



УДК 621.383.51

В. П. Афанасьев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Е. И. Теруков

Научно-технический центр тонкопленочных технологий
при Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН

Тонкие пленки аморфного гидрогенизированного кремния и солнечные модули на их основе

Солнечная энергетика является одной из самых перспективных отраслей возобновляемой энергетики. В России массовое развитие солнечной энергетики связано с организацией запущенного в феврале 2015 г. на ООО "Хевел" производства тонкопленочных солнечных модулей на основе аморфного кремния, которое призвано создать полноценную высокотехнологичную отрасль солнечной энергетики как альтернативу традиционным источникам энергии. Для поддержки и развития этого производства при Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе в 2012 г. начало функционировать ООО "Научно-технический центр тонкопленочных технологий", главная задача которого – улучшение основных параметров солнечных модулей на основе аморфного кремния в интересах ООО "Хевел".

Солнечные модули, тонкопленочные технологии, аморфный кремний, гетеропереход, аморфный/монокристаллический кремний, подготовка кадров для солнечной энергетики

Характерной особенностью деятельности человечества в начале XXI в. является быстрый рост энергопотребления. Одним из самых перспективных экологически чистых возобновляемых источников энергии следует признать солнечную энергетику, обеспечивающую прямое преобразование солнечной энергии в электрическую [1], [2]. За последние 20–30 лет темпы роста солнечной энергетики составляют в среднем примерно 25 %. Такой интенсивный рост обеспечивается как за счет расширения производства, так и за счет разработки новых структур и принципов работы фотоэлектрических преобразователей. Количество солнечной энергии, поступающей на Землю, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и других энергетических ресурсов, в том числе возобновляемых. По существующим оценкам, солнечной энергии, поступающей на Землю каждую минуту, достаточно для того, чтобы удовлетворить текущие потребности человечества в энергии в течение года. Сегодня в мире установлено 140 ГВт мощностей солнечной энергетики при ежегодных темпах

прироста 30...40 ГВт. Их основу составляют солнечные элементы (СЭ) на кристаллическом (41 %) и поликристаллическом (45 %) кремнии. Оставшуюся нишу занимают тонкопленочные СЭ на основе a-Si:H, CdTe и CuInSe.

За рубежом развитие фотоэнергетики (ФЭ) подкрепляется целевыми инвестициями, что обеспечило взрывной рост количества солнечных электростанций, который в последние 10 лет составил 40–70 % в год. Например, в странах Европы, США и Японии реализуется программа "Один миллион солнечных крыш" [3], включающая субсидии государства на установку солнечных модулей на крышах зданий общей мощностью до 3,5 кВт на одну семью и присоединение к электрической сети через инвертор и электрический счетчик.

Благодаря этому к 2014 г. производственные мощности промышленного изготовления СЭ превысили 40 ГВт в год, а цены на фотовольтаические модули за последние три года упали в 2–3 раза. Для того чтобы ФЭ могла вносить значимый вклад в обеспечение человечества энергией, необходимо решить две задачи: во-первых, нара-

тить производство СЭ и довести ФЭ-системы до терраваттного уровня; во-вторых, снизить цену на электроэнергию, вырабатываемую солнечными станциями до приемлемого, конкурентоспособного уровня [4], [5]. С обеими задачами фотоэнергетика планомерно справляется.

Локомотивом солнечной энергетики являются СЭ из кристаллического кремния (с-Si). В настоящее время более 90 % всего объема производства полупроводниковой солнечной фотоэнергетики составляют плоскостные модули из кристаллического кремния. Прогноз показывает, что в среднесрочной перспективе альтернативы кремнию не будет.

В связи с бурным развитием СЭ цена на поликремний – основу для получения мульти- и монокремния – в 2006–2008 гг. возросла с 200 до 450 долл/кг. Ситуация на рынке привела к резкому повышению интереса к тонкопленочным технологиям на основе a-Si:H, CdTe и CuInSe. Именно в тот период было принято решение о строительстве в России завода по производству тонкопленочных СЭ на основе аморфного кремния (a-Si). Инициаторами проекта выступили РОСНАНО и ГК "Ренова". Строительство завода должно было способствовать зарождению в нашей стране новой высокотехнологичной отрасли экономики – солнечной энергетики.

