

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.7:620.9

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Е.А. Андрюшин, А.П. Силин

(Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР)

Основные физические идеи. — Эффективность солнечной энергетики. — Возможности получения максимальной эффективности. — Аморфные материалы. — Альтернативные процессы преобразования энергии.

Интерес к физике полупроводниковых *солнечных элементов* (СЭ) до некоторой степени аналогичен интересу к феномену ВТСП. Он определяется не столько самой физикой, сколько экономическими и экологическими причинами. Пожалуй, главным достижением в развитии солнечной энергетики в последнее время является снижение стоимости электроэнергии, выработанной при помощи СЭ. Стоимость электроэнергии, получаемой с помощью СЭ (в США), характеризуется следующими цифрами: 60 долларов за кВт-ч в 1970 г., 1 доллар за кВт-ч в 1980 г. и 15 — 20 центов в 1990 г. [1]. Для сравнения: стоимость электроэнергии, получаемой на ветровых генераторах, составила в 1990 г. 7 центов за кВт-ч, а для обычных теплоэлектростанций на угле — 5 центов. При этом, по прогнозам [1, 2], стоимость экологически чистой энергии будет уменьшаться и в течение 90-х годов станет ниже, чем для традиционных источников энергии. Более того, уже сейчас есть области применения СЭ, в которых они экономически эффективны. Можно даже не говорить о солнечных батареях космических кораблей — солнечные энергетические установки дешевле, чем дизельные, в качестве автономных источников энергии в сельской местности при мощности до 20 кВт [1 — 3].

Впрочем, в настоящей работе не будет перечисления сфер применения СЭ и анализа иных технических проблем, как-то объединения СЭ в блоки и модули, что необходимо для получения достаточных мощностей, токов и напряжений, проблемы коммутации, а также защиты СЭ от внешних воздействий и т.д. — мы полагаем, что сейчас стоит сделать краткий обзор проблем, которые, в связи с изложенным, стоят перед физиками.

Чаще всего важнейшей вехой в истории СЭ называют создание СЭ на $p-n$ -переходе в кремнии в начале 50-х годов [4]. Стоит заметить, что само открытие *внутреннего фотоэффекта* в полупроводниках состоялось более чем за сто лет до этого (О. Беккерель, 1839 г.). История исследований в этом направлении, равно как и вопросы практического применения, подробно изложены во многих работах, обзорах и монографиях (см., например, [5 — 13]). Физика явления также изучена достаточно хорошо и уже излагается в учебниках по физике полупроводников [14], поэтому упомянем лишь основные идеи, необходимые для понимания логики развития.

Основные физические идеи

В данной статье нас будет интересовать главным образом *фотовольтаический эффект* (ФВЭ), который состоит в появлении э.д.с. в полупроводнике под действием света. Существует несколько разновидностей ФВЭ. В однородном полупроводнике под действием света появляется э.д.с. *Дембера* за счет различия подвижностей электронов и дырок. В полупроводнике с градиентом удельного сопротивления возникает так называемая *объемная фото-э.д.с.*, возможны и другие, обычно слабые, эффекты. Как общее правило, существование э.д.с., а не просто фотовозбужденных носителей (фотопроводимости) обусловлено либо неоднородностью освещения, либо неоднородностью полупроводника [14, 15].

Для практического применения в энергетике наиболее существенна *вентильная фото-э.д.с.*, которая возникает при освещении диодной полупроводниковой структуры.

При межзонном поглощении света в полупроводниках возбуждаются пары электронов и дырок. Для получения э.д.с. необходимо пространственно разделить их, не дав им рекомбинировать. Таким образом, конструкция СЭ должна обеспечивать пространственное разделение минимумов потенциальной энергии электронов и дырок. Обозначим эту ситуацию аббревиатурой РМПЭ, иногда это называется также *встроенным электрическим полем*.

