

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.П. ОГАРЁВА»

В. Я. ГРИШАЕВ, Е. В. НИКИШИН

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

САРАНСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2012

УДК 621.383 (075.8)

ББК Ч215.31(94)

Г859

Рецензенты:

кафедра физики и методики обучения физике Мордовского государственного педагогического института им. М. Е. Евсевьева (заведующий кафедрой профессор Х. Х. Абушкин); член-корреспондент АЭН РФ доктор технических наук профессор В. К. Свешников; кандидат физико-математических наук, доцент Е.М. Бибанина

Гришаев В. Я.

Г859 ISBN 978-5-7103-2554-4

Специальный физический практикум : учеб. пособие / В. Я. Гришаев, Е. В. Никишин – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2012. – 40 с.

Приведены методики измерения параметров инжекционных фоторезисторов, а также спектральных и кинетических характеристик порошковых электролюминофоров и светодиодов.

Предназначено для студентов и магистрантов специальности и направления подготовки «Физика»

Дизайн обложки

Учебное издание

ГРИШАЕВ Владимир Яковлевич

НИКИШИН Евгений Васильевич

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

*Печатается в авторской редакции в соответствии
с представленным оригинал-макетом*

Подписано в печать 00.04.12. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 2,33 Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство Мордовского университета

Типография Издательства Мордовского университета

430005, Саранск, ул. Советская, 24

ВВЕДЕНИЕ

Физика исторически зародилась как экспериментальная наука и сегодня во многом именно достижения экспериментальной физики лежат в основе технического прогресса. Физический опыт помогает, с одной стороны, исследовать возможность использования достижений науки в практической жизни и, с другой, – проверить правильность и границы применимости новых результатов исследования теоретической физики. Кроме этого, задачей физического эксперимента является выявление закономерной связи явлений и процессов, определение функциональной зависимости между различными сторонами сложных объектов и явлений, а также количественных характеристик наблюдаемых физических величин.

В пособии предложен набор работ по исследованию оптических характеристик полупроводниковых материалов (порошки и светоизлучающие структуры), а также работы по исследованию фотоэлектрических свойств полупроводниковых структур. Магистрантам предлагается провести исследования спектральных характеристик люминесцирующих объектов, кинетических процессов, оценить глубину залегания центров рекомбинации и механизм рекомбинации. Исследование фотоэлектрических свойств полупроводниковых структур проводится как в статическом, так и в динамическом режимах. Лабораторный практикум предполагает, что магистранты для решения конкретной задачи будут частично видоизменять установку в соответствии с целью исследования.

Отчет по работам оформляется на бумаге формата А4 с представлением результатов исследования и проводится защита в форме обсуждения. При этом магистранты должны объяснить полученные результаты на основе известных физических законов с привлечением физических моделей.

Лабораторная работа № 1 ГРАДУИРОВКА СПЕКТРАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Приборы и оборудование: монохроматор ДМР-23; фотоумножитель (ФЭУ - 100); источник постоянного напряжения Б5-24; усилитель постоянного тока; потенциометр самопишущий Н307/1; эталонная лампа ТРШ 2850 – 3000.

При измерении спектров излучения или поглощения используются спектральные приборы, на выходной щели которых расположен фоточувствительный датчик. Спектральный прибор имеет разный коэффициент пропускания в разных частях оптического спектра. Кроме этого, фотодатчик имеет сложную зависимость спектральной чувствительности от длины волны света. Влияние этих факторов приводит к тому, что при измерении, например, спектра излучения, полученная кривая существенно отличается от реальной зависимости спектральной энергетической светимости от длины волны. Иначе говоря, спектральная установка вместе с фотодатчиком искажают измеряемую информацию о спектре излучения.

Для получения объективной информации о спектрах излучения необходимо градуировать спектральную установку. Для этого необходимо определить поправочные коэффициенты в зависимости от длины волны. Такую градуировку осуществляли с помощью лампы, спектр свечения которой известен. В качестве такой лампы часто используется источник сплошного спектра, температура тела накала которого известна.

На основе представлений о квантовом характере теплового излучения Планк получил следующее выражение для спектральной излучательной способности абсолютно черного тела:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{hc}{\lambda kT} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

где λ – длина волны; h – постоянная Планка; T – температура; c – скорость света в вакууме; k – постоянная Больцмана. Спектральная излучательная способность реального тела, согласно закону Кирхгофа, равна:

$$r_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \varepsilon_{\lambda},$$

где α_{λ} – спектральный коэффициент поглощения тела.

На практике используют функцию Планка, для которой вводят приведенную длину волны: $\xi = \frac{\lambda}{\lambda_{\max}}$. λ_{\max} – длина волны, на которую приходится максимум спектральной излучательной способности нагретого тела. Она определяется из закона Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где $b=2,8979 \cdot 10^{-3}$ м К – постоянная Вина.

В этом случае функция Планка запишется в виде:

$$\eta = 142,3 \varepsilon^{-5} \left(e^{\frac{4,965}{\varepsilon}} - 1 \right)^{-1} . \quad (2)$$

В качестве теплового источника света используется лампа накаливания с вольфрамовым телом накала. Спектральная энергетическая светимость лампы с ленточным телом накала рассчитывается в соответствии с методикой, предложенной М. Н. Смолкиным [1]. Спектральная плотность излучения находится как произведение спектральной плотности излучения абсолютно черного тела при температуре, соответствующей температуре лампы, на спектральный коэффициент излучения вольфрама (α) при той же температуре:

$$\eta_{\text{в}} = \eta \alpha . \quad (3)$$

В видимом диапазоне кривая излучения вольфрама при температуре 2 850 К имеет вид, показанный на рис. 1а.

Для ламп со спиральным телом накала спектральная плотность излучения определяется как среднее между излучением абсолютно черного тела и вольфрама при той же температуре. В данной работе мы будем пользоваться лампой с ленточным телом накала, а значит, расчет спектральной плотности излучения следует проводить по формулам (2) – (3).

В лабораторной работе в качестве эталонного источника сплошного спектра используется лампа ТРШ 2850–3000 № 127 (источник «А») с цветовой температурой 2 850 К.

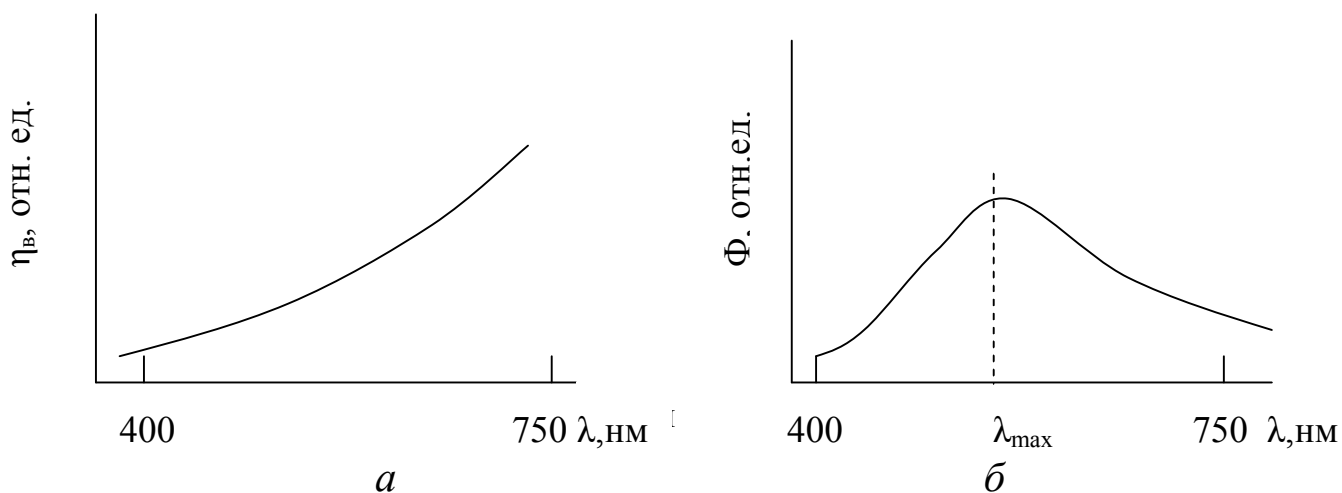


Рис. 1. Реальный спектр излучения тела (а) и спектр излучения того же тела не правленный на чувствительность установки (б)

При построении реальной зависимости спектральной плотности излучения вольфрама необходимо знать значения функция Планка η в относительных координатах (прил. 1) и спектральный коэффициент излучения вольфрама (прил. 2). Для данной температуры строим зависимость $\eta_{\text{в}} = f(\lambda)$ в диапазоне длин волн 400–750 нм. Для этого необходимо:

а) используя закон Вина, определить длину волны, на которую приходится максимум спектральной излучательной способности λ_{\max} ;

б) зная λ_{\max} , найти значения относительной координаты $\xi = \frac{\lambda}{\lambda_{\max}}$ в диапазоне длин волн 400–750 нм;

в) определить значение $\eta = f(\varepsilon)$ для абсолютно черного тела, используя прил. 1;

г) при переходе к спектральной излучательной способности при температуре 2850 К необходимо учесть спектральный коэффициент излучения металла при данной температуре $\alpha \sim f(T, \lambda)$, значения которого представлены в прил. 2.

Спектральная энергетическая светимость вольфрама в диапазоне длин волн 400–750 нм имеет вид, показанный на рис. 1а. На рис. 1б представлен возможный вид спектра излучения тела накала лампы, записанный с помощью установки ($\Phi_\lambda = \varphi(\lambda)$). Как видно из рисунка, реальный спектр излучения существенно отличается от спектра записанного экспериментально. Используя теоретические значения спектральной излучательной способности вольфрама и спектр вольфрама, записанный с помощью установки, определяем поправочный коэффициент h_λ (множитель). Множитель определим как частное от деления η_λ и Φ :

$$h_\lambda = \eta_{\lambda} / \Phi_{\lambda}. \quad (4)$$

Значения величин η_{λ} и Φ_{λ} выбираются при одной и той же длине волны из графиков $\eta_\lambda = f(\lambda)$ и $\Phi = f(\lambda)$, показанных на рис. 1.

Зная поправочный коэффициент и спектр, измеренный на установке, можно получить реальный спектр излучения любого тела перемножением измеренной спектральной плотности излучения и поправочного коэффициента при данной длине волны. Задача данной работы заключается в градуировке установки, блок-схема которой показана на рисунке 2.

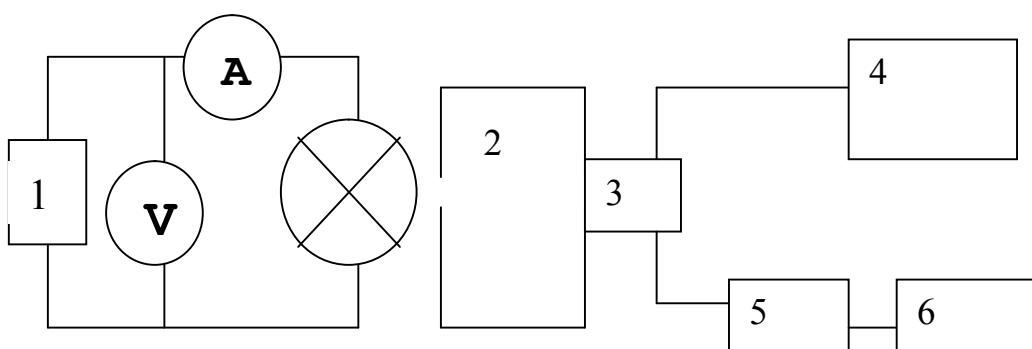


Рис. 2. Блок-схема установки

Эталонную лампу располагают перед входной щелью монохроматора МДР–23 (2). Лампа запитывается от источника постоянного тока (1). Ток и напряжение контролируются с помощью амперметра и вольтметра соответственно. Световой поток, прошедший через монохроматор,

регистрируется фотоумножителем (ФЭУ) (3), на который подается высокое напряжение от источника Б5–24 (4). Сигнал с ФЭУ поступает на усилитель постоянного тока (5) и записывается на потенциометре самопишущем Н307/1 (6). Длина волны света изменяется за счет поворота дифракционной решетки прибора, которая связана с шаговым двигателем спектральной установки (на рисунке не показан).

Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть источник тока Б5–24, усилитель постоянного тока, самопишущий потенциометр, блок управления шаговым двигателем и дать прогреться приборам в течение 10 мин.

2. На монохроматоре с помощью микровинта установить ширину входной и выходной щелей 0,03 мм. С помощью блока управления шаговым двигателем установить длину волны 400 нм. Скорость развертки установить в положение «100». Множитель « $\times 4$ ».

3. На потенциометре установить чувствительность по оси Y значение 10 мм/мВ и скорость развертки по оси X 10 с/см

4. Перед входной щелью монохроматора расположить эталонную лампу ТРШ 2850–3000 № 127. Блок питания лампы включить через ЛАТР. Выходное напряжение на ЛАТРе выставить около 100 В. Включить блок питания и, вращая регулятор автотрансформатора, выставить по амперметру ток 7,2 А, напряжение на вольтметре должно показывать значение 5,7 В.

5. На блоке питания ФЭУ выставить ручкой «Высокое напряжение» в положение 600 В и включить тумблер «Высокое».

6. Одновременно нажать кнопку «пуск» на потенциометре и кнопку « $\langle \rangle$ » на блоке управления шаговым двигателем. При этом начнет записываться спектр излучения лампы. Во время записи на диаграммной бумаге отмечать значения длин волн через каждые 20 нм. При достижении длины волны 750 нм остановить шаговый двигатель кнопкой «0».

