

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**  
*Кафедра физики твердого тела*

**В.В. ПАРФЕНОВ, Р.Х. ЗАКИРОВ, Н.В. БОЛТАКОВА**

## **ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ**

**Методическое пособие к лабораторной работе**

**Казань 2014**

**УДК 537.311.4**

**ББК В379.2**

*Принято на заседании кафедры физики твердого тела  
Протокол № 6 от 22 ноября 2014 года*

**Рецензент:**

канд. физ-мат. наук, доц. кафедры радиоэлектроники К(П)ФУ

**Гусев Ю.А.**

**Парфенов В.В., Закиров Р.Х., Болтакова Н.В.**

**Изучение работы солнечной батареи / В.В. Парфенов,**

**Р.Х. Закиров, Н.В. Болтакова. – Казань: Казан. ун-т, 2014. – 33 с.**

Методическая разработка предназначена для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 03.03.02 «Физика» и 28.03.01 "Нанотехнологии и микросистемная техника" при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Физика магнитных материалов и полупроводников», спецпрактикум, «Физика конденсированного состояния», "Физические основы микро- и наносистемной техники".

Пособие не освобождает и не ограничивает студента от обращения к другим источникам информации, в том числе рекомендованным в данном пособии, необходимым для выполнения лабораторных заданий, для подготовки к зачету и экзамену, поскольку не охватывает материал, вынесенный на самостоятельное изучение студентом.

© Парфенов В.В., 2014

© Закиров Р.Х., 2014

© Болтакова Н.В., 2014

© Казанский университет, 2014

## Введение

Использование полупроводниковых фотоэлементов для преобразования световой (солнечной) энергии в электрическую получило сильное развитие благодаря их применению в космической аппаратуре. Со временем полупроводниковые фотоэлементы нашли применение для решения энергообеспечения земных объектов – от бытовых до промышленных.

*Солнечная батарея (СБ)* – это устройство для непосредственного преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию. В основе работы солнечной батареи лежит вентильный фотоэффект.

*Вентильный фотоэффект* – это явление возникновения электродвижущей силы (или фотоэдс) при освещении структуры, состоящей из разнородных элементов. Составляющими такой структуры могут быть:

- металл и полупроводник (*контакт Шоттки*);
- два полупроводника с различным типом проводимости (*p-n-переход*);
- два полупроводника, различных по химическому составу (*гетероструктура*).

Впервые это явление было обнаружено в контактах Шоттки на основе металлической меди и закиси меди (Cu-Cu<sub>2</sub>O). Однако коэффициент полезного действия (к.п.д.) таких устройств составлял всего несколько процентов, поэтому широкого применения они не нашли. Практическое применение солнечные батареи получили, когда на смену контактам Шоттки пришли сначала германиевые, а затем кремниевые фотоэлементы с p-n-переходом, имеющие существенно более высокий к.п.д..

В первую очередь СБ были использованы в качестве электрических генераторов на космических аппаратах. Уже третий искусственный спутник Земли (1958 г.) снабжался энергией от солнечной батареи [1]. В настоящее время СБ выпускаются промышленностью, имеют мощность в десятки киловатт, а коэффициент полезного действия батарей на основе гетероструктур из новых полупроводниковых материалов достигает 30 %.

# Теоретические основы фотоэлектрического преобразования солнечной энергии

## Физические основы вентильного фотоэффекта

В основе вентильного фотоэффекта лежат два фундаментальных явления – внутренний фотоэффект и пространственное разделение разноименных неравновесных носителей заряда.

*Внутренний фотоэффект* – это явление генерации неравновесных носителей заряда при облучении полупроводника электромагнитным излучением с энергией квантов, достаточной для такой генерации. Другими словами – должно выполняться пороговое условие *красной границы фотоэффекта*, т.е. энергия кванта света должна быть больше некоторой характеристической энергии  $\epsilon_{\text{крас}}$  [2]

$$h\nu \geq \epsilon_{\text{крас}},$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

В случае собственной фотопроводимости эта энергия равна ширине запрещенной зоны  $\epsilon_g$

$$\epsilon_{\text{крас}} = \epsilon_g,$$

а в случае примесной – энергии ионизации примесного центра  $\epsilon_I$

$$\epsilon_{\text{крас}} = \epsilon_I.$$

Максимальный к.п.д. солнечных батарей возможен только в случае «собственной фотопроводимости», т.е. ситуации, когда при поглощении кванта света происходит переход электрона из валентной зоны в зону проводимости и появляется пара неравновесных носителей заряда – электрон и дырка.

Эти неравновесные носители заряда пространственно не разделены и фотоэдс не возникает, пока электрон и дырка не будут разнесены в пространстве. Эту функцию могут выполнять контакты между полупроводником и металлом (контакт Шоттки) или между полупроводниками (*p-n*-переход, гетероструктура).

Рассмотрим процесс разделения неравновесных носителей заряда на *p-n*-переходе. На рисунке 1 показана типичная конструкция вентильного фотоэлемента с *p-n*-переходом (*фотодиода*) и включение фотоэлемента во внешнюю цепь.

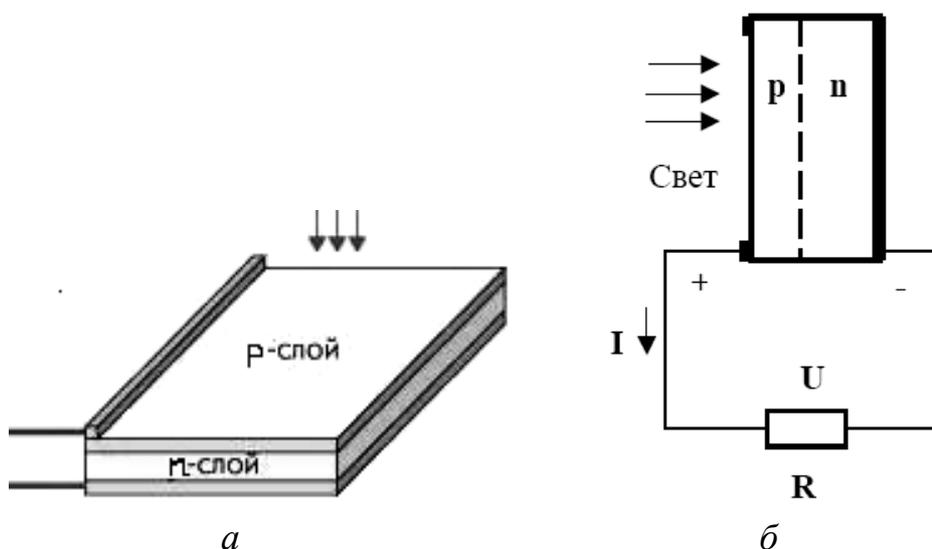


Рисунок 1. Фотодиод (вентильный элемент с  $p$ - $n$ -переходом) (а) и его включение в режиме солнечной батареи (б) [3]

При контакте материалов с различной величиной работы выхода инжекция электронов всегда происходит из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода. В частности, для полупроводников, отличающихся только типом проводимости, работа выхода из полупроводника  $p$ -типа всегда больше, чем работа выхода из полупроводника  $n$ -типа, и при образовании  $p$ - $n$ -перехода электроны инжектируются из приконтактного слоя электронного полупроводника в приконтактный слой дырочного полупроводника [4].

При этом в  $n$ -области создается нескомпенсированный положительный объемный заряд, образованный ионизированными донорными примесями, а в  $p$ -области – отрицательный объемный заряд, образованный акцепторами, захватившими инжектированные электроны.

При освещении  $p$ -области излучение поглощается в ней и генерирует электронно-дырочные пары. Поскольку концентрация тех и других носителей максимальна у поверхности, они диффундируют вглубь  $p$ -области, к  $p$ - $n$ -переходу. Электроны (неосновные носители в  $p$ -области) перебрасываются контактным полем в  $n$ -область, заряжая ее отрицательно. Для основных носителей заряда (в данном случае это дырки) на границе существует потенциальный барьер, который они не способны преодолеть и поэтому дырки остаются в  $p$ -области, заряжая ее положительно. Таким образом, электрическое поле контакта пространственно разделяет неравновесные электроны и дырки, образуемые под действием света.

