

Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики

© Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев[†], В.Д. Румянцев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 9 февраля 2004 г. Принята к печати 11 февраля 2004 г.)

Рассмотрены основные направления развития фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии, открывающие широкие перспективы полупроводниковой гелиоэнергетики. Основное внимание уделено фотопреобразователям на основе $A^{III}B^V$ -гетероструктур, главным образом каскадным солнечным элементам, обеспечивающим наибольшую эффективность преобразования солнечной энергии, для получения которых используются „высокие“ технологии — молекулярно-пучковая и МОС-гидридная эпитаксии. Показано, что использование метода промежуточного концентрирования солнечного излучения обеспечивает снижение площади и, следовательно, стоимости солнечных элементов пропорционально степени концентрирования солнечного излучения.

1. Введение

В настоящее время в общественном сознании крепнет убежденность в том, что энергетика будущего должна базироваться на крупномасштабном использовании солнечной энергии, причем в самых разных ее проявлениях. Солнце — это огромный, неиссякаемый, абсолютно безопасный источник энергии, в равной степени всем принадлежащий и всем доступный. Ставка на солнечную энергетику должна рассматриваться не только как беспроигрышный, но в долговременной перспективе и как безальтернативный выбор для человечества. Мы рассмотрим в ретроспективном и перспективном плане возможности преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью полупроводниковых фотоэлементов. Эти устройства представляются сегодня вполне созревшими в научном и технологическом отношении для того, чтобы рассматриваться в качестве технической базы для крупномасштабной солнечной электроэнергетики будущего.

2. Начальный период солнечной фотоэнергетики

Впервые фотовольтаический эффект наблюдался в электролитической ячейке Эдмондом Беккерелем в 1839 г. Первые эксперименты с твердотельными фотоэлектрическими элементами на основе селена проводились Адамсом и Деєм в Лондоне в 1876 г. [1]. Более полувека понадобилось для того, чтобы появились первые солнечные фотоэлементы с эффективностью, едва превышающей 1%. Ими стали разработанные в 1930-е годы в Физико-техническом институте серно-галлиевые фотоэлементы с запорным слоем [2]. Исследования выполнялись под руководством основателя института академика А.Ф. Иоффе, который уже в то время (1938 г.) впервые внес на рассмотрение правительства СССР программу энергетического использования солнечных фотоэлектрических крыш. Однако для старта фотоэлектрической

энергетики (даже без учета экономических соображений) требовалась существенно большая эффективность. Решающим для этого направления явилось создание кремниевых фотоэлементов с $p-n$ -переходом, имевших КПД около 6% [3]. Первое практическое использование кремниевых солнечных батарей для энергетических целей имело место не на Земле, а в околоземном космическом пространстве. В 1958 г. были запущены искусственные спутники Земли, оснащенные такими батареями — советский „Спутник-3“ и американский „Авангард-1“.

Здесь следует отметить, что научной базой для создания первых солнечных батарей стала разработка теории и технологии полупроводниковых материалов и приборных структур с $p-n$ -переходом. Основные области применения приборов на полупроводниковых материалах в то время виделись в технике преобразования электрической энергии (преобразование переменного тока в постоянный, высокочастотная генерация, переключение и т.д.) и в электронных устройствах передачи и обработки информации (радио, связь и т.д.). В дополнение к „классическим“ полупроводниковым материалам — германию и кремнию, с 1950 года начался синтез материалов типа $A^{III}B^V$ [4]. В начале 1960-х годов были созданы и первые солнечные фотоэлементы с $p-n$ -переходом на основе арсенида галлия. Уступая в эффективности кремниевым фотоэlementам, арсенид-галлиевые тем не менее были способны работать даже при значительном нагреве. Первое практическое применение усовершенствованных арсенид-галлиевых солнечных батарей для энергетических целей было еще более экзотическим, чем в случае кремниевых батарей. Они обеспечивали электроснабжение советских космических аппаратов, работающих в окрестностях планеты Венера (1965), а также самоходных аппаратов „Луноход-1“ и „Луноход-2“, исследующих поверхность Луны (1970 и 1972 гг.).

3. Солнечные элементы на основе гетероструктур

Создание солнечных элементов на основе гетероструктур $AlGaAs-GaAs$ открыло новую страницу в солнечной фотоэнергетике [5]. И вновь вклад Физико-техни-

[†] E-mail: vmandreev@mail.ioffe.ru

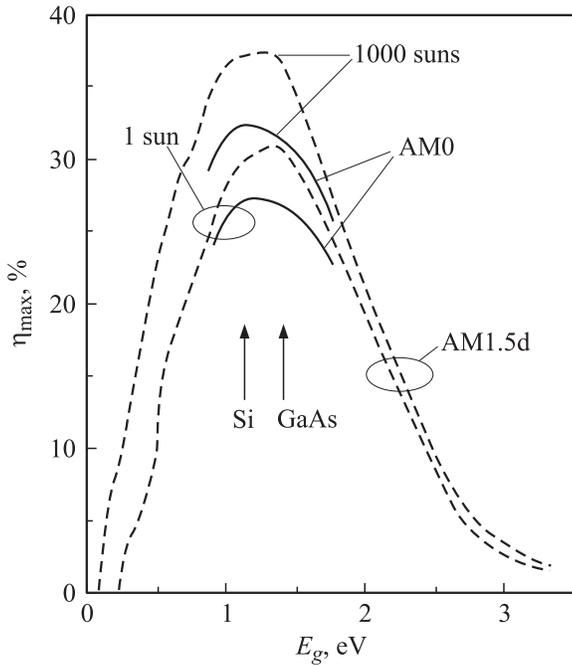


Рис. 1. Зависимости максимально достижимой эффективности преобразования (η_{\max}) солнечного элемента с одним $p-n$ -переходом от ширины запрещенной зоны материала (E_g). Сплошные линии — для солнечного спектра AM0, пунктирные — для спектра AM1.5d (для неконцентрированного солнечного излучения (1 sun) и для 1000-кратно концентрированного излучения).

ческого института оказался весьма весомым. Здесь во второй половине 1960-х годов были выполнены пионерские работы по получению и исследованию „идеальных“ гетеропереходов в системе AlAs–GaAs, направленные, в том числе, на совершенствование солнечных элементов.

Одним из результатов проведенных исследований гетеропереходов явилась практическая реализация идеи широкозонного окна для солнечных фотоэлементов. Эта идея выдвигалась и ранее и имела целью защиту фотоактивной области фотоэлемента от действия поверхностных состояний. В гетероструктурах (AlGaAs (широкозонное окно)– $p-n$ -GaAs (фотоактивная область)) удалось сформировать бездефектную гетерограницу и обеспечить идеальные условия для фотогенерации электронно-дырочных пар и их собирания $p-n$ -переходом. Поскольку гетерофотоэлементы с арсенид-галлиевой фотоактивной областью оказались еще и более радиационно-стойкими, они быстро нашли применение в космической технике, несмотря на значительно более высокую стоимость по сравнению с кремниевыми фотоэлементами. Примером масштабного энергетического использования солнечных батарей на основе AlGaAs/GaAs явилось оснащение ими в 1986 г. советской орбитальной станции „Мир“.

Кремний и арсенид галлия в значительной степени удовлетворяют условиям „идеальных“ полупроводниковых материалов. Если сравнить эти материалы с точки

зрения их пригодности для изготовления солнечного фотоэлемента с одним $p-n$ -переходом, то предельно возможные эффективности фотоэлектрического преобразования оказываются почти одинаковыми, причем близкими к абсолютному максимуму для однопереходного фотоэлемента (рис. 1). Разумеется, несомненными преимуществами кремния являются его высокая распространенность в природе, нетоксичность и относительная дешевизна. Эти обстоятельства, а также широкое разветвление индустрии по производству приборов полупроводниковой электроники обусловили исключительно важную роль кремниевых фотоэлементов в становлении нарождающейся солнечной фотоэнергетики. И хотя были затрачены значительные усилия на создание различных типов тонкопленочных солнечных батарей, но и сегодня кристаллический кремний (в моно- и поликристаллической модификациях) продолжает составлять основную долю в мировом производстве солнечных батарей наземного применения.

