

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

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ- ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТРУКТУРЫ SI/НЕМАТИК/МЕТАЛЛ ВБЛИЗИ ПЕРЕХОДА
ФРЕДЕРИКСА**

Магистерская диссертация

обучающегося по направлению подготовки 03.04.02 Физика
очной формы обучения, группы 12001737
Рыжиковой Екатерины Юрьевны

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

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

БЕЛГОРОД 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	5
1.1 Жидкие кристаллы, структура, свойства	5
1.2 Модуляторы света, различия и особенности.....	10
1.3. МДП (металл/диэлектрик/полупроводник) структура.....	13
1.4 Интегрирующая цепь	18
1.5 Программное обеспечение labview	21
ГЛАВА II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	23
2.1 Ячейка Si/нематик/металл.....	23
2.2 Экспериментальная установка	24
2.3 Проверка метода падения напряжения путем фоторегистрации	25
2.4 Емкостные свойства структуры Si/нематик/металл.....	30
2.5 Фотоемкостные свойства структуры Si/нематик/металл	35
2.5.1 Фотоемкостные свойства структуры Si/нематик/металл без накопления заряда.....	35
2.5.2 Фотоемкостные свойства структуры Si/нематик/металл с предварительным накоплением заряда.....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	55
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	56

ВВЕДЕНИЕ

Нашу жизнь невозможно представить без приборов и техники, которые основаны на жидких кристаллах. Подобранный состав жидкокристаллического вещества, создают индикаторы для различных диапазонов температуры, с помощью которых определяют неисправные или неработающие элементы. Созданы измерители давления, детекторы ультразвука. Создаются разные приборы на основе жидких кристаллов: телефоны, компьютеры, модуляторы света, цветные телевизоры с жидкокристаллическим экраном.

Большой интерес вызывают модуляторы света - приборы для управления световым потоком, а именно, такими параметрами, как фаза, поляризация, амплитуда, частота [1; 2]. Подавляющее число модуляторов света основано на МДП (металл/диэлектрик/полупроводник) структурах. Остаются нерешенными задачи поведения таких структур, вблизи перехода Фредерикса потому, что исследования таких структур осуществляются мостовыми емкостными методами, рабочее напряжения которых менее 1 вольта, тогда как пороги перехода Фредерикса насчитывают несколько вольт.

В структуре Si/нематик/металл в следствие отсутствия диэлектрика появляется ряд возможностей в обработке оптической информации, которые связаны с тем, что в такой структуре имеет место накопление и перенос ионных зарядов, которые могут служить дополнительными параметрами управления модуляторов. Вследствие отсутствия в структуре Si/нематик/металл диэлектрической пленки, нет возможности использовать мостовые емкостные методы для ее изучения. Следовательно, в данной работе будет рассматриваться возможность использования метода падения переменного напряжения для исследований структуры при напряжениях сравнимых с величиной порога Фредерикса. Поэтому данное исследование является актуальной задачей.

В работе для сбора данных вольт-фарадных характеристик использовался программный комплекс LabVIEW 7.1, а построение графиков производилось с помощью Origin.

Объект исследования - метод падения напряжения на структуре.

Предмет исследования - структура Si/нематик/металл.

Цель работы - исследовать возможность использования метода падения напряжения для исследования емкостных и фотоемкостных свойств структуры Si/нематик/металл, как прототипа оптически адресуемого модулятора света, для напряжений, сравнимых с порогом Фредерикса.

Задачи, которые необходимо выполнить:

- 1) Провести анализ литературных источников: нематический жидкий кристалл и его особенности, модуляторы света, МДП (металл/диэлектрик/полупроводник) структура, интегрированные цепочки;
- 2) Установить возможность использования метода для регистрации емкостных и фотоемкостных свойств структуры Si/нематик/металл;
- 3) Исследовать возможность регистрации нанометровых пленок на поверхности кремния в структуре Si/нематик/металл;
- 4) Исследовать проявление накопления и переноса ионных зарядов в жидком кристалле на фотоответ структуры Si/нематик/металл методом падения напряжения;
- 5) Провести сравнительные эксперименты с видеорегистрацией метода падения напряжения, а также с визуальной регистрацией светочувствительности структуры;

Структура состоит из введения, двух глав, заключения и использованных источников литературы.

Практическая значимость исследуемой проблемы: показано, что методом падения напряжения можно исследовать процессы обеднения и обогащения поверхности кремния в структуре Si/нематик/металл при напряжениях сравнимых с порогом Фредерикса.

ГЛАВА I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Жидкие кристаллы, структура, свойства

Структура Si/нематик/металл состоит из нематического жидкого кристалла.

Жидкие кристаллы - это вещества, которые находятся между кристаллическим твёрдым и изотропным жидким состоянием [3; 4]. Состоят эти вещества из длинных схожих на нить молекул. Они сохраняют черты жидкости (например, текучесть), и обладают характерной особенностью твёрдых кристаллов - анизотропией. Жидкие кристаллы имеют фотоупругие, электрооптические, нелинейно-оптические свойства [4].

Большинство веществ находятся только в трех агрегатных состояниях: жидком, газообразном и твердом (или кристаллическом), но есть и такое состояние как жидкокристаллическое. Такое состояние вещества было названо мезоморфным. Жидкие кристаллы называют, - мезофаза.

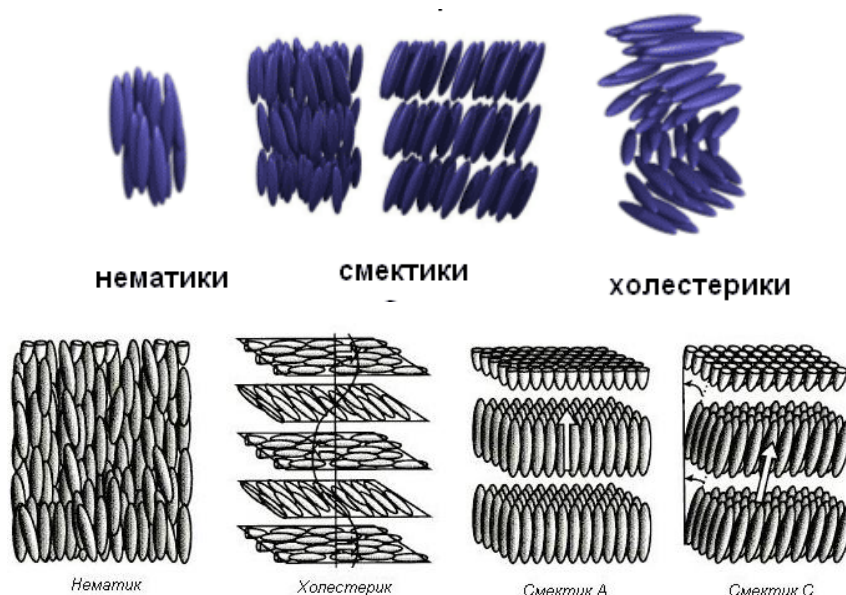


Рис. 1.1. Типы мезофаз или разновидности жидких кристаллов: нематик, холестерик, смектик

На рисунке 1.1 представлены типы жидких кристаллов, а именно структуру и направление молекул.

В конце XIX в. были обнаружены эти жидкокристаллические фазы. Немецкий ученый Ф. Рейнитцер, в 1888 году, в процессе изучения температурных зависимостей свойств производных холестерина, обнаружил эти фазы [5]. Он, нагревая кристаллическое вещество до определенной температуры увидел, как образовывался мутный расплав с анизотропными свойствами. Когда он продолжал нагревать то видел, как вещество просветлялось, переходя в изотропную фазу. А при охлаждении из изотропной фазы сначала появлялась мезофаза, и только после происходила кристаллизация. Вещества, переходящие в жидкокристаллическое состояние в процессе нагрева из кристаллической фазы или охлаждения из изотропной, были названы термотропными жидкими кристаллами. При работе с такими веществами были обнаружены еще вещества, которые обладали такими же кристаллическими свойствами при растворении до определенной концентрации, их называли лиотропными жидкими кристаллами [5].

Термин жидкие кристаллы ввел О.Леман. В 20-е годы нашего века Дж.Фридель предложил назвать жидкокристаллические системы мезоморфными фазами или мезофазами [5].

Существуют термотропные мезофазы. Получить их можно, изменяя показатель температуры. А именно, нагревая твердое вещество. Фазы возникают в определенном интервале температур и давлений.

Лиотропные - это две и более компонентные системы, которые образуются в смесях молекул вещества и воды [5].

Жидкие кристаллы могут образоваться при изменении концентрации растворов. При повышении концентрации происходит переход от неупорядоченного изотропного к упорядоченному анизотропному раствору. Молекулярную структуру фаз определяют по структуре, по поведению, например, при подаче напряжения. Структуру определяют по ориентации молекул (направлению директора). Молекулы способны менять свое

направление (переориентироваться) в магнитном поле, как вся структура, так и отдельные части. Первыми кто изучил процесс переориентации молекул в жидком кристалле под воздействием магнитного поля В. И. Цветков и В. Фредерикс [6].

Процесс, который происходит в жидком кристалле, при наложении электрического поля, а именно при облучении когерентным излучением, исследовали С. А. Пикин, Л. М. Блинов, А. С. Сонин [7; 8].

Нематический жидкий кристалл. В нашей структуре используется термотропный нематический жидкий кристалл 5СВ (4-н-пентил-4'-цианобифенил).

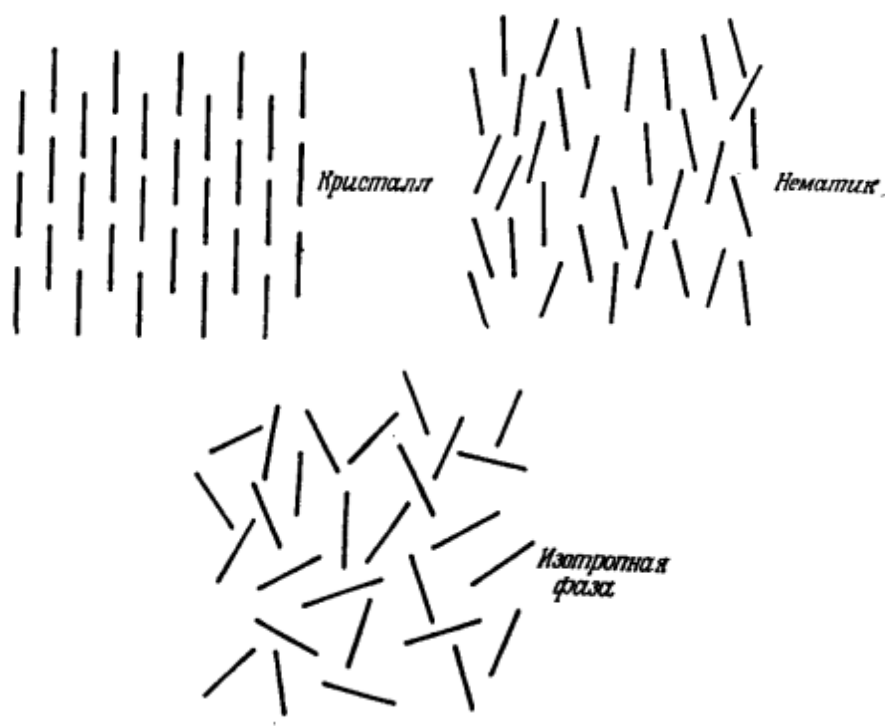


Рис. 1.2. Схема направления молекул в кристалле, нематике и изотропной фазе

Нематические жидкие кристаллы (Нематики) («нема», в переводе с греческого - нить) - это такие микроструктуры состоящие из молекул похожих на колбочки (нити или цилиндры) (см.рис.1.2). Оси молекул нематика ориентированы параллельно друг другу, а их центры масс

расположены хаотично. Нематики непроводящие органические жидкости. Направление осей (см.рис.1.3) молекул нематического жидкого кристалла задают единичным вектором n , который называют директором. Директор n и $-n$ эквивалентны.

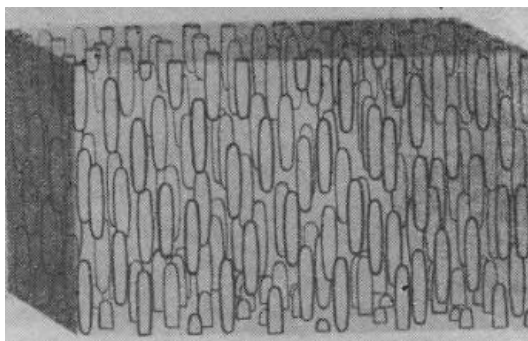


Рис.1.3. Ориентирование молекул в нематических жидких кристаллах

Свойства нематиков. Для большинства твердых кристаллов характерно свойство - двойное преломление света (двулучепреломление).

Воздействием малым электрическим или магнитным полем можно легко изменить структуру, а именно направления молекул жидкого кристалла, так как энергия деформации мала. Изменить структуру можно также температурой и механическим воздействием.

Структуру жидкого кристалла определяют с помощью поляризационного микроскопа на тонких слоях вещества.

Текстура жидкого кристалла может зависеть от различных условий, например, от того как быстро или медленно меняется температура; от толщины слоя вещества жидкого кристалла; от пластин и их свойств, между которыми помещено вещество.

Ориентация молекул в нематике бывает: планарная - параллельно стенкам и гомеотропная - перпендикулярно стенкам.

Нематически - диамагнитны. Это означает, что при включении магнитного поля в них возникает магнитный момент, направленный согласно правилу Ленца противоположно полю [3].

Когда прикладывается электрическое или магнитное поле, то жидкий кристалл деформируется (то есть происходит изменение направления молекул). Деформация происходит не однородно. Так как края молекул прикреплены к стенкам (стекло и подложка), деформация не происходит. А молекулы, которые находятся дальше от стенок подвергаются деформации. Молекулы вращаются, а могут и вовсе переместиться.

В нематике ориентированные жидкие кристаллы обладают диэлектрической анизотропией, которая является результатом наложения положительной поляризации смещения (вдоль длины молекулы) с отрицательной поляризацией ориентации (перпендикулярно оптической оси) [3; 9; 10].

Формула диэлектрической анизотропии имеет вид:

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\parallel}, \varepsilon_{\perp}$ - диэлектрические постоянные. Индексы показывают параллельное и перпендикулярное направление между молекулами.

Знак диэлектрической анизотропии, формула (1), зависит от того, какая поляризация преобладает, что в свою очередь определяется величиной и направлением дипольного момента [3; 9; 10].

Анизотропия электрических и оптических свойств приводит к различным эффектам. Например, эффекты ограниченные только диэлектрическими свойствами среды, они не связаны с протеканием электрического тока, и обладают анизотропией ε_a . Рассматривая внешнее электрическое поле, в котором напряженность равна E , жидкие кристаллы стремятся ориентироваться по направлению поля (переход, эффект Фредерикса), в котором ε максимальна. Переориентация направления директора тесно связано с изменением направления оптической оси, это означает, что изменяется все оптические свойства образца (двойное

преломление и поглощения света, вращения плоскости поляризации и так далее) [9; 11].

В процессе протекания электрического тока через жидкий кристалл из-за анизотропии их электропроводности возникает объемный заряд, который взаимодействует с полем E , и в следствии приводит к электрогидродинамической неустойчивости. В поляризационном микроскоп видим системы из светлых и темных полос из-за модуляции коэффициента преломления [9; 12].

1.2 Модуляторы света, различия и особенности

Жидкие кристаллы применяют в различных областях, одна из областей - пространственные модуляторы света. Это устройства оптической обработки информации.

Модуляторы света - устройства, с помощью которых можно управлять параметрами световых потоков: фазой, амплитудой, частотой, поляризацией. Существуют различные виды. Амплитудный модулятор света - механическое устройство, которое прерывает световой луч, в качестве которых используют вращающиеся и колеблющиеся заслонки, зеркала, призмы, растры.

Модуляторы света на основе физических эффектов. Внешние поля меняют оптические характеристики среды, таких, как электрооптические Поккельса эффект и Керра эффект, магнитооптический эффект Фарадея.

Также есть интегрально-оптические, пространственно-временные, акустооптические, пространственные модуляторы света.

Рассмотрим пространственные модуляторы света. Устройства, модулирующие амплитуду, фазу или поляризацию световой волны. Компания HOLOEYE изготавливают пространственные модуляторы на основе полупрозрачных (LCD) или отражающих (LCOS) жидкокристаллических пластинок. Благодаря свойствам оптической и

электрической анизотропии используют, в пространственных модуляторах света, жидкокристаллические пластинки.

Если осуществить модуляцию света пространственным модулятором света разной точке поперечного сечения луча, то оптический луч переносит большой объем информации.

В поляризационном микроскопе есть два поляризатора. Управляя ими можно определить модуляцию. Она бывает амплитудная или фазовая.

В модуляторе есть слой, который обладает продольным электрооптическим эффектом. Снаружи слоя записывается определенный потенциальный рельеф. Пучок света, прошедший через слой, выходит промодулированным, в каждой точке поперечного сечения. От того как будут настроены поляризаторы, зависит какая на выходе будет модуляция света. Она может быть амплитудной или фазовой [1; 16].

Схема пространственного оптически управляемого модулятора света представлена на рис 1.4. На прозрачной подложке расположены электрооптический и фотопроводящий слои, их разделяет диэлектрическое зеркало. Постоянное напряжение прикладывают к прозрачным электродам, которые находятся снаружи. Приложенное напряжение к фотослою, в отсутствии освещения, наделен темновым сопротивлением. Свет слева уменьшает сопротивление фотопроводника, и напряжение в освещенной точке оказывается приложенным к электрооптическому слою. Свет справа используется для считывания информации [1; 2].

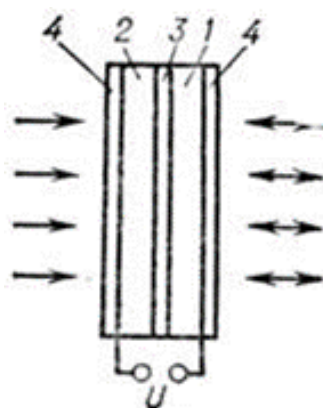


Рис.1.4. Пространственный оптически управляемый модулятор света: 1 - жидкий кристалл; 2 - фотопроводник; 3 - диэлектрическое зеркало; 4 - электроды

Вместо электрооптического слоя применяют жидкие кристаллы (см.рис.1.4), так как жидкий кристалл оптически анизотропен [2; 17].

Диэлектрическая проницаемость различна вдоль оси молекул и в перпендикулярном направлении. Молекулы разворачиваются вдоль поля стремясь к наибольшей диэлектрической проницаемости, вследствие наложения электрического поля. При этом, упругие силы стремятся вернуть их обратно в первоначальное положение. В электрическом поле показатель преломления жидкого кристалла меняется.

Положительные стороны - модулятор света начинает работать при низких напряжениях, имеет хорошее разрешение 60-100 линий/мм, и маленькую толщину слоя жидкого кристалла 2-50 мкм.

Недочеты - происходит долгая запись и мало по времени хранится информация, из-за того, что в модуляторах света есть жидкий кристалл молекулы которого начинают переориентироваться при изменении температуры.