Построенный "под ключ" на оборудовании и по технологии швейцарской фирмы "Орликон Солар" завод характеризовался следующими параметрами: объем производства порядка 130 мВт, КПД модуля – 8,9 %, себестоимость – около 0,7 долл/Вт.

В России массовое развитие солнечной энергетики связано с организацией производства тонкопленочных солнечных модулей на основе аморфного кремния на ООО "Хевел" (г. Новочебоксарск), запущенного в феврале 2015 г. Для совершенствования имеющихся технологий планировалось разработать трехкаскадный солнечный модуль, улучшить оптическое поглощение света, повысить качество активных слоев в каскадах и гетеропереходах. В результате ожидалось увеличение КПД модулей до 14–15 %.

Для поддержки данного производства акционерами было принято решение создать на базе Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН ООО "НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А. Ф. Иоффе". Открытие научно-технического центра (НТЦ) состоялось в феврале 2012 г. НТЦ размещается на территории института в Санкт-Петербурге, а завод находится в Новочебоксарске (респ. Чувашия). Учредителем НТЦ является ООО "Хевел".

Резкое снижение цен на кристаллический кремний с 300 до 20 долл/кг за последние пять лет привело к необходимости модернизации действующего производства ООО "Хевел" под новую конкурентоспособную продукцию на базе существующих технологических линий завода.

Решение, апробированное в НТЦ на технологическом оборудовании, идентичном имеющемуся на ООО "Хевел", состоит в использовании технологии изготовления СЭ на основе кристаллического кремния, базирующейся на формировании гетеропереходов a-Si:H/c-Si/a-Si:H [4]. В условиях НТЦ, близких к производству, КПД составил 21 %, что позволяет выпускать конкурентоспособную продукцию. Правительство РФ включило модернизацию ООО "Хевел" в список приоритетных задач.

В НТЦ установлена пилотная линия пятого поколения по изготовлению микроморфных тонкопленочных солнечных модулей. Технологическое и метрологическое оборудование позволяет практически полностью воспроизводить заводской процесс изготовления тонкопленочных солнечных модулей. Если на заводе реализована автоматизированная линия, где человек практически не участвует в процессе производства, то в НТЦ каждая операция выполняется отдельно на оборудовании, аналогичном заводскому. Поэтому все результаты по улучшению параметров модулей могут быть легко внедрены на заводе. Такая организация работы позволяет сократить сроки передачи инноваций, разработанных в НТЦ или в другом исследовательском центре, путем масштабирования результатов в условиях, максимально приближенных к производственным.

НТЦ был поддержан фондом "Сколково". В рамках гранта получено финансирование на приобретение современного лабораторного оборудования, позволяющего прорабатывать научные идеи и случаи получения положительного результата масштабировать их на оборудовании "Орликон Солар". НТЦ является центром коллективного пользования "Сколково" и предоставляет на льготных условиях резидентам "Сколково" свое оборудование для реализации их проектов.

Технологический процесс изготовления микроморфного тонкопленочного модуля начинается с мойки стекла размером $1.1 \times 1.3 \text{ м}^2$. Далее идут операции изготовления модуля: контроль качества мойки стекла, напыление контактов, лазерное скрайбирование (операция применяется трижды для формирования архитектуры солнечного

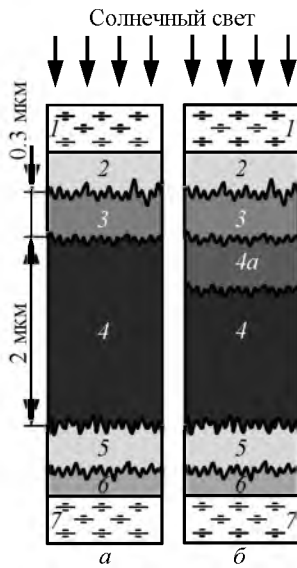


Рис. 1

модуля), напыление фотоактивных слоев, нанесение металлических контактов, ламинирование и измерение параметров готового модуля.

