

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
Кафедра физики твердого тела

В.В. ПАРФЕНОВ

**ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ И ЛЮКС-АМПЕРНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОРЕЗИСТОРА ИЗ CdS**

Методическое пособие к лабораторной работе

Казань 2016

УДК 537.311.4
ББК В379.2

*Принято на заседании кафедры физики твердого тела
Протокол № 13 от 16 мая 2016 года*

Рецензент:
доктор физ.-мат. наук, проф. кафедры общей физики К(П)ФУ
Еремина Р.М.

Парфенов В.В.
Измерение вольт-амперных и люкс-амперных характеристик фоторезистора из CdS /В.В. Парфенов. – Казань: Казан. ун-т, 2016. – 12 с.

Методическая разработка предназначена для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 03.03.02 «Физика» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Физика магнитных материалов и полупроводников», «Физика конденсированного состояния», «Физические основы микро- и наносистемной техники».

Пособие не освобождает и не ограничивает студента от обращения к другим источникам информации, в том числе рекомендованным в данном пособии, необходимым для выполнения лабораторных заданий, для подготовки к зачету и экзамену, поскольку не охватывает материал, вынесенный на самостоятельное изучение студентом.

© Парфенов В.В., 2016
© Казанский университет, 2016

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ И ЛЮКС-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОРЕЗИСТОРА ИЗ CdS

Краткая теория

Внутренним фотоэффектом называется изменение концентрации носителей заряда в полупроводнике под действием освещения. Фоторезистором называется полупроводниковый прибор из однородного полупроводника, предназначенный для регистрации освещенности.

Явление внутреннего фотоэффекта было открыто в 1873 г. английским инженером У.Смитом. Объяснение же оно получило только после создания квантовой теории твердого тела. В настоящее время это явление широко используется для создания электронных приборов – **полупроводниковых фотоприемников**.

Прежде чем рассматривать физические процессы, протекающие при внутреннем фотоэффекте, определим основные понятия.

- 1) Однородным полупроводником будем считать полупроводник с собственной или примесной проводимостью, причем примеси распределены по объему равномерно и имеют одинаковую химическую природу. Иными словами, в образце отсутствуют т.н. **p–n переходы**. Полупроводниковые фотоприемники, изготовленные на основе однородных полупроводников, называются **фоторезисторами**.
- 2) При освещении полупроводника возможно и увеличение (нормальный фотоэффект) и, значительно реже, уменьшение электропроводности (аномальный фотоэффект). В рамках данного пособия мы рассмотрим только **нормальный фотоэффект**.

При нормальном фотоэффекте происходит увеличение проводимости образца на величину фотопроводимости

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta \sigma, \quad (1)$$

где σ_0 - электропроводность образца в отсутствии освещения, т.н. **темновая проводимость**.

Причиной появления фотопроводимости является, в первую очередь, изменение концентрации носителей заряда за счет **фотогенерации**.

$$\Delta \sigma = e \Delta n \mu_n + e \Delta p \mu_p. \quad (2)$$

Подвижности электронов μ_n и дырок μ_p при освещении изменяются очень незначительно.

Фотогенерация **избыточных** носителей заряда может происходить как за счет процессов поглощения квантов света атомами основного вещества (**собственная фотопроводимость**), так и за счет процессов, в которых участвуют атомы примеси (**примесная фотопроводимость**). В первом случае (рис. 1а) электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости и в образце образуются избыточные электроны и дырки. Во втором и третьем случаях (рис. 1; б, в) электрон переходит либо с

заполненного донорного уровня в зону проводимости, либо из валентной зоны на пустой акцепторный уровень. Тогда в полупроводнике появятся избыточные носители только одного знака – электроны (б) или дырки (в).

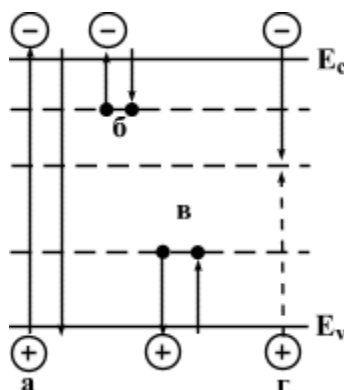


Рис.1. Собственная (а) и примесная (б, в) фотопроводимость в полупроводнике. Процесс (г) – рекомбинация с участием глубокого центра.

Процессы фотоионизации примесных центров происходят при низкой температуре, т.к. при комнатной температуре примесные центры уже обычно ионизированы за счет нагрева образца.

