

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
( Н И У « Б е л Г У » )

**ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
**КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НЕМАТИКА В  
НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

**Магистерская диссертация**

обучающегося по направлению подготовки 03.04.02 Физика  
очной формы обучения, группы 12001737  
Саломahiной Алины Александровны

Научный руководитель:  
к. ф.-м. н., доцент  
Кучеев С.И.

Рецензент  
к. ф.-м. н., доцент кафедры  
естественнонаучных  
дисциплин, БУКЭП  
Москаленко Н.И.

БЕЛГОРОД 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НЕМАТИКА В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ</b> .....	6
1.1. Общие сведения .....	6
1.2. Деформация нематического жидкого кристалла в электрическом поле .....	8
1.3. Электрооптические эффекты.....	10
1.4. Флексоэлектричество .....	15
1.5. Флексоэлектрические домены.....	19
1.6. Флексоэлектричество в холестериках .....	21
1.7. Ориентационные эффекты в холестериках.....	23
<b>ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ</b> .....	27
2.1. Переориентация нематика в электрическом поле n - р перехода .....	27
2.2. Периодическая деформация нематика в электрическом поле n - р перехода и её свойства .....	32
2.3. Температурная зависимость шага периодической деформации в электрическом поле n - р перехода.....	40
2.4. Релаксация шага периодической деформации нематика .....	43
2.5. Угловая зависимость шага периодической деформации .....	46
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	53
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	54

## ВВЕДЕНИЕ

Жидкий кристалл - термин, относящийся к веществам, которые не являются кристаллическими (твердыми) или изотропными (жидкими), но где-то между ними. Существует три основных типа или то, что с научной точки зрения известно как мезофазы, жидких кристаллов, которые могут быть идентифицированы по их различным количествам молекулярного порядка и расположения. Такое расположение молекул делает вещество более твердым или жидким. [1].

**Актуальность исследования:** В настоящее время достаточно большое разнообразие уже открытых модулированных структур, ориентационных и азимутальных эффектов в жидких кристаллах. Несмотря на их широкое практическое использование, как с теоретической, так и практической точек зрения, актуально исследовать влияния внешнего воздействия на поведение молекулярного ансамбля жидких кристаллов. В современном мире очень развита оптика, соответственно необходимо изобретение и усовершенствование приборов, которые служат для обработки оптической информации. Простейшими из этих приборов являются линзы, призмы, дифракционные решетки. Подробнее остановимся на дифракционной решетке, она представляет собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (щелей, выступов), нанесённых на некоторую поверхность. Недостаток этого прибора в том, что нанесённые штрихи уже имеют определенное расстояние (шаг дифракционной решетки) и изменить его невозможно. Поэтому для расширения функциональных возможностей дифракционных решеток необходимы решетки с изменяемым шагом периодичности. Учитывая, что электрооптические свойства жидких кристаллов достаточно легко управляются электрическим полем есть потенциальная возможность создания управляемых решеток на базе жидких кристаллов.

**Цель работы:** экспериментальное исследование появления и свойств периодической деформации в нематических жидких кристаллах под действием неоднородного электрического поля, которое создается р - n переходом.

Исходя из цели квалификационной работы, вытекают следующие **задачи:**

Исследовать два примера структур ячейки, которые создают электрическое поле носящее локальный характер.

1. Установить характер ориентации молекулы жидкого кристалла в области р-п перехода при напряжениях меньших порога появления периодической деформации.
2. Установить условия возникновения периодической деформации нематика над р -п переходом.
3. Исследовать влияние условий возбуждения и параметров ячейки на свойства периодической деформации нематика.
4. Определить влияние температуры на шаг периодической деформации в электрическом поле п - р перехода.
5. Исследовать релаксацию периодической деформации

**Объектом исследования:** периодическая деформация нематика.

**Предметом исследования:** шаг периодической деформации

**Научная новизна исследования** состоит в:

- обнаружении и экспериментальном исследовании структуры ячейки жидкого кристалла, и определении ориентации молекул жидкого кристалла в области р n перехода до появления деформации
- обнаружении и экспериментальном исследовании зависимостей шага периодичной деформации нематика от различных величин.

**Методы исследования:** наблюдение, эксперимент, обобщение.

**Структура работы:** работа состоит из 56 страниц, двух глав, введения, выводов и списка используемой литературы. Первая глава рассматривает теоретические познания, которыми должны обладать перед выполнением экспериментальной части в 7 подразделах и 9 рисунках. Вторая глава экспериментальная

рассматривает 5 подразделов и 36 рисунков. В работе было использовано количество используемых в работе источников- 22.

**Практическая ценность работы** заключается в:

Исследовании и получении результатов, для применения в электрооптических эффектах и в дальнейшем создания управляемой дифракционной решетки.

# ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НЕМАТИКА В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

## 1.1. Общие сведения

Виды жидких кристаллов:

1. Термотропные ЖК, образующиеся в результате нагревания твердого вещества и существующие в определенном интервале температур и давлений.
2. Лиотропные ЖК, которые представляют собой двух или более компонентные системы, образующиеся в смесях стержневидных молекул данного вещества и воды (или других полярных растворителей). Эти стержневидные молекулы имеют на одном конце полярную группу, а большая часть стержня представляет собой гибкую гидрофобную углеводородную цепь. Такие вещества называются амфифилами.[2]

**Термотропные ЖК подразделяются на три больших класса:**

1. Нематическая фаза является самой простой формой жидкого кристалла и является фазой, в которой молекулы кристалла не имеют упорядоченного положения и могут свободно двигаться в любом направлении. Однако, хотя они не имеют определенного порядка, в течение этой фазы молекулы имеют тенденцию указывать в одном и том же направлении, что отличает его от чистой жидкости. Жидкий кристалл в этой фазе может характеризоваться своим нитевидным внешним видом, если смотреть под микроскопом. Использование нематических жидких кристаллов широко распространено в объективах телескопов, поскольку позволяет получить четкое изображение, когда исследователи сталкиваются с атмосферной турбулентностью.
2. Сметическая фаза жидкого кристалла, которая определяется как эквивалентная скользкому толстому остатку, обнаруженному на дне мыльниц, характеризуется небольшой степенью поступательного порядка в

кристаллических молекулах, который не обнаружен в нематической фазе. Сохраняя ориентацию и направление в том же направлении, что и молекулы нематического жидкого кристалла, в этой фазе молекулы стремятся выстроиться в слои. Хотя эти слои в целом движутся свободно, движение внутри слоев ограничено; следовательно, это создает немного более твердое вещество. Было установлено, что смектический жидкий кристалл имеет быстрое электрооптическое время отклика и поэтому используется вместе с нематическим жидким кристаллом в производстве жидкокристаллических экранов (LCD).

3. Холестерическая фаза, также известная как хиральная нематическая фаза, характеризуется тем, что молекулы выровнены и находятся под небольшим углом друг к другу, сложены в очень тонкие слои - это последняя фаза, перед тем как вещество становится кристаллическим или твердым. Этот тип жидких кристаллов также имеет свойство менять цвет при воздействии различных температур. Именно по этой причине холестерический жидкий кристалл используется в обычных предметах домашнего обихода, таких как термометры и кольца настроения [2].

Основой большинства специфических для жидких кристаллов электро- и магнитооптических эффектов является переориентацией директора [1] (оси преимущественной направленности молекул) макроскопического объема вещества под действием поля или потока жидкости. Первопричиной переориентации является анизотропия электрических и магнитных свойств среды (диэлектрической диаманитной восприимчивости, электропроводности), но ход процесса также зависит от анизотропии вязкоупругих свойств и исходной ориентации молекул мезофазы относительно поля. Результатом переориентации является изменение оптических свойств среды теперь уже вследствие ее оптической анизотропии [3].

Этот процесс переориентации директора может быть прослежен буквально во всех электро- и магнитооптических эффектах [1].

## 1.2. Деформация нематического жидкого кристалла в электрическом поле

Если в исходном состоянии направления вектора электрического поля и *директора* жидкого кристалла не соответствуют условию минимума свободной энергии, то в электрическом поле, способном преодолеть силы межфазного взаимодействия и упругости жидкого кристалла, произойдет переориентация молекул. Основным типам деформации твердого тела соответствуют три типа деформации слоя жидкого кристалла [14].

- **Растяжению** соответствует *splay*-деформация. Если  $\Delta\epsilon > 0$ , а *директор* жидкого кристалла в исходном состоянии параллелен поверхности электрода, то действие внешнего поля вызывает *S*-эффект. В результате этого эффекта длинные оси молекул стремятся развернуться вдоль вектора электрического поля.
- **Изгибу** соответствует *bend*-деформация. Если  $\Delta\epsilon < 0$  и в исходном состоянии *директор* жидкого кристалла направлен перпендикулярно поверхности электродов. При приложении к слою жидкого кристалла внешнего поля длинные оси молекул стремятся переориентироваться из исходного в вертикальное положение, перпендикулярно направлению вектора электрического поля и наблюдается *B*-эффект.
- **Кручению** соответствует *torsion*-деформация или *twist*-эффект. Если при  $\Delta\epsilon > 0$  и в исходном состоянии ориентация *директоров* близи поверхностей, ограничивающих слой жидкого кристалла, взаимно перпендикулярны, то возникает закрученная структура, которая поворачивает плоскость поляризации проходящего пучка света на  $90^\circ$ . Внешнее поле, приложенное к этому слою, вызывает деформацию кручения, которая разворачивает *директор* вдоль вектора электрического поля [5].



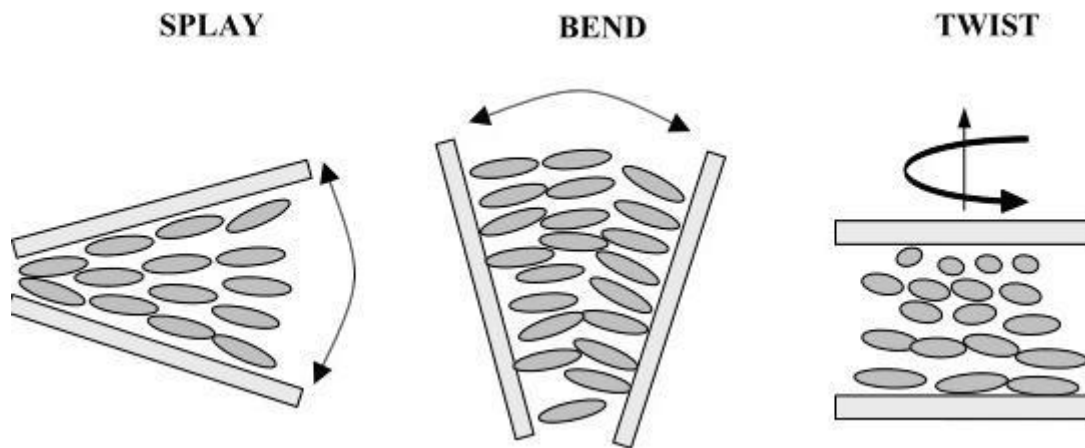


Рис. 1.1. Схемы, иллюстрирующие деформацию директора нематического жидкого кристалла

На рис. 1.1. приведены схемы иллюстрирующие деформацию директора нематического жидкого кристалла в случаях *splay*-, *bend*-деформации и *twist*-эффекта. Жидkokристаллическая среда предполагает однородное распределение директора. Деформация поля директора  $\mathbf{n}(\mathbf{r})$  происходит благодаря упругим силам, возникающим под действием внешнего электрического поля в жидком кристалле в соответствии с его диэлектрической анизотропией. Изменение положения директора в пространстве вызывает увеличение свободной энергии. Для того чтобы минимизировать свободную энергию на единицу объема образца молекулы будут переориентироваться при приложении электрического поля к слою жидкого кристалла, заключенному между двумя ограничивающими его ориентирующими поверхностями. Это условие лежит в основе феноменологической теории упругости, используемой для определения ориентации директора внутри данной ЖК структуры [16].

### 1.3. Электрооптические эффекты

Если задать исходную ориентацию директора НЖК с  $\Delta\epsilon < 0$  (диэлектрическая анизотропия)[3] вдоль координаты  $x$ , например, с помощью натирания, то в низкочастотном электрическом поле возникнет периодическая картина распределения директора вдоль  $x$ . В поляризованном свете наблюдается чередование четких светлых и темных полос, перпендикулярных направлению натирания. Причиной этого чередования является периодичность изменения показателя преломления для необыкновенного луча, обусловленная изменением директора  $\theta(x)$ . Впервые, пространственно-периодическое распределение коэффициента преломления (домены) наблюдалось Капустиным и Зверевой. Затем Вильямс исследовал поперечные домены. Для доменов Капустина-Вильямса, кроме направленности перпендикулярно детектору, характерна практическая независимость порогового напряжения от толщины ячейки и слабая зависимость периода доменов от внешнего напряжения – период их всегда чуть меньше толщины ячейки. В области низких частот, пороговое напряжение не зависит от частоты. С увеличением напряжения доменная картина усложняется и затем смазывается, сменяясь картиной интенсивного «кипения», сопровождающегося интенсивным рассеянием свет [9].

Стационарные домены Капустина-Вильямса наблюдаются и при небольших положительных  $\Delta\epsilon$ , т.к. переход через точку  $\Delta\epsilon = 0$  не меняет картины; просто вклад диэлектрического момента меняет знак, но остается недостаточным, чтобы изменить предпороговые условия[17].

При повышении напряжения вначале происходит переориентация директора, а уж затем, если достигнутый вследствие S-эффекта средний угол не слишком близок к  $\pi/2$  могут наблюдаться и домены. Они наблюдаются только во время переориентации как переходной процесс [6].

Эксперимент показывает, что в тонких ячейках (порядка 10 мкм и менее) особенно в случае хорошо очищенных НЖК (электропроводность  $\sim 10^{-11}$  Ом $^{-1}$ ×см $^{-1}$ ) домены Капустина-Вильямса не возникают. В зависимости от параметров

НЖК наблюдаются либо продольные домены Вистиня, которые имеют флексоэлектрическую природу, либо ЭГД неустойчивость «шеvronного» типа. В обоих случаях период доменов зависит от поля, так что осуществляется режим управляемой дифракционной решетки. Чем тоньше ячейка, тем меньше период доменов Капустина-Вильямса, т.е. меньше расстояние между разведенными по оси  $x$  положительными и отрицательными зарядами. Диффузионный ток старается размыть периодическое распределение, вызванное анизотропией электропроводности, тем самым повышая необходимое для возникновения неустойчивости напряжение [4].

Акцепторные примеси дают малую анизотропию электропроводности и высокий порог ЭГД неустойчивости на переменном токе. В тоже время, по-видимому, за счет свойств двойного слоя, изменяющегося условия инжекции носителей заряда, эти примеси понижают порог неустойчивости на постоянном токе [5].



Рис. 1.2. Домены Капустина – Вильямса в МББА

Когда напряжение  $V$ , приложенное к ячейке, достигает определенного порогового  $V \geq V_n$  (порядка 5В), в нематике наблюдается периодическая деформация упорядочения. Обычно это простой тип одномерного искажения, который впервые наблюдал Вильямс. Свет с плоскостью поляризации вдоль оси  $X$ , падающий перпендикулярно ячейки (вдоль оси  $Z$ ), благодаря такому типу искажения проходит как бы через оптическую систему линз, которые

фокусируют его в определенных плоскостях (они обозначены на рис.1.3. звездочками:  $f_b$ ,  $f_{cp}$  и  $f_n$  – соответственно высокая, средняя и нижняя фокальные плоскости). Как будет видно позднее, теоретически период искажения  $D$  определяется толщиной образца  $d$ , а  $V_n$  не зависит от  $d$  [22].

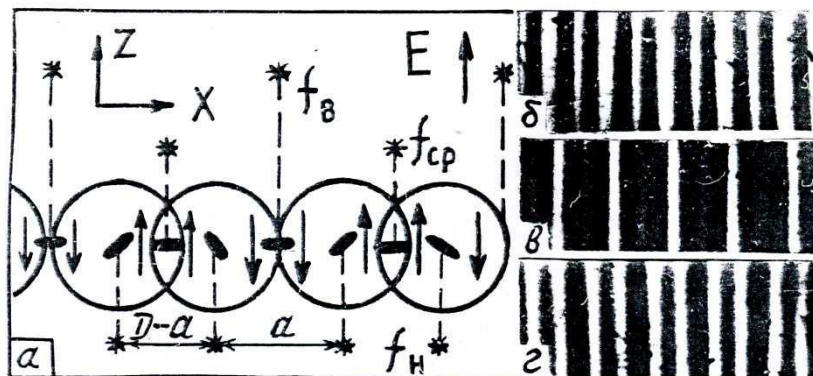


Рис. 1. 3. Схематический вид ЭГДН в нематике.  
 а – поперечный разрез образца в плоскости;  
 б, в, г – вид доменов сверху при различных фокусировках [21]

*Двойной электрический слой (межфазный) (ДЭС)* — слой ионов, образующийся на поверхности частиц в результате адсорбции ионов из раствора, диссоциации поверхностного соединения или ориентировании полярных молекул на границе фаз. Ионы, непосредственно связанные с поверхностью называются потенциалопределяющими. Заряд этого слоя компенсируется зарядом второго слоя ионов, называемых противоионами [7].

Три различных физических явления связаны с нематическим состоянием можно манипулировать электрическим полем в разных LCD геометрия для модуляции интенсивности света, проходящего через ячейка в активированном (выбранном) и неактивированном (невыбранном) состояниях. Очень широкий спектр коммерческих и прототипы LCD были разработаны на основе этих трех связанные, но разные, эффекты. Хотя утилизация жидких кристаллов в плоскопанельных устройствах отображения началось в конце 1960-х годов, эффекты магнитных и электрических полей на нематических жидких кристаллах исследуется с начала 20-го века [1]. Первый практичный электрооптический плоский ЖК-дисплей, в котором используется любая жидкость Хайльмайер

сообщил, что кристалл как устройство с переключаемым световым клапаном Занони и Бартон в Лаборатории RCA в Принстоне, Нью-Джерси в 1968 году. Переключение происходит из-за движения под действие электрического поля, небольшого количества ионов в пределах нематической жидкий кристалл, который вызывает электрогидродинамическую нестабильность. Влияние перемешивания электрического поля на нематическую жидкость кристаллы уже наблюдались в 1930-х годах и приводят к образованию видимых доменов, известных как домены Вильямса, при низких напряжениях и рассеяние света выше более высокого порогового напряжения [9]. Дисплей RCA выглядит черным, когда нет приложенного напряжения. Взаимодействие электрического поля с ионами вызывает турбулентность в жидкокристаллической среде, что приводит к движению областей жидкого кристалла в альтернативных направлениях, чтобы произвести видимые полосы, называемые доменами Уильямса. Ножницы произведены этим электрогидродинамическим эффектом уравнивается упругим и диэлектрические моменты в установившихся условиях. На более высоких полях, эти полосы заменяются однородным рассеянием инцидента видимый свет, поэтому дисплей яркий. Хотя жидкие кристаллы, как правило, рассматривается как диэлектрик (то есть непроводящий, изолирующий органический материалы), электропроводность, необходимая для формирования электрогидродинамики нестабильность относительно низкая [1]. Для подавляющего большинства нематических жидких кристаллов высокого удельного сопротивления, приложение электрического поля приводит к ориентации нематического директора, параллельного или перпендикулярного полю, в зависимости от знака диэлектрической анизотропии нематика. Молекулы выравниваются с молекулярным осью наибольшей поляризации параллельна полю. Диэлектрик перестройка нематической фазы, вызванной электрическим полем, может быть описывается теми же уравнениями, которые используются для определения эффекта магнитного поле на нематическом жидком кристалле, с соответствующими модификациями учесть различную природу поля [4].