Попадая в  $n$ -область, электроны уменьшают положительный объемный заряд в ней, а дырки, оставшиеся в  $p$ -области, уменьшают объемный отрицательный заряд. Это равносильно подаче на  $p$ - $n$ -переход прямого смещения  $\phi$ , понижающего потенциальный барьер на величину  $e\phi$ , где  $e$  – заряд электрона (рис. 2).

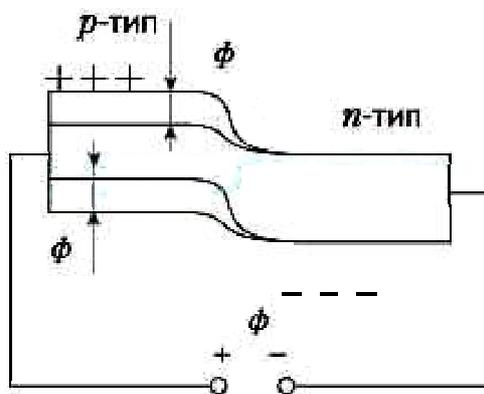


Рисунок 2. Освещенный  $p$ - $n$ -переход: потенциальный барьер и для электронов, и для дырок уменьшается на величину фотоэдс [3]

Перемещение электронов через  $p$ - $n$ -переход создает фототок  $-I_\phi$ . Поскольку он создается неосновными носителями, ему приписывают отрицательный знак. Понижение барьера ведет к возрастанию тока основных носителей, который в фотоэлементах называется *током утечки*

$$I_y = I_s \exp \frac{e\phi}{kT},$$

где  $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура (К).

Таким образом, через переход протекают следующие токи:

- неосновных носителей:  $-I_s$ ;
- основных носителей:  $I_y$ ;
- фототок:  $-I_\phi$ .

Полный ток через  $p$ - $n$ -переход равен

$$I = I_s \left( \exp \frac{e\phi}{kT} - 1 \right) - I_\phi. \quad (1)$$

Ток неосновных носителей

$$I_s = \left( \frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p p_n}{L_p} \right),$$

где  $n_p, p_n$  – концентрация неосновных носителей заряда – соответственно концентрация электронов в зоне проводимости  $p$ -области и дырок в валентной зоне  $n$ -области;

$L_n, L_p$  – диффузионная длина носителей заряда (электронов и дырок соответственно), которая может быть интерпретирована как среднее расстояние, которое проходят неравновесные носители заряда до их рекомбинации с носителями противоположного знака;

$D_n, D_p$  – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно.

В первом приближении можно считать фототок пропорциональным освещенности фотоэлемента  $\Phi$ .

### Зависимость фотоэдс вентильного фотоэлемента от внешней нагрузки

Уравнение (1) описывает вольт-амперную характеристику идеального фотодиода. По закону Ома ток во внешней цепи (рис. 1, б) равен

$$I = \frac{\Phi}{R}. \quad (2)$$

При разомкнутой внешней цепи, т.е. при  $R \rightarrow \infty$ , из (1) и (2) получим для фотоэдс «холостого хода»

$$\Phi_{\text{ХХ}} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_{\Phi}}{I_s} + 1 \right). \quad (3)$$

Если же сопротивление нагрузки мало, т.е.  $R \rightarrow 0$ , то ток короткого замыкания будет равен фототоку  $I_{\text{кз}} = I_{\Phi}$ . Внешний вид вольт-амперной характеристики идеального вентильного фотоэлемента приведен на рисунке 3.

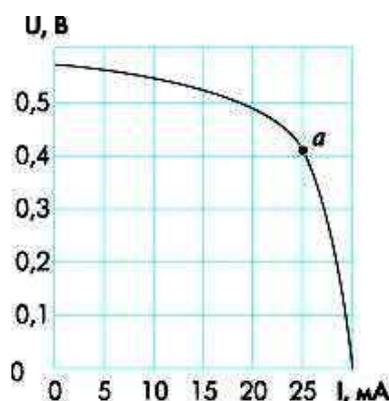


Рисунок 3. Вольт-амперная характеристика кремниевого фотоэлемента. Точка  $a$  на рис. соответствует работе с оптимальной внешней нагрузкой (с наибольшей мощностью фотоэлектрического генератора) [3]

Согласно формулам (1), (2) и рисунку 3, при увеличении сопротивления нагрузки фотоэда увеличивается, достигая в пределе значения  $\varphi_{\text{хх}}$ , а фототок уменьшается. Мощность, отдаваемая фотоэлектрическим генератором во внешнюю цепь, равна  $I_{\text{ф}}\varphi$ . При оптимальном выборе сопротивления внешней цепи эта мощность будет максимальной (рис. 3).

Как следует из рисунка 2, максимальная величина фотоэда не может превышать величину  $\varphi_{\text{макс}} \approx \varepsilon_g/e$ . Фактически, в силу ряда причин, не учтенных нами в первом приближении, максимальная величина фотоэда будет составлять примерно  $\frac{2\varepsilon_g}{3e}$ . У фотоэлементов из кремния Si с шириной

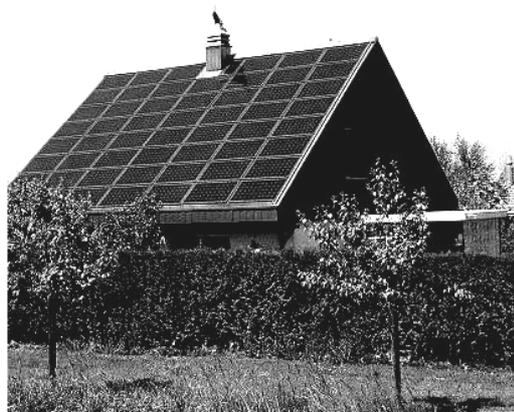
запрещенной зоны  $\varepsilon_g \approx 1$  эВ она будет равна  $\varphi_{\text{макс}} \approx 600$  мВ, фотоэлементов из германия Ge  $\varphi_{\text{макс}} \approx 400$  мВ, фотоэлементов из арсенида галлия GaAs  $\varphi_{\text{макс}} \approx 1$  В.

Для получения больших напряжений фотоэлементы подключают последовательно друг другу, для получения больших токов – параллельно, формируя, таким образом, солнечную батарею (рис. 4).

Для получения больших напряжений фотоэлементы подключают последовательно друг другу, для получения больших токов – параллельно, формируя, таким образом, солнечную батарею (рис. 4).



*a*



*б*

Рисунок 4. Примеры использования СБ: на крыльях летательного аппарата «Solar impulse» (*a*) и на крыше загородного дома (*б*)

### Пути и перспективы развития солнечных батарей

Для эффективной работы солнечных элементов (СЭ) необходимо соблюдение ряда условий:

– оптический коэффициент поглощения активного слоя полупроводника должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить поглощение существенной части энергии солнечного света в пределах толщины слоя;

– генерируемые при освещении электроны и дырки должны эффективно собираться на контактных электродах с обеих сторон активного слоя;

– СЭ должен обладать значительной высотой барьера в полупроводниковом переходе;

– полное сопротивление, включенное последовательно с солнечным элементом (исключая сопротивление нагрузки), должно быть малым для того, чтобы уменьшить потери мощности (джоулево тепло) в процессе работы.

Производство структур на основе монокристаллического кремния, удовлетворяющих данным требованиям, – процесс технологически сложный и дорогостоящий. Поэтому внимание инженеров было обращено на такие материалы, как сплавы на основе аморфного кремния a-Si:H, арсенид галлия и поликристаллические полупроводники.

Аморфный кремний выступил в качестве более дешевой альтернативы монокристаллическому. Первые солнечные элементы на его основе были созданы в 1975 г. Оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического, поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки a-Si:H толщиной 0,5–1,0 мкм вместо дорогостоящих кремниевых подложек толщиной 300 мкм. Кроме того, благодаря существующим технологиям получения тонких пленок аморфного кремния большой площади не требуется операции резки, шлифовки и полировки, необходимых для СЭ на основе монокристаллического кремния. По сравнению с кристаллическими кремниевыми элементами изделия на основе a-Si:H производят при более низких температурах (300 °С), поэтому можно использовать дешевые стеклянные подложки, что сокращает расход кремния в 20 раз.

