

# Новый тип высокоэффективных двусторонних кремниевых солнечных элементов с внешними шинами и проволочной контактной сеткой

© Г.Г. Унтила<sup>¶</sup>, Т.Н. Кост, А.Б. Чеботарева, М.Б. Закс\*, А.М. Ситников\*, О.И. Солодуха\*

Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

\* НПФ Кварк,

350000 Краснодар, Россия

(Получена 28 февраля 2005 г. Принята к печати 9 марта 2005 г.)

Представлены результаты для двусторонних, с внешними шинами, кремниевых солнечных элементов из  $[n^+p(n)p^+]$ -структур на основе Cz-Si с токособирающей системой новой конструкции LGWEB (laminated grid of wire external busbars), которая состоит из пленки проводящего оксида, нанесенной на кремниевую структуру, электрических шин, расположенных рядом с кремниевой структурой, и проволочной контактной сетки, прикрепленной низкотемпературным методом ламинирования одновременно к оксиду и шинам. Двусторонние солнечные элементы LGWEB имеют рекордно высокую для подобных приборов эффективность: 17.7%(n-Si)/17.3%(p-Si) при двусторонности 74–82% для гладкой тыльной поверхности и 16.3%(n-Si)/16.4%(p-Si) при двусторонности 89% для текстурированной тыльной поверхности. Показано, что технология LGWEB позволяет достичь величины КПД, превосходящей 21%.

## 1. Введение

Разработка новых методов формирования электрических контактов к солнечным элементам (СЭ) является одной из ключевых проблем на пути решения основных задач полупроводниковой солнечной фотоэнергетики (ФЭ).

Для того чтобы ФЭ могла конкурировать с нынешними источниками энергии (ископаемое топливо, атомная энергетика, другие виды возобновляемой энергии), необходимо снизить стоимость пикового ватта ( $W_p$ ) установленной мощности системы ФЭ как минимум в 2 раза с нынешних 6\$/ $W_p$  до уровня менее 3\$/ $W_p$ , а также увеличить объем производства (700 MW $_p$  в 2003 г.) примерно в 1000 раз в течение 30–50 лет [1,2]. Исходя из тенденции развития ФЭ, которая с 1979 по 2003 г. стабильно демонстрирует ежегодные темпы роста объема производства в 25–30% и снижение цены  $W_p$  на 5–6% в год [1], считается, что эти задачи реалистичны. Соответственно историческое преодоление ценового порога прогнозируется на 2013 г. Однако какие технические задачи должны быть решены, чтобы реализовать эту цель?

В настоящее время более 90% всего объема производства ФЭ составляют плоско-панельные модули из кристаллического кремния [2]. Прогноз показывает, что в среднесрочной перспективе альтернативы кремнию нет [3]. Европейская ассоциация производителей приборов фотовольтаики делает ставку на плоско-панельный подход и планирует, в том числе [4]:

– увеличить коэффициент полезного действия (КПД) СЭ в производстве с нынешних 12–16% до 20%, для чего, в частности, признано необходимым ввести в их конструкцию высокоэффективные контакты, причем

предпочтительно расположенные на тыльной стороне (вариант BCSC, back-contact solar cell) для удешевления процесса сборки модуля;

– снизить расход кремния с 16г/ $W_p$  (сегодня) до 8г/ $W_p$ , поскольку около половины стоимости модуля составляет цена кремниевых пластин [5,6]; таким образом, толщина СЭ должна уменьшиться с 300 до ~ 120 мкм.

Необходимо отметить, что в качестве эффективных способов снижения цены  $W_p$  также рассматриваются двусторонние (bifacial) [7] и концентраторные [8,9] СЭ.

Таким образом, необходимость снижения цены  $W_p$  определяет основные направления работ в кремниевой ФЭ: СЭ должны быть обязательно высокоэффективными и при этом тонкими (плоско-панельный подход), вместе с тем желательно двусторонними и с контактами на тыльной стороне, либо концентраторными (находящийся в стадии становления концентраторный подход).

Рассматривая современное состояние дел с КПД кремниевых СЭ, необходимо отметить, что в лабораторных СЭ уже достигнут КПД более 20% (24.7% — абсолютный рекорд для кремниевого СЭ [10]), однако КПД промышленных СЭ значительно ниже (12–16%). Основная причина, которая приводит к снижению КПД промышленных СЭ, связана с технологией формирования электрических контактов.

