

**Н. Н. Чернышов, А. Ю. Панченко, В. М. Писаренко, М. А. Ф. Алкхавалдех, К. Т. Умяров**

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

*14, пр. Науки, Харьков, 61166, Украина*

E-mail: [mykola.chernyshov@nure.ua](mailto:mykola.chernyshov@nure.ua)

## КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

В работе проводится анализ структур современных фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. Решение экологических проблем при возрастающем энергопотреблении и ограниченности традиционных земных ресурсов делает актуальными задачи использования альтернативных и возобновляемых источников энергии. Для земных применений практически неограниченным источником энергии является Солнце. Создание эффективных структур и конструкций фотоэлектрических преобразователей позволит получить доступ к этому источнику. В настоящее время их практическое применение ограничивает высокая стоимость солнечных батарей. В данной работе обобщаются известные результаты решения задач создания фотоэлектрических преобразователей. Показаны конструкции и принципы работы фотоэлектрических преобразователей, рассмотрены одно- и трехкаскадные элементы. Определены условия для эффективной работы фотоэлектрических преобразователей. Особое внимание уделяется материалам для создания элементов фотоэлектрических преобразователей. Рассматриваются особенности материалов, в которых формируются потенциальные барьеры и генерируются пары электронов и дырок. Также внимание уделяется материалам, которые используются для формирования конструкций фотоэлектронных преобразователей, а именно материалам подложек, контактов и др. Эти материалы должны обеспечить значительную высоту барьера в полупроводниковом переходе. Генерируемые при этом электроны и дырки эффективно собираются на контактных электродах. Рассмотрены условия эффективной работы фотоэлектрических преобразователей определяют их практическое значение. Показано, что дальнейшее повышение эффективности фотоэлектрических преобразователей требует как развития технологий и совершенствования структур, так и привлечения еще не используемых физических принципов, а также новых комбинаций тех, что уже применяются. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** солнечная энергия, фотоэлектрический преобразователь, ультрафиолетовое излучение, возобновляемые источники, электрическое поле, полупроводник.

Альтернативные и возобновляемые источники энергии, такие как ветер и солнечный свет, привлекают большое внимание исследователей во всем мире. Интерес к ним вызван решением экологических задач и ограниченностью традиционных земных ресурсов. Особое место среди альтернативных и возобновляемых источников энергии занимает фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии, изучение которой превратилось в отдельное научное направление – фотовольтаику. Высокая стоимость солнечных батарей ограничивает сферы их применения. Экономически развитые государства в своих научных программах стимулируют массовое применение фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). В данной работе рассматриваются основные направления развития ФЭП.

**1. Солнце – источник энергии.** Источником энергии солнечного излучения служит термоядерная реакция – каждую секунду на

Солнце  $\sim 6 \cdot 10^{11}$  кг водорода превращается в гелий. Дефект массы при этом составляет 4 000 кг, что согласно соотношению Эйнштейна  $E = mc^2$ , приводит к выделению  $4 \cdot 10^{20}$  Дж энергии. Основная часть этой энергии испускается в виде электромагнитного излучения в диапазоне 0,2...3,0 мкм. Поскольку полная масса Солнца  $\sim 2 \cdot 10^{30}$  кг, оно должно пребывать в достаточно стабильном состоянии. Интенсивность солнечного излучения в свободном пространстве на удалении, равном среднему расстоянию между Землей и Солнцем, называется солнечной постоянной. Ее величина – 1 353 Вт/м<sup>2</sup>. При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется, в основном, из-за поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения – озоном и рассеяния частицами атмосферной пы-

ли и аэрозолями. Показатель атмосферного влияния на интенсивность солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, называется «атмосферной массой» (АМ). На рис. 1 показано спектральное распределение интенсивности солнечного излучения в различных условиях. Верхняя кривая АМ0 соответствует солнечному спектру за пределами земной атмосферы, то есть нулевой воздушной массе. Она аппроксимируется распределением интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре 5 800 К. Спектральное распределение солнечного излучения на поверхности Земли в случае, когда Солнце в зените, иллюстрирует кривая АМ1, когда угол между Солнцем и зенитом  $60^\circ$  – кривая АМ2. При этом полная мощность излучения – 925 и 691 Вт/м<sup>2</sup>. Средняя интенсивность излучения на Земле примерно совпадает с интенсивностью излучения при АМ = 1,5 (высота Солнца над горизонтом  $45^\circ$ ) [1].