Третье физическое свойство проявляется нематериальной нематериальной жидкостью кристаллы флексоэлектричества, что соответствует пьезоэлектричеству кристаллах. Постулируется, что банановая или клиновидная жидкость кристаллы вызывают электрический эффект объемной кривизны при определенных граничные условия. Хотя этот эффект был предсказан в конце 1960-е годы и экспериментально подтвержденные много лет назад ЖК-дисплеи которые используют этот эффект только сейчас разрабатываются для рынка плоских дисплеев [5].

## 1.4. Флексоэлектричество

**Флексоэлектричество** является свойством диэлектрического материала, благодаря которому он проявляет спонтанную электрическую поляризацию, вызванную градиентом деформации. Флексоэлектричество тесно связано с пьезоэлектричеством, но в то время как пьезоэлектричество относится к поляризации из-за равномерной деформации, флексоэлектричество относится конкретно к поляризации из-за деформации, которая изменяется от точки к точке в материале. Эта неоднородная деформация нарушает центросимметрию, что означает, что в отличие от пьезоэлектрического эффекта флексоэлектрические эффекты могут возникать в центросимметричных кристаллических структурах [15].

Флексоэлектрический эффект является фундаментальным физическим свойством диэлектриков, которое может быть определяется как линейная связь между градиентом деформации и электрической поляризацией, и линейная связь между напряжением и градиентом электрического поля. Хотя флексоэлектрический эффект является универсальным эффектом электромеханической связи, флексоэлектричество было долгое время игнорировали [14].

Инденбом (1981) предложил флексоэлектричество для такого явления, как обсуждалось в жидких кристаллах. В 1980-х годах Таганцев (1985, 1986) дал более обширное исследование флексоэлектрики. эффект, и систематически изучал четыре вклада в этот эффект, т.е. статический флексоэлектрический эффект, объемный динамический флексоэлектрический эффект, поверхностный флексоэлектрический эффект и поверхностный пьезоэлектрический эффект [16].

Дипольные и квадрупольные флексоэлектричество

Рассмотрим рис 1.2. На верхних картинках мы видим расположение молекул, имеющих форму груши (слева) и банана (справа), в недеформированном нематическом жидком кристалле. Даже если такие молекулы полярны (имеют дипольные моменты), нематическая фаза с

симметрией  $D_{00h}$  не полярна. Теперь представим, что в отсутствие электрического поля этот же нематик подвержен механической деформации поперечного (слева) или продольного (справа) изгиба, т. е. S- или В-деформации. S- или В-деформации можно создать, например, в ячейках клиновидной формы с жестко фиксированной планарной или гомеотропной ориентацией директора, соответственно. Забудем на минуту, что молекулы имеют дипольные моменты.

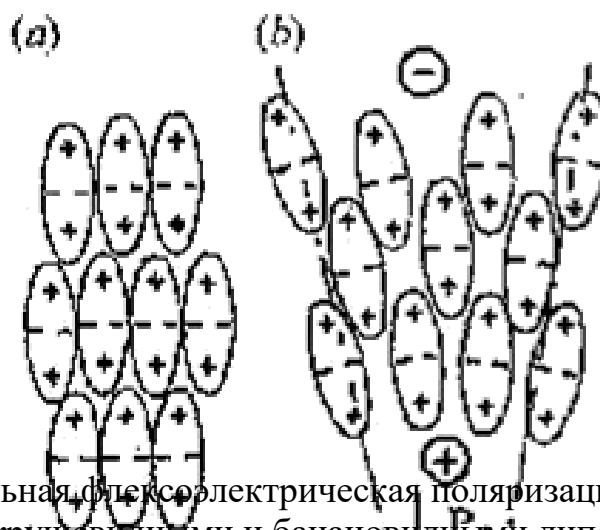


Рис.1.2 . Дипольная флексоэлектрическая поляризация. Однородная нематическая фаза с грушевидными и банановидными дипольными молекулами не имеет полярных осей (а), но в результате S- или В-деформации появляются полярные оси и флексоэлектрическая поляризация в z-направлении

Мы видим, что S-деформация изменила группу симметрии  $D_{00h}$  нематической фазы на группу  $C_{00v}$  с полярной осью  $C_{00}$ , а В-деформация - на группу  $C_{2v}$  с полярной осью. Это и неудивительно, так как деформации S и В соответствуют векторам  $(n \operatorname{div} n)$  и  $(n \times \operatorname{curl} n)$ . Полярная симметрия разрешает появление макроскопической поляризации, амплитуда которой может быть малой или большой в зависимости от величины деформации и дипольного момента молекул, обозначенных на рисунке маленькими стрелками. При этом, как показано там же, расположение диполей в молекуле, форма молекул и их плотная упаковка обеспечивает ориентацию диполей вдоль полярных осей преимущественно вверх. Разность числа диполей с ориентацией вверх и вниз в единице объема и определяет величину поляризации. Эти простые рассуждения



и привели Р. Мейера к красивой концепции пьезоэлектрической поляризации [17].

Термин «пьезоэлектрическая» был заимствован из физики твердого тела по аналогии с пьезоэлектрическим эффектом в нецентросимметричных кристаллах. Как правило, пьезоэлектрическая поляризация означает появление зарядов на поверхностях кристалла при его сжатии или растяжении без изгиба. Пьезоэффекты также характерны для полярных жидкокристаллических фаз, например, хиральной смектики –  $C^*$  фазы.

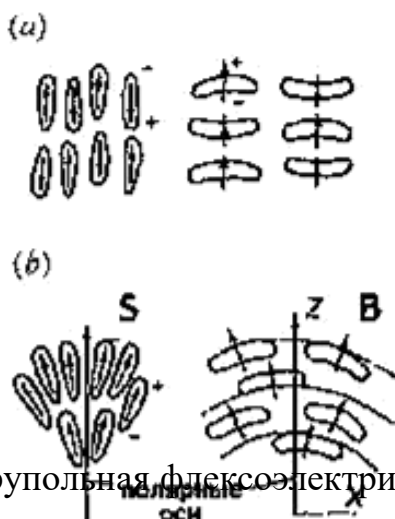


Рис. 1.3. Квадрупольная флексоэлектрическая поляризация

Возникает вопрос, появится ли флексоэлектрическая поляризация, если молекулы не обладают дипольным моментом. Оказывается, появляется, но по другому механизму, связанному с квадрупольной природой, молекул. Примером служит картина положительных палочкообразных квадруполей на рис. 1.3. : S-деформация приводит к избытку плотности положительных зарядов в нижней части рисунка (b) за счет более высокой плотности молекулярных квадруполей, и, соответственно, к их недостатку плотности зарядов в верхней части. Таким образом, нижняя часть ансамбля квадруполей заряжена положительно по отношению к нижней, и флексоэлектрическая поляризация  $P_f$  по определению, направлена сверху вниз. Для V-деформации нужно бы было рассмотреть

избыток отрицательных зарядов в зоне их большей плотности, чтобы получить дополнительный вклад поляризацию  $P_f$  [19].

### 1.5. Флексоэлектрические домены

Здесь мы рассмотрим случай, когда флексоэлектрический момент действует на директор в объеме образца. Используется типичная нематическая ячейка с исходной планарной ориентацией директора вдоль оси  $x$  и электрическим полем, направленным вдоль оси  $z$ . Энергия сцепления директора на противоположных границах практически бесконечна. Диэлектрическая анизотропия либо равна нулю, либо мала и отрицательна, а проводимость почти полностью отсутствует. При включении постоянного напряжения, вдоль директора формируется картина темных и светлых полос (доменов), легко наблюдаемых в поляризационный микроскоп. Эти домены имеют очень интересную особенность; их период уменьшается с повышением приложенного напряжения рис. 1.4. [6]. Появление доменов с изменением периода в электрическом поле было предсказано теоретически. Плотность свободной энергии включала упругий, диэлектрический и флексоэлектрический вклады, и рассматривалась двумерная деформация

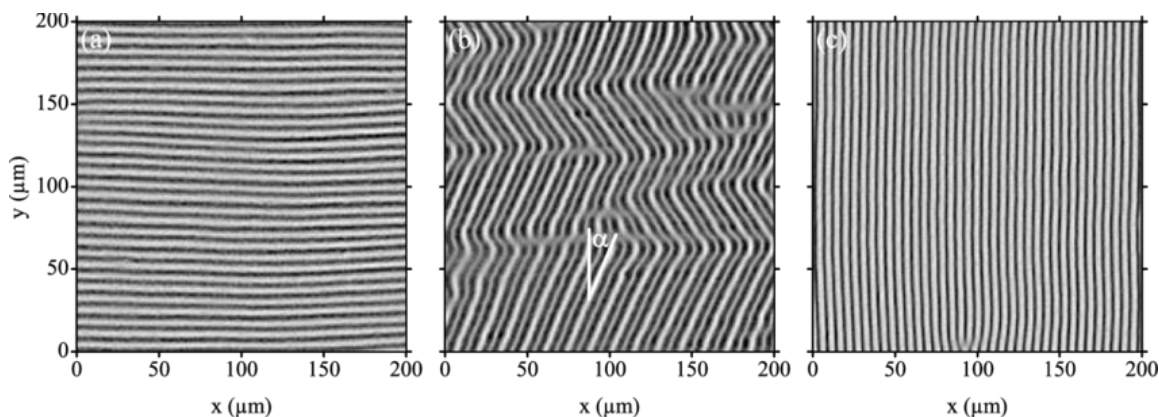


Рис. 1.4. Флексоэлектрическая неустойчивость. Фотографии флексоэлектрических доменов с периодом, управляемым электрическим полем (толщина нематической ячейки 12 мкм)

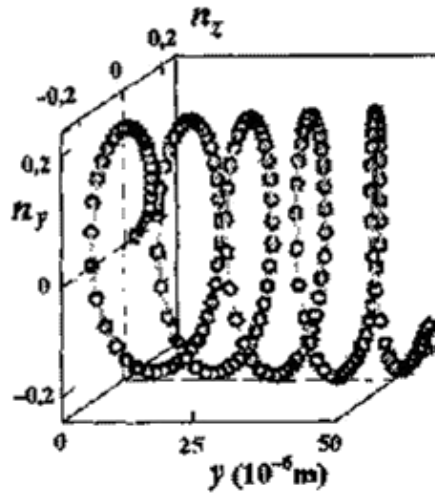


Рис. 1.5. Флексоэлектрическая неустойчивость. Индуцированная электрическим полем спиральная структура поля директора, представленная его проекциями  $n_x$  и  $n_y$

## 1.6. Флексоэлектричество в холестериках

Сама по себе деформация кручения не создает флексоэлектрической поляризации. Однако, интересный флексоэлектрический эффект наблюдается, если деформация кручения ( $T$ ) происходит совместно с деформациями поперечного ( $S$ ) и продольного ( $B$ ) изгибов. В этом случае ось спирали холестерика  $h_0$  располагается в плоскости ячейки вдоль направления  $z$ , см. рис. 1.6. (а), а электрическое поле прикладывается к прозрачным электродам ячейки в направлении  $x$ . При этом диэлектрическая анизотропия незначительна,  $E_a \leq 0$ . В отсутствие поля проекции директора находятся в плоскости  $xz$ :  $n_x = \cos\varphi$ ,  $n_y = \sin\varphi$ ,  $n_z = 0$ , рис. 1.6. (б). при  $E = 0$ . Если ячейка заполнена холестерическим жидким кристаллом с коротким шагом  $P_0 = 2\pi/q_0 \leq \lambda$ , она ведет себя как одноосная оптическая пластинка с оптической осью. Когда к ячейке приложено электрическое поле, возникает периодическая  $SB$ -деформация из-за флексоэлектрической поляризации  $P_f$  и соответствующего момента  $M_f = P_f E$  в приповерхностных областях [18].

Поворот директора по всей ячейке на угол  $\varphi$  эквивалентен повороту оптической оси холестерика вокруг оси  $x$  на тот же угол. Амплитуда и знак угла отклонения оси  $\varphi$  зависят от напряженности и полярности поля  $E$ , соответственно. [19]

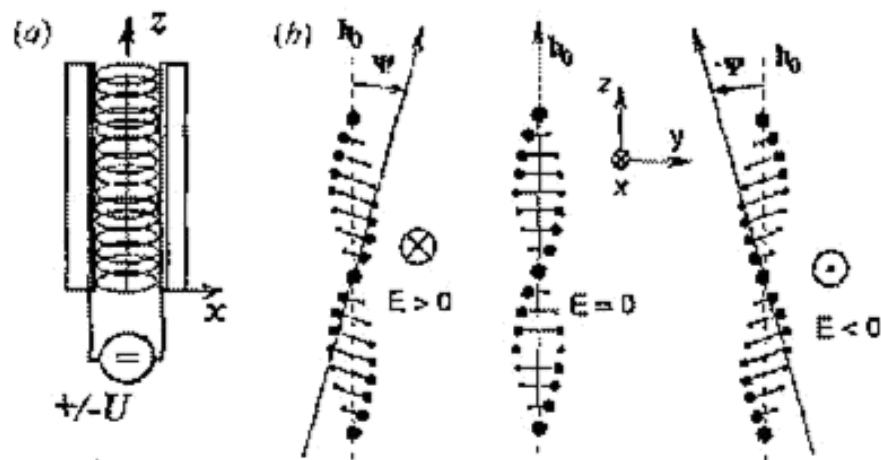


Рис. 1.6. Флексоэлектрическая деформация холестерического жидкого кристалла. (а) Постоянное поле  $\pm E$  от источника напряжения  $U$  приложено к ячейке в направлении  $x$  перпендикулярно оси спирали. (б) Индуцированные

полем  $\pm E$  деформации в плоскости  $yz$ ; видно, что холестерические квази-слои наклонены на углы  $\pm\psi$  от их исходного состояния в плоскости  $xu$  при  $E = O[20]$

### 1.7. Ориентационные эффекты в холестериках

Диспергированные полимером жидкие кристаллы (PDLC) представляют большой интерес благодаря их применению в современных оптических устройствах, таких как большие гибкие дисплеи, переключаемые окна, дисплеи в форме бумаги для электронных книг и т. Д. Электрооптические характеристики материалов PDLC зависят от таких факторов, как содержание жидких кристаллов (ЖК), морфология пленок, диэлектрические свойства композита в электрических полях и ориентационная структура ЖК в каплях. Последний фактор в основном зависит от условий закрепления молекул ЖК на границе раздела полимеров. Еще в XIX веке Леман обнаружил два типа ориентационного расположения оптической оси внутри капель ЖК, диспергированных в вязких матрицах: биполярная структура (рис. 1.7. а) для тангенциальной привязки и радиальная (рис. 1.7. е) для гомео граничного условия. Биполярная конфигурация (рис. 1.7.а) характеризуется двумя точечными поверхностными дефектами (бужумами), расположенными на противоположных концах длинной оси капли. В радиальной структуре директор выровнен по радиусу по всему объему капли, образуя точечный дефект в центре капли. Биполярные и радиальные структуры чаще образуются в композитных материалах ЖК. Однако сегодня известен ряд других конфигураций директора в каплях ЖК, диспергированных в сплошных матрицах. Как правило, ориентационная структура ЖК зависит не только от граничных условий, но и от соотношения упругих постоянных, размера и формы капли.

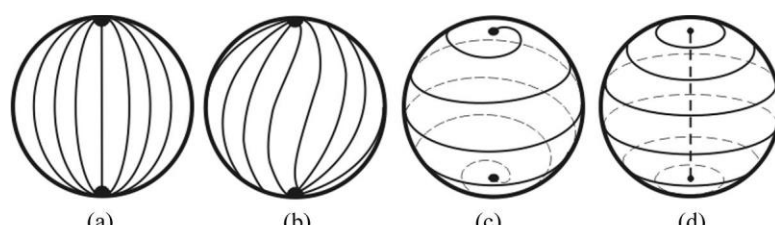


Рис. 1.7. Директор конфигурации внутри нематических капель, (а) биполярный, (б) скрученные биполярные, (с) суперврученные биполярные и (д) тороидальные структуры для тангенциальных граничных условий; (е) радиальная, (ф) скрученная радиальная, (г) экранированная радиальная и (h) осевая конфигурации для гомеотропного закрепления

Оптические свойства ХЖК зависят от ориентации оси спирали относительно поверхности ячейки. Возможны четыре вида текстур, показанных на рис.1.8. Когда оси спирали перпендикулярны к подложкам текстура называется планарной, при этом наблюдается отражение падающего на ячейку света (рис.1.8.а). При случайной ориентации осей возникает мультидоменная конфокальная текстура, рассеивающая свет (рис.1.8. б). При приложении электрического поля перпендикулярно подложкам в ХЖК возникает текстура *отпечатков пальцев* с направлением осей спиралей параллельно подложкам (рис.1.8. в). При приложении к ячейке более высокого напряжения для ХЖК с  $\epsilon > 0$  происходит раскрутка спирали и возникает гомеотропная ориентация молекул (рис.1.8. д). В этом случае ячейка становится прозрачной[20].

Рассмотрим более детально влияние электрического поля на ХЖК в случае, когда его проводимость пренебрежимо мала. Тогда взаимодействие ХЖК с электрическим полем можно рассматривать как чисто диэлектрическое. Возможны различные варианты в зависимости от знака  $\epsilon$ , исходной текстуры ХЖК и направления поля. Текстурные изменения в ХЖК аналогичны переходам Фредерикса в НЖК и приводят к существенному изменению оптических свойств слоя[20].



Ограничимся рассмотрением случаев, представляющих практический интерес, когда прикладываемое электрическое поле перпендикулярно к поверхности подложек и  $\epsilon > 0$ .

