

УДК  
621.38

Л-556 Министерство общего и профессионального  
образования Российской Федерации

---

Московский энергетический институт  
(технический университет)

---

**В. А. Лигачев, А. И. Попов**

**Лабораторная работа**

**Спектральная чувствительность и  
вольт-амперная характеристика  
солнечного элемента**

Москва

Издательство МЭИ

1999

УДК  
621.38  
Л-556  
УДК: 621.383.8:535.215 (076.5)

Утверждено учебным управлением МЭИ

Подготовлено на кафедре физики и технологии электротехнических материалов и компонентов ма-

Лигачев В.А., Попов А.И. / Ред. А.И. Попов

**Лабораторная работа “Спектральная чувствительность и вольт-амперная характеристика солнечного элемента” по курсу “Физика и технология приборов основе некристаллических полупроводников” - М.: изд-во МЭИ, 1999, – 15 С.**

Описана методика выполнения лабораторной работы по экспериментальному исследованию и расчету основных характеристик фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии на основе кристаллического и аморфного кремния.

Предназначено для студентов специальности 2001.

Учебное издание

Лигачев Валерий Алексеевич  
Попов Анатолий Игоревич

Спектральная чувствительность и вольт-амперная характеристика  
солнечного элемента  
Лабораторная работа по курсу  
“Физика и технология приборов на основе  
некристаллических полупроводников”

Корректор Е.Н.Касьянова  
ЛР № 020528 от 05.06.97

---

Темплан издания МЭИ 1999(2) метод. Подписано к печати 10.02.99  
Формат бумаги 60x84/16. Физ печ. л. 1.5. Тираж 50. Изд № 8

---

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказариенная, д. 14

© Московский энергетический институт, 1999

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение известных и разработка новых экологически чистых источников электрической энергии приобретают особое значение в связи с неуклонно повышающимся уровнем загрязнения земной атмосферы двуокисью углерода сопровождающимся ростом влияния так называемого “парникового эффекта” и вызванным им потеплением климата нашей планеты. Среди наиболее перспективных источников такого рода важное место занимают фотоэлектрические полупроводниковые преобразователи (ФЭПП) солнечной энергии. Достоинством этих устройств является безотходность технологии преобразования энергии и относительно простая конструкция, что позволяет использовать их в самых различных климатических условиях, включая работу на космических аппаратах. К недостаткам ФЭПП, прежде всего, следует отнести довольно низкие (в диапазоне 0,5 — 28 % [1]) значения коэффициента полезного действия и высокую стоимость получаемой энергии. Однако в настоящее время интенсивно развивается ряд направлений научных и технологических исследований, нацеленных на улучшение этих показателей ФЭПП. Наиболее значимые результаты надеются получить от использования в качестве основы ФЭПП аморфных полупроводниковых материалов и так называемых “тандемных” конструкций преобразователей солнечной энергии. Среди аморфных полупроводников наиболее перспективным для создания ФЭПП в настоящее время считают гидрогенизированный аморфный кремний (a-Si:H) и сплавы на его основе. Для повышения эффективности преобразования солнечной энергии представляется привлекательным соединить в одном устройстве два (тандем) или более *p-n* переходов с тем, чтобы каждый из них работал с высокой эффективностью в ограниченном спектральном диапазоне.

Для определения перспективности использования того или иного материала в качестве основы для создания ФЭПП, прежде всего, необходимо определить спектральную зависимость фотоэлектрических параметров материала, в частности, квантового выхода внутреннего фотоэффекта  $\eta$ , коэффициента оптического поглощения  $\alpha$  и сравнить полученные спектры со спектром мощности  $E(\lambda)$  солнечного излучения (рис. 1). Поскольку характер функции  $E(\lambda)$  существенно зависит от условий измерения (уровень интенсивности потока солнечного излучения в околоземном космическом пространстве принято обозначать как АМ0, на экваторе — АМ1, в средних широтах при высоте солнца  $41^\circ 49'$  — АМ1,5, при высоте Солнца  $30^\circ$  — АМ2, и т.д.) то требования к материалу зависят от условий работы проектируемого ФЭПП. Однако практика показывает, что удачный выбор того или иного материала в качестве основы для создания ФЭПП еще не гарантирует высоких характеристик всего устройства. Не менее важную роль играет совершенство технологии изготовления прибора в целом. Для количественной оценки эффективности конструкции ФЭПП удобно воспользоваться эквивалентной

электрической схемой замещения его параметров. В настоящей работе параметры схемы замещения ФЭПП оцениваются по результатам исследования спектральной чувствительности двух ФЭПП (на основе аморфного материала и его кристаллического аналога) и их вольт – амперных характеристик в темноте и при освещении.

