

## Солнечный элемент из кремния $n$ -типа, двусторонний, концентраторный

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

НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова,  
119991 Москва, Россия

\* ООО „Солнечный ветер“,  
350063 Краснодар, Россия

<sup>+</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Российская академия наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 27 февраля 2012 г. Принята к печати 7 марта 2012 г.)

Для уменьшения стоимости фотоэлектричества, вырабатываемого кремниевыми солнечными элементами (СЭ), разрабатывают различные подходы, наиболее приоритетными из которых являются: увеличение эффективности солнечных элементов, переход от  $p$ -Si на  $n$ -Si, концентрация света, двусторонние солнечные элементы. В данной работе разработан солнечный элемент, сочетающий все эти подходы за счет применения прозрачных проводящих оксидов в качестве антиотражающих и пассивирующих электродов в структуре Indium–Tin–Oxide/ $(p^+nm^+)$ -Si/Indium–Fluorine–Oxide из кремния Чохральского с проволочными контактами (конструкция Laminated Grid Cell), который показал лицевую/тыльную эффективность 16.5–16.7/15.1–15.3% при освещенности 1–3 X („солнц“). Результат является уникальным, поскольку сочетание двусторонности и концентраторности не имеет аналогов, а полученный СЭ не уступает мировому уровню как в классе двусторонних, так и концентраторных СЭ.

### 1. Введение

Чтобы снизить стоимость электроэнергии, вырабатываемой солнечными элементами (СЭ) из кристаллического кремния ( $c$ -Si), признано необходимым повышать их эффективность и уменьшать толщину [1], так как более половины стоимости солнечного модуля (СМ) составляет цена кремниевых пластин. Предпочтительно, чтобы СЭ обладали еще тремя дополнительными свойствами: были из кремния  $n$ -типа, двусторонними и могли работать в низкоконтракторных системах. Почему?

#### 1.1. CPV (Concentrator Photovoltaics) — концентраторная фотовольтаика

Концентрирование света с помощью дешевых линз и отражателей позволяет увеличить энерговыработку фотоэлектрических систем без увеличения площади дорогостоящих СЭ. Однако, хотя концентраторный подход находится в фокусе интересов фотовольтаики с 70-х гг. [2], он до сих пор все еще не реализовал свой потенциал. К 2010 г. в мире было установлено всего  $\sim 20$  МВт CPV систем ( $< 1\%$  от общего объема) [3]. Причина, тормозящая развитие CPV, в том, что еще совсем недавно на рынке отсутствовали недорогие концентраторные СЭ [4]. В высококонтракторном варианте нужны очень точные, сложные системы слежения, а также высокоэффективные, высококонтракторные СЭ, производство которых требует дорогостоящих технологий. При этом чем дороже СЭ, тем более высокая степень концентрации  $C$  требуется, чтобы его использование было экономически оправданным.

Например, оказалось невыгодно использовать высокоэффективные концентраторные СЭ ( $> 26\%$ ) в станции с  $C = 20$ –50 крат (X) [5], так как для них требуется  $C > 100$  X.

В последнее время активнее разрабатывают низкоконтракторный вариант, сочетающий простые, дешевые отражатели и обычные кремниевые СЭ, адаптированные к концентрации  $C = 2$ –5 X [6,7]. Пока стандартные СЭ, (изготовленные по технологии трафаретной печати — screen printing) и улучшенные электролитическим наращиванием контактов, имеют невысокую эффективность: 14.0–15.5% (1–14 X) [8].

#### 1.2. Двусторонность

Применение двусторонних СМ позволяет увеличить энерговыработку фотоэлектрических систем за счет использования света, падающего на тыльную поверхность, до 11 [9], 21% [10], а в некоторых случаях при должной инсталляции — до 50% [11]. Преимущество двусторонних СМ в полной мере раскрывается в концентраторных системах. По сравнению с односторонними СМ аналогичной номинальной мощности двусторонние СМ выработали энергии больше — до 10–20% в концентраторной системе с  $C = 1.6$  X [12] (за счет меньшей на 12°C рабочей температуры [13]) и до 40% в гибридной концентраторной фотоэлектротермической системе [14].

Кроме того, некоторые оптические системы концентрирования, например, TRAXLE™ [15] или нестандартная дешевая конструкция голографического планарного концентратора — Holographic Planar Concentrator™, — обеспечивающая  $C \approx 3$  X, причем без системы слежения [16], рассчитаны именно на двусторонние СМ.

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

### 1.3. *n*-Si

СЭ из *n*-Si предпочтительнее по двум причинам. Во-первых, *n*-Si менее чувствителен к обычным примесям (например, Fe [17]) и дефектам, чем *p*-Si, и поэтому время жизни носителей и соответственно предельная эффективность этих СЭ выше. Во-вторых, *n*-Si стабилен, в то время как СЭ из кремния Чохральского (Cz-Si) *p*-типа, легированного бором, подвержены эффекту светоиндуцированной деградации из-за образования бор–кислородных комплексов под действием света, и их эффективность со временем уменьшается на ~ 1 абс.% [18].

