

## Сравнение характеристик солнечных элементов, изготовленных из мультикристаллического кремния, и кремния полученного по технологии monolike

© А.А. Бетекбаев<sup>+</sup>, Б.Н. Мукашев<sup>+</sup>, L. Pelissier<sup>\*</sup>, P. Lay<sup>\*</sup>, G. Fortin<sup>\*</sup>, L. Bounaas<sup>\*</sup>, Д.М. Скаков<sup>+</sup>, Д.А. Калыгулов<sup>+</sup>, Т.С. Турмагамбетов<sup>+</sup>, В.В. Ли<sup>‡</sup>

<sup>+</sup> ТОО „МК KazSilicon“,  
041011 Бастобе, Казахстан

<sup>\*</sup> ECM Greentech,  
38100 Гренобль, Франция

<sup>‡</sup> ТОО Kazakhstan Solar Silicon,  
070017 Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: abetekbaev@kazatomprom.kz,  
a.betekbaev@gmail.com

(Получена 17 ноября 2015 г. Принята к печати 30 ноября 2015 г.)

В целях повышения эффективности солнечных элементов и снижения затрат на производство был разработан процесс получения слитков кремния по так называемой технологии monolike. Новые технологии, использующие кремний „солнечного“ качества, позволяют производить солнечные элементы при меньших затратах с высоким коэффициентом преобразования солнечной энергии. Именно поэтому процесс monolike был протестирован и оптимизирован для казахстанского кремния „солнечного“ качества. Целью данной работы было сравнение характеристик солнечных элементов, полученных из кремния monolike, с солнечными элементами, созданными из мультикристаллического кремния, полученного методом направленной кристаллизации. Для исследования были выращены слитки мультикристаллического кремния в промышленных масштабах и при использовании казахстанского кремния, созданы солнечные элементы и исследованы характеристики полученных слитков кремния и солнечных элементов.

### 1. Введение

Технология monolike позволяет выращивать слитки кремния методом направленной кристаллизации в промышленном масштабе благодаря монокристаллическим затравкам кремния, расположенным на дне тигля (рис. 1). Полученные слитки имеют квази-монокристаллическую структуру по всему объему слитка массой до 650 кг и площадью сечения в 1 м<sup>2</sup>.

Основные трудности процесса monolike следующие:

– во-первых, подбор оптимальных температурных режимов для получения монокристаллической структуры на как можно большем объеме слитка (близко к 100%), что предотвращает паразитную кристаллизацию зерен вблизи стенок тигля;

– во-вторых, ограничение образования дислокаций в процессе кристаллизации слитка (дно тигля не может быть закрыто одной затравкой, поэтому границы между затравками являются источниками дислокаций и границ двойников, которые в свою очередь могут распространяться в объем слитка);

– в-третьих, ограничение присутствия микроскопических дефектов на поверхности затравок, таких как включения примесей и механические повреждения, для исключения дополнительных ресурсов дислокаций.

Вышеописанные проблемы уже решены при использовании для процесса кристаллизации чистого кремния, очищенного газохимическим методом (сименс-процесс или его эквивалент [1]). Оборудование, использованное для решения поставленных задач, было разработа-

но компанией ECM Technologies, а именно: печи для направленной кристаллизации с тремя независимыми нагревателями по всем сторонам тигля (верх, низ и стороны), которые позволяют контролировать разницу температур и форму соединения между жидкой и

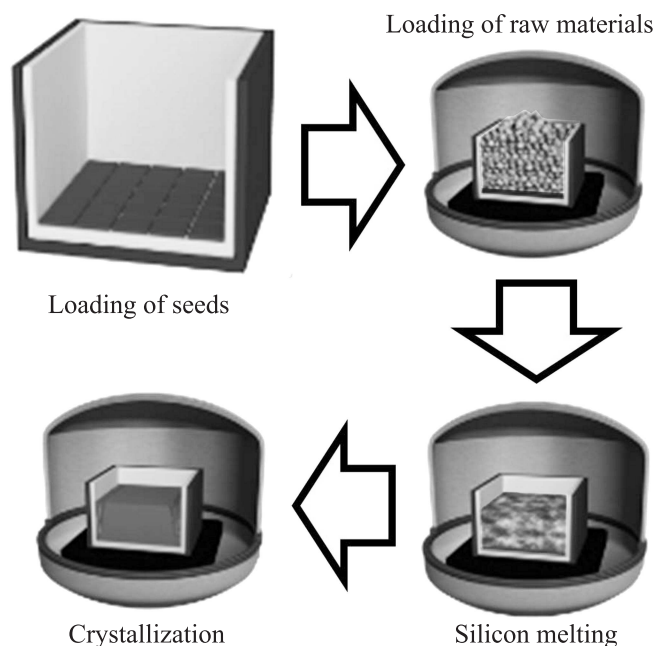


Рис. 1. Технологические этапы выращивания слитков monolike.

