

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11А  
ПО КУРСУ  
ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

**Фотоэлектрический способ  
преобразования энергии солнечного  
излучения**

выполнили студенты Б04-004 группы

Семёнова Наталия  
Атласов Владислав  
Плюскова Наталия  
Богатова Екатерина

Долгопрудный, 2023 г.

**В работе:** Исследование темновой и световой вольтамперной характеристики фотоэлемента. Изучение влияния мощности падающего излучения на характеристики образца с помощью фильтров.

## 1 Теоретическое введение

### Электронно-дырочный переход

Прямое преобразование лучистой энергии Солнца в электрическую осуществляется с помощью фотоэффекта на потенциальном барьере или так называемого вентильного фотоэффекта, суть которого – возникновение фото-ЭДС при освещении контактов металл-полупроводник и р-п переходов. Однако, вследствие сложной микроструктуры контактов полупроводника с металлом, мы ограничимся в дальнейшем наиболее ясным случаем р-п переходов.

Рассмотрим более подробно, что представляет собой р-п переход. Пусть два полупроводника, один из которых имеет проводимость р-типа, а другой п-типа приводятся в хороший контакт по плоскости  $aa'$ , как показано на изображении а (Рис. 1). Тогда под действием градиента концентрации дырки из приконтактного слоя р-области будут диффундировать в п-область, а электроны из приконтактного слоя п-области в р-область.

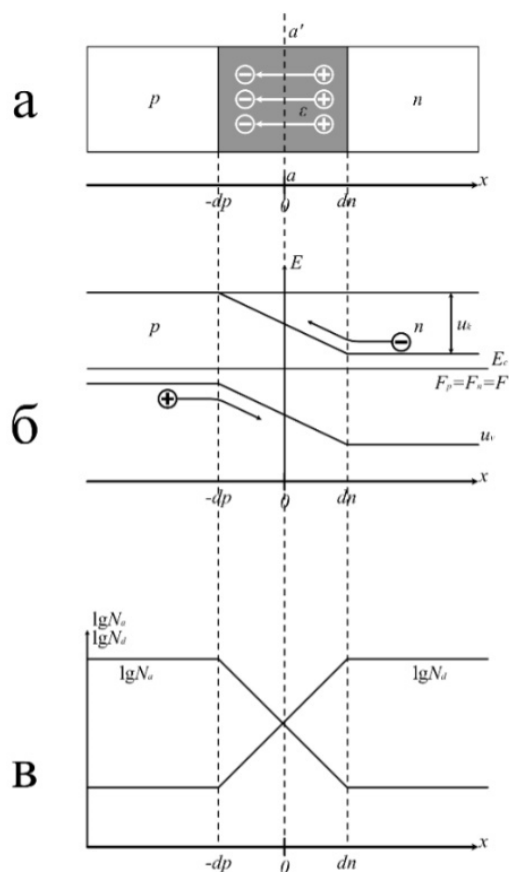


Рис. 1: р-п переход

В результате такой диффузии в приконтактном слое р-области создается отрицательный объемный заряд нескомпенсированных ионов акцепторной примеси, а в приконтактном слое п-области – положительный объемный заряд нескомпенсированных ионов донорной примеси. Порожденное объемными зарядами электрическое