Отметим, что доминирующий в производстве СЭ не отвечает ни одному из перечисленных выше требований: 1) его изготавливают из кремния *p*-типа (по технологии screen printing); 2) он односторонний, так как его тыльная поверхность покрыта слоем алюминиевой пасты; 3) его эффективность ограничена высокой рекомбинацией как в сильно легированном эмиттере, что необходимо для низкого сопротивления с контактами, так и на покрытой металлом тыльной стороне; 4) его утончению препятствует деформация пластин при высокотемпературном вжигании паст, что снижает выход годных изделий — особенно в случае тонких пластин, а также высокая рекомбинация на тыльной стороне; наконец, 5) без дополнительной модификации эти СЭ непригодны для концентраторных применений из-за большого последовательного сопротивления [19].

Таким образом, разработка высокоэффективного двустороннего концентраторного СЭ из кремния *n*-типа с использованием простой низкотемпературной высокоэффективной металлизации находится в фокусе основных направлений разработок в кремниевой фотовольтаике. Однако эти направления развиваются параллельно. Высокоэффективные СЭ из *n*-Si производят фирма Sanyo — конструкции HIT (гетеропереход с собственным тонким слоем — heterojunction with intrinsic thin layer) [9] и фирмы Sunpower и Amonix — конструкции IBC (гребенчатый тыльный контакт — interdigitated back contact) [20]. При этом СЭ HIT двусторонние, но не концентраторные [21], а СЭ IBC — высококонцентраторные, но односторонние и дорогие, т.е. не пригодны для низкоконтраторных систем [19].

Ранее на основе конструкции Laminated Grid Cell (элемент с ламинированной контактной гребенкой — LGCell) и структуры Indium–Fluorine–Oxide (IFO)/(*n*<sup>+</sup>*pp*<sup>+</sup>)Cz-Si/Indium–Tin–Oxide (ITO) мы получили двусторонние концентраторные СЭ (из *p*-Si) с лицевой/тыльной эффективностью 17.1–18.0%/13.3–13.6% при  $C = 1–6 \times$  [22].

Из *n*-Si были получены двусторонние неконцентраторные СЭ с лицевой/тыльной эффективностью 17.7/13.2% (лицевая поверхность текстурирована, тыльная — гладкая) [23], а также 16.3/14.5% для СЭ с обеими текстурированными поверхностями (подтверждено в Sandia National Laboratories) [24].

Цель данной работы — разработка двустороннего СЭ из *n*-Si, но для применения в низкоконтраторных системах.

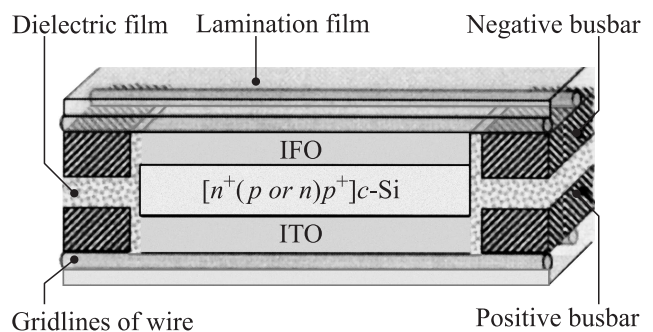
## 2. Методика эксперимента

Для достижения этой цели применена двусторонняя конструкция LGCell (рис. 1), основанная на использовании пленок прозрачных проводящих оксидов TCO (Transparent Conducting Oxide) в качестве прозрачных, просветляющих и пассивирующих электродов, а также двух (лицевой и тыльной) проволочных гребенок, прикрепленных ламинационной пленкой к TCO и коммутационным шинам, расположенным рядом со структурой, методом низкотемпературного ламинирования (150°C) [25]. Также может быть использован прозрачный проводящий полимерный материал [26].

Для работы использовали текстурированные с обеих сторон кремниевые пластины Чохральского *n*-типа проводимости  $2 \Omega \cdot \text{см}$  размером  $125 \times 125 \text{ мм}^2$  ориентации (100) толщиной 180 мкм. Структуры (*p*<sup>+</sup>*nm*<sup>+</sup>)Cz-Si получены диффузией бора и фосфора из нанесенных боросиликатного и фосфоросиликатного стекол. После удаления стекол в 4% HF поверхности структуры обработали в травящем растворе HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O : HF, в результате чего слои сопротивления, измеренные на лицевой стороне (*p*<sup>+</sup>-эмиттере), составило 85 Ω/квadrat, а на тыльной поверхности — 30 Ω/квadrat.

Пленки TCO толщиной ~ 100 нм осаждали методом пиролиза аэрозоля пленкообразующего раствора FFS (film forming solution), полученного ультразвуковым способом (pyrosol). Схема установки для нанесения пленок была описана ранее [27]. Непосредственно перед нанесением TCO структуры обработали в перекисно–аммиачном растворе (RCA-очистка: 10% NH<sub>4</sub>OH + 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в H<sub>2</sub>O) и 4% HF.

Сначала на тыльную *n*<sup>+</sup>-поверхность нанесли пленку IFO из раствора 0.2 M InCl<sub>3</sub> + 0.05 M NH<sub>4</sub>F + 0.1 M H<sub>2</sub>O в метаноле при температуре 475°C,



**Рис. 1.** Двусторонний СЭ конструкции Laminated Grid Cell с пленкой IFO на *n*<sup>+</sup>-поверхности, пленкой ITO на *p*<sup>+</sup>-поверхности и проволочной контактной гребенкой; коммутационные шины расположены рядом с СЭ.

