

Ж.Р. ПАНОСЯН, А.О. АРАКЕЛЯН, Е.В. ЕНГИБАРЯН, Г.Г. ТОРОСЯН

## ПОВЫШЕНИЕ КПД И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Մշակվել է արևային ֆոտոտարրերի և ֆոտոէլեկտրական վահանակների պարամետրերի չափման ավտոմատ սարք: Բերված է սարքի նկարագրությունը, որի օգնությամբ չափվել են արևային էներգիայի ձևափոխիչների լուսային վոլտամպերային բնութագրերը և ՕԳԳ-ները: Այդ չափումների հիման վրա առեղծվել է մեթոդ ըստ հզորությունների ֆոտոտարրերի ընտրության համար: Այդ մեթոդի օգնությամբ մշակվել է ֆոտոէլեկտրական վահանակների պատրաստման տեխնոլոգիա, որն ապահովում է համապատասխանաբար ՕԳԳ-ի և նրկարակետության մեծացում մինչև 12,5 % և 30 տարի: Կատարվել է ստացված տվյալների գնահատում:

Разработана автоматическая установка для измерения параметров солнечных фотоэлементов (ФЭ) и фотоэлектрических панелей (ФЭП). Приведено описание установки, с помощью которой были получены световые ВАХ и КПД преобразователей солнечной энергии. Создана методика выбора ФЭ и ФЭП по величине максимальной развиваемой мощности, на основе чего разработана технология изготовления ФЭП, обеспечивающая увеличение значения КПД до 12,5% и долговечности до 30 лет. Произведена оценка полученных данных.

Ил. 3. Библиогр.: 9 назв.

An automatic installation for measuring the parameters of photovoltaic cells (PVC) and photovoltaic panels (PVP) was developed. The installation utilized for obtaining light volt-ampere characteristics and efficiency of solar energy conversion was described. The method of PVC and PVP selection by peak power value was worked out. The PVP production technology providing the increase of efficiency up to 12.5% and longevity up to 30 years was developed. The results obtained were evaluated.

Ил. 3. Ref. 9.

Ограниченность запасов ископаемых источников энергии в недрах Земли и глобальные экологические проблемы диктуют необходимость разработать такие источники энергии, которые бы имели практически неисчерпаемый запас или являлись возобновляемыми, а их использование не навредило ущербу природе. В странах, имеющих высокий технический уровень, уже несколько десятков лет ведутся интенсивные работы по разработке возобновляемых и экологически чистых источников энергии, таких как Солнца, ветра, воды, биомассы и т.д. Использование возобновляемых источников энергии в общем энергетическом балансе в различных странах колеблется от 5 до 20 %. Солнце - источник гигантских и практически неисчерпаемых запасов энергии: ежегодно от него Земля получает  $10^{21}$  ккал (для сравнения: тепловая энергия, освобождающаяся при сжигании запасов ископаемого топлива нашей планеты, оценивается  $7 \cdot 10^{18}$  ккал). Даже сотая доля солнечной энергии, падающей на поверхность Земли и одновременно являющейся экологически чистой, достаточна для удовлетворения энергетических потребностей человечества [1]. Армения не имеющая собственного ископаемого топлива, имеет большие ресурсы

солнечной радиации, за счет которых может полностью удовлетворить свои энергетические нужды [2, 3]. Прямое преобразование солнечной энергии в электрическую осуществляется с помощью полупроводниковых фотопреобразователей [4]. Однако солнечные фотоэлектростанции (СФЭС) наземной энергетики в настоящее время не получили широкого применения по сравнению с тепловыми электростанциями ввиду высокой стоимости производимой ими 1 кВт·ч электроэнергии [2]. Основная и наиболее дорогостоящая часть СФЭС - это полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии, базовой ячейкой которой является фотоэлектрическая панель (ФЭП).

Повышение КПД и долговечности ФЭП, создаваемых на основе поликристаллических полупроводниковых солнечных фотоэлементов (ФЭ), очевидно, приведет к уменьшению стоимости производимой ими 1 кВт·ч электроэнергии. В настоящей работе описывается разработанная нами технология изготовления ФЭП из поликристаллических кремниевых ФЭ, приводящая к повышению КПД ФЭП и долговечности, а также предложена установка для измерения фотоэлектрических параметров ФЭ и их выбора по мощности в качестве основного звена технологии.

