

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

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИИ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

**Электрохимическая модификация кремния в эффекте памяти в
структуре Si/нематик/прозрачный электрод**

Диссертация на соискание академической степени магистра

Направления подготовки 03.04.02 Физика

Магистерская программа: Физика конденсированного состояния

Полуниной Анастасии Владимировны

Научный руководитель:
канд. физ.-мат. наук, доцент
Кучеев С.И.

Рецензент:
канд. физ.-мат. наук, доцент
Тарновский А. И.

БЕЛГОРОД 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

1.1 Структура жидких кристаллов

1.2 Основные физические свойства жидких кристаллов

1.2.1 Электрические свойства жидких кристаллов

1.3 Электрооптические эффекты в жидких кристаллах

1.3.1 Ориентационные (поляризационные) эффекты в нематиках

1.3.2 Переход Фредерикса

1.3.3 Твист-эффект

1.4 Бистабильные жидкокристаллические дисплеи

1.5 Анодное окисление кремния

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Экспериментальная ячейка

2.2 Экспериментальная установка

2.3 Ход эксперимента

2.4 Визуализация слабоконтрастных участков ориентации директора

2.5 Ориентации ЖК с повышенным порогом эффекта Фредерикса

2.6 Эффект памяти

2.7 Механизм эффекта «памяти»

2.8 Влияние примесей на эффект «памяти»

2.9 Локальное загрязнение в эффекте «памяти»

2.11 Влияние типа проводимости кремния

2.12 Анодное окисление кремния в жк ячейке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Жидкие кристаллы используются в многих отраслях фундаментальных исследований. Потребность в создании оптических компонентов, в основу которых входят жидкие кристаллы, стимулируют не только проблемы, возникающие в процессе исследований связанных с практическими приложениями, но и зачастую заставляют переосмысливать отношение к данному разделу науки в целом[3].

Созданные светуправляемые модуляторы света на основе нематических и смектических жидких кристаллов нашли широкое применение в оптических схемах адаптивной оптики и голографии. На основе жидких кристаллов были разработаны электроуправляемые устройства, которые на данный момент используются в качестве аттенуаторов оптического сигнала и переключателей.

Технологии, в основе которых используются бистабильные жидкокристаллические дисплеи, привлекли большое внимание производителей и пользователей. Основанные на использовании эффекта физической памяти, бистабильные технологии используют в дисплее жидкокристаллические материалы без применения активных элементов [2].

Изображение на бистабильных жидкокристаллических дисплеях, будучи однократно записанное может сохраняться длительное время при этом, не требуя регенерации и подачи сигналов для поддержания эффекта «памяти». Благодаря этому свойству, можно значительно уменьшить потребляемую мощность жидкокристаллических дисплеев.

Цель работы: Исследование электрохимической модификации кремния в эффекте памяти в структуре Si/нематик/прозрачный электрод

Задачи:

- 1) исследовать свойства эффекта «памяти» в структуре Si/нематик/прозрачный электрод с электрохимически модифицированной поверхностью кремния;
- 2) установить роль примесей в жк материале в эффекте «памяти»;

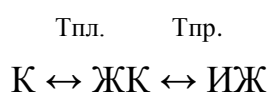
3) установить влияние типа проводимости на протекание эффекта «памяти»;

4) провести электронно-микроскопические исследования поверхности кремния, применяемого в экспериментах.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

1.1. Структура жидких кристаллов

Жидкокристаллическим (ЖК) (или мезоморфным) называют состояние веществ, промежуточное между твёрдым кристаллом и изотропной жидкостью. В изотропных жидкостях отсутствует дальний порядок, и молекулы обладают высокой подвижностью. В твердом кристалле существует дальний порядок расположения молекул и они, участвуя в тепловом движении, как правило, не покидают положения своего равновесия. В жидкокристаллическом состоянии вещество подобно жидкости – оно текуче, образует капли, принимает форму сосуда, в котором находится [11]. Вместе с тем, как твердый кристалл, оно имеет анизотропию оптических, магнитных, механических, электрических и других свойств. Все это является следствием наличия определенного порядка в расположении молекул. Жидкокристаллическое состояние свойственно многим различным органическим (и ряду неорганических) соединениям, молекулы которых анизометричны, что определяет наличие порядка в их расположении. Различают полимерные жидкие кристаллы и низкомолекулярные жидкие кристаллы[3]. Низкомолекулярные жидкие кристаллы разделяют на лиотропные и термотропные. Термотропные жидкие кристаллы существуют в некоем температурном интервале. В таких веществах фазовые переходы происходят при изменении температуры. При температуре плавления $T_{пл}$ твердый кристалл переходит в жидкокристаллическую фазу [11]. Дальнейший нагрев приводит к переходу в изотропную жидкость (ИЖ) при температуре просветления $T_{пр}$. Схема фазовых переходов имеет вид:



В прикладной оптике преимущественно используются термотропные жидкие кристаллы. Первый тип молекул имеют удлиненную форму молекул и называются каламитиками. Второй тип молекул имеют дискотическую форму молекул и называются дискотиками (рис.1.1).

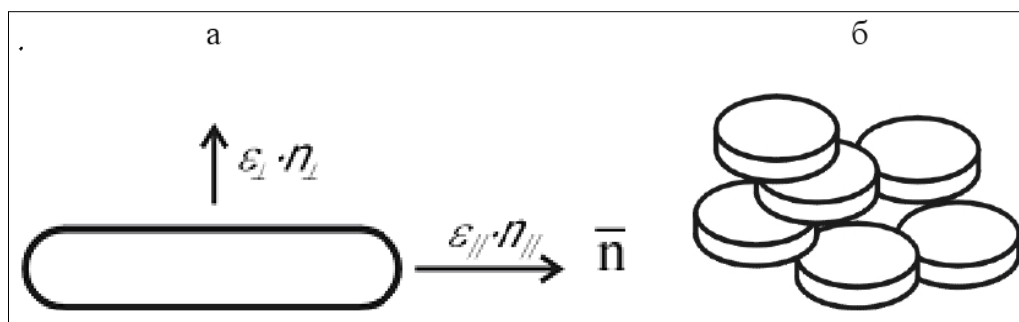


Рис.1.1. Палочкообразные молекулы жидкого кристалла или каламитиков (а) и дискотиков (б). Где n – преимущественное направление длинных осей молекул жидких кристаллов, ϵ – диэлектрическая проницаемость, n – показатель преломления жидких кристаллов.

1.2. Основные физические свойства жидких кристаллов

Оптические свойства жидких кристаллов материалов (ЖКМ) определяют эксплуатационные параметры оптических элементов, созданных на их основе. От оптической анизотропии в нематических жидких кристаллах зависят следующие параметры: контраст и углы наблюдения в дисплеях. Основной особенностью жидкокристаллических материалов является наличие большого двулучепреломления, оптической активности и дихроизма [11]. Жидкие кристаллы могут быть как оптически одноосными так и двуосными. В случае одноосных жидких кристаллов свет, поляризованный в двух взаимно перпендикулярных направлениях, распространяется с разной скоростью. Нематические жидкие кристаллы являются оптически положительными[1]. Для них показатель преломления необыкновенного луча (n_e) больше или равен

показателю преломления обыкновенного луча (n_0). Для нематиков оптическая анизотропия $\Delta n = (n_e - n_0) \geq 0$. Холестерические жидкие кристаллы являются оптически отрицательными одноосными кристаллами. Значения показателей преломления характерные для нематиков и смектиков в видимой области спектра лежат в пределах от 1,4 до 1,9. Величина двулучепреломления $\Delta n = n_e - n_0$ в зависимости от типа нематических жидких кристаллов может изменяться в пределах от 0,02 до 0,5. С уменьшением величины показателей преломления λ и Δn возрастают, а с увеличением λ значения оптической анизотропии постепенно уменьшаются и становятся практически постоянными в области ИК диапазона. Исключение составляют отдельные локальные пики поглощения.

С ростом температуры двулучепреломление жидких кристаллов уменьшается[4]. Двулучепреломление стремится к нулю при приближении к температуре просветления. Зависимость оптической анизотропии от температуры для ряда соединений приведена на рис.1.6.

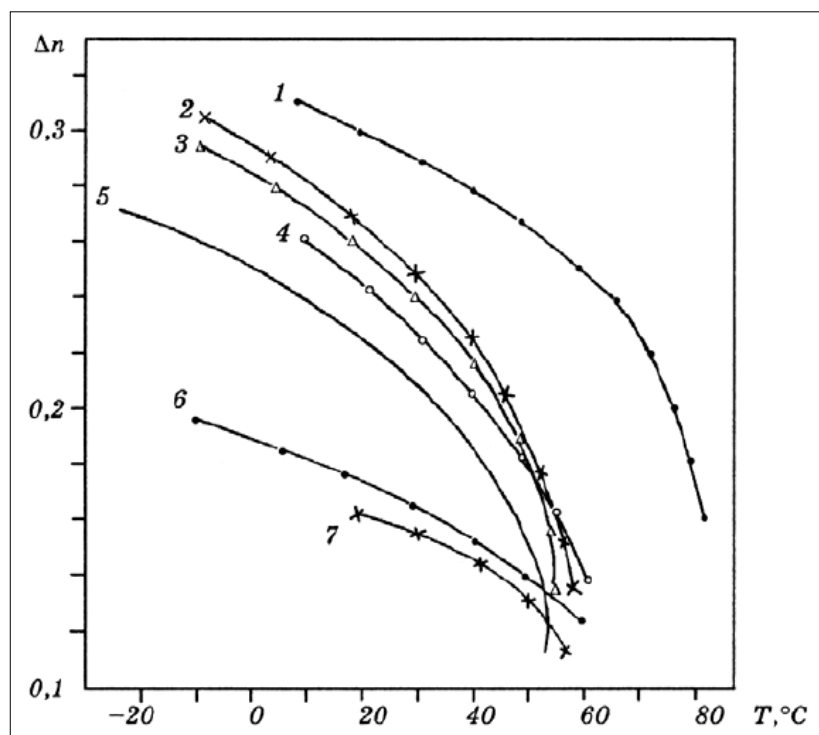


Рис.1.6. Зависимость оптической анизотропии Δn от температуры T для нематических жидких кристаллов разных структур: 1– салицилиденанилины; 2

- азоксисоединения; 3– основания Шиффа; 4 – толаны; 5 – бифенилы; 6 – циклогексаны; 7 – сложные эфиры[11].

У холестерических жидких кристаллов оптические свойства имеют ряд особенностей. Эти особенности являются следствием наличия спиральной структуры. Холестерики оптически одноосны, имеют отрицательную оптическую анизотропию, обладают круговым дихроизмом и селективным отражением света, обладают большой оптической активностью[3]. Возникновение окраски слоя холестерического жидкого кристалла при его освещении белым светом можно объяснить, если представить его как дифракционную решетку, которая имеет систему параллельных слоев толщиной $p/2$ и средним показателем преломления n . В таком случае длина волны света λ_0 , имеющего при интерференции максимальную интенсивность, будет подчиняться условию Вульфа-Брегга:

$$\lambda_0 = 2\bar{n} \cdot d \cdot \sin \theta \quad (1.1)$$

где $d = p/2$ – период решетки; θ – угол между падающим лучом и холестерической плоскостью, n - средний показатель преломления. В случае нормального падения, когда $\theta = 90^\circ$

$$\lambda_0 = \bar{n} \cdot p \quad (1.2)$$

Слой холестерика при нормальном падении света селективно отражает свет с длиной волны, равной шагу спирали. Синтезировано многие холестерические жидкие кристаллы с шагом $p \approx 400-1000$ нм. Для них λ_0 лежит в видимой области. Селективное отражение в окрестности λ_0 говорит о том, что освещенная белым светом плоская структура холестерического жидкого кристалла будет окрашена в цвет, соответствующий λ_0 . Температурная зависимость холестерического жидкого кристалла от шага спирали является его важнейшей характеристикой [4]. У большинства эфиров холестерина с ростом температуры уменьшается шаг спирали ($dp/dt < 0$). В нематохолестерических смесях можно наблюдать все

типы зависимостей [11]. Изменение шага спирали (или цвета) является основой для применения ХЖК.

1.2.1 Электрические свойства жидких кристаллов

Диэлектриками являются чистые органические жидкокристаллические соединения. Они обладают диэлектрической анизотропией $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$, где ε_{\parallel} и ε_{\perp} - диэлектрические проницаемости в направлении параллельном и перпендикулярном направлению преимущественной ориентации. Величина и знак диэлектрической анизотропии зависят от электронной структуры молекул, температуры и частоты электрического поля. Отрицательная величина диэлектрической анизотропии обусловлена наличием в молекулах жидкого кристалла дипольных моментов, которые направлены под большим углом к длинным осям молекул ($> 55^{\circ}$). Положительная величина диэлектрической анизотропии связана с наличием дипольных моментов, направленных почти по оси наибольшей поляризуемости молекул ($< 55^{\circ}$). Диэлектрические проницаемости ε_{\parallel} и ε_{\perp} испытывают дисперсию, причем дисперсия ε_{\parallel} происходит при более высоких частотах. Существуют жидкокристаллические соединения, у которых с изменением частоты происходит изменение знака диэлектрической анизотропии представлены ниже (рис.1.7).