используя газ-носитель  $\text{Ar} + 5\% \text{O}_2$  [28]. Слоеое сопротивление тыльной поверхности после нанесения IFO составило  $19 \Omega/\text{кв.кв.}$

Затем нанесли пленку ITO на  $p^+$ -эмиттер из раствора  $0.1 \text{ M InCl}_3 + 0.003 \text{ M SnCl}_4 + \text{X M H}_2\text{O}$  в метаноле при температуре  $375^\circ\text{C}$ , используя газ-носитель  $\text{Ar}$ . Конечное слоеое сопротивление лицевой поверхности составило  $29 \Omega/\text{кв.кв.}$

После осаждения пленок TCO пластины были разрезаны на фрагменты  $20 \times 20 \text{ мм}^2$  алмазным скрайбером. Лицевую и тыльную контактные гребенки из медной проволоки диаметром  $60 \text{ мкм}$ , покрытой контактной композицией, прикрепили к пленкам TCO методом ламинирования ( $T \approx 150^\circ\text{C}$ ). Расстояние между проволоками составило  $1.5 \text{ мм}$ . Структура LGCells приведена на рис. 1. Заметим, что токоотводящие шины расположены рядом с СЭ и не затеняют его. Кроме того, при последующей пайке паяльник не контактирует с кремниевой структурой, чтобы не приводить к ее повреждению, как это может происходить в случае стандартных СЭ.

Для измерения спектральных кривых внешней квантовой эффективности  $EQE$  (external quantum efficiency) использовали осветитель ЛЮС-2 с ксеноновой лампой  $1000 \text{ Вт}$  и набор интерференционных светофильтров. Угол падения лучей на СЭ не превышал  $3^\circ$ . Для калибровки использовали образец, проверенный в лаборатории Fraunhofer ISE. Фототок СЭ получали перемножением полученной кривой  $EQE$  на стандарт солнечного спектра AM 1.5G  $1000 \text{ Вт/м}^2$  (ASTM G173). Спектры полного отражения  $R(\lambda)$  измеряли на спектрометре ЛОМО-спектр СФ-56 с интегрирующей сферой.

Концентрационные зависимости параметров для полученных СЭ LGCells исследованы в ФТИ им. А.Ф. Иоффе с помощью импульсного имитатора [29].

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Оптимизация пленок ITO

Обе поверхности двустороннего СЭ LGCell ITO/ $(p^+nm^+)$ Cz-Si/IFO покрыты пленками TCO. С целью оптимизации барьерных свойств контакта TCO/Si [30] температура осаждения пленки IFO должна быть достаточно высокой ( $475^\circ\text{C}$ ), а пленки ITO — низкой ( $\sim 400^\circ\text{C}$ ). Поэтому сначала следует нанести пленку IFO, а затем — пленку ITO. Чтобы свойства пленки ITO не деградировали в процессе нанесения ITO, в частности прозрачность, температура осаждения ITO должна быть еще меньше ( $\sim 380^\circ\text{C}$ ). Однако уменьшение температуры осаждения пленки ITO приводит к росту ее удельного сопротивления  $\rho_{\text{ITO}}$  [31] и соответственно увеличению последовательного сопротивления СЭ как за счет увеличения сопротивления растекания между контактными полосками, так и из-за роста сопротивления контакта ITO/металл.

Специальное исследование, проведенное с помощью метода IS CRA [32], обнаружило (рис. 2) увеличение

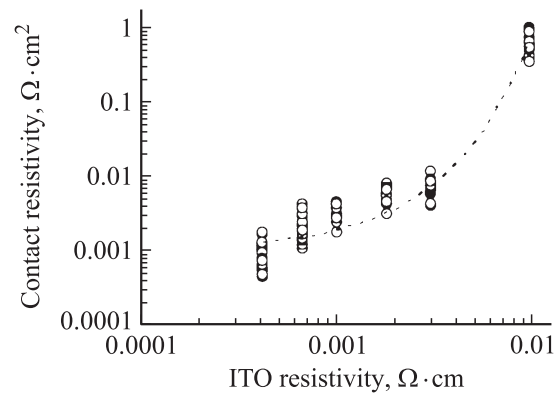


Рис. 2. Влияние удельного сопротивления пленки ITO на удельное сопротивление контакта металл/ITO.

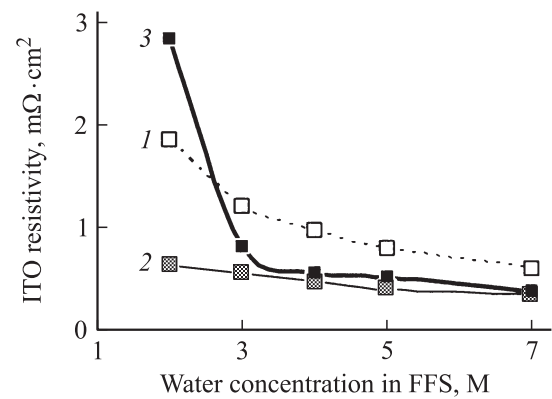


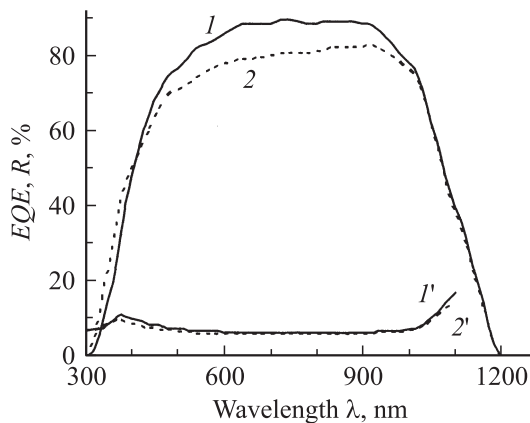
Рис. 3. Удельное сопротивление пленок ITO в зависимости от концентрации воды в пленкообразующем растворе FFS (film forming solution): 1 — после осаждения, 2 — после отжига, 3 — через 8 месяцев.

