 5.



**Рис. 5.** Взаимное расположение векторов  $E$ ,  $D$ ,  $H$ ,  $S$  и  $N$ . Вектор  $H$  нормален к плоскости, в которой лежат все остальные векторы.

Таким образом, плоскость фронта волны, распространяющейся вдоль  $N$ , есть плоскость  $DH$ . Однако и плоскость  $EH$ , повернутая на угол  $\alpha$  относительно плоскости фронта  $DH$ , имеет существенное значение, так как нормаль к ней определяет направление потока лучистой энергии, переносимой волной (вектор Умова-Пойнтинга  $S$ ), т.е. направление светового луча. Для изотропной среды *луч и нормаль* к фронту волны совпадают, так как  $E$  и  $D$  имеют одинаковые направления. В анизотропной среде это имеет место только в частных случаях.

Скорость фазы  $q$ , измеренная вдоль нормали, будет отличаться от скорости световой энергии  $v$ , измеренной вдоль луча (лучевой скорости), так что  $q = v \cos \alpha$ . Двум значениям скорости фронта по нормали  $q'$  и  $q''$ , обуславливающим двойное лучепреломление, соответствуют и два значения скорости распространения энергии –  $v'$  и  $v''$ .

3. Две скорости ( $q'$  и  $q''$  или  $v'$  и  $v''$ ), характеризующие распространение света по какому-либо направлению в кристалле, равно как и направления колебаний соответствующих векторов ( $\mathbf{D}$  или  $\mathbf{E}$ ), можно найти при помощи простых правил. Эти правила, так же как и все решения задачи о распространении света в кристаллах, были впервые определены Френелем, и применительно к электромагнитной теории света их можно сформулировать следующим образом.

Для определения лучевых скоростей  $v'$  и  $v''$  в кристалле воспользуемся вспомогательной поверхностью, носящей название эллипсоида Френеля и описываемой уравнением:

$$\varepsilon_x x^2 + \varepsilon_y y^2 + \varepsilon_z z^2 = 1. \quad (2)$$

Эллипсоид Френеля служит для определения лучевых скоростей  $v'$  и  $v''$  по любому направлению в кристалле с помощью следующего построения. Проведем сечение эллипсоида, перпендикулярное к направлению  $\mathbf{S}$ , вдоль которого распространяется свет (рис. 6). Сечение это будет иметь форму эллипса, главные оси которого  $S'S'$  и  $S''S''$  взаимно перпендикулярны. Направления этих осей дают направление колебания вектора  $\mathbf{E}$  двух волн, поляризованных взаимно перпендикулярно и распространяющихся вдоль  $OS$ , а длины полуосей ( $OS' = v'$ ,  $OS'' = v''$ ) – лучевые скорости этих двух волн, отнесенные к скорости света в вакууме  $c$ .

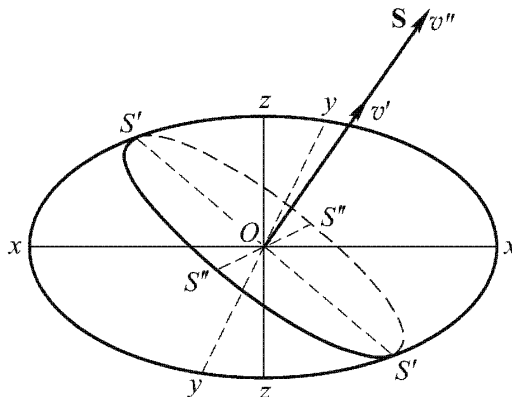


Рис. 6. Эллипсоид Френеля.

Подобным же образом можно составить представление и о скоростях распространения фазы (вдоль нормали  $N$ ). Для этого удобнее использовать вспомогательную поверхность, связанную с эллипсоидом Френеля, также имеющую вид эллипсоида, носящего название эллипсоида индексов (или эллипсоида нормалей) и описываемого следующим уравнением:

$$\frac{x^2}{\varepsilon_x} + \frac{y^2}{\varepsilon_y} + \frac{z^2}{\varepsilon_z} = 1. \quad (3)$$

Повторяя по отношению к эллипсоиду индексов построение, данное выше, мы найдем, что эллиптическое сечение его, перпендикулярное к любому направлению распространения  $ON$ , укажет два взаимно перпендикулярных колебания вектора  $D$ , совпадающих с осями эллипса. Значения соответствующих скоростей  $q'$  и  $q''$ , называемых *нормальными скоростями*, обратно пропорциональны длинам полуосей этого эллипса [1].

#### 1.4. Двухлучепреломление в нематических жидких кристаллах

**Жидкие кристаллы** – это жидкости, в которых расположение молекул может быть упорядочено, что приводит к анизотропии механических, электрических, магнитных и оптических свойств. Жидкокристаллическое состояние возникает при определенных условиях в органических веществах, молекулы которых имеют явно выраженную протяженность в одном из направлений. Принято считать, что определяющую роль в образовании жидкокристаллического состояния играют дисперсионные (Ван-дер-Ваальсовы) силы притяжения между молекулами и стерические силы отталкивания. Наиболее важной молекулярной характеристикой, определяющей тенденцию конкретного вещества к образованию жидкокристаллического состояния, является анизотропия электронной поляризуемости. В этом смысле предпочтительнее длинные палочкообразные молекулы с расположенными в ряд бензольными кольцами. Положительным фактором является наличие цепи сопряжения (чередования одиночных и двойных химических связей) вдоль всего скелета молекулы, поскольку сопряжение увеличивает продольную компоненту молекулярной поляризуемости. Наличие у молекул постоянного дипольного момента, по-видимому, не коррелирует со способностью вещества образовывать жидкие кристаллы, хотя зачастую определяет их электрическое и электрооптическое поведение. Весьма существенной является форма концевых групп молекулы (стерический фактор). Наибольшее практическое применение получили нематические жидкие кристаллы (НЖК).

**Нематические жидкие кристаллы** характеризуются дальним ориентационным порядком и полной свободой перемещения центров тяжести отдельных молекул в пространстве. Моделью нематической фазы может служить ящик с карандашами, который слегка встряхивают для имитации теплового движения: если трести не очень сильно, карандаши перемещаются, оставаясь параллельными друг другу; при сильной тряске в ящике будет полный беспорядок. НЖК представляют собой оптически одноосную среду, кристаллографическая структура которой неполярная, т.е. направления концов молекул имеет равновероятное распределение, к тому же молекулы вращаются как вокруг длинной, так и вокруг короткой оси. Однородная ориентация молекулярных осей по всему образцу создается в результате анизотропно-упругого взаимодействия молекул с поверхностью. В результате однородно ориентированный слой ЖК приобретает свойства монокристалла и становится прозрачен.

### 1.5. Анизотропия электрических и оптических свойств жидких кристаллов

Количественно степень упорядоченности жидкого кристалла определяется параметром ориентационного порядка  $S_{op}$ , введенным Цветковым:

$$S_{op} = 1/2(3\cos^2 \varphi - 1). \quad (4)$$

Здесь  $\varphi$  — угол между осью индивидуальной молекулы жидкого кристалла и преимущественным направлением всего ансамбля, а усреднение проведено и по ансамблю, и по времени. Преимущественное направление совпадает с оптической осью жидкого монокристалла и должно быть задано внешним воздействием (поверхностью твердого тела, полем или потоком). В соответствии со смыслом определения степени упорядоченности для твердых кристаллов  $S_{op}=1$  и  $S_{op}=0$  для изотропно-жидкой фазы. В жидком кристалле с параллельным расположением молекул  $0 < S_{op} < 1$  и полностью определяет анизотропию электрических и оптических свойств. В частности, анизотропия диамагнитной восприимчивости, а также электронной части диэлектрической восприимчивости жидкого нематического монокристалла, определяется через анизотропию тех же параметров, что и для твердых веществ. Для анизотропии показателя преломления  $\Delta n = n_o - n_e$ , связанного с полной диэлектрической проницаемостью соотношением Лоренц-Лоренца, включающего в себя ориентационную компоненту  $\Delta \varepsilon = \varepsilon_o - \varepsilon_e$  и анизотропию электропроводности  $\Delta \sigma = \sigma_o - \sigma_e$  имеют место более сложные соотношения. Однако сохраняется общая закономерность монотонного

снижения всех этих величин:  $\Delta n, \Delta \epsilon, \Delta \sigma \rightarrow 0$  при  $S_{op} \rightarrow 0$ . Анизотропными являются такие свойства жидких кристаллов, как вязкость и упругость. Следует отметить, что  $\Delta n > 0$  во всех известных жидких кристаллах в соответствии с анизотропией электронной поляризуемости молекул.

Диэлектрическая анизотропия жидких кристаллов может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Именно знак  $\Delta \epsilon$  определяет электрооптическое поведение жидких кристаллов. Это зависит от соотношения между анизотропией поляризуемости молекулы и величиной постоянного дипольного момента, а также от угла  $\psi$  между дипольным моментом и длинной молекулярной осью. Положительная величина  $\Delta \epsilon$  характерна для молекул с продольным дипольным моментом ( $\psi \rightarrow 0$ );  $\Delta \epsilon < 0$  реализуется в тех случаях, когда угол  $\psi$  велик, например,  $\psi > 90^\circ$ . В области частот дебаевской релаксации диполей знак  $\Delta \epsilon$  может измениться.

Специфика электрооптических эффектов в жидких кристаллах, связанных с процессами переключения их оптических свойств с помощью внешнего электрического поля, разбивается на три этапа:

а) **Вследствие анизотропии диэлектрической постоянной и электропроводности** жидкий монокристалл (аналогично твердому кристаллу) испытывает вращающий момент, стремящийся понизить энергию анизотропного тела в электрическом поле. Например, при  $\sigma = 0$  кристалл стремится повернуться таким образом, чтобы направление максимальной диэлектрической постоянной совпало с направлением поля.

б) **Вследствие относительно небольшой вязкости и внутреннего трения жидкости** вращающий момент действительно приводит к переориентации жидкого монокристалла за относительно короткое время (этого не случилось бы с твердыми кристаллами из-за сил трения).

в) **Вследствие большой анизотропии оптических свойств** (показателей преломления и коэффициента поглощения) любое изменение структуры жидкого кристалла легко фиксируется оптически в полной аналогии со свойствами твердых кристаллов.

Таким образом, вся необычность электрооптики жидких кристаллов обусловлена сосуществованием свойств, характерных для твердых кристаллов и жидкостей, а разнообразие структур, физических параметров ( $\Delta \epsilon, \Delta \sigma, \Delta n$ , анизотропия вязкости и упругости и т. д.) и граничных условий приводит к большому числу различных электрооптических эффектов.

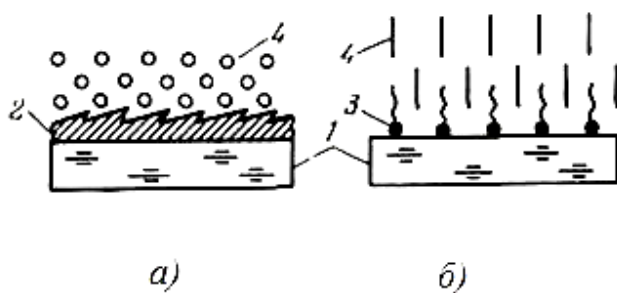


## 1.6. Электрооптические эффекты в нематических жидких кристаллах

В первых работах, посвященных исследованию влияния электрического поля на поглощение света и двулучепреломление нематических жидких кристаллов (НЖК), опубликованных в 20-х–30-х годах прошлого века, основное внимание уделялось механизму ориентации НЖК электрическим полем и интерпретации этого явления. В то время оптически прозрачные электроды еще не были изобретены, что затрудняло электрооптический эксперимент с тонкими слоями НЖК. Наиболее достоверные опыты были выполнены Фредериксом и Цветковым с использованием поляризованного света и проволочных электродных сеток.

Направление преимущественной ориентации длинных осей молекул принято характеризовать единичным вектором, называемым директором, для которого выполняется условие  $\mathbf{L} = -\mathbf{L}$ . В НЖК *директор* совпадает с направлением оптической оси  $Z$ , так что его компоненты равны  $(0, 0, n_z)$ . Для слоев НЖК с однородной ориентацией директора характерна анизотропия физических свойств. Ориентированные слои ЖК характеризуются диэлектрической  $\Delta\epsilon$  и оптической  $\Delta n$  анизотропиями.

В зависимости от угла наклона *директора* ЖК относительно поверхности, ограничивающей ЖК, различают несколько типов ориентации: параллельную (или планарную), когда *директор* параллелен плоскости, и вертикальную (гомеотропную), когда директор перпендикулярен ориентирующей поверхности. Промежуточная ориентация директора ЖК с некоторым углом наклона *директора* называется наклонной. Механизмы параллельной (*a*) и вертикальной (*б*) ориентации иллюстрирует рис. 7.



**Рис. 7.** Механизмы параллельной ориентации (*a*) и вертикальной ориентации (*б*) молекул ЖК. 1 – стеклянная подложка, 2 – поверхность наклонно напыленного ориентирующего слоя, 3 – молекулы поверхностно активного вещества. 4 – молекулы ЖК [1].

