

ФОТОВОЛЬТАИКА: МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Пусть всегда будет Солнце!

М.Мейтин

Альтернативные и возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра и солнечного света, гидро- и геотермальная энергия, во всем мире привлекают все больше внимания. Растущий интерес к ним вызван экологическими соображениями, с одной стороны, и ограниченностью традиционных земных ресурсов — с другой. Особое место среди альтернативных и возобновляемых источников энергии занимают фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии, изучение которых превратилось в отдельное научное направление — фотовольтаику.

Однако высокая стоимость солнечных элементов до недавнего времени закрывала им путь в области, где без них можно обойтись. Но времена меняются, и экономически передовые государства в своих национальных программах уже стимулируют массовое применение солнечных батарей. Что это — дань моде, транснациональное лоббирование чьих-то интересов или устойчивая тенденция, время которой пришло?

ИСТОЧНИК, КОТОРЫЙ НЕ ИССЯКНЕТ

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 4000 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 мкм. Поскольку полная масса Солнца $\sim 2 \cdot 10^{30}$ кг, оно должно пребывать в достаточно стабильном состоянии свыше 10 млрд. лет с постоянным выделением энергии.

Интенсивность солнечного излучения в свободном пространстве на удалении, равном среднему расстоянию между Землей и Солн-

цем, называется солнечной постоянной. Ее величина — 1353 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” (AM). AM определяется как секанс угла между Солнцем и зенитом.

На рис. 1 показано спектральное распределение интенсивности солнечного излучения в различных условиях. Верхняя кривая (AM0)

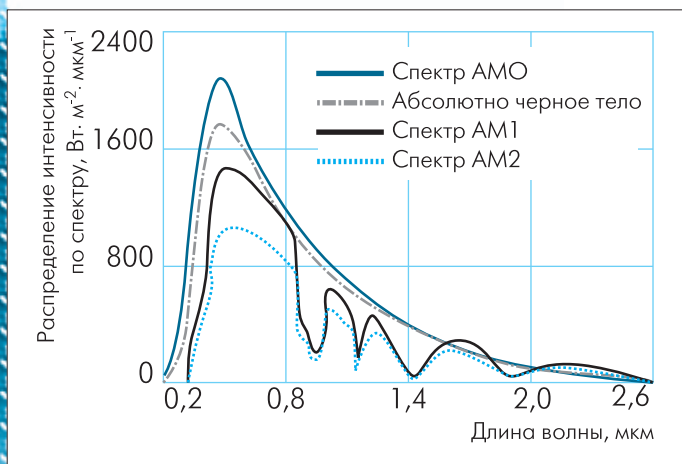


Рис. 1. Распределение интенсивности по спектру солнечного излучения

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 5800 К. Кривые AM1 и AM2 иллюстрируют спектральное распределение солнечного излучения на поверхности Земли, когда Солнце в зените и при угле между Солнцем и зенитом 60°, соответственно. При этом полная мощность излучения — соответственно порядка 925 и 691 Вт/м². Средняя интенсивность излучения на Земле примерно совпадает с интенсивностью излучения при AM=1,5 (Солнце — под углом 45° к горизонту) [1].

Таким образом, при использовании высокоэффективных методов преобразования энергии Солнце может обеспечивать бурно растущие потребности в ней практически вечно.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Простейшая конструкция солнечного элемента (СЭ) — прибора для преобразования энергии солнечного излучения — на основе монокристаллического кремния показана на рис. 2. На малой глубине от

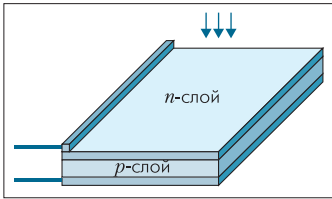


Рис.2. Конструкция солнечного элемента

поверхности кремниевой пластины p -типа сформирован p - n -переход с тонким металлическим контактом. На тыльную сторону пластины нанесен сплошной металлический контакт.

Когда СЭ освещается, поглощенные фотоны генерируют неравновесные электрон-дырочные пары. Электроны, генерируемые в p -слое вблизи p - n -перехода, подходят к p - n -переходу и существующим в нем электрическим полем выносятся в n -область. Аналогично и избыточные дырки, созданные в n -слое, частично переносятся в p -слой (рис. 3а). В результате n -слой приобретает дополни-

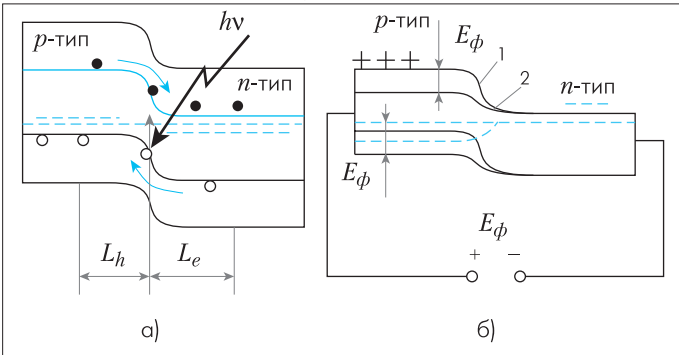


Рис.3. Зонная модель разомкнутого p - n -перехода: а) - в начальный момент освещения; б) - изменение зонной модели под действием постоянного освещения и возникновение фотоЭДС

тельный отрицательный заряд, а p -слой – положительный. Снижается первоначальная контактная разность потенциалов между p - и n -слоями полупроводника, и во внешней цепи появляется напряжение (рис. 3б). Отрицательному полюсу источника тока соответствует n -слой, а p -слой – положительному.

