

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДИОДОВ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» и
направления «Электроника и микроэлектроника»
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

Квасница Мирон Степанович

Исследование энергетических и спектральных характеристик фотодиодов: методические указания к лабораторной работе для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» и направления «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства» / М.С. Квасница; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. - 12 с.

Данная лабораторная работа посвящена определению энергетических и спектральных характеристик фотодиодов, а именно, исследованию спектральной чувствительности фотодиода, а также зависимости интегральной чувствительности фотодиода от величины обратного смещения р-п перехода.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «Приборы квантовой электроники и фотоники» и по направлению «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства» по курсу «Квантовые и оптоэлектронные приборы и устройства»

©Квасница Мирон Степанович, 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ

Зав.кафедрой ЭП

_____ С.М. Шандаров

«__» _____ 2012 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДИОДОВ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» и
«Электроника и микроэлектроника»
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

Разработчик

к.т.н., доц. каф.ЭП

_____ М.С. Квасница

_____ 2012 г

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Теоретическая часть.....	5
1.1 Принцип работы фотодиода.....	5
1.2 Энергетические и спектральные характеристики фотодиодов.....	6
1.3 Контрольные вопросы.....	9
2 Экспериментальная часть.....	9
2.1 Схема установки и ее описание.....	9
2.2 Задание.....	10
2.3 Методические указания по выполнению работы.....	10
2.4 Содержание отчета.....	11
Список литературы.....	11

Введение

Данная лабораторная работа посвящена определению энергетических и спектральных характеристик фотодиодов, а именно, исследованию спектральной чувствительности фотодиода, а также зависимости интегральной чувствительности фотодиода от величины обратного смещения р-n перехода.

1 Теоретическая часть

1.1 Принцип работы фотодиода

В фотодиодах используется одна из разновидностей внутреннего фотоэффекта, называемая фотовольтаическим эффектом. Этот эффект наблюдается в неоднородных полупроводниковых структурах с р-n - переходом или другим видом потенциального барьера. Внутренние электрические поля, существующие в таких структурах, создают благоприятные условия для пространственного разделения носителей заряда разного знака, возникающих в результате фотоактивного поглощения света. Следовательно, в указанных структурах появляется фото-ЭДС при их освещении, а во внешней цепи – фототок.

При освещении полупроводниковой структуры фотонами с энергией $h\nu$ большей, чем ширина запрещенной зоны E_d ($h\nu > E_d$) происходит генерация электронно-дырочных пар. Поведение неравновесных носителей зависит от того, где они возникают, т.е. в каком месте структуры поглощается излучение. Для каждой области важным является поведение неосновных носителей, поскольку именно их плотность может изменяться при освещении в широких пределах. Плотность основных носителей с обеих сторон границы раздела полупроводников р- и n-типа практически остается неизменной. Если излучение поглощается в р-области, то образовавшиеся электроны, находящиеся на расстоянии от р-n – перехода меньшим длины диффузии L_n , смогут достичь его. Потенциальный барьер способствует переходу электронов в n-область. Аналогично, если излучение поглощается в полупроводнике n-типа, то через переход в р-область перебрасываются только дырки. Если же электроны и дырки генерируются в области объемного заряда, то после р-n – перехода «разводит» носители заряда таким образом, что они оказываются в той области, где являются основными. Следовательно, р-n – переход играет роль тока неосновных носителей заряда.

Результатом пространственного разделения неравновесных носителей заряда является уменьшение потенциального барьера перехода на определенную величину ΔU . Это можно представить как следствие частичной нейтрализации объемного заряда р-n – перехода. Уровни Ферми в объеме полупроводниковой структуры оказываются смещенными друг относительно друга на ΔU . Разность потенциалов, возникающая на контактах диода, зависит от сопротивления внешней цепи и достигает максимального

значения при ее разрыве (режим холостого хода). Генерация вентильного фото-ЭДС при засветке р-п – перехода является основой функционирования фотоэлектрических преобразователей энергии, например, солнечных батарей и фотоприемников, работающих в вентильном режиме. Однако основным режимом работы является фотодиодный режим работы, когда на р-п – переход подается запирающее напряжение.

Гетеропереходы, используемые при изготовлении фотодиодов, представляют собой контакт двух различных по химическому составу материалов, осуществленный в одном кристалле. Следовательно, гетеропереход является контактом материалов с разной шириной запрещенной зоны, отличающихся зонными структурами, эффективными массами электронов и дырок по обе стороны границы раздела, подвижностями и другими параметрами. Данное обстоятельство приводит к разрывам в зонной диаграмме гетероперехода (в валентной зоне на ΔE_v , в зоне проводимости на ΔE_c), что обуславливает особенности прохождения электрического тока через такие структуры, в первую очередь, одностороннюю инжекцию носителей тока из широкозонного материала в узкозонный и суперинжекцию. Инжекционные токи электронов и дырок в первом приближении отличаются на величину

$$\exp\left[\frac{(\Delta E_v + \Delta E_c)}{kT}\right]$$

где k - постоянная Больцмана;
 T – абсолютная температура.