## 1.7. Деформация слоя жидкого кристалла электрическим полем

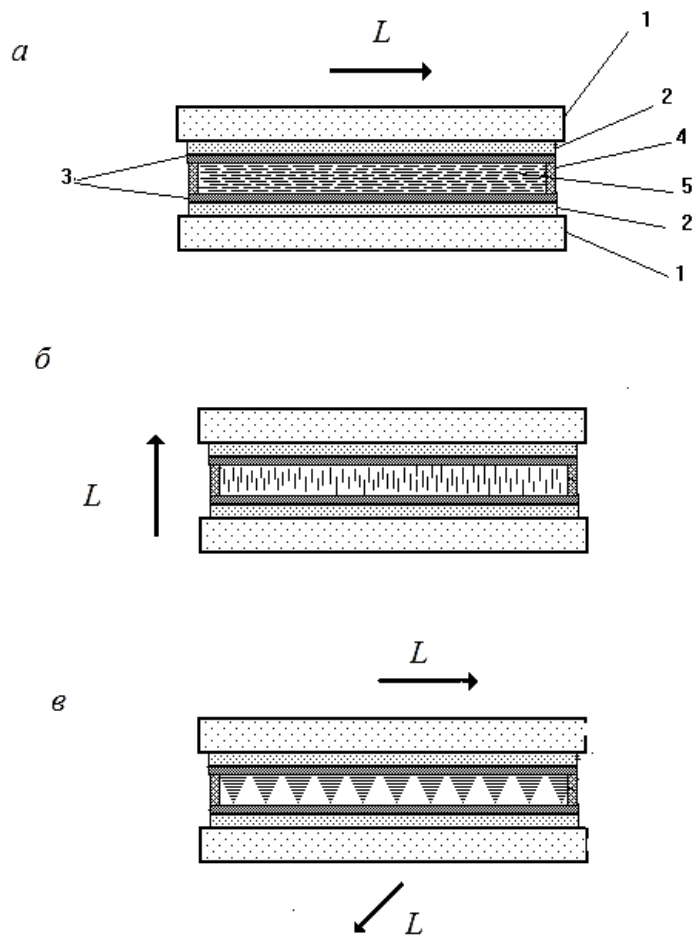
Для экспериментальных исследований используют плоскопараллельные ячейки, в которых слой жидкого кристалла толщиной  $d$  от нескольких единиц до десятков микрометров размещен между двумя прозрачными электродами 2, нанесенными на стеклянные подложки 1 (рис. 8, а). Капиллярный зазор между электродами фиксируется диэлектрическими прокладками 4. К электродам можно приложить постоянное, импульсное или переменное напряжение. Свет проходит сквозь сэндвич-структуру ячейки вдоль оси  $Z$ , перпендикулярно электродам. Для исследования деформаций НЖК электрическим полем применяется поляризованный монохроматический свет.

Основное отличие деформации жидкого кристалла от деформации твердого тела заключается в том, что в ЖК нет растяжения или сжатия слоев при изгибах и поступательного движения частиц при кручении. Это результат проскальзывания одних жидких слоев относительно других. Упругость жидких кристаллов связана с локальным изменением ориентации длинных осей молекул. Электрооптические эффекты во внешних полях, происходящие при приложении электрического или магнитного поля к слою ЖК, обусловлены упругой деформацией молекул в объеме ЖК слоя и, соответственно, переориентацией *директора* ЖК в направлении вектора электрического поля [1].

В зависимости от знака диэлектрической анизотропии и исходной ориентации молекул НЖК можно наблюдать три разновидности деформаций:

1) Если  $\Delta\epsilon > 0$ , а исходная ориентация молекул (рис. 8, а) характеризуется расположением оптической оси НЖК (или *директора*  $L$ ) параллельно электродам вдоль оси  $OX$  ( $L \parallel OX$ ). В этом случае слой НЖК обладает двулучепреломлением с определенной величиной  $\Delta n$ . Электрическое поле, действуя против упругой силы взаимодействия молекул со стенкой, вызывает деформацию поперечного изгиба НЖК (S-деформацию, от английского слова *splay*), характеризуемую модулем упругости  $K_{11}$  (или *константой упругости Франка*). В достаточно сильном поле директор НЖК переориентируется вдоль оси  $OZ$  и двулучепреломление исчезает.

2) Если  $\Delta\epsilon < 0$  и в исходном состоянии  $L \parallel OZ$  (вертикальная ориентация; рис. 8, б). В этом случае двулучепреломление отсутствует, но появляется при наложении поля на слой жидкого кристалла. Поле стремится установить *директор* перпендикулярно оси  $OZ$ . Возникающая деформация продольного изгиба характеризуется модулем упругости  $K_{33}$  и называется В-эффектом (В-деформация, от английского слова *bend*).



**Рис. 8.** Жидкокристаллические ячейки с различными типами ориентации НЖК: S-деформация (а), V-деформация (б) и T-деформация (в). 1– стеклянные пластины, 2– прозрачный электрод, 3– ориентирующий слой, 4– спейсеры, 5– ЖК.

3) Третий вид деформации возникает при  $\Delta\varepsilon > 0$  в исходной ориентации, показанной на рис. 8, в. Здесь  $\mathbf{L} \parallel OX$  на одном из электродов, но  $\mathbf{L} \parallel OY$  на другом, вследствие чего НЖК приобретает закрученную на  $1/4$  витка оптически активную структуру. Эта структура поворачивает плоскость поляризации проходящего пучка света строго на  $90^\circ$ . Электрическое поле стремится установить директор НЖК вдоль оси  $OZ$  ( $\Delta\varepsilon > 0$ ), вызывая деформацию, в которой важную роль играет модуль вращательной упругости  $K_{22}$  (T-деформация кручения, от английского слова torsion). После переориентации НЖК оптическая активность исчезает; соответствующий электрооптический эффект носит название твист-эффекта (T-эффект в нашей классификации).

Процесс переориентации жидкого кристалла носит пороговый характер. Напряжение  $U_{th}$ , соответствующее порогу электрооптического эффекта, при котором начинается переориентация молекул, определяется выражением

$$U_{th} = \pi \frac{\sqrt{K_{11}}}{\sqrt{\Delta\varepsilon}}. \quad (5)$$

При приложении электрического поля к слою ЖК с параллельно-направленной ориентацией происходит уменьшение двулучепреломления света, проходящего через слой ЖК, о чем свидетельствует наблюдаемое изменение фазы светового потока, распространяющегося перпендикулярно слою. Это связано с изменением угла наклона *директора* ЖК  $\theta$  относительно оси  $Z$ , параллельной полю. *Директор* ЖК находится в невозмущенном состоянии, пока напряжение  $U$ , приложенное к ячейке электрического поля, ниже порога  $S$ -эффекта. Как только напряжение  $U$  становится больше  $U_{th}$ , молекулы начинают переориентироваться в положение, параллельное направлению электрического поля. Показатель преломления для обыкновенного луча  $n_o$  остается неизменным, а для необыкновенного луча показатель  $n_e$  уменьшается, стремясь к  $n_o$ . Изменение показателя преломления  $n(z)$  и оптической анизотропии  $\Delta n$  описывается следующими формулами [3]:

$$n(z) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta(z) + n_e^2 \sin^2 \theta(z)}}, \quad (6)$$

$$\Delta n = (1/d) \int_0^d (n(z) - n_o) dz. \quad (7)$$

Разность фаз  $\Delta\Phi$  связана с неоднородным изменением показателя преломления  $n(z)$  по толщине слоя ЖК для монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  соотношением:

$$\Delta\Phi = 2\pi d \Delta n / \lambda. \quad (8)$$

Для получения параметров ЖК ячейки в эксперименте рассмотрим плоскую ячейку, в которой ЖК ориентируется параллельно с начальным углом наклона  $\theta_p$ . При  $U > U_{th}$  величина фазовой задержки между необыкновенным и обыкновенным лучами после прохождения через слой ЖК света, выражается как

$$\Delta\Phi(U) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_e(\theta(z)) - n_0] dz. \quad (9)$$

Угол наклона  $\theta(z)$  зависит от внешнего напряжения. С увеличением напряжения угол  $\theta$  увеличивается, а разница фаз двух ортогональных волн постепенно уменьшается. Когда приложенное напряжение будет достаточно высоким, все молекулы в слое ЖК будут сориентированы перпендикулярно подложкам, а директор ЖК будет параллелен направлению поля, общая фазовая задержка двух ортогональных компонент приближается к нулю.

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

#### *Цель работы*

- определение толщины воздушного зазора между подложками плоскопараллельной ЖК ячейки, используя спектральную зависимость пропускания света;
- определение толщины воздушного зазора путем измерения емкости ЖК ячейки;
- расчет толщины зазора и сравнение результатов, полученных интерференционным и емкостным методами.

#### *Описание лабораторной работы*

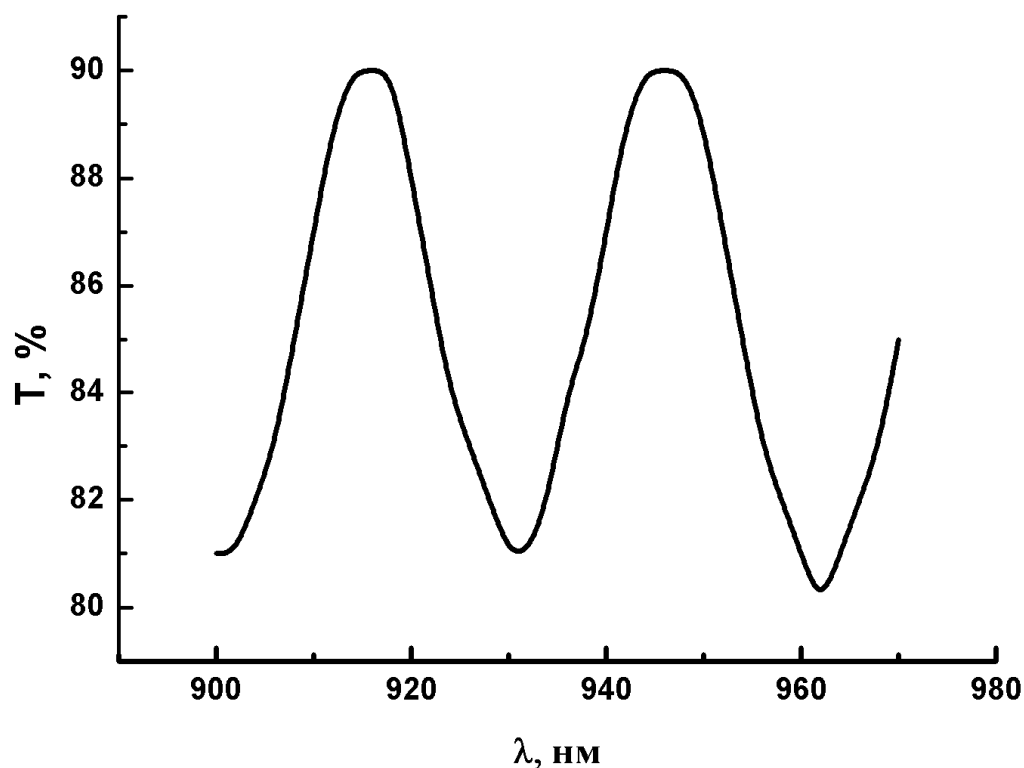
Толщина слоя жидкого кристалла является одним из важных параметров устройств на их основе. От ее величины зависят динамические и фазовые характеристики электроуправляемых модуляторов света. Обычно толщину ЖК слоя в плоскопараллельной ячейке, образованной двумя стеклянными подложками с фиксированным зазором между ними, определяют перед ее заполнением жидким кристаллом. Один из способов определения толщины воздушного зазора основан на измерении спектральной зависимости пропускания света через незаполненную ячейку. При изменении длины волны монохроматического света происходит интерференция света в воздушном зазоре ЖК ячейки. Спектральная зависимость пропускания ЖК ячейки, полученная на спектрофотометре СФ-46, приведена на рис. 9.

Используя спектральную зависимость пропускания ЖК ячейки, величину воздушного зазора  $d_T$  можно рассчитать по экстремумам, определив их порядковые номера и соответствующую им длину волны по формуле

$$d_T = \frac{(k+1)\lambda_{k+1}\lambda_k}{2(\lambda_{k+1} - \lambda_k)}, \quad (10)$$

где  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$  – порядковый номер минимума (или максимума),  $\lambda_{ki}$  – длина волны соответствующего минимума (или максимума).

Расчет толщины может производиться как по минимумам, так и по максимумам кривой пропускания. За толщину слоя ЖК  $d_T$  принимается среднее значение, полученное по результатам расчета.



**Рис. 9.** Спектральная зависимость интерференции света в воздушном зазоре.

Второй способ определения толщины ЖК слоя основан на измерении ёмкости ячейки. ЖК ячейку можно рассматривать как плоский конденсатор, обкладками которого служат стеклянные подложки с нанесёнными на их поверхность проводящим электродом и ориентирующим слоем. Ёмкость конденсатора  $C$  определяется выражением:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon s}{d}, \quad (11)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость воздуха;  $d$  – толщина,  $s$  – площадь.

