

АКТИВНОСТЬ

Петрозаводский государственный
университет

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Методические указания

Петрозаводск 2000

Петрозаводский государственный университет

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

*Методические указания к лабораторной работе
для студентов 4 курса
специальности «Твердотельная электроника
и микроэлектроника»*

Петрозаводск
Издательство Петрозаводского государственного университета
2000

Рассмотрены и рекомендованы к печати на заседании
редакционной комиссии по отрасли науки и техники «физика»
27 января 2000 г.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета
университета

Составитель: В. П. Малиненко, доцент, канд. физ.-мат. наук

Издание осуществлено при поддержке
ОАО «Кондопога»

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Цель работы.

1. Ознакомиться с внутренней ионизацией полупроводников под действием света на примере работы полупроводниковых фотоприемников.
2. Построить спектральную зависимость фотопроводимости и определить энергию оптического перехода.
3. Получить осциллограмму фотопроводимости при импульсном освещении и определить время жизни неравновесных носителей.

ВВОДНАЯ ТЕОРИЯ

Оптическая генерация носителей в полупроводниках и диэлектриках

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 I соответствует собственному поглощению вещества. При поглощении кванта света образуется пара свободных носителей - электрон и дырка. Такое возбуждение называется биполярным.

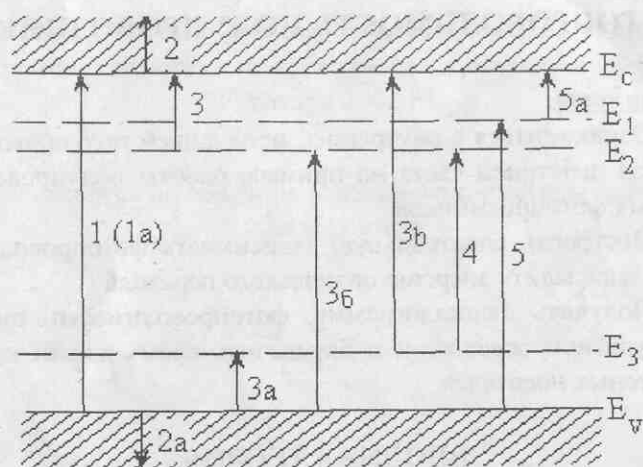


Рис. 1. Схема электронных переходов, возникающих в полупроводнике при поглощении света.

E_c - дно зоны проводимости.

E_v - потолок валентной зоны.

$E_{1,2,3}$ - примесные уровни.

1, 1a - 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 энер-

гия 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

$$\sigma = q(\mu_n p_0 + \mu_p r_0 + \mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p), \quad (2)$$

где p_0 , r_0 - равновесные концентрации электронов и дырок.

Δn , Δp - 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

Эффекты поглощения света в полупроводнике находят практическое применение при создании модуляторов световых потоков, фотоприемников и преобразователей световой энергии в электрическую (фотодатчиков). На рис. 2 показаны устройство фоторезистора и схема его включения. Фоторезистор - прибор, с помощью которого можно регистрировать световое излучение по фотопроводимости. Он состоит из чувствительного моно- или поликристаллического полупроводника в виде бруска или пленки с двумя омическими контактами.

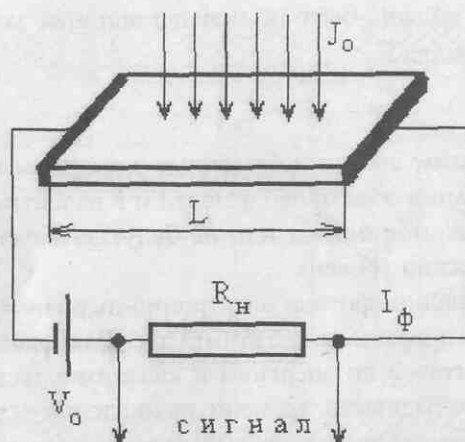


Рис. 2. Устройство фоторезистора и схема его включения.