удельного сопротивления контакта ITO/металл на 3 порядка от  $< 1 \text{ м}\Omega \cdot \text{см}^2$  до  $\sim 1 \text{ }\Omega \cdot \text{см}^2$  с ростом  $\rho_{\text{ITO}}$  от  $0.0004$  до  $0.01 \text{ }\Omega \cdot \text{см}$ .

Для уменьшения  $\rho_{\text{ITO}}$  провели исследование, показавшее (рис. 3), что увеличение концентрации воды в пленкообразующем растворе с  $2$  до  $7 \text{ М}$  снижает  $\rho_{\text{ITO}}$  у свежесоздаваемых пленок ITO с  $\sim 2 \text{ м}\Omega \cdot \text{см}^2$  до  $0.6 \text{ м}\Omega \cdot \text{см}^2$ . Отжиг этих пленок в аргоне с парами метанола при  $380^\circ\text{C}$  в течение  $10 \text{ мин}$  значительно, более чем в  $1.5$  раза, уменьшил  $\rho_{\text{ITO}}$ . Однако если  $\rho_{\text{ITO}}$  пленок, полученных при низкой концентрации воды ( $1 \text{ М}$ ), деградировало в результате старения (хранение на воздухе) до  $3 \text{ м}\Omega \cdot \text{см}^2$ , то пленки, полученные при концентрации воды  $4\text{--}7 \text{ М}$ , оставались стабильными. Основываясь на этих результатах, для осаждения пленок ITO использовали пленкообразующий раствор с  $7 \text{ М}$  воды.

#### 3.2. Параметры СЭ LGCell при однократной освещенности (1 X)

Спектры внешней квантовой эффективности  $EQE$  и отражения  $R$  при лицевом и тыльном освещении СЭ LGCell приведены на рис. 4. Отражение от лицевой



**Рис. 4.** Спектры внешней квантовой эффективности  $EQE$  ( $1, 2$ ) и отражения  $R$  ( $1', 2'$ ) при лицевом ( $1, 1'$ ) и тыльном ( $2, 2'$ ) освещении СЭ.

и тыльной стороны практически одинаковое и составило 5.5–7% в диапазоне длин волн  $\lambda = 700\text{--}900$  нм. Необходимо отметить важное обстоятельство. Отражение от СЭ конструкции LGCell несколько выше, чем от обычных высокоэффективных СЭ. Это связано с тем, что LGCell уже ламинирован, т.е. покрыт ламинационной пленкой с показателем преломления  $\sim 1.56$ , и поэтому только отражение от пленки составляет около 5% во всем спектральном диапазоне.

Обычно в литературе приводят значения параметров, в том числе спектры отражения, для неинкапсулированных СЭ, для которых в некотором спектральном диапазоне отражение может быть практически нулевым (например, у СЭ фирмы SunPower с контактами на тыльной стороне). Однако это кажущееся преимущество, поскольку в конечном итоге все СЭ в модуле покрыты стеклом с показателем преломления  $\sim 1.5$ , что приводит к потерям на отражение от стекла также  $\sim 4\%$ . Поэтому приводимые параметры для LGCell следует рассматривать как предельно приближенные к параметрам в модуле.

Максимальные значения  $EQE \approx 90\%$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 700\text{--}900$  нм при лицевом освещении ограничены сверху как отражением от ламинационной пленки ( $\sim 4.8\%$ ), так и затенением проволочных контактов ( $\sim 4.7\%$ ), что в сумме уменьшает  $EQE$  на  $\sim 9.5\%$ . Следовательно, лицевая внутренняя квантовая эффективность LGCell на активную площадь в максимуме кривой  $EQE$  составляет  $\sim 99\%$ , а тыльная  $\sim 92\%$ . Высокие значения лицевой длинноволновой и тыльной  $EQE$  ( $\geq 75\%$  при  $\lambda = 560\text{--}1000$  нм) свидетельствуют о большой диффузионной длине неравновесных носителей в базе СЭ, а также о низкой эффективной скорости рекомбинации на тыльной  $n^+$ -поверхности, полученной за счет ее подтравливания и пассивации пленкой IFO.

Напротив, относительно невысокая лицевая коротковолновая  $EQE$  (48% на длине волны  $\lambda = 400$  нм) указывает на то, что свойства борного  $p^+$ -эмиттера,

а также его пассивация пленкой IFO еще недостаточно оптимизированы. Исследование профиля борного диффузионного слоя показало, что даже после подтравливания, увеличившего его слоиное сопротивление до  $85 \Omega/\text{кв. см}$ , приповерхностная концентрация дырок достаточно велика ( $\geq 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  [33]), что сильно уменьшает время жизни неравновесных носителей в  $p^+$ -слое из-за оже-рекомбинации.