7. Вынуть бумагу с полученным спектром из потенциометра и привести кривую к единице в максимуме. Для этого значения по оси Φ для разных длин волн (через 20 нм) поделить на максимальное значение по оси Φ при длине волны λ_{\max} . Единицы измерения значений по ординате могут быть любые (в «клетках» диаграммной ленты или в миллиметрах, измеренных линейкой).

8. С помощью прил. 1 и 2 начертить зависимость излучения вольфрама от длины волны в диапазоне 400–750 нм. Полученную кривую привести к единице в точке с λ_{\max} (см. п. 7). Для этого значение $\eta_{\text{в}}$ необходимо поделить на $\eta_{\text{в0}}$ при длине волны λ_{\max} .

9. Вычислить спектральный поправочный коэффициент чувствительности установки. Для этого значения $\eta_{\text{вл}}$ из графика, полученного в п. 7, поделить на значения Φ_{λ} из п. 8. Построить график зависимости $\tilde{h}_{\lambda} = f(\lambda)$.

Рекомендуемая литература

1. Смолкин М. Н. Спектральная плотность силы излучения ламп накаливания / М. Н. Смолкин, А. М. Никитичева // Опτικο-мех. пром-сть. – 1974. – № 9. – С. 14.
2. Гуторов М. М. Сборник задач по основам светотехники / М. М. Гуторов. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 128 с.

Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОРОШКОВОГО СУЛЬФИДА ЦИНКА

Приборы и оборудование: монохроматор ДМР-23; фотоумножитель ФЭУ-100; генератор синусообразных сигналов; потенциометр самопишущий Н307/1.

Электролюминесценция (ЭЛ) – это свечение, которое возникает под действием внешнего электрического поля [1–5,7].

Люминесценция твердых тел под действием электрического поля была открыта в 1923 году О. В. Лосевым при изучении кристаллических детекторов из карбида кремния и Дестрио, обнаружившим в 1936 году, свечение сульфида цинка в жидком диэлектрике при приложении к нему переменного электрического поля.

Различают два вида электролюминесценции (ЭЛ) в полупроводниковых кристаллах [1–5].

1. ЭЛ, возникающую при прохождении сквозного тока в кристаллах. К такому виду ЭЛ относится, например, стационарная ЭЛ, возникающая при прохождении тока в прямом направлении через $p-n$ - переход.
2. ЭЛ, связанную с поляризационными явлениями в кристаллах, отделенных от электродов диэлектрическими прослойками (эффект Дестрио) [5].

К настоящему времени являются общепринятыми следующие представления о механизме ЭЛ. Под действием электрического поля заряды из объема кристалла отводятся на периферийные области. При снятии поля свободные носители возвращаются в объем и рекомбинируют с излучением света. Процесс люминесценции можно разделить на три этапа.

1. Возбуждение. Электрическое поле переводит электроны кристалла в возбужденное состояние, энергия которого отличается от основного приблизительно на ширину запрещенной зоны. Состояние возбуждения кристалла может представить собой не только увеличение числа свободных носителей заряда по сравнению с равновесной концентрацией или увеличение кинетической энергии носителей в зоне проводимости и в валентной зоне, но и возбужденное состояние примесей. Однако способы возбуждения примесей электрическим полем ничем не отличаются от способов создания неравновесных

носителей, хотя возбуждение примесей может и не сопровождаться увеличением проводимости.

2. Миграция энергии возбуждения. При электролюминесценции передача энергии по кристаллу до места, где происходит рекомбинация, может играть существенную роль. Это объясняется тем, что во многих случаях перенос энергии осуществляется свободными носителями, которые испытывают действие электрического поля. В наиболее общем случае надо учитывать не только дрейф свободных носителей, но и процессы их захвата, а также движение экситонов и резонансную передачу энергии.

3. Излучение. Процесс излучения при переходе в невозбужденное

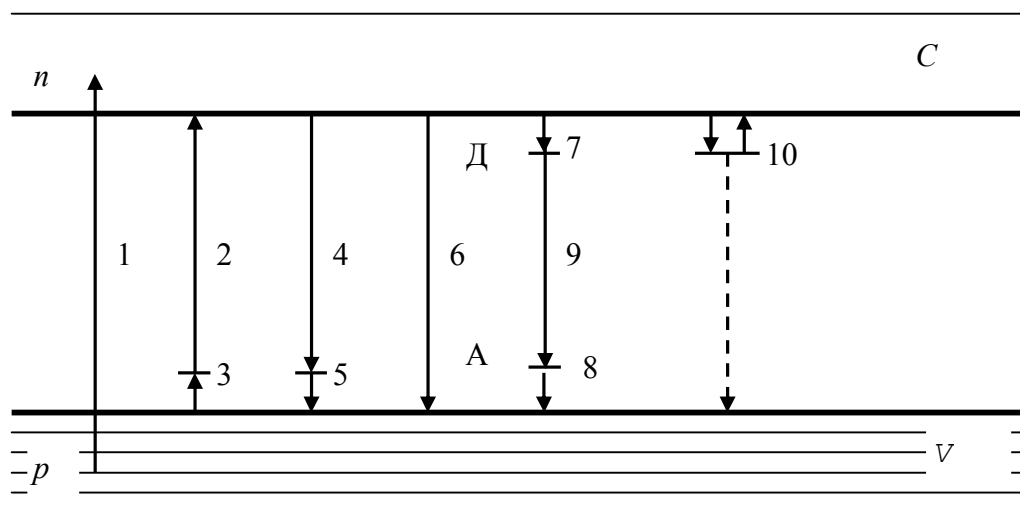


Рис. 1. Схема основных электронных переходов. C – зона проводимости, V – валентная зона [6]

состояние обычно происходит с участием дефектов кристалла. Наряду с такими переходами возможны также межзонные и внутризонные переходы.

Процессы, происходящие в полупроводниковых кристаллах, удобно описывать с помощью схемы энергетических состояний электронов в кристалле. На рис. 1 приведена модель энергетической схемы кристалла, являющегося диэлектриком или полупроводником.

Верхняя жирная линия соответствует дну зоны проводимости, нижняя потолку валентной зоны. Переход, отмеченный стрелками, направленными вверх, сопровождается поглощением энергии. При переходе 1 в зоне проводимости появляется электрон, а в валентной – уровень, не занятый электроном (дырка). Переход 2 описывает ионизацию примесей, имеющих локальный уровень в запрещенной зоне. Обратные переходы (рекомбинация электрона и дырки) сопровождаются выделением энергии в виде света и тепла. Подобные переходы (4–9) также могут происходить через уровни примеси или непосредственно из зоны в зону [5–7].

В результате длительного возбуждения кристалла в зоне проводимости устанавливается некоторая концентрация свободных электронов n , а в валентной полосе – дырок p . Скорость r межзонной рекомбинации электронов с дырками (переход 6) будет пропорциональна в этом случае как n , так и p (бимолекулярная

схема, если n пропорционально p). Скорость рекомбинации через примесные уровни определяется одной из составляющих двухступенчатого процесса (переходы 4 и 5 на рис.1). Число переходов типа 4 пропорционально как n , так и концентрация свободных уровней примеси, а число переходов 5 пропорционально p и концентрации электронов на уровнях примеси n_1 . Если $p=n+n_1$, $n \ll n_1$, то n_1 пропорциональна p , т.е. в этих условиях рекомбинация может осуществляться по квадратичному закону.

В некоторых случаях может оказаться, что концентрация носителей одного знака будет слабо зависеть от интенсивности возбуждения. Если, например, число неравновесных электронов мало по сравнению с общим числом электронов в полосе проводимости ($n=\text{const}$), то изменения скорости переходов типа 6 будут зависеть только от изменения величины p . То же получится, если концентрация уровней, через которые происходит рекомбинация, невелика и при повышении n они окажутся заполненными электронами. В этом случае скорость рекомбинации через примесные центры будет определяться переходами типа 5, число которых зависит от числа уровней примеси и p .

Многие люминофоры с точки зрения типа примесей являются компенсированными образцами, т.е. содержат почти в равных количествах как донорные так и акцепторные примеси. Электроны, поставляемые донорами (Д), располагаются в этом случае на более низких уровнях акцепторов (А). Поскольку доноры и акцепторы оказываются теперь заряженными, они могут объединиться во время приготовления люминофора в донорно-акцепторные пары и переходы, сопровождающиеся излучением, могут происходить внутри таких пар. Эффективной рекомбинации через донорно-акцепторные пары способствует то, что электроны из полосы проводимости с большей вероятностью захватываются положительно заряженными донорами, а дырки из валентной полосы – отрицательно заряженными акцепторами (переходы 7–9 на рис. 1).

В большинстве случаев в люминофорах присутствует несколько каналов рекомбинации через различные локальные уровни. При этом некоторые переходы могут происходить без излучения (рекомбинация через центры тушения). Если даже переходы с излучением света при низкой температуре преобладают, то при повышении температуры роль переходов без излучения обычно сильно возрастает. В наиболее простом случае причиной подобного температурного тушения люминесценции может быть заброс электронов из валентной полосы на уровни центров свечения (переход типа 3 на рис. 1), что приводит к уменьшению числа рекомбинаций на этих центрах и, следовательно, к увеличению потока рекомбинаций через центры тушения (внешнее тушение). Помимо этого, с повышением температуры возможно увеличение вероятности безызлучательных переходов внутри самого центра свечения (внутреннее тушение).

Механизм электролюминесценции порошкового фосфора при переменном напряжении питания описан в [2]. Представим этот механизм. Предполагается, что на краях кристаллика имеются барьеры, препятствующие проникновению

носителей в кристаллик и обратно (ток отсутствует). На люминофор подается прямоугольное напряжение. При его включении один из барьеров окажется смещенным в прямом, а другой (левый на рис. 2, б) – в обратном направлении. Электроны, поступающие в область сильного поля с поверхностных уровней или из другой фазы, ускоряются и производят ионизацию. Образовавшиеся дырки перемещаются влево, а электроны – вправо. Если данное включение было первым, то этот полупериод не сопровождается сильным излучением, так как в прианодных областях кристалла еще нет ионизованных центров свечения (излучение, происходящее одновременно с ионизацией у катода, имеет очень малую интенсивность). Если же ранее правый барьер уже был включен в запирающем направлении (как на рис. 2, в), то в случае б) происходит рекомбинация в правой части кристалла, откуда и исходит вспышка L_0 . Одновременно идет заполнение ловушек преимущественно в прианодной части кристалла (ловушек, расположенных как вблизи, так и на поверхности кристалла).

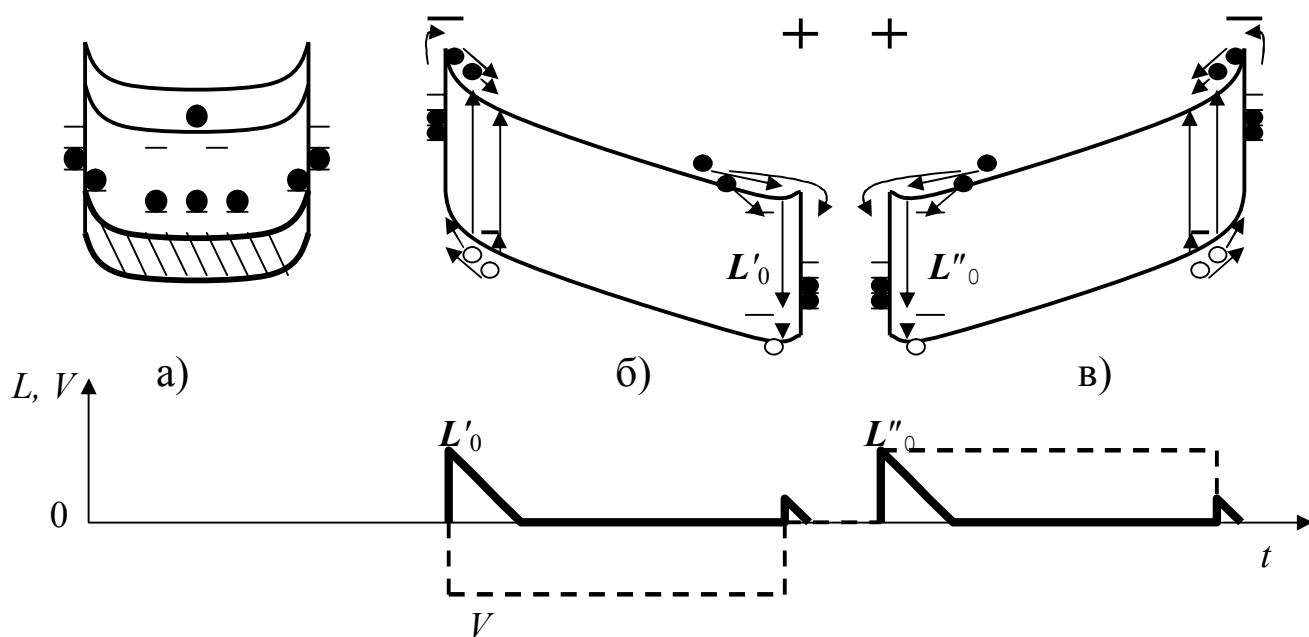


Рис. 2. Последовательность процессов ионизации и рекомбинации в кристалле с двумя барьерами, а — энергетическая схема кристалла в отсутствие внешнего напряжения; б — после включения напряжения; в — после изменения его полярности. Слои диэлектрика, отделяющие образец от электродов, на схеме не изображены. Внизу показана форма импульсов напряжения V и временное положение световых пиков L (t — время) [2]

После изменения направления поля (рис. 2, в) ионизация происходит справа, а основное свечение L_0 — слева. Часть электронов переходит на поверхностные уровни, восполняя убыль электронов, появившуюся в предыдущий полупериод. В этой схеме предполагается, что большинство освобожденных дырок имеют возможность вернуться к центрам свечения.