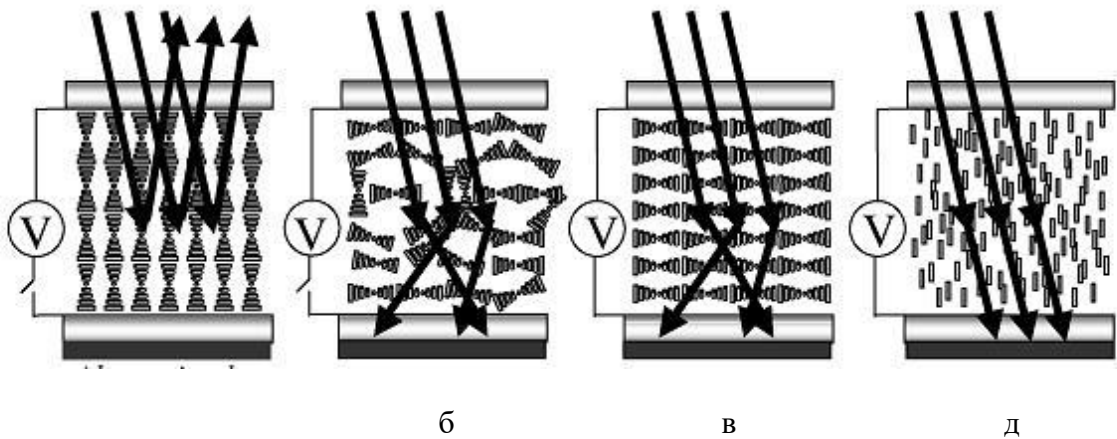


Рис. 1.8. Текстуры ХЖК: а – планарная, б – конфокальная, в – структура *отпечатков пальцев*, г – гомеотропная.

При приложении напряжения к конфокальной текстуре и его увеличении все больше молекул ХЖК ориентируется вдоль по полю, плавно переходя к текстуре *отпечатков пальцев*. При дальнейшем увеличении поля шаг спирали увеличивается, как показано на рис.1.9.

Полная раскрутка спирали приводит к превращению оптически отрицательной ( $n < 0$ ) и оптически активной планарной текстуры в оптически положительную ( $n > 0$ ) неактивную текстуру. Для практического применения используют хиральные нематики, в которых при приложении электрического поля происходит раскрутка спирали и возникает гомеотропная ориентация молекул[21].

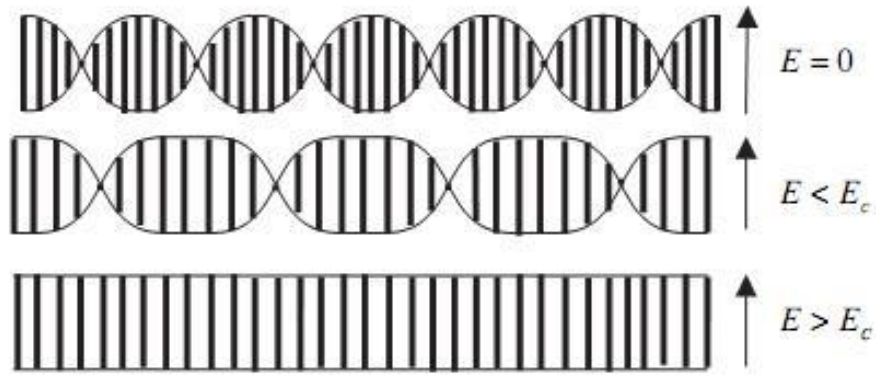


Рис.1.9. Схема перехода из текстуры *отпечатков пальцев* к гомеотропной текстуре, сопровождаемого раскруткой холестерической спирали.  $E_c$  – порог перехода в гомеотропную текстуру

При уменьшении приложенного напряжения ХЖК имеет возможность перехода из гомеотропного состояния в одну из двух структур: конфокальную и планарную. В первом случае ХЖК релаксирует в состояние *отпечатков пальцев* и затем в конфокальную структуру, как это рассмотрено выше (рис.1.9.). Переход является относительно медленным (время - порядка 100 мс) и имеет гистерезис [22].

## ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Переориентация нематика в электрическом поле p - n перехода

На рис. 2.1. (а) схематически представлена ячейка с нематическим жидким кристаллом, без напряжения. Исходная ориентация нематика гомеотропна. На рис. 2.1. (б) схематически представлена ячейка с нематиком, к которой приложено электрическим полем p-n перехода. В работе рассматривалась двухэлектродная схема приложения электрического поля, т. е. управляющее напряжение прикладывалось только к «полюсам» p-n перехода, при этом на поверхности покровного стекла какие-либо электрически проводящие плёнки отсутствуют. Электрическое поле (обозначено  $E$ , рис. 2.1. б) в области объемного заряда p-n перехода, при обратном его смещении, проникает в слой диэлектрика  $\text{SiO}_2$ , а далее в слой нематика, вызывая соответствующую переориентацию молекул жк.

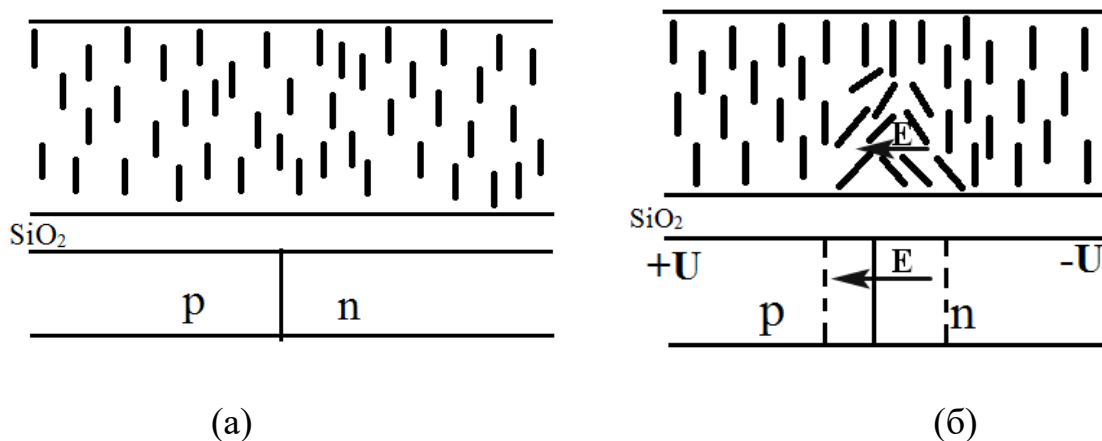


Рис. 2.1.Переориентация нематика в окрестности p-n перехода. (а) Схематическое представление ячейки без напряжения. (б) Схематическое представление ячейки с напряжением

Начиная исследования зависимости размеров переориентации в жидком кристалле над p и n областями от напряжения, были использованы

две частоты переменного напряжения. Была установлена частота 50 Гц и выбрана зона, в которой хорошо наблюдаются изменения ориентации при прикладывании напряжения (Рис.2.2.)

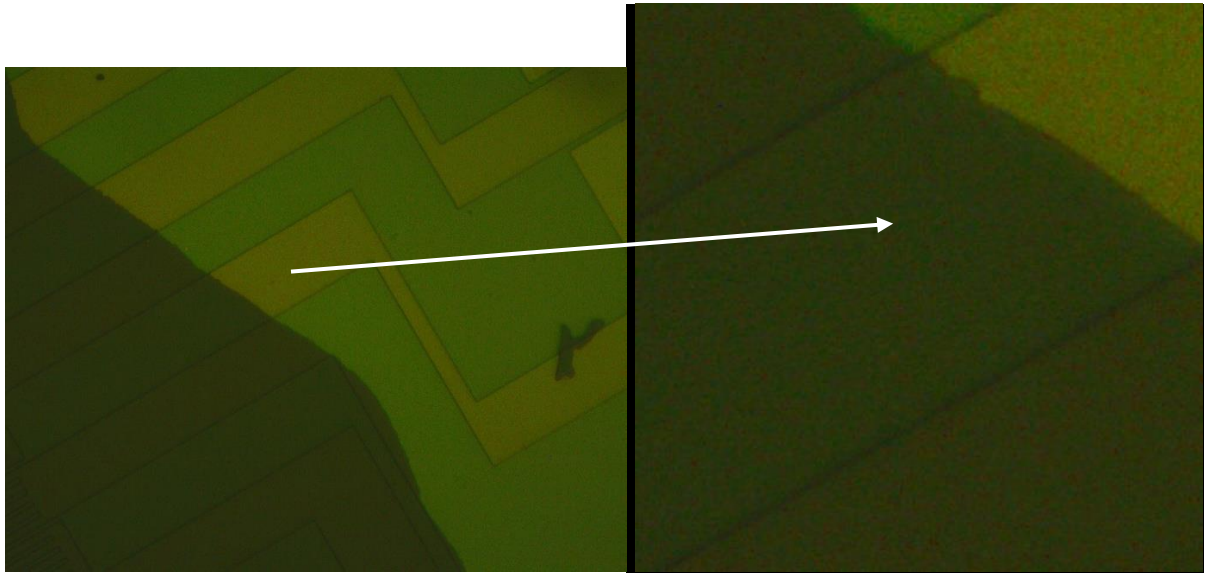


Рис. 2.2. Зона исследования, без напряжения

Далее при увеличении напряжения можно уже наблюдать появление переориентации нематика над р и п зонами. (Рис. 2.3.)

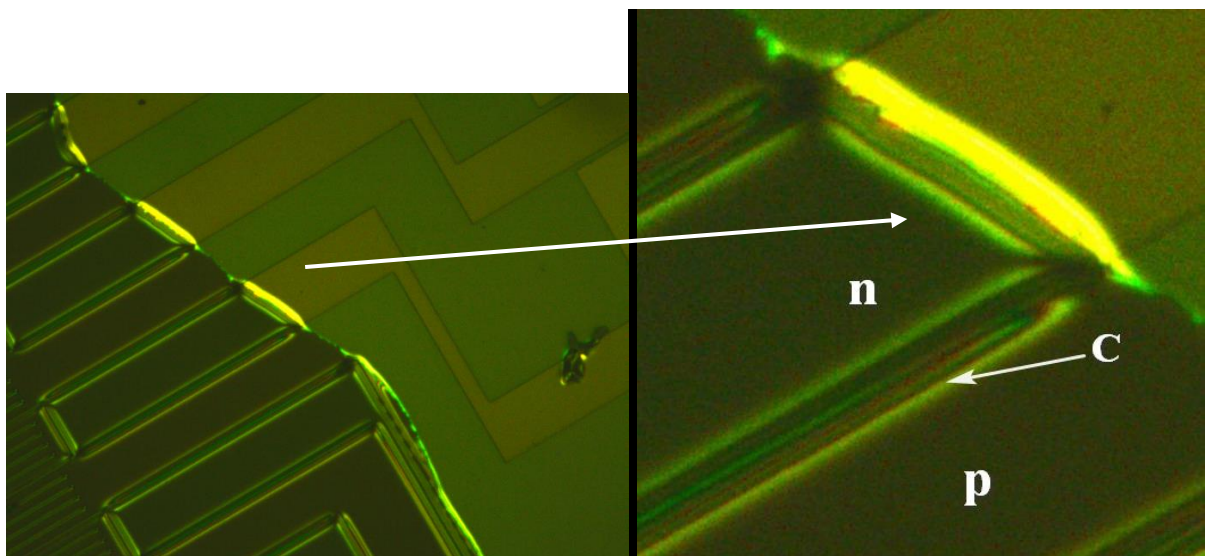


Рис. 2. 3. Переориентация нематика над р и п зонами,  $U=6,5$  В, С над р-100мкм, С над п-150мкм. Частота 50 Гц.

Используя специальную шкалу «микрон» и масштаб 300% можно наблюдать размеры переориентации областей (Рис. 2.4.).

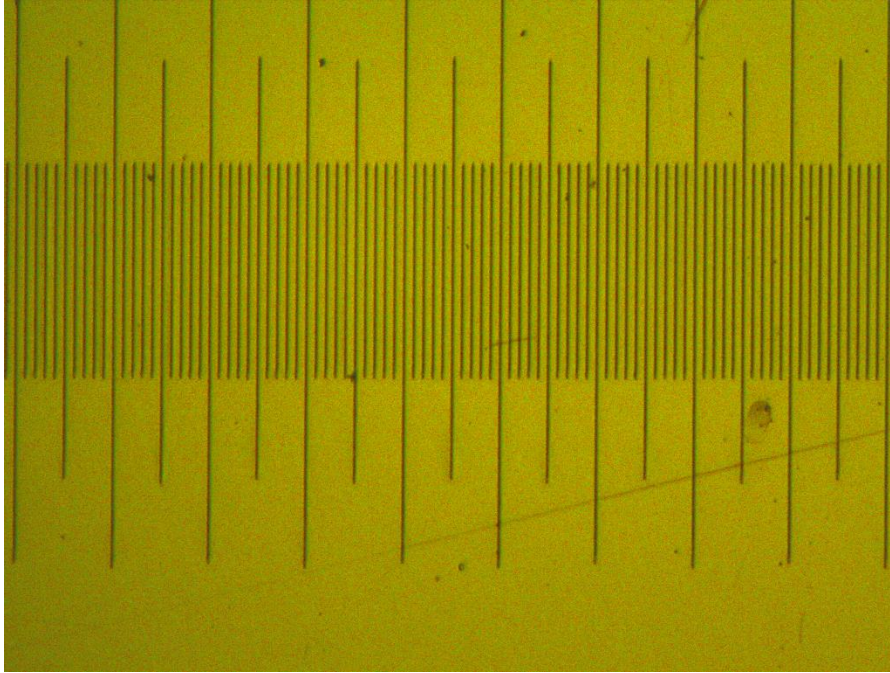


Рис. 2.4. Шкала «микрон»

Сопоставив все данные получается зависимость, представленная на графике рис. 2.5.

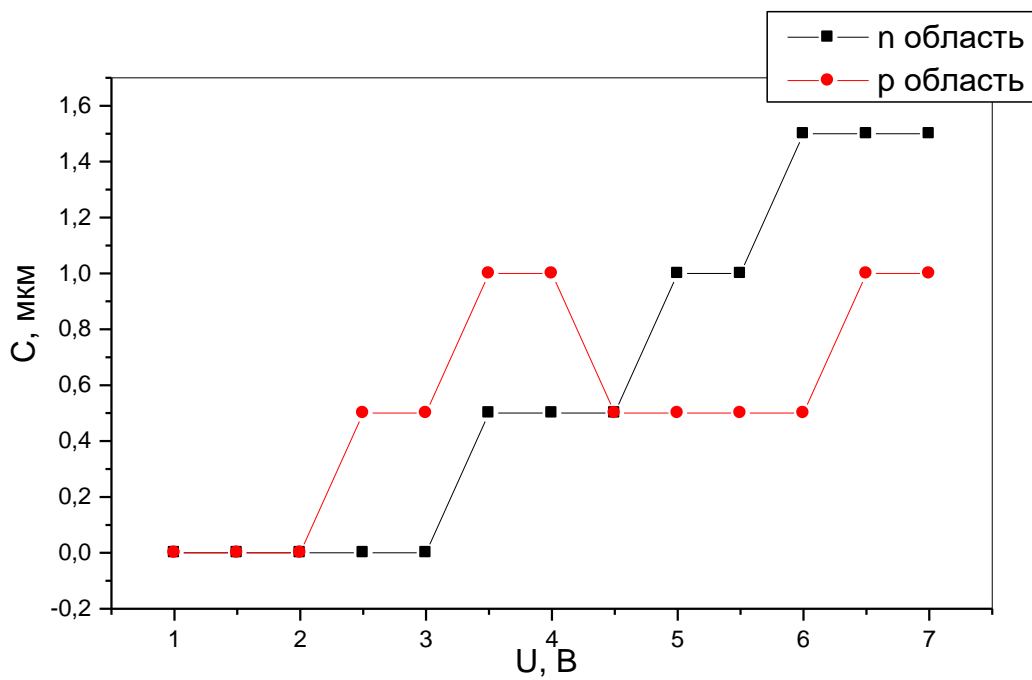


Рис. 2.5. Зависимость размера областей переориентации нематика над n и p зонами от напряжения. Частота 50 Гц

Далее была установлена частота 80 Гц. При увеличении напряжения можно уже наблюдать переориентацию нематика над р и п зонами. (Рис. 2.6.).