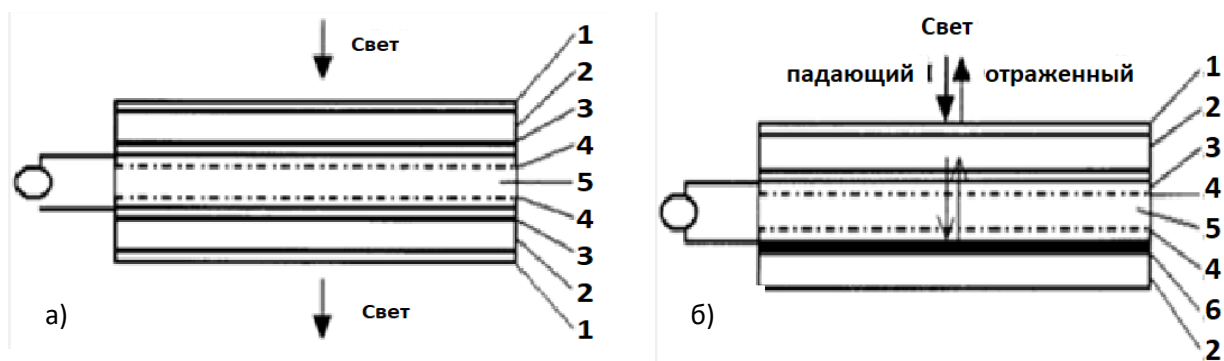


Рис.1.5. Сравнение оптически (а) и электрически (б) управляемого пространственного модулятора света

Жидкокристаллический электрически управляемый пространственный модулятор света состоит из (см.рис.1.5.):

1. антиотражающие покрытие;
2. две параллельные прозрачные диэлектрические пластины;
3. прозрачные токопроводящие покрытия;
4. слой прозрачного анизотропного диэлектрического вещества;
5. жидкий кристалл.

В зависимости от амплитуды или импульсов электрического напряжения Жидкий кристалл может изменять свою оптическую анизотропию. Направление молекул жидкого кристалла задается анизотропным покрытием, при условии отсутствия внешнего электрического поля. Изменения изображения наблюдается:

- при прохождении света через слой в одном направлении, когда два токопроводящие покрытия сделаны прозрачными (см.рис.1.5.а);
- при двойном прохождении света, когда второе токопроводящее покрытие сделано отражающим (см.рис.1.5.б).

Это изобретение используют в оптоэлектронике, а именно в устройствах и системах, в которых отображается информация с использованием лазеров (проекционных дисплеях, пространственных модуляторах света, в устройствах преобразования, хранения, обработки изображений).

1.3. МДП (металл/диэлектрик/полупроводник) структура

Структура нашей ячейки КНМ (Si/нематик/металл), подобна МДП-структуре (металл/диэлектрик/полупроводник) структуре. Так как, модуляторы света основаны на МДП структуре, то необходимо ознакомиться с этим понятием.

На основе структуры МДП, создаются полупроводящие приборы, которые работают на основе эффекта поля, таких как: приборы с

накоплением и хранением, переносом заряда; полевые транзисторы с изолированным затвором; модуляторы света и т.п. МДП-структуры дают возможность рассмотреть основные процессы в приборах, и удобные для исследований. Структура МДП представлена на рисунке 1.6.

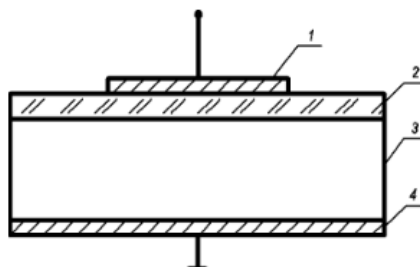


Рис.1.6. МДП-структура. 1-затвор, 2-диэлектрик, 3-полупроводниковая подложка, 4-омический контакт

Диэлектрик - материал, через который не проходит ток. В непроводящем слое и на границах нет зарядов. В МДП структуре, при разных смещениях, могут существовать только заряд в ее полупроводниковой части и равный ему заряд с минусом на металлическом электроде, между слоем полупроводника и диэлектрика [17; 18].

Если к МДП-конденсатору приложить электрическое напряжение, то его обкладки зарядятся. В зависимости от знака и величины приложенного напряжения поверхность полупроводника, будет обогащаться или обедняться основными носителями, или произойдет инверсия проводимости, в том случае, когда концентрация неосновных носителей заряда станет больше чем основных [18; 19].

На рисунке 1.7 показаны зонные диаграммы идеальных МДП-структур при напряжении на затворе: а-режим аккумуляции; б-режим обеднения; в-режим инверсии [19; 20; 21].

Рассмотрим полупроводник р-типа. При отрицательном потенциале на затворе дырки переходят к поверхности, при этом возрастает их

поверхностная концентрация. Это-режим обогащения. Основные носители заряда (дырки) увеличивают приповерхностную область [19; 22].

При положительном потенциале, который так же подается на затвор, дырки отталкиваются от поверхности и количество этих носителей уменьшается (режим обеднения), хотя количество дырок все еще превосходит количество электронов, подтянутых электрическим полем к поверхности. При этом тип проводимости приповерхностной области остается дырочным, т.е. приповерхностная область обедняется основными носителями заряда относительно объема.

Затем при увеличении потенциала, количество электронов в приповерхностной области увеличивается, и электронов ставится больше, чем дырок. Происходит изменение (инверсия) типа проводимости.

Аналогичные режимы происходят и для полупроводника n-типа (но в этом случае искривление зон на диаграммах будет направлено в другую сторону) [19; 23].

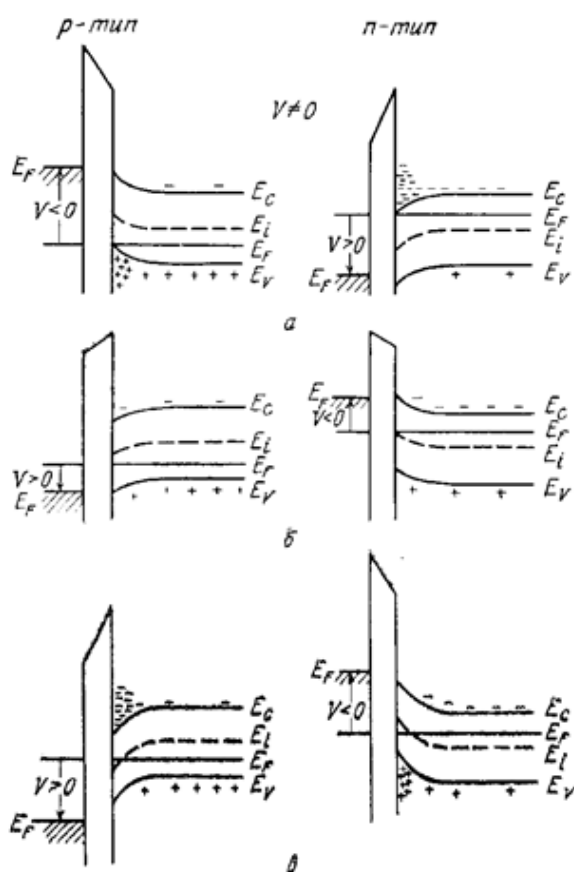


Рис.1.7. Зонные диаграммы идеальных МДП-структур при напряжении на затворе: а-режим аккумуляции; б-режим обеднения; в-режим инверсии

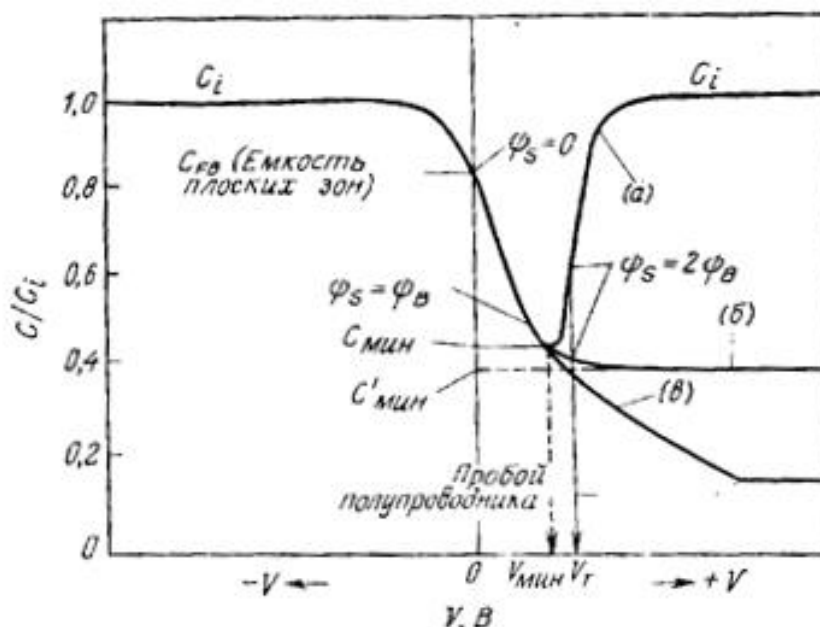


Рис.1.8. График зависимости емкости МДП-структуры от напряжения на затворе. а) область низких частот; б) область высоких частот; в) режим глубокого обеднения

На рисунке 1.8 представлена вольт-фарадная характеристика МДП-структуры от напряжения. На рисунке 1.8 (а) область низких частот, (б) область высоких частот, (в) режим глубокого обеднения

Существуют несколько методов измерения вольт-фарадных характеристик. Эти методы базируются на том что, при подаче напряжения (например, МДП структуру), и учитывая объемный заряд вблизи поверхности, определяется зависимость разных параметров емкости структуры.

Факторы, при которых измеряются параметры измерения: воздействие внешнего фотоактивного излучения, нагревание по определенному закону.

Также используют такой метод как подача на структуру постоянного напряжения (напряжение смещения), обеспечивая поддержку рабочей точки

прибора. Метод подачи переменного напряжения малой амплитуды (измерительный сигнал), для того, чтобы измерить емкость структуры.

Важно понимать, как происходят физические процессы в полупроводниковых структурах, и наблюдаем как такие структуры схожи на емкости.

Метод вольт-фарадных измерений основан на теории пространственного заряда, в приповерхностной области, а также измерения дифференциальной емкости.

Емкость-при изменении напряжения происходит изменения скорости заряда. От напряжения изменяется толщина области обеднения и на основе этого изменяется заряд.

Структура МДП похожа на емкость, эта структура состоит из конденсатора, одна из обкладок сделано из полупроводника.

Так как в структуре есть полупроводник, то появляются дополнительные слои, есть которые хорошо проводят электрический ток, а есть слои, которые плохо проводят ток. Емкость МДП структуры состоит из, формула (2), двух последовательно соединенных емкостей.

Емкость структуры определяется формулой:

$$C = \frac{C_d * C_s}{C_d + C_s} \quad (2)$$

где C_d - емкость диэлектрика, C_s - емкость полупроводника.

Емкость диэлектрика формула (3):

$$C_d = \frac{\epsilon_d \epsilon_0 * S}{\delta_d} \quad (3)$$

где $\epsilon_d \epsilon_0$ - диэлектрическая проницаемость материала; S – площадь управляющего электрода; δ_d - толщина диэлектрика.

Так как, емкость полупроводника C_s определяется конструктивными параметрами и напряжением смещения U , то C_s является нелинейным элементом.

1.4 Интегрирующая цепь

Интегрирующую цепь называют фильтром низких частот (ФНЧ).

Имеем на рисунке 1.9 электрическую цепь, состоящую из резистора R (сопротивление) и конденсатора C (ёмкость).

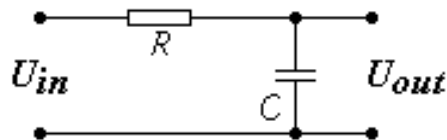


Рис.1.9. Интегрирующая цепь. U_{in} - входное напряжение, U_{out} - напряжение на выходе

Интегрирующая цепь формирует импульсы большой длительности. Удлинняет или расширяет импульсы. Преобразовывает импульсы по интегральному закону, для получения линейно изменяющегося напряжения.

Выделяют такие виды интегрирующих цепей: RC цепи; RL цепи; интегрирующие RC цепи на операционном усилителе.

Условное обозначение интегрирующих цепей:



RC интегрирующие цепи заряжают и разряжают конденсатор, вот так работает цепь.

Имеем напряжение на выходе:

$$U_2 = \frac{1}{RC} \int_0^t U_1 dt \quad (4)$$

Анализируя формулу (4) получим $U_2 = 0$, когда $U_1 = \text{const}$, то есть когда скорость изменения $\frac{dU_1}{dt} = 0$. Если $U_2 = \text{const}$ и не равняется нулю, то напряжение на входе цепи U_1 будет линейное.

RC интегрирующие цепи применяются для расширения импульсов; для выполнения операции математического интегрирования; для селекции импульсов по длительности и сравнения импульсных сигналов, в устройствах формирования линейно изменяющихся сигналов; получения линейно изменяющегося напряжения транзисторного ключа; осуществления фильтрации переменной входного напряжения.

Резистор и конденсатор соединены последовательно, а значит ток выражают выражением (5). Берется во внимание производную от напряжения заряда конденсатора $\frac{dQ}{dt} = C\left(\frac{dU}{dt}\right)$ и закон Ома $I = \frac{U}{R}$ [24; 25; 26]. Получаем:

$$I = C \frac{d(U_{\text{out}})}{dt} \frac{U_R}{R} \text{ или } d(U_{\text{out}}) = \frac{U_R dt}{RC} \quad (5)$$

где I - сила тока, C - емкость, R - сопротивление, U_R - напряжение на выводах резистора, U_{in} - входное напряжение, U_{out} - напряжение на выходе.

Возьмем последнее выражение и проинтегрируем $\int d(U_{\text{out}}) = \int \frac{U_R dt}{RC}$. В левой части выражения интеграл будет равен $U_{\text{out}} + \text{const}$. Перенесём const в правую часть с тем же знаком, а в правой части постоянную времени RC вынесем за знак интеграла, и получаем [24; 25; 26]:

$$U_{\text{out}} = \frac{1}{RC} \int U_R dt + \text{const} \quad (6)$$

Видим, что выходное напряжение U_{out} прямо-пропорционально интегралу напряжения на выводах резистора, и поэтому прямо-пропорционально входному току I_{in} (см. формула(6)).

$U_{\text{in}}, U_{\text{out}}$ - напряжения на входе и на выходе.

I_{in} , I_{out} - ток на входе и на выходе

Если входное напряжение и входной ток взаимно зависимые величины, то получим необходимую зависимость выходного напряжения U_{out} от интеграла U_{in} .

Соотношение $\frac{U_{in}}{I_{in}}$ - нелинейное, так как зарядка и разрядка конденсатора происходит экспоненциально $e^{-\frac{t}{\tau}}$, которая нелинейна при $\frac{t}{\tau} \geq 1$, то есть, когда значение $t \geq \tau$. t – время, за которое заряжается или разряжается конденсатор в пределах периода. $\tau=RC$ - постоянная времени - произведение величин R и C .

Для простой цепи RC постоянную времени берут на 1-2 порядка больше периода переменного входного сигнала. Тогда, на выводах резистора, основная и значительная часть U_{in} будет падать. В результате обеспечит линейную зависимость $\frac{U_{in}}{I_{in}} \approx R$. В таком случае U_{out} будет пропорционально интегралу U_{in} , малой погрешностью. Чем больше будут величины RC , тем меньше на выходе переменная составляющая, и в результате более точная получится кривая функции [27; 28].

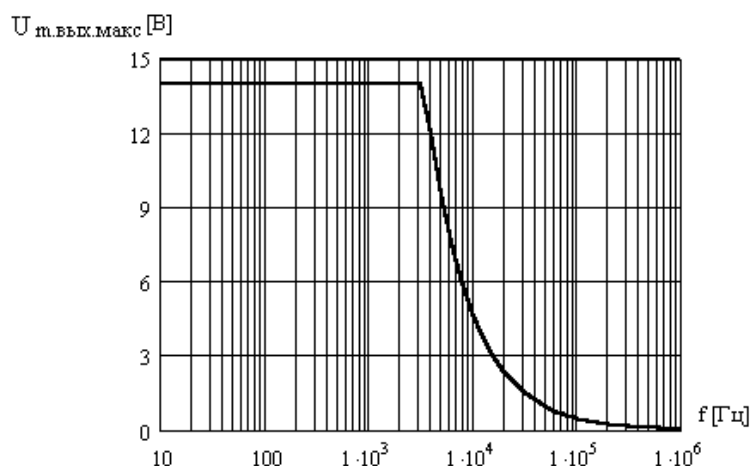


Рис.1.10. Аналитический вид ФНЧ

ФНЧ - фильтр низких частот. На рисунке 1.10 показана зависимость переменного напряжения от частоты.

1.5 Программное обеспечение labview

LabVIEW - среда графического программирования с помощью этой программы создаются приложения для измерений, управления и тестирования. Созданные программы облегчают расчёты, экономят ваше время. Разработал среду LabVIEW - National Instruments. Программа создана на английском языке. Первая версия вышла в 1986 году для Apple Macintosh, а на сегодняшний день существуют версии для Unix, Linux, Mac OS, Microsoft Windows.

Эта программа используется для обработки данных, техническими объектами и процессами. Программа легкая и доступная для эксплуатации и для экспертов, и так и для новичков. В среде LabVIEW есть широкие возможности сбора, обработки и анализа данных, управления приборами, генерации отчетов и обмена данных через сетевые интерфейсы [29; 30], а также высокая скорость выполнения задач.

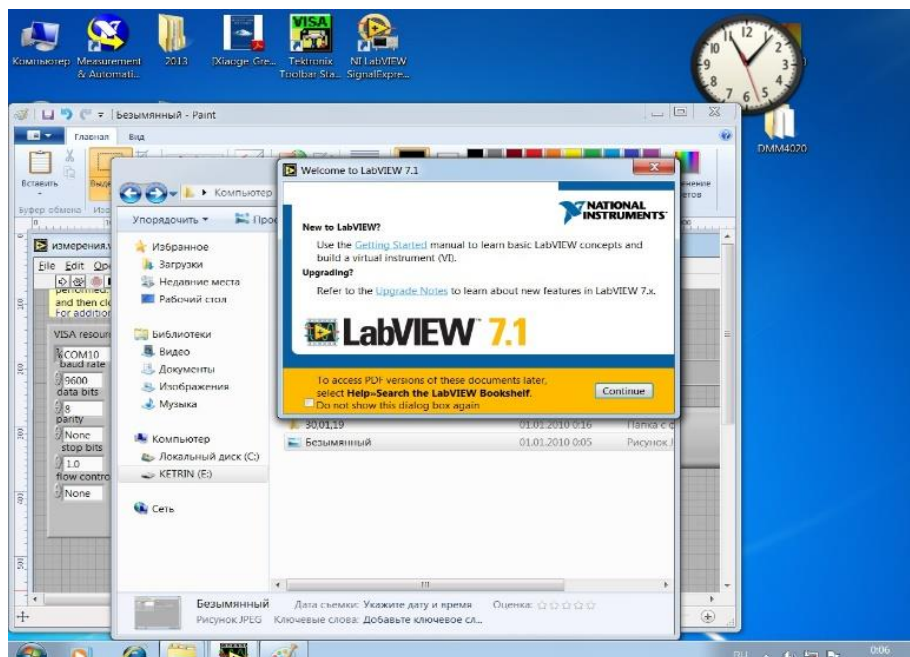


Рис.1.11 Программный комплекс LabVIEW при загрузке

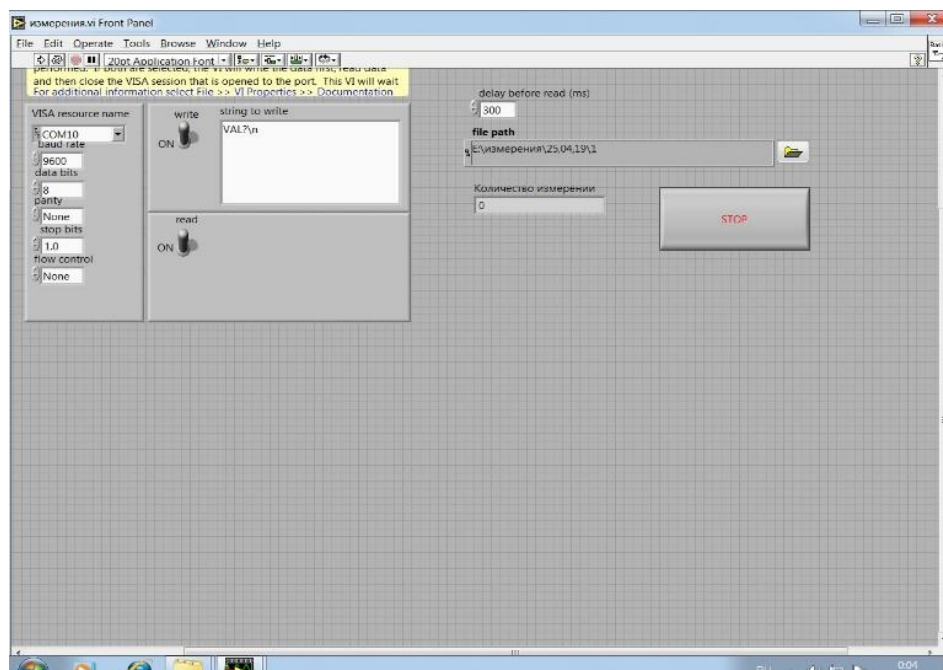


Рис.1.12. Программный комплекс LabVIEW в рабочей среде

На рисунке 1. 11 представлено окно при открытии этой программы, а на рисунке 1.12 представлена готовая спrogramмированная программа, которая нам записывала показания напряжения при установленном времени и шаге.

