

Лабораторная работа 3.66.
ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА
Ю.В. Коробкин

Цель работы: определить интегральную и спектральную чувствительность полупроводникового фотоэлемента, оценить ширину запрещенной зоны полупроводникового материала.

Задание: по экспериментально полученному графику определить интегральную чувствительность фотоэлемента γ . Из графика $\gamma_{\lambda, \text{отн.ед}} = f(\lambda)$ найти λ_{max} и оценить ширину запрещенной зоны ε_0 полупроводникового материала фотоэлемента.

Подготовка к выполнению лабораторной работы: изучить элементы зонной теории полупроводников, объяснить работу вентильного фотоэлемента, освоить методику измерений и порядок расчетов, ответить на контрольные вопросы.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1987, т.3, гл. IX, §65, гл. VIII, §57, гл. I, §7.
2. Оптика и атомная физика: Лабораторный практикум по физике (Под ред. Солоухина). – Новосибирск: Наука, 1976, с. 8-10.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение внешнего фотоэффекта.
2. Что называется внутренним фотоэффектом?
3. При контакте каких материалов создается p - n переход?
4. Дайте определение спектральной чувствительности фотоэлемента.
5. Что называется интегральной чувствительностью фотоэлемента?
6. Какой формулой пользуются для расчета интегральной чувствительности фотоэлемента?
7. Какова формула для расчета спектральной чувствительности фотоэлемента?

8. В каких единицах принято измерять интегральную чувствительность фотоэлемента?
9. Каков рабочий диапазон длин волн монохроматора УМ-2?
10. От чего зависит ширина спектрального интервала $\Delta\lambda$, выделяемого монохроматором?
11. Какой источник света используется для градуировки монохроматора УМ-2?
12. Запишите формулу для определения ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов

Основы теории фотоэффекта

Явление вырывания электронов из вещества под действием падающего света называется фотоэлектрическим эффектом. Фотоэффект устанавливает непосредственную связь между электрическими и оптическими явлениями. Различают внешний, внутренний и фотоэффект в запирающем слое.

Явление внешнего фотоэффекта состоит в испускании электронов твердыми телами при воздействии на них излучения. Эйнштейн (развив квантовую теорию Планка) предложил, что свет излучается, распространяется и поглощается веществом в виде квантов (фотонов), энергия которых равна:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (1)$$

Энергия ε идет на работу выхода A электрона из металла и на приобретение кинетической энергии T

$$\varepsilon = A + T. \quad (2)$$

При взаимодействии фотона с энергией ε с электронами твердого тела часть энергии фотона тратится на вырывание электрона из твердого тела, а остаток реализуется в виде кинетической энергии T высвободившегося из твердого тела электрона. Работой выхода A называется минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из твердого тела.

Уравнение (2) носит название уравнения Эйнштейна. В (1) и (2): h – постоянная Планка; ν – частота; λ – длина волны монохроматического излучения; T – кинетическая энергия электрона вне твердого тела.

Внутренний фотоэффект так же, как и внешний, возникает при облучении веществ светом, с той лишь разницей, что при внутреннем фотоэффекте происходит не испускание электронов с поверхности, а увеличение проводимости материала или возникновение ЭДС на p - n переходе (в запирающем слое). Такой переход образуется во внутренней области кристаллического полупроводника, где меняется тип легирующей примеси (с акцепторной на донорную) и связанный с этим тип проводимости (с дырочной на электронную).

Если контакт между полупроводниками p - и n -типа отсутствует, то уровни Ферми на их энергетических схемах (рис. 1а) расположены на разной высоте. В полупроводнике p -типа уровень Ферми расположен ближе у валентной зоне, а в n -типа – ближе к зоне проводимости. При возникновении контакта (рис. 1б) происходит обмен носителями тока, в результате которого уровни Ферми выравниваются.

В приконтактной области образуется так называемый запирающий слой, обедненный основными носителями тока: электронами со стороны электронного полупроводника, дырками со стороны дырочного полупроводника. Ионы примесей этого слоя создают положительный объемный заряд в n -области и отрицательный – в p -области. Между p - и n -областями возникает контактная разность потенциалов, препятствующая движению основных носителей. Если в отсутствии освещения закоротить наружные концы двух областей p - n -перехода, то тока в цепи не будет. Это означает, что в состоянии равновесия суммарный ток, созданный движением основных и неосновных носителей через контактный переход, равен нулю. При освещении полупроводника n -типа фотонами, обладающими необходимой энергией, образованные светом дырки проходят запирающий слой в обратном направлении и, скапливаясь на внешней границе p -полупроводника, создают постоянную разность потенциалов U . Если теперь соединить проводником обе граничные поверхности, то через него потечет ток. Указанная разность потенциалов U является электродвижущей силой по отношению к замкнутой цепи. Эта ЭДС создает в проводнике фотоэлектрический ток I , который

пропорционален падающему световому потоку Φ .

