

**БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Н И У « Б е л Г У »)**

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК
КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

**МАГНЕТРОННО НАПЫЛЕННЫЕ ПЛЕНКИ ZnO В СТРУКТУРЕ
Si/ZnO/НЕМАТИК/ПРОЗРАЧНЫЙ ЭЛЕКТРОД**

Магистерская диссертация

обучающегося по направлению подготовки

03.04.02 Физика

очной формы обучения,

группы 07001637

Ченцовой Виктории Викторовны

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

Рецензент
к.ф.-м.н., доцент кафедры
естественнонаучных
дисциплин, БУКЭП
Стукалов А.А.

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Общие сведения.....	5
1.1. Магнетронное напыление.....	5
1.2. Модуляция оптического излучения.....	8
1.3. Эффект поля.....	10
Глава 2. Экспериментальная часть.....	16
2.1. Структура жк ячейки.....	16
2.2. Образцы кремния.....	17
2.3. Экспериментальная установка.....	19
2.4. Ход эксперимента.....	20
2.4.1. Пороги напряжения светочувствительности.....	20
2.4.2. Эффекты накопления ионных зарядов.....	25
2.4.3. Наклонное напыление ZnO.....	43
2.4.4. Ориентация молекул жидких кристаллов.....	50
Заключение.....	52
Литература.....	53

Введение

В последние годы интенсивно развиваются не дисплейные применения жидких кристаллов, в частности модуляторы света (ЖКМС). Наиболее широкими функциональными возможностями обладают пространственно-временные модуляторы света (ПМС) с электрическим или оптическим управлением. Их особенность состоит в том, что они дополнительно содержат светочувствительный слой фотопроводника, позволяющий осуществлять управление световым сигналом.

Поскольку такие приборы находят применение при обработке оптической информации, необходимо улучшать их функциональные возможности, создавая новые свойства.

В основе большинства применений лежат жидкокристаллические модуляторы света, работающие в видимой и ИК областях спектра и имеющие низкие рабочие напряжения.

Изменения электрических параметров кремния и ориентации молекул жидкого кристалла необходимы для расширения функциональных возможностей жидкокристаллических модуляторов света. Например, изменение порогов светочувствительности в плоскости модулятора, получение гомеотропной или планарной ориентации нематика.

С этой целью в работе исследовалась принципиальная возможность пленки окиси цинка ZnO , которые наносились на поверхности монокристаллического кремния магнетронным методом для вариации пороговых напряжений светочувствительности и начальной ориентации молекул жидкого кристалла. Поэтому актуальность выбранной темы исследований не вызывает сомнений.

Исходя из актуальности данной темы целью работы было:

1. Исследование возможности получить планарную и гомеотропную ориентацию молекул ЖК на пленках ZnO напыляемых магнетронным способом.
2. Исследование влияния пленок ZnO на поверхностную проводимость Si в структуре Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод.

Исходя из цели магистерской диссертации, вытекают следующие задачи:

1. Показать, что в структуре Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод с плёнками ZnO, которые получены магнетронным способом, пороговое напряжение светочувствительности структуры, зависит от толщины пленки ZnO. Смещение порога светочувствительности структуры обусловлено ионной адсорбцией на пленках ZnO.
2. Показать, что нормально напыленные пленки ZnO на поверхности кремния вызывают гомеотропную ориентацию молекул жидкого кристалла 5CB.
3. Показать, что косо напыленные пленки ZnO на поверхности кремния вызывают планарную ориентацию молекул жидкого кристалла 5CB.
4. Установить, что накопление ионных зарядов у поверхности кремния в структуре Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод под действием постоянного напряжения вызывает смещение порога светочувствительности.

Глава 1. Общие сведения

1.1. Магнетронное напыление

Метод нанесения тонких плёнок на подложку, при помощи катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда — диодного разряда в скрещенных полях, называется магнетронным распылением. Для осуществления технологии нанесения тонких пленок, используются устройства, которые называются магнетронными распылительными системами (магнетронами).

Диодный газовый разряд в скрещенных полях называется магнетронным разрядом.

В настоящее время в технологиях нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами используются магнетронные распылительные системы. Рабочий процесс такого распыления основывается на образовании над катодом кольцеобразной плазмы, которая в результате столкновения с газами образует диодный газовый разряд [1]. Благодаря данному разряду ионы ускоряются в сторону катода, тем самым бомбардируют его поверхность и выбивают атом материала, который в дальнейшем оседает на поверхности подложки и образует пленку [2].

Основными элементами магнетронной распылительной системы (рис. 1.1) являются катод-мишень 1, анод 2 и магнитная система 3. Аномальный тлеющий разряд инициируется при подаче постоянного напряжения, между электродами магнетронной распылительной системы. Локализовать плазму разряда вблизи мишени позволяет наличие замкнутого магнитного поля. В результате вторичной ионно-электронной эмиссии, образующиеся

электроны, захватываются магнитным полем. Захваченные магнитным полем электроны движутся у поверхности мишени по замкнутым траекториям. Электроны удерживаются магнитным полем у поверхности катода, а электрическим полем отталкиваются. Концентрация положительных ионов у поверхности катода, значительно возрастает, в результате эффективного удержания электронов и их интенсивной энергетической релаксации. Таким образом, обуславливая увеличение плотности потока расплывшихся атомов и интенсивности ионной бомбардировки поверхности мишени. В области сильного магнитного поля поверхность мишени расплывается наиболее интенсивно. Эта часть поверхности имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы [3].

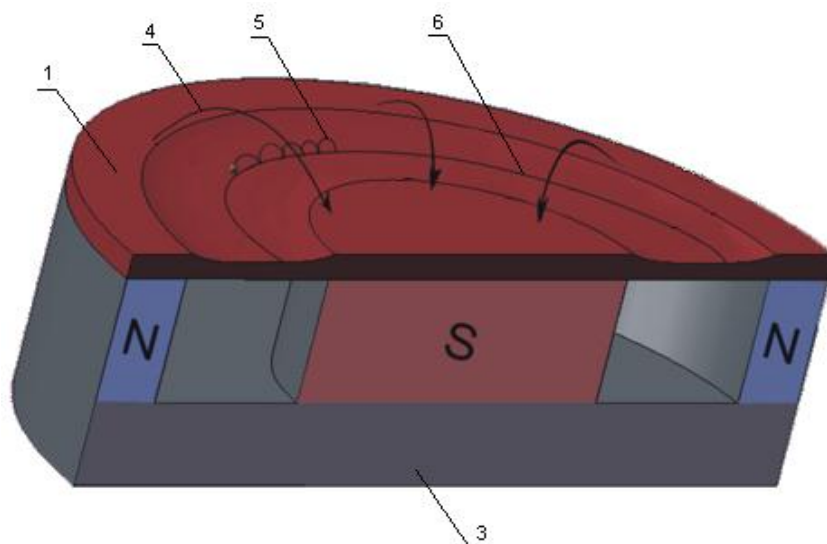


Рис. 1.1. – Схема установки для магнетронного распыления с плоской мишенью: 1 – катод-мишень; 2 – анод; 3 – магнитная система; 4 – силовая линия магнитного поля; 5 – траектория движения электронов; 6 - зона наибольшей эрозии поверхности катода

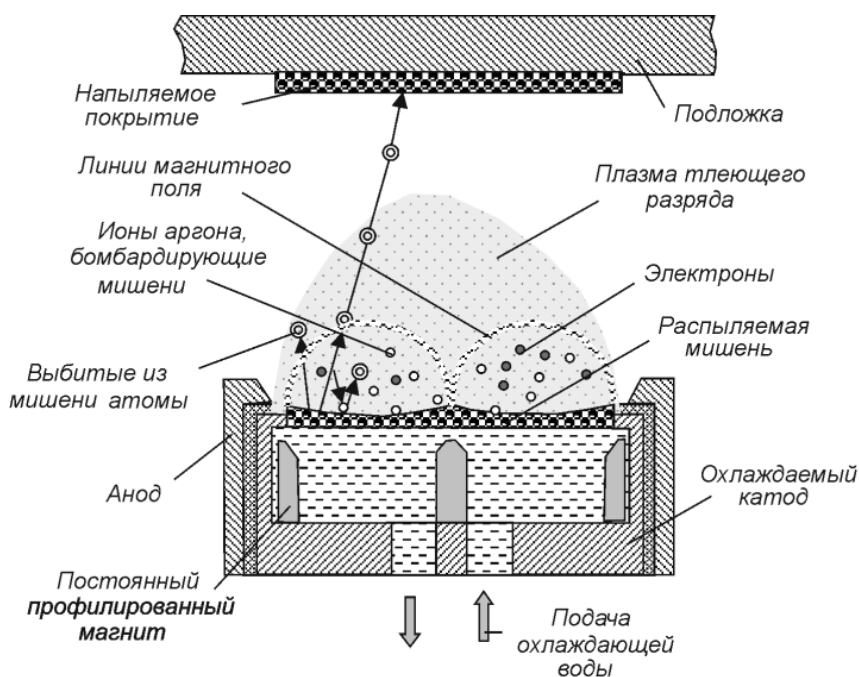


Рис. 1.2. Схема магнетронной распылительной системы.

Напряжение горения разряда, ток разряда, плотность тока на мишени, удельная мощность, величина индукции магнитного поля и рабочее давление – это основные рабочие характеристики магнетронных распылительных систем. Стабильность разряда и воспроизводимость характеристик, формируемых на образцах тонких пленок, зависят от величины и стабильности параметров, которые взаимно связаны между собой.

Значительное влияние на качество формируемых покрытий, их адгезию к основе оказывает состояние поверхности образцов. Зачастую, на поверхности образцов существует оксидный слой, который ухудшает взаимодействие покрытий. Этап чистки поверхности образцов является одним из составляющих цикла нанесения покрытий. Направленные потоки ионов инертных газов, генерируемых источниками ионов используют для чистки поверхности образцов. Так же на обрабатываемую поверхность в процессе роста плёнки можно воздействовать ускоренными ионами, что позволяет в свою очередь изменять структуру, а, следовательно, и свойства покрытия. Улучшается микроструктура, в частности увеличивается

плотность и однородность, размельчается столбчатая структура, исчезает сквозная пористость, что приводит к улучшению износо-, усталостной и коррозионной стойкости изделий с покрытиями [4].

Метод магнетронного распыления с ионным ассистированием обладает высокой эффективностью и производительностью, что позволяет получать покрытия из металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков не нарушая исходных компонентов распыляемой мишени. Данный метод также дает возможность наносить покрытие в среде химически активных газов тем самым получать соединения на основе оксидов, нитридов, сульфидов металлов, используя метод магнетронного распыления, получаем возможность наносить покрытие с широким интервалом скоростей напыления тем самым, получая многокомпонентные и многослойные покрытия, отличающиеся высоким качеством и однородностью.

Магнетронное распыление дает возможность производить обработку изделий с помощью ионной очистки для дальнейшей их активации перед нанесением покрытий.

Методу магнетронного распыления присущи и недостатки, которые ограничивают технологические возможности устройств: во-первых, при замене рабочего газа окисление и загрязнение поверхности мишени; во-вторых, требуется механическая чистка запыляемых элементов, при осаждении различных типов пленок на одной установке; в-третьих, нельзя нанести равномерно покрытие на изделие сложной формы [5].

1.2. Модуляция оптического излучения

Основной составляющей оптических устройств являются жидкокристаллические модуляторы, которые предназначены для управления

параметрами излучения: интенсивностью, фазой, спектром и углом отклонения [6]. В зависимости от того как меняется состояние одного из параметров оптического излучения модуляцию подразделяют :

- амплитудную,
- фазовую,
- поляризационную.

Модуляция излучения может производиться по параметрам: по амплитуде, по частоте, по фазе и виду поляризации. Исходя из этого, модуляторы бывают: амплитудные, частотные, фазовые и поляризационные. В зависимости от того, модулируется пучок излучения после выхода или внутри резонатора, модуляторы могут быть внешними или внутренними.

Модуляторы оптического излучения можно классифицировать по тем физическим эффектам, на которых основана их работа. В настоящее время на практике используются следующие эффекты:

- эффект Поккельса;
- эффект Керра;
- эффект Фарадея;
- акустооптический эффект.

Данные эффекты сводятся к изменению показателя преломления среды.

Электрооптические модуляторы:

1. Модулятор Керра

Эффект Керра состоит в возникновение двойного лучепреломления в оптически изотропных веществах, под воздействием однородного электрического поля.

2. Модулятор Поккельса

Эффект Поккельса состоит в возникновения двойного лучепреломления в оптических средах при наложении постоянного или переменного электрического поля.

Различие между эффектом Керра и эффектом Погкельса состоит в том, что в случае эффекта Погкельса приращение показателя преломления для волны зависит от напряжённости приложенного электрического поля линейно, а не квадратично, как при эффекте Керра [7].

Магнитооптические модуляторы

Эффекта Фарадея заключается в наблюдении вращения плоскости поляризации света, при распространении линейно-поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле [8].

Акустооптические модуляторы

Акустооптический модулятор основан на дифракции света, на бегущей ультразвуковой волне в оптически прозрачном материале (стекле).

Акустооптический модулятор света – это устройство для изменения интенсивности пропускаемого света, вследствие его дифракции на решётке, образуемой в прозрачном материале в результате пространственной модуляции показателя преломления акустической волной [9].

1.3. Эффект поля

Изменение поверхностной проводимости, вызванное действием электрического поля, приложенного нормально к поверхности называется эффектом поля [10]. Значение эффекта поля полупроводников определяется тем, что:

1. Эффект поля является одним из наиболее информативных методов исследования электронных явлений на поверхности полупроводников.
2. Данный эффект лежит в основе принципа действия полевых транзисторов.

Обогащенный слой - это слой с повышенной концентрацией основных носителей заряда (в сравнении с концентрацией носителей в объеме полупроводника).

Обедненный слой – это слой с пониженной концентрацией основных носителей заряда. Третий режим – инверсный.

Между металлической пластиной и полупроводником, разделенных воздухом (диэлектриком) приложено напряжение U . Протекание тока в системе металл-диэлектрик-полупроводник невозможно, так как такая система равновесна и представляет собой своеобразный конденсатор, одной из обкладок которой является полупроводник.

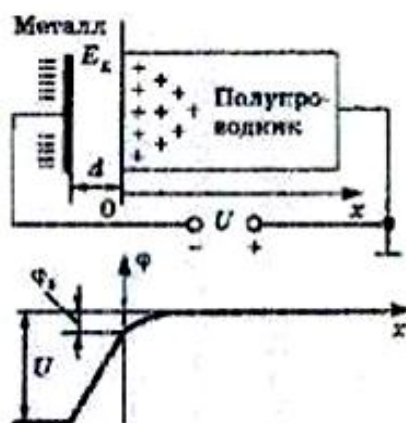


Рис. 1.3. Эффект поля в структуре металл-диэлектрик-полупроводник.