Пока максимальный коэффициент полезного действия экспериментальных элементов на основе a-Si:H составляет 12 %, что несколько ниже, чем для кристаллических кремниевых ( $\approx 15$  %). Однако не исключено, что с развитием технологии к.п.д. элементов на основе a-Si:H достигнет теоретического потолка в 16 %.

Наиболее простые конструкции солнечных элементов из a-Si:H были созданы на основе структуры металл-полупроводник (диод Шоттки) (рис. 5). Несмотря на видимую простоту, их реализация достаточно проблематична – металлический электрод должен быть прозрачным и равномерным по толщине, а все состояния на границе металл/a-Si:H – стабильными во времени. Чаще всего СЭ на основе a-Si:H формируют на ленте из

нержавеющей стали или на стеклянных подложках, покрытых проводящим слоем.

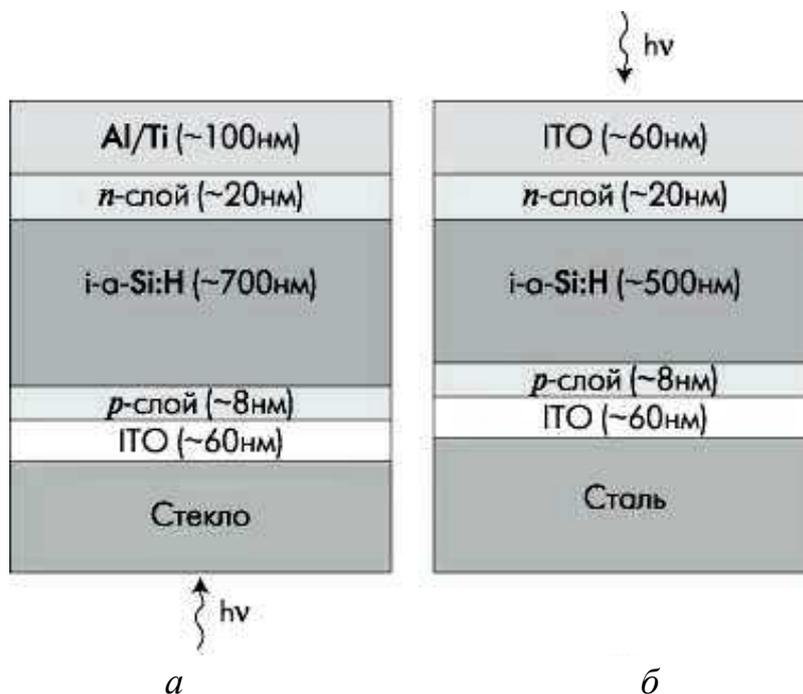


Рисунок 5. Солнечные элементы на основе аморфного кремния на стеклянной (а) и стальной (б) подложках [3]

При использовании стеклянных подложек на них наносят прозрачную для света проводящую оксидную пленку из  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$  или  $\text{SnO}_2+\text{In}_2\text{O}_3$  (ITO), что позволяет освещать элемент через стекло.

Дешевизна и простота изготовления солнечных батарей из аморфного кремния сделали эту разновидность СБ наиболее массовой и популярной на рынке. Однако есть области, где основную роль играют другие факторы – высокий коэффициент полезного действия, малые массо-габаритные параметры, устойчивость к жестким внешним воздействиям и т. п. В частности, подобные требования предъявляются к солнечным батареям космических аппаратов. Такие СБ изготавливаются на основе бинарных, тройных и более сложных полупроводниковых соединений, таких, как арсенид галлия GaAs, теллурид кадмия CdTe, диселенид меди-индия  $\text{CuInSe}_2$  и др. (рис. 6). На рисунке 7 показаны различные варианты солнечных батарей для космических аппаратов. Видно, что при одинаковой мощности больший к.п.д. и, соответственно, меньшие размеры имеют СБ на основе сложных полупроводниковых соединений.

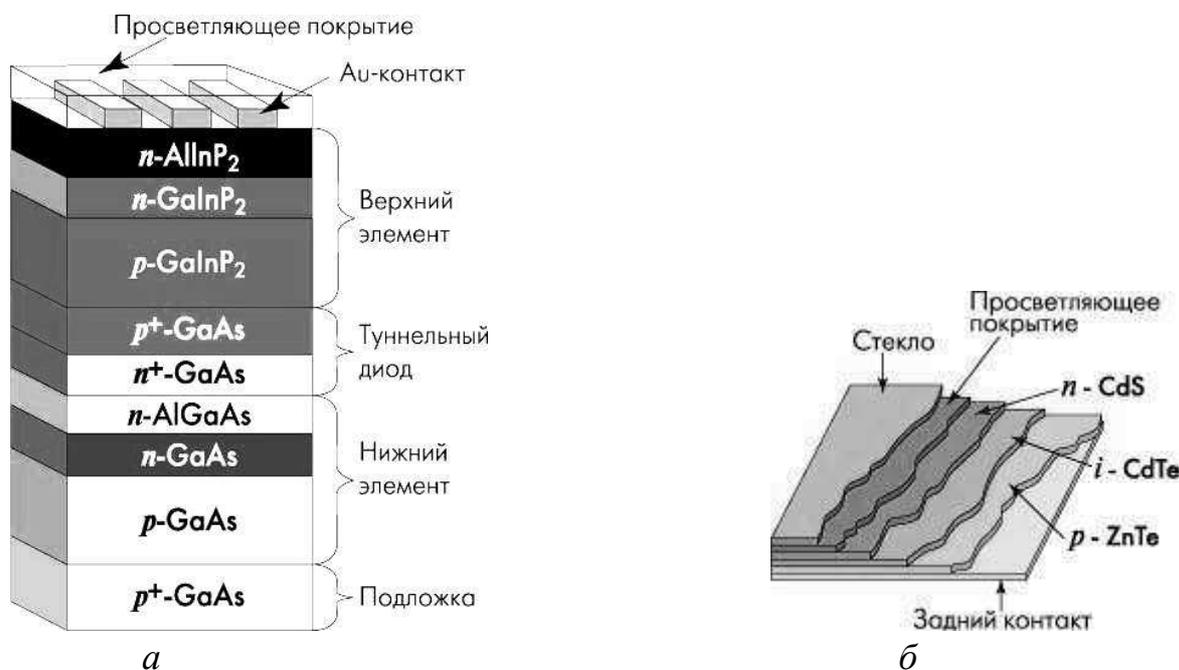


Рисунок 6. Солнечные батареи на основе гетероструктур из полупроводников  $A^{III}B^V$  (а) и  $A^{II}B^{VI}$  (б) [3]

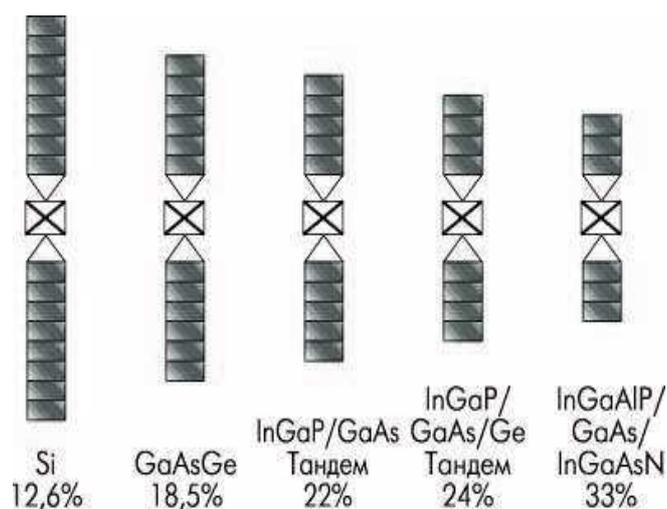


Рисунок 7. Сравнительные размеры СБ для космических аппаратов. Цифры внизу – коэффициент полезного действия [3]

Среди СЭ особое место занимают батареи, использующие органические материалы. В частности, к.п.д. солнечных элементов на основе диоксида титана, покрытого органическим красителем, весьма высок и составляет  $\approx 11\%$ . Немаловажно, что подложками в таких элементах могут выступать полимерные пленки.

Для солнечной батареи на контакте Шоттки используют фталоцианин – органический полупроводник  $p$ -типа. В нем наиболее привлекают высокая фотопроводимость в видимой области спектра и термическая стабильность. Фуллерены ( $C_{60}$ ) также весьма перспективны для органических

солнечных батарей на основе гетероструктур  $C_{60}/p\text{-Si}$  в связи с их способностью к сильному поглощению в коротковолновой области солнечного спектра.