В принципе, известно несколько возможностей осуществить РМПЭ, например р—n-переход, барьер Шоттки, гетероструктура или варизонный полупроводник. На рис. 1 — 3 в качестве примера приведены зонная диаграмма

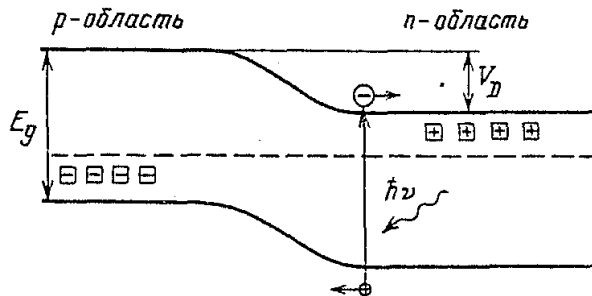


Рис. 1. Зонная диаграмма р—n-перехода. E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника. V_D — сдвиг химического потенциала за счет легирования

р—n-перехода, простейшая принципиальная схема СЭ на р—n-переходе в кремнии и его вольт-амперная характеристика (ВАХ). Обозначенная на рис. 1 величина V_D представляет собой высоту потенциального барьера для основных носителей и одновременно определяет величину электрического поля, ускоряющего неосновные носители. В СЭ на р—n-переходе V_D ограничивает максимально достижимую фото-э.д.с, или напряжение холостого хода V_{xx} (см. рис. 3). Ток короткого замыкания $I_{кз}$ определяется интенсивностью освещения и фактически пропорционален числу фотонов в падающем на полупроводник потоке электромагнитного излучения (точнее, пропорционален числу фотонов, поглощенных полупроводником).

Приведенная на рис. 3 ВАХ отвечает простейшей модели перехода, в которой кривая I описывается формулой

$$I = I_s(e^{eV/k_B T} - 1). \quad (1)$$

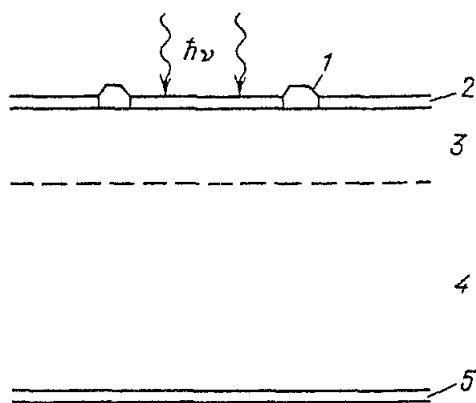


Рис. 2. Принципиальная схема СЭ на р-п-переходе. 1 — сетка электродов, 2 — защитный и просветляющий слой, 3 — р-слой, 4 — п-слой, 5 — задний контакт и отражающее зеркало. Основная поглощающая область — п-слой, толщина которого определяет общий размер СЭ и составляет для кристаллического Si $10^2 - 10^3$ мкм

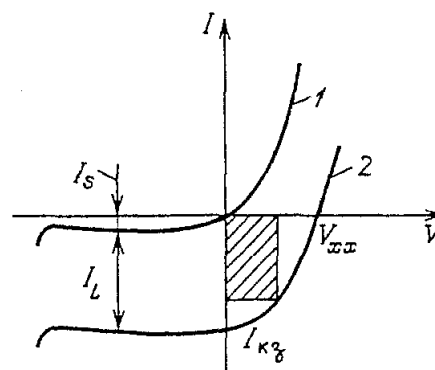


Рис. 3. 1 — ВАХ р-п-перехода в рамках диодной модели, 2 — ВАХ соответствующего СЭ

ВАХ СЭ получается смещением кривой I на величину фототока I_L . Обычно $I_L > I_s$, $I_L = I_{сз}$.

Таким образом, фото-э.д.с. зависит от интенсивности света (обозначим Φ поток энергии света, падающего на полупроводник за секунду). Естественно, зависимость $V_{xx}(\Phi)$ необязательно линейна, более того, для применения СЭ в качестве источника напряжения ее следует максимально ослабить, что иллюстрировано на рис. 4. В модели р-п-перехода (1) эта зависимость логарифмическая. Реально она быстро насыщается, и в достаточно большом диапазоне интенсивностей $V_{xx} \lesssim V_D$. В этом смысле мы можем говорить, что э.д.с. СЭ определяется его "конструкцией", встроенным электрическим полем.