Технология получения пленок аморфного и микрокристаллического кремния реализуется в реакторе плазмохимическим осаждением из газовой фазы. Суть процесса заключается в разложении рабочего газа в плазме тлеющего разряда и осаждении тонкой пленки на стеклянной подложке.

На рис. 1, а изображен двухкаскадный микроморфный модуль, состоящий из двух *p-i-n*-переходов на основе аморфного (a-Si:H) (3) и микрокристаллического гидрогенизированного (4) кремния (μc-Si:H). Подложкой для нанесения тонких пленок служит лицевое стекло (1), через которое при эксплуатации в модуль поступает солнечная энергия. На это стекло последовательно наносятся лицевой контакт ZnO (2), слой a-Si (3) и μc-Si:H (4). Тыльный слой ZnO (5) не только обеспечивает съем электрической энергии, но также совместно с последующим слоем (6) служит оптическим отражателем и обеспечивает монолитную конструкцию модуля. Конструкция завершается тыльным стеклом (7), обеспечивающим герметизацию всего модуля. Такая конструкция позволяет более полно использовать солнечный спектр и превращать свет в электрическую энергию: поглощение коротковолновой части спектра обеспечивается в основном переходом на основе a-Si:H

(рис. 2, а, кривая 1), длинноволновой – переходом на основе μc-Si:H (рис. 2, а, кривая 2). Таким образом, спектральная характеристика модуля в целом (рис. 2, а, кривая 3) перекрывает весь видимый спектр и захватывает ближние участки ультрафиолетового и инфракрасного излучений. Переход к двухслойной конструкции позволил повысить КПД до 10 % при стартовом значении 9 %.

Основная задача производства – улучшение качества продукции (в рассматриваемом случае увеличение КПД модуля) и снижение ее себестоимости. Исходя из этого, была сформулирована "дорожная карта" и заключен ряд НИР и НИОКР с ООО "Хевел", направленных на решение этих задач.

Необходимо было усовершенствовать полученную от фирмы "Орликон Солар" технологию, а именно добиться улучшения качества активных слоев в гетерокаскадах и самих гетеропереходах, усовершенствования процессов оптического поглощения света в фотоактивных слоях модуля, уменьшения потерь света, связанных с отражением света от стекла, разработать антиотражающие покрытия и т. д. Целью было получить КПД модуля порядка 15 %. Основное увеличение КПД достигалось за счет добавления к двум каскадам третьего (рис. 1, б, 4а), выполненного из сплава аморфного кремния с германием (a-Si:Ge), который позволяет еще эффективнее использовать солнечный спектр. В таком модуле коротковолновая часть спектра воспринимается в основном слоем 3 (рис. 2, б, кривая 1), середина спектра – новым слоем 4а (кривая 2), а длинноволновая – слоем 4 (кривая 3). Общая спектральная характеристика модуля (кривая 4) показывает повышение эффективности преобразования световой энергии, которое должно достигать 17 %.

Рост мирового рынка фотовольтаники привел к снижению цены на поликристаллический кремний, что вызвало снижение интереса к тонкопленочным технологиям.

Основная задача производства – улучшение качества продукции (в рассматриваемом случае увеличение КПД модуля) и снижение ее себестоимости. Исходя из этого, была сформулирована "дорожная карта" и заключен ряд НИР и НИОКР с ООО "Хевел", направленных на решение этих задач.