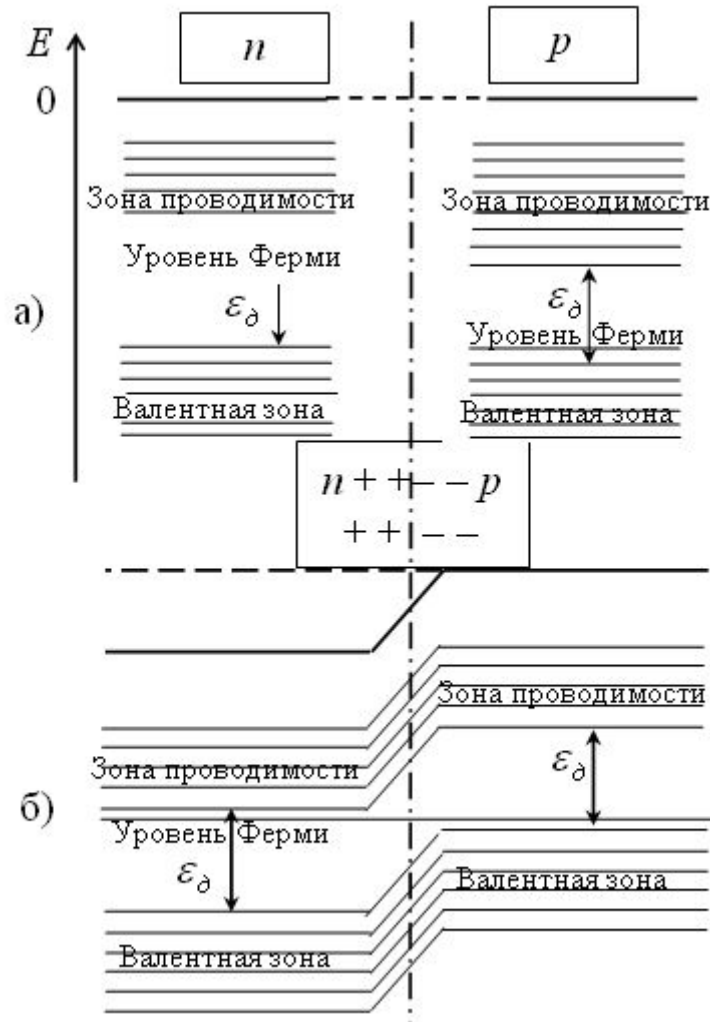


Рис. 1. Зонная диаграмма полупроводников *n*- и *p*-типа без контакта друг с другом (а) и в контакте друг с другом (б)

Приборы, в которых фотоэффект используется для превращения энергии света непосредственно в электрическую, называются фотоэлементами с запирающим слоем или вентильными фотоэлементами. Они используются в качестве солнечных батарей на искусственных спутниках Земли, в качестве индикаторов радиоактивного излучения, в целях контроля и автоматического управления различными процессами.

Рассмотрим устройство кремниевого вентильного фотоэлемента (рис. 2). Из монокристалла кремния *n*-типа вырезают пластинку 1, на поверхности которой формируется тонкая пленка 2

кремния p -типа. Контакт внешней цепи с p -областью осуществляется через металлический контакт 3 в виде напыленной полоски. Для создания контакта 4 с n -областью часть наружной пленки сошлифовывается.

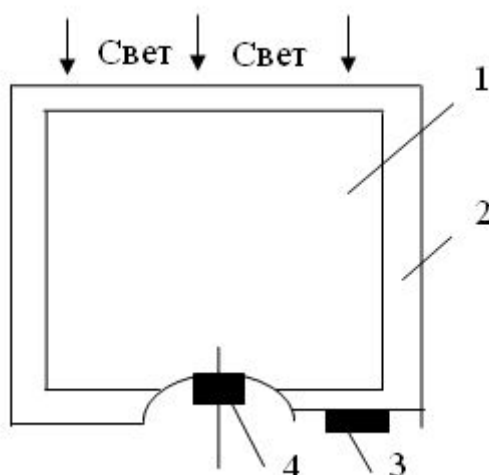


Рис. 2. Устройство кремниевого вентильного фотоэлемента

Поток света Φ легко проходит через слой p -типа и поглощается n -типом. Если фотоэлемент соединить проводниками с микроамперметром, то он покажет фототок I . Фототок I пропорционален световому потоку Φ

$$I = \gamma\Phi, \quad (3)$$

где γ — интегральная чувствительность фотоэлемента (основная его характеристика). В свою очередь

$$\Phi = ES, \quad (4)$$

где E — освещенность фотоэлемента; S — площадь кремния p -типа, на которую падает световой поток.