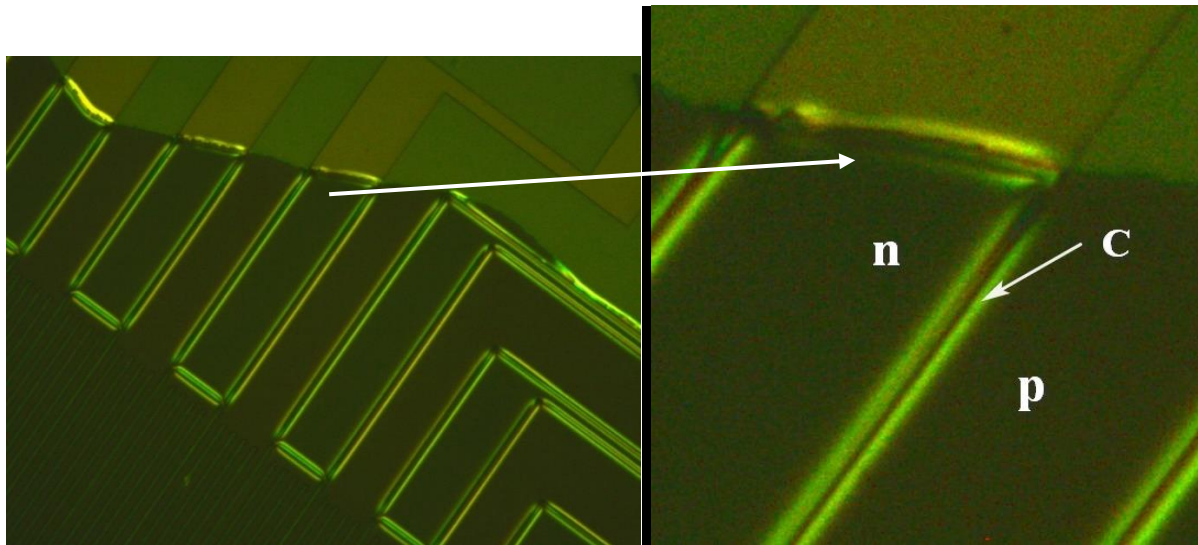


Рис. 2.6. Переориентация нематика на р и п зонами,  $U=6,5$  В, С над р-50, С над п-50. Частота 80Гц

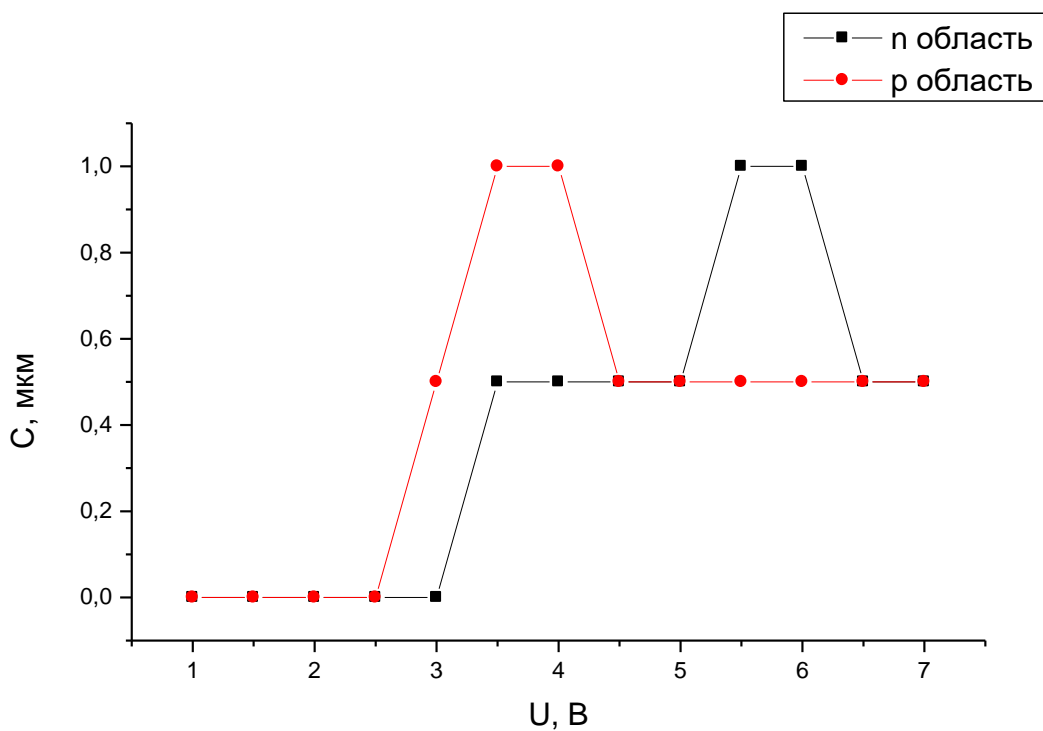
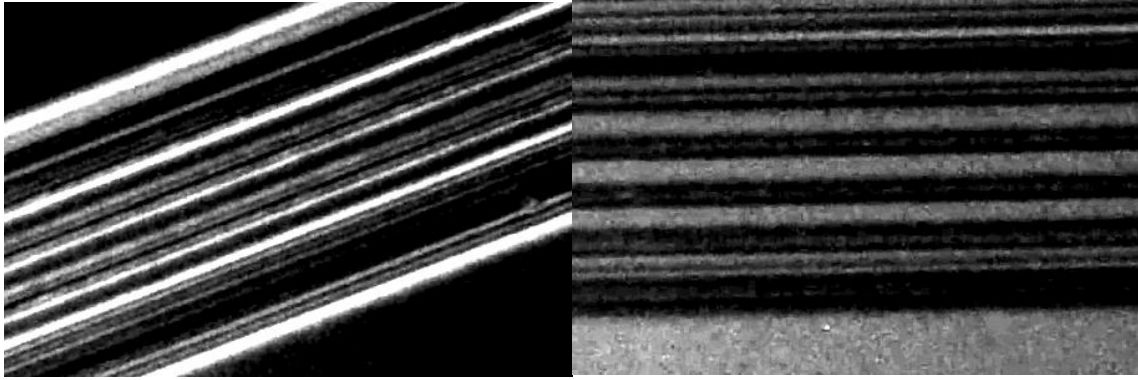


Рис. 2.7. Зависимость размера областей переориентации нематика от напряжения при частоте 80 Гц



а)

б)

Рис. 2.8. Зависимость яркости отражённого света от угла между поляризатором р - n перехода.  $U=8$  В, частота 80Гц  
а) угол  $45^\circ$ ; б) угол  $90^\circ$

Вывод: таким образом, экспериментально продемонстрировано, что электрическое поле р-п перехода может вызывать переориентацию нематического жидкого кристалла.

При повороте ячейки наблюдается затемнение областей переориентации нематика над р и n зонами. Это означает, что переориентированные молекулы лежат в плоскости перпендикулярной линии р n перехода.

## 2.2. Периодическая деформация нематика в электрическом поле n - р перехода и её свойства

Во время проведения исследования начальная температура жидкокристаллической ячейки соответствовала  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Исследуемым участком ЖК ячейки, был тот, на котором хорошо видны изменения ориентации нематика в поляризованном свете. Дополнительные исследования показали, что толщина ЖК в этом месте примерно  $30\text{ мкм}$ . Установив частоту  $46\text{ кГц}$ , исследование началось с  $0\text{ В}$ . При увеличении напряжения наблюдается переориентация молекул, этот процесс раскрыт в пункте 2.1., но периодической деформации до определенного момента не наблюдается. При напряжении  $7,6\text{ В}$  и выше наблюдается следующие изменения ориентации жидкого кристалла: появляется неоднородность, которая в дальнейшем названа «лидером». Его движение начинается с исходных неоднородностей ориентации жидкого кристалла. Периодическая деформация нематика в данном месте наступает с временной задержкой, после прохождения «лидера».

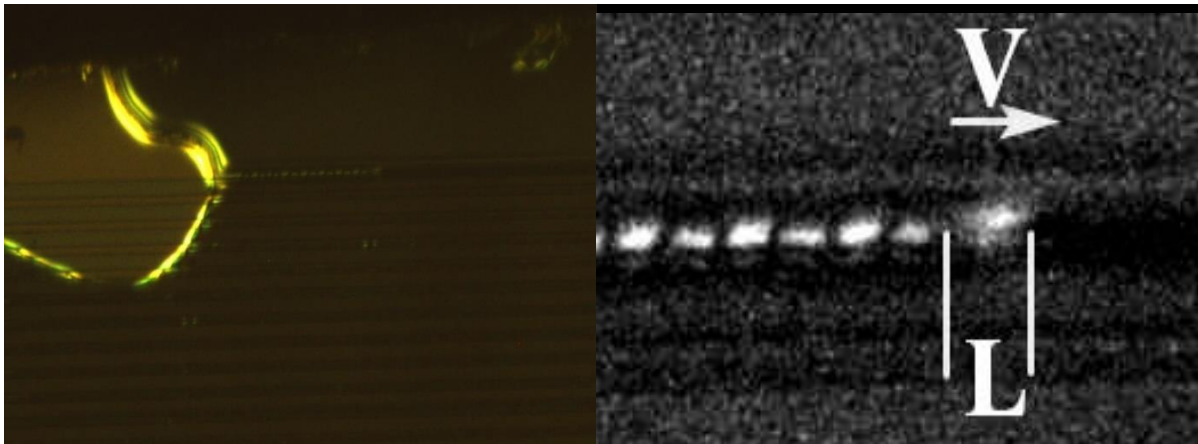


Рис.2.9. Движение «лидера»  $U= 7.6\text{ В}$ ,  $L=20\text{ мкм}$ , шаг деформации,  $d=15\text{ мкм}$



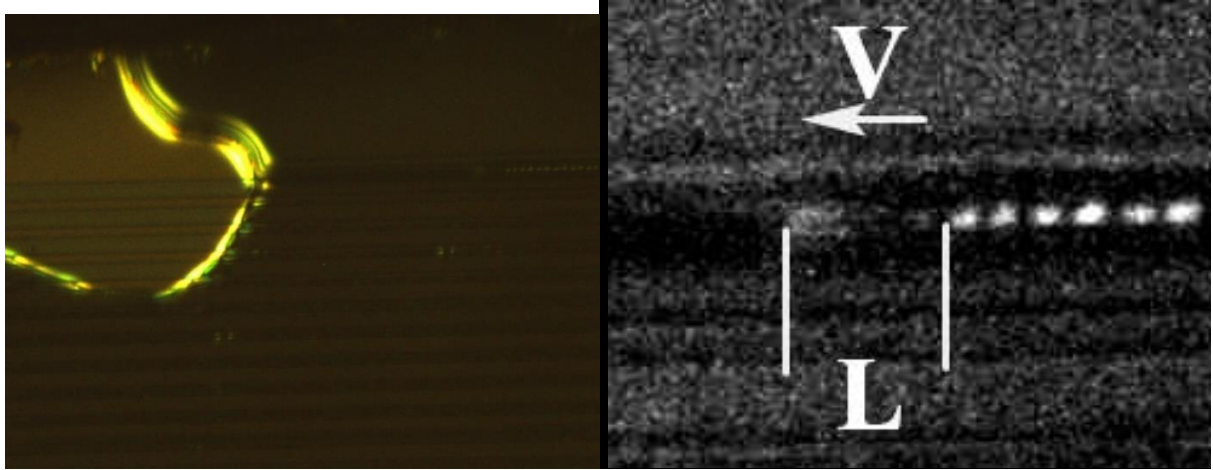


Рис.2.10. Движение «лидера»  $U= 8.6$  В,  $L= 30$  мкм, шаг деформации,  $d =10$  мкм

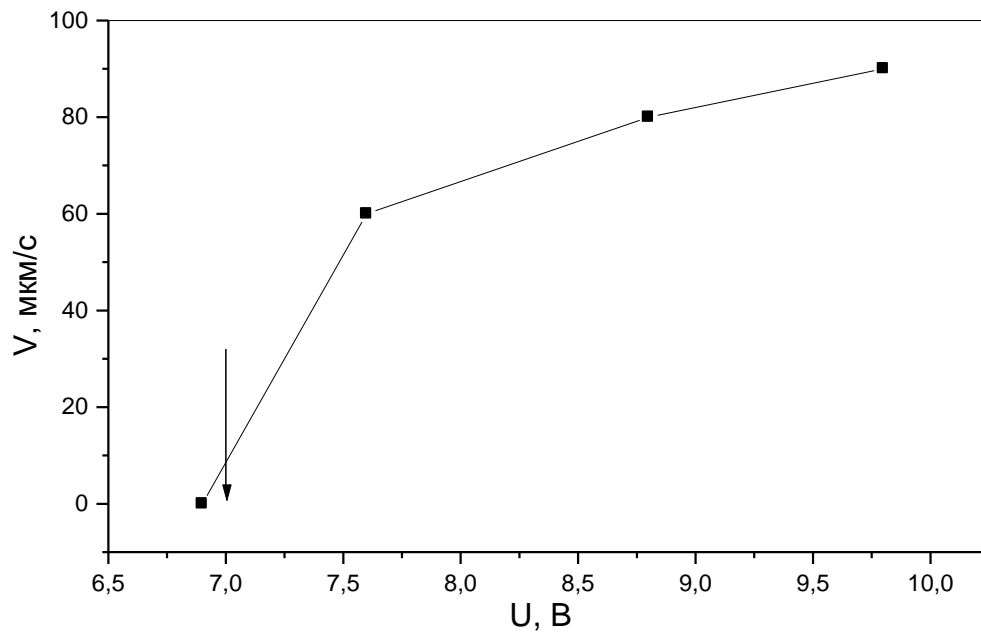


Рис. 2.11. Зависимость скорости перемещения «лидера» от напряжения. Толщина ЖК слоя 30мкм. Частота 46 кГц. Стрелка обозначает порог

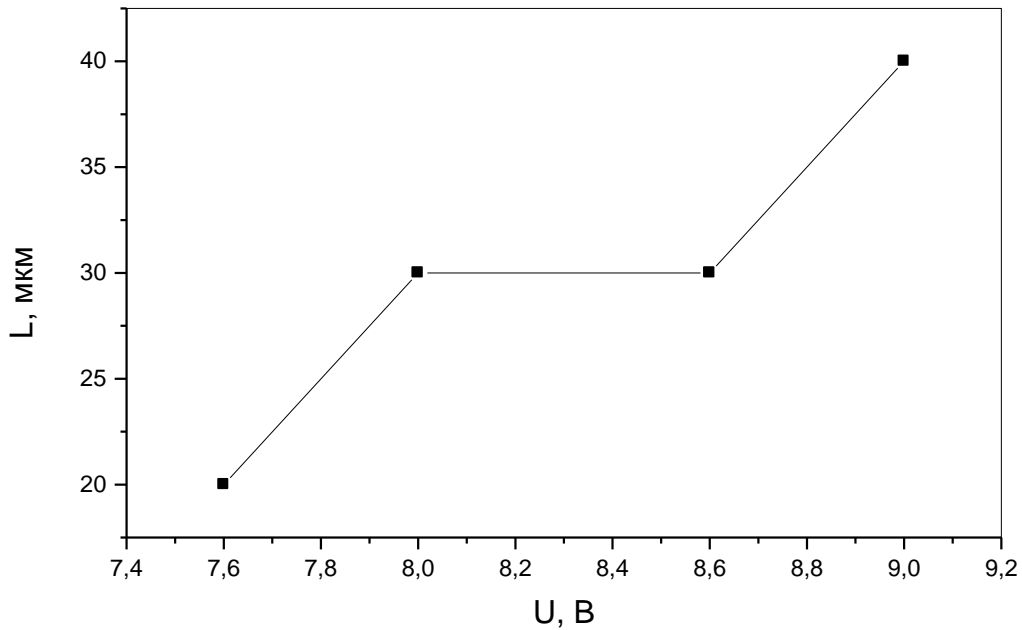


Рис. 2.12. Зависимость расстояния между «лидером» и началом периодической деформацией, от напряжения. Толщина ЖК слоя 30мкм. Частота 46 кГц

Проводя опыты, заметно, что шаг периодической деформации на протяжении всей линии р – n перехода, различен. Были проведены эксперименты по влиянию толщины ЖК слоя на шаг периодической деформации. Были использованы три толщины жидкого кристалла 5мкм, 20мкм, 30мкм (как упоминалось выше).

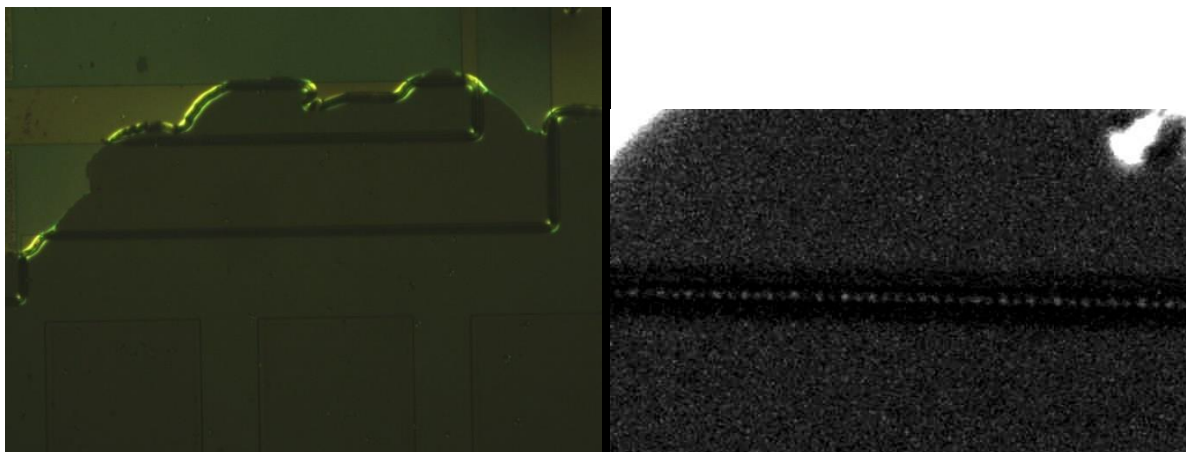


Рис. 2.13. Стационарный шаг деформации,  $d=15$  мкм, толщина ЖК слоя 5мкм,  $U=7$  В

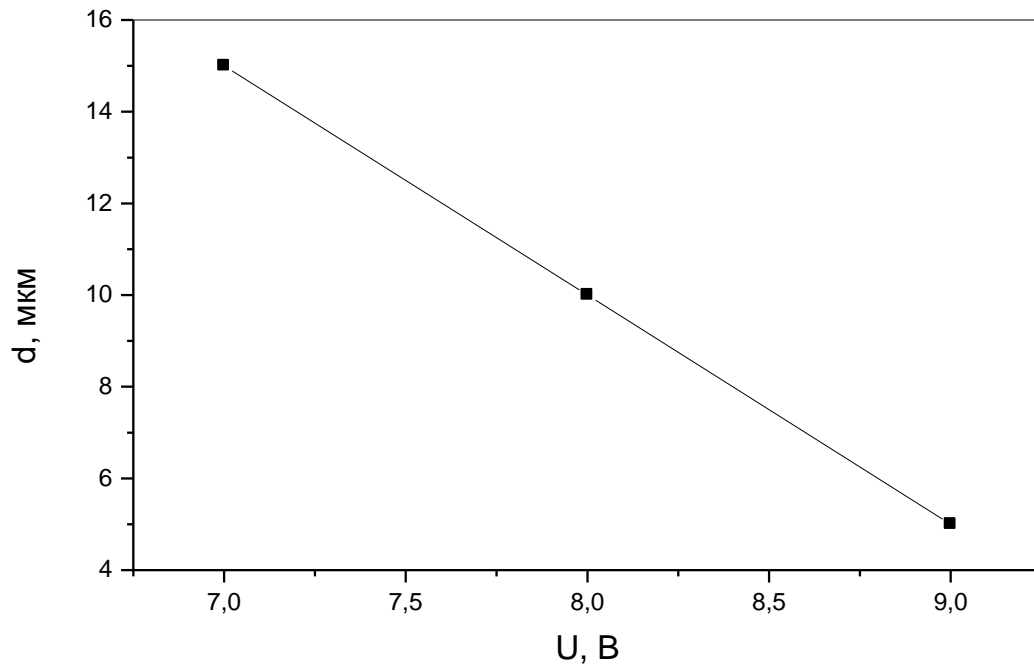


Рис. 2.14. Зависимость шага периодической деформации от напряжения (ЖК слой 5мкм)