твердой фазы. Печи должны обеспечивать 100%-ую монокристаллическую структуру слитка по высоте без паразитно кристаллизовавшихся зерен.

Использование кремния „солнечного“ качества для замены кремния электронного качества возможно при контроле концентрации примесей и легирующих элементов до уровня, при котором они не влияют на коэффициент полезного действия (кпд) солнечных элементов (СЭ). Благодаря соответствующим процессам очистки, контролированию легирующих примесей и эффекту сегрегации при направленной кристаллизации разница в кпд СЭ, полученных из „электронного“ кремния и из казахстанского кремния „солнечного“ качества, была устранена.

В кремнии „солнечного“ качества при начальных массовых концентрациях бора и фосфора  $\sim 0.2$  и  $0.6$  ppm соответственно возможно контролировать удельное сопротивление в границах, соответствующих технологическим требованиям для создания СЭ, и для слитка кремния „солнечного“ качества, по объему аналогичного слиткам, полученным из „электронного“ кремния. Ключевым элементом, используемым для контроля влияния легирующих примесей до уровня, установленного техническими требованиями при создании СЭ, является галлий [2].

Содержание других примесей в процессе очистки уменьшается до концентраций, приемлемых для процесса сегрегации при направленной кристаллизации [3]. По окончании процесса направленной кристаллизации примеси локализованы в последних частях слитков, которые не используются для создания СЭ.

Данные заключения были подтверждены экспериментально в промышленных масштабах. Например, казахстанский кремний „солнечного“ качества эффективно используется для выращивания слитков поликристаллического кремния и создания СЭ на предприятии Kazakhstan Solar Silicon [4].

Главной целью данной работы было исследование пригодности Казахстанского кремния „солнечного“ качества для процесса направленной кристаллизации по monolike-технологии и возможность создания солнечных элементов с высоким кпд в промышленных масштабах. Как было показано выше, на процесс сильно влияет наличие примесей, которые могут привести к образованию паразитных центров кристаллизации и механическому повреждению поверхности затравок. Сегрегация примесей в конце слитка в процессе направленной кристаллизации позволяет использовать кремний „солнечного“ качества для выращивания кристаллов по monolike-технологии [5].

## 2. Описание экспериментов

### 2.1. Используемое сырье

Сырьем для производства СЭ является электронный кремний, очищенный в процессе, пришедшем из

**Таблица 1.** Концентрации легирующих примесей и металлов для различного кремния

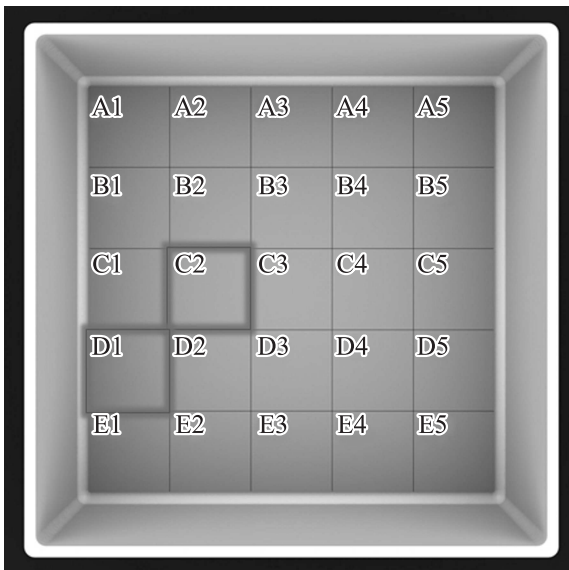
Легирующая примесь	Сверхчистый ПК SoG	ПК SoG, доступный на мировом рынке	Казахстанский ПК SoG
Массовая концентрация, ppm			
Бор	0.00004	0.26	0.20
Фосфор	0.0004	0.68	0.40
Железо	0.002	0.05	0.05
Все металлы			0.5

электронной промышленности. Такие процессы хорошо контролируются, но они требуют больших инвестиций с точки зрения затрат и энергопотребления. Фотогальваническая промышленность нуждается в кремнии высокой чистоты (примеси и кристаллические дефекты отрицательно влияют на транспортные характеристики носителей заряда в кремнии [6]), однако качеством ниже, чем полупроводниковый кремний, используемый для электронной промышленности. Это приводит к большому интересу в разработке новых способов технологической очистки кремния, достаточной для фотогальванического производства. Альтернативная технология, очистка металлургическим методом, дает возможность производить кремний „солнечного“ качества с меньшими рисками и затратами по сравнению с „электронным“ кремнием. Однако технические барьеры, связанные с уровнем легирования и наличием металлических примесей, до сих пор не позволяют данному материалу соответствовать требованиям для производства в промышленных масштабах.

