

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Д. Б. Золотухин

## **ВНУТРЕННИЙ ФОТОЭФФЕКТ**

Методические указания по выполнению лабораторных работ по  
физике для студентов всех специальностей

Томск  
2023

УДК 537.5

ББК 22.3

**Рецензент**

**Бурдовицин В.А., профессор, доктор техн. наук**

Одобрено на заседании каф. физики протокол №104 от 16.04.23

**Золотухин Денис Борисович**

Внутренний фотоэффект / Д.Б. Золотухин. – Томск: Томский гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 10 с.

Представлена краткая теория явления внутреннего фотоэффекта. Дано описание экспериментальной установки, методики измерений зависимости фототока в полупроводнике от его освещенности световым потоком. Приведена методика обработки результатов измерений.

Для студентов ТУСУРа, обучающихся по всем направлениям подготовки и специальностям.

УДК 537.5

ББК 22.3

© Золотухин Д. Б., 2023  
© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ .....	4
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ .....	5
3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	8
4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	9
5 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	9

## ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является изучение внутреннего фотоэффекта на основе измерения световой характеристики полупроводникового фотоэлемента.

### 1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Внутренним фотоэффектом называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием света. Он проявляется в изменении концентрации носителей тока в среде и приводит к возникновению фотопроводимости или вентильного фотоэффекта. Фотопроводимостью называется увеличение электрической проводимости вещества под действием света. Вентильным фотоэффектом (фотоэффектом в запирающем слое) называется возникновение под действием света электродвижущей силы (фото-ЭДС) в системе, состоящей из контактирующих полупроводника и металла или двух разнородных полупроводников (например, в *p-n* переходе).

Взаимодействие света с полупроводниками представляет собой достаточно сложное явление. Качественно можно рассмотреть простые случаи. К фотопроводимости приводят следующие виды поглощения света:

Собственное или фундаментальное поглощение света приводит к переходу электрона из связанного состояния в свободное. Т.е. электрон под действием света переходит из валентной зоны в зону проводимости. Собственное поглощение возможно лишь при условии, что энергия кванта света превышает ширину запрещенной зоны. Оно приводит к появлению электронов и дырок, участвующих в создании проводимости полупроводника.

Примесное поглощение вызвано ионизацией атомов примеси, т.е. переходом электрона с примесного уровня в зону проводимости или из валентной зоны на уровень примеси. При этом также возникают носители заряда, участвующие в проводимости.

Поглощение света свободными носителями заряда. Электрическое поле световой электромагнитной волны может ускорять свободные носители заряда, при этом происходит её ослабление. Этот вид поглощения не приводит к изменению

концентрации носителей заряда, однако при этом нарушается равновесное распределение носителей заряда по состояниям. Они становятся более «горячими», и их подвижность увеличивается, что приводит к изменению проводимости.

В любом случае, изменение электрического сопротивления полупроводника можно описать величиной световой проводимости:

$$\gamma_{св} = eb_n \cdot \Delta n + eb_p \cdot \Delta p \quad (1.1)$$

где  $e$  – элементарный заряд,  $b_n, b_p$  – подвижности электронов и дырок соответственно,  $\Delta n$  и  $\Delta p$  – избыточная концентрация электронов и дырок, создаваемая светом.

Если  $\gamma_{св}$  растет при освещении светом, то это положительный фоторезистивный эффект, если уменьшается, то отрицательный.

Основная проводимость полупроводника обусловлена тепловым возбуждением и называется темновой  $\gamma_T$ . Полная проводимость  $\gamma$  может быть представлена в виде суммы темновой и световой проводимостей:

$$\gamma = eb_n(n + \Delta n) + eb_p(p + \Delta p) = \gamma_T + \gamma_{св} \quad (1.2)$$

где  $n$  и  $p$  – концентрации электронов и дырок в отсутствие света.

Экспериментально доказано, что количество образующихся зарядов, а, следовательно, и проводимость, пропорциональны световому потоку. Этот рост происходит до стабилизации процессов генерации и рекомбинации носителей заряда при фиксированном световом потоке.