До середины 1980-х годов совершенствование солнечных фотоэлементов на основе как кремния, так и арсенида галлия осуществлялось на базе относительно простых структур и простых технологий. Для кремниевых фотоэлементов использовалась планарная структура с мелким $p-n$ -переходом, получаемым методом диффузии. Для фотоэлементов на основе арсенида галлия при выращивании широкозонного окна AlGaAs необходимо было применять эпитаксиальные методы. Использовался сравнительно простой метод жидкофазной эпитаксии, разработанный ранее для получения структур гетеролазеров первого поколения. В случае фотоэлементов необходимо было выращивать всего один широкозонный слой p -AlGaAs, в то время как $p-n$ -переход получался

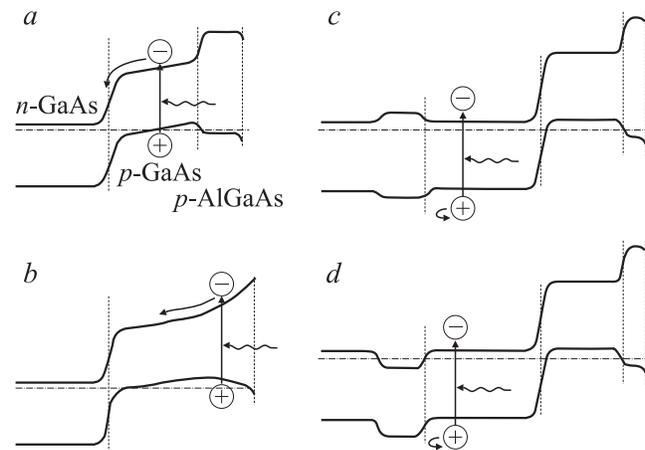


Рис. 2. Зонные диаграммы p -AlGaAs– $p-n$ -GaAs гетеропереходных солнечных элементов: *a* — структура, в которой слой p -GaAs со встроенным электрическим полем получен путем диффузии цинка в базу n -GaAs во время роста широкозонного слоя p -AlGaAs; *b* — структура с сильным встроенным электрическим полем; *c* — структура с тыльным широкозонным слоем, создающим потенциальный барьер; *d* — структура с тыльным потенциальным барьером, сформированным высоколегированным слоем n^+ -GaAs.

за счет диффузии примеси p -типа из расплава в базовый материал n -GaAs (рис. 2, *a*).

С середины 1980-х годов началось проникновение „высоких технологий“ в сферу полупроводниковой солнечной фотоэлектронерики. Были предложены усложненные структуры фотоэлементов на основе кремния, позволяющие снизить в них как оптические, так и рекомбинационные потери. Были также предприняты усилия по улучшению качества самого базового материала. Реализация таких структур оказалась возможной благодаря применению многостадийных технологических приемов, хорошо отработанных к этому времени при изготовлении кремниевых интегральных схем. Результатом этих усилий стал резкий скачок в эффективности фотоэлектрического преобразования кремниевых фотоэлементов [6]. Эффективность, демонстрируемая лабораторными образцами, вплотную приблизилась к теоретическому пределу (рис. 1). К сожалению, стоимость „высокоэффективных“ кремниевых фотоэлементов многократно превосходила стоимость „обычных“.

В то же время прогресс в сфере солнечных фотоэлементов на основе арсенида галлия был обусловлен применением новых эпитаксиальных методов выращивания гетероструктур — в основном это был метод газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений (МОС ГФЭ). Данный метод разрабатывался в процессе совершенствования инжекционных лазеров и фотоэлементов второго поколения на основе соединений $A^III B^V$.

Какие же улучшения были внесены в структуру солнечных гетерофотоэлементов благодаря открывшимся новым технологическим возможностям? Во-первых, было оптимизировано широкозонное окно AlGaAs, толщина которого стала сравнимой с толщиной наноразмерных активных областей в гетеролазерах. Слой AlGaAs стал выполнять также функцию третьей составляющей в трехслойном интерференционном антиотражающем покрытии фотоэлемента (ARC на рис. 3, *a*). Поверх широкозонного слоя AlGaAs стали выращивать узкозонный сильно легированный контактный слой, удаляемый при пост-ростовой обработке в промежутках между контактными полосками. Во-вторых, был введен тыльный (за p - n -переходом) широкозонный слой, обеспечивающий вместе с фронтальным широкозонным слоем двустороннее ограничение фотогенерированных носителей в пределах области поглощения света (рис. 2, *c*). Рекомбинационные потери носителей до их собирания p - n -переходом были снижены. На этом этапе оптимизации гетероструктур AlGaAs/GaAs-фотоэлементов с одним p - n -переходом вновь разработанный технологический метод МОС ГФЭ еще испытывал конкуренцию со стороны усовершенствованного метода низкотемпературной жидкофазной эпитаксии. Так, для подобного рода структур рекордное значение $\text{kпд} = 27.6\%$ в условиях освещения концентрированным солнечным светом со спектром AM1.5 принадлежит фотоэлементам, выращенным методом МОС ГФЭ (указанное значение kпд — это

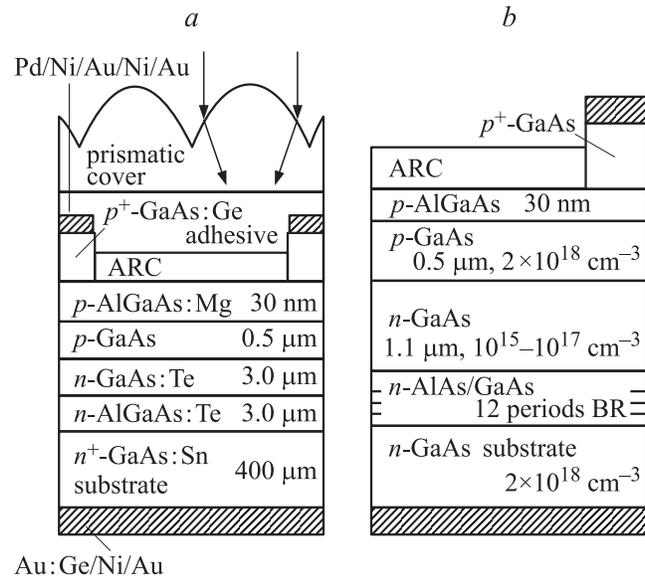


Рис. 3. Схематические диаграммы однопереходных многослойных солнечных элементов (СЭ) на основе AlGaAs/GaAs для космических приложений: *a* — структура СЭ с тыльным потенциальным барьером и тонким широкозонным окном p -AlGaAs. На таких элементах была получена рекордная для СЭ с одним переходом эффективность преобразования 24.6% для 100-кратно концентрированного „космического“ солнечного излучения (AM0); *b* — структура СЭ со встроенным брегговским отражателем (БО), выращенная методом МОС-гидридной эпитаксии. БО состоит из 12 пар слоев $(\text{AlAs} (72 \text{ нм})/(\text{GaAs} (59 \text{ нм}))$, настроен на длину волны $\lambda = 850 \text{ нм}$ и имеет коэффициент отражения 96%. Вследствие этого достигается эффект двойного прохождения длинноволнового излучения через структуру СЭ, что позволяет снизить толщину базового слоя n -GaAs до 1–1.5 мкм. На таких элементах была достигнута высокая радиационная стабильность — „остаточная мощность“ 84–86% после облучения электронами с энергией 1 МэВ (плотность потока 10^{15} см^{-2}).