Компания Kazakhstan Silicon разработала процесс получения кремния „солнечного“ качества, начинающийся с кварцевого восстановления. Затем полученный кремний „солнечного“ качества (SoG) используется для получения пластин поликристаллического кремния (ПК) и производства СЭ на предприятии Kazakhstan Solar Silicon. Очистка кремния оптимизирована для удаления любого негативного эффекта на кпд СЭ. В табл. 1 показаны сравнительные характеристики по примесям для кремния, очищенного сименс-процессом, и для кремния „солнечного“ качества.

### 2.2. Подготовка слитков и пластин

Для проведения экспериментов было выращено 2 слитка поликристаллического кремния  $p$ -типа проводимости по технологии „направленной кристаллизации“ в печи PV 600 фирмой ЕСМ (Франция), массой  $\sim 450$  кг [7]. Первый слиток (mc-Si), используемый как эталонный, был выращен по стандартной технологии без использования затравок. Второй слиток был выращен с использованием технологии monolike (monolike-Si). Для исследований слитка monolike-Si были использованы блоки, показанные на рис. 2. Для выращивания



**Рис. 2.** Схематическое изображение распила слитка monolike-Si на блоки. Выделенные блоки были использованы для проведения экспериментов.

обоих слитков использовался кремний, полученный и очищенный до кремния „солнечного“ качества на предприятии ТОО „МК KazSilicon“ по ранее разработанной технологии [4].

Процесс выращивания слитков поликристаллического кремния состоит из ряда этапов и занимает  $\sim 78$  ч. Сначала осуществляется разогрев кремния до температуры плавления  $1423^\circ\text{C}$  — до полного расплавления кремния. Кристаллизация происходит от нижней к верхней части, с применением теплового рассеивания, которое осуществляется при помощи водного охлаждения в нижней части слитка. Охлаждение слитка кремния осуществляется в условиях гомогенизированной температуры печи для ограничения тепловых деформаций.

Выращенные кремниевые слитки были разрезаны на блоки, затем блоки были разрезаны на пластины размером  $156 \times 156$  мм и толщиной 180 мкм. Для измерения эффективного времени жизни носителей заряда ( $\tau_{\text{eff}}$ ) были выбраны соседние пластины по всей высоте слитков для получения более полных физических данных. Выбранные пластины химически полированы и очищены по стандартной технологии, более подробно описанной в работе [4]. На половине пластин при высокой температуре ( $840^\circ\text{C}$ ) была проведена диффузия фосфора для определения влияния эффекта геттерирования в процессе создания солнечных элементов, после чего диффузионный слой был химически стравлен. Последней химической обработке также были подвергнуты образцы без диффузионного слоя для получения одинаковой толщины на всех образцах. На заключительной стадии все образцы были электрически пассивированы слоем аморфного гидрогенизированного нитрида кремния ( $\text{SiN}_x:\text{H}$ ) для уменьшения влияния поверхностной рекомбинации при

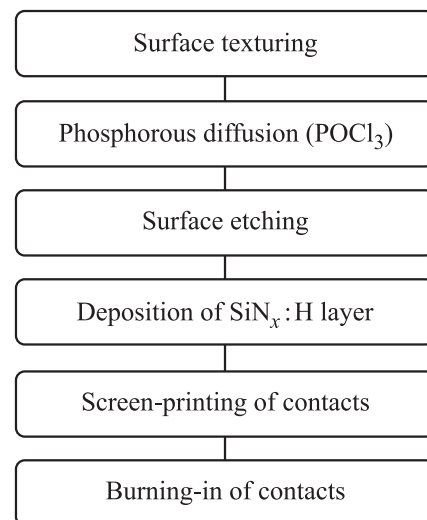
измерении  $\tau_{\text{eff}}$ . Измерение  $\tau_{\text{eff}}$  на пластинах проводилось в пяти различных точках выбранных образцов методом измерения спада фотопроводимости в квазистабильном состоянии (QSSPC) [8].

Кроме того было измерено изменение концентрации межузельного кислорода  $[\text{O}_i]$  по высоте слитка с использованием инфракрасной фурье-спектрометрии.

### 2.3. Изготовление и исследование солнечных элементов

Для исследований возможности использования кремния monolike для производства СЭ с высоким КПД из выбранных пластин кремния были изготовлены солнечные элементы. Для создания СЭ были выбраны пластины из разных участков по высоте центрального слитка. СЭ были изготовлены с использованием стандартной архитектуры Al-BSF [1], согласно которой СЭ на верхней части имеет однородный фосфорный эмиттер  $n$ -типа проводимости и электрически пассивирован слоем  $\text{SiN}_x:\text{H}$ , выступающим также в качестве антиотражающего покрытия. Задняя сторона СЭ пассивирована  $p^+$ -областью, называемой BSF (back surface field), в результате трафаретной печати и вжигания тыльного контакта из алюминиевой пасты. Носители заряда собираются на сплошном алюминиевом тыльном контакте и на  $\text{H}$ -образном серебрянном лицевом контакте, выполненном в виде сетки. Этапы создания СЭ по Al-BSF технологии показаны на рис. 3.