- J_0 - падающее излучение заданной интенсивности.
 L - длина чувствительного слоя.
 R_H - нагрузочное сопротивление.
 V_0 - приложенное напряжение.
 I_ϕ - фототок

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, $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, J_ϕ - интенсивность падающего света, $\eta(\lambda)$ - квантовый выход фотоионизации, Δn - число электронно-дырочных пар, образуемых одним квантом света.

Интенсивность излучения спадает вглубь 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.

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.

Фоторезистор должен быть достаточно толстым, чтобы в нем поглощался 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 τ/t_{np} раз, где t_{np} - время пролета или время дрейфа носителя через резистор.

$$t_{np} = \frac{L}{v_{др}} = \frac{L}{\mu E} = \frac{L^2}{\mu V}, \quad (8)$$

где L - длина чувствительного элемента, $v_{др}$ - скорость дрейфа, μ - подвижность носителей, E - напряженность электрического поля в фоторезисторе, V - разность потенциалов на резисторе.

Сила фототока I_ϕ равна произведению числа носителей, ежесекундно генерируемых в полупроводнике под действием света G , заряда электрона и отношения τ/t_{np} :

$$I_\phi = eG \cdot \frac{\tau}{t_{np}} = eG\tau \frac{\mu V}{L^2}. \quad (9)$$

Генерация, происходящая в ед. объема в ед. времени, характеризуется соответствующим темпом генерации $G = \Delta n / \tau$.

Тогда $G \cdot \tau = \Delta n$ - число неравновесных носителей в фоторезисторе.

Выражение (9) можно переписать в виде:

$$I_{\phi} = \frac{e N_{\phi} \eta(\lambda) \tau \mu V}{L^2} = \eta(\lambda) \cdot \frac{N_{\phi 0} e \tau \mu V}{h \nu L^2} [1 - r(\lambda)], \quad (10)$$

где $N_{\phi 0} = J_{\phi 0} / h \nu$.

$$\text{Отношение} \quad \frac{I_{\phi}}{J_{\phi 0}} = \frac{e [1 - r(\lambda)]}{h c L^2} \eta(\lambda) \cdot \lambda \tau \mu V \quad (11)$$

характеризует чувствительность фоторезистора, которая пропорциональна длине волны λ падающего излучения $J_{\phi 0}$, приложенному к фотопроводнику напряжению V , времени жизни неравновесных носителей τ , их подвижности μ и обратно пропорциональна квадрату длины чувствительного элемента. В выражениях (10) и (11) $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, а $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света.

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

Фотопроводимость возникает при возбуждении только таким излучением, для которого энергия фотонов превышает некоторое пороговое значение. При собственном поглощении пороговая энергия определяется шириной запрещенной зоны, а при примесном - энергией активации соответствующего уровня примесного центра. На рис. 3 показан вид спектральной зависимости фотопроводимости полупроводника.

Спектральная зависимость фотопроводимости аналогична зависимостям квантового выхода $\eta(\lambda)$ коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$ от энергии квантов $\left(E = h \frac{c}{\lambda}\right)$ (рис. 4, 5).

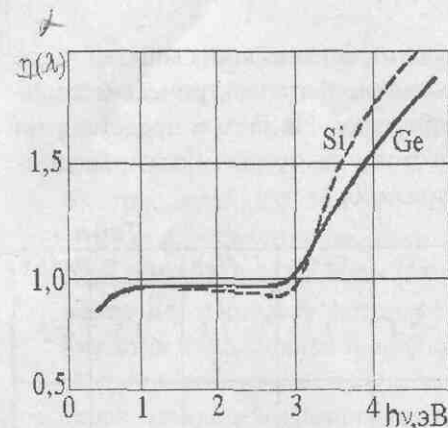


Рис. 3. Спектральная зависимость собственной фотопроводимости [4]