По мнению ученых, главная специфическая особенность нового экономического механизма — сделать охрану окружающей среды составной частью производственно-коммерческой деятельности, чтобы хозяйственник, предприниматель был заинтересован в охране окружающей среды не меньше, чем он заинтересован в выпуске конкурентоспособной продукции [5].

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение солнечной батарее.
2. На каких структурах возможно наблюдение вентильного фотоэффекта?
3. Поясните, в чем состоит явление внутреннего фотоэффекта.
4. Что такое собственная фотопроводимость?
5. Чем определяется направление инжекции электронов при контакте двух материалов?
6. Из каких составляющих складывается полный ток, протекающий через  $p\text{-}n$ -переход?
7. Используя формулу для полного тока через  $p\text{-}n$ -переход и закон Ома для внешней цепи, получите формулу фотоэдс вентильного фотоэлемента.
8. Что такое фотоэдс «холостого хода»?
9. Покажите на графике вольт-амперной характеристики фотоэлемента точку, соответствующую максимальной мощности, отдаваемой фотоэлектрическим генератором во внешнюю цепь.
10. Назовите основные факторы, определяющие эффективность работы солнечных батарей.

## Описание установки

Внешний вид установки для изучения работы солнечной батареи приведен на рисунке 8. Принципиальная схема установки приведена на рисунке 9. Перед началом работы тщательно изучите схему установки. Схема многофункциональная, т.е. на этой установке можно выполнить несколько упражнений, которые коммутируются пятью переключателями  $B1-B5$  (рис. 10) дублированными светодиодными индикаторами соответственно  $L1-L5$ .



Рисунок 8. Внешний вид установки для изучения работы СБ

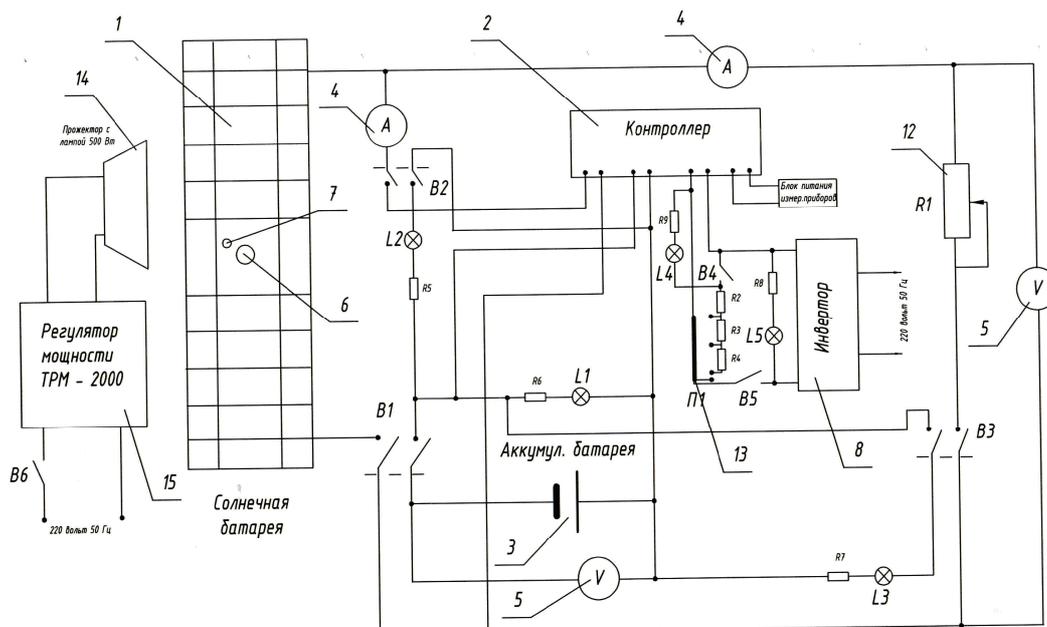


Рисунок 9. Принципиальная схема установки для изучения принципа работы солнечной батареи и ее характеристик. Обозначения: 1 – солнечная батарея, 2 – контроллер, 3 – аккумуляторная батарея, 4 – амперметр, 5 – вольтметр, 6 – люксметр (рис. 11, а), 7 – электронный термометр, 8 – инвертор, 12 – нагрузочное сопротивление, 13 – магазин нагрузок, 14 – лампа-прожектор, 15 – регулятор мощности – диммер (рис. 11, б)



Рисунок 10. Расположение переключателей и соответствующих им светодиодных индикаторов на панели установки для изучения работы СБ



а



б

Рисунок 11. Внешний вид люксметра (а) и диммера (б)

## **Лабораторная работа 1. Исследование характеристик солнечной батареи при разных значениях сопротивления нагрузки и освещенности**

### **Зависимость фотоэдс от освещенности**

Зависимость фотоэдс от освещенности  $\Phi$  будет логарифмической (формула (3)), поскольку фототок  $I_{\phi} = \alpha\Phi$ . На практике зависимость  $\varphi(\Phi)$  будет расти медленней, чем это предписывается формулой (3). Причина заключается в том, что при больших уровнях освещенности будет расти скорость поверхностной и объемной рекомбинации неравновесных носителей заряда. Поэтому при низких уровнях освещенности скорость рекомбинации будет расти пропорционально концентрации фотоэлектронов  $n_{\phi}$ , а при большой освещенности – пропорционально  $n_{\phi}^2$ . В результате не все фотоэлектроны будут достигать  $p$ - $n$ -перехода, что и приведет к отклонению от логарифмической зависимости.

### **Дополнительные контрольные вопросы**

1. Нарисуйте график зависимости фотоэдс от освещенности.

### **Порядок выполнения работы**

Перед тем, как приступить к выполнению работы, ознакомьтесь с теоретическими основами, необходимыми для понимания происходящих процессов.

Прежде чем включить установку, проверьте положение тумблеров, которые должны быть выключены, т.е. все светодиодные индикаторы не должны гореть. Регулятор мощности лампы-прожектора должен находиться в левом крайнем положении. Плоскость солнечной батареи должна располагаться перпендикулярно плоскости стола.

Для выполнения данной работы необходимы солнечная батарея 1, люксметр 6, нагрузочное сопротивление 12, амперметр 4 и вольтметр 5 (рис. 9). Лампа-прожектор 14 питается от сети 220 В, ее мощность регулируется диммером 15 (рис. 9). Поэтому, пользуясь переключателями, необходимо сформировать схему, показанную на рисунке 12.

Для выполнения данного упражнения используются амперметр А1 и вольтметр V1. Амперметр А1 контролирует ток через нагрузку, а вольтметр V1 контролирует напряжение солнечной батареи.

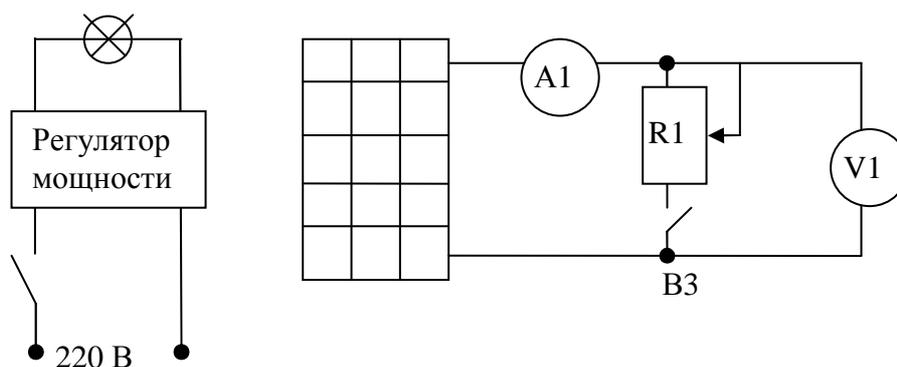


Рисунок 12. Часть общей схемы установки, предназначенная для выполнения данной работы

**Задание 1.** Исследование параметров солнечной батареи в зависимости от освещенности.

1. Включите тумблер  $B1$ , при этом загорится индикатор  $L1$  и включатся все измерительные приборы.

2. Включите тумблер  $B2$ , т. е. подключите солнечную батарею.