Тогда толщину воздушного зазора  $d_C$  между двумя подложками ЖК ячейки можно определить по формуле:

$$d_C = \frac{\epsilon_0 \epsilon s}{C}. \quad (12)$$

Проведя измерения емкости ЖК ячейки с помощью цифрового измерителя E7-8 и рассчитав площадь подложки, можно найти величину воздушного зазора  $d_C$ , которая соответствует толщине слоя жидкого кристалла.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Перед началом измерений пропускания ЖК ячейки необходимо включить спектрофотометр, последовательно нажав кнопки «Сеть» и «Пуск», и дать прибору прогреться в течении 15-20 мин.
2. Настроить спектрофотометр в положение «ноль». Для этого необходимо закрыть шторку фотоприемника и нажать на кнопку Ш(0). Если показания цифровой шкалы попадают в диапазон 0,05-0,1, то спектрофотометр настроен. В противном случае, необходимо постепенно поворачивая рукоятку «Ноль» и каждый раз, проверяя значение цифровой шкалы нажатием кнопки Ш(0), установить нужное значение, соответствующее указанному выше диапазону.
3. Установить ЖК ячейку в «каретку» таким образом, чтобы ее плоскость была перпендикулярна направлению падающего монохроматического света. Закрывать крышку и открыть шторку фотоприемника. ВНИМАНИЕ! Категорически запрещается открывать шторку фотоприемника, если крышка не закрыта!
4. Настроить ширину щели. Для этого необходимо установить «каретку» в положение «опорного» пучка (т.е. без образца) и нажать на кнопку К(1). Если показания цифровой шкалы попадают в диапазон 0,5–5,0, то ширина щели подобрана верно. В противном случае поворотом рукоятки «Щель» изменить ширину щели и повторно нажать на кнопку К(1).
5. Установить необходимое значение длины волны. Диапазон измерений 900 – 1000 нм с шагом 2 нм. Управляя «кареткой», установить образец на место опорного пучка. Нажать на кнопку  $\tau(2)$ . Полученное цифровое значение является пропусканием ЖК ячейки в процентах. Произвести несколько повторных нажатий на кнопку  $\tau(2)$  и усреднить полученное значение. Изменяя длину волны, повторить измерения для всего диапазона.
6. Составить таблицу значений пропускания в соответствии с длиной волны падающего монохроматического света.
7. Отключить спектрофотометр, нажав на кнопку «Сеть».



### ***Обработка результатов эксперимента***

1. Построить график зависимости пропускания ЖК ячейки от длины волны  $I(\lambda)$ .
2. Определить значения длин волн, соответствующие экстремумам на кривой пропускания, и рассчитать значения величины воздушного зазора по максимумам и минимумам пропускания. Определить среднее значение  $d_T$ .
3. Измерить емкость незаполненной ЖК ячейки и рассчитать величину воздушного зазора, используя полученное значение емкости. Для расчета площади диаметр подложки принять равным 35 мм.
4. Сравнить значения воздушного зазора ячейки  $d_T$  и  $d_C$ , полученные разными методами.
5. Рассчитать погрешность измерения величины воздушного зазора.

### ***Содержание отчета по лабораторной работе***

1. Формулировка задания.
2. Описание эксперимента.
3. Графики, отображающие результаты измерений.
4. Расчет величины воздушного зазора.
5. Расчет погрешности.
6. Выводы.

## Лабораторная работа № 2

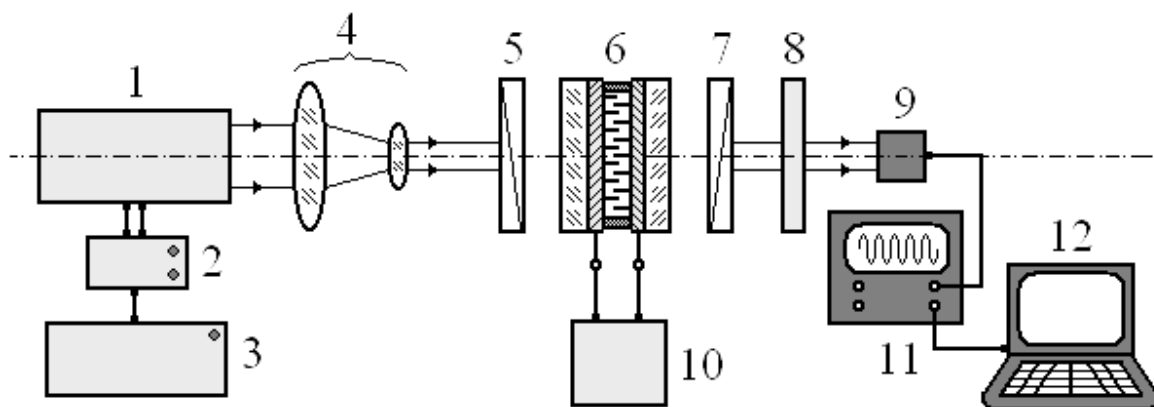
### ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА В СЛОЕ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

#### Цели работы

- изучение электрооптического S-эффекта в жидких кристаллах;
- определение порога электрооптического S-эффекта;
- определение фазовой задержки света.

#### Описание лабораторной работы

В этой работе исследуются ЖК ячейки с параллельно-направленной ориентацией (рис. 8, а), заполненные НЖК с  $\Delta\varepsilon > 0$ , в которых под действием электрического поля будет наблюдаться S-деформация молекул. На рис. 10 приведена схема установки для измерения электрооптических характеристик ЖК ячеек.



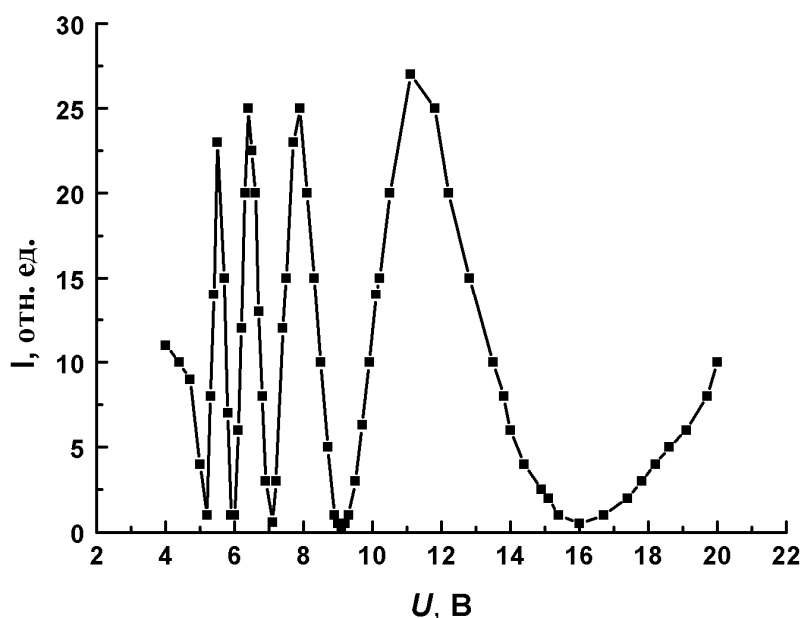
**Рис. 10.** Схема измерения электрооптических характеристик ЖК ячеек. 1 – полупроводниковый лазерный модуль, 2 – блок питания лазера, 3 – сетевой адаптер, 4 – коллиматор, 5 – поляризатор, 6 – ЖК ячейка, 7 – анализатор, 8 – система фильтров, 9 – фотодиод, 10 – генератор импульсов, 11 – осциллограф, 12 – компьютер.

Изменение интенсивности регистрируемого излучения связано со значением фазовой задержки следующей формулой:

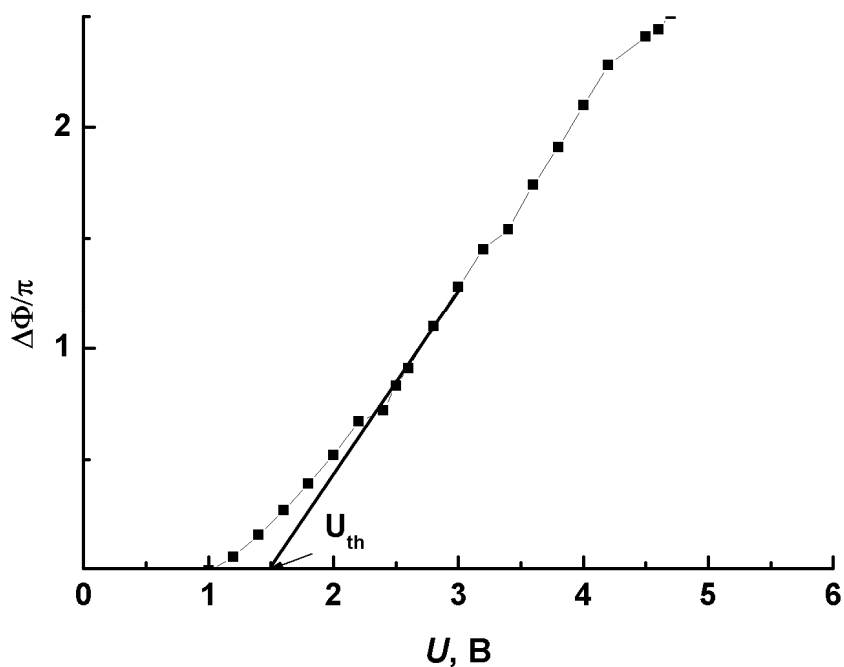
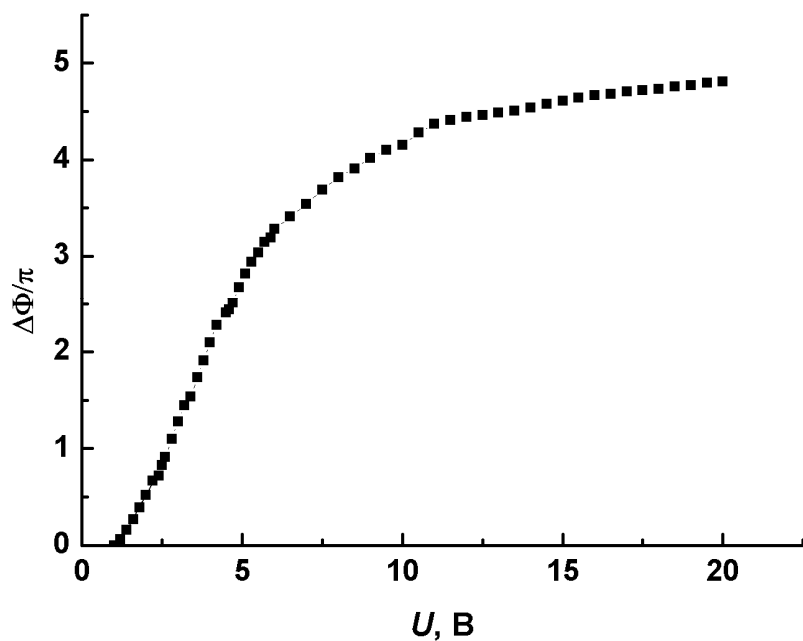
$$I = I_0 \sin^2 2\beta \sin^2(\Delta\Phi/2), \quad (13)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего на ячейку линейно поляризованного света,  $\beta$  – угол между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением *директора* ЖК. Максимальное пропускание света наблюдается при угле  $\beta=45^\circ$ . Поэтому ЖК ячейку (6) устанавливают между поляризатором (5) и анализатором (7) таким образом, чтобы длинная ось ЖК молекул лежала в плоскости ее вращения и составляла угол  $45^\circ$  с плоскостью поляризации падающего света. Излучение, прошедшее через анализатор (7), регистрируется с помощью фотодиода (9), сигнал от которого поступает на осциллограф (11) на рис.10. Возникающая в слое ЖК фазовая модуляция в скрещенных поляризаторах преобразуется в амплитудную, которую регистрируют по изменению интенсивности света  $I$ , проходящего через ячейку и отвечающего определенному значению фазовой задержки  $\Delta\Phi$ .

Экспериментальные данные для определения фазовой задержки и порогового напряжения получают путем измерения интенсивности пропускания излучения ЖК ячейкой в зависимости от переменного напряжения  $U$ , подаваемого с частотой 1 кГц. Измерения проводятся при комнатной температуре и постоянной интенсивности падающего излучения. Изменение пропускания  $I$  от напряжения представляет собой осциллирующую кривую, как показано на рис. 11, количество максимумов на которой зависит от толщины слоя ЖК.



**Рис.11.** Зависимость пропускания ЖК ячейки от переменного напряжения, подаваемого с частотой 1 кГц.



**Рис.12.** Зависимости фазовой задержки  $\Delta\Phi$  от напряжения  $U$  (a); определение порога электрооптического эффекта  $U_{th}$  (b)

Экспериментальные данные изменения пропускания используются для расчета фазовой задержки  $\Delta\Phi$  и построения зависимости ее от напряжения (Рис.12а). Пороговое напряжение S-эффекта  $U_{th}$  определяется линейной экстраполяцией зависимости  $\Delta\Phi(U)$  в области низких напряжений до 3 В, как показано на рис. 12(б).

### **Порядок выполнения работы**

1. Подсоединить п/п лазерный модуль (в случае необходимости проведения измерений в ИК диапазоне красный лазер используется в качестве юстировочного) и проверить правильность соединения.
2. Включить электропитание лазерного модуля. **ВНИМАНИЕ! Блок питания лазера включать только после подключения сетевого адаптера!**
3. Включить осциллограф. Проконтролировать положение поляризаторов в скрещенном состоянии – сигнал должен отсутствовать.
4. Установить ЖК ячейку в держатель, таким образом, чтобы ее плоскость была перпендикулярна направлению, падающего излучения. Далее вращая ячейку получить максимум пропускания, контролируя сигнал, поступающий на осциллограф. Это положение ЖК ячейки будет соответствовать углу равному  $45^\circ$ , между *директором* ЖК и плоскостью поляризации излучения. Для уменьшения сигнала можно использовать нейтральные светофильтры.
5. Включить генератор импульсов. Подключить ЖК устройство к генератору. Плавно увеличивая напряжение, фиксировать изменение пропускания по осциллографу. Провести измерение пропускания в интервале напряжений 1 до 20 В с шагом 1 В и составить таблицу значений интенсивности прошедшего через ЖК ячейку света в соответствии с поданным напряжением.
6. Отсоединить ЖК ячейку и извлечь ее из оправки.
7. По окончании измерений выключить приборы, отключить лазерный модуль (сначала выключается блок питания лазера, потом сетевой адаптер) и обесточить стенд.