И в случае собственной, и в случае примесной проводимости должно выполняться пороговое условие **красной границы фотоэффекта**, т.е. энергия кванта света должна быть больше некоторой характеристической энергии,

$$h\nu \geq \varepsilon_{\text{крас}}. \quad (3)$$

В случае собственной фотопроводимости эта энергия равна ширине запрещенной зоны

$$\varepsilon_{\text{крас}} = \varepsilon_g, \quad (3a)$$

а в случае примесной – энергии ионизации примесного центра

$$\varepsilon_{\text{крас}} = \varepsilon_I. \quad (3б)$$

Поскольку электронная система полупроводника, будучи выведенной из равновесия, стремится к нему вернуться, то наряду с процессами фотогенерации избыточных носителей будут **обязательно** идти и процессы **рекомбинации** (рис.1). При рекомбинации высвобождается энергия, затраченная на генерацию. Она может высвобождаться в виде тепла (безызлучательная рекомбинация) или же в виде излучения (излучательная рекомбинация). Излучательная рекомбинация лежит в основе работы полупроводниковых источников излучения – светодиодов и лазеров.

С учетом двух конкурирующих процессов: фотогенерации и рекомбинации, можно записать систему дифференциальных уравнений для концентрации избыточных электронов и дырок

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta n)}{dt} = G_n - R_n \\ \frac{d(\Delta p)}{dt} = G_p - R_p \end{cases}, \quad (4)$$

где G_n, G_p - скорости генерации электронов и дырок;

R_n, R_p - скорости рекомбинации.

Скорости генерации избыточных носителей должны быть пропорциональны количеству поглощенных полупроводником квантов света

$$G = \alpha\beta J. \quad (5)$$

Здесь J – интенсивность светового потока;

α - коэффициент поглощения;

β - **квантовый выход** внутреннего фотоэффекта, т.е. количество электронов или дырок, появившихся в образце в результате поглощения одного фотона при примесной фотопроводимости, или же количество электрон-дырочных пар, появившихся при поглощении одного фотона в случае собственной фотопроводимости. Обычно величина $\beta \leq 1$, но в случае, если энергия кванта в несколько раз превышает ширину запрещенной зоны полупроводника, величина квантового выхода может быть и больше единицы.

Скорости рекомбинации должны зависеть **только** от свойств самого полупроводника. В самом общем виде для **межзонной рекомбинации** можно записать

$$R = \gamma(np - n_0 p_0), \quad (6)$$

где n, p – концентрации электронов и дырок в освещенном полупроводнике;

n_0, p_0 – равновесные или “темновые” концентрации;

γ – коэффициент пропорциональности.

С учетом того, что $n = n_0 + \Delta n$; $p = p_0 + \Delta p$, формулу (6) можно переписать как

$$R = \gamma(p_0 \Delta n + n_0 \Delta p + \Delta n \Delta p). \quad (7)$$

Еще больше это выражение можно упростить, если рассмотреть два предельных случая – случай «слабого» и «сильного» внешнего воздействия.

При слабом внешнем воздействии, т.е. когда интенсивность падающего на образец излучения невелика, концентрации фотогенерированных носителей заряда существенно меньше их «темновых» концентраций $\Delta n, \Delta p \ll n_0, p_0$. Тогда в (7) можно пренебречь третьим слагаемым и записать для скорости рекомбинации

$$R = \gamma(p_0 \Delta n + n_0 \Delta p), \quad (8)$$

а с учетом того, что при **межзонной генерации и рекомбинации** количество избыточных электронов равно количеству избыточных дырок $\Delta n = \Delta p$, для скорости рекомбинации получим

$$R = \frac{\Delta n}{\tau_f}. \quad (9)$$

Здесь

$$\tau_f = \frac{1}{\gamma(n_0 + p_0)}, \quad (10)$$

величина, имеющая размерность времени, и, по сути своей, представляющая некоторое **среднее время**, в течение которого **существуют и вносят вклад в электропроводность** фотогенерированные носители. Эта величина называется **временем жизни** неравновесных носителей. Процесс рекомбинации, описываемый (9), носит название **линейной** рекомбинации.