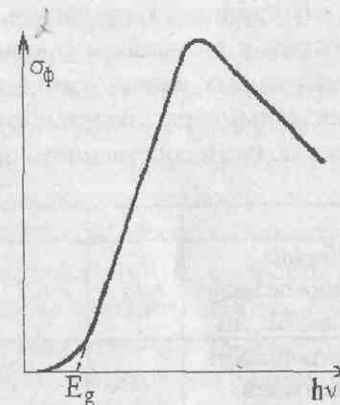


Рис. 4. Спектральная зависимость квантового выхода германия и кремния [4]

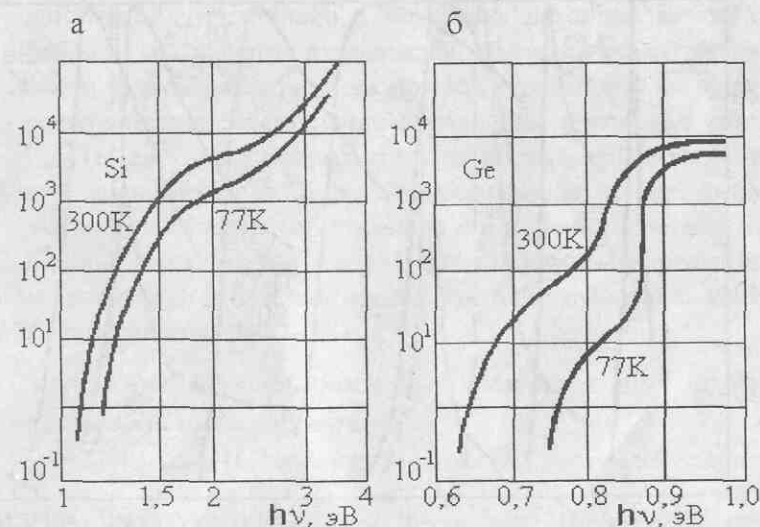


Рис. 5. Спектры поглощения излучения кремния (а) и германия (б)

В таблице 1 приведены электрофизические свойства ряда простых и сложных полупроводников, фотоэлектрические свойства которых используются в приборах. На рис. 6 представлено спектральное распределение фототока некоторых полупроводников в области собственного поглощения.

Таблица 1

	Si	Ge	CdS*	Se*	CdTe*	αAs*	InSb*
Ширина запрещенной зоны ΔE _з , эВ	1,15	0,7	2,4	1,7	1,5	1,5	0,2
Подвижность носителей электронов	300	3800	200	600	1500	500	8000
дырок, см ² /В·с	500	820	20	-	100	20	750

* Свойства соединений зависят от формульного состава (стехиометрии) и в данной таблице соответствуют составу 50% ат. на 50% ат.

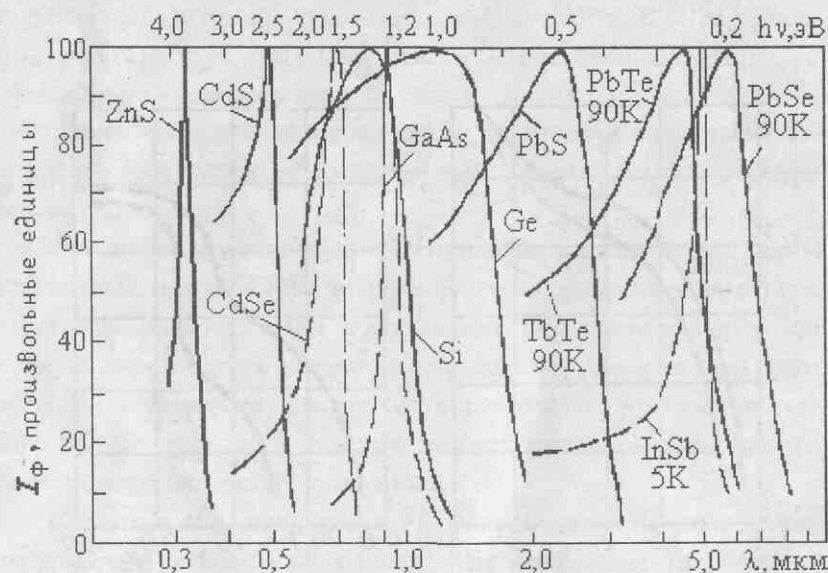


Рис. 6. Спектральное распределение фототока полупроводников в области собственного поглощения [2]