В табл. 1 приведены параметры двустороннего концентраторного СЭ LGCell, измеренные при однократном (1X) лицевом и тыльном освещении. Двусторонность полученного СЭ равна 92% по фототоку и по эффективности. Столь высокая двусторонность стала возможной благодаря высокому качеству кремниевых пластин  $n$ -типа (большая диффузионная длина неосновных носителей), а также благодаря эффективной пассивации тыльной поверхности  $n^+$ -слоем и пленкой IFO. Вследствие близких значений лицевого и тыльного фототоков разность фотонапряжений (лицевого и тыльного) составляет всего 4 мВ.

Чтобы оценить полученный для LGCell результат как для двустороннего СЭ, приведем данные для двусторонних СЭ из  $\text{Cz-Si}$  как  $n$ -, так и  $p$ -типа (табл. 2), которые, отметим, не являются концентраторными. Сравнение показывает, что величины лицевой/тыльной эффективности 16.5/15.1% при освещении 1X, полученные в данной работе для СЭ LGCell из  $n\text{-Si}$ , так же как и 17.7/13.3% для двустороннего LGCell из  $p\text{-Si}$ , находятся на уровне лучших результатов, включая даже те, которые были изготовлены с использованием вакуумно-напыленных контактов ECO (evaporated contacts). Однако СЭ LGCell являются еще и концентраторными.

Эти результаты следует прокомментировать. Известно, что рекомбинация на непассивированном торце СЭ приводит к уменьшению всех параметров СЭ. Чем меньше образец и чем больше время жизни неосновных носителей в базе  $\tau$ , тем больше негативное влияние торцов. Экспериментально показано, что эффективность СЭ приблизительно линейно уменьшается с ростом отношения его периметра  $P$  к площади  $S$  с наклоном, величина которого для лицевого/тыльного освещения составила 1.0/1.2 абс.% для СЭ с  $\tau = 500$  мкс и 0.4/0.5 абс.% для  $\tau = 100$  мкс [34].

**Таблица 1.** Параметры ITO/ $(p^+nn^+)$ -Cz-Si/IFO СЭ LGCell при лицевом и тыльном освещении 1X: эффективность ( $Eff$ ), ток короткого замыкания ( $J_{sc}$ ), напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ ) и фактор заполнения ( $FF$ )

Параметр	Лицевое освещение	Тыльное освещение
$Eff, \%$	16.5	15.1
$J_{sc}, \text{mA}/\text{cm}^2$	35.1	32.4
$V_{oc}, \text{mV}$	611	607
$FF, \%$	76.7	76.7
$R_s, \text{Om} \cdot \text{cm}^2$	0.43	



**Таблица 2.** Эффективность двусторонних Cz-Si солнечных элементов при лицевом и тыльном освещении

Организация, детали	<i>Eff</i> , %
<i>n</i> -тип, Cz-Si	лицо_тыл
IES-UPM, ECO 300 мкм [35]	15.2_17.7
140 мкм [36]	14.9_17.0
240 мкм [36]	14.2_14.9
TiM-EHU, Isofoton, Fraunhofer.	
ISE, CENER, NPC, USF, Ferro.	
screen printing [37], 120 мкм	12.8_13.2
320 мкм	14.4_14.2
ITM, Univ. Rais Vasco, screen	
printing, 120 мкм [38]	13.6_11.0
НИИЯФ, „Солнечный ветер“,	
концентраторный LGCell	16.5_15.1
<i>p</i> -тип, Cz-Si	
ISFH, screen print., 140 мкм [39]	14.6_13.0
IES-UPM, ECO [37] 140 мкм	16.0_13.0
240 мкм	13.8_13.7
ISC Konstanz, Univ. Stuttgart.	
screen print., selective BSF [40]	15.9_14.1
ISC Konstanz [41]	16.4_14.4
Aachen Univ., Deutsche Cell,	
Solland Solar, screen print. [42]	17.0_10.3
ISC Konstanz, screen print. [43]	17.3_15.0
Shanghai Univ., Georgia Inst. of	
Techn., Solarfun Co. [44]	16.6_12.8
НИИЯФ, „Солнечный ветер“,	
концентраторный LGCell [22]	17.7_13.3

Отметим, что концентраторные СЭ, как правило, делают меньшего размера [45], чем СЭ для однократной освещенности. Следовательно, поскольку изготовленный в данной работе СЭ размером  $20 \times 20$  мм имеет  $P/S = 2$  и высокое время жизни  $\tau$ , можно ожидать, что увеличение размера, например, до  $125 \times 125$  мм ( $P/S \approx 0.3$ ) может привести к увеличению его эффективности на 0.7–1.7 абс.%. К этому следует также добавить, что, например, в работе [35], в которой получена эффективность 15.2/17.7%, СЭ не имеет торцов, так как он сформирован как мезаструктура на пластине диаметром 100 мм.