3. Включите прожектор тумблером  $B6$ . Постепенно изменяя мощность прожектора до максимума (поворачивая регулятор мощности прожектора по часовой стрелке), запишите значения освещенности  $\Phi$  солнечной батареи (с шагом примерно 1 000 лк) по показаниям люксметра и выходного напряжения  $U$  по показаниям вольтметра  $V1$ . Значения всех регистрируемых величин занесите в табл.1.

Таблица 1

Значения измеряемых величин

№ п/п	$I, A$	$\Phi, лк$	$U, В$
1			
2			
...			

4. Постройте график зависимости выходного напряжения от освещенности  $U(\Phi)$ .

**Задание 2.** Исследование параметров солнечной батареи в зависимости от сопротивления нагрузки.

1. Поворачивая регулятор мощности прожектора установите освещенность  $\Phi = 10\ 000$  лк. По показаниям вольтметра  $V1$  запишите значение напряжения  $U$  на солнечной батарее.

2. Включите тумблер  $B3$ , при этом загорится индикатор  $L3$ . Плавно регулируя сопротивление нагрузки, регистрируйте значения тока  $I$  (с шагом примерно  $0,3$  А) по показаниям амперметра  $A1$  и напряжения  $U$  по показаниям вольтметра  $V1$ . Значения всех регистрируемых величин занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Значения измеряемых величин

№ п/п	$I$ , А	$U$ , В	$N$ , Вт
1			
2			
...			

3. Поверните регулятор сопротивления нагрузки против часовой стрелки до упора, выключите тумблер  $B3$ . Поверните регулятор мощности против часовой стрелки до упора, выключите прожектор тумблером  $B6$ . Тумблером  $B2$  отключите солнечную батарею. Выключите тумблер  $B1$  (отключение всех измерительных приборов), при этом индикатор  $L1$  погаснет.

4. Постройте график зависимости  $U(I)$ .

5. Рассчитайте значение электрической мощности, вырабатываемой батареей, для каждой пары значений тока и напряжения. Определите значения тока  $I_{\text{пик}}$  и напряжения  $U_{\text{пик}}$  соответствующие пиковой мощности солнечной батареи.

### Содержание отчета

Отчетом по работе является заполненная таблица 1, график зависимости  $U(\Phi)$ , заполненная таблица 2, график зависимости  $U(I)$ , формула для расчета пиковой мощности. При построении графиков экспериментальных данных для каждой точки должна быть графически указана погрешность измерения. Следует проанализировать полученные результаты, основываясь на теоретических знаниях, освоенных перед выполнением лабораторной работы.

## Лабораторная работа 2. Исследование зависимости выходного напряжения солнечной батареи от температуры при разных значениях сопротивления нагрузки

### Зависимость темнового тока, фототока и фотоэдс солнечной батареи от температуры

Фототок  $I_{\phi}$  правильно сконструированного фотоэлемента определяется полным числом поглощенных квантов и, если это число неизменно, не должен зависеть от температуры.

Экспериментальные данные, приведенные на рисунке 13, в основном, подтверждают это. Рост  $I_{\phi}$  с температурой определяется уменьшением ширины запретной зоны, что при использовании белого света приводит к увеличению в спектре числа квантов, способных генерировать неосновные носители. Слабая температурная зависимость фототока является важным достоинством фотодиодов. Некоторым недостатком следует признать сильную зависимость от температуры темнового тока  $I_s$  (рис. 13). Это, в первую очередь, связано с резкой температурной зависимостью концентрации неосновных носителей. Действительно, поскольку обычно в рабочей области температур имеет место полная ионизация примесей и, следовательно, концентрация основных носителей (например, электронов) неизменна, из условия постоянства произведения концентраций электронов  $n$  и дырок  $p$  при заданной температуре

$$np = n_0 \exp\left(-\frac{\epsilon_g}{kT}\right),$$

где  $n_0$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий число атомов решетки в единице объема, для концентрации неосновных носителей получим

$$p = \frac{1}{n} n_0 \exp\left(-\frac{\epsilon_g}{kT}\right) \approx \exp\left(-\frac{\epsilon_g}{kT}\right).$$

Таким образом, концентрации неосновных носителей заряда, а, следовательно, и  $I_s$  экспоненциально растут с температурой. Согласно (3) рост тока неосновных носителей приводит к уменьшению фотоэдс.

Для уменьшения величины темнового тока следует либо понижать температуру прибора, либо использовать для изготовления фотоэлементов вещества с большей шириной запрещенной зоны.

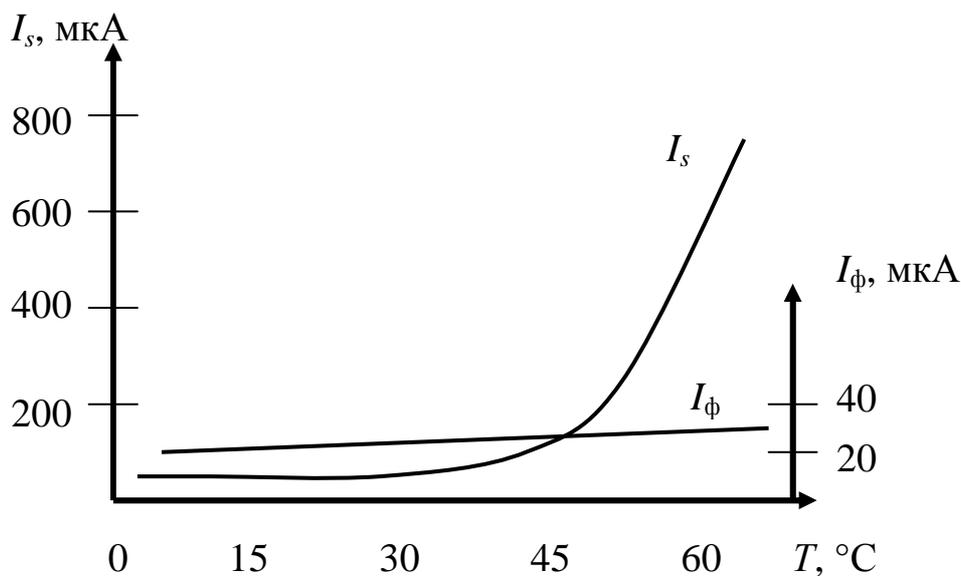


Рисунок 13. Температурная зависимость тока неосновных носителей  $I_s$  и фототока  $I_\phi$  германиевого фотодиода

### Дополнительные контрольные вопросы

1. Объясните температурную зависимость фототока.
2. Объясните температурную зависимость темнового тока.

### Порядок выполнения работы

Перед тем, как приступить к выполнению работы, ознакомьтесь с теоретическими основами, необходимыми для понимания происходящих процессов.

Прежде чем включить установку, проверьте положение тумблеров, которые должны быть выключены, т.е. все светодиодные индикаторы не должны гореть. Регулятор мощности лампы-прожектора должен находиться в левом крайнем положении. Плоскость солнечной батареи должна располагаться перпендикулярно плоскости стола.

Для выполнения данной работы необходимы солнечная батарея 1, люксметр 6, нагрузочное сопротивление 12, амперметр 4 и вольтметр 5 и термометр 7 (рис. 9). Пользуясь переключателями, необходимо сформировать схему, показанную на рисунке 12. Затем следуйте нижеприведенному порядку действий.

Для выполнения данного упражнения используются амперметр А1 и вольтметр V1. Амперметр А1 контролирует ток через нагрузку, а вольтметр V1 контролирует напряжение солнечной батареи. Термометр контролирует температуру солнечной батареи, а люксметр – освещенность.

1. Включите тумблеры  $B1$ ,  $B2$  и  $B3$ , при этом включатся все измерительные приборы.

2. Включите прожектор тумблером  $B6$ .

3. Регулируя мощность прожектора, установите освещенность  $\Phi = 15\ 000$  лк.

4. По показаниям вольтметра  $V1$  запишите значение напряжения  $U$  на солнечной батарее по показаниям амперметра  $A1$  значение фототока.

5. Нагрев солнечной батареи осуществляется излучением прожектора. Контролируя нагрев батареи, повторите действия п.4, увеличивая температуру батареи на 5, 10, 15 и т.д. градусов по сравнению с комнатной температурой. Значения всех регистрируемых величин занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Значения измеряемых величин

№ п/п	$T, ^\circ\text{C}$	$I, \text{A}$	$U, \text{B}$	$I_s, \text{A}$
1				
2				
...				