После изготовления на всех солнечных элементах были измерены световые вольт-амперные характеристики (ВАХ) при стандартных освещении и температуре (AM1.5G,  $0.1 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ). Из измеренных ВАХ были получены основные параметры солнечных элементов, такие как напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ ), плотность тока короткого замыкания ( $J_{sc}$ ), коэффи-



**Рис. 3.** Процесс производства солнечных элементов с архитектурой Al-BSF.

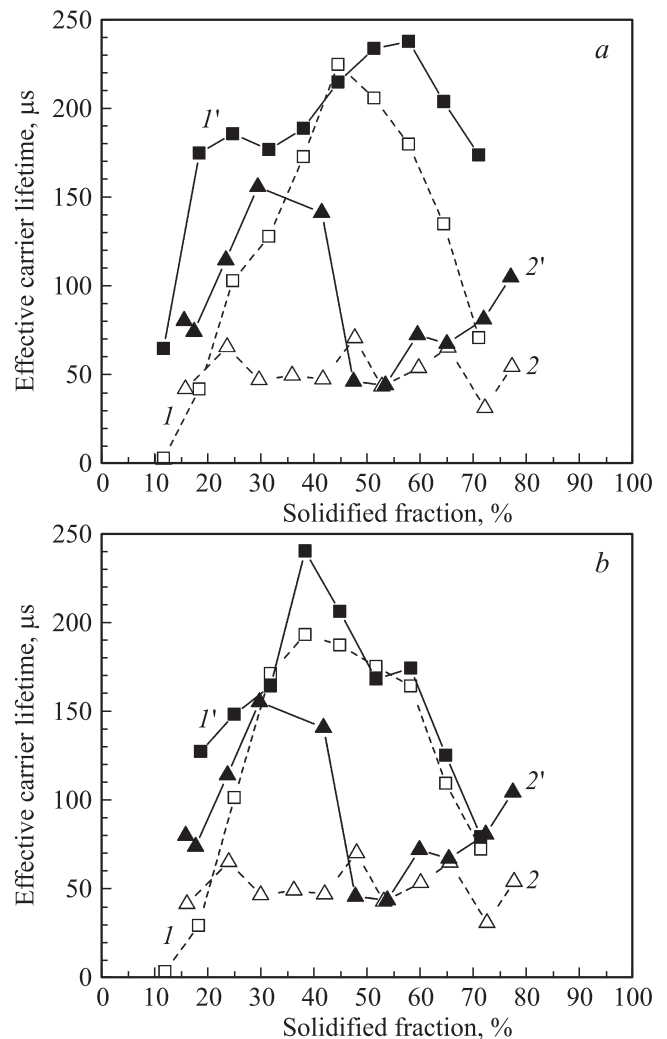
циент заполнения (FF) и КПД ( $\eta$ ). Кроме того ВАХ были измерены на солнечных элементах после теста на деградацию под освещением. Для изучения эффекта деградации солнечных элементов под освещением (LID) были использованы солнечные элементы с наибольшим КПД. Измерения LID проводились на установке, регистрирующей изменение  $V_{oc}$  при постоянных температуре ( $65^\circ\text{C}$ ) и освещении (43 мВ,  $\sim 1.1$  „солнца“) каждую секунду.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Влияние геттерирования на время жизни носителей заряда

На рисунках показаны результаты измерений  $\tau_{eff}$  для пластин кремния до и после геттерирования. По результатам измерений видно, что на обоих типах кремния  $\tau_{eff}$  имеет достаточно низкие значения на пластинах из верха слитков и без процесса геттерирования, особенно для пластин из mc-Si (рис. 4, *a, b*). На образцах после проведения диффузии фосфора наблюдалось значительное увеличение  $\tau_{eff}$  независимо от типа используемого материала. Известно, что металлические примеси являются одним из основных факторов, уменьшающих  $\tau_{eff}$  в кремнии. Примеси металлов могут создавать преципитаты в кристаллографических дефектах или могут быть растворены в объеме кремния, как, например, атомы межзельного железа ( $Fe_i$ ), что приводит к образованию глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне. В результате увеличивается рекомбинационная активность и понижается  $\tau_{eff}$ . В процессе диффузии фосфора примеси с достаточно высоким коэффициентом диффузии при высоких температурах из-за разности коэффициентов растворения диффундируют в слой *n*-типа и образуют электрически неактивные кластеры — процесс геттерирования. Однако видно, что измеренное  $\tau_{eff}$  выше для monolike-Si по причине более высокого начального, до геттерирования, значения  $\tau_{eff}$  ( $\tau_0$ ) (рис. 4, *a, b*). Более высокое  $\tau_0$  для monolike-Si объясняется лучшим кристаллическим качеством данного образца и меньшим количеством металлических примесей в объеме пластины, что было показано в предыдущей работе [5].