Заряд в полупроводнике не сосредотачивается на поверхности, как у металла, а распространяется на некоторое расстояние вглубь кристалла, поэтому на данной обкладке будет по значению такой же заряд, как и на металлической.

Между диэлектриком и полупроводником распределяется электрическое поле, созданное напряжением. В диэлектрике нет объёмных зарядов, поэтому поле диэлектрике постоянное, так как заряд спадает от поверхности вглубь полупроводника, то поле в нем заведомо непостоянное.

От полярности приложенного напряжения зависит знак заряда в полупроводнике. При отрицательной полярности (рис. 1.3) наведенный заряд положительный, а при положительной полярности напряжения, в электронном полупроводнике происходит обогащение приповерхностного слоя электронами, а в дырочном - обеднение дырками и "обнажение" отрицательных акцепторных ионов [11].

В дырочном полупроводнике положительный заряд обусловлен дырками, а в электронном полупроводнике - ионами доноров.

Протяженность подвижных зарядов в обогащенном слое называют длиной Дебая или дебаевской длиной, а протяженность неподвижных ионных зарядов - глубиной обедненного слоя. В собственном полупроводнике (кремний) значение обедненного слоя (L_{Di}) составляет 14 мкм. Значение L_D определяется на расстоянии, при котором потенциал уменьшается в e раз, по сравнению с максимальным значением ϕ_s на поверхности (составляет несколько десятых долей вольта). В примесных полупроводниках значение обедненного слоя меньше, чем в собственном и почти не зависит от температуры ($L_D = 0,04$ мкм). Обедненный слой зависит от количества примеси. При увеличении концентрации примеси обогащенные и обедненные слои становятся тоньше. Таким образом, тонкие слои свойственны низкоомным полупроводникам, а толстые - высокоомным.

Благодаря наличию зарядов между объёмом и поверхностью, потенциал поверхности будет отличен от нуля, в то время как потенциал в объёме полупроводника равен нулю. Поверхностным потенциалом (ϕ_s) называют разность потенциалов между поверхностью и объёмом [12].

Поверхностный потенциал имеет конечную равновесную величину (ϕ_{s0}), в случае отсутствия внешнего напряжения. Значение равновесной величины обусловлено следующими факторами:

- наличием поверхностных состояний, которые способны захватывать или отдавать электроны на сравнительно долгое время.
- контактная разность потенциалов между металлом и полупроводником.

Чтобы скомпенсировать равновесный поверхностный потенциал необходимо внешнее напряжение или напряжением спрямления зон (U_F).

Ранее говорилось о том, что электрическое поле распределяется между диэлектриком и полупроводником. Поле в диэлектрике возрастает при уменьшении расстояния d , оно не должно быть произвольно малым. При $d < 10$ нм диэлектрик становится проницаемым для подвижных носителей благодаря туннельному эффекту. При этом структура МДП перестает быть аналогом конденсатора: обмен носителями через диэлектрик вызывает протекание тока, а значит, нарушает равновесное состояние. Распределение потенциала в области объёмного заряда можно оценить с помощью одномерного уравнения Пуассона:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\lambda}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (1.1)$$

где λ - плотность заряда;

ε_0 - электрическая постоянная;

ε - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника.

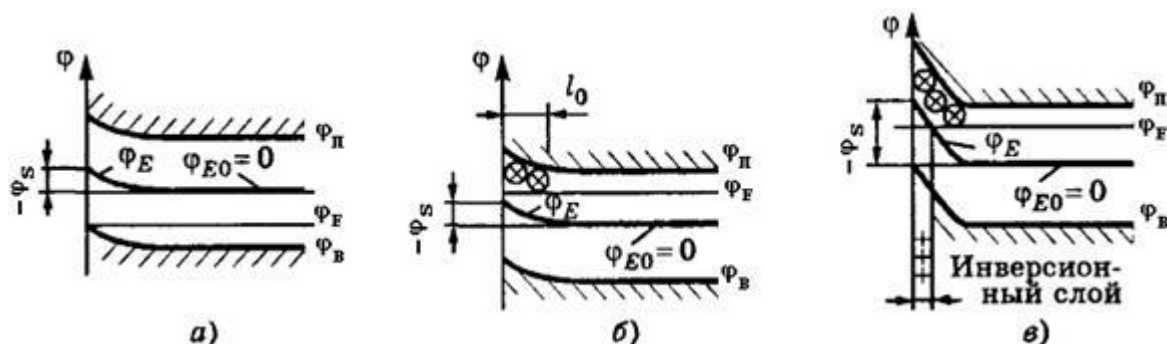
В общем случае плотность заряда в полупроводнике записывается следующим образом:

$$\lambda = q(p + N_D^* - n - N_A^*) \quad (1.2)$$

где N_D^* и N_A^* - концентрации ионизированных примесей [13].

Особенностью эффекта поля в примесных полупроводниках является возможность получения как обогащенных, так и обедненных слоев.

Режим обогащения соответствует такой полярности приложенного напряжения, при которой основные носители притягиваются к поверхности. Меньшее искривление зон обусловлено подвижными носителями в примесном полупроводнике и потому даже небольшой поверхностный потенциал обеспечивает необходимый заряд вблизи поверхности.



а – режим обогащения; б – режим обеднения; в – образование инверсионного слоя

Рис. 1.4. – Эффект поля в примесных полупроводниках

При условии $\varphi_s < 2\varphi_T$ дебаевская длина имеет вид:

$$l_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon \varphi_T}{qN}} \quad (1.3)$$

где N - концентрация ионизированной примеси (донорной или акцепторной)

Режим обеднения соответствует такой полярности приложенного напряжения, при которой основные носители отталкиваются от поверхности. В этом случае поверхностный потенциал может иметь гораздо большие

значения, чем в режиме обогащения (рис. 1.4,б), благодаря появлению объёмного некомпенсированного заряда примесных ионов [10,11].

Основные носители продолжают отталкиваться с ростом напряжения (а обедненный слой расширяться). Одновременно к поверхности притягиваются неосновные носители. Тип проводимости приповерхностного слоя изменяется в том случае, когда нарастающий заряд не базовых носителей превысит заряд оставшихся базовых. Данный случай называют термином инверсия типа проводимости, а слой - инверсионным (рис. 1.4, в).

Вблизи поверхности уровень электростатического потенциала пересекает уровень Ферми при образовании инверсионного слоя. Тем самым на приповерхностном участке уровень Ферми оказывается в той половине запрещенной зоны, которая соответствует преобладанию не базовых носителей. Толщина инверсионного слоя составляет всего 1-2 нм, т.е. 3-4 постоянных решетки. Из рисунка 1.4(в) видно, что инверсионный слой образуется при значении поверхностного потенциала $-(\phi_F - \phi_{E0})$. Увеличение внешнего напряжения сопровождается увеличением потенциала ϕ_S до того, как уровень Ферми не пересечет границу разрешенной зоны (рис. 1.4, в - валентной), после чего граничный слой превращается в полуметалл, а потенциал ϕ_S практически не меняется и сохраняет значение [14].

Глава 2. Экспериментальная часть.

2.1. Структура жк ячейки.

В эксперименте использовалась жидкокристаллическая ячейка монокристаллического кремния р- типа проводимости $4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

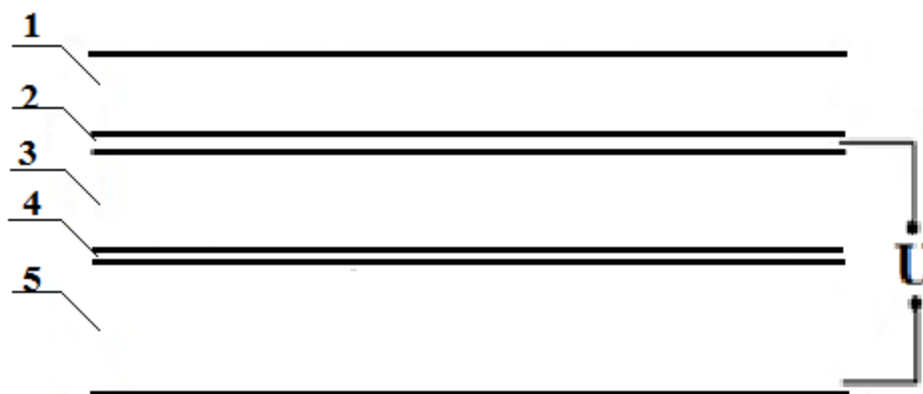


Рис. 2.1. Схематическое изображение строения жк ячейки. 1 – стекло, 2 – прозрачный электрод, 3 – жидкий кристалл, 4 – оксид цинка, 5 – кремний р- типа.

В качестве жидкокристаллической ячейки использовался 4,4' – пентилцианобифенил (5CB, производство фирмы MERCK) со структурной формулой:

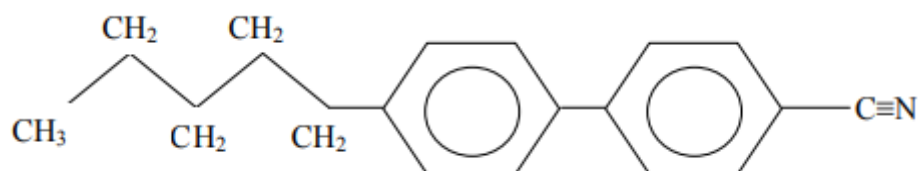


Рис. 2.2. Структурная формула молекулы 4-пентил-4'-цианобифенила

с температурами фазовых переходов Crystal 21,5 °C Nematic 35 °C Isotropic и обладающей положительной анизотропией диэлектрической проницаемости $\Delta \varepsilon = 11,5$ при 20 °C.

2.2. Образцы кремния

В ходе проведения эксперимента были исследованы следующие образцы кремниевых подложек: №6.0; №6; №8; №4; №9.

На рисунке 2.3 представлена жк ячейка с напыленной пленкой SiO_2 , в центре жк ячейки вытравленная область Si.

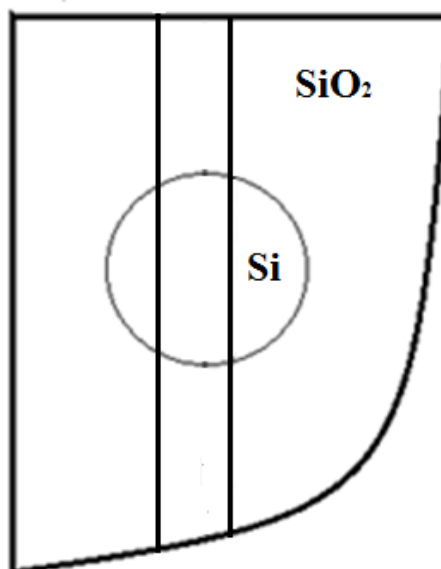


Рис. 2.3. Схематическое изображение образца кремния № 6.0 от 15.05.2017г. $U = 5\text{В}$, $T_k = 20^\circ\text{C}$, $\nu = 80$ кГц.

На рисунке 2.4 представлен образец кремния №6.

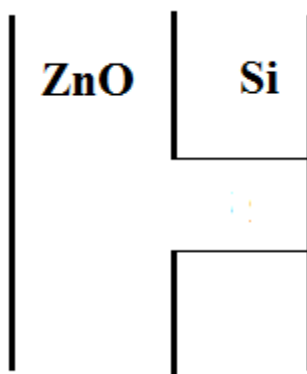


Рис. 2.4. Схематическое изображение образца кремния №6 от 05.02.2018. Пленка ZnO напылялась на всю поверхность Si, где нет заслонки.

На рисунке 2.5 представлена жк ячейка № 8 от 12.01.2018. В данном образце кремниевой подложки под микроскопом наблюдается проявление пленок ZnO в результате напыления магнетронным способом на поверхность Si.

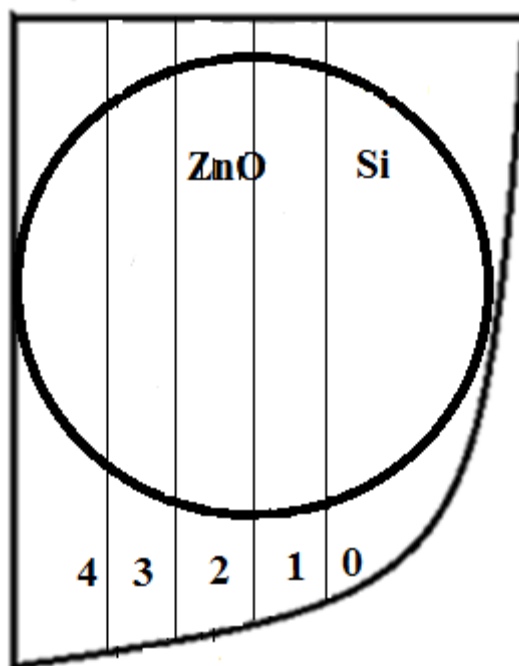


Рис. 2.5. Схематическое изображение образца кремния №8 от 12.02.2017.

На рисунке 2.6 представлена жк ячейка №9. В данном образце кремниевой подложки на поверхность Si магнетронным способом была напылена пленка ZnO. В микроскопе видно, что при напылении образовалась пленка. При дальнейших исследованиях было выявлено, что пороговое напряжение светочувствительность жк ячейки заметно изменяется вдоль данной пленки.

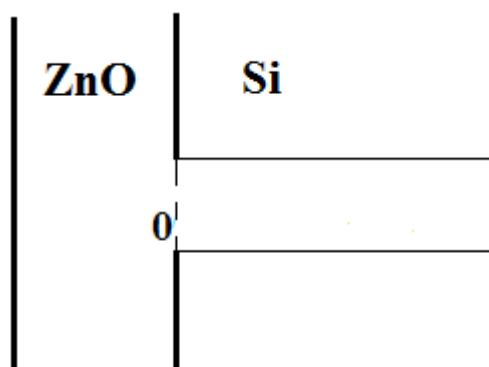


Рис. 2.6. Схематическое изображение образца № 9 от 20.03.2018.

2.3. Экспериментальная установка

В работе использовалась экспериментальная установка, состоящая из генератора переменного тока, двух вольтметров, микроскопа, гелий-неонового лазера, фотокамеры. В эксперименте измерялось пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод в зависимости от толщины напыления пленки ZnO на поверхность Si и вдоль пленки.