Появление некоторой фоточувствительности при $h\nu < E_g$ объясняется тем, что тепловые колебания кристаллической решетки приводят к возникновению флуктуальной энергии электронов и значения E_g . С увеличением энергии фотонов фотопроводимость быстро достигает максимума, а затем начинает уменьшаться. Этот спад объясняется малыми временами жизни носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника, где преимущественно поглощаются фотоны с энергией $h\nu < E_g$. Скорость рекомбинации здесь велика и велика также концентрация носителей. У поверхности, кроме того, мала эффективная подвижность носителей заряда из-за многочисленных дефектов. На поверхности и вблизи нее на перенос носителей влияют не только центры захвата, связанные с нарушением периодичности кристаллической решетки полупроводника, но и область пространственного заряда, который обусловлен поверхностными состояниями.

Длинноволновая граница примесной проводимости в соответствии с примесным поглощением сдвинута в сторону больших длин волн относительно собственной фотопроводимости. Коэффициент поглощения в примесной области зависит от интенсивности возбуждающего света, так как вероятность поглощения фотонов определяется степенью заполнения примесных уровней.

На рисунке 3 показано, как по восходящей ветви спектральной зависимости фотопроводимости можно найти наименьшую энергию в области собственного поглощения, соответствующую ширине запрещенной зоны. Оценку ширины запрещенной зоны можно сделать по длине волны, соответствующей максимальной фотопроводимости.

Уравнение непрерывности и фототок при импульсном освещении фоторезистора

Генерация (G) и рекомбинация (R) носителей задаются темпом и равны соответственно $\pm \frac{\Delta n}{\Delta t}$, где Δn учитывает изменение концентрации неравновесных носителей относительно начала процесса за промежуток времени (Δt).

При захвате носителей на локальные центры происходит накопление объемного заряда. Темп накопления объемного заряда равен $\frac{1}{q} \operatorname{div} j_n$, где q - заряд носителя, j_n - плотность тока.

Уравнение непрерывности для фотоэлектронов и фотодырок имеет вид:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G + R + \frac{1}{q} \operatorname{div} j_{n,p} \quad (12)$$

где $j_{n,p}$ - плотность электронного или дырочного тока.

Аналогичным выражением описывается кинетика изменения концентрации дырок.

Полная плотность тока в полупроводнике складывается из диффузионной и дрейфовой составляющих. Для электронов и соответственно также для дырок она имеет вид:

$$j_n = qD_n \frac{dn}{dx} + qn\mu_n E, \quad (13)$$

где D_n - коэффициент диффузии данного вида носителя.

Для одномерного случая выражение, характеризующее движение нейтрального фронта неравновесных носителей на основании (12) и (13), имеет вид:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G - R + \frac{d}{dx} \left(D \frac{d(\Delta n)}{dx} \right) + \mu E \frac{d(\Delta n)}{dx}, \quad (14)$$

где D и μ - коэффициент биполярной диффузии и биполярная дрейфовая подвижность соответственно.

Из (12) видно, что на начальном этапе освещения, когда рекомбинация мала и объемный заряд отсутствует, нарастание неравновесных носителей при заданных условиях освещения происходит линейно. За счет рекомбинации происходит отклонение от линейного закона и устанавливается равновесное значение неравновесных носителей, определяющее стационарную фотопроводимость в соответствии с уравнением (3).

В стационарных условиях $\frac{d(\Delta n)}{dt} = 0$ и $\frac{d(\Delta p)}{dt} = 0$.

Уравнение непрерывности приобретает вид:

$$\begin{aligned} - \left(D_n \frac{d^2(\Delta n)}{dx^2} + \mu_n E_x \frac{d(\Delta p)}{dx} \right) &= G - \frac{n - n_0}{\tau_n}, \\ - \left(D_p \frac{d^2(\Delta p)}{dx^2} + \mu_p E_x \frac{d(\Delta p)}{dx} \right) &= G - \frac{p - p_0}{\tau_p} \end{aligned} \quad (15)$$

Уравнение (15) выражает закон сохранения числа частиц в стационарных условиях: поток частиц, вытекающих из единицы объема полупроводника, равен числу частиц, генерируемых в этом объеме, за вычетом числа частиц, рекомбинирующих в этом объеме.

