МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

А.Д. Баринов В.А. Воронцов Д.А. Зезин

ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Практикум по выполнению лабораторных работ

по курсу «Физика и технология неупорядоченных полупроводников»

для студентов, обучающихся по направлению «Электроника и наноэлектроника»

Москва Издательство МЭИ 2018 Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»

Подготовлено на кафедре электроники и наноэлектроники

Баринов А.Д.

Б 249 Физика и технология неупорядоченных полупроводников: практикум по выполнению лабораторных работ / А.Д. Баринов, В.А. Воронцов, Д.А. Зезин. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 82 с.

Содержит необходимый материал для проведения лабораторных занятий, посвященных изучению физики и техники неупорядоченных полупроводников.

Предназначено для студентов ИРЭ МЭИ, обучающихся по направлению «Электроника и наноэлектроника». Продолжительность лабораторных занятий – 4 часа.

УДК 621.38 ББК 22.379

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2018

Оглавление

1. Вводная статья 3 работа №1. 5 2. Лабораторная Температурная зависимость электропроводности аморфных полупроводников. Лабораторная Определение работа <u>№</u>2. 3. 13 оптических характеристик пленок аморфного кремния. 4. Лабораторная работа №3. Изучение спектра пропускания 24 аморфного кремния в инфракрасном диапазоне. 5. Лабораторная работа №4. Измерение коэффициента поглощения 41 и плотности состояний в полупроводниках с помощью метода постоянного фототока. Лабораторная работа <u>№</u>5. Определение 47 характеристик 6.

б. Лабораторная работа №5. Определение характеристик 47 оптических дисков методами туннельной и атомно-силовой микроскопии.

7. Лабораторная работа №6. Исследование параметров 60 электрофотографических носителей изображения на основе некристаллических полупроводников.

8. Лабораторная работа №7. Спектральная чувствительность и 71 вольт-амперная характеристика солнечного элемента.

ВВОДНАЯ СТАТЬЯ

Практикум посвящён изучению основ физики и технологии неупорядоченных полупроводников. Физике процессов, происходящих в аморфных полупроводниках, посвящены первые четыре работы. Технологическая составляющая рассмотрена в лабораторных работах №5-7.

Первая работа посвящена изучению температурной зависимости электропроводности аморфных полупроводников, которая позволяет определить доминирующий механизм электропроводности для каждой заданной температуры.

Вторая работа знакомит обучающегося с методикой определения основных оптических параметров аморфного кремния при помощи измерения спектра пропускания оптического диапазона.

Третья работа позволяет студентам на практике освоить методику определения примесей в аморфном кремнии по результатам измерения спектра ИК-пропускания на примере пленок аморфного кремния.

Четвёртая работа посвящена методу расчёта параметров распределенных состояний в запрещённой зоне некристаллического полупроводника по результатам обработки спектральных измерений.

Пятая работа посвящена освоению практических приемов работы с атомно-силовым микроскопом на примере анализа особенностей строения оптических дисков, изготовленных на основе ХСП.

Шестая работа знакомит обучающихся с методикой измерения основных параметров электрофотографических цилиндров лазерных принтеров.

Седьмая работа посвящена изучению основных параметров солнечных элементов.

лабораторных работ позволяет обучающимся Комплекс ПО направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроники» всесторонне процессы, изучить физические происходящие аморфных В полупроводниках, применить также полученные знания а при исследовании параметров приборов, изготовленных на основе некристаллических полупроводников.

4

Лабораторная работа №1

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

<u>Цель работы</u>: экспериментальное изучение температурной зависимости электропроводности аморфных полупроводников, механизмов электропереноса в аморфных полупроводниках.

Теоретическое введение

В кристаллических полупроводниках для энергетического распределения плотности электронных состояний N(E)характерно наличие резких краев плотности состояний у потолка валентной зоны и плотности проводимости. Резкие края дна зоны состояний обусловливают наличие четко выраженной запрещенной зоны. Элементы зонной структуры являются следствием идеального ближнего и дальнего порядков в расположении атомов кристалле.

В аморфном полупроводнике дальний порядок расположения атомов нарушен, тогда как ближний порядок, т.е. межатомные расстояния и углы между связями, изменен лишь незначительно. Существует несколько моделей зонной диаграммы аморфного материала, но все они основаны на представлениях о локализации состояний в хвостах зон. Эти модели приведены на рисунке 1.1.



Рис. 1.1 – Модели зонных диаграмм для аморфных полупроводников (заштрихованные области – области локализованных состояний): а) модель Коэна-Фрицше-Овшинского (КФО); б) модель Мотта-Дэвиса; в) модифицированная модель Мотта-Дэвиса

Приведённые модели разрабатывались авторами постепенно от простой (1.1a) к более полной (1.16-1.1в). Каждая последующая модель уточняла и дополняла предыдущую, пытаясь объяснить открытые с течением времени экспериментальные данные. Так модель КФО позволяет хорошо объяснить электрические свойства халькогенидных стекол. Однако аморфные халькогениды обладают высокой оптической прозрачностью за краем поглощения, имеющим резкую границу, что не согласуется с предположением о глубоком проникновении хвостов плотности состояний в запрещенную зону.

Модели Мотта-Дэвиса хорошо описывают электрические, фотоэлектрические и оптические свойства пленок тетраэдрических аморфных полупроводников, таких, как кремний и германий. Причем «однопиковая» (1.16) модель наиболее хорошо подходит для слоев *a*-Si и полученных облучением кристаллических α-Ge, ионным полупроводников, а «двухпиковая», модифицированная модель (1.1в), позволяет объяснить особенности физических свойств гидрогенизированного аморфного кремния (*a*-Si:H).

Согласно модели Мотта-Дэвиса, в аморфных полупроводниках реализуются три механизма проводимости, относительное влияние которых на полную проводимость не одинаково при различных температурах. При очень температурах проводимость низких обусловлена термически активированным прыжковым переносом носителей заряда по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. В области промежуточных температур носители переходят В состояния, содержащиеся локализованные В хвостах 30H, И электроперенос здесь также осуществляется за счет прыжкового механизма. При высоких температурах имеет место проводимость по делокализованным состояниям носителями, активированными в зону этих состояний.

Температурная зависимость электропроводности

Проводимость в зоне делокализованных состояний (проводимость по распространенным состояниям)

Будем считать, что полупроводник невырожден и плотность состояний и подвижность в зоне проводимости постоянны. Тогда удельную проводимость, осуществляемую электронами, возбужденными выше края подвижности E_c , можно представить в виде:

$$\sigma = qN(E_C)\mu_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right),\,$$

где μ_c – среднее значение подвижности, $N(E_c)$ – плотность состояний в зоне проводимости. Для типовых некристаллических полупроводников при комнатной температуре $\mu_c = 10 \text{ см}^2/(B \cdot c)$. При таком типе подвижности средняя длина свободного пробега электронов сравнима с

межатомным расстоянием. Выражение для удельной проводимости также записывают в сокращённом варианте:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right),\,$$

где σ_0 – предэкспоненциальный множитель, проводимость при $T \rightarrow \infty$.

У многих тетраэдрических аморфных полупроводников $\sigma_0 = (10 \div 10^3)$ Ом⁻¹см⁻¹.

Проводимость по локализованным состояниям в хвостах энергетических зон

Если волновые функции электронов локализованы, то $\sigma(E) = 0$ и перенос носителей заряда может осуществляться только за счет термически активированного прыжкового механизма. Каждый раз, когда электрон переходит из одного локализованного состояния в другое, он обменивается энергией с фононом. Для подвижности носителей μ_h в случае прыжковой проводимости справедливо активационное соотношение:

$$\mu_h = \mu_0 \exp\left[-\frac{W(E)}{kT}\right],\,$$

где W(E) – энергия активации прыжка электрона, μ_0 – предэкспоненциальный множитель, подвижность при $T \to \infty$.

Типовое значение при комнатной температуре $\mu_h \approx 10^{-2}$ см²/(B·c), т. е. в случае прыжковой проводимости по локализованным состояниям в хвосте зоны подвижность на два-три порядка меньше величины μ_c .

Прыжковая проводимость в этом случае можно представить в виде:

$$\sigma_h = \sigma_{0h} \exp\left(-\frac{E_A - E_F + W}{kT}\right),\,$$

где σ_{0h} – переменная, определяемая свойствами материала.

Проводимость по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми

Полагают, что переход электронов из одного локализованного состояния в другое происходит за счет стимулируемых фононами процессов туннелирования. Этот механизм проводимости аналогичен примесной проводимости в сильно легированных и компенсированных кристаллических полупроводниках при низких температурах.

Для данного типа проводимости получаем:

$$\sigma_F = \frac{1}{6} q^2 R^2 v_{ph} N(E_F) \exp(-2\alpha R) \exp(-W / kT),$$

где R – длина прыжка (при высоких температурах эта величина равна расстоянию между атомами), α – параметр, который характеризует размер локализации волновой функции электрона (радиус локализации), $N(E_F)$ – плотность состояний на уровне Ферми, v_{ph} – величина, пропорциональная частоте фонона.

Величину *W* (разность энергий между двумя локализованными состояниями), можно рассчитать как:

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)}.$$

Проводимость с переменной длиной прыжка

В предельном случае, при очень низких температурах, число и энергия фононов, равно как и вероятность переходов, требующих участия фононов высоких энергий, уменьшаются. Носители заряда, «выбирая» энергетически выгодные состояния, вынуждены совершать прыжки на большие расстояния, позволяющие попасть на узлы, лежащие ближе по энергии, нежели ближайшие соседи. Этот механизм носит название проводимости с переменной длиной прыжка.

В этом случае температурную зависимость удельной проводимости можно теперь представить в виде:

$$\sigma_L = \sigma_{0L}(T) \exp\left(-\frac{A}{T^{1/4}}\right),$$
 где $\sigma_{0L} = \frac{q^2 v_{ph}}{2\sqrt{8\pi}} \sqrt{\frac{N(E_F)}{\alpha kT}}$

Следует отметить, что при анализе проводимости с переменной нескольких прыжка Мотт исходил ИЗ упрощающих длиной предположений и не учитывал энергетической зависимости плотности состояний вблизи уровня Ферми Е_F, корреляционных эффектов при туннелировании носителя, многофононных процессов и электронвзаимодействия. Несмотря фононного на то, что приведённая зависимость многократно подтверждена экспериментально, величина $N(E_F)$, определяемая из уравнения для $\sigma_{0L}(T)$, имеет чрезмерно высокие значения. Несколькими годами позже показано, что на результаты теоретического описания процесса проводимости с переменной длиной существенное прыжка влияние оказывает конкретный распределения ВИД функции плотности состояний кристаллических по энергиям.

В зависимости от величины и профиля плотности локализованных стояний в запрещенной зоне аморфного полупроводника могут наблюдаться не все механизмы проводимости. Кроме того,

8

существующие механизмы электропереноса дают разный вклад в общую проводимость аморфного полупроводника при различных температурах. Таким образом, в общем случае и в большом диапазоне температур зависимость $\sigma(T)$ может быть представлена в виде:

$$\sigma(T) = \sum_{i=1}^{3} \sigma_{0i} \exp\left(-\frac{\Delta E_i}{kT}\right) + \sigma_{04} T^{\delta} \exp\left[\left(-\frac{T_0}{T}\right)^{\beta}\right].$$

Член с i=1 соответствует проводимости по распространенным состояниям σ . Слагаемое с i=2 – прыжковая проводимость по локализованным состояниям в хвостах зон σ_h . При i=3 наблюдается прыжковая проводимость по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми с постоянной энергией активации σ_F . Последнее слагаемое правой части уравнения соответствует переносу по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми с переменной длиной прыжка σ_I .

В принятых здесь обозначениях температурная зависимость может быть представлена в виде, как показано на рисунке 1.2.



Рис. 1.2 – Общий вид температурной зависимости проводимости аморфного полупроводника в координатах Аррениуса

В координатах Аррениуса $\ln(\sigma) = f(1/T)$ для механизмов с *i* = 1,2,3 – выполняются линейные законы, а параметры электропереноса σ_{0i} , ΔE_i могут быть определены графически.

Методика измерений

Для измерения электропроводности и ее температурной зависимости применяется автоматизированная система электрофизических измерений ASEC-03. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.3.



 1 – компьютер, 2 – измерительный блок, 3 – блок питания со схемой температурной стабилизации и измерителем давления, 4 – термостат

Лабораторная установка ASEC-03 позволяет проводить измерения при охлаждении азотом, при освещении постоянным или импульсным источником света. В связи с тем, что эти возможности стенда в данной лабораторной работе не используются, соответствующие элементы отсутствуют на рис. 1.3.

Основная часть ASEC-03 – это измерительный блок, 2. Блок соединен с термостатом 4. Образец помещается внутрь термостата на термостабилизируемый столик. Измерительный блок соединяется с компьютером через параллельный порт LPT и с блоком питания, 3. Нагрев столика обеспечивается нагревателем, который управляется схемой стабилизации температуры. В качестве измерителя температуры терморезистор, применяется помещенный внутри столика непосредственно под образцом. Для включения/отключения нагревателей применяются тумблер "Heat" на передней панели блока питания.

Порядок работы с установкой при измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ)

Начало работы

1. Для начала работы необходимо нажать зеленую кнопку "*POWER*" на панели блока питания. До начала измерений необходимо подождать порядка 10 минут, чтобы установка прогрелась.

2. Включить системный блок компьютера. Запустить программу для измерений. В главном окне программы в верхнем правом углу расположены кнопки управления, разделенные на 4 группы: "File", "Temperature", "Graph Tools", "Function". В верхнем левом углу расположено окно текущей функции. В нижней части экрана располагается окно графиков.

10

Установка образца

1. Установить образец на термостабилизируемом рабочем столике в термостате при помощи прижимных контактов к диагональным разъемам. Если подложка является проводящим материалом, необходимо изолировать подложку от измерительного столика диэлектрическим материалом, например стеклом.

2. Закрыть термостат крышкой.

Измерение ВАХ. Работа с программой

1. Выбрать измерение с использованием термостата. Для этого в группе "*Temperature*" кликнуть в меню "*Holder*" опцию "*Thermo*".

2. В группе "Function" выбрать в меню измерительных функций функцию I(V). В группе "Function" находятся кнопки выбора 10 измерительных функций, 4-x расчетных функций, a также вспомогательных расчета параметров, окон для калибровки, тестирования, кнопки запуска измерений и выхода из программы. При нажатии на кнопку выбранной функции в левой части экрана выводится окно этой функции с параметрами измерения и командами.

3. В появившемся окне устанавливаем параметры измерения Initial Voltage Vn [mV] – начальное смещение на образце; Final Voltage Vm [mV] – конечное смещение на образце; Step dV [mV] – шаг смещения. Диапазон напряжения смещения составляет от -13 до +13 В. Delay time td [msec] – задержка после изменения смещения до середины времени измерения (т.е. определяет скорость измерения). Необходимый диапазон указанных величин следует выбирать по указанию преподавателя.

4. В группе "*Temperature*" необходимо ввести температуру измерения [K] в поле установки температур и нажать кнопку "Set T". Далее необходимо ввести скорость изменения температуры dT/dt [K/cek] и нажать кнопку "Set dT/dt". Диапазон устанавливаемой температуры, поддерживаемый установкой, от комнатной до 520 К. Необходимый диапазон следует выбирать по указанию преподавателя.

5. Включить тумблер "*Heat*" на передней панели блока питания. Тумблер "*Cool*" должен быть выключен. Выдержать образец при выбранной температуре в течение 30 секунд.

6. Для начала измерений нажать кнопку "Start" (в группе "Function").

Сохранение результатов измерений (группа "File")

1. Ввести имя образца в поле "Sample Name".

2. Выбрать директорию записи кнопкой "Data Path" (название текущей директории находится в Edit Box под "Data Path"). Откроется окно со списком директорий. Если требуемая директория есть в списке, выбрать ее мышью и нажать кнопку "OK", либо сделать двойной щелчок

по директории в списке. Если нужно создать новую директорию, ввести ее с полным названием пути к ней в поле рядом с кнопкой "*Add New*". Нажать "*Add New*" для создания директории и внесения ее в список.

3. Для записи всех графиков из памяти нажать кнопку "Save all". Откроется окно записи. В нередактируемом поле с названием "File Name" выводится имя файла записи, в поле "Comment" можно вписать комментарий к этому файлу данных. Для записи файла нажать "OK".