Шаг повремени задавался в 300 относительных единиц для всех экспериментов. Время задавалось разное, оно указано в записях к рисункам.

ГЛАВА II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Ячейка Si/нематик/металл

Для исследования вольт-фарадных характеристик структуры Si/нематик/металл вблизи перехода Фредерикса использовались ячейки с нематическим жидким кристаллом, название которого 5CB (4-н-пентил-4'-цианобифенил). Для 5CB характерна положительная диэлектрическая анизотропия. Ориентация молекул нематика на кремниевой подложки - гомеотропная, а на поверхности прозрачного электрода - планарная. Обе ориентации нематика задавались соответствующими ориентантами. Это означает, что оси молекул с продольным дипольным моментом будут располагаться вдоль направления электрического поля перпендикулярно металлическому электроду (поверхность ячейки).

Структура экспериментальной ячейки КНЭ (Si/нематик/металл), подобна МДП (металл/диэлектрик/полупроводник) структуре, на которых основаны модуляторы света.

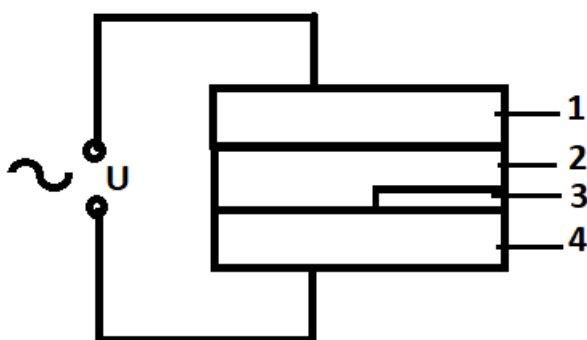


Рис.2.1. Экспериментальная ячейка Si/нематик/металл

Ячейка, схематично представлена на рисунке 2.1 состоит из:

1. Металлический электрод (прозрачная пленка окиси индия);
2. Нематический жидкий кристалл;

3. Напыленная пленка аморфного кремния;
4. Si подложка.

В качестве металлического электрода использовалась пленка окиси индия. Толщина пленки жидкого кристалла 5 мкм. Подложка из низкоомного $4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ кремния (Si) p - типа проводимости.

Полярность напряжения U в данной работе рассматривается относительно Si подложки. Кремний, находится в контакте с жидким кристаллом.

Аморфный кремний был получен с помощью метода магнетронного напыления. Магнетронное напыление - нанесение на кремний тонких пленок в плазме. Образец кремния в ячейке используется в качестве подложки. Имеем такие параметры напыления аморфного кремния: время 3 минуты, мощность 30Вт и по результатам дополнительных исследований толщина пленки аморфного кремния составляла около 10 нм.

2.2 Экспериментальная установка

На рисунке 2.2 представлена схема экспериментальной установки. Ячейка была установлена под поляризационным микроскопом. Сигнал с генератора переменного напряжения поступал на ячейку. Необходим был вольтметр, чтобы контролировать показания падения напряжения в цепи, и устанавливать необходимые их значения. Вольтметр был подключен к компьютеру. В схеме был ключ, с помощью которого подавалось напряжение в цепь, а также переключалось при необходимости на постоянное или на переменное напряжение, путем переключения полярности. Микроскоп был оборудован цифровой камерой, которая передавала изображения процессов в ЖК(жидком кристалле) на компьютер. Фотовозбуждение структур осуществлялось лазером закрепленном на стойке, луч которого был направлен на ячейку.

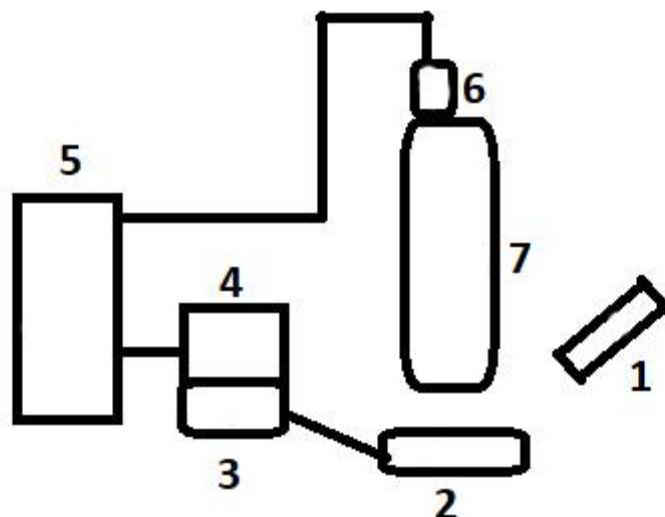


Рис.2.2. Схема экспериментальной установки

На рисунке 2.2 представлена схема экспериментальной установки, состоящая из:

1. Лазер (0,63 нм);
2. Экспериментальная ячейка;
3. Генератор переменного напряжения;
4. Вольтметр;
5. Персональный компьютер;
6. Фото камера;
7. Поляризационный микроскоп.

2.3 Проверка метода падения напряжения путем фоторегистрации

Первым этапом проверки метода падения напряжения было использование фоторегистрации. Метод был проверен на двух структурах. Видео записывалось с помощью мобильного устройства. Настроили нужные параметры, включили видеозапись, а затем подали напряжение на ячейку с помощью ключа. Фотовозбуждение структуры осуществлялось лазерным излучением длительностью около пары секунд.

На рисунке 2.3 представлена зависимость падения напряжения от времени для двух структур, полученная по результатам обработки видеорегистрации. Для структуры 1 параметры были следующие: температура $20C^0$; переменное напряжение U_{ac} - 3,7В; частота f - 80кГц. Для структуры 2: температура $22C^0$; переменное напряжение U_{ac} - 3,8В; частота f - 80кГц.

Далее при разных значениях частоты в диапазоне $f = 100 - 10кГц$, начиная с большего, через 10кГц, фиксировали порог светочувствительности от частоты и от переменного напряжения. График представлен на рисунках 2.4 и 2.5. Параметры эксперимента для структуры 1: $t-20C^0$; U_{ac} - 3,7В; f - 80кГц. Для структуры 2: $t-22C^0$; U_{ac} - 3,8В; частота f - 80кГц. Порог светочувствительности структуры Si/нематик/металл, означает, что молекулы жидкого кристалла не полностью переориентируются, оставаясь вблизи перехода Фредерикса.

Строим зависимости с помощью программы origin. Смещение - постоянная составляющая напряжения.

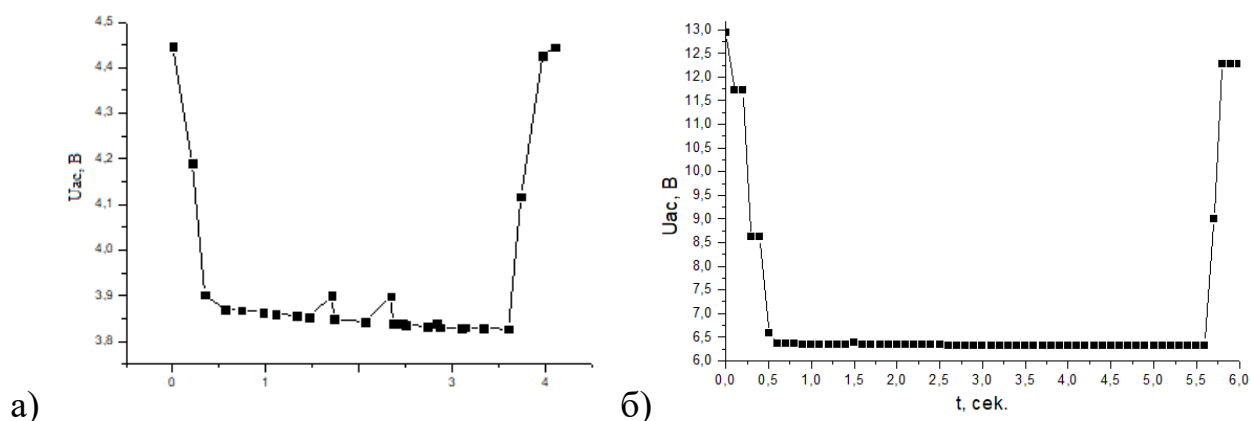


Рис.2.3. Зависимость падения напряжения от времени при подключении экспериментальной ячейки. а) структура 1; б) структура 2

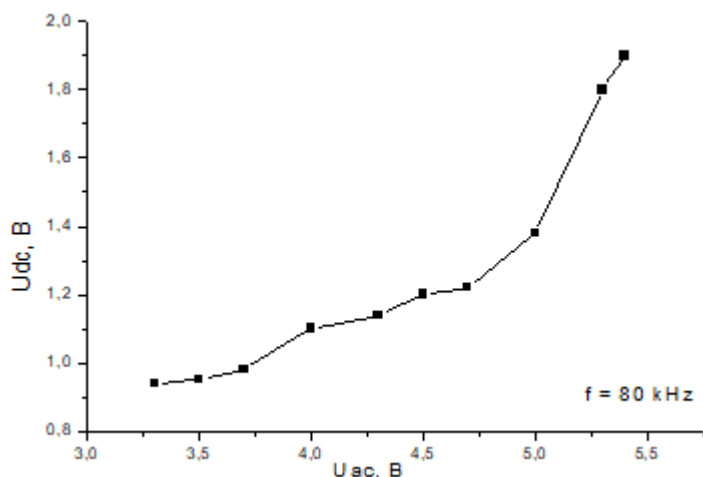


Рис.2.4. Зависимость порога светочувствительности структуры 2 от величины переменного напряжения

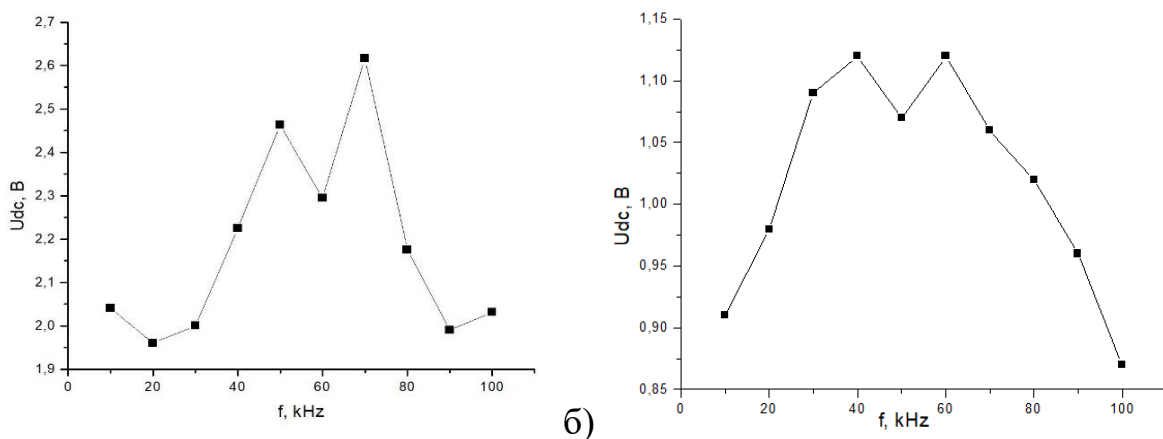


Рис.2.5. Зависимость порога светочувствительности от частоты, U_{ac} = 3.8В. а) структура 1; б) структура 2

На рисунке 2.6 представлен график зависимости падения переменного напряжения от времени по результатам обработки видеозаписей, при U_{dc} - (-1 и +1)В. Зафиксированы параметры: температура 21С⁰; переменное напряжение U_{ac} - 4,2В; частота f - 80kHz; смещение U_{dc} (1; -1)В. На рисунке 2.6 (в, г) выбран другой масштаб.

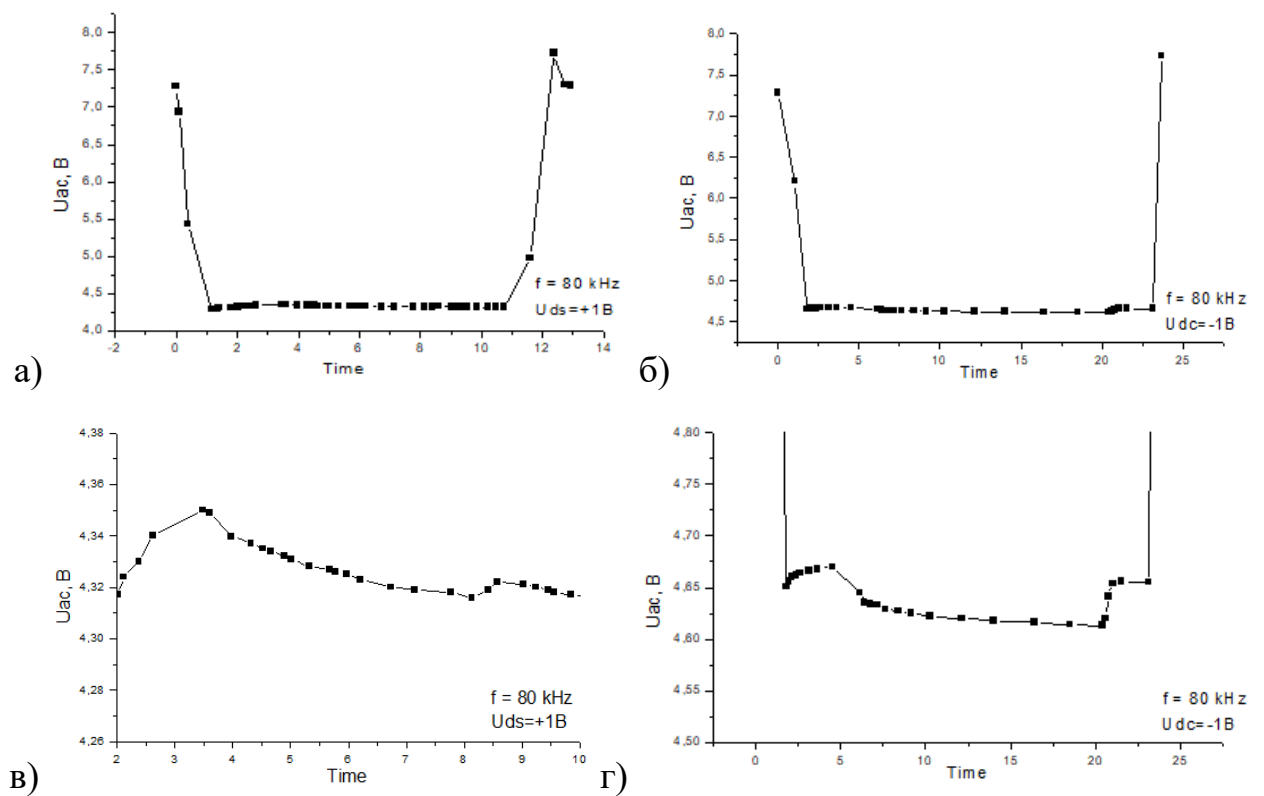


Рис.2.6. Зависимость падения переменного напряжения от времени. а и в) структура 1; б и г) структура 2

На рисунке 2.7 представлена зависимость порога светочувствительности структуры от частоты. Зафиксированы параметры: температура $19C^0$, переменное напряжение $U_{ac} - 3,8B$, частота $f-100-10kHz$. К данным на рисунке 2.8 относятся следующие параметры: температура $19C^0$, частота $f - 80kHz$.

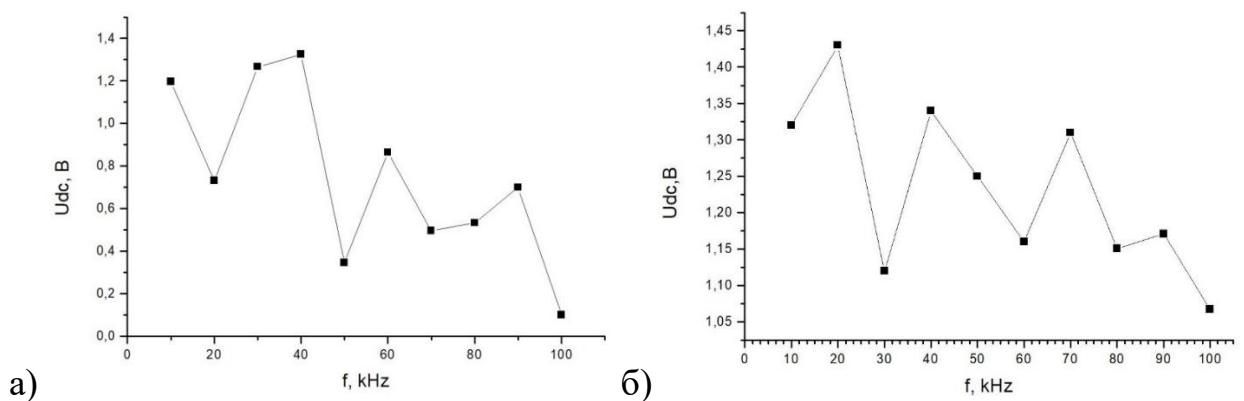


Рис.2.7. Зависимость порога светочувствительности от частоты. а) структура 1; б) структура 2

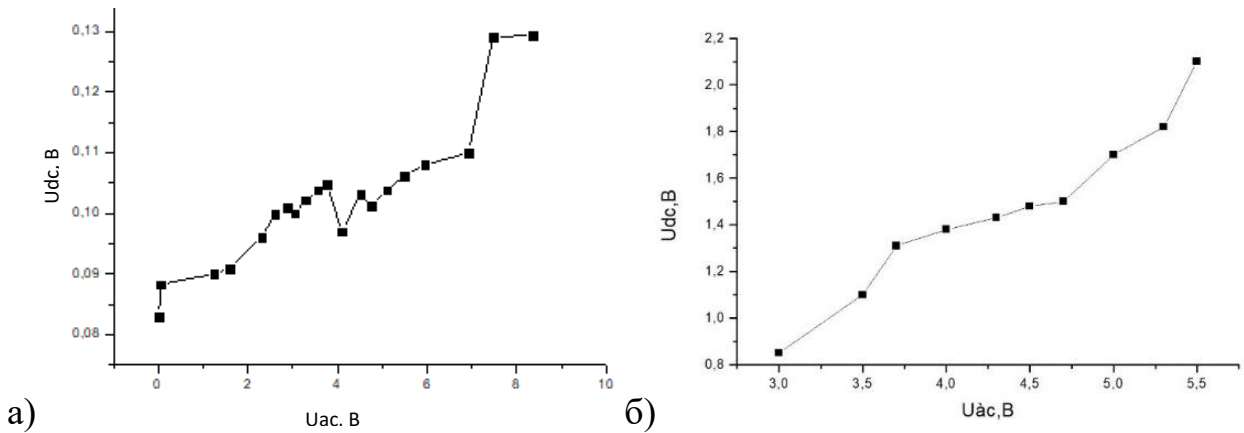


Рис.2.8. Зависимость порога светочувствительности структуры от величины переменного напряжения. а) структура 1; б) структура 2

При изменении частоты переменного напряжения была необходимость корректировки величины этого напряжения U_{ac} , так как при изменении частоты в процессе нахождения порога светочувствительности, переменное напряжение U_{ac} изменялось.