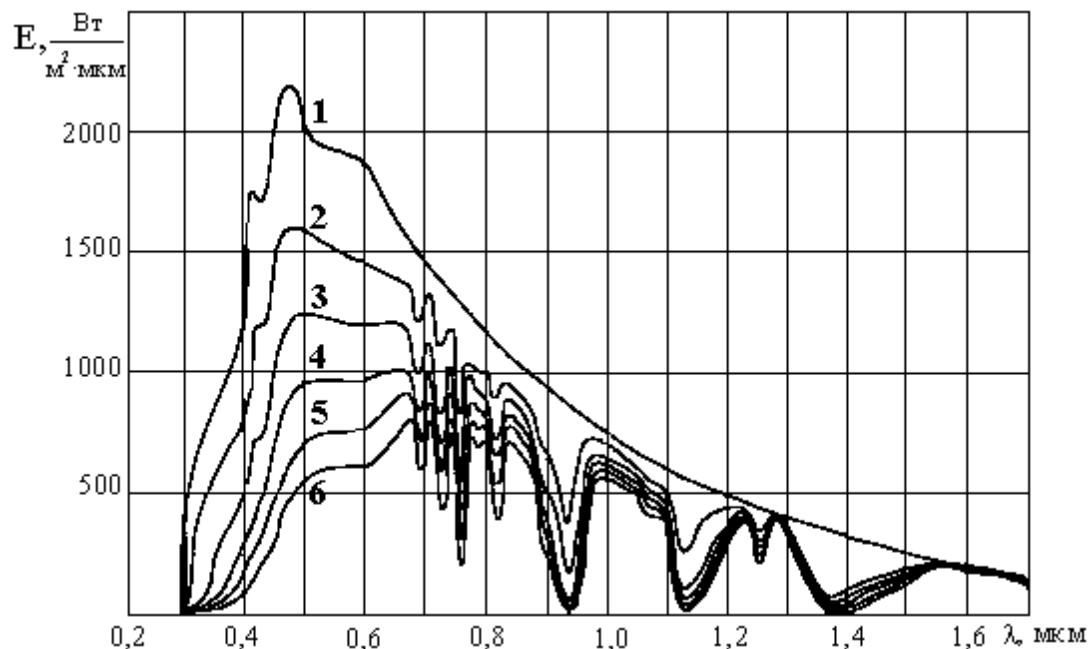


Рис. 1. Спектральное распределение энергии солнечного излучения при различных значениях атмосферной массы: 1 – AM0, 2 – AM1, 3 – AM2, 4 – AM3, 5 – AM4 и 6 – AM5.

**Целью работы** является сравнительное исследование спектральной чувствительности двух ФЭПП (на основе аморфного и кристаллического кремния), их вольт – амперных характеристик в темноте и при монохроматическом освещении, а также использование полученных данных для расчета параметров эквивалентной схемы замещения исследованных ФЭПП и параметров расчетного соотношения для вольт – амперной характеристики приборов.

## 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ФЭПП

В простейшем случае ФЭПП может состоять из единственного *p-n* – перехода, расположенного на сравнительно небольшой (1 – 2 мкм) глубине от освещаемой поверхности полупроводника. Поглощение света с энергией квантов  $h\nu$  больше ширины запрещенной зоны материала  $E_g$  приводит (за счет внутреннего фотоэффекта) к возникновению свободных электронов и дырок как в *p* и *n* областях перехода, так и в непосредственно примыкающей к границе их раздела области пространственного заряда (ОПЗ). Существующие

