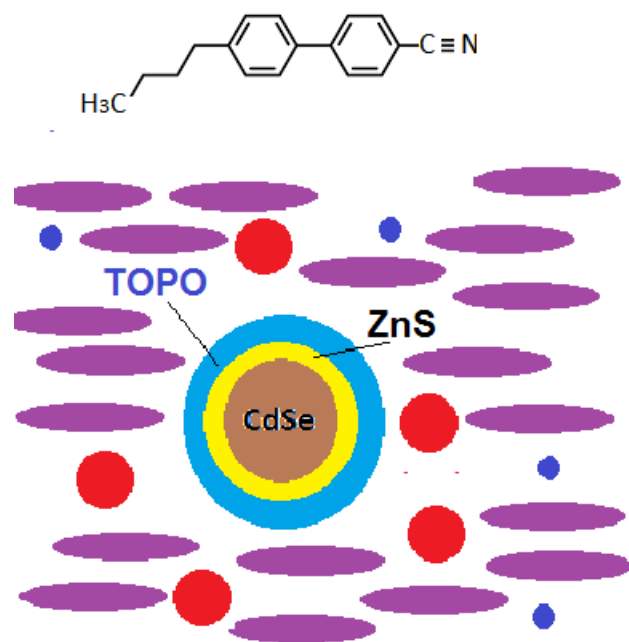


Е.А. Коншина, Д.П. Щербинин, М.А. Федоров

**ПРАКТИКУМ  
ПО ФИЗИКЕ И ОПТИКЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ  
И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ**



Санкт-Петербург

2018

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Е.А. Коншина, Д.П. Щербинин, М.А. Федоров**

**ПРАКТИКУМ**  
**ПО ФИЗИКЕ И ОПТИКЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ**  
**И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

**РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ**  
**В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО**

по направлению подготовки 12.04.03 «Фотоника и  
оптоинформатика» в качестве учебно-методического пособия для  
реализации основных профессиональных программ высшего  
образования магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**  
**2018**

Е.А. Коншина, Д.П. Щербинин, М.А. Федоров. Практикум по физике и оптике жидких кристаллов и композитов на их основе. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 60 с.

Рецензент: Перлин Е.Ю., д.ф.-м.н., профессор ФиОИ

Содержание учебного пособия направлено на получение практических навыков и компетенций в области исследований физических свойств жидких кристаллов и их композитов с наночастицами, а также электрооптических характеристик устройств на их основе. Пособие включает десять лабораторных работ, охватывающих методики научных исследований жидкокристаллических сред. Учебное пособие предназначено для подготовки магистров по направлению подготовки 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика в рамках профиля магистерской программы «Физика и технология наноструктур».



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2018

© Е.А. Коншина, Д.П. Щербинин, М.А. Федоров, 2018

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

НЖК – нематический жидкий кристалл

$S$  – параметр ориентационного порядка

$\theta_p$  – угол преднаклона директора ЖК

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

$\mathbf{n}$  – директор жидкого кристалла

$\Delta n$  – анизотропия показателя преломления

$n_o$  и  $n_e$  – показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного луча

$n_{\perp}$ ,  $n_{\parallel}$  – показатели преломления для луча с поляризацией перпендикулярной и параллельной директору ЖК

$\Delta\epsilon$  – анизотропия диэлектрической проницаемости

$\epsilon_{\perp}$  и  $\epsilon_{\parallel}$  – поперечная и продольная составляющие диэлектрической проницаемости

$d$  – толщина слоя жидкого кристалла

$K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$  – константы упругости Франка для S-, T- и В-деформаций

$U$  – амплитуда напряжения электрического поля

$U_{th}$  – пороговое напряжение электрооптического эффекта

$\Phi$  – фазовая задержка света (разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами)

$\Phi_{max}$  – максимальная фазовая задержка

$\lambda$  – длина волны излучения

$C$  – емкость ЖК ячейки

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная

$s$  – площадь пластины конденсатора

$\beta$  – угол между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора ЖК

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Краткие представления о свойствах жидких кристаллов и их композитов с наночастицами	6
1 Определение толщины слоя жидкого кристалла в ячейке	13
2 Определение параметра ориентационного порядка нематического жидкого кристалла	15
3 Исследование электрооптических эффектов в нематическом жидком кристалле	18
4 Исследование дисперсии оптической анизотропии жидкого кристалла	25
5 Исследование угла преднаклона директора, порогового напряжения и энергии сцепления в ЖК композитах с наночастицами	28
6 Исследование диэлектрических характеристик жидкокристаллических сред	32
7 Ослабление оптического пропускания с помощью твист-эффекта в жидком кристалле	37
8 Исследование динамических характеристик твист-ячеек	41
9 Исследование динамики оптического отклика и релаксации для <i>S</i> -деформации жидкого кристалла	44
10 Влияние наночастиц на динамические характеристики нематического жидкого кристалла	46
Список рекомендуемой литературы	49
Глоссарий	51
ПРИЛОЖЕНИЕ	
1. Техника измерения спектров пропускания с	52

помощью СФ-56	
2. Техника измерения емкости ЖК ячеек и тангенса угла диэлектрических потерь	54
3. Техника измерения поляризационных ИК спектров с помощью Фурье спектрометра	57
4. Техника измерения электрооптических характеристик ЖК ячеек	58
Шаблон отчета по лабораторной работе	60

## ВВЕДЕНИЕ

Практикум по физике и оптике жидких кристаллов и композитов на их основе – это учебное пособие, предназначенное для реализации магистерской программы «Физика и технология наноструктур» по направлению подготовки 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика для преподавания курса «Наночастицы в конденсированных средах».

Основная цель настоящего учебного пособия – развитие практических навыков и компетенций на основе полученных знаний о физических свойствах конденсированных сред, включая жидкие кристаллы и наночастицы, а также физических методах их исследования. В задачи практикума входит развитие самостоятельных навыков планирования и проведения экспериментов, представляющих собой модели реальных научных исследований. Проведение лабораторных работ необходимо для использования физических методов при проведении экспериментальных исследований наноструктур и решении конкретных задач, представления полученных результатов графически и в виде отчетов, их анализа и формулирования выводов, выделяя наиболее существенные результаты.

Практикум включает в себя десять лабораторных работ, направленных на экспериментальное исследование параметров чистых нематических жидких кристаллов и их композитов с наночастицами для выявления влияния вещества, размера и концентрации наночастиц на изменение свойств и электрооптических характеристик ЖК ячеек. В лабораторных работах студентам предлагается исследовать изменения параметра ориентационного порядка, оптической и диэлектрической анизотропии, содержания ионных примесей и их мобильность, а также электрооптических характеристик ЖК ячеек, как лабораторного образца ЖК устройств: фазовой задержки света, угла преднаклона директора, порога электрооптического эффекта, временных характеристик оптического отклика и релаксации и коэффициент контраста.

Отчет по лабораторной работе должен включать цель проводимого исследования, описание объекта и методов эксперимента, полученные результаты, их анализ и основные выводы. Это позволит студентам получить навыки написания научных статей. В основу предлагаемых лабораторных работ положены ранее разработанные методики и результаты исследований, полученные при проведении НИР в лаборатории «Нелинейная оптика конденсированных сред» Центра информационных оптических технологий ИТМО в период 2006 – 2017 г.г.

## **КРАТКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СВОЙСТВАХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ И ИХ КОМПОЗИТОВ С НАНОЧАСТИЦАМИ**

Жидкие кристаллы – это органические вещества, обладающие анизотропными свойствами твердых кристаллов и текучестью жидкостей. Уникальность этой среды заключается в их особенности изменять оптические и диэлектрические свойства в электромагнитных полях. Мы уже не замечаем, что ежедневно используем свойства жидких кристаллов, работающих в смартфонах, планшетах, дисплеях компьютеров и телевизоров, без которых не представляем повседневной жизни. В настоящий момент времени рынок электронных приборов на основе ЖК технологий оценивается в десятки миллиардов долларов. Однако этим применение жидких кристаллов не ограничиваются. Они имеют техническое применение в различных адаптивных оптических схемах для коррекции волнового фронта, в схемах когерентной обработки изображений, проекционных схемах и телекоммуникационных системах и других приложениях.

Жидкие кристаллы представляют собой вязкие жидкости, в которых при определенных условиях имеет место дальний порядок расположения молекул и анизотропия механических, электрических, магнитных и оптических свойств. И хотя жидкие кристаллы проявляют свойства анизотропных кристаллов и изотропной жидкости, электрооптические явления в них весьма специфичны и не имеют аналогов в твердой и жидкой фазе.

Наибольшее практическое применение получили нематические (нитевидные) жидкие кристаллы (НЖК). Они характеризуются дальним ориентационным порядком и полной свободой перемещения центров тяжести отдельных молекул в пространстве. Молекулы НЖК имеют вытянутую форму и могут вращаться как вокруг длинной, так и вокруг короткой оси. Жидкий кристалл, помещенный в стеклянный сосуд, представляет собой мутную вязкую жидкость, т.к. оси молекул в отдельных доменах (или каплях) ориентируются произвольным образом. Но если добиться однородной однонаправленной ориентации длинных осей молекул в тонком слое ЖК, заключив его между двумя параллельными плоскостями, имеющими с внутренней стороны, обращенной к слою ЖК, анизотропную текстуру поверхности, например, в виде параллельных канавок, то слой ЖК станет прозрачным. Такой слой НЖК, ориентированный в результате анизотропно-упругого взаимодействия молекул с поверхностью твердого тела, представляет собой одноосный монокристалл. Если рассматривать ЖК ячейку с параллельно-направленной ориентацией в скрещенных поляризаторах в



поляризационном микроскопе, то при вращении ячейки в плоскости можно видеть изменение интенсивности пропускания света.

Направление преимущественной ориентации длинных осей молекул принято характеризовать единичным вектором, называемым директором от английского слова «direction», для которого выполняется условие  $\mathbf{n} = -\mathbf{n}$ , т.к. распределение концов молекул в слое ЖК равновероятно. В НЖК направления оптической оси совпадает с направлением директора.

Объектом исследования в лабораторных работах будут служить ЖК ячейки плоскопараллельного типа, которые являются прообразом известных ЖК устройств. Принципиальная схема ЖК ячейки показана на рисунке 1.

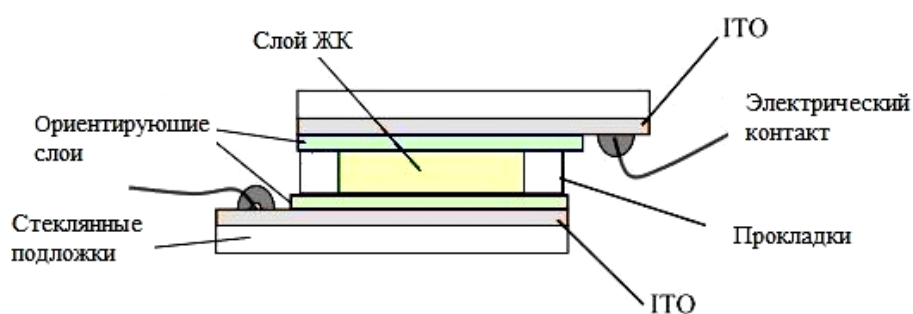


Рисунок 1 – Схема электроуправляемой ЖК ячейки

ЖК ячейка состоит из двух стеклянных подложек, между которыми заключен слой жидкого кристалла толщиной несколько микрометров. Внутренние поверхности обеих подложек покрыты тонким слоем окислов индия и олова (Indium Tin Oxide – ITO), используемым в качестве прозрачного проводящего электрода. ITO слои обеспечивают равномерное распределения потенциала электрического поля при приложении к электродам напряжения. На поверхность электродов наносят ориентирующие слои, которые обеспечивают выравнивание молекул НЖК в заданном направлении в результате анизотропно-упругого межфазного взаимодействия с поверхностью. Зазор между стеклянными подложками фиксируется с помощью тефлоновых прокладок. Заполнение зазора ячейки жидким кристаллом происходит под действием капиллярных сил.

Для ориентации молекул ЖК используются слои, полученные наклонным напылением в вакууме, полимеры, натертые в одном направлении, и другие ориентирующие слои. В зависимости от направления ориентации директора ЖК относительно ограничивающей поверхности различают гомогенную (параллельную или планарную) и гомеотропную (перпендикулярную или вертикальную) ориентации

молекул. Промежуточная ориентация молекул ЖК с углом наклона директора более  $10^\circ$  называется наклонной ориентацией (Рис. 2).

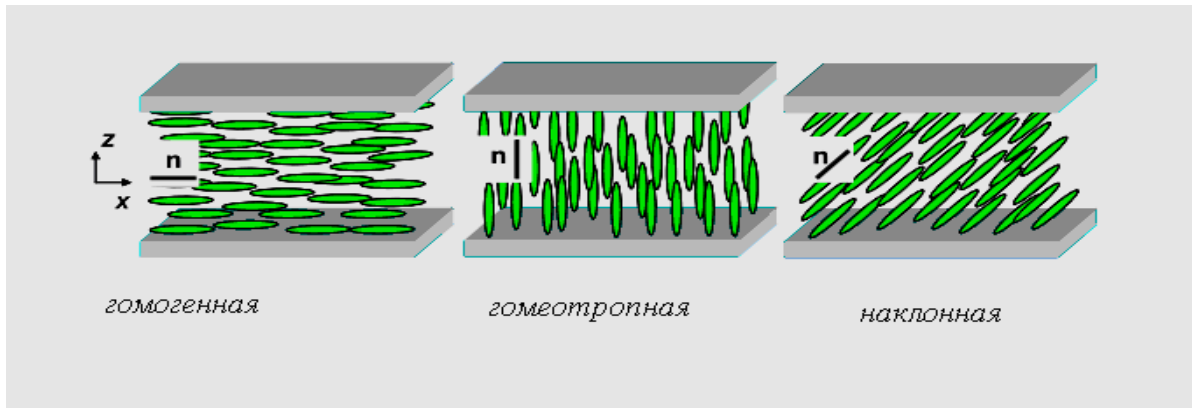


Рисунок 2 – Иллюстрация гомогенной, гомеотропной и наклонной ориентации молекул НЖК

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, происходящие при приложении электрического или магнитного поля к слою ЖК, обусловлены переориентацией директора относительно направления вектора электрического поля.

Жидкие кристаллы являются диэлектриками и поляризуются под действием электрического поля, приложенного к слою ЖК. Переориентация ЖК молекул приводит к изменению диэлектрической проницаемости среды. Поэтому диэлектрическая анизотропия жидких кристаллов является их важной характеристикой. Даже хорошо очищенные жидкие кристаллы обладают заметной ионной проводимостью, существование которой не всегда желательно, так как наличие тока через ЖК ячейку приводит к накоплению и релаксации электрических зарядов вблизи электродов, что может ухудшать качество работы ЖК устройств.

Диэлектрические и электрические свойства ЖК представляют в виде комплексных величин. Комплексная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon^*$  выражается как разность действительной и мнимой ее частей

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (1)$$

Действительная часть диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  пропорциональна энергии, накопленной в диэлектрике под действием внешнего

электрического поля, а мнимая часть  $\epsilon''$  соответствует рассеянной энергии. Накопление энергии происходит за счет поляризации диэлектрика. Рассеяние энергии связано с проводимостью ЖК среды. Протекающий ток согласно закону Джоуля-Ленса переводит приложенную электрическую энергию в тепловую. Потери на проводимость проявляются в низкочастотной области диэлектрических спектров. В высокочастотной области спектра диэлектрические потери связаны с релаксационными явлениями ориентационной компоненты диэлектрической проницаемости.

Вследствие анизотропии диэлектрической проницаемости свободная энергия ансамбля молекул НЖК в электрическом поле имеет минимум при вполне определенной ориентации молекулярных осей относительно вектора электрического поля. При положительных значениях диэлектрической анизотропии  $\Delta\epsilon > 0$  директор стремится установиться вдоль вектора поля, а при отрицательных значениях  $\Delta\epsilon < 0$ , напротив, перпендикулярно ему. Если в исходном состоянии направления вектора поля и директора НЖК не соответствуют условию минимума свободной энергии, то в достаточно сильном поле, способном преодолеть силы упругости НЖК, произойдет переориентация директора и установиться его новое стационарное распределение. Этот эффект был открыт и подробно исследован В.К. Фредериксом с сотрудниками еще в 30-е годы прошлого века и назван его именем.

Анизотропные свойства ориентированных слоев ЖК наиболее заметно проявляются в двулучепреломлении – изменении оптической анизотропией  $\Delta n$ . В кристалле существует одно определенное направление, вдоль которого оба необыкновенный и обыкновенный лучи распространяются с одной скоростью, как в обычной изотропной среде, которое называют оптической осью. Для жидких кристаллов оптической осью является директор. Плоскость, проходящая через оптическую ось и волновой вектор, распространяющихся волн, носит название плоскости главного сечения или главной плоскости. При нормальном падении света относительно плоскости подложки ЖК ячейки переориентация директора при *splay*-деформации будет происходить в плоскости главного сечения. Плоскость поляризации обыкновенного луча всегда перпендикулярна директору ЖК и не зависит от напряжения, приложенного к ячейке. Это значит, что показатель преломления для луча перпендикулярного директору  $n_{\perp}$  не изменяется. Показатель преломления  $n_{\parallel}$  луча, поляризация которого параллельна директору, изменяется при изменении его положения.