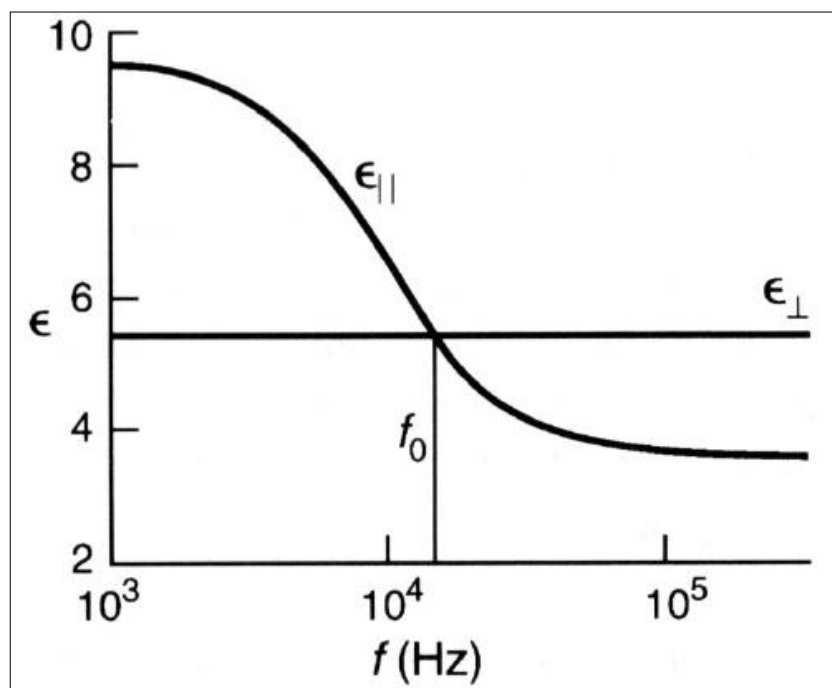


Рис.1.7. Смена знака диэлектрической анизотропии в смеси фенолбензоатов. Где f_0 – частота инверсии знака диэлектрической анизотропии

Смена знака диэлектрической анизотропии имеет важное практическое значение. Это позволяет уменьшить времена релаксации ориентационного электрооптического эффекта. Жидкие кристаллы являются диэлектриками, электропроводность которых можно менять. Собственная удельная электропроводность чистых нематических жидких кристаллов имеет величину порядка $1 \cdot 10^{-13}$ Ом \cdot см $^{-1}$ [11]. Механизм электропроводности в жидких кристаллах ионный. По своей природе носители заряда могут быть как собственные, так и примесные. Ионы могут образовываться как в результате диссоциации в объеме образца, так и в процессе электрохимических явлений на электродах.

Величину электропроводности в жидких кристаллах можно менять, добавляя токопроводящие добавки. Электропроводность в жидких кристаллах носит анизотропный характер: $\Delta\sigma = \sigma_{||} - \sigma_{\perp}$ (где $\sigma_{||}$ - электропроводность, измеренная вдоль направления длинных осей молекул, а σ_{\perp} - перпендикулярно ему). Анизотропия электропроводности определяется не столько химической структурой жидкокристаллических материалов, сколько анизотропией

подвижности носителей зарядов[5]. Для большинства нематиков $\Delta\sigma > 0$ и не зависит от анизотропии диэлектрической проницаемости. В смектиках $\Delta\sigma < 0$, величина анизотропии существенно больше, чем в нематической фазе. Проводимость жидкокристаллических материалов оказывает существенное влияние на их стабильность и долговечность.

Для различных применений предъявляются разные требования к электрическим свойствам жидкокристаллических материалов. Так например, для твистовых жидкокристаллических дисплеев, на тонкопленочных транзисторах требование обеспечения высокого сопротивления важнее, чем обеспечение большой диэлектрической анизотропии. В то время как для супертвистовых дисплеев на нематических жидких кристаллах и для дисплеев на холестерических жидких кристаллах высокая диэлектрическая анизотропия эффективнее уменьшает управляющее напряжение, чем высокое сопротивление.

1.3 Электрооптические эффекты в жидких кристаллах

1.3.1 Ориентационные (поляризационные) эффекты в нематиках

При приложении электрического поля к слою нематических жидких кристаллов, плотность свободной энергии равна $F = F_d + F_e$, где F_d - плотность свободной энергии, связанной с изгибными деформациями, F_e – плотность свободной энергии нематических жидких кристаллов в электрическом поле [6]. Директор n в электрическом поле переориентируется вследствие наличия вращающего момента, пропорционального диэлектрической анизотропии $\Delta\epsilon$ и вектору поляризации P .

В основе анализа всех ориентационных эффектов служит утверждение: распределение директора n должно соответствовать минимуму свободной энергии при заданных граничных условиях.

Для исследования электрооптических эффектов используются ячейки сэндвич типа (рис.1.9). Плоский капилляр толщиной от 5 до 100мкм образован двумя стеклянными пластинами с прозрачными электродами. Зазор фиксирован с помощью изолирующих прокладок. В данной конструкции свет проходит вдоль направления электрического поля.

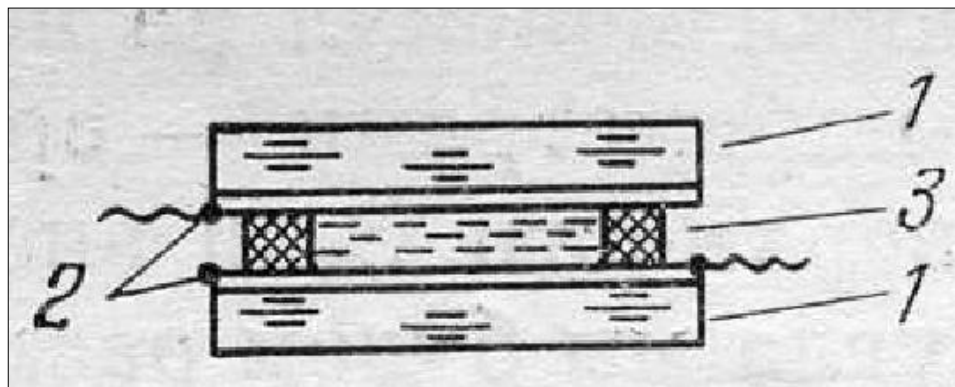


Рис.1.9. Ячейки сэндвич типа: 1 – стеклянные подложки, 2 – прозрачные электроды, 3 – диэлектрические прокладки.

1.3.2 Переход Фредерикса

Если в исходном состоянии направления поля и директора нематических жидких кристаллов не соответствуют условию минимума свободной энергии, то в электрическом поле, способном преодолеть силы упругости, произойдет переориентация, установится его новое стационарное распределение. Первоначальная ориентация директора является гомогенной ($E \perp n$) для S перехода Фредерикса (S-эффект) и гомеотропной ($E \parallel n$) для V-эффекта (рис.1.10а, б). Диэлектрическая анизотропия нематических жидких кристаллов в случае S-эффекта положительная, а для V-эффекта – отрицательная. Распределение директора в слое жидкого кристалла в случае S- и V-эффектов было найдено из условия минимума свободной энергии. Результаты полученного расчета распределения директора по толщине ячейки представлены на рис.10

(справа) [7]. Видим, что при жестком сцеплении нематических жидких кристаллов с подложкой переориентация директора в электрическом поле возможна только при достижении порогового значения напряженности (E_n), который определяется следующим выражением:

$$E_n = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{4\pi K}{\Delta\varepsilon}} \quad (1.3)$$

Формула позволяет рассчитать пороговое поле для S-эффекта при $K = K_{11}$, и пороговое поле для В-эффекта при $K = K_{33}$. При S- и В-деформациях происходит изменение двулучепреломления жидкокристаллического слоя, так как оно однозначно связано с распределением показателя преломления необыкновенного луча $n_e(z)$:

$$n_e = \frac{n_{\perp} n_{\parallel}}{\sqrt{n_{\perp}^2 \cos^2 \theta(z) + n_{\parallel}^2 \sin^2 \theta(z)}} \quad (1.4)$$

где n_{\perp} и n_{\parallel} - главные значения показателей преломления.

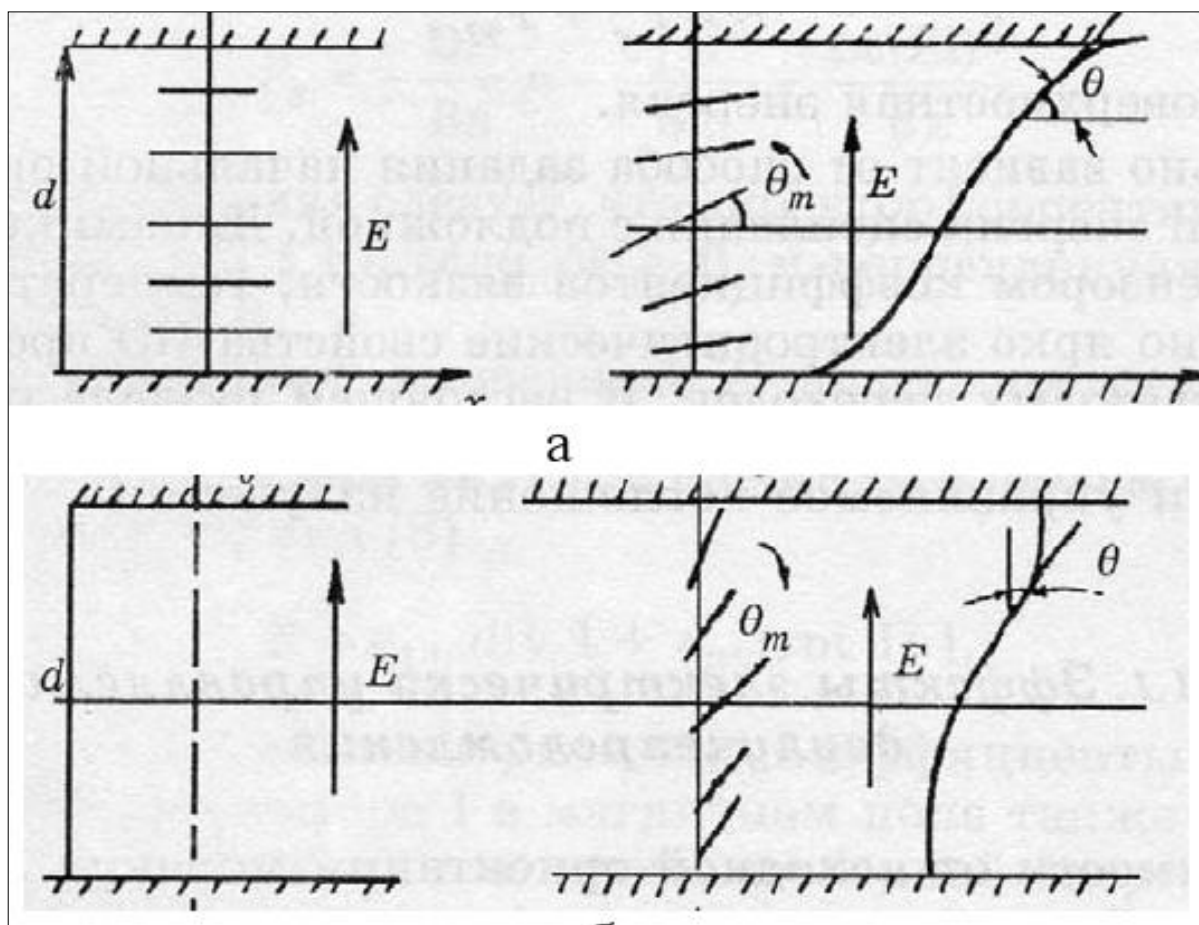


Рис.1.10. Эффекты Фредерикса: а – S-эффект, исходная ориентация планарная, $\Delta\epsilon > 0$; В-эффект, ориентация гомеотропная, $\Delta\epsilon < 0$.

Изменение разности фаз приводит к осциллирующей зависимости оптического пропускания на выходе анализатора (рис.1.11).

Зависимости интенсивности света, прошедшего через ячейку, для S-и В-эффекта отличаются только тем, что в начальном состоянии соответственно $\Delta\Phi = \Delta\Phi_{\max}$ и $\Delta\Phi = 0$, т.е начальное пропускание ячейки с гомеотропной ориентацией минимально в скрещенных поляроидах.

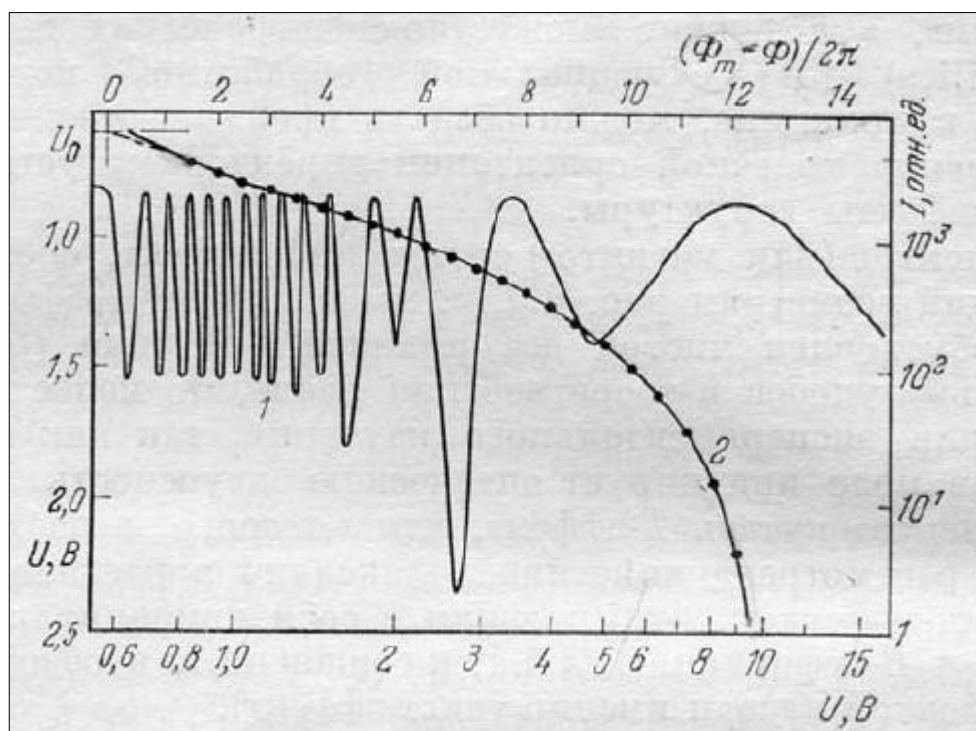


Рис.1.11. Зависимости оптического пропускания от разности фаз. Кривая 1– оптическое пропускание (масштаб справа и снизу), кривая 2– фазовая задержка монохроматического света (масштаб слева и вверху) в случае S-эффекта.

Следовательно, внешнее электрическое поле изменяет направление директора, $\theta = \theta(E, z)$ и, таким образом величины $\Delta n(E, z)$ и $\Delta\Phi(E)$.

1.3.3 Твист-эффект

Если при исходной планарной ориентации молекул направления директора на противоположных подложках перпендикулярны друг другу (рис.1.12) и вещество имеет положительную диэлектрическую анизотропию, то тогда при приложении электрического поля вдоль оси z возникает ориентационный эффект[8]. Ориентационные эффекты представляет комбинацию из S-, В- и Т-деформаций. Этот эффект называется твист-эффектом.