Небольшие световые пики, появляющиеся после выключения каждого импульса, могут быть связаны с возвращением к центрам свечения электронов, освобожденных теплом и перемещаемых полем поляризации, которое присутствует в промежутках между импульсами.

Форма световых пиков определяется временной зависимостью электронного тока от противоположного края кристалла и изменением со временем числа дырок на уровнях центров свечения. Поток электронов может состоять, очевидно, из электронов, как освобожденных полем из ловушек (малые напряжения), так и образовавшихся вследствие ионизации (более высокие напряжения). Тогда по мере роста напряжения в пределах фронта импульса в область скопления дырок устремятся сначала электроны, освобожденные из ловушек, а позже – преимущественно появившиеся вследствие ионизации. В веществах с большой концентрацией глубоких ловушек и большим сечением захвата электронов первые приходящие в область скопления дырок электроны будут захвачены ловушками, причем за короткое время импульса (менее *мс*) ловушки глубиной в несколько десятых электрон-вольт не будут освобождены теплом при комнатной температуре. Тогда основная часть рекомбинаций в левой части образца на рис. 2, в произойдет только после начала ионизации в правой части кристалла. Подобные условия рекомбинации осуществляются в обычных ZnS-люминофорах, что вытекает из ряда наблюдений [2].

На основе исследования частотной зависимости и переменной составляющей электролюминесценции фосфора авторами [8] предложен способ разделения сложных спектров свечения на элементарные полосы. Сложный спектр люминесценции состоит из полос свечения различных центров свечения. При этом спектры излучения накладываются друг на друга так, что нет возможности оптическими средствами выделить отдельные линии. Если линии в спектре излучения электролюминофора различаются временем затухания, то они будут иметь разную зависимость переменной составляющей свечения от частоты питающего напряжения. В основу метода легли отличия в скорости затухания излучения различных центров свечения. При повышении частоты питающего напряжения амплитуда переменной составляющей свечения центра с большим временем жизни падает быстрее, чем амплитуда переменной составляющей с меньшим временем. Это позволяет выделить свечение центра с малым временем жизни в возбужденном состоянии путем измерения амплитуды переменной составляющей при высоких частотах модуляции возбуждающего излучения.

В работе необходимо исследовать спектры электролюминесценции порошкового фосфора ЭЛ-515 (ZnS:Cu), который предположительно содержит два центра свечения меди, ответственные за излучение в зеленой и голубой областях спектра. Получить спектры свечения при различных частотах питающего напряжения.

Спектр измерить на установке, блок схема которой показана на рисунке 3. Образец, нанесенный на планарную гребенчатую структуру электродов (1), располагают перед входной щелью монохроматора МДР-23 (3). На структуру с люминофором подают переменное напряжение генератора (2). Напряжение

контролируется с помощью вольтметра. Световой поток, прошедший через монохроматор, регистрируется фотоумножителем (ФЭУ-100) (4), на который подается высокое напряжение от источника Б5-24 (5). Сигнал с ФЭУ поступает на усилитель постоянного тока (6) и записывается на потенциометре самопишущем НЗ07/1 (7). Длина волны света изменяется за счет поворота дифракционной решетки прибора, которая связана с шаговым двигателем спектральной установки (на рисунке не показан)

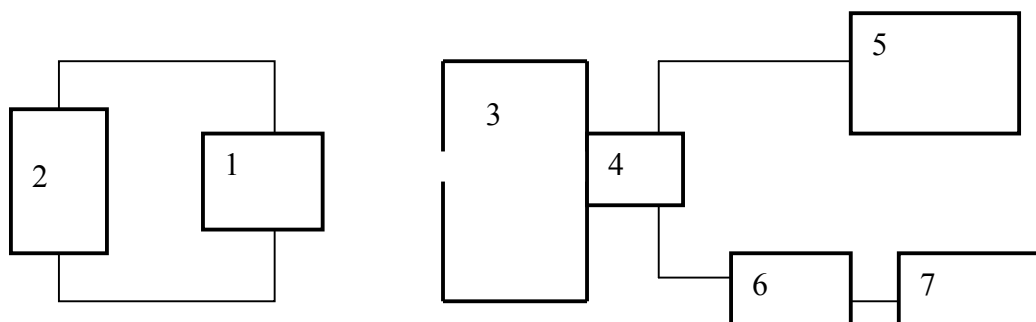


Рис. 3. Блок-схема установки

Порядок выполнения работы

Порошок люминофора нанести на подложку с гребёнчатыми электродами с использованием спирта и дать просохнуть образцу в течении 15 мин.

1. Включить в сеть источник тока Б5-24, усилитель постоянного тока, самопишущий потенциометр, блок управления шаговым двигателем и дать прогреться приборам в течение 10 мин.

2. На монохроматоре с помощью микровинта установить ширину входной и выходной щелей 0,03 мм. С помощью блока управления шаговым двигателем установить длину волны 400 нм. Скорость развертки установить в положение «100». Множитель «×4».

3. На потенциометре установить чувствительность по оси Y значение 10мм/мВ и скорость развертки по оси X 10 с/см.

4. Перед входной щелью монохроматора расположить образец с люминофором. Включить генератор (2), не подавая напряжение на образец выждать 10 минут. Выставить напряжение на генераторе 160 В. Вращая ручку частоты генератора, выставить минимальную частоту питающего напряжения, при которой начнет светиться люминофор.

5. На блоке питания ФЭУ включить тумблер «Высокое», выставить ручку «Высокое напряжение» в положение 800 В.

6. Одновременно нажать кнопку «пуск» на потенциометре и кнопку «>>» на блоке управления шаговым двигателем. При этом начнет записываться спектр излучения лампы. Во время записи на диаграммной бумаге отмечать значения длин волн через каждые 20 нм. При достижении длины волны 750 нм остановить шаговый двигатель кнопкой «0». Если на полученном графике высота пиков

мала, необходимо увеличить напряжение на ФЭУ или увеличить чувствительность потенциометра (переключить чувствительность по оси Y в положение 5 мВ/см).

7. Увеличить частоту питающего напряжения на генераторе в два раза и записать спектр люминесценции еще раз. Повторить измерения, увеличивая частоту питания в кратное число раз, пока свечение образца не станет визуально слабым.

8. Полученные спектры корректировать, используя поправочные множители из работы № 1.

9. Объяснить возможные причины различия в спектрах электролюминесценции при разных частотах. По максимуму спектров люминесценции определить глубину рекомбинационных центров в люминофоре. Предложить энергетическую диаграмму люминофора.

Рекомендуемая литература

1. Электролюминесцентные источники света / под ред. И. К. Верещагина. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 124 с.

2. *Верещагин И. К.* Электролюминесценция кристаллов / И. К. Верещагин. – М. : Наука, 1971. – 236 с.

3. *Хёниш Г.* Электролюминесценция / Г. Хёниш. – М. : Мир, 1964. – 455 с.

4. *Деркач В. П.* Электролюминесцентные устройства / В. П. Деркач, В. М. Корсунский. – Киев: Наук. думка, 1968. – 215 с.

5. Механизм анодной электролюминесценции пористого кремния в электролитах / Д. Н. Горячев, Л. В. Беляков, Г. Полисский, О. М. Сресель. – ФТП. 1998. – Т. 32, № 5. – С. 591 – 595.

6. *Фок М. В.* Введение в кинетику люминесценции кристаллов / М. В. Фок. – М. : Наука, 1964. – 283 с.

7. *Фок М. В.* Прикладная электролюминесценция / М. В. Фок. – М. : Совет. радио, 1974. – 414 с.

8. Метод разделения сложных спектров электролюминесценции / Б. Н. Денисов, В. А. Горюнов, В. И. Беглов, Е. М. Бибанина // Полупроводниковые и газоразрядные приборы. – 2003. – № 1. – С. 69–71

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОДИОДА

Приборы и оборудование: монохроматор ДМР-23; фотоумножитель ФЭУ-100; источник постоянного напряжения Б5-24; усилитель постоянного тока; потенциометр самопишущий НЗ07/1; генератор импульсов специальной формы; осциллограф.

Светоизлучающие диоды (СИД) были созданы и начали активно выпускаться и применяться с 60-х гг. прошлого века как индикаторные изделия для радиотехнической и электротехнической продукции [1–5]. Это были, можно

сказать, прародители поразившей всех «световой технологии XXI ве-ка» – современных светодиодов. Их характеристики соответствовали уровню технологии того времени.

Прорыв в технологии полупроводниковой и микроэлектронной техники, осуществленный в конце 1980-х гг., позволил резко повысить технический уровень СИД и заговорить о них как об источниках света будущего. Современный технологический уровень позволяет создавать полупроводниковые источники света, которые, по прогнозам полностью заменят современные осветительные приборы (как лампы накаливания, так и люминесцентные газоразрядные источники света).

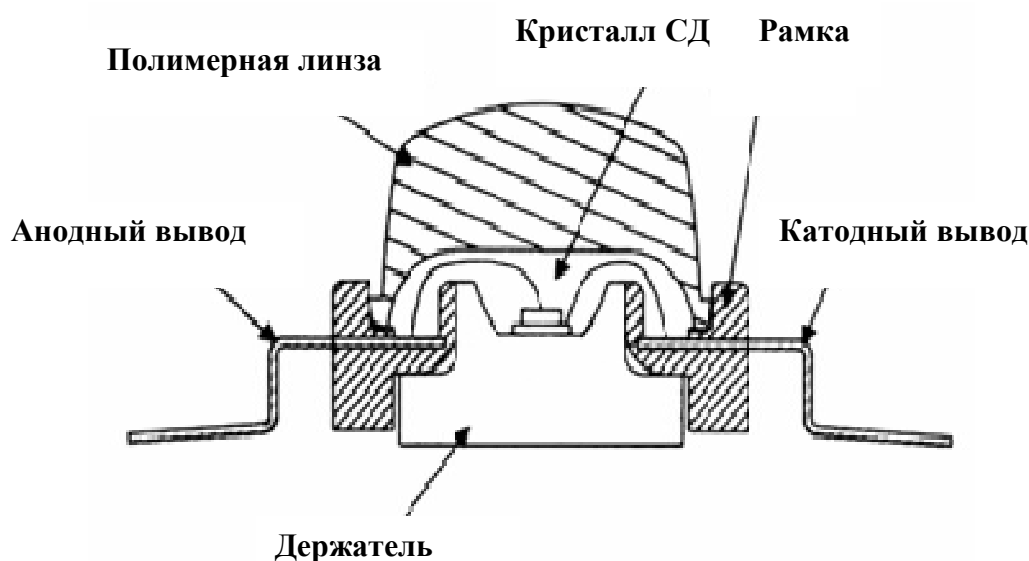


Рис. 1. Конструкция мощного светодиода [2]

Светодиод представляет собой полупроводниковый прибор с $p-n$ -переходом, работающий в прямом включении и преобразующий энергию электрического поля непосредственно в световое излучение. По сути, все светодиоды работают на использовании инжекционной электролюминесценции. Любой светодиод состоит из полупроводникового кристалла с $p-n$ -переходом на подложке, корпуса с контактными выводами и оптической системы (рис. 1). Свечение возникает в полупроводниковом кристалле под действием электрического поля в области $p-n$ -перехода при рекомбинации электронов и положительно заряженных дырок с испусканием фотона. Глубина залегания рекомбинационного центра, на котором в основном происходит излучательная рекомбинация, определяет цвет свечения светодиода. Для обеспечения максимальной эффективности светодиода в нужной спектральной области необходимо выполнить целый ряд условий [2–4].

Во-первых, ширина запрещенной зоны полупроводника в активной области диода должна быть близка к максимуму в спектре энергий квантов излучения. Во-вторых, вероятность излучательной рекомбинации электронно-дырочных пар должна быть велика. Для этого оптические переходы электронов

из зоны проводимости в валентную зону полупроводника должны происходить без изменения квазиимпульса, т. е. полупроводник должен быть прямозонным и иметь кристаллическую структуру, близкую к совершенной (содержать минимальное число дефектов, на которых происходит безызлучательная рекомбинация). Кроме этого, для получения значительного количества свободных носителей заряда в названной области полупроводника должен быть создан *p-n*-переход, т. е. проводимость под одним контактом должна быть дырочной, а под другим – электронной. Приконтактные слои полупроводника должны быть легированы соответственно акцепторными или донорными примесями. При включении напряжения на диод в прямом направлении дырки и электроны инжектируются с разных сторон в активную область.

В 70-х гг. XX века была открыта реальная возможность создания высокоэффективных светодиодов красного свечения на основе гетероструктур твердых растворов арсенида галлия-алюминия (GaAlAs) и светодиодов зеленого свечения из фосфида галлия, а также маломощных голубых светодиодов на основе карбида кремния. В начале 90-х гг. прошлого века было найдено технологическое решение создания высокоэффективных оранжевых светодиодов на основе гетероструктур из твердых растворов фосфидов галлия-индия-алюминия (AlGaInP). В конце 1993 г. две японские фирмы объявили об открытии сверхъярких синих светоизлучающих диодов на основе нитрида галлия (GaN). В таблице и на рис. 2 приведены спектральные характеристики рассматриваемых светодиодов.