Измеряемые значения  $\tau_{eff}$  и  $\tau_0$  уменьшаются с увеличением кристаллической фракции, что объясняется увеличением плотности кристаллографических дефектов и увеличением концентрации примесей из-за эффекта сегрегации в процессе роста. Это подтверждается более низкими значениями  $\tau_{eff}$  и  $\tau_0$  для пластин из краевого блока слитка по причине более высокой концентрации дефектов [5]. Следует заметить, что увеличение  $\tau_{eff}$  после процесса геттерирования ниже для последней кристаллизовавшейся фракции (пластины из краевого блока monolike-Si и все пластины mc-Si (рис. 4, *a, b*)). Отсутствие увеличения  $\tau_{eff}$  после процесса геттерирования показывает, что в данном случае  $\tau_{eff}$  больше ограничено кристаллографическими дефектами, чем концентрацией примесей.



**Рис. 4.** Сравнение эффективного времени жизни (при избыточной концентрации носителей заряда  $\Delta n = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) на пластинах monolike-Si центрального (*a*), краевого (*b*) блоков и mc-Si (*a, b*) в зависимости от высоты слитка. 1 — monolike-Si до геттерирования, 1' — monolike-Si после геттерирования, 2 — mc-Si до геттерирования, 2' — mc-Si после геттерирования.

Исходя из полученных данных можно заключить, что использование технологии monolike для выращивания слитков кремния более перспективно и что кремний, выращенный по данной технологии, обладает лучшими электрическими характеристиками. Следовательно, СЭ, изготовленные из monolike-Si, должны иметь более высокий КПД.

#### 3.2. Влияние типа материала на коэффициент полезного действия солнечных элементов

На рис. 5, 6 показано распределение  $J_{sc}$  и  $V_{oc}$  солнечных элементов из центральных частей слитков monolike-Si и mc-Si в зависимости от фракции кристаллизации. Значения  $J_{sc}$  и  $V_{oc}$  напрямую зависят от  $\tau_{eff}$ , длины

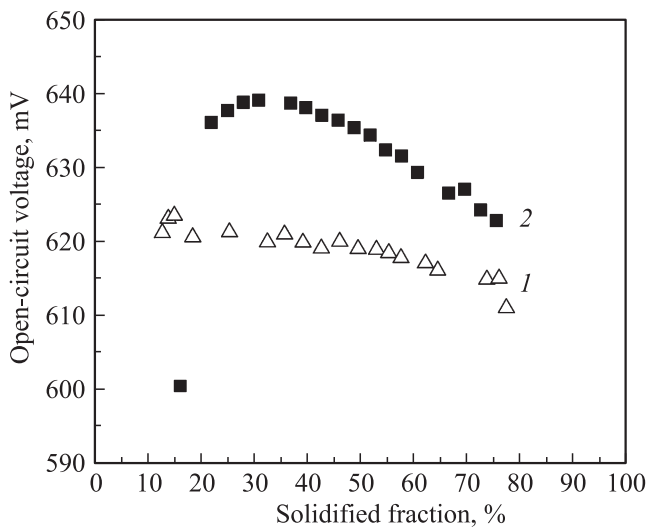


Рис. 5. Сравнение изменения  $V_{oc}$  по высоте слитков для СЭ, изготовленных из mc-Si (1) и monolike-Si (2).

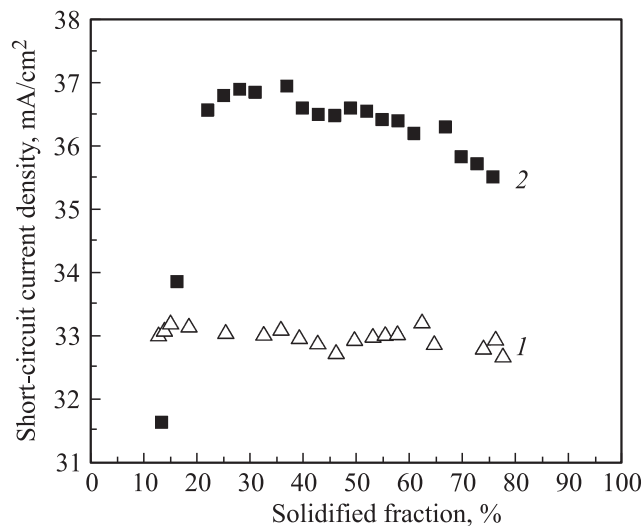


Рис. 6. Сравнение изменения  $J_{sc}$  по высоте слитков для СЭ, изготовленных из mc-Si (1) и monolike-Si (2).