Явление внутреннего фотоэффекта используется в фотодиодах. При освещении  $p$ - $n$  перехода, во внешней цепи появляется фототок, обусловленный рождением дополнительных носителей заряда.

## 2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В работе используется фотодиод ( $p$ - $n$  переход), включенный в обратном направлении, как это показано на рисунке 2.1. Из этого рисунка видно, что внутренний фотоэффект может происходить не при любой частоте падающего света, а только при частоте, превышающей некоторую минимальную частоту, которой соответствует энергия кванта, равная ширине запрещенной зоны  $\Delta E$ . Такая частота света, при которой еще происходит фотоэффект, называется красной границей внутреннего фотоэффекта  $\nu_{кр}$ .

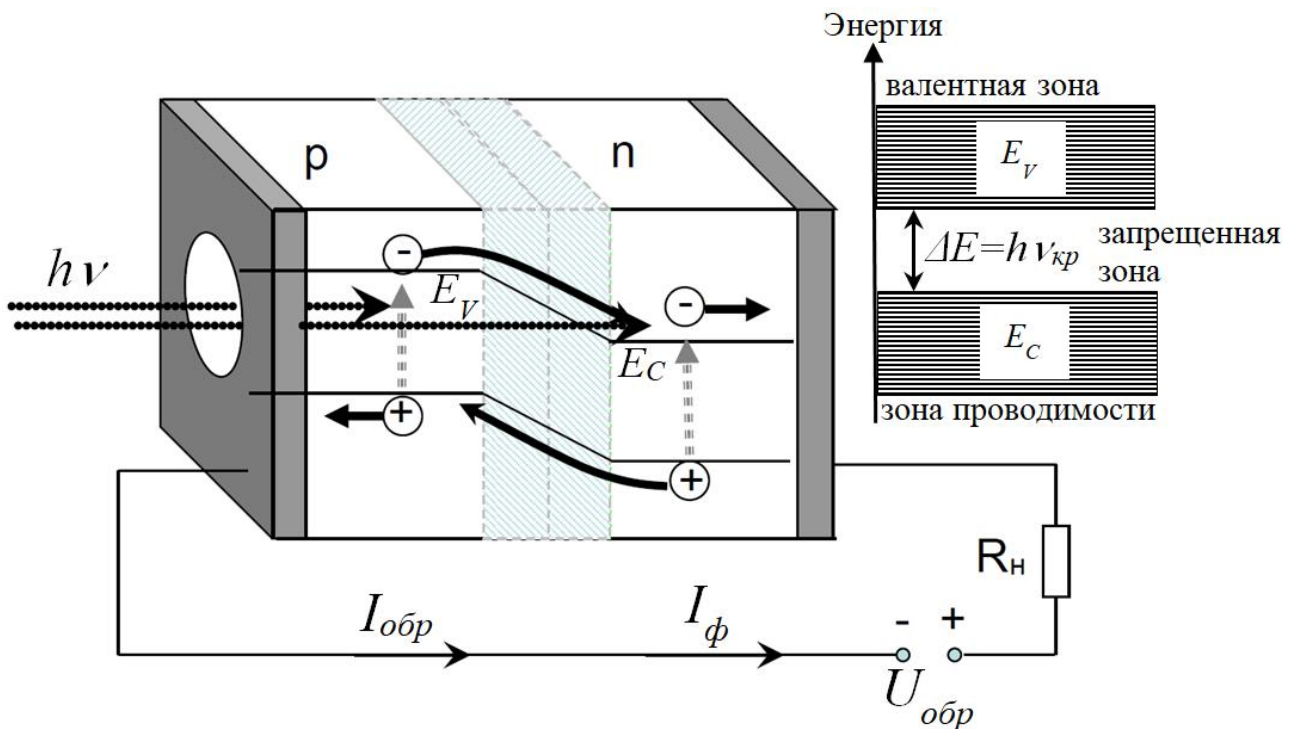


Рисунок 2.1 – Схема включения фотодиода.