Подставим (4) в (3), получим:

$$\gamma = \frac{I}{ES} = \frac{I}{\Phi}. \quad (5)$$

В (3) и (5) обычно фототок измеряют в микроамперах, освещенность — в люксах, световой поток — в люменах. Тогда в СИ чувствительность фотоэлемента имеет размерность

$$[\gamma] = \text{мкА/лм}. \quad (6)$$

Таким образом, интегральная чувствительность — это величина

фототока, отнесенная к одному люмену потока световой энергии.

Интегральная чувствительность вакуумных фотоэлементов имеет значение от нескольких микроампер на люмен до 100 мкА/лм, полупроводниковых – от 500 до 20000 мкА/лм.

Если фотоэлемент последовательно освещать монохроматическими источниками с разными длинами волн λ , имеющими одинаковую интенсивность, то величина фототока будет зависеть от длины волны падающего света. Поэтому наряду с интегральной чувствительностью вводится понятие спектральной чувствительности.

Спектральная чувствительность γ_λ измеряется отношением силы фототока к величине падающего на фотоэлемент потока световой энергии Φ_λ в узком интервале длин волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$

$$\gamma_\lambda = \frac{I}{\Phi_\lambda}. \quad (7)$$

Простейший способ получения спектральной характеристики фотоэлемента заключается в том, что на последний направляют при помощи монохроматора свет одинаковой интенсивности, но разной длины волны, и измеряют соответствующую величину фототока.

На практике интенсивность стандартных тепловых источников света меняется в зависимости от длины волны излучения. Поэтому, если перед монохроматором поставить лампу накаливания и, вращая барабан, выделить различные участки излучаемого лампой спектра, то интенсивность выходящего света будет неодинаковой. Величина энергии для каждого значения λ определяется на основании законов теплового излучения. Зависимость спектральной плотности излучательной способности r_λ вольфрама (энергия, излучаемая в интервале длин волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$) от λ приведена на рис. 3.

Поток световой энергии Φ_λ (из формулы (7)) пропорционален r_λ . Коэффициент пропорциональности зависит от многих трудно учитываемых факторов, как то: потери света в монохроматоре, ширины входной и выходной щелей, потемнение со временем баллона лампы накаливания и т.п. Поэтому в данной работе спектральная чувствительность фотоэлемента определяется в относительных единицах:

$$\gamma_{\lambda} = \frac{I}{r_{\lambda}}. \quad (8)$$

Опыт показывает, что максимум спектральной чувствительности фотоэлемента наблюдается в том случае, когда энергия поглощенного кванта $\varepsilon = hc/\lambda$ сравнима с шириной запрещенной зоны ε_0 полупроводникового материала. Поэтому по зависимости $\gamma_{\lambda} = f(\lambda)$ можно оценить ширину запрещенной зоны Se или другого полупроводникового материала, из которого сделан фотоэлемент. Зонная теория твердого тела достаточно сложна, и ознакомиться с ней необходимо по учебнику [1].

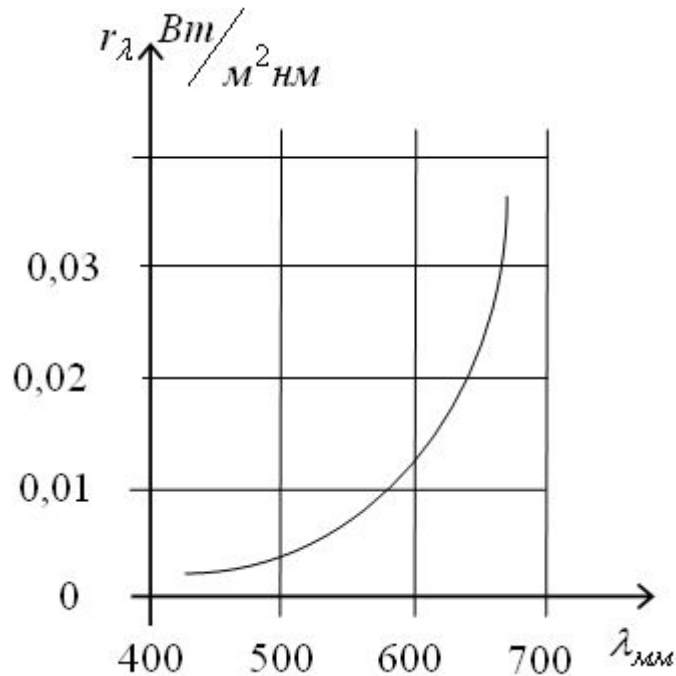


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности излучательности r_{λ} вольфрама от длины волны λ

