

Применение квазимонокристаллических подложек для тонкопленочных гетеропереходных солнечных элементов



В. Н. Вербицкий,
младший научный сотрудник,
Физико-технический
институт им. А. Ф. Иоффе
Российской академии наук
vnverbitskiy@mail.ru



И. А. Няпшаев,
к. ф.-м. н., старший
технолог, ООО «НТЦ
тонкопленочных
технологий в энергетике»
i.nyapshaev@hevelsolar.com



Д. А. Андроников,
к. ф.-м. н., главный
технолог, ООО «НТЦ
тонкопленочных
технологий в энергетике»
d.andronikov@hevelsolar.com



Д. В. Жилина,
специалист по техническому
сопровождению, ООО «НТЦ
тонкопленочных
технологий в энергетике»
d.zhilina@hevelsolar.com



А. В. Семенов,
к. т. н., старший
технолог, ООО «НТЦ
тонкопленочных
технологий в энергетике»
a.semenov@hevelsolar.com



А. С. Абрамов,
к. ф.-м. н., руководитель
отдела по солнечной
энергетике, ООО «НТЦ
тонкопленочных
технологий в энергетике»
a.abramov@hevelsolar.com



Е. И. Теруков,
д. т. н., профессор,
зам. генерального
директора, ООО «НТЦ
тонкопленочных
технологий в энергетике»
e.terukov@hevelsolar.com



Д. Л. Орехов,
к. т. н., генеральный
директор, ООО «НТЦ
тонкопленочных
технологий в энергетике»
d.orehov@hevelsolar.com

В работе продемонстрированы результаты изготовления гетеропереходных солнечных элементов на полно-размерных кремниевых пластинах топо-like n-типа (244,2 см²), выращенных методом направленной кристаллизации с высокой монокристаллической долей — более 95% поверхности с кристаллографической ориентацией (100). Солнечные элементы были изготовлены на базе промышленной технологии, разработанной в ООО «НТЦ ТПТ» для монокристаллических кремниевых пластин (Cz). Эффективность фотоэлектрического преобразования солнечных элементов на подложках топо-like составила 19,48%, на монокристаллических подложках (Cz), изготовленных в качестве эталона в том же процессе — 22,89%.

Ключевые слова: солнечная энергетика, солнечные модули, тонкопленочные технологии, аморфный кремний, гетероструктурный солнечный элемент.

Введение

Начало XXI века ознаменовалось бурным развитием кремниевой солнечной энергетики в мире, которая в настоящее время заняла серьезное место в мировом энергетическом балансе в целом и энергетических балансах ряда стран мира. Установленная мощность построенных к 2018 г. солнечных электростанций достигла 400 ГВт, что составляет около 10% мощности всех электростанций мира, причем среднегодовые темпы развития фотоэнергетики в мире за последние

15 лет превысили 30% в год. Инвестиции в солнечную энергетику в мире достигли около \$200 млрд в год и примерно в два раза превышают инвестиции в традиционную энергетику. В результате развития технологий и освоения широкомасштабного производства удельная стоимость промышленно выпускаемых фотоэлектрических модулей с начала века снизилась более чем в 10 раз (до 300-400 \$/Вт_{пик}), а приведенные затраты на производство электроэнергии в наиболее солнечных регионах мира приблизились к 10 центам за 1 кВт·ч (около 6 руб./кВт·ч) и вышли во многих

странах на конкурентоспособный уровень в сравнении со стоимостью энергии от электростанций на ископаемом топливе.

Основная преграда увеличения темпов внедрения фотовольтаики (в плане замещения газа, нефти и атомной энергии) связана с относительно высокой стоимостью «солнечной» электроэнергии. Снижение стоимости и, следовательно, увеличение экономической целесообразности внедрения солнечной энергетики может быть достигнуто повышением КПД фотоэнергосистем и уменьшением затрат на производство (снижение расхода материалов, применение более дешевых технологий производства и более дешевого исходного сырья). В частности, в зависимости от технологии изготовления стоимость кремниевой пластины может составлять 50-70% от стоимости солнечного элемента [1, 2].