6. Поверните регулятор сопротивления нагрузки против часовой стрелки до упора, выключите тумблер  $B3$ . Поверните регулятор мощности против часовой стрелки до упора, выключите прожектор тумблером  $B6$ . Тумблером  $B2$  отключите солнечную батарею. Выключите тумблер  $B1$  (отключение всех измерительных приборов), при этом индикатор  $L1$  погаснет.

7. Для каждого значения температуры, пользуясь формулой 3, рассчитайте значение темнового тока  $I_s$  и также занесите значения в таблицу 3.

8. Постройте графики зависимостей фототока, фотоэдс и темнового тока от температуры солнечной батареи.

### Содержание отчета

Отчетом по работе является заполненная таблица 3, графики зависимостей фототока, фотоэдс и темнового тока от температуры солнечной батареи. При построении графиков экспериментальных данных для каждой точки должна быть графически указана погрешность измерения. Следует проанализировать полученные результаты, основываясь на теоретических знаниях, усвоенных перед выполнением лабораторной работы.

### Лабораторная работа 3. Исследование зависимости выходного напряжения солнечной батареи от угла наклона ее поверхности по отношению к источнику света при разных значениях сопротивления нагрузки

#### Зависимость выходного напряжения солнечной батареи от угла наклона ее поверхности по отношению к источнику света и спектрального состава излучения

Интенсивность солнечного излучения в свободном пространстве на удалении, равном среднему расстоянию между Землей и Солнцем, называется солнечной постоянной. Ее величина составляет  $1\,353 \text{ Вт/м}^2$ . При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется в основном из-за поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения - озоном и рассеяния излучения частицами атмосферной пыли и аэрозолями. Показатель атмосферного влияния на интенсивность солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, называется «воздушной массой» (АМ, от англ. air mass). АМ определяется как секанс ( $\sec \Theta = 1 / \cos \Theta$ ) угла между Солнцем и зенитом (рис. 14).

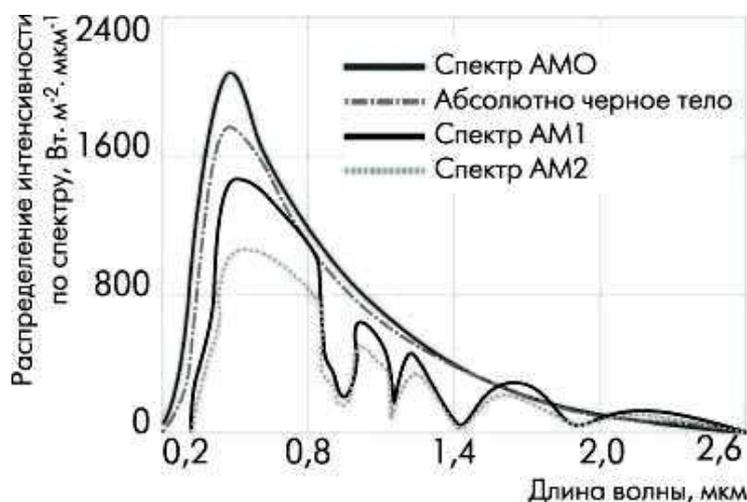


Рисунок 14. Спектральное распределение интенсивности солнечного излучения в различных условиях [3]

Верхняя кривая (АМ0) соответствует солнечному спектру за пределами земной атмосферы (например, на борту космического корабля), т.е. при нулевой воздушной массе. Она аппроксимируется распределением интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре  $5\,800 \text{ К}$ . Кривые АМ1 и АМ2 иллюстрируют спектральное распределение сол-

нечного излучения на поверхности Земли, когда Солнце в зените и при угле между Солнцем и зенитом  $60^\circ$ , соответственно. При этом полная мощность излучения составит соответственно 925 и 691 Вт/м<sup>2</sup>. Средняя интенсивность излучения на Земле примерно совпадает с интенсивностью излучения при  $AM = 1,5$  (Солнце под углом  $42^\circ$  к горизонту, т. е. угол между Солнцем и зенитом  $48^\circ$ ,  $\sec 48^\circ = 1,49$ ).

### **Дополнительные контрольные вопросы**

1. Что такое солнечная постоянная и каково ее значение?
2. Какому значению  $AM$  соответствует средняя интенсивность излучения на Земле?

### **Порядок выполнения работы**

Перед тем, как приступить к выполнению работы, ознакомьтесь с теоретическими основами, необходимыми для понимания происходящих процессов.

Прежде чем включить установку, проверьте положение тумблеров, которые должны быть выключены, т.е. все светодиодные индикаторы не должны гореть. Регулятор мощности лампы-прожектора должен находиться в левом крайнем положении. Плоскость солнечной батареи должна располагаться перпендикулярно плоскости стола.

Для выполнения данной работы необходимы солнечная батарея 1, люксметр 6, нагрузочное сопротивление 12, амперметр 4 и вольтметр 5 (рис. 9). Лампа-прожектор 14 питается от сети 220 В, ее мощность регулируется диммером 15 (рис. 9). Поэтому, пользуясь переключателями, необходимо сформировать схему, показанную на рисунке 12. Затем следуйте нижеприведенному порядку действий.

Для выполнения данного упражнения используются амперметр  $A1$  и вольтметр  $V1$ . Амперметр  $A1$  контролирует ток через нагрузку, а вольтметр  $V1$  контролирует напряжение солнечной батареи.

1. Включите тумблер  $B1$ , при этом загорится индикатор  $L1$  и включатся все измерительные приборы.
2. Включите тумблер  $B2$ , т. е. подключите солнечную батарею.
3. Включите прожектор тумблером  $B6$ .
4. Выполните задание 2 лабораторной работы 1, занося регистрируемые значения в таблицы 6 (вместо табл. 2) и 7 (вместо табл. 3).

Таблица 6

Значения измеряемых величин

№ п/п	$\Phi$ , лк	$\beta$ , °	$I$ , А	$U$ , В
1				
2				
...				

Таблица 7

Характеристики солнечной батареи, соответствующие пиковой мощности

№ п/п	$\Phi$ , лк	$\beta$ , °	$I_{\text{пик}}$ , А	$U_{\text{пик}}$ , В	$N_{\text{пик}}$ , Вт
1					
2					
...					

5. Поверните плоскость СБ относительно источника света на угол  $\beta = 30^\circ$ , повторите действия п.1. Поверните регулятор сопротивления нагрузки против часовой стрелки до упора, выключите тумблер В3.

6. Повторите действия п.5 для различных значений  $\beta$  с шагом  $10^\circ$  (до  $75^\circ$ ).

7. Поверните регулятор сопротивления нагрузки против часовой стрелки до упора, выключите тумблер В3. Поверните регулятор мощности против часовой стрелки до упора, выключите прожектор тумблером В6. Тумблером В2 отключите солнечную батарею. Выключите тумблер В1 (отключение всех измерительных приборов), при этом индикатор L1 погаснет. Верните плоскость СБ в исходное вертикальное положение ( $\beta = 0^\circ$ , перпендикулярно плоскости стола).

8. Постройте семейство зависимостей  $U(I)$  при различных значениях  $\beta$  (на одном графике).

9. Постройте график зависимости  $N_{\text{пик}}(\beta)$ .

### Содержание отчета

Отчетом по работе являются заполненная таблица 6, графики семейства зависимостей  $U(I)$  (при различных значениях  $\beta$ ), формула для расчета пиковой мощности, заполненная таблица 7, график зависимости  $N_{\text{пик}}(\beta)$ . При построении графиков экспериментальных данных для каждой точки должна быть графически указана погрешность измерения. Следует проанализировать полученные результаты, основываясь на теоретических знаниях, освоенных перед выполнением лабораторной работы.

## Лабораторная работа 4. Исследование основных режимов работы солнечной фотоэлектрической системы электроснабжения в зависимости от интенсивности падающего излучения и мощности нагрузки

### Основные узлы и элементы солнечной электростанции

Кроме собственно солнечной батареи, любая фотоэлектрическая силовая установка (солнечная электростанция) комплектуется аккумуляторной батареей, контроллером и инвертором. Принципиальная схема установки приведена на рисунке 15.