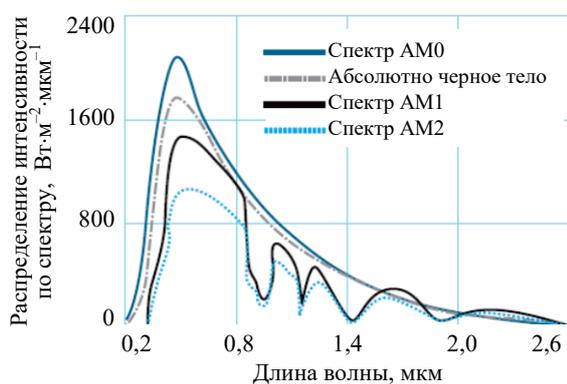


Рис. 1. Распределение интенсивности солнечного излучения в различных условиях

**2. Принципы работы ФЭП.** Конструкция ФЭП на основе монокристаллического Si показана на рис. 2. На малой глубине от поверхности Si *p*-типа сформирован *p-n*-переход с тонким металлическим контактом. На нижней стороне пластины помещен металлический контакт. Когда ФЭП освещается, поглощенные фотоны генерируют неравновесные электрон-дырочные пары. Электроны, генерируемые в *p*-слое, подходят к *p-n*-переходу и существующим в нем электрическим полем выносятся в *n*-область. Избыточные дырки, созданные в *n*-слое, частично переносятся в *p*-слой.

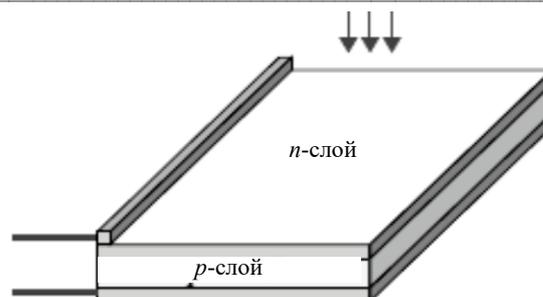


Рис. 2. Конструкция ФЭП

В результате *n*-слой приобретает дополнительный отрицательный заряд, а *p*-слой – положительный. Снижается первоначальная контактная разность потенциалов между *p*- и *n*-слоями полупроводника, и во внешней цепи появляется фото-ЭДС. Оно определяется действием источника тока  $I_{ph} = SqN_0Q$ , где  $Q$  – безразмерный множитель, показывающий долю всех созданных светом электронно-дырочных пар  $SN_0$ , и шунтирующим действием тока *p-n*-перехода  $I_s(e^{qU/kT} - 1)$ , где  $I_s$  – ток насыщения. В результате при освещении перехода излучением постоянной интенсивности связь напряжения на выходе ФЭП с током нагрузки  $I$  определяется выражением:

$$U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1, \quad (1)$$

где  $I_s$  – ток насыщения;  $I_{ph}$  – фототок.

Для эффективной работы ФЭП необходимо соблюдать следующие условия:

- оптический коэффициент поглощения активного слоя полупроводника должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить поглощение существенной части энергии;
- генерируемые при освещении электроны и дырки должны эффективно собираться на контактных электродах с обеих сторон;
- ФЭП должен обладать значительной высотой барьера в полупроводниковом переходе;
- полное сопротивление, включенное последовательно с ФЭП (исключая сопротивление нагрузки), должно быть малым для того, чтобы уменьшить потери мощности;
- структура тонкой пленки должна быть однородной по всей активной области ФЭП, чтобы исключить влияние шунтирующих сопротивлений на характеристики элемента.