Электрические контакты в прямом и в переносном смысле определяют „лицо“ СЭ. В настоящее время в промышленности доминирует технология screen-printing (SP), используемая при изготовлении 90% всех кремниевых СЭ, которая основана на трафаретной печати и впекании металлосодержащих паст. Однако технология SP отличается не только простотой и экономичностью, но и существенными недостатками, которые обуславливают ее непригодность в применении к тонким СЭ, а также ограничивают КПД промышленных СЭ [11]. В свою очередь все рекордные значения КПД получены при

<sup>¶</sup> E-mail: GUntila@mics.msu.su

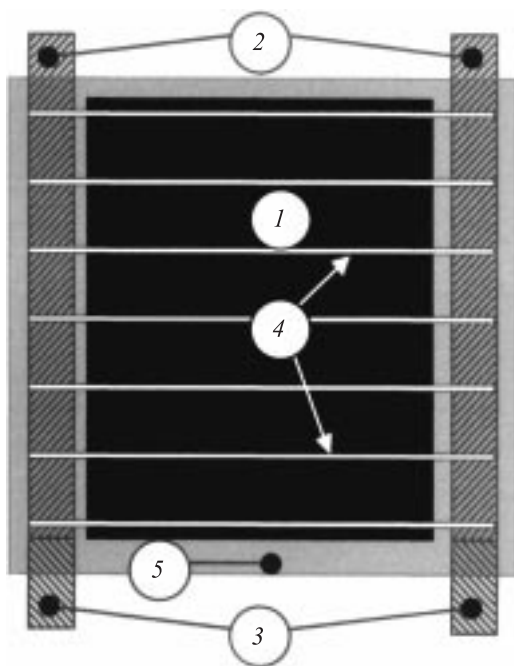
использовании технологии ECO (evaporated contacts) — нанесенных в вакууме контактов, рисунок которых формируют с помощью фотолитографии. Однако из-за высокой стоимости технология ECO в массовом производстве не используется.

Таким образом, ключевая долгосрочная задача ФЭ состоит в ликвидации разрыва между кпд промышленных и лабораторных СЭ, для чего необходимо разработать новые, простые, рентабельные технологии. В особенности это относится к технологии изготовления высокоэффективных контактов, которые не должны содержать операций фотолитографии и маскирования.

В качестве перспективных конструкций для СЭ с кпд выше 20% рассматриваются, в частности, структура НТ (heterojunction with intrinsic thin-layer) фирмы Sanyo Electric [12], point-contact solar cell от Sun Power [13] и конструкция OECO (oblique evaporated contacts), разрабатываемая в ISFH [14]. В статье представлены результаты для двусторонних кремниевых СЭ с проволочной контактной сеткой и внешними шинами, изготовленных по разрабатываемой нами новой низкотемпературной технологии LGWEB (laminated grid of wire external busbars) [15].

## 2. Конструкция солнечного элемента LGWEB

Солнечный элемент (рис. 1) состоит из структуры 1  $[n^+n(p)p^+]$ -Si и двух (лицевой и тыльной) токособирающих систем, в состав каждой из которых входят:



**Рис. 1.** Конструкция СЭ LGWEB (вид лицевой и тыльной сторон идентичен): 1 — структура  $[n^+n(p)p^+]$ -Si с нанесенными на обе поверхности слоями прозрачного проводящего оксида, 2 — лицевые шины, 3 — тыльные шины, 4 — проволочные контактные полоски, 5 — ламинационная пленка.

нанесенный на поверхность структуры слой прозрачного проводящего оксида TCO (transparent conducting oxide), который одновременно является просветляющим покрытием; электрические шины (лицевые — 2, тыльные — 3), расположенные рядом со структурой 1; проволочная контактная сетка (лицевая — 4), изготовленная из медной проволоки, покрытой контактной композицией, прикрепленная низкотемпературным методом ламинирования одновременно к лицевому слою TCO и лицевым шинам, и аналогично с тыльной стороны; ламинационная пленка 5, которая прикреплена к поверхности TCO и фиксирует проволочную контактную сетку.