абсолютный рекорд для фотоэлементов с одним p - n -переходом [6]), а фотоэлементам, выращенным методом жидкофазной эпитаксии, до сих пор принадлежит рекордное значение $\text{kпд} = 24.6\%$ в условиях 100-кратного концентрирования солнечного излучения со спектром AM0 [7].

В структурах AlGaAs/GaAs-фотоэлементов, выращенных методом МОС ГФЭ, одиночный широкозонный слой AlGaAs, формирующий тыльный потенциальный барьер, мог быть заменен на систему чередующихся пар слоев AlAs/GaAs, образующих брегговское зеркало (рис. 3, *b*). Длина волны максимума в спектре отражения такого зеркала выбиралась вблизи края поглощения фотоактивной области, поэтому длинноволновое излучение, не поглощенное в этой области за один проход, могло быть поглощено при втором проходе после отражения от зеркала [8]. Одновременно широкозонные слои зеркала продолжали по-прежнему выполнять функцию тыльного барьера для фотогенерированных носителей. В этих условиях толщина фотоактивной области могла

быть уменьшена в 2 раза без потери тока по сравнению со структурами без зеркала. Это существенно повышало радиационную стойкость фотоэлементов, поскольку количество вносимых при облучении высокоэнергетическими частицами дефектов, влияющих на деградацию диффузионных длин носителей, снижалось пропорционально снижению толщины фотоактивной области [8].

Наряду с реализацией в структурах солнечных фотоэлементов научного и технического „задела“, созданного ранее при разработке структур гетеролазеров, применение новых эпитаксиальных методов позволило решить и ряд сугубо „фотоэлектрических“ проблем. Используя неравновесность условий эпитаксии и (или) встраивая промежуточные сверхрешетки, удалось найти условия роста совершенных гетероструктур AlGaAs/GaAs на германиевой подложке. С этого момента гетерофотоэлементы на германии начали рассматриваться как основные кандидаты для использования на большинстве космических аппаратов. Решающую роль здесь сыграло то обстоятельство, что германий прочнее механически, чем арсенид галлия, используемый до этого в качестве подложек. Поэтому батареи, составленные из AlGaAs/GaAs-фотоэлементов на германии, по весовым и прочностным характеристикам были сравнимы с кремниевыми, а по КПД и радиационной стойкости их превосходили. Другая „фотоэлектрическая“ проблема была принципиально важной для солнечной фотоэлектроэнергетики. Речь идет о создании каскадных фотоэлементов.

4. Каскадные солнечные элементы

Идея каскадных фотоэлементов обсуждалась с начала 1960-х годов и рассматривалась как очевидная, но далекая перспектива для повышения КПД. Ситуация стала меняться в конце 1980-х годов, когда многие исследовательские группы сконцентрировали свои усилия на разработке различных типов двухкаскадных солнечных элементов (рис. 4, 5). На первом этапе лучшие результаты по КПД были получены в механически стыкованных фотоэлементах, хотя все понимали, что действительно перспективными являются фотоэлементы с монокристаллической структурой. Такие структуры ранее других разработали сотрудники NREL (США). Используя германиевые подложки, они вырастили методом МОС ГФЭ многослойные согласованные по периоду решетки структуры, в которых верхний фотоэлемент имел $p-n$ -переход в твердом растворе $In_{0.5}Ga_{0.5}P$, а нижний фотоэлемент — в GaAs. Последовательное соединение фотоэлементов осуществлялось посредством туннельного $p-n$ -перехода, специально формируемого между каскадами. В дальнейшем к процессу фотоэлектрического преобразования был подключен и третий каскад с $p-n$ -переходом в германиевой подложке (рис. 6). В настоящее время трехкаскадные фотоэлементы (см. таблицу) уже находятся в стадии практического использования при оснащении космических аппаратов.

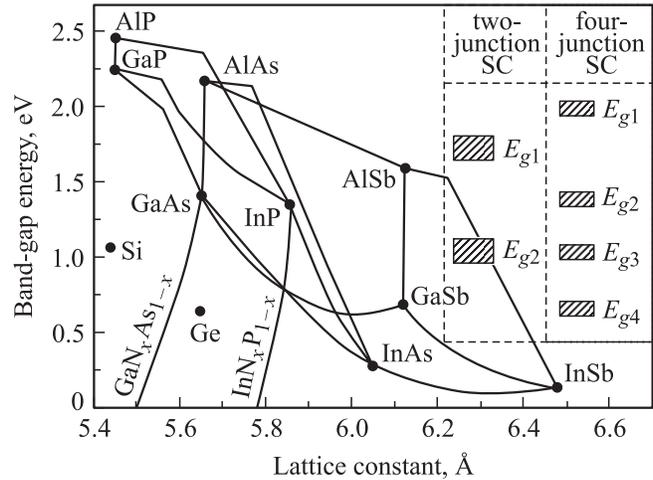


Рис. 4. Ширина запрещенной зоны E_g в зависимости от постоянной решетки для Si, Ge, соединений $A^{III}B^V$ и их твердых растворов. Заштрихованные прямоугольники соответствуют интервалам E_g для различных материалов, обеспечивающих наивысшие эффективности в солнечных элементах (SC) с 2 и 4 $p-n$ -переходами.

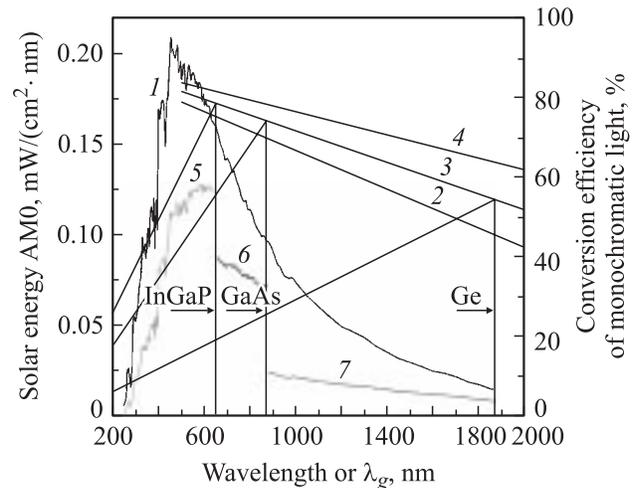


Рис. 5. Кривая 1 — энергетический спектр AM0 для неконцентрированного солнечного излучения; прямые 2, 3 и 4 — максимальные значения „монокроматической“ эффективности идеализированного СЭ для плотностей фототока $j_{ph} = 0.1, 1.0$ и 10 A/cm^2 соответственно, которые зависят от граничной длины волны λ_d полупроводникового материала; наклонные линии слева — зависимости эффективности преобразования в идеализированных СЭ на основе материалов $In_{0.5}Ga_{0.5}P$, GaAs и Ge при $j_{ph} = 1.0 \text{ A/cm}^2$; кривые 5, 6 и 7 показывают части солнечной энергии, преобразуемой в электроэнергию в соответствующих каскадах, составляющих солнечный элемент с 3 $p-n$ -переходами.