Теперь система уравнений (4) может быть сведена к одному простому уравнению

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = \alpha\beta J - \frac{\Delta n}{\tau_f}. \quad (11)$$

Решая это уравнение с начальным условием $\Delta n = 0$ при $t = 0$, получим

$$\Delta n(t) = \alpha\beta\tau_f J \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) \right]. \quad (12)$$

Полученное решение означает, что при включении внешнего воздействия (освещения) концентрация избыточных носителей заряда **не изменяется мгновенно**, а нарастает по асимптотическому закону (12), приближаясь в пределе при $t \rightarrow \infty$ к **стационарному значению**

$$\Delta n_{\text{стац}} = \alpha\beta\tau_f J. \quad (13)$$

Если теперь выключить освещение, то уравнение (11) запишется в виде

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau_f}, \quad (14)$$

а его решением будет

$$\Delta n(t) = \alpha\beta\tau_f J \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right). \quad (15)$$

Изменение фотопроводимости (или фототока) со временем будет подчиняться тем же законам, что и зависимость $\Delta n(t)$, а стационарное значение фотопроводимости при межзонной линейной рекомбинации будет задаваться соотношением

$$\Delta\sigma_{\text{стац}} = \alpha\beta\tau_f J e(\mu_n + \mu_p). \quad (16)$$

Таким образом, стационарное значение фотопроводимости (фототока) будет в этом случае линейно зависеть от интенсивности светового потока J , а законы нарастания и спада фотопроводимости при включении и выключении освещения содержат одну и ту же постоянную времени τ_f .

Теперь рассмотрим случай **сильного внешнего воздействия**. В полупроводниках с малой концентрацией примесей и/или при большой интенсивности светового потока выполнится условие $\Delta n, \Delta p \gg n_0, p_0$. Считая по-прежнему рекомбинацию межзонной и пренебрегая двумя первыми слагаемыми в уравнении 7, получим для скорости **квадратичной** рекомбинации

$$R = \gamma(\Delta n)^2. \quad (17)$$

При включении освещения избыточная концентрация носителей будет теперь возрастать по закону

$$\Delta n(t) = \sqrt{\frac{\alpha\beta J}{\gamma}} \tanh(\sqrt{\alpha\beta\gamma J} t), \quad (18)$$

а при $t \rightarrow \infty$ будет достигать стационарного значения

$$\Delta n_{\text{стац}} = \sqrt{\frac{\alpha\beta J}{\gamma}}. \quad (19)$$

При выключении внешнего воздействия

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\gamma(\Delta n)^2 \quad (20)$$

и

$$\Delta n(t) = \frac{\sqrt{\frac{\alpha\beta J}{\gamma}}}{\sqrt{\alpha\beta\gamma J} t + 1}. \quad (21)$$

Следовательно, при межзонной квадратичной рекомбинации стационарная концентрация генерированных светом носителей, а также фотопроводимость и фототок будут зависеть от интенсивности светового потока как $\sqrt{J}$. При этом нарастание фотопроводимости при включении света и спад при выключении будут происходить по разным законам (см. ф. 18, 21).

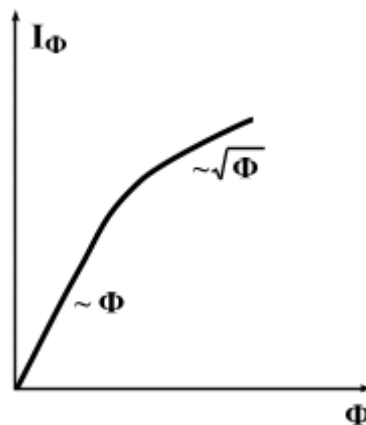


Рис. 2. Зависимость фототока от освещенности (люкс-амперная характеристика).

Зависимость фототока (фотопроводимости) от интенсивности светового потока J (или освещенности Φ) является для полупроводникового фотоэлемента важнейшей

характеристикой и называется **световой** или **люкс-амперной** характеристикой. Как следует из (13), (19) эта характеристика линейна при малых освещенностях (в области линейной рекомбинации) и нелинейна в области больших интенсивностей светового потока (рис. 2).

Тангенс угла наклона касательной к кривой ЛАХ на ее линейном участке

$$K = \frac{\Delta I_{\phi}}{\Phi} \quad (22)$$

называется **интегральной чувствительностью фотоэлемента**.

Второй важнейшей характеристикой фотоэлемента является его **спектральная чувствительность** – зависимость фототока от длины волны падающего излучения. Спектральная чувствительность имеет вид кривой с максимумом, ограниченной со стороны длинных волн - длиной волны, соответствующей красной границе фотоэффекта (см. ф..3):

$$\lambda_{\text{крас}} = \frac{hc}{\epsilon_{\text{крас}}} \quad (23).$$

При уменьшении длины волны фототок сначала резко возрастает, достигает максимума и снова падает в области коротких длин волн (рис.3).