### **Варианты задания**

1-вариант: «Исследование влияния длины волны излучения на фазовую модуляцию света в слое нематического жидкого кристалла». Измерить пропускания ЖК ячейки в зависимости от напряжения для двух длин волн 0,65 мкм и 1,55 мкм. Полученные данные измерений представить в виде графиков и таблицы. Сравнить данные эксперимента и расчета.

2-вариант: «Исследование влияния толщины слоя ЖК на фазовую модуляцию света для видимого света». Измерить пропускания 2-х ЖК ячеек с разной толщиной слоя ЖК в зависимости от напряжения на длине волны 0,65 мкм. Полученные данные измерений представить в виде графиков и таблицы. Сравнить данные эксперимента и расчета.

3-вариант: «Исследование влияния толщины слоя ЖК на фазовую модуляцию света в ИК области спектра». Измерить пропускания 2-х ЖК ячеек с разной толщиной слоя ЖК 14 и 8 мкм в зависимости от напряжения на длине волны 1,55 мкм. Полученные данные измерений представить в виде графиков и таблицы. Сравнить данные эксперимента и расчета.

4-вариант: «Исследование влияния оптической анизотропии ЖК на величину фазовой задержки в слое ЖК». Измерить пропускания 2-х ЖК ячеек, заполненных жидкими кристаллами с разными значениями оптической анизотропии с одинаковой толщиной слоя, в зависимости от напряжения на длине волны 0,65 мкм. Полученные данные измерений представить в виде графиков и таблицы. Сравнить данные эксперимента и расчета.

5-вариант: «Исследование влияния свойств поверхности ориентирующего слоя на границе раздела твердое тело – ЖК на фазовую задержку света в слое ЖК». Измерить пропускание 2-х ЖК ячеек с одинаковой толщиной слоя ЖК в зависимости от напряжения на длине волны 0,65 мкм. Полученные данные измерений представить в виде графиков и таблицы. Сравнить данные эксперимента и расчета.

### **Обработка результатов эксперимента**

1. Построить график зависимости пропускания ЖК ячейки от напряжения  $I(U)$ . Полученные экспериментальные значения нормируются по максимальному значению интенсивности и выражаются в относительных единицах.
2. Рассчитать значения фазовой задержки и построить график зависимости фазовой задержки от напряжения  $\Delta\Phi(U)$ .
3. Рассчитать теоретическое значение фазовой задержки, используя формулу (8), в соответствии с условиями задания (значения оптической анизотропии для ЖК приведены в таблице «Свойства нематических жидких кристаллов» см. приложение).
4. Экстраполяцией линейного участка графика зависимости  $\Delta\Phi(U)$  при напряжениях до 3 В определить графически значение порогового напряжения  $U_{th}$ .
5. Составить таблицу:

Таблица.

№ образца	НЖК	$d$ , мкм	$\lambda$ , мкм	$U_{th}$ , В	Эксперимен- тальное значение $\Delta\Phi/\pi$	Расчетное значение $\Delta\Phi/\pi$

***Содержание отчета по лабораторной работе***

1. Формулировка задания.
2. Описание эксперимента.
3. Графики, отображающие результаты измерений.
4. Таблица с полученными экспериментальными данными.
5. Выводы.

### Лабораторная работа № 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО УГЛА НАКЛОНА ДИРЕКТОРА ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

### *Цели работы*

- изучение электрооптического S-эффекта в жидких кристаллах;
- определение максимальной фазовой задержки света;
- определение начального угла наклона директора ЖК.

### *Описание лабораторной работы*

Оптические и динамические характеристики различных жидкокристаллических устройств зависят от величины начального угла наклона *директора*  $\theta_p$ , т.е. угла между направлением ориентации длинной оси молекул и поверхностью, ограничивающей слой жидкого кристалла, в отсутствии внешнего воздействия. Угол  $\theta_p$  зависит как от свойств жидкого кристалла, так и от структуры и физико-химических свойств ориентирующей поверхности твердого тела. Экспериментальный опыт разработки оптических ЖК модуляторов света показывает, что незначительные изменения угла  $\theta_p$  могут существенным образом влиять на фазовую модуляцию света и динамику переориентации молекул ЖК под действием электрического поля. Поэтому контроль этого параметра важен при изготовлении различных жидкокристаллических устройств.

При высоких напряжениях величина фазовой задержки становится линейной функцией обратного напряжения, поэтому максимальную величину фазовой задержки  $\Delta\Phi_{max}$  можно определить линейной экстраполяцией зависимости  $\Delta\Phi$  ( $1/U$ ) при  $1/U = 0$ , как показано на рис. 13 [2]. При  $1/U \rightarrow 0$  все ЖК молекулы, за исключением граничных слоев, будут перпендикулярны подложкам, а изменение фазовой задержки, вызванное приложенным напряжением, достигает своего максимума.

Для расчета теоретической зависимости фазовой задержки используются известные формулы разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами, прошедшими через слой ЖК. Максимальное значение фазовой задержки света в слое ЖК  $\Delta\Phi_{max}$  будет равно

$$\Delta\Phi_{max} = 2\pi/\lambda (n_e - n_o) d. \quad (14)$$

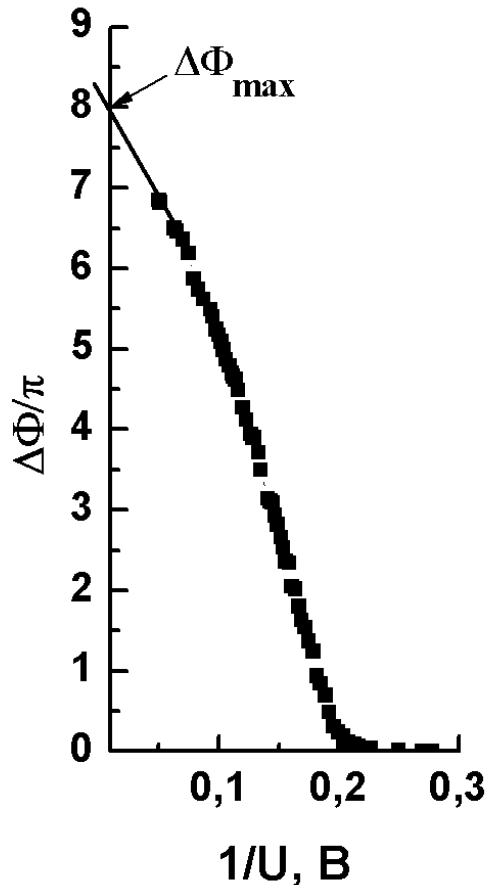
Коэффициент преломления необыкновенного луча зависит от угла наклона директора:



$$n_e(\theta_p) = \frac{n_0 n_e}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta_p + n_0^2 \cos^2 \theta_p}}. \quad (15)$$

Подставляя формулу (15) в формулу (13) для фазовой задержки получаем зависимость для разности фаз от угла  $\theta_p$ :

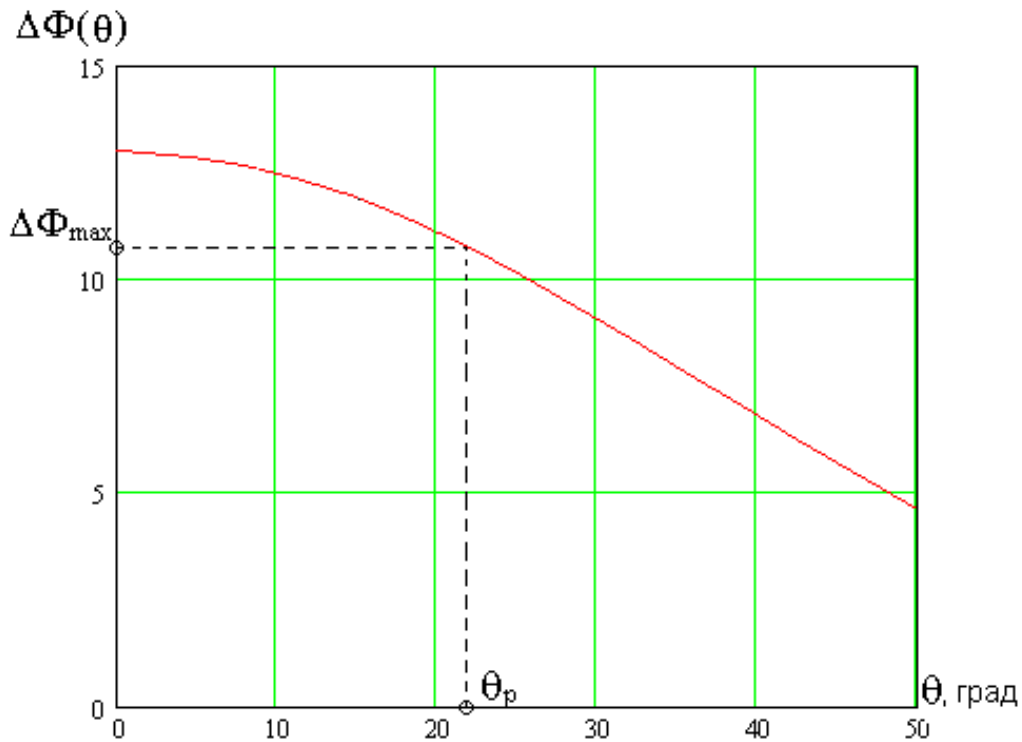
$$\Delta\Phi(\theta_p) = \frac{2\pi d n_0}{\lambda} \left[ \frac{n_e}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta_p + n_0^2 \cos^2 \theta_p}} - 1 \right]. \quad (16)$$



**Рис. 13.** Зависимость фазовой задержки  $\Delta\Phi$  от  $1/U$  ЖК ячейки.

Пример теоретической зависимости фазовой задержки от угла наклона  $\theta_p$ , рассчитанной для толщины ЖК слоя  $d = 14,5$  мкм и известных значений  $n_o = 1,808$  и  $n_e = 1,526$  в соответствии с формулой (16), показан на рис. 14.

Таким образом, найдя экспериментально максимальную фазовую задержку  $\Delta\Phi_{\max}$ , можно определить величину угла наклона *директора*  $\theta_p$  в ячейке с определенным зазором. Следует заметить, что при отклонении зазора ЖК ячейки на величину  $\Delta d = \pm 0,5$  мкм ошибка определения угла  $\Delta\theta$  может достигать  $10^\circ$  при углах  $\theta_p \leq 15^\circ$ . Поэтому при расчете этим методом необходимо предварительно точно определить толщину ЖК слоя. При углах наклона более  $20^\circ$  точность метода увеличивается, как видно из рис. 14.



**Рис. 14.** Теоретическая зависимость фазовой задержки от угла наклона директора молекул ЖК для ячейки с определенной толщиной.

Экспериментальная установка и методика измерения величины фазовой задержки описаны в лабораторной работе № 1.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Подсоединить п/п лазерный модуль (красный). Проверить правильность соединения.
2. Включить электропитание лазерного модуля. **ВНИМАНИЕ!** Блок питания лазера включать только после включения сетевого адаптера!
3. Включить осциллограф. Проконтролировать положение поляризаторов в скрещенном состоянии (по отсутствию сигнала).
4. Установить ЖК ячейку в держатель таким образом, чтобы ее плоскость была перпендикулярна направлению падающего излучения. Далее, вращая ячейку, получить максимум пропускания, контролируя сигнал, поступающий на осциллограф.
5. Включить генератор импульсов. Подключить ЖК устройство к генератору импульсов. Плавно увеличивая напряжение, фиксировать изменение пропускания по осциллографу. Провести измерение пропускания в интервале напряжений 1 до 20 В с шагом 1 В и составить таблицу значений интенсивности прошедшего через ЖК ячейку света в соответствии с поданным напряжением.
6. Отсоединить ЖК ячейку и извлечь ее из оправки.
7. По окончании измерений выключить приборы, отключить лазерный модуль (сначала выключается блок питания лазера, потом сетевой адаптер) и обесточить стенд.

### ***Обработка результатов эксперимента***

1. Составить таблицу значений интенсивности света, прошедшего через ЖК ячейку, в соответствии с подаваемым напряжением.
2. Рассчитать по экспериментальным данным значения фазовой задержки и построить график зависимости фазовой задержки от напряжения  $\Delta\Phi(U)$ .
3. Построить график обратной зависимости  $\Delta\Phi(1/U)$ . Экстраполяцией линейного участка при  $1/U \rightarrow 0$  определить  $\Delta\Phi_{\max}$ .
4. По формуле (16) рассчитать теоретическую зависимость фазовой задержки от угла наклона, построить график и определить угол наклона директора, соответствующий экспериментальному значению  $\Delta\Phi_{\max}$ .
5. Составить таблицу:

Таблица.

№ образца	НЖК	$d$ , мкм	$\lambda$ , мкм	Экспериментальное значение $\Delta\Phi_{\max} / \pi$	$\theta_p$ , град.

***Содержание отчета по лабораторной работе***

1. Формулировка задания.
2. Описание эксперимента.
3. Графики, отображающие результаты измерений.
4. Таблица с полученными экспериментальными данными.
5. Выводы.

## Лабораторная работа № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ЧАСТОТЫ ДВУХЧАСТОТНОГО НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

#### *Цели работы*

- изучение электрооптического S-эффекта в жидких кристаллах;
- определение порога электрооптического S-эффекта;
- определение переходной частоты двухчастотного НЖК.