В каждую ФЭП входят 36 последовательно соединенных поликристаллических кремниевых фотоэлементов площадью  $10 \times 10 \text{ см}^2$ . Такое соединение обусловлено обеспечением напряжения заряда аккумулятора на 12 В. Последовательное соединение ФЭ требует, чтобы фотоэлектрические параметры ФЭ были одинаковыми. В этом случае схемные потери будут минимальными [4]. Отметим, что при изготовлении промышленностью одной партии ФЭ величины их максимальной развиваемой мощности и тока могут быть довольно разные. Поэтому для измерения параметров (напряжение, ток и мощность) ФЭ, а также для их сравнения и выбора была создана установка, блок-схема которой приведена на рис. 1.

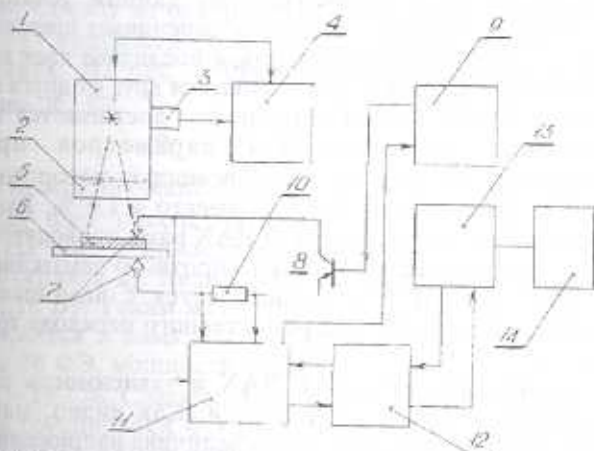


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения фотоэлектрических параметров солнечных фотоэлементов и фотопанелей.

- 1 - источник света; 2 - водяной фильтр; 3 - датчик интенсивности света;
- 4 - стабилизатор мощности источника света; 5 - ФЭ; 6 - контактная площадка;
- 7 - токосъемные контакты; 8 - транзистор; 9 - генератор пилообразного сигнала;
- 10 - датчик тока; 11 - АЦП-ЦАП (CR 10WP); 12 - интерфейс (RS 232);
- 13 - компьютер (IBM-586); 14 - принтер.

Установка работает следующим образом. Световое излучение от источника света 1 (была использована лампа накаливания мощностью 500 Вт), проходя через водяной фильтр 2, который срезает инфракрасную область спектра света  $\lambda > 1$  мкм, падает на исследуемый ФЭ 5, помещенный на контактной площадке 6. Интенсивность излучения источника света 1 во время измерения остается постоянной, для чего был использован датчик интенсивности излучения света 3, который входит в состав стабилизатора мощности 4. Через токосъемные контакты 7 устанавливается связь между исследуемым ФЭ и измерительной системой. Транзистор 8 в цепи ФЭ служит переменной нагрузкой (сопротивлением), величина которой изменяется с помощью пилообразного генератора 9. Для измерения тока в цепь ФЭ введен датчик тока 10 (величина сопротивления 0,01 Ом). Напряжение от датчика тока 10 и от токосъемных контактов 7 подается на преобразователь данных 11, где аналоговый сигнал преобразуется на цифровой, и через интерфейс 12 данные вводятся в компьютер 13. С помощью компьютера в предварительно заданные интервалы нагрузки ФЭ производится измерение и набор параметров. Таким образом, во всем рабочем диапазоне ФЭ (от режима короткого замыкания до режима холостого хода) получается полный набор параметров (величины тока и напряжения). Отметим, что в каждой точке измерение параметров производится 10 раз, затем берется усредненное значение. Полученные данные компьютер обрабатывает и на их основании получает световую ВАХ данного ФЭ. Исходя из этой световой ВАХ, получается также зависимость развиваемой мощности ФЭ от напряжения. Указанным методом для определенной группы ФЭ получаются зависимости мощности от напряжения. При этом по максимальным значениям развиваемой мощности компьютер выбирает одинаковые ФЭ. Область выбираемой мощности задается предварительно. В конце работы компьютер предлагает список групп, однотипных по параметрам ФЭ. На основании полученного списка для ФЭП группируются 36 ФЭ. Управление и контроль всего процесса осуществляются с помощью специально разработанной программы. Преимущество данной установки перед существующими [5] состоит в том, что она обеспечивает широкий диапазон и высокую точность измерений параметров, а последнее дает возможность выбора группировки для ФЭП ФЭ, отличающихся друг от друга по величине мощности не более 20 мВт. Такие преимущества достигаются тем, что для управления процессами измерения параметров применяется быстродействующий компьютер РС 586, с помощью которого параметры ВАХ измеряются с точностью до  $\pm 0,5$  % вместо  $\pm 1,0$  %. Вместо узкого диапазона измерения параметров световой ВАХ нами проводятся измерения во всех рабочих точках, начиная с режима короткого замыкания и кончая режимом холостого хода ФЭ, что достигается с помощью плавного измерения сопротивления коллекторно-эмиттерного перехода транзистора в цепи ФЭ (рис.1).