Был проведен следующий эксперимент, в котором необходимо было, выбрать 4 разных участка ячейки с жидким кристаллом и найти порог светочувствительности для этих участков. На графике 2.9 изображена зависимость смещения (порог светочувствительности) для участков 1, 2, 3, 4(sector) соответственно при действии переменного напряжения с заданной частотой 60kHz, 80kHz, 100kHz.

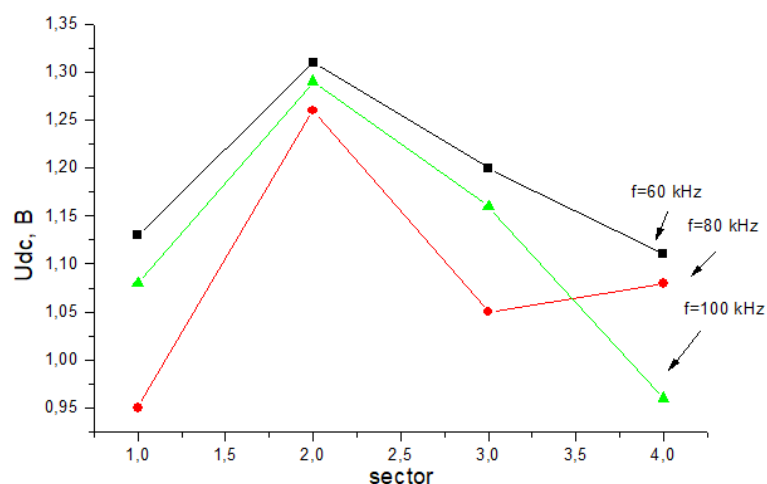


Рис.2.9. Порог светочувствительности при одном переменном напряжении и при разных частотах, структура 2, на четырех разных участках, $U_{ac}=3.9$ В

Метод, основанный на обработке видеоряда не дал точных результатов, потому что на графиках часто и не предсказуемо появляются неизвестные пики. Кроме этого этот метод занимает много времени, поскольку необходимо было выполнить много этапов: запись видео, фиксирование значений, ввод результатов в программу для построения графиков, постройка графиков.

2.4 Емкостные свойства структуры Si/нематик/металл

Для исследований емкостных свойств была использована структура Si/нематик/металл без диэлектрика. Воспользуемся методом падения напряжения при разных значениях частоты, смещения и так далее.

Было подготовлено все необходимое оборудование и ячейку к эксперименту. Фиксировали температуру, и проделывали это каждый раз перед экспериментами.

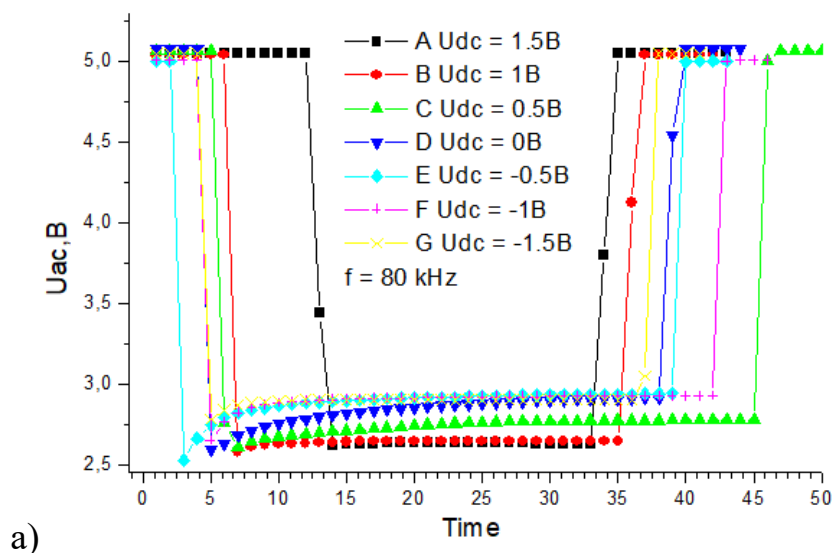
Все начиналось с визуальных наблюдений и исследований пороговых напряжений светочувствительности структуры Si/нематик/металл. Изменяя переменное напряжение, фиксировали показания смещения, которое

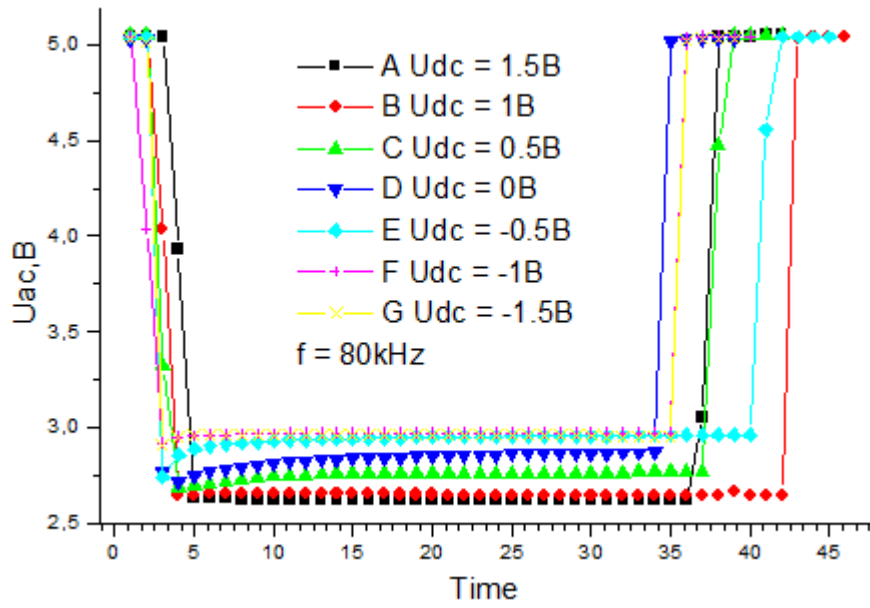
соответствует моменту исчезновения светочувствительности. Смещение - постоянная составляющая напряжения.

С помощью программы LabVIEW, были получены все необходимые данные, а построение графиков производилось в программе Origin.

На рисунках 2.10, 2.11 представлена зависимость падения переменного напряжения от времени. Параметры эксперимента: температура $t - 22C^0$, переменное начальное напряжение $U_{ac}=5V$, частота f (100; 80; 60; 40; 10; 5)kHz., смещение U_{dc} (-1,5; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 1,5)V. На рисунке 2.10 (а) под буквой «I» изображена зависимость при $U_{ac} = 7V$.

На рисунке 2.12 представлена зависимость падения переменного напряжения от смещения в пределах светочувствительности структуры. Под буквой (а) первый эксперимент, под (б) второй эксперимент. На графике рисунка 2.12 (б) добавлена кривая с частотой 5 kHz. Полученные значения переменного напряжения были найдены таким образом, например, на рисунке 2.11 (в) при частоте равной 40 kHz были взяты значения смещений U_{dc} (-1,5; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 1,5)V и соответственно U_{ac} .

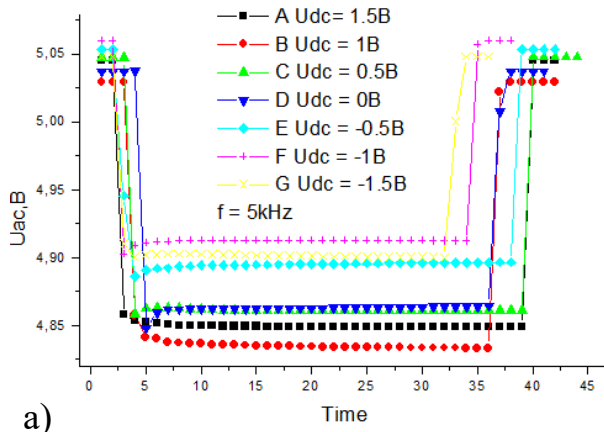




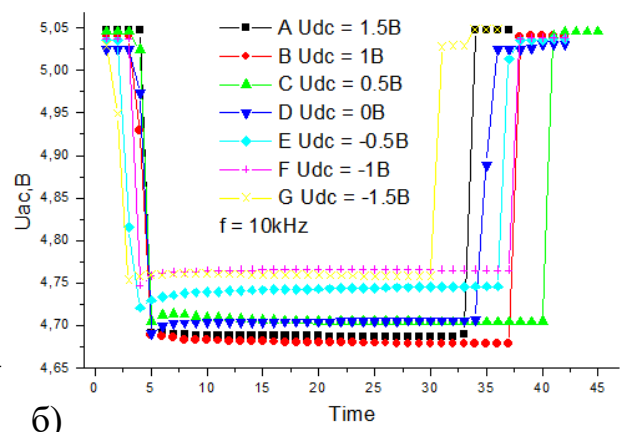
б)

Рис.2.10. Зависимость падения переменного напряжения от времени.

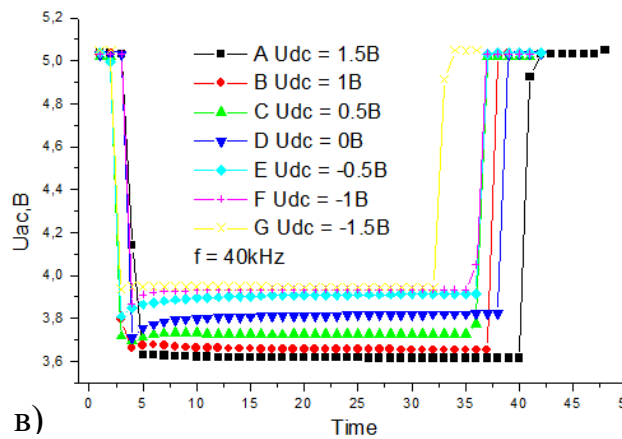
а) эксперимент 1, и б) эксперимент 2



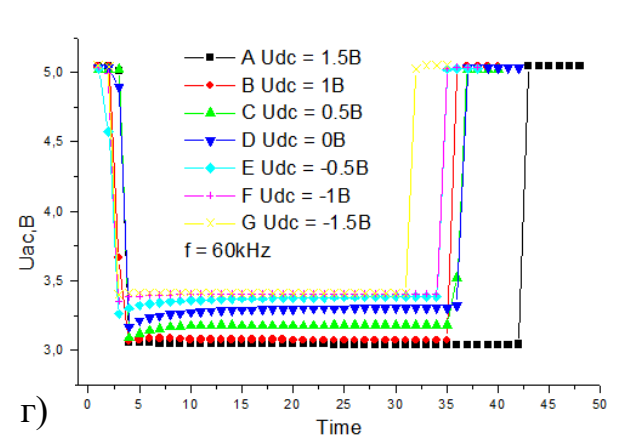
а)



б)



в)



г)

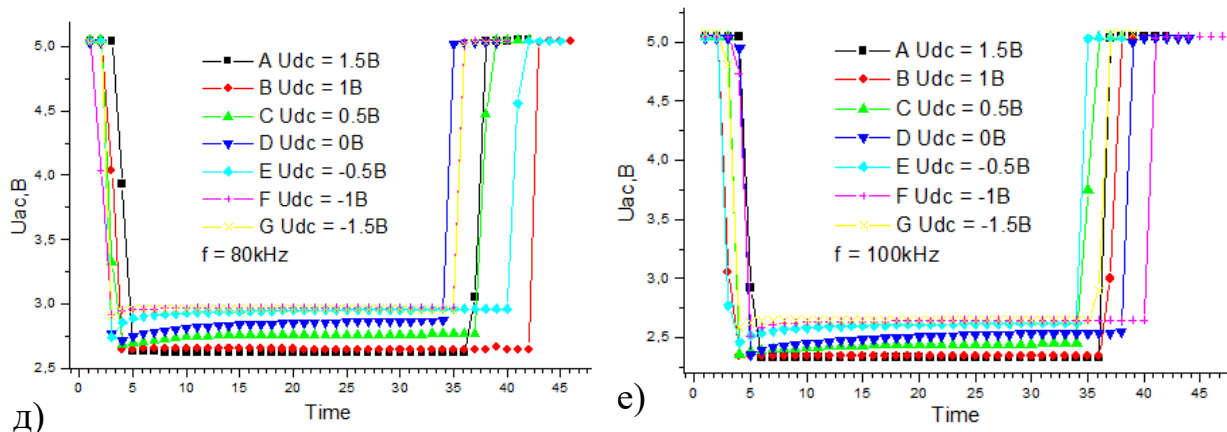


Рис.2.11. Зависимость падения переменного напряжения от времени.

Сравнение кривых при разных частотах (5, 10, 40, 60, 100) kHz

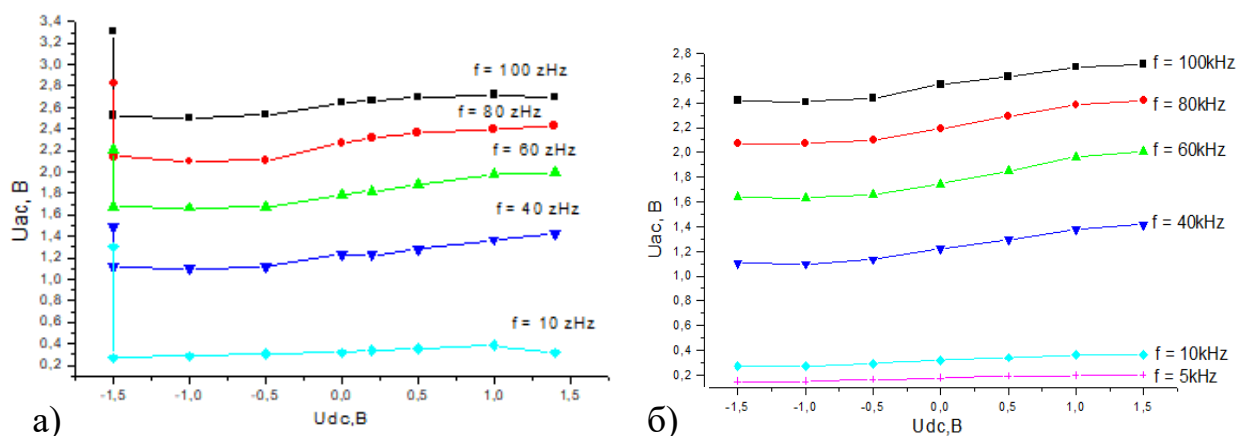


Рис.2.12. Зависимость падения переменного напряжения от смещения в пределах светочувствительности структуры. а) первый эксперимент; б) второй эксперимент. На графике (б) добавлена кривая с частотой 5 kHz

Был проведен дополнительный эксперимент по влиянию внешнего освещения на падение напряжения на структуре. На рисунке 2.13 представлена полученная зависимость. Как следует из рисунка 2.13 влияние внешнего освещения на величину падения напряжения незначительно. В дальнейших экспериментах влиянием внешнего освещения пренебрегаем.

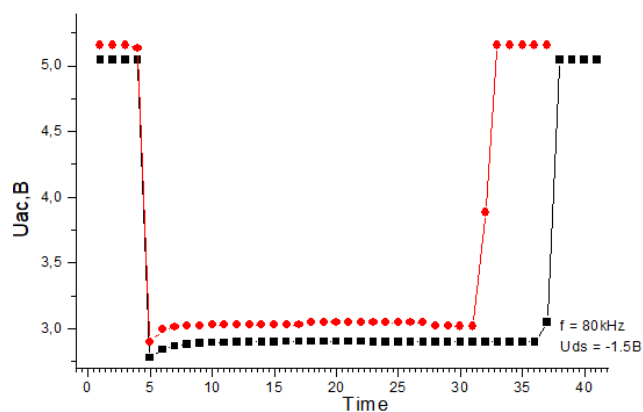


Рис.2.13. Зависимость падения переменного напряжения от времени при включенном внешнем освещении (А) и выключенном (В)

С целью сравнения выше полученных результатов, касающихся поведения структур, далее были проведены измерения емкости реального керамического конденсатора методом падения напряжения. В эксперименте были установлены параметры: смещение 0 В, переменное начальное напряжение 5 В, емкость конденсатора 6800 нФ, временной шаг 400 относительных единиц на рисунке 2.14 (б) и 300 на рисунке (а). На рис. 2.14 представлен график зависимости падения напряжения от частоты в логарифмическом масштабе для конденсатора. Для сравнения структуры Si/нематик/металл с реальным конденсатором построена зависимость падения переменного напряжения от частоты на основе результатов, представленных на рисунках 2.10 и 2.11, которая представлена на рисунке 2.15, в дальнейшем прологарифмирована, рисунок 2.15 (б).

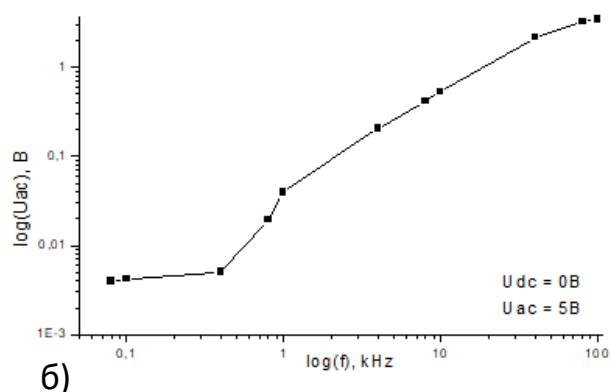
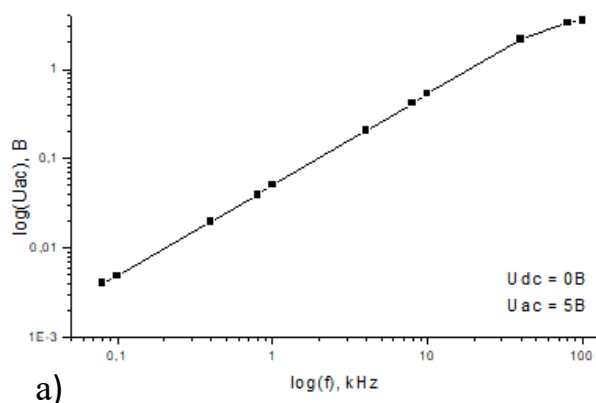


Рис.2.14. Зависимость падения переменного напряжения от частоты на конденсаторе. а) временной шаг 300 отн. едн.; б) временной шаг 400 отн. едн.