Процесс переориентации жидкого кристалла носит пороговый характер. Напряжение порога электрооптического эффекта, соответствует началу процесса переориентации молекул и зависит от коэффициента упругости и диэлектрической анизотропии НЖК. Показатель преломления

для луча с поляризацией параллельной директору ЖК будет уменьшаться от  $n_{\parallel}$  до  $n_{\perp}$  при приложении напряжения электрического поля к слою ЖК с гомогенной ориентацией. Разность фаз  $\Phi$  между обыкновенным и необыкновенным лучами в результате изменения полярного угла наклона директора приводит к изменению показателя преломления  $n(z)$ . Для монохроматического света с длиной волны  $\lambda$ , проходящего через слой ЖК,  $\Phi$  стремится к нулю при увеличении напряжения приложенного к слою ЖК.

Динамика переориентации директора ЖК при приложении электрического поля характеризуется временем оптического отклика, которое зависит от разности амплитуды приложенного и порогового напряжений, а также динамической вязкости, диэлектрической анизотропии и толщины слоя ЖК. После снятия напряжения происходит процесс естественной релаксации – возвращения молекул ЖК в исходное состояние. Время релаксации определяется вязкостью и коэффициентом упругости и также зависит от толщины слоя ЖК. На скорость релаксации влияет межфазное взаимодействие молекул ЖК с ориентирующей поверхностью, которое определяет энергию сцепления.

Разработкой композитных материалов на основе жидкокристаллических сред, допированных наночастицами, и изучением их свойств активно занимаются в последнее время. Новые жидкокристаллические системы с уникальными свойствами создаются с целью совершенствования ЖК устройств, изучения их свойств и расширения знаний об особенностях таких композитных сред. Для их практического использования необходимо исследовать изменение свойств ЖК в зависимости от размеров и концентрации, химического состава и структурных особенностей наночастиц, а также выяснить механизмы, вызывающие эти изменения. Интерес к композитным средам на основе ЖК связан, в первую очередь, с их научным и техническим потенциалом [1]. Была показана возможность электроуправляемого рассеяния наночастицами в ЖК матрице [2], создания электроуправляемых переключателей [3] и плазмонных цветофильтров с подстройкой цвета в зависимости от приложенного напряжения [4], улучшения динамических [5] и электрических [6] характеристик ЖК сред для дисплеев, а также создания 3D экранов [7]. Свойства ЖК матрицы могут существенно изменяться в зависимости от свойств материала наночастиц и их особенностей [8].

1. *Choudhary A., Singh G., Biradar A.M.* Advances in gold nanoparticle-liquid crystal composites // *Nanoscale*. – 2014. – V. 6 – P. 7743-7756.  
**DOI:** 10.1039/C4NR01325E.

2. *Muller J., Sonnichsen C., von Poschinger H., von Plessen G., Klar T. A., Feldmann J.* Electrically controlled light scattering with single metal nanoparticles // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – V. 81. – P. 171-173.  
**DOI:** 10.1063/1.1491003
3. *Kumar R., Raina K.K.* Enhanced ordering in polymer stabilised ferroelectric liquid crystal guest-host composites: evidence by polarised fluorescence spectroscopy//*Liquid Crystals.* – 2014. – V. 41. –Is. 5. – P. 694-700 **DOI:** 10.1080/02678292.2013.875228.
4. *Si G., Zhao Y., Eunice Sok Ping Leong, LiuY.J.* Liquid-Crystal-Enabled Active Plasmonics: A Review // *Materials.* – 2014. – V. 7. – P. 1296-1317. **DOI:** 10.3390/ma7021296.
5. *Zhang T., Zhong C., Xu J.* CdS-Nanoparticle-Doped Liquid Crystal Displays Showing Low Threshold Voltage // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2009. – V. 48. –P. 055002(5). **DOI:**10.1143/JJAP.48.055002.
6. *Chen W.-T., Chen P.-S., C.-Y. Chao C.-Y.* Effect of Doped Insulating Nanoparticles on the Electro-Optical Characteristics of Nematic Liquid Crystals. // *Jpn. J. of Appl. Phys.* – 2009. V. 48. – P. 015006(4).  
**DOI:** 10.1143/JJAP.48.015006.
7. *Li H., Xu S., Wang H., Gu Y., Lombardi, J. R., Xu W.* Active-Tuned Plasmonic Angle Modulator of Light Beams for Potential Application of 3D Display // *ACS Photonics.* – 2014. – V. 1. – Is. 8. – P. 677-682.  
**DOI:** 10.1021/ph5000902.

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА В ЯЧЕЙКЕ

#### *Основные задачи работы:*

- определить толщину воздушного зазора между подложками плоскопараллельной ЖК ячейки, используя спектральный метод и емкостной метод;
- сравнить толщины, полученные спектральным и емкостным методами.

#### *Описание лабораторной работы*

Толщина слоя жидкого кристалла является одним из важных параметров ЖК устройств. От ее величины зависят как оптические, так и динамические характеристики электроуправляемых ЖК устройств. Для экспериментальных исследований используются плоскопараллельная ячейка, показанная на рисунке 1. 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 такой ячейкой. При прохождении монохроматического света через многослойные структуры происходит его интерференция. Для пустой ячейки спектральное положение локальных максимумов и минимумов зависят от длины волны падающего света и толщины зазора. Спектральная зависимость пропускания ЖК ячейки, приведена на рисунке 3. Величину воздушного зазора  $d_T$  можно рассчитать по экстремумам спектральной зависимости пропускания пустой ячейки, используя следующую формулу:

$$d_T n = \frac{(x+1)\lambda_1\lambda_2}{4(\lambda_2 - \lambda_1)}, \quad (2)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – две произвольные длины волны,  $x$  – количество экстремумов (максимумов и минимумов), находящихся в диапазоне между длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ,  $d$  – толщина ячейки,  $n$  – показатель преломления воздуха.

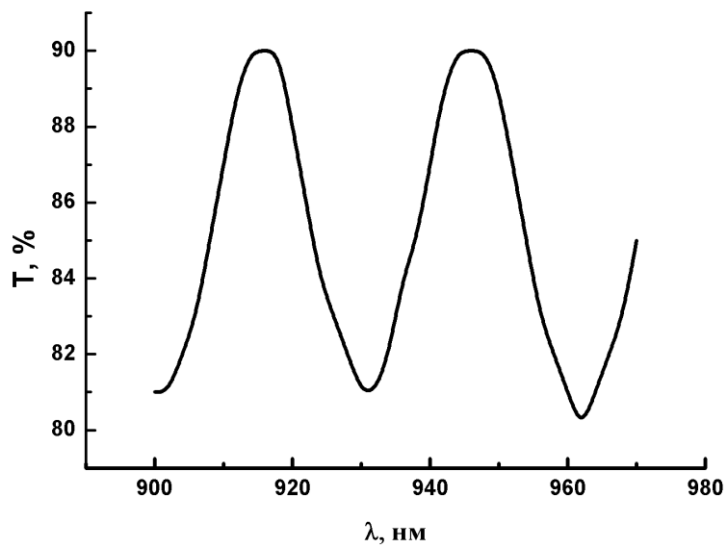


Рисунок 3 – Спектральная зависимость интерференции света в воздушном зазоре ЖК ячейки

ЖК ячейку можно рассматривать как плоский конденсатор, обкладками которого служат стеклянные подложки, покрытые с внутренней стороны прозрачным проводящим электродом и ориентирующим слоем. Емкость конденсатора  $C$  определяется выражением

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость воздуха;  $d$  – толщина,  $S$  – площадь пластин.

Тогда величину воздушного зазора  $d_c$  между двумя подложками ЖК ячейки можно определить по формуле

$$d_c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{C}. \quad (4)$$

Величина воздушного зазора  $d_c$  будет соответствовать толщине слоя жидкого кристалла.

### ***Задание***

1. Получить зависимость пропускания ЖК ячейки от длины волны  $I(\lambda)$  в видимой области спектра (Приложение 1) и рассчитать величину воздушного зазора  $d_T$ .
2. Измерить емкость незаполненной ячейки (Приложение 2) и рассчитать величину воздушного зазора. Для расчета площади подложки принять диаметр равным 35 мм.
3. Сравнить значения воздушного зазора ячейки  $d_T$  и  $d_C$ , полученные двумя методами.

## **Лабораторная работа № 2**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ОРИЕНТАЦИОННОГО ПОРЯДКА НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА**

#### ***Основные задачи работы:***

- получить колебательные спектры нематического ЖК в интервале  $3000 - 1000 \text{ см}^{-1}$  с помощью метода поляризационной инфракрасной спектроскопии;
- рассчитать параметр ориентационного порядка нематического жидкого кристалла.

#### ***Описание лабораторной работы***

Для нематических жидких кристаллов характерен дальний ориентационный порядок. Молекулы в слое нематического жидкого кристалла выравниваются в одном направлении в результате межмолекулярного взаимодействия под действием сил Ван-дер-Ваальса. Степень упорядоченности ЖК фазы определяется параметром ориентационного порядка  $S$ , от которого зависят основные свойства ЖК, такие как оптическая и диэлектрическая анизотропия, анизотропия электропроводности, вязкоупругие свойства. Параметр порядка зависит от температуры, и резко изменяется при нагревании ЖК до температуры межфазового перехода в изотропную фазу (точки просветления ЖК).

Отдельные молекулы жидкого кристалла могут существенно отклоняться от преимущественного направления длинных осей – директора вследствие как температурных флуктуаций, так и дефектов ориентации. Теоретически параметр порядка определяется выражением



$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \varphi - 1 \rangle. \quad (5)$$

где  $\varphi$  – угол между длинной осью молекулы и директором. Фигурные скобки означают усреднение по всему ансамблю молекул. Из этого соотношения следует, что в идеальном кристалле, параметр порядка  $S = 1$ . В изотропной жидкости параметр порядка  $S = 0$ , в то время как жидкие кристаллы имеют параметр порядка  $0 < S < 1$ . У нематических жидких кристаллов  $0.45 < S < 0.65$ .

Для измерения параметра порядка используют разные методы: спектроскопию ядерно-магнитного резонанса, флуоресцентную спектроскопию, комбинационное рассеяние. Наиболее простым и точным способом является поляризационная инфракрасная (ИК) спектроскопия. Одноосные анизотропные материалы обладают линейным дихроизмом  $Dr$ , т.е. различным поглощением света во взаимно перпендикулярных направлениях линейной поляризации. Для численного описания дихроичное соотношение соответствует

$$Dr = \frac{A_{\parallel}}{A_{\perp}}, \quad (6)$$

где  $A_{\parallel}$  и  $A_{\perp}$  – коэффициенты поглощения света линейно поляризованного вдоль и поперек оптической оси кристалла.

В общем виде параметр порядка  $S$  выражается как

$$S = \frac{(Dr-1)}{(Dr+2)} \cdot \frac{2}{3 \cos^2 \alpha - 1}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – угол между дипольным моментом перехода, связанным с поглощением, и молекулярной осью, определяемый из молекулярных моделей. В случае, если дипольный момент перехода параллелен молекулярной оси, выражение (7) имеет вид

$$S = \frac{Dr-1}{Dr+2}. \quad (8)$$

В этой лабораторной работе исследуются ИК спектры ЖК смесей на основе цианбифенилов и сложных эфиров. Поляризационные ИК спектры поглощения ЖК показаны на рисунке 4.

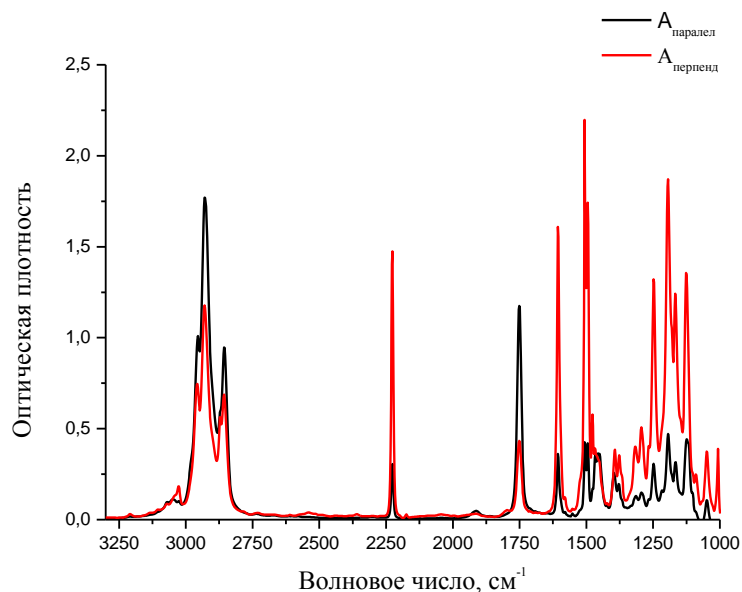


Рисунок 4 – Поляризационные ИК спектры поглощения НЖК смеси

Валентные колебания С=С связей в бифенильных ядрах и СN групп в молекулах направлены вдоль длинной молекулярной оси и дают интенсивные изолированные полосы в ИК спектрах. Для гомогенно ориентированного слоя ЖК, когда длинные оси молекул выровнены параллельно границе раздела с подложкой, в ИК спектрах наблюдаются полосы поглощения, соответствующие валентным колебаниям С≡N связи ( $2220\text{ см}^{-1}$ ) и С–С связей в бензольном кольце ( $\sim 1610\text{ см}^{-1}$  и  $\sim 1500\text{ см}^{-1}$ ) и бифенильных соединениях ( $\sim 1240\text{ см}^{-1}$ ). Данные полосы могут быть использованы для расчета параметра ориентационного порядка.

### **Задание**

1. Провести измерение ИК спектров ЖК ячеек с помощью Фурье спектрометра (Приложение 3).
2. Выбрать полосы поглощения в полученных ИК спектрах и рассчитать дихроичные отношения полос и параметр ориентационного порядка ЖК для каждой полосы.

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В НЕМАТИЧЕСКОМ ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ

#### Основные задачи работы:

- исследовать модуляцию интенсивности света в слое жидкого кристалла под действием электрического поля;
- определить фазовую задержку света с помощью зависимостей пропускания света от напряжения;
- определить величину максимальной фазовой задержки и порог электрооптического S-эффекта.

#### Описание лабораторной работы

В этой работе исследуется *splay*-деформация (S-эффект) нематического ЖК с положительной диэлектрической анизотропией при приложении напряжения электрического поля. В отсутствие электрического поля направление директора вблизи поверхностей, ограничивающих слой ЖК, параллельно ей. При *splay*-деформации ЖК в электрическом поле происходит изменение полярного угла наклона директора относительно вектора электрического поля относительно подложки от  $\theta_p$  до  $90 - \theta_p$ . Переориентация директора относительно вектора электрического поля приводит к изменению показателя преломления для необыкновенного луча, в то время как для луча, перпендикулярного директору, показатель остается неизменным. В результате двулучепреломления излучения, падающего на слой жидкого кристалла, происходит модуляции его интенсивности.

Полярный угол наклона директора  $\theta(z)$  начинает изменяться при напряжении, соответствующем порогу электрооптического эффекта  $U_{th}$ . Величина порогового напряжения  $U_{th}$  связана с  $\Delta\varepsilon$  и коэффициентом упругости  $K_{11}$  жидкого кристалла следующей формулой:

$$U_{th} = \pi \frac{\sqrt{K_{11}}}{\sqrt{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}}. \quad (9)$$

При приложении электрического поля к слою ЖК толщиной  $d$  происходит изменение эффективной оптической анизотропии  $\Delta n$ , что приводит к изменению фазы светового потока, распространяющегося перпендикулярно слою. В результате изменения полярного угла наклона директора  $\theta(z)$  показатель преломления для необыкновенного луча  $n_e$  уменьшается, стремясь к  $n_o$  для обыкновенного луча. Изменение

показателя преломления  $n(z)$  и оптической анизотропии  $\Delta n$  описывается следующими формулами:

$$n(z) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta(z) + n_e^2 \sin^2 \theta(z)}}, \quad (10)$$

$$\Delta n = (1/d) \int_0^d (n(z) - n_o) dz, \quad (11)$$

Фазовая задержка  $\Phi$  связана с оптической анизотропией, толщиной ЖК слоя и длиной волны следующим выражением:

$$\Phi = 2\pi d \Delta n / \lambda. \quad (12)$$

Рассмотрим плоскую ячейку, в которой ЖК ориентируется параллельно подложке с углом преднаклона директора  $\theta_p$ . При приложении к ячейке напряжения  $U \ll U_{th}$  происходит переориентация поля директора, и полярный угол наклона директора, равный в начальный момент  $\theta(z) = 90 - \theta_p$ , начинает уменьшаться. При  $U > U_{th}$  величина фазовой задержки излучения с длиной волны  $\lambda$  после прохождения через слой жидкого кристалла света будет равна

$$\Phi(U) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_e(\theta(z)) - n_o] dz. \quad (13)$$

Полярный угол наклона  $\theta(z)$  зависит от амплитуды приложенного напряжения. Когда напряжение электрического поля будет достаточно высоким, все молекулы в ЖК слое будут переориентированы перпендикулярно подложкам, а директор будет параллелен вектору поля. При этом фазовая задержка двух ортогональных компонент будет приближаться к нулю.