Необходимо было усовершенствовать полученную от фирмы "Орликон Солар" технологию, а именно добиться улучшения качества активных слоев в гетерокаскадах и самих гетеропереходах, усовершенствования процессов оптического поглощения света в фотоактивных слоях модуля, уменьшения потерь света, связанных с отражением света от стекла, разработать антиотражающие покрытия и т. д. Целью было получить КПД модуля порядка 15 %. Основное увеличение КПД достигалось за счет добавления к двум каскадам третьего (рис. 1, б, 4а), выполненного из сплава аморфного кремния с германием (a-Si:Ge), который позволяет еще эффективнее использовать солнечный спектр. В таком модуле коротковолновая часть спектра воспринимается в основном слоем 3 (рис. 2, б, кривая 1), середина спектра – новым слоем 4а (кривая 2), а длинноволновая – слоем 4 (кривая 3). Общая спектральная характеристика модуля (кривая 4) показывает повышение эффективности преобразования световой энергии, которое должно достигать 17 %.

Рост мирового рынка фотовольтаники привел к снижению цены на поликристаллический кремний, что вызвало снижение интереса к тонкопленочным технологиям.

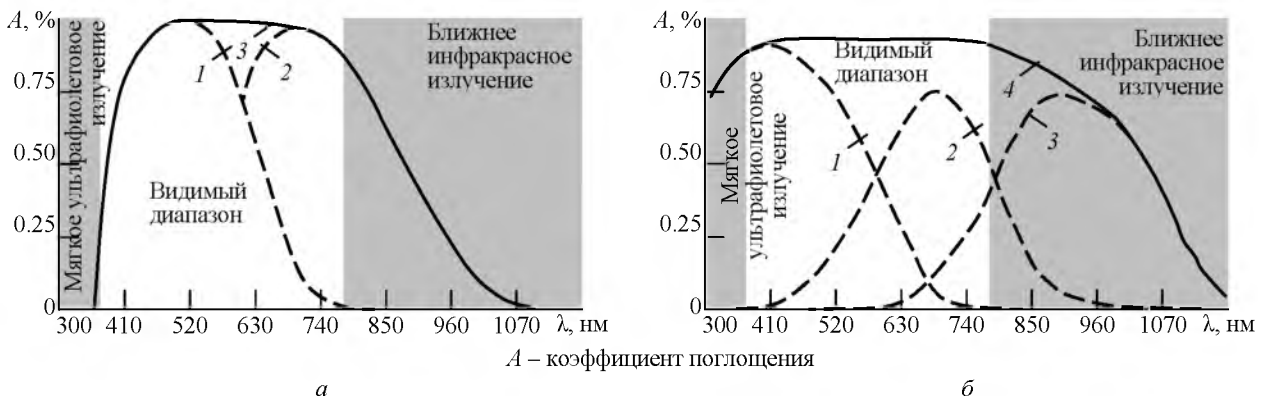


Рис. 2

ночным технологиям, и весь мир начал заниматься производством солнечных модулей для большой энергетики на кристаллическом кремнии. Возникла дилемма: закрывать завод, в который вложено более 20 млрд р., или найти выход из этой ситуации. На этом этапе пригодились сделанные ранее научно-технические наработки Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН.

Для решения указанной задачи было предложено использовать в технологии гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на монокристаллическом кремнии плазмохимические реакторы. Эти ФЭП занимают нишу высокоэффективных СЭ с КПД более 20 %, их рынок начал формироваться с 2012 г., с момента истечения срока патента фирмы "Sunyo" – единственного производителя этих модулей в мире. ООО "Хевел" располагает современными плазмохимическими установками КАИ 1200, которые используются для нанесения пленок аморфного гидрогенизированного кремния и составляют 60 % стоимости завода. Реализация высокоэффективного, конкурентоспособного СЭ с использованием этого оборудования позволит модернизировать производство и вывести ООО "Хевел" на современный уровень. Поэтому было предложено использовать плазмохимические реакторы в технологии гетероструктурных высокоэффективных СЭ на монокристаллическом кремнии.