Величина установившейся фотоЭДС при освещении перехода излучением постоянной интенсивности описывается уравнением вольт-амперной характеристики (ВАХ) (рис. 4):

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

где I_s – ток насыщения, а I_{ph} – фототок.

ВАХ поясняет эквивалентная схема фотоэлемента (рис. 5), включающая источник тока $I_{ph} = SqN_0Q$, где S – площадь фотоэлемента, а коэффициент собирания Q – безразмерный множитель (<1), показывающий, какая доля всех созданных светом электронно-дырочных пар (SN_0) собирается p - n -переходом. Параллельно источнику тока включен p - n -переход, ток через который равен $I_s [e^{qU/kT} - 1]$. p - n -Переход шунтирует нагрузку, и при увеличении напряжения ток через него быстро возрастает. В нагрузку (сопротивление R) отбирается ток I .

Уравнение ВАХ справедливо и при освещении фотоэлемента светом произвольного спектрального состава, изменяется лишь значение фотото-

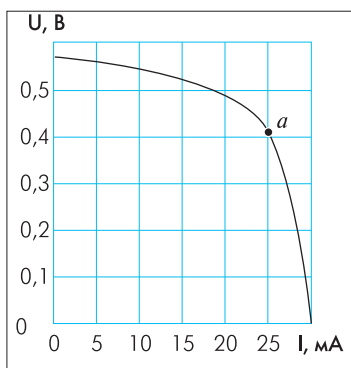


Рис.4. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента

ка I_{ph} . Максимальная мощность отбирается в том случае, когда фотоэлемент находится в режиме, отмеченном точкой a (см. рис. 4).

Максимальная мощность, снимаемая с 1 см^2 , равна

$$P = I_{ph} U = x I_{кз} U_{хх},$$

где x – коэффициент формы или коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики, $I_{кз}$ – ток короткого замыкания, $U_{хх}$ – напряжение холостого хода.

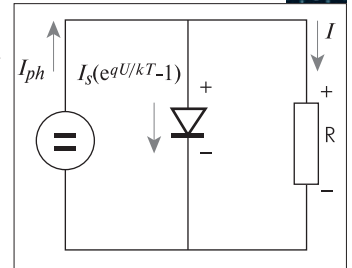


Рис.5. Эквивалентная схема солнечного элемента

КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для эффективной работы солнечных элементов необходимо соблюдение ряда условий:

- оптический коэффициент поглощения (α) 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;
- солнечный элемент 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;
- структура тонкой пленки должна быть однородной по всей активной области солнечного элемента, чтобы исключить закорачивание и влияние шунтирующих сопротивлений на характеристики элемента.

Производство структур на основе монокристаллического кремния, удовлетворяющих данным требованиям, – процесс технологически сложный и дорогостоящий. Поэтому внимание было обращено на такие материалы, как сплавы на основе аморфного кремния (a -Si:H), арсенид галлия и поликристаллические полупроводники [2].

Аморфный кремний выступил в качестве более дешевой альтернативы монокристаллическому [3]. Первые СЭ на его основе были созданы в 1975 году. 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 300-мкм подложек. 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 поликристаллическими кремниевыми элементами изделия на основе a -Si:H производят при более низких температурах (300 С): можно использовать дешевые стеклянные подложки, что сократит расход кремния в 20 раз.

Пока максимальный КПД экспериментальных элементов на основе a -Si:H – 12% – несколько ниже КПД кристаллических кремниевых СЭ (~15%). Однако не исключено, что с развитием технологии КПД элементов на основе a -Si:H достигнет теоретического потолка – 16 %.

Наиболее простые конструкции СЭ из a -Si:H были созданы на основе структуры металл – полупроводник (диод Шоттки) (рис. 6).

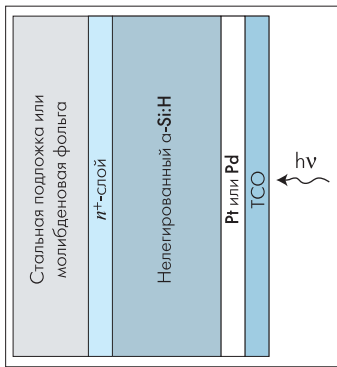


Рис.6. Конструкция фотоэлемента с барьером Шотки

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 солнечные элементы на основе a-Si:H формируют на ленте из нержавеющей стали или на стеклянных подложках, покрытых проводящим слоем.