Описание аппаратуры и методов измерения

При определении интегральной чувствительности фотоэлемента в качестве скамьи используется свободная часть рельса монохроматора, расположенная перед входной щелью 3 (рис. 4).

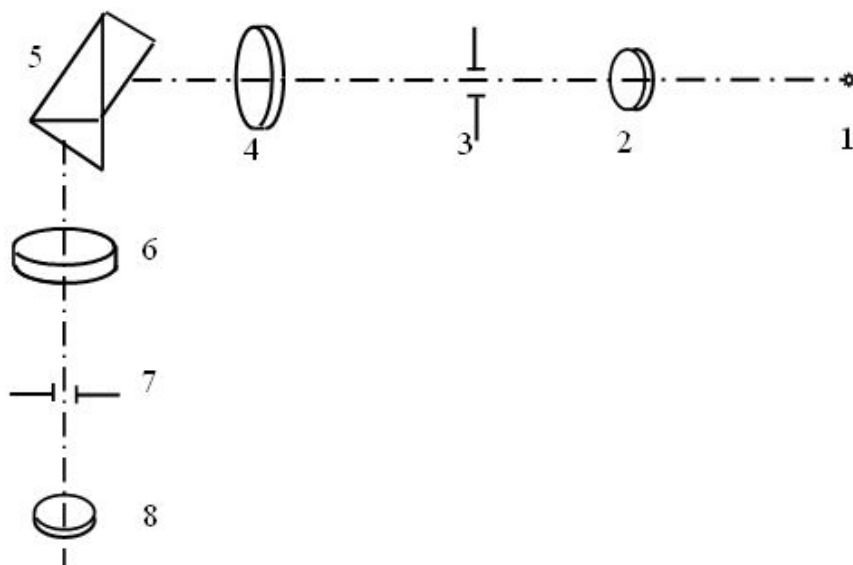


Рис. 4. Оптическая схема монохроматора УМ-2

На этом конце оптической скамьи устанавливают фотоэлемент 8 перед источником белого света 1. Центр нити лампы 1 должен находиться на одной горизонтальной оси с геометрическим центром фотоэлемента 8.

Площадь фоточувствительного слоя фотоэлемента 8 известна. Зависимость светового потока Φ от расстояния между данным источником и фотоэлементом r дана в приложении (табл. 1). Меняя расстояние между лампочкой и фотоэлементом, снимают зависимость фототока I от r .

Для определения спектральной чувствительности фотоэлемента в качестве прибора, позволяющего получить на выходе пучок света определенной длины волны, используется монохроматор УМ-2 (рабочий диапазон 380-1000 нм), оптическая схема которого изображена на рис. 4. Источником света служит вольфрамовая лампа накаливания. Распределение r_λ по спектру лампы при 2800 К дается в приложении (табл. 2).

Свет от лампы 1, проходя конденсатор 2, попадает через входную щель 3 монохроматора на объектив коллиматора 4 и параллельным пучком проходит через призму 5. Под углом 90° к падающему пучку света помещается выходная (зрительная) труба 8; 7 – съемная выходная щель. Поворачивая столбик с призмой 5 на различные углы относительно падающего света, получают в

выходной щели монохроматический свет различной длины волны.

Монохроматор отградуирован, и график, показывающий какой длине волны λ излучения соответствует каждое деление барабана φ , прилагается к прибору. Примерный график зависимости φ от λ приведен на рис. 5. Дисперсия призмы не является линейной функцией угла поворота и, следовательно, угла поворота барабана. Поэтому зависимость $\varphi = f(\lambda)$ также является нелинейной.