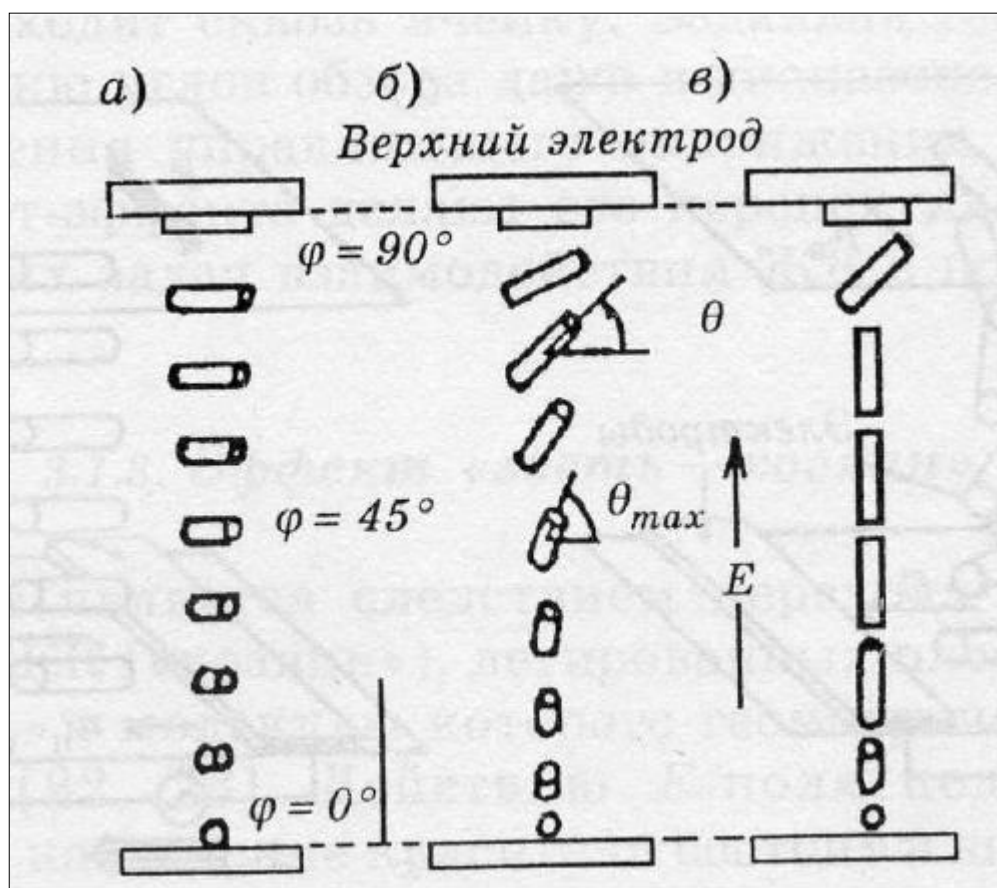


Рис.1.12. Твист-эффект в нематических жидких кристаллов. Молекулярная ориентация: а – в отсутствии поля; б – при $U \geq U_{п}$; в – при $U \gg U_{п}$

Теория отклика твист-ячейки на внешнее электрическое поле строится по той же самой схеме, что и для S-эффекта[9]. Разница заключается только в том, что в случае твист-эффекта деформация является двумерной. От координаты z зависит не только угол наклона молекул $\theta(z)$, но и их азимут $\varphi(z)$.

С повышением напряжения угол наклона $\theta(z)$ увеличивается, как и при переходе Фредерикса из планарной ориентации. При достаточно большом

напряжении молекулы в центральной части ячейки практически перпендикулярны электродам [11]. В результате при достаточно высоком поле твист-структура вообще перестает поворачивать плоскость поляризации света. В этом случае жидкокристаллическая ячейка в параллельных электродах оказывается прозрачной.

1.4 Бистабильные жидкокристаллические дисплеи

В бистабильных жидкокристаллических дисплеях изображение однократно записанное может длительное время сохраняться, не требуя регенерации либо подачи каких-либо сигнала для поддержания записанной информации.

Наличие физической «памяти» обеспечивает увеличения коэффициента мультиплексирования строк. Таким образом, обеспечивая возможность реализации дисплеев с высокой разрешающей способностью, и при этом без потери контраста изображения. Технологии с пассивной адресацией, которые используют в моностабильных жидкокристаллических ячейках (STN , FSTN ,TN), требуют регенерации, и с увеличением числа строк их контраст падает. Последовательная развертка строк дисплея производится для всех технологий. Регенерация сопровождается кросс-эффектом[10]. Например, для технологии STN требуются дополнительные оптические слои, которые необходимы для компенсации цветовых искажений. Цветовые искажения характерны для данного типа жидкокристаллической ячейки.

Технология ViNem позволяет достичь наиболее лучших параметров при одинаковых затратах. Например, для промышленного выпуска

жидкокристаллических дисплеев по данной технологии можно использовать такое же оборудование и базовые технологии, что и для обычных жидкокристаллических дисплеев с пассивной адресацией.

Холестерические жидкокристаллические дисплеи обеспечивают хорошо воспроизводимый эффект бистабильности, однако в процессе записи изображения необходимо довольно высокое напряжение (от 30 до 60В), неудовлетворительные оптические качества, которые возникают при воспроизведении цветных изображений, а также ограниченный контраст изображения.

Следует также отметить, что характерной чертой для бистабильных дисплеев является необходимость получения равномерных малых зазоров, которые расположены по всей площади экрана. При реализации малых зазоров возникает дефект, связанный с короткими замыканиями между электродами нижней и верхней подложек дисплея.

Малый зазор в этом случае необходим для реализации определенных физических свойств молекул жк материала. Чем меньше зазор, тем меньше шаг спирали молекул жидкого кристалла, и следовательно размеры зазора становятся сравнимы с размерами спирали жидкокристаллических молекул. При малых размерах зазора, поведение молекул нематического материала несколько отличается от поведения молекул в стандартной ячейке (зазор 20–25 мкм). Следующая характерная особенность ViNem технологии является использование ориентирующих покрытий, которые обеспечивают слабое сцепление спирали молекул жидкокристаллического материала.

Молекулы жидкокристаллического материала в технологии Neomatic образуют спиральные структуры. При воздействии электрического поля молекулы, которые образуют пружину, разворачиваются и становятся вдоль поля, пружина в данном случае разрушается, и вырождается в диполь. После выключения электрического поля, молекулы под воздействием внутренних сил опять стремятся перейти в состояние пружины. Такой динамический процесс

проходит вместе с процессом взаимодействия концов, формируемых пружин с силами, возникающими на границе с ориентирующим покрытием. Различие этих сил для верхней и нижней частей подложки дает возможность для воспроизведения эффекта бистабильности [12]. При некоторых условиях концы пружин, образованных жидкокристаллическими молекулами, ориентированы на обеих подложках в соответствии с векторами, которые заданы ориентирующим покрытием. В качестве ориентирующих покрытий используют пленки двуокиси кремния. Свойства, ориентирующие в пленки оксида кремния получены за счет специальной стехиометрии её структуры.

В технологии ViNem адресации используется последовательная схема выборки строка за строкой. Для записи информации с помощью строчных электродов используют импульсы напряжения длительностью 2 мс и амплитудой 16 В, а для столбцовых электродов используют импульсы отрицательной или положительной полярности с амплитудой около 2 В. Практически будучи однажды записанной структура изображения может оставаться стабильной в течение месяцев в отсутствие электрического поля.

1.5 Анодное окисление кремния

Анодное окисление кремния является основной электродной реакцией, происходящей на поверхности исходной пластины, при воздействии на нее электрического тока и электролита. Метод анодного окисления включает две модификации. Первая модификация это окисление поверхности кремния в жидком электролите и окисление в газовой плазме. В этом случае процесс называют электролитическим анодированием. Во втором случае процесс называется газовым анодированием.

Процесс электролитического анодирования происходит при о условии когда поверхность кремниевых пластин покрыта тонкой пленкой оксида, толщиной около 3 нм. Эта оксидная пленка разделяет вещества участвующие в реакции анодного окисления. Скорость роста пленок оксида кремния на кремнии в жидком электролите, зависит от электростатического поля в слое оксида, который стимулирует миграцию ионов. Считается, что подвижным компонентом в данном случае является ион кремния. Поэтому процесс выращивания анодных оксидных пленок может быть описан как процесс переноса[7]. Например, ионов кремния через границу раздела оксид — кремний и через оксид к границе раздела оксид — электролит, где и происходит реакция окисления.

Присутствие ионов в электролите у границы с оксидом заметно влияет на скорость окисления. Также влияет на предельную толщину оксидной пленки. Толщина пленки, при анодном окислении, определяется значениями напряжения пробоя и ионного тока. Регулирование значения общего тока в процессе анодного окисления может осуществляться тремя способами, такими, как например, при постоянном токе, при постоянном напряжении и при комбинации этих величин.

Процесс окисление при постоянном токе. Для поддержания постоянного ионного тока через оксид нужно, чтобы с увеличением толщины оксидной пленки возрастало падение напряжения в данной пленке. Поэтому, анодирование при постоянном токе так же можно характеризовать как скорость роста напряжения в оксиде. Скорость изменения напряжения примерно пропорциональна току, следовательно, чем выше плотность ионного тока, тем быстрее повышается напряжение и следовательно быстрее растет оксид. При этом значение коэффициента полезного выхода ионного тока составляет около 1 %, от выхода электролитических реакций. Анодное окисление при постоянном токе может продолжаться до тех пор, пока напряжение не достигнет определенных значений. Это значение зависит от типа электролита и конструкции установки, после чего происходит пробой оксидной пленки.

В случае окисления при постоянном напряжении между катодом и анодом первоначальный ток, определяется сопротивлением электролита, толщиной первоначального слоя оксида на кремниевой пластине, а так же поляризацией, которая связанной с образованием «двойного слоя» в электролите. По мере роста оксида, электрическое поле в нем уменьшается это приводит к уменьшению тока, проходящего через оксид, следовательно рост оксида замедляется. Большую роль в получении воспроизводимых результатов анодного окисления играет выбор электролита и процентное содержание в нем влаги. В процессе могут быть использованы самые различные электролиты, например на основе борной, азотной или фосфорной кислот с добавками нитрата натрия, нитрата калия и др.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Экспериментальная ячейка.

В ходе выполнения диссертационной работы была собрана экспериментальная ячейка, которая имела вид классической МДП структуры. В таких экспериментальных ячейках в серии опытов, мы исследовали эффект «памяти». Ячейка состоит из подложки, образца кремния р-типа проводимости с удельным сопротивлением около $4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, нематического жидкого кристалла 5СВ. Толщина жидкокристаллического слоя поддерживалась фторопластовыми пленками. В экспериментах использовались пленки толщиной от 5, 10 мкм до 20 мкм. В конструкцию ячейки входил прозрачный электрод, который выполнен в виде тонкой пленки окиси индия (ITO) на поверхности стекла. На стекло с проводящим слоем нанесена полиимидная пленка. Пленка обеспечивает планарную ориентацию молекул в слое жидкого кристалла. Полярность

напряжения в данной работе рассматривается относительно подложки с кремнием.

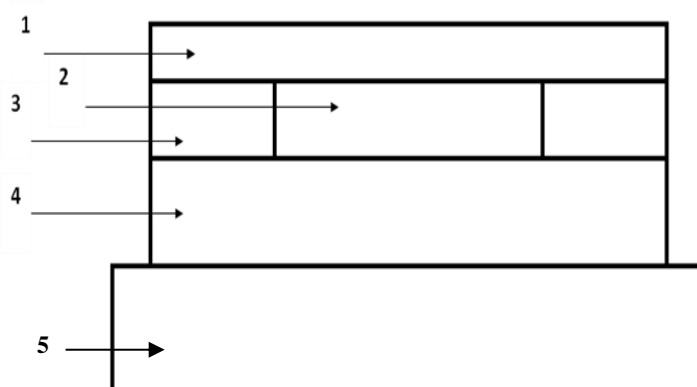


Рис. 2.1. Вид экспериментальной ячейки: 1- стекло с проводящим слоем, покрытое полиимидной пленкой, 2-жидкий кристалл, 3- фторопластовая пленка, задающая толщину жидкокристаллического слоя, 4- кремний р- типа проводимости, 5- подложка.

Начальная ориентация молекул жидкого кристалла – планарная, на поверхности стекла. На поверхности кремния ориентация жк специально не задаётся. Исходная ориентация молекул жидкого кристалла анализируется поворотом ячейки относительно скрещенных поляризаторов. В случае, когда ось ориентирования жидкого кристалла расположена под углом 45 градусов к скрещенным поляроидам, в поляризационном микроскопе видим светлое поле. В случае, наблюдения темного поля ось ориентации жк в жидкокристаллической ячейки и плоскость поляризации поляризаторов расположены параллельно.

Смена поля зрения микроскопа со светлого к темному, и с темного на светлое происходит четыре раза при повороте на 360 град. через каждые 90

градусов. Данный факт подтверждает, что преобладающая в объеме жк слоя ориентация планарная (почти планарная).

В процессе эксперимента поверхность кремния предварительно очищали следующим способом: сначала протравливали поверхность кремния плавиковой кислотой, затем промывали поверхность кремния дистиллированной водой и просушивали потоком нагретого воздуха. Стекло с полиимидной пленкой очищали с помощью изопропилового спирта. После чего собиралась экспериментальная ячейка. Жидкий кристалл заправляли с одной стороны ячейки.

Наблюдали за изменениями ориентации в поляризационный микроскоп. Было замечено, что при введении жидкого кристалла в пустую ячейку, сразу же после травления кремния, наблюдаются формирование участков с другой ориентацией и с повышенным пороговым напряжением эффекта Фредерикса. Такие участки другой ориентации возникают только на свежетравленной поверхности кремния там, где жидкий кристалл впервые мгновения взаимодействует с поверхностью кремния. Если очищенный, протравленный плавиковой кислотой кремний оставить на воздухе длительное время (более нескольких часов), то участки с повышенным пороговым напряжением эффекта Фредерикса не формируются.

Проводились эксперименты с травлением участка поверхности кремния расположенного далеко от точки введения жк в ячейку. После сборки экспериментальной ячейки с таким образом травленным образцом кремния, провели серию опытов. В ходе работы наблюдали за поверхностью жидкокристаллического слоя в экспериментальной ячейке. Было установлено, что в таких случаях участки с повышенным пороговым напряжением эффекта Фредерикса не наблюдаются.

2.2 Экспериментальная установка

Для проведения экспериментов нам понадобилось оборудование: генератор переменного напряжения, поляризационный микроскоп, вольтметр, нематическая ячейка МДП конструкции, компьютер, аппаратура для съемки изображений поверхности исследуемых образцов.