Одной из наиболее перспективных и активно развивающихся технологий изготовления солнечных элементов на основе кристаллического кремния является гетероструктурная технология (HJT – heterojunction technology). Особенность HJT состоит в том, что формирование гетероперехода осуществляется нанесением методом плазмохимического осаждения на поверхность кристаллической кремниевой пластины тонких пленок аморфного гидрогенизированного кремния, играющих роль эмиттера и обеспечивающих пассивацию поверхности активных состояний. Солнечные элементы, изготовленные по HJT, обладают преимуществами классических кремниевых элементов (изготовленных по диффузионной технологии), включая высокую эффективность фотоэлектрического преобразования. На сегодняшний день эффективность, достигнутая на лабораторных образцах, превышает 25,1% [3], в промышленном производстве HJT элементов величина находится на уровне 22%, что соответствует уровню рекордных величин для монокристаллического кремния. Кроме того, изготовление солнечных элементов по гетероструктурной технологии происходит при относительно низких температурах (менее 200°C) [4]. Это способствует снижению энергетических затрат и, таким образом, удешевлению процесса производства, что дает неоспоримое преимущество перед диффузионной технологией.

Сегодня список компаний с опытом промышленного производства HJT элементов и модулей относительно не велик. Основными зарубежными производителями являются такие компании как Panasonic (Япония) и GCL System Integration Technology (Китай).

В России технология промышленного производства гетероструктурных солнечных элементов внедрена и реализована на заводе российской компании «Хевел» (г. Новочебоксарск, Республика Чувашия), где ежегодный выпуск гетероструктурных солнечных модулей с эффективностью ячейки более 22% составляет более 160 МВт. При этом разработка, улучшение и внедрение улучшенных технологий в производство осуществляется в научно-техническом центре тонкопленочных технологии (ООО «НТЦ ТПТ», Санкт-Петербург).

НТЦ ТПТ, созданный в 2012 г. при ФТИ им. А. Ф. Иоффе для поддержки развития производства ООО «Хевел», имел главной задачей улучшение основных параметров солнечных модулей на основе

аморфного кремния в интересах ООО «Хевел». Планировалась разработка трехкаскадного солнечного модуля, улучшение оптического поглощения света в каскадах и гетеропереходах, дизайна модулей. Ожидаемый результат от этих улучшений – увеличение КПД модулей до 14-15%. Резкое снижение цен на кристаллический кремний с 300 до 20 \$/кг за последние 5 лет заставило заняться задачей модернизации действующего производства ООО «Хевел» под новую конкурентоспособную продукцию, используя существующие технологические линии завода.

Решение, разработанное в НТЦ на технологическом оборудовании идентичном тому, которое имеется на предприятии, состоит в использовании технологии изготовления солнечных элементов (СЭ) на основе кристаллического кремния (Heterojunction with Intrinsic Thin layer), базирующейся на формировании гетеропереходов a-Si:H/c-Si/a-Si:H. В условиях НТЦ, близких к производству, КПД составил 22%, что позволяет производить конкурентоспособную на мировом рынке продукцию. По результатам этих работ была осуществлена модернизация ООО «Хевел» и начато производство высокоэффективных гетероструктурных солнечных модулей с годовым объемом 170 МВт.

Переход на более дешевую кремниевую подложку, которая составляет порядка 50% от стоимости ФЭП, является целью проекта НТЦ, поддержанного «Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере».

В качестве подложек солнечных элементов используются пластины монокристаллического кремния, выращенного методом Чохральского. На солнечных элементах, изготовленных по HJT, стоимость подложки может достигать 70% от стоимости ячейки. Таким образом, удешевление кремниевых подложек является актуальной задачей для гетероструктурных солнечных элементов. Возможным вариантом решения может быть замена технологии выращивания кремниевой слитки методом Чохральского (Cz) на метод направленной кристаллизации (DS) (на основе метода Бриджмена) [5], который применяется для производства мультикремния. При этом использование монокристаллических подложек и оптимизация процесса роста позволяют выращивать слитки с большой долей монокристаллического материала (более 95%). Применение таких пластин, также называемых квазимонокристаллическими или «mono-like», позволяет снизить стоимость подложки на 30-40%, тем не менее, остается вопрос – какую часть слитка можно использовать в качестве подложек для гетероструктурных солнечных элементов? В Европе пластины mono-like успешно применила научная группа компании INES (Франция) для создания в лабораторных условиях HJT солнечных элементов с максимальной эффективностью 21,57% [6]. Аналогичные работы активно ведутся научными группами в Китае и Японии. При этом на данный момент внедрение в промышленное производство гетероструктурных элементов на mono-like пластинах, выращенных методом направленной кристаллизации, отсутствует.