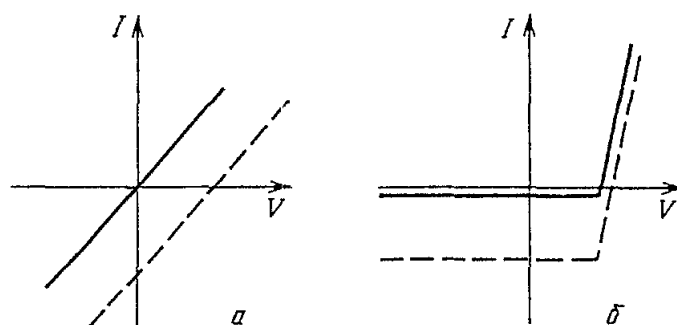


Рис. 4. Гипотетические ВАХ СЭ; пунктиром показан сдвиг под действием освещения. а — Омический случай, самый невыгодный для реализации СЭ. б — Идеальная для СЭ нелинейность ВАХ

В СЭ на р-п-переходе V_D не превосходит E_g — ширины запрещенной зоны полупроводника. Увеличение э.д.с. достигается при последовательном

соединении СЭ в батарее. В отдельном же СЭ в любой гетероструктуре э.д.с. ограничена максимальной величиной энергетической щели, ибо именно наличие энергетической щели определяет диодные свойства полупроводниковой структуры и неомичность ВАХ (см. рис. 4).

Максимальная мощность $P_{\max}$, выделяемая на оптимально подобранной нагрузке СЭ, близка к произведению $I_{\text{кз}} \cdot V_{\text{хх}}$. Отношение

$$\eta = \frac{P_{\max}}{\Phi} \quad (2)$$

называется эффективностью СЭ. Эффективность ограничена потерями на отражение, термодинамикой поглощения света, величиной квантового выхода, рекомбинацией фотовозбужденных носителей и т.п.

Эффективность солнечной энергетики

Порядок величины мощности СЭ определяется внешним потоком Φ . Количество энергии излучения Солнца, падающей за 1 с на площадку единичной площади, ориентированную перпендикулярно солнечным лучам, находящуюся в космосе на расстоянии Земли от Солнца,

$$W = 0,1353 \text{ Вт/см}^2 \quad (3)$$

называется солнечной постоянной. Пиковый поток света, прошедшего атмосферу, на уровне моря, когда Солнце в зените, составляет

$$W_0 = 0,0925 \text{ Вт/см}^2. \quad (4)$$

Величина этого потока естественным образом меняется в зависимости от времени суток, сезона и местоположения СЭ на земной поверхности. С точки зрения конструктора, важнейшей характеристикой СЭ является η — ее увеличению посвящена львиная доля исследовательских работ.

Для СЭ на р—n-переходе величина η немонотонно зависит от E_g , она имеет плавный максимум в диапазоне $E_g = 1 - 2$ эВ. Наилучшим материалом из хорошо изученных полупроводников можно считать GaAs с $E_g \approx 1,4$ эВ, что почти точно соответствует максимуму солнечного спектра по числу фотонов. Полное число фотонов

$$N \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ фот/см}^2\text{с}; \quad (5)$$

см. также таблицу. Расчет [16] дает для этого случая

$$\eta_{\max}(E_g = 1,4 \text{ эВ}) \approx 31\%. \quad (6)$$

Для материалов с $E_g \geq 2$ эВ эффективность падает, так как используется слишком малая часть солнечного спектра, для материалов с малыми E_g теряется избыток энергии фотона ($h\nu - E_g$). Таким образом, для создания СЭ подходят и широко используются материалы с типичными "полупроводниковыми" значениями щелей, часть из которых упомянута в таблице.

Распределение солнечного излучения по спектральным диапазонам по числу фотонов и интенсивности с указанием ширины запрещенных зон E_g некоторых полупроводников. Все значения округлены

Спектральные диапазоны, эВ:	0—0,5	0,5—1	1—1,5	1,5—2	2—2,5	2,5—3	3—3,5	3,5—4	4—4,5	4,5—5	> 5
Число фотонов, 10^{16} фот/с	1	5	7	7	5	3	2	0,5	—	—	—
Интенсивность, Вт/м ²	10	80	190	250	250	210	140	100	80	60	30
E_g , эВ	0,16 InSb, 0,28 InAs, 0,35 Te	0,68 Ge, 0,81 GaSb	1,12 Si, 1,38 GaAs, 1,04 CuInSe ₂	1,51 CdTe, 1,74 CdSe, 1,80 Se	2,23 AlAs	2,58 CdS	3,58 ZnS				

Некоторое увеличение эффективности достигается при использовании оптических систем для концентрации света (в $1 - 10^3$ раз). В этом случае, однако, необходимо решать проблему нагрева — эффективность кремниевого СЭ падает до нуля уже при 300°C .