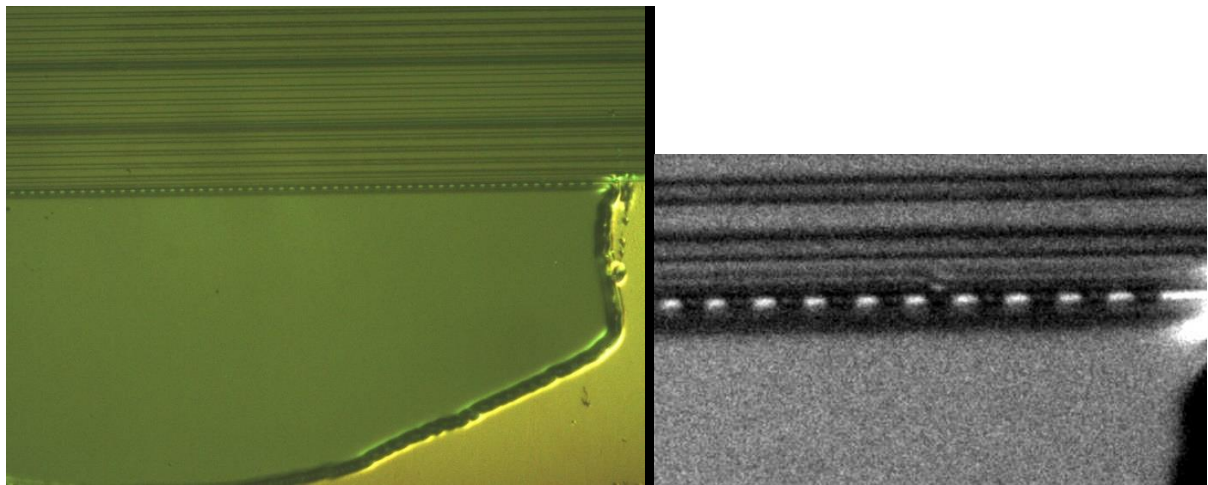


Рис. 2.15. Стационарный шаг деформации,  $d = 25$  мкм, толщина ЖК слоя 20мкм,  $U = 7,8$  В

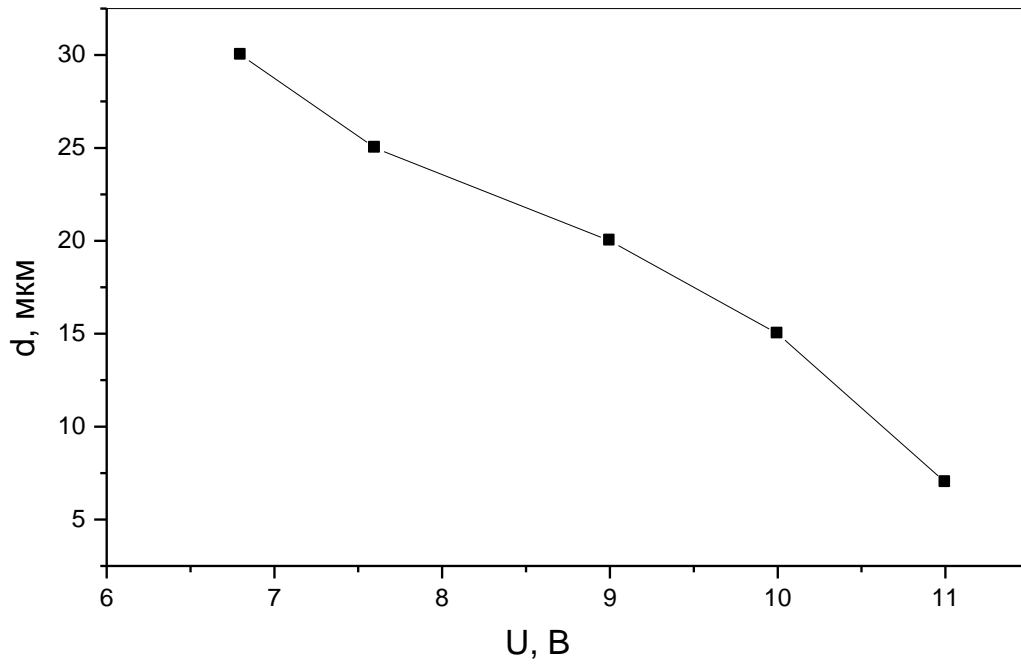


Рис. 2.16. Зависимость шага периодической деформации от напряжения (ЖК слой 20мкм)

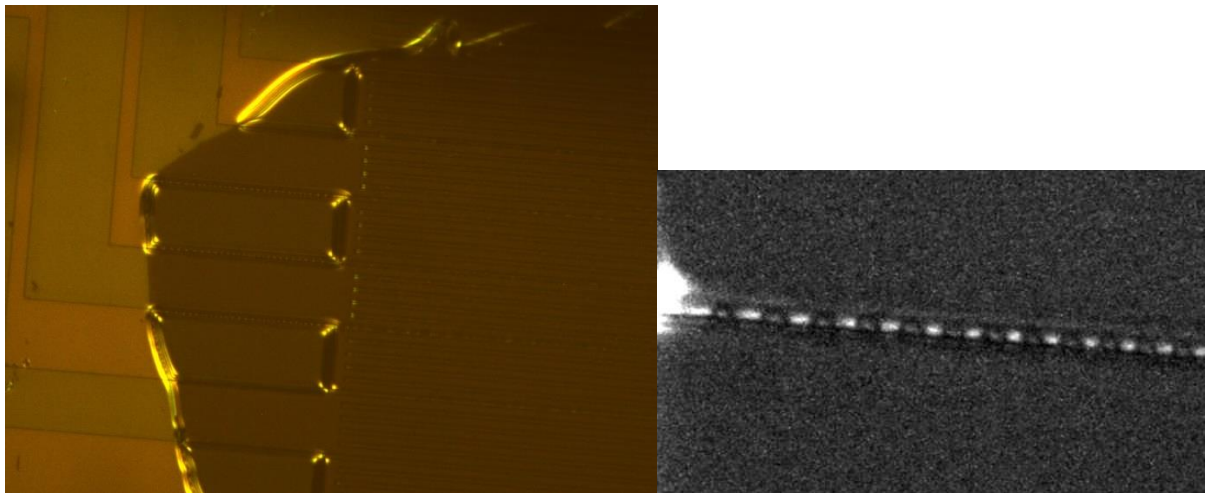


Рис. 2.17. Стационарный шаг деформации,  $d = 5$  мкм, толщина ЖК слоя 30мкм,  $U = 9$  В

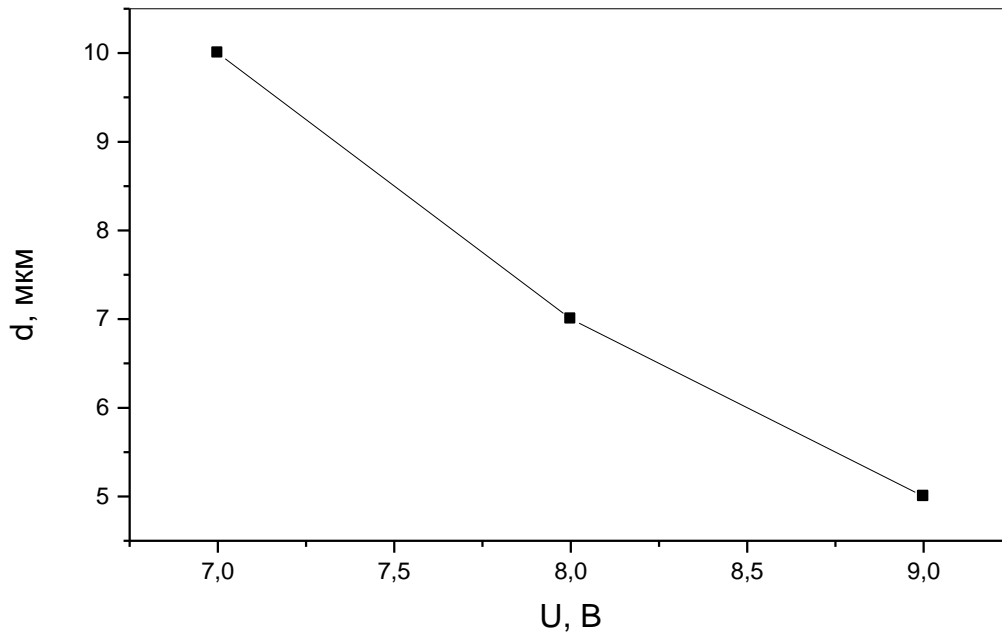


Рис. 2.18. Зависимость расстояния между шагом периодической деформации от напряжения (ЖК слой 30мкм)

На рис. 2.19. представлены все зависимости, которые мы получили в ходе эксперимента, в одной координатной плоскости.

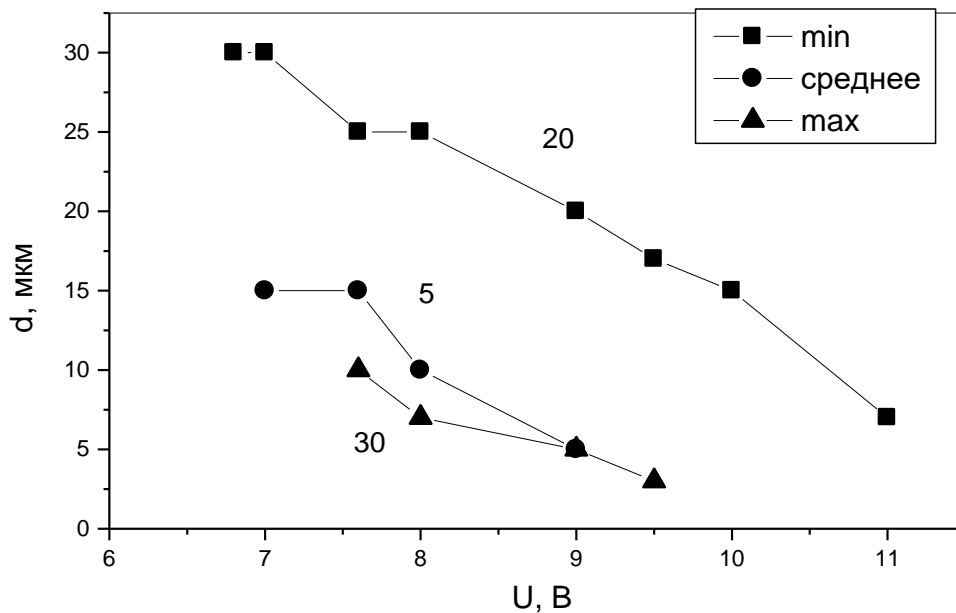


Рис. 2.19. Зависимость шага периодической деформации от напряжения для трех толщин ЖК слоя (5 мкм; 20 мкм; 30 мкм)

Проведя три опыта на разных толщинах ЖК слоя, построив зависимость в одной координатной плоскости, можно увидеть, что пороговое напряжение зависит от толщины жидкого кристалла, при котором начинается периодическая деформация, что отображено на графике рис.2.20.

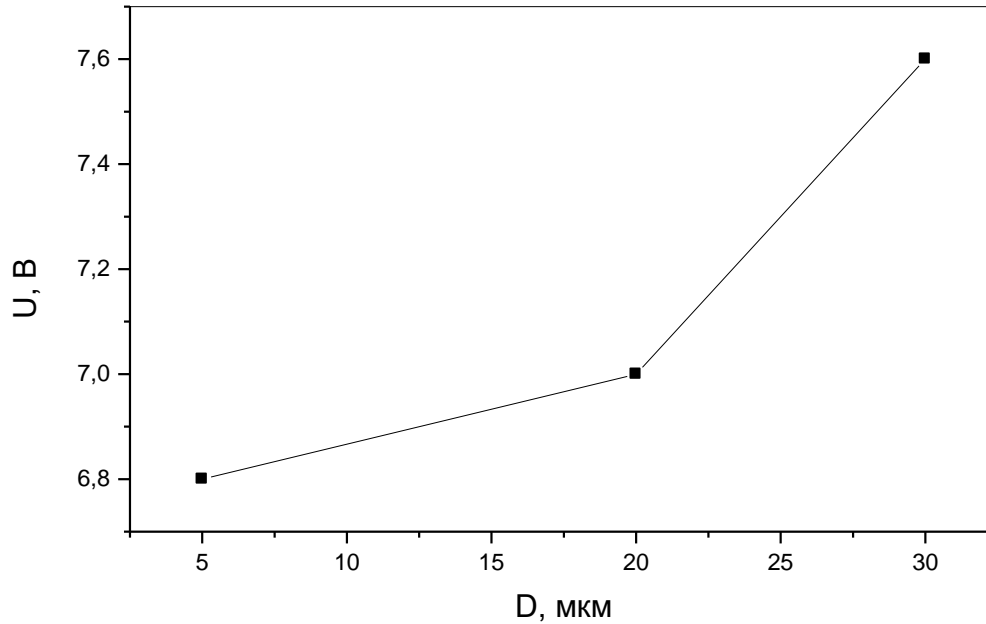


Рис. 2.20. Зависимость напряжения порога появления периодической деформации от толщины ЖК слоя

Так же можно увидеть, что пороговое напряжение зависит от частоты, при котором начинается периодическая деформация, что отображено на графике рис.2.21.

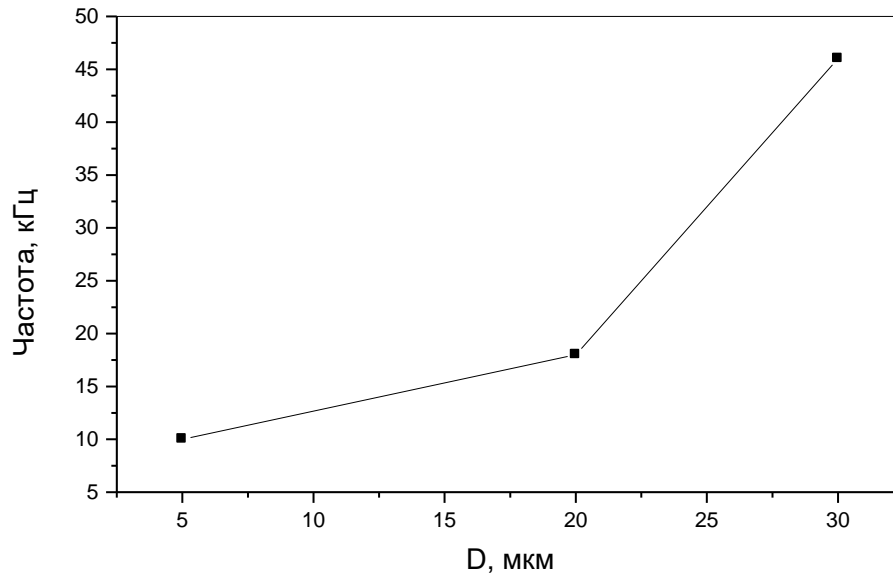


Рис. 2.21. Зависимость появления периодической деформации от частоты

Вывод: в ходе экспериментов было выяснено, что шаг периодической деформации нематика над р - n переходом зависит от

Скорости перемещения «лидера»;

Напряжения подаваемого на р - n переход;

Напряжение появления периодической деформации нематика пороговое, зависит от толщины жидкого кристалла и от частоты.

Величиной напряжения можно регулировать скорость и направление движения «лидера».

### 2.3. Температурная зависимость шага периодической деформации в электрическом поле n - p перехода

Эксперимент проводился при начальной температуре жидкокристаллической ячейки 23 °С. Начальная температура измерялась спиртовым термометром. График соответствия температуры ячейки при нагреве от времени был построен на основании двух точек, первая это комнатная температура 23 °С, вторая точка это температура фазового перехода (паспортные данные) жидкого кристалла.

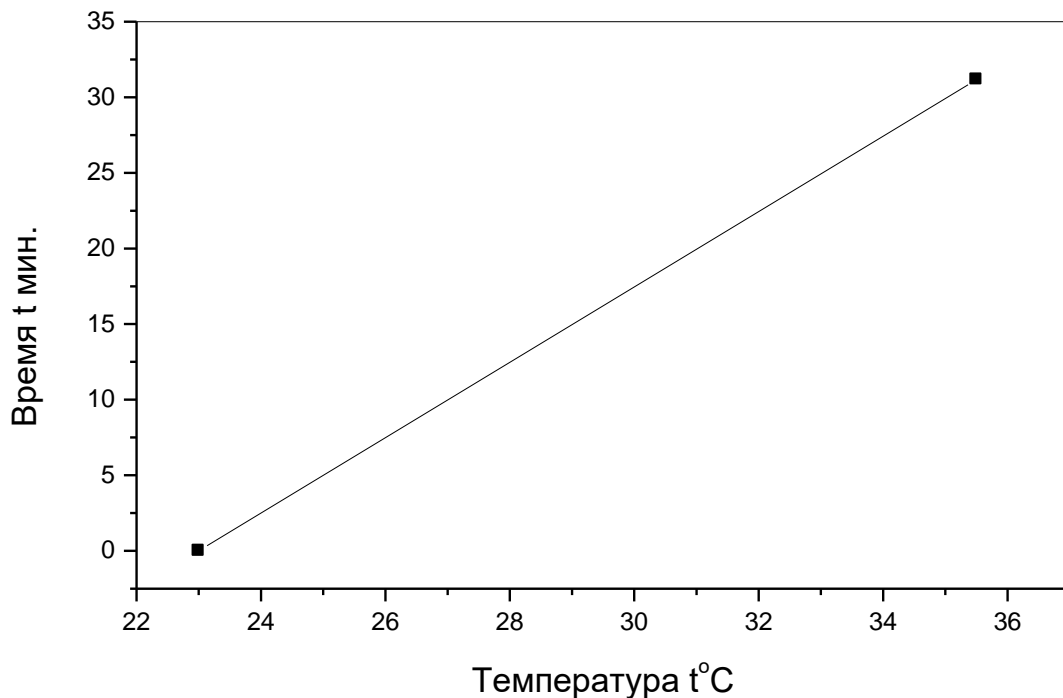


Рис. 2.22. Калибровочная зависимость времени нагрева от температуры контрольных точек

Для регистрации результатов температурных исследований была выбрана зона ячейки с толщиной ЖК слоя 30 мкм. Установив частоту 46 кГц и напряжение 8,5 В, после движения «лидера» добились появления стационарной периодической деформации, далее постепенно и равномерно осуществлялся нагрев образца с начальной комнатной температуры, при этом одновременно производилась фото фиксация изображения



периодической деформации каждые 5 минут. Стационарный шаг периодической деформации не изменялся. Спустя 25 минут, можно заметить, что изображение периодической деформации изменило свою насыщенность, а еще через 5 минут она совсем исчез. Изменение яркости предшествовало фазовому переходу. Фазовый переход произошел через 1 минуту 17 секунд, после исчезновения изображения периодической деформации. Этот температурный интервал равен  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Это означает, что мы достигли предельной температуры жидкокристаллического состояния для данного нематика равного  $35,5^{\circ}\text{C}$ .