Завершение работы

Сначала необходимо выключить тумблер "*Heat*", после этого выключить блок питания, закрыть программу, выключить системный блок.

Задание на работу

1. Измерить и построить температурную зависимость электропроводности образцов.

2. Построить зависимость $lg(\sigma) = f(1/T)$.

3. Для выявления линейных участков перестроить ВАХ в координатах lg(I) - lg(U).

4. Произвести расчёт параметров электропереноса для каждого типа проводимости, выявленного у образца в указанном преподавателем диапазоне температур.

Контрольные вопросы

1. Приведите основные отличия плотности электронных состояний в кристаллическом и аморфном твёрдом теле.

2. От каких параметров полупроводника зависит проводимость по распространенным состояниям?

3. От каких параметров полупроводника зависит проводимость по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям?

4. От каких параметров полупроводника зависит проводимость по локализованным состояниям в хвостах зон?

5. От каких параметров полупроводника зависит проводимость по локализованным состояниям с переменной длиной прыжка?

Литература,

рекомендуемая для самостоятельного изучения

1. Попов А.И. Физика и техника неупорядоченных полупроводников / А.И. Попов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

Лабораторная работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЕНОК АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

<u>Цель работы</u> определить показатель преломления, толщину и коэффициент пропускания аморфного гидрогенизированного кремния путем изучения спектра его оптической прозрачности в диапазоне 400-1000 нм.

Теоретическое введение

Для изготовления оптических приборов на основе *a*-Si:Н важно знать основные оптические постоянные получившейся плёнки, в первую очередь коэффициент преломления (его действительную и мнимую части) и коэффициент поглощения в диапазоне длин волн, в котором планируется использовать прибор.

Традиционно задача поиска указанных оптических величин сводится к последовательному измерению спектра пропускания и спектра отражения плёнки, с последующей математической обработкой для поиска коэффициента поглощения, а также к эллипсометрическим измерениям для расчёта коэффициента преломления.

Однако для плёнок *a*-Si:H существует методика расчёта искомых параметров с использованием только спектра пропускания с погрешностью не более 1% [1].

Общая структура исследуемого образца представлена на рис. 2.1.

$n_0 = 1$	$T_0 = 1$
Пленка <i>d</i> ↓	$n=n-ik$ α
Подложка	$s \qquad \alpha_s = 0$
$n_0 = 1$	Т

Рис. 2.1. Структура исследуемого образца

Образец находится в воздушной среде, которую в исследуемом диапазоне можно считать оптически прозрачной, т.е. коэффициент

преломления имеет только действительную часть $n_0 = 1$, а коэффициент пропускания $T_0 = 1$. Предполагается, что образец состоит только из двух слоёв. Первый слой – плёнка a-Si:Н толщиной d, с коэффициентом с комплексным коэффициентом поглощения α, и преломления $n^* = n - ik$. Второй слой – подложка с толщиной многократно превышающей *d*, действительная часть коэффициента преломления которого *s* . Материал подложки выбирается таким, чтобы eë коэффициент поглощения в исследуемом диапазоне можно было принять за 0.



Рис. 2.2. Типовой вид спектра пропускания a-Si:H

На рис. 2.2 представлен типовой спектр пропускания реального образца. Измеренная кривая изображена на графике сплошной толстой линией. Набор минимумов и максимумов на полученном графике является следствием интерференции, возникающей из-за отражения и преломления падающего света на границах раздела воздух – a-Si:H, a-Si:H – подложка, подложка – воздух. Соответственно количество пиков на разных образцах будет зависеть от толщины образца. Следует заметить, что в случае неровной поверхности указанных границ интерференционная картина не будет видна, и график примет вид плавной кривой, обозначенной как T_{α} . В этом случае указанная методика не применима.

Для расчёта коэффициента преломления подложки достаточно произвести измерения спектра пропускания чистой подложки (T_s) в необходимом диапазоне волн. Зная, что по определению

 $(1 \ D)^2$

$$T_{s} = \frac{(1-R)}{1-R^{2}},$$
где $R = \left(\frac{s-1}{s+1}\right)^{2}$ – коэффициент отражения, можно записать:

 $s = \frac{1}{T_s} + \sqrt{\frac{1}{T_s^2} - 1}, \qquad (2.1)$

Показано [1], что действительная часть коэффициента преломления плёнки, нанесённой на подложку может быть рассчитана как

$$n = \sqrt{N + \sqrt{N^2 - s^2}} , \qquad (2.2)$$

где

$$N = 2s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{s^2 + 1}{2},$$

где T_M и T_m – огибающие, которые представляют собой плавные линии, соединяющие интерференционные максимумы и минимумы соответственно, как показано на рис. 2.2.

Если для расчётов использовать только формулу (2.2), то погрешность в определении коэффициента преломления может доходить до 30%. Для увеличения точности расчётов проводят последующие вычисления.

Рассчитанную на первом шаге действительную часть коэффициента преломления будем обозначать как n_i , аналогичный индекс присвоим всем переменным, рассчитанным на первом шаге. Далее находят толщину плёнки *a*-Si:H:

$$d_{I} = \frac{\lambda_{1}\lambda_{2}}{2\left[\lambda_{1}n_{I}\left(\lambda_{2}\right) - \lambda_{2}n_{I}\left(\lambda_{1}\right)\right]},$$
(2.3)

где λ_1, λ_2 – длины волн, соответствующие соседним интерференционным максимумам или минимумам. Следует заметить, что формула (2.3) очень чувствительна к точности определения λ_1, λ_2 .

После нахождения толщины плёнки *a*-Si:H, рассчитывается порядок максимума (минимума) интерференции по известной формуле:

$$2n_I(\lambda)d_I = m_I\lambda, \qquad (2.4)$$

где *m* – порядок максимума (минимума) интерференции. В качестве λ следует подставлять значение каждого максимума или минимума. Не

следует использовать величину λ для первых двух (при наименьших длинах волн) максимумов или минимумов. В результате расчётов в большинстве случаев m_1 не получится целым или полуцелым, что и наличии существенной свидетельствует 0 погрешности. Тогла получившиеся *m*₁ необходимо округлить по дополнению до целой величины (в случае максимума), или полуцелой величины (в случае минимума). Далее необходимо, используя выражение 2.4, рассчитать d_{II} , подставляя в формулу прежние $n_I(\lambda)$ и округлённые m_{II} для каждого минимума или максимума. Затем среди получившихся d_{II} следует наиболее часто встречающееся выбрать значение. Используя усреднённое значение \overline{d} и округлённые значения m_{μ} для каждого максимума рассчитывается уточнённое минимума или $n_{II}(\lambda)$. Полученные $n_{II}(\lambda)$ можно использовать для экстраполяции значений на весь диапазон измерений. В качестве функции для экстраполяции рекомендуется использовать полином второй степени.

Для расчётов коэффициента поглощения следует использовать формулу:

$$X = \frac{E_M - \sqrt{E_M^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4)}}{(n - 1)^3 (n - s^2)},$$
(2.5)

где

$$E_{M} = \frac{8n^{2}s}{T_{M}} - (n^{2} - 1)(n^{2} - s^{2}).$$

Используя $X = \exp(-\alpha d)$, нетрудно получить коэффициент поглощения. Формула (2.5) удобна в первую очередь тем, что требует построение только одной огибающей линии по максимумам спектра.

В том случае, когда плёнка *a*-Si:Н очень тонкая (видна только пара минимумов и максимумов), или плёнка *a*-Si:Н очень толстая (пики начинают сливаться друг с другом), можно использовать более точную формулу:

$$X = \frac{F - \sqrt{F^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4)}}{(n - 1)^3 (n - s^2)},$$
(2.6)

где

$$F = \frac{8n^2s}{T_i}, \ T_i = \frac{2T_M T_m}{T_M + T_m}.$$

Получив коэффициент поглощения для измеряемого образца, можно рассчитать мнимую часть показателя преломления (коэффициент экстинкции) как:

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi}.$$
 (2.7)

Описание экспериментальной установки

В данной лабораторной работе используется спектрофотометр СФ-46. Работа спектрофотометра основана на сравнении потоков излучения, прошедшего через исследуемый образец и падающего на образец (или прошедшего через контрольный образец). Структурная схема спектрофотометра представлена на рисунке 2.3.



Рис. 2.3. Структурная схема спектрофотометра СФ-46

Световой пучок из осветителя попадает в монохроматор через входную щель и разлагается дифракционной решеткой в спектр. В монохроматический поток излучения, поступающий из выходной щели в кюветное отделение, поочередно вводятся контрольный и исследуемые образцы. Излучение, прошедшее через образец, попадает на катод фотоэлемента в приемно-усилительном блоке.

Электрический ток, проходящий через резистор $R_{\rm H}$, который включен в анодную цепь фотоэлемента (ФЭ), создает на резисторе падение напряжения, пропорциональное потоку излучения, падающему на фотокатод.

Усилитель постоянного тока, с коэффициентом усиления близким к единице, обеспечивает передачу сигналов на вход микропроцессорной системы (далее – МПС).

МПС по команде оператора поочередно измеряет и запоминает напряжение $U_{\rm T}$ (пропорциональное темновому току ФЭ $I_{\rm T}$), U_0 (пропорциональное потоку Φ_0 через контрольный образец) и $U_{\rm X}$ (пропорциональное потоку $\Phi_{\rm X}$ через исследуемый образец). После измерения МПС рассчитывает коэффициент пропускания исследуемого образца по формуле:

$$T = \frac{U_{\rm X} - U_{\rm T}}{U_0 - U_{\rm T}},$$
(2.8)

Значение высвечивается на цифровом табло МПС в процентах.

Монохроматор построен по вертикальной автоколлимационной схеме (см. рисунок 2.4).

Излучение от источника 1 (или 2) попадает на зеркальный конденсор 3, который направляет его на плоское поворотное зеркало 4, и дает изображение источника излучения в плоскости входной линзы монохроматора 5, расположенной вблизи входной шели 8 монохроматора. Прошедшее через входную щель 8 излучение сквозь сменный светофильтр 6 попадает на вогнутую дифракционную решетку криволинейным с переменным шагом и штрихом. 7 Решетка изготавливается сферической поверхности, поэтому на помимо диспергирующих свойств, она обладает свойством фокусировать излучение во всем рабочем диапазоне монохроматора.

Дифрагированный пучок фокусируется в плоскости выходной щели 8 монохроматора, расположенной над входной щелью. Его относительно выходной осуществляется сканирование щели 8 механизмом поворота дифракционной решетки. Входная и выходная щели монохроматора объединены в единый механизм высокой щели, при этом нижняя ее часть служит входной щелью, а верхняя часть выходной монохроматора. Вырезанное щелью выходной щелью монохроматическое излучение какой-либо длины волны проходит выходную линзу 9, контрольный 10 или измеряемый 11 образец, и через линзу кюветного отдела 12 попадает на поворотное зеркало 14. Зеркало 14 имеет два фиксированных положения, посылая пучок лучей на фотокатоды одного из фотоэлементов, 13 или 15.

Для уменьшения рассеянного света и для срезания высших порядков дифракции в монохроматоре используется два светофильтра 6: из стекла ПС11 для работы в области спектра 230 – 450 нм и из стекла ОС14 для работы в области спектра 600 – 1100 нм. Смена светофильтров производится автоматически. Все линзы в монохроматоре изготовлены из кварцевого стекла.

обеспечения работы спектрофотометра Для широком В спектральном диапазоне используются два фотоэлемента 13 и 15 и два источника излучения сплошного спектра 1 и 2. Сурьмяно-цезиевый фотоэлемент с окном из кварцевого стекла применяется для измерений в области спектра от 190 до 700 нм, кислородно-цезиевый фотоэлемент – для измерений в области спектра от 600 до 1100 нм. Длина волны, при которой следует переходить от измерений с одним фотоэлементом к фотоэлементом, измерениям с другим указана В паспорте

18

спектрофотометра или определяется экспериментально (для данного прибора – 642 нм).

Дейтериевая лампа предназначена для работы в области спектра от 190 до 350 нм, лампа накаливания – для работы в области спектра от 340 до 1100 нм. Для проверки монохроматора используется ртутно-гелиевая лампа ДРГС-12.



Рис. 2.4. Оптическая схема спектрофотометра СФ - 46 1 – дейтериевая лампа; 2 – лампа накаливания; 3 – зеркальный конденсор; 4 – поворотное зеркало; 5 – входная линза монохроматора; 6 – сменный светофильтр; 7 – дифракционная решетка; 8 – входная (выходная) щель; 9 – выходная линза монохроматора, 10 – место контрольного образца; 11 – исследуемый образец; 12 – входная линза кюветного отделения; 14 – поворотное зеркало; 13, 15 – фотоэлементы

2.5, Спектрофотометр, показанный на рис. состоит ИЗ монохроматора 1, осветителя с источниками излучения и стабилизатором 2, кюветного отделения 4, камеры 6 с фотоприемниками и усилителем (приемно-усилительный блок) и микропроцессорной системы (МПС) 12. Все основные элементы спектрофотометра установлены на основании 10. Основные органы управления и индикации выведены на переднюю панель спектрофотометра. Кнопка 13 «СЕТЬ» служит для включения и выключения спектрофотометра, расположенная над ней индикаторная лампа сигнализирует о включении спектрофотометра. Рукоятка 14 предназначена для установки требуемых длин волн, значения которых определяются по отсчетному устройству 15 в нанометрах.

Переключатель 11 служит для ступенчатого выбора размеров щели, при этом на передней панели спектрофотометра выгравированы значения спектральной ширины щели (в нанометрах) (0,15; 0,5; 1,0; 2,5; 6,5 нм) для данной ступени раскрытия щелей. Рукоятка 9 служит для поперечного фиксированного перемещения каретки с держателем образцов внутри кюветного отделения. Держатель имеет четыре калиброванных отверстия для крепления образцов, при повороте рукоятки 9 одно из них (выгравированная на панели цифра указывает – которое) ставится на пути зондирующего монохроматического пучка.



1 – монохроматор; 2 – осветитель с источниками света и стабилизатором; 3 – рычаг перемещения зеркального конденсора; 4 – кюветное отделение; 5 – переключатель фотоэлементов; 6 – приемно-усилительный блок; 7 – потенциометр установки нуля с двойной регулировкой (грубой и точной); 8 – рукоятка переключения шторки; 9 – рукоятка перемещения каретки с образцами; 10 – основание, 11 – пятипозиционный переключатель входной и выходной щелей; 12 – микропроцессорная система; 13 – индикаторная лампа и кнопка «СЕТЬ», 14 – рукоятка установки длин волн излучения монохроматора; 15 – отсчетное устройство длин волн излучения

Рукоятка 8 предназначена для открытия (положение «ОТКР») или закрытия (положение «ЗАКР») шторки входного окна приёмноусилительного блока, которая при необходимости затемняет Рукояткой 7 «НУЛЬ» производится компенсация фотоэлементы. темнового тока фотоэлемента при установке рукоятки 8 в положение «ЗАКР». Рукоятка 5 предназначена для смены фотоэлементов. соответствует включению Положение «К» кислородно-цезиевого фотоэлемента, работающего в «красной» области спектра 600 – 1100 нм, а положение «Ф» – включению сурьмяно-цезиевого фотоэлемента для измерений в области спектра 190 – 700 нм. Рычагом 3 производится переключение источников излучения. При установке рычага 3 в положение «Н» используется лампа накаливания, а при установке рычага в положение «Д» – дейтериевая лампа.

Клавиатура МПС 26 предназначена для управления измерительной системой и ручного ввода данных. Кнопка «ПУСК» служит для включения МПС, о чем сигнализирует высвечиваемая на табло запятая.

При нажатии клавиши «Ш(0)», что должно производиться при закрытом рукояткой 8 фотоэлементе, определяется выходное напряжение $U_{\rm T}$ при неосвещенном фотоэлементе, соответствующее значению темнового тока фотоприёмника. Это значение в вольтах

высвечивается на фотометрическом табло и запоминается в памяти МПС.

При нажатии клавиши «К(1)» определяется выходное напряжение U_0 при попадании на фотоэлемент светового потока, прошедшего через контрольный образец или калиброванное отверстие держателя. Это значение в вольтах также высвечивается на фотометрическом табло и запоминается в памяти МПС. Оно соответствует величине падающего на образец потока.