При использовании стеклянных подложек на них наносят прозрачную для света проводящую оксидную пленку (TCO) из SnO₂, In₂O₃ или SnO₂+In₂O₃ (ITO), что позволяет освещать элемент через стекло. Поскольку у нелегированного слоя электронная проводимость выражена слабо, барьер Шотки создается за счет осаждения металлических пленок с высокой работой выхода (Pt, Rh, Pd), которая обуславливает образование области положительного объемного заряда (обедненного слоя) в a-Si:H.

При нанесении аморфного кремния на металлическую подложку образуется нежелательный потенциальный барьер a-Si:H/металлическая подложка, высоту которого необходимо уменьшать. Для этого используют подложки из металлов с малой работой выхода (Mo, Ni, Nb). Перед нанесением аморфного кремния желателен осадить на металлической подложке тонкий слой (10–30 нм) a-Si:H, легированный фосфором. Не рекомендуется использовать в качестве материалов электродов легко диффундирующие в аморфный кремний металлы (например, Au и Al), а также Cu и Ag, поскольку a-Si:H обладает плохой адгезией к ним. Отметим, что U_{хх} солнечных элементов с барьером Шотки на основе a-Si:H обычно не превышает 0,6 В.

Более высокой эффективностью обладают СЭ на основе аморфного кремния с *p-i-n*-структурой (рис.7). В этом “заслуга” широкой нелегированной *i*-области a-Si:H, поглощающей существенную долю света. Но возникает проблема – диффузионная длина дырок в a-Si:H очень мала (~100 нм), поэтому в солнечных элементах на основе a-Si:H носители заряда достигают электродов в основном только благодаря внутреннему электрическому полю, т.е. за счет дрейфа носителей заряда. В СЭ на основе кристаллических полупроводников носители заряда, имея большую диффузионную длину (100 – 200 мкм), достигают электродов и в отсутствие электрического поля. Поскольку в простом *p-n*-переходе в a-Si:H область сильного электрического поля очень узка и диффузионная длина носителей заряда мала, в большей части СЭ не происходит эффективного разделения носителей заряда, генерируемых при поглощении света. Следовательно, для получения эффективных СЭ на основе *p-i-n*-структуры аморфного гидрогенизированного кремния необходимо добиться во всей *i*-области однородного мощного внутреннего электрического поля, достаточного для достижения

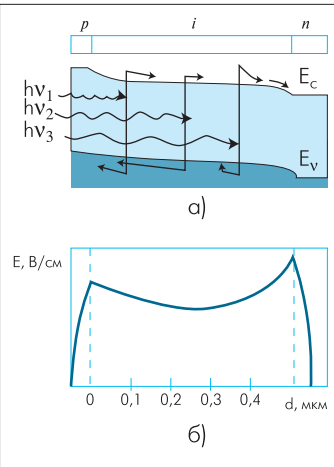


Рис.7. Энергетическая зонная диаграмма *p-i-n*-структуры (а) и расчетное распределение электрического поля (б)

длины дрейфа носителей, соизмеримого с размерами области поглощения (см. рис. 7).

Данная задача решается, если при изготовлении *p-i-n*-структуры первым формировать *p*-слой (рис.8). Для его создания необходимо небольшое количество бора (<10¹⁸ см⁻³), а значит, существенного загрязнения нелегированного слоя не происходит. В то же время, если первым осадить *n*-слой, то наличие остаточного фосфора изменяет свойства *i*-слоя. Формирование *p*-слоя на поверхности про-

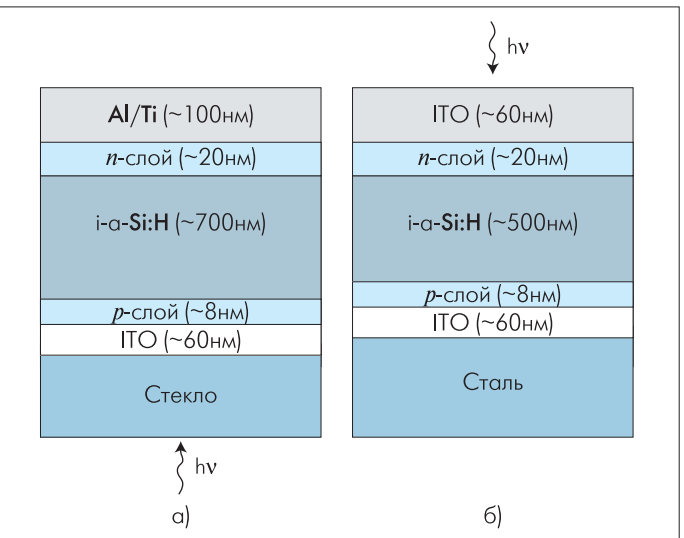


Рис.8. *p-i-n*-структура на стеклянной (а) и стальной (б) подложке

зрачного проводящего 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-i-n*-структура СЭ на основе a-Si:H с подложкой из металлической фольги, в частности 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 легированными фосфором пленками a-Si:H (*n*-область) по сравнению с легированными бором *p*-слоями.

