

Федеральное агентство по образованию

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)

Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой физики

\_\_\_\_\_ Е.М. Окс  
\_\_\_\_\_

Физика

ВНУТРЕННИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Руководство к лабораторным работам для студентов  
всех специальностей

Разработчики

профессор кафедры физики

\_\_\_\_\_ В.А. Бурдовицин

\_\_\_\_\_ 2009г.

Доцент кафедры физики

\_\_\_\_\_ М.В. Федоров

\_\_\_\_\_ 2009г.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

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

## 2. 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 ЭДС (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 зо-

ны 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:

$$\gamma_{cv} = eb_n \cdot \Delta n + eb_p \cdot \Delta p. \quad (2.1)$$

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  $\gamma_{cv}$  увеличивается 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:

$$\gamma = eb_n (n + \Delta n) + eb_p (p + \Delta p) = \gamma_T + \gamma_{cv}. \quad (2.2)$$

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

Экспериментально доказано, что количество образующихся зарядов, а, следовательно, и проводимость пропорциональна световому потоку.

Явление внутреннего фотоэффекта используется в полупроводниковых фотодиодах. Фотодиод представляет собой p-n переход, при освещении которого фотонами с энергией превышающей ширину запрещенной зоны полупроводника, происходит генерация дополнительных пар носителей заряда. Неосновные носители заряда, для которых поле p-n перехода является ускоряющим, могут легко преодолеть p-n переход и попасть в смежную область (дырки n-области в область p, а электроны p-области в область n) и тем самым внести свой вклад в общий ток неосновных носителей заряда фотодиода. Таким образом

ток неосновных носителей, вызванный освещением, не зависит от напряжения приложенного к р-п переходу. Он пропорционален световому потоку и называется световым током или фототоком.

### 3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В работе используется фотодиод (р-п переход), включенный в обратном направлении, как это показано на рис.3.1.

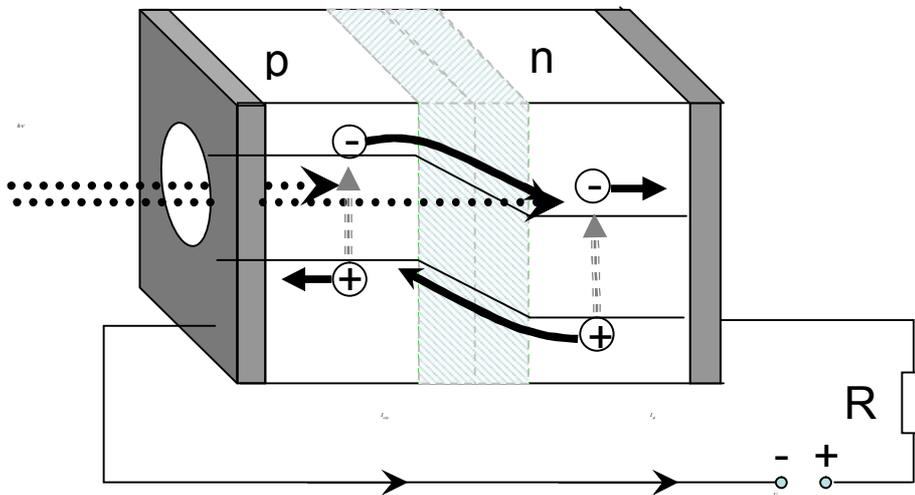


Рисунок 3.1 – Схема включения фотодиода.

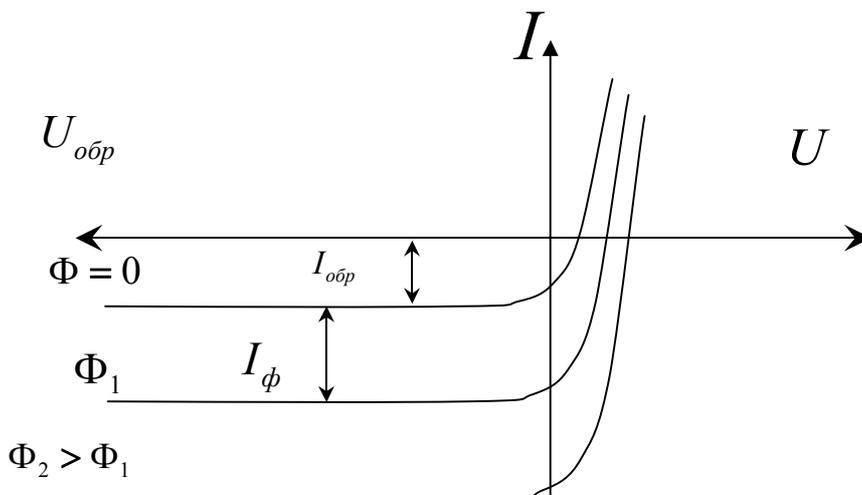


Рисунок 3.2 – Типичное семейство ВАХ для различных световых потоков

При таком включении ток через р-п переход можно представить в виде суммы двух составляющих: фототока  $I_\phi$  определяемого освещенностью и темнового обратного тока  $I_{обр}$ .

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  $N'$ , попадающих на фотодиод (которое пропорционально световому потоку) равно

$$N' = \frac{N}{4\pi r^2} S, \quad (3.1)$$

где  $S$  – освещаемая площадь р-п 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 (3.1) представляет собой константу в условиях постоянства накала источника света.

Конструктивно макет выполнен в виде блока, изображенного на рис. 3.3. 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.