щее в ОПЗ электрическое поле разделяет созданные светом свободные носители заряда в зависимости от их знака: свободные электроны выбрасываются в  $n$ - область перехода, а дырки – в  $p$ -область [2]. Отметим, что при разомкнутой внешней цепи электроны и дырки, концентрирующиеся соответственно в  $n$  и  $p$  областях диода, приводят к появлению разности потенциалов, смещающей  $p$ - $n$  переход в прямом направлении. Если же ФЭПП подключен во внешнюю электрическую цепь, то создаваемые при освещении избыточные концентрации электронов и дырок приведут к возникновению во внешней цепи электрического тока. Таким образом, во время освещения ФЭПП происходит преобразование энергии квантов света в энергию движущихся по внешней цепи электрических зарядов. Типичные значения напряжения  $U_{xx}$  холостого хода (напряжение между  $p$ - и  $n$ - областями прибора, отсоединенного от внешней электрической цепи) описанного выше однокаскадного ФЭПП обычно находятся в диапазоне 0,3 – 1,0 эВ [2], и в основном определяются электрофизическими параметрами и степенью легирования материала, на основе которого изготовлен ФЭПП. Другой важной характеристикой прибора является его ток короткого замыкания  $I_{кз}$ , определяемый при коротком замыкании между металлизированными контактами к  $p$ - и  $n$ - областям ФЭПП. Естественно, что величина  $I_{кз}$  зависит не только от электрофизических параметров прибора, но и от его площади, поэтому часто вместо  $I_{кз}$  используют другую характеристику – плотность тока короткого замыкания  $J_{кз}$ , которая равна частному от деления  $I_{кз}$  на площадь освещаемой поверхности прибора. Типичные значения этого параметра для используемых на практике ФЭПП находится в пределах от единиц до нескольких десятков миллиампер на квадратный сантиметр освещаемой площади прибора [2, 3]. Из-за резкой зависимости коэффициента поглощения полупроводника от энергии квантов света измеряемые в эксперименте значения  $U_{xx}$  и  $I_{кз}$  (или  $J_{кз}$ ) будут в весьма значительной степени зависеть от спектрального состава оптического излучения, падающего на ФЭПП. Поэтому для унификации измерений соответствующих характеристик ФЭПП широко используются так называемые имитаторы солнечного спектра [1, 2], дающие излучение со спектральным составом, близким к спектру Солнца (обычно при условиях измерения от АМ0 до АМ2). На рис.2 показаны типичная вольт – амперная характеристика кремниевого ФЭПП измеренная при условиях освещения АМ0 (1, сплошная линия) и темновая (измеренная в отсутствии освещения) вольт – амперная характеристика этого же прибора (2, пунктирная линия).