Т а б л и ц а

**Длина волны, соответствующая максимуму в спектре излучения светодиодов,
и полуширина полосы излучения**

Полупроводниковое соединение	λ_{\max} , нм	$\Delta\lambda_{0,5}$, нм
GaAlAs	650	22,0
AlGaInP	639	19,0
AlGaInP	620	17,5
AlGaInP	594	16,0
InGaN	526	35
InGaN	470	25

Современный технологический уровень позволяет получать светодиоды, излучающие белый свет. Их изготовление осуществляется тремя способами. Первый заключается в том, что смешивается излучение красного, голубого и зеленого цветов по технологии RGB. При этом на одной матрице плотно размещаются три структуры – красные, голубые и зеленые светодиоды, излучение которых смешивается при помощи оптической системы, например линзы. В результате получается белый свет. Второй способ заключается в том, что на активную поверхность светодиода, изготовленного на основе широкозонного полупроводника и излучающего в ультрафиолетовом диапазоне, наносятся три люминофора, светящихся соответственно в голубой, зеленой и красной областях спектра. В третьем способе желто-зеленый или зеленый и

красный люминофор наносится на голубой светодиод так, что при смешивании излучений образуется белый или близкий к белому свет.

Рассмотрим светодиоды белого свечения на основе кристалла InGaN и люминофорного покрытия, которое содержит люмоиттриевый гранат с общей формулой $Y_{3-x}(Gd)_xAl_{5-y}Ga_yO_{12} : Ce^{3+}$. При этом замещение части ионов иттрия (Y^{3+}) на атомы гадолиния приводит к смещению максимума полосы люминесценции в длинноволновую сторону от 530 до 590 нм. Замещение атомов алюминия (Al) атомами галлия (Ga) позволяет управлять полосой поглощения люминофора в пределах от 475 до 445 нм. Зерна люминофора размером 1–2 мкм размещаются в прозрачном полимере. Часть голубого излучения кристалла поглощается люминофором, где и возбуждается широкая желто-зеленая полоса его люминесценции. На рис. 2 приведен спектр излучения, дающий белое свечение.

Преимущества светодиодов перед традиционными источниками света (люминесцентными лампами и лампами накаливания) заключаются в следующем [2–4]:

- электрический ток в светодиоде преобразуется непосредственно в световое излучение, и теоретически это можно сделать практически без потерь;
- предельное значение световой отдачи оценивается в 300 лм/Вт;
- светодиод при хорошем теплоотводе мало нагревается;
- светодиод излучает в узкой области спектра;
- в светодиодах, излучающих в видимой области спектра, отсутствует УФ- и ИК-излучение;
- светодиод механически прочен и исключительно надежен;
- срок службы его 100 тыс. ч, а по оценкам специалистов, он может достигать 500 тыс. ч;

светодиод – низковольтный прибор, а поэтому электробезопасный.

Однако следует очень внимательно подходить к сравнению значений этих параметров светоизлучающих диодов с аналогичными параметрами традиционных источников света.

Во-первых, свет, излучаемый диодом, является узконаправленным, в отличие от традиционных источников. Чтобы получить сопоставимые величины, требуется дополнительная оптика, что означает дополнительные потери. Во-вторых, при увеличении светового потока приборов встанет вопрос о системе охлаждения кристалла.

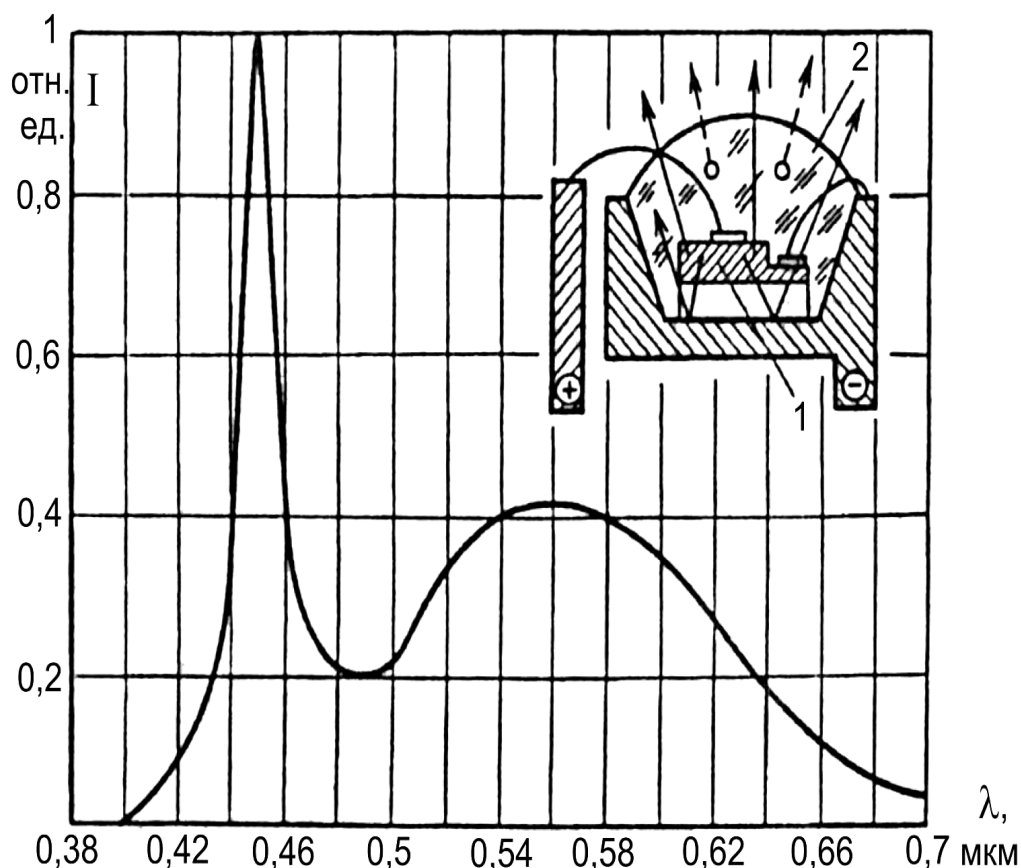


Рис. 2. Спектр излучения и устройство светодиода с белым свечением из InGaN с люминофором: 1 – кристалл InGaN; 2 – люминофор

Для повышения выхода излучательной рекомбинации в активной области поддерживают высокую концентрацию носителей. Это позволяют сделать двойные гетероструктуры (ДГС, ДН).

Двойная гетероструктура состоит из активного среднего слоя – области рекомбинации, ограниченной двумя барьерными слоями (эмиттерами). На рис. 3 показана схема двойной гетероструктуры. При подключении структуры в прямом направлении в активную область инжектируют электроны со стороны n -полупроводника и дырки со стороны полупроводника p -типа. Ширина запрещенной зоны барьерных слоев всегда значительно больше ширины запрещенной зоны активного слоя, что позволяет создать потенциальные ямы для неравновесных носителей заряда в активной области. Рекомбинируя, носители излучают фотоны. Резкие барьеры обладают значительным сопротивлением, что уменьшает эффективность диодов. Для уменьшения сопротивления барьерных переходов их, используя плавное легирование, делают плавным – градиентным (см. рис. 3 б).

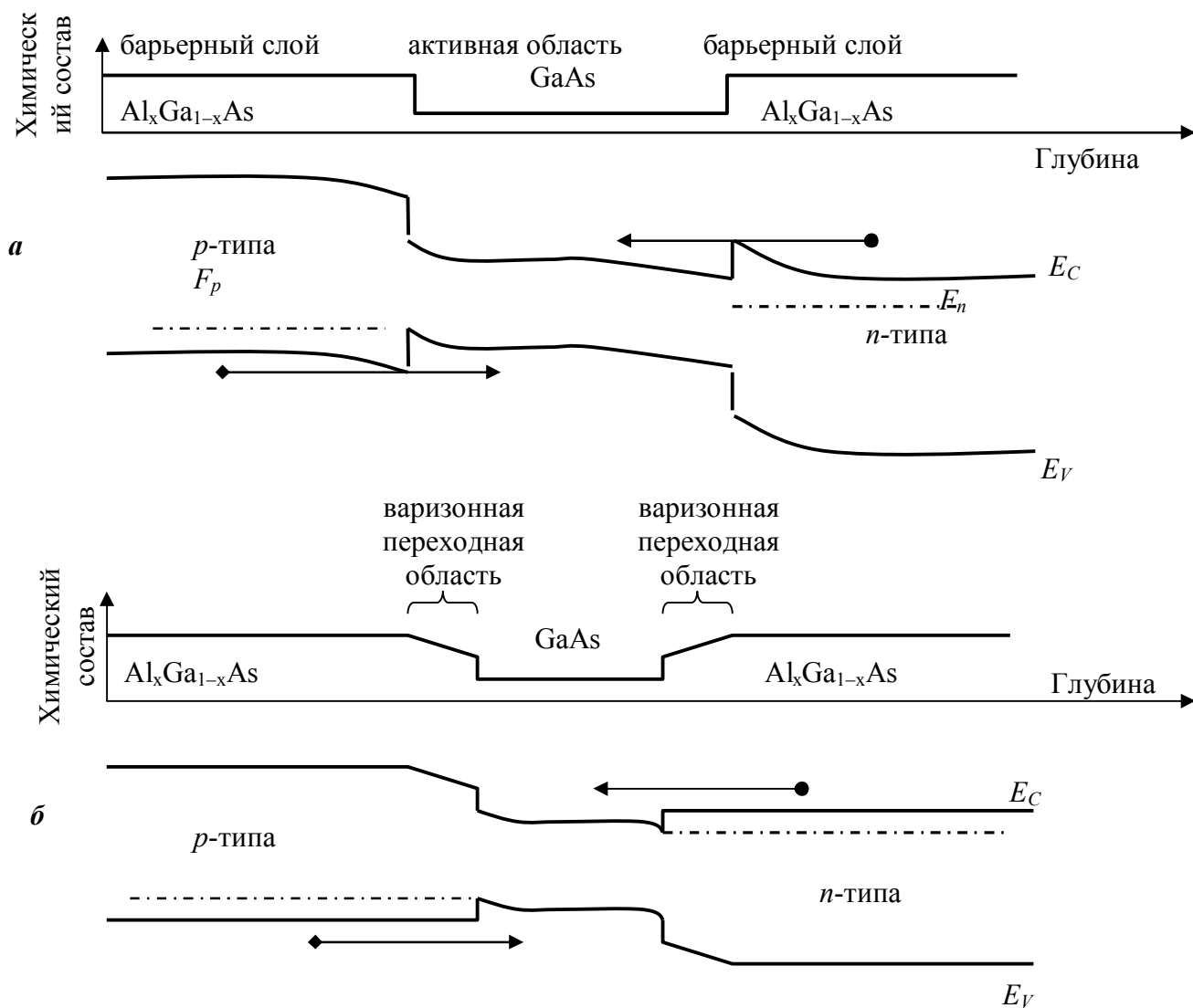


Рис. 3. Зонная диаграмма двойной гетероструктуры с резкими переходами (а) и градиентными переходами (б) [1]

Затухание люминесценции

Уменьшение количества носителей в полупроводниках может быть определено по затуханию люминесценции после короткого импульса [1, 5, 6]

Интенсивность люминесценции пропорциональна скорости рекомбинации. Вычислить последнюю при низком и высоком уровне возбуждения соответственно можно с помощью следующих выражений:

$$R = -\frac{dn}{dt} = -\frac{\Delta n_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

$$R = -\frac{dn}{dt} = \frac{-B}{\left(Bt + \Delta n_0^{-1}\right)^2}. \quad (2)$$

На рис. 4 схематично показан спад люминесценции после возбуждения коротким оптическим импульсом. При низком уровне возбуждения люминесценция уменьшается по экспоненциальному закону с постоянной

времени τ . В случае высокого уровня возбуждения затухание люминесценции носит неэкспоненциальный характер. В большинстве случаев постоянные времена растут со временем. При этом спад люминесценции более медленный, чем экспоненциальный.

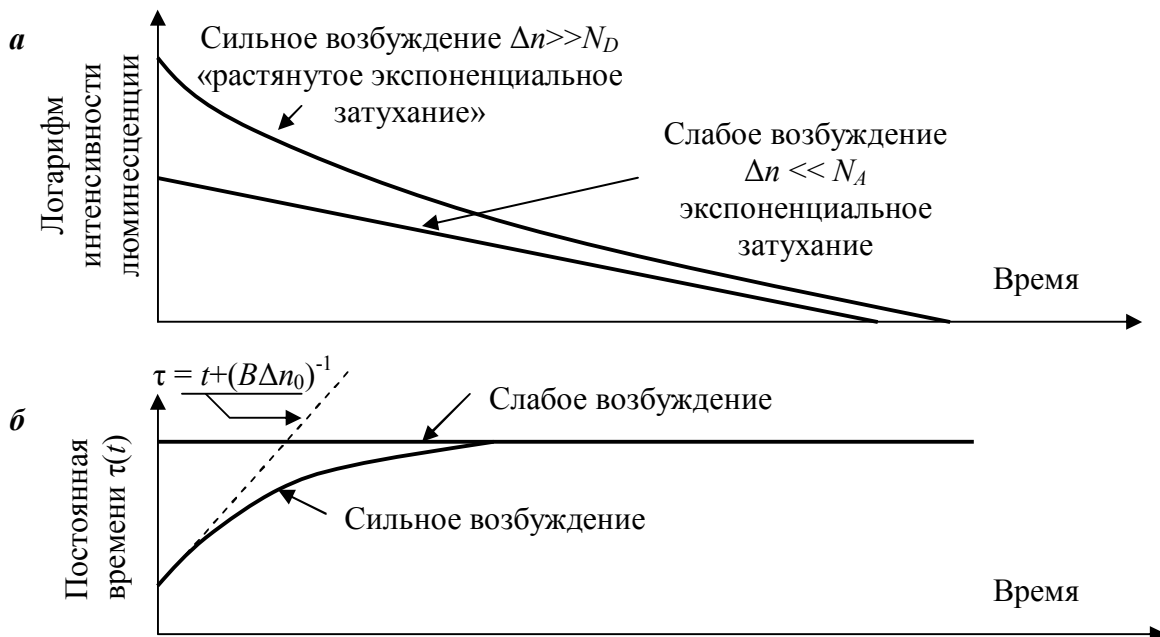


Рис. 4. Затухание люминесценции в случае низкого и высокого уровня возбуждения (а); постоянные времена в случае низкого и высокого уровня возбуждения (б) [1]

Самое распространенное выражение для экспоненциальной функции имеет вид:

$$R \approx \exp \left\{ \left(- \frac{t}{\tau(t)} \right)^\beta \right\},$$

где β – параметр, характеризующий степень упорядоченности кристаллических решеток излучающих материалов. При $\beta = 1$ в кристаллической решетке не наблюдается никаких нарушений, при $\beta \approx 1/2$ – материал обладает сильно неупорядоченной структурой (стекло и неупорядоченные полупроводники) [1].