## 3. Технология изготовления солнечного элемента LGWEB

Для создания СЭ использовали структуры на базе Cz-Si (кремний, полученный методом Чохральского), как  $n$ -, так и  $p$ -типа проводимости. В структурах на основе  $n$ -Si кремний имел удельное сопротивление  $\rho = 4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и толщина составляла 390 мкм, а на основе  $p$ -Si —  $40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и 290 мкм. Структуры  $[n^+np^+]$ -Si и  $[n^+pp^+]$ -Si изготавливали в НПФ „Кварк“ (г. Краснодар) на обычном производственном оборудовании путем диффузии фосфора и бора из нанесенных фосфорсодержащего и борсодержащего стекол. Были использованы как текстурированные с двух сторон пластины, так и пластины с гладкой тыльной поверхностью после щелочного травления. Структуры после снятия стекла могли подвергаться травлению в смеси азотной и плавиковой кислот [16].

В качестве TCO на поверхность кремниевой пластины наносили: на  $p^+$ -слой — пленку  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  (ITO, indium tin oxide — сплав оксидов индия и олова), на  $n^+$ -слой — пленку  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{F}$  [17]. Пленки растили методом распыления раствора при температуре подложки  $400\text{--}500^\circ\text{C}$  [18]. Время нанесения пленки составляло  $\sim 1$  мин. Пленки толщиной  $\sim 75$  нм имели темно-голубой цвет. При этом пленки ITO имели удельное слоевое сопротивление  $\sim 50 \text{ Ом}/\square$ , а пленки  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{F}$   $\sim 30 \text{ Ом}/\square$ . После нанесения TCO образец необходимой площади вырезали с помощью алмазного скрейбера, дополнительную обработку торцов не проводили. Контактную сетку из медной проволоки диаметром 70 мкм, покрытой контактной композицией, прикрепляли к TCO с помощью ламинационной пленки толщиной 32 мкм при температуре  $150^\circ\text{C}$ .

## 4. Достоинства конструкции LGWEB

— Введение TCO позволяет использовать в LGWEB простой высокоэффективный гомогенный (не селективный) эмиттер с удельным слоевым сопротивлением  $100 \text{ Ом}/\square$  и более.

— Сочетание проволочной контактной сетки с TCO позволяет получить в СЭ LGWEB экстраординарно низкие потери на затенении (3.2%) и последовательном

сопротивлении [19], не выше, чем в СЭ с металлизацией ЕСО, и примерно в 3 раза ниже, чем для металлизации SP [20–22]. Так, ширина проволочной контактной полоски составляет всего  $\sim 80$  мкм и может быть легко уменьшена. Кроме того, контактные полоски из медной проволоки имеют низкое продольное сопротивление,  $\sim 40$  мОм/см, более чем в 15 раз меньше, чем получают методом SP. Эти свойства особенно важны для СЭ большой площади и в концентраторных СЭ.

– Конструкция LGWEB предпочтительнее варианта BCSC, поскольку она свободна от его главного недостатка, состоящего в том, что для получения высокоэффективного BCSC необходим дорогой кремний, обычно  $Fz$ -Si (полученный методом безтигельной зонной плавки). Например, расчеты, выполненные в Sun Power, показали, что для получения КПД  $> 20\%$  в их Point Contact СЭ требуется кремний с временем жизни носителей  $> 1$  мс (т.е.  $Fz$ -Si) [13]. Аналогично для высокого КПД в СЭ OECO толщиной 200–300 мкм диффузионная длина должна быть не менее 500–800 мкм [23]. Для кремния с худшими параметрами КПД BCSC резко уменьшается, причем значительно сильнее, чем при расположении контактов на обеих поверхностях. Таким образом, уникальное преимущество СЭ LGWEB состоит в том, что шины в них расположены в стороне от СЭ, но при этом контактные полоски расположены на обеих поверхностях. В результате не только упрощается процесс сборки модуля, причем в большей степени, чем в варианте BCSC, но и не повышаются требования к качеству кремния.

– Проволочные контактные полоски можно легко изготавливать любой формы, например треугольной, что рассматривается как эффективный способ уменьшения затенения [24].

– Проволочные контактные полоски совместимы практически с любой формой поверхности СЭ, в частности, не только гладкой или текстурированной, но также шероховатой, волнистой или изогнутой. Это означает, что для ленточного кремния (EFG) конструкция LGWEB имеет исключительные преимущества перед другими методами.