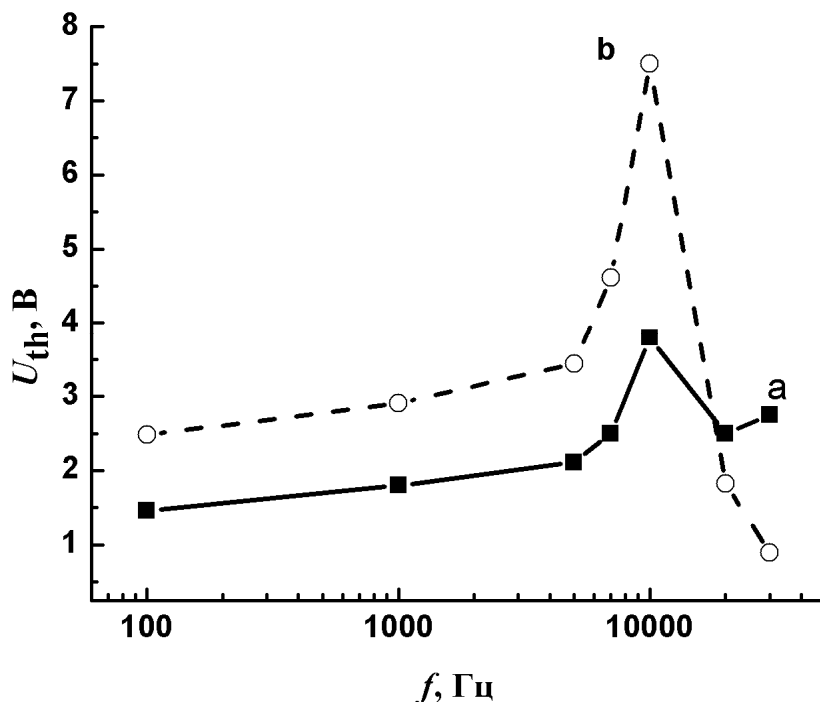
#### *Описание лабораторной работы*

Двухчастотный нематический жидкий кристалл (ДЧ НЖК) представляет собой смесь, состоящую из молекул жидких кристаллов с положительной и отрицательной диэлектрическими анизотропиями. Знак диэлектрической анизотропии  $\Delta\epsilon = \epsilon_e - \epsilon_o$  такой смеси может изменяться от положительных до отрицательных значений при изменении частоты электрического поля. Возможность инверсии знака диэлектрической анизотропии на некоторой переходной частоте  $f_c$  позволяет управлять процессами переключения в жидком кристалле.  $\Delta\epsilon > 0$  на низких частотах (НЧ), когда  $f_{НЧ} < f_c$ , и  $\Delta\epsilon < 0$  на высоких частотах (ВЧ) при  $f_{ВЧ} > f_c$ .

С увеличением частоты  $f$  приложенного электрического поля  $\epsilon_e$  уменьшается, в то время как  $\epsilon_o$  остается постоянной. Таким образом, при приложении к слою ДЧ НЖК с параллельно-направленной ориентацией молекул напряжения с частотой  $f_{НЧ}$  происходит переориентация диполей молекул с положительной диэлектрической анизотропией параллельно вектору электрического поля. Приложение напряжения с частотой  $f_{ВЧ}$  вызывает переориентацию диполей молекул с отрицательной диэлектрической анизотропией перпендикулярно вектору электрического поля. В результате этого происходит процесс релаксации молекул и возвращения директора ЖК в исходное положение.

При  $S$ -деформации НЖК порог электрооптического эффекта Фредерикса соответствует напряжению  $U_{th}$  электрического поля, при котором начинает изменяться угол наклона директора ЖК относительно плоскости подложки (см. лабораторную работу №2). В соответствии с формулой (5) вблизи переходной частоты ДЧ НЖК при  $\Delta\epsilon \rightarrow 0$  должно наблюдаться резкое увеличение  $U_{th}$  (рис. 15). Величину  $U_{th}$ , при которой начинается переориентация молекул ЖК, можно определить экспериментально экстраполяцией линейного участка зависимости  $\Delta\Phi(U)$

при  $U \rightarrow 0$ . С этой целью необходимо получить кривые изменения пропускания от напряжения  $U$ , приложенного с разной частотой, и рассчитать соответствующие им значения фазовой задержки [6].



**Рис. 15.** Зависимости величины порогового напряжения S-эффекта от частоты переменного напряжения, подаваемого на НЖК ячейки.

Экспериментальная установка и метод измерения величины фазовой задержки описаны в лабораторной работе № 2.

### **Порядок выполнения работы**

1. Подсоединить п/п лазерный модуль (в случае необходимости проведения измерений в ИК диапазоне красный лазер используется в качестве юстировочного) и проверить правильность соединения.
2. Включить электропитание лазерного модуля. **ВНИМАНИЕ!** Блок питания лазера включать только после подключения сетевого адаптера!
3. Включить осциллограф. Проконтролировать положение поляризаторов в скрещенном состоянии – сигнал должен отсутствовать.
4. Установить ЖК ячейку в держатель таким образом, чтобы ее плоскость была перпендикулярна направлению падающего излучения. Далее, вращая ячейку, получить максимум пропускания, контролируя сигнал,

- поступающий на осциллограф. Это положение ЖК ячейки будет соответствовать углу равному  $45^\circ$ , между *директором* ЖК и плоскостью поляризации излучения. Для уменьшения сигнала можно использовать нейтральные светофильтры.
5. Включить генератор импульсов. Выставить значение частоты подаваемых импульсов – 1 кГц. Подключить ЖК устройство к генератору. Плавно увеличивая напряжение, фиксировать изменение пропускания по осциллографу. Провести измерение пропускания в интервале напряжений 1 до 20 В с шагом 1 В и составить таблицу значений интенсивности прошедшего через ЖК ячейку света в соответствии с поданным напряжением.
  6. Повторить измерения, описанные в п. 5, для частот 2, 5, 7, 10, 15, 20 кГц.
  7. Отсоединить ЖК ячейку и извлечь ее из оправки.
  8. По окончании измерений выключить приборы, отключить лазерный модуль (сначала выключается блок питания лазера, потом сетевой адаптер) и обесточить стенд.

### ***Обработка результатов эксперимента***

1. Составить таблицу значений интенсивности света, прошедшего через ЖК ячейку, в соответствии с подаваемым напряжением и частотой следования импульсов.
2. Рассчитать по экспериментальным данным значения фазовой задержки и построить графики зависимости фазовой задержки от напряжения  $\Delta\Phi(U)$ .
3. Экстраполяцией линейного участка графиков зависимости  $\Delta\Phi(U)$  при напряжениях до 3 В определить графически значения порогового напряжения  $U_{th}$ .
4. Построить график зависимости порогового напряжения  $U_{th}(f)$  от частоты переменного напряжения, подаваемого на ЖК ячейку.
5. Определить переходную частоту двухчастотного жидкого кристалла.

### ***Содержание отчета по лабораторной работе***

1. Формулировка задания.
2. Описание эксперимента.
3. Сводные графики  $I(U)$ ,  $\Delta\Phi(U)$  для всех исследуемых частот.
4. График  $U_{th}(f)$ .
5. Выводы.

## Лабораторная работа № 5

### ДИСПЕРСИЯ ОПТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА В БЛИЖНЕЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

#### *Цели работы*

- изучение электрооптического S-эффекта в жидких кристаллах;
- определение максимальной фазовой задержки;
- определение дисперсии оптической анизотропии жидкого кристалла.

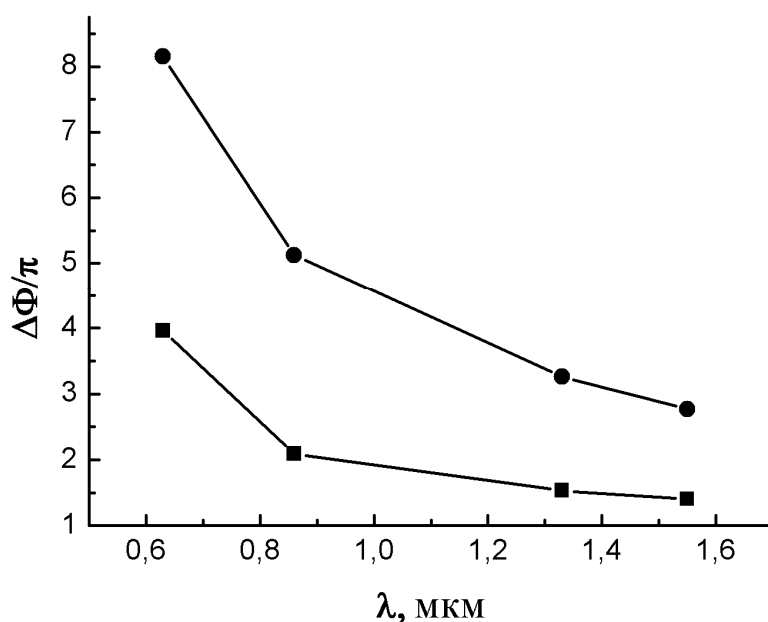
#### *Описание лабораторной работы*

Двулучепреломление НЖК зависит от длины волны и при переходе в ближнюю ИК область оптическая анизотропия может уменьшаться на 15-20 % по сравнению с  $\Delta n$  для видимой области спектра. Для измерения двулучепреломления в видимой и ИК областях спектра используют различные способы измерения  $\Delta n$ . Для определения дисперсии оптической анизотропии двухчастотного ЖК в ближней ИК-области спектра используются экспериментальные данные, полученные из зависимостей пропускания слоя ЖК от напряжения [7].

Уменьшение двулучепреломления можно контролировать по изменению фазы светового потока, распространяющегося перпендикулярно слою. Максимальная фазовая задержка  $\Delta\Phi_{\max}$  связана с оптической анизотропией для монохроматического света и длиной волны формулой (8), по которой можно рассчитать оптическую анизотропию жидкого кристалла, если известна толщина слоя и значение  $\Delta n$  для одной длины волны. Для этого необходимо получить экспериментальные зависимости пропускания ЖК ячеек на длинах волн: 0,63 мкм, 0,86 мкм, 1,33 мкм и 1,55 мкм от переменного напряжения, подаваемого с частотой 1 кГц. Для этого используется электрооптическая схема, показанная на рис. 10 и методика, описанная в лаб. работе №2.

При увеличении длины волны от видимого до ИК диапазона спектра наблюдается уменьшение  $\Delta\Phi$ . При постоянной толщине слоя ЖК уменьшение фазовой задержки может быть вызвано изменением длины волны, либо оптической анизотропии НЖК. Путем экстраполяции графика  $\Delta\Phi(1/U)$  можно определить максимальную фазовую задержку  $\Delta\Phi_{\max}$ . На рис. 18 показаны зависимости максимальной фазовой задержки для трех ЖК ячеек от длины волны. Дисперсия оптической анизотропии для длин волн 0,86, 1,33 и 1,55 мкм оценивается путем использования известного значения  $\Delta n$  для длины волны 0,63 мкм и значений максимальной фазовой задержки, полученных экспериментально [7].





**Рис. 16.** Зависимость максимальной фазовой задержки от длины волны.

### **Порядок выполнения работы**

1. Подсоединить п/п лазерный модуль с длиной волны 0,65 мкм и проверить правильность соединения.
2. Включить электропитание лазерного модуля. ВНИМАНИЕ! Блок питания лазера включать только после подключения сетевого адаптера!
3. Включить осциллограф. Проконтролировать положение поляризаторов в скрещенном состоянии – сигнал должен отсутствовать.
4. Установить ЖК ячейку в держатель, таким образом, чтобы ее плоскость была перпендикулярна направлению, падающего излучения. Далее вращая ячейку получить максимум пропускания, контролируя сигнал, поступающий на осциллограф. Это положение ЖК ячейки будет соответствовать углу равному  $45^\circ$ , между *директором* ЖК и плоскостью поляризации излучения. Для уменьшения сигнала можно использовать нейтральные светофильтры.
5. Включить генератор импульсов. Выставить значение частоты подаваемых импульсов – 1 кГц. Подключить ЖК устройство к генератору. Плавно увеличивая напряжение, фиксировать изменение пропускания по осциллографу. Провести измерение пропускания в интервале напряжений 1 до 20 В с шагом 1 В и составить таблицу значений интенсивности прошедшего через ЖК ячейку света в соответствии с поданным напряжением.

6. Повторить измерения, описанные в п. 5, для лазерных модулей с длиной волны 0,86, 1,33, 1,55 мкм.
7. Отсоединить ЖК ячейку и извлечь ее из оправки.
8. По окончании измерений выключить приборы, отключить лазерный модуль (сначала выключается блок питания лазера, потом сетевой адаптер) и обесточить стенд.

### **Обработка результатов эксперимента**

1. Составить таблицу значений интенсивности света, прошедшего через ЖК ячейку, в соответствии с подаваемым напряжением и длиной волны излучения.
2. Рассчитать по экспериментальным данным значения фазовой задержки и построить графики зависимости фазовой задержки от напряжения  $\Delta\Phi(U)$ .
3. Экстраполяцией линейного участка графиков зависимости  $\Delta\Phi(1/U)$  определить  $\Delta\Phi_{\max}$ .
4. Построить график зависимости максимальной фазовой задержки  $\Delta\Phi(\lambda)$  от длины волны падающего на ЖК ячейку излучения.
5. Рассчитать значения оптической анизотропии для длин волн 0,86, 1.33 и 1,55 мкм.
6. Составить таблицу:

№	Ориентирующее покрытие	Длина волны, мкм							
		0,63		0,86		1,33		1,55	
		$\frac{\Delta\Phi_{\max}}{\pi}$	$\Delta n$	$\frac{\Delta\Phi_{\max}}{\pi}$	$\Delta n$	$\frac{\Delta\Phi_{\max}}{\pi}$	$\Delta n$	$\frac{\Delta\Phi_{\max}}{\pi}$	$\Delta n$

7. Оценить уменьшение оптической анизотропии при переходе в ИК область спектра.
8. С помощью полученного значения  $\Delta n$  рассчитать минимальную толщину слоя жидкого кристалла, необходимую для получения фазовой задержки, равной  $2\pi$  в ЖК ячейке на длине волны 1,55 мкм.