В настоящем обзоре мы стараемся сконцентрироваться на физике дела и почти не затрагиваем технических проблем, обсуждение которых занимает сейчас львиную долю времени тематических конференций. Но даже чисто техническая проблема может приводить к выбору иных материалов и возникновению разных классов конструкций. Различные ветви такой эволюции разошлись уже довольно далеко (СЭ с концентрацией или без концентрации света, СЭ для наземного или космического использования и т.п.).

Значительное увеличение η достигается, если одновременно с концентрацией света оптическая система осуществляет его спектральное расщепление. Каждый спектральный диапазон поглощается затем отдельным СЭ с оптимальными E_g и другими характеристиками. Первый такой СЭ сделан в 1978 г. на основе GaAs и Si с $\eta = 28\%$ [17].

Основное направление увеличения η — создание многослойных структур. При этом речь идет как о последовательном соединении СЭ, так и об усложнении внутренней структуры СЭ (см. рис. 2) [18]. При последовательном соединении СЭ в верхнем слое поглощаются более коротковолновые фотоны, в нижнем — длинноволновые. При этом суммарная эффективность больше эффективности каждого из слоев, а э.д.с. просто складывается (если не учитывать внутреннего сопротивления). Усложнением внутренней структуры достигается улучшение условий поглощения света и собирания носителей — желательно, чтобы вес фотовозбужденные носители дошли до электродов. На этом пути достигнуты следующие практические результаты: абсолютный максимум $\eta = 31\%$ для СЭ на гетероструктуре на основе GaAs, СЭ на p—n-переходе в GaAs дает 25% , на p—n-переходе в кристаллическом Si $\eta = 23\%$, для СЭ на поликристаллическом Si $\eta = 17\%$ [11]. Кроме того, уже созданы тонкопленочные многослойные СЭ с $\eta = 10 - 12\%$ ($\text{Cu}_2\text{S}-\text{CdZnS}$, $\text{CdS}-\text{CuInSe}_2$, $\text{CdS}-\text{CdTe}$, а также СЭ на аморфном кремнии структуры

a-Si:H p—i—n, о которых более подробно будет рассказано ниже) [19]. Тонкопленочные СЭ имеют толщину порядка 1 мкм, малый объем активного материала, технологичность и дешевизна позволяют им успешно конкурировать с высокоэффективными кристаллическими СЭ. Именно с ними связано экономическое "наступление" фотовольтаических устройств.

Возможности получения максимальной эффективности

По-видимому, здесь уместно заметить, что физические задачи далеко не сводятся к обеспечению экономической эффективности, тем более сегодняшней. Максимизация эффективности η будет поэтому еще долго привлекать значительное внимание — независимо от стоимости соответствующих СЭ. Развитие твердотельной технологии представляет для этого обширные возможности. Вероятно, в ближайшее десятилетие будут созданы СЭ с $\eta \sim 50\%$. Это могут быть как СЭ на основе полупроводниковых соединений (тройных, четверных и т.п.), гетероструктур, сверхрешеток, так и системы с разделением спектра.

Весьма актуальной представляется задача о максимизации энергии света, поглощенной в той или иной полупроводниковой структуре. В рамках классической электродинамики эта задача рассмотрена в гл. 13 монографии В.Л. Гинзбурга [20]; см. также [21]. В данном случае речь идет о квантовой задаче — межзонном поглощении света. Для идеализированной слоистой системы p—n-переходов в [16] был теоретически получен предел $\eta = 72\%$ (при концентрации света 10^3). Считается, что фотоны каждой длины волны λ поглощаются и генерируют электронно-дырочные пары в наиболее "подходящем" для этого полупроводниковом слое. Предел η , однако, будет сильно зависеть от конкретных особенностей конструкции СЭ. Уже используемые в настоящее время гетероструктуры есть полупроводники со ступенчато изменяющейся шириной запрещенной зоны. Аналогичную роль могли бы играть варизонные полупроводники (рис. 5). Эта идея была выдвинута еще в конце 50-х годов, в ряде расчетов предсказывались значительные η , но никаких практических результатов до сих пор достигнуто не было [22]. С точки зрения сегодняшних технологических возможностей можно предположить аналог p—i—n-структуры, в которой в качестве i-слоя используется варизонный полупроводник, например твердый раствор $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$ (см. рис. 5). Параметры x и y являются непрерывными функциями координаты z , и оба уменьшаются с увеличением z .