Параметры динамических процессов рекомбинации носителей в светодиодах определяют их быстродействие, т. е. время их включения и выключения (скорость модуляции). Скорость переключения светодиодов, используемых в системах связи, ограничивается временем жизни неосновных носителей, которое может быть уменьшено либо повышением степени легирования активной области, либо увеличением в ней концентрации инжектированных носителей. Для получения высоких концентраций носителей и, следовательно, снижения времени их жизни используются гетероструктуры, удерживающие свободные носители в узких квантовых ямах.

Спектр измерить на установке, блок схема которой показана на рис. 5. Светодиод (1) располагают перед входной щелью монохроматора МДР – 23 (3). На него подают напряжение от источника постоянного тока (или генератора прямоугольных импульсов) (2). Световой поток, прошедший через монохроматор, регистрируется фотоумножителем (ФЭУ–100) (4), на который подается высокое напряжение от источника напряжения Б5–24 (5). Сигнал с ФЭУ поступает на усилитель постоянного тока (6) и записывается на потенциометре самопишущем Н307/1 (7). Длина волны света изменяется за счет поворота дифракционной решетки прибора, которая связана с шаговым двигателем спектральной установки (на рисунке не показан). При исследования кинетических характеристик диода сигнал с ФЭУ подается на осциллограф С1–69 (8).

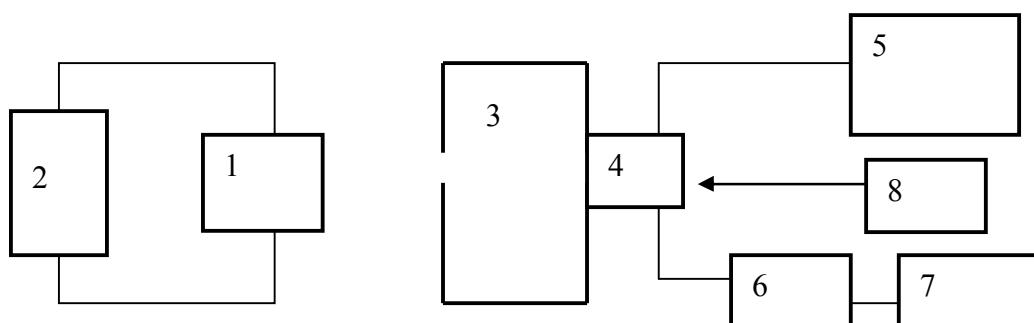


Рис. 5. Блок-схема установки

Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть источник тока Б5–24, усилитель постоянного тока, самопишущий потенциометр, блок управления шаговым двигателем и дать прогреться приборам в течение 10 мин.

2. На монохроматоре с помощью микровинта установить ширину входной и выходной щелей 0,03 мм. С помощью блока управления шаговым двигателем установить длину волны 400 нм. Скорость развертки установить в положение «100». Множитель «×4».

3. На потенциометре установить чувствительность по оси Y значение 10 мм/мВ и скорость развёртки по оси X 10 с/см

4. Перед входной щелью монохроматора расположить светодиод. От источника постоянного тока Б5–50 подать на него напряжение 3В.

5. На блоке питания ФЭУ включить тумблер «Высокое», выставить ручку «Высокое напряжение» в положение 600 В. Одновременно нажать кнопку «пуск» на потенциометре и кнопку «>» на блоке управления шаговым двигателем. При этом начнет записываться спектр излучения светодиода. Во время записи на диаграммной бумаге отмечать значения длин волн через каждые 20 нм. При достижении длины волны 750 нм остановить шаговый двигатель кнопкой «0». Если на полученном графике высота пиков мала, необходимо

увеличить напряжение на ФЭУ или увеличить чувствительность потенциометра (переключить чувствительность по оси Y в положение 5 мВ/см). После записи спектра выключить усилитель постоянного тока, самопишущий потенциометр и питание диода.

7. Исправить спектр излучения диода и определить по максимуму глубину залегания рекомбинационного центра люминофора и ширину запрещенной зоны полупроводника активной области светодиода.

8. Подключить светодиод к генератору импульсов. Подать прямоугольные импульсы напряжения на образец. Амплитуда напряжения не должна превышать значение 2,5–3 В. Подключить вывод ФЭУ к входу осциллографа. Чувствительность осциллографа сделать максимальной. С помощью шагового двигателя выставить на монохроматоре длину волны одного из максимумов.

9. С помощью ручек «стабилизации», «развертки» и «чувствительности» добиться на экране осциллографа четкого изображения кинетической кривой. Сфотографировать кривые разгорания и затухания люминесценции. По фотографиям построить кривые зависимости фототока от времени в полулогарифмическом и двойном логарифмическом масштабах. Определить закон затухания и разгорания люминесценции. Вычислить постоянную времени затухания.

10. С помощью монохроматора вывести следующий максимум спектральной кривой и повторить действия пункта 9.

Рекомендуемая литература

1. *Шуберт Ф. Е.* Светодиоды / Ф. Е. Шуберт. – М. : Физматлит, 2008. – 496 с.
2. *Юнович А. Э.* Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его твердых растворов / А. Э. Юнович // Светотехника. – 1996. – № 5–6. – С. 2–7.
3. *Юнович А. Э.* FAQ про LED / А. Э. Юнович // Цоколь. – 2004. – № 1. – С. 56–66; № 2. – С. 60–67.
4. *Юнович А. Э.* Светодиоды как основа освещения будущего / А. Э. Юнович // Светотехника. – 2003. – № 3. – С. 2–7.
5. *Девятых Э. В.* Люминесценция кристаллов и ее применение / Э. В. Девятых, В. А. Горюнов, В. Я. Гришаев. – Саранск : Изд-во Морд. ун-та, 2009. – 176 с.
6. *Верещагин И.К.* Электролюминесценция кристаллов / И. К. Верещагин. – М. : Наука, 1971. – 236 с.

Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ $n-n^+$ -ТИПА

Приборы и принадлежности: спектрофотометр СФ-16; лампа накаливания; источник постоянного тока для лампы накаливания; генератор синусоидальных сигналов ГЗ-7А, ГЗ-104; милливольтметр ВЗ-38А; магазин шунтирующих сопротивлений.

Для оценки качества при разработке датчиков оптического излучения важно определить влияние тех или иных параметров полупроводникового прибора на качество его работы. Поэтому ставится вопрос об умении оценить необходимые параметры фотоприемника с требуемой точностью. Набор параметров и точность измерения зависят от характера задач, для решения которых предназначен конкретный фотоприемник.

При создании полупроводниковых приборов наряду с $p-n$ -переходом широко используются структуры $n-n^+$, $p-p^+$, $p-i-n$ -типов. Переходы первых двух типов используются при создании приборов на базе широкозонных полупроводников, например на основе большинства соединений $A^{II}B^{VI}$. Высокоомную n -область (p -область) в таких структурах часто получают методом компенсации. При создании области с низкой проводимостью необходимо контролировать ее размеры и степень компенсации (величину проводимости этого участка полупроводника).

На рисунке 1а показана структура $n-n^+$ типа, изготовленная методом компенсации низкоомного n^+ -полупроводника акцепторной примесью (d – толщина высокоомной области). На n -область нанесен полупрозрачный контакт, через который она освещается. На рисунке 1б представлена эквивалентная схема структуры.

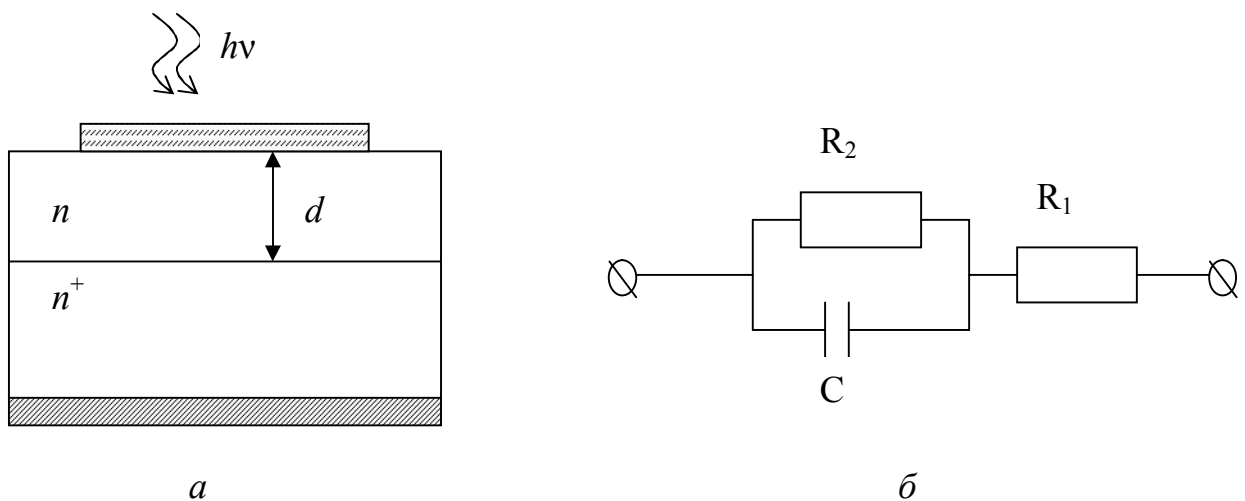


Рис. 1. Структура фотоприемника (а) и его эквивалентная схема (б)

Задача работы состоит в том, чтобы определить размеры высокоомной n -области по зависимости тока от частоты питающего напряжения. Если образец освещать светом так, что направление освещения совпадает с направлением напряженности электрического поля (продольная фотопроводимость), то толщина высокоомной области и ее проводимость изменяются в зависимости от интенсивности светового пучка и длины волны света. Это связано с тем, что при поглощении света генерируются свободные носители заряда. Концентрация их увеличивается. Избыточная концентрация неравновесных носителей приводит к увеличению проводимости на величину [1]

$$\Delta\sigma = e(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p).$$

Если освещать прибор светом из области собственного поглощения, то он поглотится в тонком приповерхностном слое толщиной несколько микрон [1]. Именно в этом слое и повысится проводимость полупроводника. Незасвеченная часть останется высокоомной. Глубина проникновения света в полупроводник изменится при изменении длины волны света. Значит, будет изменяться и глубина модуляции проводимости.

Таким образом, освещение изменяет параметры полупроводниковой структуры. Проследить за изменением толщины n -области можно с использованием простых расчетов с использованием эквивалентной схемы предложенной структуры. Показанный метод может быть использован для определения эффективной глубины поглощения света с разной длиной волны в продольном режиме работы полупроводниковой структуры.

Общее сопротивление образца в соответствии с эквивалентной схемой описывается уравнением

$$Z = R_1 + \left(\omega C + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} = R_1 + \frac{R_2}{1 + \omega C R_2} \quad (1)$$

При малых частотах $\omega \rightarrow 0$, имеем

$$Z_0 = R_1 + R_2.$$

При $\omega \rightarrow \infty$ сопротивление $Z_\infty \approx R_1$.

В случае, когда $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$, емкость не вносит существенного вклада в зависимость импеданса образца от частоты питающего напряжения. Поэтому на участках, когда Z не зависит от ω , можно определить величины сопротивлений R_1 и R_2 эквивалентной схемы с использованием закона Ома для участка цепи:

$$Z_\infty = \frac{U}{I_{\text{нас.max}}} = R_1,$$

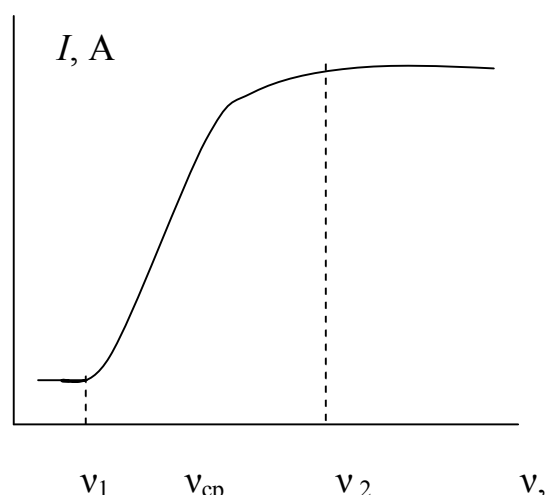


Рис. 2. Зависимость тока от частоты приложенного напряжения

$$Z_0 = \frac{U}{I_{\text{нас. min}}} = R_1 + R_2.$$

Отсюда $R_2 = Z_0 - Z_\infty$

На графике зависимость тока от частоты питающего напряжения имеет примерный вид, показанный на рис. 2. Данную зависимость измеряют при постоянном эффективном значении переменного напряжения, подаваемого на образец. Значение сопротивления R_1 определяют при высоких частотах, когда импеданс не зависит от частоты (при ν_2 или более). Суммарное значение сопротивлений R_1 и R_2 определяется при низкой частоте ν_1 , когда ток минимален и не меняется с частотой питающего напряжения ввиду того, что емкостную составляющую импеданса при низкой частоте можно принять за бесконечность.