Производство структур на основе монокристаллического Si, удовлетворяющих данным требованиям, – процесс технологически сложный. Поэтому внимание уделяется сплавам на основе аморфного кремния ( $a\text{-Si-H}$ ), арсенида галлия и поликристаллическим полупроводникам [2].

**3. Аморфный кремний** выступает в качестве более дешевой альтернативы монокристаллическому Si. Оптическое поглощение аморфного Si в 20 раз выше, чем кристаллического. Поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки  $a\text{-Si:H}$  толщиной 0,5...1,0 мкм вместо дорогостоящих кремниевых (300 мкм) подложек. По сравнению с поликристаллическими кремниевыми элементами, изделия на основе  $a\text{-Si:H}$  производят при более низких температурах (300° С). Можно использовать недорогие стеклянные подложки, что сократит расход Si в 20 раз. Пока максимальный КПД экспериментальных элементов на основе  $a\text{-Si:H}$  (12 %) несколько ниже КПД кристаллических Si ФЭП (~15 %). Не исключено, что с развитием технологии КПД элементов на основе  $a\text{-Si:H}$  достигает теоретического потока – 16 %. Наиболее простые конструкции ФЭП из  $a\text{-Si:H}$  были созданы на основе структуры «металл–металл–полупроводник» (диод Шоттки). Их реализация достаточно проблематична – металлический электрод должен быть прозрачным и равномерным по толщине, а все состояния на границе металл/ $a\text{-Si:H}$  – стабильными по времени. При использовании стеклянных подложек на них наносят проницаемую для света проводящую оксидную пленку из  $\text{ZnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$  или  $\text{ZnO}_2+\text{In}_2\text{O}_3$ , что позволяет освещать элемент через стекло. Поскольку у нелегированного слоя электронная проводимость выражена слабо, барьер Шоттки создается за счет осаждения металлических пленок (Pt, Rh, Pd) с высокой работой выхода, которая обуславливает образование области положительного объемного заряда (обедненного слоя) в  $a\text{-Si:H}$  [3]. При нанесении аморфного Si на металлическую подложку образуется нежелательный потенциальный барьер. Для этого используют подложки из металлов с малой работой выхода (Mo, Ni, Nb). Перед нанесением аморфного Si желательнее осадить на металлической подложке тонкий слой (10...30 нм)  $a\text{-Si:H}$ , леги-

рованный фосфором. Отметим, что  $U_{\text{xx}}$  ФЭП с барьером Шоттки на основе  $a\text{-Si:H}$  обычно не превышает 0,6 В. Более высокой эффективностью обладает ФЭП на основе аморфного Si с  $p\text{-i-n}$ -структурой (рис. 3).