Еще одной возможностью оптимизации поглощения солнечного спектра являются композиционные полупроводниковые сверхрешетки (в частности, пилообразные и с переменными толщинами ям и барьеров). В этом случае увеличение поглощения энергии света можно было бы получить как за счет выбора полупроводников, размера и формы квантовых ям и барьеров, так и за счет эффектов размерного квантования и квазидвухмерности носителей.

Далее, как видно из таблицы, в солнечном спектре есть заметная доля высокоэнергетичных фотонов, при поглощении которых можно было бы в принципе увеличить квантовый выход на основе эффекта ударной ионизации по аналогии, скажем, с лавинными фотодиодами [23].

Наконец, на новой технологической базе перспективной может оказаться идея, на основе которой в свое время были созданы высоковольтные фотоэлектрические генераторы [24 — 26]. Основой СЭ стала бы в этом случае легированная сверхрешетка (см., например, обзор [27]), каждый период ко-

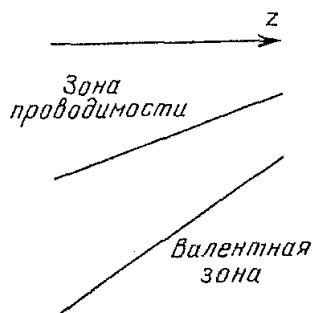


Рис. 5. Гипотетическая зонная диаграмма варизонного полупроводника

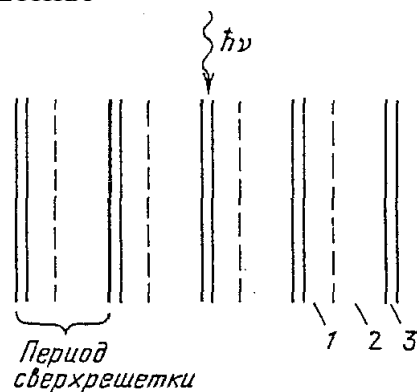


Рис. 6. Схема СЭ на основе легированной сверхрешетки. 1 — р-слой, 2 — n-слой, 3 — слой "электрода"

торой является как бы отдельным СЭ (рис. 6). В каждом периоде сверхрешетки есть р—n-переход, а также слой металла, или, лучше, сильнолегированного полупроводника. Таким образом, сверхрешетка представляет собой уже батарею, напряжение которой пропорционально числу периодов. При этом сверхрешетка освещается со стороны, перпендикулярной оси сверхрешетки, поэтому длина поглощения света и длина диффузии носителей перестают быть конкурирующими конструктивными параметрами — они определяют разные геометрические размеры системы, соответственно поперечную протяженность слоев и период сверхрешетки.

На основе изложенных соображений, тенденций развития исследований ФВЭ нам представляется, что максимизировать такие характеристики СЭ, как η , V_{xx} , удастся методами зонной инженерии.

Аморфные материалы

Развитие твердотельной солнечной энергетики — одна из областей современной физики, где речь идет не только о создании тех или иных конструкций, но о конструировании "искусственных" твердых тел, в которых "каждый" атом поставлен на определенное место, чтобы все вместе они обеспечили определенные свойства.

Применение в солнечной энергетике получила и другая ветвь современной физики твердого тела — исследование неоднородных неупорядоченных материалов. Как отмечалось выше, для наземного применения может быть выгодно идти не только по пути увеличения η , а также и по пути удешевления СЭ. Это стало возможным в связи с созданием СЭ из гидрогенизированного аморфного кремния (a-Si:H) — весьма дешевых и, с другой стороны, достаточно эффективных. Вот каковы параметры современного лабораторного СЭ на a-Si:H [28] площадью $3 \times 3 \text{ мм}^2$ и с суммарной толщиной 8000 Å:

$$\eta = 11,4\%, \quad V_{xx} = 0,9 \text{ В}, \quad I_{кз} = 18 \text{ мА/см}^2. \quad (7)$$

Эффективность СЭ на аморфном кремнии реально можно довести до 15% [29].

Сугубо академические исследования структуры и свойств аморфных материалов (по крайней мере, некоторых их классов) имеют здесь прямой выход на практическое применение. А функционирование подобных СЭ изучено далеко не полностью.