При выключении источника света концентрация избыточных носителей убывает за счет рекомбинации по закону:

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}}, \quad (16)$$

где t_0 - момент выключения света.

По такому же закону происходит спад фотопроводимости полупроводника:

$$\sigma_\phi = \sigma_{\phi 0} e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} \quad (17)$$

Характер нарастания фотопроводимости полупроводника после включения светового импульса описывается уравнением, подобным уравнению, описывающему спад фототока:

$$\sigma_\phi = \sigma_{\phi 0} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (18)$$

На рис. 7 показана кривая нарастания фотопроводимости при облучении и спада фотопроводимости после прекращения облучения. На кривой спада фототока при $(t - t_0) = \tau$ максимальное значение фототока при $t = t_0$ убывает в "е" раз и можно определить время жизни носителей τ .

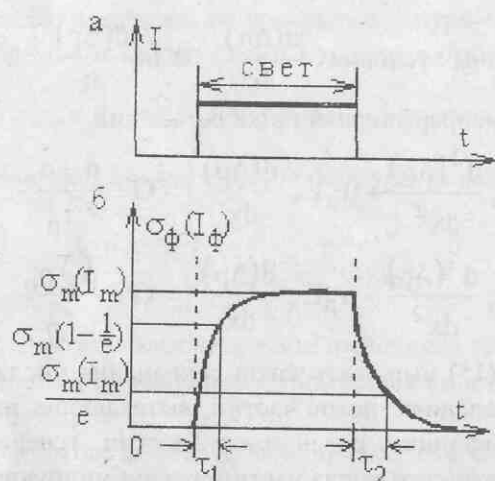


Рис. 7. Релаксация фотопроводимости (б) при возбуждении ее импульсом прямоугольной формы (а) [2.3]

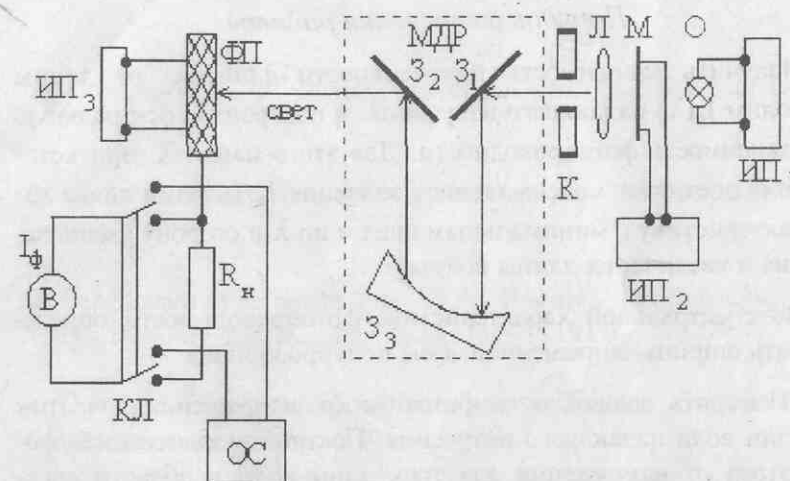


Рис. 8. Схема установки для изучения фотопроводимости полупроводников:

- ИП₁ - источник питания осветителя (В-24м: I=6А).
- О - осветитель.
- М - модулятор света.
- ИП₂ - источник питания модулятора (В5-49: I=210мА, U=10 В).
- Л - линза.
- К - коллиматор.
- З₁, З₂, З₃ - система зеркал и дифракционных решеток оптического монохроматора МДР.
- ФП - фотоприемник типа ФСД на основе CdSe.
- ИП₃ - источник питания приемника (В5-49: I=300мА, U=10 В).
- R_н - нагрузочное сопротивление (режимы: прямой - R₁=1000 Ом. обратный - R₂=10 кОм).
- В - вольтметр.
- ОС - осциллограф.
- КЛ - ключ переключения на вольтметр или осциллограф.
- I₀ - фототок