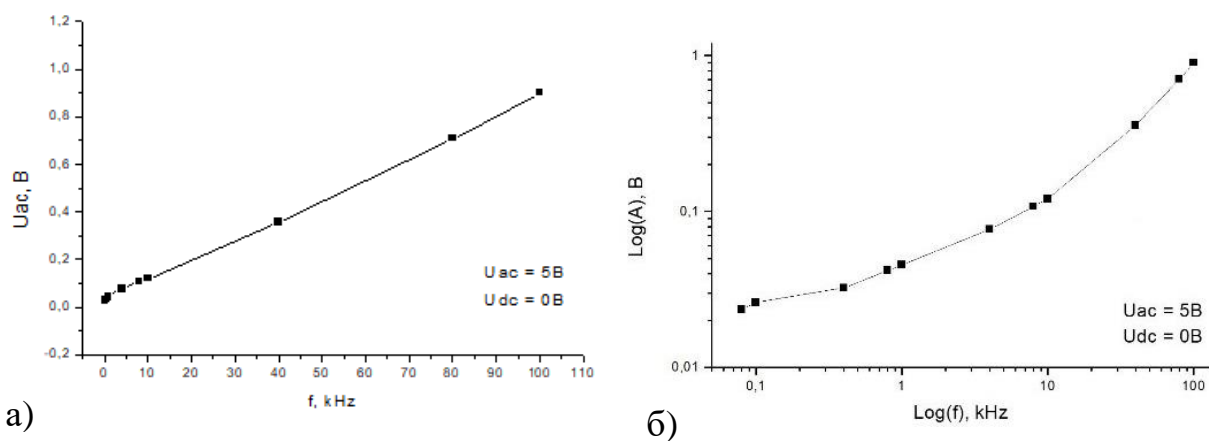


Рис.2.15. Зависимость падения переменного напряжения от частоты на структуре Si/нематик/металл на структуре 2, $U_{ac} = 5B$, $U_{dc} = 0B$

На основе сравнения поведения нашей структуры с реальным поведением падения напряжения на обычном конденсаторе следует, что наша структура Si/нематик/металл демонстрирует емкостные свойства.

2.5 Фотоемкостные свойства структуры Si/нематик/металл

2.5.1 Фотоемкостные свойства структуры Si/нематик/металл без накопления заряда

Далее в экспериментах исследовались фотоемкостные свойства структуры под действием света (лазерное излучение).

Эксперименты проводились на одной ячейке, в которой были зоны с пленкой аморфного кремния и зона тонкого слоя жидкого кристалла. Под зоной тонкого жидкого кристалла подразумевается наличие колец Ньютона. Это означает, что толщина слоя жидкого кристалла около 1 мкм.

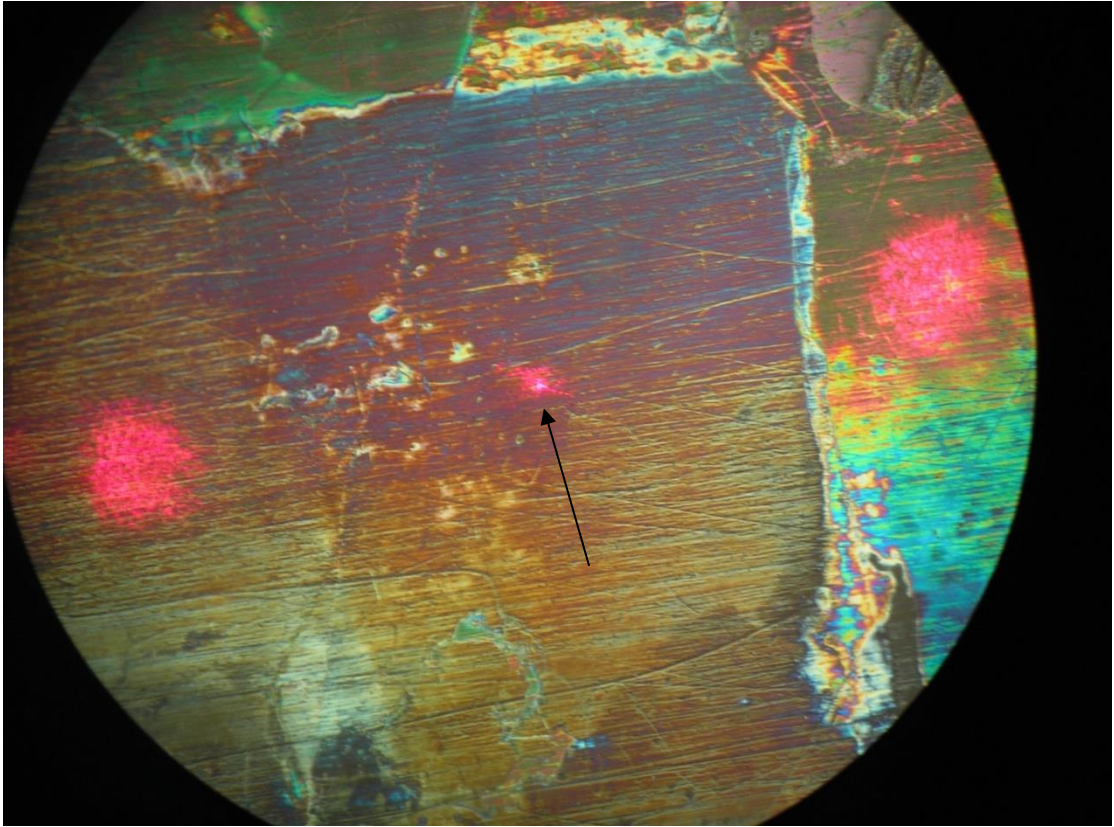


Рис.2.16. Вид участка 1 кремния Si слоя жидкого кристалла. Стрелка указывает на пятно от лазера. Светочувствительность отсутствует

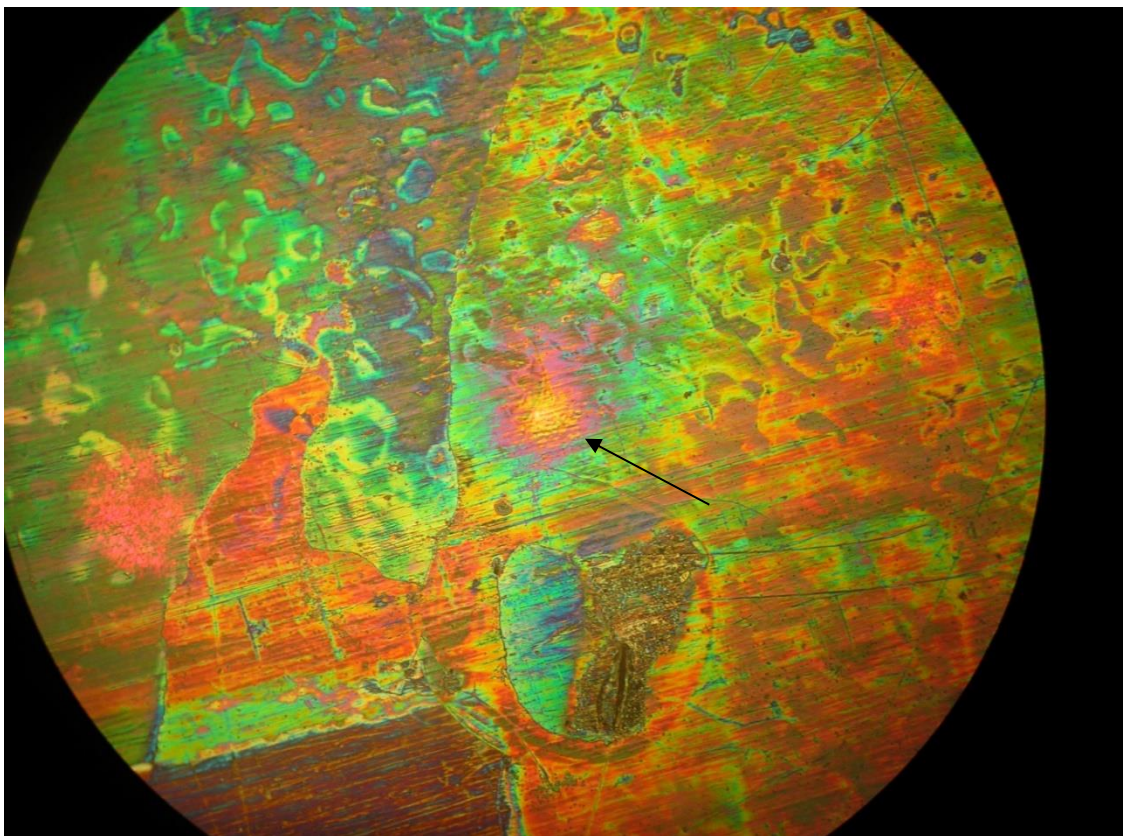
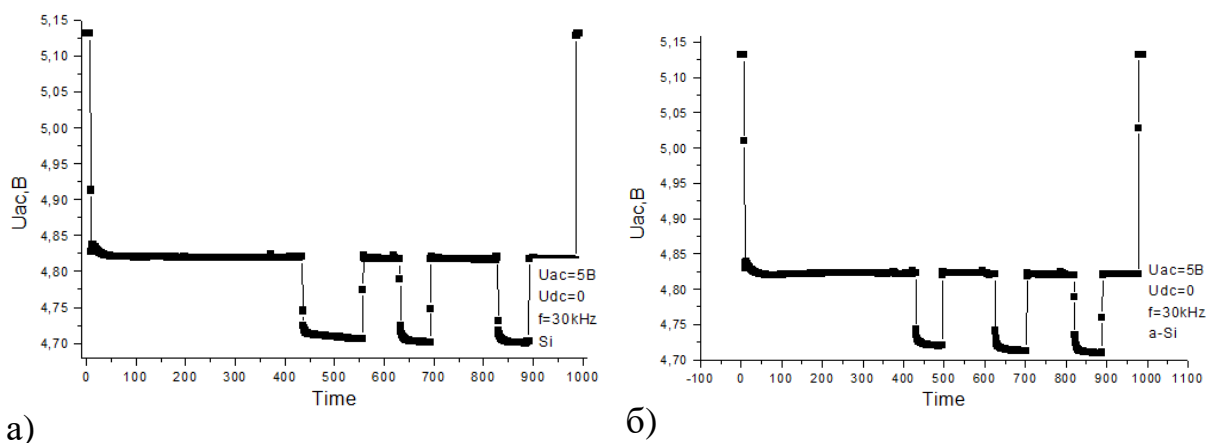


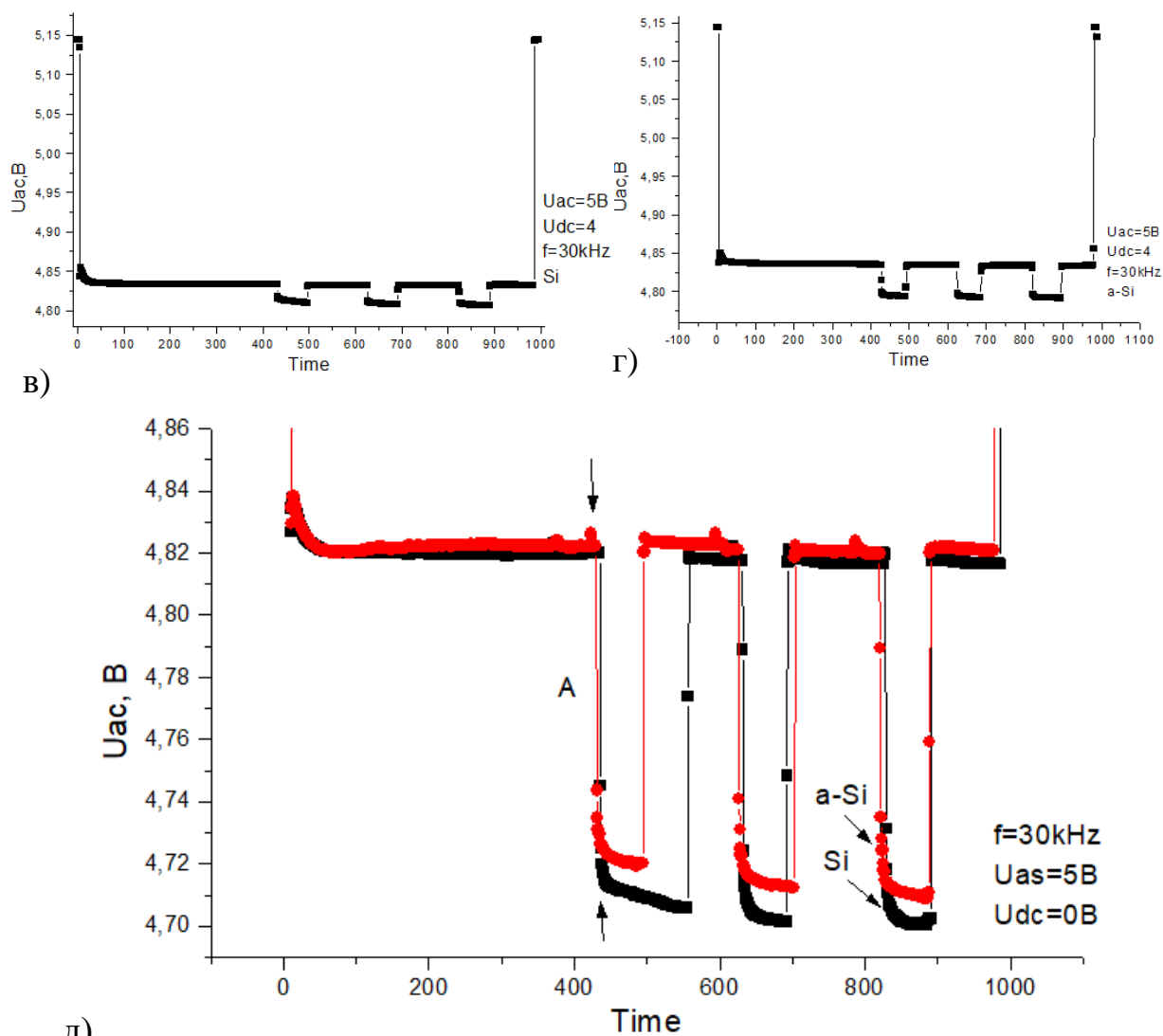
Рис.2.17. Вид участка 2 структуры с напыленной пленкой аморфного кремния a-Si слоя жидкого кристалла. Стрелка указывает на область переориентации нематика в области пятна луча лазера на поверхности аморфного кремния.

Светочувствительность имеет место

Для лучшего наблюдения, ячейка была установлена под углом 45 градусов. Затем были определены переменное напряжение и частота. В первую очередь определили порог светочувствительности участка структуры a-Si/нематик/металл с пленкой аморфного кремния. А затем исследовались зависимости падения переменного напряжения от времени, частоты и смещения.

Рисунок 2.18 демонстрирует зависимость падения переменного напряжения на структуре 3 от времени на участках Si (кремний) и a-Si (аморфный кремний). Параметры эксперимента: время 5 мин., температура $20C^0$, f - 30kHz, U_{ac} - 5В, U_{dc} - 0 и 4В. На рисунке 2.18 (а) стрелки указывают на точки, которые были взяты, для нахождения разницы переменного напряжения (а). Видим три «ступеньки» которые соответствуют периодам лазерного свечения структуры. На рисунке 2.18 (д) представлены два участка Si и a-Si при смещении $U_{dc} = 0В$, частоте $f=30kHz$, переменном напряжении $U_{ac} = 5В$.





д)

Рис.2.18. Зависимость падения переменного напряжения от времени.

а) на участке 1 кремния Si при $U_{dc} = 0V$;

б) на участке 2 кремния a-Si при $U_{dc} = 0V$;

в) на участке 1 кремния Si при $U_{dc} = 4V$

г) на участке 2 кремния a-Si при $U_{dc} = 4V$;

д) зависимости Si рис.2.18 (а) и a-Si рис. 2.18 (б) при $U_{dc} = 0V$.

(в) и (г) светочувствительность отсутствует

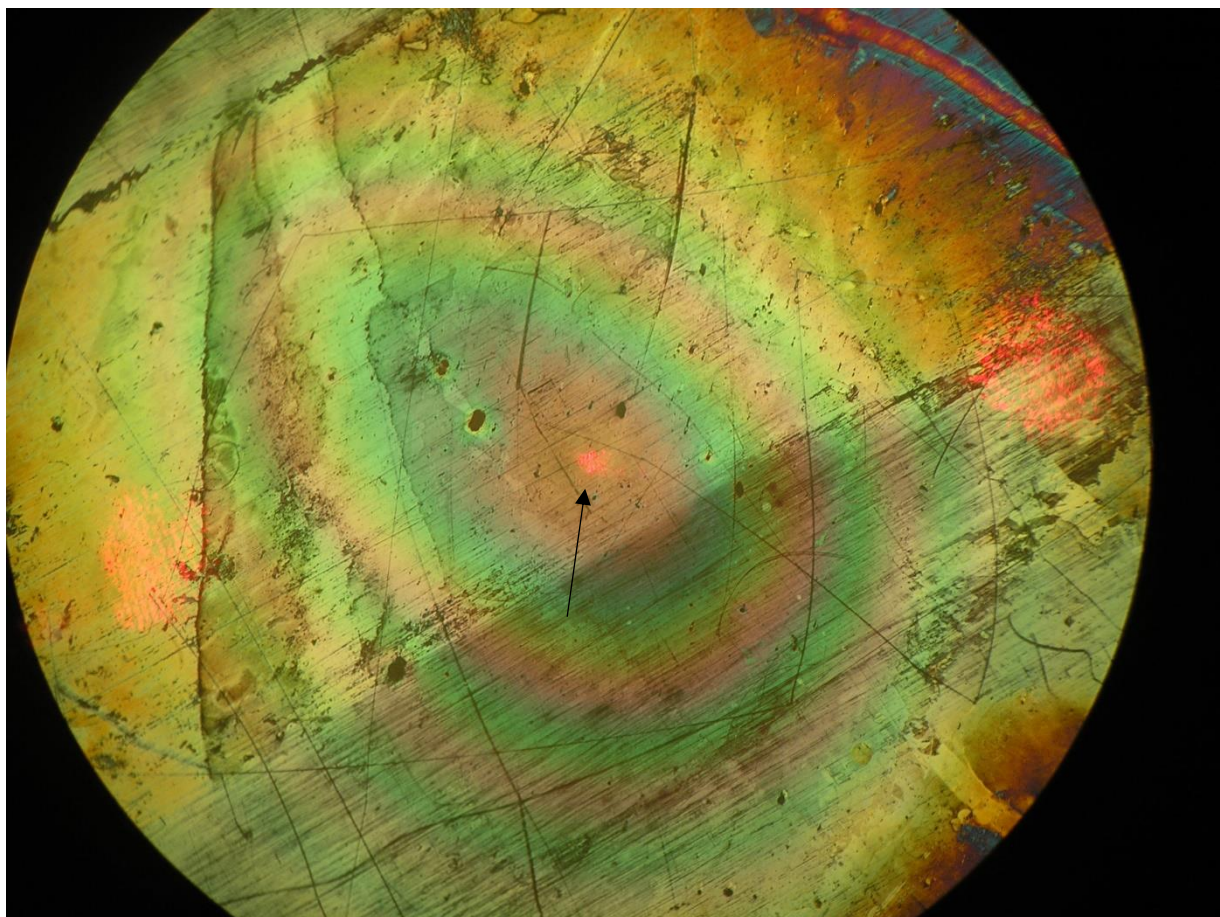


Рис.2.19. Вид участка 3 кремния Si в тонком месте слоя жидкого кристалла (кольца Ньютона). Стрелка указывает на пятно лазерного излучения на поверхности кремния

На рисунке 2.20 представлена зависимость падения переменного напряжения от времени. Лазер попадает на тонкий слой ячейки. Все внешнее освещение было выключено. На рисунке 2.20 (б) стрелки указывают на точки, которые были взяты, для нахождения разницы переменного напряжения (а). На рисунке 2.20 (б) выбран другой масштаб. Зафиксированы параметры: шаг по времени - 300 единиц; температура 20C^0 ; $f = 100\text{kHz}$; $U_{ac} = 5\text{V}$, $U_{dc} = 0\text{V}$