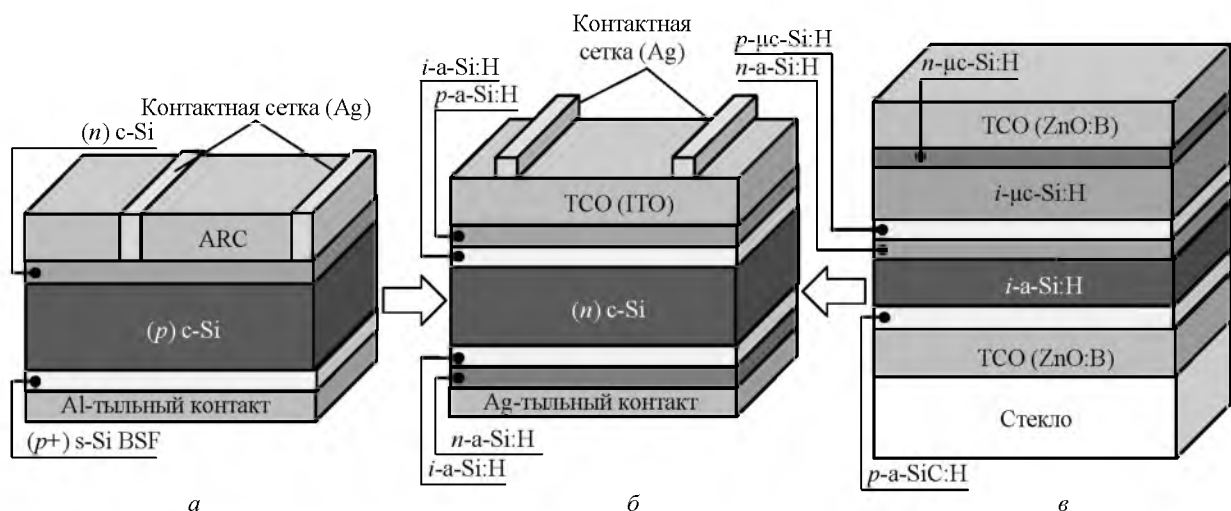
На рис. 3 схематически представлена конструкция гетероструктурного СЭ (б) и приведено его сравнение с классической конструкцией ФЭП на основе кристаллического кремния (а) и конструкцией тонкопленочного ФЭП (в). В этом случае в плазмохимический реактор помещается не стеклянная подложка, а кремниевые пластины, и на их поверхность методом плазмохимического

осаждения наносятся тонкие легированные слои аморфного гидрогенизированного кремния, формирующие на ней гетероконтакт. При этом типы легирования кристаллического кремния и аморфных слоев задают омический или барьерный контакт на гетероинтерфейсе.

Описанной структуры оказалось достаточно для получения модуля с эффективностью более 20 % на промышленном реакторе, что находится на уровне лучших мировых результатов в области технологии солнечных ФЭП на кристаллическом кремнии. Наряду с высокой эффективностью данный ФЭП обладает более низким температурным коэффициентом за счет более высокого барьера на интерфейсе по сравнению с классическим кремниевым $p-n$ -переходом, полученным диффузией или имплантацией. Это значит, что при высоких температурах эксплуатации он эффективен не более, чем классический кристаллический модуль.

Предложенная модернизация обеспечивает высокий КПД модуля, низкотемпературный процесс формирования гетероперехода, оптимальные характеристики при его эксплуатации и цену на ФЭП, сравнимую с классической кремниевой технологией (таблица). Необходимо отметить, что если конечным продуктом тонкопленочной технологии был модуль, то при переходе на гетероструктурную технологию продуктом является не только модуль, но и ФЭП, из которых могут собираться модули на линиях сборки в месте локализации солнечных энергоустановок.

На рис. 4 представлена технология формирования гетероструктурных СЭ на основе кристаллического кремния. Подложка подвергается химической обработке с целью структурирования и очистки поверхности. Затем методом плазмохи-



б
Рис. 3

Основные характеристики	Тонкопленочные модули на основе a-Si/ μ c-Si (tandem)	Модули на основе гетероперехода a-Si/ c-Si (HIT)
Эффективность модуля, %	9...11	18...20
Температурный коэффициент мощности, %/К	0.3	0.3
Световая деградация	Есть	Отсутствует
Суммарная производительность линии "Хевел", МВт/г.	86	90...200
Продукция завода	Модули	Модули, ФЭП
Доля на рынке, %	2...3	1...2
Себестоимость модуля, евро/Вт	0.60...0.80	0.48...0.52



Рис. 4

Тыльный контакт обеспечивается напылением слоев ITO и серебра. Технологический процесс состоит из семи операций, что выгодно отличает эту технологию от технологии IBC фирмы "Sun Power", позволяющей получать высокоэффективный, односторонний кристаллический ФЭП такой же эффективности, но с помощью 18 операций [6].