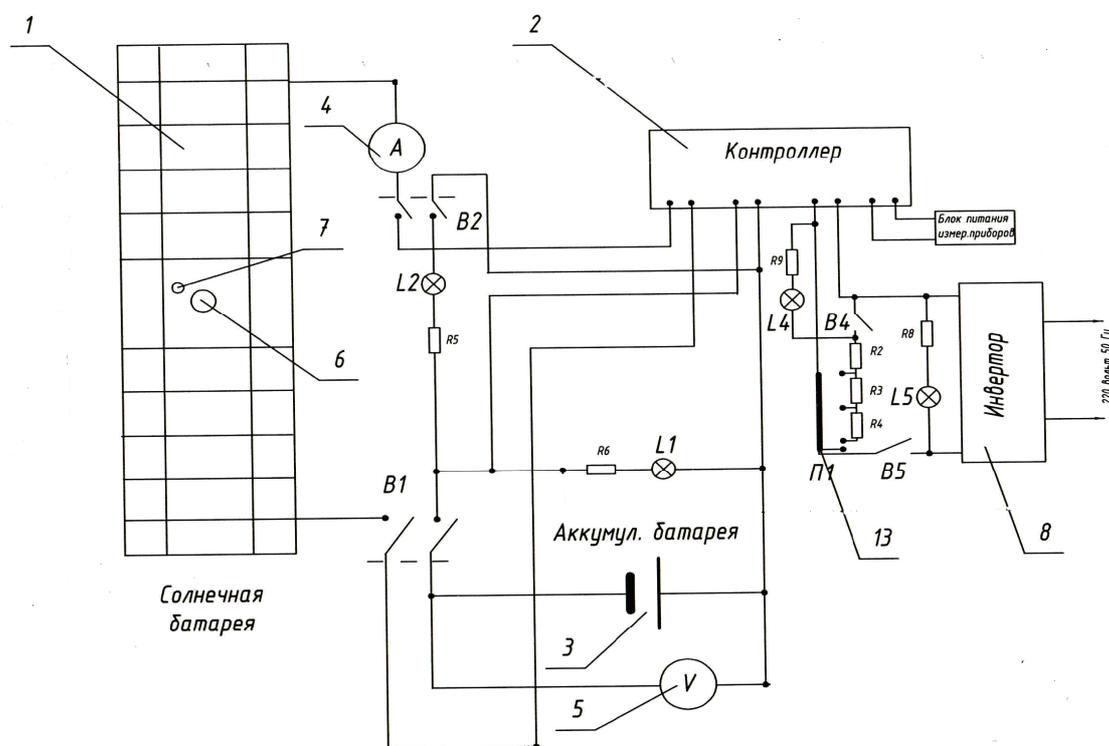


Рисунок 15. Принципиальная схема солнечной электростанции. Обозначения те же, что на рисунке 9.

Данная схема полностью объясняет работу солнечной фотоэлектрической электростанции. Основными элементами являются солнечная батарея 1, контроллер 2 и аккумуляторная батарея 3. Солнечные батареи могут создать до 100 В напряжения, а аккумуляторные батареи рассчитаны на рабочее напряжение 12 В или 24 В. Работа контроллера заключается в регулировании зарядки аккумуляторов в определенном режиме и строгом контроле выходной мощности. Выполнение данной работы заключается в

изучении работы контроллера, который является сердцем всей фотоэлектрической системы.

### Дополнительные контрольные вопросы

1. Назовите основные узлы и элементы солнечной электростанции.
2. В чем заключается работа контроллера?

### Порядок выполнения работы

Перед тем, как приступить к выполнению работы, ознакомьтесь с теоретическими основами, необходимыми для понимания происходящих процессов.

Прежде чем включить установку, проверьте положение тумблеров, которые должны быть выключены, т.е. все светодиодные индикаторы не должны гореть. Регулятор мощности лампы-прожектора должен находиться в левом крайнем положении. Плоскость солнечной батареи должна располагаться перпендикулярно плоскости стола.

Для выполнения данной работы необходимы солнечная батарея 1, люксметр 6, амперметр 4 (А2), вольтметры 5 (V1, V2), аккумуляторная батарея 3, различные нагрузки 13, контроллер 2 и инвертор 8 (рис. 9). Принципиальная схема установки приведена на рисунке 9.

Амперметр А1 контролирует ток через нагрузку, а вольтметр V1 контролирует напряжение солнечной батареи. Амперметр А2 показывает ток зарядки аккумулятора, который управляется контроллером в зависимости от мощности нагрузки. Вольтметр V2 следит за изменениями напряжения  $U_{AB}$  на аккумуляторе.

Следуйте нижеприведенному порядку действий.

1. Включите тумблер  $B1$ , при этом загорится индикатор  $L1$  и включатся все измерительные приборы.

3. Проверьте напряжение на аккумуляторе по показаниям вольтметра V2. Если оно меньше 13 В, переходите к выполнению следующих пунктов. Если оно больше 13 В, подключите тумблером  $B4$  нагрузку  $R = 10$  Ом и следите, чтобы напряжение упало до 13 В. Это связано с тем, что контроллер включается при напряжении на аккумуляторе меньшем 13 В и в дальнейшем поддерживает напряжение на аккумуляторе в диапазоне от 13,1 В до 13,7 В.

3. Включите тумблер  $B2$ , т. е. подключите солнечную батарею.

4. Тумблером  $B6$  включите прожектор 14. Регулируя мощность прожектора диммером 15, установите освещенность 10 000 лк. Освещенность регистрируется люксметром 6.

5. По показаниям амперметра  $A2$  регистрируйте ток зарядки аккумулятора  $I_{3A}$ , по показаниям вольтметра  $V2$  - напряжение на нем. Зарегистрируйте напряжение на аккумуляторе  $U_{AB \text{ макс}}$ , при котором произойдет отключение солнечной батареи (ток через  $A2$  упадет до нуля). Показания регистрируемых величин занесите в таблицу 8.

Таблица 8

Значения измеряемых величин

№ п/п	$R$ , Ом	$I_{3A}$ , А	$U_{AB}$ , В
1			
2			
...			

6. Включите тумблером  $B4$  нагрузку  $R = 5$  Ом и следите за показаниями вольтметра  $V2$  и амперметра  $A2$ . Зарегистрируйте напряжение на аккумуляторе  $U_{AB \text{ мин}}$ , при котором произойдет подключение солнечной батареи (через  $A2$  пойдет ток зарядки). Зарегистрируйте этот ток. Показания регистрируемых величин занесите в таблицу 8.

7. Тумблером отключите  $B4$  нагрузку. Поверните регулятор мощности против часовой стрелки до упора, выключите тумблер  $B3$ . Поверните регулятор мощности против часовой стрелки до упора, выключите прожектор тумблером  $B6$ . Тумблером  $B2$  отключите солнечную батарею. Выключите тумблер  $B1$  (отключение всех измерительных приборов), при этом индикатор  $L1$  погаснет.

### Содержание отчета

Отчетом по работе является заполненная таблица 8. Следует проанализировать полученные результаты, основываясь на теоретических знаниях, освоенных перед выполнением лабораторной работы.

## **Лабораторная работа 5. Исследование принципов работы фотоэлектрической системы электроснабжения в режимах защиты аккумуляторной батареи и солнечной батареи**

Схема солнечной электростанции, приведенная на рисунке 15 полностью объясняет работу солнечной фотоэлектрической энергосистемы, которая стремительно внедряется во всем мире. В контроллерах предусмотрен электронный предохранитель, который имеет точку защитного отключения при разрядке аккумулятора до 11,1 В, при превышении напряжения на аккумуляторе 14,4 В, защиту от короткого замыкания на входе и от короткого замыкания на нагрузке. Выполнение данной работы заключается в изучении работы режимов защиты контроллера (2 на рис. 15). В данной работе исследуется также работа инвертора (8 на рис. 15), который применяется для преобразования постоянного напряжения аккумуляторов 12 В в переменное напряжение 220 В, 50 Гц. Инвертор тоже защищен от разрядки аккумулятора (10 В), от перегрева и перегрузки. Промышленные инверторы поддерживают мощности в десятки киловатт.

### **Дополнительные контрольные вопросы**

1. В чем заключается функция инвертора в работе солнечной электростанции?