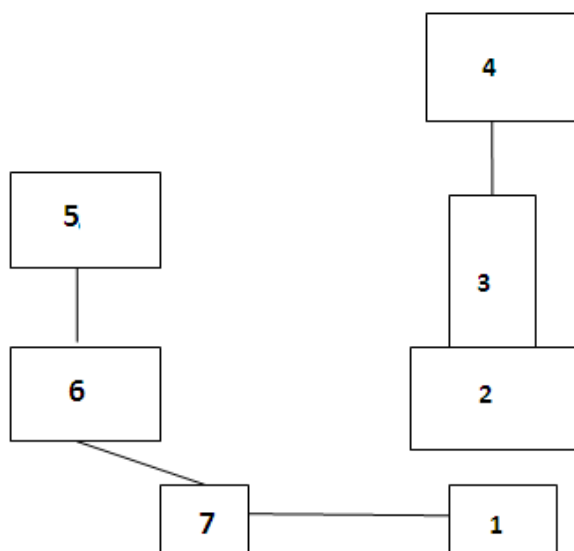


Рис.2.2. Схематическое изображение экспериментальной установки:

1-экспериментальная ячейка, 2-поляризационный микроскоп, 3-фотокамера цифровая, 4-компьютер, 5-вольтметр, 6-генератор переменного напряжения, 7-ключ.

Поляризационный микроскоп – использовался в ходе экспериментов для контроля ориентации и для наблюдения за исследуемой областью экспериментального образца. Вольтметр– используется для контроля показаний напряжений в цепи. Генератор переменного напряжения– использовался для подачи напряжения с постоянным смещением, полярность которого отсчитывалась относительно кремниевой подложки в ЖК ячейке. Ключ– используется для подачи напряжения в цепь, при этом также позволяет переключаться с постоянного на переменное напряжение, путем переключения полярности. С помощью установленных программ на

компьютере мы наблюдали за изменениями, происходящими в экспериментально наблюдаемой области. Проводили фотосъемку исследуемых участков экспериментальной ячейки.

2.3 Ход эксперимента

В процессе выполнения диссертационной работы были поставлены эксперименты на собранных жидкокристаллических ячейках. Эксперименты, в ходе которых был исследован эффект «памяти», заключается в следующем. На экспериментальную ячейку подавали напряжение соответствующей полярности. За изменениями, происходящими в МДП структуре, наблюдали в поляризационный микроскоп. В ходе опытов заметили изменения ориентации, происходящие в жидкокристаллическом слое. Наблюдая за участками с измененной ориентацией, установили, что такие участки возникают после действия напряжения и сохраняют измененную ориентацию длительное время.

В экспериментах жидкокристаллическую ячейку располагали двумя способами. В первом случае ось ориентирования жидкого кристалла расположена под углом 45 градусов, между скрещенными поляроидами поляризатора. В этом случае в поляризационном микроскопе наблюдалось светлое поле. Темное поле видим, когда ось ориентации нематика в ячейке и плоскость поляризации поляризаторов расположены параллельно друг другу.

В ходе работы был использован жидкий кристалл типа 5СВ. Жидкий кристалл типа 5СВ имеет следующие свойства: анизотропия диэлектрической проницаемости > 0 , молекулы этого типа жк ориентируются вдоль вектора

напряженности электрического поля, обладают дипольным моментом. В процессе проводимых экспериментов изменяли толщину жидкокристаллического слоя. Для этой цели использовали фторопластовые пленки различной толщины от 5-20 мкм.

2.4 Визуализация слабоконтрастных участков ориентации директора

В ходе выполнения работы был разработан способ визуализации слабоконтрастных участков ориентацией директора на кремниевой подложке.

Принцип способа состоит в том, чтобы расположить ячейку таким образом, чтобы плоскости поляризации поляризаторов, были параллельны ориентации директора верхнего слоя жк на прозрачной подложке. Так как на стекло нанесена полиимидная пленка, которая обеспечивает жесткое сцепление молекул жидкого кристалла, то практически для всего объема жк, ориентация директора будет планарной. Исключение составляет тонкий слой, прилежащий к поверхности кремния. В этом слое директор может иметь слегка различное направление на некоторых соседних участках. Таким образом, мы исключаем двулучепреломление практически всего слоя жк, а те молекулы, которые расположены под некоторым углом относительно друг друга в плоскости, у кремниевой подложки, дают различающееся друг от друга двулучепреломление, которое фиксируется в поляризационный микроскоп.

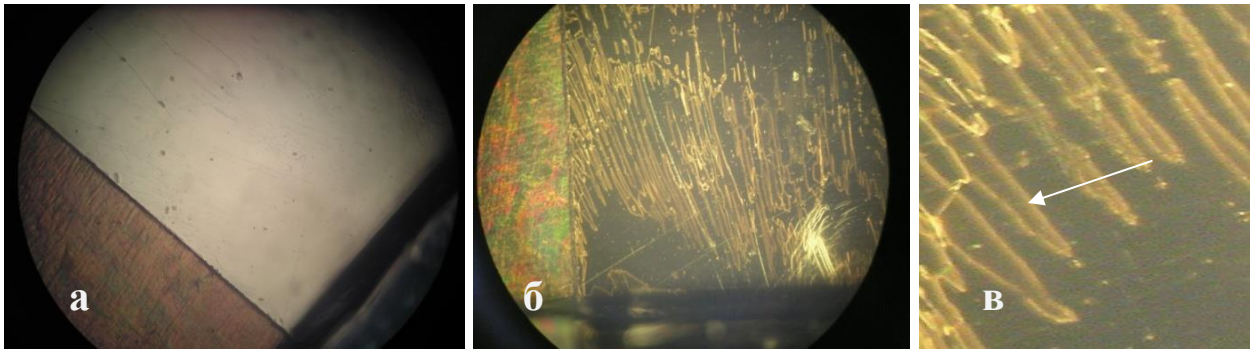


Рис.2.3. Слабоконтрастные участки ориентации: а- светлое поле; б- темное поле; в- слабоконтрастные фрагменты в ориентации директора.

В качестве подтверждения разработанного способа визуализации сделали серию снимков. На приведенных фотографиях представлена область ячейки, на которой наблюдались слабоконтрастные участки для представленного выше метода, на рисунке 2.3 а не наблюдаются слабоконтрастные участки ориентации директора на кремниевой подложке. На рисунке 2.3 б, в, видим слабоконтрастные участки ориентации директора на кремниевой подложке.

На рисунке 2.4 представлен схематический вид ориентации директора на кремниевой подложке, представляющий собой пример соседних участков ориентации директора дающих слабоконтрастное изображение.

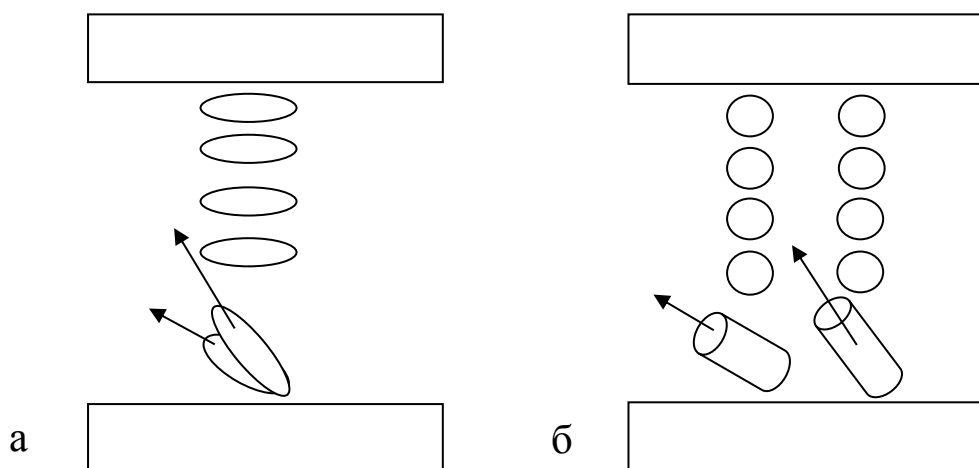


Рис. 2.4. Схематический вид ориентации молекул ЖК: а- вид с боку, б- вид с фронта.

Из представленного рисунка видно, что мы исключаем двулучепреломление верхнего слоя жк, где молекулы ориентированы однородно,

а те молекулы, которые расположены у поверхности кремния под некоторым углом друг от друга в плоскости, дают различающееся друг от друга двулучепреломление, которое мы фиксируем в поляризационный микроскоп.

2.5 Ориентация ЖК с повышенным порогом эффекта Фредерикса.

В процессе сборки экспериментальной ячейки по схеме 2.1 производился запуск жидкого кристалла с одной стороны ячейки. На входе образовалось много участков ЖК слоя, форма которых повторяет (декорирует) процесс затекания жидкого кристалла в ячейку. При взаимодействии жидкого кристалла с поверхностью кремния формируются отдельные участки (назовем условно-планарные), на которых наблюдается повышенный порог эффекта Фредерикса.

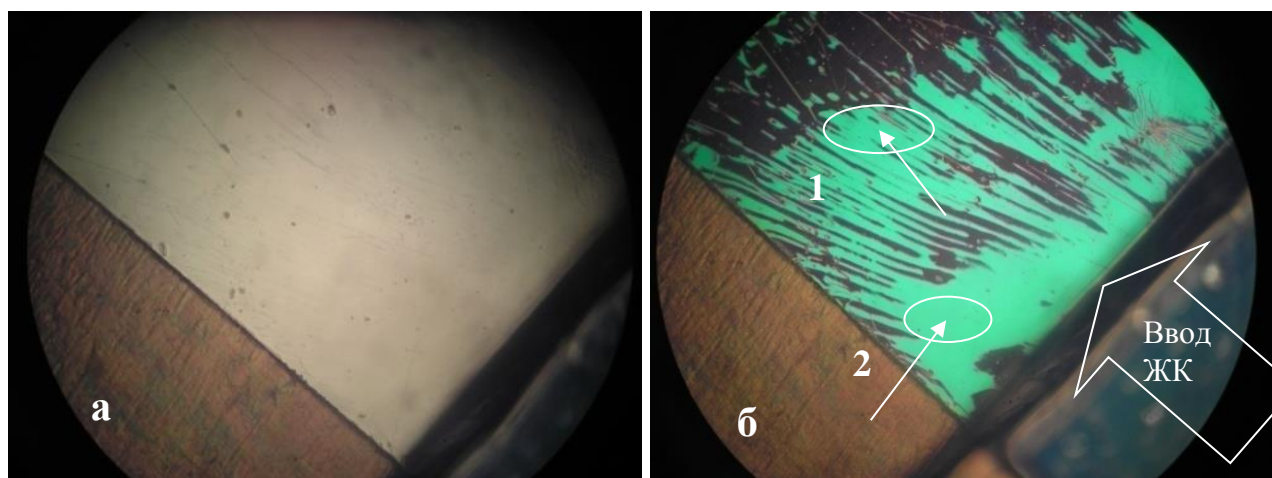


Рис 2.5. Участки измененной ориентации нематика: а- $U=0$, б- $U=2,5$ В

На рисунке 2.5 б) представлена фотография участка жк ячейки, на которой образовались участки с другой «планарной» ориентацией в окрестности впуска жидкого кристалла в ячейку. В области указанной стрелкой 1 ориентация жк перешла в гомеотропное состояние при меньшем напряжении, чем над участком обозначенным стрелкой 2. Разница в значениях напряжений, при которых имеет место эффект Фредерикса, над этими участками соответствует 2.5 и 3.2 вольта.

Участки с повышенным пороговым напряжением эффекта Фредерикса возникают только на свежетравленной поверхности кремния там, где жидкий кристалл при впуске в пустую ячейку, впервые мгновения взаимодействует с поверхностью кремния. Мы полагаем, что повышение порога связано с тем, что ориентация в этих местах планарная и это вызывает повышение порога эффекта Фредерикса по сравнению с другими участками ячейки, где директор имеет повышенный угол преднаклона у поверхности кремния.

Использование другого типа жк материала - МББА не демонстрирует такого эффекта появления новой ориентации в окрестности ввода жк материала в ячейку.

2.6 Эффект «памяти»

В процессе проводимых экспериментов исследовали переориентацию молекул жк, которые проявлялись при некоторых условиях. Первоначально рассмотрим процессы переориентации без режима памяти. Для этого провели серию экспериментов, исследовали процесс переориентации жк слоя в ячейке. Толщина жк слоя в данных экспериментах составляет 20 мкм. На рисунке 2.6 а, представленном ниже, видим фотографию области экспериментальной ячейки без режима «памяти». На рисунке 2.6 б представлена область в момент подачи тестирующего напряжения $U=4В$. Видим изменения ориентации жк слоя, включая участки планарной ориентации (отмечено стрелкой Р), но после выключения напряжения, жк возвращается в исходное состояние ориентации, т.е. эффекта «памяти» не наблюдается.

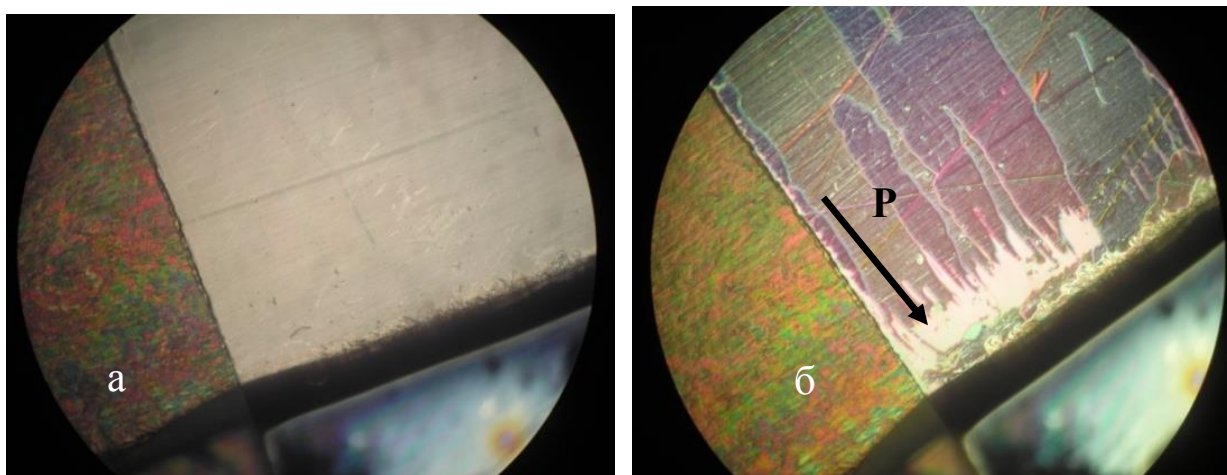


Рис.2.6. Экспериментальная область ячейки: а) $U=0$, б) $U=4V$, 100 кГц.

