

УДК 621.383

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

© 2022 г. Б. М. Абдурахманов<sup>1</sup>, М. М. Адиллов<sup>1,\*</sup>,  
иностраннный член РАН, академик АН Узбекистана М. Х. Ашуров<sup>2</sup>, Х. Б. Ашуров<sup>1</sup>

Поступило 24.05.2021 г.  
После доработки 19.04.2022 г.  
Принято к публикации 21.06.2022 г.

Приведены результаты сопоставления эффективности и радиационной стойкости солнечных элементов, изготовленных из монокристаллического кремния и поликристаллического кремния (мультикремния). Показано, что пленочные солнечные элементы, синтезированные с помощью хлоридного процесса, при использовании мультикремния в качестве подложечного материала по своим характеристикам не уступают солнечным элементам из монокристаллического кремния.

*Ключевые слова:* солнечный элемент, монокристаллический кремний, мультикремний, эффективность преобразования излучения, радиационная стойкость

DOI: 10.31857/S2686740022060037

Задача оптимизации производства солнечных элементов (СЭ) решается, в том числе, и путем удешевления применяемого для их изготовления материала. Внедрение оборотных технологий [1] хлорсиланового синтеза поликристаллического кремния привело не только к существенному снижению стоимости кремния и, соответственно, СЭ, но и поставило вопрос о конкурентоспособности металлургических методов очистки технического кремния (ТК), с помощью которых пытались получать поликристаллический кремний с ориентированными кристаллитами (мультикремний), приемлемый по чистоте для производства СЭ [2].

В настоящей работе показано, что применение мультикремния, получаемого путем однократной переплавки ТК с добавлением отходов производства кремния электронной чистоты, может быть вполне целесообразным. При этом мультикремний используется в качестве специально сильно легированного мелкими примесями подложечного материала, а базовая область СЭ синтезируется из газовой фазы, в том числе с применением приемов вышеупомянутых оборотных технологий.

Далее будут сопоставлены характеристики СЭ, изготовленных на основе кремния электронной чистоты и мультикремния, двух видов:

– вторичного литого поликристаллического кремния (ВЛПК) [3], полученного кристаллизацией в графитовой изложнице расплава смеси ТК с отходами кремниевого производства;

– поликристаллического крупноблочного кремния, синтезированного по Чохральскому из расплава смеси ТК и отходов кремния с операций эпитаксии и получения монокристаллов.

В шихту для выплавки мультикремния обоих видов добавляли до 30% ТК марки Кр00, с содержанием кремния 99.9%, имитируя тем самым ситуацию разной степени очистки материала от примесей, имеющих в техническом кремнии. Из полученного мультикремния, представлявшего собой поликристаллический материал с размером зерен более 300 мкм, изготавливали тестовые структуры размером 20 × 40 мм с  $p-n$ -переходами, выполненными диффузией. Использовалось простейшее просветляющее покрытие,  $SiO_x$ , создаваемое по упрощенной технологии, основанной на гидролизе паров тетрагидрида кремния при 350 К на фронтальной поверхности заготовок для СЭ с  $p-n$ -переходами. Применялись луженые контакты из напыленной через маски композиции Ti–Ni–Cu. Контрольные СЭ были приготовлены из монокристаллического кремния марки КСД-1  $p$ -типа, а также на основе кремниевых однослойных эпитаксиальных структур (КОЭС)  $p-p^+$ , с пленкой

<sup>1</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
Академии наук Республики Узбекистан,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup> Институт ядерной физики  
Академии наук Республики Узбекистан,  
Ташкент, пос. Улугбек, Узбекистан