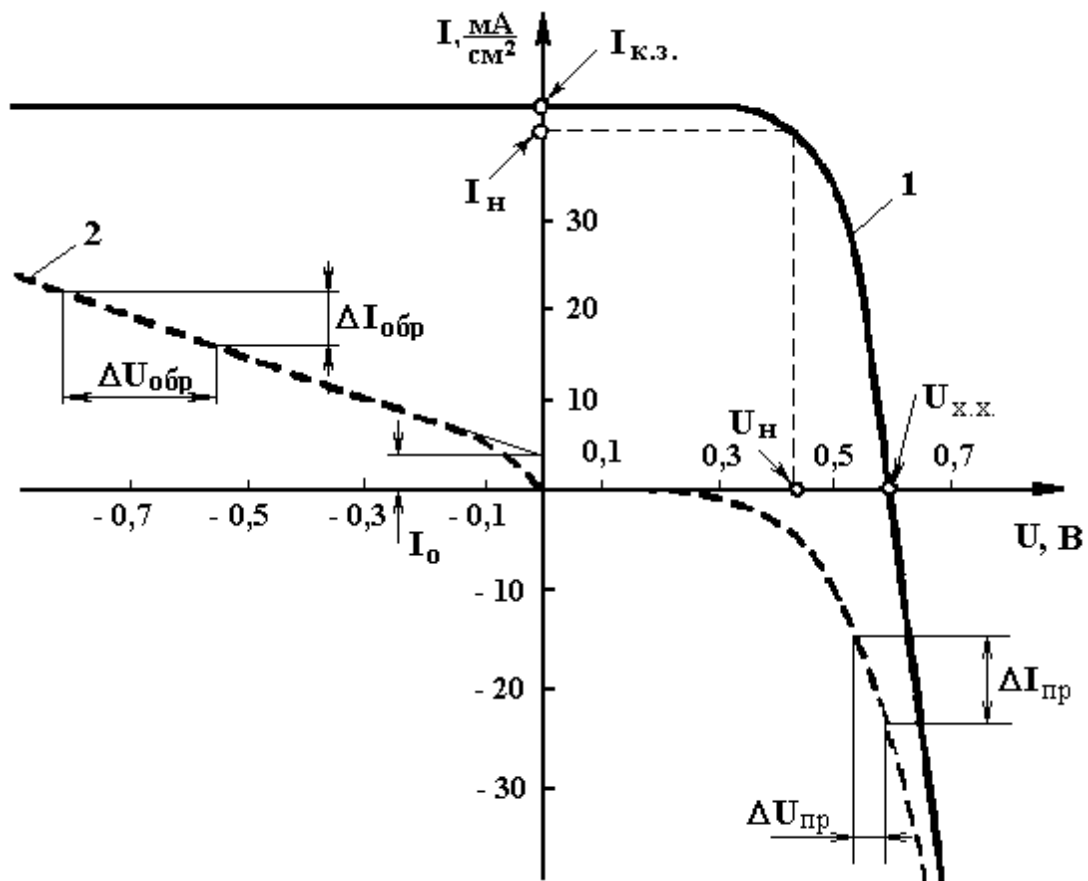


Рис. 2. Типичная вольт – амперная характеристика ФЭП на основе кристаллического кремния при измерении на имитаторе внеатмосферного Солнца [1]. Кривая 1 – световая характеристика, кривая 2 – темновая. На рисунке также проиллюстрированы методы определения некоторых параметров эквивалентной схемы замещения ФЭП и уравнения вольт-амперной характеристики.

Символами  $U_n$  и  $J_n$  обозначены значения напряжения и плотности тока в нагрузочной цепи при режиме работы ФЭП, соответствующему максимальной выделяемой мощности на сопротивлении нагрузки (см. рис.2): максимальной площади прямоугольника с противоположными вершинами в начале координат и на принадлежащем первому квадранту участка световой вольт – амперной характеристики ФЭП. Важным параметром ФЭП является коэффициент заполнения вольт – амперной характеристики  $\xi$ , определяемый отношением площади под световой вольт – амперной характеристикой прибора в первом квадранте системы координат на рис.2 к площади прямоугольника со сторонами  $U_{x.x}$  и  $J_{k.z.}$  У современных солнечных элементов на основе кристаллического кремния величина параметра  $\xi$  обычно находится в пределах 0,75 – 0,80 [1], а для однокаскадного ФЭП на основе аморфного кремния величина этого параметра обычно не превышает 0,7 [3].

Поскольку в простейшем варианте ФЭП представляет собой полупроводниковый диод, то его световая вольт – амперная характеристика определяется соотношением, полученным [2] модификацией соответствующего соотношения для неосвещаемого  $p-n$  перехода:

$$I_H = I_\phi - I_{on} \cdot \left\{ \exp \left[ \frac{e \cdot (U + I_H R_n)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U}{R_{ш}}, \quad (1)$$

где  $I_\phi$  – фототок, протекающий через переход,  $I_{OH}$  – обратный ток насыщения,  $e$  – заряд электрона,  $R_H$  – последовательное сопротивление ФЭПП,  $A$  – коэффициент, получаемый из сравнения теоретической и экспериментальной вольт – амперных характеристик (обычно принимает значения от 1 до 5 [2]),  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура прибора,  $R_{ш}$  – шунтирующее сопротивление ФЭПП.

Введенные выше параметры вольт – амперной характеристики ФЭПП позволяют построить эквивалентную схему ФЭПП (рис.3). Параметры идеального источника тока  $I_\phi$  определяются преимущественно характеристиками светового потока и оптическими параметрами материала, наличие прямовключенного идеального диода необходимо для учета тока через  $p-n$  переход, возникающего под действием прямого смещения из-за наличия избыточных концентраций электронов в  $n$  – области прибора и избыточной концентрации дырок в его  $p$  – области. Появление в эквивалентной схеме шунтирующего сопротивления обусловлено наличием различного рода токов утечки в приборе, а последовательное сопротивление учитывает наличие контактных сопротивлений между полупроводниковым материалом и металлизированными внешними контактами прибора, сопротивление  $p$ - и  $n$ - областей ФЭПП. Измерение вольт – амперных характеристик ФЭПП позволяет определить численные значения параметров его эквивалентной схемы, что является одной из задач данной лабораторной работы.