поле (направление которого показано на изображении а (Рис. 1)), будет препятствовать дальнейшей диффузии основных носителей зарядов (основными называются носители, знак которых соответствует типу проводимости полупроводника). При этом напряженность электрического поля  $\epsilon$  и толщины слоев объемных зарядов в  $n$  и  $p$ -областях будут возрастать до тех пор, пока не достигнут своих равновесных значений  $\epsilon_0$ ,  $d_p$  и  $d_n$ , при которых диффузионные потоки основных носителей зарядов полностью скомпенсированы дрейфовыми потоками, вызванными электрическим полем объемных зарядов. Переходная область толщины  $d = d_n + d_p$ , объединённая свободными носителями зарядов, и в которой локализовано электрическое поле с напряженностью  $\epsilon_0$  получила название электронно-дырочного или  $p$ - $n$  перехода. Толщина  $p$ - $n$ -перехода  $d$  для различных полупроводниковых систем может изменяться от единицы и до сотых долей микрометров, а величина  $\epsilon_0$  достигать значений  $\sim 10^7 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Состояние  $p$ - $n$ -перехода в термодинамическом равновесии легко понять, обращаясь к его энергетической диаграмме, приведенной на схеме б (Рис. 1). Здесь  $E_c$  – дно зоны проводимости,  $E_v$  – потолок валентной зоны,  $F$  – уровень Ферми. В самом деле, электроны из  $n$ -области не могут проникнуть в  $p$ -область, так как для этого им необходимо преодолеть потенциальный барьер, высота  $u_k$  которого равна контактной разности потенциалов, а энергия электронов меньше высоты этого барьера. По аналогичной причине дырки из  $p$ -области не могут попасть в  $n$ -область.

На практике  $p$ - $n$ -переходы реализуются не механическим соединением двух полупроводников, а внутри единого кристалла, в котором создают подходящее распределение донорной  $N_d$  и акцепторной  $N_a$  примесей, например, показанной на схеме в (Рисунок 1).

## 2 Экспериментальная установка

Вольтамперная характеристики фотопреобразователя могут быть измерены с помощью схемы, представленной на схеме (Рис. 2). Когда преобразователь работает как генератор электроэнергии, то в качестве источника излучения используется лампа марки ЗН7 или ЗН8 с встроенным зеркальным отражателем и мощностью 500 Вт. Спектр ее излучения с помощью водяного фильтра приближен к спектру солнечного излучения и к спектральной чувствительности кремниевого преобразователя.

Перед началом и после измерений тумблеры на пульте управления и переключатели других приборов должны быть установлены в следующих положениях:

- Тумблер 1: подачи напряжения от батареи аккумуляторов – в положении «выкл».
- Тумблер 2 – переключение полярности микроамперметра М 95 – в положении «обр».
- Тумблер 3 – переключение с микроамперметра на миллиамперметр – в положении «мА».
- Тумблер 4 – изменение полярности напряжения подаваемого на фотопреобразователь – в положении «обр.».

Потенциометры «грубо» и «точно» должны быть выведены против часовой стрелки до упора.

Переключатель шкалы микроамперметра М 95 должен стоять в положении «арретир», а наружный шунт к М 95 в положении « $\infty$ ».

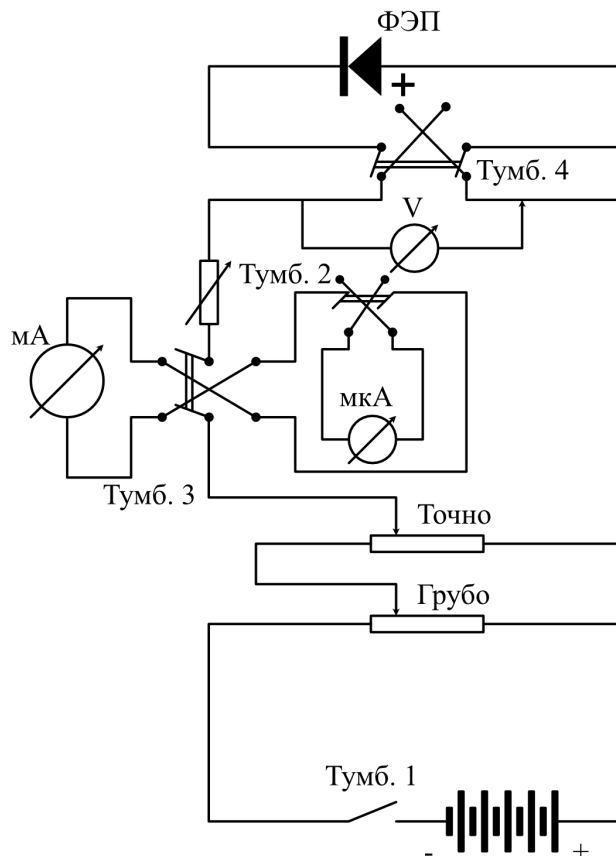


Рис. 2: Схема установки для экспериментальных исследований световой и темновой в/а характеристик фотоэлементов

### 3 Ход работы

Проведём измерение темновых вольтамперных характеристик исследуемого кремниевое фотоэлемента.