### 3.3. Параметры СЭ LGCell при концентрированном освещении

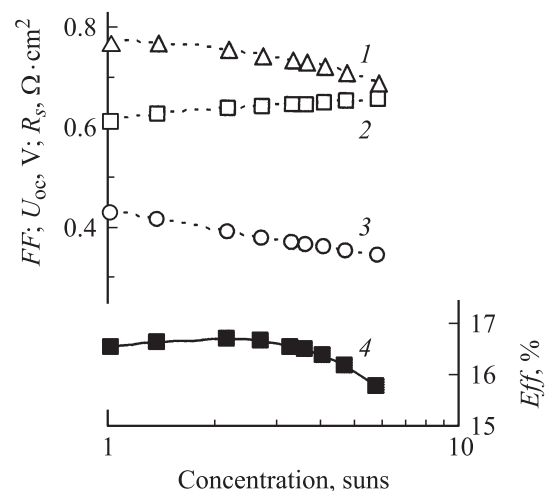
Изменение параметров преобразования полученного двустороннего СЭ LGCell при увеличении степени концентрации освещенности  $C$  с лицевой стороны приведены на рис. 5.

В оптимальном диапазоне концентраций света 1–3 X лицевая эффективность варьируется от 16.5 до 16.7% (тыльная — от 15.1 до 15.3%). Рост эффективности с освещенностью продолжается до уровня  $\sim 2.5$  X. Величина  $U_{oc}$  закономерно увеличивает-

ся с освещенностью  $C$  по логарифмическому закону  $U_{oc} = U_{oc}(C = 1) + (nk_B T/e) \ln(C)$ , где  $n$  — фактор неидеальности диодной структуры, который оказался близким к единице ( $n = 1.08$ ),  $k_B$  — константа Больцмана,  $T$  — температура (К),  $e$  — заряд электрона.

Фактор заполнения  $FF$  уменьшается с ростом  $C$  из-за последовательного сопротивления  $R_s$ , которое, заметим (рис. 5), уменьшается при увеличении освещенности, что, как правило, наблюдается в концентраторных СЭ и связано с уменьшением сопротивления базы за счет эффекта фотопроводимости, модулирующего сопротивление базы, а также, возможно, с нелинейностью контактных сопротивлений. Оптимальная концентрация  $C_{opt}$ , при которой эффективность максимальна, составляет  $C_{opt} \approx 2.5$ , сопротивление в этой точке равно  $R_s \approx 0.4 \Omega \cdot \text{см}^2$ , т.е. выполняется закономерность  $C_{opt} \propto 1/R_s$ .

По поводу величины  $R_s$ , полученного LGCell, следует отметить следующее обстоятельство. Для увеличения эффективности СЭ используют высокоэффективные диффузионные слои с высоким слоевым сопротивлением, которые получают различными способами, включая подтравливание (etch-back) [46]. В СЭ LGCell подтравливание как лицевого [23], так и тыльного [47] диффузионного слоя также приводило к росту эффективности. В данной работе слоевое сопротивление лицевой/тыльной поверхности было доведено травлением до  $85/30 \Omega/\text{квадрат}$ . В случае двустороннего СЭ с диэлектрическим просветляющим покрытием и контактами screen printing, с расстоянием 2–2.5 мм между контактными ресничками только растекание между ресничками дало бы вклад в  $R_s = 0.4–0.6 \Omega \cdot \text{см}^2$ . Однако в LGCell применение пленок IFO и ITO, снизивших слоевые сопротивления лицевой/тыльной поверхности до  $29/19 \Omega/\text{квадрат}$ , а также благодаря более тонким



**Рис. 5.** Изменение лицевых параметров двустороннего СЭ LGCell на основе структуры ITO/( $p^+nn^+$ )-Cz-Si/IFO с ростом освещенности: 1 — фактор заполнения  $FF$ , 2 — напряжение холостого хода  $U_{oc}$ , 3 — последовательное сопротивление  $R_s$ , 4 — эффективность  $Eff$ .

проволочным контактам, что позволило уменьшить расстояние между ними до 1.5 мм при том же затенении, позволило снизить этот компонент  $R_s$  в 4–6 раз до  $\sim 0.09 \Omega \cdot \text{см}^2$ . И еще одно замечание: одним из компонентов  $R_s$ , присущих СЭ с пленками TCO, является сопротивление контакта TCO/Si, которое мало изучено, однако в случае контакта IFO/ $n^+$ -Si оно может быть заметным [48] и, скорее всего, именно этот компонент вносит значительный вклад в  $R_s$ . Таким образом, контактная система конструкции LGCell позволила получить высокоэффективный СЭ не только двусторонний, но и концентраторный.

Чтобы оценить полученный LGCell как концентраторный СЭ, приведем для сравнения данные, представленные в 2011 г. фирмой Narec [44], которая специализируется на разработке и производстве односторонних концентраторных СЭ и изготавливает их по технологии LGBC (Laser Grooved Buried Contacts) из кремния  $p$ -типа. Полученные Narec концентраторные СЭ LGBC показали эффективность 17.0–17.1% при концентрации 4–10 X. Однако эти результаты относятся к одностороннему СЭ, причем из деградирующего кремния  $p$ -типа.