\*E-mail: muxammad.84@mail.ru

**Таблица 1.** КПД и некоторые свойства СЭ из монокристаллического кремния и мультикремния

№	Тип СЭ, электрофизические характеристики материала и технология изготовления базовой области	Максимальное значение КПД при АМ 1.5
1	СЭ, на основе КОЭС $n^+p-p^+$ , с пленочной базой $p$ -типа, удельное сопротивление $\rho \sim 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , толщина $\sim 60 \text{ мкм}$ , осажденной из газовой фазы на $p^+$ -подложку $p$ -типа КДБ-0.003 из монокристаллического кремния	$\sim 13$
2	СЭ $n^+p-p$ , с пленочной базой, $p$ -типа, $\rho \sim 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , толщина $60 \text{ мкм}$ , осажденной на сильнолегированную $p^+$ -подложку с $\rho \sim 0.01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ из крупноблочного мультикремния	11
3	База из монокристаллического кремния марки КСД-1	$\sim 11$
4	$n^+p-p^+$ , база из мультикремния, вытянутого из расплава по Чохральскому $p$ -типа с $\rho \sim 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и тыльным подлегированием Al и водородной пассивацией	8
5	$n^+p$ , база из мультикремния ВЛПК, $p$ -типа, $\rho \sim 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Водородная пассивация	6–7

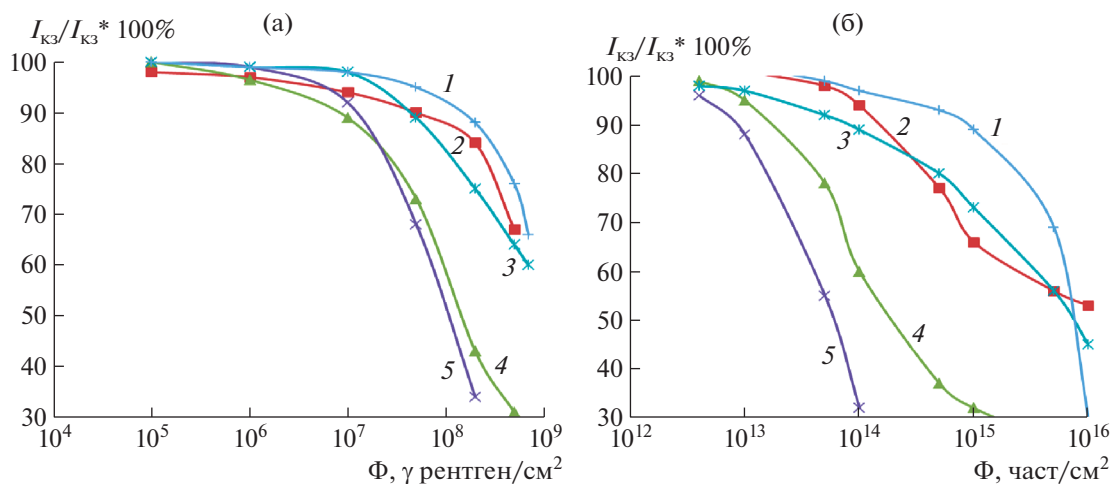
$p$ -типа толщиной  $\sim 60 \text{ мкм}$ , осажденной в хлоридном процессе на монокристаллическую  $p^+$ -подложку с удельным сопротивлением  $0.003 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

На образцах СЭ были выполнены измерения тока короткого замыкания ( $I_{кз}$ ), напряжения холостого хода ( $U_{хх}$ ), коэффициента заполнения нагрузочной вольт-амперной характеристики ( $FF$ ) и максимальной мощности ( $P_{max}$ ), и были оценены температурные зависимости указанных параметров. Результаты измерений сопоставляли с типичными данными для соответствующих параметров у монокристаллических СЭ производства фирмы “Sarp Corporation” (Japan) и ПО “Красная Звезда” (РФ).