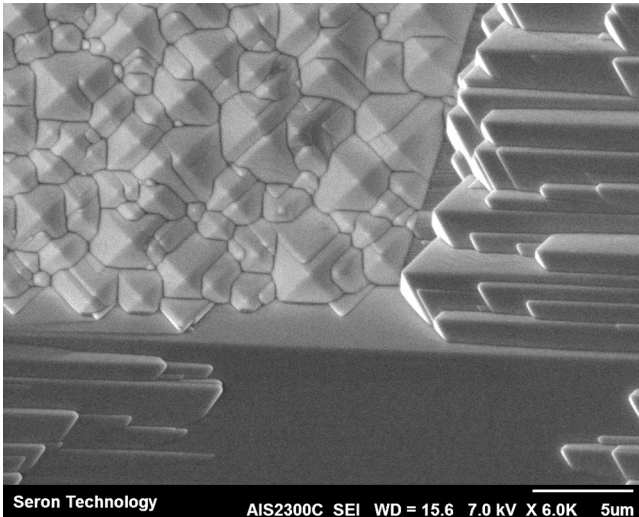


Рис. 1. Микрофотография поверхности пластины mono-like после формирования рельефа

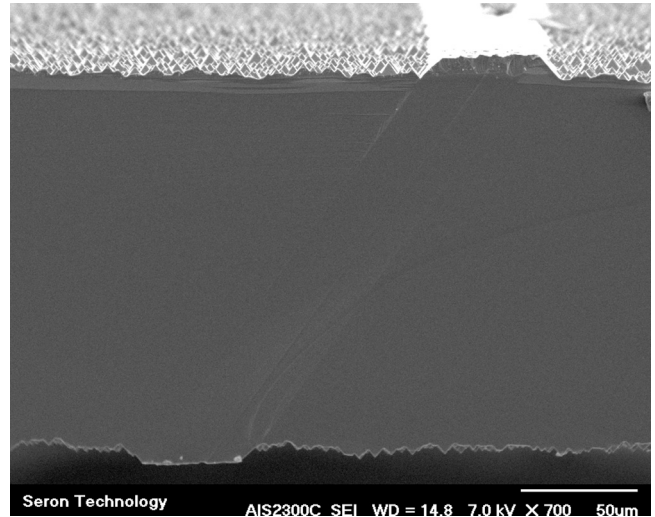


Рис. 2. Микрофотография на сколе пластины mono-like после формирования рельефа

В России первые эксперименты по гетероструктурным солнечным элементам на mono-like пластинах сегодня проводит «НТЦ ТПТ» в рамках проекта «Развитие-НТИ II», направленного на исследование применения кристаллических пластин, выращенных методом направленной кристаллизации, для производства гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей. Согласно экономическим расчетам применение пластин mono-like с ценой на уровне 36 руб. за пластину и при сохранении эффективности получаемых НЭТ солнечных элементов на уровне свыше 20%, потенциально сможет снизить себестоимость продукции действующего производства завода «Хевел» на 10-14%.

В данной работе приведены результаты первых экспериментов по формированию НЭТ структур на пластинах mono-like и для сравнения результаты эффективности заводских ячеек, изготовленных по гетероструктурной технологии на заводе «Хевел» на монокристаллических кремневых подложках, выращенных методом Чохральского.