### **Содержание отчета по лабораторной работе**

1. Формулировка задания.
2. Описание эксперимента.
3. Сводные графики  $I(U)$ ,  $\Delta\Phi(U)$  для всех исследуемых длин волн.
4. График  $\Delta\Phi(\lambda)$ .
5. Таблица с результатами эксперимента и расчета.
6. Выводы.

## Раздел II

### ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ МОДУЛЯТОРЫ СВЕТА

#### 2.1. Устройство и принцип работы

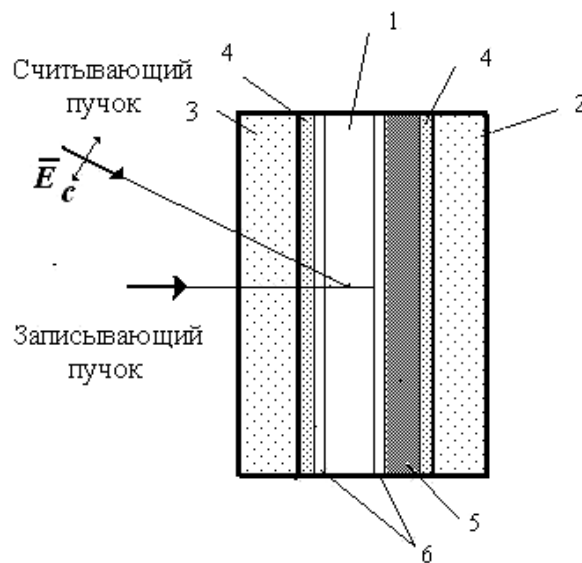
Электроуправляемый жидкокристаллический модулятор света представляет собой плоскую ячейку, состоящую из двух параллельных подложек, на которые последовательно нанесены слой прозрачного проводящего электрода на основе окислов индия и олова (indium tin oxide - ИТО) и ориентирующий слой, задающий начальную ориентацию длинных осей молекул ЖК. Прозрачные электроды имеют внешние выводы, к которым прикладывается управляющее электрическое поле. ЖК ПМС используют для своей работы способность ориентированных слоев жидких кристаллов изменять электрооптические свойства под действием электрических и магнитных полей. Одним из наиболее часто используемых в реальных устройствах эффектов является эффект *электроуправляемого двулучепреломления*.

Оптически управляемые ЖК ПМС относятся к числу наиболее совершенных приборов данного класса. Исторически первым и наиболее простым типом таких ПМС является структура фотопроводник – жидкий кристалл (ФП – ЖК), конструктивно представляющая собой плоскую ячейку типа сэндвич, отличающуюся от электроуправляемого модулятора наличием фотослоя (рис.17).

Записывающий свет входного изображения создает в фотопроводнике пространственное распределение фотогенерированных свободных носителей заряда, которое формирует рельеф сопротивления структуры, соответствующий входному изображению. На освещенных участках активное сопротивление слоя фотопроводника уменьшается, а емкость увеличивается, что приводит к перераспределению приложенного напряжения между слоями структуры и увеличению напряжения, приложенного к ЖК.

Прошедший через слой ЖК считывающий световой поток модулируется в соответствии с показателем преломления. При наличии в схеме опроса поляризаторов воспроизводится амплитудная картина преобразования изображения. Таким образом, оптическое управление, в конечном счете, также сводится к воздействию на ЖК электрического поля фотоиндуцированного в слое ФП объемного заряда и перераспределению внешнего напряжения между слоями ЖК и ФП, которое происходит в результате резкого уменьшения сопротивления последнего при засветке.

ЖК ПМС на основе структуры ФП – ЖК предназначены для преобразования излучения по спектру, когерентности и мощности. Они разрабатывались, прежде всего, для построения когерентно-оптических процессоров обработки изображений в реальном масштабе времени, в основном, методами фурье-оптики и голографии. Помимо использования в нелинейных оптических логических процессорах фазовые оптически управляемые ЖК ПМС применяются для решения ряда задач адаптивной оптики, например, для коррекции aberrаций волнового фронта.



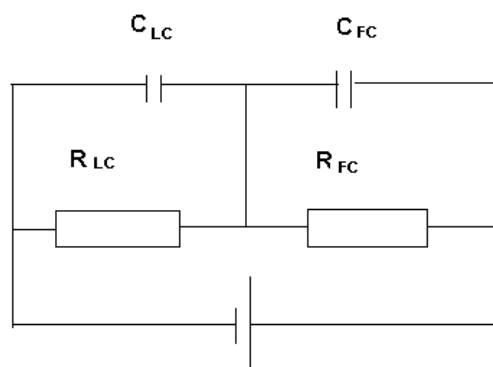
**Рис. 17.** Схема оптически управляемой структуры ФП – ЖК просветного типа. Слой ЖК (1) расположен между двумя параллельными стеклянными подложками (2 и 3). Каждая подложка покрыта прозрачным проводящим электродным слоем (4). На поверхность прозрачного электрода на подложке (2) нанесен фоточувствительный полупроводниковый слой (5). Для получения ориентации ЖК на поверхность полупроводника (5) на подложке (2) и поверхность прозрачного электрода (4) на подложке (3) нанесен ориентирующий слой (6). Толщина зазора между подложками фиксируется с помощью прокладок из фторопласта.

К основным характеристикам оптически адресуемых структур ФП – ЖК, определяющим их принципиальную пригодность для использования в когерентно-оптических процессорах обработки изображений, адаптивной оптике и динамической голографии, относятся чувствительность к записываемому излучению, пространственное разрешение, быстродействие и дифракционная эффективность.

Оптически управляемые ЖК ПМС бывают просветного и отражательного типов. Основной недостаток ПМС просветного типа –

ограничение на длину волны считывающего света (ФП должен быть к ней нечувствителен). Наиболее совершенный тип структур ФП – ЖК, в котором достигнуто максимальное ослабление воздействия на фоточувствительный слой – это ПМС со сплошными или дискретными (мозаичными) отражающими слоями, введенными в структуру между ФП и ЖК. В качестве сплошного отражающего покрытия используются различные диэлектрические зеркала, которые, как правило, представляют собой систему чередующихся слоев окислов кремния и тугоплавких металлов. Коэффициент отражения таких зеркал для считывающего света должен быть не меньше 90%. Надежная развязка между каналами записи и считывания достигается за счет блокирующего (поглощающего) слоя, например, слоя аморфного углерода.

Эквивалентная электрическая схема одиночного элемента изображения ПМС (сплошные электроды) в первом приближении может быть представлена последовательно соединенными сопротивлениями ФП и ЖК, зашунтированными соответствующими емкостями (рис.18).



**Рис. 18.** Эквивалентная схема структуры ФП – ЖК.

Для нормального функционирования ПМС необходимо, чтобы в отсутствие записывающего излучения напряжение на слое ЖК было ниже порогового ( $U_n$ ), а под действием записывающего излучения, за счет изменения проводимости ФП, напряжение на слое ЖК должно повышаться до напряжения насыщения ( $U_n$ ). Оценим величины необходимых значений темновой проводимости ФП и приращения проводимости под действием записывающего излучения.

Напряжение на ЖК слое можно записать как

$$U_{\Phi\Pi} = E_{\Phi\Pi} d_{\Phi\Pi} = \frac{U}{1 + \frac{d_{\Phi\Pi} \sigma_{\text{ЖК}}}{d_{\text{ЖК}} \sigma_{\Phi\Pi}}}, \quad (17)$$

где  $d_{\Phi\Pi}$   $d_{\text{ЖК}}$  – толщины слоев ФП и ЖК, а  $\sigma_{\Phi\Pi}$  и  $\sigma_{\text{ЖК}}$  – их проводимости.

Без записывающего излучения, когда проводимость ФП равна темновой, напряжение на слое ЖК должно быть меньше порогового. Это условие выполняется, если

$$\sigma_{\Phi\Pi}^T \leq \frac{\sigma_{\text{ЖК}} d_{\Phi\Pi} U_n}{d_{\text{ЖК}} (U_0 - U_n)}. \quad (18)$$

Сопротивление большинства ЖК имеет порядок  $10^{12}$  Ом·см, а пороговое напряжения 1–2 В. Толщины слоев ФП и ЖК соизмеримы. Напряжение питания ПМС, даже если проводимости ФП и ЖК одного порядка, должно быть равным  $U=2U_n$ . Так как обычно  $U_n=3-5$  В, напряжение питания для оценки можно положить 10 В. Подставляя в формулу (6) значения параметров получим, что темновая проводимость ФП не должна превышать  $10^{-13}$  Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ .

Приведенные выше выкладки справедливы для режима питания структуры постоянным напряжением. При питании переменным напряжением, из-за шунтирующего действия эквивалентных емкостей слоев ФП и ЖК темновая проводимость ФП должна быть заметно ниже. Пользуясь формулой (18) нетрудно показать, что даже при оптимальном согласовании импедансов слоев ФП и ЖК, из-за их шунтирующего действия, чувствительность при питании переменным напряжением будет ниже, чем при питании постоянным.

При использовании структур ФП – ЖК в режиме реверсивных голографических сред обычно применяется режим питания прямоугольными низкочастотными импульсами напряжения (однополярными или биполярными), синхронизированными с записывающими световыми импульсами. Частота следования импульсов находится в интервале 2-10 Гц. На таких частотах шунтирующее действие емкостей слоев сказывается незначительно, а импульсное питание (особенно биполярное) позволяет существенно снизить негативное влияние процессов накопления заряда на границах раздела фаз.

Максимальный контраст полученного изображения характеризуется контрастным отношением  $K=I_{max}/I_0$ , где  $I_{max}$  – максимальная интенсивность

прошедшего через структуру считывающего света при наличии записывающего света,  $I_0$  – интенсивность считывающего излучения в отсутствие записывающего света. Информацию о способности ПМС передавать мелкие детали дает частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), представляющая собой зависимость контраста переданного изображения от пространственной частоты проектируемой решетки. Под разрешением ПМС подразумевают пространственную частоту на полуспаде ЧКХ, но пользуются и классическим определением разрешающей способности – пространственная частота при предельно разрешимом глазом контрасте. Разрешающая способность ПМС зависит от толщины слоев ФП и ЖК, их удельных сопротивлений и некоторых других факторов, например, от диэлектрической проницаемости.

## 2.2. Чувствительность к записывающему излучению

Для любой оптически управляемой структуры важнейшим параметром является чувствительность к записывающему излучению, а основной характеристикой является сенситометрическая (зависимость интенсивности промодулированного структурой считывающего излучения от интенсивности записывающего излучения) в случае неголографического применения и зависимость дифракционной эффективности от интенсивности записывающего излучения при использовании ПМС в качестве реверсивных голографических сред.

При использовании ЖК ПМС для записи динамических голограмм встает вопрос о получении максимально возможной для данной структуры дифракционной эффективности (ДЭ), которая в случае записи решетки с симметричным профилем штриха достигается при условии равенства  $\pi$  фотоиндуцированного фазового набегу. (Дифракционная эффективность определяется как отношение интенсивности излучения в первом порядке дифракции к интенсивности прошедшего через структуру считывающего излучения в отсутствие записывающего света). Данное утверждение следует из того, что ДЭ ЖК ПМС на основе структур ФП – ЖК при нормальном падении считывающего излучения описывается квадратом функции Бесселя соответствующего порядка от глубины фазовой модуляции считывающего пучка.

Максимальный фотоиндуцированный фазовый набег определяется чувствительностью оптически управляемого ЖК ПМС к записывающему излучению. Чувствительность структуры в целом зависит, в значительной степени, от чувствительности используемого фотопроводника, но определяется не только ею. Поскольку молекулы ЖК, в конечном счете, управляются электрическим полем, то при одинаковой чувствительности ФП

слоев и одинаковом ЖК слое более чувствительной оказывается структура, которая раньше достигает набега фазы  $\pi$  по напряжению, то есть та, у которой меньше начальный угол наклона директора ЖК к подложке.

Что касается самого фотопроводника, то его чувствительность определяется отношением фототока к темновому току. Для нормальной работы ЖК ПМС это отношение должно составлять не менее трех порядков. С другой стороны, темновое сопротивление ФП, как уже говорилось ранее, должно быть примерно на порядок выше сопротивления ЖК и составлять не менее  $10^{12}$ – $10^{13}$  Ом·см. Данные требования делают невозможным использование в ЖК ПМС классических хорошо проводящих кристаллических фотопроводников в чистом виде.

В качестве фоточувствительных слоев в описанных структурах применяются слои аморфных фотопроводников, причем оба основных класса этих веществ: халькогенидные стекла и гидрогенизированные элементы IV группы. К достоинствам этих веществ относятся их относительная дешевизна (по сравнению с выращиванием кристаллов) и простота получения элементов большой площади, поскольку они изготавливаются либо вакуумным напылением, либо осаждением из газовой фазы.