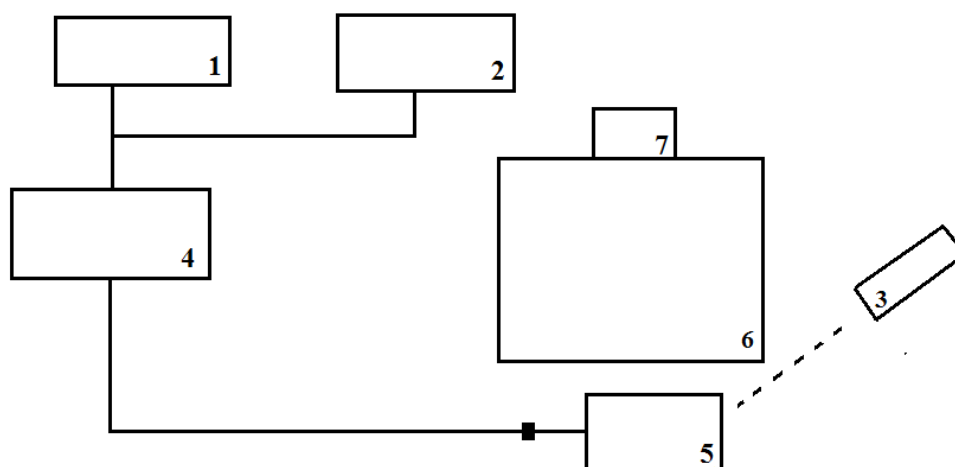


Рис. 2.7. Схематическое изображение блок – схемы экспериментальной установки: 1,2 – вольтметр; 3 – гелий-неоновый лазер; 4 – генератор переменного напряжения; 5 – жк ячейка; 6 – микроскоп; 7 – фотокамера.

2.4. Ход эксперимента

2.4.1. Пороги напряжения светочувствительности

Эксперимент состоял в измерении порогового напряжения светочувствительности жк ячейки, в зависимости от толщины пленок ZnO, напыленных на поверхность Si магнетронным способом и вдоль пленки.

В данной работе предполагалось, что менять поверхностную проводимость Si можно с помощью пленок ZnO, которые получались магнетронным способом.

На жк ячейку подается напряжение U , которое остается постоянным на протяжении всего эксперимента и напряжение U_{ds} , которое устанавливается при пропадании светочувствительности.

На рисунках 2.8 - 2.10 изображены графики зависимости порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный

электрод вдоль пленки, с учетом времени релаксации жк ячейки 3 минуты. На жк ячейку подавалось постоянное напряжение «-» 3В 3 минуты. Измерения светочувствительности проводилось каждые 3 минуты. Кривая 1 на рис. 2.8 соответствует измерению порогового напряжения после отдыха ячейки в течение суток, а кривая 2 на рис. 2.8 соответствует измерению после 3х минутного действия постоянного напряжения «-» 3В и 3х минутной релаксации.

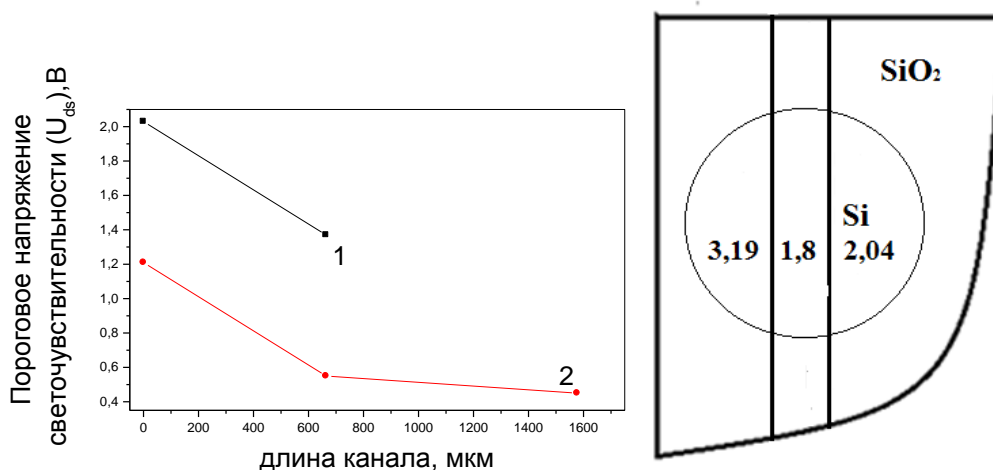


Рис. 2.8. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод. а) для образца 6.0 б) вдоль пленки для образца 6. Кривая 1 соответствует измерению порогового напряжения после отдыха ячейки в течение суток, а кривая 2 соответствует измерению после 3х минутной релаксации. $T_k=19^{\circ}\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. 1-660 мкм, 2-1570 мкм.

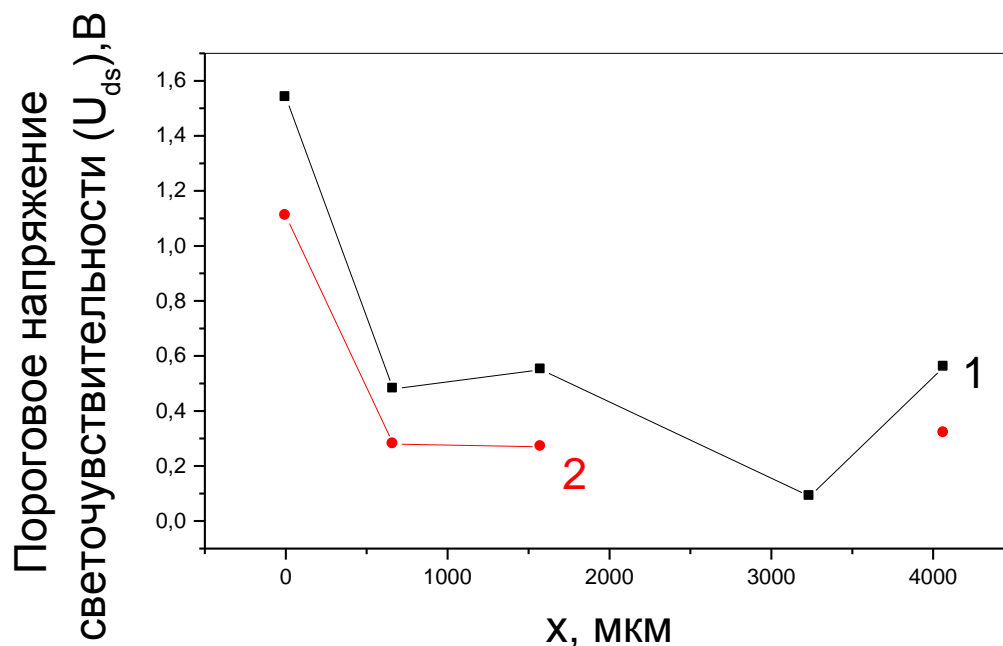


Рис. 2.9. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод по длине пленки. Кривая 1 соответствует измерению порогового напряжения после отдыха ячейки в течение суток, а кривая 2 соответствует измерению после 3х минутной релаксации. $T_k=20^{\circ}\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. Измерения проводились спустя сутки от предыдущего.

На рисунке 2.10. изображен график зависимости порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, с учетом времени релаксации жк ячейки 3 минуты. На жк ячейку подавалось напряжение «-» 3В, затем ячейка релаксировала в течение 3-х минут, далее потом было произведено измерение. Кривая 1 соответствует измерению порогового напряжения после отдыха ячейки в течение суток, а кривая 2 соответствует измерению после 3х минутной релаксации. Измерение проведено на 5 сутки от предыдущего с повышением постоянного напряжения на 0,5В.

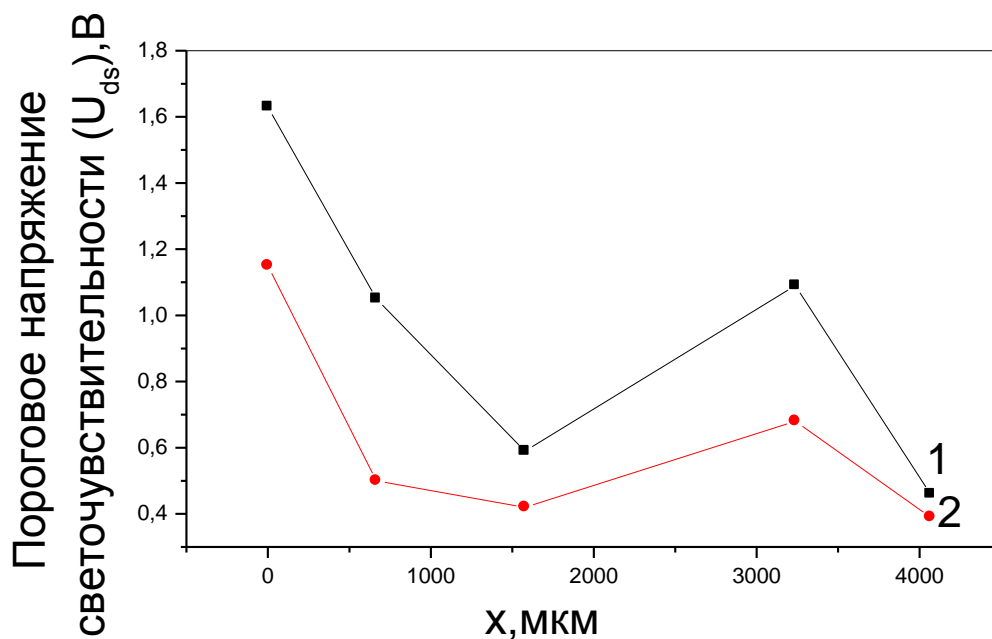


Рис. 2.10. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод по длине пленки. Кривая 1 соответствует измерению порогового напряжения после отдыха ячейки в течение суток, а кривая 2 соответствует измерению после 3х минутной релаксации. $T_k=20,5^{\circ}\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5,5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. Измерение проводилось спустя 5 дней от предыдущего, с повышением напряжения на 0,5 В.

На рисунке 2.11 изображен график зависимости порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, с учетом времени релаксации жк ячейки 3 минуты. На жк ячейку подавалось напряжение «-» 3В. Измерения светочувствительности проводились каждые 3 минуты. На рисунке изображены кривые зависимости за все дни измерений.

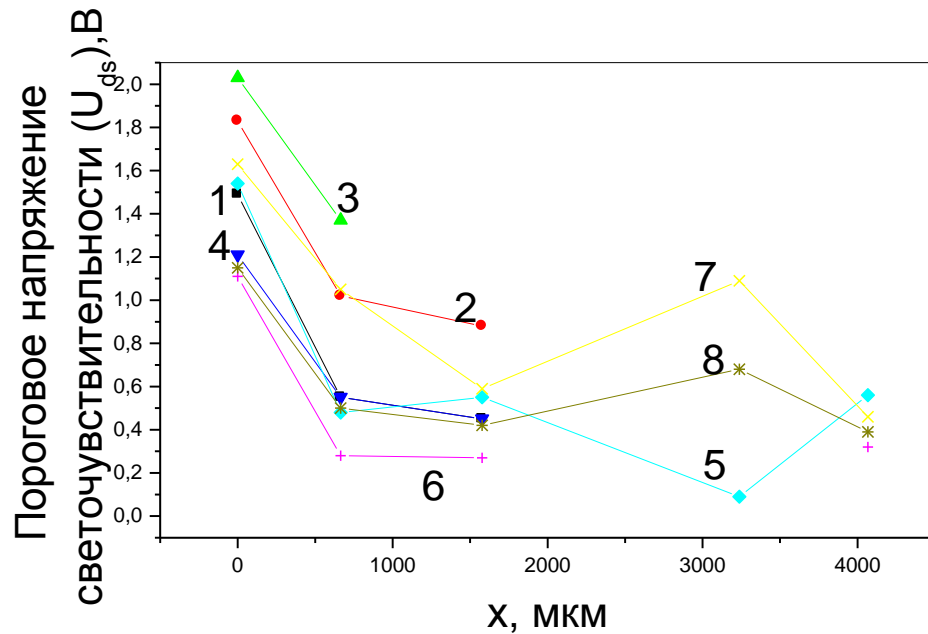


Рис. 2.11. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки. Кривая 1 соответствует измерению порогового напряжения после отдыха ячейки в течение суток, а кривые 2,3,4,5,6,7,8 соответствует измерению после 3х минутной релаксации.. $\nu=80\text{кГц}$, $U=5,5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6.

На рисунке 2.12 изображен график зависимости порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, после подачи «-» 3В в течение 1, 3, 5 минут, с учетом времени отдыха между измерениями равным 3 минутам. Кривая 1 соответствует измерению порогового напряжения после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению порогового напряжения после подачи -3В в течение 1 минуты, затем была релаксация ячейки в течение 3 минут, кривая 3 соответствует измерению порогового напряжения после подачи «-» 3В в течение 3 минут, затем ячейка релаксировала 3 минуты, кривая 4 соответствует измерению порогового напряжения после подачи «-» 3В, в течение 5 минут и так же ячейка затем релаксировала 3 минуты.

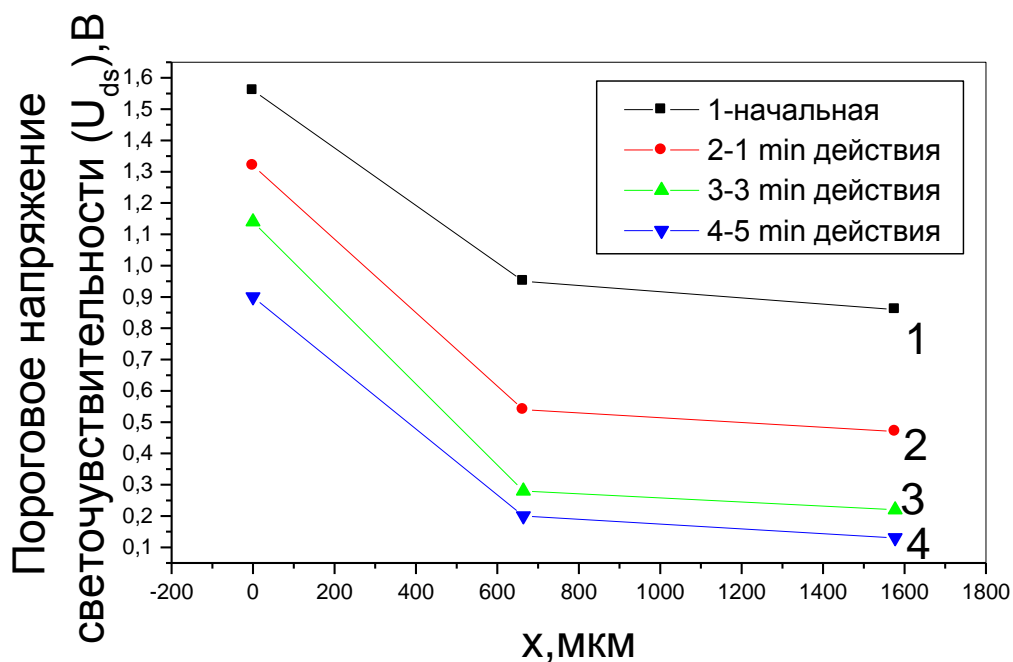


Рис. 2.12. Зависимость порогового напряжения исчезновения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, после подачи «-» 3В на 1,3,5 мин., с учетом времени отдыха между измерениями равным 3 минуты $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, $T_{\text{к}}=20^{\circ}\text{С}$, жк ячейка с образцом №6. Кривая 1 соответствует измерению порогового напряжения после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению порогового напряжения после подачи «-» 3В на 1 минуту, затем была релаксация ячейки в течение 3 минут, кривая 3 соответствует измерению порогового напряжения после подачи «-» 3В на 3 минуты, затем ячейка релаксировала 3 минуты, кривая 4 соответствует измерению порогового напряжения после подачи «-» 3В на 5 минут и так же ячейка затем релаксировала 3минуты.