Показано, что КПД монокристаллических Si-СЭ уменьшается с коэффициентом  $\sim 0.5\%$  на градус, что совпадает с результатами измерений на наших СЭ, изготовленных на монокристаллических подложках. Найдено, что нагрев СЭ с трещинами, царапинами и другими визуальными дефектами до температур, превышающих  $400 \text{ К}$ , приводит к еще более значительным нелинейным изменениям параметров СЭ, которые слабо выражены при рабочей температуре  $300 \text{ К}$ . Наиболее существенные отклонения от линейных температурных зависимостей у  $I_{кз}$ ,  $U_{хх}$ ,  $FF$  и  $P$  в диапазоне  $400\text{--}800 \text{ К}$  имели место у СЭ на основе мультикремния. Как и у контрольных СЭ, у СЭ на основе мультикремния наблюдалось увеличение  $I_{кз}$  с ростом температуры. Однако, в отличие от монокристаллических СЭ и СЭ на основе КОЭС, эта зависимость не только не линейна, но и обнаруживает ряд дополнительных особенностей. При этом амплитуда “подъемов” и “провалов” превышает погрешность измерений, дающей отклонения в пределах  $5\%$ . Для объяснения наблюдаемого поведения на тех же образцах СЭ из мультикремния были проведены измерения температурной зависимости тока  $I_{кз}$  в темноте.

Было обнаружено существенное влияние нагрева на величину  $I_{кз}$ , обусловленное термоэлектрическими эффектами. Отметим, что у аналогично нагреваемых бездефектных СЭ из монокристаллического кремния наблюдается существенно меньшая величина темновых  $I_{кз}$  и  $U_{хх}$ . Такое расхождение можно связать с особенностями генерации носителей тока в мультикремнии в присутствии дефектов и примесей, отсутствующих в монокристаллическом кремнии. Для оценки вклада каждого из этих факторов и нахождения отличий СЭ, изготовленных из разных кремниевых материалов, были поставлены эксперименты по намеренному созданию дефектов в монокристаллических кремниевых структурах для СЭ. Использовалась водородная пассивация межзеренных границ в мультикремнии, аналогичная пассивации в поликристаллическом кремнии электронной чистоты. Структуры типа  $p-p^+$  получались осаждением из газовой фазы слоев  $p$ -типа с удельным сопротивлением  $\sim 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  на сильнолегированные  $p^+$ -подложки из мультикремния, для которых использовалась шихта с разным содержанием ТК. В данном случае, при условии подавления автолегирования, наращиваемый слой, который в дальнейшем используется как база СЭ  $p$ -типа, на следует из подложки из мультикремния только границы зерен и их ориентацию, т.е. поликристаллическую и двойниковую структуру. При этом электрофизические характеристики структуры определяются исключительно режимом легирования из газовой фазы, и влияние примесей в подложке на свойства пленочной базы СЭ может быть минимизировано. Этот результат иллюстрируют данные табл. 1, в которой приведены характеристики СЭ, изготовленных из мультикремния, КОЭС и пленочных структур на подложках из мультикремния.

Из табл. 1 видно, что в том случае, когда мультикремний используется для изготовления из не-



**Рис. 1.** Влияние рентгеновского излучения с  $E = 1.3$  МэВ с плотностью  $J = 300$  рентген/с (а) и облучения быстрыми электронами с  $E = 1-3.5$  МэВ с плотностью  $J = 10^{11}$  см $^{-2}$  с $^{-1}$  (б) на величину тока короткого замыкания СЭ, при АМ 1.5 ( $P = 850$  Вт/м $^2$ ,  $T = 300$  К), изготовленных из кремния разного технологического происхождения.

го базовой области СЭ (позиции 4 и 5), параметры таких элементов уступают по КПД СЭ с базой из кремния электронного качества (позиция 3). Поэтому для получения сопоставимых параметров СЭ в рассматриваемом случае требуется глубокая очистка ТК и (или) самого мультикремния, что трудоемко и экономически не выгодно. Поэтому мы предлагаем использовать мультикремний исключительно в качестве сильнолегированного подложечного материала, что позволяет изготавливать СЭ с КПД, близким (позиция 2) к таковому у СЭ на основе КОЭС (позиция 1) при тех же параметрах базы.

На рис. 1 представлено сравнение данных о радиационной стойкости различных видов СЭ. Видно, что наибольшей стойкостью как к рентгеновскому излучению (рис. 1а), так и облучению быстрыми электронами (рис. 1б), обладают СЭ на основе КОЭС (кривая 1). При этом радиационная стойкость СЭ с базой из мультикремния, будь то мультикремний, полученный переплавом отходов металлургии кремния с добавлением ТК Кр00 по Чохральскому (кривая 4), или ВЛПК (кривая 5), оказывается наименьшей.

