

# Лабораторная работа №1

## Исследование преобразователей лучистой энергии

### Цель работы

Ознакомиться с процессом преобразования световой энергии в электрическую и определить КПД преобразователя.

### Теоретическая часть

Типичная конструкция солнечного элемента (СЭ) показана на рисунке 1.1. На полупроводниковую пластину с проводимостью *n*-типа нанесен тонкий слой полупроводника *p*-типа. На границе двух полупроводников образуется *p-n* переход. Свет падает со стороны *p*-слоя. Для включения СЭ в цепь имеются металлические контакты: сплошной со стороны *n*-слоя и по периферии – с освещаемой стороны.

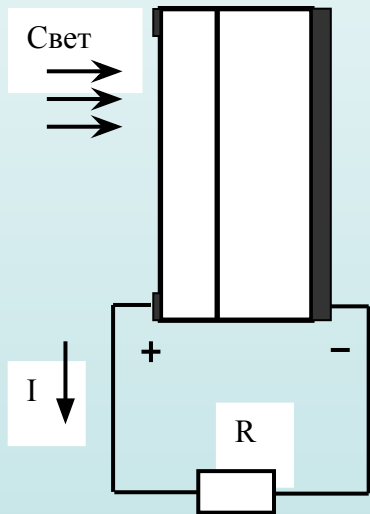


Рис. 1.1

Напомним, что происходит в *p-n* переходе в отсутствие света и внешнего источника напряжения. В области *p-n* перехода образуется двойной электрический слой из положительных и отрицательных ионов примесных атомов, в результате между *p* и *n* областями возникает контактная разность потенциалов  $U$  (в переходе из кремния она близка к 1 В). При этом через переход протекают два небольших, равных по величине и противоположных по направлению тока: неосновных носителей  $-IS$  и основных носителей  $+IS$ , в результате суммарный ток через переход равен нулю. Если к *p-n* переходу подключить резистор, то ток в нем будет отсутствовать. Таким образом, в отсутствие света и при одинаковой температуре всех участков замкнутой цепи электрический ток не протекает.

Внешние, валентные электроны атомов полупроводника принадлежат кристаллу в целом, при этом они имеют дискретные значения энергии, объединенные в энергетические зоны. Поглощая квант света, электрон занимает более высокий энергетический уровень в кристалле, например, переходит из валентной зоны в зону проводимости, создавая в валентной зоне вакансию (дырку). В результате появляются дополнительные носители тока – электроны проводимости и дырки. Это явление называется внутренним фотоэффектом. Внутренний фотоэффект имеет «красную границу»: энергия кванта света (фотона) должна превышать ширину запрещенной зоны  $EG$ , разделяющей валентную зону и зону проводимости, т.е.  $h\nu \geq EG$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота света. В кремнии внутренний фотоэффект имеет место для волн с длиной  $\lambda \leq 1,1$  мкм, т.е. для видимого, ультрафиолетового и ближнего инфракрасного излучений.

Рассмотрим, что происходит в СЭ при освещении. Излучение поглощается в  $p$ -области и генерирует в ней электронно-дырочные пары, образующиеся вблизи  $p$ - $n$  перехода. Электроны (не основные носители в  $p$ -области) перебрасываются контактным полем в  $n$ -область, заряжая ее отрицательно.

Подавляющая часть дырок не способна преодолеть потенциальный барьер и остается в  $p$ -области, заряжая её положительно. Электрическое поле контакта пространственно разделяет отрицательные электроны и положительные дырки образующиеся под действием света. Вследствие этого на переходе формируется прямое смещение  $U$ , понижающее потенциальный барьер на величину  $qU$ , где  $q$  – заряд электрона по модулю. Перемещение электронов через  $p$ - $n$  переход создает ток  $-I_{\phi}$ , называемый первичным фототоком, которому, как и току неосновных носителей, приписывают отрицательный знак. Понижение барьера ведет к возрастанию тока основных носителей, который становится равным. Таким образом, через переход протекают следующие токи: неосновных носителей  $-I_S$ , основных носителей и первичный фототок  $-I_{\phi}$ . Полный ток через  $p$ - $n$  переход равен

$$I = I_s \cdot \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I_0. \quad (1.1)$$

Эта формула описывает вольтамперную характеристику (ВАХ) идеального СЭ. Из нее легко определить прямое смещение напряжения

$$U = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_0 + I}{I_s} + 1 \right). \quad (1.2)$$

Таким образом, при освещении *p-n* перехода контактная разность потенциалов в нём уменьшилась на величину  $U$ , а другие контактные разности потенциалов не изменились. В результате на клеммах СЭ появилось напряжение  $U$ , называемое фото-ЭДС, а в сопротивлении – ток  $I$ . Следовательно, *p-n* переход стал источником тока, в котором энергия света преобразуется непосредственно в электрическую энергию. Так как фото-ЭДС равна понижению контактного напряжения, она не может превысить само контактное напряжение  $U$  (для кремния примерно 1 В).