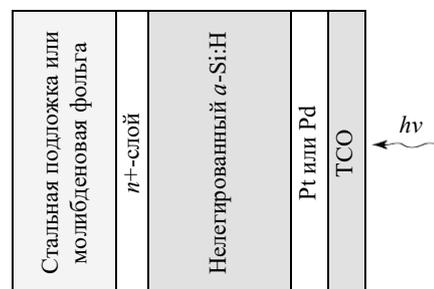


Рис. 3. Структура ФЭП с барьером Шоттки

Эффективность такого ФЭП обусловлена наличием широкой нелегированной  $i$ -области  $a\text{-Si:H}$ , поглощающей существенную долю света. Поскольку диффузионная длина дырок в  $a\text{-Si:H}$  очень мала (~100 нм), поэтому в ФЭП на основе  $a\text{-Si:H}$  носители заряда достигают электродов благодаря внутреннему электрическому полю. Для простого  $p\text{-n}$ -перехода  $a\text{-Si:H}$  область сильного поля очень узка и диффузионная длина носителей заряда мала. В большей части ФЭП не происходит эффективного разделения носителей заряда, генерируемых при поглощении света. Следовательно, для получения эффективных ФЭП на основе  $p\text{-i-n}$ -структуры аморфного гидрогенизированного Si необходимо добиться во всей  $i$ -области однородного мощного внутреннего поля, достаточного для достижения длины дрейфа носителей заряда, соизмеримого с размером области поглощения. Данная задача решается, если при изготовлении  $p\text{-i-n}$ -структуры первым формируется  $p$ -слой. Для его создания необходимо небольшое количество  $B$  ( $<10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), а значит, существенного загрязнения нелегированного слоя не произойдет. В то же время, если первым осаждают  $n$ -слой, то наличие остаточного Р изменяет свойства  $i$ -слоя. Формирование  $p$ -слоя на поверхности прозрачного электрода обеспечивает с ним хороший электрический контакт. Однако толщина  $p$ -слоя должна быть мала (10 нм), чтобы основная часть света поглощалась в  $i$ -области. Используется и другая  $p\text{-i-n}$ -структура ФЭП на основе  $a\text{-Si:H}$  – с подложкой из металлической фольги, в част-

ности из нержавеющей стали. Свет попадает со стороны прозрачного электрода, контактирующего с *n*-областью. В результате возрастает плотность тока короткого замыкания благодаря отражающей способности металлической подложки и меньшему оптическому поглощению света. Одним из перспективных материалов для создания эффективных ФЭП является GaAs. Его преимущества заключаются в следующем [4]:

- идеальная для однопереходных ФЭП ширина запрещенной зоны – 1,43 эВ;
- повышенная способность к поглощению солнечного излучения (требуется слой толщиной всего в несколько микрометров);
- высокая радиационная стойкость, что совместно с высокой эффективностью делает этот материал чрезвычайно привлекательным для использования в космических аппаратах;
- относительная нечувствительность к нагреву;
- характеристики сплавов GaAs с Al, As, P или In дополняют характеристики GaAs, что расширяет возможности проектирования.

Главное достоинство GaAs и сплавов на его основе – широкий диапазон возможностей для дизайна ФЭП. Фотоэлемент на основе GaAs может состоять из нескольких слоев различного состава. Это позволяет разработчику с большой точностью управлять генерацией носителя заряда, что в кремниевом ФЭП ограничено допустимым уровнем легирования. Основной недостаток GaAs – высокая стоимость. Для удешевления производства предлагается формировать ФЭП на более дешевых подложках, выращивать слои GaAs на удаляемых подложках или подложках многократного использования.

**4. Поликристаллические пленки** также весьма перспективны для солнечной энергетики. Чрезвычайно высока способность к поглощению солнечного излучения у диселенида меди и индия ( $\text{CuInSe}_2$ ) – 99 % света поглощается в первом микроне этого материала (ширина запрещенной зоны – 1,0 эВ). Немного Ga в слое  $\text{CuInSe}_2$  увеличивает ширину запрещенной зоны, что приводит к росту напряжения холостого хода и, следовательно, повышению эффективности устройства. Еще один перспективный материал для фотовольтаики – теллурид кадмия ( $\text{CdTe}$ ).

У него почти идеальная ширина запрещенной зоны (1,44 эВ) и очень высокая способность к поглощению излучения [3]. Пленки CdTe достаточно дешевы в изготовлении. Кроме того, технологически несложно получить разнообразные сплавы CdTe с Zn, Hg и другими элементами для создания слоев с заданными свойствами. Подобно  $\text{CuInSe}_2$ , наилучшие элементы на основе CdTe включают гетеропереход с CdS в качестве оконного слоя. Оксид олова используется как прозрачный контакт и просветляющее покрытие. Серьезная проблема на пути применения CdTe – высокое сопротивление слоя *p*-CdTe, что приводит к большим внутренним потерям. Но она решена в *p-i-n*-структуре с гетеропереходом CdTe/ZnTe (рис. 4). Наиболее ответственный этап формирования ФЭП на основе CdS/CdTe – осаждение поглощающего слоя CdTe толщиной 1,5...6,0 мкм. Для этого используют различные способы: сублимацию, электрохимическое осаждение, трафаретную печать, химическое осаждение из газовой фазы и распыление. Пленки CdTe, полученные данными методами, обладают высокой подвижностью носителей заряда, а ФЭП – высокими значениями КПД, от 10 до 16 %.