2.4.2. Эффекты накопления ионных зарядов

С целью выяснения механизма зависимости порога напряжения светочувствительности от толщины была проведена следующая серия

экспериментов, которая заключается в предварительной подаче постоянного напряжения, а потом переключении управляющего напряжения и наблюдении что происходит со светочувствительностью.

Для проведения следующей серии измерений на жк ячейку подавалось «-» 3В 5 минут. Измерения светочувствительности проводились каждые 5 минут.

На рисунках 2.13 - 2.19 изображены графики зависимости порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при подаче «-» 3В 5 минут. Измерения светочувствительности проводились каждые 5 минут. Кривая 1 соответствует измерению после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению вдоль пленки в точке 660 мкм, 3 кривая зеленая в точке 1570 мкм от начала пленки.

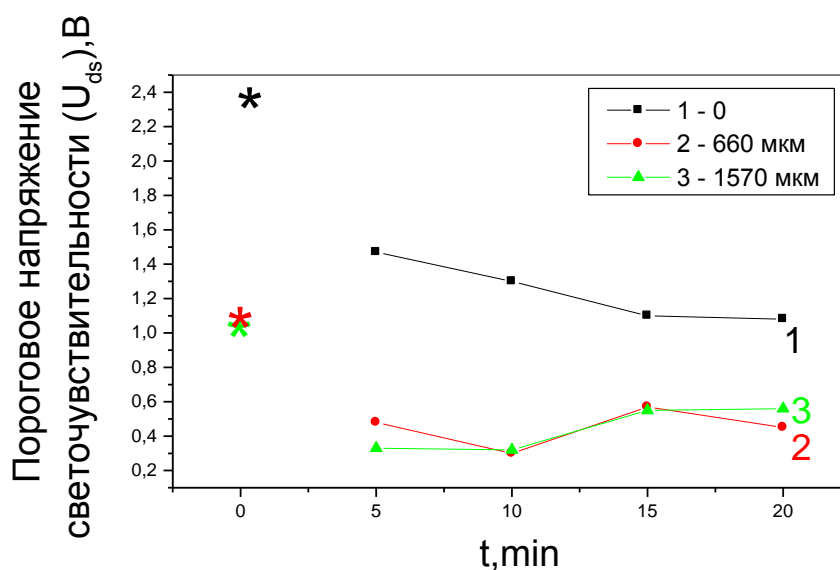


Рис. 2.13. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при подаче «-» 3В 5 минут. Измерения светочувствительности проводились каждые 5 минут. $T_k=20^{\circ}\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. *- Исходное напряжение перед подачей напряжения. Кривая 1 соответствует измерению

напряжения U через время в фиксированных точках (0; 4; 9,5 делений), что соответствует 0; 660 мкм; 1570 мкм.

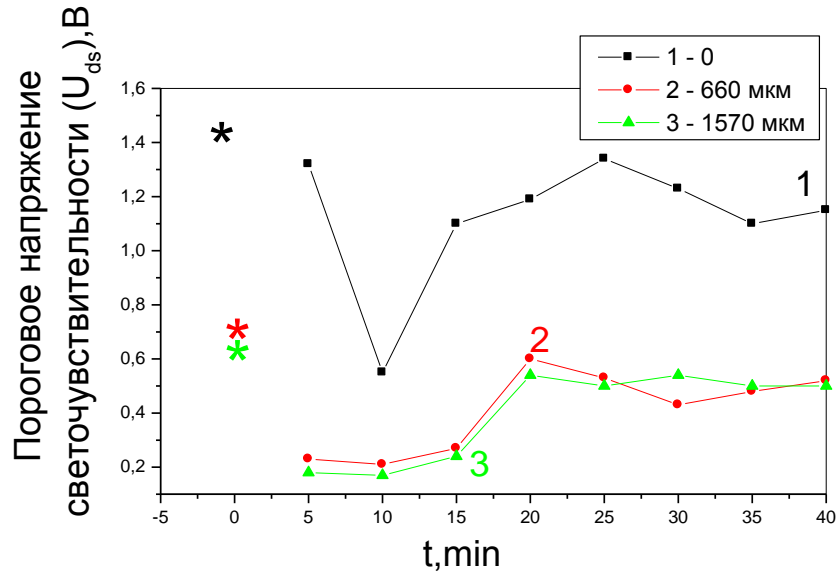


Рис. 2.14. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при подаче «-» 3В 5 минут. Измерение светочувствительности проводились каждые 5 минут. $T_k=21^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. *- Исходное напряжение перед подачей напряжением. Кривая 1 соответствует измерению после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению по длине пленки на глубине 660 мкм, 3 кривая на глубине 1570 мкм от начала пленки.

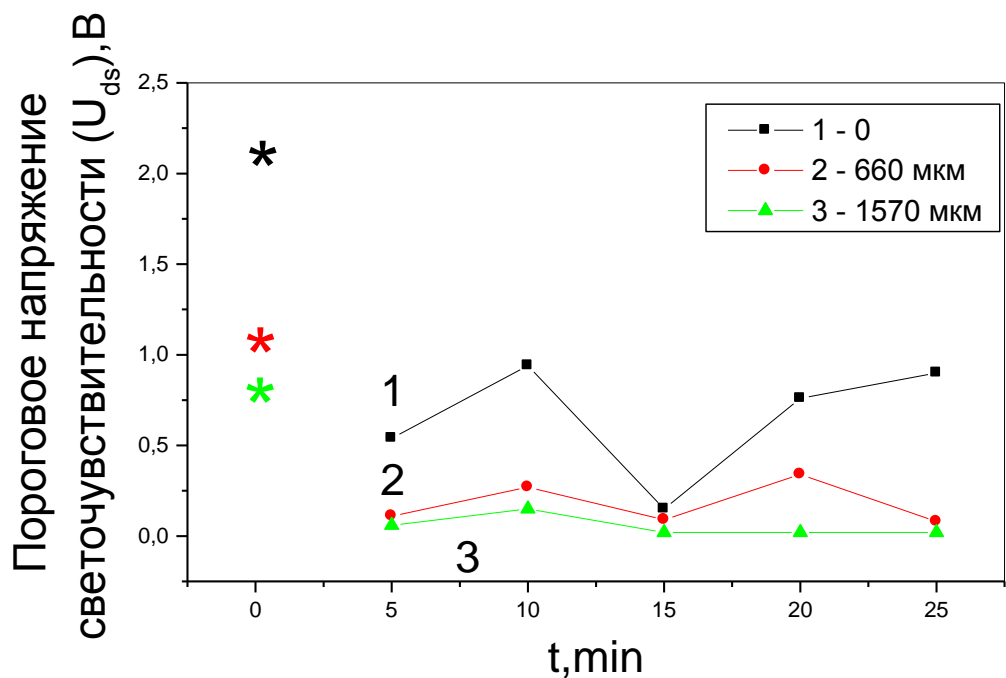


Рис. 2.15 Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при подаче «-» 3В 5 минут. Измерение светочувствительности проводились каждые 5 минут. $T_k=21^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №4. *- Исходное напряжение перед подачей напряжения. Кривая 1 соответствует измерению после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению длине пленки на глубине 660 мкм, 3 кривая на глубине 1570 мкм от начала пленки.

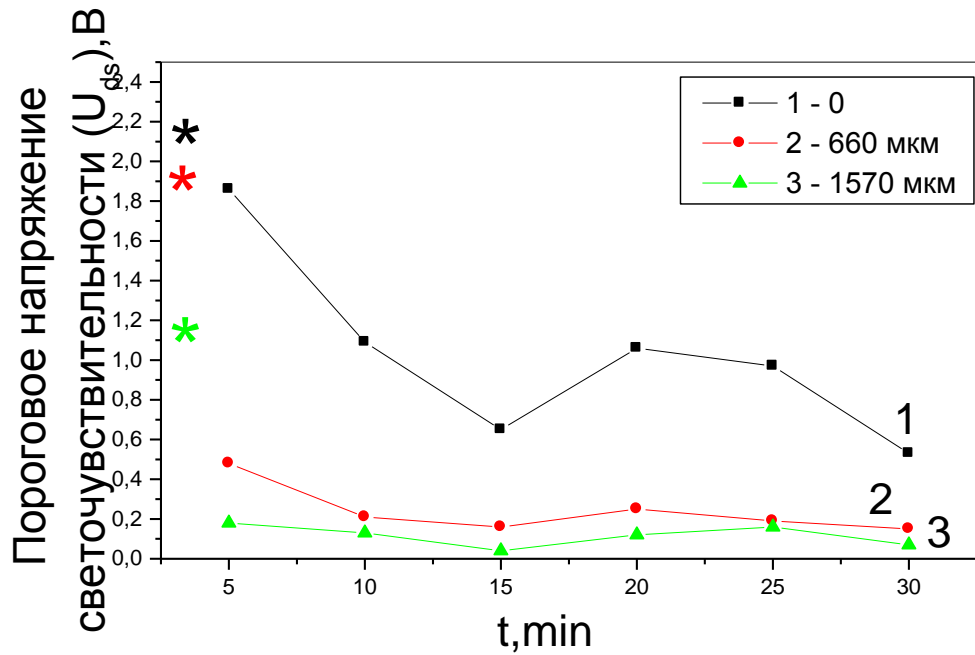


Рис. 2.16. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при подаче «-» 3В 5 минут. Измерение светочувствительности проводились каждые 5 минут. $T_k=21^{\circ}\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. *- Исходное напряжение перед подачей напряжения. Кривая 1 соответствует измерению после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению вдоль пленки на глубине 660 мкм, 3 кривая на глубине 1570 мкм от начала пленки.

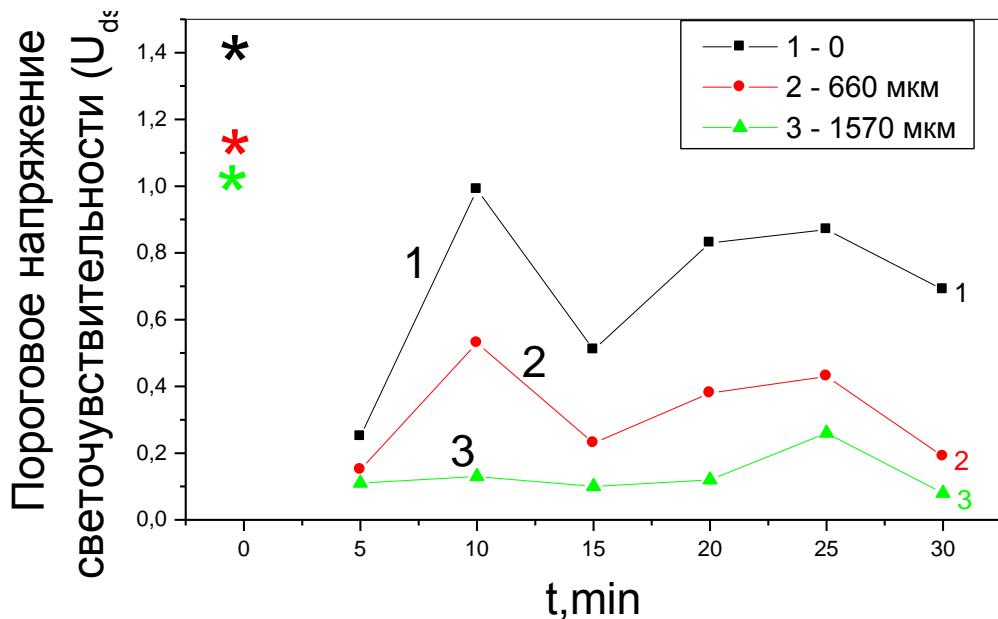


Рис. 2.17. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при подаче «-» 3В 5 минут. Измерение светочувствительности проводились каждые 5 минут. $T_k=21^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. *- Исходное напряжение перед подачей напряжения. Кривая 1 соответствует измерению после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению вдоль пленки на глубине 660 мкм, 3 кривая на глубине 1570 мкм от начала пленки.

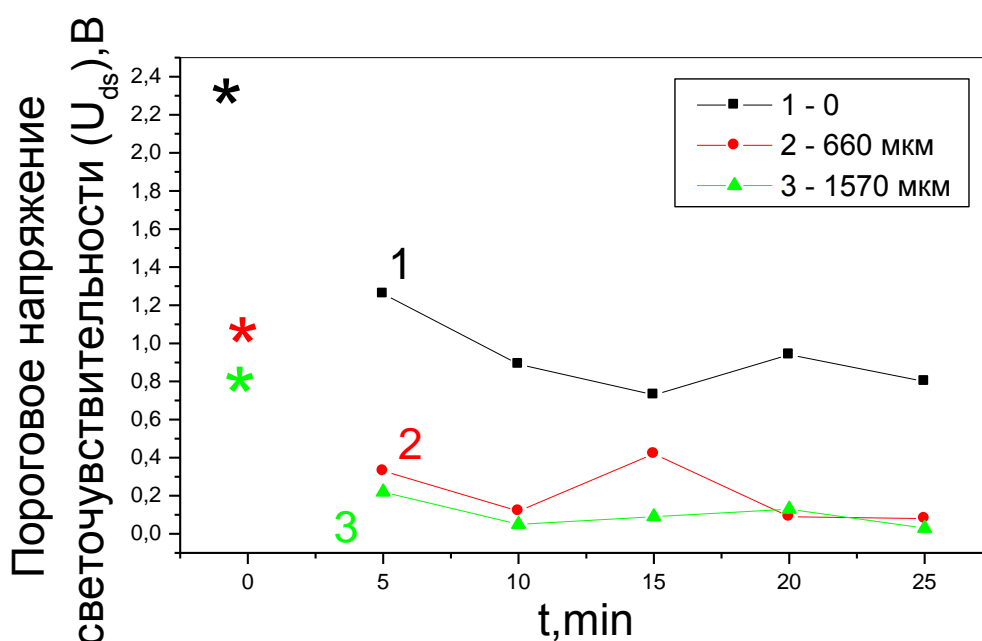


Рис. 2.18. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при подаче «-» 3В 5 минут. Измерение светочувствительности проводились каждые 5 минут. $T_k=21^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. *- Исходное напряжение перед подачей напряжения. Кривая 1 соответствует измерению после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению вдоль пленки на глубине 660 мкм, 3 кривая на глубине 1570 мкм от начала пленки.