Проблема с применением рассмотренных *p-i-n*-элементов в том, что их можно оптимизировать только в одном измерении. Значительно больше возможностей в этом плане предоставляет СЭ с поперечным переходом [4]: на изолирующей подложке перпендикулярно к поверхности формируется *p-i-n*-структура a-Si:H (рис. 9). Такой СЭ не требует прозрачного проводящего оксида в качестве контакта и широкого *p*-слоя для создания прозрачного оконного слоя, его можно изготовить посредством стандартных технологий микроэлектроники.

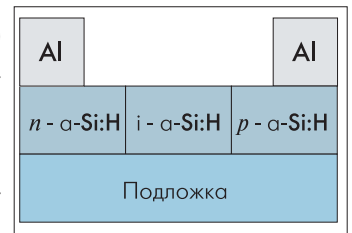


Рис.9. Солнечная батарея с поперечным переходом

Один из наиболее перспективных материалов для создания высокоэффективных солнечных батарей – **арсенид галлия**. Это объясняется такими его особенностями, как:

- почти идеальная для однопереходных солнечных элементов ширина запрещенной зоны 1,43 эВ;
- повышенная способность к поглощению солнечного излучения: требуется слой толщиной всего в несколько микрон;



- высокая радиационная стойкость, что совместно с высокой эффективностью делает этот материал чрезвычайно привлекательным для использования в космических аппаратах;
- относительная нечувствительность к нагреву батарей на основе GaAs;
- характеристики сплавов GaAs с алюминием, мышьяком, фосфором или индием дополняют характеристики GaAs, что расширяет возможности при проектировании СЭ.

Главное достоинство арсенида галлия и сплавов на его основе – широкий диапазон возможностей для дизайна СЭ. Фотоэлемент на основе GaAs может состоять из нескольких слоев различного состава. Это позволяет разработчику с большой точностью управлять генерацией носителей заряда, что в кремниевых СЭ ограничено допустимым уровнем легирования. Типичный СЭ на основе GaAs состоит из очень тонкого слоя AlGaAs в качестве окна.

Основной недостаток арсенида галлия – высокая стоимость. Для удешевления производства предлагается формировать СЭ на более дешевых подложках; выращивать слои GaAs на удаляемых подложках или подложках многократного использования.

Поликристаллические тонкие пленки также весьма перспективны для солнечной энергетики.

Чрезвычайно высока способность к поглощению солнечного излучения у *диселенида меди и индия* ($CuInSe_2$) – 99 % света поглощается в первом микроне этого материала (ширина запрещенной зоны – 1,0 эВ) [2,5]. Наиболее распространенным материалом для изготовления окна солнечной батареи на основе $CuInSe_2$ является CdS. Иногда для улучшения прозрачности окна в сульфид кадмия добавляют цинк. Немного галлия в слое $CuInSe_2$ увеличивает ширину запрещенной зоны, что приводит к росту напряжения холостого хода и, следовательно, повышению эффективности устройства. Один из основных способов получения $CuInSe_2$ – электрохимическое осаждение из растворов $CuSO_4$, $In_2(SO_4)_3$ и SeO_2 в деионизованной воде при соотношении компонентов Cu:In:Se как 1:5:3 и pH $\gg 1,2-2,0$.

Еще один перспективный материал для фотовольтаики – *теллурид кадмия* (CdTe). У него почти идеальная ширина запрещенной зоны (1,44 эВ) и очень высокая способность к поглощению излучения. Пленки CdTe достаточно дешевы в изготовлении. Кроме того, технологически несложно получать разнообразные сплавы CdTe с Zn, Hg и другими элементами для создания слоев с заданными свойствами.

Подобно $CuInSe_2$, 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. 10).

Наиболее ответственный этап формирования СЭ на основе CdS/CdTe – осаждение поглощающего слоя CdTe толщиной 1,5–6 мкм. Для этого используют различные способы: сублимацию/конденсацию, электрохимическое осаждение, трафаретную печать, химическое осаждение из газовой фазы и распыление. Пленки CdTe, полученные данными методами,

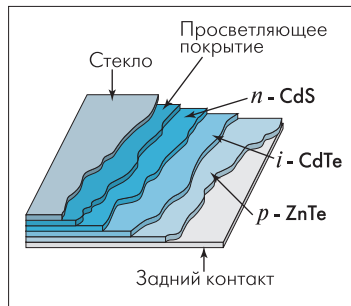


Рис. 10. Структура солнечного элемента на основе CdTe

обладают высокой подвижностью носителей заряда, а СЭ на их основе – высокими значениями КПД, от 10 до 16%.

$CuGaSe_2$ также весьма интересен как тонкопленочный элемент солнечных батарей. Благодаря запрещенной зоне шириной 1,68 эВ он используется как верхний элемент tandemной солнечной батареи с нижним элементом из $CuInSe_2$. Слои $CuGaSe_2$ формируют путем последовательного осаждения термическим испарением тонких слоев Ga, Se и Cu на поверхность стеклянной подложки, покрытой слоем молибдена толщиной 1 мкм (рис. 11). Далее из полученной структуры в установке быстрого термического отжига в течение пяти минут при температуре 550 С получают соединение $CuGaSe_2$.