Провели дальнейшие эксперименты для наблюдения эффекта «памяти» с подачей на ячейку переменного напряжения с постоянным смещением $-U$. Переориентация молекул жк, которую можно отнести к эффекту «памяти», происходила при подаче напряжения с постоянным смещением $-U$. Изменения в жк слое в ячейке, в этом случае, сохранялись длительное время после выключения «записывающего» напряжения. Отметим, что в качестве записывающего напряжения может выступать только постоянное смещение без действия переменного. В ходе опытов установлено, что в экспериментальной ячейке на поверхности кремния в области, охваченной «памятью» достигнута хорошая гомеотропная ориентация молекул жк.

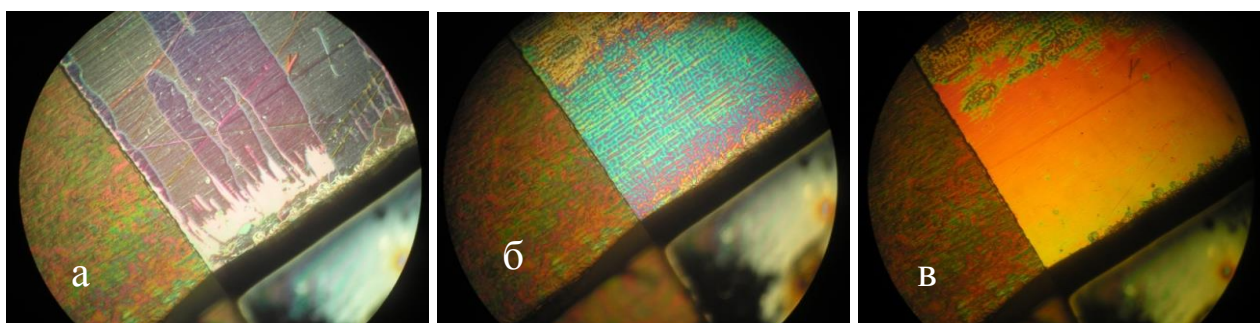


Рис.2.7. Исследуемая область жк ячейки: а- тестирование исходной ориентации жк слоя, б- запись памяти (тестирующее напряжение + смещение $-3 V$, в- Тестирование (без смещения)

На представленных выше фотографиях рисунка 2.7а видим измененную ориентацию жк слоя под действием тестирующего напряжения. На рисунке 2.7б

замечаем процессы доменнообразования, происходящие на поверхности жк ячейки при подаче напряжения со смещением. На рисунке 2.7в видим, режим памяти, при котором имеет место долговременное изменение ориентации.

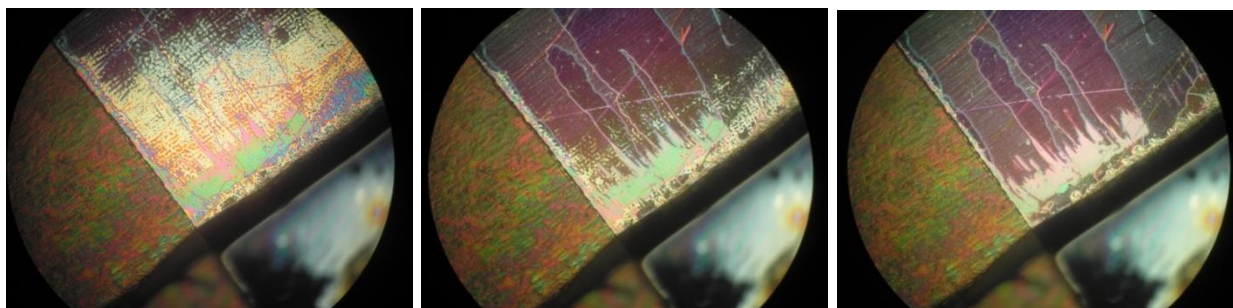


Рис.2.8. Процесс релаксации жк слоя экспериментальной ячейки. Тестирующее напряжение $U=4$ В, частота 100 кГц.

На рисунке 2.8 представлен процесс релаксации жидкокристаллического слоя ячейки в исходное состояние ориентации. Контроль изменения ориентации осуществлялся кратковременным включением тестирующего напряжения $U=4.1$ В, частота 100 кГц.

В ходе опытов провели исследования зависимости времени эффекта «памяти» от величины прикладываемого напряжения с значением смещения $-U$ относительно кремния. Полученные данные использовали для построения графика, представленного на рисунке 2.9.

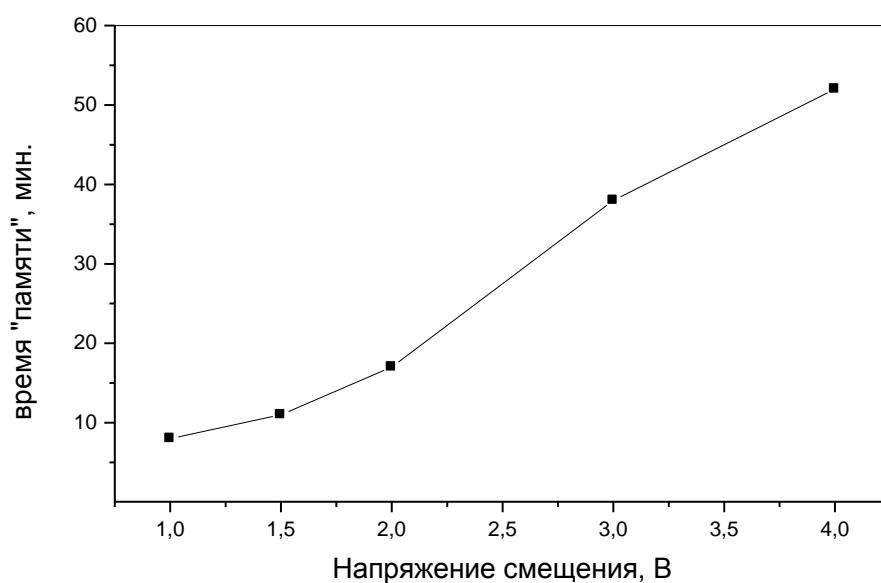


Рис.2.9. Зависимость времени эффекта «памяти» от напряжения смещения, время записи (для каждого значения напряжения) 1 минута. Тестирующее напряжение 100 кГц, 4,2 В.

Хорошо видно, что с увеличением смещения, время нахождения ячейки в эффекте «памяти» возрастает. Данный факт позволяет использовать эффект «памяти» в системах хранения, обработки оптической информации. С другой стороны времена релаксации, насчитывающие десятки минут на много порядков больше релаксации объёмных зарядов в жк слое. Поэтому мы считаем, что эффект памяти связан с электрохимической обратимой модификацией поверхности кремния на молекулярном уровне.

2.7 Механизм эффекта «памяти»

В ходе проведенных экспериментов установили, что переменное напряжение со смещением $+U$ не вызывает изменения ориентации молекул ЖК, т.е. осуществить режим памяти не возможно.

В случае, когда жк слой уже находится в состоянии памяти, такое напряжение со смещением $+U$ стабилизирует «память», что также может быть использовано при обработке, хранении оптической информации.

Эксперименты в ходе которых был установлен эффект блокирования релаксации «памяти» при действии напряжения со смещением $+U$ заключаются в следующем. Наблюдали за тем, как ориентация жк на исследуемой области возвращается в исходное состояние. Для этого в первую очередь ввели ячейку записывающим напряжением в состояние «памяти». Выключили напряжение и

через некоторое время тестировали состояние ориентации кратковременной подачей напряжения.

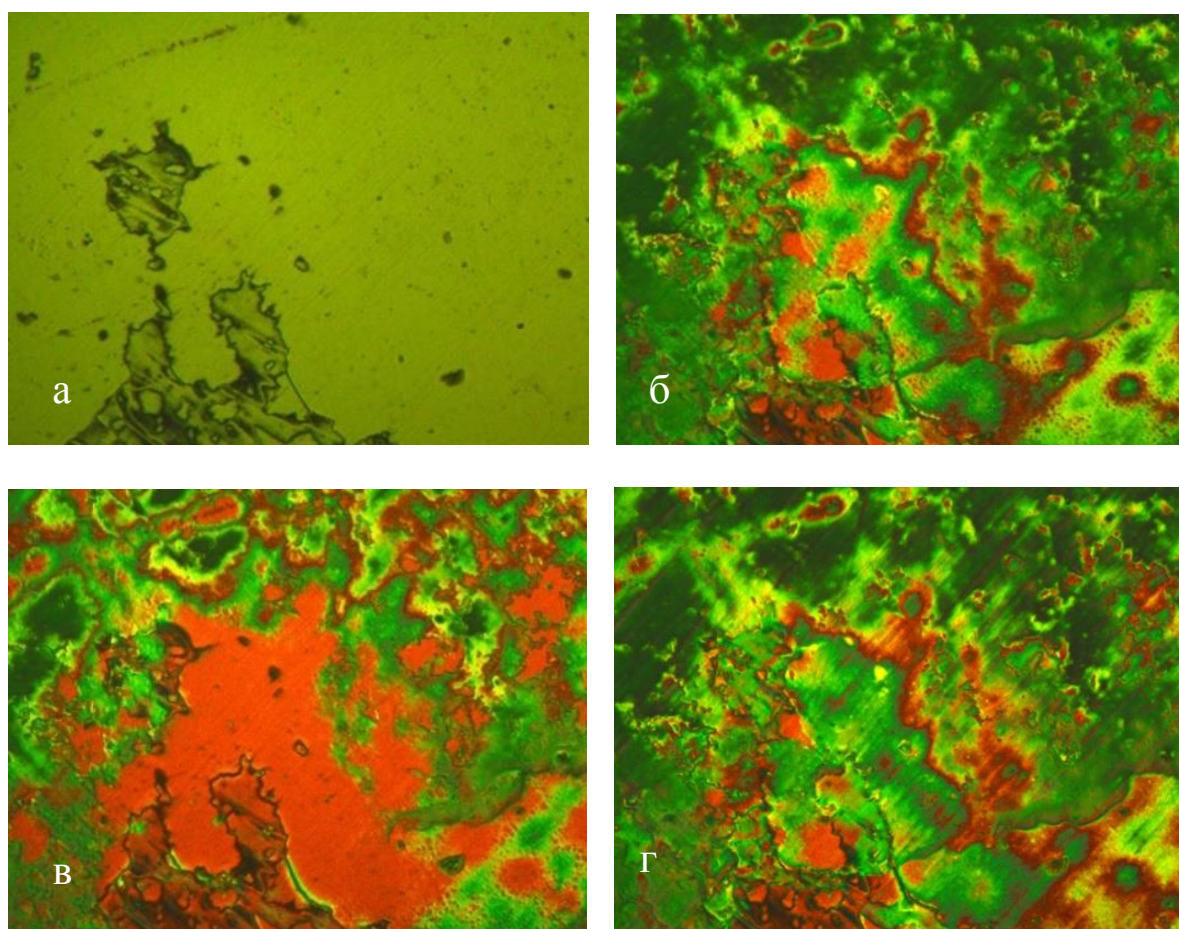


Рис 2.10. Исследуемая область жк ячейки: а) Исходная $U=0$, б) $U=4.3$ в, 100 кГц, смещение -0.5 в, время действия напряжения 2минуты, в) время действия 5 минут, г) через 8 минут с момента выключения записывающего напряжения

На рисунке 2.10 представлены изображения участков поверхности исследуемой области. Видно, что через 8 минут релаксации состояние ориентации соответствует тому, что было через 2 минута после начала действия записывающего напряжения.

Далее провели серию следующих опытов. Для этого снова подавали некоторое время записывающее напряжение со смещением -0.5 В, введя тем самым ячейку с состоянием «памяти». Затем подавали смещение $+0.5$ В в течение длительного периода времени. Наблюдали за релаксационными процессами в поляризационный микроскоп.

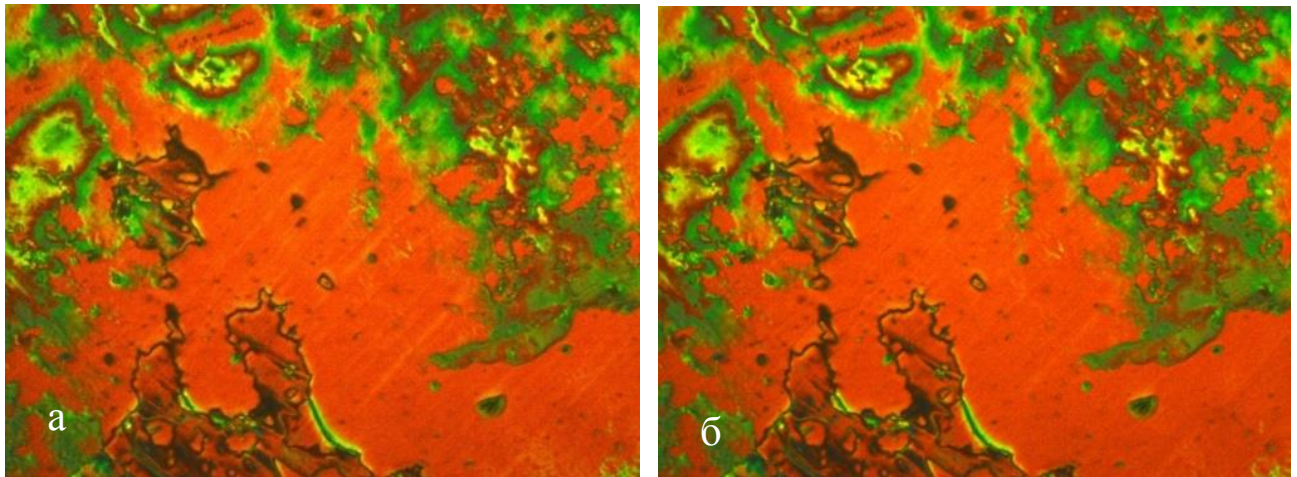


Рис. 2.11. Область с измененной ориентацией: а- измененная ориентация жк слоя, б- ориентация после действия +0.5 в в течение 15 минут

Видим из рисунка 2.11, что изменения ориентации жк не происходит с течением времени, как бы ориентация застabilizировалась.