На рис. 2 приведены световая ВАХ и зависимость развиваемой мощности кремниевого ФЭ от напряжения. Как видно, максимальная мощность ФЭ развивается при 0,47 В, когда величина напряжения холостого хода составляет 0,58 В. КПД данного ФЭ составляет 13,2% и рассчитывается согласно формуле [6]

$$\eta = (I_{\text{out}} U_{\text{out}} / W_c) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $W_c$  — мощность солнечного излучения, падающего на поверхность ФЭ, значения  $I_{\text{онт}}$  и  $U_{\text{онт}}$  берутся из световой ВАХ, соответствующей вписанному прямоугольнику (рис. 2).

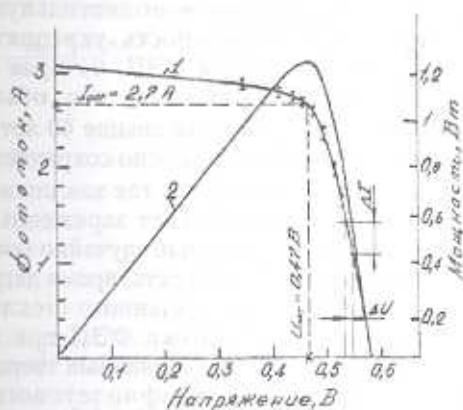


Рис. 2. Зависимости световой ВАХ (кр. 1) и мощности (кр. 2) поликристаллического кремниевого фотоэлемента от напряжения

Отношение

$$\beta = (I_{\text{онт}} U_{\text{онт}}) / (I_{\text{кз}} U_{\text{хх}}) \quad (2)$$

определяет коэффициент заполнения ФЭ, величина которого составляет 0,7 для приведенной ВАХ (рис. 2). Значения тока короткого замыкания  $I_{\text{кз}}$  и напряжения холостого хода  $U_{\text{хх}}$  соответствуют значениям, получаемым при пересечении кривой световой ВАХ с соответствующими координатными осями. КПД рассчитан в условиях освещенности, соответствующей однократному Солнцу на поверхности Земли АМ 1,5, при которой  $I_{\text{кз}}$  не меняется от напряжения и отсутствуют потери мощности на сопротивлениях. Из рис. 2 было также определено последовательное сопротивление  $R_n$  [7]

$$R_n = \Delta U / \Delta I = 0,03 \text{ Ом} \quad (3)$$

Такое низкое значение  $R_n$  означает, что эти ФЭ и технология пайки токосъемных шин обеспечивают получение максимальной выходной мощности. На рис. 2 приведена также зависимость мощности ФЭ от напряжения (кривая 2). Видно, что максимальная мощность данного ФЭ составляет 1,16 Вт. Таким же способом определяются мощности всех ФЭ, которые вносятся в память компьютера. Из этого массива компьютер выбирает те 36 ФЭ, мощности которых находятся между 1,16 и 1,18 Вт и имеют КПД - 13,2 %. Следующие 36 ФЭ имеют мощности от 1,181 до 1,2 Вт и т.д. После группировки ФЭ составляется последовательно соединенная цепочка. Цепочка, помещенная между двумя полимерными пленками из этиленвинилацетата (ЭВА), размещается на термообработанное стекло толщиной 3,5 мм, имеющее высокую механическую прочность, специальный химический состав и оптическую пропускательность (~95%) в видимой области спектра. С тыльной стороны ФЭ покрывается электроизоляционным слоем, имеющим также высокую механическую прочность. Эта многослойная система ламинируется в ламинаторе, в результате получается слитая со

стеклом герметично закрытая цепочка из последовательно соединенных 36 ФЭ. Данная система полностью защищена от вредных климатических воздействий, что способствует повышению долговечности ФЭП. После ламинации полученная многослойная система помещается в алюминиевую рамку, которая придает этой системе дополнительную механическую прочность и, кроме этого, дает возможность укреплять ее к несущей конструкции. Таким образом, получается ФЭП, которая является базовой ячейкой генератора тока СФЭС. Известно, что обычные диоды из кристаллического Si надежно работают уже свыше 40 лет. Используемое нами защитное стекло толщиной 3,5 мм надежно сохраняет кремниевые ФЭ (также являющиеся диодом с *p-n*-переходом), так как полностью поглощает ультрафиолетовое излучение и не пропускает заряженные элементарные частицы - электроны, протоны и т.п., которые случайно могли бы попасть на поверхность ФЭП (см., например, [4,6]). То есть, время деградации ФЭ ФЭП составляет более 30 лет. Замена термозакаленного стекла менее прочным стеклом могла бы стать причиной поломки ФЭП при попадании на ее поверхность градов больших размеров или случайных твердых тел.