В настоящее время практически используется лишь один аморфный ма-

териал — $a\text{-Si:H}$ (есть уже работы и по фторированию аморфного кремния [30], а также по соединениям кремния с углеродом и германием). Это обусловлено неким счастливым сочетанием характеристик. Во-первых, оказалось, что гидрогенизация кремния резко уменьшает концентрацию оборванных связей и соответственно плотность локализованных уровней энергии. Во-вторых, локализация происходит в хвостах плотности состояний по краям зон, а в глубине зон носители остаются подвижными, причем подвижность достаточно высока для аморфного полупроводника. $a\text{-Si:H}$ аналогичен поэтому прямо-зонному полупроводнику с $E_g \approx 1,65$ эВ.

В-третьих, естественно, по сравнению с кристаллическим Si подвижность носителей значительно меньше, а скорость рекомбинации больше. К счастью, одновременно значительно выше коэффициент поглощения (по меньшей мере на порядок, а то и на два, в зависимости от технологии приготовления аморфной пленки). В результате толщина СЭ на $a\text{-Si:H}$ ~ 1 мкм на два порядка меньше, чем толщина кристаллического СЭ на Si (рис. 7).

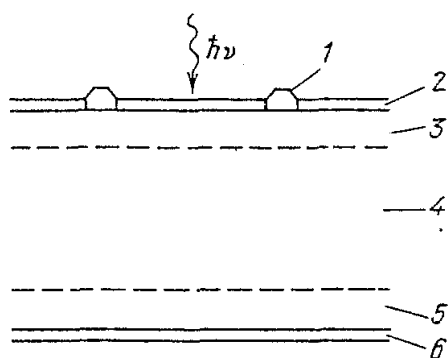


Рис. 7. Принципиальная схема СЭ на аморфном кремнии (указаны примерные толщины слоев). 1 — сетка электродов, 2 — защитное и просветляющее покрытие ($\sim 100 \text{ \AA}$), 3 — р-слой ($\sim 100 \text{ \AA}$), 4 — i-слой ($\sim 10^4 \text{ \AA}$), 5 — n-слой ($\sim 10^3 \text{ \AA}$), 6 — задний контакт и зеркало

Первые работы по исследованию гидрогенизированного аморфного кремния появились в 1969 г. [31]. В середине 70-х годов было показано, что $a\text{-Si:H}$ можно легировать [32], т.е. получить ситуацию РМПЭ, и был создан первый СЭ на его основе (с $\eta \approx 1\%$) [33].

Несмотря на то что СЭ на $a\text{-Si:H}$ выпускаются уже промышленным образом, до сих пор нет окончательной ясности в понимании физики функционирования таких СЭ. Это касается даже структуры аморфного материала (например, не ясно, один или два атома Н требуются для пассивации оборванных связей Si [34]). $a\text{-Si:H}$ метастабилен, и это ограничивает срок службы СЭ. В 1977 г. было обнаружено весьма существенное явление деградации СЭ [35], которое состоит в уменьшении η с течением времени. Степень уменьшения зависит от технологии, но само по себе уменьшение обусловлено физически самим механизмом поглощения света в аморфных полупроводниках. Предполагается, что эффект Штеблера—Вронского [35] (уменьшение темновой и фотоэлектропроводности со временем) связан с образованием "новых" оборванных связей, не пассивированных водородом. Эффект обратим — при нагревании до $150 - 200^\circ\text{C}$ диффузия водорода усиливается и проводимость увеличивается до первоначальных значений.

Следует заметить, что физические основы этого явления недостаточно ясны. В некоторых случаях наблюдается обратный эффект: проводимость под действием освещения со временем растет, а затем падает [36]. Или, наоборот, сначала идет падение, а затем (условия освещения не меняются) фототок не только восстанавливает первоначальное значение, но и превосходит его [37].

Помимо изучения физики аморфных материалов идет активное усовер-

шенствование конструкции соответствующих СЭ. Так, для увеличения η пытаются создать двуслойные СЭ (**a-Si:H—CuInSe₂** [38]), а при этом, возможно, полезным окажется поиск новых материалов, в том числе и природных.