Как во всяком другом источнике тока в СЭ должны быть сторонние силы, природа которых отличается от сил электростатического поля. Под действием электростатических сил заряды перемещаются в направлении уменьшения потенциальной энергии. Для непрерывного протекания тока по замкнутой цепи необходимо, чтобы хотя бы на одном участке цепи заряды перемещались в направлении от меньшей к большей потенциальной энергии, т.е. поднимались на потенциальный барьер. Это участок действия сторонних сил. Их физическая природа может быть различной. В гальванических элементах сторонние силы возникают в результате химических реакций на электродах, а энергия, освобождаемая в

Первичный фототок пропорционален потоку излучения (мощности излучения)  $\Phi$ , падающему на СЭ:  $I_\phi = \alpha \cdot \Phi$ , где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности. Ток  $I$  в нагрузке зависит от  $I_\phi$  и сопротивления нагрузки  $R$ . При коротком замыкании СЭ, когда  $R=0$ , напряжение на сопротивлении  $U=IR=0$ , а ток, как следует из (1.1), равен  $I_\phi$ . Это означает, что все генерированные светом носители поступают во внешнюю цепь, а высота барьера в  $p$ - $n$  переходе не изменяется. Если внешняя цепь разомкнута, то  $I=0$ . При этом напряжение, называемое напряжением холостого хода  $U_{xx}$ , как следует из (1.2), равно

$$U = U_{xx} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_\phi + I}{I_s} + 1 \right). \quad (1.3)$$

Зависимость тока от напряжения, т.е. вольтамперная характеристика идеального СЭ, показана на рисунке 1.2.

Каждой точке кривой соответствует определенное сопротивление нагрузки: с увеличением  $R$  напряжение растет, а ток падает. В нагрузке выделяется электрическая мощность  $P=IU$ . Она зависит от  $R$  и при некотором его значении  $R_m$  достигает максимального значения  $P_m = I_m \cdot U_m$ , где  $I_m$  и  $U_m$  – ток и напряжение при максимальной мощности (максимальная мощность равна площади заштрихованного прямоугольника на рисунке 1.2). При изменении потока излучения ВАХ изменяются так, как показано на рисунке 1.3. С ростом  $\Phi$  увеличиваются напряжение, ток и мощность, а оптимальное сопротивление  $R_m$  – уменьшается. Коэффициентом полезного действия СЭ называют отношение максимальной электрической мощности к потоку падающего излучения:

$$\eta = \frac{P_M}{\Phi}. \quad (1.4)$$

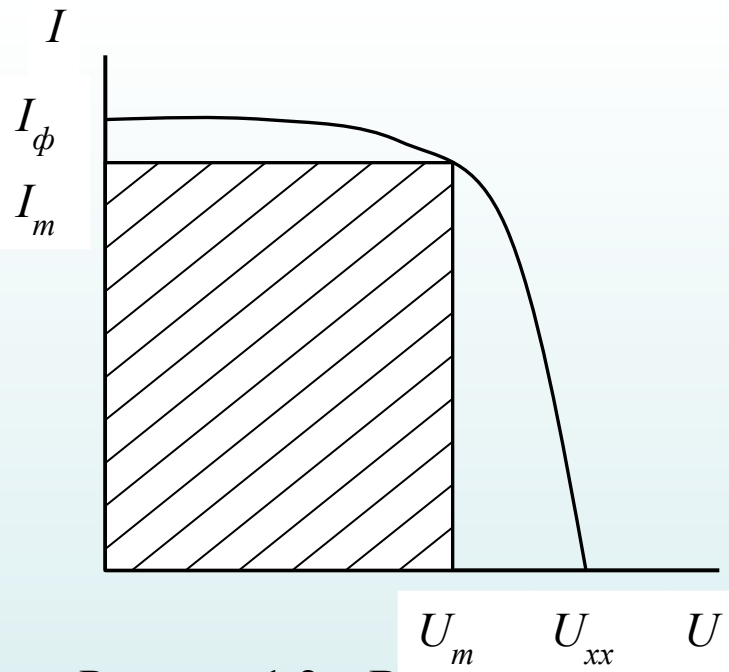


Рисунок 1.2 – Вольтамперная характеристика преобразователя

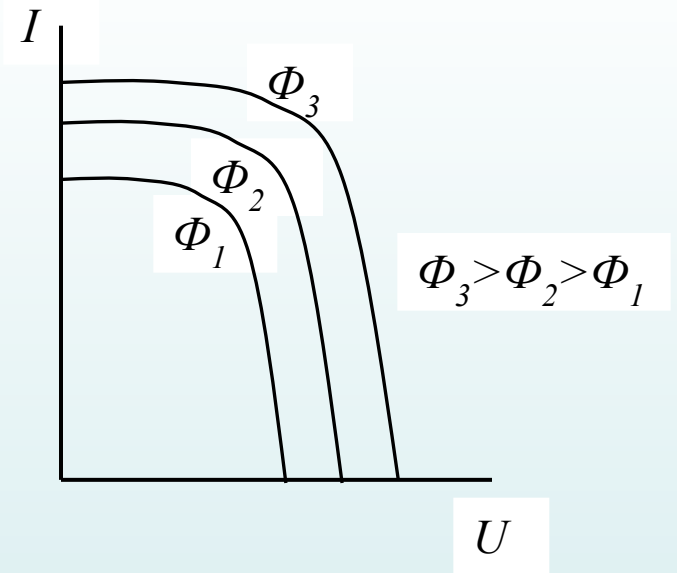


Рисунок 1.3 – Вольтамперная характеристика при различных потоках излучения

Многие процессы уменьшают КПД, отметим некоторые из них. Частично свет отражается от поверхности полупроводника, поэтому для уменьшения отражения СЭ покрывают интерференционным просветляющим слоем. Фотоны, энергия которых недостаточна для внутреннего фотоэффекта, не дают вклада в электрическую энергию. Некоторые пары электрон-дырка рекомбинируют и не дают вклада в фототок. Мощность теряется при прохождении тока через объемное сопротивление полупроводника. Согласно теории, солнечный элемент из кремния имеет КПД не более 20%, а практически – меньше.

# Описание лабораторного оборудования

Внешний вид и электрическая схема стенда представлены на рисунках 1.4 и 1.5.