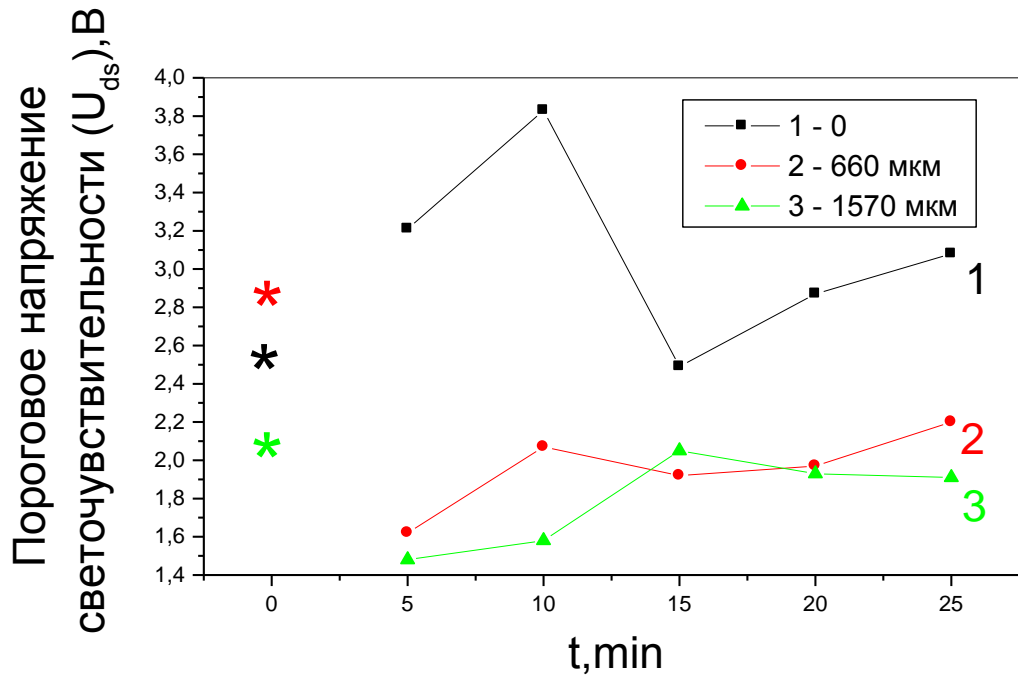


Рис. 2.19. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при подаче «←» 3В 5 минут. Измерение светочувствительности проводились каждые 5 минут. $T_k=21^{\circ}\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. *- Исходное напряжение перед подачей напряжения. Кривая 1 соответствует измерению после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению вдоль пленки на глубине 660 мкм, 3 кривая на глубине 1570 мкм от начала пленки.

На рисунке 2.20 изображен график среднего значения зависимости порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при подаче «→» 3В 5 минут. Измерение светочувствительности проводились каждые 5 минут. Кривая 1 соответствует измерению после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению вдоль пленки на глубине 660 мкм, 3 кривая на глубине 1570 мкм от начала пленки.

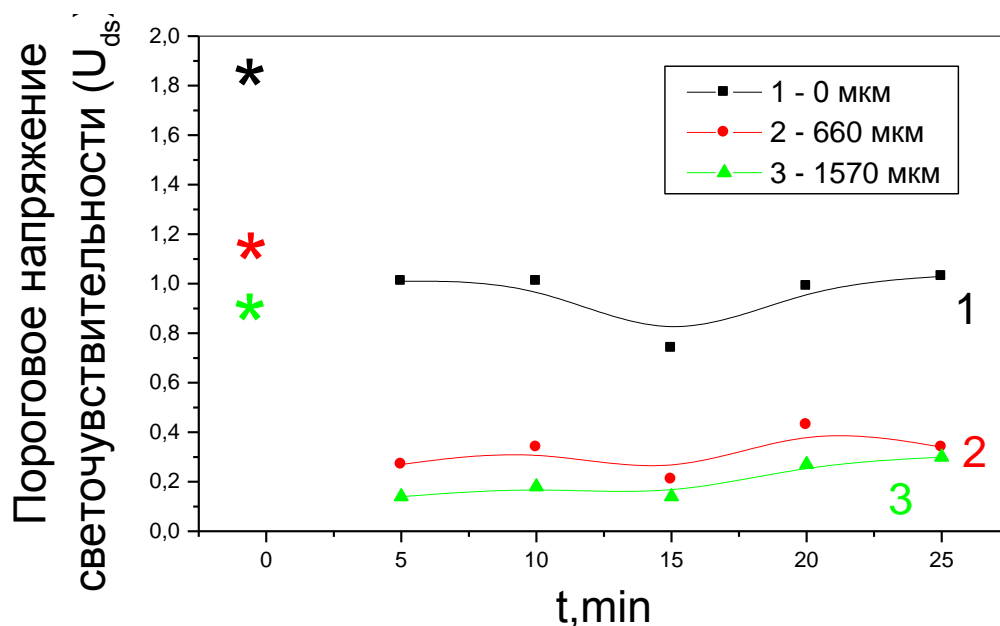


Рис. 2.20. Среднее значение порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при подаче «-» 3В 5 минут. Измерения светочувствительности проводились каждые 5 минут. $T_k=21^{\circ}\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. Кривая 1 соответствует измерению после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению вдоль пленки на глубине 660 мкм, 3 кривая на глубине 1570 мкм от начала пленки.

Анализируя измерения зависимости порогового напряжения светочувствительности можно увидеть, что при подаче «-» 3В дают понижение напряжения светочувствительности.

Следующая серия экспериментов проводится с положительной полярностью напряжения относительно подложки.

На рисунках 2.21, 2.22 изображены графики зависимости порогового напряжения исчезновения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, после предварительной подачи «+» 3В 5 минут. Измерения светочувствительности проводились каждые 5 мин. Кривая 1 соответствует измерению после отдыха ячейки в течение суток, кривая 2 соответствует измерению вдоль пленки на глубине 660 мкм, кривая 3 на глубине 1570 мкм.

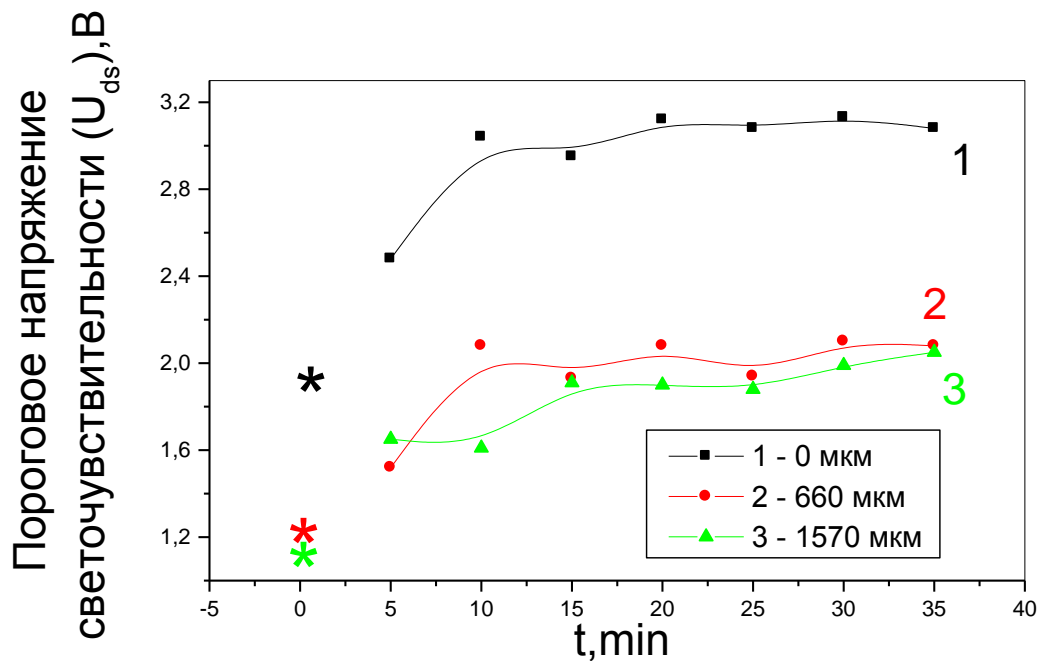


Рис. 2.21. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод в фиксированных точках (1, 2,3) от времени, после действия постоянного напряжения «+» 3В 5 минут. $T_k=20^{\circ}\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. *- Исходное напряжение перед подачей напряжения.

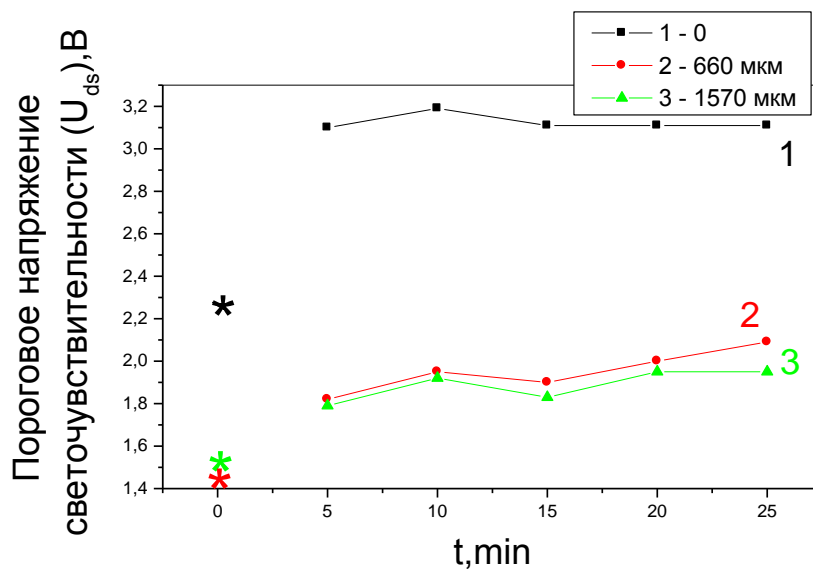


Рис. 2.22 Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод в фиксированных точках (1,

2,3) от времени, после действия постоянного напряжения «+» 3В 5 минут.
 $T_k=22^{\circ}\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №6. *- Исходное напряжение перед подачей напряжения.

Анализируя измерения зависимости порогового напряжения светочувствительности можно увидеть, что при подаче «+» 3В дают повышение напряжения.

Пронаблюдав, что при отрицательном предварительном постоянном действии дают понижение порога светочувствительности напряжения, а при положительном предварительном постоянном дают повышение, можно сделать вывод: увеличение или уменьшение порогового напряжения светочувствительности связано с предполагаемой адсорбцией на поверхности пленок. Поэтому полагаем, что зависимость порогового напряжения светочувствительности от толщины пленки также связана с адсорбцией ионов на пленке, следовательно, чем толще пленка, тем больше происходит адсорбция при некоторых начальных толщинах.

Далее проводим измерение с образцом №8, схематический вид которого изображен на рисунке 2.7 на котором видно в микроскоп 2 параллельные пленки с разной толщиной ZnO. Периферия между 1 и 2 пленкой, при виде в микроскоп не различима, поэтому при измерении считали как одну пленку.

На рисунках 2.23 - 2.28 представлены графики зависимости порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от номера пленки.

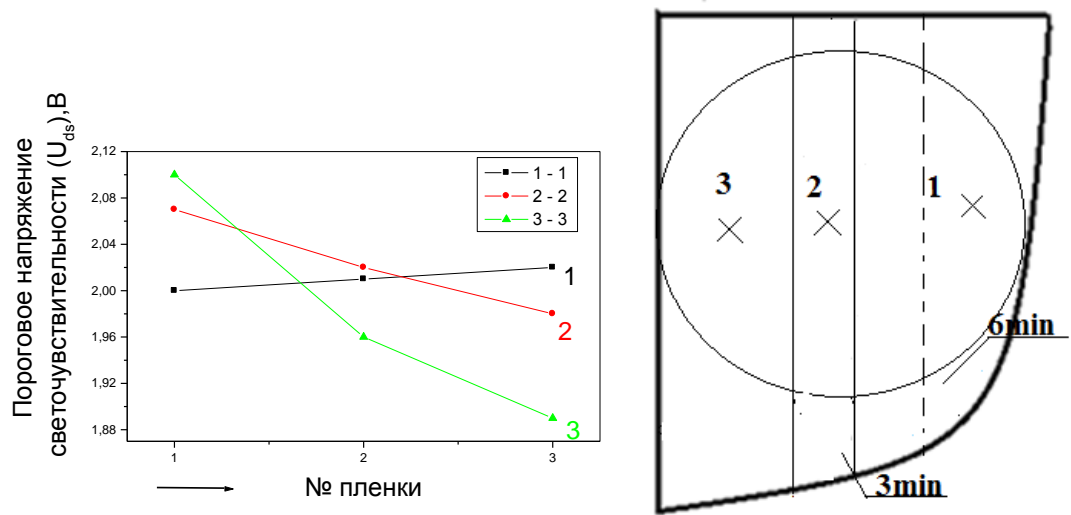


Рис. 2.23. а) Изменение светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от соответствующего номера пленки.

$T_k=22^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №8. Измерение осуществлялось справа налево.

б) схематический вид жк ячейки с образцом №8.

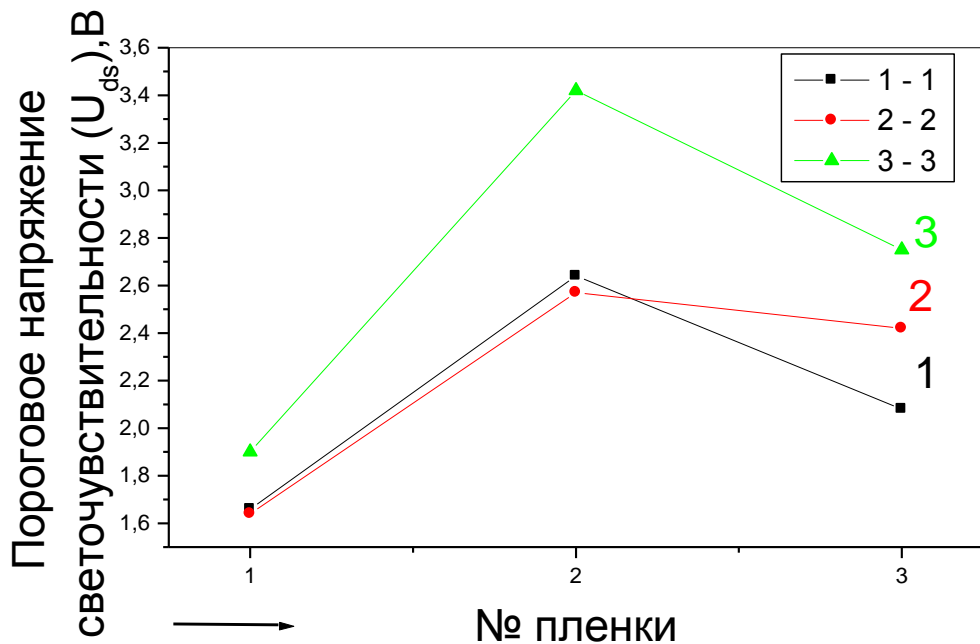


Рис. 2.24. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от соответствующего номера пленки.