2.8. Влияние примесей на эффект «памяти»

Провели серию опытов на собранной экспериментальной ячейке - МДП структуре. Схематический вид ячейки представлен на рисунке 2.1. Исследовали изменения, происходящие на поверхности в жк ячейке при подаче записывающего напряжения. При тестировании кратковременными включениями напряжения (без смещения) заметили, что область с измененной ориентацией, где имеет место эффект «памяти», с течением времени увеличивается от границы заливки жк в ячейку.

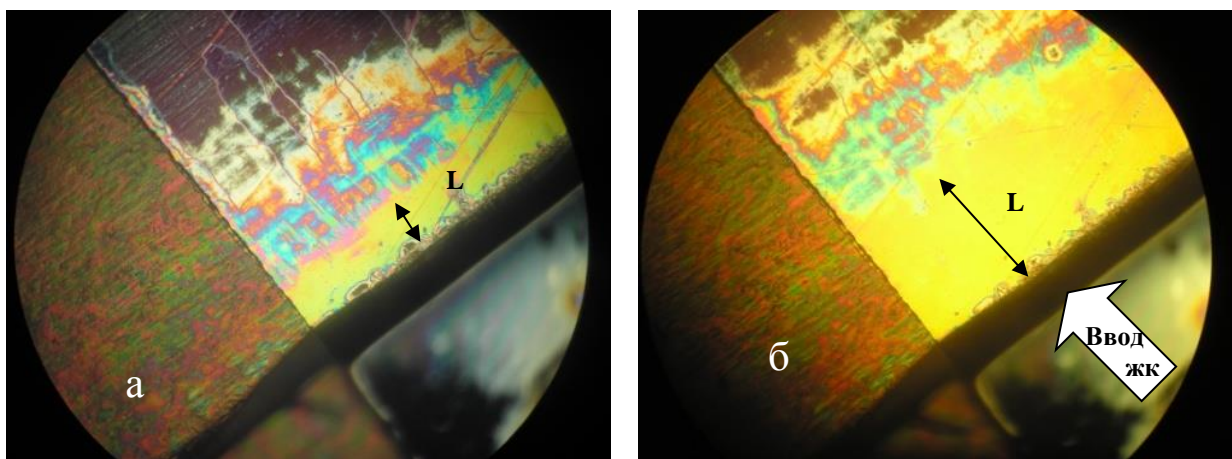


Рис. 2.12. Изменение ориентации жк слоя (область «памяти»): а- изменения ориентации в первые минуты подачи напряжения смещения $-1В$, б- спустя 5 минут с момента подачи напряжения.

На рисунке 2.12 представлена экспериментальная область жк ячейки, видим, что движение области с измененной ориентацией жк, где имеет место эффект памяти, начинается с места ввода жк в ячейку. Это может интерпретироваться следующим образом. В жк материале всегда присутствуют примеси, загрязнения. Поэтому, при вводе жк материала в пустую ячейку, возле входа будет иметь место адсорбция этих примесей, убывающая по мере удаления от границы ввода.

В результате проведенных опытов установили зависимость размера области с измененной ориентацией от времени.

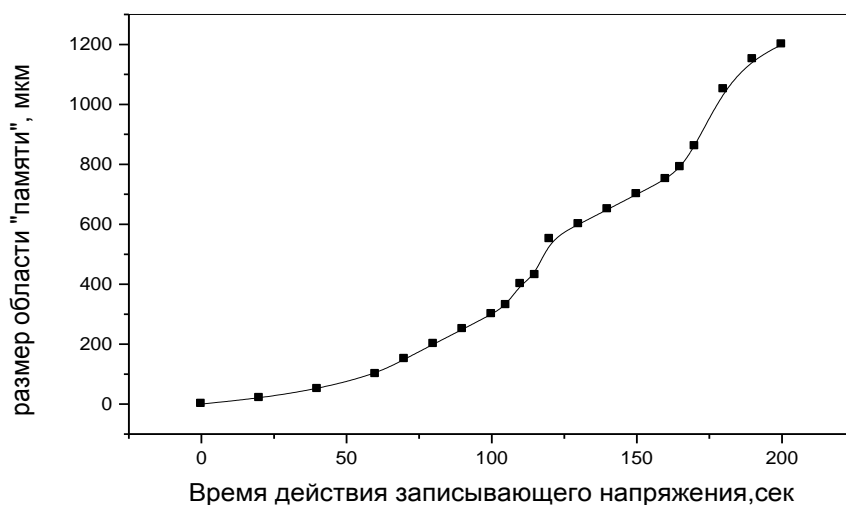


Рис.2.13. Зависимость размера области с измененной ориентацией («память») от времени действия записывающего напряжения (-1В).

На рисунке 2.13 представлен график зависимости размера области с измененной ориентацией от времени. Видно, что размеры увеличиваются со временем и начало соответствует области ввода жк в ячейку.

2.9 Локальное загрязнение в эффекте «памяти»

Так как жк содержит примеси «собственного» происхождения, то, когда вводим жк в ячейку, примеси начинают активно взаимодействовать с поверхностью подложки. Чем ближе наблюдаемая область к месту входа, тем «грязнее» жидкий кристалл.

В данной серии опытов наблюдали за влиянием загрязнения (примесей) не связанных с самим жк материалом на эффект «памяти». Так как жк дойдя до центральных областей ячейки, более менее очищается, за счет адсорбции примесей (считаем становится «чистым»), то мы вносим загрязнения в центральной области ячейки следующим образом.

Загрязнённые области были получены каплями воды, которые при высыхании стягивали всё загрязнение в локальные области. Следовательно, когда мы запускаем жк в ячейку с такой подложкой, то жк до загрязненной области доходит «чистым» и далее от наших локальных областей загрязняется (аналог запуска жк через край ячейки). Далее наблюдали в поляризационный микроскоп за изменениями, происходящими на поверхности подложки.

Заметили, что в областях загрязнений наблюдается переход в режим «памяти» при действии записывающего напряжения (по аналогии с участками впуска жк в ячейку). Ниже на рисунке 2.14 представлена исследуемая область

локального загрязнения. Видно, что с течением времени размер области с эффектом «памяти» увеличивается.

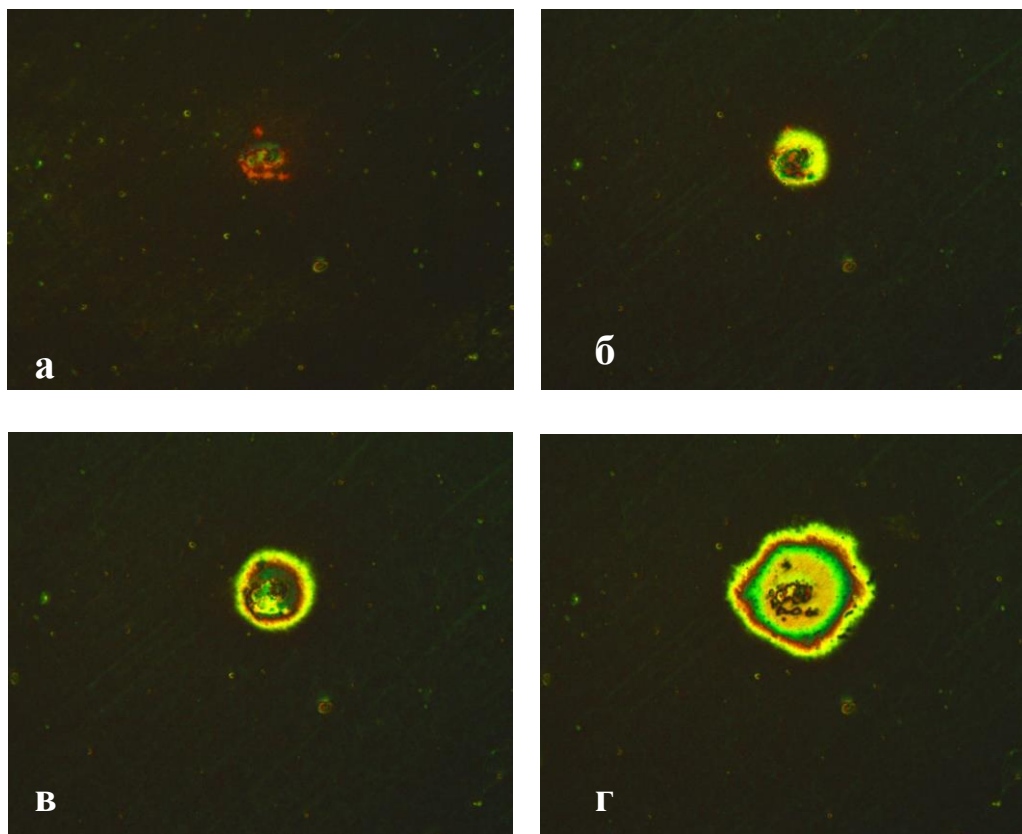


Рис.2.14. Эффект «памяти» в окрестности локального загрязнения:

а- вид области в первую минуту подачи напряжения, б- через 5 минут, в- через 8 минут, г- через 12 минут. Напряжение 4 В, смещение – 0.5 В, частота 100 кГц.

Ниже на рисунке 2.15 представлен график зависимости размера области с эффектом «памяти» от времени действия напряжения.

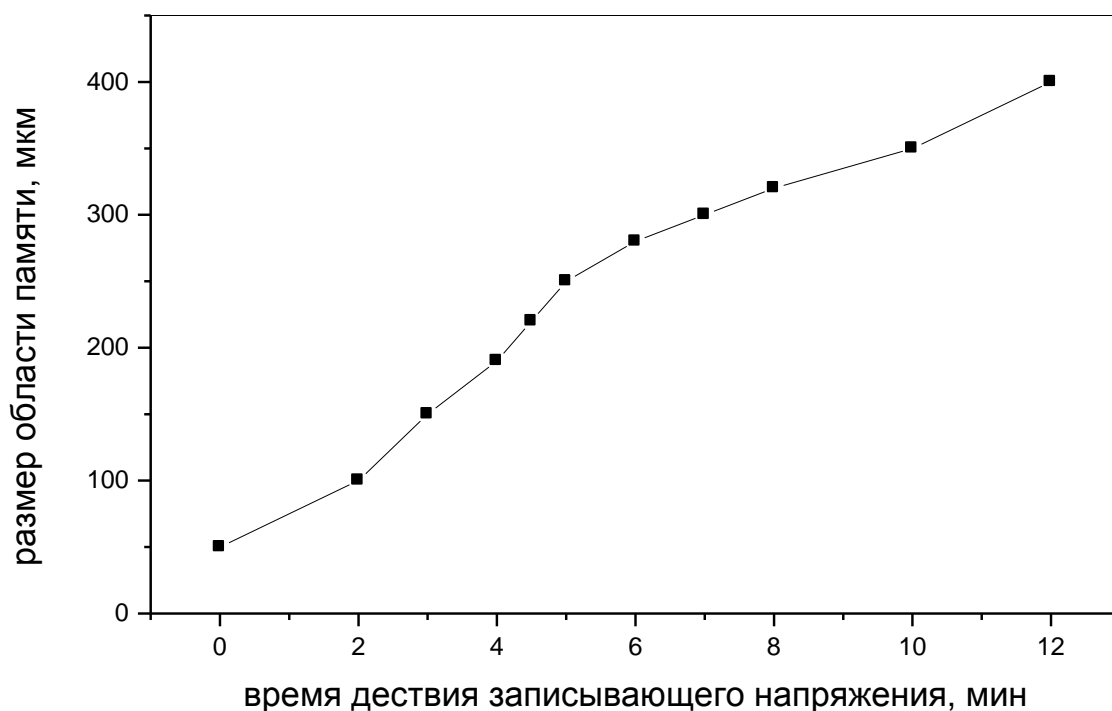


Рис.2.15. Зависимость размера области эффекта «памяти» в окрестности локального загрязнения от времени действия записывающего напряжения.

Следующая серия опытов была проведена без поля. Видим, что в области «памяти» имеется слабозаметная, по сравнению с исходной ориентацией (с соседними областями), интерференция. Это означает, что молекулы в области «памяти» на подложке перешли в гомеотропное состояние. На рисунке 2.16 стрелкой указана область с гомеотропной ориентацией нематика.

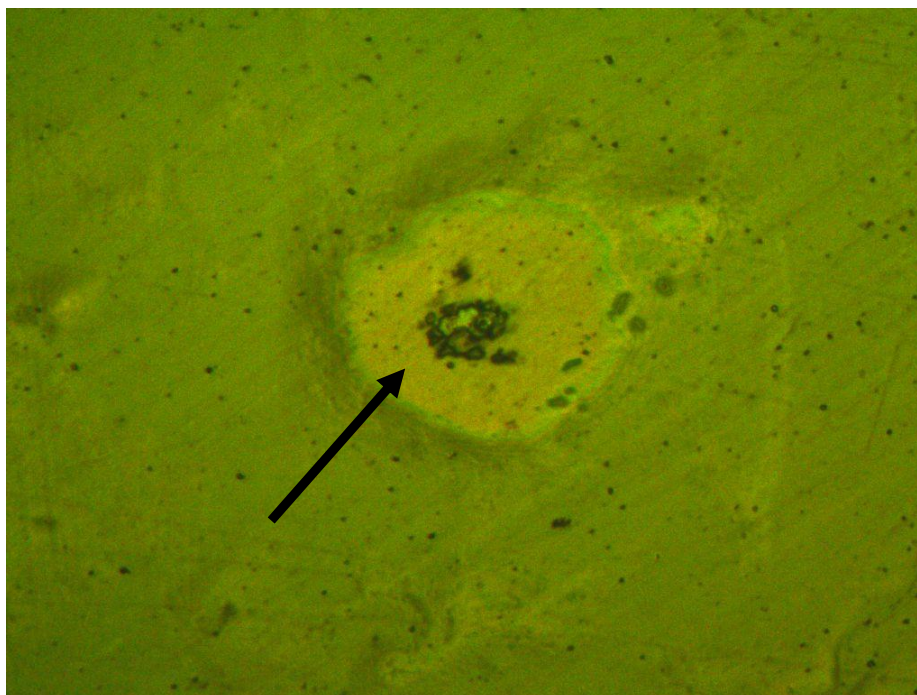


Рис.2.16. Гомеотропная ориентация нематика соответствующая «памяти» в окрестности загрязнения на поверхности кремния.

Наблюдали так же и за другими областями загрязнений на поверхности подложки. Исследования проводились после достижения определённых размеров областей «памяти» с переводом в режим блокирования релаксации, который обеспечивался смещением $+U$. Ниже представлен график зависимости среднего диаметра области с эффектом «памяти» от среднего диаметра области загрязнения.