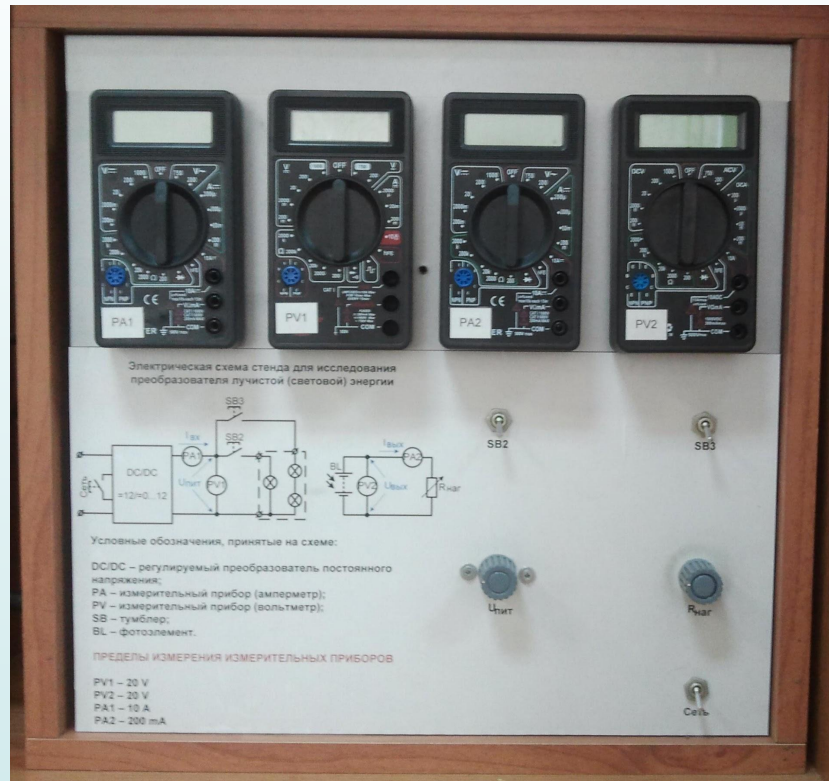


Рисунок 1.4 – Внешний вид лабораторного стенда

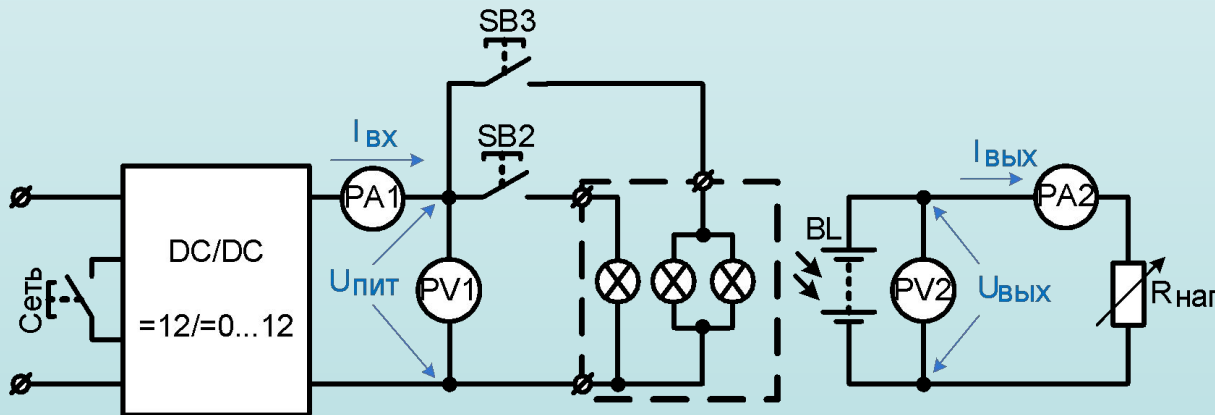


Рисунок 1.5 – Электрическая схема стенда для исследования преобразователя лучистой энергии

## Методика проведения эксперимента:

Включить галогенную лампу накаливания (ГЛН). – Для подключения необходимого количества ламп используются переключатели SB2 и SB3.

– Установить определённую мощность излучения с помощью регулятора напряжения

$U_{\text{ПИТ}}$ .

– Изменяя нагрузку в цепи СЭ снять ВАХ (4-5 точек при неизменной мощности питания). Изменение величины нагрузочного сопротивления производится регулятором  $R_{\text{НАГ}}$ . При проведении эксперимента необходимо нагрузку изменять во всём диапазоне (от режима холостого хода до режима короткого замыкания).

– Повторить измерения еще для двух вариантов входной мощности.

Результаты занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Данные измерений с ГЛН (КПД 12%)

$U_{\text{ВХ}}$	$I_{\text{ВХ}}$	$P_{\text{ВХ}}$	$\Phi$	$U_{\text{ВЫХ}}$	$I_{\text{ВЫХ}}$	$P_{\text{ВЫХ}}$	$\eta$
1 лампа							
		$P_{\text{ВХ1}}$		3-4 измерения			
		$P_{\text{ВХ2}}$		3-4 измерения			
		$P_{\text{ВХ3}}$		3-4 измерения			

Измерения повторить для двух и трех включенных ГЛН.

## Обработка результатов измерений

По результатам измерений напряжений и токов на входе (питание ламп) и выходе (в цепи СЭ) рассчитать мощность на входе и выходе системы. Результаты расчётов занести в таблицу 1.1. Определить поток излучения ( $\Phi$ ) для каждого измерения (внести в таблицу 1.1).



По данным таблицы 1.1 определить максимальную мощность на выходе СЭ и соответствующие ей значения тока и напряжения во вторичной цепи. По выражению (1.4) определить коэффициент полезного действия СЭ. В одной системе координат построить ВАХ СЭ. На каждом графике построить прямоугольник максимальной мощности. Построить зависимость КПД СЭ от тока лампы для разного количества включенных ламп.

### **Контрольные вопросы**

- Как устроен полупроводниковый солнечный элемент?
- Какие токи протекают через неосвещенный  $p-n$  переход?
- Какие токи протекают через освещенный  $p-n$  переход?
- Как возникает фото-ЭДС?
- Какова природа сторонних сил в солнечном элементе?
- Объяснить механизм образования свободных носителей заряда.
- Что такое первичный фототок?