1.2 Энергетические и спектральные характеристики фотодиодов

Как отмечалось выше, при освещении фотодиода происходит генерация электронно-дырочных пар. Электрическое поле перехода разделяет неравновесные носители заряда. Ток, образованный этими носителями, совпадает по направлению с обратным током р-п – перехода. Поэтому вольт-амперную характеристику фотодиода можно представить в виде

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) - I_\phi$$

где I_0 – ток насыщения;
 I_ϕ – фототок;
 q – заряд электрона;
 U – напряжение, приложенное к р-п – переходу.

В вентильном режиме $U=0$, в фотодиодном $U<0$, то есть на р-п – переход подается обратное смещение.

Величина фототока I_ϕ определяется коэффициентом поглощения света α , размером базы по направлению света l , световым потоком Φ , равным произведению освещенности на площадь фоточувствительной поверхности фотодиода Q и другими параметрами. В общем случае

$$I_\phi = qQ\alpha l\eta\Phi$$

где η - эффективность регистрации (вероятность поглощения отдельного кванта света).

Данное соотношение является справедливым и в более реальном случае, когда интенсивность света спадает по экспоненциальному закону.

При достаточно больших обратных напряжениях вольт-амперная характеристика диода запишется как

$$I = -I_0 - qQ\alpha l\eta\Phi$$

то есть ток не зависит от напряжения, определяется только интенсивность регистрирующего света.

Ширина базы фотодиода существенно меньше длины диффузии неосновных носителей, по этому их значительная часть доходит до р-п – перехода. Потери этих носителей происходят вследствие рекомбинации их в объеме плазмы и особенно на ее поверхности. Более полное разделение неосновных носителей происходит в диффузионных переходах, в базе которых внутреннее электрическое поле ускоряет их движение к р-п – переходу.

Темновое сопротивление фотодиода может быть много больше, чем у фоторезистора, поскольку оно определяется обратным током р-п – перехода, который имеет небольшое значение (особенно в кремнии). Следовательно отношение темнового сопротивления к сопротивлению при освещении у фотодиода также выше.

При использовании фотодиода для приема света удобно пользоваться понятием монохроматической чувствительности (специальной чувствительности S_λ) как меру реакции фотоприемника на оптическое излучение с длиной волны λ :

$$S_\lambda = \frac{dU}{d\Phi_\lambda}, [B/Bm]$$

или

$$S_{\lambda} = \frac{dI}{d\Phi_{\lambda}}, [A/Bm]$$

где U – напряжение на нагрузке фотодиода;
 I – ток фотодиода;
 Φ_{λ} – световой поток с длиной волны λ .

Интегральная чувствительность S отражает меру реакции фотоприемника на световой поток Φ заданного спектрального состава

$$S = \frac{dU}{d\Phi} \quad \text{или} \quad S = \frac{dI}{d\Phi}$$

Для фотодиодов характерно такое понятие как минимально различимый сигнал Φ_{\min} – та величина светового потока, которая на выходе фотоприемника создает сигнал, равный шуму. Так как интенсивность белого шума пропорциональна корню квадратному из полосы пропускания Δf , то вводят понятие эквивалентная мощность шума NEP (Noise Equivalent Power)

$$NEP = \frac{\Phi}{\sqrt{\Delta f}} \frac{U_{ш}}{U_c}, [Bm/\Gamma u^{1/2}]$$

где $U_{ш}$ – шумовое напряжение;
 U_c – сигнальное напряжение на выходе фотодиода.

Величину обратную NEP называют обнаружительной способностью D

$$D = \frac{1}{NEP}, [\Gamma u^{1/2}/Bm]$$

Если обнаружительную способность D пронормировать на площадь A чувствительной области фотодиода (шум пропорционален \sqrt{A}), то полученную величину называют детектирующей способностью фотоприемника

$$D^* = \sqrt{AD}, [m\Gamma u^{1/2}/Bm]$$

Помимо указанных параметров фотодиоды характеризуются также инерционностью. В общем случае инерционность фотодиодов определяется тремя процессами: временем диффузии или дрейфа неравновесных носителей через базу, временем их пролета через область объемного заряда

p-n – перехода и постоянной времени RC – цепи, образованной емкостью p-n – перехода и сопротивлением нагрузки. Инерционность фотодиода определяет его полосу пропускания Δf . Значения параметра Δf зависят от типа фотодиода, его конструктивных особенностей и, в лучшем случае составляет $\approx 10^{10}$ Гц.

1.3 Контрольные вопросы

1. Принцип работы фотодиода
2. Особенности конструкции и режимов работы лавинных и p-i-n фотодиодов
3. Понятие общей чувствительности и спектральной чувствительности
4. Характеристики зависимости чувствительности от длины волны λ регистрируемого излучения для фотодиодов на основе германия и кремния
5. Чем обусловлены преимущества фотодиодов, созданных на основе гетероструктур
6. Характерный вид зависимости чувствительности от длины волны регистрируемого излучения для фотодиодов на основе гетероструктур
7. Чем обусловлена практически постоянная спектральная чувствительность фотодиодов на основе гетероструктур
8. Что такое «обнаружительная способность фотодиода»
9. Чем обусловлено появление шумов на выходе фотодиода

2 Экспериментальная часть

2.1 Схема установки и ее описание

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.1.