Понимание технологии и физики процессов, а также разработки ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН в

мического осаждения формируются омический и гетерокontakt, состоящие из нанослоев собственного и легированного аморфного кремния. Токосъем обеспечивается напылением на лицевую сторону прозрачного проводящего покрытия (ITO) и трафаретной печати серебряной контактной

области физики аморфных полупроводников позволили в кратчайшие сроки добиться успеха. В течение года в ООО "Хевел" на промышленной установке была получена эффективность более 20 %, причем не в условиях лабораторного эксперимента, а в результате разработки в НТЦ технологического процесса, готового к передаче в производство.

Когда формируется новая отрасль промышленности, необходимо заниматься подготовкой кадров. С этой целью на базе кафедры квантовой электроники и оптико-электронных приборов (КЭОП) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ) "ЛЭТИ" в 2011 г. была открыта магистерская программа "Солнечная гетероструктурная фотоэнергетика". На протяжении пяти лет велась подготовка инженеров-технологов, метрологов и инженеров-исследователей. В 2013–2015 гг. состоялось три выпуска магистров по новой программе. Большинство выпускников защитили магистерские диссертации на "отлично", из них восемь человек получили дипломы с отличием, что свидетельствует о высокой степени мотивированно-



Рис. 5

Основные характеристики	Тонкопленочные модули на основе a-Si/ μ c-Si (tandem)	Модули на основе гетероперехода a-Si/ c-Si (HIT)
Эффективность модуля, %	9...11	18...20
Температурный коэффициент мощности, %/К	0.3	0.3
Световая деградация	Есть	Отсутствует
Суммарная производительность линии "Хевел", МВт/г.	86	90...200
Продукция завода	Модули	Модули, ФЭП
Доля на рынке, %	2...3	1...2
Себестоимость модуля, евро/Вт	0.60...0.80	0.48...0.52



Рис. 4

мического осаждения формируются омический и гетероконтакт, состоящие из нанослоев собственного и легированного аморфного кремния. Токосъем обеспечивается напылением на лицевую сторону прозрачного проводящего покрытия (ITO) и трафаретной печати серебряной контактной

сетки. Тыльный контакт обеспечивается напылением слоев ITO и серебра. Технологический процесс состоит из семи операций, что выгодно отличает эту технологию от технологии IBC фирмы "Sun Power", позволяющей получать высокоэффективный, односторонний кристаллический ФЭП такой же эффективности, но с помощью 18 операций [6].

Понимание технологии и физики процессов, а также разработки ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН в

области физики аморфных полупроводников позволили в кратчайшие сроки добиться успеха. В течение года в ООО "Хевел" на промышленной установке была получена эффективность более 20 %, причем не в условиях лабораторного эксперимента, а в результате разработки в НТЦ технологического процесса, готового к передаче в производство.

Когда формируется новая отрасль промышленности, необходимо заниматься подготовкой кадров. С этой целью на базе кафедры квантовой электроники и оптико-электронных приборов (КЭОП) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ) "ЛЭТИ" в 2011 г. была открыта магистерская программа "Солнечная гетероструктурная фотоэнергетика". На протяжении пяти лет велась подготовка инженеров-технологов, метрологов и инженеров-исследователей. В 2013–2015 гг. состоялось три выпуска магистров по новой программе. Большинство выпускников защитили магистерские диссертации на "отлично", из них восемь человек получили дипломы с отличием, что свидетельствует о высокой степени мотивированно-



Рис. 5

сти обучающихся, основанной на тесной связи теоретического обучения с практической работой на оборудовании НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике. В настоящее время выпускники СПбГЭТУ "ЛЭТИ" успешно работают на заводе ООО "Хевел" в г. Новочебоксарске и в НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А. Ф. Иоффе в Санкт-Петербурге (рис. 5).