Одним из перспективных материалов для дешевых солнечных батарей благодаря приемлемой ширине запрещенной зоны

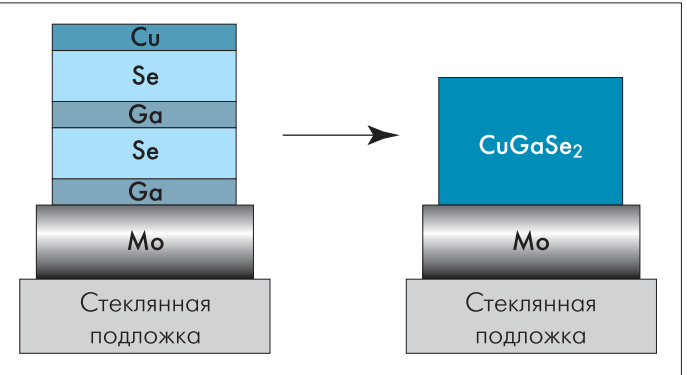


Рис. 11. Получение пленок $CuGaSe_2$

(1,4–1,5 эВ) и большому коэффициенту поглощения 10^4 см^{-1} является Cu_2ZnSnS_4 . Его главное достоинство в том, что входящие в него компоненты широко распространены в природе и нетоксичны. Однако пока достигнута эффективность преобразования всего в 2,3% при использовании гетероперехода Cu_2ZnSnS_4 и CdS/ZnO.

Среди СЭ особое место занимают батареи, использующие органические материалы [6]. В частности, КПД СЭ на основе диоксида титана, покрытого органическим красителем, весьма высок – ~11 %. Немаловажно, что подложками в таких элементах могут выступать полимерные пленки.

Основа СЭ данного типа – широкозонный полупроводник, обычно TiO_2 , покрытый монослоем органического красителя, как правило – цис-(NCS)₂бис(4,4'-дикарбокси-2,2'-бипиридин)-рутением (II) (рис. 12). Фотоэлектрод такого устройства представляет собой нанопористую пленку TiO_2 толщиной 1 мкм, осажденную на TCO на стекле. Отражающим электродом служит тонкий слой Pt, осажденный на TCO на стекле. Пространство между двумя электродами заполняют электролитом, обычно содержащим иодид/трииодид (I^-/I_3^-).

Принцип работы элемента основан на фотовозбуждении красителя и быстрой инжекции электрона в зону проводимости TiO_2 . При этом молекула красителя окисляется, через элемент идет электрический ток и на платиновом электроде происходит восстановление трииодида до иодида. Затем иодид проходит через электролит к фотоэлектроду, где восстанавливает окисленный краситель.

Для солнечной батареи на эффекте Шотки используют фталоцианин – органический полупроводник *p*-типа. В нем наиболее привлекают высокая фотопроводимость в видимой области спектра и термическая стабильность [7]. Основной недостаток – низкое время жизни носителей вследствие большого числа ловушек. Для повышения времени жизни фталоцианин легируют фуллеренами или 2-, 4-, 7-тринитрофлуореноном, создающими акцепторные уровни.

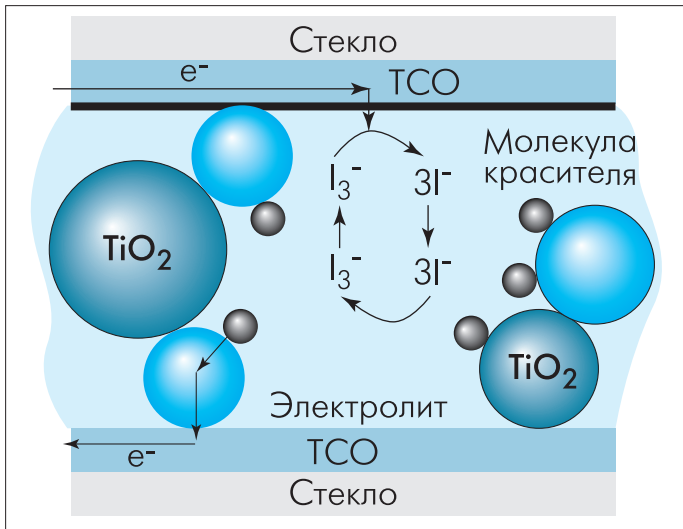


Рис. 12. Солнечная батарея на основе органических материалов

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 [8]. Поликристаллический фуллерен C_{60} толщиной ~1 мкм осаждают на кремниевую подложку в глубоком вакууме. Далее на слой C_{60} наносят алюминиевые контакты. В качестве заднего контакта используется сплав Ga_xIn_y на позолоченной подложке.