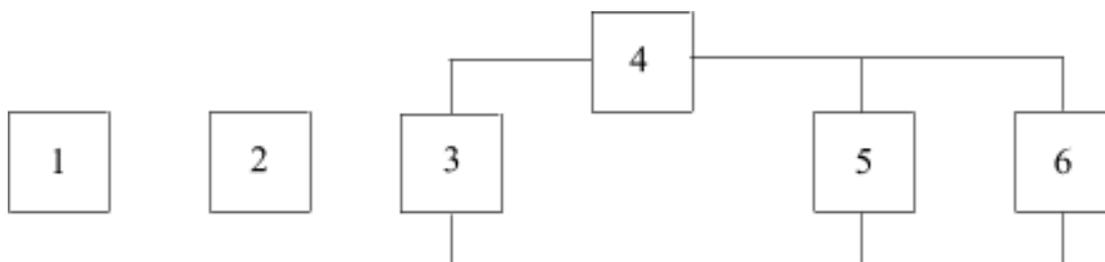


Рис. 3.1 Схема экспериментальной установки

На данном рисунке:

- 1 – источник некогерентного излучения;
- 2 – оптические стекла (фильтры);
- 3 – исследуемый фотодиод;
- 4 – микроамперметр;

- 5 – вольтметр;
- 6 – регулируемый источник напряжения.

2.2 Задание

1. Соберите установку согласно приведенной схеме.
2. Исследуйте зависимость интегральной чувствительности от величины обратного смещения.
3. Определите вольт-амперную характеристику фотодиода.
4. Исследуйте спектральную чувствительность фотодиода.

2.3 Методические указания по выполнению работы

Источник немонохроматического излучения представляет собой лампу накаливания. Спектр излучения лампы можно подбирать путем изменения напряжения, подаваемого на данную лампу. Предполагается, что при фиксированном напряжении питания лампы спектр $f(\lambda)$ регистрируемого излучения во времени постоянен.

Используемые оптические фильтры представляют собой оптические среды с известным коэффициентом поглощения $\alpha(\lambda)$. Значения $\alpha(\lambda)$ приведены в их паспортных данных. Коэффициент ослабления излучения в этом случае равен $\exp(-\alpha(\lambda))$.

Методика определения спектральной чувствительности $S(\lambda)$ фотодиода состоит в следующем. При неизменном спектре $f(\lambda)$ источника света и различных оптических фильтрах снимаются показания фотоприемника. Затем производится совместная обработка полученных данных. Практически это означает выполнение следующих этапов:

1. Определить интервал длин волн излучения, в котором будет оцениваться спектральная чувствительность фотодиода. Этот интервал будет определяться материалом полупроводника фотодиода, спектром источника излучения, а так же диапазоном изменения коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$.

2. Разбить вышеуказанный интервал на n участков. По существу это означает переход к дискретным значениям $f(\lambda), S(\lambda), \alpha(\lambda)$. Путем интерполяции привести в соответствие паспортные данные оптических фильтров к интервалу длин волн и числу n его разбиения.

3. Составить на основе экспериментальных результатов систему алгебраических уравнений, в которых в качестве неизвестных будут $f(\lambda_i)$ и $S(\lambda_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Для повышения точности определения $S(\lambda_i)$ использовать ситуацию, в которой число уравнений больше числа неизвестных. Обосновать линейность данной системы уравнений. Показать, что задача оценки спектральной чувствительности $S(\lambda_i)$ является частным случаем задачи восстановления изображений по интегральным проекциям.

4. Численно решить полученную систему уравнений. Полученные оценки спектров $f(\lambda_i)$ и $S(\lambda_i)$ сравнить с теоретическими.

2.4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) введение;
- 3) описание макета, и методику измерений;
- 4) основные расчетные соотношения;
- 5) результаты работы и их анализ;
- 6) выводы;
- 7) список используемой литературы.

Список литературы

1. Киселев Г.Л. Квантовая и оптическая электроника. – СПб.: Изд-во "Лань", 2011. – 320 с. - 2-е изд. испр. и доп.. ISBN: 978-5-8114-1114-6 http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=627
2. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника - СПб.: Изд-во "Лань", 2011. – 528 с ISBN: 978-5-8114-1136-8 http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=684
3. Колебания, волны, структуры / Н. В. Карлов, Н. А. Кириченко. - М. : Физматлит, 2003. - 496 с. : ил. - ISBN 5-9221-0205-2
4. Оптоэлектроника : Пер. с фр. / Э. Розеншер, Б. Винтер ; ред. пер. О. Н. Ермаков. - М. : Техносфера, 2006. - 588[4] с. : ил. - (Мир электроники ; VII - 04) - ISBN 5-94836-031-8
5. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник для ВУЗов.- М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.

Учебное пособие

Квасница М.С.

Исследование энергетических и
спектральных характеристик фотодиодов

Методические указания к лабораторной работе

Усл. печ. л. _____ Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40