диффузии электронов и хорошо коррелируют с измеренными значениями  $\tau_{eff}$ . Также видно, что значения  $J_{sc}$  и  $V_{oc}$  выше для СЭ, изготовленных из monolike-Si, что и ожидалось по причине более высокого  $\tau_{eff}$ .

На рис. 7 показано распределение кпд солнечных элементов по высоте центральных блоков на пластинах кремния, созданных со стандартной архитектурой Al-BSF. Как и ожидалось, после измерения  $\tau_{eff}$  СЭ, изготовленные из monolike-Si, имеют более высокие значения кпд по причине лучших характеристик. Максимальное значение кпд для СЭ, изготовленного из monolike-Si, составило 18.4%. В работе [9] сообщалось о значительном уменьшении эффективности по высоте слитка monolike-Si, что объяснялось увеличением плотности дислокаций. В противоположность нашему случаю,

очень точное контролирование процесса кристаллизации не способно ограничивать образование кристаллографических дефектов в объеме кристалла. Как результат, солнечные элементы, приведенные из материала такого уровня, в меньшей степени ограничены по эффективности вследствие рекомбинационных потерь, и тем самым объясняется наличие широкой области с очень слабым уменьшением эффективности. Эти результаты показывают, что контролируемая мультипликация дислокаций имеет значительное влияние на процесс производства солнечных элементов посредством не только увеличения пределов кпд, но и сужением области распределения.

С другой стороны, СЭ, полученные из monolike-Si, имеют коэффициент заполнения ВАХ ниже, чем СЭ из

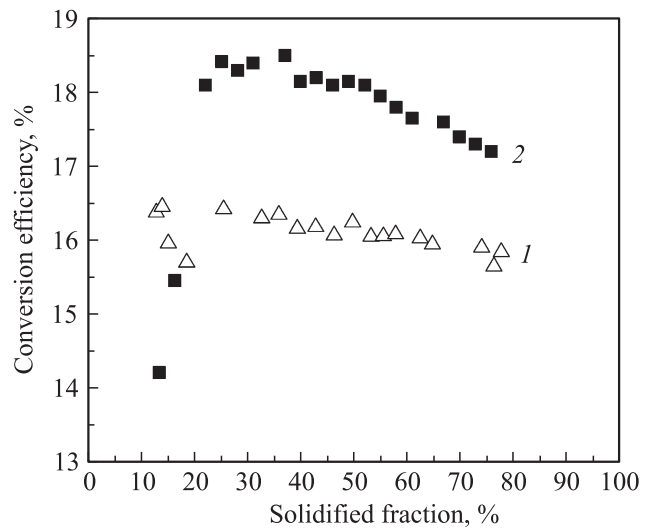


Рис. 7. Сравнение изменения кпд по высоте слитков для СЭ, изготовленных из mc-Si (1) и monolike-Si (2).

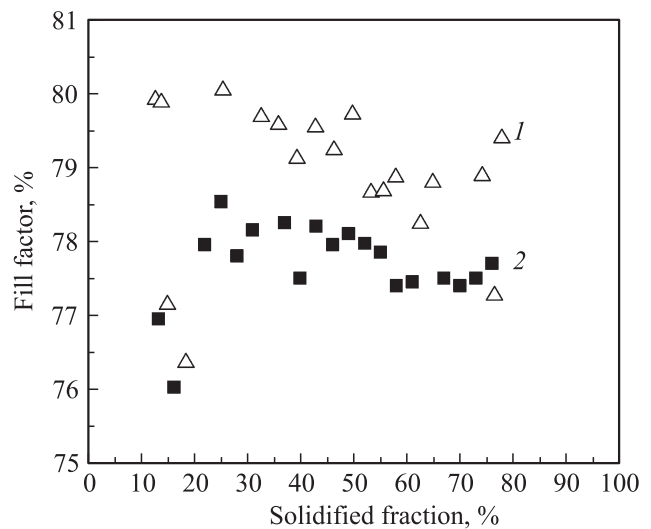


Рис. 8. Сравнение изменения коэффициента заполнения ВАХ по высоте слитков для СЭ, изготовленных из mc-Si (1) и monolike-Si (2).

mc-Si (рис. 8). Данные результаты могут быть объяснены неполной отработанностью процесса и технологических режимов создания СЭ, так как коэффициент заполнения напрямую зависит от качества процесса металлизации и диффузии фосфора (создание *n*-слоя). Однако даже при меньших значениях коэффициента заполнения СЭ из monolike-Si имеют более высокий КПД, что показывает дальнейшую возможность для увеличения КПД СЭ путем отработки технологических процессов и режимов.