#### 4. Заключение

В данной работе благодаря применению контактной системы конструкции Laminated Grid Cell в структуре СЭ ITO/ $(p^+nn^+)$ -Cz-Si/IFO получен концентраторный, двусторонний солнечный элемент из обычного кремния Чохральского  $n$ -типа, показавший лицевую/тыльную эффективность 16.5–16.7/15.1–15.3% при освещенности 1–3 X. Этот результат является уникальным, поскольку полученный LGCell не уступает мировому уровню, во-первых, в классе двусторонних СЭ и, во-вторых, в классе концентраторных СЭ. Как показывает анализ литературы, до сих пор не было сообщений о разработке двусторонних концентраторных СЭ.

На основе анализа параметров СЭ сделан вывод, что для дальнейшего увеличения эффективности необходимо решить проблемы, связанные с (i) рекомбинацией в  $p^+$ -слое и его пассивацией, (ii) с рекомбинацией на торцах, а также (iii) с сопротивлением контакта IFO/ $n^+$ -Si.

Работа выполнена при поддержке ведущей научной школы НШ-3322.2010.2 и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 10-08-01171, 10-08-00737, 11-08-01301, 11-08-01251).

#### Список литературы

- [1] S.W. Glunz. *Sol. Energy Mater. & Solar Cells*, **90**, 3276 (2006).
- [2] R.M. Swanson. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **8**, 93 (2000).
- [3] F. Rubio, M. Martinez, A. Hipolito, A. Martin, P. Banda. *Proc. 25th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Valencia, 2010) p. 1008.
- [4] M. Castro, I. Anton, G. Sala. *Sol. Energy Mater. & Solar Cells*, **92**, 1967 (2008).
- [5] A.W. Blackers. *Proc. 16th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Glasgow, 2000).
- [6] B.A. Butler, E.E. van Dyk, F.J. Vorster, W. Okullo, M.K. Munji, P. Booyesen. *Physica B*, doi:10.1016/j.physb.2011.09.071 (2011).
- [7] L.M. Fraas, J.E. Avery, H.X. Huang, L. Minkin, J.X. Fraas, L.C. Maxey, A. Gehl. *Proc. 33rd IEEE Photovolt. Spec. Conf.* (San Diego, 2010) 978-1-4244-1641-7/08.
- [8] J. Coello, M. Castro, O. Anton, G. Sala, M.A. Vazquez. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **12**, 323 (2004).
- [9] T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata, E. Maruyama. *Sol. Energy Mater. & Solar Cells*, **95**, 18 (2011).
- [10] L. Krenin, N. Bordin, A. Karsenty, A. Drori, N. Eisenberg. *Proc. 26th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Hamburg, 2011) p. 3140.
- [11] A. Cuevas, A. Luque, J. Equiren, J. Del Alamo. *Sol. Energy*, **29**, 419 (1982).
- [12] M. Libra, V. Poulek. *Proc. 19th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Paris, 2004) p. 2430.
- [13] <http://www.solar-trackers.com/bifacial-solar-panels>
- [14] B. Robles-Ocampo, E. Ruiz-Vasquez, H. Canseco-Sanchez, R.C. Cornejo-Mezac, G. Trapaga-Martinez, F.J. Garcia-Rodriguez, J. Gonzalez-Hernandez, Yu.V. Vorobiev. *Sol. Energy Mater. & Solar Cells*, **91**, 1966 (2007).
- [15] M. Libra, V. Poulek, J. Mares. *Proc. 23rd Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Valencia, 2008) p. 926.
- [16] <http://prismsolar.com/homepage.html>
- [17] D. Macdonald, L.J. Geerligs. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 4061 (2004).
- [18] K. Bothe, J. Schmidt. *Proc. 20th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Barcelona, 2005) p. 757.
- [19] M. Vivar, C. Morilla, I. Anton, J.M. Fernandez, G. Sala. *Sol. Energy Mater. & Solar Cells*, **94**, 187 (2010).
- [20] E. Van Kerschaver, G. Beaucarne. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **14**, 3107 (2006).
- [21] Q. Wang, M.R. Page, E. Iwaniczko, Y.-Q. Xu, L. Roybal, A. Duda, F. Hasoon, S. Ward, D. Wang, P.R. Yu. *Proc. 25th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Valencia, 2010) p. 1295.
- [22] T. Kost, G. Untila, A. Chebotareva, M. Zaks, A. Sitnikov, O. Solodukha, M. Shvarts. *Proc. 25th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Valencia, 2010) p. 2588.
- [23] G. Untila, A. Osipov, T. Kost, A. Chebotareva, M. Zaks, A. Sitnikov, O. Solodukha. *Proc. 17th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Munich, 2001) p. 1796.
- [24] G. Untila, A. Osipov, T. Kost, A. Chebotareva, M. Zaks, A. Sitnikov, O. Solodukha, A. Pinov. *Proc. 17th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Munich, 2001) p. 1793.
- [25] Г.Г. Унтила, Т.Н. Кост, А.Б. Чеботарева, М.Б. Закс, А.М. Ситников, О.И. Солодуха. *ФТП*, **39**, 1393 (2005) [*Semiconductors*, **39**, 1349 (2005)].
- [26] A. Chebotareva, G. Untila, T. Kost, A. Lachinov, V. Kornilov, S. Salazkin. *Proc. 21st Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Dresden, 2006) p. 291.
- [27] A. Chebotareva, G. Untila, T. Kost. *Thin Sol. Films*, **515**, 8505 (2007).
- [28] G.G. Untila, T.N. Kost, A.B. Chebotareva. *Thin. Sol. Films*, **518**, 1345 (2009).