Не так давно было показано, что в определенных случаях возможно создание сверхрешеток из аморфных материалов [39]. В [40] сообщалось об использовании в качестве р-слоя СЭ (см. рис. 7) сверхрешетки **a-SiC(50 Å) — a-Si(25 Å)**. Эта сверхрешетка играет роль широкозонного защитного слоя, но одновременно оказалось, что она увеличивает эффективность за счет лучшего поглощения коротковолновых фотонов. Следует заметить, что указанные сверхрешетки (а также сверхрешетки **a-Ge:H—a-Si:H**) получают с резкими границами раздела, с малой плотностью дефектов, а их свойства отлично описываются моделью квантовых ям [41] (в частности, при уменьшении толщин слоев можно получить сдвиг края оптического поглощения до 0,25 эВ).

Рассмотренные аморфные материалы образуют отдельный класс веществ, во многом аналогичных кристаллическим полупроводникам. Исследование их свойств и расширение класса представляют собой актуальную физическую задачу.

Альтернативные процессы преобразования энергии

Способы использования солнечной энергии отнюдь не ограничиваются рассмотренным выше. Здесь, однако, нецелесообразно сравнивать устройства на основе ФВЭ с биологическими или фотохимическими процессами преобразования энергии или с солнечными коллекторами тепла. Соображения о конкурентоспособности различных источников энергии и т.п. читатель найдет, например, в [1, 9 — 11, 13]. Следует заметить лишь, что суммарное энергопотребление на Земле подбирается приблизительно к 1 % энергии фотосинтеза или ~ 0,1 % кинетической энергии атмо- и гидросфер. Это означает, что в ближайшее время представления об экономической эффективности могут радикально измениться.

Лучше говорить не о новом источнике дешевой или дорогой энергии, а о том, что мы наткнулись на ограничение на энергопотребление на Земле сверху. Если стремиться сохранить человеческие условия жизни на планете, придется сильно менять большинство технологических схем. И в новой реальности солнечная энергетика будет, по-видимому, незаменимым компонентом.

Твердотельные фотоэлектрические устройства могут составить основу как локальных источников электроэнергии, так и больших электростанций. Стоит заметить, что это пока единственный предложенный способ использования энергии Солнца в пустынях, не требующий воды.

В заключение вновь вернемся на почву физики. Теоретически мыслимы различные варианты физических процессов превращения солнечной энергии в электрическую, но ФВЭ заведомо самый экономный из них. Дело в том, что в любом случае на входе есть фотон, а на выходе должны быть носители тока, разведенные на разные электроды, что и дает нам источник э.д.с. Как видно из вышеизложенного, в случае ФВЭ практически нет лишних звеньев. Квант света при поглощении непосредственно дает электронно-дырочную пару, конструкция СЭ обеспечивает пространственное разделение носителей.

В принципе возможен (см., например, [42]) иной процесс поглощения света: за счет неоднородности в полупроводниковой гетероструктуре, коллек-

тивными возбуждениями поверхностей раздела и т.п. Но поглощенная таким образом энергия все равно должна быть преобразована в энергию носителей тока. Кроме того, как правило, процессы поглощения света носят резонансный характер, следовательно, на выходе требуется еще монохроматизация солнечного излучения. Процесс межзонного поглощения в полупроводниках является счастливым исключением, диапазон его спектральной чувствительности достаточно широк.