Объектом исследований в этой работе будут гомогенно ориентированные ЖК ячейки, заполненные НЖК с  $\Delta\varepsilon > 0$ . При приложении напряжения электрического поля жидкий кристалл будет испытывать *splay*-деформацию. На рисунке 5 приведена принципиальная электрооптическая схема для измерения характеристик ЖК ячеек. В качестве источника монохроматического излучения используется полупроводниковый лазер (1) с длиной волны 0.65 мкм, подключенный к блоку питания (2). Для наблюдения пропускания поляризованного света через ЖК ячейку (4) её размещают между поляризатором (3) и анализатором (5). Каждый поляризатор пропускает свет, поляризованный в одной плоскости. Излучение на выходе из анализатора проходит через

систему фильтров (6), регистрируется фотоприемником (7) и поступает на осциллограф (8). Измерения интенсивности пропускания излучения ЖК ячейкой проводятся при подаче на электроды напряжения  $U$  от источника (9).

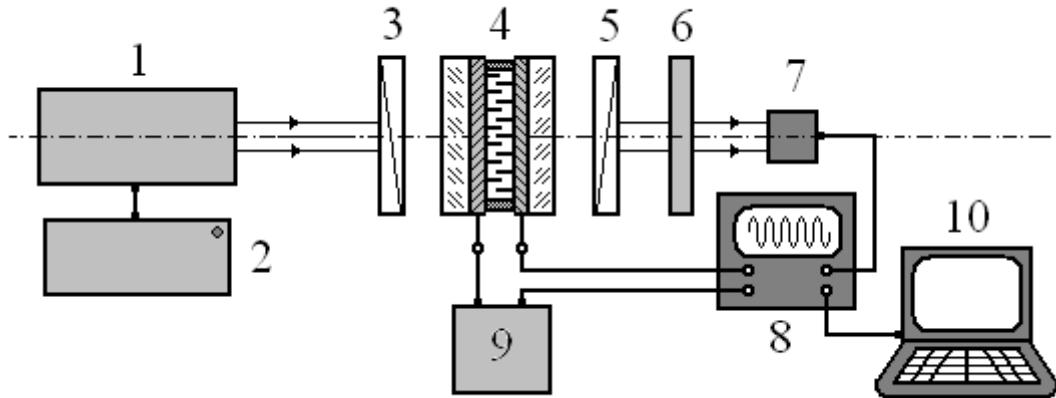


Рисунок 5 – Схема измерения электрооптических характеристик ЖК ячеек.  
 1 - лазер; 2 – блок питания лазера; 3 – поляризатор; 4 – ЖК ячейка; 5 – анализатор; 6 - система фильтров; 7 – фотоприемник; 8 – осциллограф; 9 – генератор; 10 – компьютер.

Данные, полученные в результате измерений, используются затем для построения зависимостей пропускания и фазовой задержки света от напряжения, определения максимальной фазовой задержки и порогового напряжения  $S$ -эффекта. Изменение интенсивности, регистрируемое фотоприемником (7) излучения, связано с фазовой задержкой в слое ЖК следующей формулой:

$$I = I_0 \sin^2 2\beta \sin^2(\Phi/2). \quad (14)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего на ЖК ячейку линейно поляризованного света,  $\beta$  – угол между вектором поляризации падающего луча и начальным направлением директора. Ячейку (4) устанавливают между поляризатором (3) и анализатором (5) таким образом, чтобы длинная ось ЖК молекул лежала в плоскости ее вращения и составляла угол  $\beta = 45^\circ$  с плоскостью поляризации падающего света.

Зависимость пропускания  $I(U)$  на рисунке 6 представляет собой осциллирующую кривую. Используя значений интенсивности пропускания, можно построить зависимость  $\Phi(U)$ . За пороговое напряжение эффекта Фредерикса принимается напряжение, при котором максимальная фазовая задержка изменилась на 10 %.

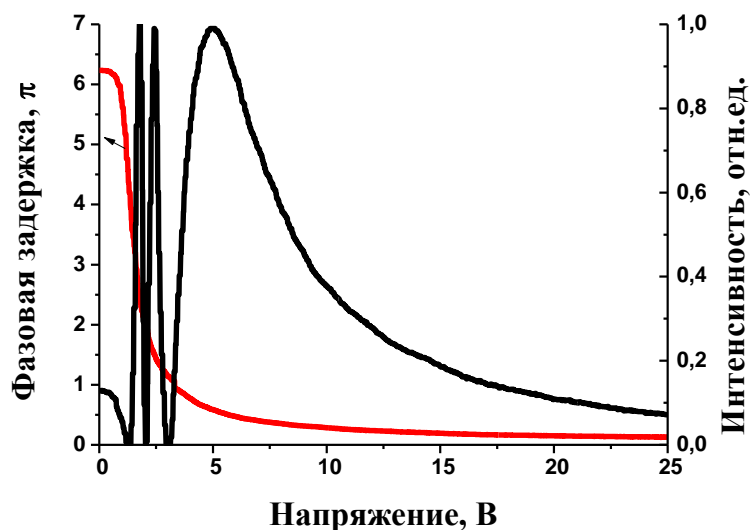


Рисунок 6 – Зависимости пропускания света и изменение фазовой задержки от напряжения, приложенного к ЖК ячейке

### *Пример расчета фазовой задержки*

Осцилляции интенсивности света  $I$  связаны с изменением фазовой задержкой  $\Phi$  соотношением (12). Это выражение можно упростить при условии, если угол  $\beta = 45^\circ$

$$I_n = \sin^2 \frac{\Phi}{2},$$

Значения интенсивности, нормированные по ее максимальному значению, изменяются от 0 до 1. С помощью выражения

$$\sin \frac{\Phi}{2} = \pm \sqrt{I_n},$$

находим величину фазовой задержки

$$\frac{\Phi}{2} = (-1)^k \arcsin(\pm \sqrt{I_n}) + \pi k,$$

$$\Phi = 2[(-1)^k \arcsin(\pm \sqrt{I_n}) + \pi k].$$

где  $k$  – любое целое число. Как известно, тригонометрическое уравнение будет давать множество решений для  $k = 0, k = 1, k = 2$  и т.д. В нашем случае имеется одно решение с определенным  $k$  и знаком перед корнем. Значение  $k$  и знак перед корнем выбирается таким образом, чтобы полученное значение для каждой точки на графике попадало в заранее размеченные значения. Например, решим это уравнение для всех точек в интервале между  $\min$  и  $\pi$ , как показано на рисунке 7. При этом  $k$  и знак

перед корнем выбираем таким, чтобы фазовая задержка изменялась в пределах от 0 до  $\pi$ .

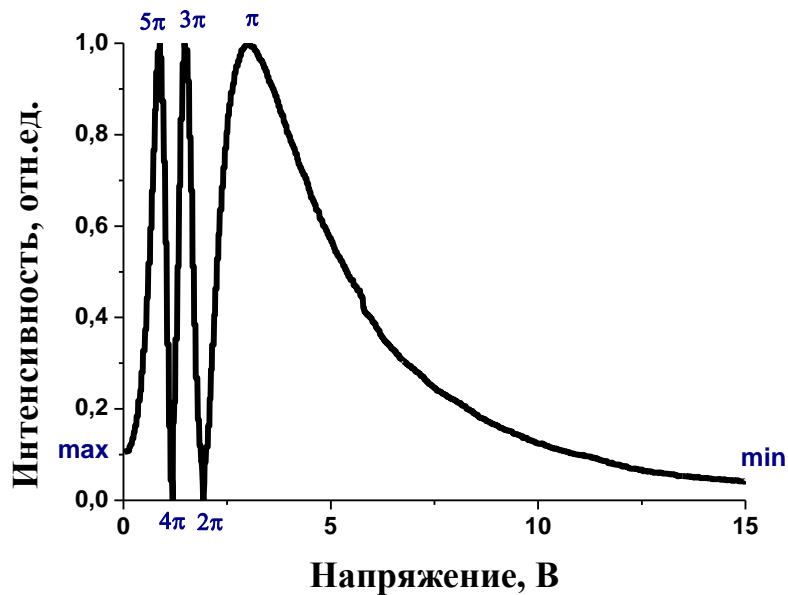


Рисунок 7 – Зависимость интенсивности излучения от напряжения

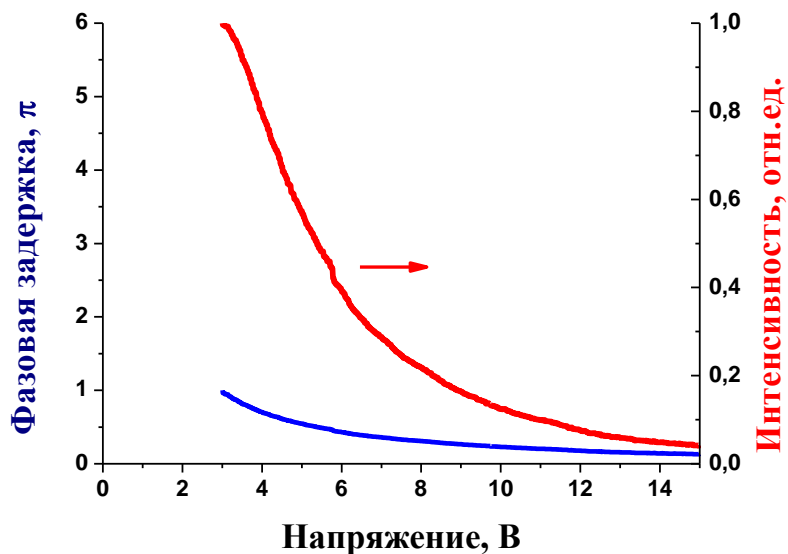


Рисунок 8 – Пример расчета

В этом случае  $k = 0$ , а перед корнем будет знак плюс, как видно на рисунке 8. Процедуру повторяем для следующей части зависимости пропускания от напряжения. Величину  $k$  и знак выбираем так, чтобы полученные значения укладывались в заранее намеченные интервалы.

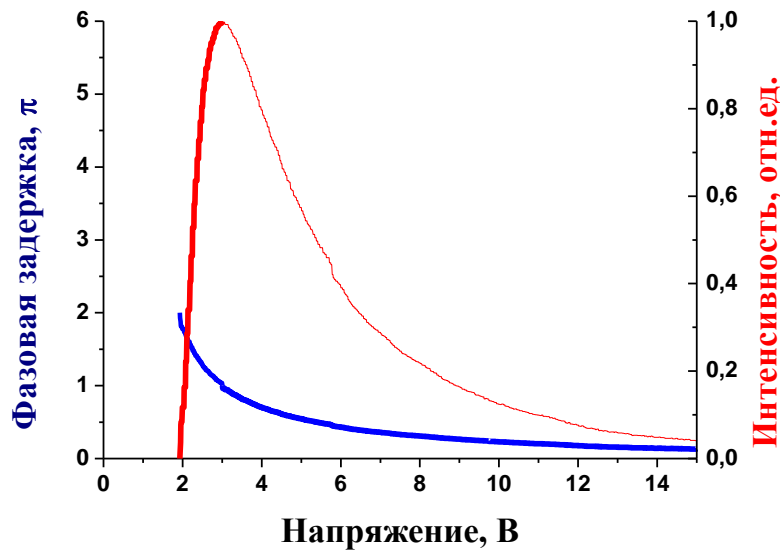


Рисунок 9 – Пример расчета

Полученные значения фазовой задержки нужно выразить в значениях кратных  $\pi$ . Первому минимуму на зависимости пропускания от напряжения для фазовой задержки, равной  $2\pi$ , например, будет соответствовать точка с ординатой 2 на графике фазовой задержки, а не 6.2831. Расчет проводится для каждой части зависимости пропускания от напряжения. В результате получаем зависимость, показанную на рисунке 10.

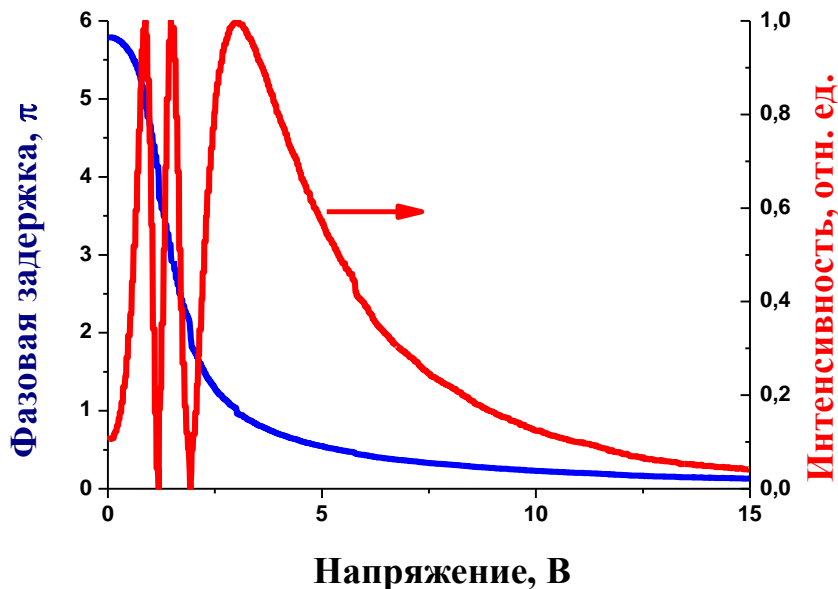


Рисунок 10 – Результаты расчета



### Задание

1. Построить график зависимости пропускания ЖК ячейки от напряжения  $I(U)$ .
2. Рассчитать значения фазовой задержки и построить график зависимости  $\Phi(U)$ .
3. Определить максимальную фазовую задержку и напряжение порога Фредерикса.
4. Рассчитать теоретическое значение фазовой задержки, в соответствии с условиями задания.
5. Составить таблицу полученных результатов.

Пример: Таблица

№ образца	НЖК	$d$ , мкм	$\lambda$ , мкм	$U_{th}$ , В	$\Phi_{max}/\pi$	Расчетное значение $\Phi/\pi$

Примечание: Для построения графиков использовать программу *Origin*. Значения оптической анизотропии для НЖК приведены в таблице 1.

Таблица 1: Свойства НЖК

НЖК	$n_e$	$n_o$	$\Delta n$	$\epsilon_{//}$	$\epsilon_{\perp}$	$\Delta\epsilon$ , kHz	$\gamma$ , $m^2/сек$	$\eta$ н сек/ $m^2$
VL-037 (Merck)	1.808	1.526	0.282	23.1	6.1	16.9	$81 \times 10^{-6}$	
VL-006 (Merck)	1.816	1.53	0.286	22.8	5.5	17.3	$71 \times 10^{-6}$	
ЖК-1001 (НИОПИК)	1.79	1.53	0.26	9.53	5.1	4.43		0.377
ЖК-1282 (НИОПИК)	1,678	1.509	0.1695	15.5	5.6	9.9		

## Лабораторная работа № 4

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ОПТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

### *Основные задачи работы:*

- измерить оптическое пропускание гомогенно ориентированной ЖК ячейки в зависимости от напряжения для нескольких длин волн;
- определить максимальную фазовую задержку и рассчитать оптическую анизотропию нематического жидкого кристалла для каждой длины волны;
- получить зависимость оптической анизотропии от длины волны.

### *Описание лабораторной работы*

Направление колебаний вектора необыкновенного луча лежит в плоскости главного сечения. Если ЖК ячейка имеет гомогенную (параллельную) ориентацию, то в отсутствие электрического поля вектор поляризации необыкновенного луча и директор, соответствующий оптической оси ЖК, будут параллельны. При приложении напряжения выше порога Фредерикса происходит изменение положения директора в результате переориентации молекул ЖК. Угол между вектором поляризации и директором увеличивается от угла преднаклона  $\theta_p$  до  $90^\circ$ . Скорость распространения необыкновенного луча и показатель преломления  $n_e$  уменьшаются при прохождении через ЖК слой, в то время как для обыкновенного луча она не изменяется. В исходном состоянии величина эффективной оптической анизотропии  $\Delta n$  и фазовая задержка для данной толщины ЖК слоя  $d$  будут наибольшими. Оптическая анизотропия ЖК стремится к нулю при переориентации директора параллельного поверхности подложки ЖК ячейки в вертикальное положение. При этом фазовая задержка в слое ЖК уменьшается. Двухлучепреломление ЖК можно контролировать по изменению фазовой задержки между обыкновенным и необыкновенным лучами света, падающего перпендикулярно поверхности слоя жидкого кристалла. Зная величину фазовой задержки и толщину ЖК слоя можно рассчитать эффективную оптическую анизотропию по формуле (12). На рисунке 11 показаны зависимости пропускания от напряжения ЖК ячейки для двух длин волн 450 нм (а) и 800 нм (б), полученные с помощью спектрофотометра СФ-56.