При нажатии клавиш «~(2)» определяется выходное напряжение U_X при попадании на фотоэлемент светового потока, прошедшего через исследуемый образец. Это напряжение пропорционально величине прошедшего потока Φ_X . Но на фотометрическом табло показывается не эта величина, а сразу высвечивается значение коэффициента пропускания в процентах, вычисленное МПС по формуле (2.8).

Клавиша «Ц/Р» служит для перевода МПС из разового режима в циклический и наоборот, о чем сигнализирует горящий индикатор «Р» (разовый) или «Ц» (циклический). При циклическом режиме вычисление и высвечивание измеряемых величин происходит каждые 5 секунд без дополнительного нажатия клавиш.

Клавиши «C(4)» и «A(3)» предназначены для работы спектрофотометра в режиме определения концентрации и скорости изменения оптической плотности во времени. В данной работе эти режимы не используются.

При проведении измерений и проверок все клавиши следует нажимать не чаще, чем один раз в 2 секунды.

Порядок выполнения работы

1. Произвести измерения пропускания чистой подложки в диапазоне 400 - 1000 нм, для чего:

1.1. Рукояткой 28 установить длину волны, при которой требуется произвести измерения.

1.2. Установить рукоятку 22 в положение «ЗАКР».

1.3. Нажать клавишу «Ш(О)», при этом на фотометрическом табло высветится значение сигнала в вольтах, пропорциональное значению темнового тока фотоэлемента.

1.4. Установить рукояткой 21 «НУЛЬ» на фотометрическом табло числовое значение в диапазоне от 0,05 до 0,1. Для этого необходимо после каждого подстроечного поворота рукоятки нажимать кнопку «Ш(О)». Вращение по часовой стрелке соответствует увеличению сигнала. При достижении необходимого значения, кнопку «Ш(О)» надо нажать несколько раз до появления на табло показания равного предыдущему или отличающегося от него не более, чем на 0,001.

Последнее показание заносится в память МПС и остается там до следующего нажатия клавиши «Ш(О)».

1.5. Перемещая каретку рукояткой 23, установить на пути потока излучения контрольный образец или свободное отверстие держателя. При отсутствии контрольного образца измерение будет производиться относительно воздуха.

1.6. Установить рукоятку 22 в положение «ОТКР».

1.7. Нажимая клавишу «К(1)», рукояткой 25 «ЩЕЛЬ» установить на фотометрическом табло показание в диапазоне от 0,5 до 5,0. Наблюдая за миганием запятой на фотометрическом табло (частота мигания – один раз в секунду), отсчитать 10 секунд и нажать клавишу «К(1)».

1.8. Нажать клавишу «~(2)», при этом на фотометрическом табло должно появиться показание от 100,0 до 0,1 (значение пропускания контрольного образца в %), а слева – индекс «2». Если показание имеет другое значение, необходимо еще раз ввести значение сигнала сравнения, нажав кнопку «К(1)».

1.9. Рукояткой 23 установить на пути зондирующего потока излучения один из измеряемых образцов, и при появлении показания, отличающегося от предыдущего не более чем на 0,1, снять показания с фотометрического табло, соответствующие пропусканию измеряемого образца.

1.10. При непродолжительных измерениях, во время которых величина темнового тока не изменяется, можно не вводить эту величину в память МПС при каждом измерении. В этом случае все последующие измерения следует производить, начиная с операции, указанной в п. 1.4.

2. Построить график зависимости пропускания подложки T_s от длины волны λ .

3. Произвести измерения пропускания образца в диапазоне 400 - 1000 нм аналогично п.1.

4. Построить график зависимости пропускания образца T от длины волны λ . Примерный вид спектра пропускания пленки *a*-Si:H представлен на рис. 2.2.

5. Построить верхнюю и нижнюю огибающую интерференционной картины (T_M, T_m) , как показано на рис. 2.2. Определить положения максимумов и минимумов интерференционной картины.

6. Произвести расчёт коэффициента преломления подложки по формуле 2.1 для длин волн, на которых наблюдались минимумы и максимумы интерференционной картины.

7. Для каждого максимума и минимума произвести расчёт действительной части коэффициента преломления по формуле 2.2.

8. Для каждой пары максимумов и минимумов произвести расчёт толщины плёнки *a*-Si:H.

9. Следуя рекомендациям практикума произвести уточнение действительной части коэффициента преломления, произвести расчёт коэффициента поглощения (2.5) или (2.6) и мнимой части коэффициента преломления (2.7). Результаты свести в таблицу:

Таблица 2.1

λ [HM]	T_{S}	T_M	T _m	n _I	<i>d</i> _{<i>I</i>} [мкм]	m _I	m _{II}	<i>d</i> _{II} [мкм]	<i>d</i> [мкм]	n _{II}	α [см ⁻¹]	k
					-							
					-							

Результаты расчёта

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы спектрофотометра.

2. Дайте определение основным оптическим параметрам полупроводника

3. Чем определяется наличие максимумов и минимумов в спектре коэффициента пропускания?

4. Каким параметром пленки определяется частота следования максимумов в спектре пропускания?

Используемая литература

1. Swanepoel R. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon / R Swanepoel // Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1983. Vol. 16, 1214 – 1222.

Литература, рекомендуемая для самостоятельного изучения

1. Попов А.И. Физика и технология неупорядоченных полупроводников: учеб. пособие для вузов / А.И. Попов. – М.: МЭИ, 2008. – 272 с., ил.

Лабораторная работа №3

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА ПРОПУСКАНИЯ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

<u>Цель работы</u> практическое освоение физических основ инфракрасного (ИК) поглощения колебаниями атомов примесей в полупроводниковых образцах на основе аморфного кремния.

Замечание о единицах измерения

В литературе по ИК-спектроскопии принято использовать три взаимосвязанных величины с соответствующими обозначениями: длина волны λ, частота волны ν, волновое число ν̃. Эти величины связаны простой формулой:

$$v = c\tilde{v} = c / \lambda,$$

где с – скорость света. При рассмотрении теоретических вопросов, связанных с переходами между энергетическими уровнями, v и \tilde{v} поскольку оказываются более удобны, чем λ, они прямо Для пропорциональны энергии излучения. удобства работы с указанными величинами рекомендуется запомнить таблицу 3.1.

Также, при самостоятельном изучении специализированной литературы, следует обратить внимание на то, что под термином «частота» очень часто понимают в первую очередь волновое число, что легко определяется по соответствующей размерности.

Таблица 3.1

Частота	Волновое число	Длина волны
[c ⁻¹]	[CM ⁻¹]	[мкм]
$3 \cdot 10^{14}$	104	1
$3 \cdot 10^{13}$	10 ³	10
$3 \cdot 10^{12}$	10 ²	100

Связь единиц измерений, использующихся в спектроскопии

Теоретическое введение

При взаимодействии молекул с электромагнитным излучением реализуются разнообразные возможности возбуждения их внутренней энергии. В первую очередь – это энергетические переходы, при которых изменяются величина или направление электрического дипольного момента рассматриваемой молекулы, что сопровождается её вращениями и колебаниями, которые изучают методами *колебательной спектроскопии*, к которой относится ИК-спектроскопия.

Энергетическое состояние молекулы определяется тремя факторами:

1) вращением молекулы;

2) колебательными движениями атомов молекулы относительно друг друга;

3) изменениями электронной структуры молекулы.

Расстояния между вращательными уровнями энергии очень малы. Они имеют порядок 10⁻³ эВ, и переходы между этими состояниями соответствуют излучению с длиной волны от 0,1 мм до 1 см. Схема термов и энергетические переходы приведены на рис. 3.1.

Энергетическое расстояние между колебательными уровнями примерно на два порядка больше и равно ~ 0,1 эВ, а переходы между этими уровнями приводят к генерации излучения с длиной волны от 1 мкм до 0,1 мм. Гипотетические чисто колебательные переходы также приведены на рис. 3.1.

Разность энергии между уровнями валентных электронов составляет несколько электронвольт, что соответствует длинам волн видимой и ультрафиолетовой (УФ) частей спектра.

При электрических дипольных взаимодействиях в чистом виде могут вращательные возбуждаться лишь движения, тогда как колебательные переходы всегда сопровождаются вращением И вращательно-колебательными электронными переходами — И электронно-колебательными переходами. При нормальных температурах тепловая энергия молекул имеет величину порядка kT (26 мэВ для комнатной температуры), так что они находятся в своих наинизших энергетических электронных и колебательных состояниях, и лишь вращательное движение возбуждается в большей степени.

Поскольку вращательные и колебательные спектры зависят от массы частиц, длины и силы связи между ними, они являются характеристическими для определенных групп атомов.

Помимо «физической» классификации переходов, применяются также «прикладная» классификация по видам вращений и колебаний. В зависимости от того, изменяются ли при возбужденных колебаниях расстояния между атомами или валентные углы, их относят или к *валентным* или к *деформационным* колебаниям, часто в колебательной спектроскопии используются другие наглядные термины, например, *маятниковое* (молекула CH₂), *крутильное* (CCl₃) или *веерное* (CF₂) колебание. Тем не менее, за каждым из подобных терминов стоит либо вращение, либо колебание молекулы.





Особенности вращательных переходов

Вращательная энергия молекулы зависит от ее симметрии и моментов инерции рассматриваемой молекулы, а также, согласно квантовой механике, от вращательного квантового числа J, т. е. может принимать лишь определенные дискретные значения. При взаимодействии с излучением происходят переходы между вращательными уровнями, причем действует правило отбора: $\Delta J = \pm 1$.

Простейшими молекулами, имеющими вращательными спектр, являются двухатомные (рис. 3.2) и линейные многоатомные, у которых два главных момента инерции равны, а третий равен нулю.

Для таких молекул вращательная энергия описывается выражением:

$$E(J) = J(J+1)Bhc, \qquad (3.1)$$

где $B = \frac{h^2}{8\pi^2 I}$ – постоянная вращения; I – момент инерции, h – постоянная Планка. В случае двухатомной молекулы, изображенной на рис. 3.2 *a*), момент инерции $I = m_A m_B r_{AB}^2 / (m_A + m_B)$. Рис. 3.2 *б*) поясняет смысл вращательной константы.



Рис. 3.2. *а*) Вращательные движения двухатомной молекулы *АВ*: *S* – центр тяжести молекулы; *б*) Вращательный спектр : *B* – вращательная константа, по оси ординат отложена интенсивность, по оси абсцисс волновое число

Уравнение (3.1) показывает, что чем больше момент инерции молекулы, тем теснее располагаются вращательные линии. Также следует заметить, что с ростом квантового числа *J* уровни вращательных переходов удаляются друг от друга.

Следует заметить, что из анализа спектров вращательных колебаний для некоторых простейших молекул путём математических вычислений возможно определить момент инерции, вращательную константу, расстояние между атомами. Однако для большинства реальных соединений необходимые формулы становятся достаточно громоздкими, а для некоторых молекул расчётных формул в общем виде не существует.

Особенности колебательных переходов

Колебательные спектры в простейшем случае могут быть получены в предположении, что система атомов является ансамблем квантовых гармонических осцилляторов. Однако для целей непосредственных расчётов такая модель не подходит, поскольку каждому атому необходимо приписать свою собственную силовую постоянную, а соответственно система уравнений, которую необходимо решить, становится кратной числу атомов. Кроме того, молекулярные колебания в действительности не являются гармоническими, уже по той причине, что в случае реальных молекул не выполняется важное для гармонических осцилляторов условие: колебательная энергия не может принимать любые значения, она ограничена энергией диссоциации. Это означает, что потенциальная энергия будет несимметричной функцией относительно положения равновесия колеблющихся масс, т. е. не подчиняется простому выражению вида $E(x) = kx^2/2$, где k – упругая постоянная (рис. 3.3а). Кривая потенциальной энергии ангармонического осциллятора может быть приближенно выражена функцией Морзе (рис. 3.36):

$$E(r) = D\left\{1 - \exp\left[-k\left(r - r_0\right)\right]\right\}^2,$$

где D – энергия диссоциации, r_0 – равновесное расстояние между атомами.



Рис. 3.3. Кривые потенциальной энергии гармонического (*a*) и ангармонического (*б*) осциллятора. Цифрами обозначена величина квантового числа *n* дискретных энергетических уровней

Таким образом, колебательные спектры принципиально отличаются от вращательных тем, что наряду с *основными колебаниями* (разность квантовых чисел начального и конечного энергетического уровня $\Delta n = \pm 1$) становятся возможными *обертоны* и *составные* частоты ($\Delta n = \pm 2, \pm 3...$). Под *обертонами* понимают частоты, кратные *основным частотам*. Составные частоты – сумма или разность двух или более *основных частот*.

Также следует заметить, что расстояние между энергетическими уровнями уменьшается с увеличением квантового числа n (рис. 3.3 б).

колебательные Так переходы всегда сопровождаются как вращательным возбуждением, обычно наблюдают вращательноколебательные спектры. Правило отбора для переходов между вращательными уровнями различных колебательных термов, наряду с $\Delta J = \pm 1$, допускает также $\Delta J = 0, \pm 2, \pm 3...$

В кристаллическом состоянии силовые поля, действующие на отдельные молекулы, периодичны, что приводит к дальнейшим изменениям в спектре. Полосы поглощения обычно становятся более узкими, часто расщепляются, могут появляться новые. Это происходит из-за того, что каждая элементарная ячейка играет роль колеблющегося элемента, но она обычно содержит больше одной молекулы. Поэтому существует возможность движений в фазе и не в фазе, которые могут иметь различающиеся частоты. Может также происходить либрация (ограниченное вращение) отдельных молекул и колебания решетки с низкой частотой. Эти энергетические состояния перекрываются с колебательными и проявляются в спектрах поглощения. К тому же сильные локальные силовые поля могут как изменять частоту колебательной полосы, так и снимать запрет с обычно неактивных в ИКобласти нормальных колебаний.

Особенности ИК-спектра «чистого» аморфного кремния

Здесь и далее под «чистым» понимается кремний, в котором концентрация примесей менее предела обнаружения их методом ИК-спектроскопии.

Для понимания природы дополнительных колебательных состояний, вводимых атомами примеси, следует знать колебательные состояния чистой исходной аморфной системы. На рис. 3.4 приведен типовой ИК-спектр аморфного кремния.



Частота, см⁻¹ Рис. 3.4. Типовой спектр поглощения чистого *a*-Si

Частоты характерных особенностей, представлены в таблице 3.2. Деформации, являющиеся причинами появления на спектрах характерных особенностей, схематично приведены на рис. 3.9.

В *a*-Si и соединениях на его основе часто обнаруживаются заметные количества случайно попавшего в них кислорода, азота и углерода. Считается, что источником кислорода служат молекулы воды, которые адсорбируются на стенках и внутренних частях камеры или вносятся в систему с рабочим газом или – в экстремальных случаях – попадают в систему в результате натекания. То же относится к азоту и углероду. Последний также может загрязнять пленки при использовании вакуумных систем с паромасляной откачкой.

Особенности ИК-спектра гидрогенезированного аморфного кремния

Пленки гидрогенезированного аморфного кремния *a*-Si:H содержат от 8 до 50 ат. % связанного водорода. В этом интервале концентраций материал можно рассматривать как бинарный сплав a-Si_{1-x}H_x. Поскольку однокоординированные атомы водорода насыщают оборванные связи кремния, локальную атомную структуру удобно характеризовать множеством атомов H в положениях Si и возникающей при этом топологией сетки. На рис. 3.5 схематически показаны положения, занимать атомы водорода которые могут или атомы других одновалентных примесей (например, хлор) в *a*-Si. Конфигурации a, б, в на рис. 3.5 относятся к изолированным связям, которые могут присоединить один, два или три одновалентных атома с образованием (SiH), (SiH_2) моногидрида дигидрида или тригидрида (SiH_3) . соответственно.



Рис. 3.5. Геометрия локальной связи для одновалентных атомов. Конфигурации *а* – *в* – изолированные связи; *г* – связи на внутренней поверхности (цис-структура); *д* – связи в полимерной конфигурации

На рис. 3.5 г показана одна из возможных конфигураций связи на поверхности: одновалентные атомы насыщают оборванные связи поверхности. На рис. 3.5 д структура, возникающая при полимеризации групп SiX₂, если X – водород, то такую структуру называют полисиланом и обозначают (SiH₂)_n.

На рис. 3.6 приведен ИК-спектр пропускания пленок *a*-Si, изготовленных разложением SiH₄ в тлеющем разряде.