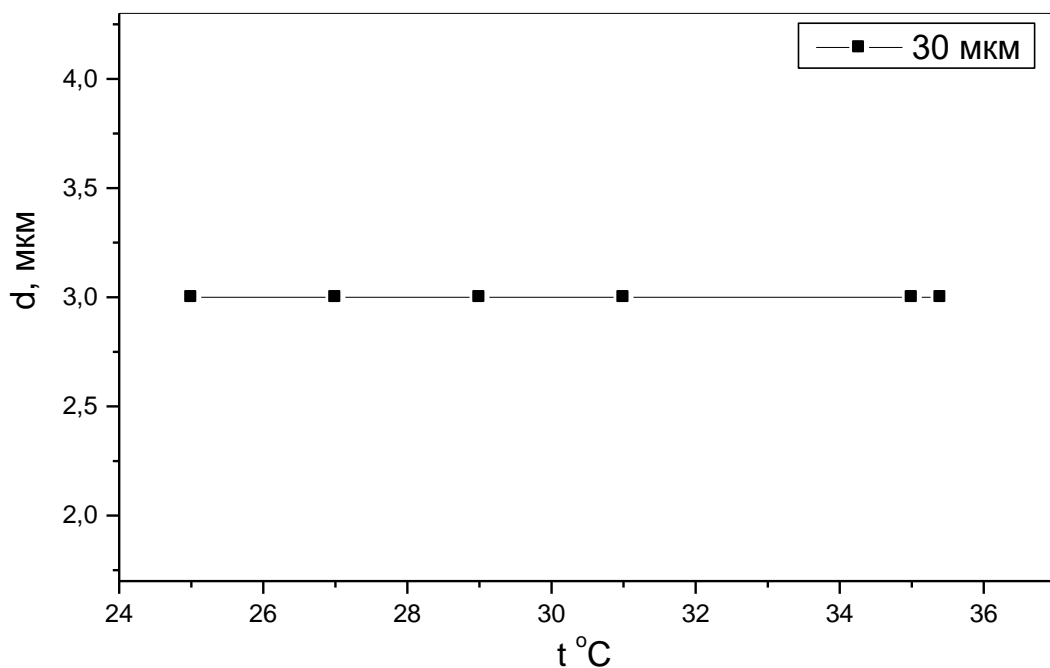


Рис. 2.23. Зависимость шага периодической деформации от температуры, при равномерном нагреве

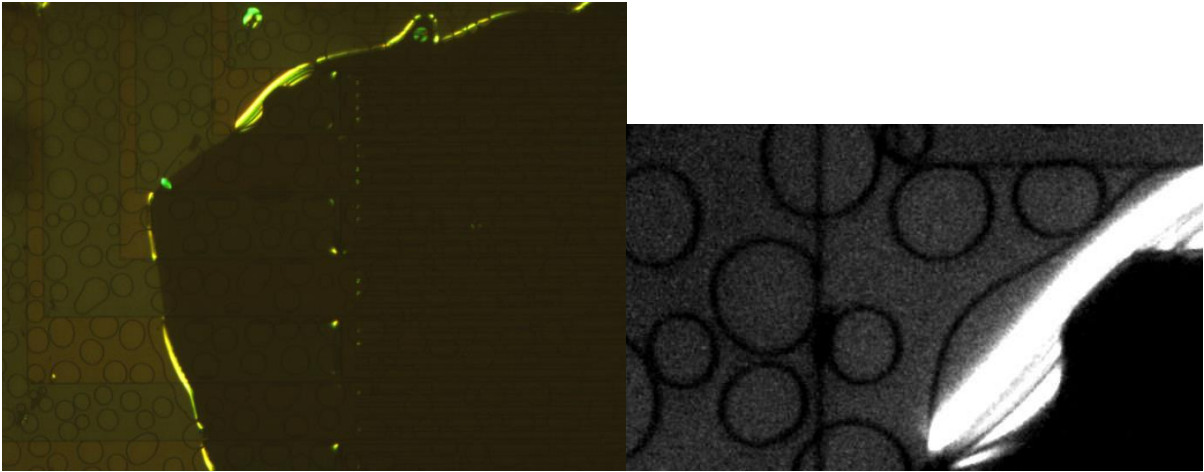


Рис. 2.24. Иллюстрация фазового перехода, при достижении температуры 35,5 °С, при  $U=8,5$  В. Частота 46кГц, толщина ЖК слоя 30мкм

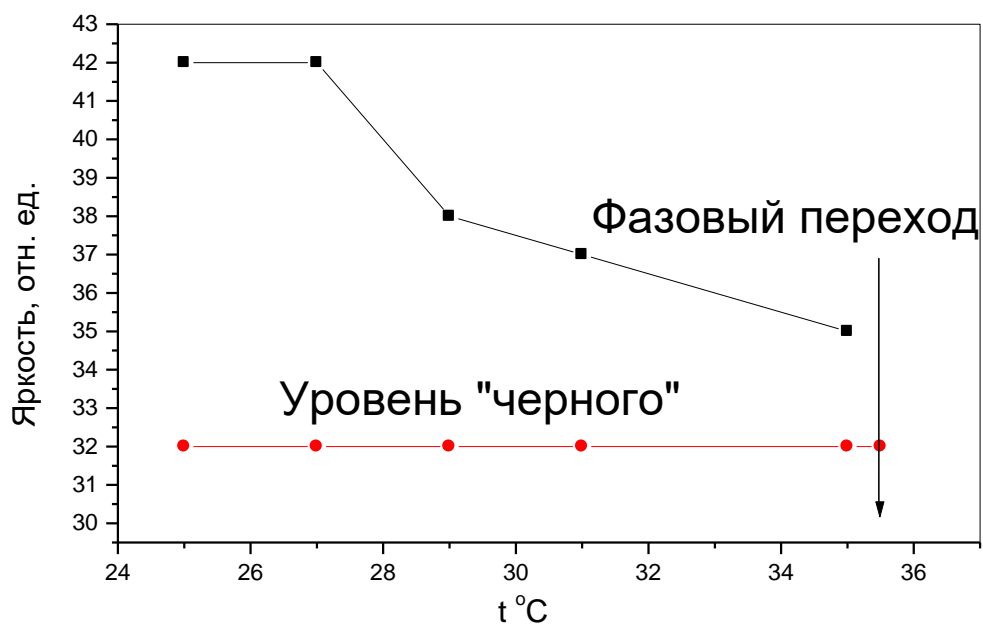


Рис. 2.25. Зависимость интенсивности участка периодической деформации от температуры

Вывод:

Изменение температуры не влияет на размер шага периодической деформации.

Изменение температуры влияет на яркость и насыщенность изображения периодической деформации.

## 2.4. Релаксация шага периодической деформации нематика

Для установления зависимости шага периодической деформации от напряжения была выбрана толщина ЖК слоя 30 мкм, при частоте 46 кГц. При напряжении 9,5 В, спустя 20 секунд было установлено, что шаг деформации стал стационарным и равным 3 мкм, что показано на рис. 2.26.

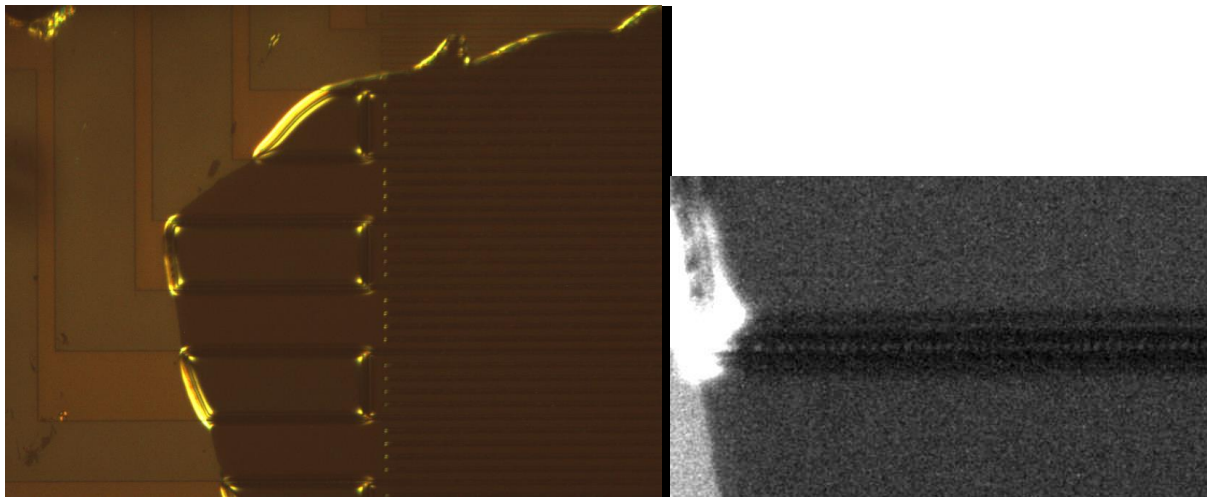


Рис. 2.26. Начальное напряжение  $U=9,5$  В, шаг деформации,  $d = 3$  мкм

Далее напряжение было уменьшено на 1В, в течение 2-3 секунд. При новом напряжении равном 8,5 В, наблюдалось равномерное изменения шага в сторону увеличения. Переход в стационарное состояния значения шага занял 15 секунд рис. 2.27.

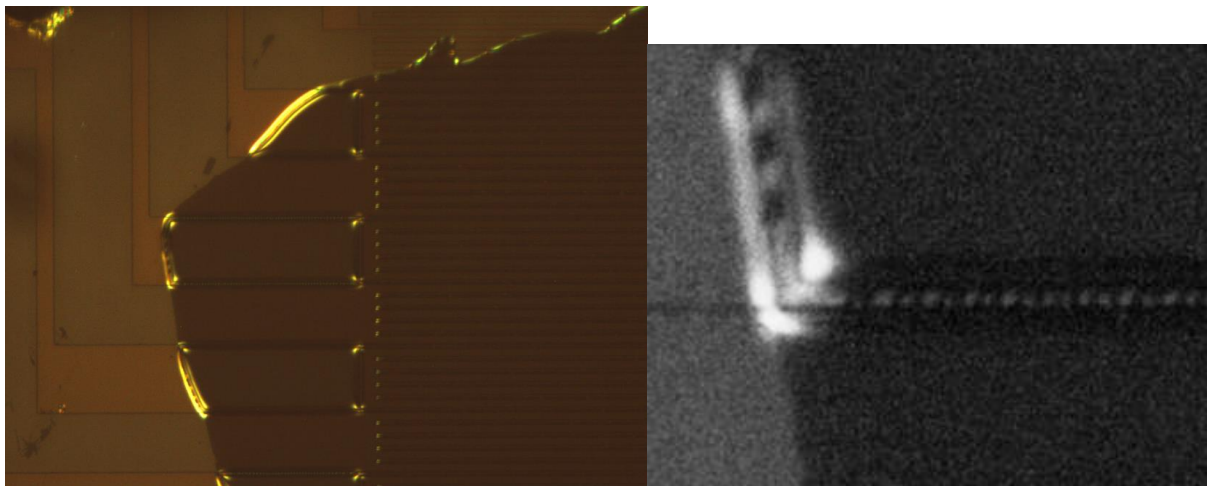


Рис. 2.27.  $U=8,5$  В, шаг деформации,  $d = 5$  мкм

Далее уменьшили напряжение на 1В, в течение 2-3 секунд. При напряжении 7,6 В, после 6 секунд равномерного изменения шага его величина приняла стационарные размеры, что отображено на рис. 2.28.

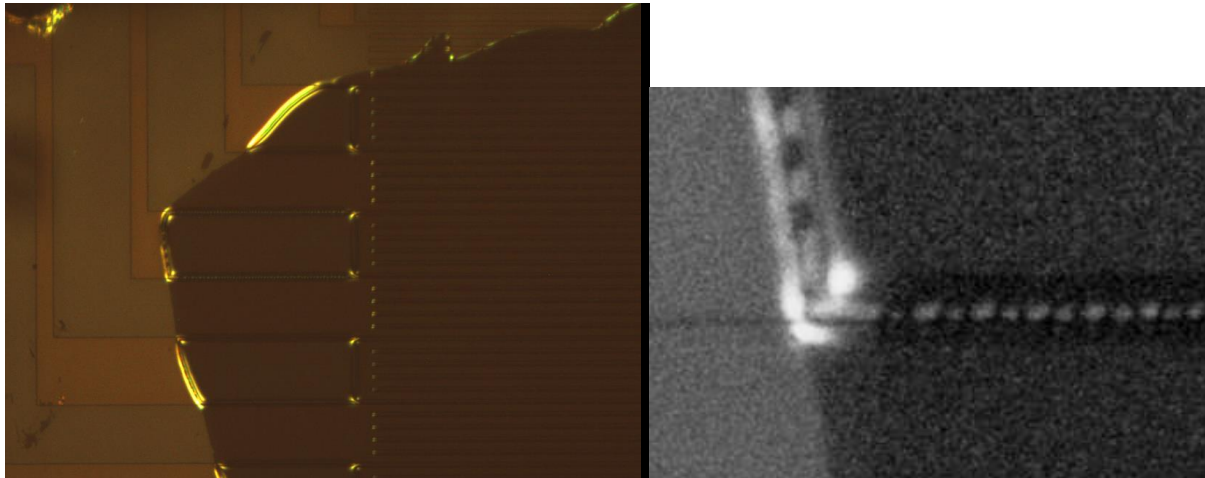


Рис. 2.28.  $U=7,6$  В, шаг деформации,  $d = 7$  мкм

При дальнейшем уменьшении напряжение еще на 0,1В релаксация деформации начала происходить в виде обратного движения «лидера», что отображено на рис. 2.29.

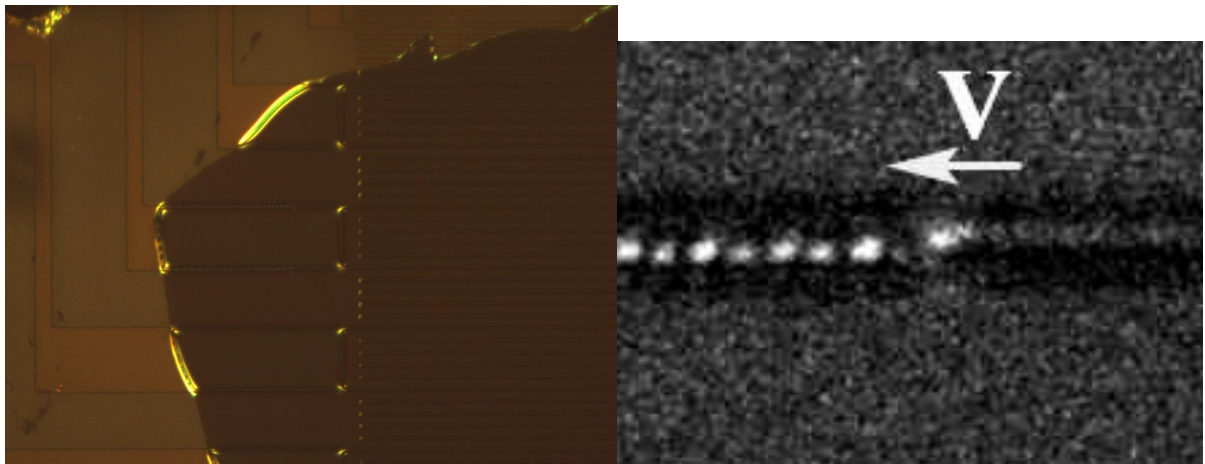


Рис. 2.29. Движение «лидера» в обратную сторону,  $U=7,5$  В при релаксации периодической деформации

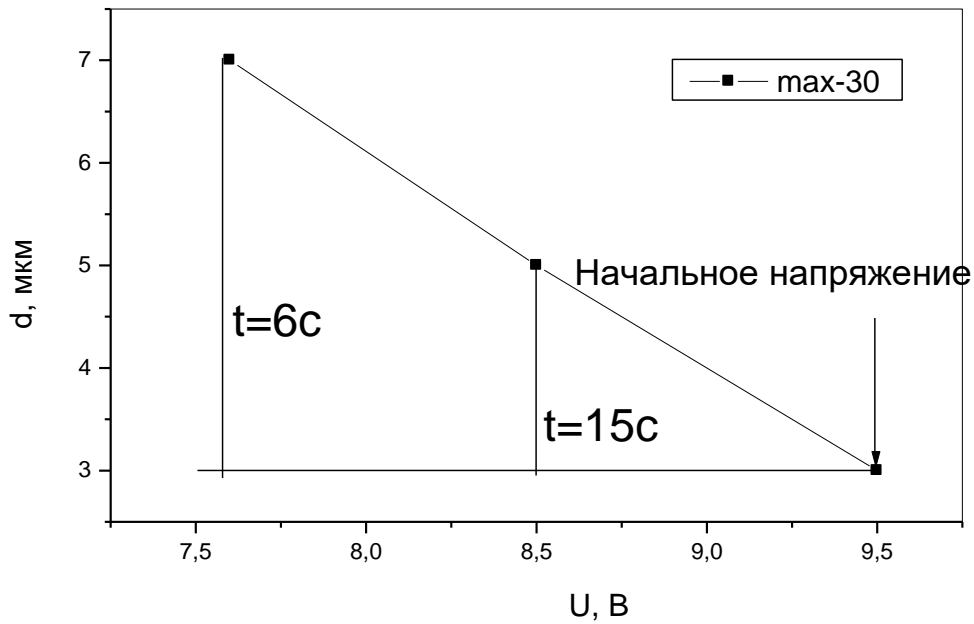


Рис. 2.30. Зависимость шага периодической деформации от напряжения, при уменьшении напряжения

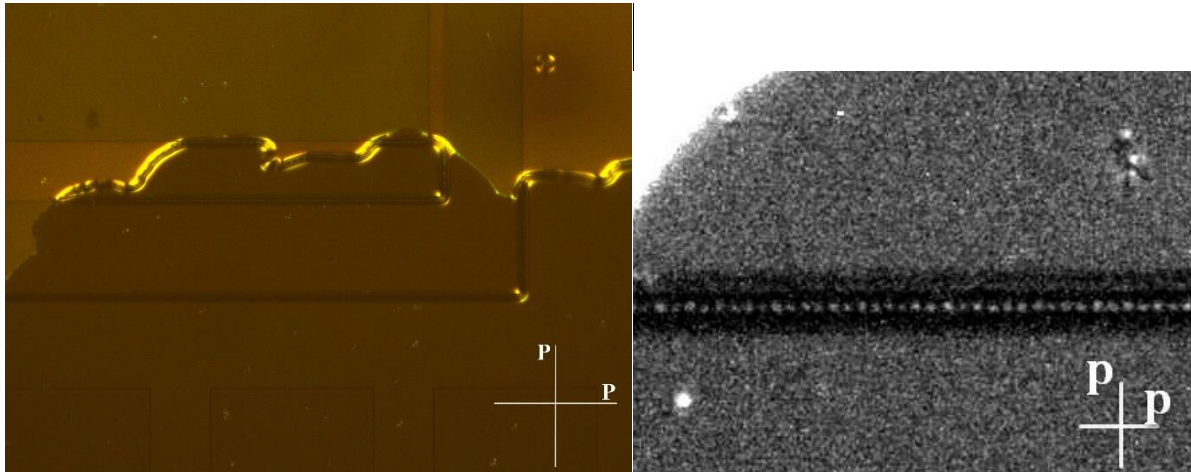
Вывод: в ходе работы установлено, что существует два вида релаксации периодической деформации:

Если напряжение будет уменьшаться постепенно, но при этом оставаясь выше порогового, то шаг периодической деформации будет монотонно увеличиваться.