Исследование воздействия ультрафиолетового излучения и температуры на полимерные пленки ЭВА, специально разработанные промышленностью для ФЭП, показало, что они имеют высокое оптическое пропускание (~95%) в области спектральной чувствительности ФЭ, устойчивы по отношению к ультрафиолетовому излучению и при рабочих температурах  $t < 85^{\circ}\text{C}$  не меняют свои характеристики на протяжении 30 лет [8]. Следовательно, использованные нами компоненты и технология для изготовления ФЭП дают возможность увеличить долговечность ФЭП не менее, чем на 30 лет. При использовании вместо специального стекла и ЭВА других полимерных покрытий (например, поливинилбутерал) долговечность ФЭП ограничивается 10-15 годами. Для получения необходимой мощности СФЭС из этих ячеек составляются модули, которые с помощью соответствующих (параллельных или последовательных) соединений образуют генераторы тока. Для повышения напряжения генератора тока необходимо в модулях использовать последовательно соединенные ФЭП. Следовательно, возникает необходимость произвести группировку ФЭП по их электрическим параметрам, как описано для ФЭ, что приведет к уменьшению потерь мощности модулей. С этой целью с помощью вышеописанной установки (рис. 1) была произведена выборка ФЭП по величине их развиваемой максимальной мощности. Измерение параметров ФЭП произведено как в натуральных (излучение Солнца составляло  $900 \text{ Вт/м}^2$ ), так и в лабораторных условиях. В последнем случае в качестве источника света были использованы ксеноновые лампы мощностью 1 кВт. На рис.3 приведена световая ВАХ ФЭП. Как видно, ФЭП площадью  $3492 \text{ см}^2$  развивала максимальную мощность величиной 43,7 Вт, КПД которой составлял 12,53 %, а для ФЭП, в состав которой входили не отобранные вышеописанным способом 36 ФЭ, максимальная развиваемая мощность достигла не более 35 Вт. Коэффициент заполнения для ФЭП из отобранных ФЭ составляет 0,65. Это значение в основном определяется коэффициентом заполнения ФЭ. Здесь отметим также, что КПД ФЭП был всего на 5 % меньше по сравнению с КПД ФЭ. Это означает, что при изготовлении ФЭП с помощью вышеописанной технологии мы достигли минимальной потери мощности. Таким образом, используя вышеописанную технологию изготовления ФЭП, дальнейшее увеличение КПД ФЭП станет возможным

только при применении ФЭ с высоким КПД. В настоящее время КПД из поликристаллического Si достигает 21,5% [9].

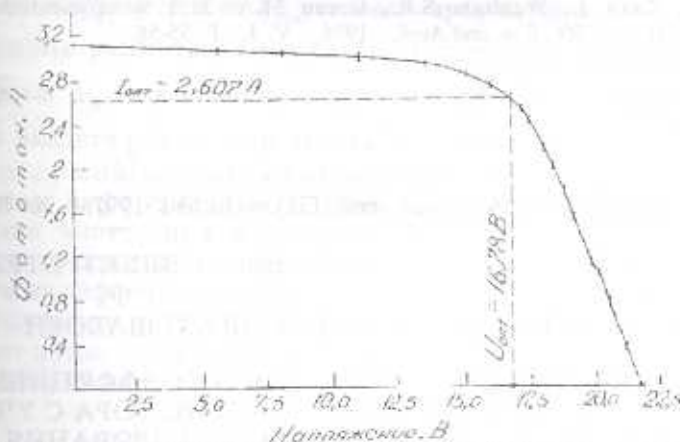


Рис. 3. Световая ВАХ ФЭП из 36 кремниевых ФЭ при температуре 20°C и мощности освещения 1 кВт/м<sup>2</sup>