– СЭ LGWEB по своей конструкции являются двусторонними.

– Низкая температура процесса изготовления ( $< 150^\circ\text{C}$ ) делает технологию LGWEB применимой к СЭ на основе аморфных материалов, включая структуру НТ.

## 5. Параметры солнечного элемента LGWEB

Из световых вольт-амперных характеристик (ВАХ) определяли параметры СЭ:  $J_{sc}$  (плотность тока короткого замыкания),  $V_{oc}$  (напряжение холостого хода),  $FF$  (фактор заполнения) и  $Eff$  (эффективность). Для образца #615 результаты получены в SNL (Sandia National Laboratories), включая измерения спектрального отклика

Таблица 1. Параметры солнечных элементов LGWEB

Параметр	Группа 1: $n^+ - n - p^+$				Группа 2: $n^+ - p - p^+$			
	#615		#739		#1044-2		#1043-1	
	front	back	front	back	front	back	front	back
Текстурирование	есть	есть	есть	нет	есть	есть	есть	нет
$R_{ini}$ , Ом/□	26		60		52		84	
$R_{fin}$ , Ом/□	112		110		85		84	
$I_{sc}$ , mA/cm <sup>2</sup>	35.0	30.8	36.2	27.3	35.4	31.3	36.6	29.8
$V_{oc}$ , мВ	609	607	623	615	617	614	619	615
$FF$ , %	76.5	77.4	78.3	78.5	75.2	76.6	76.2	78.0
$Eff$ , %	16.3	14.5	17.7	13.2	16.4	14.7	17.3	14.3
$Eff_{total}$ , %	30.8		30.9		31.1		31.6	
Двусторонность, %	88.9		74.6		89.6		82.7	
Площадь, см <sup>2</sup>	32.2		42		42.3		42.3	

*Примечание.*  $R_{ini}$  — слоевое сопротивление эмиттера после диффузии;  $R_{fin}$  — слоевое сопротивление эмиттера после подтравливания эмиттера;  $Eff_{total}$  — суммарная эффективность с фронтальной и тыльной сторон; front, back — фронтальная и тыльная поверхности соответственно. Двусторонность (bifaciality) — отношение КПД при освещении с тыльной и лицевой сторон. Солнечный элемент #615 тестирован в Sandia National Laboratories и использовался как калибровочный образец.

и коэффициента отражения. Для остальных СЭ  $J_{sc}$  определяли на импульсном тестере фирмы „Телеком-СТВ“, при этом образец #615 использовали для калибровки по току. В результате проведенного нами исследования было установлено, что при правильной калибровке по току тестер фирмы „Телеком-СТВ“ обеспечивает корректное (ошибка менее  $\pm 2\%$ ) измерение  $J_{sc}$ , однако занижает параметры  $V_{oc}$  и особенно сильно  $FF$ , что обусловлено природой импульсных измерений. При этом степень занижения увеличивается с ростом эффективного времени жизни неосновных носителей заряда в базе. Поэтому для определения параметров  $V_{oc}$ ,  $FF$  и  $Eff$  измеряли стационарные световые ВАХ при освещении галогеновой лампой накаливания мощностью 1000 Вт на термостатируемом столике при температуре СЭ ( $25 \pm 0.1$ ) $^\circ\text{C}$ . При этом значение тока короткого замыкания каждого СЭ выставлялось в соответствии со значением, полученным на тестере „Телеком-СТВ“.

В табл. 1 представлены параметры СЭ LGWEB из  $n$ -Si (группа 1) и  $p$ -Si (группа 2), как с текстурированной, так и с гладкой тыльной стороной. Как видно из таблицы, технология LGWEB позволяет получить двусторонние СЭ из  $Cz$ -Si с лицевым КПД выше 17% и тыльным КПД выше 14%.