Термофотовольтаическое производство электроэнергии, т.е. преобразование длинноволнового (теплового) излучения посредством фотовольтаических ячеек было открыто в 1960 году и вызывает все больший интерес, особенно в связи с современными достижениями в области создания узкозонных полупроводников. В термофотовольтаической ячейке (рис. 13) тепло преобразуется в электроэнергию посредством селективных эмиттеров из оксидов редкоземельных элементов — эрбия и 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 фотовольтаической ячейки более всего подходит $In_xGa_{1-x}As$, поскольку он позволяет добиться необходимой ширины запрещенной зоны.

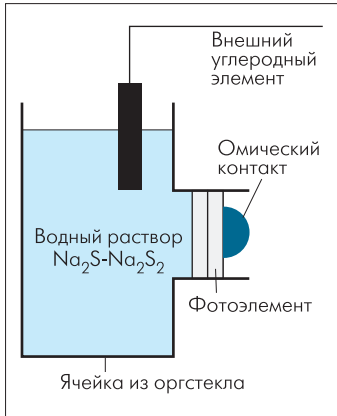


Рис. 13. Схема термофотовольтаического солнечного элемента

КАСКАДНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Большинство современных СЭ обладают одним $p\text{-}n$ -переходом. В таком элементе свободные носители заряда создаются только теми фотонами, энергия которых больше или равна ширине запрещенной зоны. Другими словами, фотовольтаический 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 СЭ с различной шириной запрещенной зоны. Такие элементы называются многопереходными, каскадными или тандемными [2, 9, 10]. Поскольку они работают со значительно

большой частью солнечного спектра, эффективность фотоэлектрического преобразования у них выше.

В типичном многопереходном солнечном элементе (рис. 14) одиночные фотозлементы 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 элемент с меньшей шириной запрещенной зоны и т.д.

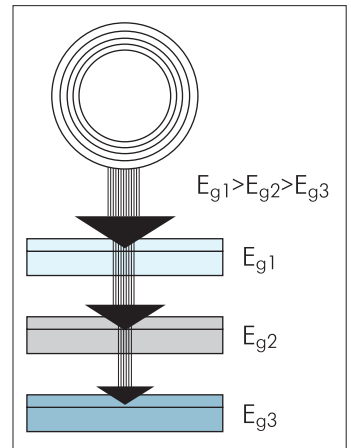


Рис. 14. Принцип построения многопереходного солнечного элемента

Основное направление исследований в области каскадных элементов связано с использованием арсенида галлия в качестве одного или нескольких компонентов. Эффективность преобразования подобных СЭ достигает 35 %. Кроме того в каскадных элементах широко применяются аморфный кремний, сплавы на его основе ($a\text{-Si}_{1-x}C_x:H$, $a\text{-Si}_{1-x}Ge_x:H$), а также $CuInSe_2$.

На рис. 15 изображена каскадная батарея, в которой верхним элементом служит структура на основе $GaInP$ с $n\text{-}AlInP$ в качестве окна, далее следует туннельный диод на $GaAs$ для прохождения носителей между элементами и нижний элемент из $GaAs$.

Весьма перспективны каскадные батареи, состоящие из трех элементов с различной шириной запрещенной зоны (рис. 16) [9, 10]. 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 германия