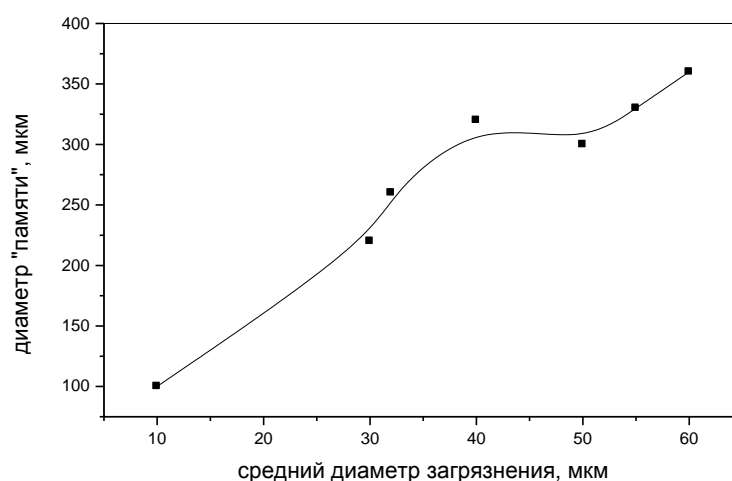


Рис.2.17. Зависимость среднего диаметра области с эффектом «памяти» от

среднего диаметра загрязнения. Время действия записывающего напряжения 400 секунд.

Из представленного на рисунке 2.17 графика видим, что чем больше средний диаметр загрязнения на подложке, тем больше область, которая переходит в состояние «памяти». Это подтверждает, что эффект памяти обусловлен наличием загрязнений (примесей) на поверхности, провоцирующих переход директора в гомеотропное состояние.

Механическая деформация жк ячейки при которой имеет место перемещение жк материала, в процессе записи в «память», не влияет на форму области охваченной «памятью». Это означает, что эффект «памяти» связан с процессами на границе жк – подложка, а не в объеме жк.

2.10 Дефекты ориентации директора на поверхности

В ходе серии опытов, проведенных в процессе выполнения магистерской, работы был исследован механизм эффекта «памяти». Из анализа ориентации жк слоя в состоянии памяти можно сделать вывод, что все дефекты ориентации жидкокристаллического слоя на кремниевой подложке исчезают. Это говорит о том, что на нижней подложке наблюдается гомеотропный переход.



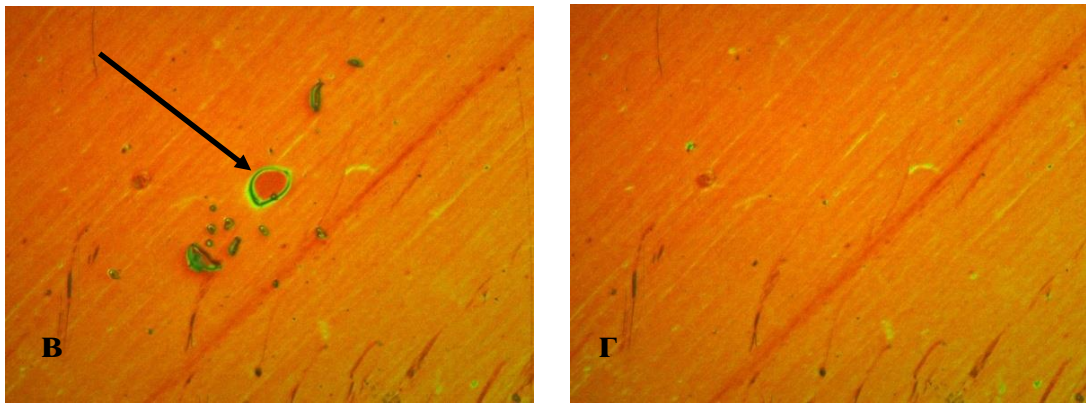


Рис.2.18. Исчезновение дефектов ориентации на подложке. Напряжение 4 В, смещение -1 В, частота 100 кГц, время 2 мин.

На рисунке 2.18г видим, что через некоторое время дисклинация пропала, это свидетельствует о том, что молекулы стали гомеотропно ориентированы (возможно, из-за уменьшения энергии связи). Отметим, что после процесса релаксации все дефекты на поверхности кремния восстановились (за исключением дисклинации).

В ходе анализа полученных данных установили схематический вид процесса переориентации. На рисунке 2.19 представлен процесс переориентации, происходящий на поверхности кремниевой подложки экспериментальной ячейки.

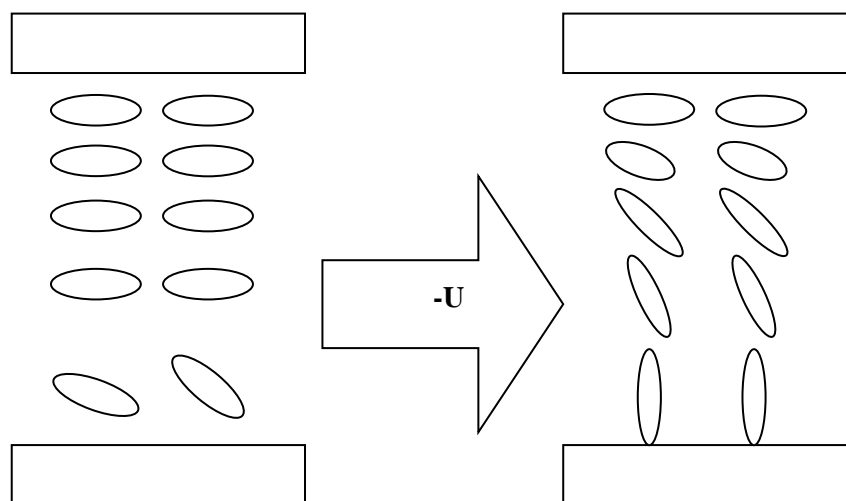


Рис.2.19. Гомеотропный переход на кремниевой подложке при реализации эффекта памяти.

2.11 Влияние типа проводимости кремния

С целью исследования, влияния типа проводимости кремния на гомеотропный переход были проведены следующие эксперименты. В качестве нижней подложки ячейки использовался кремний р-типа проводимости с удельным сопротивлением $4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см.}$ с карманами n- типа проводимости. Исходная поверхность кремния была пассивирована термическим окислом. Далее поверхность кремния обрабатывалась водным раствором плавиковой кислоты (1:1) с целью удаления маскирующего окисла. После этого собрали жидкокристаллическую ячейку сэндвич – типа. Верхний слой экспериментальной ячейки представлен стеклом с нанесенным на него в виде змейки, выполненной проводящим слоем ИТО. Далее на поверхность кремния в ячейке, при комнатной температуре был нанесен нематик 5СВ с повышенной проводимостью (с примесями). Наличие примесей устанавливалось при прохождении электрического тока в ответ на приложение ступеньки напряжения. Данный образец жк демонстрировал повышенное значение тока по сравнению с чистым жк. На ячейку подавалось постоянное напряжение величиной - 1 В. Причем на кремний подавался «-», на стеклянную подложку подавался «+».

Данный образец кремния со слоем жк наблюдался нами в поляризационный микроскоп. Плоскости поляризации поляризатора и анализатора при этом были скрещены. С течением времени ориентация жк в той части ячейки, где прикладывалось напряжение, менялась: от планарной ориентации к гомеотропной. Причем над n -карманами данный процесс проходил быстрее. Следовательно, используя планарно-гомеотропный переход можно контролировать тип проводимости участков кремния. Через некоторое время

переход от планарной ориентации к гомеотропной осуществляется над всей поверхностью кремния.

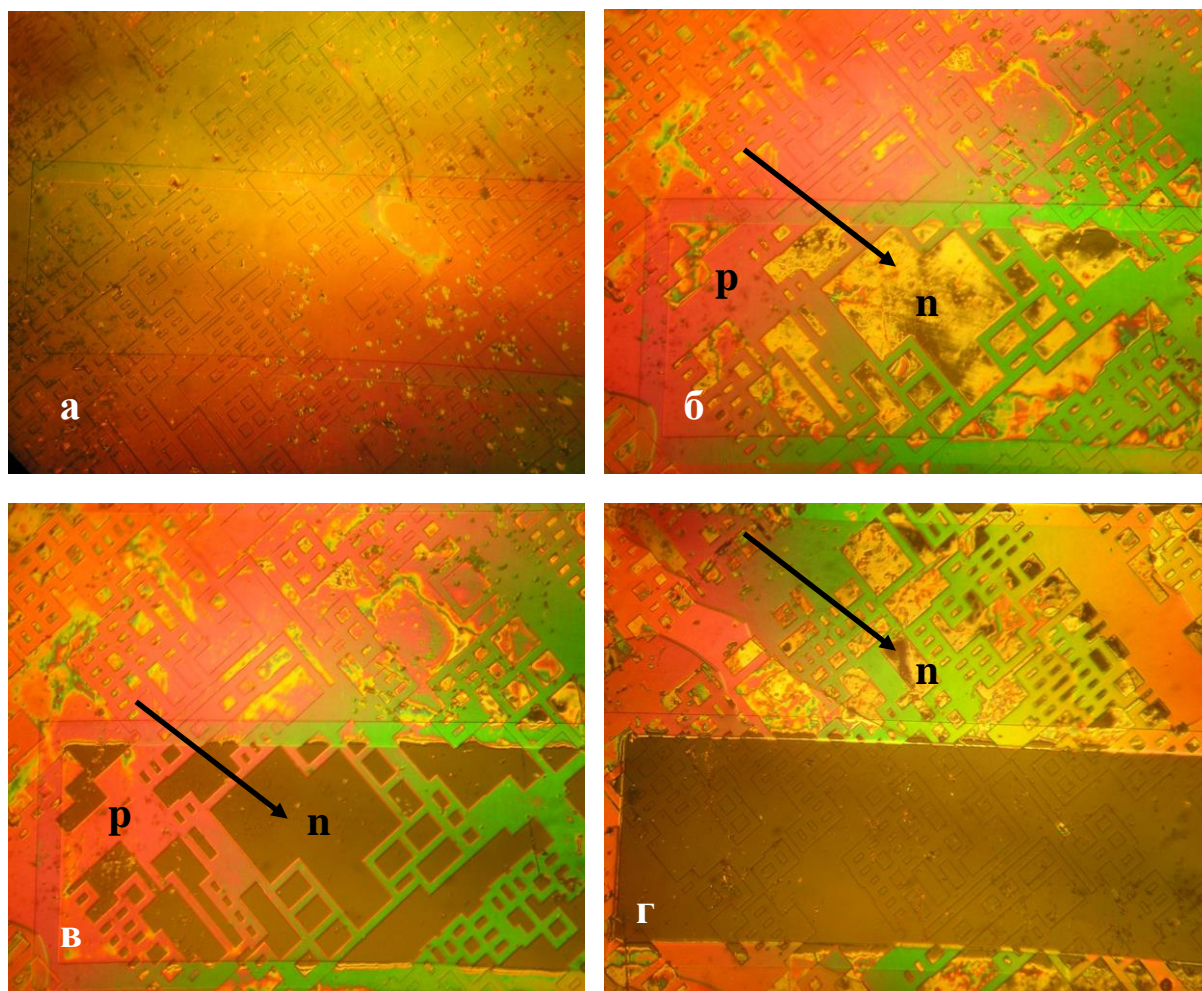


Рис. 2.20. Процесс переориентации нематического жк от планарной ориентации к гомеотропной: а- ориентация жк слоя до подачи напряжения на ячейку, б- вид ориентации спустя 10 минут с момента подачи напряжения, в- ориентация через 15 минут, г- вид ориентации спустя 20 минут с момента подачи напряжения. Напряжение 4 В, частота 100 кГц

На рисунке 2.20а. демонстрируется изображение жк ячейки в начальный момент времени. Очевидно, что молекулы жк ориентированы наклонно. С течением времени (рис 2.20 б) области над n-карманами начинают темнеть, т.о. угол преднаклона молекул жк начинает увеличиваться, и молекулы постепенно становятся перпендикулярно поверхности.

Над участками кремния, где электрическое поле не приложено, гомеотропный переход также происходит, но значительно медленнее. На

рисунке 2.20 г стрелка показывает на гомеотропную ориентацию над p-карманом, тогда как под электродами гомеотропная ориентация уже давно достигнута.

Отметим важное обстоятельство: гомеотропный переход, может происходить также на кремнии без покровного стекла. Времена перехода сопоставимы с временем переориентации для областей в ячейке на которые не прикладывается напряжение.

Следующий экспериментальный образец представляет собой кремниевую полужку, обработанную выше указанным образом. На поверхность кремния при температуре $+21^{\circ}\text{C}$ был нанесен жк 5СВ с меньшей проводимостью, по сравнению с предыдущим образцом жк. Данный образец тоже наблюдался нами в поляризационный микроскоп. Первоначально жк кристалл имел планарную ориентацию молекул, которая сохранялась с течением времени. На рисунке 2.21а. демонстрирует изображение жк ячейки в начальный момент времени.

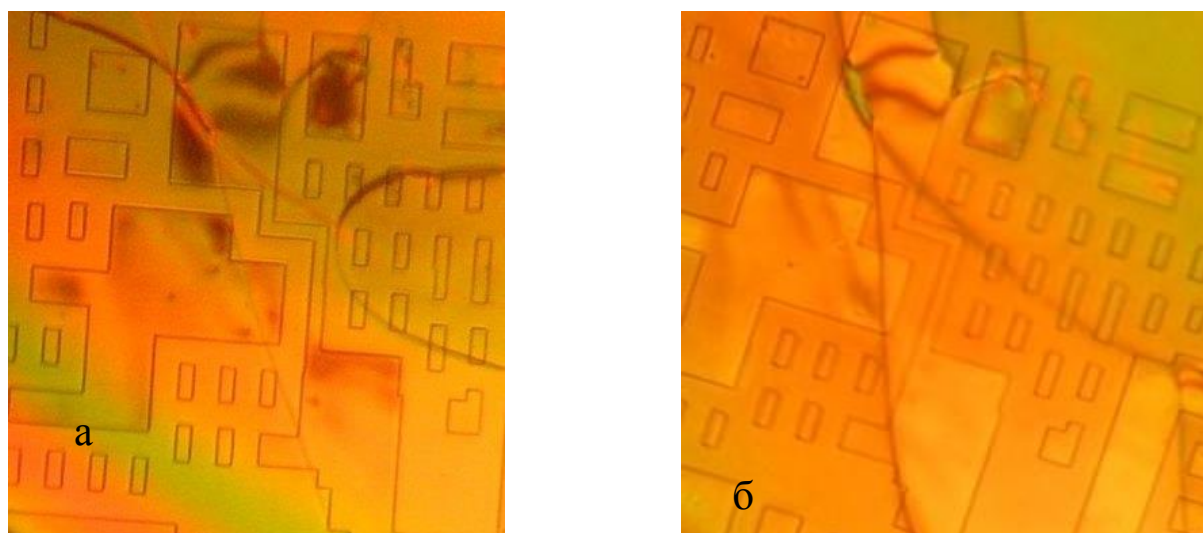


Рис.2.21. Ориентация нематического жк без примесей на кремнии с открытой поверхностью жк: а- в момент времени $t=0$, б- в момент времени $t=180$ мин.