## 6. Сравнение солнечных элементов LGWEB и OECO

Чтобы оценить уровень достигнутых нами результатов, проведем их сравнение с данными, которые получил один из пионеров и лидеров фотовольтаики R. Hezel в ISFH (Германия) с помощью других методов нанесения

**Таблица 2.** Параметры СЭ, полученные для конструкции LGWEB, а также в ISFH с помощью различных технологий нанесения контактов

Тип СЭ		Si (тип)	Площадь, см <sup>2</sup>	$\rho(\text{Si})$ , Ом · см	Eff, % (front)	Eff, % (back)
ОЕСО [14,23]	Односторонний	$Fz(p)$	4	0.5	21.1	—
			100	1.5	20.4	—
		$Cz(p)$	4	1.3	18.3	—
			100	1.3	17.9	—
	Двусторонний				19.0	17.0
	Двусторонний BCSC	$Fz(p)$	4	0.5	18.1	17.4
				19.2	16.0	
ECO (front&back), двусторонний [7]		$Fz(p)$	4	0.5	20.1	17.2
ECO (front)/SP(back), двусторонний [25]		$Fz(p)$	4	1.5	17.4	13.4
SP (front&back), двусторонний [26]		$Fz(p)$	2.6	1.5	14.5	12.7
		$Cz(p)$	4	6.0	13.4	11.5
LGWEB		$Cz(p)$	42	40	16.4	14.7*
					17.3	14.3**
		$Cz(n)$	32	4.5	16.3	14.5*
					42	17.7

*Примечание.* \* текстурированы и фронтальная, и тыльная поверхности; \*\* текстурирована только фронтальная поверхность; front, back — фронтальная и тыльная поверхности соответственно.

контактов, и в частности для новой высокоэффективной технологии ОЕСО. Уникальная особенность технологии ОЕСО состоит в том, что впервые высокоэффективные контакты ECO МТДП (металл–туннельный диэлектрик–полупроводник) нанесены на СЭ без использования фотолитографии и маскирования. Для проведения сравнения в табл. 2 собраны параметры СЭ, полученные в ISFH с помощью различных методов металлизации — ОЕСО, ECO и SP, а также для разрабатываемой нами конструкции LGWEB.

Выбор в пользу именно группы из ISFH для проведения сравнения связан исключительно с многообразием и рекордно высоким уровнем полученных ими результатов, которые позволяют проследить влияние на КПД СЭ таких важных факторов, как качество кремния ( $Cz$ -Si или  $Fz$ -Si), удельное сопротивление кремния  $\rho$ , размер СЭ, метод нанесения контактов — ECO или SP, тип конструкции — односторонний (monofacial) или двусторонний (bifacial), перенесение всех контактов на тыльную сторону — BCSC.

Анализ данных в табл. 2 показывает, что рекордное значение КПД по технологии ОЕСО 21.1% получено для одностороннего СЭ площадью 4 см<sup>2</sup> из кремния  $p$ - $Fz$  с  $\rho = 0.5$  Ом · см. Однако КПД СЭ ОЕСО уменьшается при переходе: а) от  $Fz$ -Si к  $Cz$ -Si — на 2.1–2.8%, б) от одностороннего СЭ к двустороннему — на ~ 2.1%, в) от одностороннего СЭ к двустороннему с контактами

на тыльной стороне — на 1.9–3%, г) от размера 4 см<sup>2</sup> к 100 см<sup>2</sup> — на 0.4–1%.

Для корректного сравнения СЭ ОЕСО и LGWEB нужны данные для сопоставимых по свойствам СЭ, которых, к сожалению, нет. Однако можно оценить, что КПД двустороннего с контактами на тыльной стороне ОЕСО СЭ площадью 4 см<sup>2</sup> из  $Cz$ -Si КПД составит 15.3–16.4% с фронтальной стороны и 13.2–14.6% с тыльной, т.е. не больше, чем КПД СЭ LGWEB (с фронтальной — на ~ 1% меньше).

## 7. Сравнение солнечного элемента LGWEB и солнечного элемента с металлизацией Screen Printing

Данные в табл. 2 позволяют также проследить, как уменьшается КПД двустороннего СЭ из кремния  $Fz$ -Si при замене в нем контактов ECO на контакты SP. Так, если используется металлизация ECO на обеих сторонах, то КПД (фронтальный/тыльный) достаточно высоки, (20.1/17.2)%. При замене контактов с ECO на SP только на тыльной стороне КПД уменьшаются до (17.4/13.4)%, а для СЭ с полностью контактами SP КПД падают до крайне низких значений — (14.5/12.7)%. Этот пример наглядно демонстрирует недостатки технологии SP.