К первому классу относятся, так называемые, бескислородные халькогенидные стекла. Эти вещества представляют собой химические соединения элементов VI группы (S, Se, Te), имеющие валентность II, с элементами V группы (As, Sb), обычно проявляющие валентность, равную III. Таким образом, общую формулу халькогенидного стекла стехиометрического состава можно записать как  $A_2B_3$ . К данной группе веществ относятся сульфид и селенид мышьяка ( $As_2S_3$  и  $As_2Se_3$ ), стибнит ( $Sb_2S_3$ ). Эти вещества склонны к стеклованию при охлаждении, то есть, застывая, раствор превращается в настоящее аморфное стекло, причем это их свойство сохраняется в очень широком диапазоне концентраций компонентов, при очень значительном отклонении от стехиометрии. В общем виде формулу селенида мышьяка можно, например, записать как  $As_xSe_{1-x}$ , где  $0 \leq x < 0,6$ . Варьируя процентный состав ФП, можно сдвигать максимум его спектральной чувствительности в пределах всего видимого спектра: от синей области (для чистого аморфного селена и составов с содержанием мышьяка менее 20 ат.%) до красной области (для составов с содержанием мышьяка 40 – 50 ат.%). К сожалению, составы с большим содержанием мышьяка являются нестабильными. Причину возникновения нестабильности можно понять, если представить структуру стекла как длинную нить из атомов селена (координационное число 2), которая разветвляется в местах вкрапления трехвалентных атомов мышьяка (модель пересекающихся цепей). Подобная структура будет существовать при концентрации мышьяка от



стехиометрии и менее, причем она может быть построена одним единственным способом и потому стабильна. Если же мышьяка становится больше 40 ат.%, то из-за нехватки селена химическое упорядочение не может быть полным. (Химически упорядоченной считается структура, в которой все связи гетерополярны.) Существует определенное количество гомополярных связей As-As. Такая случайная сетка может быть построена несколькими способами, поскольку при заданном составе сплава доля атомов избыточного компонента, находящихся в том или ином локальном окружении, не может быть определена однозначно. Система является неустойчивой и может переходить из одного состояния в другое под действием внешних воздействий, в том числе, света и напряжения.

Фотослои  $As_xSe_{1-x}$  с содержанием мышьяка менее 40 ат. % ранее вполне успешно использовались в ЖК ПМС. Они легко согласуются по электрическим параметрам с жидким кристаллом и помимо широкого спектрального диапазона чувствительности и хорошего разрешения (за счет высокого темнового сопротивления ФП записанное изображение не расплывается в поперечном направлении) очень просты в изготовлении. Стекло нужного состава может быть сварено заранее, поскольку, как показал опыт, процентный состав достаточно хорошо переносится на подложку в процессе простого термического испарения. Кроме того, процедура напыления не требует высокого вакуума. Дело в том, что халькогенидные стекла обладают свойством самокомпенсации, которое выражается в закреплении уровня Ферми посередине запрещенной зоны. При этом полупроводник, в который добавлено до 1% легирующих (или, как принято говорить о примесях в халькогенидных стеклообразных полупроводниках, модифицирующих) примесей, будет проявлять собственную проводимость. Цифра совершенно фантастическая, если вспомнить, что в классических кристаллических полупроводниках на порядок меньшее количество примесей приводит к полному вырождению.

Ко второму классу ФП, используемых в качестве фоточувствительных слоев в ЖК ПМС, относятся гидрогенизированные элементы IV группы: германий, кремний, карбид кремния. С химической точки зрения эти вещества не являются в полном смысле аморфными, то есть стеклами. Они имеют достаточно жесткую сетку, характерную для элементов данной группы (хотя углы, образованные химическими связями, могут быть искажены по сравнению с кристаллами за счет дефектов). При этом оборванные химические связи, неизбежно возникающие в процессе осаждения пленки, пассивируются водородом. Гидрогенизированные германий, кремний, карбид кремния имеют достаточно чистую запрещенную зону и потому поддаются легированию, как кристаллические полупроводники. Используя эти вещества,

легированные донорными и акцепторными примесями, можно создавать диодные *p-n* и *p-i-n* структуры. Технология получения гидрогенизированных кремния и карбида кремния с различным уровнем легирования достаточно хорошо отработана, поскольку эти материалы очень удобны для создания фотоэлектрических преобразователей большой площади и являются основными материалами, используемыми для изготовления солнечных элементов и батарей.

Преимуществами гидрогенизированных элементов IV группы перед халькогенидами является большая стабильность и механическая прочность, а также большая подвижность носителей, позволяющая ПМС работать при питании переменным напряжением. Преимущества такого способа питания очевидны: он существенно снижает все эффекты, связанные с накоплением объемного заряда на границах раздела фаз, повышая быстродействие и срок службы, а главное, позволяет создавать структуры отражательного типа, в которых снимается ограничение на длину волны считывающего света. Напомним, что в структурах, работающих в просветном режиме, ФП должен быть нечувствителен к длине волны считывающего излучения.

### 2.3. Быстродействие

Быстродействие ЖК ПМС определяется как величина, обратная времени отклика структуры на записывающий импульс, и измеряется в герцах. Оно определяется суммарным временем включения и выключения, за которое интенсивность прошедшего через структуру считывающего света спадает до 0,1 от максимального значения и вновь увеличивается до 0,9 от максимального значения.

Малое быстродействие является одним из основных недостатков оптически управляемых ЖК устройств. У большинства таких структур оно не достигает даже телевизионного стандарта частоты смены кадра, который составляет 25 Гц. Этот недостаток носит принципиальный характер, поскольку образующийся в процессе работы объемный заряд на межфазной границе ФП – ЖК при стандартных значениях проводимости прилегающих слоев самостоятельно стекает очень медленно. Это длительное рассасывание заряда еще более замедляет процесс естественной релаксации ЖК слоя. А даже для электроуправляемых структур быстродействие, как правило, определяется именно временем релаксации ЖК, которое больше времени отклика и которым значительно труднее управлять. Некоторые способы повышения быстродействия электроуправляемых структур применимы и к оптически управляемым структурам. К таким способам относится возможное уменьшение толщины ЖК слоя, как за счет использования кристалла с большой оптической анизотропией, так и за счет введения в структуру

зеркала, повышение температуры для уменьшения вязкости. Используются и двухчастотные ЖК смеси, допускающие управление процессом релаксации, отличительной особенностью которых является смена знака диэлектрической анизотропии при определенной частоте питающего напряжения. Иногда применяются специальные способы, такие как опустошение заполненных электронных ловушек на межфазной границе мощным световым импульсом.

С другой стороны, с оптически управляемыми структурами стараются, по возможности, работать на первых осцилляциях пропускания от напряжения, что связано с ограниченной величиной фотогенерируемых напряжений. Если мы имеем дело с достаточно толстой ячейкой, то фазовый набег до  $2\pi$  обеспечивается при сравнительно несильной деформации слоя жидкого кристалла. Для достижения такого состояния, как и для релаксации ЖК в исходное положение, требуется значительно меньше времени, чем для полного разворота молекул ЖК перпендикулярно подложкам.

Существенно улучшить динамику отклика позволяет биполярное питание, причем это относится к питанию как одиночными импульсами, так и последовательностью импульсов напряжения. Выигрыш имеет место за счет того, что приложенное напряжение, полярность которого противоположна полярности фотоэда, сразу нейтрализует влияние объемного заряда, который, в противном случае, тормозит естественную релаксацию ЖК слоя.

Поскольку быстрдействие ФП, как правило, существенно выше быстрдействия ЖК, то для оценки времен включения и выключения оптически управляемых структур мы можем использовать стандартные формулы, выведенные для электроуправляемых ячеек:

$$\tau_{on} = \frac{4\pi\gamma_1}{\Delta\varepsilon(f)} \frac{d^2}{(U^2 - U_{th}^2)}, \quad (19)$$

$$\tau_{off} = \gamma_1 d^2 / \pi^2 K_{ii}, \quad (20)$$

где  $\gamma_1$  – вязкость ЖК,  $\Delta\varepsilon(f)$  – диэлектрическая анизотропия, зависящая от частоты питания,  $d$  – толщина слоя ЖК,  $U$  – приложенное управляющее напряжение  $K_{ii}$  – константа упругости. Для  $S$ -эффекта  $K_{ii} = K_{11}$ , в то время как для твист-эффекта  $K_{ii} = K_{11} + (K_{33} - 2K_{22})/4$ . Поскольку последняя величина больше  $K_{11}$ , то следует ожидать уменьшения постоянной времени процесса релаксации директора ЖК и, следовательно, лучших временных характеристик по сравнению с  $S$ -эффектом.

## Лабораторная работа №6

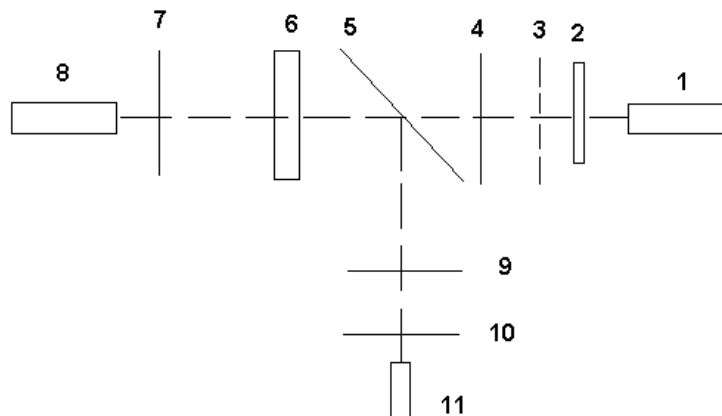
### ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА ПО ПРОЕКЦИОННОЙ МЕТОДИКЕ

#### Цели работы

- получение навыков оптимизации параметров ЖК ПМС в стационарном режиме;
- знакомство с методами преобразования оптического сигнала по спектру (из одной волны в другую) и по когерентности (из некогерентного в когерентное);
- оценка разрешающей способности ЖК ПМС по проекционной методике;
- оценка контрастного отношения (кратности ослабления излучения) ЖК ПМС.

#### Описание лабораторной работы

Для исследования электрооптических характеристик ПМС в стационарном режиме используется установка, изображенная на рис.19.



**Рис. 19.** Оптическая схема для исследования характеристик ПМС по проекционной методике. 1 – осветитель; 2 – фильтры; 3 – «тест-объект» (мира); 4 – объектив; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – ЖК ПМС; 7, 9 – скрещенные поляризаторы; 8 – источник считывающего излучения; 10 – линза; 11 – ФЭУ (фотодиод, глаз).

Прим.1. В качестве источника считывающего излучения может использоваться лазер. В этом случае вместо поляризатора 7 должны стоять расширитель пучка и ослабитель.

Прим. 2. ЖК ПМС (6) помещен в защищающий от фоновых засветок кожух.

Записывающий свет от осветителя (1) через систему фильтров (2) освещает «тест-объект» (3), изображение которого объективом (4) проектируется на слой ФП (6). Система фильтров вырезает узкую спектральную полосу в области максимальной чувствительности ФП. Оптическая схема предусматривает как лазерное считывание, так и считывание светом некогерентного источника с красным (инфракрасным) фильтром. В последнем случае необходим дополнительный поляризатор. Считывающий плоскополяризованный луч направляется на ПМС. Промодулированный структурой свет отражается от полупрозрачного зеркала (5), проходит через анализатор (9) (второй поляризатор, скрещенный с первым) и либо наблюдается визуально, либо регистрируется каким-либо измерительным устройством (11) (ФЭУ, фотодиод).

### ***Порядок выполнения работы***

1. Установить модулятор в держателе, проверить контакты.
2. Включить источник записывающего излучения. С помощью подвижки и объектива сфокусировать изображение миры на фотослой. Закрывать кожух.
3. Включить источник считывающего излучения. Поворачивая анализатор, добиться максимальной яркости рабочего поля.
4. Включить источник управляющего напряжения. Медленно вращая регулировку плавно увеличивать напряжение до появления изображения. Вращая анализатор добиться наибольшего контраста изображения.
5. Увеличивая далее напряжение оценить максимальный фазовый набег (по напряжению), достижимый в исследуемой структуре.
6. Убрать миру. Измерить интенсивность  $I$  считывающего света с помощью приемника излучения при наличии записывающего света. Выключить записывающий свет и измерить  $I_0$  – интенсивность считывающего излучения без записывающего света. Оценить контраст полученного изображения.
7. Повторить для модулятора, ориентированного другим способом.

### ***Содержание отчета***

1. Теоретическая часть. Описать устройство и принцип работы оптически управляемого ЖК ПМС.
2. Оценить пространственное разрешение ПМС, используя набор штриховых мир, предназначенный для определения предела разрешения оптических систем. Число полос на миллиметр вычисляется по стандартной формуле:  $R_N=60K_N/B$ , где  $B$  – длина базы миры в мм,  $K_N$  – коэффициент, зависящий от номера элемента.
3. Рассчитать контраст полученного изображения как отношение показаний фотодетектора в отсутствии и при наличии записывающего излучения.
4. Параметры исследованных модуляторов занести в таблицу:

Таблица. Параметры модуляторов

№	Толщина ЖК, мкм	Ориентация ЖК	$U$ питания, В	Разрешение $R_N$ лин/мм	$I_{max}$ , мВ (по фотодетектору)	$I_0$ , мВ (по фотодетектору)	Контраст $K=I_{max}/I_0$
1							
2							
3							

5. Выводы. Сравнить контраст модуляторов, ориентированных различными способами.

**Вопросы для подготовки**

1. Из каких слоев состоит оптически управляемый ЖК ПМС? Какова его эквивалентная электрическая схема?
2. Описать принцип работы оптически управляемого ЖК ПМС.
3. Какой основной недостаток модуляторов, работающих на пропускание? Как этот недостаток устраняется в конструкции отражательного типа?
4. Как оценивается разрешающая способность оптически управляемого ЖК ПМС?