Порядок выполнения работы

1. Получить зависимость интенсивности фототока от длины волны $I_{\phi}(\lambda)$ падающего излучения и построить спектральную зависимость фотопроводности. Для этого найти λ , при которой достигает максимального значения I_{ϕ} , а затем снять характеристику с минимальным шагом по λ в сторону уменьшения и увеличения длины волны.
2. По спектральной характеристике фотопроводности определить ширину запрещенной зоны полупроводника.
3. Измерить зависимость фототока от напряжения для трех длин волн падающего излучения. Построить зависимость фототока от напряжения для трех длин волн в области спектральной зависимости фотопроводности.
4. Получить осциллограммы нарастания и спада фотопроводности при циклическом освещении полупроводника прямоугольным импульсом света с длиной волны, соответствующей максимальной фотопроводности. Зарисовать осциллограмму и оценить время жизни τ неравновесных носителей.

Контрольные вопросы

1. Что такое внутренний фотоэффект? Как появляются неравновесные носители в полупроводнике?
2. Как изменяется проводимость полупроводника при освещении?
3. Как изменяется проводимость полупроводников в зависимости от длины волны падающего света и почему?
4. Запишите уравнение непрерывности фототока для одномерного случая и проанализируйте его
5. Как определить время жизни неравновесных носителей?
6. Можно ли по спектральной характеристике фотопроводности определить энергию оптического возбуждения носителей?

Литература

1. Елифанов Г. И. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977. 288 с.
2. Шалимова К. В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985. 391 с.
3. Верещагин И. К., Косяченко Л. А., Кокин С. М. Введение в оптоэлектронику. М.: Высшая школа, 1991. 191 с.
4. Полупроводниковые фотоприемники / Под ред. Стафеева В. И. М.: Радио и связь, 1984. 216 с.

Составитель
Владимир Пантелеймонович Малиненко

Фотопроводимость полупроводников

Методические указания к лабораторной работе для студентов 4 курса
специальности «Твердотельная электроника
и микроэлектроника»

Редактор
Т.Н. Музалева

ЛР №040110 от 10.11.96
Гигиенический сертификат
№10.КЦ.34.953.П.00136.03.99 от 05.03.99

Подписано в печать 29.03.2000
Форма 60×84¹/₁₆. Бумага газетная.
Офсетная печать.
1 уч.-изд.л. 6 усл.кр.-отт.
Тираж 100 экз. Изд. №65

Издательство Петрозаводского государственного университета
185640, Петрозаводск, пр. Ленина, 33



ИЗДАТЕЛЬСТВО ПЕТРОЗАВОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

**PETROZAVODSK STATE UNIVERSITY
PRESS**

Издательство Петрозаводского государственного университета основано в 1991 г. Ежегодно издается свыше 150 наименований учебной, методической и научной литературы. В 1998 г. Издательство ПетрГУ вошло в список базовых издательств Российского гуманитарного научного фонда.

Тематика изданий:

- история, философия, филология, культурология;
- юриспруденция, политология;
- медицина, биология, химия, сельское хозяйство;
- физика, математика, кибернетика;
- лесное хозяйство;
- архитектура, строительство.

Подробную информацию о наличии изданий и условиях их приобретения можно получить в Internet по адресу
<http://epsilon.cs.karelia.ru/~psupress/homepg.htm>

Адрес: 185640, Республика Карелия,
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33
Петрозаводский госуниверситет,
Издательство ПетрГУ

Контактные телефоны: (814-2) 77-15-40
(814-2) 76-96-39

Факс: (814-2) 71-10-00

E-mail: afil@mainpgu.karelia.ru

**Приглашаем к взаимовыгодному сотрудничеству
издательства, оптовые фирмы
и библиотечные коллекторы**