Учитывая возросший объем работ в образовательной сфере, СПбГЭТУ и НТЦ в 2013 г. подписали соглашение о сотрудничестве, целью которого является обеспечение высокого качества профессиональной подготовки и переподготовки специалистов в области тонкопленочной солнечной энергетики и проведение совместных научных исследований. Соглашение существенно расширяет рамки взаимодействия вуза и НТЦ в образовательной, научно-исследовательской деятельности и в развитии инфраструктуры. Например, планируется организация Центра подготовки и переподготовки специалистов по направлению "Тонкопленочная солнечная энергетика" в СПбГЭТУ с развитой лабораторной базой. С этой целью в СПбГЭТУ "ЛЭТИ" была запущена солнечная электростанция (рис. 6), на базе которой проводится цикл лабораторных работ по исследованию эффективности работы тонкопленочных солнечных модулей в условиях Санкт-Петербурга, открыта лаборатория солнечной гетероструктурной фотоэнергетики им. акад. Ж. И. Алферова (рис. 7).

Наряду с обучением студентов в СПбГЭТУ "ЛЭТИ" ведется подготовка кадров высшей квалификации по солнечной энергетике. В 2014 г. доцент кафедры КЭОП А. С. Гудовских защитил докторскую диссертацию на тему "Границы раздела в гетероструктурных фотоэлектрических преобразователях солнечного излучения". Аспирантами кафедры КЭОП А. В. Семеновым и Д. Л. Ореховым в 2015 г. защищены кандидатские диссертации на темы "Технология тонкопленочных солнечных модулей большой площади на основе аморф-

ного и микрокристаллического кремния" и "Разработка технологии гетероструктурных солнечных элементов на кристаллическом кремнии с использованием промышленных реакторов плазмохимического осаждения", результаты которых внедрены в ООО "Хевел".

В октябре 2015 г. совет директоров РОСНАНО рассмотрел и поддержал новую стратегию компании "Хевел", которая заключается в технологической модернизации завода, увеличении его мощности и развитии направления по строительству и управлению солнечными электростанциями. Технологическая линия завода будет модернизирована под производство солнечных модулей с КПД не менее 20 %, что позволит увеличить годовой объем выпуска продукции на 60 %, до 160 МВт. Новая технология изготовления СЭ – НИТ-технология (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) базируется на формировании гетероперехода при помощи тонких пленок аморфного кремния (a-Si:H), нанесенных на поверхность пластины монокристаллического кремния (c-Si). СЭ, изготовленные по такой технологии, обладают всеми преимуществами классических СЭ на основе кристаллического кремния, включая высокую эффективность, достигающую на сегодняшний день 24.7 %, что соответствует уровню рекордных величин для монокристаллического кремния. В то же время такие СЭ могут быть полностью изготовлены при низких температурах. Неоспоримым преимуществом указанной технологии является достижение высокого КПД в условиях промышленного производства.

Дополнительными преимуществами этой технологии являются низкий, по сравнению с классическими СЭ на кремнии, температурный коэф-



Рис. 6



Рис. 7

фициент снижения мощности и низкотемпературный процесс формирования таких структур, что позволяет использовать более тонкие пластины с-Si и, следовательно, обеспечить более экономный расход материала, что невозможно при использовании высоких температур вследствие деформации пластин.

Таким образом, ключевым преимуществом новой технологии является создание СЭ с высоким КПД, низкой себестоимостью, высокой стабильностью характеристик.