## Лабораторная работа № 7

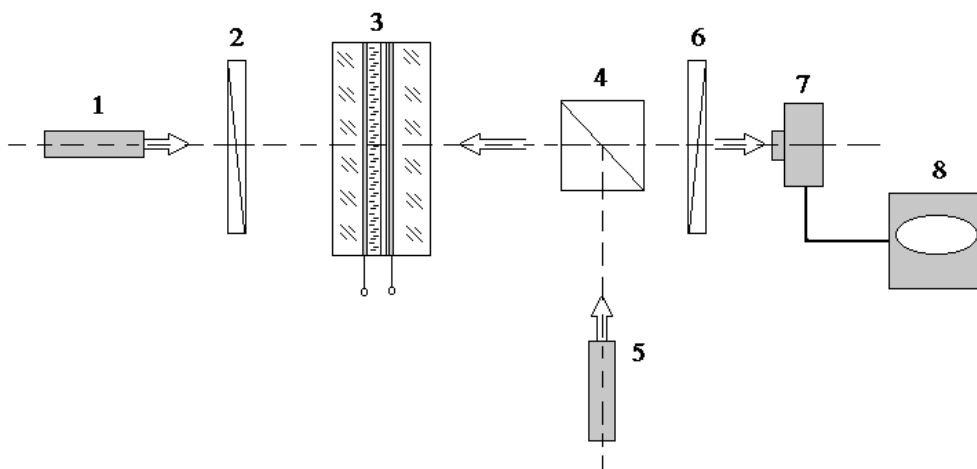
### ИЗМЕРЕНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЙ ЗАДЕРЖКИ ФАЗЫ В ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ МОДУЛЯТОРАХ СВЕТА

#### Цели работы

- получение сенситометрической характеристики оптически управляемого ЖК ПМС;
- исследование зависимости фазовой задержки в оптически управляемом ЖК ПМС от интенсивности записывающего излучения и от напряжения питания.

#### Описание лабораторной работы

Для измерений используется установка, изображенная на рис. 20. Сначала производится измерение пропускания ЖК ПМС в отсутствие записывающего излучения (питающее напряжение подается). Для этого излучение считывающего лазера, прошедшее через структуру, регистрируется с помощью фотодиода (7) и осциллографа (8). Анализатор (6) предназначен для преобразования модуляции фазы считывающего света в модуляцию амплитуды (интенсивности).



**Рис. 20.** Схема стенда для измерения оптического пропускания оптически управляемого ЖК ПМС. 1– считывающий лазер; 2– поляризатор; 3 – ЖК ПМС; 4 – светоделитель; 5 – записывающий лазер, 6 – анализатор; 7– фотодиод; 8 – осциллограф.

Прим. Измерения должны производиться в затемненном помещении, а ЖК ПМС желательно дополнительно защищать от фоновых засветок кожухом.

Для формирования изображения к прозрачным проводящим электродам модулятора прикладывается питающее напряжение и одновременно подается импульс записывающего света от записывающего лазера (5). Стенд

предусматривает устройство для обеспечения синхронизации записывающих световых импульсов с импульсами напряжения. В освещенной области пропускание структуры изменяется и при определенном уровне интенсивности записи (этот уровень зависит, в том числе, от питающего напряжения) достигает минимума. Разница фазы между соседними максимумом и минимумом составляет  $\pi/2$ .

При выполнении работы используется оптически управляемый ЖК ПМС просветного типа с фоточувствительным слоем из гидrogenизированного карбида кремния, с параллельной ориентацией ЖК. Ориентированная таким образом структура является фазовой, то есть на выходе мы регистрируем фазовую задержку необыкновенного луча, преобразованную в изменение амплитуды (интенсивности) сигнала с помощью поляризаторов. По изменению интенсивности, которую легко регистрировать с помощью фотодиода и наблюдать по осциллографу, мы можем судить о фазовой задержке.

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Установить ПМС в держателе таким образом, чтобы записывающий лазер находился со стороны слоя ФП, а считывающий – со стороны ЖК. Излучение обоих лазеров должно направляться нормально к плоскости слоев. Электрические контакты к проводящим электродам присоединить к источнику напряжения.
2. Включить считывающий лазер.
3. Поворачивая ПМС вокруг оси, нормальной к подложкам, добиться максимального пропускания. Зарегистрировать по осциллографу сигнал, соответствующий максимальному пропусканию.
4. Включить источник питания и, плавно увеличивая подаваемое на ПМС напряжение, снять зависимость пропускания от напряжения. Напряжение подается в виде прямоугольных импульсов с частотой несколько герц, однополярных или биполярных в зависимости от типа модулятора.
5. Включить записывающий лазер. С помощью термостолбика измерить его мощность. С помощью того же термостолбика откалибровать систему фильтров, которые в дальнейшем будут использоваться для ослабления интенсивности (мощности) записывающего излучения.
6. Подавая на ПМС записывающие импульсы света, синхронизированные с импульсами питающего напряжения, снять зависимость пропускания от напряжения на освещенном участке рабочего поля при фиксированной интенсивности излучения записи. Для облегчения обработки данных рекомендуется подавать импульсы питающего



напряжения той же амплитуды и длительности, что и в отсутствии засветки.

7. Повторить измерения несколько раз, ослабляя мощность записывающего излучения с помощью системы калиброванных фильтров.

### ***Содержание отчета***

1. Теоретическая часть. Рассмотреть факторы, влияющие на чувствительность оптически управляемого ЖК ПМС к записывающему излучению.
2. Построить зависимости пропускания структуры от напряжения питания в отсутствие и при различных интенсивностях записывающего излучения (семейство кривых).
3. Построить зависимости пропускания от мощности записывающего излучения для двух- трех фиксированных значений питающего напряжения (сенситометрические кривые).
4. Для этих значений питающего напряжения определить фотоиндуцированный фазовый набег.
5. Выводы. Объяснить факт смещения экстремумов на кривых пропускания: при увеличении питающего напряжения – в область меньших интенсивностей записывающего излучения (семейство кривых 1), а при увеличении интенсивности – в область меньших напряжений (семейство кривых 2).

### ***Вопросы для подготовки***

1. Каково принципиальное отличие оптически управляемых ЖК ПМС от электрически управляемых?
2. Каковы основные характеристики оптически управляемых ЖК ПМС?
3. От каких факторов зависит чувствительность оптически управляемых ЖК ПМС к записывающему излучению?
4. Как можно ее повысить?
5. Какова разность фаз на кривой пропускания от напряжения между соседними экстремумами?

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

#### *Цели работы*

- определение времени отклика структуры при синхронной подаче импульсов напряжения и засветки;
- исследование динамики формирования фотоэда (исследование зависимостей пропускания ПМС на основе структуры ФП – ЖК от временной задержки светового записывающего импульса относительно импульса питающего напряжения при разной амплитуде напряжения и разной мощности записывающего сигнала);
- определение времени релаксации (регистрируется пропускание после а) отключения засветки и напряжения одновременно и б) отключения только засветки; в) отключения засветки и подачи на структуру импульса напряжения противоположной полярности);
- сравнение времен отклика и релаксации при однополярном и биполярном режимах питания, когда на структуру подается не одиночный импульс, а серия импульсов.

#### *Описание лабораторной работы*

Для исследования динамических характеристик ПМС используется оптический стенд, изображенный на рис.20.

#### *Порядок выполнения работы*

1. Установить ПМС в держателе таким образом, чтобы записывающий лазер находился со стороны слоя ФП, а считывающий – со стороны ЖК. Излучение обоих лазеров должно направляться нормально к плоскости слоев. Электрические контакты к проводящим электродам присоединить к источнику напряжения.
2. Включить считывающий лазер.
3. Поворачивая ПМС вокруг оси, нормальной к подложкам, добиться максимального пропускания.
4. Настроить источник напряжения и записывающий лазер на некоторые значения, соответствующие минимуму пропускания ПМС (значения взять из предыдущей лабораторной работы). Задержка импульса записи относительно импульса питания равна 0.
5. Включить источник питания и записывающий лазер.
6. Подавая на ПМС записывающие импульсы света, синхронизированные с импульсами питающего напряжения, зарегистрировать по

- осциллографу времена его включения и выключения (естественной релаксации).
7. Повторить измерения при различных амплитудах и длительностях импульсов питающего напряжения и различной мощности записывающего излучения.
  8. Устанавливая задержку записывающего светового импульса в диапазоне 0,1–0,5 временного периода от импульса питающего напряжения, измерить времена включения и выключения в этих условиях. Одновременно следует измерять величину максимального и минимального пропускания, так как при больших задержках модулятор может не выходить на оптимальный режим.

### ***Содержание отчета***

1. Теоретическая часть. Рассмотреть факторы, влияющие на быстродействие оптически управляемого ЖК ПМС.
2. Построить зависимости времен включения и выключения структуры от длительности импульса напряжения питания при фиксированной его амплитуде и фиксированной интенсивности записывающего излучения.
3. Построить зависимости времен включения и выключения структуры от величины временной задержки импульса засветки относительно импульса питающего напряжения (остальные параметры фиксированы).
4. Выводы. Сравнить времена включения и выключения оптически управляемых ЖК ПМС с временами переключения электрически управляемых ПМС аналогичной конфигурации, но без слоя ФП. Последние характеристики взять из соответствующих лабораторных работ или рассчитать по теоретическим формулам.

### ***Вопросы для подготовки***

1. От каких параметров зависят времена включения и выключения оптически управляемых ЖК ПМС?
2. Каковы основные способы повышения быстродействия оптически управляемых ЖК ПМС?

## **Литература**

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. С. 495 – 537.
2. Блинов Л.М. Электро – и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. - 384 с.
3. Коншина Е. А., Федоров М. А., Амосова Л. П. Определение угла наклона директора и фазовой задержки жидкокристаллических ячеек оптическими методами. // Опт. журн. 2006. Т.73, В.12. С. 9-13.
4. Коншина Е.А., Федоров М. А. , Амосова Л. П. , Воронин Ю. М. Влияние нанорельефа поверхности на ориентационные и электрооптические эффекты в нематических жидких кристаллах. // Вестник СПб ГУ ИТМО. 2007. Вып 43. С. 127-135.
5. Коншина Е.А., Федоров М. А. , Амосова Л. П. , Воронин Ю. М. Влияние поверхности на фазовую модуляцию света в слое нематического жидкого кристалла. // ЖТФ. 2008. Т.78. Вып.2. С. 71-76.
6. Коншина Е.А., Костомаров Д.С. Фазовая модуляция света в двухчастотном нематическом жидком кристалле. // Оптический журнал 2007. №10. С. 88–90.
7. Костомаров Д.С. Дисперсия оптической анизотропии двухчастотного жидкого кристалла в ближней ИК-области спектра. // Научно-технический вестник. 2008. Т.49. С. 106-109.
8. Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В.. Пространственные модуляторы света. – М.: Радио и связь, 1987, 320 с.
9. Управляемые транспаранты и реверсивная запись оптических сигналов. Труды ордена Ленина физического института им. П.Н. Лебедева, том 126. М.: Наука, 1981. 156 с.
10. Аморфные полупроводники. Под ред. М. Бродски, пер. с англ. – М.: Мир, 1982, 414 с.
11. Аморфные и поликристаллические полупроводники. Под. Ред. В. Хайванга, пер. с нем. – М.: Мир, 1987, 160 с.

## Приложение.

Таблица: Свойства нематических жидких кристаллов

Марка НЖК	$n_e$	$n_o$	$\Delta n$	$\varepsilon_{  }$	$\varepsilon_{\perp}$	$\Delta\varepsilon,$ 1кГц	$\gamma,$ $m^2/сек$
Merck BL-037	1,81	1,53	0,28	23,1	6,1	16,9	$81 \times 10^{-6}$
Merck BL-006	1,82	1,53	0,29	22,8	5,5	17,3	$71 \times 10^{-6}$
Nipik ЖК- 1001	1,79	1,53	0,26	9,5	5,1	4,4	
Nipik ЖК- 1282	1,68	1,51	0,17	15,7	5,8	9,9	$52 \times 10^{-6}$



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

---

## **КАФЕДРА ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

Кафедра основана в 2002 году под названием «Оптическая физика и современное естествознание» в составе факультета «фотоники и оптоинформатики». Первым заведующим кафедрой был избран М.Н. Либенсон, возглавлявший лабораторию «Фотофизика поверхности» в Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И. Вавилова.

В 2004-2006 гг. кафедру возглавлял доктор техн. наук, профессор А.И. Степанов, а с 2006 г. ею руководит доктор физ.-мат. наук, профессор А.В. Федоров, который одновременно возглавляет Центр «Информационные оптические технологии» (ЦИОТ) в составе СПбГУ ИТМО и Научно-исследовательский центр «Оптические нанотехнологии и материалы».

В настоящее время на кафедре преподают: академик РАН Е.Б. Александров, профессора А.В. Баранов, Т.А. Вартамян, Н.В. Каманина, В.Г. Маслов, Е.Ю. Перлин, В.Н. Смирнов, А.И. Степанов А.В., Федоров, В.Б. Шилов; доценты Л.П. Амосова, Г.Н. Виноградова, Г.С. Жданов, В.Л. Комолов, Е.А. Коншина, П.С. Парфенов.

Амосова Лариса Павловна  
Коншина Елена Анатольевна  
Костомаров Денис Сергеевич  
Федоров Михаил Александрович

**ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМОЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ  
В НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Дизайн

Л.П. Амосова

Верстка

Л.П. Амосова

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного  
университета информационных технологий, механики и оптики

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского государственного  
университета информационных технологий,  
механики и оптики  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