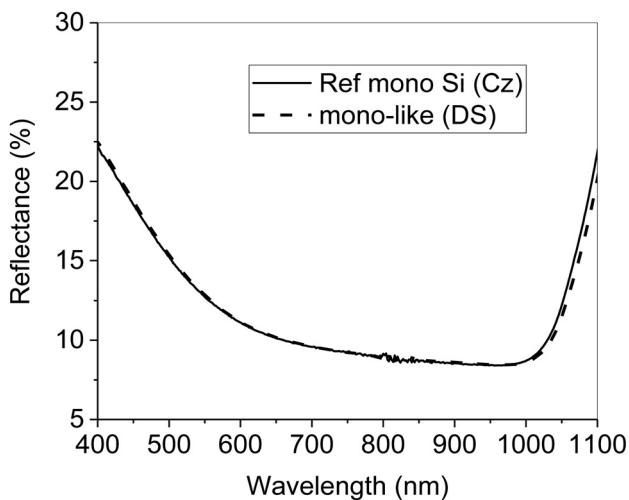


Рис. 3. Спектры полного отражения от поверхности пластин mono (Cz) и mono-like (DS) Si после формирования пирамидального рельефа и осаждения слоев a-Si:H

Результаты эксперимента

Изготовление солнечных элементов проведено на пластинах mono-like *n*-типа размером 156×156 мм² и с долей монокристалличности более 95%. В качестве контрольных образцов использованы монокристаллические кремниевые пластины, выращенные методом Чохральского, с аналогичным типом проводимости и размерами. Последовательность изготовления образцов содержала следующие основные стадии: удаление нарушенного слоя и формирование рельефа на поверхности, нанесение аморфных слоев, формирование гетероперехода, осаждение прозрачных проводящих электродов и формирование токосъемной сетки.

Наличие на поверхности пластин mono-like пирамидально не текстурированных областей (рис. 1), возвышающихся над поверхностью, связано с анизотропией травления кремниевых граней с различной кристаллографической ориентацией. Используемый рецепт текстурирования позволяет получать пирамидальный рельеф на пластинах с ориентацией (100). При выращивании пластин методом направленной кристаллизации существует вероятность образования включений с другой кристаллографической ориентацией, на которую влияет оптимизация технологического процесса и качество применяемых материалов (например, чистота поликристаллического кремния, тиглей и затравок). Наличие смещения не пирамидальных областей между нижней и верхней сторонами пластины (рис. 2) должно быть связано с особенностью процесса затвердевания слитка от центра к краям тигля, что позволяет снизить вероятность формирования центров кристаллизации на границах уменьшить зону их разрастания.

Наличие на mono-like пластинах небольшого количества включений не оказывает заметного влияния на изменение коэффициента отражения от поверхности (рис. 3). На незначительное расхождение спектров на длине волны более 1000 нм оказывает влияние небольшой разброс по толщине образцов.

Однако на границах между включениями с различной кристаллографической ориентацией у подложек mono-like остаются дефекты (дислокации, примеси),

Результаты измерения времени жизни и ВАХ СЭ

Название образца	Время жизни, мкс	Сопротивление, Ом·см	I_{sc} , А	V_{oc} , В	P_{max} , Вт	FF, %	КПД, %
mono-like (DS)	371	3,71	9,274	0,680	4,759	75,45	19,48
Ref mono Si (Cz)	2907	1,85	9,462	0,737	5,592	80,14	22,89

которые играют роль рекомбинационных центров и, таким образом, приводят к снижению качества объемного материала, что оказывает влияние на время жизни неосновных носителей заряда и другие фотоэлектрические параметры (таблица). Кроме того, при выращивании слитка методом направленной кристаллизации происходит перераспределение примесей в процессе роста слитка без изменения их исходного количества. Поэтому, на объемное качество подложки также будет оказывать существенное влияние область и высота слитка, из которого пластина вырезана [7].

Основные характеристики исследованных образцов суммированы в табл. 1.

Заключение

Таким образом, в результате первых экспериментов изготовлены образцы солнечных элементов по НТ на пластинах mono-like со временем жизни неосновных носителей заряда равным около 400 мкс и максимальным КПД – 19,48%. На контрольных образцах на основе Cz кремния параметр превышал 2 мс (КПД 22,89%). Процесс изготовления солнечных элементов был идентичен для всех образцов, спектры отражения согласуются, таким образом, разница в характеристиках связана с качеством объемного материала. Для достижения лучших результатов необходимо использовать пластины mono-like более высокого качества, либо применять процедуру геттерирования для нейтрализации объемных рекомбинационных центров. Согласно литературным данным [8-10] подобранный рецепт геттерирования может способствовать повышению времени жизни неосновных носителей заряда в несколько раз, например, с 400 до 1600 мкс для пластин *n*-типа [7].