Таким образом, результаты исследований показывают высокую потенциальную возможность использования кремния „солнечного“ качества, очищенного по технологии ТОО „МККазSilicon“ для создания высококачественных СЭ с высоким КПД.

### 3.3. Световая деградация солнечных элементов

В завершение исследования СЭ с высоким КПД были подвергнуты тестам на световую деградацию для получения более полных результатов. Данные исследования являются важными по причине образования комплексов бор-кислород (В-О) в результате воздействия света. Данные комплексы, в свою очередь, являются электрически активными рекомбинационными центрами и могут значительно снизить КПД СЭ [10].

В табл. 2 показаны результаты проведенных тестов на LID. Для подтверждения стабильности измерений использовался эталонный СЭ без процесса деградации.

Было обнаружено, что среднее значение относительной деградации КПД составляет ~1%. Полученные результаты показывают незначительное влияние LID на КПД СЭ, изготовленных из monolike-Si, что хорошо коррелирует с теоретическими данными об образовании комплексов В-О при концентрации кислорода  $> 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Согласно измерениям, концентрация межзельного кислорода  $[O_i]$  в monolike-Si (рис. 9) не превышает значения в  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  для частей слитка, используемых при создании солнечных элементов. В отличие от кремния, выращенного по технологии Чохральского, в котором  $[O_i]$  достигает  $\sim 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , кремний, выращенный по технологии monolike, менее подвержен образованию комплексов В-О и, следова-

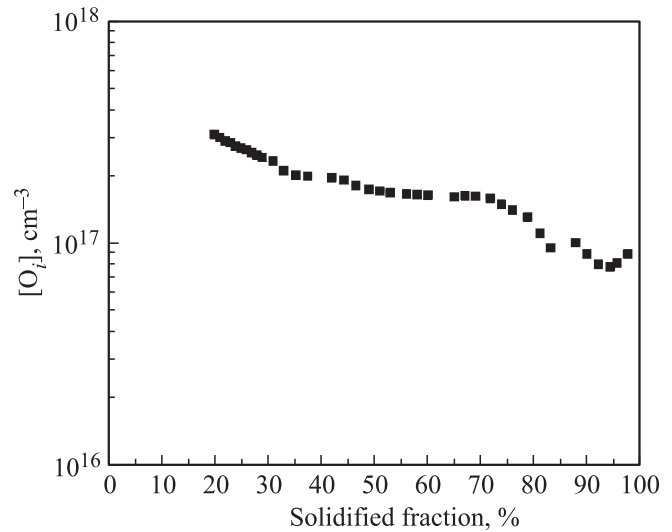


Рис. 9. Изменение концентрации  $O_i$  по высоте слитка monolike-Si.

тельно, деградации КПД СЭ при воздействии солнечного света.

С другой стороны, на исследуемых СЭ эффект LID увеличивается с увеличением фракции кристаллизации и, следовательно, с уменьшением  $[O_i]$  и можно сделать заключение, что в данном случае эффект LID больше связан с другими процессами и механизмами, чем образование комплексов В-О. В недавно опубликованных работах [11,12] сообщалось, что примеси металлов, таких как медь, формируют электрически активные преципитаты в объеме кремния при воздействии освещения и могут вызывать деградацию электрических характеристик СЭ. В литературе также представлены данные по деградации СЭ из mc-Si при освещении без объяснения причин данного явления [13]. Кроме того, в работе [14] сообщается о влиянии архитектуры СЭ на эффект деградации при освещении, показано, что СЭ с пассивированной поверхностью более чувствительны к деградации. Полученные результаты по LID пока не объяснены и требуют дальнейшего анализа.

### 4. Заключение

В работе исследованы потенциальные возможности производства СЭ из казахстанского кремния *p*-типа проводимости, очищенного металлургическим путем с использованием преимуществ технологии monolike. Показано, что кремний, выращенный по технологии monolike, имеет большее время жизни носителей заряда по сравнению со стандартным mc-Si. Кроме того, показано, что в процессе создания СЭ время жизни носителей заряда увеличивается из-за эффекта геттерирования без дополнительных процессов очистки. Преимущества разработанной технологии наблюдались на уровне солнечных элементов, проявлялись в повышении КПД и уменьшении

Таблица 2. Относительные потери основных электрических характеристик  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF,  $\eta$  для СЭ, изготовленных из monolike-Si

Положение СЭ по высоте слитка, %	Относительные потери, %			
	$\Delta V_{oc}$	$\Delta J_{sc}$	$\Delta FF$	$\Delta \eta$
Эталонный СЭ (без деградации)	0	0.2	0.1	0
20	0.2	0.3	0.6	0.6
47	0.2	0.3	0.5	1
69	0.4	0.7	1.4	1.4

распределения кпд по высоте слитка. Показано, что СЭ из кремния monolike имеют достаточно низкую деградацию кпд при воздействии света. В заключение данной работы можно сказать, что кремний monolike в ближайшем будущем может стать прорывом в фото-вольтаической промышленности по причине высокого потенциала для производства СЭ с высоким кпд и значительным снижением затрат на производство.