Может показаться, что мы слишком много внимания уделили описанию весьма сложных по структуре и дорогих фотоэлементов на основе соединений $A^{III}B^V$. Разрабатываемые для довольно узкой и специфической области энергетического применения, каковой является космическая техника, имеют ли они перспективы для

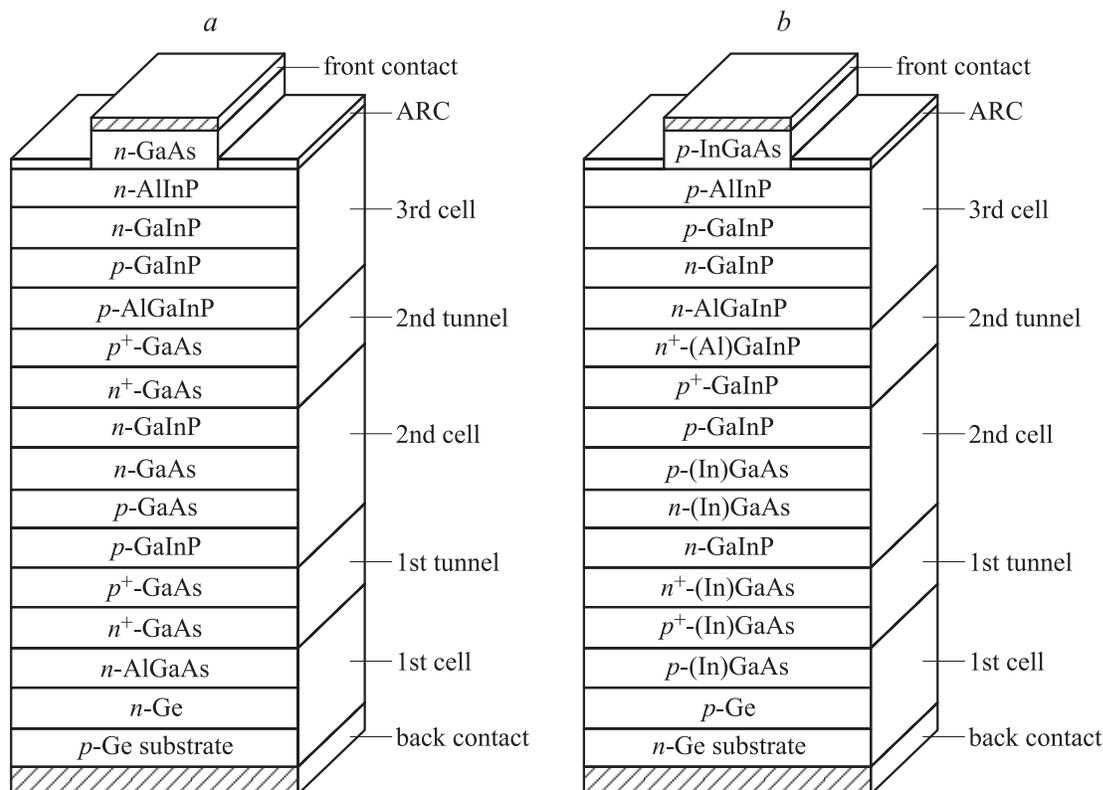


Рис. 6. Поперечные разрезы солнечных элементов с 3 $p-n$ -переходами: *a* — гетероструктура (Al)GaInP/GaAs/Ge, в которой 2-й элемент, а также 1-й и 2-й туннельные переходы выполнены из GaAs; *b* — гетероструктура (Al)GaInP/(In)GaAs/Ge, в которой 1-й туннельный переход выполнен из InGaAs, в то время как 2-й элемент и 2-й туннельный переход выполнены из (Al)GaInP.

использования в крупномасштабной фотоэлектроэнергетике будущего? На наш взгляд, ответ на этот вопрос позитивный, и для этого есть многочисленные основания.

Структура трехкаскадных гетерофотоэлементов сложна, и она еще более усложнится при переходе, например, к четырех- и пятикаскадным фотоэлементам. Однако эпитаксиальное выращивание таких структур — это одностадийный, полностью автоматический процесс, успешность результатов которого целиком зависит от степени проработанности технологической базы. Расход

исходных материалов (газов в методе МOC ГФЭ) здесь мало зависит от количества каскадов. Поскольку все фотоактивные области выполняются, как правило, из „прямозонных“ материалов, общая толщина подлежащей выращиванию эпитаксиальной структуры составляет всего несколько микрон.

Одной из определяющих в стоимости эпитаксиальной структуры является стоимость подложки. Мы уже говорили о том, что использование „инородной“ по отношению к материалам $A^{III}B^V$ германиевой подложки

Теоретические, ожидаемые и достигнутые значения КПД каскадных солнечных элементов

Спектр солнечного излучения	Значение	КПД, %				
		Количество $p-n$ -переходов в каскаде				
		1	2	3	4	5
В условиях околоземного космоса (AM0)	Теоретическое	28	33	38	42	45
	Ожидаемое	23	28	33	36	38
	Реализованное	21.8 [10]	27.2 [11]	29.3 [11]	—	—
В наземных условиях (AM1.5)	Теоретическое	30	36	42	47	49
	Ожидаемое	27	33	38	42	44
	Реализованное [6]	25.1	30.3	31.0	—	—
В наземных условиях с концентрацией (AM1.5)	Теоретическое	35	42	48	52	54
	Ожидаемое	31	38	43	47	49
	Реализованное [6]	27.6	31.1	34.0	—	—

позволило улучшить эксплуатационные параметры космических солнечных батарей. Фактически это привело ко „второму рождению“ технологии германия, бывшего когда-то первым „классическим“ материалом в технике полупроводников и вытесненного затем кремнием. Стоимость германия как подложечного материала ниже, чем используемого для этого арсенида галлия, не говоря уже о его технологических достоинствах (механическая устойчивость при постростовой обработке) и возможности быть включенным в процесс фотоэлектрического преобразования в каскадной структуре. Однако сегодня, оглядываясь на успехи, достигнутые в технологиях наногетероструктур, можно предположить, что германий, уже как подложечный материал, будет, возможно, вновь вытеснен кремнием как еще более дешевым и технологичным. Работы в этом направлении уже ведутся. Таким образом, результатом использования „высоких технологий“ для производства солнечных фотоэлементов на основе соединений $A^{III}B^V$ может стать не только радикальное увеличение КПД (в многокаскадных структурах), но и радикальное снижение стоимости гетероструктурных фотоэлементов.

Рассмотрим теперь перспективы повышения КПД в многокаскадных фотоэлементах (см. таблицу). Сегодняшний опыт разработки трехкаскадных фотоэлементов позволяет надеяться на практическую реализацию повышенных значений КПД в четырех-, пяти-, а может быть, и в еще более многокаскадных структурах. Нет никаких научно-теоретических сомнений, что надежды оправдаются, если будут найдены подходящие материалы для промежуточных каскадов, и эти материалы будут выращены надлежащего качества. Поиск таких материалов ведется, и здесь могут быть выделены несколько направлений.

„Традиционным“ направлением является „просто“ синтез новых материалов. Среди материалов $A^{III}B^V$ это пока мало или вовсе не освоенные практикой полупроводниковые нитриды и бориды. Для широкозонных нитридов уже существует значительный технологический задел (при выращивании тем же методом МОС ГФЭ), обусловленный „радужными“ перспективами переворота в осветительной технике. Возможно, мы станем свидетелями того, как повсеместно в осветительных приборах горячая ртуть и накаливаемый вольфрам будут заменены „холодными“ структурами на основе материалов $A^{III}N$ микронной толщины. Однако для каскадных фотоэлементов требуются скорее узкозонные материалы, в большей степени согласованные по типу и периоду решетки с материалами, уже работающими в трехкаскадных структурах. Такими материалами могут быть, например, твердые растворы GaInNAs (рис. 4), интенсивно изучаемые в настоящее время. Интересно отметить, что усложнение структуры фотоэлементов, а именно, переход к многокаскадным структурам, ослабляет требования к объемным свойствам используемых материалов. Действительно, чем больше каскадов, тем тоньше фотоактивная область в каждом из них и тем

меньше влияние на КПД такого параметра, как диффузионная длина неосновных носителей заряда. Метод компенсации недостаточно хороших объемных свойств материалов технологическим совершенством каскадной структуры начинает применяться и при создании новых типов тонкопленочных солнечных батарей.