Начнём с прямой ветви темновой в/а характеристики. Будем снимать точки до 300 мВ с шагом в 20 мВ, а затем до 700 мВ с шагом 50 мВ. Предварительно не забудем учесть, что ноль напряжений смещён на 0.9 делений (на 9 мВ) вправо.

U, мВ	21	41	61	81	101	121	141	161	181	201	221
I, мкА	4,9	9	13	17	21	24	28	32,5	36	40	44
U, мВ	241	261	281	331	381	431	481	531	581	631	681
I, мкА	48,3	50	54	62,5	72,5	82,5	92,5	102,5	111,5	121	130,5

Таблица 1: Зависимость значений прямого темнового тока от напряжения на фотоэлементе

Основываясь на данных из таблицы 1 построим график зависимости тока от напряжения (вольт-амперную характеристику) – рис 3 – и фиттируем её линейной зависимостью, проходящей через ноль.

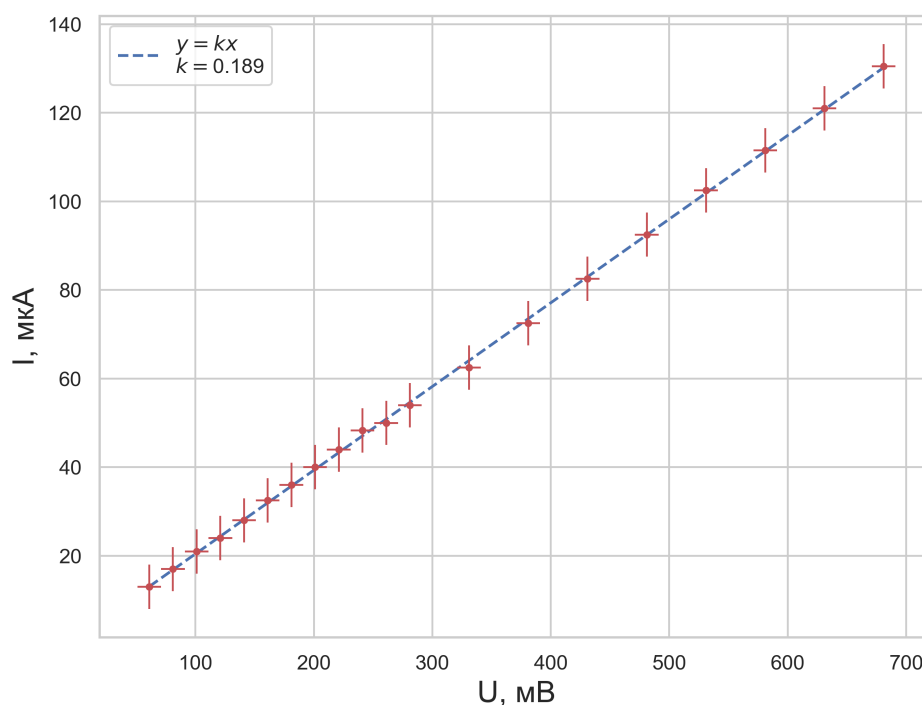


Рис. 3: Вольт-амперная характеристика темнового тока (прямая ветвь)

Здесь в качестве погрешностей использовали цену деления прибора: 10 мВ для напряжения и 5 мкА для тока.