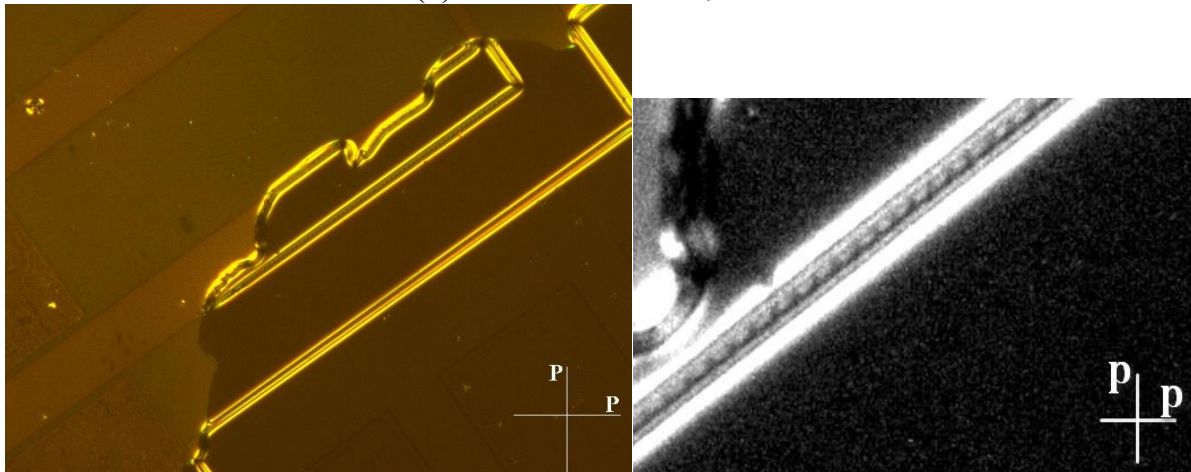
Если понизить напряжение ниже порога, то релаксация периодической деформации в состояние однородной ориентации нематика, произойти двумя вариантами: 1) при небольшом уменьшении напряжения ниже порога «лидер» движется в обратную сторону, 2) если напряжение уменьшено значительно, то исчезновение периодической деформации происходит одновременно вдоль всей линии р n перехода.

## 2.5. Угловая зависимость шага периодической деформации

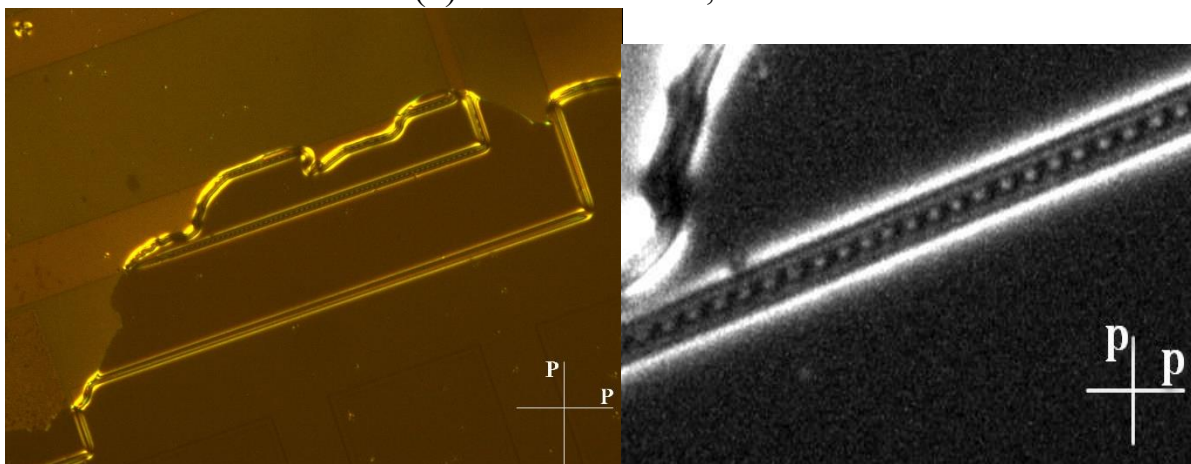
В экспериментах по установлению угловых зависимостей первоначально выбрана зона ячейки с толщиной жидкого кристалла 5 мкм. Угловые отсчеты осуществлялись относительно скрещенных поляризаторов.



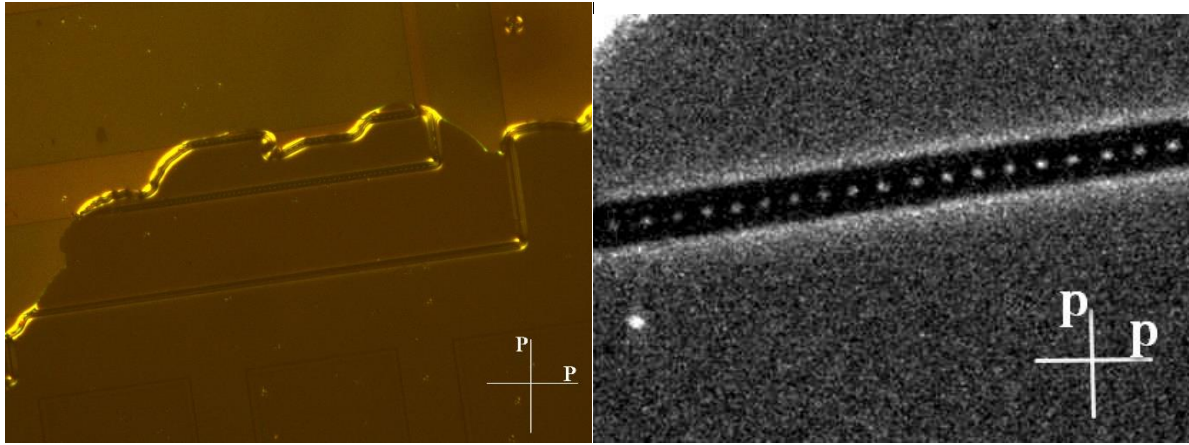
(а)  $\alpha=90^\circ$   $d=5$  мкм,  $U=8В$



(б)  $\alpha=60^\circ$   $d=7$  мкм,  $U=8В$



(в)  $\alpha=45^\circ$   $d=10$  мкм,  $U=8В$



(г)  $\alpha=30^{\circ}$ ,  $d=7$  мкм,  $U=8$ В

Рис. 2.30. Изменение шага периодической деформации от угла между поляризатором и линией р п перехода. (а)  $\alpha=90^{\circ}$ , (б)  $\alpha=60^{\circ}$ , (в)  $\alpha=45^{\circ}$ , (г)  $\alpha=30^{\circ}$

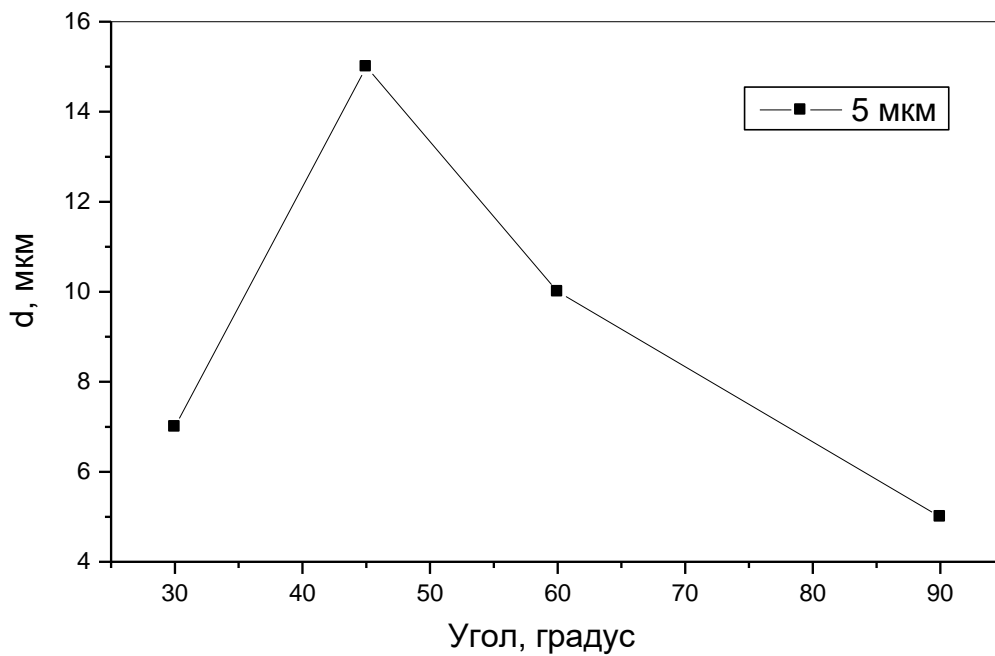
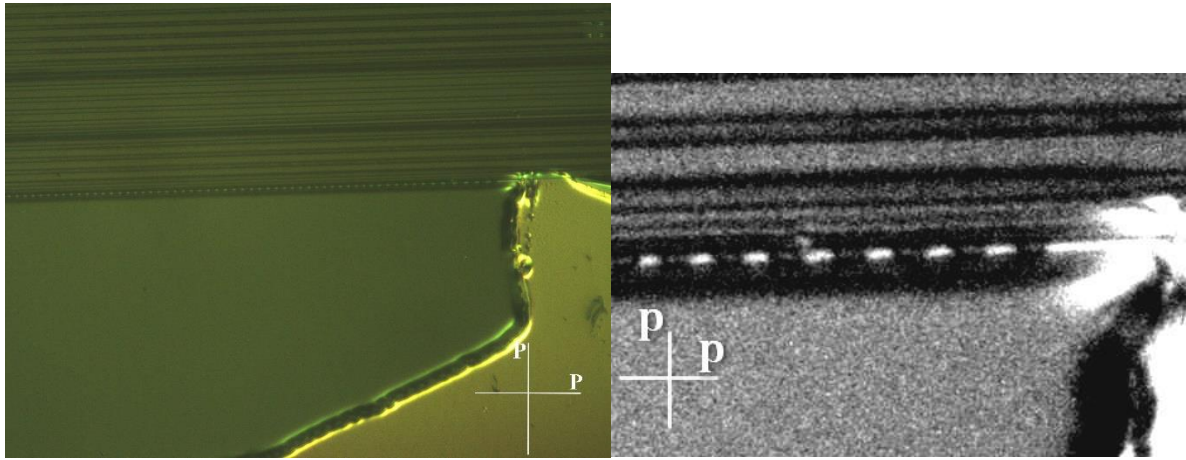
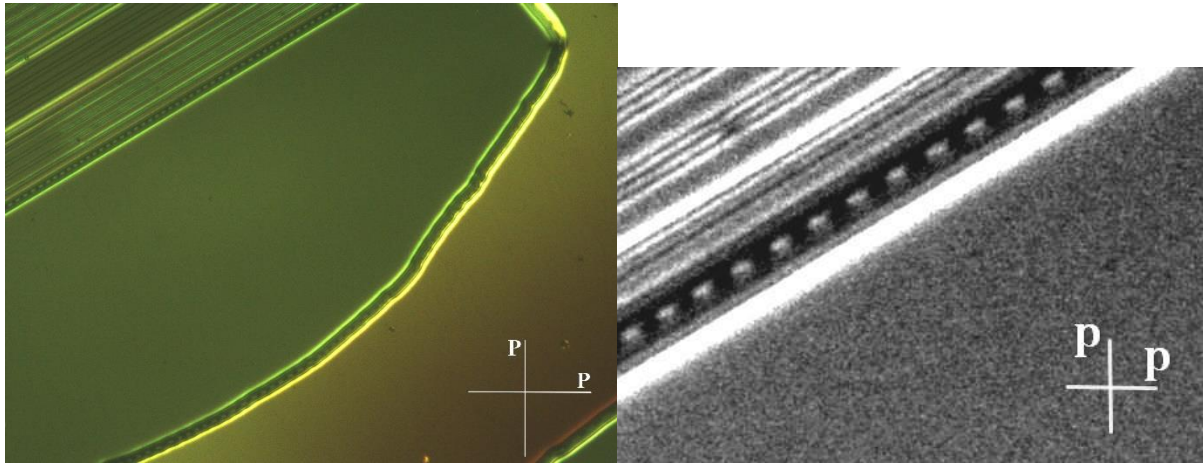


Рис. 2.32. Зависимость шага периодической деформации от угла  $\alpha$  (толщина ЖК слоя 5 мкм)

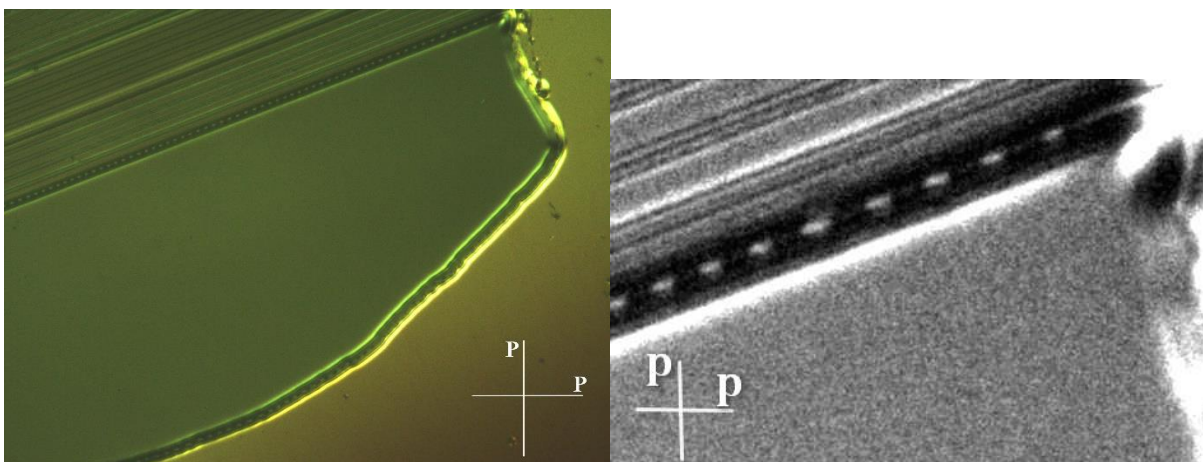
В экспериментах по установлению угловых зависимостей далее была выбрана зона ячейки с толщиной жидкого кристалла 20 мкм. Угловые отсчеты осуществлялись относительно скрещенных поляризаторов.



(а)  $\alpha = 90^\circ$   $d = 5$  мкм,  $U = 8,8$ В

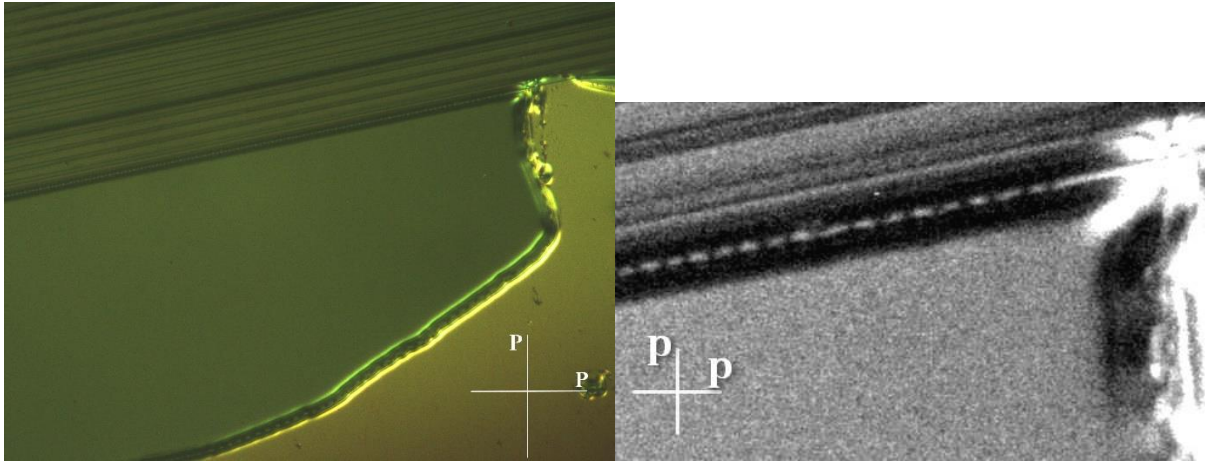


(б)  $\alpha = 60^\circ$   $d = 7$  мкм,  $U = 8,8$ В



(в)  $\alpha = 45^\circ$   $d = 10$  мкм,  $U = 8,8$ В





(г)  $\alpha = 30^\circ$   $d = 7$  мкм,  $U = 8,8$  В

Рис. 2.33. Изменение угла между поляризатором и линией перехода шага периодической деформации. (а)  $\alpha = 90^\circ$ , (б)  $\alpha = 60^\circ$ , (в)  $\alpha = 45^\circ$ , (г)  $\alpha = 30^\circ$