Рассмотрим теперь некоторые иные возможности для совершенствования каскадных солнечных элементов. При этом воспользуемся предыдущим опытом развития полупроводниковой техники и, в частности, лазеров на основе соединений $A^{III}B^V$ (рис. 7). До настоящего времени можно было выделить два этапа в таком развитии. Первый из них был связан с созданием гетероструктур, второй — с созданием наногетероструктур. В обоих случаях основные начальные идеи были направлены на совершенствование инжекционных лазеров и разработку технологий для создания таких лазеров. В 1970-х годах даже сложилась традиция, согласно которой параметры инжекционных гетеролазеров, изготовленных с использованием того или иного метода, всегда служили критерием совершенства самого технологического метода. Определение „материал лазерного качества“ означало, что, благодаря именно высокому кристаллографическому совершенству, данная гетероструктура способна работать при сверхвысоких плотностях накачки, необходимых для реализации лазерного эффекта. Анализируя тенденции, наблюдающиеся в настоящее время в работах по созданию инжекционных лазеров третьего поколения, мы увидим, что это прежде всего переход к структурам с квантовыми точками [9].

Что касается солнечных фотоэлектрических преобразователей, то в последнее время здесь также предложены новые подходы, связанные с использованием материалов с квантовыми точками. В частности, речь

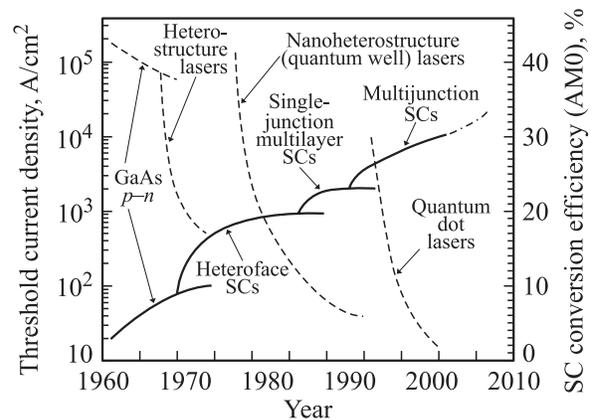


Рис. 7. Эволюция параметров инжекционных лазеров и солнечных элементов на основе $A^{III}B^V$. Пунктирные линии (левая ось) — эволюция плотностей пороговых токов для трех поколений инжекционных лазеров. Сплошные линии (правая ось) — эволюция эффективностей фотоэлектрического преобразования в солнечных элементах на основе различных структур (солнечный спектр AM0, без концентрации светового потока).

идет о создании фотоактивной среды с „промежуточной зоной“ [12]. В структурах многокаскадных фотоэлементов, кроме использования вновь созданных материалов с заданным спектром поглощения, вероятно, можно было бы улучшить характеристики коммутирующих туннельных диодов (увеличить пиковый ток) путем введения между n^+ - и p^+ -слоями сверхрешеток из вертикально связанных квантовых точек. Следует добавить, что существуют и другие, в том числе уже довольно старые предложения по повышению КПД фотоэлектрических преобразователей, при реализации которых потребовались бы „вновь сконструированные“ материалы. К ним относится идея использования плавных гетероструктур, в которых необходимо получить очень большой перепад в значении запрещенной зоны при обеспечении высокой подвижности носителей заряда. Все эти предложения вызваны стремлением приблизить (вначале теоретически, а затем и практически) КПД солнечного фотоэлектрического преобразования к термодинамическому пределу в 93%, определяемому циклом Карно.

Предшествующий опыт показывает, что все достижения в повышении эффективности солнечных фотоэлементов будут в первую очередь использованы в космической технике [10,11]. Этот же вывод можно сделать, оценивая масштаб тех задач, которые ставятся перед новой космической техникой. Существует потребность в большом количестве мощных телекоммуникационных спутников, растут требования к энергетическому обеспечению обитаемых орбитальных станций, становится необходимым создание специализированных энергетических спутников, которые могли бы подпитывать космические транспортные средства. В частности, на энергетических спутниках солнечная энергия преобразовывалась бы в электрическую, а электрическая в лучевую для трансляции энергии с помощью лазерного или СВЧ луча. В более отдаленной перспективе энергию в значительных количествах можно было бы транслировать на Землю для выработки электроэнергии. Для осуществления наиболее крупных проектов структуры солнечных фотоэлементов следовало бы выращивать прямо на орбите методом молекулярно-пучковой эпитаксии в условиях космического вакуума. В любом случае значительное расширение производства фотоэлементов для космоса позволит „попутно“ создать также и технологическую базу для еще более крупномасштабного производства фотоэлементов наземного применения.

5. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения

До сих пор мы не рассматривали еще одну возможность для увеличения КПД фотоэлектрического преобразования. Речь идет о переходе к преобразованию предварительно сконцентрированного солнечного излучения. Предельная расчетная кратность концентриро-

вания излучения на расстоянии от Солнца, соответствующем орбите Земли, составляет 46200 X. Именно такая кратность концентрирования задается обычно при оценке термодинамически предельных эффективностей различных типов солнечных фотоэлементов. В частности, для многопереходных фотоэлементов, состоящих из нескольких десятков каскадов, предельный КПД весьма близок к КПД цикла Карно и составляет почти 87%. Таким образом, многопереходные фотоэлементы, кроме демонстрации уже сегодня наивысших значений КПД и перспективы их повышения в ближайшем будущем, имеют и самые лучшие „фундаментальные“ перспективы.

Но можно ли говорить о перспективах крупномасштабного использования таких фотоэлементов в наземных условиях, где определяющим является экономический фактор? Многопереходные фотоэлементы действительно очень сложны по структуре. Более того, они, пожалуй, являются наиболее сложными в структурном отношении среди всех других полупроводниковых приборов. Здесь должны быть обеспечены самые большие изменения в значениях ширины запрещенной зоны для нескольких фотоактивных областей с $p-n$ -переходами. Весьма значительно варьируются и уровни легирования слоев, причем с резкой сменой типа проводимости при формировании нескольких (по ходу роста структуры) туннельных $p-n$ -переходов, коммутирующих каскады. Заданные толщины слоев фотоактивных областей должны выдерживаться с высокой точностью, обеспечивая расчетное поглощение определенной части солнечного спектра для генерации одинаковых значений фототока в каскадах. Слои, формирующие туннельные p^+-n^+ -переходы, должны быть предельно тонкими (в нанометровом диапазоне) для минимизации поглощения света, в то время как фотоактивные слои должны быть примерно на 2 порядка толще. Весь набор материалов $A^{III}B^V$ (в виде твердых растворов) оказывается вовлеченным в формирование структуры многопереходных фотоэлементов (в перспективе также и нитриды), выращиваемых, кроме всего прочего, на инородной подложке (Ge, а в перспективе — Si). Однако, как уже отмечалось, экономическая сторона при этом не столь драматична. Выращивание структуры — это одностадийный автоматический процесс, вся ее толщина составляет лишь несколько микрометров, а нефотоактивная подложка может быть достаточно дешевой. Решающим же обстоятельством для экономически оправданного использования многопереходных фотоэлементов является тот факт, что они могут весьма эффективно работать при высококонцентрированном солнечном облучении.