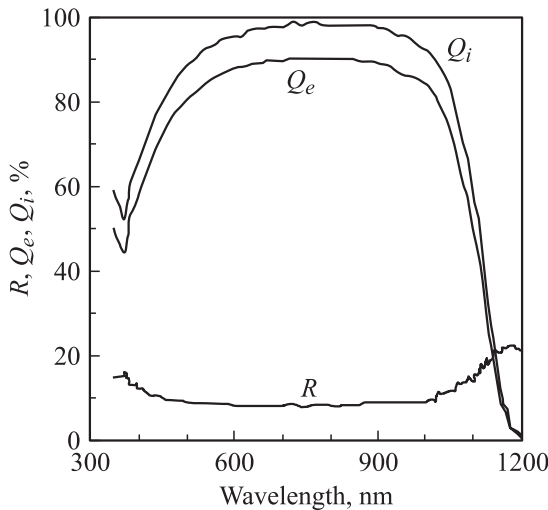
### 8. Перспектива увеличения КПД солнечного элемента LGWEB

За счет мероприятий, рассматриваемых далее, КПД СЭ LGWEB может быть увеличен более чем на 4.5% и соответственно превысит 21%.

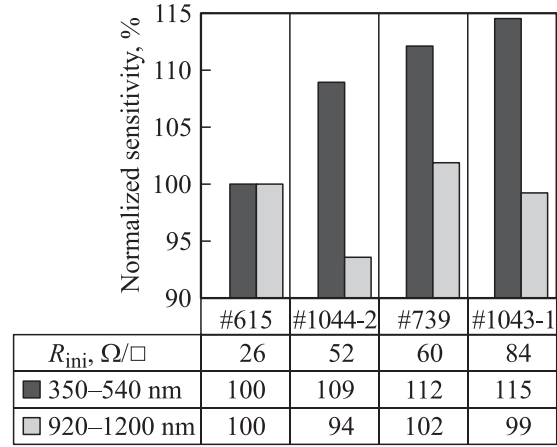
**Отражение.** Прежде всего отметим, что СЭ LGWEB уже ламинирован, т.е. измеряемое для него КПД максимально приближено к КПД в модуле. В настоящее время нами используется ламинационная пленка с высоким показателем преломления,  $n \approx 1.56$ , что приводит к высокому отражению,  $\sim 4.8\%$ . На рис. 2 приведены коэффициенты отражения ( $R$ ), внешний ( $Q_e$ ) и внутренний ( $Q_i$ ) квантовый выход для СЭ #615. Видно, что в диапазоне 450–1000 нм  $R \approx 8\text{--}9\%$ , из них вклад ламинационной пленки составляет  $\sim 4.8\%$ , и 3.2% дает проволоочная сетка. Следовательно, за счет уменьшения  $n$  до 1.3 можно повысить КПД на  $\sim 0.5\%$ .

**Удельное сопротивление базы.** Оптимизация удельного сопротивления кремния  $\rho$  является большим резервом для увеличения КПД СЭ LGWEB. Заметим, что в рекордных СЭ материал базы обычно имеет высокий уровень легирования,  $\sim 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  ( $\rho \approx 0.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ), что способствует росту КПД за счет уменьшения объемного рекомбинационного тока, последовательного сопротивления, негативной роли эффекта высокого уровня инжекции. В работе [23] подробно исследовано влияние  $\rho$  на КПД СЭ OECO в диапазоне  $\rho = 0.08\text{--}1.4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Показано, что с ростом  $\rho$  от оптимального значения 0.4 до  $1.4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  КПД уменьшается с 21.1 до 20.4%, т.е. на 0.7%. В то же время СЭ LGWEB изготовлены из кремния с неоптимальным уровнем легирования, в 30–100 раз меньшим, чем обычно используется в высокоэффективных СЭ. Поэтому есть основания ожидать, что оптимизация  $\rho$  приведет к росту КПД СЭ LGWEB более чем на 1%.