Влияние кислорода на ИК-спектр a-Si

Кислород – типичный двухвалентный атом примеси. Предположим, что локальная связь атомов О в аморфном кремнии аналогична его связи в аморфной фазе SiO₂. Это означает, что атом кислорода занимает мостиковое положение, в котором имеет двух соседей Si (рис. 3.9). Предполагается, что угол между связями в соединении *a*-Si:H:O равен 150°.

Спектр ИК-пропукания соединений *a*-Si:H:O показан на рис. 3.7. Видно, что спектр ИК-пропукания не является просто суммой спектров групп Si-O и Si-H. На это указывают следующие три факта: а) частота валентных колебаний SiH смещается с 2000 см⁻¹ в сплавах *a*-Si:H с моногибридной связью к 2090 см⁻¹ в тройной системе; б) аналогичный сдвиг (с 940 на 980 см⁻¹) испытывает асимметричная валентная мода O в *a*-Si:O сплавах; появляется новое колебание на частоте 780 см⁻¹. В любом случае внедрение в *a*-Si:H более 0.5 ат.% кислорода легко обнаруживается по широкой полосе поглощения с центром около 980 см⁻¹.



Рис. 3.7. ИК-поглощение соединения *a*-Si:H:O. Стрелки вверху указывают частоты колебаний для *a*-Si:H и *a*-Si:O с концентрациями, как в тройном соединении: 10-15 ат. % Н и 5 ат. % О. Особенности v1, v2, v3 наблюдаются только в тройном соединении и обусловлены конфигурациями, где атомы Н и О связаны с одним и тем же атомом Si

Влияние азота на ИК-спектр a-Si:Н

Для атомов с трехвалентной координацией существует два возможных типа конфигураций: а) планарная конфигурация, в которой атом примеси находится в центре равностороннего треугольника, образованного тремя его Si-соседями, б) пирамидальная конфигурация, когда атом примеси располагается в вершине пирамиды, а три соседних атома Si образуют основание (рис. 3.9). Обычно предполагается, что атомы азота занимают планарные положения.

На рис. 3.8 приведены спектры пропускания соединений *a*-Si:H:N. Эти спектры качественно подобны спектрам *a*-Si:H:O и указывают на то, что атомы H и N связаны с одним и тем же атомом кремния. Характер изменений трех полос поглощения говорит о том, что связь аналогична связи в пленках *a*-Si:H:O, который заключается в следующем. Во-первых, частота валентных колебаний SiH смещается от 2000 к 2060 см⁻¹. Во-вторых, аналогичное смещение (от 790 к 840 см⁻¹) испытывает частота асимметричных валентных колебаний связи SiN. В-третьих, возникает мода «дыхания» атомов Si на 495 см⁻¹.



Рис. 3.8. Спектр ИК-пропускания соединений *a*-Si:H:N. Стрелками отмечены частоты полос в спектрах соединений *a*-Si:H и *a*-Si:N.

Влияние углерода и германия на ИК-спектр a-Si:H

На рис. 3.9 представлена локальная геометрия для четырехкоординированных атомов примеси, таких как углерод или германий. Пятиатомный кластер, состоящий из атома С (Ge) и четырех соседних атомов Si обладает тетраэдрической симметрией.

В спектре соединения *a*-Si:H:C кроме особенностей, обусловленных валентными колебаниями атомов водорода, существуют другие полосы поглощения, соответствующие связям, имеющимся в соединении. Валентные колебания связи Si-C наблюдаются на частотах около 700 см⁻¹. Кроме того, в их спектрах имеется большое число других полос поглощения между 600 и 1500 см⁻¹, которые обусловлены различными колебаниями типа изгиба и качания групп CH₂ и CH₃ вокруг осей *x* и *y*.

В ИК-спектрах большинство мод является резонансными, т. е. приходится на интервал частот от 300 до 500 см⁻¹, и выделить их среди мод колебаний атомов решётки кремния сложно.



Рис. 3.9. Виды деформаций связей гидрогенезированного аморфного кремния

Чистый <i>а-</i> Si:Н						
Группа	Пафариация	Волновое	Обозначение			
1 руппа	деформация	число [см ⁻¹]	на рис. 3.7			
SiH	Растяжение	2000	1			
	Изгиб-качание	650	2			
	(вокруг оси у или х)	050				
	Симметричное растяжение	2100	3			
	Несимметричное растяжение	2100	4			
SiH.	"Ножницы"	900	5			
51112	Качание вокруг оси у	850	6			
	Качание вокруг оси х	650	7			
	Вращение	не активна	8			
SiH ₃	Симметричное растяжение	2150	9			
	Вырожденное растяжение	2150	10			
	Симметричная деформация	850	11			
	Вырожденная деформация	900	12			
	Качания вокруг у и х	630	Аналог 2			
	Вращение	не активна	Аналог 8			
Примесь кислорода в <i>a</i> -Si:H						
	Валентная	980	13			
Si-O-Si	Изгиб (Цис-)	750	14			
	Изгиб (Транс-)	650	15			
	Примесь азота в	s a-Si:H				
Si ₃ N	«Дыхание»	495	16			
	Колебания, выходящие из плоскости	не активна	17			
	Асимметричная валентная	790	18			
	Изгиб в плоскости	200	19			
Примесь углерода в <i>a</i> -Si:H						
Si-C	Валентная	700	20			
CH ₂ CH ₃	Изгиб-качание (вокруг оси у или х)	600-1500	Аналог 2, 6, 7			

Виды деформаций связей гидрогенезированного аморфного кремния

Описание измерительной установки

В данной лабораторной работе измерения производится с помощью спектрофотометра SPECORD 75 IR, который автоматически регистрирует инфракрасные спектры пропускания исследуемых проб в диапазоне волновых чисел 4000...400 см⁻¹ (длин волн λ=2,5...25 мкм).

В спектрофотометре используется двухлучевая схема по принципу оптического дифференцирования. Принципиальная схема данного спектрофотометра приведена на рисунке 3.10.



Рис. 3.10. Схема спектрофотометра SPECORD 75 IR

Исходящие из источника (1) пучки измерения и сравнения проходят соответственно через исследуемую (8) и эталонную (9) пробы в кюветном отсеке прибора. Затем оба пучка опять сходятся у зеркального модулятора (13) попеременно направляющего их с частотой чередования 12,5 Гц во входную щель (17) монохроматора. Приемный термоэлемент (30)превращает выделенный монохроматором компонент модулированного излучения в электрические сигналы, поступающие последовательно на предусилитель и главный усилитель. Работающий под управлением усилителей серводвигатель изменяет сечение пучка сравнения через измерительную диафрагму (7) до выравнивания интенсивностей монохроматических компонентов обоих пучков, то есть, до исчезновения сигнала 12,5 Гц. С этой диафрагмой, отверстие которой пропорционально разности коэффициентов пропускания обеих проб,
механически связаны перо самописца и ползунки трех потенциометровдатчиков в контурах проверки энергии излучения, автоматического регулирования усиления и вывода измеряемой величины. Для изменения волнового числа выделяемого монохроматором компонента излучения служит вал развертывания с лимбом волновых чисел. Этот вал имеет кулачки для управления щелями (17, 26), зеркалом Литрова (25) и находящейся в рабочем положении дифракционной решеткой (19) монохроматора, а также процессом автоматической смены этой решетки. Смену производит двигатель с задающей обмоткой, полосы которой по достижении переходного волнового числа переключаются, через реле управления, кулачковым контактом. Кроме того, вал развертывания имеет кулачок с юстируемыми сегментами, регулирующий через диафрагму корректировки (6) сечение пучка измерения так, чтобы при отсутствии проб перо самописца не отклонялось от ординаты 100 %.

Передача масштабов между валом развертывания и кареткой абсцисс самописца позволяет путем смены зубчатых колес выбирать пять разных масштабов абсцисс, а за счет удаления одного из ее колес осуществить регистрацию временных изменений коэффициентов пропускания при неизменном волновом числе. Вторая гитара сменных колес между кареткой абсцисс и двигателем развертывания позволяет выбирать четыре разных времени записи. Двигатель развертывания питается приводным усилителем. Последним управляет замедляющий усилитель, который при больших амплитудах выходного сигнала прерывающего усилителя, то есть, при скачках измеряемой величины, может автоматически снижать число оборотов двигателя. Работая независимо от прерывающего усилителя, замедляющий усилитель может обеспечивать такое снижение числа оборотов постоянно, продлевая выбранное время записи на фактор 3 или 10. Вместо двигателя развертывания может работать, двигатель быстрого хода, который включается как схемой автоматического возврата, так и кнопками быстрого хода вперед и назад.

Исходящие из источника излучения лучи, которые направляются цилиндрическими зеркалами (2, 3, 4, 5) в виде двух взаимно параллельных пучков в отверстия диафрагмы корректировки (6) и измерительной диафрагмы (7) перед самыми входными окошками кюветного отсека, дают у выходных окошек этого отсека два идентичных изображения излучающей площади. Зеркала (10, 11, 12) изображения зеркальный направляют ЭТИ на модулятор (13)представляющий собой плоское полукруглое зеркало, вращающееся вокруг перпендикулярной к отражающей плоскости оси со скоростью 750 об/мин. Сложный монохроматор выделяет из сплошного спектра исходящего из источника излучения интересующий в данный момент монохроматический компонент. Вогнутое зеркало (18) направляет

37

прошедшие через апертурную диафрагму (15), бромисто-калиевую линзу (16) и входную щель (17) лучи в виде параллельного пучка на находящуюся в рабочем положении дифракционную решетку (19). В диапазоне волновых чисел 4000 – 1200 см⁻¹ работает решетка с 162 штрихами на 1 мм, а в диапазоне 1200-400 см⁻¹ – 54 штриха на 1 мм.

Прошедшие через промежуточную щель (21) в призменную часть монохроматора лучи направляются отклоняющим зеркалом (22) на вогнутое (23). Затем они в виде параллельного пучка пронизывают дважды бромисто-калиевую призму (24). В плоскости выходной щели образуется изображение входной.

Таким образом на ленте самописца вычерчивается кривая зависимости пропускания (*T*) от длины волны:

$$T(\lambda) = I(\lambda) / I_0(\lambda) = \beta(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda) dS],$$

где I_0 и I – соответственно интенсивности излучения до и после прохождения пучка через слой пробы толщиной d; $\alpha(\lambda)$ – коэффициент поглощения для данной длины волны; $\beta(\lambda)$ – коэффициент, учитывающий потери на отражение; S – коэффициент, учитывающий степень поляризации луча.

Порядок работы на спектрофотометре SPECORD 75 IR

1. Управление работой (рисунок 3.11) прибора осуществляется с помощью кнопок «быстро вперед» (2), «быстро назад» (3), «пуск» (5), «без возврата» (4), «стоп» (6).



Рис. 3.11. Условное изображение внешнего вида передней панели спектрофотометра SPECORD 75 IR

Нажатие кнопки «быстро вперед» вызывает быстрое движение каретки абсцисс самописца влево с одновременным уменьшением, в соответствии с выбранным масштабом, волнового числа. Нажатие кнопки «быстро назад» вызывает быстрое движение каретки абсцисс самописца вправо с одновременным увеличением, в соответствии с выбранным масштабом, волнового числа. Нажатие кнопки «пуск» вызывает как подвод пера самописца к бумаге, так и медленное движение, в соответствии с выбранным временем записи, каретки абсцисс влево с одновременным уменьшением, в соответствии с выбранным масштабом, волнового числа. Это движение прекращается временно, примерно на 20 секунд, по достижении переходного волнового числа 1200 см⁻¹ с целью происходящей при отведенном пере автоматической смене дифракционной самописца решетки, а окончательно, по достижении либо предельного волнового числа 400 см-1, либо правого предела диапазона абсцисс. Если кнопка «без возврата» свободна, достижение правого предела диапазона абсцисс вызывает как отвод пера самописца от бумаги, так и быстрое движение каретки абсцисс вправо с одновременным увеличением, в соответствии с выбранным масштабом, волнового числа. Если кнопка «без возврата» нажата, достижение правого предела диапазона абсцисс вызывает как отвод пера самописца от бумаги, так и остановку каретки абсцисс с сохранением данного волнового числа. Нажатие кнопки «стоп» во время процесса развертывания спектра вызывает как отвод пера самописца от бумаги, так и остановку каретки абсцисс с сохранением данного волнового числа.

Задание к работе

1. На листе диаграммной бумаги, выданной преподавателем, осуществляете укажите диапазон волновых чисел, В котором регистрацию спектров пропускания (диапазон волновых чисел назначается преподавателем). Укажите масштаб абсцисс и время записи спектра (устанавливается преподавателем).

3. На каретке абсцисс самописца укрепите лист бумаги.

4. Установите ширину щелей монохроматора (см. рис. 3.13). Регулятор ширины щелей (8) позволяет бесступенчато расширять щели, а тем самым, и полосу пропускания монохроматора в отношении 3:1 максимально.

5. коэффициент Выберите И режим усиления сигналов. (9) Регулятор усиления позволяет оптимально согласовать чувствительность следящей системы регулирования с зависящей от выбора ширины щелей монохроматора и от поглощающих свойств данной эталонной пробы энергией излучения. Регулятор режима усиления (10) поверните в положение «0». Установите регулятор усиления в положение 1...3 (по указанию преподавателя). Регулятор режима усиления (10) поверните в положение «1».

6. Выберите постоянную времени отклонения пера самописца. Регулятор времени отклонения (11) позволяет выбрать четыре разных времени 1, 3, 10, 30 сек., в течение которых связанное с измерительной диафрагмой перо самописца отклоняется, после мгновенного изменения коэффициента пропускания исследуемой пробы от 0 до 100 %, от ординаты 0 % до ординат свыше 95 %. Время отклонения определяет

максимально допустимую скорость развертывания спектра, позволяющую избежать ошибок отставания пера самописца. Установите регулятор времени отклонения пера самописца в положение «*E*».

7. Установите регулятор коэффициента автоматического замедления в положение 1.

8. Осуществите выбор начала спектра, для этого: влючите прибор – кнопка «питание» (1). Установите на лимбе волновых чисел (16) значение 4000 см⁻¹ – путем одновременного нажатия кнопок «быстро назад» и «расцепление». Нажав кнопку «расцепление» доведите рукой каретку пера самописца до ее правого упора. Совместите перо самописца с осью ординат на диаграммной бумаге, путем вращения черной рукояткой на самописце.

9. Откройте кюветный отсек. Вставьте исследуемый образец в передний держатель.

10. Кнопкой «питание» начните процесс развертывания спектра, который можно в любой момент прекратить кнопкой «питание». При этом, если кнопка "без возврата" свободна, произойдет автоматический возврат каретки абсцисс к ее правому упору.

11. Снимите ИК-спектр полученных образцов (образец указывает преподаватель).

12. Выключите прибор после окончания процесса регистрации спектра (на лимбе будет достигнуто значение волнового числа 400 см⁻¹).

13. Используя полученные спектры и табличные данные, идентифицировать имеющиеся в спектре полосы поглощения.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о физических основах колебательной спектроскопии.

2. Поясните методику регистрации спектров.

3. Приведите формулу закона поглощения Бугера-Ламберта, поясните физический смысл входящих в него величин.

4. Расскажите о колебательных свойствах чистого *a*-Si.

5. Расскажите о колебательных свойствах атомов примесей H, O, N, C и Ge в *a*-Si.

Литература,

рекомендуемая для самостоятельного изучения

1. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений: Пер. с англ. / К. Накамото. – М.: «Мир», 1991.

Лабораторная работа №4

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ И ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ПОСТОЯННОГО ФОТОТОКА

<u>Цель работы</u> ознакомление с методом исследований спектров плотности состояний в щели подвижности неупорядоченных полупроводниковых материалов.

Теоретическое введение

Полупроводниковый материал с одиночным уровнем в щели подвижности

Метод постоянного фототока (МПФ) был предложен Гриммейссом и Ледебо для измерений спектральной зависимости сечения ионизации глубоких ловушек в полупроводниках и применялся при исследованиях глубоких уровней в монокристаллическом арсениде галлия. Этим методом исследовались и другие кристаллические полупроводники с глубокими уровнями в запрещенной зоне: кремний и теллурид кадмия, легированные золотом. К основным достоинствам МПФ следует отнести возможность исследований спектральных зависимостей коэффициента оптического поглощения и спектра плотности состояний в диапазонах, охватывающих, как правило, большую часть спектра локализованных состояний. Основной недостаток МПФ – ограниченность области использования материалами с высоким отношением фотопроводимости к темновой.