То, что гетеропереходные солнечные фотоэлементы на основе арсенида галлия могут эффективно работать при значительном (в сотни и даже тысячи раз) концентрировании светового потока и выгодно отличаются в этом отношении от кремниевых, было отмечено еще на рубеже 1970-х–1980-х годов. К этому времени относятся первые опыты по созданию концентраторных

фотоэлектрических модулей с высокоточными гетерофотоэлементами [13]. Генерируемый фототок возрастал линейно с увеличением светового потока, а выходное напряжение в свою очередь возрастало с увеличением тока по логарифмическому закону. Таким образом, выходная мощность росла сверхлинейно при концентрации излучения и эффективность фотоэлектрического преобразования увеличивалась. Данная ситуация могла быть использована на практике, если бы ток не создавал заметного падения напряжения на внутреннем сопротивлении фотоэлемента. Радикальное снижение внутренних омических потерь становилось ключевой проблемой при разработке концентраторных фотоэлементов. Перспектива увеличения КПД при работе с концентраторами излучения выглядела весьма заманчиво. Однако главной движущей силой при создании концентраторных модулей была возможность снижения расхода полупроводниковых материалов для выработки заданной электрической мощности пропорционально кратности концентрирования светового потока. В этом случае полупроводниковые фотоэлементы относительно малой площади перехватывали солнечное излучение, находясь в фокальной плоскости концентраторов — фокусирующих зеркал или линз, выполненных из сравнительно дешевых материалов. Вклад стоимости фотоэлементов в стоимость солнечных модулей становился незначительным, в то время как эффективность модулей напрямую зависела от эффективности используемых фотоэлементов. Таким образом, создавались предпосылки для экономически оправданного использования в наземной энергетике наиболее эффективных, хотя и дорогих, фотоэлементов на основе соединений $A^{III}B^V$ [14,15].

С начала 1990-х годов в практике создания солнечных концентраторных систем возникло новое направление, базирующееся на концепции малоразмерных модулей, имеющих все предпосылки для обеспечения высокоэффективного и экономически оправданного фотоэлектрического преобразования солнечного излучения [14–19]. При уменьшении линейных размеров концентратора и сохранении заданного отношения размера апертуры к фокусному расстоянию сохраняется и значение кратности концентрирования излучения. Однако в этом случае строительная высота модуля уменьшается из-за более короткого фокусного расстояния линз. Линейные размеры фотоэлементов сокращаются до 1–2 мм (рис. 8), так что их монтаж может быть обеспечен с помощью автоматического оборудования, используемого для монтажа дискретных приборов при массовом производстве продукции в электронной промышленности. При малых линейных размерах фотоэлементов толщина подложки для выращивания структур может быть уменьшена, а доля полезно используемой площади пластин увеличена, что ведет к дополнительной экономии (кроме факта концентрирования излучения) полупроводникового материала. Монтаж может быть осуществлен без сложной компенсации коэффициентов теплового расширения материалов фотоэлемента и металлического теплоотводя-

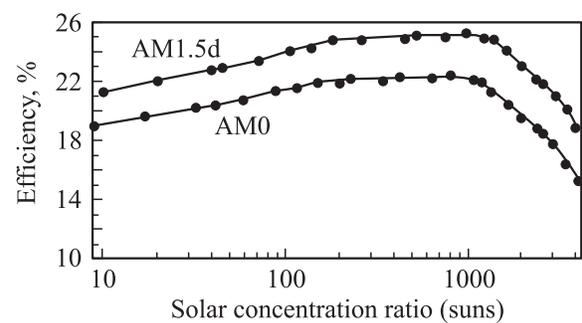
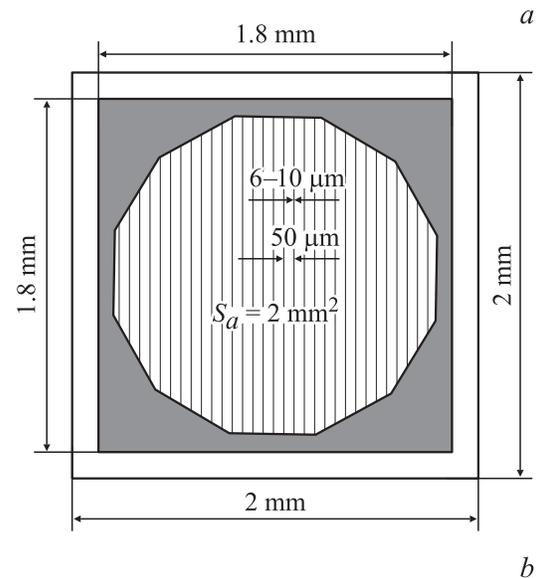


Рис. 8. *a* — схематический вид концентраторного солнечного элемента; *b* — зависимости эффективности преобразования от кратности концентрирования солнечного излучения для однопереходного солнечного элемента на основе AlGaAs/GaAs для условий облучения AM0 и AM1.5.

щего основания. Особенно важно, что толщина теплоотвода тоже уменьшается пропорционально уменьшению линейных размеров концентратора в модуле, что приводит к резкому снижению расхода металла при изготовлении такого модуля. Таким образом, в концепции малоразмерных концентраторных модулей преимущества концентраторных систем (повышение КПД, экономия полупроводниковых материалов) могут быть реализованы при сохранении в целом распределенного характера преобразования солнечного излучения и теплоотвода (как в системах без концентрирования излучения).

Следует отметить, что при рассмотрении перспектив крупномасштабной солнечной электроэнергетики расход любых, даже самых обычных, конструкционных материалов может быть экономически оправдан лишь при высокой эффективности преобразования в расчете на всю фотоприемную поверхность. Это связано с необходимостью покрывать значительные площади земной поверхности для перехвата излучения при выработке больших мощностей.

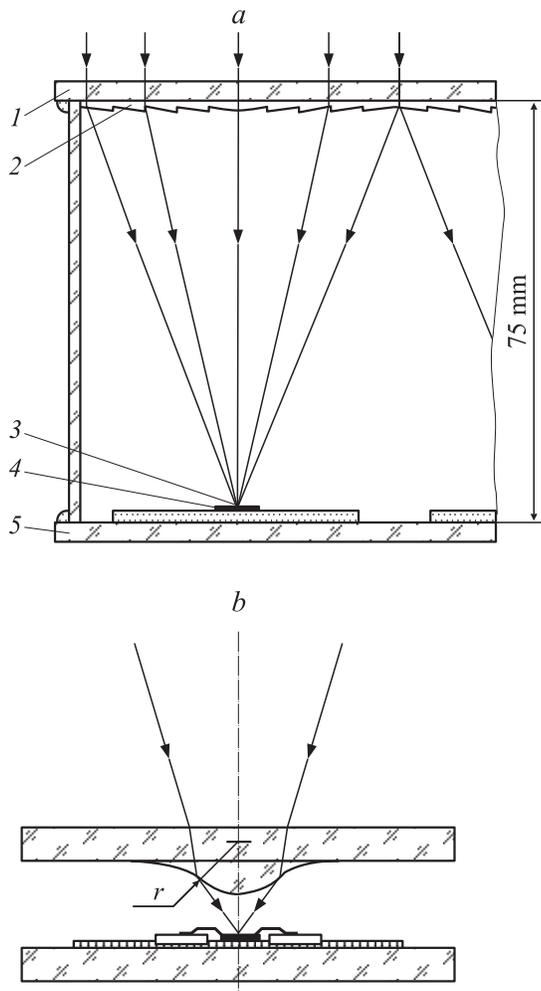


Рис. 9. *a* — поперечный разрез концентраторного модуля: 1 — основа линзовой панели, выполненная из стекла; 2 — микропризмы линз Френеля, выполненных из силикона; 3 — сфокусированные солнечные лучи; 4 — солнечный элемент, смонтированный на металлическом основании; 5 — основа панели солнечных элементов, выполненная из стекла. *b* — система со вторичными микролинзами для увеличения кратности концентрирования солнечного излучения.