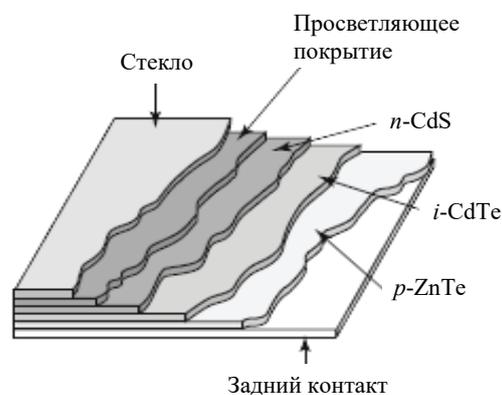


Рис. 4. Структура ФЭП на основе CdTe

Материал  $\text{CuGaSe}_2$  используется для тонкопленочных ФЭП. Благодаря запрещенной зоне шириной 1,68 эВ, он используется как верхний элемент ФЭП с нижним элементом из  $\text{CuInSe}_2$ . Слои  $\text{CuInSe}_2$  формируют путем последовательного осаждения термическим испарением тонких слоев Ga, Se и Cu на поверхность стеклянной подложки, покрытой слоем Mo толщиной 1 мкм. Затем из полу-

ченной структуры в установке быстрого термического отжига при температуре 550° С получают соединение  $\text{CuGaSe}_2$ .

Одним из перспективных материалов для дешевых ФЭП является  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ . Он обладает приемлемой шириной запрещенной зоны (1,4...1,5 эВ) и большим коэффициентом поглощения ( $10^4 \text{ см}^{-1}$ ). Его главное достоинство заключается в том, что входящие в него компоненты широко распространены в природе и нетоксичны. Однако эффективность преобразования составляет всего 2,3 % при использовании гетероперехода  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  и  $\text{CdS/ZnO}$  [5].

Среди ФЭП особое место занимают батареи, использующие органические материалы. КПД ФЭП на основе  $\text{TiO}_2$ , покрытого органическим красителем, весьма высок (~11 %). В качестве подложек в таких элементах могут выступать полимерные пленки. Основа ФЭП данного типа – широкозонный полупроводник, обычно  $\text{TiO}_2$ , покрытый монослоем органического красителя (рис. 5).

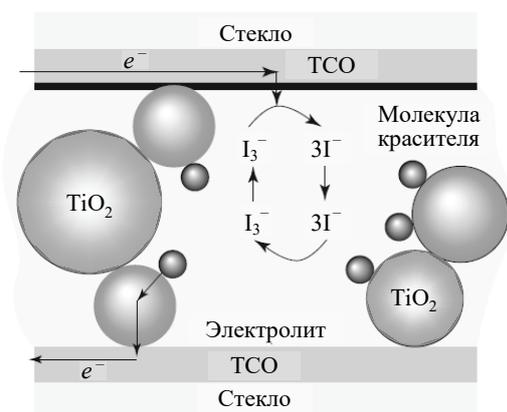


Рис. 5. ФЭП на основе органических материалов

Фотоэлектрод такого устройства представляет собой непористую пленку  $\text{TiO}_2$  толщиной 1 мкм, осажденную на стекло. Отражающим электродом служит тонкий слой Pt, осажденный на стекло. Пространство между двумя электродами заполняется электролитом, обычно содержащим иодид/трииодид ( $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ ). Принцип работы элемента основан на фотовозбуждении красителя и быстрой инъекции электрона в зону проводимости  $\text{TiO}_2$ . При этом молекула окисляется, через элемент идет электрический ток и на Pt электроде происходит восстановление трииодида и иодида. Затем иодид проходит через электролит к