Описание МПФ следует начать с рассмотрения одиночного энергетического уровня с концентрацией состояний N_i в верхней половине щели подвижности ($E_g = E_C - E_V$) полупроводника *n*-типа. Предположим, что тепловой генерацией носителей на рассматриваемый уровень можно пренебречь. Тогда равновесная концентрация фотогенерированных электронов *n* определяется соотношением:

$$\frac{dn}{dt}=e_n^0n_i-C_n(N_i-n_i)n=0,$$

где e_n^0 – скорость оптической эмиссии электронов при интенсивности потока фотонов F, n_i – плотность заполненных электронами ловушек на уровне N_i , C_n – скорость захвата электронов. Скорость оптической эмиссии $e_n^0 = \sigma_n^0 F$, где σ_n^0 – сечение ионизации для электронов. Тогда,

$$F(\hbar\omega)\sigma_n^0(\hbar\omega)n_i - C_n(N_i - n_i)n = 0, \qquad (4.1)$$

если выполнены следующие условия:

• наличие однородного возбуждения $\alpha(h\nu)d \ll 1$, где d – толщина исследуемой пленки; $\alpha(h\nu)$ – зависящий от энергии фотона $h\nu$ коэффициент оптического поглощения;

• скорость термической эмиссии e_n^T с уровня E_i пренебрежимо мала;

• отсутствие процессов двухфотонного возбуждения $(hv << E_i - E_V)$.

Из уравнения (4.1) следует, что равновесная концентрация фотогенерированных электронов *п* может поддерживаться постоянной при изменении энергии фотонов *hv* путем изменения интенсивности предположить фотонов F(hv). Если далее потока отсутствие спектральной зависимости подвижности фотогенерированных электронов, то при этих условиях будем иметь постоянную величину в образце. Постоянными будут и установившееся фототока I_{nh} заселенность примесных уровней и время жизни на них электронов.

Следовательно, при рассматриваемых условиях, спектральная зависимость величины оптического коэффициента поглощения определяется выражением:

$$\alpha(\hbar\omega) = Const / F(\hbar\omega). \tag{4.2}$$

Таким образом, измеряя спектральную зависимость величины потока фотонов, необходимого для поддержания постоянной величины фототока в образце, имеем возможность получать информацию о положении и концентрации одиночных уровней в щели подвижности полупроводниковых материалов по спектральной зависимости коэффициента поглощения. В реальном аморфном полупроводнике квазинепрерывное распределение состояний щели существует В усложняет подвижности. Это несколько алгоритмы обработки информации, получаемой при использовании МПФ.

Материал с квазинепрерывным распределением состояний в щели подвижности

Ha 4.1 изображена энергетическая рис. диаграмма неупорядоченного полупроводника, освещаемого монохроматическим светом с энергией фотонов hv. E_C и E_V разделяют распространенные и локализованные состояния, E_{fn} обозначает энергию квазиуровня Ферми МΠΦ В случае для электронов. величина экспериментально регистрируемого параметра существенно зависит и от оптического

возбуждения носителей заряда и от их транспорта, то в процессе таких измерений оказывается возможным независимо определять интенсивность различных типов оптических переходов.



аморфных полупроводниках

С одной стороны это обстоятельство делает неправомерным использование МПФ для вычисления $\alpha(hv)$ и ограничивает область применения соотношения (4.2) рассмотренным выше идеализированным полупроводником с одиночным уровнем. С другой стороны существенно математическая упрощается формулировка решение задачи И N(E), так нахождения как в величину $\Psi(hv)$, определяемую соотношением

$$\psi(hv) = Const / F(hv),$$

вносят вклад оптические переходы лишь одного типа. Тогла в одноэлектронном приближении для $\psi(hv)$ можно записать:

$$\int N(E)f(E)g(E+h\nu)\left[1-f(E+h\nu)\right]dE = h\nu \cdot \psi(h\nu), \qquad (4.3)$$

где f(E) – функция Ферми – Дирака (при квазиравновесном распределении электронов f(E)=1 для всех $E < E_{fn}$, и f(E)=0 для $E > E_{fn}$), g(E) – плотность конечных состояний для переходов рассматриваемого типа.

На рис. 4.1 введем вспомогательную ось энергий є, что позволит переписать (4.3) в виде

$$\int N(E)g(h\nu - \varepsilon)d\varepsilon = h\nu \cdot \psi(h\nu).$$
(4.4)

В случае параболических зон $g(hv-\varepsilon) \sim (hv-\varepsilon)^{0.5}$ (экспериментальным доказательством параболичности зон в *a*-Si:H является линейная зависимость $\sqrt{\alpha(hv)}$ от hv в области края оптического поглощения). На рис. 4.1 видно, что в отсутствии многофотонного возбуждения, состояния, расположенные ниже уровня $\varepsilon = hv$ не могут участвовать в процессах типа «а» (носители, возбуждаемые с этих состояний не достигают дна зоны проводимости). Отсюда немедленно следует равенство верхнего предела в интеграле уравнения (4.4) энергии hv квантов излучения, падающего на образец. Поскольку состояния, расположенные на рис. 4.1 выше E_{fn} пусты, то имеет можно записать:

$$\int_{Efn}^{hv} N(E)\sqrt{hv-\varepsilon}d\varepsilon = hv\bullet\psi(hv)$$

Описание измерительной установки

Для измерений спектральной зависимости фотопроводимости образцов используется установка (рис. 4.2), состоящая из источника света, монохроматора, камеры с исследуемым образцом, и измерительных приборов. Источником света 2 для монохроматора 1, служит лампа, подключенная к блоку питания 3. Световой поток от источника света с помощью вогнутого зеркала проектируется на входную щель прибора. Измерения фотопроводимости образцов 5 проводятся посредством пикоамперметра Keithley 6480. Источником напряжения служит стабилизированный блок питания M4203 4.



Рис. 4.2. Блок схема установки для измерения спектральной зависимости фотопроводимости: 1 – монохроматор МДР-23; 2 – лампа накаливания; 3 – блок питания лампы; 4 – блок питания измерительной цепи; 5 – исследуемый образец; 6 – цифровой пикоамперметр Keithley 6480.

Порядок выполнения работы

Процедура измерения фотоэлектрических свойств с использованием МПФ:

1) Включить лампу накаливания.

2) Включить источник питания стабилизированный М4203 и пикоамперметр Keithley 6480. Установить на выходе источника питания постоянное напряжение согласно указанию преподавателя.

3) Закрыть щель монохроматора, для чего вращать соответствующую рукоятку до тех пор, пока не будет установлено нулевое значение ширины щели.

4) Измерить величину темнового тока образца.

5) Установить длину волны монохроматора 600 нм.

6) Записать значение тока на индикаторе Keithley 6480 при закрытой щели монохроматора; плавно увеличивать ширину щели монохроматора до тех пор, пока ток не превысит в два раза ток, измеренный при закрытой щели; записать значение ширины щели, при котором достигнуто необходимое значение тока.

7) Повторить измерения в соответствии с п. 6 меняя длину волны с шагом 20 нм до 1300 нм.

8) Показать преподавателю полученные данные и получить программу для расчетов параметров пленки, измеренных с помощью МПФ.

Контрольные вопросы

1) Каковы основные достоинства и недостатки МПФ?

2) Почему в процессе измерения величина фототока должна поддерживаться постоянной?

3) Как связаны спектральная зависимость потока фотонов, получаемая с помощью МПФ со спектрами коэффициента оптического поглощения материала и спектром плотности локализованных состояний?

4) Чем отличаются локализованные состояния от распространенных?

5) В чем основные различия между спектрами плотности состояний в кристаллических и аморфных (неупорядоченных) полупроводниковых материалах.

6) Каковы основные особенности известных Вам моделей распределения локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченных полупроводников?

7) В чем сходство и различие полученных в ходе выполнения работы результатов экспериментальных исследований и модельных распределений плотности состояний?

Литература,

рекомендуемая для самостоятельного изучения

1. Попов А.И. Физика и технология неупорядоченных полупроводников: учеб. пособие для вузов / А.И. Попов. – М.: МЭИ, 2008. – 272 с., ил.

Лабораторная работа №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ДИСКОВ МЕТОДАМИ ТУННЕЛЬНОЙ И АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

<u>Цель работы</u>: изучение принципов действия сканирующих туннельного и атомно-силового микроскопов, изучение топографии оптических дисков, расчёт информационной ёмкости оптических дисков и мощности лазерного излучения, которым эти диски записываются.

Сканирующие зондовые микроскопы

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ, англ. SPM – Scanning Probe Microscope) – класс микроскопов для получения изображения поверхности и её локальных характеристик. Процесс построения изображения основан на сканировании поверхности зондом. В общем случае позволяет получить как яркостное двухмерное, так и рельефное трёхмерное изображение поверхности с высоким (вплоть до атомарного) разрешением. Отличительной особенностью СЗМ является наличие:

- зонда;
- системы перемещения зонда относительно образца по двум
- (x y) или трём (x y z) координатам;
- регистрирующей системы.

Регистрирующая система отрицательной обратной связи (ОС) фиксирует значение некой функции P = P(z), зависящей от расстояния зонд – образец (значение P однозначно определяет высоту z). На рис. 5.1. представлена схема организации ОС. Значение P_0 задаётся оператором. Если при движении зонда вдоль поверхности образца расстояние зонд-образец изменится на Δz , то система ОС отреагирует на это и изменит значение P на ΔP так, что $\Delta P = P - P_0$, которое усиливается и подаётся на исполнительный элемент (ИЭ). ИЭ обрабатывает этот разностный сигнал ΔP , приближая зонд к образцу или отдаляя его до тех пор, пока разностный сигнал не станет нулём. Таким образом поддерживается расстояние зонд – образец с высокой точностью.

Работа сканирующего зондового микроскопа основана на взаимодействии поверхности образца с зондом (кантилевер, игла или оптический зонд). При малом расстоянии между поверхностью и зондом действие сил взаимодействия (отталкивания, притяжения и других сил) и проявление различных эффектов (например, туннелирование электронов) можно зафиксировать с помощью современных средств регистрации. Для регистрации используют различные типы сенсоров, чувствительность которых позволяет зафиксировать малые по величине возмущения. Для получения полноценного растрового изображения используют различные устройства развёртки по осям *x* и *y* (например, пьезотрубки, плоскопараллельные сканеры).

Существуют три основных типа сканирующих зондовых микроскопов: сканирующий атомно-силовой микроскоп, сканирующий туннельный микроскоп и ближнепольный оптический микроскоп. В настоящей работе используются первые два из них.

В сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) для получения изображения используется эффект туннелирования электронов из материала зонда в образец, что позволяет получить информацию о топографии и электрических свойствах образца. В атомно-силовом микроскопе (АСМ) регистрируются силы взаимодействия между зондом образца. поверхностью Это позволяет получить топографию И поверхности информацию eë механических И 0 И некоторых электрических свойствах.



Рис. 5.1. Схема организации системы обратной связи

При работе на сканирующем зондовом микроскопе необходимо выполнение следующих требований. Конец зонда должен иметь размеры сопоставимые с исследуемыми объектами. Необходимо обеспечение механической (в том числе тепловой и вибрационной) стабильности на уровне лучше 0,1 Å. Детекторы должны надёжно фиксировать малые по величине возмущения регистрируемого параметра. Необходимо создание прецизионной системы развёртки и обеспечение плавного сближения зонда с поверхностью.

Лабораторный нанотехнологический комплекс (НТК) «Умка»

Входящий в НТК «Умка» сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) «Умка-02-U» (рис. 5.2) относится к зондовым микроскопам, используемым для исследования неразрушающим методом свойств материалов и топографии поверхностей на атомарно-молекулярном уровне. При помощи СТМ «Умка-02-U» можно проводить исследования в воздушной атмосфере, как проводящих, так и слабопроводящих материалов, а также полупроводников.

Прибор позволяет:

• определять топологию поверхности образцов в виде чётких 2D- и 3D-изображений с атомарным разрешением;

• определять работу выхода и импеданса – определение примесей в исследуемом материале; измерять вольт-амперные и дифференциальные характеристики материала (определение типа проводимости материала, анализ структур проводящих и магнитных образцов) на атомно-молекулярном уровне;

• измерять параметры профиля (шероховатость, размер включений и наночастиц);

• измерять все типы дифференциальных спектров: dI/dU, dI/dH, dH/dU;

Реализованные алгоритмы обработки данных позволяет определять амплитуду и сдвиг фаз между измеряемыми каналами. Это даёт возможность использовать комплекс при изучении коррозии, в том числе и гетерогенных материалов, позволяя чётко определять структуру «зёрен» разного состава, исследовать композитные материалы, различать зоны с разным типом проводимости и уровнем легирования в полупроводниках; осуществлять оценку длительного внешнего воздействия на образцы в режиме реального времени (in situ) (определение коррозионной устойчивости, радиационного воздействия и т.д.).

В основе работы микроскопа лежит туннельный эффект – явление туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер между зондом поверхностью образца во металлическим И внешнем электрическом поле. СТМ осуществляет детектирование локального взаимодействия (изменение силы тока), возникающего между зондом и поверхностью исследуемого образца при их взаимном сближении. При этом в цепь (рис.5.2), состоящую из иголки (зонда), образца и источника напряжения, поступает ток. Данные о материале и топографии поверхности получают при изменении расстояния между образцом и иглой (уменьшении туннельного зазора), необходимом для поддержания постоянного туннельного тока, либо ПО изменению величины

49

туннельного тока. С помощью СТМ можно получить изображение поверхности вплоть до атомарного разрешения.



Рис. 5.2. Устройство сканирующего туннельного микроскопа

Между зондом (1) и исследуемым образцом (5) прикладывается небольшая разность потенциалов (6). Величина приложенного напряжения должна соответствовать величине потенциального барьера: если приложить слишком большое напряжение, то вместо туннельного тока можно получить ионную эмиссию. Зонд микроскопа, укреплённый на пьезодвигателе (2), перемещается над образцом, не касаясь его, последовательно по линиям-строчкам (сканирует образец), образуя полный кадр. Частота сканируемых строк при этом зависит от требуемого разрешения изображения (скана). Туннельный ток, пройдя через усилитель (3), подаётся на модуль обратной связи (4), который управляет движением зонда.

В СТМ «Умка-02-U» используются зонды из вольфрамовой проволоки, острия которых заточены до размера, не более 100 нм. Изготовление зондов осуществляется методом электрохимического травления с помощью специальной установки для заточки зондов.

Требования к исследуемому образцу: форма – плоская квадратная пластинка со стороной примерно 10 мм; поверхность – гладкая; материал – электропроводящий, слабопроводящий или полупроводниковый.

Платформа NanoEducator II

Платформа NanoEducator II создана для организации обучения принципам работы с СЗМ, приобретения навыков исследования нанообъектов и наноструктур, осуществления нанолитографии и наноманипуляций.

C3M NanoEducator II позволяет работать как в туннельном режиме, так и в режиме сканирующего атомно-силового микроскопа (ACM).

В отличие от СТМ, АСМ позволяет исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности. Пространственное разрешение атомносилового микроскопа зависит от размера кантилевера и радиуса кривизны его острия. Разрешение достигает атомарного уровня по горизонтали и существенно превышает его по вертикали. Обычно под взаимодействием понимают притяжение или отталкивание зонда и поверхности под действием близкодействующих сил Ван-дер-Ваальса, однако существует целый ряд модификаций метода для анализа иных взаимодействий, например, электростатических, магнитных, сил трения. Когда игла находится на достаточно большом расстоянии от образца, зонд слабо притягивается к образцу. С уменьшением расстояния указанное притяжение усиливается до тех пор, пока электронные облака иглы и атомов поверхности не начнут испытывать электростатическое отталкивание. Суммарная сила обращается в ноль на расстоянии порядка длины химической связи (несколько десятых долей нанометров); при меньших расстояниях доминирует отталкивание.

В зависимости от расстояний зонд-образец, используемых для получения ACM-изображений, возможны следующие режимы (моды) работы ACM: контактный режим (contact mode); бесконтактный режим (non-contact mode); полуконтактный режим (tapping mode). При контактном режиме расстояние зонд-образец составляет порядка нескольких десятых долей нанометра. Таким образом, игла ACM находится в мягком физическом контакте с образцом и подвержена действию сил отталкивания. В этом случае взаимодействие между иглой и образцом заставляет кантилевер изгибаться, повторяя топографию поверхности. Топографические изображения в ACM обычно получают в одном из двух режимов: режим постоянной высоты и режим постоянной силы.