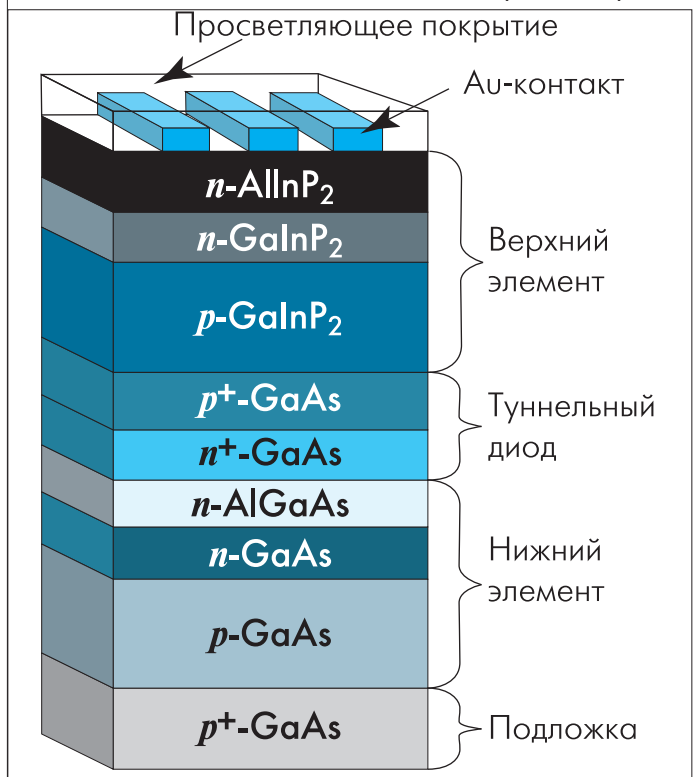


Рис. 15. Каскадный элемент

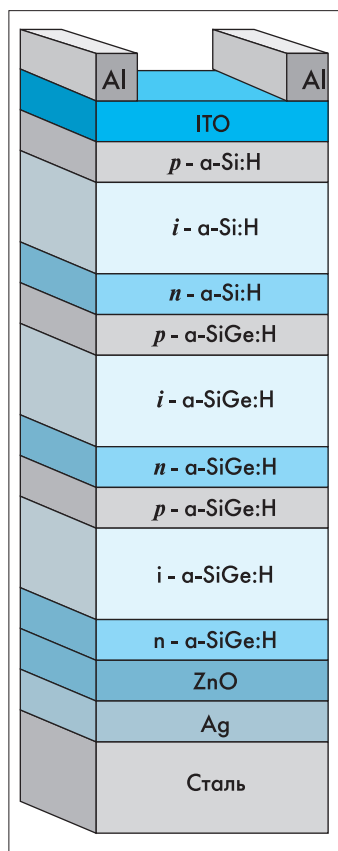


Рис. 16. Трехкаскадный солнечный элемент на основе сплавов α-SiGe:H

тов солнечных батарей, а следовательно, и общего веса космического аппарата (рис. 17). В результате стоимость запуска космических аппаратов существенно снижается (табл. 1).

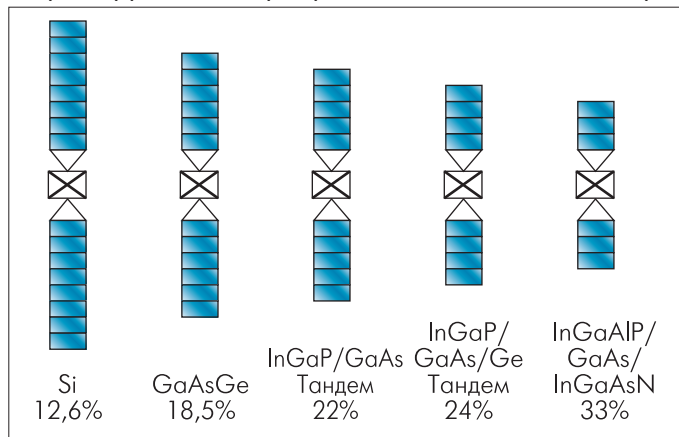


Рис. 17. Размеры панелей солнечных батарей для космических аппаратов

Тенденции развития технологий, применения и рынка фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии достаточно противо-

~10–15%. Ширина оптической щели данного слоя (1,6 эВ) идеальна для поглощения зеленой области солнечного спектра. Нижняя часть СЭ поглощает длинноволновую часть спектра, для этого используется *i*-слой α-SiGe:H с концентрацией германия 40–50%. Непоглощенный свет отражается от заднего контакта на основе Ag/ZnO. Все три элемента каскадной солнечной батареи связаны между собой сильнолегированными слоями, образующими туннельные переходы между соседними элементами.

СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ КОСМОНАВТИКИ

Пример практически безальтернативной области применения СЭ – космические аппараты. Но при таком их использовании к ним предъявляется ряд требований, связанных с общим весом и объемом системы, точностью позиционирования батареи относительно положения Солнца, временем жизни и скоростью деградации батарей.

Таблица 1. Технично-экономические показатели солнечных батарей для космических аппаратов

| Параметр | GaInP/GaAs/Ge | GaAs/Ge | Si |
|--|---------------|---------|-------|
| Удельная мощность, Вт/кг | 22 | 19 | 14 |
| Требуемая мощность, Вт | 10000 | 10000 | 10000 |
| Расчетная масса солнечной батареи, кг | 455 | 526 | 714 |
| Экономия средств запуска по сравнению с батареями на кристаллическом Si, долл. | 5126128 | 3720896 | 0 |

речивы. Основанием к оптимизму может служить интенсивность развития данной отрасли в последние несколько лет (табл. 2) [12]. В частности, в 1997 году уровень продаж превысил уровень 1996 года на 42% и составил 126 МВт. Общая емкость установленных солнечных батарей во всем мире превышает 800 МВт. Причем в равной мере расширяется применение СЭ как в традиционных областях (телекоммуникации, бытовые источники электроэнергии, небольшие источники света), так и в системах, подключенных к общим электрическим сетям.

Однако многие наблюдатели рассматривают происходящий рост рынка как нестабильный в связи с тем, что он в большей степени носит “политический” характер, чем экономический. Так, одна из причин феноменального роста фотовольтаики в Японии – действующая правительственная программа, предлагающая налоговые льготы и субсидии производителям солнечных батарей, монтируемых на крышах домов. Только в 1997 году было установлено 9400 таких систем, к концу 2000 года их число превысит 70 тыс.

Однако многие наблюдатели рассматривают происходящий рост рынка как нестабильный в связи с тем, что он в большей степени носит “политический” характер, чем экономический. Так, одна из причин феноменального роста фотовольтаики в Японии – действующая правительственная программа, предлагающая налоговые льготы и субсидии производителям солнечных батарей, монтируемых на крышах домов. Только в 1997 году было установлено 9400 таких систем, к концу 2000 года их число превысит 70 тыс.