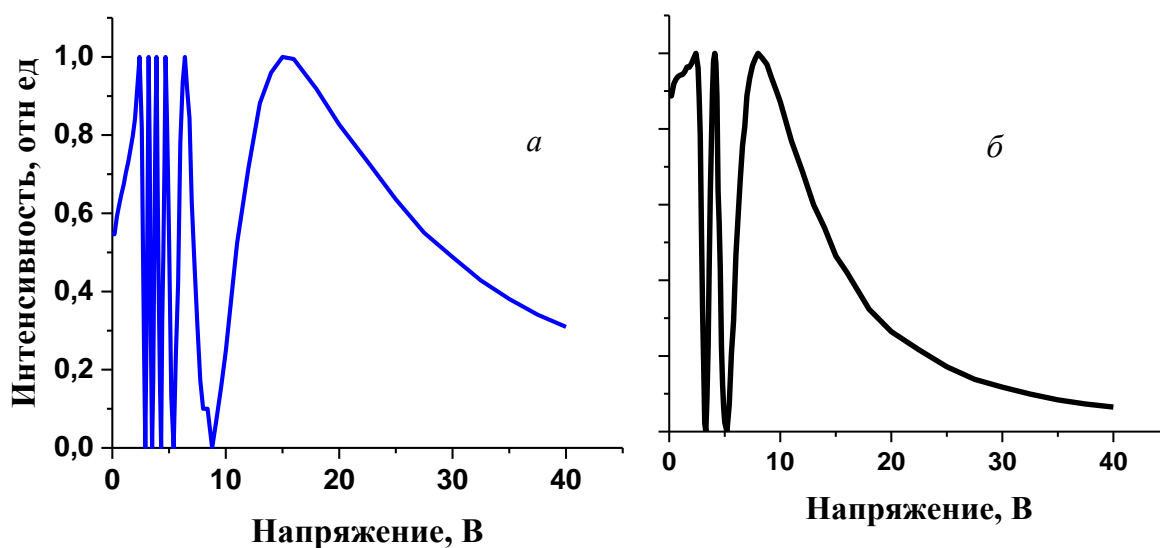


Рисунок 11 – Зависимости пропускания ЖК ячейки от напряжения на длинах волн 450 нм и 800 нм

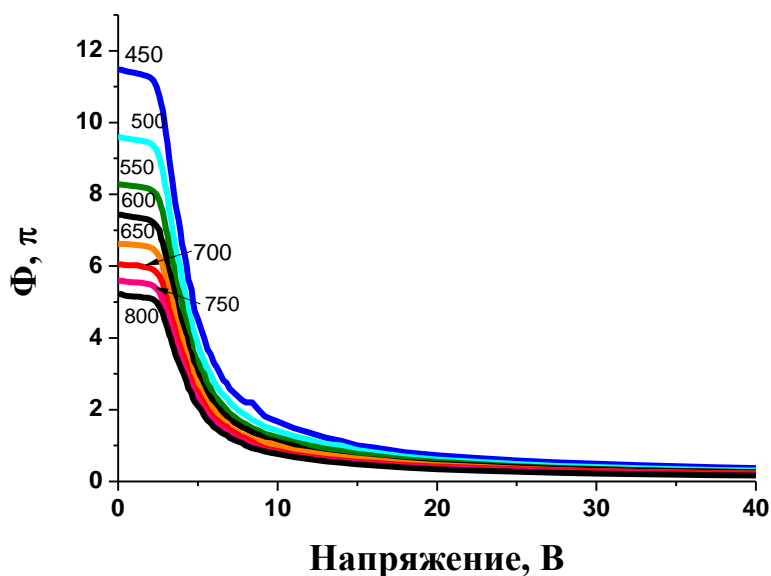


Рисунок 12 – Зависимости фазовой задержки света в слое ЖК для длин волн в интервале 450 – 800 нм

Рисунки 11 *a* и *б* иллюстрируют влияние длины волны на двулучепреломление жидкого кристалла. С увеличением длины волны количество осцилляций уменьшается, что свидетельствует об уменьшении фазовой задержки в результате дисперсии оптической анизотропии. Рассчитать фазовую задержку и определить дисперсию  $\Delta n(\lambda)$  можно, измерив зависимости пропускания ЖК слоя от приложенного напряжения

для нескольких длин волн. Пропускание ЖК ячейки связано с фазовой задержкой в слое ЖК в соответствии с формулой (14). Экспериментальные зависимости пропускания от напряжения нормируются по величине максимального пропускания для угла  $\beta = 45^\circ$  между плоскостью поляризации падающего света и оптической осью ЖК

$$I_n = \sin^2 \frac{\Delta\Phi}{2}. \quad (15)$$

Максимальную фазовую задержку можно определить из зависимости фазовой задержки от напряжения, используя экспериментальные данные оптического пропускания ЖК ячейки (пример расчета в работе № 3). На рисунке 12 показаны зависимости фазовой задержки от напряжения для нескольких длин волн. Наибольшая величина фазовой задержки света в ЖК ячейке для всех длин волн наблюдается, когда напряжение электрического поля равно нулю. Измерения оптического пропускания ЖК ячеек на разных длинах волн можно проводить с помощью спектрофотометра СФ-56, используя генератор напряжений, для приложения к ЖК ячейке электрического поля. Порядок включения этого прибора приведен в Приложении 1, а порядок проведения измерений зависимостей пропускания от напряжения описан в Приложении 2.

### ***Задание***

1. Получить зависимости пропускания ЖК ячейки от напряжения для нескольких длин волн.
2. Рассчитать зависимости фазовой задержки от напряжения для каждой длины волны и определить максимальные значения фазовой задержки между обыкновенным и необыкновенным лучами в слое ЖК.
3. Рассчитать величину оптической анизотропии для каждой длины волны и построить зависимость  $\Delta n(\lambda)$ .

## Лабораторная работа №5

### ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛА ПРЕДНАКЛОНА ДИРЕКТОРА, ПОРОГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ЭНЕРГИИ СЦЕПЛЕНИЯ В ЖК КОМПОЗИТАХ С НАНОЧАСТИЦАМИ

#### *Основные задачи работы:*

- получить зависимости пропускания от напряжения для ЖК ячеек допированных наночастицами;
- рассчитать фазовую задержку, угол преднаклона директора и энергии сцепления.

#### *Описание лабораторной работы*

Добавление наночастиц в НЖК может влиять как на их объемные свойства, так и на изменение условий межфазного взаимодействия молекул ЖК с ориентирующей поверхностью. Межфазное взаимодействие между жидким кристаллом и поверхностью твердого тела на границе раздела двух конденсированных сред является одним из факторов, влияющим на электрооптические процессы в жидких кристаллах, и характеризуется энергией сцепления (anchoring energy). Полярная энергия сцепления соответствует энергии «отрыва» молекул жидкого кристалла от подложки при приложении к ней напряжения электрического поля, превышающего порог эффекта Фредерикса. Азимутальная энергия это энергия, необходимая для изменения азимутального угла между осью  $x$  и проекцией директора на плоскость. Наночастицы и их продукты распада могут изменять условия взаимодействия на межфазной границе в результате их конденсации на поверхности ориентирующего слоя. В результате этого может уменьшаться энергия сцепления и увеличиваться угол преднаклона директора ЖК. Увеличение концентрации наночастиц CdSe/ZnS в НЖК композитах сопровождалось увеличением угла преднаклона директора на рисунке 13, что приводило к уменьшению фазовой задержки света, проходящего через слой ЖК. Одновременно с этим понижалось эффективное пороговое напряжение электрооптического эффекта на рисунке 14, которое влияет на динамику оптического отклика.

Значения угла преднаклона и энергии сцепления можно рассчитать с помощью зависимостей фазовой задержки от напряжения. Для этого необходимо провести экспериментальное измерение зависимости пропускания ЖК ячеек от приложенного напряжения и рассчитать соответствующую зависимость фазовой задержки. Техника измерения

пропускания ЖК ячеек приведена в приложении 4, а описание расчета фазовой задержки дано в лабораторной работе № 3.

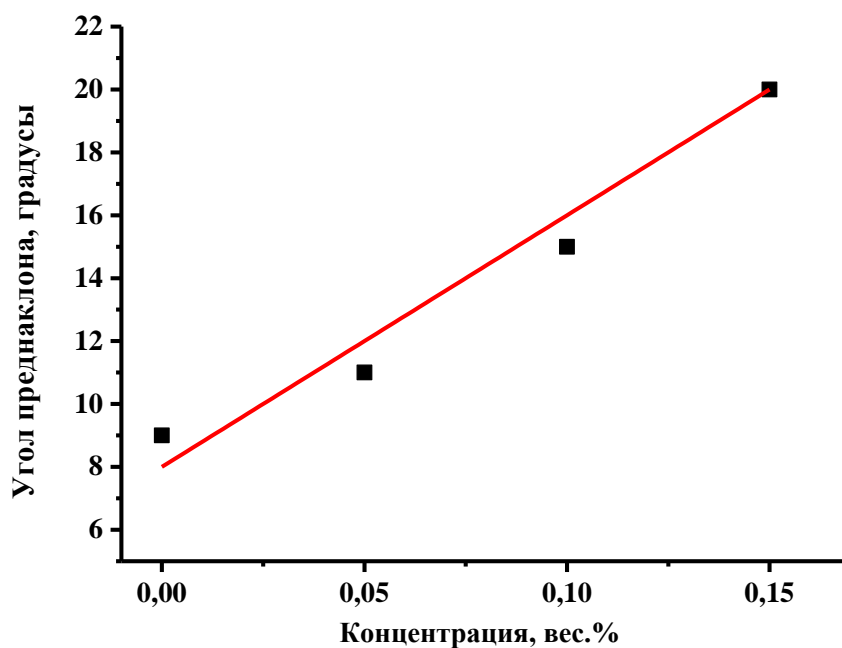


Рисунок 13 – Зависимость угла преднаклона директора от концентрации полупроводниковых наночастиц CdSe/ZnS в НЖК

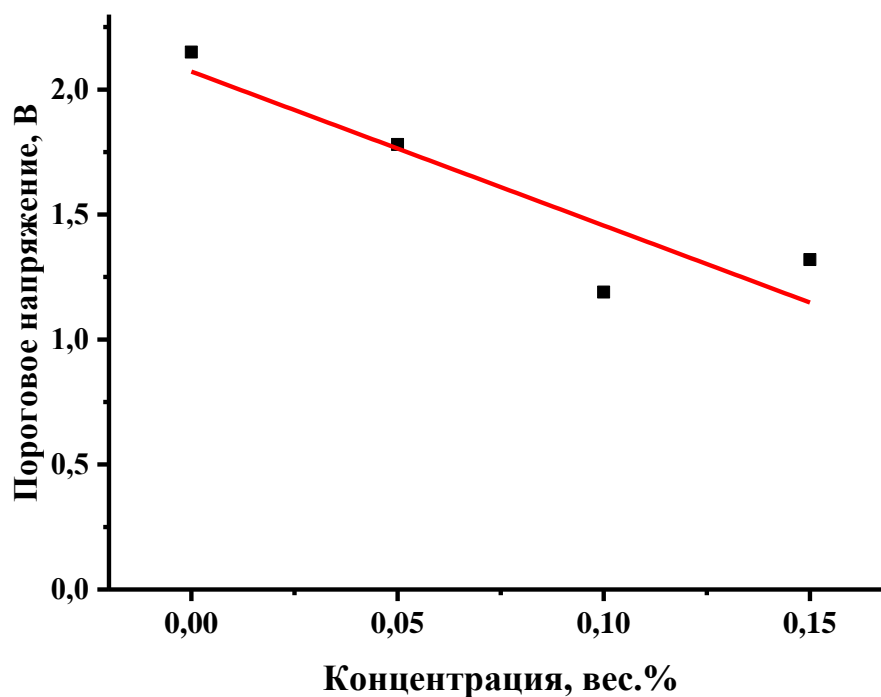


Рисунок 14 – Зависимость порогового напряжения ЖК ячеек от концентрации наночастиц CdSe/ZnS в НЖК

Угол преднаклона директора  $\theta_p$  можно определить, зная фазовую задержку  $\Phi_0$  в начальный момент времени, согласно формуле:

$$\Phi_0 = \frac{2\pi \cdot d \cdot n_o}{\lambda} \left( \frac{n_e}{\sqrt{n_o^2 \cdot \cos^2 \theta_p - n_e^2 \cdot \sin^2 \theta_p}} - 1 \right). \quad (16)$$

Для оценки энергии сцепления  $W$  можно использовать следующие соотношения:

$$\frac{\Phi(U - U')}{\Phi_0} = J_0 - \frac{2K_{11}}{Wd} (1 + \kappa y_0)(U - U'), \quad (17)$$

где  $U$  – напряжение,  $J_0$  – коэффициент,

$$\kappa = \frac{K_{33} - K_{11}}{K_{11}},$$

$$y_0 = \sin^2 \theta_0,$$

$$U' = \alpha \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_{\parallel}} U_{th},$$

$$\alpha = \frac{1}{\pi} \int_{y_0}^1 \sqrt{\frac{(1+B)(1+\kappa y)}{y(1+\beta y)}},$$

$$B = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_{\perp}}.$$

Чтобы определить энергию сцепления, зависимость фазовой задержки перестраивается в координатах  $(U - U', \frac{\Phi(U-U')}{\Phi_0})$ . Затем линейная часть этой зависимости аппроксимируется линейной функцией. Энергию сцепления можно рассчитать, определив наклон аппроксимирующей прямой, соответствующий  $\frac{2K_{11}}{Wd} (1 + \kappa y_0)$ . Пример аппроксимации показан на рисунке 15.

Этот метод оценки энергии сцепления можно использовать только, если добавление наночастиц не вызывает существенного изменения ориентационного параметра порядка ЖК. Для расчетов допускается использовать табличные значения оптической и диэлектрической анизотропии, а также коэффициента упругости ЖК, так как их величины не изменяются в этом случае.

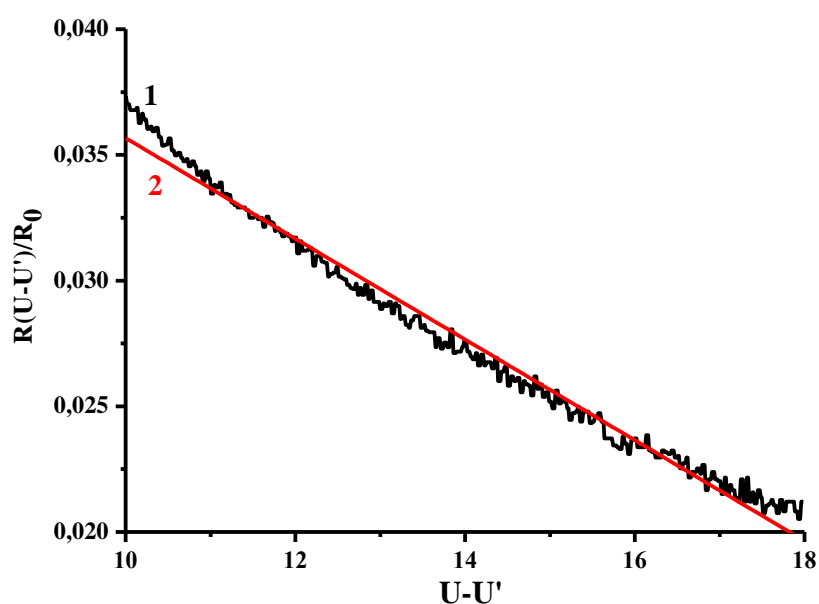


Рисунок 15 – Определение энергии сцепления: 1 – экспериментальные данные, 2 – теоретическая аппроксимация

### Задание

1. Измерить пропускание ЖК ячеек от напряжения  $I(U)$ .
2. Построить зависимости  $\Phi(U)$  для каждого образца, определить максимальную фазовую задержку и рассчитать угол преднаклона директора, используя уравнение (16).
3. Построить зависимость фазовой задержки от напряжения в координатах  $(U - U', \frac{\Phi(U-U')}{\phi})$ . Определить наклон прямой, аппроксимируя линейный участок зависимости.
4. Рассчитать энергию сцепления.
5. Составить таблицу полученных результатов.

Пример: Таблица

№ образца	Содержание наночастиц	$d$ , мкм	$R_{\max}/\pi$	$\theta_0$ , град.	$W$ , Дж/м <sup>2</sup>



## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕД

#### *Основные задачи работы:*

- получить низкочастотные диэлектрические спектры ЖК с помощью импеданс спектроскопии;
- определить диэлектрическую проницаемость и диэлектрическую анизотропию ЖК;
- рассчитать концентрацию мобильных ионов и средний коэффициент их диффузии.

#### *Описание лабораторной работы*

Метод импеданс спектроскопии широко применяется для исследования конденсированных сред с диэлектрическими и полупроводниковыми свойствами. Исследования диэлектрических и электрических свойств ЖК дают информацию о процессах, происходящих в ЖК ячейках при приложении к ним напряжения электрического поля. Измерения импеданса жидких диэлектриков и электролитов, в том числе и жидких кристаллов, почти всегда сопряжены с необходимостью разделения составляющих импеданса. В ЖК они характеризуют импеданс объема слоя ЖК и тонкого слоя вблизи электродов ЖК ячейки. Импеданс объема определяется не только молекулярно-ориентированной ЖК мезофазой, но и существенным вкладом в него удельной проводимости ЖК, которая зависит от объемной концентрации ионов, их заряда и подвижности. Приэлектродный импеданс главным образом связан с накоплением и движением зарядов вблизи поверхности электродов ячейки от электролита во внешнюю электрическую цепь.

Часто для описания объемных свойств ЖК используют упрощенную электрическую схему, состоящую из емкости  $C_{ЖК}$  и объемного сопротивления ЖК материала  $R_{ЖК}$ . Для полного описания электрических свойств жидкого кристалла используется эквивалентная электрическая схема ЖК ячейки, показанная на рисунке 16.  $R_{эл}$  – сопротивление электродов.