При бесконтактном режиме (режиме притяжения) кантилевер с помощью пьезокристалла колеблется над изучаемой поверхностью с некоторой амплитудой, не касаясь поверхности. По изменению амплитуды или сдвигу резонансной частоты колебаний в ходе сканирования поверхности определяется сила притяжения и формируется изображение поверхности.

Полуконтактный режим аналогичен бесконтактному режиму с тем отличием, что игла кантилевера в нижней точке своих колебаний слегка касается поверхности образца.

При использовании ACM в нанолитографии работа ведется в контактном режиме с контролируемым перемещением острия зонда по заданной схеме.

Таким образом, основными преимуществами методов сканирующей зондовой микроскопии являются:

• высокая локальность, которая определяется взаимодействием зонда и поверхности;

• возможность использования зонда для модификации поверхности объекта (нанолитография);

• возможность использования не только в вакууме, но и на воздухе, и в жидкой среде.

Основными недостатками СЗМ являются:

• сильная зависимость результатов от формы и природы зонда;

• низкая скорость, обусловленная механической системой сканирования;

• искажения латеральных расстояний и углов, что связано с температурным дрейфом, нелинейностью функционирования пьезокерамики и тем фактом, что данные от различных участков растра получены в разные моменты времени.

Оптический диск

Оптический диск оформляется в виде конструкции с воздушным зазором, так называемый «воздушный сэндвич». Две прозрачные подложки из пластика соединяются в оптический диск (рисунок 5.3).



Рис. 5.3 – Устройство незаписываемого оптического диска (слева – разрез, справа – увеличенные питы). 1 – краска и лак, 2 – защитный слой, 3 – алюминиевый слой, 4 – поликарбонатная основа

Запись на диск осуществляется, как и чтение, «через подложку». В системах одноразовой записи применяется способ термоперфорации («выжигание углублений»).

Запись и чтение информации производится сфокусированным пучком лазера. В режиме записи мощность лазера выше, чем в режиме чтения. Для того, чтобы материал диска в процессе записи не слишком сильно нагревался, лазер работает в импульсном режиме.

Записанная информация представляет собой преобразованный исходный двоичный код методом модуляции из восьми в четырнадцать (англ. *EFM – eight to fourteen modulation*), что приводит к увеличению плотности записи информации и повышению помехоустойчивости.

Воспроизведение записанной информации осуществляется после декодирования.

Рельеф компакт-диска представляет собой чередование питов (англ. *pit* – углубление) и лендов (англ. *land* – пространство). Логическая единица представляет собой переход от пита к ленду и наоборот, а ноль – отсутствие перехода (рисунок 5.4). При этом длина пита не может быть меньше 3 бит, а длина ленда не должна превышать 11 бит (между соседними единицами не должно быть менее двух или более десяти нулей).

Между *EFM*-словами находятся три объединяющих бита, задача которых разрешить, например, такие конфликты, как первое *EFM*-слово заканчивается единицей, а второе – начинается на единицу (не может быть подряд идущих единиц).

Таким образом, начальное 8-битное слово перекодируется в 17битную последовательность.



Рис. 5.4 – Принцип записи на компакт-диск

Задание

1. Подготовить образец DVD-диска.

2. По заданию преподавателя отсканировать поверхность образца на НТП «Умка» или NanoEducator II.

3. Провести необходимые геометрические измерения на скане.

4. Произвести расчёт информационной ёмкости оптического диска и рассчитать погрешность расчёта.

5. Произвести оценку мощности лазера, которым диск был записан, и рассчитать погрешность оценки.

Порядок выполнения лабораторной работы *CTM «Умка»*

1. Получить у преподавателя образец для исследования.

Подготовка образца. Закрепить держатель, на который будет 2. крепиться образец для исследования, в специальной подставке. Затем поместить при помощи пинцета и отвёртки образец под пружины на Манипуляции держателе. Внимание! С держателем образца необходимо осуществлять при помощи пинцета! Вытащить из подставки держатель, открыть шторку манипулятора и установить держатель в рабочую камеру подальше от зонда. Образец должен располагаться перпендикулярно зонду. После установки аккуратно пинцетом подвести держатель с образцом к острию зонда так, чтобы между ними оставалось 1 – 2 мм. Закрыть шторку манипулятора.

3. Запустить программу UmkaPO.exe (или test1.exe). Откроется окно подвода Approach образца к зонду. Перед началом подвода образца к зонду необходимо настроить рабочий режим – выставить напряжение, прикладываемое между образцом и зондом 0,3 В, а также величину рабочего тока 0,1 нА. Убедиться, что цепь отрицательной обратной связи замкнута (должна быть нажата кнопка Feedback ON). После этого осуществить процесс подвода нажатием кнопки Start. По завершении подвода шкала выдвижения зонда должна быть заполнена примерно наполовину. В случае если шкала заполнена существенно меньше или больше, чем на половину, обратиться к преподавателю.

Открыть вкладку *Topography* для осуществления настройки 4. сканирования и самого процесса сканирования. Для первого обзорного сканирования необходимо выставить максимальный размер области сканирования либо изменением параметров размера области (Xoff = Yoff = 0, Xlen = Ylen = 8000 нм), либо растягиванием мышкой красного квадрата в области построения топографии поверхности до максимального размера. Затем в случае необходимости выбрать нужное направление сканирования. Скорость измерения установить примерно численно равную размеру скана, т.е. Speed \approx Xlen. Выбрать в качестве первого канала рельеф при прямом прохождении (Channel 1: R), а в качестве второго канала рельеф при обратном прохождении (Channel 2: R Reverse). Начать сканирование нажатием кнопки Scan (или Start). В области построения топографии будут строиться два изображения: рельеф поверхности при прямом прохождении строки и рельеф поверхности при обратном прохождении этой же строки. Перемещаться между ними можно при помощи радиокнопок, расположенных над областью построения изображения.

5. В процессе построения изображения справа от него появятся профили текущей строки рельефа: красная (прямой проход) и зелёная (обратный проход) кривые. В случае нормально протекающих измерений оба профиля должны максимально совпадать.

6. По окончании процесса сканирования можно выбрать новую область (см. п. 4) для сканирования, перемещая красный квадрат. После

завершения нажатием правой кнопки по области построения топографии при активном нужном канале (сверху выбрать соответствующую радиокнопку) произвести экспорт изображения в папку со своей фамилией в папке своей группы в формате *.bcr. Обратите внимание: если необходимо обрабатывать несколько изображений, то одно изображение – один файл!

7. Закрыть окно программы, выключить микроскоп и отодвинуть образец от зонда.

8. Обработать изображение в программе Gwyddion.

ACM NanoEducator II

1. Получить у преподавателя образец для исследования.

2. Запустить программу Nova Px. После открытия окна программы дождаться инициализации оборудования, которое произойдёт при смене кнопки *Initializing* на *SMP Ok* и нескольких характерных щелчках в микроскопе.

3. Установка образца. Перед началом убедиться, что датчик выдвижения сканера установлен в крайнее нижнее положение (см. п. 6, на вкладке *Approach* нажать кнопку *Remove* для отвода сканера, в журнале появится сообщение "*Stopped by Backward Limiter*"). Закрепить образец на скотч на металлическую подложку. Установить подложку с образцом на магнитный фиксатор так, чтобы три металлических шарика на фиксаторе попали в пазы. После установки подложек установить измерительную головку на основной блок.

4. После инициализации оборудования открыть окно видеокамеры. Так как сканер находится в крайнем нижнем положении, то на видеоизображении образца не будет видно.

5. Открыть вкладку настройки колебаний зонда *Resonance*. Настроить колебания зонда на резонансную частоту нажатием на кнопку *Auto* (текущая амплитуда колебаний станет равной порядка *Mag* = 10 [нА], а фаза колебаний – 0°). Внимание! Поиск и настройка резонанса осуществляется автоматически!

6. Перейти на вкладку *Аpproach* для осуществления подвода сканера с образцом к кончику зонда. Подвод осуществляется в два этапа: грубый подвод и точный подвод. В первом этапе сканер с образцом перемещается вверх на расстояние порядка 2 – 3 мм. Движение сканера быстро и его ничто не ограничивает. Поэтому данный этап работает тогда, когда расстояние между зондом и образцом достаточно большое, чтобы не произошло случайное столкновение образца и кончика зонда. Точный подвод осуществляется медленно; при каждом движении сканера осуществляется измерение амплитуды колебаний зонда и подвод прекращается, когда амплитуда станет равной рабочей.

6.1. Для начала, следя за сигналом видеокамеры микроскопа, осуществить грубый подвод сканера к зонду нажатием кнопки *Move*. Внимание! Во избежание соприкосновения поверхности образца с остриём зонда и последующей его поломкой, когда изображение поверхности появится в видеокамере, остановить грубый подвод нажатием копки *Stop*. Осуществить, если необходимо, данный подвод несколько раз до того момента, как на образце появится отражение кончика зонда.

6.2. Перед началом этапа точного подвода необходимо в поле SetPoint выставить рабочее значение амплитуды колебаний, которое должно быть меньше амплитуды колебаний зонда, совершающего вынужденные колебания (SetPoint = 8 нА). Затем замкнуть систему обратной связи. Справа от коэффициента усиления цепи обратной связи заполнится шкала, означающая степень выдвижения сканера.

6.3. Нажать кнопку Landing. На осциллографе будет показана временная зависимость амплитуды колебаний зонда. В момент окончательного подвода образца к кончику зонда амплитуда колебаний изменится с величины равной *Mag* на величину *SetPoint*, а на сигнале видеокамеры будет показано соприкосновение кончика зонда и поверхности образца (отражение зонда и сам зонд стыкуются). Шкала выдвижения сканера заполнится наполовину. Сигнал *Mag* станет равным *SetPoint*.

6.4. В случае возникновения генерации сигнала амплитуды колебаний уменьшить коэффициент усиления обратной связи *Gain* или переподвестись в другое место образца.

7. Перейти на вкладку *Scanning*.

7.1. Для осуществления процесса сканирования установить режим «*Phase Contrast*». В процессе сканирования будут измеряться два сигнала: высоты *SensHeight* для построения рельефа поверхности и фазы *Phase* для построения фазового контраста. Установить площадь окна сканирования равную 30×30 мкм² для осуществления предварительного обзора поверхности исследуемого образца. Скорость сканирования установить равной *Rate* = 0,8 Гц. Запустить сканирование нажатием кнопки *Run*.

7.2. В процессе сканирования на обоих сигналах осуществить вычитание поверхности нужного порядка (обычно первого или второго) нажатием кнопки *None* снизу изображений. Одновременно можно наблюдать движение сканера на сигнале с видеокамеры микроскопа.

7.3. После окончания сканирования обзорной области выбрать новую область для исследования, установить скорость сканирования *Rate* = 0,5 Гц и снова начать сканирование.

8. По окончании сканирования перейти на вкладку *Data*, выделить нужные фреймы и сохранить их для дальнейшей обработки

File \rightarrow *Save Selected Frame* в папке со своей группой и фамилией в формате *.*mdt*. Все выделенные фреймы сохранятся в одном файле.

9. Закрыть окно *Image Analysis*, разъединить цепь обратной связи, на вкладке *Approach* нажатием кнопки *Remove* осуществить быстрый отвод сканера от зонда на расстояние порядка 2 мм (процесс отвода наблюдается в окне сигнала видеокамеры микроскопа). По окончании процесса отвода закрыть окно программы и отключить блок управления микроскопом.

10. Обработать изображение в программе *Gwyddion*.

Обработка экспериментальных данных

Определение информационной ёмкости диска

Ha сканах поверхности оптического полученных диска необходимо найти наибольший по размерам пит, который соответствует записанному коду 10000000001 (десять нулей). Не менее чем по пяти измерениям (см. таблицу 5.1) определить и рассчитать следующие усреднённые геометрические размеры (рисунок 5.5), a также погрешность измерений.

Таблица 5.1

	Измараниа					Сродноо
Параметр	измерение					Среднее
	1	2	3	4	5	значение
Расстояние между						
соседними дорожками						
D, мкм						
Длина пита <i>L</i> , мкм						
Ширина пита <i>W</i> , мкм						
Глубина пита <i>h</i> , нм						

Параметры рельефа оптического диска

Угол к нормали, образуемый при переходе от ленда к питу и от пита к ленду, определяется как $\theta = arctg \frac{W}{2h}$. Площадь, занимаемая одним питом: $S_n = L \cdot D$ – область, в которую входят 12 закодированных бита. Тогда количество бит информации, приходящееся на единицу площади, называемое информационной плотностью, определяется как $c_{un\phi} = \frac{1}{S_n/12} \cdot \frac{8}{17}$ (с учётом того, что 8 исходных бит информации перекодируются в 17-битную последовательность). Площадь дискового кольца $A = \pi (R_2^2 - R_1^2)$, где R_1, R_2 – радиусы внутреннего и внешнего круга соответственно.

Информационная ёмкость $C_{uh\phi} = c_{uh\phi} \cdot A$. Информационная ёмкость измеряется в гигабайтах (1 Гб = 2^{10} б = $8 \cdot 2^{10}$ бит).



Расчёт мощности лазера

Как было сказано выше, при записи информации на CD-R, DVD-R или BD-R производится выжигание участка поверхности сфокусированным лазерным пучком. Выжигание требует затраты энергии, которая определяется теплотой испарения $Q_{ucn} = \frac{L_{ucn}}{M}m$, где L_{ucn} – удельная теплота испарения, M – молярная масса испаряемого вещества, значение которых дано в таблице ниже (в предположении, что в качестве материала, из которого сделан активный слой диска, используется теллур), m – масса испаряемого вещества.

Масса испаряемого вещества легко находится, если известен объём пита: $m = \rho V$, где ρ – плотность испаряемого вещества (см. таблицу 5.2). Объём пита находится по следующей формуле, которая учитывает сложную форму пита:

$$V = \frac{1}{3}\pi \left[\frac{W^3}{2\mathrm{tg}\theta} - \left(W - 2h\mathrm{tg}\theta\right)^2 \left(\frac{W}{2\mathrm{tg}\theta} - h\right)\right] + 2\left(W - 2h\cos\theta\right) \cdot \left(L - W\right) \cdot h \,.$$

Тогда мощность лазера определяется как: $P = Q_{ucn} / \tau$, где τ – длительность импульса записи, равная 15 нс.

Помимо этого, можно оценить плотность мощности излучения W (мощность излучения P, приходящуюся на усреднённую по объёму площадь сечения пита $S_{\rm cp} \approx V / h$): $w = \frac{P}{S_{\rm cp}}$.

Таблица 5.2

Физические и химические характеристики Те

Удельная теплота	Молярная масса	Плотность		
испарения	M Γ	Г		
$L_{\mu c \pi}, \frac{\kappa \Box \varkappa}{\Box}$	и, моль	$p, \frac{1}{cM^3}$		
МОЛЬ				
51	127,6	6,247		

Контрольные вопросы

1. Каков общий принцип работы сканирующего зондового микроскопа?

2. В чём заключаются различия сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов?

3. Опишите устройство и принцип записи информации на оптический диск (CD-ROM, DVD-ROM, BD-ROM).

4. Опишите устройство и принцип записи информации на оптический диск с одноразовой записью (CD-R, DVD-R, BD-R).

5. Опишите устройство и принцип записи информации на перезаписываемый оптический диск (CD-RW, DVD-RW, BD-RW).

6. В чём заключается различие CD-, DVD- и BD-дисков?

7. Какие существуют способы чтения информации в незаписываемых оптических дисках?

Литература,

рекомендуемая для самостоятельного изучения

1. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. / В.Л. Миронов. – Н. Новгород: Ин-т физики микроструктур РАН, 2004. – 110 с., ил.

2. Попов А.И. Физика и технология неупорядоченных полупроводников: учеб. пособие для вузов / А.И. Попов. – М.: МЭИ, 2008. – 272 с., ил. – ISBN 978-5-383-00231-5.

3. **Боухьюз Г.** Оптические дисковые системы: [пер. с англ.] / Г. Боухьюз, Дж. Браат, А. Хейсер [и др.]. – М.: Радио и связь, 1991. – 280 с., ил.

4. **Касперски К.** Техника защиты компакт-дисков от копирования / К. Касперски. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 464 с., ил.

Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

<u>Цель работы:</u> – экспериментальное исследование и расчет основных характеристик промежуточных носителей заряда на основе аморфного полупроводникового материала для электрофотографии.

Теоретическое введение

Некристаллические полупроводники широко применяются в различных типах устройств для записи, обработки и тиражирования оптической информации. Наибольшее распространение в настоящее время получил электрофотографический (ксерокс) процесс, в котором изображение первоначально записывается в виде потенциального рельефа на поверхности или в объеме так называемого промежуточного носителя информации (изображения).



Рис. 6.1. Основные этапы электрофотографического процесса:

а – зарядка; б – экспозиция; в – визуализация; г – перенос изображения на бумагу; д – закрепление; е – очистка; ж – разрядка.

1 – основной слой полупроводника; 2 – защитный поверхностный слой полупроводника; 3 – коронатор; 4 – высоковольтный источник; 5 – блок проявления; 6 – бумага; 7 – блок закрепления; 8 – блок очистки; 9 – лампа разрядки.

Промежуточный носитель изображения представляет собой слой высокоомного некристаллического полупроводника на проводящем основании. Поверхность этого слоя заражается до некоторого начального

потенциала с помощью коронного заряда (рис. 6.1 а). Затем на заряженную поверхность проецируется регистрируемое изображение, создающее за счет фотопроводимости к концу периода экспозиции потенциальный рельеф – скрытое электростатическое изображение (рис. 6.1 б). Визуализация скрытого изображения проводится с помощью заряженного красящего порошка (рис. 6.1 в). Затем полученное изображение переносится на бумагу (рис. 6.1 г) и закрепляется силовым или термосиловым методом (рис. 6.1 д).

Заключительные стадии процесса – очистка слоя от остатков красящего порошка (рис. 6.1 е) и электрических зарядов (рис 6.1 ж). После этого носитель готов к новому циклу записи информации. В электрофотографических аппаратах слой фоточувствительного правило, полупроводника, цилиндрическую как наносится на металлическую подложку – электрофотографический цилиндр (ЭФЦ), вращающийся вокруг своей оси с постоянной скоростью, а все основные этапы электрофотографического процесса выполняются по окружности ЭФЦ.

Из сказанного слой некристаллического следует, что полупроводника должен обладать высокой фоточувствительностью в видимой области спектра (для создания BO время экспозиции рельефа) необходимого потенциального И высоким удельным 10^{12} Ом*см) для сохранения сопротивлением (более созданного потенциального рельефа во время визуализации.

Указанные требования весьма противоречивы. жестки И электропроводность Действительно, следовательно, удельное И, сопротивление полупроводника определяется концентрацией И подвижностью носителей заряда:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = qn\mu_n + qp\mu_p,$$

где q – заряд электрона; n, p, μ_n и μ_p – концентрации электронов и дырок и их подвижности соответственно.

В свою очередь минимальная концентрация носителей заряда в собственном кристаллическом полупроводнике зависит от ширины его запрещенной зоны:

$$n_i = p_i = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right),$$

где ΔE — ширина запрещенной зоны; k — постоянная Больцмана, T — температура.

Таким образом увеличения для удельного сопротивления выбирать необходимо полупроводники большой шириной с запрещенной зоны. С другой стороны, что максимум известно, фоточувствительности полупроводника наблюдается при взаимодействии с излучением с энергией квантов близкой к ширине запрещенной зоны. Поскольку видимая область спектра лежит в 0.4 диапазоне длин волн _ 0,8 мкм, то для обеспечения фоточувствительности в красной области спектра ширина запрещенной 1,7 – 1,9 эВ. Однако традиционные зоны должна составлять полупроводники кристаллические при таких значениях ширины запрещенной не обеспечивают необходимого зоны удельного сопротивления. Это противоречие удалось решить, используя некристаллические полупроводники, обладающие при той же ширине запрещенной зоны более высоким (на четыре – пять порядков) удельным сопротивлением за счет меньшей подвижности носителей заряда.

Зависимость потенциала поверхности полупроводникового слоя от времени на различных стадиях фотографического процесса изображена на рис. 2.2. Основные параметры электрофотографического носителя:

• предельный потенциал зарядки слоя $U_{\Pi P}$ – максимальный потенциал, до которого возможна зарядка слоя;

• скорость спада потенциала в темноте – скорость уменьшения потенциала заряженного слоя при отсутствии экспозиции за счет собственной электропроводности материала;

• время полуспада потенциала в темноте $t_{1/2}$ – время, за которое начальный потенциал зарядки при отсутствии экспозиции в два раза;

• световая скорость спада потенциала – скорость изменения потенциала поверхности слоя за счет фотопроводимости материала;

• остаточный потенциал U_{oCT} – потенциал освещенных участков слоя после экспозиции;

• электростатический контраст ΔU – разность потенциалов на освещенных и неосвещенных участках слоя после экспозиции;

• рабочая экспозиция – величина экспозиции [лк·с], необходимая для достижения заданного электростатического контраста;

• электрофотографическая чувствительность – величина обратная рабочей экспозиции [лк⁻¹·c⁻¹].

Световые характеристики электрофотографических слоев могут определяться как при экспозиции интегральным (белым) светом, так и при экспозиции излучением с определенной длиной волны.

63



Рис. 6.2. Зависимость потенциала полупроводникового слоя от времени

Описание лабораторной установки

Для исследования кинетики зарядки, темнового и светового спадов потенциала электрофотографических полупроводниковых слоев используется стенд для измерения параметров электрофотографических цилиндров (рис. 6.3), работающий совместно с ПЭВМ.

Стенд выполнен в виде конструктивно законченного устройства неразъемных модулей, настольного типа И состоит ИЗ двух установленных один над другим. В нижней части стенда (блоке электроавтоматики) расположены электрические блоки: питания БП, синхронизации, контроллера БК. В верхней части стенда (оптикомеханическом блоке): узел фиксации и возвращения ЭФЦ, устройство измерения, механизм перемещения устройства экспонирования, плата электрометра, узел электризации, высоковольтные источники питания, узел засветки, светонепроницаемый кожух.



Рис. 6.3. Стенд для измерения параметров электрофотографических цилиндров 1 – оптико-механический блок; 2 – блок электроавтоматики; 3 – блок питания; 4 – блок синхронизации; 5 – блок контроллера.

Устройство измерения параметров ЭФЦ (рис. 6.4) представляет собой сборную конструкцию и содержит следующие элементы: плиту,

узел объектива, привод оптического клина, держатель светофильтров и датчик потенциала.

Узел объектива состоит из осветителя, обоймы, оптической щели, корпуса и объектива. Осветитель выполняет несущую функцию и имеет сборную конструкцию коробчатой формы. Внутри осветителя расположена лампа КГМ-6.3-15, выполняющая роль источника света; на задней стенке осветителя закреплен фотодатчик, контролирующий яркость лампы.

Держатель светофильтров имеет сложную геометрическую форму, включающую в себя тубус с зеркалами и корпус, с направляющими канавками, в которые могут быть уставлены три светофильтра.

Оптический клин представляет собой диск с плавно изменяющейся (по окружности) окраской (от абсолютно прозрачного до абсолютно черного). Оптический клин служит для изменения светового потока, падающего на ЭФЦ в процессе измерения его фотоэлектрических параметров. Для этого рабочая часть оптического клина входит в паз корпуса узла объектива. В ходе работы стенда оптический клин поворачивается на определенный фиксированный угол $\Delta \Psi_i$, где i – номер фиксированного положения оптического клина, может изменяться от 0 до 20. При i = 0 лампа осветителя выключена, поэтому экспозиция ЭФС равна 0. Экспозиция при 0 < i < 21 может быть рассчитана по формуле:

$$H_i = \frac{E_{20} L_{\mu} K \tau_C}{V} \tau,$$

где E_{20} – максимальное значение освещенности в плоскости ЭФС при i = 20, L_{uq} – ширина оптической щели (2 мм), V – линейная скорость вращения ЭФЦ (0,12 м/с), K – увеличение оптической системы (2), τ – значение пропускания оптического клина, τ_C – коэффициент пропускания светофильтра. Система экспонирования позволяет изменять экспозицию в диапазоне от 0 до 18 лк·с.

Узел засветки, выполнен в виде поворотной конструкции, предназначен для снятия остаточного заряда на ЭФЦ перед его повторной зарядкой.

Узел электризации выполнен в виде поворотной конструкции, основным элементом которой является электризатор типа «коротрон». Конструкция коротрона состоит из следующих частей: коронирующего электрода (вольфрамовая проволока диаметром 0,08 мм), сферического экрана, колодок крепления коронирующего электрода и контактных площадок. Коммутация полярности электризатора осуществляется вручную, подключением к электризатору соответствующего блока с помощью контактной колодки. Экран электризатора заземлен. Подложка ЭФЦ соединена с корпусом стенда через резистор R_3 , (рис. 2.5). Резистор

 R_3 шунтирован конденсатором $C_3 = 47$ пФ для сглаживания тока зарядки. Ток зарядки создает на резисторе падение напряжения, которое поступает в блок БК и используется для управления током зарядки. Задание тока зарядки производится оператором с клавиатуры ПЭВМ.

Электрометр предназначен для получения сигнала, прямо пропорционального Чувствительным потенциалу зарядки ЭФ∐. элементом электрометра является бесконтактный (емкостный) зонд, в форме металлического диска, расположенного на некотором расстоянии от поверхности ЭФЦ и образующего с этой поверхностью конденсатор. При вибрации зонда электромагнитным вибратором датчика изменяется емкость конденсатора «зонд – поверхность» и на зонде за счет электростатической индукции возникает переменное напряжение, частота которого равна частоте вибрации зонда. Это переменное напряжение усиливается, для этого оно предварительно подстраивается фазовращателем синфазно с колебаниями вибратора, и детектируется синхронным детектором. Полученный с выхода синхронного детектора пульсирующий однополярный сигнал сглаживается интегратором и изменяет амплитуду выходного напряжения регулируемого преобразователя напряжения Выходное напряжение РПН (PΠH). приложено между подложкой ЭФЦ и зондом датчика таким образом, что зонд датчика «чувствует» разность потенциалов между потенциалом поверхности ЭФЦ и выходным напряжением РПН. В результате действия образованной обратной связи через зонд датчика выходное напряжение РПН, являясь компенсационным напряжением потенциала ЭФЦ, устанавливается равным по значению этому напряжению. Кроме напряжение того, компенсационное поступает через делитель напряжения как сигнал о потенциале заряда ЭФЦ в схему управления аппарата.



Рис. 6.4. Схема устройства измерения 1 – электрофотографический цилиндр; 2 – электризатор (коротрон); 3 – осветитель; 4 – узел засветки; 5 – датчик электрометра; 6 – держатель светофильтров; 7 – объектив; 8 – оптическая щель.

Привод вращения электрофотографических цилиндров обеспечивает линейную скорость вращения ЭФЦ равную 0,12 м/с для цилиндров с диаметром 30, 60 и 84 мм. Соответствующее изменение скорости вращения для ЭФЦ различного диаметра осуществляется с помощью переключателя на блоке БС. Диэлектрическая изоляция корпуса) держателей ЭФЦ (относительно позволяет обеспечить возможность измерения тока зарядки ЭФЦ, для чего система измерения тока подключается при помощи подпружиненной графитовой щетки к левому держателю ЭФЦ, (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Блок-схема узла электризации

 1 – электрофотографический цилиндр; 2 – коротрон; 3 – БВМ-7АУ (источник положительного напряжения для коротрона); 4 – БВМ-7БУ (источник отрицательного напряжения для коротрона); 5 – держатель ЭФЦ; 6 – гнездо Гн 3; 7 – штекер; 8 – резистор R3; 9 – шунтирующий конденсатор С3; 10 – прижимной контакт

Описание алгоритма измерения

В режиме «Измерение» стенд обеспечивает определение и расчет следующих параметров:

- начального потенциала зарядки V_0 [B];
- остаточного потенциала $V_{\text{ост}}$ [B];
- светочувствительности S [лк⁻¹·c⁻¹];
- номинальной рабочей экспозиции H_{p} [лк·с];
- электростатического контраста $\Delta V_{\rm K}$ [B];
- номинальной плотности поверхностного заряда Ф [Кл/м2];
- средней скорости темновой разрядки $\Delta V_{\rm T} / \Delta t$ [B/c];

• тока зарядки *I* [А];

В ходе определения параметров ЭФЦ стенд отрабатывает четыре этапа:

- установка тока зарядки ЭФЦ;
- измерение кинетики световой разрядки;
- измерение кинетики темновой разрядки ЭФЦ;
- измерение остаточного потенциала.

На первом этапе осуществляются следующие операции:

- зарядка ЭФЦ;
- засветка ЭФЦ.

При этом производится установка выбранного оператором тока зарядки ЭФЦ. Заданный ток зарядки отображается на экране дисплея ПЭВМ.

На втором этапе проводится:

- зарядка ЭФЦ;
- экспонирование ЭФЦ;
- засветка ЭФЦ.

Ha ЭТОМ этапе включается лампа осветителя В системе экспонирования положения И для каждого оптического клина производится измерение потенциала ЭФЦ. Полный цикл измерений проводится при 20 фиксированных положениях оптического клина. По результатам измерения на экране дисплея ПЭВМ строится график кинетики разрядки ЭФЦ. В это же время производится измерение тока разрядки І. Программное обеспечение ПЭВМ позволяет производить обработку результатов измерений и расчеты требуемых параметров в следующей последовательности:

по графику определяется значение начального потенциала зарядки V_0 при H = 0;

из формулы $V_{0.5} = 0.5V_0$ рассчитывается потенциал полуспада;

по графику определяется значение рабочей экспозиции $H_{0.5}$, вызывающей полуспад потенциала на ЭФЦ;

из формулы $S_{0.5} = 1 / H_{0.5}$ определяется фоточувствительность ЭФЦ;

из формулы $\Phi = \frac{I}{Vl}$ определяется поверхностная плотность заряда, где I

– ток зарядки ЭФЦ; *l* – длина коронирующего электрода; *V* – линейная скорость вращения ЭФЦ.

Полученные значения параметров не должны выходить за допустимые пределы; в случае отклонения параметров за пределы допустимого диапазона на экран дисплея выводится соответствующая информация.

На третьем этапе выполняется:

• зарядка ЭФЦ в течении одного оборота (при этом лампы засветки и экспонирования отключены);

• остановка ЭФЦ;

В течение последующих 30 сек датчиком электрометра измеряется потенциал ЭФЦ. По результатам измерений на экране строится график темновой разрядки ЭФЦ. По графику определяется значение начального потенциала разрядки V_0 и потенциал ЭФЦ через каждые 2 сек. По формуле рассчитывается средняя скорость темновой разрядки. Если эта скорость превышает максимально допустимое значение, на экране ПЭВМ высвечивается соответствующее сообщение.

На четвертом этапе проводится одна операция: засветка ЭФЦ. После нее датчиком электрометра измеряется остаточный потенциал.

После завершения всех четырех этапов цикл измерения останавливается, при этом на экране дисплея ПЭВМ высвечивается график текущих значений потенциала ЭФЦ.

Порядок выполнения работы

Для управления лабораторным стендом с ПЭВМ используется программа STENDEFC при запуске которой на экране монитора появляется меню. Выбор команды из меню производится клавишами «*Cmpeлкa влево*», «*Cmpeлкa вправо*», «*Cmpeлкa вверх*», «*Cmpeлкa вниз*», «*Enter*», «*Esc*», «*Home*», «*End*». Выбранная возможность подсвечивается повышенной яркостью. Для начала выполнения нужной команды необходимо нажать клавишу «*Enter*». Если в упомянутом меню нажать клавишу «*Esc*» или выбрать команду (опцию) «*Конец работы*», то программа SENDEFC завершит работу и передаст управление операционной системе.

При выборе опции «Управление» и нажатии клавиши «Enter» на экране ПЭВМ появляется вертикальное меню. В этом меню конкретная опция выбирается также с помощью клавишей – "стрелок" и активизируется нажатием «Enter». Клавиша «Esc» производит возврат к предыдущему меню.

Опция «Состояние стенда» предназначена для опроса лабораторного стенда, в случае его неработоспособности на экране появляется соответствующее сообщение.

Опция «Установка тока зарядки» предназначена для задания тока зарядки ЭФЦ. После нажатия клавиши «Enter» появляется вертикальное меню с возможными значениями тока зарядки. После выбора нужного значения тока нажимается клавиша «Enter» и в случае его успешной установки меню токов исчезает с экрана монитора.