фотоэлектроду, где восстанавливают окисленный краситель. Для ФЭП на эффекте Шоттки используют фталоцианин – органический полупроводник *p*-типа. В нем наиболее привлекает высокая проводимость в видимой области спектра и термическая стабильность [6]. Основной недостаток – низкое время жизни носителей заряда вследствие большого числа ловушек. Для повышения времени жизни фталоцианин легируют фуллеренами или 2-, 4-, 7-тринитро-флюореноном, создающими акцепторные уровни. Фуллерены ( $\text{C}_{60}$ ) весьма перспективны для органических ФЭП на основе гетероструктур  $\text{C}_{60}/p\text{-Si}$  в связи с сильным поглощением в коротковолновой области солнечного спектра. Поликристаллический фуллерен  $\text{C}_{60}$  толщиной ~1 мкм осаждают на кремниевую подложку в глубоком вакууме. Затем на слой  $\text{C}_{60}$  наносят Al. В качестве заднего контакта используется сплав  $\text{Ga}_x\text{In}_y$  на позолоченной подложке. В термофотовольтаической ячейке тепло преобразуется в электроэнергию посредством селективируемых эмиттером из оксидов редкоземельных материалов – Er (эрбия) и Yb (иттербия). Эти вещества поглощают инфракрасное излучение и вновь излучают его в узком энергетическом диапазоне. Излучение может быть эффективно преобразовано с помощью фотовольтаической ячейки с соответствующей шириной запрещенной зоны. В качестве материала для фотоэлектрической ячейки более всего подходит  $\text{I}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , поскольку он дает необходимую ширину запрещенной зоны.

**5. Каскадные ФЭП.** Большинство современных ФЭП обладают одним *p-n*-переходом. В таком элементе свободные носители заряда создаются фотонами, энергия которых больше или равна ширине запрещенной зоны. Фотоэлектрический отклик однопереходного элемента ограничен частью солнечного спектра, энергия которого выше ширины запрещенной зоны, а фотоны меньшей энергии не используются. Преодолеть это ограничение позволяют многослойные структуры из двух и более ФЭП с различной шириной запрещенной зоны. Такие элементы называются многопереходными, или каскадными. Поскольку они работают со значительно большей частью спектра, эффективность фотоэлектрического преобразования у них выше. В многопереходном ФЭП одиночные фото-

элементы расположены друг за другом таким образом, что солнечный свет сначала попадает на элемент с наибольшей шириной запрещенной зоны, при этом поглощаются фотоны с наибольшей энергией. Пропущенные верхним слоем фотоны проникают в следующий слой запрещенной зоны. Основное направление исследований в области каскадных элементов связано с использованием GaAs в качестве одного или нескольких компонентов. Эффективность преобразования таких ФЭП достигает 35 %. В каскадных элементах широко применяется аморфный Si, сплавы на его основе ( $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ,  $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ ), а также  $\text{CuInSe}_2$ . Весьма перспективны каскадные батареи, состоящие из трех элементов с различной шириной запрещенной зоны. Верхний слой, поглощающий коротковолновую область солнечного спектра, сформирован из сплава на основе  $a\text{-Si:H}$  с шириной оптической щели 1,8 эВ. Для серединного элемента в качестве слоя  $i$ -типа использован сплав  $a\text{-SiGe:H}$  с содержанием Ge ~10...15 %. Ширина оптической щели данного слоя (1,6 эВ) идеальна для поглощения зеленой области солнечного спектра. Нижняя часть ФЭП поглощает длинноволновую часть спектра, для этого используется  $i$ -слой  $a\text{-SiGe:H}$  с концентрацией Ge 40...50 %. Непоглощенный свет отражается от заднего контакта на основе  $\text{Ag/ZnO}$ . Все элементы каскадной солнечной батареи связаны между собой сильнолегированными слоями, образующими туннельные переходы [7]. Пример безальтернативной области применения ФЭП – космические аппараты. Но при таком использовании к ним предъявляется ряд требований, связанных точно с позиционированием батареи относительно положения Солнца, которые стали причиной разработки многопереходных батарей на основе  $\text{InGaP/GaAs/InGaAsN/Ge}$  с теоретической эффективностью преобразования до 42 % (таблица).