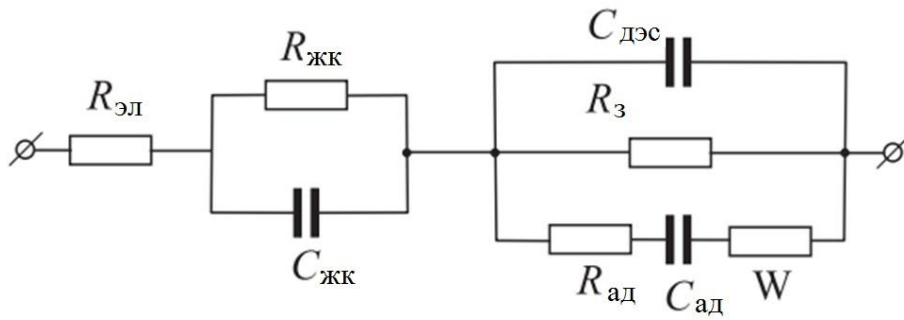


Рисунок 16 – Эквивалентная электрическая схема ЖК ячейки

Правая часть схемы описывает приэлектродные процессы, где  $R_з$  – активное сопротивление переноса зарядов из внешней электрической цепи через электрод в слой ЖК и экстракцию зарядов из слоя ЖК через электрод во внешнюю электрическую цепь. Именно это сопротивление определяет электрические свойства ЖК при приложении постоянного напряжения. Элементы  $C_{ад}$  и  $R_{ад}$  описывают поведение слоев, адсорбированных на электроде (ориентирующие слои, поверхностно-активные вещества и сурфактанты). Под действием внешнего электрического поля в ЖК ячейках с большой концентрацией мобильных ионов могут образовываться двойные электрические слои ( $C_{дэс}$ ). Образование двойных электрических слоев происходит из-за накопления ионов одного знака у электрода с противоположным знаком. Неоднородность межфазных границ учитывается введением диффузионного элемента Варбурга  $W$  на рисунке 16.

Действительная часть диэлектрической проницаемости ЖК определяется из результатов измерения емкости ЖК ячейки, которая описывается формулой:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (18)$$

Мнимая часть диэлектрических потерь рассчитывается по результатам измерения тангенса угла диэлектрических потерь.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}. \quad (19)$$

На рисунке 17 приведены характерные зависимости действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  составляющих диэлектрической проницаемости ЖК в интервале частот  $10-10^3$  Гц. Эти зависимости можно аппроксимировать функциями вида:

$$\varepsilon' = \frac{2c_i q^2 D_i^{3/2}}{\varepsilon_0 \pi^{1/2} d k_B T} f^{-3/2} + \varepsilon'_{нч}, \quad (20)$$

$$\varepsilon'' = \frac{2c_i q^2 D_i}{\varepsilon_0 k_B T} f^{-1}. \quad (21)$$

где  $\varepsilon_{нч}$  – низкочастотная составляющая диэлектрической проницаемости (без учета ионно-релаксационной дисперсии),  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $c_i$  – концентрация мобильных ионов,  $q$  – элементарный заряд,  $D$  – средний коэффициент диффузии мобильных ионов,  $d$  – толщина ЖК слоя,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $f$  – частота сигнала.

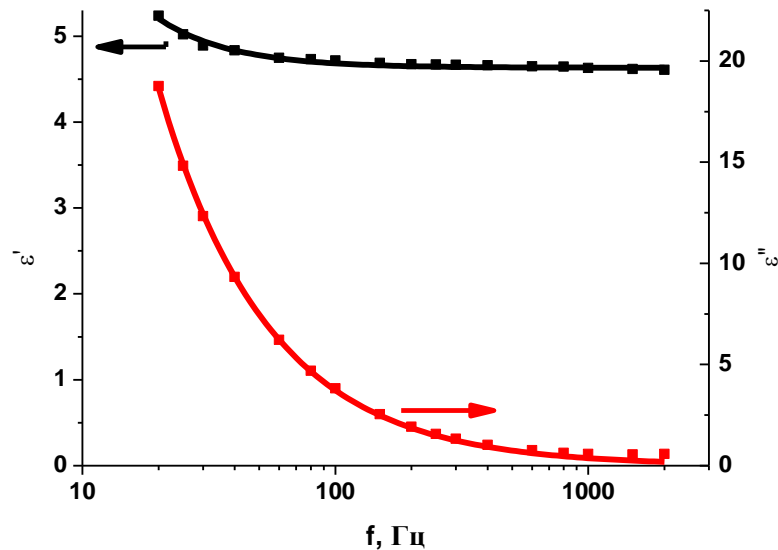


Рисунок 17 – Низкочастотные спектры действительной и мнимой составляющих диэлектрической проницаемости жидкого кристалла. Расчетные значения показаны сплошными линиями

С увеличением частоты электрического поля диполи молекул ЖК не успевают следовать за ним и диэлектрическая проницаемость уменьшается. В ЖК материалах нормальная составляющая диэлектрической проницаемости начинает значительно изменяться на частотах выше, чем параллельная составляющая. В области частот больше 1 кГц начинает проявляться дисперсия ориентационной поляризации параллельной составляющей диэлектрической проницаемости ЖК. Частота релаксации зависит от многих параметров, таких как температура среды, ориентационный порядок, а также от структурных особенностей молекул. Как правило, в интервале от единиц до десятков кГц релаксацию испытывают сложные молекулы, входящие в состав ЖК смеси (молекулы с

длинными цепями сопряжения). Из-за этого уменьшается эффективная диэлектрическая анизотропия ЖК среды. Типичная зависимость диэлектрической анизотропии от частоты приведена на рисунке 18.

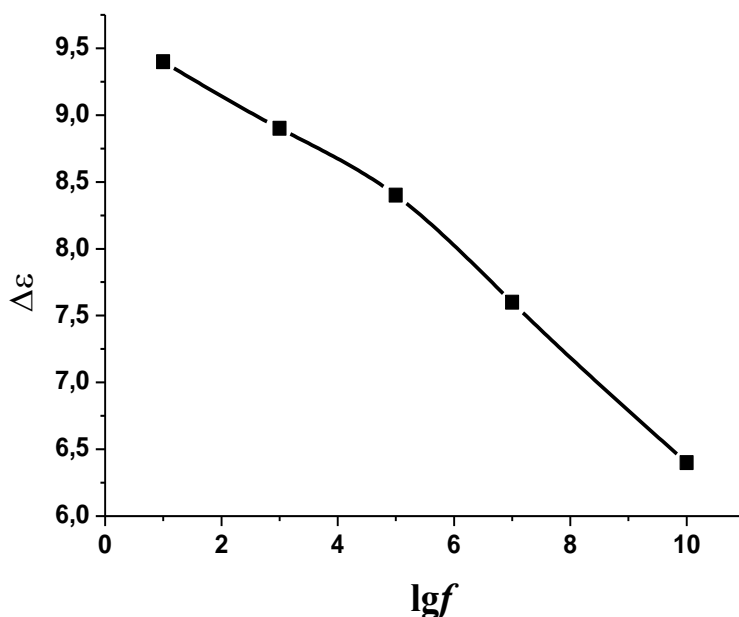


Рисунок 18 – Зависимость эффективной диэлектрической анизотропии от частоты

В этой работе будут проводиться исследования электрических и диэлектрических свойств НЖК с гомеотропной ориентацией. При напряжениях ниже порога Фредерикса переориентации ЖК молекул не происходит и значение диэлектрической проницаемости соответствует перпендикулярной составляющей  $\varepsilon_{\perp}$ . С увеличением напряженности приложенного электрического поля, вектор которого перпендикулярен директору, он изменяет свое положение. Длинные оси молекул переориентируются вдоль вектора поля. Значение диэлектрической проницаемости в этом случае эквивалентно продольной составляющей  $\varepsilon_{\parallel}$ . На рисунке 19 показаны зависимости диэлектрической проницаемости от напряжения для разных частот. Нормальную составляющую  $\varepsilon_{\perp}$  можно определить экстраполированием линейного участка зависимости  $\varepsilon(U)$  к оси ординат в области напряжений ниже порога Фредерикса как показано на рисунке 20 а.

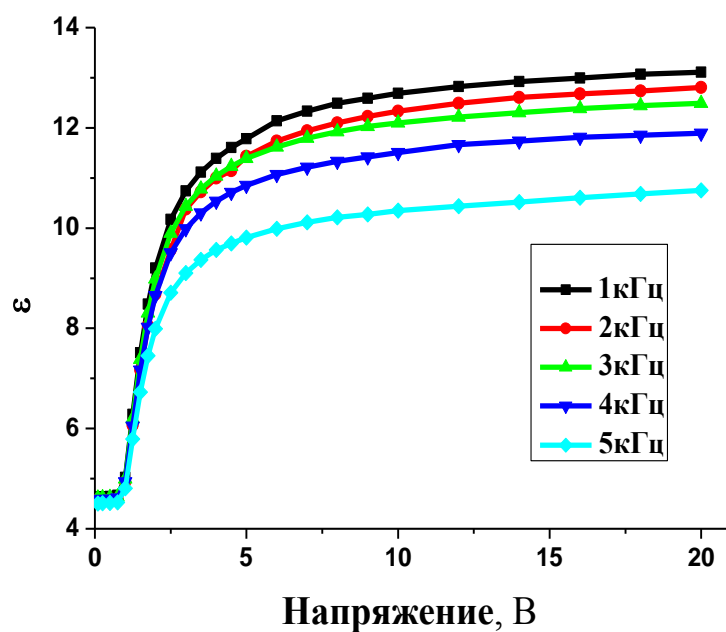


Рисунок 19 – Зависимости диэлектрической проницаемости ЖК от напряжения электрического поля, приложенного с разной частотой

Для определения параллельной составляющей  $\varepsilon_{//}$  строится график зависимости  $\varepsilon$  от обратного напряжения и экстраполируется его линейный участок до оси ординат, как показано на рисунке 20 б.

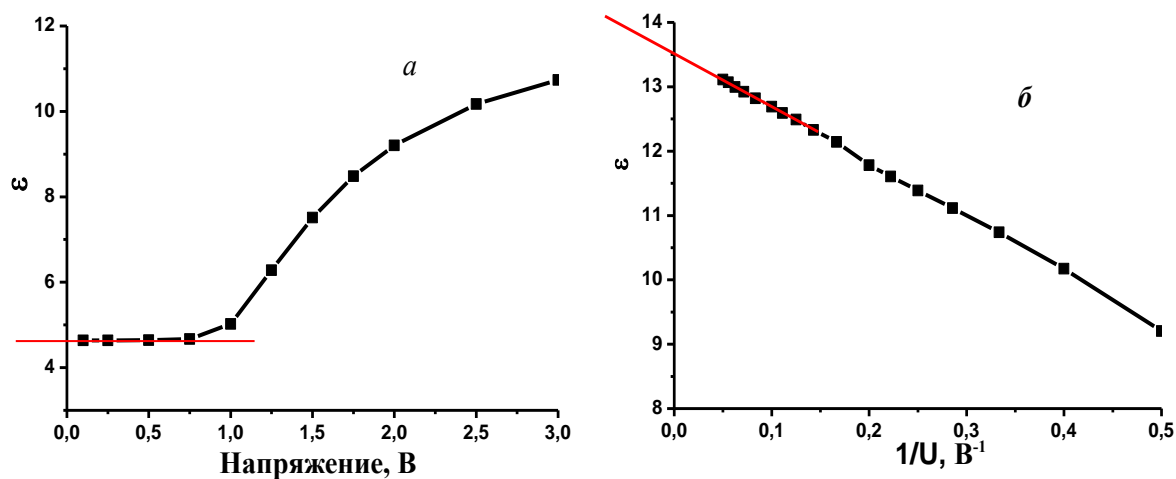


Рисунок 20 – Определение нормальной (а) и параллельной (б) составляющих диэлектрической проницаемости ЖК

Измерения диэлектрических характеристик ЖК ячеек проводятся с помощью прецизионного измерителя импеданса E4980A в ручном или автоматическом режимах (Приложение 2).

### ***Задание***

1. Измерить зависимости емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, рассчитать и построить спектры действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости.
2. Определить концентрации мобильных ионов и среднего коэффициента их диффузии.
3. Получить зависимости действительной части диэлектрической проницаемости от напряжения для всех измеренных частот, используя зависимости емкости от напряжения.
4. Определить поперечную и продольную составляющую диэлектрической анизотропии для каждой измеренной частоты.
5. Рассчитать значение эффективной диэлектрической анизотропии для всех частот.

## **Лабораторная работа №7**

### **ОСЛАБЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОПУСКАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТВИСТ ЭФФЕКТА В ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ**

#### ***Основные задачи работы:***

- измерить оптическое пропускание твист-ячейкой в зависимости от амплитуды приложенного напряжения;
- определить оптический порог твист-эффекта;
- рассчитать контрастное отношение и динамический диапазон твист-ячейки.

#### ***Описание лабораторной работы***

Известно несколько вариантов перехода Фредерикса, отличающихся геометрией исходной ориентации директора и знаком диэлектрической анизотропии. Особый интерес представляет, так называемый твист-эффект. При переходе Фредерикса, индуцированном электрическим полем, директор нематического ЖК стремится сориентироваться так, чтобы направление, вдоль которого диэлектрическая проницаемость максимальна по отношению к директору, совпало с вектором поля безотносительно к

его знаку. Переориентация сопровождается изменением двулучепреломления среды, что используется для модуляции монохроматического света. Специальной обработкой стенок ячейки искусственно создается закрученная на  $90^\circ$  ориентация директора. Такая структура поворачивает вектор поляризации света на угол  $90^\circ$ , а при приложении поля эффект поворота исчезает. Используя два пленочных поляризатора, можно создать световой затвор, который и применяется в большинстве дисплеев. Твист-эффект широко используются в различных дисплейных устройствах: ноутбуках, компьютерах, сотовых телефонах и других коммуникационных ЖК устройствах. Использование деформации кручения НЖК позволяет ускорить время переключения и повысить контраст устройства. В телекоммуникационных системах используются оптические ЖК аттенюаторы на твист-эффекте, которые служат для понижения амплитуды светового сигнала без заметного его искажения.

Твист-структура слоя НЖК образуется, когда направления директора вблизи противоположных границ раздела ЖК с поверхностью подложек ячейки, взаимно перпендикулярны или развернуты на некоторый угол относительно друг друга. Рассмотрим твист ячейку, в которой директора на межфазных границах образуют угол  $90^\circ$ . При приложении к ЖК ячейке напряжения, превышающего порог электрооптического эффекта, директор ЖК начинает отклоняться в результате *splay*-деформации ЖК. В результате этого происходит изменение показателя преломления необыкновенного луча и оптической анизотропии  $\Delta n$ . Фазовая задержка в слое уменьшаются. Затем происходит поворот плоскости поляризации линейно поляризованного излучения вдоль оси  $z$  перпендикулярной слою ЖК на угол  $\pi/2$ .

Процесс переориентации директора из горизонтального в вертикальное положение сопровождается ослаблением пропускания ЖК ячейки. В скрещенных поляризаторах при этом наблюдается переход из «светлого» состояния в «темное», т.е. ячейка становится непрозрачной. При снятии напряжения молекулы нематического ЖК возвращаются в исходное положение под действием упругих сил, и твист-ячейка вновь начинает пропускать падающее на нее излучение. На рисунке 21 приведена схема переориентации НЖК молекул в твист-ячейке.

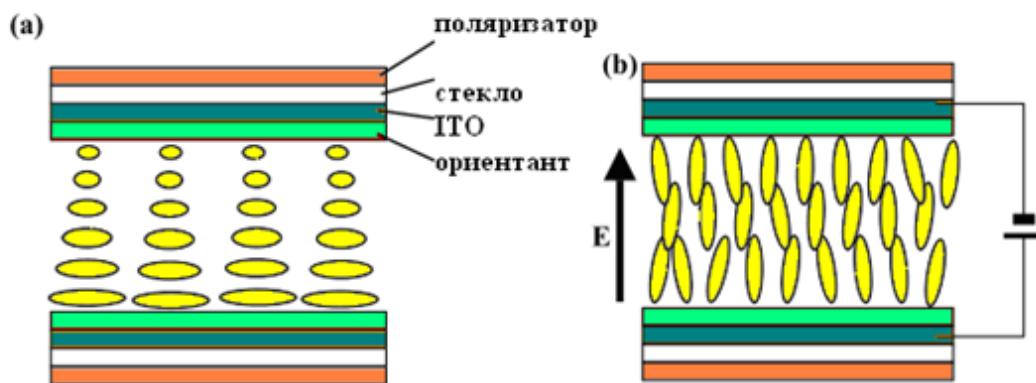


Рисунок 21 – Схема переориентации молекул в твист-ячейке:  
 (а) – соответствует исходному «светлому» состоянию в скрещенных поляризаторах – максимальное пропускание излучения,  
 (б) – соответствует «темному» состоянию с минимальным пропусканием при приложении электрического поля

На рисунке 22 показана кривая спада пропускания твист ячейки. Напряжение, при котором начинается спад пропускания в твист ячейке, называется оптическим порогом  $U_{op}$  твист-эффекта. В работе за оптический порог принимается напряжение, при котором пропускание уменьшается на 10 % от максимальной интенсивности пропускания.