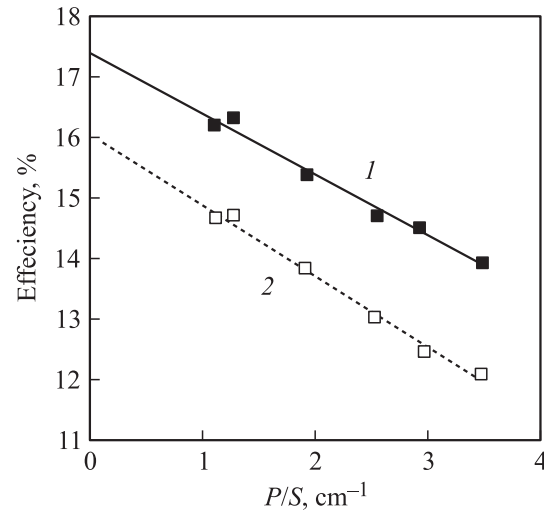
**Диффузионные слои.** Диффузионные слои в СЭ LGWEB еще не оптимизированы. Коротковолновая чув-



**Рис. 2.** Коэффициент отражения ( $R$ ), внутренний ( $Q_i$ ) и внешний ( $Q_e$ ) квантовые выходы разделения зарядов для СЭ #615.



**Рис. 3.** Сравнение спектральной чувствительности СЭ LGWEB в сине-зеленом (350–540 нм) и инфракрасном (920–1200 нм) диапазонах при фронтальном освещении, нормированные на чувствительность #615.



**Рис. 4.** Зависимость КПД СЭ LGWEB от отношения его периметра ( $P$ ) к площади ( $S$ ) при освещении с фронтальной (1) и тыльной стороны (2).

ствительность СЭ #615 невысокая [20], что мы связываем с сильным исходным легированием эмиттера (26 Ом/□). Однако замечено, что коротковолновая чувствительность возрастает по мере увеличения исходного (т.е. сразу после диффузии) слоевого сопротивления эмиттера  $R_{ini}$  (рис. 3). Кроме того, с ростом  $R_{ini}$  не только возрастает коротковолновая чувствительность, но улучшаются и другие параметры СЭ (табл. 1). Заметим, что длинноволновая чувствительность образцов с гладкой тыльной стороной выше, чем соответствующих образцов с текстурированной тыльной поверхностью, что, очевидно, связано с увеличением отражения длинноволнового света от гладкой поверхности. Кроме того, длинноволновая чувствительность СЭ на  $n$ -Si в целом выше, чем на  $p$ -Si, возможно, по той причине, что их толщина на 100 мкм больше.

**Края.** Края СЭ LGWEB не подвергались специальной обработке и являются источником потерь. Экспериментальные данные показывают (рис. 4), что увеличение площади СЭ LGWEB приводит не к уменьшению КПД, как в СЭ ОЕСО, а к его увеличению. Таким образом, решение проблемы торцов позволит повысить КПД на  $\sim 0.5\%$ .

**Качество кремния.** За счет использования высококачественного кремния  $Fz$ -Si, как видно из табл. 2, возможно увеличить КПД СЭ LGWEB на  $\sim 2.5\%$ .

## 9. Заключение

Таким образом, СЭ на основе новой конструкции и технологии изготовления токособирающей системы LGWEB продемонстрировали рекордный КПД для этого класса СЭ (двусторонние, back-contact, из  $Cz$ -Si). Проведенный анализ показывает, что существует большое поле деятельности для оптимизации и повышения КПД СЭ LGWEB, который имеет потенциал превзойти 21%.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (грант № 04-02-16691).

Авторы выражают благодарность Б.Л. Эйдельману и А.Ф. Яремчуку за плодотворное обсуждение результатов и содействие в проведении измерений.

## Список литературы

- [1] R.M. Swanson. *Proc. 19th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Paris, France, 2004) 2CV.2.63.
- [2] H.A. Aulich, F.W. Schulze. *Proc. 17th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Munich, Germany, 2001) p. 65.
- [3] A. Goetzberger. *Proc. 17th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Munich, Germany, 2001) p. 9.
- [4] G.P. Willeke. *Proc. 19th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Paris, France, 2004) 2CP.1.1.
- [5] R. Einhaus, D. Sarti, S. Pleier, M. Blum, P.J. Ribeyron, F. Durand. *Proc. 16th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Glasgow, UK, 2000) O.D5.5.
- [6] J.F. Nijs, J. Szlufcik, J. Poortmans, S. Mertens. *Proc. 16th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Glasgow, UK, 2000) P.D2.1.
- [7] A. Hubner, A.G. Aberle, R. Hezel. *Proc. 14th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Montreux, Switzerland, 1992) p. 92.
- [8] R. Swanson. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **8** 93 (2000).
- [9] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев. *ФТП*, **38**, 8 (2004).
- [10] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **7**, 411 (1999).
- [11] M.A. Green. *Proc. 16th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Glasgow, UK, 2000) OB3.1.
- [12] H. Sakata. *Proc. 3rd World Conf. Photovolt. Solar Energy Conv.* (Osaka, Japan, 2003) 4O-D10-01.
- [13] K.R. McIntosh, M.J. Cudzinovic, D.D. Smith, W.P. Mulligan, R.M. Swanson. *Proc. 3rd World Conf. Photovolt. Solar Energy Conv.* (Osaka, Japan, 2003) 4O-D10-05.
- [14] R. Hezel, R. Meyer, J.W. Mueller. *Proc. 19th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Paris, France, 2004) 2CV.2.40.