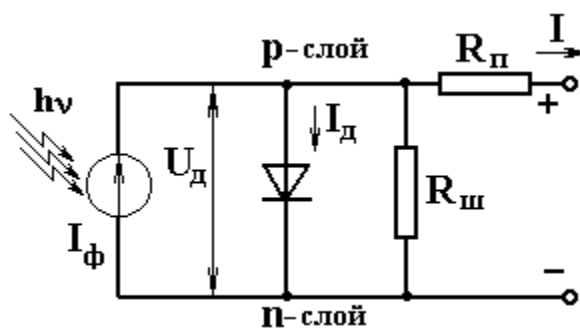


Рис.3. Эквивалентная схема фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии. На схеме обозначено направление протекания прямого тока  $I_D$  через  $p-n$  – переход (диод) и прямое напряжение на нем  $U_D$ . Значение других параметров и элементов схемы разъясняется в основном тексте.

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФЭПП

Спектральная чувствительность ФЭПП определяется [1] как спектральная зависимость тока его короткого замыкания  $I_{кз}$ , рассчитанного на единицу энергии падающего оптического излучения. Схема установки для измерения спектральной чувствительности ФЭПП приведена на рис.4. Оптическая часть установки состоит из источника света (1), и монохроматора (2). В качестве источника света используется галогенная лампа накаливания типа КГИ 150–24, а в качестве монохроматора – оптическая часть спектрофотометра СФ4 (или СФ4А). Установка снабжена также блоком питания источника света (3), и камерой (4) в которую помещается исследуемый образец (5). Все измерения проводятся при комнатной температуре. Электрическая часть измерительной схемы включает источник питания измерительной цепи (6), нагрузочный переменный резистор (7), вольтметр (8) и амперметр (9). В качестве источника питания измерительной цепи используется источник постоянного тока П4105, для измерения напряжения применяется цифровой вольтметр В7-21А, а для измерения тока – цифровой вольтметр В7-21 с соответствующей приставкой. Элементы, обведенные на рис.4 пунктирным прямоугольником расположены в блоке коммутации (БК).

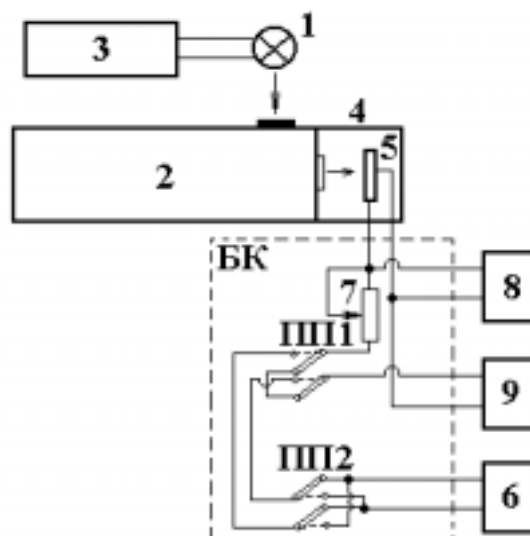


Рис. 4. Блок-схема установки для измерения спектральной чувствительности ФЭПП, а также световой и темновой вольт-амперных характеристик прибора. 1 – лампа накаливания КГИ 150 – 24; 2 – монохроматор СФ4 (СФ4А); 3 – блок питания источника света; 4 – камера для исследуемого ФЭПП; 5 – исследуемый образец ФЭПП; 6 – источник питания типа П4105; 7 – переменный резистор цепи нагрузки; 8 – вольтметр В7 – 21А; 9 – амперметр В7 – 21; БК - блок коммутации; ПП1 – тумблер для подключения в измерительную цепь внешнего источника питания 6; ПП2 – тумблер для изменения напряжения полярности внешнего источника питания 6.