### **Порядок выполнения работы**

Перед тем, как приступить к выполнению работы, ознакомьтесь с теоретическими основами, необходимыми для понимания происходящих процессов.

Прежде чем включить установку, проверьте положение тумблеров, которые должны быть выключены, т.е. все светодиодные индикаторы не должны гореть. Регулятор мощности лампы-прожектора должен находиться в левом крайнем положении. Плоскость солнечной батареи должна располагаться перпендикулярно плоскости стола.

Принципиальная схема установки приведена на рисунке 9. Для выполнения данной работы необходимы солнечная батарея 1, люксметр 6, амперметр 4 (А2), вольтметры 5 (V1, V2), аккумуляторная батарея 3, различные нагрузки 13, контроллер 2 и инвертор 8 (рис. 9).

Амперметр А1 контролирует ток через нагрузку, а вольтметр V1 контролирует напряжение солнечной батареи. Амперметр А2 показывает

управляемый контроллером ток зарядки аккумулятора. Этот ток зависит от мощности нагрузки. Вольтметр  $V2$  измеряет напряжение  $U_{AB}$  на аккумуляторе.

Следуйте нижеприведенному порядку действий. Значения всех регистрируемых величин заносите в таблицу 9.

Таблица 9

Значения измеряемых величин

$R, \text{ Ом}$	$\Phi, \text{ лк}$	$U_{AB \text{ выкл}}, \text{ В}$	$U_{AB \text{ вкл}}, \text{ В}$	$U_{\text{вкл}}, \text{ В}$	$U_{\text{выкл}}, \text{ В}$

1. Включите тумблер  $B1$ , при этом загорится индикатор  $L1$  и включатся все измерительные приборы.

2. Включите тумблер  $B2$ , т. е. подключите солнечную батарею.

2. Тумблером  $B5$  включите инвертор, для наглядности к нему подключите настольную лампу (рис. 16). Лампа должна гореть. Тумблером  $B4$  подключите нагрузку  $R = 10 \text{ Ом}$ . Зарегистрируйте, при каком напряжении на аккумуляторной батарее  $U_{AB \text{ выкл}}$  выключится настольная лампа и выключите тумблер  $B4$ .



Рисунок 16. Расположение розетки на установке для изучения работы СБ

2. Включите тумблер  $B2$ , т.е. солнечную батарею. Включите прожектор тумблером  $B6$ . Поворачивая регулятор мощности прожектора, установите освещенность 10 000 лк и зарегистрируйте по показаниям вольтметра  $V2$  напряжение на аккумуляторной батарее  $U_{AB \text{ вкл}}$ , при котором включилась настольная лампа.

3. При освещенности 10 000 лк зарегистрируйте напряжение на солнечной батарее  $U_{\text{вкл}}$  по показаниям вольтметра  $V1$ . Тумблером  $B3$  включите нагрузку и постепенно увеличивайте ее. По показаниям вольтметра  $V1$  зарегистрируйте напряжение  $U_{\text{выкл}}$ , при котором включится система защиты контроллера, т.е. выключится настольная лампа.

4. Переведите регулятор сопротивления нагрузки в крайнее левое положение, выключите тумблер  $B3$ . Поверните регулятор мощности против часовой стрелки до упора, выключите прожектор тумблером  $B6$ . Выключите солнечную батарею (тумблер  $B2$ ) и инвертор (тумблер  $B5$ ). Выключите тумблер  $B1$  (отключение всех измерительных приборов), при этом индикатор  $L1$  погаснет.

### Содержание отчета

Отчетом по работе является заполненная таблица 9, Следует проанализировать полученные результаты, основываясь на теоретических знаниях, освоенных перед выполнением лабораторной работы.

## Библиографический список

1. Сайт «Википедия – Свободная энциклопедия» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org>, свободный.
2. Парфенов, В. В. Физика полупроводников (элементы теории, руководство и задания к лабораторным работам): учеб.-метод. пособие для студ. физ. ф-та [Текст] / В. В. Парфенов, Р. Х. Закиров. – Казань: Физический факультет Казан. гос. ун-та, 2001. – 60 с. – Режим доступа: [http://old.kpfu.ru/f6/k5/bin\\_files/29.pdf](http://old.kpfu.ru/f6/k5/bin_files/29.pdf), свободный.
3. Мейтин, М. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы [Электронный ресурс] / М. Мейтин. – 2008. – Режим доступа: <http://www.mobipower.ru/modules.php?name=Pages&pa=showpage&pid=1>, свободный.
4. Парфенов, В. В. Физика полупроводниковых приборов (элементы теории, руководство и задания к лабораторным работам): метод. пособие для студ. физ. ф-та [Текст] / В. В. Парфенов, Р. Х. Закиров, Н. В. Болтакова. – Казань: Физический факультет Казан. гос. ун-та, 2004. – 56 с. – Режим доступа: [http://old.kpfu.ru/f6/k5/bin\\_files/30.pdf](http://old.kpfu.ru/f6/k5/bin_files/30.pdf), свободный.
5. Григоров, И. Н. Зарядка аккумуляторов с помощью солнечных батарей [Текст] / И. Н. Григоров // Радиоконструктор. – 2002. – № 10. – С. 13–17.
6. Городов, Р. В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие [Текст] / Р. В. Городов, В. Е. Губин, А. С. Матвеев. – Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2009. – 294 с.
7. Пикус, Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов [Текст] / Г. Е. Пикус. – М.: Наука, 1965. – 628 с.
8. Васильев, А. М. Полупроводниковые фотопреобразователи [Текст] / А. М. Васильев, А. П. Ландсман. – М.: Советское радио, 1971. – 568 с.
9. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов [Текст] / С. Зи. – М.: Мир, 1984.
10. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники [Текст] / В. В. Пасынков, В.С. Сорокин – М.: Лань, 2003. – 368 с.
11. Рывкин, С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках [Текст] / С. М. Рывкин – М.: Физматгиз, 1963. – 496 с.

## Содержание

	стр.
Введение .....	3
Теоретические основы фотоэлектрического преобразования солнечной энергии .....	4
Физические основы вентильного фотоэффекта .....	4
Зависимость фотоэдс вентильного фотоэлемента от внешней нагрузки .....	7
Пути и перспективы развития солнечных батарей .....	8
Контрольные вопросы .....	12
Описание установки .....	13
Лабораторная работа 1. Исследование характеристик солнечной батареи при разных значениях сопротивления нагрузки и освещенности .....	15
Зависимость фотоэдс от освещенности .....	15
Дополнительные контрольные вопросы .....	15
Порядок выполнения работы .....	15
Задание 1 .....	16
Задание 2 .....	16
Содержание отчета .....	17
Лабораторная работа 2. Исследование зависимости выходного напряжения солнечной батареи от температуры при разных значениях сопротивления нагрузки .....	18
Зависимость темнового тока, фототока и фотоэдс солнечной батареи от температуры .....	18
Дополнительные контрольные вопросы .....	19
Порядок выполнения работы .....	19
Содержание отчета .....	20
Лабораторная работа 3. Исследование зависимости выходного напряжения солнечной батареи от угла наклона ее поверхности по отношению к источнику света при разных значениях сопротивления нагрузки .....	21
Зависимость выходного напряжения солнечной батареи от угла наклона ее поверхности по отношению к источнику света и спектрального состава излучения .....	21
Дополнительные контрольные вопросы .....	22

Порядок выполнения работы .....	22
Содержание отчета .....	23
Лабораторная работа 4. Исследование основных режимов работы солнечной фотоэлектрической системы электроснабжения в зависимости от интенсивности падающего излучения и мощности нагрузки .....	24
Основные узлы и элементы солнечной электростанции .....	24
Дополнительные контрольные вопросы .....	25
Порядок выполнения работы .....	25
Содержание отчета .....	26
Лабораторная работа 5. Исследование принципов работы фотоэлектрической системы электроснабжения в режимах защиты аккумуляторной батареи и солнечной батареи .....	26
Дополнительные контрольные вопросы .....	27
Порядок выполнения работы .....	27
Содержание отчета .....	29
Библиографический список .....	30

*Учебное издание*

**Парфенов Виктор Всеволодович,  
Болтакова Наталья Викторовна  
Закиров Рифгат Хусниевич**

**ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ**

Методическое пособие к лабораторным работам

Кафедра физики твердого тела