Очевидно, что устройства преобразования должны быть защищены от атмосферных воздействий для обеспечения их долговременной (в течение 20–30 лет) работоспособности. В этом отношении многообещающей выглядит конструкция „полностью стеклянных“ концентраторных модулей (рис. 9, 10), разрабатываемых в последние годы в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе в кооперации с Фраунгоферовским институтом солнечных энергосистем (г. Фрайбург) [16,17]. Малоразмерные линзы Френеля здесь объединены в интегральную панель. В панель объединены также и смонтированные на тонких (0.5 мм) металлических теплопроводах концентраторные фотоэлементы. Обе эти панели скреплены стеклянными боковыми стенками, так что внутренний объем модуля герметизирован. Линзо-

вая панель имеет композитную структуру. Здесь лист обычного силикатного стекла, защищающий модуль с фронтальной стороны, служит основой для тонкого, выполненного из прозрачного силикона и расположенного на внутренней стороне стекла френелевского профиля, фокусирующего солнечный свет. Основанием для панели фотоэлементов также служит лист силикатного стекла, через который осуществляется теплосброс. Таким образом, дешевое и стабильное по свойствам стекло становится основным конструкционным материалом концентраторного модуля. Расход силикона оптического качества здесь сведен до минимума, необходимого для формирования преломляющих микропризм (средняя толщина около 0.2 мм). Для соединения и герметизации стеклянных частей модуля служит обычный строительный силикон (рис. 9). Благодаря применению наиболее стойких к излучению и атмосферным воздействиям материалов (стекло и силикон) данные концентраторные модули имеют наилучшие перспективы для долговременной работы. В экспериментальной „полностью стеклянных“ модулях оптическая эффективность линз Френеля достигала 89%. При использовании двухкаскадных InGaP/InGaAs-фотоэлементов с кпд $\approx 30\%$ (AM1.5 d) кпд модуля, измеренный в натуральных условиях, составил 24.8% в расчете на мощность излучения, падающую на поверхность линз [17].

Дальнейшее совершенствование модулей рассматриваемой конструкции идет по пути увеличения кратности концентрирования солнечного излучения. В частности, при размерах каждой единичной линзы в submodule $4 \times 4 \text{ см}^2$ высокая оптическая эффективность обеспечивается при применении фотоэлементов с диаметром фоточувствительной поверхности 2 мм (рис. 8), что соответствует кратности концентрирования около $500\times$. Дальнейшее уменьшение размеров фотоэлементов и переход к кратностям концентрирования $1000\times$ и более возможны при использовании вторичных микролинз с гладким профилем, расположенных в непосредственной близости от фотоэлементов (рис. 9). В этом случае вторичные линзы также могут быть объединены в панель (рис. 10) [18,19]. При высококонцентрированном солнечном излучении использование многопереходных фотоэлементов имеет дополнительные преимущества. При увеличении количества каскадов выходное напря-

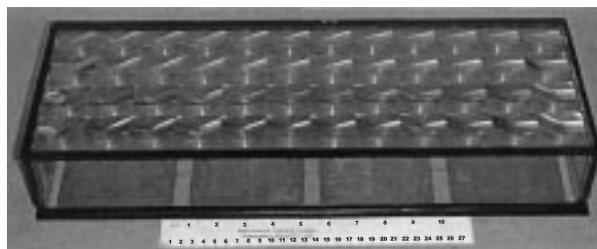


Рис. 10. Экспериментальный фотоэлектрический модуль для преобразования концентрированного солнечного излучения с панелью из 48 линз Френеля.

жение увеличивается, а фототок уменьшается. Благодаря этому обстоятельству снижаются внутренние омические потери при собирании тока, так что высокий КПД сохраняется при более высоких кратностях концентрирования излучения.

В отношении практического использования фотопреобразователей концентрированного солнечного излучения могут существовать определенные опасения, связанные с необходимостью обеспечения слежения концентраторных модулей за Солнцем. Действительно, в этом случае для размещения модулей требуется создание специальных опорно-поворотных устройств, оснащенных датчиками положения Солнца и электроприводами. По сравнению с размещением обычных модулей без концентраторов это приводит к дополнительному расходу конструкционных материалов и расходу энергии на слежение. Но даже в обычном модуле при постоянном слежении за Солнцем за световой день вырабатывается на 30–40% больше энергии, чем без слежения. Учитывая эту прибавку и факт более высокой эффективности концентраторных модулей, можно сказать, что это компенсирует дополнительные затраты на материалы. Что касается затрат электроэнергии на слежение, то они составляют в экспериментальных установках лишь 0.2–0.3% от энергии, вырабатываемой концентраторными модулями, размещенными на этих установках [18,19].

Не следует противопоставлять обычные и концентраторные модули при оценке перспектив развития солнечной фотоэлектроэнергетики. И те, и другие должны использоваться в будущих системах электроснабжения. По-видимому, обычные модули с фотоэлементами из кристаллического кремния или тонкопленочных структур составят основу децентрализованной системы выработки электроэнергии. Принадлежащие широкому кругу лиц, устанавливаемые на крышах и стенах домов и сооружений, объединенные в сеть, они будут олицетворять собой „демократические принципы“ новой энергетики в сравнении с „диктатурой“ энергетических гигантов, имеющей место в настоящее время. Однако для покрытия энергетических потребностей энергоемких производств, муниципальных сообществ и т.д. будет необходимо создание достаточно крупных солнечных станций, обеспечивающих минимальную стоимость вырабатываемой электроэнергии. Такие станции, размещаемые на специально отведенных территориях и обслуживаемые специальным персоналом, также будут частью децентрализованной энергетической системы. Применение концентраторных фотоэлектрических модулей при создании таких станций выигрывает в естественном решении. Существуют многочисленные экономические оценки (см. например, [20–22]), согласно которым концентраторная фотоэлектроэнергетика в ближайшие десять лет может стать не только наиболее экономически эффективной среди других устройств для фотоэлектрического преобразования, но и составить конкуренцию существующим традиционным источникам по стоимости вырабатываемой

электроэнергии. Важно также то, что можно построить солнечные электростанции значительной мощности, не развертывая при этом в больших объемах новое полупроводниковое производство. Ведь в данном случае основные усилия будут связаны с изготовлением не фотоэлементов, а механических частей конструкции концентраторных модулей и поддерживающих устройств, для изготовления которых производственная база уже существует.

Между тем проблема развертывания новых производственных мощностей полупроводниковой промышленности уже в ближайшее время может стать актуальной в связи с необходимостью обеспечения космической техники высокоэффективными фотоэлементами на основе соединений $A^{III}B^V$. И здесь концентраторный подход рассматривается как один из возможных вариантов решения проблемы. В условиях космоса в качестве концентраторов излучения наиболее перспективным представляется применение линейных линз Френеля. Это позволяет использовать относительно точное слежение за Солнцем только вокруг одной оси, параллельной микропризмам линз, в то время как вокруг второй оси слежение может быть осуществлено значительно грубее. Кратности концентрирования излучения при этом обычно составляют $(6–10) \times$. Преломляющийся профиль в линзах выполняется из прозрачного силикона. Для космических применений линзы могут иметь очень тонкую (~ 0.1 мм) стеклянную основу [23] или даже не иметь ее вовсе [24]. В первом случае лист стекла, легированного двуокисью церия, выполняет функцию защиты линзы от ультрафиолетового излучения и действия высокоэнергетических частиц. Во втором случае на фронтальную поверхность силиконовой линзы наносятся многослойные защитные покрытия. В обоих случаях фотоэлементы оказываются лучше защищены от неблагоприятных воздействий, чем это имеет место в солнечных батареях без концентраторов. Радиационная стойкость батарей повышается и за счет работы при более высокой плотности фототока, достигаемой при концентрировании солнечного излучения. Повышение плотности тока становится особенно важным при запусках космических объектов в сторону от Солнца. В этом случае концентрирование излучения компенсирует эффект уменьшения КПД фотоэлементов, наблюдаемый при снижении плотности мощности солнечного света. Для условий околоземного космического пространства возможна реализация удельной мощности на единицу веса концентраторной солнечной батареи ~ 180 Вт/кг и удельной мощности на единицу площади ~ 300 Вт/м² [24]. Эти параметры ожидаются при использовании трехкаскадных InGaP/GaAs/Ge-фотоэлементов и не могут быть достигнуты ни в каком другом типе космических солнечных батарей. Разработанные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе космические модули с короткофокусными (23 мм) линейными линзами Френеля позволяют применять их вместо обычных плоских батарей без изменения конструкции транспортных контейнеров.