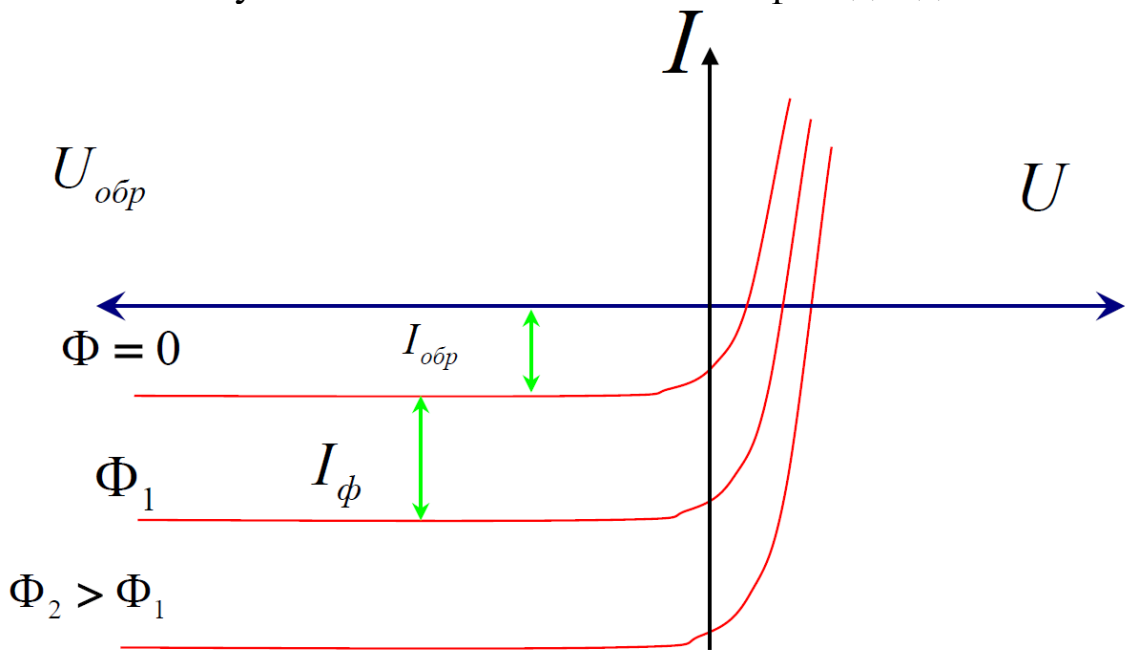


Рисунок 2.2 – Типичное семейство ВАХ для различных световых потоков.

При таком включении ток через  $p$ - $n$  переход можно представить в виде суммы двух составляющих: фототока  $I_\phi$ , определяемого освещенностью, и темного обратного тока  $I_{обр}$  (Рис. 2.2).

Изучение фотоэффекта заключается в подтверждении линейной зависимости между фототоком  $I_\phi$  и световым потоком, падающим на фотодиод. Изменять световой поток можно изменением расстояния  $r$

между источником света и фотодиодом. Действительно, если  $N$  – число фотонов, испускаемых точечным источником света в единицу времени, то число фотонов  $\Phi$ , попадающих на фотодиод (которое пропорционально световому потоку) равно:

$$\Phi = \frac{N}{4\pi r^2} S, \quad (2.1)$$

где  $S$  – освещаемая площадь  $p$ - $n$  перехода.

Т.о., задача сводится к подтверждению линейной зависимости между фототоком  $I_\phi$  и  $1/r^2$ , поскольку коэффициент перед  $1/r^2$  в выражении (2.1) представляет собой константу в условиях постоянства накала источника света.

Конструктивно макет выполнен в виде блока, изображенного на рис. 2.3.