## Список литературы

- [1] A. Luque, S.S. Hegedus. *Handbook of photovoltaic science and engineering* (John Wiley & Sons Ltd).
- [2] F. Kirscht, M. Heuer, M. Käs, J.-P. Rakotoniaina, T. Jester. *Metallurgically Refined Silicon for Photovoltaics. Proc. CSSC-6* (Aixles-Bains, France, 2012).
- [3] B.N. Mukashev, A.A. Betekbaev, D.A. Kalygulov, I. Pellegrin, A.A. Pavlov, D.M. Skakov, Zh. Bektemirov. *Eurasian Chem. Technol. J.*, **16**, 307 (2014).
- [4] Б.Н. Мукашев, А.А. Бетекбаев, Д.А. Калыгулов, А.А. Павлов, Д.М. Скаков. *ФТП*, **49** (10), 1421 (2015).
- [5] А. Бетекбаев, Б. Мукашев, Л. Пеллисер, Ф. Лай, Г. Фортин, Л. Бунас, Д. Скаков, А. Павлов, В. Ли. *Материалы электронной техники*, (МИСИС, Москва, 2016).
- [6] G. Coletti, P.C.P. Bronsveld, G. Hahn, W. Warta, D. Macdonald, B. Ceccaroli, K. Wambach, N.L. Quang, J.M. Fernandez. *Adv. Funct. Mater.*, **21**, 879 (2011).
- [7] A.A. Betekbaev, B.N. Mukashev, K. Ounadjela, A.A. Pavlov, I. Pellegrin, V.S. Shcolnik. *24th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes* (Breckenridge, Colorado, USA, 2014) p. 101.
- [8] K.A. Jackson. In: *Crystal Growth — From Fundamentals to Technology*, ed. by G. Muller, J.-J. Metois, P. Rudolph (Elsevier, Amsterdam, 2004) p. 27.
- [9] M. Trempa et al. *J. Cryst. Growth*, **351**, 131 (2012).
- [10] K. Bothe, J. Schmidt. *J. Appl. Phys.*, **99**, 013 701 (2006).
- [11] H. Savin, M. Yli-Koski, A. Haarahiltunen. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 152 111 (2009).
- [12] T. Turmagambetov, S. Dubois, J.-P. Garandet, B. Martel, N. Enjalbert, J. Veirman, E. Pihan. *Phys. Status Solidi C*, **11**, 1697 (2014).
- [13] S. Dubois, N. Enjalbert, J.P. Garandet, R. Monna, J. Kraiem. *Proc. 23th EU PVSEC* (Valencia, Spain, 2008) p. 1437.
- [14] M. Cascant, N. Enjalbert, R. Monna, S. Dubois. *Proc 29th EU PVSEC* (Munich, Germany, 2014) p. 2570.

Редактор Л.В. Шаронова

## Characteristics of solar cells fabricated from multicrystalline silicon and silicon obtained using monolike process

A.A. Betekbaev<sup>+</sup>, B.N. Mukashev<sup>+</sup>, L. Pelissier\*, P. Lay\*, G. Fortin\*, L. Bounaas\*, D.M. Skakov<sup>+</sup>, D.A. Kalygulov<sup>+</sup>, T.S. Turmagambetov<sup>+</sup>, V.V. Lee<sup>‡</sup>

<sup>+</sup> LLP „МК KazSilicon“,  
041011 Bastobe, Kazakhstan

\* ECM Greentech,  
38100 Grenoble, France

<sup>‡</sup> LLP „Kazakhstan Solar Silicon“,  
070017 Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

**Abstract** In the frame of permanent objective to increase solar cell efficiency and to decrease production cost, monolike ingot process is designed to combine multicrystalline productivity and monocrystalline structure performances. New technologies that use solar grade silicon are less expensive and enable to produce high efficiency solar cells. It is why the monolike process have been tested and optimized with Kazakhstan's solar grade silicon. The objective of this work is to study the differences in solar cells characteristics fabricated from monolike silicon and multicrystalline silicon grown by direct crystallization. For this study industrial scale multicrystalline and monolike ingots were grown and their characteristics were investigated. Furthermore, the solar cells were fabricated from both type of silicon and their electrical parameters were studied.