Величину емкости C определяют с использованием формулы (1), рассчитывая значение сопротивления Z_{cp} в точке, соответствующей середине линейного участка на кривой зависимости тока от частоты питающего напряжения (при частоте ν_{cp}):

$$C = \frac{R_1 + R_2 - Z_{\text{cp}}}{\omega_{\text{cp}} R_2 (Z_{\text{cp}} - R_1)}. \quad (2)$$

Используя формулу плоского конденсатора, можно определить примерную толщину высокоомной области по формуле

$$d = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{C}. \quad (3)$$

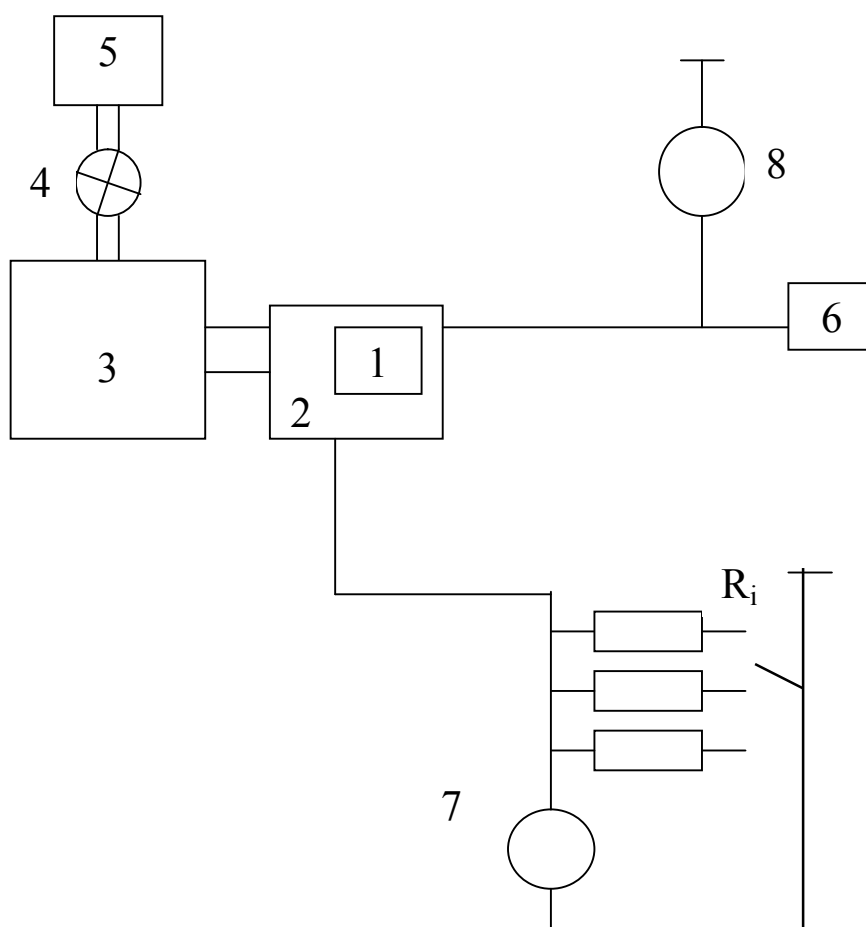
Понятно, что для оценки толщины высокоомной области структуры необходимо знать величину относительной диэлектрической проницаемости материала ϵ .

Работа выполняется на установке, блок-схема которой показана на рис. 3. Образец (1) помещается в светоизолирующую ячейку (2), расположенную перед выходной щелью монохроматора СФ-16 (3). Питающее напряжение на образец подается с генератора (6). Величина напряжения контролируется милливольтметром ВЗ-38 (8). Сила тока через образец измеряется по падению напряжения на одном из сопротивлений R_i . Падение напряжения измеряется милливольтметром ВЗ-38А. Установка предусматривает возможность освещать образец светом различной длины волны. В качестве источника света применяется лампа накаливания (4), которая питается от источника постоянного тока (5). Длина волны света, подаваемого на образец, изменяется с помощью спектрофотометра СФ-16.

В работе изучается фоточувствительная структура, которая работает в продольном режиме фотопроводимости. Свет падает на образец так, как показано на рис. 1. Контакт к n -области является полупрозрачным. Освещение приводит к модуляции светом высокоомной n -области структуры и изменению ее толщины.

Для определения эффективной глубины поглощения света сначала определяют толщину высокоомной области в темноте. Потом подобные

измерения проводят при освещении. Длину волны света выводят и помощью спектрофотометра. Она соответствует максимальной чувствительности фотоприемника.



Ри. 3. Блок- схема установки.

Для определения длины волны, соответствующей максимуму фототока необходимо измерить спектральную зависимость фототока. Поэтому прежде чем приступить к частотным измерениям, необходимо определить по спектру фототока длину волны, при которой ток максимален.

Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть генератор синусоидального напряжения и милливольтметры (7), (8). Дать приборам прогреться в течение 10 мин.
2. Включить на передней панели генератора тумблер «генератор» и установить значение выходного напряжения 3 В по милливольтметру (8).
3. Включить лампу накаливания и, изменяя длину волны света от 400 до 600 нм, записать значения фототока. Нарисовать график зависимости фототока

от длины волны света и определить λ_{\max} . Выключить лампу и выдержать образец в темноте в течение 5 минут.

4. Изменяя на генераторе частоту выходного напряжения от 20 Гц до 10 МГц, измерить значение тока через структуру. Напряжение на выходе генератора поддерживать неизменным – 3 В.

5. Включить лампу накаливания и выставить длину волны, равную λ_{\max} . Повторить измерения п. 4 при освещении.

6. По полученным данным построить графики зависимости тока от частоты питающего напряжения в темноте и при освещении. Используя экспериментальный график, определить значения R_1 , R_2 и C . По формуле плоского конденсатора оценить толщину высокоомной n -области в отсутствие света и при освещении.

7. Сравнивая полученное значение с толщиной n -области без освещения, определить эффективную глубину проникновения света в полупроводник.

Рекомендуемая литература

1. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел / Р. Бьюб. – М. : Иностран. лит., 1962. – 420 с.

Лабораторная работа № 5 ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОТОРЕЗИСТОРА С ИНЖЕКЦИОННЫМ УСИЛЕНИЕМ ФОТОТОКА НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СУЛЬФИДА КАДМИЯ

Приборы и принадлежности: спектрофотометр СФ-16; лампа накаливания; источник постоянного тока для лампы Б5–50; усилитель постоянного тока У2–8; вольтметр М-106.

При освещении полупроводника происходит процесс внутренней ионизации под действием света. Он приводит к образованию дополнительных носителей заряда, которые называются неравновесными, в отличие от носителей заряда, которые появляются в результате термической генерации и находятся в термодинамическом равновесии с решеткой. Эффект появления дополнительных неравновесных носителей заряда называется внутренним фотоэффектом, а добавочную к термически генерированным носителям проводимость называют фотопроводимостью.

Появление неравновесных носителей при поглощении света веществом происходит в результате электронных переходов. На рис. 1 представлена схема электронных переходов, возникающих в полупроводнике при поглощении света. Переход типа 1 соответствует собственному поглощению вещества. При

поглощении кванта света образуется пара свободных носителей – электрон и дырка. Такое возбуждение называется биполярным.

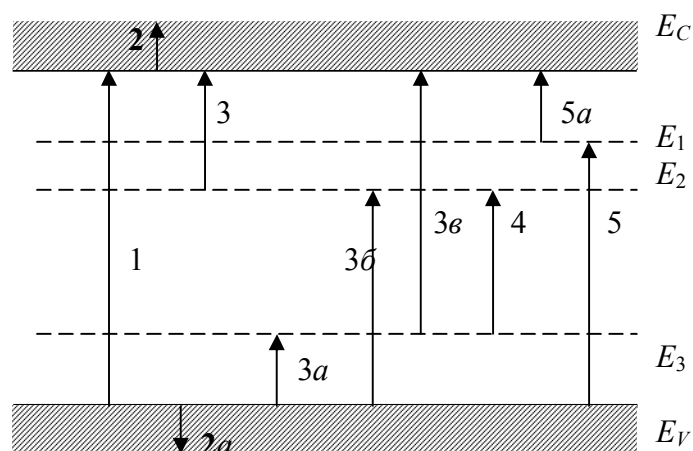


Рис. 1. Схема электронных переходов, возникающих в полупроводнике при поглощении света E_C – дно зоны проводимости; E_V – потолок валентной зоны; $E_{1,2,3}$ – примесные уровни; 1 – собственное поглощение; 2, 2a – поглощение свободными носителями; 3, 3a – примесное поглощение (примесь – ближняя зона); 3б, 3в – примесное поглощение (примесь – дальняя зона); 4 – межпримесное поглощение; 5 – экситонное поглощение (оптическое возбуждение экситона); 5a – экситонное поглощение (оптический распад экситонов)

В результате поглощения фотонов локальными несовершенствами кристаллической решетки, которые обеспечивают промежуточные примесные уровни разрешенных энергетических состояний электрона в запрещенной зоне, происходят переходы типа 3 и 4. Переходы электронов с примесного уровня в зону проводимости или из валентной зоны на примесный уровень обеспечивают примесное возбуждение. Свободными оказываются лишь носители одного знака. Энергия поглощенного кванта света соответствует энергии перехода. Для собственного поглощения энергия фотона $h\nu$ должна быть не меньше ширины запрещенной зоны полупроводника E_g :

$$h\nu \geq \Delta E = E_g. \quad (1)$$

Возбужденные светом избыточные электроны и дырки остаются свободными в зоне проводимости и в валентной зоне до тех пор, пока не рекомбинируют или не будут захвачены на локальный энергетический уровень.

При поглощении фотона электронно-дырочная пара получает избыточную энергию и квазиимпульс. Равновесное распределение фотоносителей по энергиям и квазиимпульсам устанавливается за время, меньшее времени нахождения в соответствующих зонах. Поэтому они успевают "термализоваться", т.е. распределение их по энергиям и квазиимпульсам становится таким же, как для равновесных электронов и дырок.

Полная проводимость полупроводника

$$\sigma = q (\mu_n n_0 + \mu_p p_0 + \mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p), \quad (2)$$

где n_0, p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок, $\Delta n, \Delta p$ – их неравновесные концентрации.

Проводимость, появляющаяся в результате действия оптического излучения,

$$\sigma_\phi = q(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p). \quad (3)$$

Спектральная зависимость фотопроводимости

При $h\nu \geq E_g$ концентрация неравновесных носителей пропорциональна скорости оптической генерации $G = \Delta n/\tau$:

$$G = \eta(\lambda) N_\phi, \quad (4)$$

где $N_\phi = J_\phi/h\nu$ – поток фотонов, проникающих через поверхность полупроводника, $\text{см}^2\text{с}^{-1}$, J_ϕ – интенсивность света, $\eta(\lambda)$ – квантовый выход, – это число электронно-дырочных пар, образованных одним квантом света. Интенсивность излучения спадает в глубь полупроводника по закону Бугера – Ламберта:

$$N_\phi(x) = N_{\phi 0} \exp(-\alpha(\lambda)x), \quad (5)$$

где $\alpha(\lambda)$ – коэффициент поглощения, характерный для каждого вещества и зависящий от длины волны; x – толщина слоя, через который прошел свет.

С учетом отражения от поверхности

$$N_\phi = N_{\phi 0} [1 - r(\lambda)] \exp(-\alpha(\lambda)x), \quad (6)$$

где $r(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения; $N_{\phi 0}$ – поток фотонов, падающих на поверхность полупроводника.

Полагаем, что фоторезистор достаточно длинный и в нем поглощается практически весь свет $N_{\phi 0}[1 - r(\lambda)]$, падающий на освещенную поверхность. Объемная скорость генерации носителей тока в плоскости, находящейся на расстоянии x от освещаемой поверхности полупроводника, определяется уравнением

$$G(x) = \eta(\lambda)[1 - r(\lambda)]N_{\phi 0} \exp(-\alpha(\lambda)x). \quad (7)$$

Квантовый выход фотоионизации $\eta(\lambda)$ учитывает, что часть энергии поглощенных фотонов расходуется без образования неравновесных электронов и дырок.

Под действием напряжения V , приложенного к фоторезистору, созданные светом носители заряда совершают дрейф и создают в цепи ток, который называется фототоком, – I_ϕ . Каждый носитель заряда за время жизни τ проходит через фоторезистор $\tau/t_{\text{пр}}$ раз, где $t_{\text{пр}}$ – время пролета или время дрейфа носителя через резистор.

$$t_{\text{пр}} = \frac{L}{V_{\text{др}}} = \frac{L}{\mu E} = \frac{L^2}{\mu V}, \quad (8)$$

где L – длина чувствительного элемента; $V_{\text{др}}$ – скорость дрейфа, μ – подвижность носителей; E – напряженность электрического поля в фоторезисторе; V – разность потенциалов на резисторе.