В заключение отметим, что разработанная технология и используемые компоненты, включая тщательное измерение параметров каждого ФЭ и метод их группировки, обеспечили минимальные потери мощности и получение КПД 12,5 % для ФЭП, долговечность которых не менее 30 лет. Уже несколько лет действующие в Армении СФЭС, изготовленные в Государственном инженерном университете Армении на основе изготовленных нами ФЭП, имеют эффективные и надежные эксплуатационные характеристики. Отметим также некоторые их существенные преимущества по отношению к другим видам станций, производящих электрическую энергию. Установка СФЭС сравнительно проста и менее трудоемка. В довольно короткий срок их можно установить в любом месте: в горах, в пустынях, на крыше любого сооружения, на дорогах, т.е. везде, где есть потребность электрической энергии и где не требуется особое обслуживание.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Замираев К.Н., Пармон В.Н. Возможные пути и перспективы создания фотокаталитических преобразователей солнечной энергии // Успехи химии АН СССР. - 1980. - Т. 49, № 8. - С. 1457 - 1497.
2. Toungyan K.J. Toward energy independence for Armenia: Renewable energy and conservation // Proceedings of symp. 91 "The economic restructuring of Armenia". - Los-Angeles, 1991. - P. 185-195.
3. Panossian J.R. Solar energy-research and utilization in Armenia // Proc. of symp. 91 "The economic restructuring of Armenia". - Los-Angelex, 1991. - P. 195-196.
4. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. - М.: Советское радио, 1971. - 246 с.
5. Установка для измерения электрических параметров и сортировки по КПД фотопреобразователей // Инф. листок № 198 - 91. Краснодарский межотр. тер. центр науч.-тех. инф. и проп. - 1991. - 4с.
6. Фарсибрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 278 с.
7. Колтун М.М. Солнечные элементы. - М.: Наука, 1987. - 190 с.

8. Pern F.J. Luminescence and absorption characterization of the structural effects of thermal processing and weathering degradation on Ethylene Vinyl Acetate (EVA) encapsulant for PV modules // Polymer degradation and stability, - 1993, - V. 41, - P. 125-139.

9. Wang A., Zhao J., Wenham S.R., Green M.A. 21,5 % efficient thin Silicon solar cell // Progress in PV: Res. and Appl. - 1996, - V. 4, - P. 55-58.

ГИУА

28.11.1996

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. L, №1, 1997, с. 36-40.

УДК 621.382.017.7

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г.Г. КИРАКОСЯН, Г.А. МАКАРЯН, А.С. ШАБОЯН

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ПО ТОКУ СИЛОВОГО ТРАНЗИСТОРА С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ВЫСОКОГО УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ

Чառաքել էն ուժային տրանզիստորների դիֆուզային խորությունների տեսական և փորձարարական հետազոտություններ: Նկատվում է էմիտերային անցման խորությունների հաշվարկային և փորձնական արժեքների լավ համընկնում: Կոլեկտորային անցման խորությունների արժեքների տարբերությունը պայմանավորված է ակցեպտորային խառնուրդների տվյալ դիֆուզային մեխանիզմի առանձնահատկությամբ: Ստացվել են ըստ հոսանքի առաջնայնայն ուժեղացման գործակցի  $h_{21\beta 0}$ -ի և ուժային տրանզիստորի դիֆուզային պարամետրերի տեղադրությունը: Արտահայտությունում էքսպոնենցիալային արտադրիչի առկայությունը  $h_{21\beta 0}$ -ի համար պայմանավորված է ընդլայնման բարձր մակարդակով:

Проведены теоретические и экспериментальные исследования диффузионных глубин силовых транзисторов. Наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений глубины эмиттерного перехода. Отличие значений глубины коллекторного перехода обусловлено ограниченностью данного механизма диффузии акцепторных примесей. Получены зависимости максимального коэффициента усиления по току  $h_{21\beta 0}$  от диффузионных параметров силового транзистора. Наличие экспоненциального множителя в выражении для  $h_{21\beta 0}$  обусловлено эффектом ВУД.

Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

Theoretical and experimental studies of power transistor diffusion depths are performed. A good coincidence of design and experimental values for emitter junction depth is observed. The value difference of collector junction depths is due to the limitation of the acceptor impurity diffusion mechanism. Dependencies of maximum current gain  $h_{21\beta 0}$  are obtained from diffusion parameters of a power transistor. The availability of an exponential factor for  $h_{21\beta 0}$  is conditioned by a high doping effect.

Table 1. Ref. 5.

Исследование зависимости максимального коэффициента усиления по току силового транзистора от диффузионных параметров, в частности, от глубин залегания эмиттерных и коллекторных переходов, представляет определенный научный и практический интерес. Рассмотрению этого вопроса посвящены работы [1, 2], в которых дается качественный анализ