Помимо переменного резистора в **БК** входят также переключатель **ПП1**, позволяющий проводить измерения как при подключенном блоке питания измерительной цепи **б**, так и без его подключения. Переключатель **ПП2** обеспечивает возможность изменения полярности напряжения, выдаваемого блоком питания **б**. Измерение спектральной чувствительности ФЭПП осуществляется при отключенном источнике питания **б**, что достигается переводом **ПП1** в нижнее положение. После установки номинального режима для источника света на шкале длин волн монохроматора следует установить длину волны 650 нм и полностью открыть щель монохроматора. Затем нужно расположить исследуемый образец в измерительной камере установки таким образом, чтобы световой пучок, выходящий из монохроматора, полностью освещал рабочую поверхность исследуемого образца. Далее, устанавливается начальное значение длины волны  $\lambda_0$  спектра и измеряется величина  $I_{кз}(\lambda_0)$  при нулевом сопротивлении нагрузочного резистора и максимальном значении ширины щели монохроматора. После этого, оставляя щель полностью открытой, установить новое значение длины волны на шкале монохроматора и вновь провести измерение тока короткого замыкания. Для удобства последующей обработки результатов измерения рекомендуется изменения длины волны излучения осуществлять с постоянным шагом  $\lambda_1$ . Для расчета спектральной чувствительности ФЭПП полученные значения  $I_{кз}(\lambda)$  следует разделить на число фотонов  $N(\lambda)$ , при котором получено измеренное значение тока короткого замыкания. Численные значения параметров  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$  рекомендуется принять равными 500 нм и 10 нм соответственно. Таблицу значений спектра  $N(\lambda)$  получить у преподавателя (лаборанта). Результаты измерения спектральной чувствительности ФЭПП представить в виде графика.

### **3. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВОЙ И ТЕМНОВОЙ ВОЛЬТ – АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЭПП**

#### **3.1. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВОЙ ВОЛЬТ – АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

После завершения измерения спектральной чувствительности ФЭПП следует определить длину волны спектра  $\lambda_M$ , соответствующую максимуму отношения  $I_{кз}(\lambda)/N(\lambda)$ . Затем на шкале длин волн монохроматора установить найденное значение  $\lambda_M$  и полностью открыть щель прибора. Переключатель П1 на блоке коммутации установить в нижнее положение (отключив источник питания измерительных цепей **б**). Увеличивая сопротивление переменного резистора (**7** на рис.4) для каждого его значения записать значение напряжения  $U$  на ФЭПП (по показаниям В7-21А) и тока  $I$  в измерительной цепи (по показаниям В7-21). Изменять сопротивление переменного резистора на

каждом шаге необходимо с таким расчетом, чтобы число точек вольт – амперной характеристики было не меньше 15. Результаты измерения представить в виде графика, аналогичного приведенному на рис.2.

### 3.2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМНОВОЙ ВОЛЬТ – АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для измерения темновой вольт – амперной характеристики следует полностью закрыть щель прибора (установив на соответствующей шкале нулевое значение щели). Сопротивление переменного резистора (7 на рис.4) нужно установить минимально возможным, для чего подвижный элемент резистора вывернуть влево до упора. После этого задать выходное напряжения источника питания П4105 (контролируется по встроенному вольтметру прибора) равным 0, а затем с помощью тумблера *ПП1* на блоке коммутации подключить источник питания к измерительной цепи. Установив переключать *ПП2* в положение “Прямая ветвь”, измерить вольт – амперную характеристику прямой ветви ФЭПП. Для этого необходимо увеличить напряжение источника питания *б* с шагом в 0,05 В и измерять при каждом новом значении напряжения источника ток через ФЭПП (по данным амперметра В7-21) и напряжение на нем (по шкале В7-21А). Измерения прямой ветви следует считать законченными при достижении напряжения на ФЭПП максимально допустимой величины в 0,8 В. После этого напряжение источника питания *б* необходимо плавно уменьшить до нуля и переключить *ПП2* в положение “Обратная ветвь”. Далее измерения характеристик обратной ветви темновой вольт – амперной характеристики ФЭПП выполняются полностью аналогично описанным выше измерениям прямой ветви, включая одинаковую величину шага напряжения источника питания и максимальную величину напряжения на исследуемом приборе. После достижения максимального значения напряжения на ФЭПП следует плавно уменьшить до нуля напряжение источника питания *б*, а затем отключить его от сети. После завершения измерений темновую вольт – амперную характеристику прибора следует представить в графическом виде на одном рисунке со световой характеристикой ФЭПП.