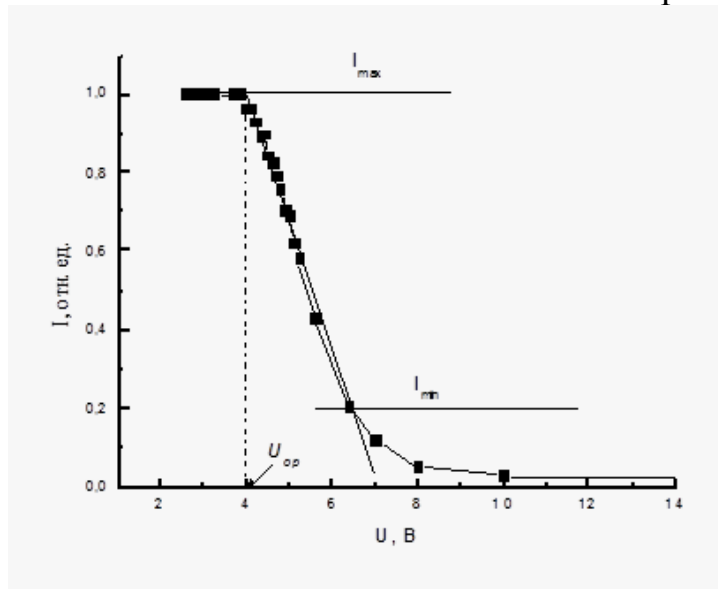


Рисунок 22 – Изменение пропускания твист-ячейки в зависимости от приложенного напряжения

Величина оптического порога и диапазон напряжений, в котором происходит изменение оптического пропускания ячейки от максимального до минимального значения, зависят от свойств и толщины слоя ЖК, способа его ориентации и длины волны излучения. Для определения



коэффициента контраста ЖК ячейки на кривой пропускания выделяется линейный отрезок, начало которого совпадает с максимальной интенсивностью пропускания  $I_{max}$ . Минимальная интенсивность  $I_{min}$  соответствует наименьшему значению интенсивности пропускания на этом отрезке зависимости  $I(U)$ , как показано на рисунке 22. Коэффициент контраста определяется по формуле:

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (22)$$

Для характеристики ослабления пропускания света оптическим аттенуатором используется характеристика, называемая динамическим диапазоном, которая выражается в децибелах (дБ):

$$-10 \log \frac{I_{min}}{I_{max}}. \quad (23)$$

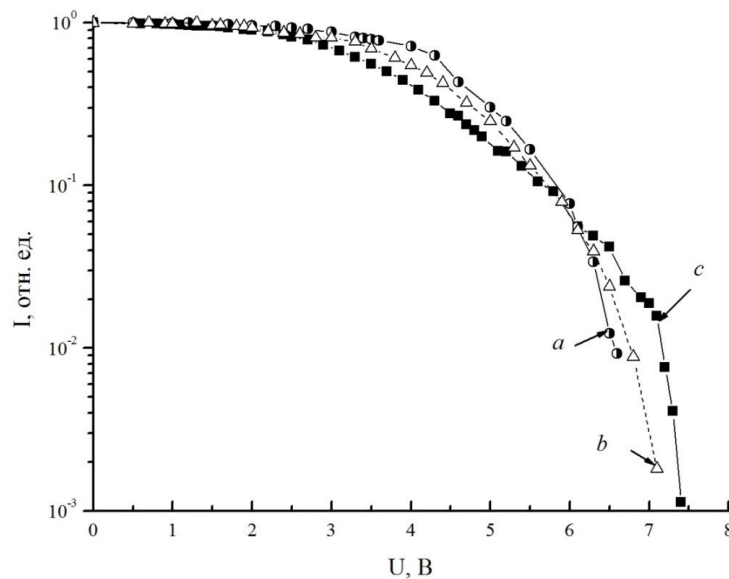


Рисунок 23 – Кривые пропускания  $I(U)$  ЖК ячеек с разными граничными условиями на длине волны  $\lambda = 1.55$  мкм

Динамический диапазон аттенуаторов может достигать 40 – 50дБ, что соответствует кратности ослабления сигнала на 4–5 порядков. На рисунке 23 приведены кривые пропускания для трех твист-ячеек. Относительное изменение интенсивности ( $I / I_{max}$ ) дано в логарифмическом масштабе, что позволяет оценить динамический диапазон ослабления пропускания ЖК устройства.

Объектом исследований в этой работе является твист-ячейка. Изменение интенсивности оптического пропускания в ней будет наблюдаться в результате деформации кручения при приложении к ней электрического поля. Измерения зависимости пропускания от напряжения проводятся на стенде, электрооптическая схема которого показана на рисунок 5. Порядок проведения измерений приведен в Приложении 4.

### ***Задание***

1. Построить график зависимости пропускания твист-ячейки (в относительных единицах) от напряжения в линейном масштабе.
2. Определить значение оптического порога пропускания и рассчитать коэффициент контраста по значениям максимального и минимального пропускания твист-ячейки.
3. Построить зависимость относительного пропускания твист-ячейки в логарифмическом масштабе по шкале ординат и определить динамический диапазон ослабления.

## **Лабораторная работа №8**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВИСТ-ЯЧЕЕК**

#### ***Основные задачи работы:***

- исследовать динамику процессов оптического отклика и релаксации в твист-ячейке;
- определить время включения и время выключения оптического пропускания твист-ячейкой.

#### ***Описание лабораторной работы***

Разработка современных устройств на основе жидких кристаллов требует теоретического и экспериментального изучения динамики процессов переориентации и релаксации молекул под действием электрического поля. Устройства на основе электрооптического твист-эффекта в нематических жидких кристаллов представляют интерес из-за их быстродействия. Закрученная твист-структура поворачивает плоскость поляризации падающего на ЖК ячейку света на  $90^\circ$ . При приложении к ЖК ячейке напряжения электрического поля в результате переориентации молекул ЖК из исходного состояния «выключено» в состояние «включено» происходит изменение пропускания от максимального

значения пропускания до полного его ослабления. После отключения напряжения пропускание ЖК ячейки восстанавливается. В результате процесса релаксации молекулы ЖК возвращаются в исходное состояние «выключено» под действием упругих сил.

На рисунке 24 приведены типичные кривые изменения оптического пропускания для твист-ячейки, расположенной между поляризатором и скрещенным с ним анализатором в электрооптической схеме на рисунке 5, при приложении напряжения электрического поля и после его снятия. Динамика переключения оптического сигнала характеризуется временами спада и подъема пропускания. За время включения  $\tau_{on}$  на рисунке 24 а принимается период время спада пропускания, определяемое изменением интенсивности пропускания от 90 % начальной величины до 10 %.

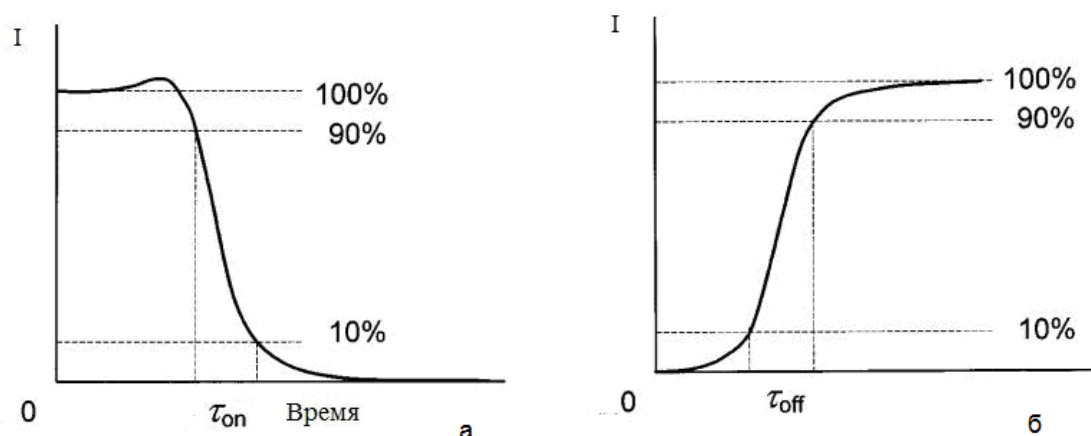


Рисунок 24 – Определение времен включения и выключения твист-ячейки по осциллограммам изменения интенсивности оптического пропускания

Согласно эмпирической формуле:

$$\tau_{on} = \frac{\gamma_1}{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon(f)} \frac{d^2}{(U^2 - U_{th}^2)}, \quad (24)$$

величина времени  $\tau_{on}$  прямо пропорционально квадрату толщины слоя ЖК  $d$  и его вязкости  $\gamma_1$  и обратно пропорционально диэлектрической анизотропии ЖК  $\Delta \varepsilon$  и разности квадратов приложенного  $U$  и порогового  $U_{th}$  напряжений:

После выключения напряжения происходит подъем пропускания в результате процесса естественной релаксации ЖК под действием упругих сил на рисунке 24 б. Время  $\tau_{off}$  в соответствии с формулой:

$$\tau_{off} = \gamma_1 d^2 / \pi^2 K_{22}, \quad (25)$$

прямо пропорционально динамической вязкости и квадрату толщины слоя ЖК и обратно пропорционально коэффициенту упругости  $K_{22}$  твист-эффекта. Экспериментально время выключения  $\tau_{\text{off}}$  определяется периодом времени изменения интенсивности пропускания от 10 % до 90 %, как показано на рисунке 24 б.

Сумма времен включения и выключения, характеризует быстродействие электроуправляемого ЖК устройства и называется временем реакции. Переключение оптического сигнала можно ускорить, если уменьшить толщину слоя жидкого кристалла или его динамическую вязкость путем повышения температуры, как следует из формул (24) и (25). Этому будет способствовать увеличение амплитуды приложенного напряжения и понижение порога электрооптического эффекта. Для достижения быстродействия ЖК устройства перечисленные способы могут комбинироваться.

Объектом исследований в этой работе является твист-ячейка с НЖК с положительной диэлектрической анизотропией. При приложении к ней электрического поля в результате деформации кручения в ней будет наблюдаться оптический отклик – изменение интенсивности пропускания. После снятия напряжения ЖК молекулы под действием упругих сил будут возвращаться в исходное состояние. Электрооптическая схема для измерения временных характеристик ЖК ячеек приведена на рисунке 5, а порядок проведения измерений описан в Приложении 4.

### ***Задание***

1. Измерить осциллограммы переключения оптического сигнала твист-ячейкой при приложении к ней напряжения электрического поля и после его снятия.
2. Получить зависимость времени оптического отклика от амплитуды напряжения, приложенного к твист-ячейке.

## Лабораторная работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА И РЕЛАКСАЦИИ ДЛЯ $S$ -ДЕФОРМАЦИИ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

#### *Основные задачи работы:*

- определить время оптического отклика ЖК при приложении напряжения электрического поля;
- определить время естественной релаксации ЖК.

#### *Описание лабораторной работы*

Уменьшение времени реакции до микросекундного уровня является актуальным как для дисплейных, так и других применений ЖК устройств. Поэтому большинство исследований и разработок в области создания разнообразных жидкокристаллических устройств направлены на поиск новых путей улучшения их временных характеристик. Наиболее простым способом понижения времени реакции является уменьшение толщины слоя жидкого кристалла. Повышение напряжения, прикладываемого к слою жидкого кристалла, влияет только на ускорение оптического отклика нематического жидкого кристалла. После снятия напряжения происходит естественная релаксация жидкого кристалла под действием упругих сил, возвращающих молекулы в исходное состояние, время которой существенно увеличивает время реакции ЖК устройства. Управлять одновременно оптическим откликом и релаксацией жидкого кристалла с помощью электрического поля можно при использовании двухчастотных нематических жидких кристаллов с инверсией знака диэлектрической анизотропии путем приложения переменного электрического поля с разной частотой.

Объектом исследований в этой работе служит ЖК ячейка с гомогенной ориентацией нематического жидкого кристалла. При приложении электрического поля к слою НЖК он будет испытывать  $S$ -деформацию, сопровождающуюся модуляцией интенсивности входящего излучения. Наблюдаемое количество максимумов и минимумов на осциллограмме оптического отклика соответствует их количеству на осциллограмме процесса релаксации после снятия напряжения. Для измерений осциллограмм оптического отклика и релаксации НЖК используется электрооптическая схема, показанная на рисунке 5, а порядок выполнения измерений описан в Приложении 4.

Осциллограмма оптического отклика для  $S$ -эффекта показана на рисунке 25. Суммарное количество максимумов и минимумов  $k$  ( $\pi$ ,  $2\pi$ ,

Зп,...) на осциллограмме соответствует величине фазовой задержки в слое жидкого кристалла *кп*. Схемы определения времен включения и выключения показаны на рисунках 25 и 26.

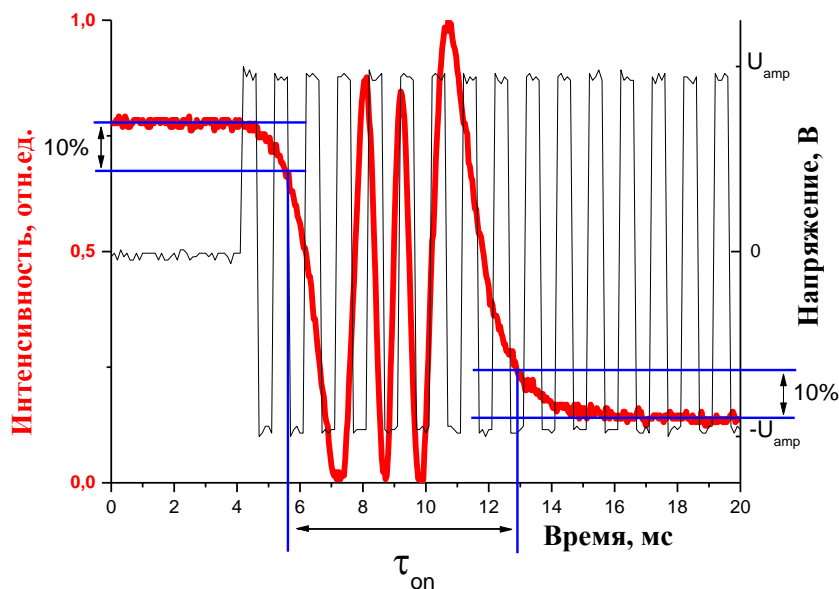


Рисунок 25 – Осциллограмма оптического отклика ЖК ячейки в результате S-деформации

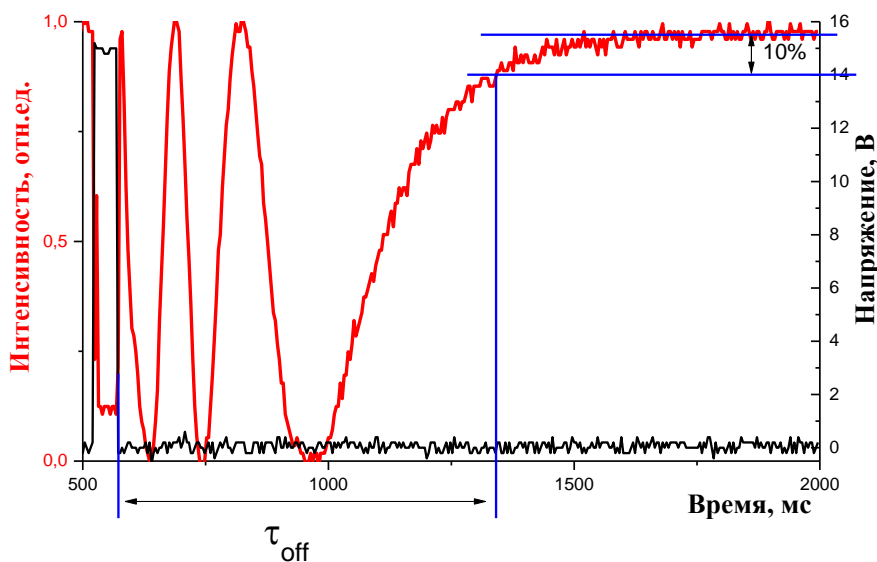


Рисунок 26 - Осциллограмма изменения интенсивности света в ЖК ячейке в результате процесса релаксации

Для определения времени включения необходимо построить осциллограммы оптического отклика и провести нормирование по

максимуму интенсивности. Времени включения соответствует периоду времени, за которое интенсивность оптического пропускания изменилась от 10 % до 90 % как показано на рисунке 25. За время выключения принимается период времени изменения интенсивности оптического пропускания от 90 % до 10 % как показано на рисунке 26.

### ***Задание***

1. Измерить осциллограммы пропускания при включении и выключении напряжения, приложенного к ЖК ячейке и определить времена  $\tau_{on}$  и  $\tau_{off}$ .
2. Получить зависимость времен включения и выключения от амплитуды напряжения.

## **Лабораторная работа №10**

### **ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА**

#### ***Основные задачи работы:***

- исследовать времена отклика и релаксации в результате S-эффекта в ЖК ячейках с наночастицами;
- получить зависимости времени включения и выключения ЖК ячеек от концентрации наночастиц.