Параметр	Материал		
	GaInP/GaAs/Ge	GaAs/Ge	Si
Удельная мощность, Вт/кг	22	19	14
Требуемая мощность, Вт	10 000	10 000	10 000
Расчетная масса ФЭП, кг	455	526	714

**Вывод.** Создание эффективных структур и конструкций ФЭП позволит получить доступ к практически неограниченному источнику энергии, которым является Солнце. В настоящее время развитие ФЭП включает несколько направлений, в каждом из которых достигнуты значительные успехи. Тем не менее, современные ФЭП при высокой цене имеют сравнительно низкий КПД. Причем величина КПД ограничивается физическими факторами. Увеличение КПД требует, с одной стороны, чтобы  $p$ - $n$ -переход ФЭП имел значительную высоту барьера, с другой – чтобы генерируемые при освещении электроны и дырки эффективно собирались на контактных электродах с обеих сторон активного слоя. Поэтому на данный момент актуально не только дальнейшее совершенствование технологий и конструкций уже разработанных структур, но и поиск новых структур ФЭП, основанных на новых сочетаниях физических механизмов и развитии технологий реализации этих структур в практических изделиях.

#### Библиографический список

1. Амброзьяк А. *Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов*. Москва: Советское радио, 1970. 392 с.
2. Колтун М. М. *Оптика и метрология солнечных элементов*. Москва: Наука, 1985. С. 54–67.
3. Чопра К., Дас С. *Тонкопленочные солнечные элементы*. Пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна. М.: Мир, 1986. 438 с.
4. Раушенбах Г. *Справочник по проектированию солнечных батарей*. Пер. с англ. Москва: Энергоатомиздат, 1963. 360 с.
5. Виссарионов В. И., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А., Малинин Н. К. *Солнечная энергетика*. Учеб. пособие для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2008. 317 с.
6. Lee S. W., Ahn K. S., Zhu K., Neale N. R., Frank A. J. 2012. Effects of  $\text{TiCl}_4$  Treatment of Nonporous  $\text{TiO}_2$  Films on Morphology, Light Harvesting, and Charge-Carrier Dynamics in Dye-Sensitized Solar Cells. *J. Phys. Chem. C*. 2012. Vol. 116, Iss. 40. P. 21285–21290. DOI: 10.1021/jp3079887
7. Licht S., Khaselev O., Ramakrishnan, P. A., Faiman, D., Katz, E. A., Shames, A., Goren, S. Fullerene Photoelectrochemical Solar Cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 1998. Vol. 51, Iss. 1. P. 9–19. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00014-7)

#### REFERENCES

1. Ambrozyak, A., 1970. *Construction and technology of semiconductor photoelectric devices*. Moscow: Sovetskoye radio Publ. (in Russian).

2. Koltun, M. M., 1985. Optics and metrologiya of sun elements. Moscow: Nauka Publ. P. 54–67 (in Russian).
3. Chopra, K., Das, S., 1986. *Thin Film Solar Cells*. Translated from English with reductions and ed. by M. M. Koltun. Moscow: Mir Publ. (in Russian).
4. Rauschenbach, H., 1983. *Solar cell array design handbook*. Abbr. translated from English. Moscow: Energoatomizdat Publ. (in Russian).
5. Vissarionov, V. I., Deryugina, G. V., Kuznetsova, V. A., Malinin, N. K., 2008. *Solar power engineering*. Textbook for high schools. Moscow: Izdatelskiy dom MEI Publ. (in Russian).
6. Lee, S. W., Ahn, K. S., Zhu, K., Neale, N. R., Frank, A. J., 2012. Effects of  $TiC_{14}$  Treatment of Nonporous  $TiO_2$  Films on Morphology, Light Harvesting, and Charge-Carrier Dynamics in Dye-Sensitized Solar Cells. *J. Phys. Chem. C*, **116**(40), pp. 21285–21290. DOI: 10.1021/jp3079887
7. Licht, S., Khaselev, O., Ramakrishnan, P. A., Faiman, D., Katz, E. A., Shames, A., Goren, S., 1998. Fullerene Photoelectrochemical Solar Cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **51**(1), pp. 9–19. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00014-7)