Падение фототока в коротковолновой области спектра обусловлено увеличением коэффициента поглощения в этой области до значений $\alpha = 10^3\text{--}10^5 \text{ см}^{-1}$. Соответственно глубина проникновения света в полупроводник уменьшается до $10^{-3}\text{--}10^{-5} \text{ см}$, т.е. все падающее излучение поглощается в тонком приповерхностном слое. А этот слой всегда богат дефектами, приводящими к увеличению скорости рекомбинации (**поверхностная рекомбинация**) и, следовательно, к уменьшению времени жизни и уменьшению фоточувствительности. Действительно, область спектральной чувствительности можно расширить в коротковолновую сторону спектра, выполнив, например, тщательную обработку поверхности кристалла.

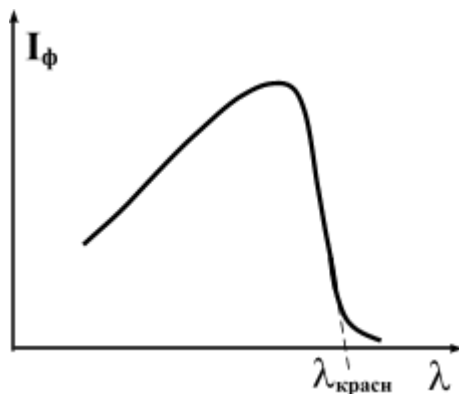


Рис.3. Типичная спектральная зависимость фототока в полупроводнике.

Третьей важнейшей характеристикой полупроводникового фотоприемника является его **амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)**. Она определяет

способность прибора реагировать на быстро меняющийся световой поток. Если период, в течение которого изменяется световой сигнал $T < \tau_f$, то при включении освещения фотопроводимость не достигнет своего стационарного значения, а при выключении – не успеет упасть до нуля. В результате регистрируемый сигнал будет иметь постоянную составляющую $\Delta\sigma_{\sim}$ и переменную составляющую $\Delta\sigma_{\sim}$, амплитуда которой будет тем меньше, чем меньше T по сравнению с τ_f . Можно показать, что для **линейной межзонной рекомбинации**

$$\Delta\sigma_{\sim} = \Delta\sigma_{стат} \tanh \frac{1}{4\tau_f f}, \quad (24)$$

где $f = 1/T$ – частота модуляции (прерывания) светового потока.

Среди других характеристик полупроводниковых фотоэлементов отметим **вольт-амперные характеристики**, которые для фоторезисторов **линейны**, как для темнового, так и для фототока, и **температурные зависимости** фототока и темнового тока, которые обычно **нелинейны**. В некотором ограниченном интервале температур T_1 - T_2 их, впрочем, можно аппроксимировать линейной зависимостью и ввести **температурные коэффициенты (ТК)** фототока и темнового тока по формуле

$$TK = \left| \frac{I(T_1) - I(T_2)}{T_1 - T_2} \right|, \quad (26)$$

где I - либо темновой, либо фототок.

В заключение отметим, что в полупроводниках часто реализуется не межзонный механизм рекомбинации, а т.н. рекомбинация через примесные центры (**рекомбинация Шокли-Рида**). В этом случае процесс рекомбинации идет в две стадии. Сначала на **глубокий** примесный уровень захватывается электрон из зоны проводимости, а потом на этот же уровень захватывается дырка из валентной зоны (рис.1д). Вблизи этого примесного центра и происходит процесс рекомбинации. Решения уравнений, описывающих рекомбинацию Шокли-Рида, достаточно сложны и их анализ выходит за рамки данного описания. Отметим только, что качественная картина явления и основные характеристики фотоэлементов будут отличаться от рассмотренных выше не очень значительно.

ЗАДАНИЕ

В данной работе предлагается определить некоторые характеристики и параметры полупроводниковых фотоэлементов – фоторезисторов из сульфида кадмия CdS.