$T_k=22^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №8. Измерение осуществлялось справа налево.

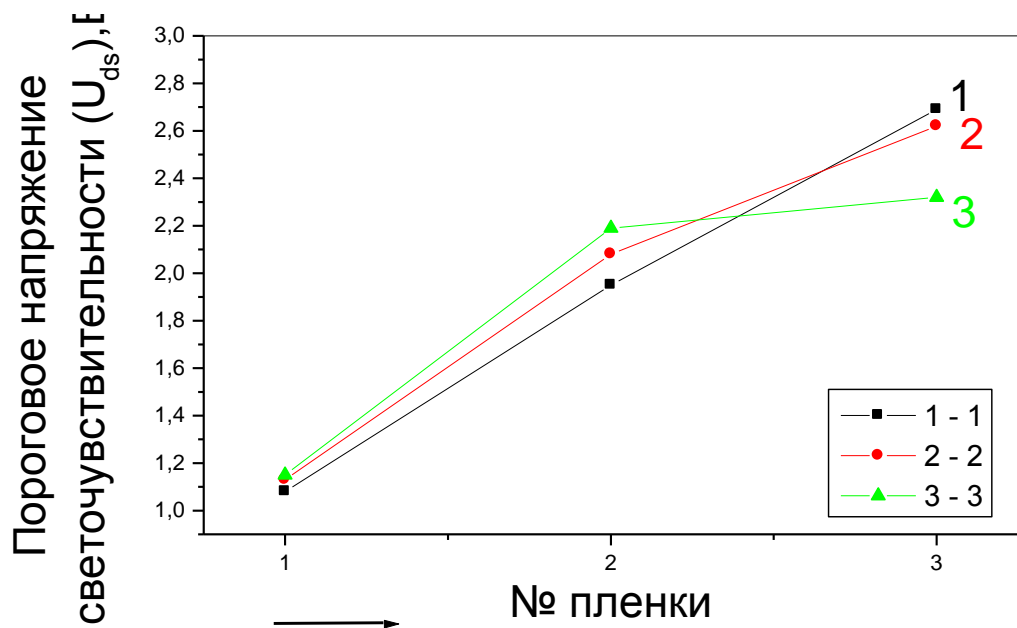


Рис. 2.25. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от соответствующего номера пленки. $T_k=22^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №8. Измерение спустя сутки после предыдущего измерения. Измерение осуществлялось справа налево.

Для проведения следующей серии экспериментов на жк ячейку подавалось отрицательное напряжение «-» 3В 5 минут. Сначала были сняты значения порогового напряжения светочувствительности после суточной релаксации, а затем после подачи «-» 3В 5 минут после релаксации в 5 минут.

На рисунке 2.26 представлен график порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод соответствующего номера пленки. Сначала было измерено после суточной релаксации, а затем после релаксации в 5 минут после подачи «-» 3В 5 минут. $T_k=22^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №8.

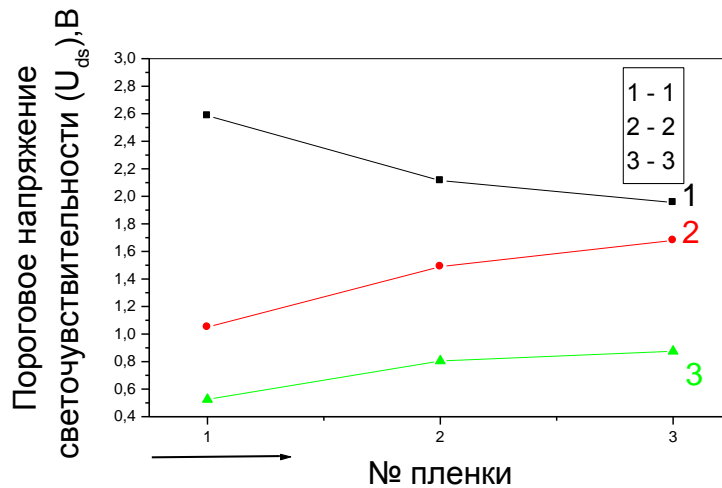


Рис. 2.26. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от соответствующего номера пленки. $T_k=22^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №8. Измерение спустя сутки после первого измерения. Измерение осуществлялось справа налево.

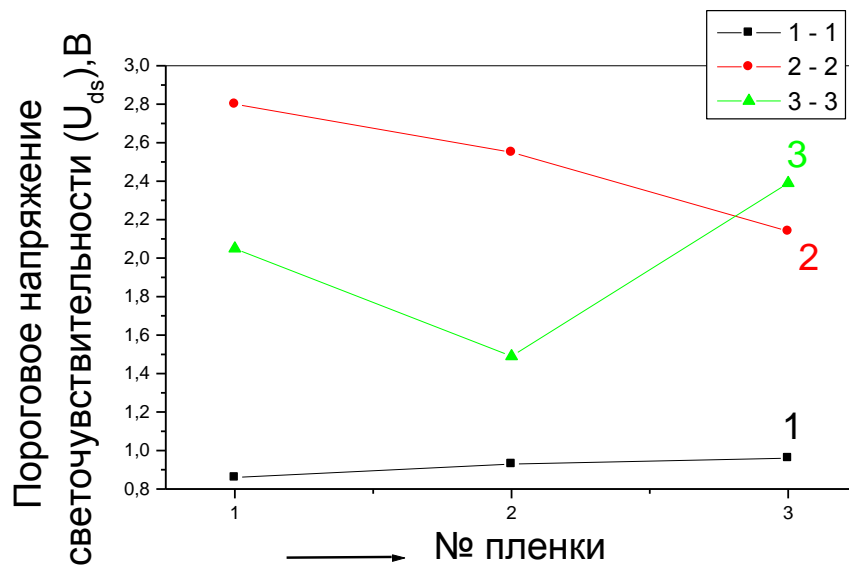


Рис. 2.27. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от соответствующего номера пленки. $T_k=21^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №8. Измерение снято спустя двое суток от первоначальных измерений. Измерение осуществлялось справа налево.

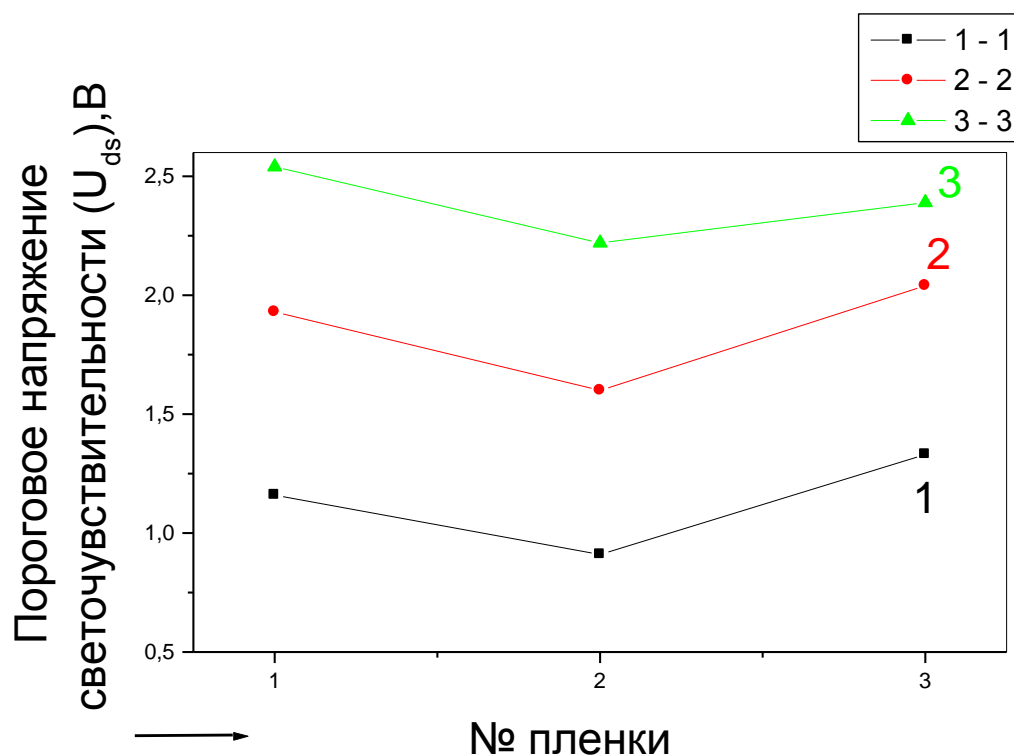


Рис. 2.28. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от соответствующего номера пленки. $T_k=21^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом №8. Измерение снято спустя двое суток от первоначальных измерений и спустя 4 минуты после предыдущих. Измерение осуществлялось справа налево (до переборки).

Для проведения следующей серии измерений были сняты значения порогового напряжения светочувствительности после суточной релаксации, а затем спустя 5 минут повторили. Измерения проводились спустя неделю после первоначальных измерений.

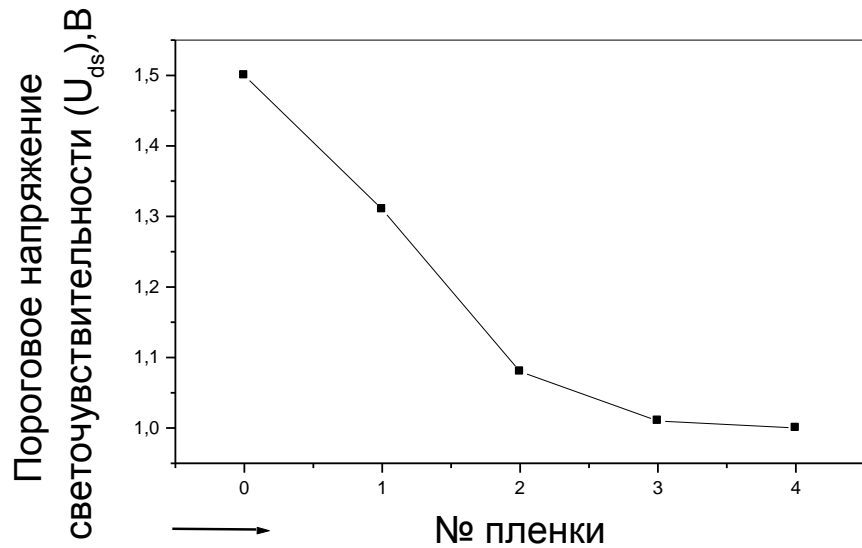


Рис. 2.29. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от номера пленки. $T_k=21^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка №8. Измерение снято спустя неделю от первоначальных измерений. Измерение проводится до 1 пленки, между 1 и 2 пленками и после 2 пленки (до переборки).

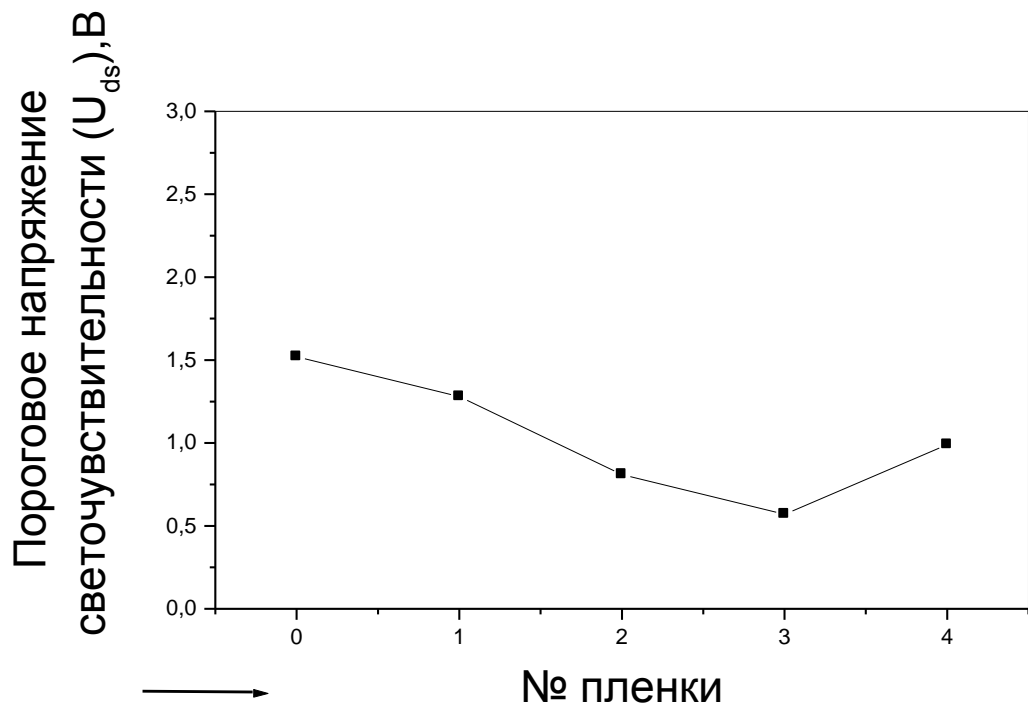


Рис. 2.29. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от номера пленки. $T_k=21^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка №8. Измерение снято спустя неделю от первоначальных измерений. Повторное измерение через 5 минут после предыдущего. Измерение проводится до 1 пленки, между 1 и 2 пленками и после 2 пленки.

Далее проводим измерение с жк ячейкой №8, после переборки, схематический вид которой изображен на рисунке 2.30 (б) и представляет собой 4 параллельные пленки с разной толщиной Zn. Измерение проводится до 1 пленки, между 1 и 2, между 2 и 3, между 3 и 4, и после 4 пленки.

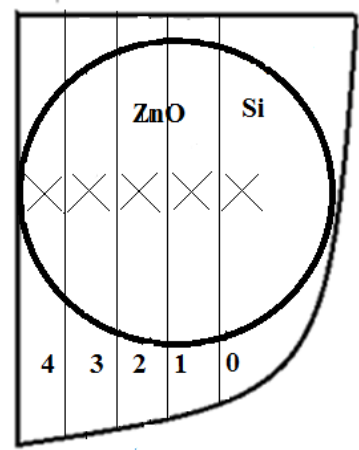
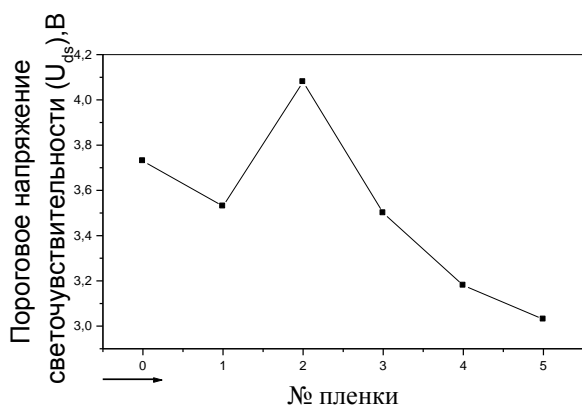


Рис. 2.30. а) Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от номера пленки. $T_k=23^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка №8, после переборки. б) Схематическое изображение жк ячейки с образцом №8.