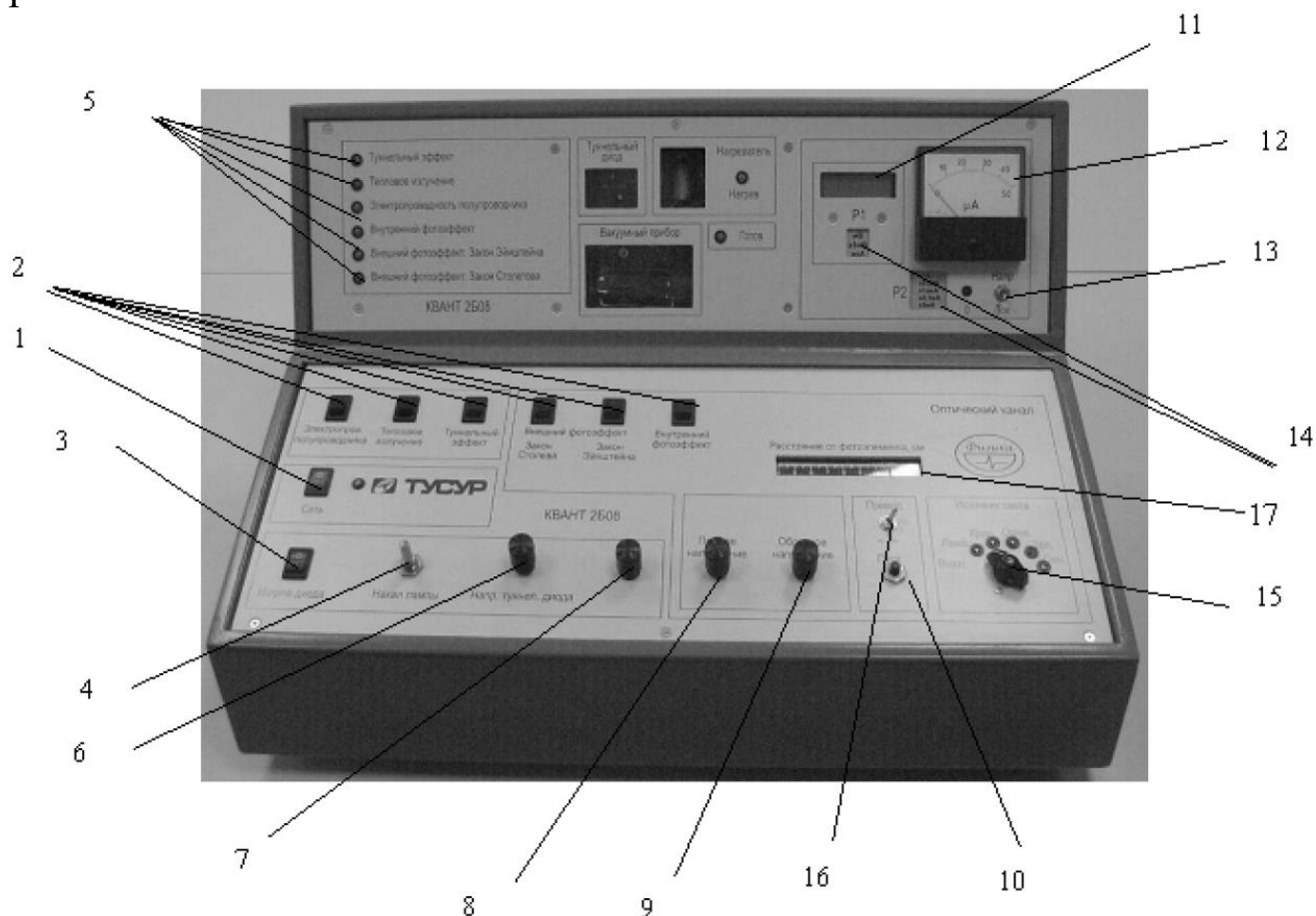


Рисунок 2.3 – Внешний вид установки.

В работе используются выключатели  $1$  «Сеть»,  $2$  «Выбор работы», переключатель  $13$  «Напр.-Ток»,  $16$  «< >», кнопка  $10$  «Пуск»,

рукоятка 15 «Источник света», рукоятка потенциометра 7 и измерительные приборы 11, 12.

### 3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Перед началом работы повернуть все потенциометры против часовой стрелки в крайнее положение. Все кнопки поставить в положение “-”, т.е. «Выкл». Включить установку кнопкой 1 «Сеть», при этом загорится сигнальная лампочка.