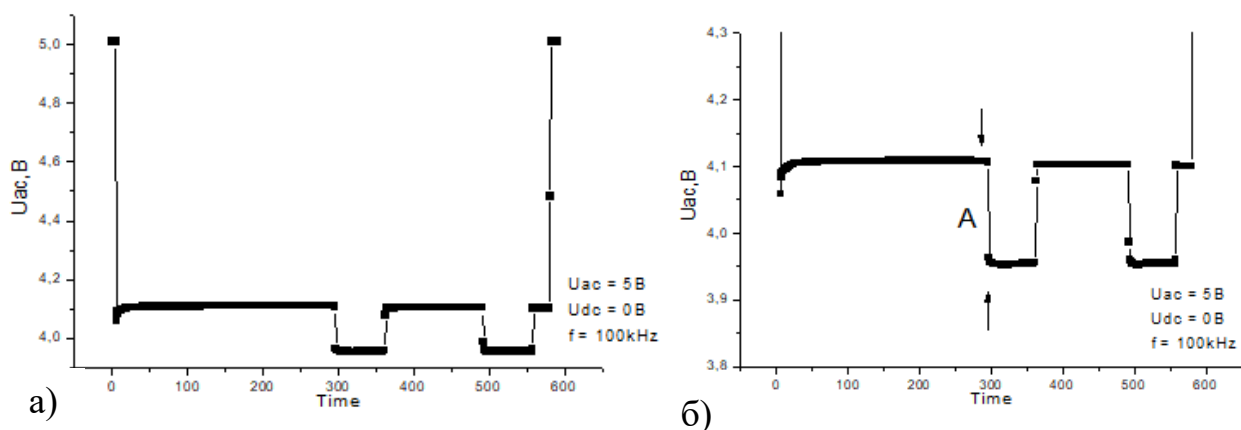


Рис.2.20. Зависимость падения переменного напряжения от времени (весь цикл, включающий лазерное облучение), участок 3 (Si)

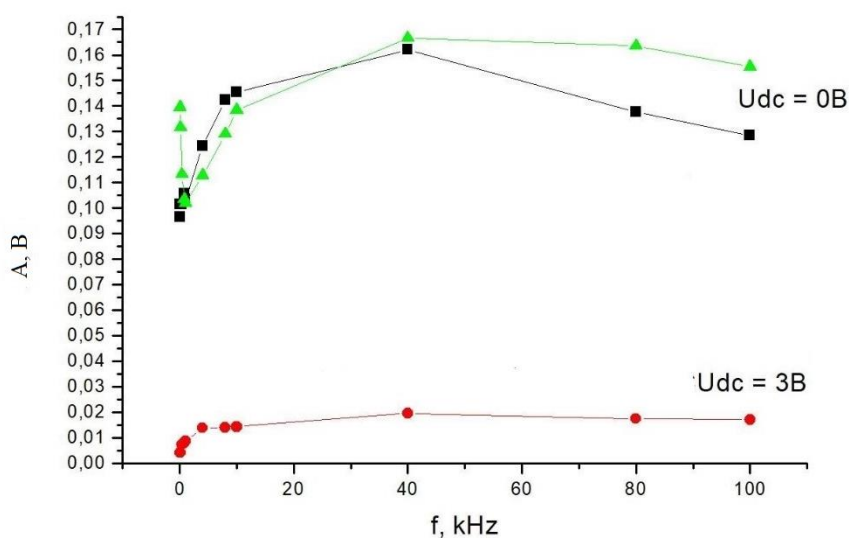


Рис.2.21 Зависимость падения напряжения A при фотовозбуждении от частоты, участок 3 (Si)

На рисунке 2.21 построена зависимость падения напряжения A при фотовозбуждении структуры от частоты. Построены кривые для смещений 0В и +3В.

На рисунке 2.22 построена зависимость падения напряжения A при фотовозбуждении структуры от частоты. Были построены зависимости при положительных и отрицательных смещениях. На рисунке 2.22 (а) смещение $U_{dc} = (-3, 4)V$, переменное напряжение $U_{ac} = 5V$, а на рисунке 2.22 (б)

смещение $U_{dc} = (-3, 4)\text{В}$. Видно разделение положения кривых для положительных и отрицательных показателей смещения.

На рисунке 2.23 построены зависимости падения напряжения А при фотовозбуждении структуры от частоты при смещении $U_{dc} = 0\text{В}$ и переменном напряжении $U_{ac} = 5\text{В}$. Эксперимент был проведен несколько раз. На рисунке 2.23 (а) два раза проведен эксперимент, на рисунке (б) - добавился еще один эксперимент.

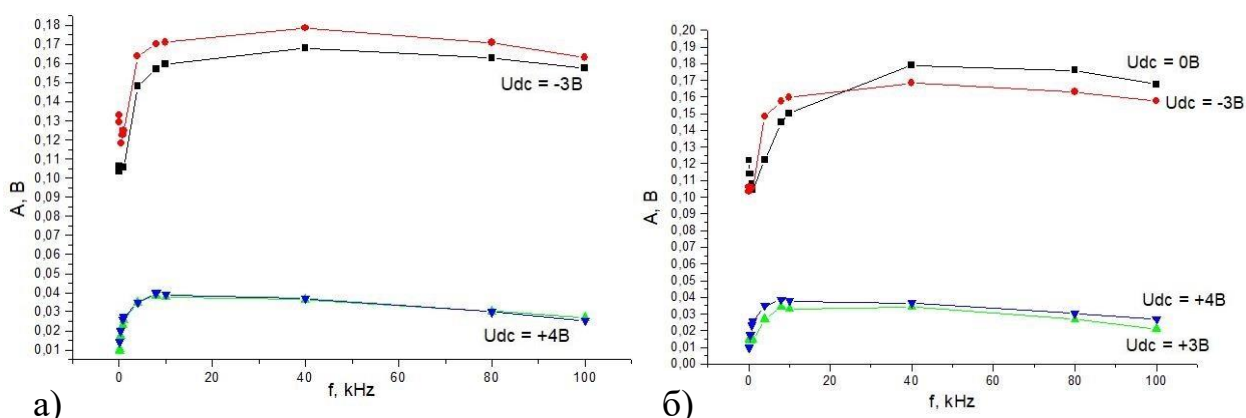


Рис.2.22. Зависимость падения напряжения А при фотовозбуждении структуры от частоты, участок 3 (Si, для смещений $U_{dc} = (+3, +4, -3, -4)\text{В}$

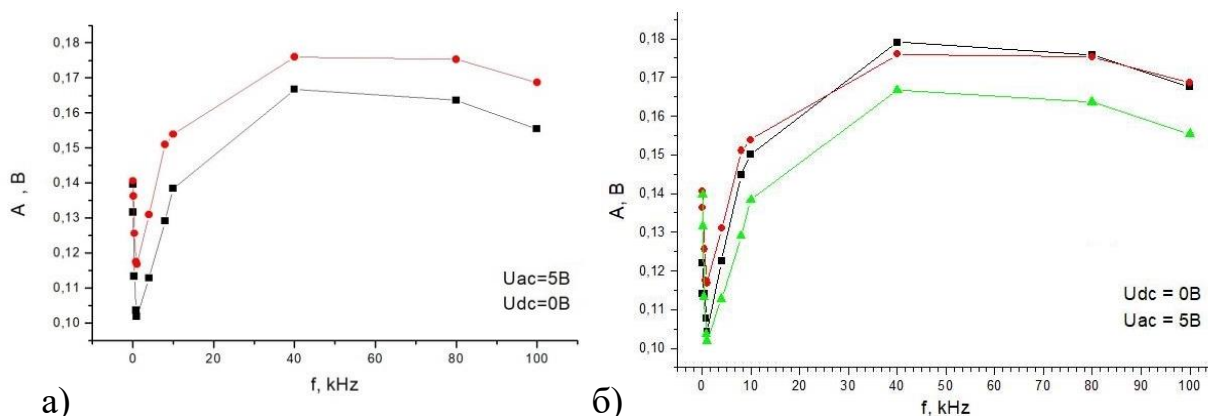


Рис.2.23. Зависимость падения напряжения А при фотовозбуждении структуры от частоты, участок 3 (Si), для смещений $U_{dc} = 0\text{В}$

На рисунке 2.24 участка 3 (Si) зафиксированы параметры: шаг по времени - 300 единиц; температура 21C^0 ; $f = (100, 80, 40, 10, 8, 4, 1, 0,8, 0,4,$

0,1, 0,08)kHz; $U_{ac} = 5V$, $U_{dc} = (0, -3, +3, +4)V$; $U_{dc} = (-4, -1, +1, +2)V$. Этот эксперимент был повторением с такими же эксперимента, результаты которого представлены на рисунках 2.21, 2.22, 2.23.

Затем этот эксперимент был повторен такими же исходными параметрами для участка 4 (a-Si). Были построены новые зависимости падения напряжения A от частоты f при разных значениях смещения U_{dc} : 0, -1, +1, +2 и -3, -4, +3, +4. На рисунке 2.26 представлены отдельно несколько смещений, а на рисунке 2.27 построены зависимости для всех имеющихся смещений. Зафиксированы параметры: температура $21C^0$ переменное напряжение $U_{ac} = 5V$. Данные эксперимента проведенные в разные дни соединены вместе на рисунке 2.27.

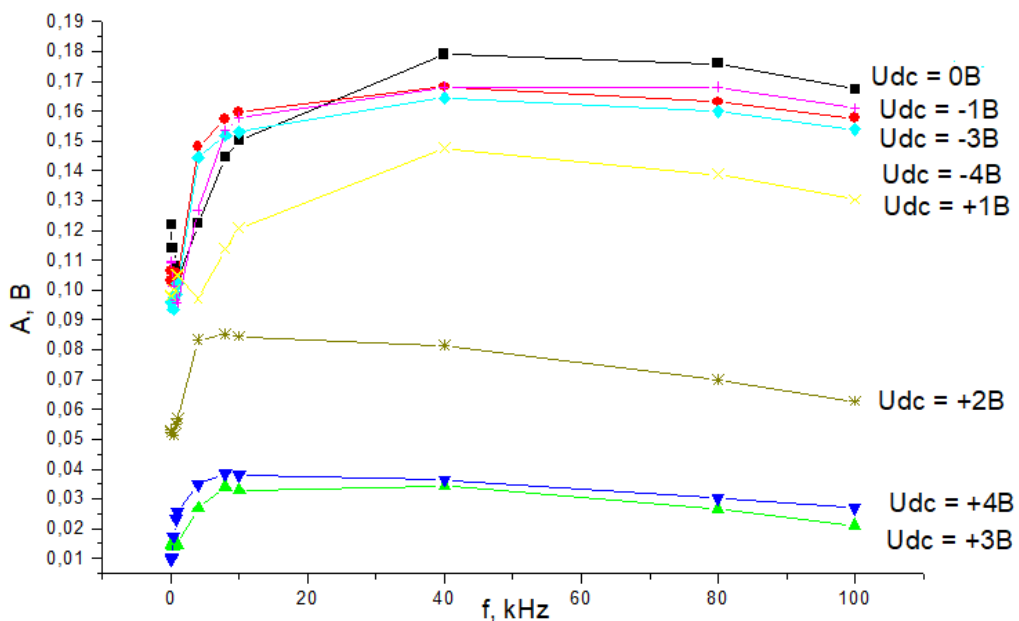


Рис.2.24. Зависимость падения напряжения A от частоты при разных значениях смещения U_{dc} , участок 3 (Si)

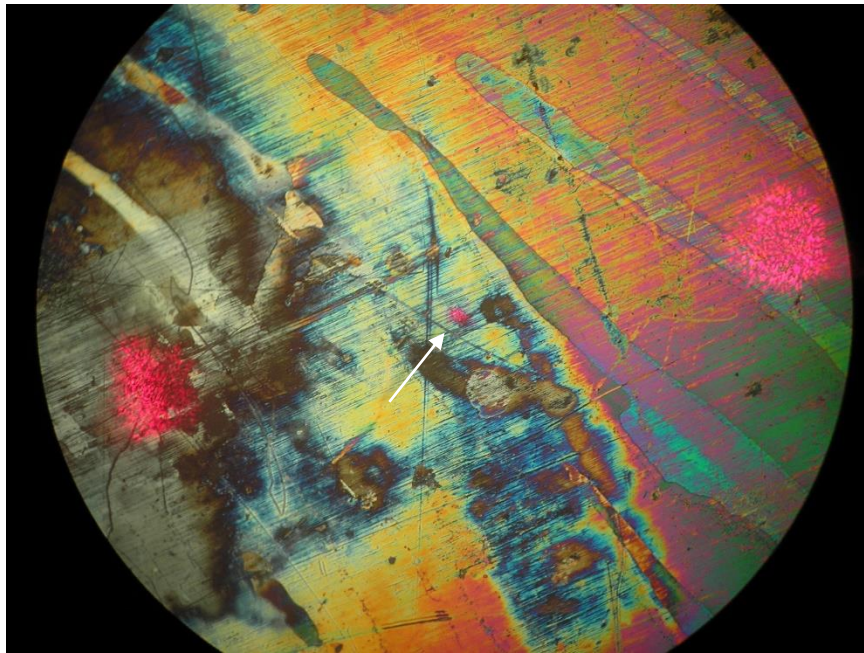
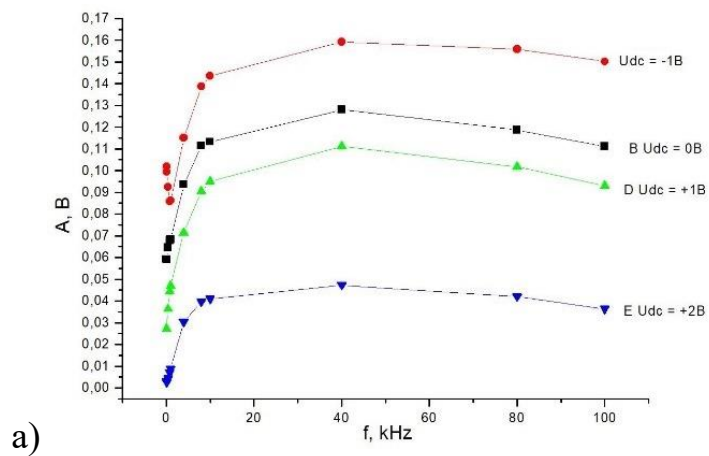
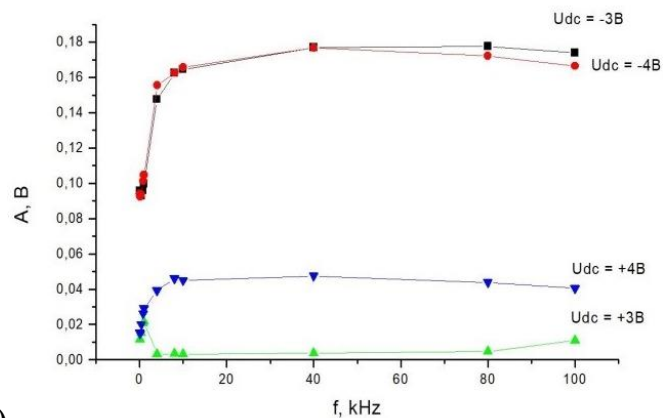


Рис.2.25. Вид участка 4 с напыленной аморфной пленкой кремния a-Si. Стрелка указывает на пятно луча лазера. Светочувствительность отсутствует



а)



б)

Рис.2.26. Зависимость падения напряжения A от частоты f при разных значениях смещения U_{dc} : 0, -1, +1, +2 и -3, -4, +3, +4. участок 4 (a-Si)

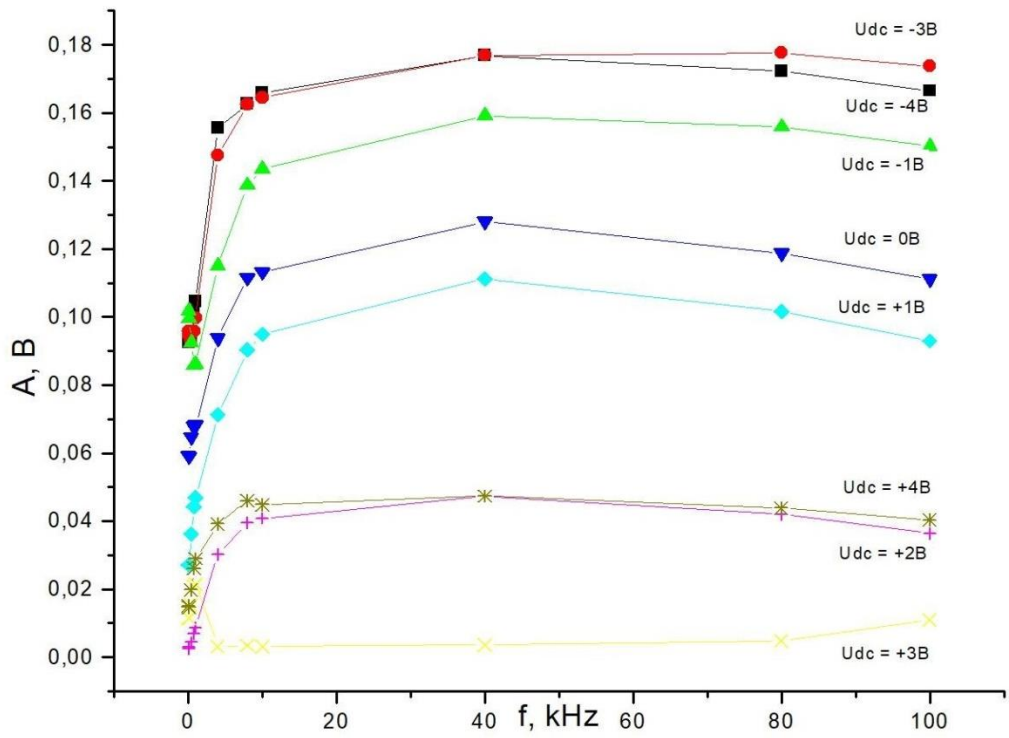
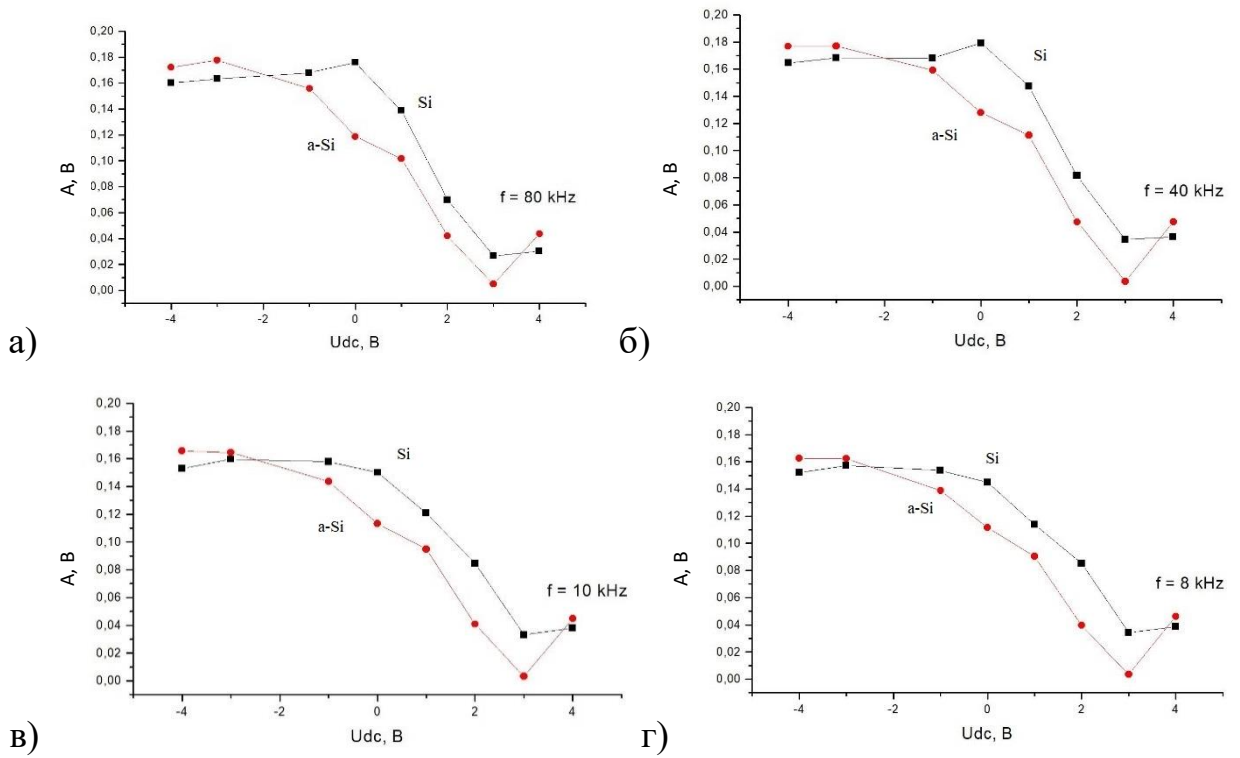