Теперь аналогично снимем обратную ветвь темновой в/а характеристики. Будем снимать точки с шагом в 10 мВ до значения напряжения в 100 мВ. Также учтём, что напряжения сдвинуты вправо на 9 мВ.

U, мВ	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101
I, мкА	0	2	4	6,3	8,2	10,1	12,5	14,7	17	19	20,5

Таблица 2: Зависимость значений обратного темнового тока от напряжения на фотоэлементе

Из таблицы 2 строим ВАХ уже для обратной ветви темнового тока – рис. 4

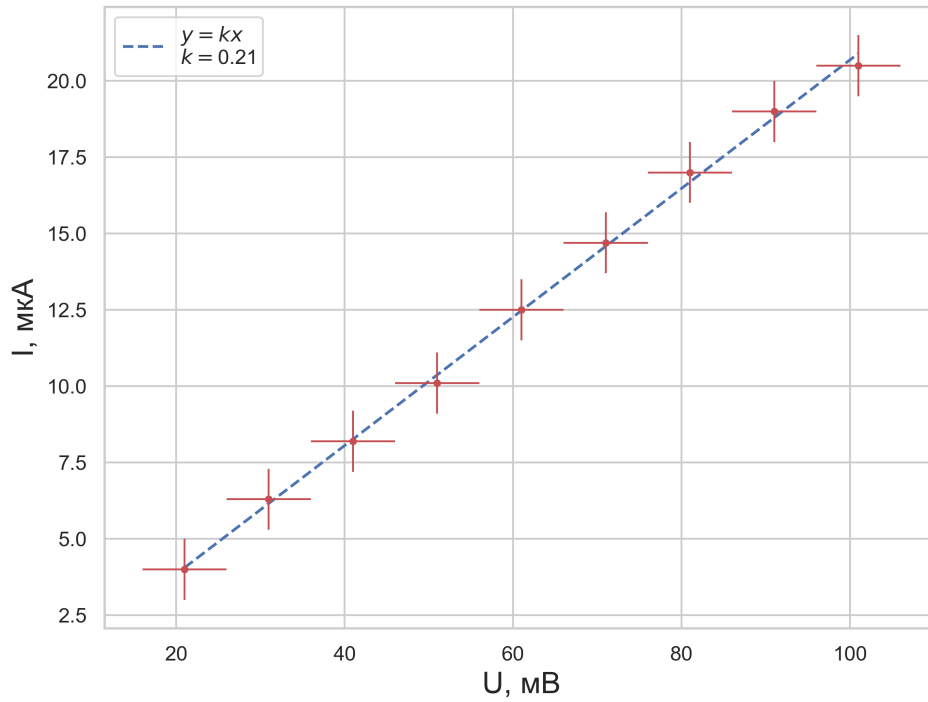


Рис. 4: Вольт-амперная характеристика темнового тока (обратная ветвь)

Здесь погрешность для напряжения – 5 мВ, для тока – 1 мкА (цена деления для тока изменилась в случае обратной ветви).

Теперь оценим  $R_{ш}$  и  $R_{п}$  как обратные угловые коэффициенты на рисунках 4 и 3 соответственно.

$$R_{ш} = \left( \frac{dI}{dU} \right)_{обр}^{-1}; \quad R_{п} = \left( \frac{dI}{dU} \right)_{прям}^{-1}.$$

Погрешности оценим по следующей формуле (как погрешность косвенной величины  $\sigma_y = \left| \frac{dy}{dx} \right| \sigma_x$ ):

$$\sigma_R = \frac{\sigma_{(dI/dU)}}{\frac{dI}{dU}}.$$

Таким образом, получаем следующий результат:

$$R_{ш} = (4.75 \pm 0.01) \cdot 10^3 \text{ Ом}; \quad R_{п} = (5.25 \pm 0.02) \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Теперь построим график зависимости  $\ln(I) = f(U)$  для прямой ветви тока, чтобы найти коэффициенты  $A$  и  $I_s$ .