6. Заключение

Мы являемся свидетелями и участниками многих интересных и важных процессов, происходящих в настоящее время в научно-технической сфере. Полупроводники, история технического развития которых насчитывает лишь немногим более 50 лет, прочно завоевали все области электропреобразовательной техники и электроники, подготовили и осуществляют „информационную революцию“, близки к тому, чтобы сделать „переворот“ в осветительной технике. Научные и технологические успехи последнего десятилетия позволяют надеяться, что „революция“ с участием полупроводников может произойти и в технике генерирования электроэнергии.

В широком смысле создание новой энергетической базы никогда не обходилось дешево. Трудно даже представить, сколько усилий и средств было вложено при разработке и создании систем электрогенерирования, распределения и потребления, когда электроэнергетика только начинала входить в хозяйственный обиход. Последующее развитие электроэнергетики потребовало вовлечения новых видов топлива. Были построены атомные электростанции, которые, казалось, решат все энергетические проблемы. Но могли ли быть построены эти электростанции, если бы не существовало национальных программ по созданию ядерного оружия? Ведь колоссальные средства были первоначально вложены именно в эти программы, а электростанции явились лишь одним из результатов их реализации. Кажущаяся дешевизна готовой разработки привела к тому, что даже за отказ от использования атомных электростанций придется платить огромную цену.

Солнечная фотоэлектроэнергетика рождается не на пустом месте. Во многом за счет развития электроники, лазерной техники и электроэнергетики для космических аппаратов создана научно-технологическая база, которая может послужить отправной точкой для развертывания наземной солнечной электроэнергетики на основе полупроводников. Наступает время, когда следует переходить к более широкому инвестированию средств в эту область, соответствующую значимости, которую будет иметь солнечная электроэнергетика в будущем.

Работа поддержана Европейской комиссией в рамках проекта „Fulspectrum“ SES6-CT-2003-0502620.

Список литературы

- [1] W.G. Adams, R.E. Day. Phil. Trans. R. Soc., **167** (part 1) 313 (1877).
- [2] A.F. Ioffe, A.V. Ioffe. Phys. Z. Sov. Un., **7**, 343 (1935).
- [3] D.M. Chapin, C.S. Fueller, G.L. Pearson. J. Appl. Phys., **25**, 676 (1954).
- [4] Н.А. Горюнова. Автореф. дис. (ЛГУ–ФТИ, 1951).
- [5] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, М.Б. Каган, И.И. Протасов, В.Г. Трофим. ФТП, **4**, 12 (1970).
- [6] M.E. Green, K. Emery, D.L. King, S. Igary, W. Warta. Progr. Photovolt.: Res. Appl., **10**, 355 (2002).

- [7] V.M. Andreev, A.B. Kazantsev, V.P. Khvostikov, E.V. Paleeva, V.D. Rummyantsev, M.Z. Shvarts. Proc. 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion (Hawaii, 1994) p. 2096.
- [8] V.M. Andreev, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, M.Z. Shvarts. Proc. 2nd World Conf. on Photovolt. Solar Energy Conversion (Vienna, 1998) p. 3757.
- [9] N.N. Ledentsov, M. Grundmann, F. Heinrichsdorff, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, M.V. Maksimov, Zn.I. Alferov, J.A. Lott. IEEE J. Select. Topics. Quant. Electron., **6**, 439 (2000).
- [10] S.G. Bailey, D.F. Flood. Progr. Photovolt., **6**, 1 (1998).
- [11] R.R. King et al. Proc. 28th IEEE Photovolt. Specialists Conf. (IEEE, N.Y., 2000) p. 998.
- [12] A. Luque, A. Marti, P. Wahnnon, C. Tablero, L. Cuadra. Workshop Proc. „The path to ultra-high efficient photovoltaics“ (Ispra, Italy, 2002) p. 40.
- [13] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, Х.К. Арипов, В.Р. Ларионов, В.Д. Румянцев. Гелиотехника, **6**, 3 (1981).
- [14] V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rummyantsev. Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight (John Wiley & Sons Ltd, 1997).
- [15] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, V.D. Rummyantsev, E.V. Paleeva, M.Z. Shvarts, C. Algora. Technical Digest of the International PVSEC-11 (Sapporo, Japan, 1999) p. 147.
- [16] V.D. Rummyantsev, M. Hein, V.M. Andreev, A.W. Bett, F. Dimroth, G. Lange, G. Letay, M.Z. Shvarts, O.V. Sulima. Proc. 16th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. (Glasgow, 2000) p.2312.
- [17] M. Hein, M. Meusel, C. Baur, F. Dimroth, G. Lange, G. Siefert, T.N.D. Tibbits, A.W. Bett, V.M. Andreev, V.D. Rummyantsev. Proc. 17th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. (Munich, Germany, 2001) p. 496.
- [18] V.D. Rummyantsev, O.I. Chosta, V.A. Grilikhes, N.A. Sadchikov, A.A. Soluyanov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. Proc. 29th IEEE Photovolt Specialists Conf. (New Orleans, 2002) p. 1596.
- [19] V.D. Rummyantsev, V.M. Andreev, N.A. Sadchikov, A.W. Bett, F. Dimroth, G. Lange. Proc. Conf. „PV in Europe“ (Rome, 2002).
- [20] H.L. Cotal et al. Proc. 28th IEEE Photovolt. Specialists Conf. (Anchorage, 2000) p. 955.
- [21] M. Yamaguchi. Workshop Proc. „The path to ultra-high efficient photovoltaics“ (Ispra, Italy, 2002) p. 15.
- [22] M. Yamaguchi, A. Luque. IEEE Transactions on Electron Dev., **46**, 41 (1999).
- [23] V.M. Andreev, V.R. Larionov, V.M. Lantratov, V.A. Grilikhes, V.P. Khvostikov, V.D. Rummyantsev, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts, E.V. Yakimova. Proc. 28th IEEE Photovolt. Specialists Conf. (Anchorage, 2000) p. 1157.
- [24] M.J. O'Neill, M.F. Piszczor, M.I. Eskenazi, M.M. Botke, H.W. Brandhorst, D.L. Edwards, P.A. Jaster. Proc. 29th IEEE Photovolt. Specialists Conf. (New Orleans, 2002) p. 916.

Редактор Т.А. Полянская

Trends and Perspectives of Solar Photovoltaics

Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Rumyantsev

Ioffe Physico-Technical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Considered are key directions of the development of photovoltaic method of the solar energy conversion, which open up wide prospects in the advancement of the semiconductor photovoltaics. Primary emphasis was received by photoconverters based upon $A^{III}B^V$ heterostructures ensuring the highest efficiency of solar cells, for fabrication of which the high-performance technologies — MBE and MOCVD — are used. It is shown that the use of the intermediate sunlight concentration technique ensures reduction of the solar cell dimensions and, hence, their cost proportionally to the sunlight concentration ratio.