Очевидно, что молекулы жк ориентированы планарно. Рис 2.21б дает изображение той же области через 180 мин. Очевидно, что ориентация молекул

жк не изменилась. Дальнейшие исследования показали, что ориентация не меняется в течении нескольких суток и более. Таким образом в жк без примесей эффекта перехода в гометропную ориентацию не наблюдается.

2.12 Анодное окисление кремния в жк ячейке.

Низкие напряжения смещения.

Провели серию следующих опытов с малыми по величине смещениями постоянного напряжения. Взяли экспериментальную ячейку, на которую подавалось напряжение в процессе исследования, не выше ± 4 В., рис. 2.22 а. Затем передвинули фторопластовую плёнку ограничивающую толщину жк. В этом случае в поле зрения оказалась новая поверхность, рис.2.22 б. Наблюдали за происходящими изменениями в жк слое. Было установлено, что порог эффекта Фредерикса над вновь открытой поверхностью ниже, чем над «старой» поверхностью. Это косвенно указывает, что в процессе эксплуатации ячейки (до смещения пленки) поверхность кремния изменилась. Прикладывая к ячейке записывающее напряжение можно ввести ее в режим «памяти», рис. 2.22 в. В режиме памяти области старая и новая не различаются, рис.2.22 г. После процесса релаксации ячейка возвращается в состояние, в котором и эффект Фредерикса различим над этими участками (как до реализации эффекта памяти). Таким образом эффект памяти осуществляется на фоне измененной поверхности кремния, вызванной смещением $+U$ в жк ячейке.

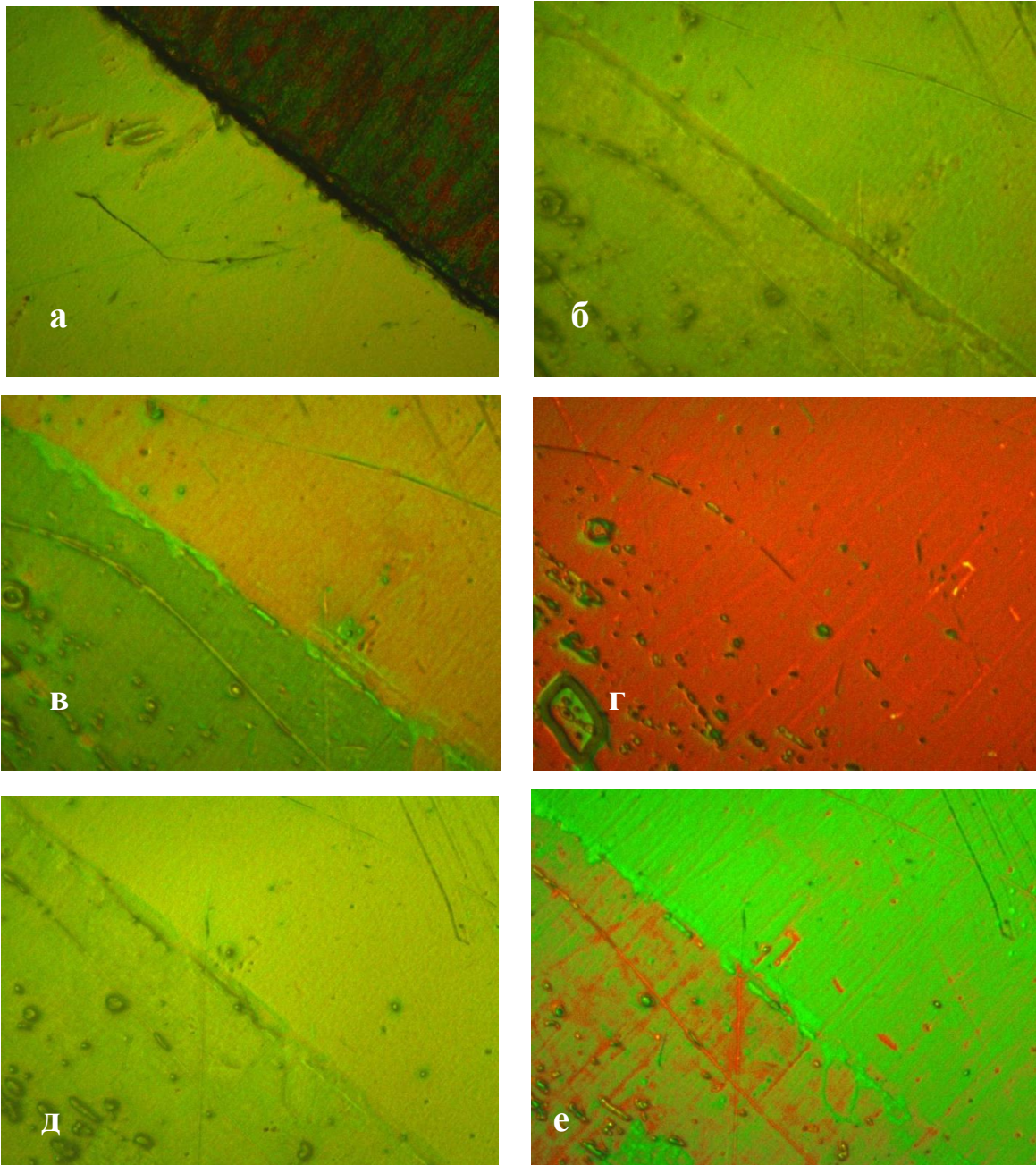


Рис.2.22. Процесс переориентации жк слоя на поверхности экспериментальной ячейки: а- область с пленкой фиксирующей толщину слоя жк, б- без пленки (сдвинутой), в- области с различающимся эффектом Фредерикса, г- эффект «памяти», д- процесс релаксации, е- области с эффектом Фредерикса.

Высокое напряжение смещения.

Далее проведены исследования изменений происходящих на поверхности кремниевой подложки при больших значениях смещения $+U$. Эксперимент по

видоизменению поверхности кремния при больших величинах напряжения смещения заключается в следующем.

Использовался кремний р-типа проводимости. Далее на поверхность кремния воздействовали пучком Ga (30КеВ) в течение 3 минут в РЭМ Quanta 200 3D, ионной пушкой с целью создания реперной области и модификации поверхности. Затем, используя выше указанный образец кремния, собрали экспериментальную жк ячейку. Верхний слой ячейки представлен встречно-штырьевым электродом. Данная ячейка затем была использована в серии проведенных экспериментов. Подавали напряжение с постоянным смещением +20 В в течении 10 минут на некоторые полосы встречно-штырьевого электрода. После чего экспериментальная ячейка была разобрана. Поверхность кремния промыта органическими растворителями. После этого исследовали поверхность кремния растровым электронным микроскопом. На рисунке 2.8 представлено REM изображение поверхности кремния после воздействия на ячейку выше указанным способа. Хорошо видно, что поверхность кремния под электродом, на который подавалось напряжение, изменилась. Она покрылась диэлектрическим слоем. Диэлектрические поверхности в РЭМ выглядят светлыми. На рисунке 2.8 эта поверхность обозначена L.

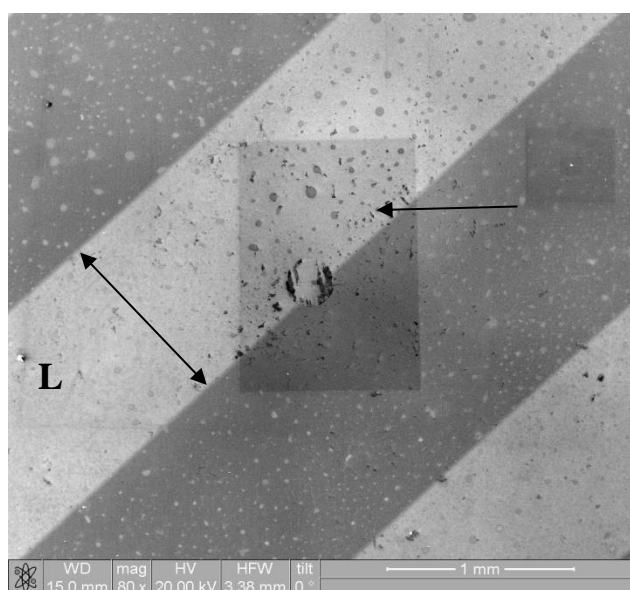


Рис.2.23. РЭМ изображение поверхности кремния. Белая полоса – пленка окиси кремния.

Также хорошо видно, что поверхность кремния, подвергнутая действию ионного пучка, имеет особенности при анодном окислении. Следовательно, можем сказать, что в жк ячейке при действии напряжения происходит процесс анодирования поверхности кремния.

Далее кремний использовался в качестве подложки при сборке экспериментальной ячейки. На рисунке 2.9 представлена область анодирования. Установлено, что порог эффекта Фредерикса на этом участке поверхности повышен. Таким образом, получается, что с помощью электрического напряжения с полярностью $+U$ электрохимическим образом можем анодировать поверхность кремния. Ниже приведены фотографии исследуемой области жк ячейки.

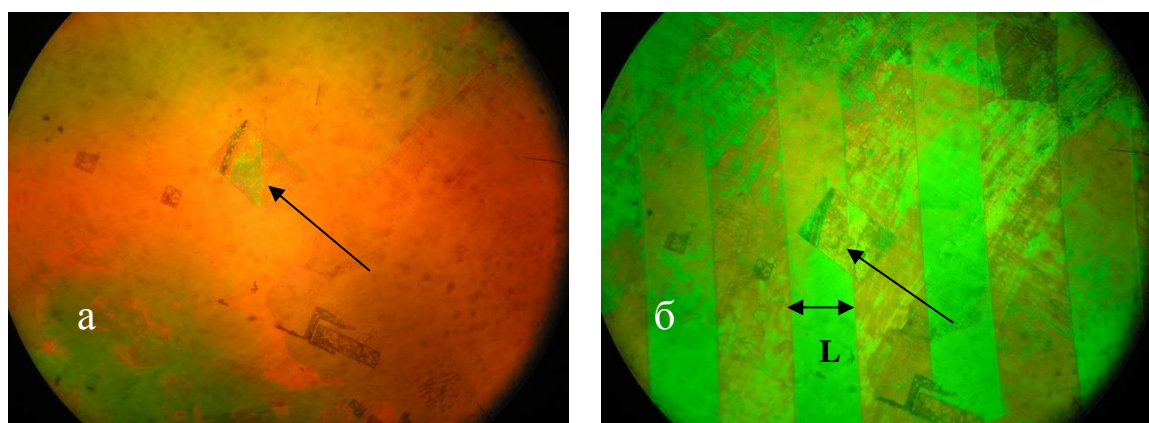


Рис2.24. Фрагмент жк ячейки с анодно-окисленным кремнием. а- $U=0$, б- переменное напряжение $U=2.5$ В, 100 кГц

Провели исследование светочувствительности жк ячейки с обработанным выше указанным способом кремнием. Установили, что порог напряжения светочувствительности на участках, обозначенных L , отличается от не окисленных участков, что также косвенно указывает на присутствие на поверхности кремния окисленных участков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

- 1) исследован эффект «памяти», который заключается в переходе директора в гомеотропное состояние при действии на жидкокристаллическую ячейку (структура Si/нематик/прозрачный электрод) постоянного смещения с отрицательной полярностью, и долговременном, зависящем от величины смещения, нахождении директора в этом состоянии на кремниевой подложке;
- 2) смещение с положительной полярностью стабилизирует директор в состоянии «памяти» неограниченное время;
- 3) установлено, что как собственные так и привнесённые из вне примеси в жк материале неустановленной (на данном этапе исследований) природы являются необходимым условием реализации эффекта «памяти»;
- 4) темп перехода директора в гомеотропное состояние зависит от типа проводимости кремния;
- 5) установлено, что на свежетравленной поверхности кремния в окрестности первого контакта жидкого кристалла из класса цианобифенилов при впуске его в ячейку, может формироваться ориентация нематика с повышенным порогом эффекта Фредерикса;
- 6) установлен эффект электрохимического анодирования поверхности кремния в жк ячейке при положительном смещении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Bougrenet De La Tonnaye J. L. Engineering liquid crystals for optimal uses in optical communication systems // Liquid crystals. 2004. V. 31.No. 2. P. 241–269.
2. Беляев В.В. Современные электронные дисплеи // Электр. комп. 2002. №1. С. 24-28.
3. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: структура и свойства. М. Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013.С.480.
4. Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Воронин Ю.М. Влияние поверхности на фазовую модуляцию света в слое нематического жидкого кристалла // ЖТФ. 2008. Т.78. №.2. С.71-76.
5. Ламанов А., Ламанов М., Шешин Е., Щука А. Экраны на основе автоэлектронной эмиссии – перспективные устройства отображения информации // Инженерная микроэлектроника. 2005. №9. С.10-12.
6. С. Чандрасекар Жидкие кристаллы. М. Мир. 1980. С. 343.
7. Сонин А. С. История открытия жидких кристаллов: драматические страницы //Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 2.Химия. 2002. Т. 43. № 2.С.130-134.
8. Томилин М.Г. Жидкие кристаллы: восхождение в третье тысячелетие// Опт. журн. 2001. Т.68, № 3. С.78-83.
9. Томилин М.Г. Какая дисплейная технология победит в битве за большой экран? // Опт. журн. 2004. Т.71. № 10. С.85-88.
10. Томилин М.Г. Создание и обработка изображений с помощью ЖК //Опт. журн. 2001. Т.68, № 4. С.122.
11. Томилин М.Г., Невская Г.Е. Дисплеи на жидких кристаллах // СПб: СПбГУ ИТМО. 2010. С.108.
12. Чигринов В. Г. Ориентационные эффекты в нематических жидких

кристаллах в электрическом и магнитном полях //Кристаллография. 1982.
Т.27. В. 2. С. 404.