*Рукопись поступила 27.11.2017.*

N. N. Chernyshov, A. U. Panchenko,  
V. M. Pisarenko, M. A. F. Alkhalwaldeh,  
K. T. Umyarov

## DESIGNS AND PRINCIPLES OF OPERATION OF PHOTOELECTRIC SOLAR ENERGY CONVERTERS

In the present paper, the analysis of structures of modern photoelectric solar energy converters is carried out. The solution of ecological problems at increasing energy consumption and limitations of traditional earthly resources makes the tasks of using alternative and renewable energy sources actual. The sun is a practically unlimited energy source for earthly applications. Development of effective structures and designs of photoelectric converters provides the access to this source. Currently, their practical application is limited due to the high cost of solar batteries. The paper generalizes the known results of solving the problems of creating photoelectric converters. The design and operation principles of photoelectric converters are shown, single- and 3-stage elements are considered. Conditions for efficient operation of photoelectric converters are determined. Particular attention is paid to materials for creating elements of photoelectric converters. The paper considers the peculiarities of materials in which potential barriers are formed and pairs of electrons and holes are generated. In addition, the paper deals with the materials that are used for forming the constructions of photoelectric converters, namely, the materials of plates, contacts etc. These materials must provide a considerable barrier height in a semiconductor junction. The generated

electrons and holes are effectively collected at contact electrodes. The considered conditions of efficient operation of photoelectric converters determine their practical importance. It is shown that the further increase of efficiency of photoelectric converters requires the development of technologies, improvement of structures, and application of physical principles that are not used yet, as well as new combinations of those that are already being used.

**Key words:** solar energy, photoelectric converter, ultraviolet radiation, renewable sources, electric field, semiconductor.

М. М. Чернышов, О. Ю. Панченко,  
В. М. Писаренко, М. А. Ф. Алкхавалдех,  
К. Т. Умяров

## КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

У роботі проведено аналіз структур сучасних фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії. Рішення екологічних проблем за умов зростаючого енергоспоживання та обмеженості традиційних земних ресурсів робить актуальними завдання використання альтернативних і поновлюваних джерел енергії. Для земних застосувань практично необмеженим джерелом енергії є Сонце. Створення ефективних структур і конструкцій фотоелектричних перетворювачів дозволить отримати доступ до цього джерела. Нині їх практичне застосування обмежує висока вартість сонячних батарей. У цій роботі узагальнюються відомі результати рішення завдань створення фотоелектричних перетворювачів. Показано конструкції і принципи роботи фотоелектричних перетворювачів, розглянуто одно- і трикаскадні елементи. Визначено умови для ефективної роботи фотоелектричних перетворювачів. Особливу увагу приділено матеріалам для створення елементів фотоелектричних перетворювачів. Розглядаються особливості матеріалів, у яких формуються потенційні бар'єри та генеруються пари електронів і дірок. Також увага приділяється матеріалам, які використовуються для формування конструкцій фотоелектронних перетворювачів, а саме матеріалів підкладок, контактів тощо. Ці матеріали повинні забезпечити значну висоту бар'єру в напівпровідниковому переході. Генеровані при цьому електрони і дірки ефективно збираються на контактних електродах. Розглянуті умови ефективної роботи фотоелектричних перетворювачів визначають їх практичне значення. Показано, що подальше підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів вимагає як розвитку технологій та вдосконалення структур, так і залучення ще невикористовуваних фізичних принципів, а також нових комбінацій тих, що вже застосовуються.

**Ключові слова:** сонячна енергія, фотоелектричний перетворювач, ультрафіолетове випромінювання, поновлювані джерела, електричне поле, напівпровідник.