Рис.2.27. Зависимость падения напряжения A от частоты f при разных значениях смещения U_{dc} , участок 4 (a-Si)



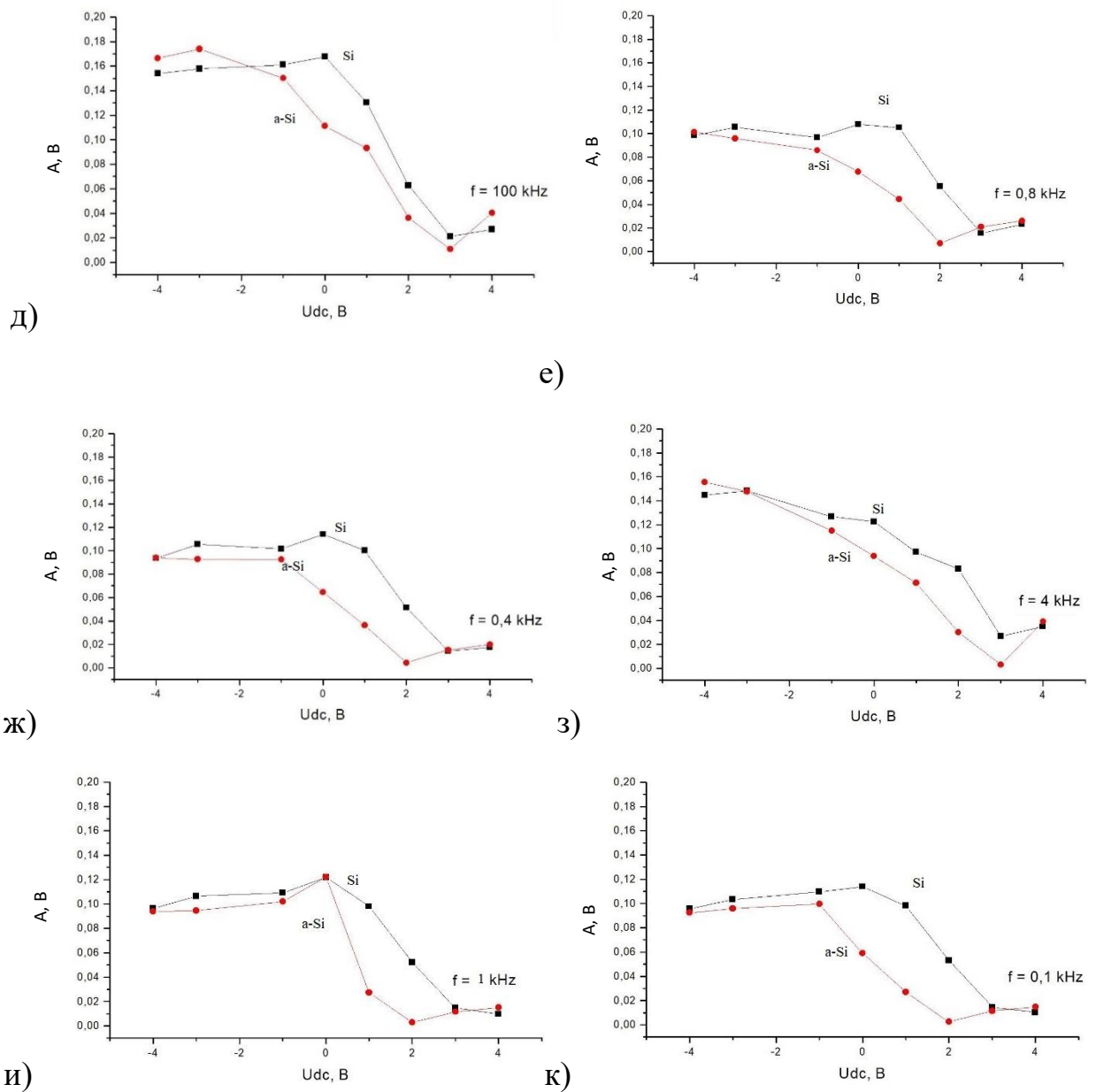


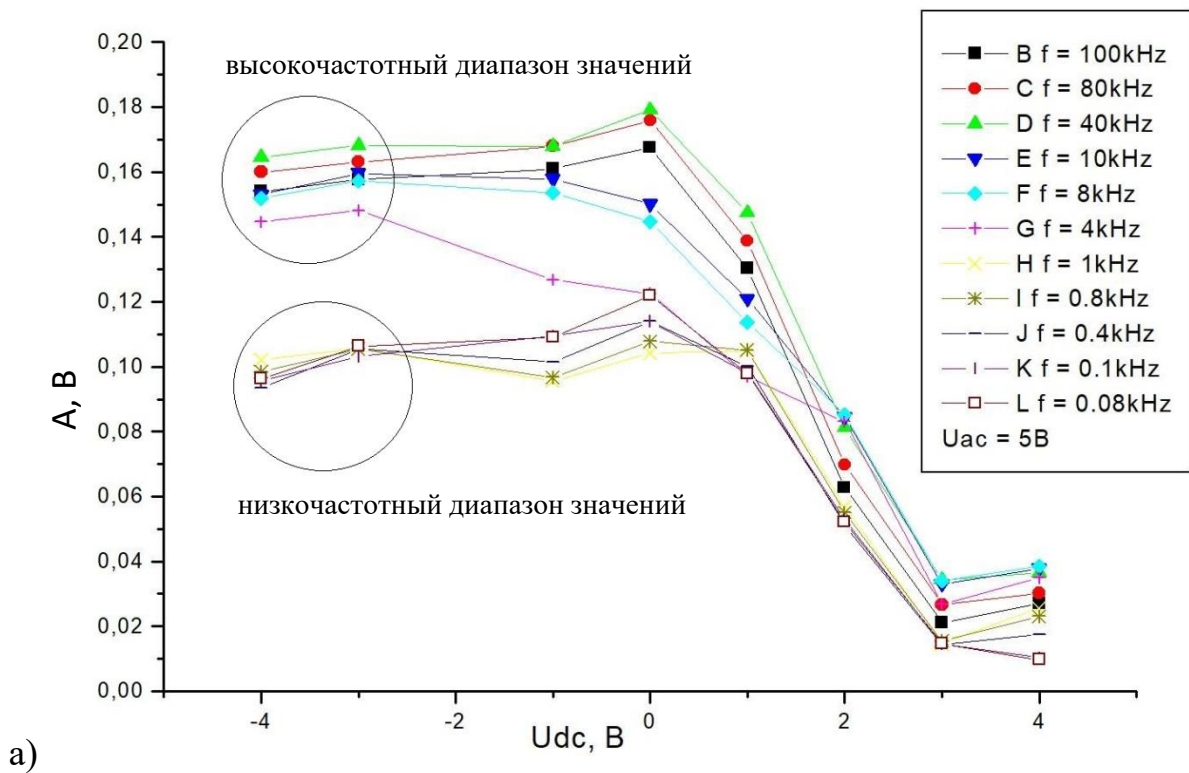
Рис.2.28. Зависимость падения напряжения при фотовозбуждении структуры (3 (Si) и 4 (a-Si) поверхности) от смещения при разных частотах

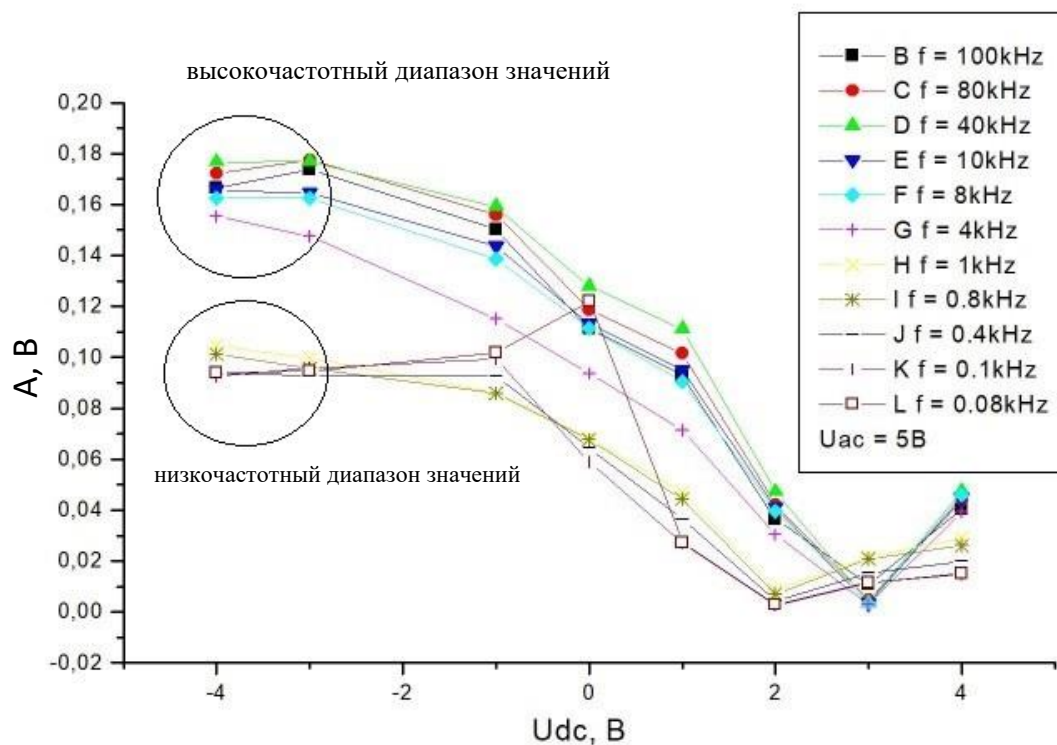
На основе обработки данных представленных на рисунках 2.24 и 2.27 были построены зависимости падения напряжения при фотовозбуждении структуры от смещения при разных частотах для участков 3 (Si) и 4 (a-Si). На рисунке 2.28 представлены эти результаты. На графиках изменяется только параметр частоты, остальные параметры остаются неизменными.

Согласно графикам, все кривые падения напряжения, соответствующих участкам 3 (Si) расположены выше кривых соответствующих участкам

аморфной пленки 4 (a-Si). Это означает, что метод падения напряжения позволяет регистрировать наличие наноразмерных пленок на поверхности кремния в таких структурах как Si/нематик/металл.

На рисунке 2.29 были сведены вместе все зависимости падения напряжения A от всех показаний значений смещения $U_{dc} = (+4, +3, +2, +1, 0, -1, -3, -4)$ В, при разных значениях частоты $f = (100, 80, 40, 10, 8, 4, 1, 0,8, 0,4, 0,1, 0,08)$ кГц; Зафиксированы параметры: шаг по времени - 300 единиц; температура 21C^0 ; $U_{ac} = 5\text{В}$.





б)

Рис.2.29. Сводная зависимость падения напряжения A от смещения U_{dc} при разных значениях частоты f . а) участок 3 (Si); б) участок 4 (a-Si)

Исходя из приведённого графика на рисунке 2.29 как для поверхности кремния, так и для поверхности аморфного кремния, для отрицательных смещений, кривые разделяются по величине падения напряжения на низкочастотный и высокочастотный диапазон значений. Указанное разделение кривых низкочастотный и высокочастотный диапазоны связано с переносом и накоплением ионного заряда в жидком кристалле.

2.5.2 Фотоемкостные свойства структуры Si/нематик/металл с предварительным накоплением заряда

Далее были исследованы фотоемкостные свойства структуры при предварительном действии постоянного напряжения.

Исследования проводились на структуре с участком 3 (Si) и участком 4 (a-Si).

В первую очередь были проведены исследования порога светочувствительности, а именно зависимость смещения от частоты, которая представлена на рисунке 2.30. На рисунке 2.30 (а) эксперимент проводился два раза для участка структуры 3 (Si), а на рисунке 2.30 (б) эксперимент проводился для двух участков 3 (Si) и 4 (a-Si). Исследование порога светочувствительности выполнялось визуальным методом.

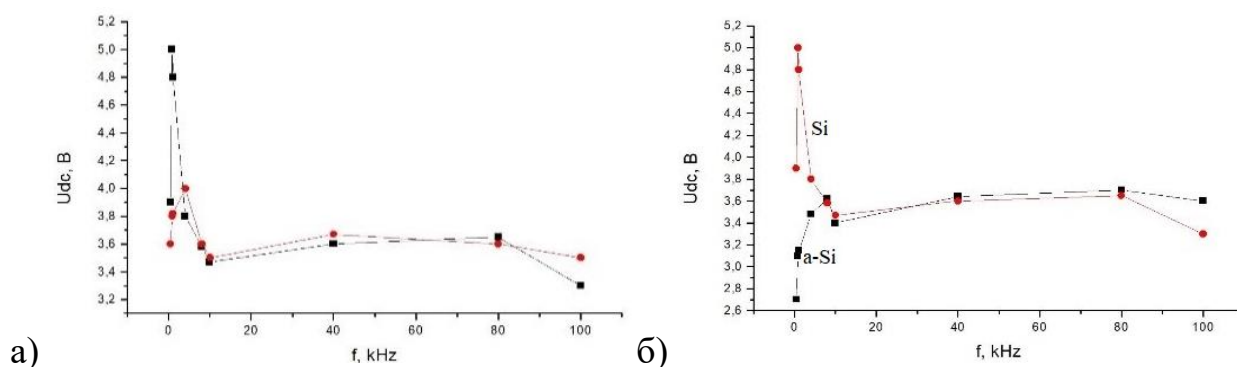


Рис.2.30. Зависимость порога светочувствительности (смещения) от частоты, при разных частотах. а) участок Si; б) участок Si и a-Si

Сравнивая порог светочувствительности представленным на рисунке 2.30 с методом падения напряжения представленным на рисунке 2.29, делаем вывод, о том, что метод падения напряжения более чувствителен нежели метод основанный на визуальном контроле светочувствительности.

Далее исследовалось падения переменного напряжения от времени при предварительной подачи переменного напряжения на структуру.

На рисунке 2.31 представлена зависимость падения переменного напряжения от времени без предварительной подачи постоянного напряжения.

На рисунке 2.32 представлена зависимость падения переменного напряжения от времени с предварительной подачи постоянного напряжения. Время подачи постоянного напряжения -3В 1 минута, а далее подавалось

переменное напряжение. Указанные эксперименты проводились в разные дни.

На рисунке 2.33 представлена зависимость падения переменного напряжения от времени с предварительной подачи постоянного напряжения (б) и без предварительной подачи постоянного напряжения (а). Стрелки указывают на точки, которые были взяты, для нахождения разницы переменного напряжения (а). Первые две «ступени», места в период свечения лазерным излучением, а последний (третья) «ступень», место в период свечения светом с мобильного устройства.

Для экспериментов были заданы следующие параметры: температура $22C^0$, частота $f = 80kHz$, переменное напряжение $U_{ac} = 5V$, смещение $U_{dc} = 0V$, постоянное напряжение $U_{пост} = -3V$.

Полученные временные относительные единицы time (время) приблизительно равны: 50 ед. - 15 сек., 100 ед. - 30 сек, 200 ед. - 1 мин, 1000 ед. - 5 мин.

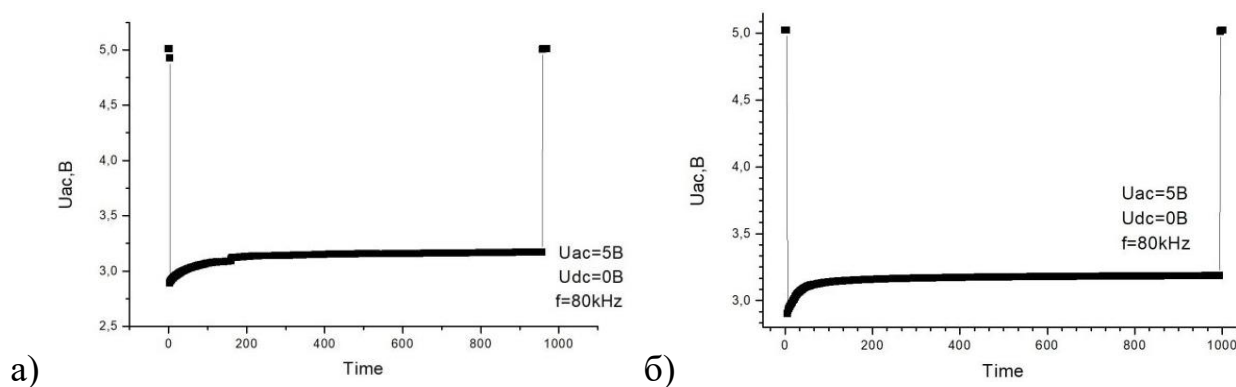


Рис.2.31. Зависимость падения переменного напряжения от времени. а) эксперимент 1, б) эксперимент 2

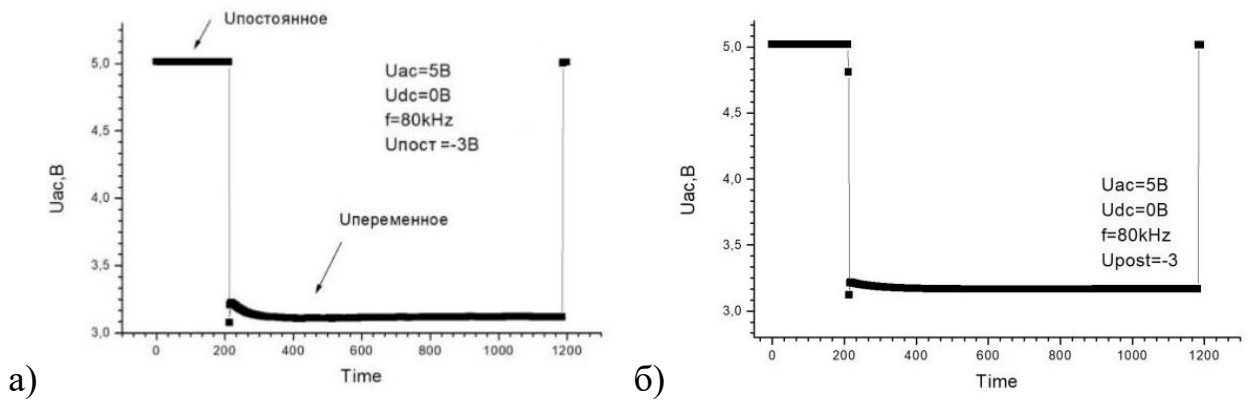


Рис.2.32. Зависимость падения переменного напряжения от времени. а) эксперимент 1, б) эксперимент 2

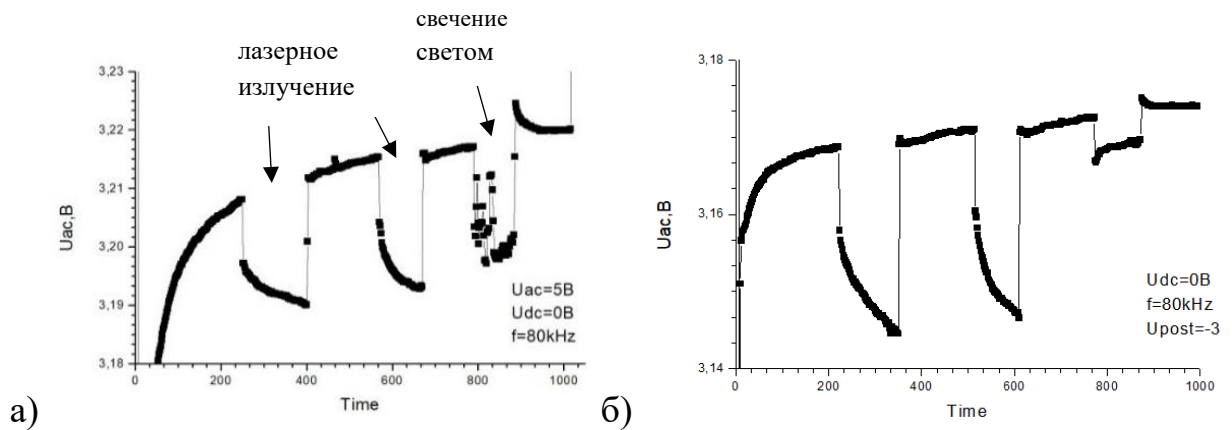


Рис.2.33. Зависимость падения переменного напряжения от времени. а) без предварительной подачи постоянного напряжения, б) с предварительной подачи постоянного напряжения, $U_{\text{пост}}=-3\text{В}$

Из рисунка 2.33 следует, что влияние на величину фототока накопления заряда незначительно.