В 2018 г. ТНЦ ТПТ продолжит работу по улучшению качественных характеристик ячеек и модулей. В марте пройдены испытания солнечных модулей Nevel в условиях экстремально низких температур (–60°C), что открывает перспективу арктического применения. В дорожной карте НТЦ установлено улучшение КПД ячейки до 23%.

Научный потенциал НТЦ будет расширяться за счет сотрудничества с ведущими российскими и зарубежными научными центрами и компаниями, проявляющими заинтересованность в развитии технологии тонкопленочных солнечных модулей. На сегодняшний день договоренности о сотрудничестве достигнуты с Mayer Burger (Германия, Швейцария), INES (Франция), Fraunhofer (Германия), Singulus Technologies (Германия), Санкт-Петербургским государственным электротехническим университетом и Санкт-Петербургским государственным университетом.

* * *

Работа проводилась при поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договор №205ГРНТИС5/35920 от 07.08.2017).

Список использованных источников

1. A. Louwen et al. Solar Energy Materials & Solar Cells 147 (2016) 295-314.
2. International Technology Roadmap of Photovoltaic (ITRPV). Results 2016, including maturity report. Eighth Edition, 2017
3. D. Adachi, J. L. Hernández, and K. Yamamoto, Impact of carrier recombination on fill factor for large area heterojunction crystalline silicon solar cell with 25,1% efficiency//Applied Physics Letters, 107(23): 233506, 2015.
4. Taguchi et al. 24,7% Record efficiency HIT solar cell on thin silicon//IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 4, No. 1, January 2014, pp. 96-99.
5. Crystal Growth Technology/Edited by H. J. Scheel and T. Fukuda, 2003 John Wiley & Sons, Ltd.
6. F. Jay et al. Advanced process for n-type mono-like silicon a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with 21.5% efficiency//Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 130, 2014, pp. 690-695.
7. R. Cabal, B. Grange, L. Bounaas, R. Monna, N. Plassat, E. Pihan, Y. Veschetti. «20% pert technology adapted to n-type monolike silicon:simplified process and narrowed cell efficiency distribution»//29th EU PVSEC and Exhibition, 648-652.
8. J. S. Kang, D. K. Schroder. «Gettering in silicon»//J. Appl. Phys. 65, 2974 (1989).
9. Sieu Pheng Phang et al 2017 Jpn. J. Appl. Phys. 56 08MB10.
10. Hyomin Park, Sung Ju Tark et al. «Effect of the Phosphorus Gettering on Si Heterojunction Solar Cells»//International Journal of Photoenergy, Volume 2012, Article ID 794876, 7 p.

High efficiency heterojunction solar cells based on quasi-mono-crystal silicon wafers

V. N. Verbitskii, junior researcher, Ioffe institute.

I. A. Nyapshaev, PhD, senior process engineer, R&D Center TFTE LLC.

D. A. Andronikov, PhD, chief process engineer, R&D Center TFTE LLC.

D. V. Zhilina, technical support specialist, R&D Center TFTE LLC.

A. V. Semenov, PhD, senior process engineer, R&D Center TFTE LLC.

A. S. Abramov, PhD, head of photovoltaics department, R&D Center TFTE LLC.

E. I. Terukov, doctor of technical sciences, professor, deputy director for science, R&D Center TFTE LLC.

D. L. Orekhov, PhD, CEO, R&D Center TFTE LLC.

Heterojunction solar cells based on mono-like silicon wafers (*n*-type, 244,2 cm²) grown by directional solidification were made. Mono-crystal fraction with crystallographic orientation (100) was more than 95% of the surface of wafer. Solar cells were manufactured on the basis of industrial technology developed in R&D center TFTE for monocrystalline silicon wafers (Cz). Solar cell conversion efficiency on mono-like wafers reached 19,48%. For monocrystalline silicon wafer (Cz) produced as a reference sample in the same process conversion efficiency was 22,89%.

Keywords: solar energy, solar module, thin-film technology, amorphous silicon, heterojunction solar cell.