Опция «Измерение» предназначена для запуска процесса измерения параметров цилиндра. В процессе измерения значения

потенциала зарядки ЭФЦ отображаются графически. После окончания процесса измерения нажатие любой клавиши запускает процедуру расчета параметров ЭФЦ. Если параметры были вычислены неправильно, то на экран дисплея выдается соответствующее сообщение.

Просмотр полученных зависимостей потенциала зарядки можно осуществить с помощью опции «Графики» основного меню. Повторное вычисление параметров можно произвести из опции «Вычисление параметров» (расположенной в опции «Управление») основного меню.

Подготовка стенда к работе

Поднимите светозащитный кожух оптико-механического блока стенда и установите колодку "Положительная полярность зарядки" или "Отрицательная полярность зарядки" в рабочее гнездо.

• подключите штекер высоковольтного провода "коротрона" в гнездо соответствующего блока питания:

БВМ-7АУ – для положительной зарядки ЭФЦ; БВМ-7БУ – для отрицательно зарядки ЭФЦ. С помощью рукоятки, расположенной между оптико-механическим блоком и блоком электроавтоматики, переместите оптико-механический блок в среднее положение;

• закройте светозащитный кожух оптико-механического блока;

• включите тумблер "Сеть", расположенный на левой боковой стенке стенда. После включения питания производится инициализация всех блоков стенда, а затем осуществляется установка стенда в исходное положение:

проверяется исправность двигателя вращения ЭФЦ;

оптический клин устанавливается в исходное положение;

устройство экспонирования перемещается в исходное (крайнее правое положение).

• переместите устройство измерения в нужную часть цилиндра.

ВНИМАНИЕ!

Во избежание ударов электрическим током не поднимать светозащитный кожух при включенном стенде!

Порядок выполнения работы

1. Измерить зависимость потенциала зарядки электрофотографических слоев при различных токах зарядки.

2. Определить предельный потенциал зарядки исследуемого ЭФЦ при положительном и отрицательном напряжении "коротрона".

3. По результатам измерений определить время полуспада потенциала ЭФЦ в темноте, а также при освещении его белым светом и через светофильтры, остаточный потенциал ЭФЦ, его электростатический контраст, а также тип основных носителей заряда в исследуемом промежуточном носителе информации.

4. По полученным значениям оценить спектральную зависимость электрофотографической чувствительности материала ЭФЦ и зависимость ее от тока зарядки.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные этапы электрофотографического (ксерокс) процесса.

2. Какие требования предъявляются к материалам промежуточных носителей информации и чем эти требования обусловлены?

3. Почему в электрографии используются, как правило, некристаллические полупроводники?

4. Назовите и дайте определения основных параметров, характеризующих работу промежуточного носителя изображения.

5. Чем обусловлена спектральная зависимость параметров электрофотографических носителей изображения?

6. Какую информацию можно получить из анализа результатов измерения параметров промежуточного слоя?

7. В чем преимущества и недостатки электрофотографического метода записи оптической информации по сравнению с обычной галлоидно – серебрянной фотографией?

Литература,

рекомендуемая для самостоятельного изучения

1. Попов А.И. Физика и технология неупорядоченных полупроводников: учеб. пособие для вузов / А.И. Попов. – М.: МЭИ, 2008. – 272 с., ил.

Лабораторная работа №7

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Цель работы: исследование спектральной чувствительности солнечного элемента (СЭ), его вольт-амперных характеристик в темноте монохроматическом освещении, а также использование И при полученных данных для расчета параметров эквивалентной схемы исследованного солнечного замещения элемента И параметров расчетного соотношения для вольт-амперной характеристики приборов.

Теоретическое введение

Среди аморфных полупроводников наиболее перспективным для СЭ настоящее время создания В считают гидрогенизированный аморфный кремний (a-Si:H) и соединения на его основе. Для определения перспективности использования того или иного материала в качестве основы для создания СЭ, прежде всего, необходимо определить спектральную зависимость фотоэлектрических параметров материала, в частности, квантового внутреннего фотоэффекта выхода η, коэффициента оптического поглощения α, и сравнить полученные спектры со спектральной плотностью потока солнечного излучения (рис. 7.1).



Рис. 7.1.Спектральное распределение энергии солнечного излучения при значении атмосферной массы AM1.5
Поскольку характер спектра существенно зависит от условий измерения (уровень интенсивности потока солнечного излучения в околоземном космическом пространстве принято обозначать как AMO, на экваторе – AM1, в средних широтах при высоте солнца 41°49′ – AM1.5, при высоте Солнца 30° – AM2, и т.д.), то требования к материалу зависят от условий работы проектируемого СЭ. Не менее важную роль играет совершенство технологии изготовления прибора в целом. Для количественной оценки эффективности конструкции СЭ удобно воспользоваться эквивалентной электрической схемой замещения его параметров.

Принцип действия, основные параметры и эквивалентная схема солнечного элемента

В простейшем случае солнечный элемент может состоять из *р-п*-перехода, расположенного единственного на сравнительно небольшой (1 2 мкм) глубине от освещаемой поверхности _ полупроводника. Поглощение света с энергией квантов hv больше ширины запрещенной зоны материала E_g приводит (за счет внутреннего фотоэффекта) к возникновению свободных электронов и дырок как в *p*и *п*-областях перехода, так и в непосредственно примыкающей к их раздела области пространственного границе заряда (ОПЗ). Существующее в ОПЗ внутреннее электрическое поле разделяет созданные светом свободные носители заряда в зависимости от их знака: свободные электроны выбрасываются в *n*-область перехода, а дырки – в р-область. При разомкнутой внешней цепи электроны и дырки, концентрирующиеся соответственно в *p* - и *n* - областях диода, приводят к появлению разности потенциалов, смещающей *p-n*-переход в прямом направлении. Если же солнечный элемент подключен во внешнюю электрическую цепь, то создаваемые при освещении избыточные концентрации электронов и дырок приведут к возникновению во внешней цепи электрического тока. Таким образом, во время освещения солнечного элемента происходит преобразование энергии квантов света в энергию движущихся по внешней цепи электрических зарядов. Типичные значения напряжения $U_{\rm xx}$ холостого хода (напряжение между *p*-и *n*-областями прибора, отсоединенного от внешней электрической цепи) описанного выше однокаскадного СЭ обычно находятся в диапазоне 0,3 - 1,0 B, и в основном определяются электрофизическими параметрами и степенью легирования материала, на основе которого изготовлен СЭ. Другой важной характеристикой прибора является его ток короткого замыкания I_{кз}, определяемый при коротком замыкании между металлизированными контактами к *p* - и *n* - областям СЭ. Естественно, что величина Ікз зависит не только от электрофизических параметров прибора, но и от его площади, поэтому часто вместо $I_{\mu\nu}$ используют другую характеристику – плотность тока короткого замыкания $J_{_{\rm K3}}$, которая равна частному от деления $I_{_{\rm K3}}$ на площадь освещаемой поверхности прибора. Типичные значения этого параметра для используемых на практике СЭ находится в пределах от единиц до нескольких десятков миллиампер на квадратный сантиметр освещаемой площади прибора. Из-за резкой зависимости коэффициента поглощения полупроводника от энергии квантов света измеряемые в эксперименте значения U_{xx} и I_{κ_3} (или J_{κ_3}) будут в весьма значительной степени зависеть от спектрального состава оптического излучения, падающего на CЭ. Поэтому унификации измерений для соответствующих характеристик СЭ широко используются так называемые имитаторы солнечного спектра [1, 2], дающие излучение со спектральным составом, близким к спектру Солнца (обычно при условиях измерения от АМО до AM2). На рис. 7.2 показана типичная вольт-амперная характеристика кремниевого СЭ.



Рис. 7.2. Типичная вольт-амперная характеристика СЭ. Кривая 1 – световая характеристика, кривая 2 – темновая. На рисунке также проиллюстрированы методы определения некоторых параметров эквивалентной схемы замещения СЭ и уравнения вольт-амперной характеристики.

Символами U_{μ} и J_{μ} обозначены значения напряжения и плотности тока в нагрузочной цепи при режиме работы СЭ, соответствующему максимальной выделяемой мощности на сопротивлении нагрузки: максимальной площади прямоугольника с противолежащими вершинами в начале координат и на принадлежащем первому квадранту участка световой вольт-амперной характеристики СЭ. Важным параметром СЭ является коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики *FF* (англ. *fill factor*), определяемый отношением площади под световой вольт-амперной характеристикой прибора в первом квадранте системы координат на рис. 7.2 к площади прямоугольника со сторонами U_{xx} и J_{x3} . У современных солнечных элементов на основе кристаллического кремния величина параметра *FF* обычно находится в пределах 0,75 – 0,80, а для однокаскадного СЭ на основе аморфного кремния величина этого параметра обычно не превышает 0,7.

Поскольку в простейшем варианте СЭ представляет собой полупроводниковый диод, то его световая вольт-амперная характеристика определяется соотношением, полученным модификацией соответствующего соотношения для неосвещаемого *p*-*n*-перехода:

$$I_{\rm H} = I_{\phi} - I_{\rm off} \left\{ \exp\left[\frac{q(U + I_{\rm H}R_{\rm n})}{AkT}\right] - 1 \right\} - \frac{U}{R_{\rm m}}$$
(7.1)

где I_{ϕ} – фототок, протекающий через переход, I_{oH} – обратный ток насыщения, q – заряд электрона, R_{n} – последовательное сопротивление СЭ, A – коэффициент неидеальности ВАХ, получаемый из сравнения теоретической и экспериментальной вольт – амперных характеристик (обычно принимает значения от 1 до 5), k – постоянная Больцмана, T – температура прибора, R_{m} – шунтирующее сопротивление СЭ.

Введенные выше параметры вольт-амперной характеристики СЭ позволяют представить эквивалентную схему СЭ (рис. 7.3). Параметры идеального источника тока определяются преимущественно $I_{\rm d}$ оптическими параметрами характеристиками светового потока и материала, наличие включенного прямо идеального диода необходимо для учета тока через *p*-*n*-переход, возникающего под действием прямого смещения из-за наличия избыточных концентраций электронов в *n*области прибора и избыточной концентрации дырок в его *p*-области. Появление в эквивалентной схеме шунтирующего сопротивления обусловлено наличием различного рода токов утечки в приборе, а сопротивление учитывает наличие последовательное контактных сопротивлений между полупроводниковым материалом И металлизированными внешними контактами прибора, сопротивление *p*и п-областей СЭ. Измерение вольт-амперных характеристик СЭ позволяет определить численные значения параметров его эквивалентной схемы, что является одной из задач данной лабораторной работы.



Рис. 7.3. Эквивалентная схема фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии. На схеме обозначено направление протекания прямого тока $I_{Д}$ через *p*-*n*-переход (диод) и прямое напряжение на нем $U_{Д}$. Значение других параметров и элементов схемы разъясняется в основном тексте.

Принцип действия, основные параметры и эквивалентная схема СЭ

Схема измерительного стенда приведена на рис. 7.4.



Рис. 7.4. Схема измерительного стенда: 1 – монохроматор ДМР-4; 2 – лампа накаливания; 3 – блок питания лампы; 4 – источник питания измерительной цепи; 5 – исследуемый образец; 6 – цифровой мультиметр/вольтметр.

Оптическая часть установки состоит из источника света (2), и монохроматора (1). В качестве источника света используется галогенная накаливания, 220В, а в лампа питающаяся ОТ сети качестве ДМР-4. Электрическая монохроматора ____ монохроматор часть измерительной схемы включает источник питания измерительной цепи цифровой измерительный прибор (6). (4),Спектральная чувствительность СЭ определяется как спектральная зависимость тока его короткого замыкания І_{кз}, рассчитанного на единицу энергии падающего оптического излучения. Поскольку исследуемым образцом является солнечный элемент, то источник питания измерительной цепи отключается, а для измерения напряжения применяется цифровой вольтметр В7-38. При измерении ВАХ солнечного элемента в качестве источника питания измерительной цепи используется источник постоянного тока Agilent E3648A, а для измерения тока – цифровой мультиметр Agilent U3402A.

Расчет параметров эквивалентной схемы и вольт-амперной характеристики прибора

Часть световой характеристики СЭ в первом квадранте (рис. 7.2) и ее продолжение в четвертом квадранте представляют собой прямую линию. Наклон этой прямой к оси токов характеризует последовательное сопротивление СЭ:

$$R_{\rm m} = \frac{\Delta U_{\rm c}}{\Delta I_{\rm c}}.$$

Величину шунтирующего сопротивления с приемлемой степенью точности можно определить по наклону обратной ветви темновой вольт-амперной характеристики:

$$R_{\rm m} = \frac{\Delta U_{\rm T}}{\Delta I_{\rm T}}.$$

Построение темновой характеристики позволяет также найти обратный ток насыщения. Продолжение линейного участка на обратной ветви темновой характеристики до пересечения с осью ординат (токов), дает искомую величину I_{on} .

В рабочем состоянии СЭ его *p*-*n*-переход включен в прямом направлении, поэтому правильнее определять ток насыщения не по обратной, а по прямой ветви темновой вольт-амперной характеристики прибора. Для этого можно воспользоваться темновой характеристикой СЭ, представленной в виде уравнения прямой в отрезках:

$$ln(I_{\mathcal{A}} + I_{_{OH}}) = ln(I_{_{OH}}) + \frac{qU}{AkT}.$$
(7.2)

Уравнение (7.2) применяется только в случае больших токов ($I_{\rm d} >> I_{\rm oh}$), а также рекомбинационного механизма протекания обратного тока насыщения через *p-n*-переход. Тангенс угла наклона прямой, описываемой уравнением (7.2) в координатах $\ln(I_{\rm d}) = f(U)$, равен q/(AkT), что позволяет рассчитать величину параметра *A* в уравнении (7.1), а отрезок, отсекаемый на оси ординат, дает значение $ln(I_{oh})$.

Порядок выполнения работы

1. Провести измерение спектра тока короткого замыкания и спектральной чувствительности СЭ в диапазоне длин волн 500 – 1200 нм. Для удобства последующей обработки результатов измерения

рекомендуется изменения длины волны излучения осуществлять с постоянным шагом 10 нм. Для расчета спектральной чувствительности СЭ полученные значения $I_{{}_{\mathrm{K}^3}}(\lambda)$ следует разделить на число фотонов $N(\lambda)$, при котором получено измеренное значение тока короткого $N(\lambda)$ по расчёту следует замыкания. Указания получить y преподавателя исходя из использующейся в момент выполнения работы лампы. По результатам измерения определить длину волны, соответствующую максимуму спектральной чувствительности исследованного СЭ.

2. Измерить световую вольт-амперную характеристику СЭ.

3. Рассчитать для каждой полученной BAX точки соответствующую ей Перестроить мощность. вольт-амперную характеристику в виде вольт-ваттной характеристики, определить точку максимальной мощности. Определить напряжение холостого хода и ток Рассчитать короткого замыкания CЭ. величину коэффициента заполнения световой вольт-амперной характеристики.

4. Рассчитать величину последовательного сопротивления в схеме замещения СЭ.

5. Измерить темновую вольт-амперную характеристику СЭ. Определить параметры *А* и *I*_{он}. Рассчитать шунтирующее сопротивление СЭ.

Контрольные вопросы

1. Какие эффекты лежат в основе принципа действия СЭ?

2. Каковы основные преимущества и недостатки СЭ на аморфном и кристаллическом кремнии?

3. От каких факторов зависит эффективность работы СЭ?

4. Перечислите основные электрофизические параметры СЭ.

5. Поясните назначение элементов эквивалентной схемы замещения СЭ.

6. Каким образом можно оценить численные значения параметров эквивалентной схемы?

Литература,

рекомендуемая для самостоятельного изучения

1. Алхасов, А. Б. Возобновляемая энергетика / А. Б. Алхасов ; Ред. В. Е. Фортов . – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Физматлит, 2012. – 256 с. - ISBN 978-5-9221-1244-4.

Учебное издание

Баринов Алексей Дмитриевич Воронцов Владимир Анатольевич Зезин Денис Анатольевич

ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Практикум по выполнению лабораторных работ

Редактор издательства М.П. Малахов Компьютерная верстка М.К. Петушкеевой

Подписано в печать	01.03.2018	Печать офсетная	Формат 60×84/16
Физ. печ. л. 5	Тираж 75 экз.	Изд. №	Заказ №

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.