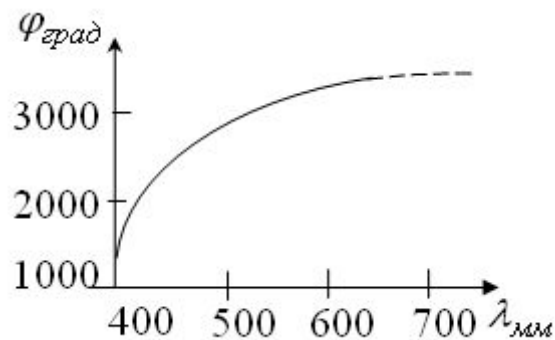


Рис. 5. Градуировочная кривая

Для градуировки в видимой области спектра была использована ртутно-кварцевая лампа.

Для измерения фототока применяется микроамперметр М-95. В комплекте с шунтом этот прибор позволяет измерить токи от 0,002 до 10^{-2} мкА.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Измерение интегральной чувствительности фотоэлемента

1. Знакомятся с работой многопредельного миллиамперметра.

2. Устанавливают центр нити лампы на одном уровне с центром светочувствительного слоя фотоэлемента.

3. Отодвигают фотоэлемент на максимальное расстояние от лампы и подключают его к микроамперметру.

4. Подключают лампу к источнику питания (на вилке указано допустимое напряжение). Записывают для этого положения силу фототока I .

5. Передвигают фотоэлемент, уменьшая последовательно

расстояние r каждый раз на 5-10 см. Для каждого его положения записывают I и r в табл. 1.

Упражнение 2. Исследование спектральной чувствительности фотоэлемента

1. Подключают лампочку накаливания I к источнику питания и добиваются равномерного освещения входной щели монохроматора.

2. Фотоэлемент поворачивают светочувствительным слоем к выходной щели монохроматора и придвигают его вплотную к щели. Закрывают его черными сукном.

3. Вращая барабан, поворачивают призму и тем самым подводят к входной щели поочередно различные длины волн. Отсчет углов φ производят против индекса, скользящего по спиральной канавке барабана.

4. Для каждого значения установочного угла φ отсчитывают показания микроамперметра. Результаты измерений φ и I заносят в табл. 2.

Зависимость фототока I от длины волны λ имеет максимум. В районе максимума замеры необходимо производить чаще.

Обработка результатов измерений

Упражнение 1

1. По данным табл. 1 построить график зависимости силы фототока I от величины светового потока Φ , используя при этом зависимость $\Phi(r)$, данную в приложении (табл. 1).

2. По тангенсу угла наклона этой прямой определить интегральную чувствительность фотоэлемента.

Упражнение 2

1. По градуировочному графику найти λ для заданных углов и занести в табл. 2.

2. Начертить график $I=f(\lambda)$.

3. Используя данные табл. 2 приложения, занести в табл. 2 величины r_λ для всех значений λ .

4. Рассчитать γ_λ по формуле (8) для всех длин волн табл. 2.

5. Разделив каждое значение γ_λ на значение γ_λ в максимуме, получить значение γ_λ в отн. ед. На графике $I = f(\lambda)$ построить график γ_λ (в относительных единицах) = $f(\lambda)$ и найти λ_{\max} , соответствующее максимальному значению γ_λ (в относительных единицах).

6. По значению λ_{\max} оценить ширину запрещенной зоны полупроводникового материала фотоэлемента

$$\varepsilon_\delta = \frac{hc}{\lambda_{\max}}. \quad (9)$$

Перевести значение ε_δ в эВ.

Таблица 1

r , м	I , мкА	Φ , лм

Таблица 2

φ , град	λ , нм	I , мкА	r_λ , Вт/м ² нм	γ_λ , $\frac{\text{мкА} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{нм}}{\text{Вт}}$	γ_λ , отн. ед.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Зависимость светового потока от расстояния

r , м	Φ , 10 ⁻³ лм
1	7,9
0,9	9,4
0,8	11,0

0,7	16,3
0,65	19,0
0,60	22,0
0,55	25,0
0,50	31,0
0,45	40,0
0,40	48,7
0,35	60,3
0,30	89,5
0,25	110,0

Таблица 2

Значение спектральной плотности излучательной способности вольфрама при температуре 2800 К в видимой области спектра

λ , нм	r_{λ} , Вт/м ² нм
420	0,0015
430	0,0018
440	0,0022
450	0,0028
460	0,0033
470	0,0040
480	0,0046
490	0,0052
500	0,0062
510	0,0070
520	0,0080
530	0,0090
540	0,0104
550	0,0110
560	0,0120
570	0,0140
580	0,0152
590	0,0170
600	0,0188
610	0,0206
620	0,0224
630	0,0240
640	0,0260

650	0,0280
660	0,0300
670	0,0326
680	0,0354
690	0,0380
700	0,0400
720	0,0440