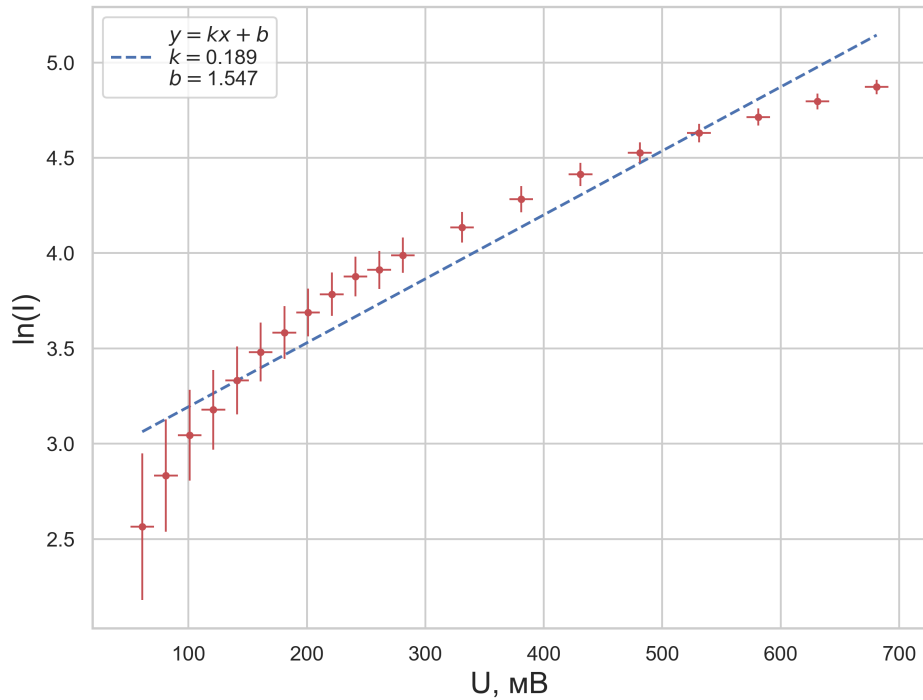


Рис. 5: График зависимости  $\ln(I) = f(U)$  (для прямой ветви темного тока)

Погрешность для  $\ln(I)$  оценили по формуле для погрешности косвенного измерения:

$$\sigma_{\ln(I)} = \frac{\sigma_I}{I}.$$

Коэффициенты  $A$  и  $I_s$  Найдём с помощью следующей формулы:

$$\ln(I) = \ln(I_s) + U \frac{e}{A \cdot kT}. \quad (1)$$

Таким образом, отсюда и рис. 5 находим коэффициенты  $A$  и  $I_s$ :

$$I_s = e^b = (17 \pm 5) \text{ мкА}$$

$$A = \frac{1}{0.025 \cdot k} = (12 \pm 4)$$

## 4 Вывод

В ходе данной лабораторной работы мы сняли вольт-амперные характеристики темного тока для прямой и обратных ветвей для исследуемого кремниевого фотоэлемента (рис. 3, 4). С помощью этих вольт-амперных характеристик рассчитали значения для  $R_{\text{ш}} = (4.75 \pm 0.01) \cdot 10^3 \text{ Ом}$  и  $R_{\text{п}} = (5.25 \pm 0.02) \cdot 10^3 \text{ Ом}$ . Также, с помощью графика зависимости  $\ln(I) = f(U)$  (рис. 5) для прямой ветви темного тока рассчитали коэффициенты  $A$  и  $I_s$ , фигурирующие в формуле 1:  $I_s = (17 \pm 5) \text{ мкА}$ ,  $A = (12 \pm 4)$ .

График зависимости  $\ln(I) = f(U)$  (рис. 5) получился очень не точным (плохо фиттируется линейной зависимостью). Это может быть связано с проблемами, возникшими в ходе выполнения работы. Например, у нас мог сгореть фотоэлемент, из-за чего значения, полученные нами, оказались неточными.