Сила фототока $I_{\text{ф}}$ равна произведению числа носителей ежесекундно генерируемых в полупроводнике под действием света G , заряда электрона и отношения $\tau/t_{\text{пр}}$:

$$I_{\text{ф}} = \ell G \frac{\tau}{t_{\text{пр}}} = \ell G \tau \frac{\mu V}{L^2}. \quad (9)$$

Генерация, происходящая в единице объема за единицу времени, характеризуется соответствующим темпом генерации $G = \Delta n/\tau$. Понятно, что $G\tau = \Delta n$ – концентрация неравновесных носителей в фотоприёмнике.

Выражение (9) можно переписать в следующем виде:

$$I_{\text{ф}} = \frac{\ell N_{\text{ф}} \eta(\lambda) \tau \mu V}{L^2} = \eta(\lambda) \frac{N_{\text{ф}0} \ell \tau \mu V}{L^2} [1 - r(\lambda)],$$

где – $N_{\text{ф}0} = J_{\text{ф}0}/h\nu$ число фотонов, падающих на поверхность фоторезистора.

Отношение

$$\frac{I_{\text{ф}}}{J_{\text{ф}0}} = \frac{\ell [1 - r(\lambda)]}{hcL^2} \eta(\lambda) \lambda \tau \mu V$$

характеризует *чувствительность фоторезистора*, которая сложным образом зависит от длины волны λ падающего излучения $J_{\text{ф}0}$, приложенного к фотопроводнику напряжению V , времени жизни неравновесных носителей τ , их подвижности μ и обратно пропорциональна квадрату длины чувствительного элемента.

Зависимость фотопроводимости от энергии падающего излучения носит название спектральной зависимости собственной фотопроводимости.

Монополярная инжекция. При больших полях, приложенных к полупроводнику, ток через него определяется его дрейфовой составляющей. В случае, когда ток обусловлен носителями одного знака, его называют током монополярной инжекции. Если носители разного знака вносят сравнимый вклад в ток, тогда говорят о токах двойной инжекции. В сульфиде кадмия ток электронный преобладает над дырочным, поэтому мы рассмотрим зависимость тока от напряжения при монополярной инжекции. При инжекции большого количества электронов в высокоомный полупроводник генерируется поле. Его величина определяется из уравнения Пуассона (для одномерного случая):

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\ell n}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (10)$$

Здесь ℓn – заряд, образованный инжектированными электронами; ℓ – заряд электрона; n – концентрация инжектированных электронов; ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; E – напряженность электрического поля в кристалле.

Величину заряда определим из плотности электронного тока в дрейфовом приближении $j = \ell n \mu_n E$; $\ell n = \frac{j}{\mu_n E}$, (μ_n – подвижность электронов) тогда уравнение (10) запишем в виде:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{j}{E \mu_n \varepsilon \varepsilon_0}.$$

Решая данное дифференциальное уравнение относительно E получим:

$$E = \left(\frac{2j}{\mu_n \varepsilon \varepsilon_0} \right)^{1/2} x^2.$$

Зная распределение поля по координате x , найдем падение напряжения:

$$V = \int_0^W E dx = \left(\frac{2j}{\mu_n \varepsilon \varepsilon_0} \right)^{1/2} W \int_0^W x^2 dx = \left(\frac{2j}{\mu_n \varepsilon \varepsilon_0} \right)^{1/2} \frac{2}{3} W^3.$$

Отсюда плотность тока

$$j = \frac{9}{8} \varepsilon \varepsilon_0 \mu_n \frac{V^2}{W^3}. \quad (11)$$

Последнее соотношение определяет зависимость тока от напряжения при монополярной инжекции. Ток пропорционален квадрату приложенного напряжения.

Инжекционные фоторезисторы работают эффективно в продольном режиме работы. Это связано с тем, что инжекционный ток сильно зависит от толщины высокоомной области полупроводника W (11). При продольном режиме работы свет, проникая в приповерхностную область, генерирует в этой части полупроводника неравновесные носители тока, таким образом, часть высокоомной области модулируется светом. Поле на высокоомной части резистора увеличивается, что приводит к увеличению инжекции носителей тока в полупроводник.

Исследования фотоэлектрических свойств монокристалла сульфида кадмия будем проводить на установке, блок схема которой показана на рис. 2. В работе необходимо измерить вольтамперные характеристики (ВАХ) образца при постоянном смещении в темноте и при освещении светом разной длины волны и зависимости фототока от длины волны света.

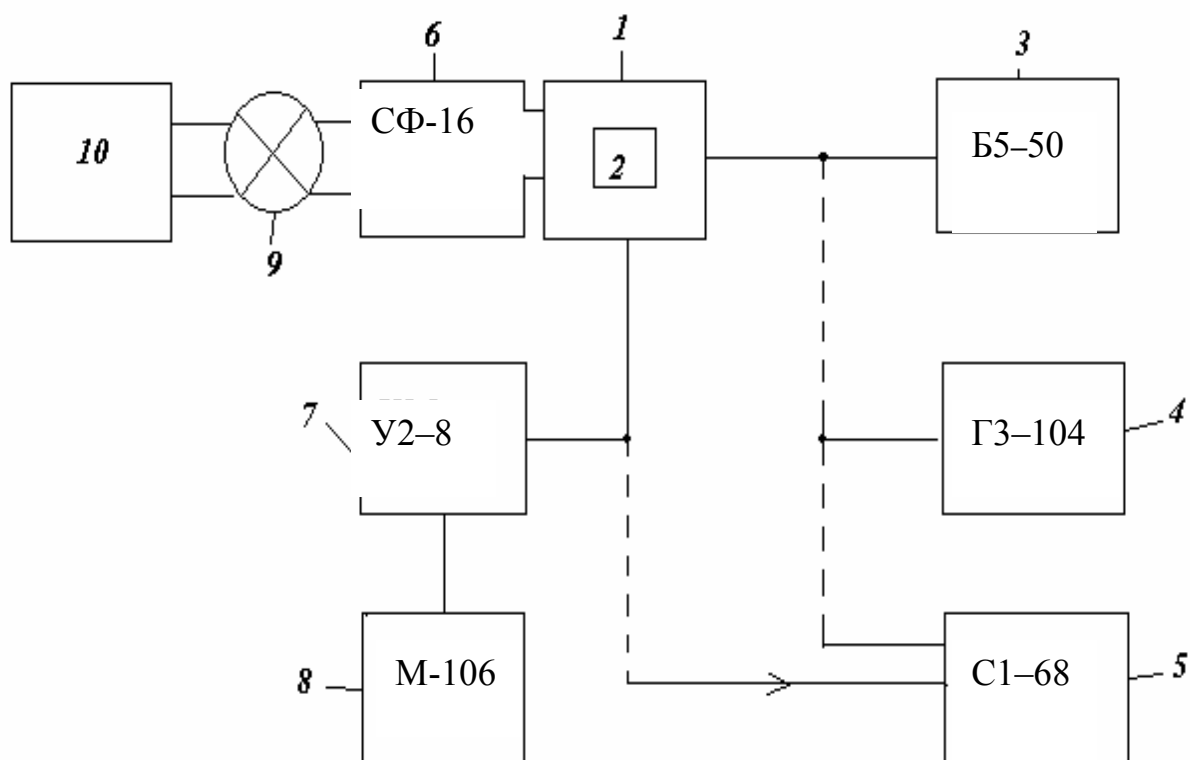


Рис. 2. Блок-схема установки

Измерения проводим в продольном режиме работы фотопроводника, т.е. когда направление светового потока, падающего на образец, было параллельно направлению поля, приложенного к кристаллу. В качестве образца служил монокристалл CdS. На основания кристалла была нанесена механическим путем индий-галиевая паста.

Образец (2) помещен в специальную светоизолирующую ячейку (1) перед выходной щелью спектрофотометра СФ-16 (6). Свет на образец подается от лампы накаливания (9), которая питается от блока питания (10). Изменение длины волны света, освещающего образец, осуществляется с помощью спектрофотометра СФ-16. На образец подается постоянное напряжение от источника Б5 – 50 (3). Сигнал с образца подается на усилитель постоянного тока У5–9 (7). Диапазон усилителя позволяет проводить измерения тока в пределах от 10^{-4} до 10^{-13} А. Величина тока измеряется с помощью вольтметра М-106 (8), который соединяется с выходом усилителя.

Установка позволяет проводить исследование свойств сульфида кадмия в динамическом режиме. На образец подается в этом случае переменное пилообразное напряжение с осциллографа С1–68 (5). Выходной сигнал подается на горизонтальные пластины осциллографа. Форма сигнала на выходе образца при его питании синусоидальном напряжением исследуется с использованием генератора Г3 – 104 (4) и осциллографа.

Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть источник питания Б5–50 и при нажатой кнопке «0» усилитель постоянного тока У2–8. На усилителе выставить самое маленькое значение множителя по току. Дать приборам прогреться в течение 10 мин.

2. Измерить ВАХ образца. Для этого изменяя напряжение от 0.1 до 10 В на источнике питания, измерить значение тока. **ВСЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЬ ПРИ НАЖАТОЙ КНОПКЕ «0» на усилителе постоянного тока.**

График ВАХ нарисовать в двойном логарифмическом масштабе. Используя график, определить аналитическую зависимость тока от напряжения. При наличии инжекции по графику определить напряжение, при котором она начинается.

3. Включить лампу накаливания. Расположить ее так, чтобы свет, прошедший через монохроматор попадал на образец. Изменяя длину волны света от 400 до 700 нм записать значения фототока. Измерение провести при напряжениях 0.1, 1, и 10 В. Нарисовать график зависимости фототока от длины волны света и определить λ_{\max} . Объяснить смещение максимума спектральной зависимости при изменении напряжения питания.

4. Установить длину волны света равную λ_{\max} измерить ВАХ структуры при освещении в соответствии с п. 2. Установить длину волны $\lambda_{\max}+20\text{нм}$ и повторить измерение ВАХ. Аналогичные измерения провести при $\lambda = \lambda_{\max}-20\text{ нм}$. Определить коэффициент внутреннего усиления фоторезистора для указанных длин волн при напряжении питания 1 и 10 В.

5. Используя графики зависимости фототока от длины волны определить участки фотопроводимости при собственном и примесном поглощении. Ширина запрещенной зоны монокристалла CdS равна 2,54 эВ.

Рекомендуемая литература

1. Бьюб Р. Фотопроводимость твёрдых тел / Р. Бьюб. – М. : Иностран. лит., 1962. – 420 с.

2. Бонч-Бруевич В. Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977 – 672 с.

3. Епифанов Г.И. Твердотельная электроника / Г. И. Епифанов, Ю. А. Мома. – М. : Высшая шк., 1977. – 304 с.

4. Любченко А. В. Физические основы полупроводниковой инфракрасной фотоэлектроники. Современные тенденции, новые материалы / А. В. Любченко, Е. А. Сальков, Ф. Ф. Сизов. – Киев: Наук. думка, 1984. – 256 с.

Лабораторная работа № 6

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДОЛЬНОГО ФОТОРЕЗИСТОРА ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ ПИТАНИЯ

Приборы и принадлежности: спектрофотометр СФ-16; лампа накаливания; источник постоянного тока для лампы накаливания; генератор синусоидальных сигналов ГЗ–7А, ГЗ–104; милливольтметр ВЗ–38А; магазин шунтирующих сопротивлений.

Интерес к сульфиду кадмия связан с тем, что фотоприемники на базе этого материала имеют высокую чувствительность и, кроме этого, кривая спектральной чувствительности данного материала близка к чувствительности глаза человека, что даёт возможность создать фотоприемник, регистрирующий параметры визуальной фотометрии (например, освещенность).

Влияние метастабильных уровней в кристаллах полупроводника приводит к тому, что образец под действием внешнего поля поляризуется. После снятия внешнего поля происходит деполяризация. Этот процесс протекает с конечной скоростью, что оказывает влияние на прохождение переменного тока. В частности, процессы поляризации – деполяризации влияют на вид вольтамперной характеристики кристалла, которая в этом случае существенно зависит от частоты питающего напряжения. Кроме этого, сдвиг фаз между током и напряжением в полупроводнике будет сложным образом зависеть от частоты переменного напряжения.

В работе необходимо исследовать некоторые фотоэлектрические свойства монокристалла сульфида кадмия: а) провести измерения вольтамперных характеристик образца при переменном смещении и разных частотах питающего напряжения; б) изучить влияние частоты и длины волны света на форму выходного сигнала; в) исследовать изменение сдвига фаз между током и напряжением при разных режимах работы фоторезистора.

При наблюдении зависимости сдвига фаз между током и напряжением надо вспомнить сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Напряжение и ток через полупроводник изменяются по гармоническому закону с одинаковой круговой частотой ω по формулам:

$$U = U_0 \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (1)$$

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_2) \quad (2)$$

Здесь U_0 и I_0 – амплитудные значения напряжения и тока соответственно; φ_1 и φ_2 – начальные фазы напряжения и тока соответственно.

Исключая время из уравнений (1) и (2) получим уравнение, описывающее результирующую траекторию:

$$\frac{U^2}{U_0^2} + \frac{I^2}{I_0^2} - 2 \frac{UI}{U_0 I_0} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (3)$$

Данное уравнение описывает эллипс. В зависимости от разности фаз между током и напряжением эллипс может принимать положение, симметричное относительно осей тока и напряжения (при $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi/2$) или прямой, проходящей через начало координат (при $\varphi_2 - \varphi_1 = 0, \pi$).

Таким образом, на экране осциллографа в общем случае будет наблюдаться эллипс (рис. 1). Измеряя параметры эллипса легко определить сдвиг фаз между током и напряжением.