- [29] M.Z. Shvarts, V.D. Romyantsev, V.M. Andreev, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy. *Proc. 4th Conf. on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen* (El Escorial, 2007) p. 277.
- [30] G. Untila, T. Kost, A. Chebotareva, M. Zaks, A. Sitnikov, O. Solodukha. *Proc. 21th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Dresden, 2006) p. 1199.
- [31] Г.Г. Унтила, Т.Н. Кост, А.Б. Чеботарева, М.Б. Закс, А.М. Ситников, О.И. Солодуха. *ФТП*, **42**, 415 (2008) [*Semiconductors*, **42**, 406 (2008)].
- [32] G. Untila, A. Osipov, T. Kost, A. Chebotareva. *Proc. 17th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Munich, 2001) p. 265.
- [33] Г.Г. Унтила, Т.Н. Кост, А.Б. Чеботарева, М.Б. Закс, А.М. Ситников, О.И. Солодуха. *ФТП*, **46** (6), (2012).
- [34] G. Untila, A. Chebotareva, T. Kost, A. Sitnikov, O. Solodukha. *Proc. 20th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Barcelona, 2005) p. 1255.
- [35] C. del Canizo, A. Moechlecke, I. Zanesco, I. Tovias, A. Luque. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **48**, 2337 (2001).
- [36] A.C. Pan, D. del Canizo, A. Laque. *Proc. 22nd Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Milan, 2007) p. 1438.
- [37] J.C. Jimeno, G. Bueno, R. Lago, I. Freire, L. Pérez, F. Recart, I. Hoces, N. Azkona, J. Alonso, P. Sánchez-Friera, S.W. Glunz, G. Emanuel, R. Ruiz, A. Pohl, W. Wolke, M. Schubert, I. Gavilanes, M. Gavilanes, M. Ezker, A. Turumbay, H. Sato, J. Bragagnolo, P.M. Nasch, S. Ostapenko, A. Belyaev, W. Dallas, O. Polupan, K. Albertsen, A. Shaikh, H. Kerp, J. Salami. *Proc. 22nd Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Milan, 2007) p. 875.
- [38] I. Hoces, N. Azkona, L. Perez, F. Recart, J.C. Jimeno. *Proc. 25th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Valencia, 2010) p. 1974.
- [39] S. Steckemetz, A. Metz, R. Hezel. *Proc. 17th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Munich, 2001) p. 1902.
- [40] C. Duran, S.J. Eisele, T. Buck, R. Kopecek, J.R. Kohler, J.H. Werner. *Proc. 24th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Hamburg, 2009) p. 1775.
- [41] S. Gloger, S. Riegel, B. Raabe, G. Hahn. *Proc. 24th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Hamburg, 2009) p. 1544.
- [42] L. Janssen, H. Windgassen, D.L. Batzner, B. Bitnar, H. Heuhaus. *Sol. Energy Mater. & Solar Cells*, **93**, 1435 (2009).
- [43] C. Duran, T. Buck, R. Kopecek, J. Libal, F. Traverso. *Proc. 25th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Valencia, 2010) p. 2348.
- [44] L. Yang, Q.H. Ye, A. Ebong, W.T. Song, G.J. Zhang, J.X. Wang, Y. Ma. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **19**, 275 (2011).
- [45] K. Drew, L.M. Brown, A. Cole, K.C. Heasman, T.M. Brutton. *Proc. 26th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Hamburg, 2011) p. 625.
- [46] B. Raabe, F. Book, A. Dastgheib-Shirazi, G. Hahn. *Proc. 25th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Valencia, 2010) p. 1174.
- [47] G. Untila, T. Kost, A. Chebotareva, M. Zaks, A. Sitnikov, O. Solodukha. *Proc. 21th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Dresden, 2006) p. 1258.
- [48] G. Untila, T. Kost, A. Chebotareva, M. Zaks, A. Sitnikov, O. Solodukha. *Proc. 22th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Milan, 2007) p. 600.

Редактор Л.В. Беляков

## Solar cell based on *n*-type silicon, bifacial, concentrator

G.G. Untila, T.N. Kost, A.B. Chebotareva, M.B. Zaks\*, A.M. Sitnikov\*, O.I. Solodukha\*, M.Z. Shvarts<sup>+</sup>

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,  
M.V. Lomonosov Moscow State University,  
119991 Moscow, Russia

\* Solar Wind,  
350063 Krasnodar, Russia

<sup>+</sup> Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Different approaches are under elaboration aimed to the cost reduction of photoelectricity produced by crystalline silicon solar cells (SC), and the most important of them are: increasing the SC efficiency, replacement of the *p*-type silicon as base material by *n*-type silicon, light concentration, bifacial SC. In this work we developed SC which combined all these approaches due to the use of transparent conductive oxide as antireflecting and passivating electrodes in the Indium–Tin–Oxide/(*p*<sup>+</sup>*nm*<sup>+</sup>)-Si/Indium–Fluoride–Oxide structure made of Cz-silicon with gridlines of wire (Laminated Grid Cell design). This SC showed the front/rear efficiencies of 16.5–16.7%/15.1–15.3% under 1–3 X („suns“) illumination. This results is unique because the combination of the bifaciality and the ability to work under concentration had no analogs, and the developed SC is highly competitive both in the categories of bifacial as well as concentrator cells.