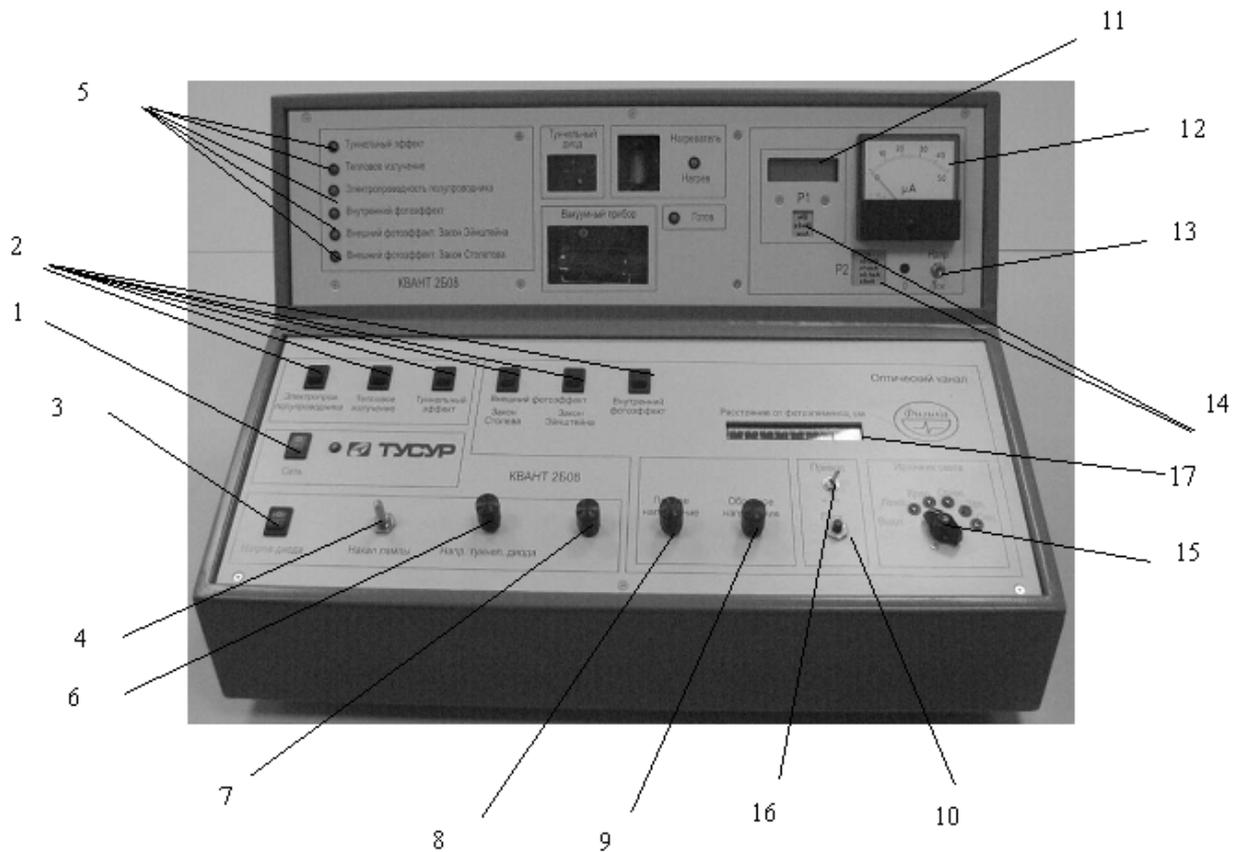


Рисунок 3.3 – Внешний вид установки

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

4.2. Кнопкой 2 выбрать соответствующую работу.

4.3. 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 измере-

ний занести в табл. 4.1. При этом напряжение считывается в **милливольт**ах 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÷1 В и регистрировать показания токового прибора. Следует иметь в виду, что измерения проводятся на обратной ветви вольтамперной характеристики диода.

4.4. При помощи переключателя 16 и кнопки 10 установить фотодиод максимально близко к источнику света. Расстояние  $r$  вычислить по формуле

$$r = r_{изм} - 4,5 см, \quad (4.1)$$

где  $r_{изм}$  – расстояние, считанное по шкале 17 (Рис. 3.3). Записать значение расстояния  $r$  в таблицу 4.1 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.

4.5. Повторить п.4.4 для 5-6 других значений расстояния, изменяя их через 0,5 см.

4.6. 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:

$$I_{\phi} = I_{\text{полн}} - I_{\text{темн}} \quad (4.2)$$

4.7. Нанести экспериментальные точки на график в координатах  $I_{\phi}$  и  $1/r^2$ . Нанести доверительные интервалы по соответствующим осям.

4.8. Провести аппроксимирующую прямую через доверительные интервалы и убедиться в наличии линейной зависимости между фототоком и освещенностью.

4.9. Сделать выводы по работе.

Таблица 4.1 – Вольтамперные характеристики фотодиода для различных освещенностей.

Темновая		r, см =									
		1/r <sup>2</sup> =									
U, мВ	I, мкА	U, мВ	I, мкА	U, мВ	I, мкА	U, мВ	I, мкА	U, мВ	I, мкА	U, мВ	I, мкА

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Что называют внутренним фотоэффектом?

5.2. Чем внутренний фотоэффект отличается от внешнего?

5.3. Какие виды поглощений приводят к появлению фотопроводимости?

- 5.4. Поясните принцип работы фотодиода.
- 5.5. Где можно использовать фотодиоды?
- 5.6. Существует ли красная граница внутреннего фотоэффекта?

## 6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 6.2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная физика. Т. 5, Ч. 1., – М.: «Наука», 1986. – 425 с.
- 6.3. Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы.: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 271 с.
- 6.4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3. Квантовая механика: Уч. пособие для студентов вузов. 3-е изд., исправл. – М.: Наука, 1987. – 317 с.
- 6.5. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973. – 655 с.