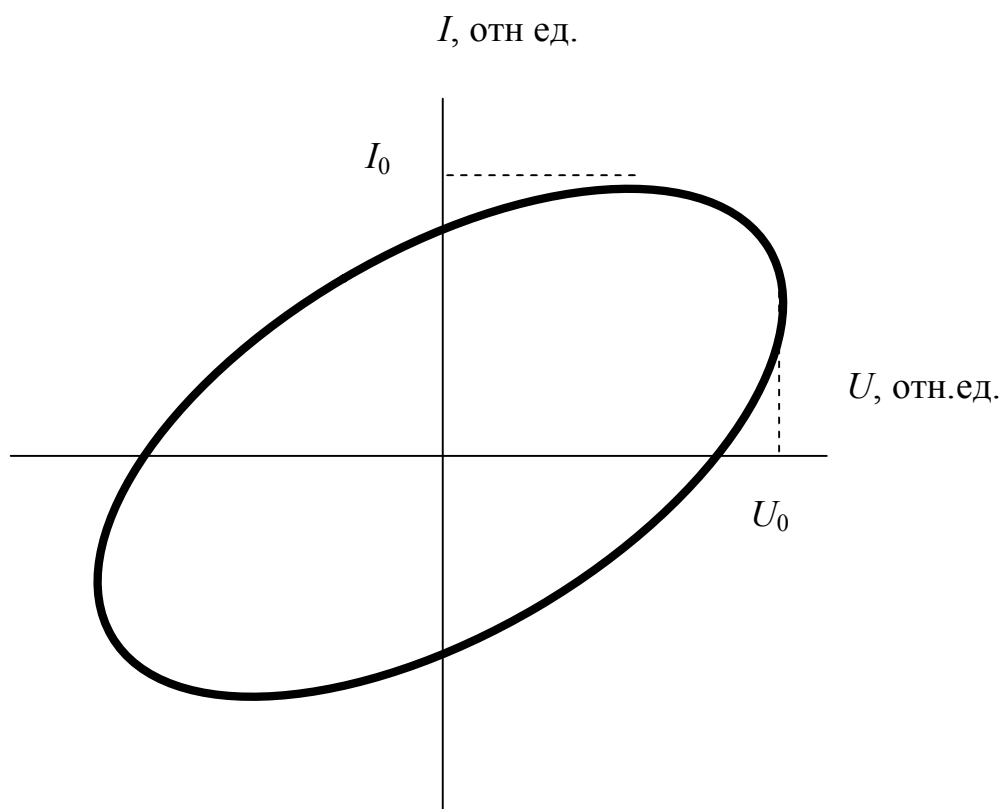


Рис. 1. Результат сложения колебаний тока и напряжения. Напряжение совершает колебания вдоль абсциссы, ток – вдоль ординаты

Измерения провести в продольном режиме работы фотопроводника, т.е. когда направление светового потока, падающего на образец, параллельно направлению поля, приложенного к кристаллу. В качестве образца служит высокоомный фоточувствительный монокристалл CdS. Кристалл вырезан таким образом, что оси C перпендикулярна граням с контактами. Контакты в виде индий-галиевой пасты наносились на противоположные основания кристалла механическим путем (намазыванием).

Лабораторная работа проводится на установке, блок схема которой показана на рис. 2.

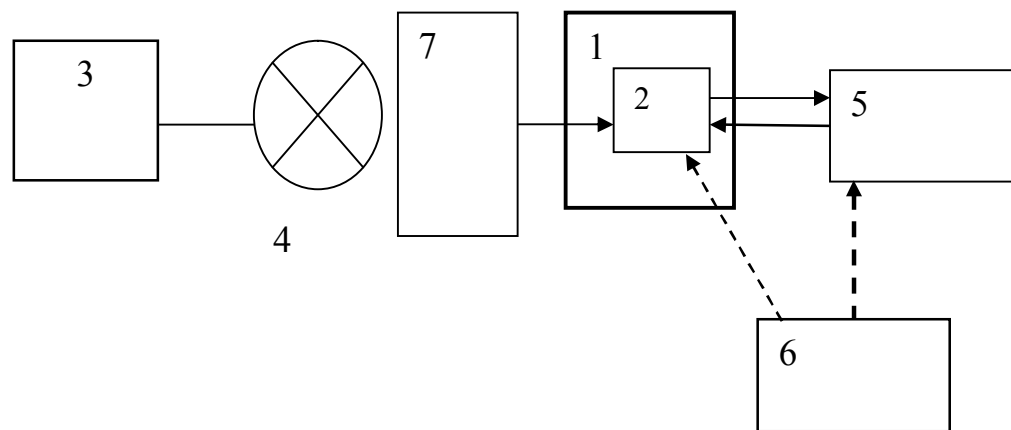


Рис. 2. Блок-схема установки.

Порядок выполнения работы

А. Наблюдение за выходным током в зависимости от частоты питающего напряжения и длины волны света.

1. Образец (2) поместить в специальную светоизолирующую ячейку (1) перед выходной щелью спектрофотометра СФ-16 (7). Свет на образец подавался от лампы накаливания (4), которая питается от блока питания (3). С помощью спектрофотометра СФ-16 выставить длину волны 400 нм, освещающего образец света. На образец подать переменное напряжение частотой 20 Гц от генератора сигналов синусоидальной формы Г-104 (6). Выходной сигнал зарегистрировать с использованием осциллографа (5).

2. Изменяя длину волны света, наблюдать за выходным сигналом на экране осциллографа. Увеличивая частоту напряжения в два раза, повторить наблюдение за сигналом, изменяя длину волны света до 700 нм. При отклонении от синусоиды или появлении постоянной составляющей тока записать параметры приложенного напряжения (частоту и величину) и длину волны света. Сделать фотографии тех кривых с экрана осциллографа, которые представляют, на Ваш взгляд, интерес. Объяснить наблюдаемые эффекты.

Б. Исследование ВАХ монокристалла сульфида кадмия в динамическом режиме.

1. На образец подать переменное пилообразное напряжение с осциллографа С1-64 (5). Выходной сигнал подать на горизонтальные пластины осциллографа.

2. Изменяя частоту развертки осциллографа наблюдать кривую ВАХ на экране при различной частоте. Наблюдать за изменениями ВАХ при освещении светом разной длины волны. Отметить параметры режима работы образца, при которых наблюдаются отклонения от закона Ома.

В. Зависимость сдвига фаз тока и напряжения от длины волны света и частоты питающего напряжения.

При определении зависимости сдвига фаз от частоты питающего синусоидального напряжения в качестве напряжения развертки использовался синусоидальный сигнал с генератора ГЗ-104.

1. С генератора синусоидальных сигналов ГЗ–104 подать напряжение 5 В на образец и одновременно на вертикальные пластины осциллографа. Сигнал с образца подать на вход осциллографа. Выставить начальную частоту питающего напряжения 20 Гц.

2. Форму сигнала на выходе образца наблюдать на экране осциллографа. Сделать фотографии тех кривых с экрана осциллографа, которые представляют, на Ваш взгляд, интерес. Определить сдвиг фаз между током и напряжением при разных значениях частоты питающего напряжения и длинах волн освещения. Объяснить наблюдаемые эффекты.

Рекомендуемая литература

1. Бьюб Р. Фотопроводимость твёрдых тел / Р. Бьюб. – М. : Иностран. лит., 1962. – 420 с.

Приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Функция Планка η в относительных координатах

ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$	ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$
0,20	$7,37 \cdot 10^{-4}$	0,65	59,08
0,21	$0,188 \cdot 10^{-2}$	0,66	61,45
0,22	$0,437 \cdot 10^{-2}$	0,67	63,78
0,23	$0,931 \cdot 10^{-2}$	0,68	66,06
0,24	$1,85 \cdot 10^{-2}$	0,69	68,25
0,25	$3,45 \cdot 10^{-2}$	0,70	70,42
0,26	$6,10 \cdot 10^{-2}$	0,71	72,48
0,27	0,102	0,72	74,48
0,28	0,162	0,73	76,42
0,29	0,254		
		0,74	78,28
0,30	0,380	0,75	80,05
0,31	0,550	0,76	81,74
0,32	0,774	0,77	83,36
0,33	1,062	0,78	84,91
0,34	1,425		
0,35	1,870	0,79	86,36
		0,80	87,74
0,36	2,410	0,81	89,94
0,37	3,051	0,82	90,26
0,38	3,801	0,83	91,40
0,39	4,667		
0,40	5,648	0,84	92,46
0,41	6,76	0,85	93,45
		0,86	94,35
0,42	8,00	0,87	95,16
0,43	9,36	0,88	95,95
0,44	10,84		
0,45	12,45	0,89	96,63
0,46	14,18	0,90	97,24
0,47	16,02	0,91	97,28
		0,92	98,26
0,48	17,97	0,93	98,68
0,49	20,03		
0,50	22,17	0,94	99,04
0,51	24,39	0,95	99,34
0,52	26,70	0,96	99,59
0,53	29,06	0,97	99,78
		0,98	99,90
0,54	31,48		
0,55	33,92	0,99	99,97
0,56	36,45	1,00	100,00
0,57	38,98	1,01	99,98
0,58	41,52	1,02	99,91
0,59	44,08	1,03	99,79
0,60	46,63	1,04	99,63
0,61	49,17	1,05	99,44
0,62	51,70	1,06	99,20

ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$	ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$
1,07	98,92	1,55	67,38
1,08	98,60	1,56	66,66
1,09	98,26	1,57	65,94
1,10	97,88	1,58	65,20
1,11	97,47	1,59	64,51
1,12	97,04	1,60	63,80
		1,61	63,10
1,13	96,59		
1,14	96,12	1,62	62,41
1,15	95,63	1,63	61,73
1,16	95,11	1,64	61,05
1,17	94,56	1,65	60,38
1,18	93,99	1,66	59,72
		1,67	59,06
1,19	93,39		
1,20	92,77	1,68	58,40
1,21	92,14	1,69	57,75
1,22	91,50	1,70	57,11
1,23	90,85	1,71	56,47
1,24	90,19	1,72	55,84
		1,73	55,21
1,25	89,51		
1,26	88,82	1,74	54,59
1,27	88,12	1,75	53,98
1,28	87,41	1,76	53,37
1,29	86,70	1,77	52,76
1,30	85,98	1,78	52,16
		1,79	51,57
1,31	85,26		
1,32	84,53	1,80	50,99
1,33	83,79	1,82	49,84
1,34	83,05	1,84	48,70
1,35	82,30	1,86	47,60
1,36	81,55	1,88	46,52
		1,90	45,46
1,37	80,80		
1,38	80,04	1,92	44,43
1,39	79,09	1,94	43,42
1,40	78,53	1,96	42,43
1,41	77,77	1,98	41,47
1,42	77,01	2,00	40,54
		2,05	38,27
1,43	76,26		
1,44	75,51	2,10	36,14
1,45	74,76	2,15	34,14
1,46	74,01	2,20	32,28
1,47	73,27	2,25	30,53
1,48	72,52	2,30	28,87
		2,35	27,31
1,49	71,78		
1,50	71,04	2,40	25,85
1,51	70,30	2,45	24,47
1,52	69,56	2,50	23,18

λ , нм	Спектральный коэффициент излучения вольфрама α при T, К							
	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400	2 600	2 800	3 000
300	0,488	0,486	0,483	0,481	0,478	0,475	0,473	0,470
325	0,476	0,474	0,472	0,470	0,469	0,467	0,465	0,463
350	0,469	0,468	0,467	0,466	0,465	0,464	0,463	0,462
375	0,476	0,475	0,473	0,472	0,471	0,470	0,469	0,468
400	0,479	0,476	0,474	0,471	0,468	0,466	0,463	0,460
425	0,473	0,470	0,467	0,463	0,460	0,457	0,453	0,450
450	0,470	0,466	0,463	0,459	0,456	0,449	0,449	0,445
500	0,459	0,456	0,453	0,450	0,447	0,444	0,441	0,438
550	0,453	0,451	0,448	0,446	0,443	0,441	0,439	0,436
600	0,447	0,445	0,443	0,441	0,438	0,436	0,436	0,432
650	0,440	0,438	0,436	0,434	0,432	0,430	0,428	0,426
700	0,436	0,434	0,431	0,429	0,427	0,425	0,423	0,420
750	0,430	0,426	0,422	0,418	0,414	0,410	0,405	0,401
800	0,418	0,409	0,401	0,392	0,383	0,375	0,366	0,357
900	0,398	0,387	0,376	0,365	0,354	0,342	0,331	0,320
1000	0,375	0,347	0,351	0,339	0,327	0,315	0,302	0,290
1100	0,345	0,334	0,322	0,311	0,290	0,288	0,276	0,265
1200	0,317	0,308	0,298	0,289	0,279	0,270	0,260	0,251
1300	0,295	0,288	0,280	0,273	0,266	0,258	0,251	0,241
1400	0,278	0,273	0,268	0,263	0,258	0,253	0,247	0,242
1500	0,264	0,261	0,258	0,256	0,253	0,250	0,247	0,244

Содержание

Введение	3
Лабораторная работа № 1. Градуировка спектральной установки	4
Лабораторная работа № 2. Исследование спектральных особенностей электролюминесценции порошкового сульфида цинка	8
Лабораторная работа № 3. Определение оптических параметров ветодиода	14
Лабораторная работа № 4. Определение параметров полупроводниковой структуры n–n-типа	23
Лабораторная работа № 5. Электрооптические свойства фоторезистора с инжекционным усилением фототока на основе монокристаллического сульфида кадмия	27
Лабораторная работа № 6. Измерение электрических характеристик продольного фоторезистора при переменном напряжении питания.	34
Приложения	39