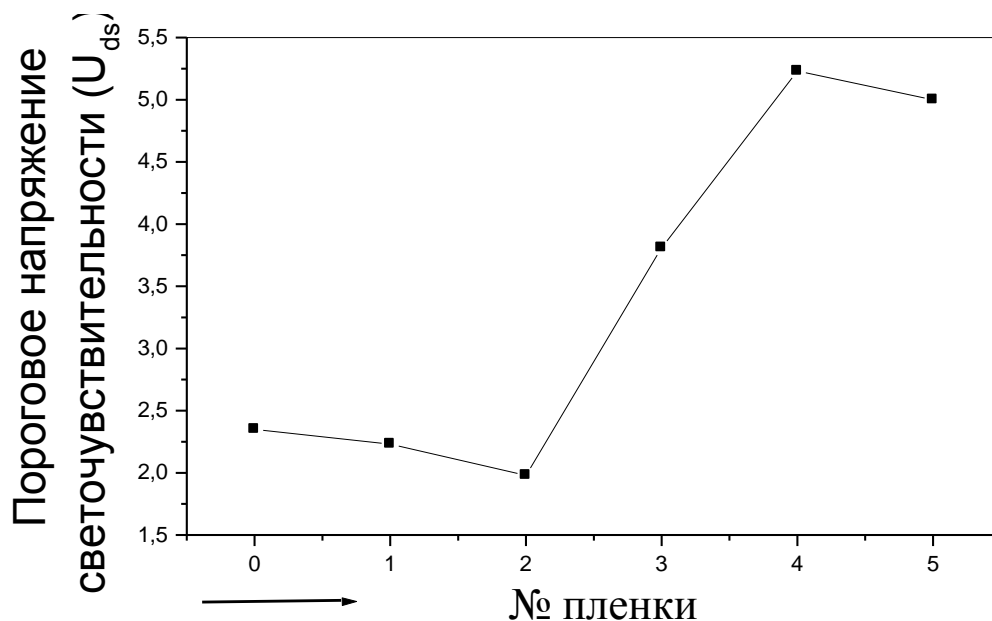


Рис. 2.31 Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от номера пленки. $T_k=23^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка №8, после переборки. Повторное измерение, спустя 5 минут.

На рисунке 2.32 представлен график зависимости порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от № пленки.

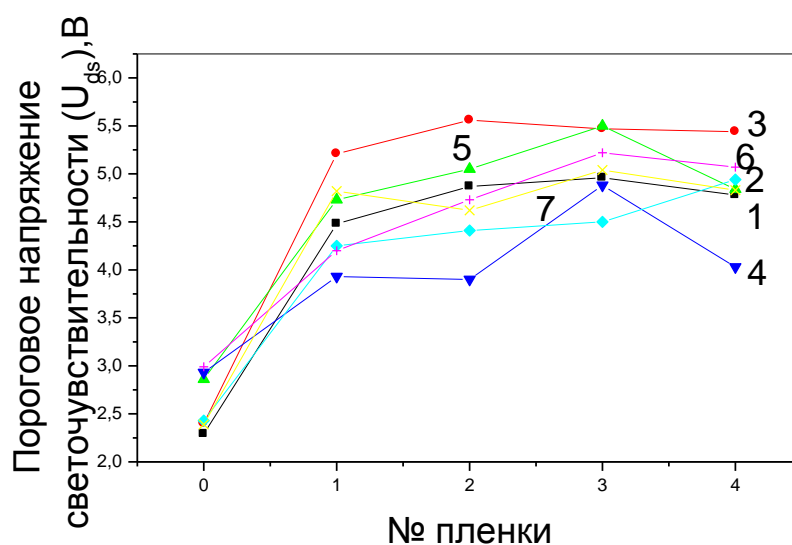


Рис. 2.32. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от № пленки. $T_k=24^\circ\text{C}$,

$\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка №8 от 12.01.17г после переборки вместе за несколько дней измерений. 1 – спустя 20 минут после сборки ячейки, 2,3,4,5,6,7 – каждое измерение через 1 сутки.

На рисунках 2.33-2.34 представлены график зависимости порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от № пленки спустя 10 дней от первоначального измерения.

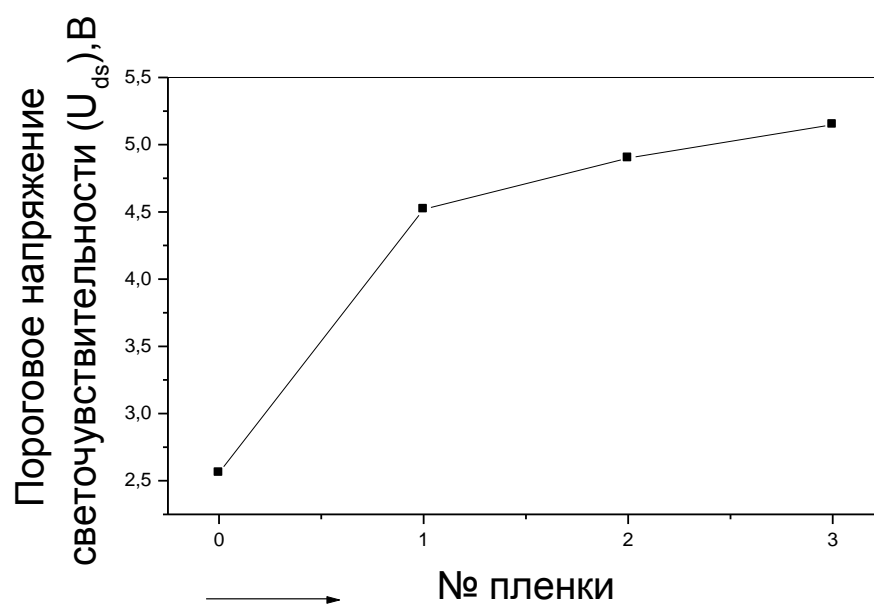


Рис. 2.33. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от № пленки. $T_k=25^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка №8 от 12.01.17г.

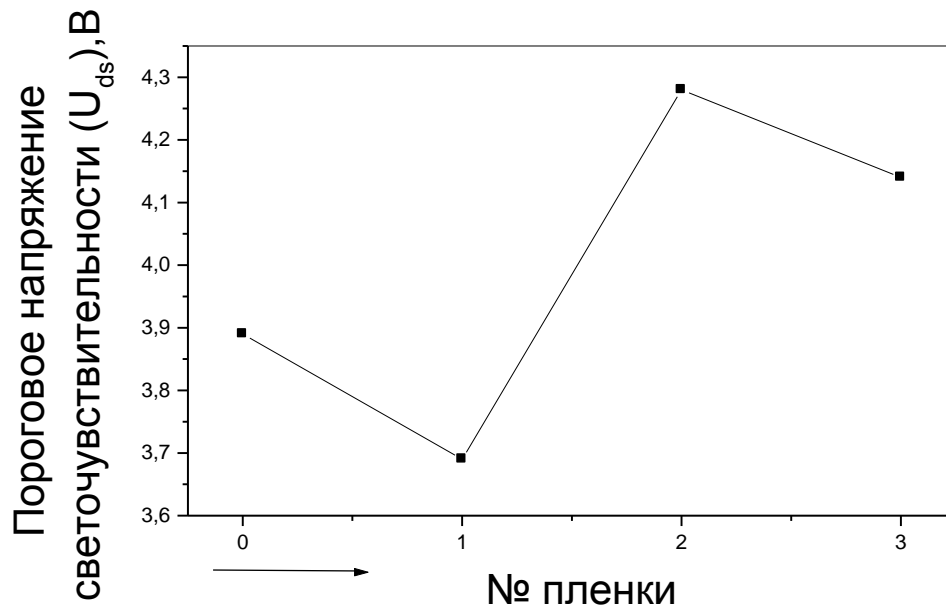


Рис. 2.34. Зависимость порогового напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод от № пленки. $T_k=25^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка №8 от 12.01.17г. Через 5 минут от предыдущего.

2.4.3. Наклонное напыление ZnO

Для дальнейшей серии измерений была использована жк ячейка с образцом кремния №9. На рисунках 2.33- 2.36 изображены графики пороговых напряжений светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки.

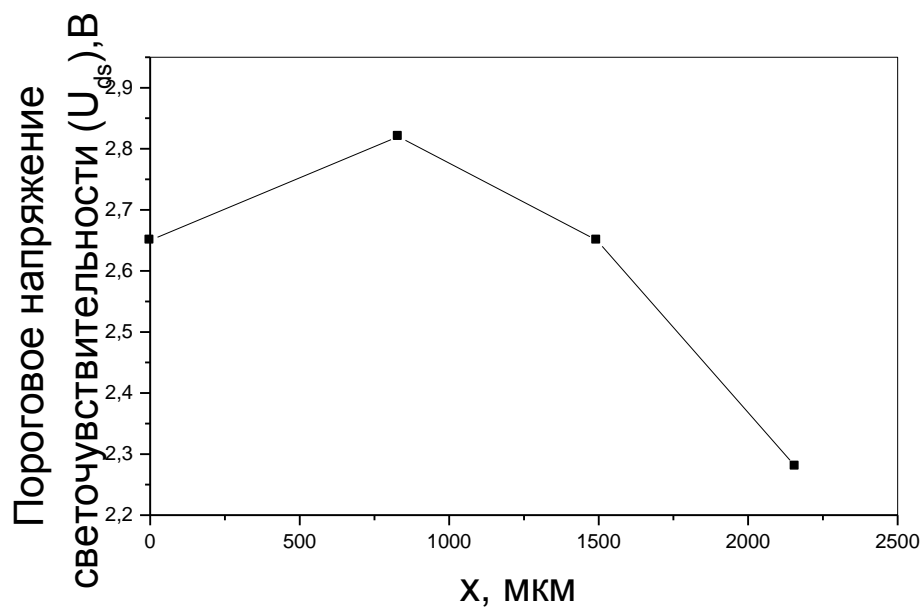


Рис. 2.33. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод по длине пленки. $T_k=23^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом кремния №9 от 20.03.18 г.

На рисунке 2.34. изображен график порогового напряжения светочувствительности структуры а) вдоль пленки спустя сутки после первоначального измерения; б) спустя 5 минут после предыдущего измерения и при понижении напряжения на 1В.

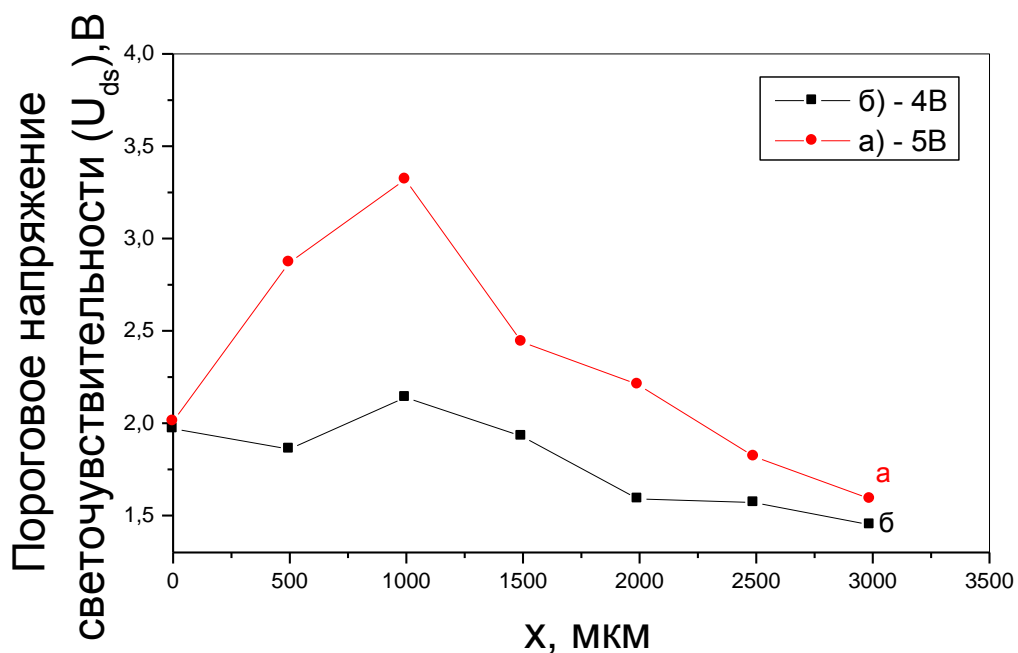


Рис. 2.34. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки: а) $T_k=23^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом кремния №9 от 20.03.18 г. Измерение спустя сутки, от первоначального. б) $T_k=23^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=4\text{В}$, жк ячейка с образцом кремния №9 от 20.03.18 г. Измерение спустя сутки от первоначального и через 5 минут от предыдущего и при понижении напряжения на 1В.

На рисунке 2.37 изображены кривые порогового напряжения светочувствительности структуры вдоль пленки спустя 6 суток после первоначального измерения.

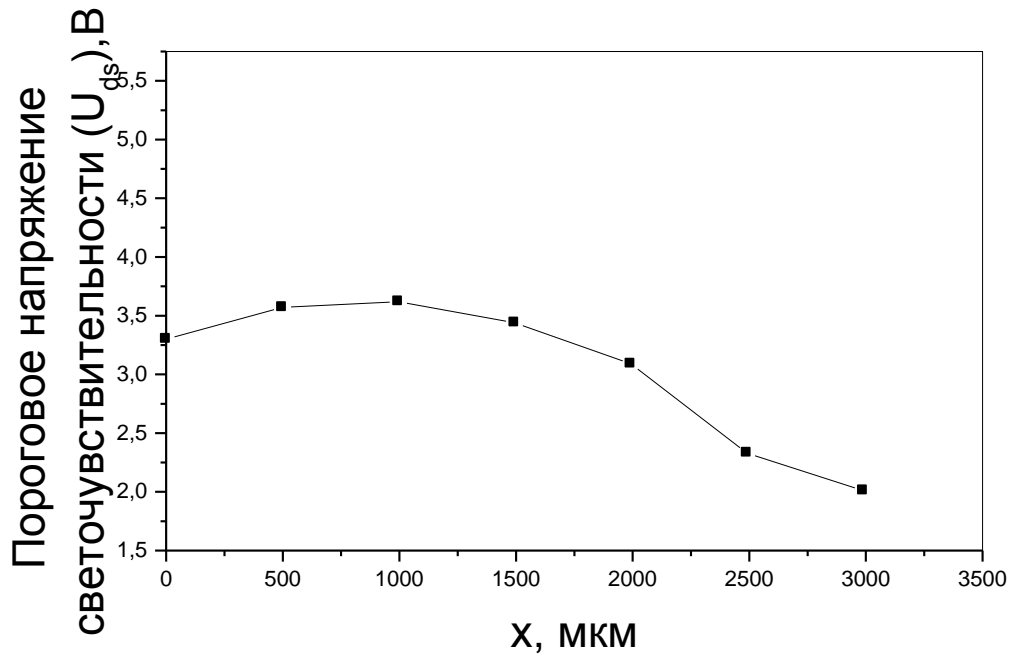


Рис. 2.37. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки. $T_k=22^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом кремния №9 от 20.03.18 г. Измерение спустя 6 суток от первоначального.