Процесс, альтернативный ФВЭ, должен содержать минимум два дополнительных звена, с которыми обязательно будут связаны дополнительные потери. В борьбе за наивысшую эффективность конкурировать с ФВЭ сложно. Однако само открытие реального альтернативного процесса было бы событием в физике твердого тела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Weinberg G.J., Williams R.H.*//Sci. American. 1990. V. 263, No. 3. P. 99.
2. *Backus Ch.E.*//Conf. Rec. of the 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. — New York: IEEE, 1987. — P. 1.
3. *Photovoltaic Materials and Devices*/Eds. B.K. Das, S.N. Singh. — New York: John Wiley and Sons, 1985.
4. *Chapin D.M., Fuller C.S., Pearson G.L.*// J. Appl. Phys. 1954. V. 2. P. 676.
5. *Лашкарев В.Е.*//ЖЭТФ. 1948. Т. 18. С. 917.
6. *Tauc J.*// Rev. Mod. Phys. 1957. V. 29. P. 308.
7. *Васильев А.М., Ландсман А.П.* Полупроводниковые фотопреобразователи. — М.: Сов. радио, 1971.
8. *Леонтович М.А.*//УФН. 1974. Т. 114. С. 555.
9. *Butti K., Perlin J.* A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology. — Palo Alto: Cheshire Books, 1980.
10. Преобразование солнечной энергии. — М.: Наука, 1985.
- [11] *Hubbard H.M.*//Science. 1989. V. 244. P. 297.
12. *Кириллин В.А., Шпильрайн Э.Э.*//Вест. АН СССР. 1989. № 4. С. 51.
13. *Davis G.P.*// Sci. American. 1990. V. 263, No. 3. P. 21.
14. *Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г.* Физика полупроводников. — М.: Наука, 1977.
15. *Аут И., Генцов Д., Герман К.* Фотоэлектрические явления. — М.: Мир, 1980.
16. *Henri C.H.*// J. Appl. Phys. 1980. V. 51. P. 4494.
17. *Moore R.L., Games L.W., Vander P.H.A., Yip T.O., Antypas G.A., Chai Y.*//Conf. Rec. of the 13th IEEE Photovoltaic Specialist's Conference. — New York: IEEE, 1978. — P. 859.
18. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984. — Т. 2. Гл. 14.
19. *Rotwarf A.*// Proc. of the 7th Photovoltaic Advanced Research and Development Project Review Meeting. — Solar Cells. 1987. V. 21. P. 1.
20. *Гинзбург В.Л.* Теоретическая физика и астрофизика. — М.: Наука, 1987.
- [21] *Полевой В.Г.*//Изв. вузов СССР. Сер. "Радиофизика". 1990. Т. 33. С. 818.
22. *Konagai M., Takahashi K.*// J Appl. Phys. 1975. V. 46. P. 3542.
23. *Capasso F.*//Physica. Ser. B. 1985. V. 129. P. 92.
24. *Ландсман А.П., Стребков Д.С.*//ФТП. 1970. Т. 4. С. 1922.
25. *Ландсман А.П., Стребков Д.С., Унишков В.А.*//ФТП. 1971. Т. 5. С. 2136.
26. *Епифанов М.С., Галкин Г.Н., Журавлева Л.Л., Мусниев П.Т., Стребков Д.С., Унишков В.А.*//ФТП. 1983. Т. 17. С. 2116.
27. *Силин А.П.*// УФН. 1985. Т. 147. С. 485.
28. *Kim W.-Y., Shibata A., Kazama Y., Konagai M., Takahashi K.*// Japan J. Appl. Phys. 1989. V. 28. P. 311.
29. *Yamanaka S., Konagai M., Takahashi K.*//Ibidem. P. 1178.
30. *Advances in Amorphous Semiconductors*/Ed. H. Fritzsche. — Singapore a.o.: World Scientific, 1988.
- [31] *Chittick R.C., Alexander J.H., Sterling H.F.*// J. Electrochem. Soc, 1969. V. 116. P. 77.
32. *Speark W.E., Le Comber P.G.*//Sol. Stale Commun. 1975. V. 17. P. 1193.

33. *Carbon D.E., Wronski C.R.*// Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. P. 671.
34. Физика гидрогенизированного аморфного кремния. Ч. II./Под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски. — М.: Мир, 1988.
35. *Staebler D.L., Wronski C.R.*// Appl. Phys. Lett. 1977. V. 31. P. 292.
36. *Stutzman M., Jackson W.B., Tsai C.C.*//Phys. Rev. Ser. B. 1985. V. 32. P. 23.
37. *Miyaniishi A., Nakata J., Imao S., Shirafuji J., Kubo U., Inuishi Y.*// Japan J. Appl. Phys. 1989. V. 28. P. 2125.
38. *Mitchell K. W.*// P r o c. of the 7th Photovoltaic Advanced Research and Development Project Review Meeting. — Solar Cells. 1987. V. 21. P. 127.
39. *Abeles B., Tiedje T.*//Phys. Rev. Lett. 1981. V. 51. P. 2003.
40. *Tarui H. et al.*// Japan J. Appl. Phys. 1989. V. 28. P. 1769.
- [41] *Wronski C.R.*/ Proc. of the 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. — New York: IEEE, 1987.
42. *Anderson L.M.*//Intersoc. Energy Conversion Engineering Conference. — Angles, California, August 1982.

Статья поступила 29.01.91 г.