Далее были проведены эксперименты с предварительной подачей постоянного напряжения положительной полярности относительно кремния.

На рисунках 2.34 и 2.35 представлено сравнение зависимостей падения переменного напряжения от времени, с предварительной и без предварительной подачи постоянного напряжения.

Были заданы следующие параметры: температура 21C^0 , смещение $U_{\text{dc}} = 0\text{В}$, переменное напряжение $U_{\text{ac}} = 5\text{В}$, $U_{\text{пост}} = +1\text{В}$, время 13 минут. На

каждой минуте по 30 секунд светили лазером. В конце 1 минуту часто открывали и закрывали лазер. Между экспериментами было около 5 минут. Из приведённых рисунков 2.34 и 2.35 следует, что амплитуда фотоответа структуры фактически не изменилась.

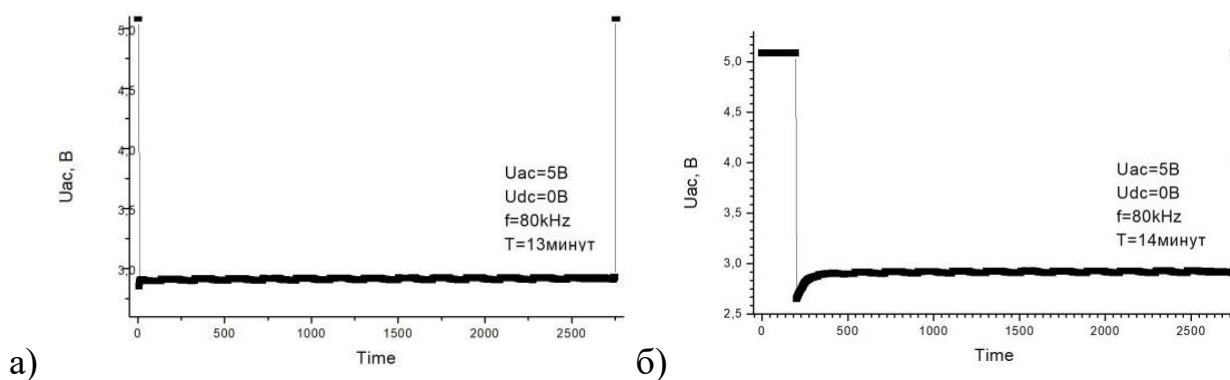


Рис.2.34. Зависимость падения переменного напряжения от времени. а) без предварительной подачи постоянного напряжения, б) с предварительной подачи постоянного напряжения $U_{\text{пост}} = +1\text{В}$

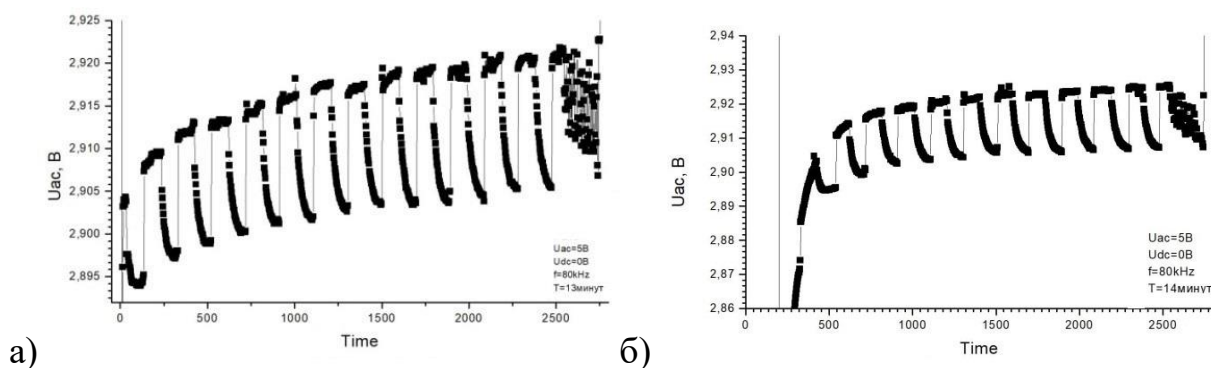


Рис.2.35. Зависимость падения переменного напряжения от времени. а) без предварительной подачи постоянного напряжения, б) с предварительной подачи постоянного напряжения $U_{\text{пост}} = +1\text{В}$

В следующих экспериментах длительность подачи постоянного напряжения увеличена до 5 минут.

На рисунке 2.36 представлена зависимость падения переменного напряжения от времени, без предварительной подачи постоянного напряжения. На рисунке 2.36 (б) выбраны другие масштабы графика.

На рисунке 2.37 представлена зависимость падения переменного напряжения от времени, с предварительной подачей постоянного напряжения.

Были заданы следующие параметры: температура $19C^0$, смещение $U_{dc} = 0V$, переменное напряжение $U_{ac} = 5V$, частота $f=80kHz$, $U_{пост} = (-1, -3, -4, +1)V$, время 5 минут. На каждой минуте осуществлялось свечение по 30 секунд лучом от лазера. В конце одну минуту часто открывали и закрывали лазер. Между экспериментами было около 5 минут. Постоянное напряжение подавалось на ячейку по 3 минуты. Оставшиеся время подавалось переменное напряжение.

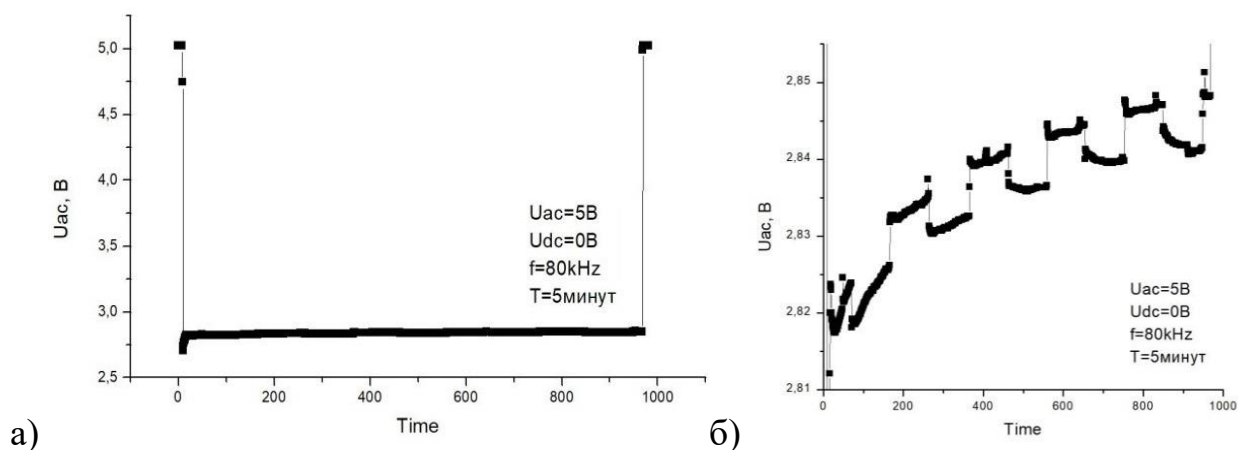
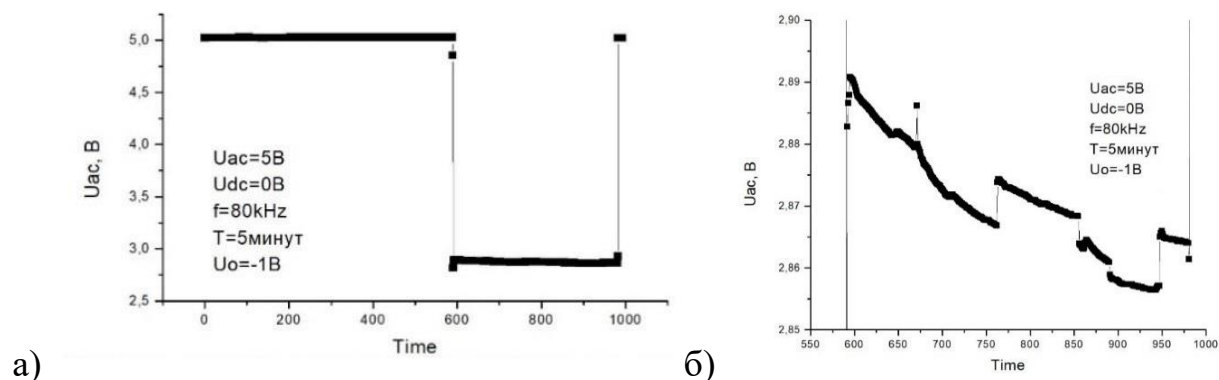


Рис.2.36. Зависимость падения переменного напряжения от времени, без предварительной подачи постоянного напряжения. На рисунке (б) выбраны другие масштабы графика (а)



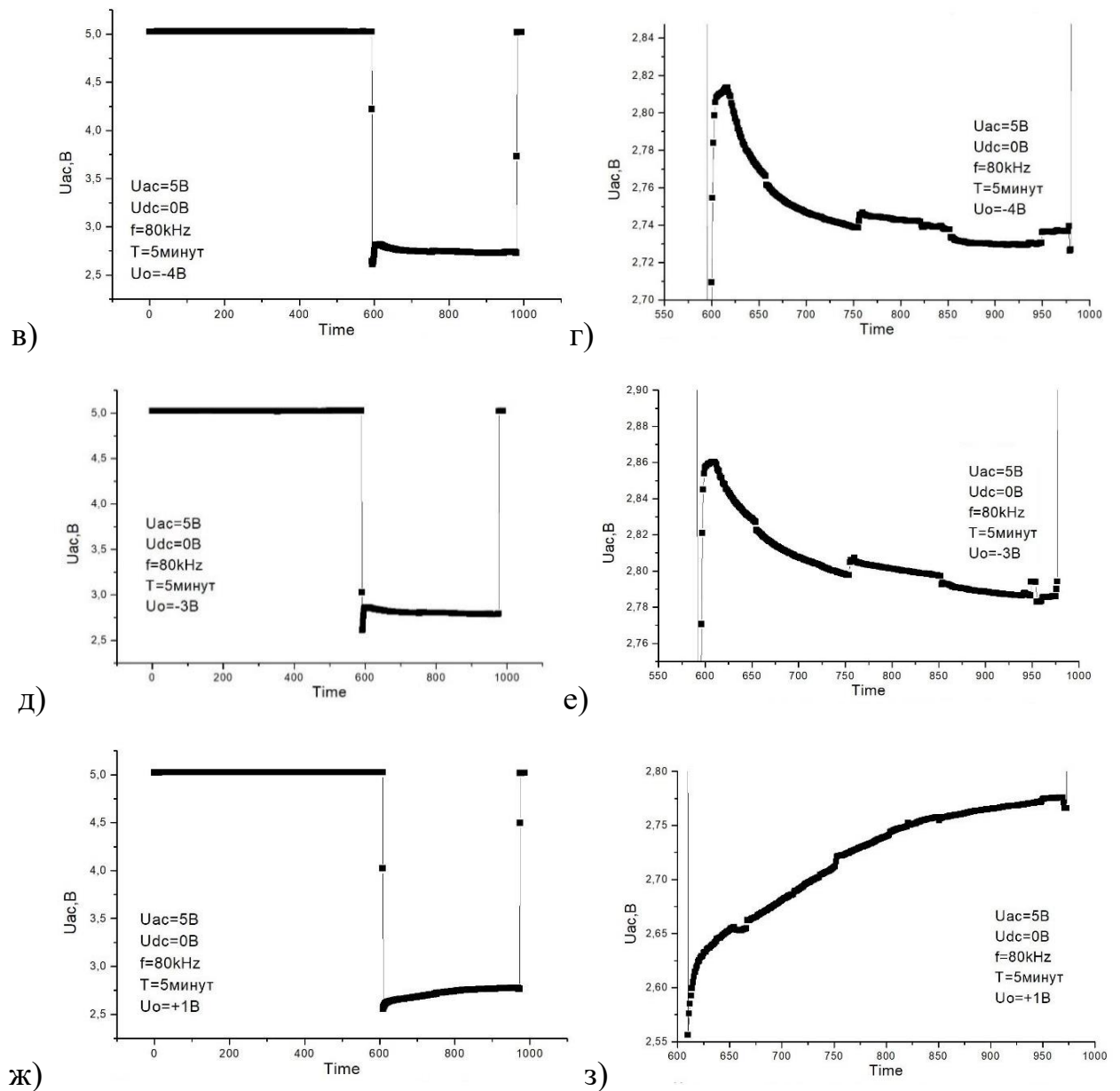


Рис.2.37. Зависимость падения переменного напряжения от времени, с предварительной подачей постоянного напряжения

Накопление заряда влияет на амплитуду фототока структуры. При предварительной подаче постоянного напряжения с отрицательной полярностью амплитуда фототока большая, а при положительных значениях постоянного напряжения амплитуда фототока меньшее значение. Это не противоречит процессам обеднения или обогащения поверхности кремния в структуре под действием ионных зарядов накапливающихся у поверхности кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении работы были получены следующие результаты:

1. Показано, что методом падения напряжения можно исследовать процессы обеднения и обогащения поверхности кремния в структуре Si/нематик/металл при напряжениях сравнимых с порогом Фредерикса.

2. Методом падения напряжения установлено проявление емкостных и фотоемкостных свойств структуры Si/нематик/металл при напряжениях сравнимых с порогом Фредерикса.

3. Установлено влияние процессов накопления и переноса ионных зарядов в жидком кристалле на характер кривых зависимостей падения напряжения от смещения (разделение на низкочастотный и высокочастотный диапазон).

4. Метод падения напряжения позволяет регистрировать наличие наноразмерных пленок аморфного кремния на поверхности кремния в структуре Si/нематик/металл.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Парыгин В. Н., Балакший В. И., Оптическая обработка информации, М., 1987; Пространственные модуляторы света, М., 1987 г.;
2. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н., Методы модуляции и сканирования света, М., 1970 г.;
3. S.Chandrasekhar, liquid crystals, Raman Research Institute, Bangalore. С. Чандрасекар, жидкие кристаллы, перевод с англ., канд. физ.-мат. наук Л. Г. Шалтыко, под редакцией д-ра физ.-мат. наук, проф. А.А. Веденова и д-ра физ.-мат. наук, проф. И.Г. Чистякова. Издательство «Мир», Москва 1980 г.;
4. Каманина Н. В. Электрооптические системы на основе жидких кристаллов и фуллеренов - перспективные материалы нанoeлектроники. Свойства и области применения. Учебное пособие. - СПб: СПбГУИТМО, 2008 г. - 137с;
5. Э.Е. Блохин, материалы электронной техники: учебно-методическое пособие к лекционным занятиям / Блохин Э.Е.; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. - Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2017 г. - 38 с;
6. Фредерикс В., Золина В. О применении магнитного поля к измерению сил, ориентирующих анизотропные жидкости в тонких однородных слоях // ЖРФХО ч. Физ. 1930 г. Т. LXII, № 5. С. 458– 464;
7. Пикин С. А., Блинов Л. М. Жидкие кристаллы. М., 1982 г.;
8. Пикин С. А. Структурные превращения в жидких кристаллах. М., 1981 г.;
9. Адамчук А., Стругальский З. Жидкие кристаллы: Пер. с польск./ Под ред. И.Г. Чистякова. - М.: Сов. Радио, 1979 г. - 160 с.;
10. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М., 1978 г.;

11. Платэ Н. А., Шибает В. П. Гребнеобразные полимеры и жидкие кристаллы. М., 1980 г.;
12. Кац Е. И., Лебедев В. В. Динамика жидких кристаллов. М., 1988г.;
13. Томилин М. Г. Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью. СПб., 2001 г.;
14. Амоносова Л.П.Коншина Е.А., Костомаров Д.С, Федоров М.А. Электроуправляемое двулучепреломление в нематических жидких кристаллах. Учебное пособие.- СПб:СПбГУ ИТМО, 2010 г.-63с.;
15. Де Жен П. Ж. Физика жидких кристаллов. М., 1977 г.;
16. Мари Ж., Донжон Ж., Азан Ж. П., Устройства воспроизведения изображений, основанные на эффекте Погкельса, и их применение, в кн.: Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений, т. 1, под ред. Б. Кейзана, пер. с англ., М., 1978г.;
17. Топорков В. М., изучение эффекта Погкельса и модуляции света, Новосибирс, 2003г., 24 стр.;
18. Гуртов В. А., Твердотельная электроника: Учеб. пособие / В. А. Гуртов. - Москва, 2005 г. -492с. Глава 3 физика поверхности и мдп-структуры, п. 3.6 вольт-фарадные характеристики структур МДП, стр. 101-116;
19. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. 2-е изд. М., 1970 г.;
20. Отблеск А. Е., Челноков В. Е. Физические проблемы в силовой полупроводниковой электронике. Л., 1984 г.;
21. Бурбаева Н. В., Днепровская Т. С. Основы полупроводниковой электроники. М., 2012 г.;
22. Ковчавцев А. П., Структуры металл-диэлектрик-полупроводник на основе арсенида индия специальность. Диссертация на соискание ученой степени;

23. А. Г. Захаров, Н.А. Филипенко. Методические указания к выполнению индивидуального задания по курсу «Физические основы микроэлектроники». Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003 г. 36 с.;
24. Дубинин А. Е., Михайлов В. И., Киреев В. Р., Чернышева Л. П., Цаплин Н. Н. Основы теории цепей. Тестовые задания по курсу ОТЦ. ПГАТИ, кафедра ТЭЦ, Самара 2004 г., 58 с.;
25. Михайлов В. И., Чернышева Л. П. Методические указания к лабораторным работам по 1-й части курса «Основы теории цепей». ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара, 2002 г., 85 с.;
26. Бакалов В. П., Дмитриков В. Ф., Крук Б. И Основы теории цепей. - М: Радио и связь, 2000 г.- 592 с.;
27. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Часть 1, 2, 3. - М: Энергия, 1978 г.- 592 с.;
28. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. - М.: Гардарики. 1999 г.- 638 с.;
29. Магда Ю. С., LabVIEW. Практический курс для инженеров и разработчиков. Мягкая обложка, 208 стр. Тираж: 200 экз., 2012 г.;
30. Л. Г. Белиовская, Н .А. Белиовский. Основы машинного зрения в среде LabVIEW: учебный курс: учебное пособие. - Электрон. Дан. - Москва: ДМК Пресс, 2017 г.-88 с.;