3.2. Кнопкой 2 выбрать соответствующую работу.

3.3. Убедиться, что рукоятка 15 «Источник света» поставлена в положение «Выкл». Вращая рукоятку потенциометра 7 снять зависимость (7-10 точек) тока от напряжения на фотодиоде, т.е. темновую вольтамперную характеристику. Результаты измерений занести в таблицу 3.1. **При этом напряжение считывается в милливольтках с цифрового прибора 11 с использованием множителя  $\times 5$  мВ, а ток в микроамперах считывается непосредственно с прибора 12.** Рекомендация. Поскольку темновой ток мал, рекомендуется выставлять напряжение в интервале  $0 \div 1$  В и регистрировать показания токового прибора. Следует иметь в виду, что измерения проводятся на обратной ветви вольтамперной характеристики диода.

3.4. При помощи переключателя 16 и кнопки 10 установить фотодиод максимально близко к источнику света. Расстояние  $r$  вычислить по формуле  $r = r_{изм} - 4,5 \text{ см}$ , где  $r_{изм}$  – расстояние в сантиметрах, считанное по шкале 17 (Рис. 2.3). Записать значение расстояния  $r$  в таблицу 3.1 и включить лампу накаливания, поставив рукоятку 15 в положение «Ламп». Снять вольтамперную характеристику фотодиода.

Рекомендация. Измерения проводить в диапазоне токов от нуля до максимального. Иметь в виду, что фототок равен нулю при положительном напряжении на диоде. Поскольку характеристика резко нелинейна, то в ее начале следует устанавливать ток и измерять напряжение, а затем делать наоборот.

3.5. Повторить п.3.4 для 5-6 других значений расстояния, изменяя их через 0,5 см.

3.6. На одном графике построить семейство вольтамперных характеристик фотодиода. Для каждого значения расстояния



определить фототок  $I_\phi$  на участке насыщения для одного и того же напряжения  $U$ , вычитая темновой ток из полного.

**3.7. Построить график в координатах  $I_\phi$  и  $1/r^2$ . Убедиться в наличии линейной зависимости между фототоком и освещенностью.**

3.8. Сделать выводы по работе.

Таблица 3.1 – Вольтамперные характеристики фотодиода для различных освещенностей.

Темновая		$r, \text{ см} =$		$r, \text{ см} =$		$r, \text{ см} =$		$r, \text{ см} =$		$r, \text{ см} =$	
		$1/r^2 =$		$1/r^2 =$		$1/r^2 =$		$1/r^2 =$		$1/r^2 =$	
U, мВ	I, мкА	U, мВ	I, мкА	U, мВ	I, мкА	U, мВ	I, мкА	U, мВ	I, мкА	U, мВ	I, мкА

#### 4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 4.1. Что называют внутренним фотоэффектом?
- 4.2. Чем внутренний фотоэффект отличается от внешнего?
- 4.3. Какие виды поглощений приводят к появлению фотопроводимости?
- 4.4. Поясните принцип работы фотодиода.
- 4.5. Где можно использовать фотодиоды?
- 4.6. Существует ли красная граница внутреннего фотоэффекта?

#### 5 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

5.1 Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 т. Том 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: Учебник для вузов / И. В. Савельев. — 5-е изд. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 384. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/210611>. (дата обращения: 10.04.23)

5.2 Физические основы твердотельной электроники: Учебно-методическое пособие Томск Издательство ТУСУРа 2019 [Электронный ресурс] / Ю. Г. Юшков [и др.]. — Томск: ТУСУР:

2019. — 152 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/9026>.  
(дата обращения: 10.04.23)

5.3 Зенин, А. А. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике: Методические указания [Электронный ресурс] / А. А. Зенин. — Томск: ТУСУР, 2019. — 20 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8957>. (дата обращения: 10.04.2023).

5.4 Мухачев, В.А. Оценка погрешностей измерений: Методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / В.А. Мухачев. — Томск: ТУСУР, 2012. — 24 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099>. (дата обращения: 10.04.23)