#### ***Описание лабораторной работы***

Для практического использования НЖК, допированного наночастицами, особенно важно изучить влияние концентрации наночастиц на функциональные характеристики ЖК устройств. В том числе и динамику процесса переключения оптического сигнала в результате переориентации молекул. Добавление наночастиц в зависимости от их концентрации может изменять вязкость НЖК и энергию сцепления на границе раздела фаз, влияя на времена оптического отклика и релаксации. Увеличение угла преднаклона директора и уменьшение порогового напряжения должны способствовать ускорению переключения оптического сигнала под действием электрического поля. Повышение вращательной вязкости НЖК будет существенно увеличивать время релаксации ЖК. На рисунке 27 приведена зависимость времени включения НЖК с положительной диэлектрической анизотропией от концентрации полупроводниковых наночастиц CdSe/ZnS.

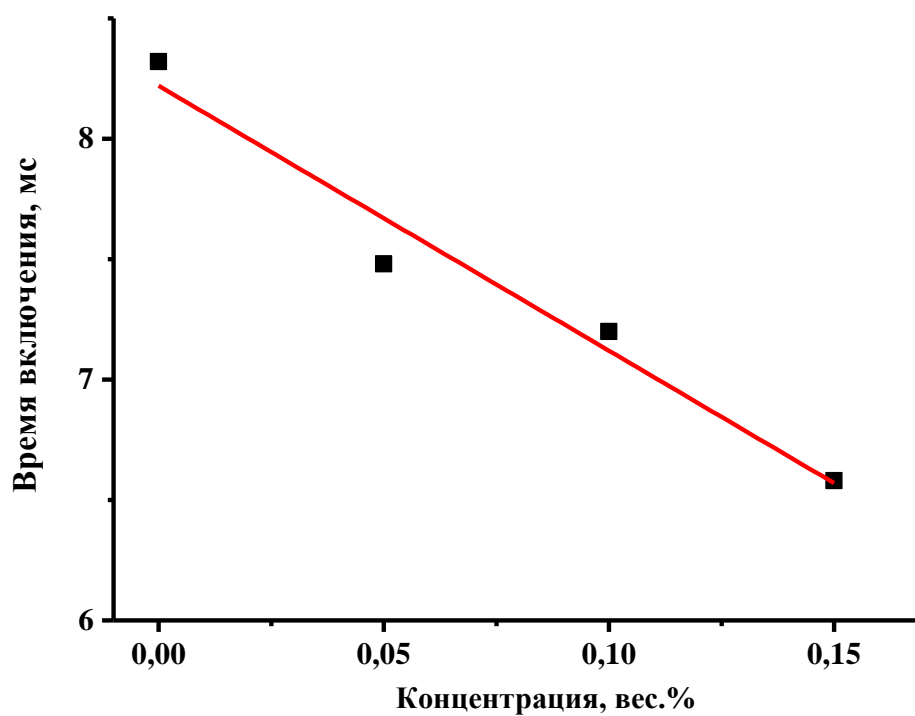


Рисунок 27 – Время оптического отклика ЖК ячеек с разной концентрацией наночастиц CdSe/ZnS при приложении напряжения 30 В с частотой 1кГц

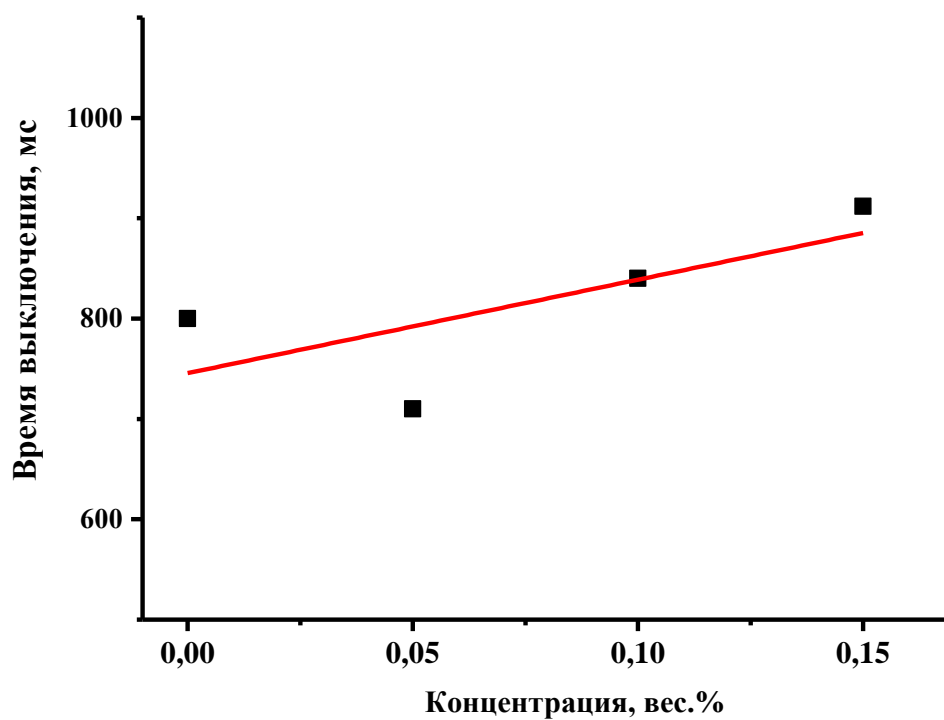


Рисунок 28 – Зависимость времени релаксации НЖК от концентрации наночастиц CdSe/ZnS



С увеличением концентрации наночастиц наблюдается ускорение оптического отклика, но после снятия напряжения происходит замедление процесса релаксации НЖК, как видно на рисунке 28. После снятия напряжения в ЖК ячейке остается внутреннее электрическое поле объемного заряда, стекание которого замедляет процесс релаксации директора и увеличивает время выключения ЖК ячейки. Добавление наночастиц в зависимости от их состава и природы вещества может приводить как к десорбции, так и адсорбции ионов, присутствующих в НЖК. Медленный дрейф носителей заряда после снятия электрического поля, приложенного к ячейке, может затруднять переориентацию диполей молекул НЖК в процессе релаксации и замедлять переориентацию молекул в исходное положение.

Для проведения исследований динамики переключения ЖК ячеек, содержащих наночастицы, используется электрооптическая схема, показанная на рисунке 5, и методики, описанные в Приложении 4.

### ***Задание***

1. Измерить осциллограммы включения и выключения ЖК ячеек.
2. Определить время  $\tau_{on}$  и  $\tau_{off}$  для каждой ЖК ячейки.
3. Получить зависимости времени включения и времени выключения ЖК ячеек от концентрации наночастиц.

## Список рекомендуемой литературы

1. *Конишина Е.А.* Основы физики жидкокристаллических систем. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013.- 130с.
2. *Амосова Л.П., Конишина Е.А., Костомаров Д.С., Федоров М.А.* Электроуправляемое двулучепреломление в нематических жидких кристаллах. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.– 63 с.
3. *Konshina E. A., Galin I. F., Gavrish E. O., Vakulin, D.A* The doping of the polyimide alignment layer by semiconductor quantum dots. // *AIP Advances*. – 2013. – V. 3. –P. 082104. **DOI:** 10.1063/1.4817826
4. *Konshina E. A., Galin I. F., Shcherbinin, D. P., Gavrish E.O.* Study of dynamics and relaxation optical response of nematic liquid crystals doped with CdSe/ZnS quantum dots. // *Liquid Crystals* – 2014. – V. 41. – Is. 9. – P. 1229-1234. **DOI:** 10.1080/02678292.2017.1323353
5. *Galina I.F., Shcherbinin D.P., Gavrish E.O., Konshina E.A.* Features of the optical response and relaxation of the nematic LC doped with CdSe/ZnS quantum dots. // *MC&LC*. –2015. – V. 612. – P. 261-266. **DOI:** 10.1080/15421406.2015.1032001
6. *Gavrish E.O., Konshina E.A., Galin I.F., Vakulin, D.A.* Comparison the Properties of LC Cells with CdSe/ZnS QDs Embedded into Nematic LC Matrix and the Polyimide Alignment Layer. // *MC&LC*. – 2015. – V. 615. – P. 50-56. **DOI:**10.1080/15421406.2015.1066954
7. *Galina I.F., Konshina E.A.* Optical response features of LC cells doped with CdSe/ZnS quantum dots. // *MC&LC*. –2015. –V. 615. –P. 57-62. **DOI:**10.1080/15421406.2015.1066955
8. *Конишина Е.А., Гавриш Е.О., Вангонен А.И.* Исследование ориентационного порядка в нематическом жидком кристалле с полупроводниковыми квантовыми точками CdSe/ZnS методом ИК спектроскопии. // *Оптика и Спектроскопия*. –2016. –Т. 120. – № 2 – С. 261–265. **DOI:** 10.7868/S0030403416020148
9. *Конишина Е.А., Щербинин Д.П., Гавриш Е.О., Галин И.Ф., Курочкина М.А.* Свойства нематических жидких кристаллов, допированных полупроводниковыми наночастицами CdSe/ZnS. // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2015. – Т. 15. –№ 3. – С. 64–81. **DOI:** 10.18083/LCAppl.2015.3.64
10. *Shcherbinin D.P., Konshina E.A.* Ionic impurities in nematic liquid crystal doped with quantum dots CdSe/ZnS. // *Liquid Crystals*. – 2017. – V. 44. – Is. 4. – P. 648-655. **DOI:**10.1080/02678292.2016.1227483
11. *Shcherbinin D.P., Konshina E.A.* Impact of titanium dioxide nanoparticles on purification and contamination of nematic liquid crystals. // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. – 2017. – V. 8. – Is. 1. – P. 2766-2770. **DOI:**10.3762/bjnano.8.275

12. *Konshina E.A., Shcherbinin D.P.* Effect of granular silver films morphology on molecule orientation and ion contamination of nematic liquid crystal. // *Bulletin of Moscow Region State University.* – 2017. – V. 4. –P. 103-113. **DOI:** 10.18384-2310-7251-2017-4-103-113
13. *Konshina E. A., Shcherbinin D. P., Kurochkina M. A.* Comparison of the properties of nematic liquid crystals doped with TiO<sub>2</sub> and CdSe/ZnS nanoparticles. // *Journal of Molecular Liquids.* – 2018.– P. 308-314. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.12.112>
14. *Konshina E. A., Shcherbinin D. P.* Study of dynamic light scattering in nematic liquid crystal and its optical, electrical and switching characteristics. // *Liquid Crystals.* – 2018. – V. 45. – Is. 2 – P. 292-302. **DOI:** 10.1080/02678292.2017.1323353

## ГЛОССАРИЙ

**Жидкие кристаллы** – это промежуточное состояние вещества, обладающего текучестью и вязкостью подобно жидкости и оптическими и электрическими свойствами анизотропных кристаллов.

**Директор** – единичный вектор, соответствующий направлению преимущественной ориентации длинных осей молекул НЖК, для которого выполняется условие  $\mathbf{n} = -\mathbf{n}$ .

**Диэлектрическая анизотропия ЖК** – определяется разностью диэлектрической проницаемости ЖК вдоль  $\epsilon_{//}$  и поперек  $\epsilon_{\perp}$  директора.

**Оптическая анизотропия ЖК** – определяется разностью показателей преломления необыкновенного и обыкновенного лучей.

**Угол преднаклона директора** – начальный угол между директором и его проекцией на плоскость, ограничивающую слой ЖК.

**Полярный угол** – это угол между директором и осью  $z$ , перпендикулярной поверхности подложки ЖК ячейки.

**Пороговое напряжение** электрооптического эффекта ( $U_{th}$ ) соответствует напряжению электрического поля, при котором в ЖК ячейке начинает изменяться полярный угол наклона директора  $\theta(z)$  в результате переориентации директора.

**Основные типы ориентации молекул НЖК:**

**гомогенная** – молекулы ориентированы параллельно поверхности подложки, ограничивающей ЖК слой;

**гомеотропная** – молекулы ориентированы перпендикулярно поверхности подложки;

**твист-структура** – направления ориентации директора на противоположных поверхностях подложек взаимно ортогональны, т.е. соответствуют углу между ними  $90^\circ$ .

**Типы деформации НЖК:**

*splay*- или S-деформация;

*bend*- или В-деформация;

T- деформация кручения или твист-эффект.

**Электрооптическими эффектами** называются эффекты, связанные с изменением амплитуды, фазы и поляризации оптического излучения в результате переориентации директора в электрическом поле, приложенном к ЖК слою.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1. Техника измерения спектров пропускания на спектрофотометре СФ-56

Перед началом измерений пропускания необходимо включить блок питания спектрофотометра СФ-56 на рисунке 29 и прогреть прибор в течение 30 минут. Инициализация прибора осуществляется путем запуска программы для СФ-56 (ярлык на рабочем столе компьютера). Нажимаем на кнопку "подключиться" на рисунке 30.

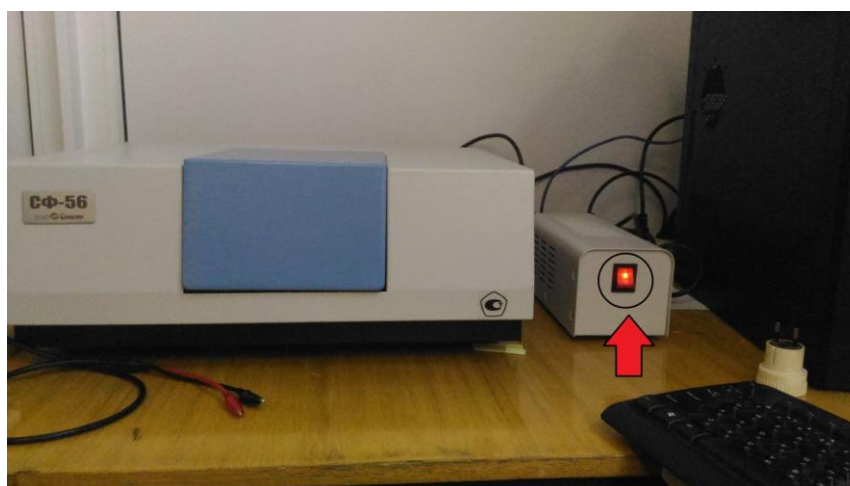


Рисунок 29 – Внешний вид спектрофотометра СФ-56

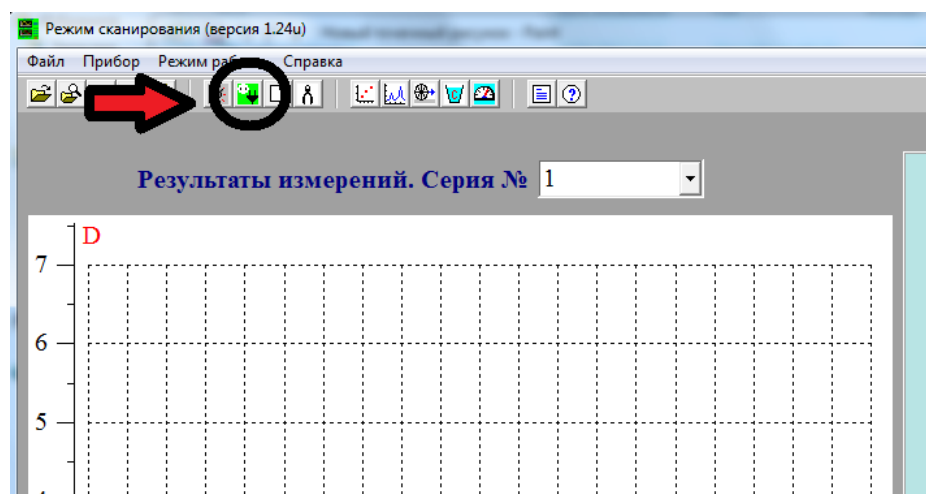


Рисунок 30 – Изображение на дисплее компьютера

Если во время включения прибор не выдал сообщение об ошибках, то включение прошло в штатном режиме. Если прибор выдал ошибки – нужно обратиться к инженеру/преподавателю. Далее нужно выбрать удобную каретку для фиксации образцов. Спектрофотометр СФ-56 является однолучевым, прибором, поэтому вначале происходит запись

пропускания канала сравнения (нулевой канал), а затем пропускание образца. При установке каретки нулевым каналом является канал, ближайший к оператору. Следующие каналы нумеруются по порядку от 1 до 5, как показано на рисунке 31. Образец можно установить в любой из этих каналов. Затем выставляется режим измерения «сканирование».

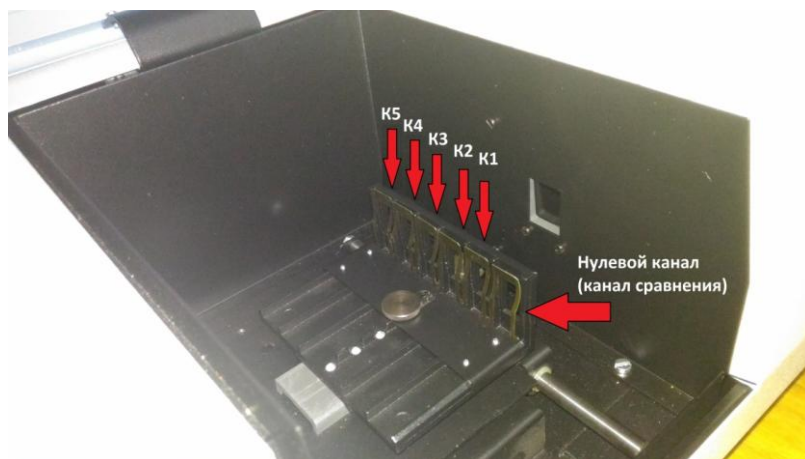


Рисунок 31 – Каретка для установки измеряемых образцов

Для проведения измерений устанавливаются следующие параметры, как показано на рисунке 32:

- диапазон 600–1000 нм (максимальный диапазон измерений СФ-56 – 190-1100 нм);
- шаг дискретизации – 1 нм;
- время измерения 0.02 с;
- ширина щели – 6 нм;
- измеряемая величина – пропускание в %.