Европейская промышленность за 1997 год увеличила производство СЭ на 56% (с 18,8 до 30,4 МВт). Производители Германии получили правительственную финансовую поддержку, которая позволила в текущем году довести объем выпуска СЭ до 40 МВт. В США – основном мировом поставщике солнечных батарей (их доля составляет около 42%) – действует программа “миллион солнечных крыш”, позволяющая с оптимизмом взирать на развитие фотовольтаики в этой стране.

Однако “политический” рынок не может существовать без общественной поддержки, которая, как показывают проводимые опросы, остается стабильной. Поэтому основная задача маркетинга СЭ на сегодня – использовать правительственную поддержку (как в США, ФРГ и Японии) для создания здорового рынка, на котором изделия фотовольтаики смогут жить и без привлечения инвестиций.

Основной же проблемой на пути широкого распространения изделий фотовольтаики до сих пор остается их сравнительно высокая стоимость. Соотношение цена/производительность за 1997 год выросло с 4,15 до 4,20 долл./Вт. Однако такая тенденция считается кратковременной и связанной с расширением производства.

Таким образом, основные тенденции развития технологий, применения и рынка преобразователей солнечной энергии показывают, что у них есть многообещающее будущее. Производителей стимулирует потенциально гигантский рынок солнечных батарей, устанавливаемых на крышах зданий. Растущий интерес к изделиям фотовольтаики для космонавтики, телекоммуникаций и портативных источников питания также является ключевым фактором развития отрасли в целом. Основные усилия исследователей сосредоточены на повышении стабилизированной эффективности фотоэлектрического преобразования, снижении стоимости материалов и производства, повышении надежности приборов, на внедрении новых тонкопленочных технологий вместе с развитием моно- и поликристаллических технологий, пока доминирующих на рынке. Продолжаются разработки по стандартизации качества и производительности изделий фотовольтаики, включая стандарты ISO9001 и ISO14001.

Таблица 2. Тенденции развития технологий солнечных батарей

| Страна | 1997 г. | 1998 г. | 1999 г. | 2000 г. |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Монокристаллический Si | | | | |
| США | 67,1 | 93,5 | 114,6 | 134,7 |
| Япония | 35 | 52 | 67 | 82 |
| Европа | 45 | 54 | 99 | 104 |
| Остальные страны | 16,2 | 16,3 | 16,3 | 16,3 |
| Всего МВт | 163,3 | 215,3 | 296,9 | 337 |
| CdTe, CuInSe ₂ | | | | |
| США | 0,8 | 12,7 | 23,8 | 34,4 |
| Япония | 2,0 | 7,0 | 7,0 | 15,0 |
| Европа | 0,2 | 0,2 | 10,2 | 15,2 |
| Остальные страны | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Всего МВт | 3 | 19,9 | 41 | 64,6 |
| a-Si | | | | |
| США | 17,7 | 18,5 | 20,5 | 37 |
| Япония | 11 | 23 | 40 | 54 |
| Европа | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Остальные страны | 3 | 5,5 | 5,5 | 5,5 |
| Всего МВт | 33,7 | 49 | 68 | 89,5 |

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов.- М.: Мир, 1984.
 2. <http://www.eren.doe.gov>
 3. **Айвазов А.А., Будагян Б.Г., Вихров С.П., Попов А.И.** Неупорядоченные полупроводники.— М.:Высшая школа, 1995.— 352 с.
 4. **Kroon M.A., van Swaaij R.A.C.M.M, Zeman M., Metselaar J.W.** Study of the Design of the a-Si:H Transverse Junction Solar Cell. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.

5. **Nakazawa T., Kuranouchi S., Haeiwa T.** CuInSe₂ Thin Films Prepared by One Step Electrodeposition. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
 6. **Sommeling P.M., Spath M., Roosmalen J.A.M., Meyer T.B., Meyer A.F., Kohle O.** Dye-Sensitized Nanocrystalline TiO₂ Solar Cells on Flexible Substrates. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
 7. **Rudiono, Shuichi Okazaki, Manabu Takeuchi.** Effects of NO₂ on Photovoltaic. Performance of Phtalocyanine Thin Film Solar Cells. – Thin Solid Films, 334(1998), p.187-191.
 8. **Light S., Khaselev O., Ramakrishna P.A., Faiman D., Katz E.A., Shames A., Goren S.** Fullerene Photoelectrochemical Solar Cells. – Solar Energy Materials and Solar Cells, 51(1998), p.9–19.
 9. **Yang J., Banerjee A., Lord K., Guha S.** Correlation of Component Cells with High Efficiency Amorphous Silicon Alloy Triple-Junction Solar Cells and Modules. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
 10. **Guha S., Yang J., Banerjee A., Glatfelter T.** Amorphous Silicon Alloy Solar Cells for Space Application. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
 11. **Kroll W.J., Thompson A.G., Armour E., Stal R.A., Brennan T., Hou H.** MOCVD Technology for Advanced Space Solar Cell Production. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
 12. **Rannels J.F.** Trends in PV Technology Development – Future Implications. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, p.LXXXVII.