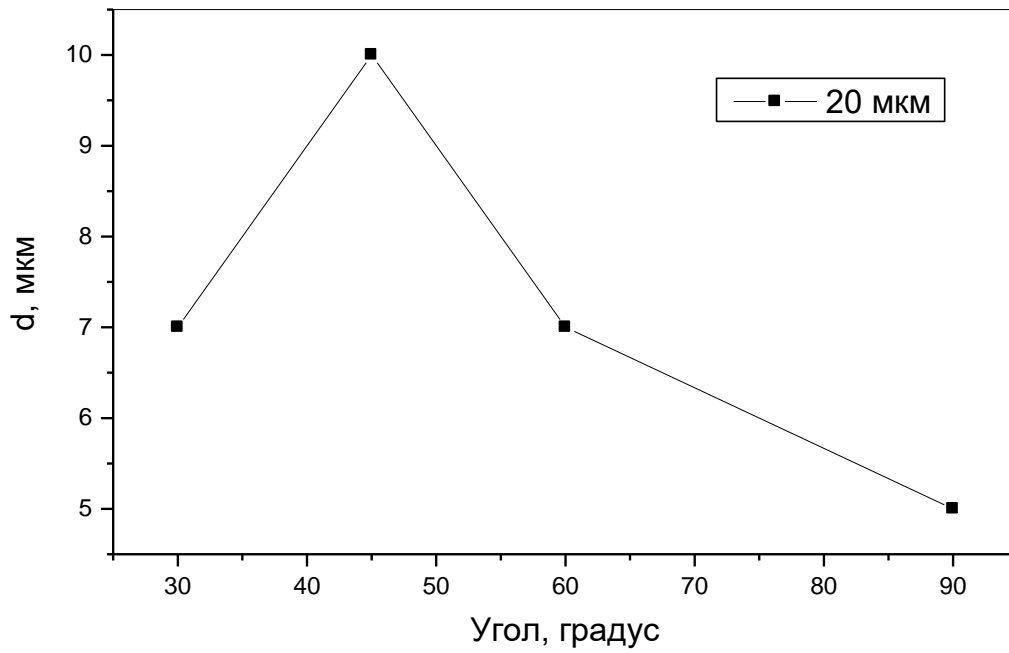
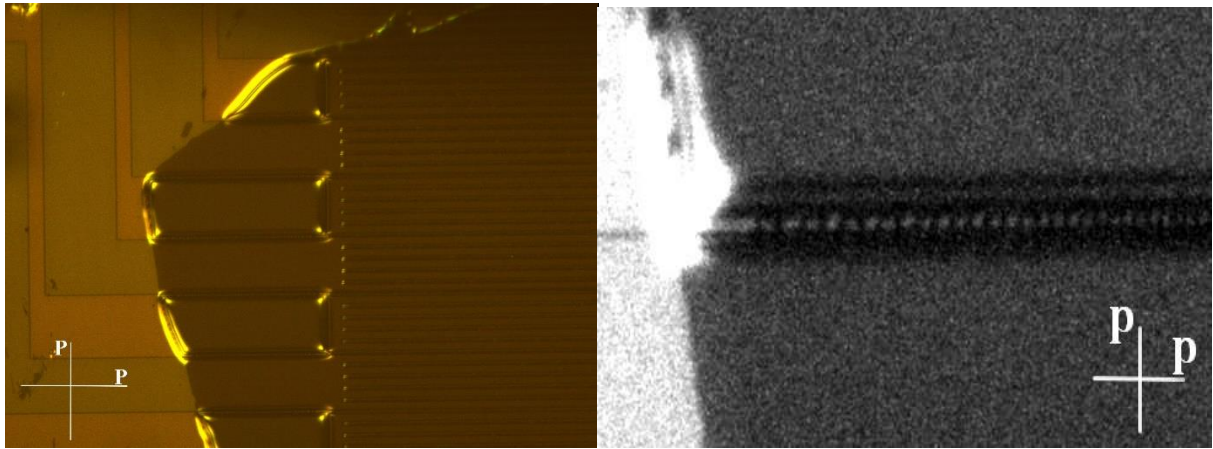
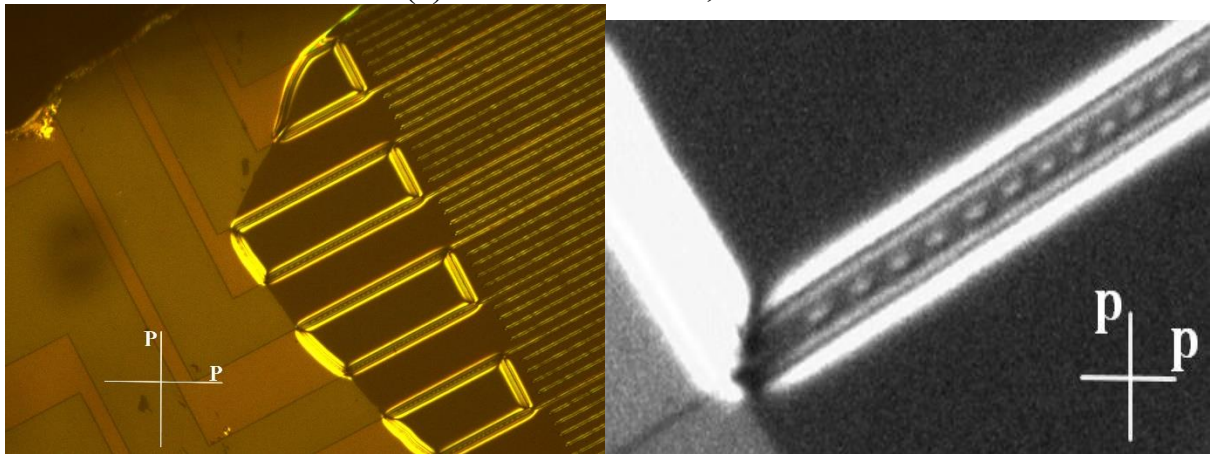


Рис. 2.34. Зависимость шага периодичности от угла  $\alpha$  (толщина ЖК слоя 20 мкм)

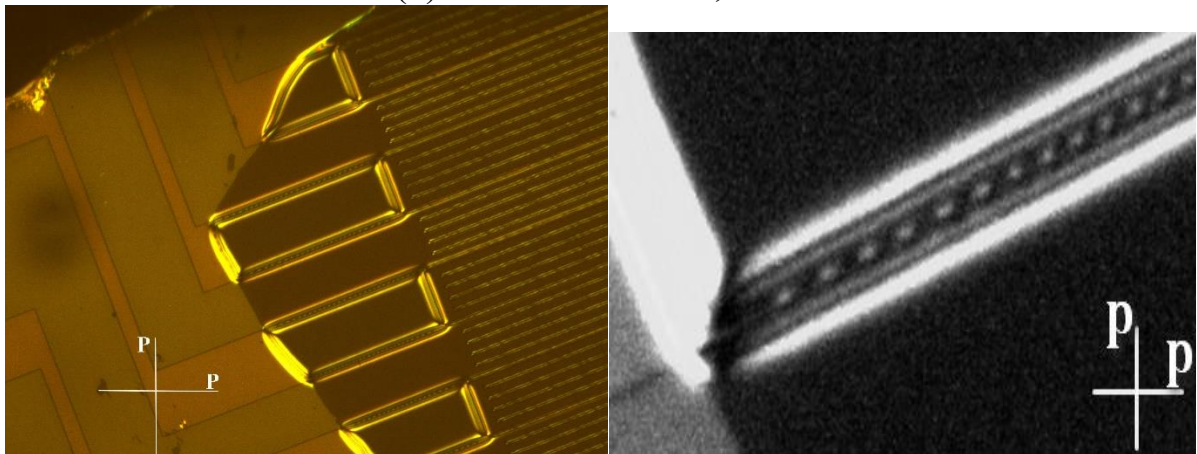
В экспериментах по установлению угловых зависимостей далее была выбрана зона ячейки с толщиной жидкого кристалла 30 мкм. Угловые отсчеты осуществлялись относительно скрещенных поляроидов.



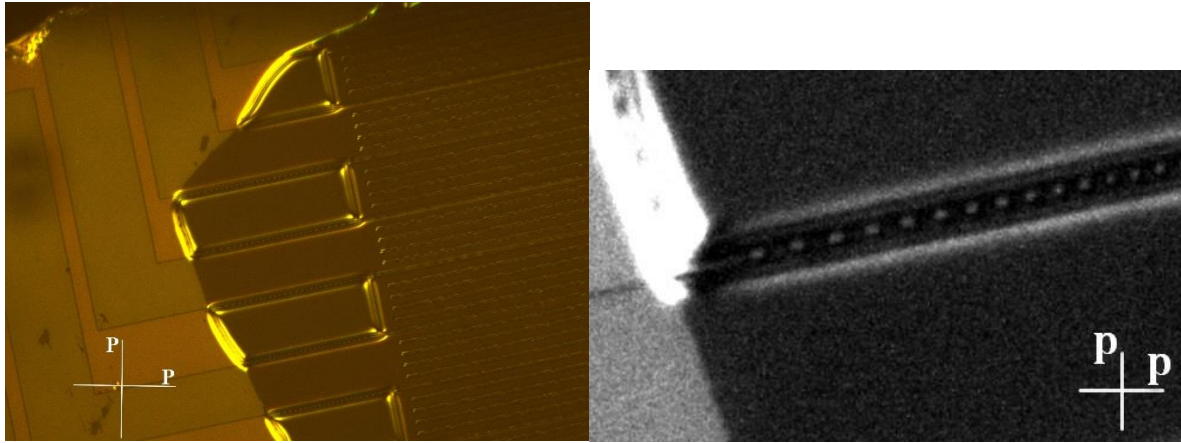
(а)  $\alpha = 90^\circ$   $d = 3$  мкм,  $U = 8$ В



(б)  $\alpha = 60^\circ$   $d = 10$  мкм,  $U = 8$ В



(в)  $\alpha = 45^\circ$   $d = 10$  микрон,  $U = 8$ В



(г)  $\alpha = 30^\circ$   $d = 7$  микрон,  $U = 8$  В

Рис. 2.35. Изменение шага периодической деформации от угла между поляризатором и линией  $p$   $n$  перехода. (а)  $\alpha = 90^\circ$ , (б)  $\alpha = 60^\circ$ , (в)  $\alpha = 45^\circ$ , (г)  $\alpha = 30^\circ$

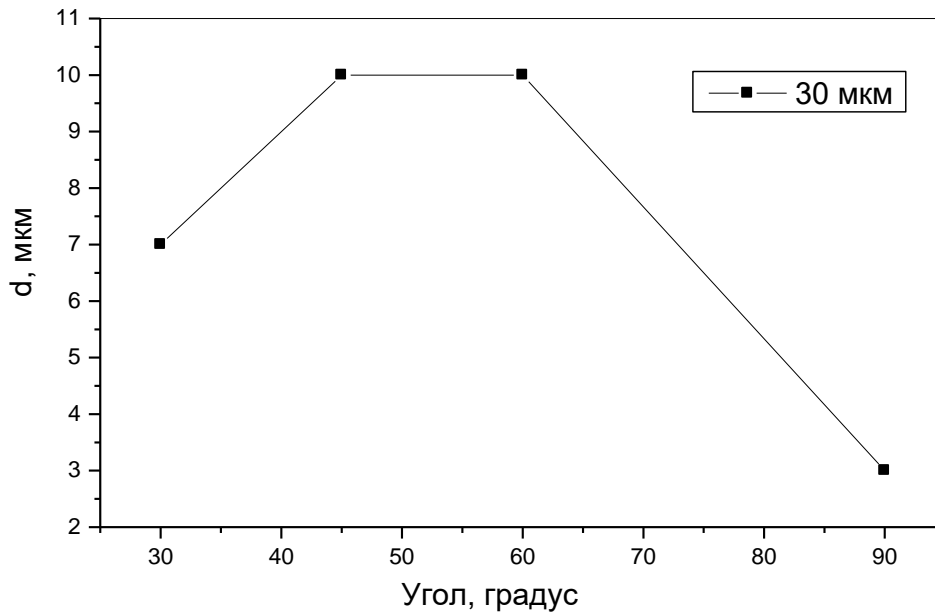


Рис. 2.36. Зависимость шага периодической деформации от угла  $\alpha$  (толщина ЖК слоя 30 мкм)

На рис. 2.37. представлены все зависимости, которые мы получили в ходе эксперимента, в одной координатной плоскости.

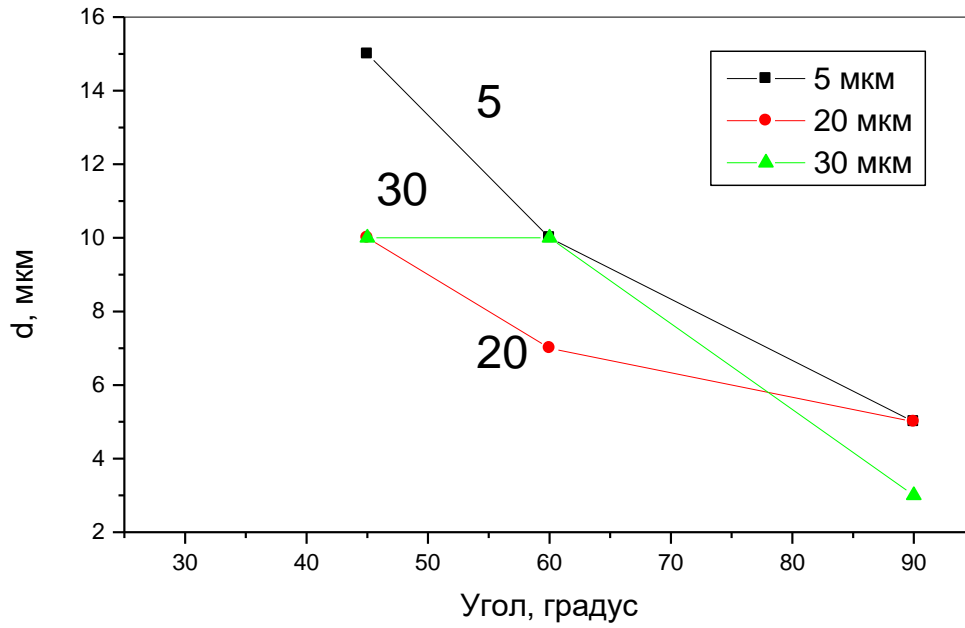


Рис. 2.37. Зависимость шага периодической деформации от угла  $\alpha$  для трех толщин ЖК слоя (5 мкм; 20 мкм; 30 мкм)

Вывод: в результате исследования установлено, что зависимость шага периодической деформации зависит от угла  $\alpha$ , т.е. чем больше угол между поляризатором и линией р - п перехода, тем шаг периодической деформации меньше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты.

1. Электрическое поле р-п перехода вызывает переориентацию нематического жидкого кристалла, при этом переориентированные молекулы лежат в плоскости перпендикулярной линии р - п перехода.
2. Появление периодической деформации нематика, которая содержит «лидер» и собственно периодическую деформацию является пороговой. Порог зависит от толщины жидкого кристалла, частоты переменного напряжения, прикладываемого к р-п переходу. Скоростью и направлением движения «лидера» можно управлять напряжением.
3. Шаг периодической деформации нематика над р - п областями зависит от скорости перемещения «лидера».
4. Температура в пределах мезофазы не влияет на размер шага периодической деформации.
5. Релаксация периодической деформации происходит двумя путями: 1) при уменьшении напряжения до пороговых значений, шаг периодической деформации монотонно увеличивается; 2) при напряжении ниже порога, релаксация периодической деформации осуществляется за счет движения «лидера» в обратную сторону при сохранении периодической деформации, а при напряжении значительно меньшем порогового, периодическая деформация исчезает одновременно вдоль линии р - п перехода.
6. Предполагается что в основу механизма возникновения периодической деформации в нематике в электрическом поле р п перехода лежит механизм возникновения доменной неустойчивости Капустина-Вильямса.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Коншина Е.А., Амосова Л.П., Костомаров Д.С., Федоров М.А. Электроуправляемое двулучепреломление в нематических жидких кристаллах. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.– 63 с.
2. <https://megaobuchalka.ru>
3. Каманина Н. В. Электрооптические системы на основе жидких кристаллов и фуллеренов – перспективные материалы наноэлектроники. Свойства и области применения. Учебное пособие. - СПб: СПбГУИТМО, 2008 – 137с.
4. Л.М.Блинов. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.,1978 - 384 с.
5. Коншина Е.А. Оптика жидкокристаллических сред. Учебное пособие – СПб: СПб НИУ ИТМО, 2012.– 99 с.
6. Блинов Лев Михайлович Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 480с.
7. Гончаров И.Ю., Колесников Д.А., Кучеев С.И. 2014. Нестационарная локальная переориентация нематика в ячейке с кремниевым р-п переходом. Письма в ЖТФ. 40(9): 758–761.
8. С. Чандрасекар. Жидкие кристаллы. М.,1980 – 340 с.
9. Пикин С. А., Блинов Л. М. Жидкие кристаллы / Под ред. Л. Г. Асламазова. – М.,1982 – 208 с.
10. Вестник Челябинского государственного университета. 2011. № 15 (230). Физика. Вып. 10. С. 37–41. Физика жидких кристаллов.
11. Богданов С.И., Гудкова В.А., Колесников Д.А., Кучеев С.И., Плесканёв А.А. 2017. Дифракционная решетка, индуцированная электрическим полем р-п переходов в нематической ячейке. Научные ведомости БелГу, Серия Математика. Физика. 27 (276). 49: 75–84.
12. Лукьянченко Е.С., Козунов В.А., Григос В.И. 1985. Ориентация нематических жидких кристаллов, Успехи химии, 2. 214–226.

13. F. Brochard and P. G. De Gennes, "Theory of magnetic suspensions in liquid crystals," J. Phys. (Paris) **31**(7), 691–708 (1970).
14. Де Жен, П. Физика жидких кристаллов / Де Жен В. -М.: Мир, 1977. - 377 с.
15. Некрасов, Т.Д. Измерение среднего угла наклона молекул в локализованных участках жидкокристаллической ячейки / Т.Д. Некрасов // Изв. АН БССР, Сер. физ.-мат. н. -1981. -№6. -С. 114 - 118.
16. Сонин, А.С. Лекции о жидких кристаллах. ч.1. / А.С. Сонин. -М.: изд-во МГУ. -122 с.
17. Капустин, А.П. Экспериментальное исследование жидких кристаллов / А. П. Капустин. -М.: Наука, 1974. -368 с.
18. X. Wang, et al. Electricity Generation based on OneDimensional Group-III Nitride Nanomaterials, Adv. Mater., 2010, 22(19), 2155–2158
19. А. К. Tagantsev, Theory of flexoelectric effect in crystals, Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1985, 88(6), 2108–2122.
20. А. К. Tagantsev, Piezoelectricity and flexoelectricity in crystalline dielectrics, Phys. Rev. B: Condens. Matter, 1986, 34(8), 5883.
21. Томилин М.Г., Невская Г.Е. Дисплеи на жидких кристаллах. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 108 с.
22. Капустин А. П. Электрооптические и акустические свойства жидких кристаллов. М. : Наука, 1973.