Стойкость СЭ  $p-p^+$ -типа с пленочной базой с  $d = 60$  мкм, осажденной в хлорсилановом процессе на крупноблочные ( $d_{\text{зерна}} = 500-1000$  мкм) подложки из мультикремния, сильно легированного бором, до предела растворимости, оказывается сопоставимой (кривая 2) с таковой у СЭ с базой из кремния марки КСД-1 (кривая 3), широко используемого в технологии СЭ для наземной энергетики. Таким образом, применение мультикремния в качестве подложечного материала для изготовления пленочных структур для СЭ намного

более целесообразно, чем его использование в качестве материала для изготовления базы СЭ. При этом технологию получения структур-заготовок для СЭ с пленочной базой необходимо с самого начала ориентировать на использование оборотных хлорсилановых технологий [1, 4], показавших свою высочайшую экономическую эффективность в процессах получения кремния электронной чистоты.

Из приведенных выше данных следует еще один, физически интересный вывод, заключающийся в том, что причиной нелинейности температурных зависимостей параметров СЭ с базой из мультикремния является генерация в ней носителей заряда при нагреве, идущая с участием глубоких энергетических уровней, обусловленных структурными дефектами и примесями, т.е. за счет теоретически предсказанного в [5] тепловольтаического эффекта. Доказательством данного утверждения может служить тот факт, что водородная пассивация границ зерен мультикремния сопровождается уменьшением и даже исчезновением упомянутых выше нелинейных изменений параметров СЭ, наблюдающихся при нагреве.

В качестве будущего перспективного направления исследований следует рассмотреть изучение корреляции между сроком службы и радиационной стойкостью Si СЭ с базой  $p$ -типа, поскольку причиной радиационной деградации является наличие в базе дефектов, связанных с кислородосодержащими комплексами, а одной из причин так называемой “световой деградации” параметров СЭ является наличие в базе комплексов бор–кислород.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наумов А.В.* Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок кремниевого сырья в 2006–2010 г. // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2006. № 2. С. 3–8.
2. *Колобов Г.А., Критская Т.В., Мосейко Ю.В., Карпенко А.В., Печерица К.А.* Рафинирование металлургического кремния до чистоты сорта “солнечный” // Металлургия. 2014. Вып. 2 (32). С. 118–126.
3. *Кадыров А.Л.* Получение и свойства вторичного литого поликристаллического кремния. Худжанд: Нури Марифат, 2018. 396 с.
4. *Абдурахманов Б.М., Ашууров Х.Б., Курбанов М.Ш.* Химико-металлургический передел кремнезема в моносилановое сырье для солнечной энергетики и нанoeлектроники. Монография. Ташкент: Navroz, 2018. 505 с.
5. *Саидов М.С.* Примесные вольтаические эффекты и термофотовольтаика // Гелиотехника. 2008. № 1. С. 6–11.

## CHARACTERISTICS OF SOLAR CELLS BASED ON POLYCRYSTALLINE SILICON

**B. M. Abdurakhmanov<sup>a</sup>, M. M. Adilov<sup>a</sup>,**

**Foreign Member of the RAS, Academician of the Academy of Sciences of Uzbekistan M. Kh. Ashurov<sup>b</sup>,  
and Kh. B. Ashurov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan*

<sup>b</sup> *Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Ulugbek village, Uzbekistan*

The results of comparing the efficiency and radiation resistance of solar cells made of single-crystal silicon and polycrystalline silicon (multisilicon) are presented. It is shown that film solar cells synthesized using the chloride process, when using multisilicon as a substrate material, are not inferior in their characteristics to solar cells made of single-crystal silicon.

*Keywords:* solar cell, monocrystalline silicon, multisilicon, radiation conversion efficiency, radiation resistance