Обе лампы в приборе включены постоянно. Измерение происходит автоматически в соответствии с установкой образца в каретке: число повторов – 1; границы по координате *min* – 0, *max* – 100. После нажатия на клавишу старт на рисунке 30 прибор сначала автоматически перемещает каретку в нулевой канал и записывает спектр излучения ламп в воздухе. После этого каретка перемещается в положение с измеряемым объектом, и записывается его спектр пропускания. Чтобы сохранить спектр необходимо нажать на иконку «дискеты» или зайти в меню файл/сохранить данные. Для выключения прибора необходимо закрыть программу и отключить блок питания.

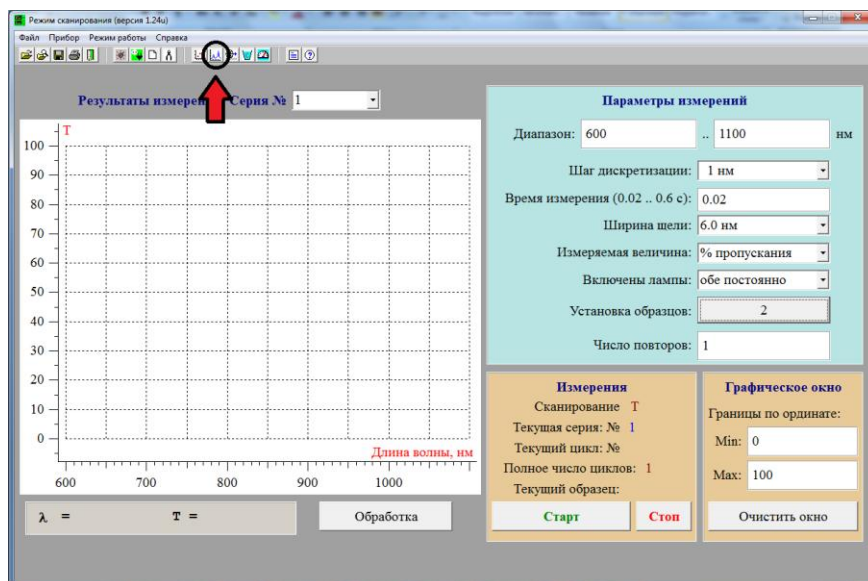


Рисунок 32 – Установка параметров измерения

При проведении измерения пропускания ЖК ячейки от напряжения электрического поля используется генератор переменного напряжения. Измерения выполняются следующим образом:

1. В режиме тестирования установить номер канала измерения. Перейти в поточечный режим.
2. Использовать следующие настройки: установка образца; ручная, измеряемая величина; % пропускания.
3. Выполнить измерение эталона, не устанавливая образец. При каждом новом измерении эталон прописывать больше не следует.
4. Установить ЖК ячейку, зафиксированную между двумя скрещенными тонкопленочными поляризаторами, подключить к ней контакты от генератора и произвести измерения.

## 2. Техника измерения емкости ЖК ячейки и тангенса угла диэлектрических потерь

Измерения емкости ЖК ячейки и диэлектрических потерь проводится с помощью прецизионного измерителя импеданса LCR meter E4980A (Key Sight), показанного на рисунке 33.

1. Прибор включается кнопкой в нижнем левом углу передней панели. При включении прибор автоматически проводит процедуру проверки. Если прибор при включении выдал ошибку нужно обратиться к инженеру/преподавателю. Время прогрева прибора – 30 мин. Для проведения измерения необходимо подсоединить измерительные контакты. Нужно помнить, что прибор работает корректно только в случае

правильного присоединения контактов. Контакты, объединенные в пары, необходимо подключать к соседним выходам.

2. После прогрева прибора необходимо выполнить процедуру коррекции на разрыв и на короткое замыкание, чтобы скомпенсировать паразитные емкости измерительных проводов. Для этого необходимо нажать на клавишу «Meas Setup».

3. Затем измерить емкость ЖК ячейки.



Рисунок 33 – Прецизионный измеритель импеданса KeySight E4980A

Измерения диэлектрических характеристик ЖК ячеек могут проводиться в автоматическом или ручном режимах. Перед началом работ убедиться у преподавателя, что прибор готов к работе и получить ЖК ячейку для проведения измерений.

### ***Автоматический режим работы***

1. Включить компьютер и запустить программу E4980A.exe (IP адрес: 192.168.239.20), нажать клавишу «Подключиться».
2. Затем нажать клавишу «Калибровка на разрыв» и дождаться окончания калибровки.
3. Подключить к контактам образец проводника, нажать клавишу «Калибровка на замыкание». Если калибровка прошла слишком быстро (в течение одной секунды), нужно сменить проводник и повторить действия. Дождаться окончания калибровки.
4. Подключить измеряемый образец – ЖК ячейку.
5. Выбрать раздел «Измерение (Частота)», со следующими настройками:
  - ✓ Режим измерения –  $C_p$ -D;
  - ✓ Уровень переменного напряжения (AC) – 0.1 В;
  - ✓ Частота (min) – 20 Гц;



- ✓ Частота (max) – 5 кГц;
- ✓ Количество измерений – 20 (log шкала).

Нажать клавишу «НАЧАТЬ». В данном режиме одновременно измеряются емкость ЖК ячейки  $C$  и тангенс угла диэлектрических потерь.

6 По окончании измерений сохранить полученные результаты, как файл "CSV" или в программе Microcal Origin.

7 Выбрать раздел "«Измерение (Напряжение)», со следующими настройками:

- ✓ Режим измерения  $C_p-D$ ;
- ✓ Частота (AC) – 1 кГц;
- ✓ Напряжение (мин) – 0.1 В;
- ✓ Напряжение (макс) – 20 В;
- ✓ Количество измерений – 50;
- ✓ Задержка – 1 сек.

8. Нажать клавишу «НАЧАТЬ».

Таким же образом проводятся измерения емкости ЖК ячейки в зависимости от приложенного напряжения на фиксированных частотах.

9. По окончании измерений сохранить полученные результаты, как файл "CSV", или в программе Microcal Origin. В случае обнаружения некорректных показаний (отрицательные значения  $C_p$ , резкие изменения данных на графике и т.п.) провести ручную калибровку прибора E4980A (см. ниже, раздел «Ручной режим») и повторить измерения.

### ***Ручной режим работы***

1. Включить прибор E4980A.
2. Провести калибровку, нажав клавишу «MEAS SETUP» на передней панели прибора E4980A, затем клавишу «CORRECTION» в вертикальном меню дисплея (справа). Перемещая курсор стрелочками «вверх-вниз», выбрать опцию «OPEN ON», потом нажать клавишу «MEAS OPEN». Дождаться конца калибровки.
3. Перемещая курсор стрелочками «вверх-вниз», выбрать опцию "«SHORT ON». В вертикальном меню дисплея нажать клавишу «MEAS SHORT». Дождаться конца калибровки. Нажать клавишу "«DISPLAY FORMAT» на передней панели прибора E4980A.
4. Перемещая курсор стрелочками «вверх-вниз», выбрать следующие настройки: FUNC:  $C_p-D$ ; Freq: 1 kHz.
5. Подключить образец. Выставив начальные значения напряжения и частоты, провести измерения емкости и диэлектрических потерь в зависимости от напряжения при фиксированной частоте, а также в зависимости от частоты при фиксированном напряжении. Значения

частоты и напряжения выставлять клавишами с цифровым обозначением.

## **2. Техника измерения поляризационных ИК спектров с помощью Фурье-спектрометра**

Для измерения ИК спектров пропускания и отражения используется Фурье-спектрометр ФСМ-2201 фирмы *InfraSpec* (Санкт-Петербург, РФ), показанный на рисунке 34.



Рисунок 34 – Фурье-спектрометр ФСМ- 2201

1. Время прогрева источника ИК излучения спектрофотометра – 60 мин.
2. Управление Фурье-спектрометром, получение и обработка ИК спектров осуществляется с помощью базовой программы Fspec на рабочем столе компьютера.
3. В рабочем окне программы установить необходимые значения диапазона измерения, спектральное разрешение, режим измерения, количество сканов. Вид окна программы показан на рисунке 35.
4. Установить поляризатор и записать спектр сравнения для каждой поляризации.
5. Далее производится измерение ИК спектров пропускания для параллельной и перпендикулярной директору плоскости поляризации ЖК и измерение спектров подложек.
6. ИК спектры объекта исследования получают путем вычитания спектров подложек.

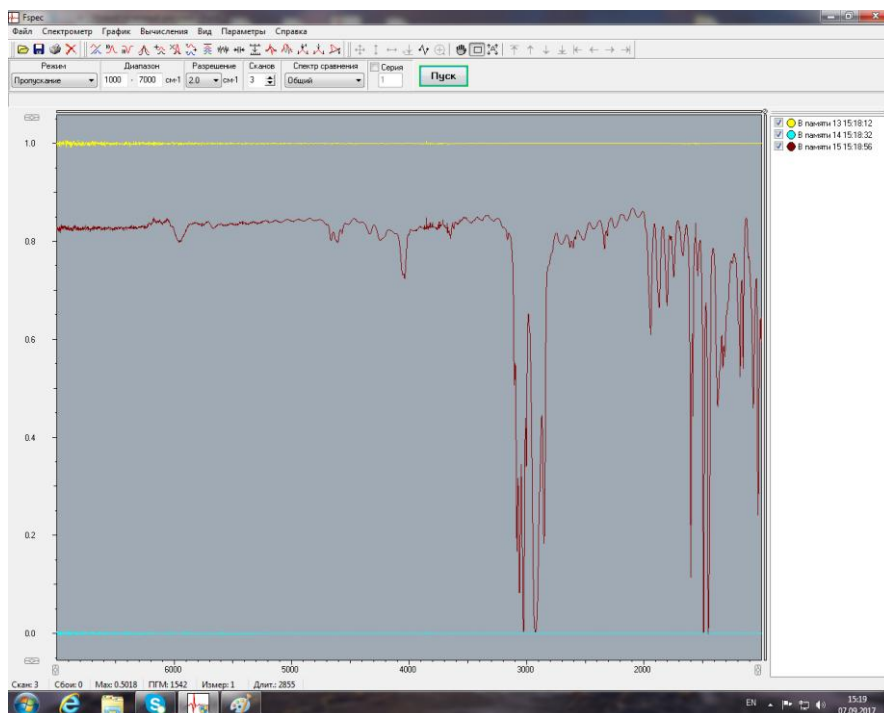


Рисунок 35 – Отображение ИК спектров с помощью программы Fzres

#### 4 Техника измерения электрооптических характеристик ЖК ячеек

Для измерения используется электрооптическая схема, показанная на рисунке 36.

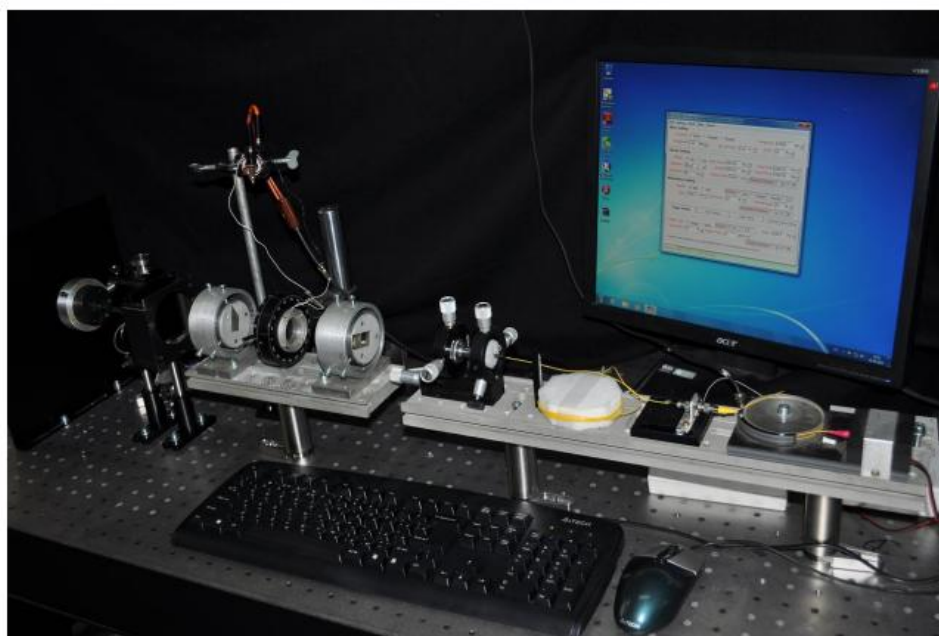


Рисунок 36 - Стенд для измерения электрооптических характеристик ЖК ячеек

1. В начале измерений включить лазер, установленный в электрооптической схеме.
2. Включить осциллограф. Проконтролировать положение поляризаторов в скрещенном состоянии – сигнал должен отсутствовать (канал 1).
3. Установить ЖК ячейку в держатель таким образом, чтобы ее плоскость была перпендикулярна направлению падающего излучения. Луч, отраженный от плоскости ячейки, должен попасть в центр диафрагмы лазерного излучателя. Далее путем вращения ячейки добиться максимума пропускания, контролируя сигнал, поступающий на осциллограф. В этом случае директор ЖК будет составлять с плоскостью поляризации излучения угол  $45^\circ$ . Для уменьшения сигнала и предотвращения выхода фотоприемника в режим насыщения следует использовать нейтральные светофильтры.
4. В ручном режиме включить блок управления электрическими сигналами. Подключить ЖК устройство к блоку. Плавно увеличивая напряжение, фиксировать изменение пропускания по осциллографу. Провести измерение пропускания в интервале напряжений от 1 В до 30 В с заданным шагом и составить таблицу значений интенсивности пропускания света, прошедшего через ЖК ячейку, в соответствии с приложенным напряжением.
5. По окончании измерений выключить приборы и отключить лазер. Отсоединить ЖК ячейку и извлечь ее из оправки.

### ***Автоматический режим работы***

Измерения оптического пропускания и динамики переключения ЖК ячеек могут проводиться в автоматическом режиме с использованием цифро-аналогового преобразователя и компьютерных программ. Последовательность операций, описанных в пунктах 1-3, повторяется. Затем производятся следующие действия:

1. Включить цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и усилитель мощности и запустить программы управления ЦАП. Установить параметры (уточнить у преподавателя).
2. Запустить программу управления осциллографом для получения данных.
3. Произвести настройку осциллографа. Параметры осциллографа уточнить у преподавателя.
4. Подключить ЖК ячейку к узлу подачи напряжения. Подавая напряжение, фиксировать осциллограммы включения и выключения. Можно использовать разные формы и амплитуды сигналов.
5. Выключить все приборы и снять ЖК устройство по окончании измерений.

## Шаблон оформления лабораторных работ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ (Университет ИТМО)	
Отчет по лабораторной работе №.... НАЗВАНИЕ.....	
Выполнил (и): .....	.....
Преподаватель:.....	
Санкт-Петербург 20... г.	

В описание работы должны быть включены следующие пункты:

***Цель работы***

***Объект исследования***

***Методы и техника эксперимента***

***Результаты эксперимента и расчета***

***Обсуждение результатов***

***Выводы***

**Миссия университета** генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **ФАКУЛЬТЕТ ФОТОНИКИ И ОПТОИНФОРМАТИКИ**

В рамках образовательного направления «Фотоника и оптоинформатика» факультет готовит специалистов для одной из самых инновационных областей современной науки и техники, развивающейся на основе лазерных технологий, квантовых технологий, нанотехнологий и новых оптических материалов. Факультет располагает несколькими десятками учебных и научно-исследовательских лабораторий и центрами, в том числе Международный научно-образовательный центр физики наноструктур, включая: Центр «Информационные оптические технологии». В соответствии с учебными планами, включающими сквозную систему курсовых исследовательских работ и научно-технологических практик, студенты факультета получают возможность участвовать в работе над действующими проектами в области фотоники и оптоинформатики.

Программа «Физика и технология наноструктур» ориентирована на студентов, которые хотят заниматься физикой наноразмерных объектов, а именно, синтезом, модификацией и исследованием квантовых точек, углеродных наноструктур, плазмонных наночастиц и других нанобъектов. Нанотехнологии – ключ к инновационному решению современных проблем электроники, телекоммуникаций, космической и атомной техники, экологии, биологии, медицины и энергетики.

Авторы данного учебного пособия: Коншина Елена Анатольевна доктор физ.-мат наук, профессор и Щербинин Дмитрий Павлович канд. физ.-мат.наук, ассистент факультета фотоники и оптоинформатики – специалисты в области оптики и физики конденсированного состояния, а также Федоров Михаил Александрович инженер Центра «Информационные оптические технологии»

Коншина Елена Анатольевна  
Щербинин Дмитрий Павлович  
Федоров Михаил Александрович

**ПРАКТИКУМ**  
**ПО ФИЗИКЕ И ОПТИКЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ**  
**И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

Учебное пособие для профиля  
«Физика и технология наноструктур».

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**

**Университета ИТМО**

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49