1. При комнатной температуре измерить вольт-амперные характеристики темнового тока и фототока.
2. Изучить световую (люкс-амперную характеристику). По линейному участку характеристики определить чувствительность прибора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка представлена на рис.4. Она представляет из себя оптическую скамью, на которой размещены лампа **a**, со щелевой диафрагмой **b**, поляризационные фильтры **c,d**, фокусирующая линза **e**, держатель с CdS фоторезистором **f**. Кроме того, в состав экспериментальной установки входит блок питания лампы, два мультиметра, один из которых используется в режиме амперметра, второй – вольтметра. Освещенность фоторезистора регулируется поворотом одного поляризационного фильтра относительно другого на угол α и описывается формулой 27.

$$\Phi = \Phi_0 D \cos^2 \alpha \quad (27),$$

где Φ_0 – освещенность фоторезистора без поляризационных фильтров;

D – пропускание поляризационных фильтров при $\alpha = 0^\circ$.

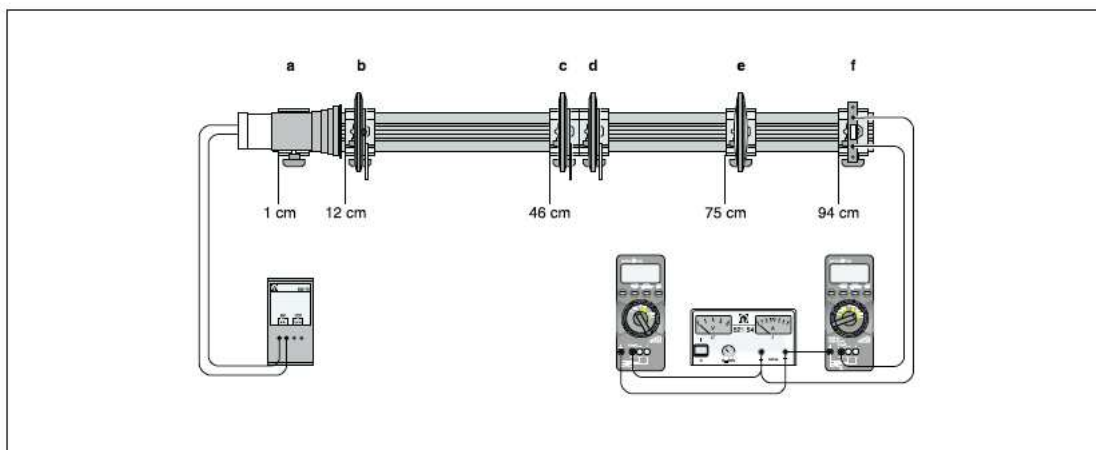


Рис.4. Блок-схема экспериментальной установки

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Примечание:

Фоторезистор медленно откликается на изменение интенсивности светового потока (см. ф.24). Прежде чем измерять параметры, необходимо подождать, пока они достигнут стационарного значения.

а) Измерение фототока I_Φ в зависимости от напряжения на фоторезисторе при постоянной освещенности:

- Установите ширину щелевой диафрагмы, равную 0,4 мм.
- Подайте напряжение 16 В на фоторезистор, перекройте световой поток и измерьте ток I_0 фоторезистора, возникающий из-за фоновой засветки.
- Осветите фоторезистор. Уменьшайте напряжение от 16 В с шагом 2 В. Измеряя каждый раз фототок, зарегистрируйте вольт-амперную характеристику.

- Повторите измерения при угле $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$.

б) Измерение фототока I_f в зависимости от освещенности Φ при постоянном напряжении питания.

- Подайте напряжение 16 В на фоторезистор, перекройте световой поток и измерьте ток I_0 фоторезистора, возникающий из-за фоновой засветки.

- Уменьшайте освещенность фоторезистора, увеличивая угол между плоскостями поляризации светофильтров с шагом 10° , от 0 до 90° . Измеряя каждый раз фототок, зарегистрируйте люкс-амперную характеристику.

- Повторите измерения при напряжении питания $V=10В$ и $V=1В$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Охарактеризуйте физические условия, необходимые для наблюдения примесной фотопроводимости.
2. В чем причина нелинейности люкс-амперной характеристики фоторезистора?
3. Из-за чего происходит спад спектральной чувствительности фоторезистора в области коротких длин волн?
4. Из-за чего происходит спад амплитудно-частотной характеристики фоторезистора при быстро меняющемся световом потоке?

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурбаева Н.В. Основы полупроводниковой электроники, Физматлит, 2012.

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=5261

2. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов, Физматлит, 2008.

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2244

3. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников, Лань, 2008.

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=693

4. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников, Физматлит, 2009.

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2371

СОДЕРЖАНИЕ

Краткая теория.....	3
Задание.....	9
Экспериментальна установка.....	10
Выполнение работы.....	10
Контрольные вопросы.....	11
Литература.....	11