Для проведения исследований в следующей серии экспериментов измерялось пороговое напряжение в структуре по длине пленки и по высоте, относительно расположения самой пленки. На рисунках 2.38 - 2.41 изображены графики порогового напряжения в структуре вдоль длины пленки и по высоте, относительно расположения пленки.

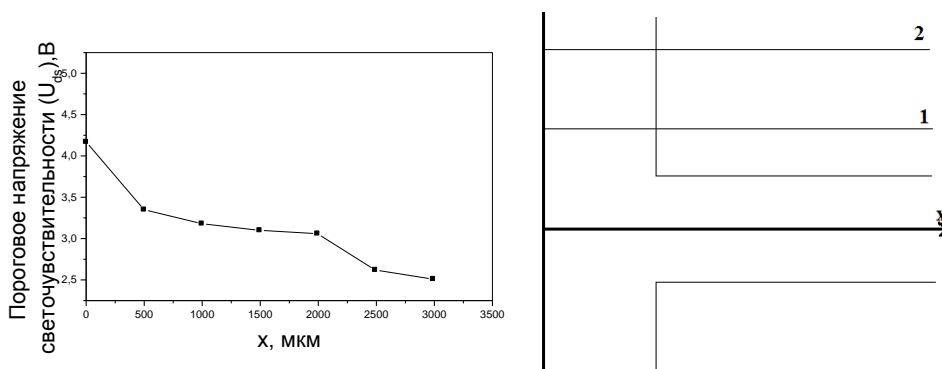


Рис. 2.38. а) Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки. $T_k=22^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$,

$U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом кремния №9 от 20.03.18 г. Измерение спустя 7 суток от первоначального. Измерение вдоль пленки. б) Схематическое изображение локальных точек измерения.

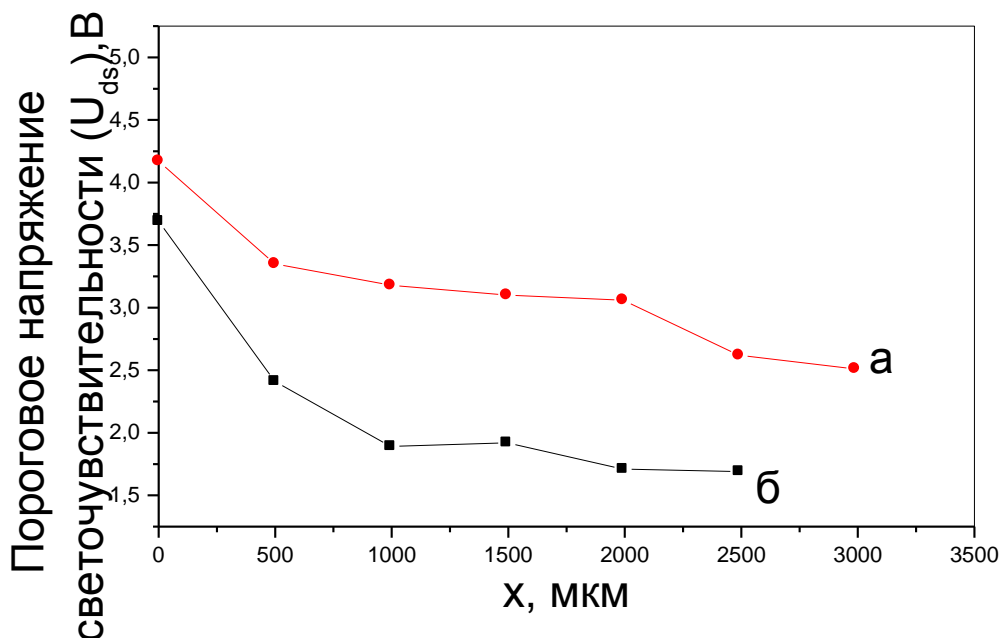


Рис. 2.39. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль «канала». $T_k=22^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом кремния №9 от 20.03.18 г. Измерение спустя 7 суток от первоначального. Измерение вдоль пленки и выше пленки на 1 см. а)- вдоль пленки; б - выше на 1 см).

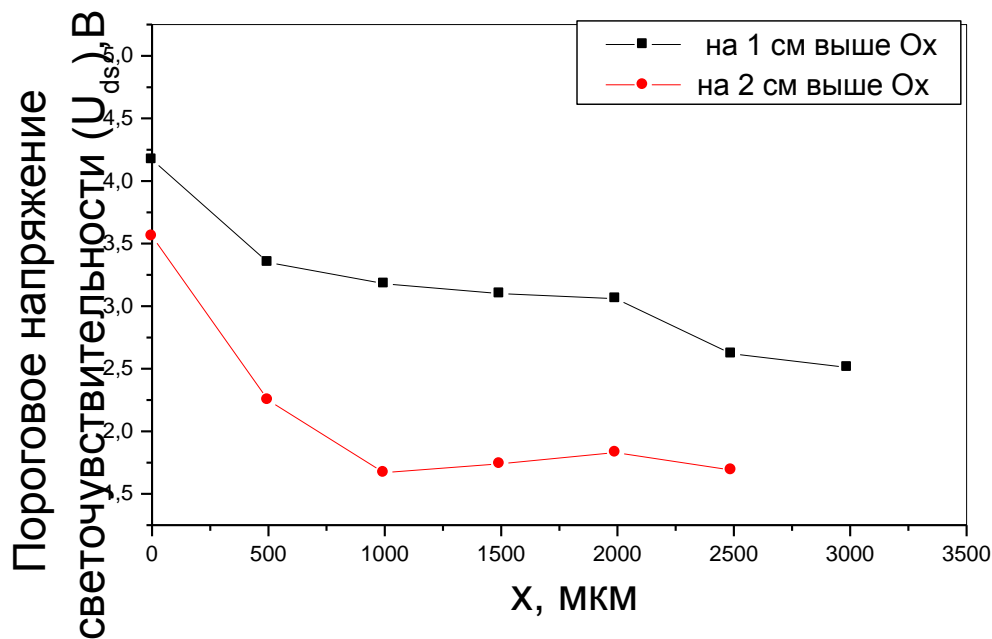


Рис. 2.40. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки. $T_k=22^{\circ}\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом кремния №9 от 20.03.18 г. Измерение спустя 7 суток от первоначального. Измерение вдоль пленки и выше пленки на 2 см.

На рисунке 2.41 изображен график пороговых напряжений светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод вдоль пленки, при различных положениях относительно оси OX.

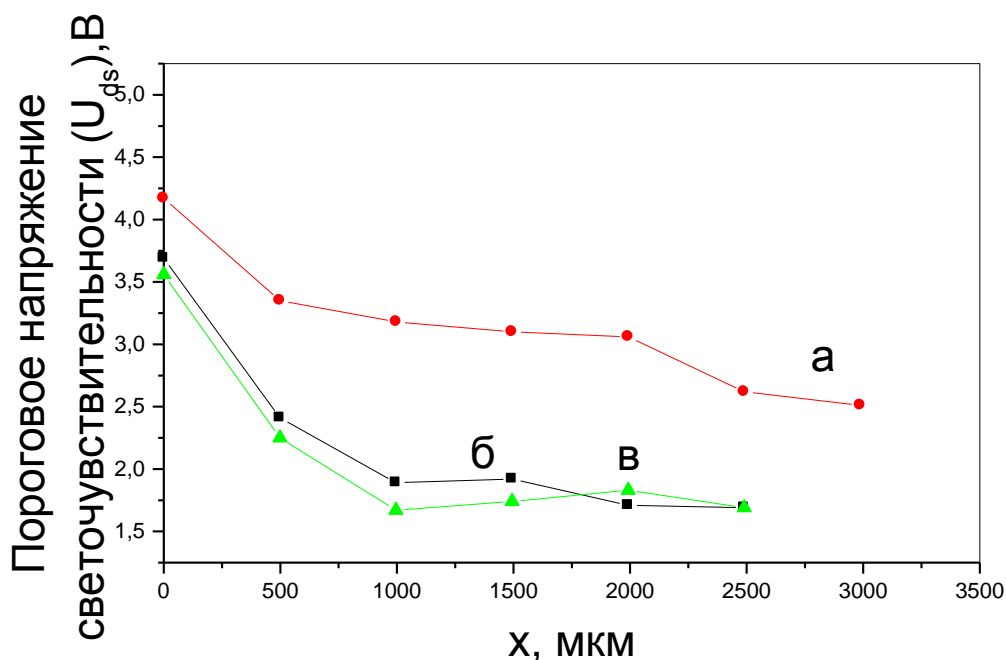


Рис. 2.41. Пороговое напряжения светочувствительности структуры Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод по высоте пленки. $T_k=22^\circ\text{C}$, $\nu=80\text{кГц}$, $U=5\text{В}$, жк ячейка с образцом кремния №9 от 20.03.18 г. Измерение вдоль пленки и выше пленки на 1;2 см. а - по длине пленки б - на 1 см выше Ox , в - на 2 см выше Ox .

На графике видно, что пороговое напряжение светочувствительности изменяется вдоль пленки с косым напылением, на Si пороговое напряжение светочувствительности ниже. Таким образом, как на нормально напыленных пленках, так и на косо напыленных пленках наблюдается явная зависимость порога напряжения светочувствительности от толщины. Пороговое напряжение светочувствительности над косо напыленной пленкой выше, чем над Si.

2.4.4. Ориентация молекул жидких кристаллов

На рисунках 2.42, 2.43 представлены микроскопические изображения ячеек, на которых видна область, соответствующая косо напыленной пленки и область Si, которая была закрыта маской при напылении.

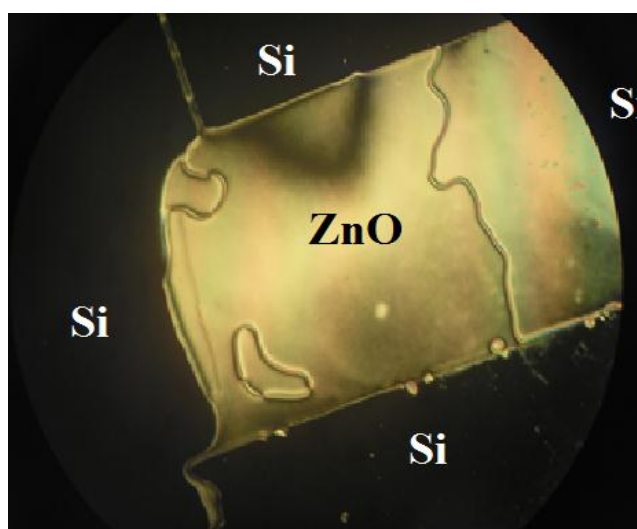


Рис.2.42. Изображение жк: 1-нормальное напыление; 2- косо напыление.

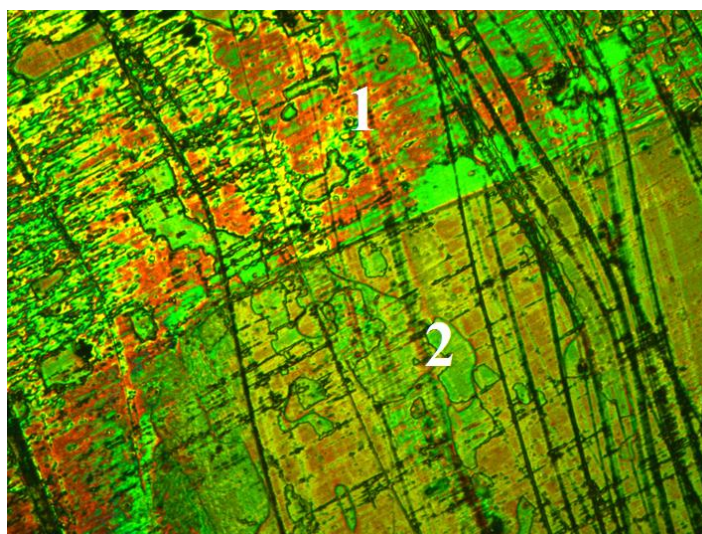


Рис. 2.42. Изображение жк: 1- область под маской
2- область косоного напыления

Хорошо видно, что ориентация различна. Учитывая, что на стекле изначально задается планарная ориентация кристалла, видим различие двулучепреломления над этими поверхностями ZnO и Si. Напыление происходило в тех же условиях, 3 минуты при 30 Вт. В собранной ячейке наблюдается своего рода полоска, соответствующая косому напылению пленки ZnO на Si.

Заключение

В ходе выполнения исследования были получены следующие результаты:

1. Показано, что в структуре Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод с плёнками ZnO, которые получены магнетронным способом, пороговое напряжение светочувствительности структуры, зависит от толщины пленки ZnO. Смещение порога светочувствительности структуры обусловлено ионной адсорбцией на пленках ZnO.

2. Нормально напыленные пленки ZnO на поверхности кремния вызывают гомеотропную ориентацию молекул жидкого кристалла 5CB.

3. Косо напыленные пленки ZnO на поверхности кремния вызывают планарную ориентацию молекул жидкого кристалла 5CB.

4. Накопление ионных зарядов у поверхности кремния в структуре Si/ZnO/нематик/прозрачный электрод под действием постоянного напряжения вызывает соответствующее смещение порога светочувствительности.

Литература

1. Жуков В.В., Кривобоков В.П., Янин С.Н., Распыление мишени магнетронного диода в присутствии внешнего ионного пучка, Журнал технической физики, 2006, том 76, вып. 4.
2. Моргулис Н. Д., Катодное распыление, Успехи физических наук, 1946, т. 28.
3. Данилин Б.С. Магнетронные распылительные системы / Б.С.Данилин, В.К. Сырчин. – М.: Радио и связь; 1982 – 72 с.
4. Гусев Е.Ю. Исследование режимов нанесения нанокристаллических пленок оксида цинка методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления [Текст] / Е.Ю. Гусев, В.А. Гамалеев, А.С. Михно, О.О. Мироненко // Фундаментальные исследования. – 2012 – №. 11-2. – С. 389
5. <https://studfiles.net/preview/6338835/>
6. Томилин М.Г., Невская Г.Е. Фотоника жидких кристаллов, СПб, 2011.
7. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н., Методы модуляции и сканирования света, М., 1970
8. http://lib.alnam.ru/book_copt.php?id=3
9. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е., Физические основы акустооптики, М., 1985;
10. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука; 1977. – 988с
11. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. М: Наука;
12. http://scask.ru/book_s_phis3.php?id=50
13. http://books.sernam.ru/book_izm.php?id=28
14. Ржанов А.В. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М: Наука; 1971. – 480с