- [15] G. Untila, A. Osipov, T. Kost, A. Chebotareva, M. Zaks, A. Sitnikov, O. Solodukha, A. Pinov. *Proc. 16th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Glasgow, UK, 2000) p. 1468.
- [16] G. Untila, A. Osipov, T. Kost, A. Chebotareva, M. Zaks, A. Sitnikov, O. Solodukha. *Proc. 17th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Munich, Germany, 2001) p. 1796.
- [17] G. Untila, A. Osipov, T. Kost, A. Chebotareva, M. Zaks, A. Sitnikov, O. Solodukha, A. Pinov. *Proc. 17th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Munich, Germany, 2001) p. 1793.
- [18] G. Untila, A. Osipov. *Proc. 2nd World Conf. on Photovolt. Solar Energy Conv.* (Vienna, Austria, 1998) p. 1555.
- [19] G. Untila, A. Osipov, T. Kost, A. Chebotareva. *Proc. 17th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Munich, Germany, 2001) p. 265.
- [20] K.A. Munzer, K.T. Holdermann, R.F. Schlosser, S. Sterk. *Proc. 16th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Glasgow, UK, 2000) OB7-2.
- [21] F. Recart, G. Bueno, J.C. Jimeno, J.R. Gutierrez, F. Hernando, V. Rodriguez. *Proc. 16th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Glasgow, UK, 2000) VA1.50.
- [22] F. Recart, R. Gutierrez, V. Rodriguez, J.C. Jimeno, F. Hernando, G. Bueno. *Proc. 16th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Glasgow, UK, 2000) p. 1654.
- [23] R. Hezel, W. Hoffman. *Proc. 3rd World Conf. Photovolt. Energy Conv.* (Osaka, Japan, 2003) 4P-C4-20.
- [24] A.W. Blackers. *Proc. 16th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Glasgow, UK, 2000) OB2.2.
- [25] B. Lenkeit, S. Steckmetz, F. Artuzo, R. Hezel. *Solar Energy Mater. & Solar Cells*, **65**, 317 (2001).
- [26] B. Lenkeit, S. Steckmetz, A. Mucklich, A. Metz, R. Hezel. *Proc. 16th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Glasgow, UK, 2000) VA1.31.

Редактор Л.В. Шаронова

## A new type of high-efficiency bifacial silicon solar cells, with external busbars and current-collecting grid of wire

G.G. Untila, T.N. Kost, A.B. Chebotareva, M.B. Zaks\*, A.M. Sitnikov\*, O.I. Solodukha\*

Nuclear Physics Institute,  
Lomonosov Moscow State University,  
119992 Moscow, Russia  
\* SPF Quark, 350000 Krasnodar, Russia

**Abstract** The results are presented for bifacial, with external busbars, silicon solar cells of  $[n^+p(n)p^+]$   $Cz$ -Si structures based on a current-collecting system of new design LGWEB (laminated grid of wire external busbars), which consists of transparent conducting oxide film, deposited on Si-structure, busbars, adjacent to Si-structure, and the contact grid of wire, attached by means of low-temperature lamination simultaneously to the oxide and busbars. Bifacial LGWEB solar cells yield the record high efficiency for such SC: 17.7%(n-Si)/17.3%(p-Si) with 74–82% bifaciality for flat back and 16.3%(n-Si)/16.4%(p-Si) with 89% bifaciality for textured back. As is shown the potential of LGWEB technology exceeds 21%.