### 4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ И ВОЛЬТ - АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА

Часть световой характеристики ФЭПП в первом квадранте (рис. 2) и ее продолжение в четвертом квадранте представляют собой [1] прямую линию. Наклон этой прямой к оси токов характеризует последовательное сопротивление ФЭПП:

$$R_n = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c} \quad (2)$$

Величину шунтирующего сопротивления с приемлемой степенью точности можно определить [1] по наклону обратной ветви темновой вольт – амперной характеристики:

$$R_{ш} = \frac{\Delta U_m}{\Delta I_m} \quad (3)$$

Построение темновой характеристики позволяет также найти обратный ток насыщения  $I_{ОН}$ . Продолжение линейного участка на обратной ветви темновой характеристики до пересечения с осью ординат (токов), дает искомую величину  $I_{ОН}$ .

В рабочем состоянии ФЭПП его  $p-n$  – переход включен в прямом направлении, поэтому правильнее определять ток насыщения не по обратной, а по прямой ветви темновой вольт – амперной характеристики прибора. Для этого можно воспользоваться [1] темновой характеристикой ФЭПП, представленной в виде уравнения прямой в отрезках:

$$\ln(I_o + I_{он}) = \ln(I_{он}) + \frac{eU}{AkT} \quad (4)$$

Это уравнение применяется [1] только в случае больших токов ( $I_D \gg I_{ОН}$ ), а также рекомбинационного механизма протекания обратного тока насыщения через  $p-n$  – переход. Тангенс угла наклона прямой, описываемой уравнением (4) в координатах  $\ln I_D = f(U)$  равен  $e/AkT$  (что позволяет рассчитать величину параметра  $A$  в уравнении (1)), а отрезок, отсекаемый на оси ординат, дает значение  $\ln I_{ОН}$ .

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Провести измерение спектра тока короткого замыкания и спектральной чувствительности ФЭПП на основе кристаллического и аморфного кремния в диапазоне длин волн 500 – 1200 нм в соответствии с методикой, описанной в разд. 2. Определить длину волны, соответствующую максимуму спектральной чувствительности каждого из исследованных ФЭПП.

5.2. Измерить световую вольт-амперную характеристику каждого из приборов при длине волны, соответствующей найденному в предыдущем пункте максимуму спектральной чувствительности ФЭПП. По методике, описанной в разд. 4, рассчитать шунтирующее сопротивление ФЭПП. Определить напряжение холостого хода и ток короткого замыкания ФЭПП для обоих приборов. Рассчитать величину коэффициента заполнения световой вольт-амперной характеристики.

5.3. Измерить темновую вольт – амперную характеристику обоих ФЭПП в соответствии с методикой разд. 3.2. Для каждого из них рассчитать величину последовательного сопротивления в схеме замещения ФЭПП и опреде-

лить параметры  $A$  и  $I_{OH}$  в уравнении (1), описывающем вольт – амперную характеристику прибора.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Какие эффекты лежат в основе принципа действия ФЭПП?
- 6.2. Каковы основные преимущества и недостатки ФЭПП на аморфном и кристаллическом кремнии?
- 6.3. От каких факторов зависит эффективность работы ФЭПП?
- 6.4. Перечислите основные электрофизические параметры ФЭПП.
- 6.5. Поясните назначение элементов эквивалентной схемы замещения ФЭПП.
- 6.6. Каким образом можно оценить численные значения параметров эквивалентной схемы?
- 6.7. Какие пути повышения эффективности работы ФЭПП Вам известны?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985, 280 С.
2. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983, 360 С.
3. Неупорядоченные полупроводники / А.А. Айвазов, Б.Г. Будагян, С.П. Вихров, А.И. Попов. – М.: Изд – во МЭИ, 1995, 352 С.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ФЭПП .....	4
2. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФЭПП .....	8
3. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВОЙ И ТЕМНОВОЙ ВОЛЬТ –АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЭПП .....	9
3.1. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВОЙ ВОЛЬТ – АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	9
3.2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМНОВОЙ ВОЛЬТ – АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	10
4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ И ВОЛЬТ - АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА .....	10
5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ .....	11
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	12
ЛИТЕРАТУРА .....	12