Основным отличием СЭ, изготовленных по НИТ-технологии, от классических СЭ на кристаллическом кремнии является наличие собственного слоя аморфного кремния. Назначение этого слоя заключается в формировании гетероперехода и пассивация дефектов на поверхности с-Si-пластин [4], которая необходима для снижения рекомбинации неравновесных носителей через поверхностные состояния. Недостаточная пассивация поверхности с-Si-пластин приводит к снижению напряжения холостого хода, что влечет за собой снижение эффективности СЭ. Таким образом, качество пассивации поверхности с-Si-пластин является одним из наиболее критических параметров для создания высокоэффективных СЭ на основе НИТ-технологии. Оценка качества пассивации осуществляют измерением времени жизни неравновесных носителей заряда, значение которого для создания высокоэффективных СЭ должно быть более 1 мс [7].

В связи с переходом ООО "Хевел" на принципиально новую технологию изготовления СЭ встал вопрос не только о существенной модернизации производства, но и переподготовке специалистов, знающих новые технологии.

В связи с планируемым преобразованием тонкопленочного производства в линию гетероструктурных солнечных модулей на основе кристаллического кремния ООО "Хевел" и ООО "НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А. Ф. Иоффе" обратились в СПбГЭТУ "ЛЭТИ" с просьбой организовать при поддержке Фонда инфраструктурных и образовательных программ "РОСНАНО" подготовку и переподготовку персонала для перехода на новый вид продукции. Предлагается подготовить и реализовать образовательную программу профессиональной подготовки и переподготовки пилотной группы производственно-технического персонала в количестве 25 человек в области НИТ-технологии в объеме 300...500 ч.

Вследствие удаленности потенциального заказчика в СПбГЭТУ "ЛЭТИ" внедряются дистанционные образовательные технологии. Применение электронного обучения обеспечивает возможность обучения или повышения квалификации непосредственно на рабочем месте без отрыва от производства. Наряду с этим в последние годы существенно расширился круг вузов, занимающихся подготовкой кадров по возобновляемым источникам энергии, вследствие чего возрос спрос на повышение квалификации преподавателей по этому направлению. В СПбГЭТУ "ЛЭТИ" разработан ряд дистанционных образовательных программ, таких как "Тонкопленочная солнечная гетероструктурная фотовольтаика" и "Технология и диагностика тонкопленочных солнечных модулей на основе кремния", предусматривающих следующие образовательные технологии:

- интерактивные дистанционные занятия;
- контрольные мероприятия;
- выполнение индивидуальных практических заданий;
- интерактивные виртуальные лабораторные работы с удаленным доступом к оборудованию;
- работа с электронными образовательными ресурсами;
- консультации.

Подготовлен и размещен на сайте Фонда инфраструктурных и образовательных программ в системе электронного обучения Blackboard электронный учебно-методический комплекс для подготовки специалистов для производства тонкопленочных солнечных модулей на основе пленок аморфного и микрокристаллического кремния. Регулярное общение преподавателей с инженерно-техническим персоналом в процессе повышения квалификации благотворно сказывается на уровне их подготовки, обеспечивает углубленное знание предмета.

Следующим шагом в развитии образовательных программ в области солнечной энергетики является подготовка англоязычной программы по солнечной гетероструктурной энергетике, которая предусматривает проведение всех видов занятий на английском языке. Планируется начать подготовку специалистов в англоязычной группе с 1 сентября 2016 г. Считаем, что знание терминологии и более свободное владение языком в профессиональной области позволит специалистам более оперативно знакомиться с последними разработками, которые, как правило, представлены в англоязычной литературе.

Таким образом, СПбГЭТУ "ЛЭТИ" совместно со своими стратегическими партнерами на комплексной основе совершенствует развитие образовательных программ подготовки и переподго-

товки специалистов для современного производства фотоэлектрических преобразователей и регулярно проводит их адаптацию с учетом новых разработок в области солнечной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортов В. Е., Попель О. С. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2011. 168 с.
2. Первый Международный форум "Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности" (REENFOR-2013). URL: <http://www.reenfor.org/> (дата обращения 06.05.2016).
3. <http://www.megawt.ru/17-programma-ssha-million-solnechnyh-krysh.html> (Дата обращения 29.05.2016.)
4. Гудовских А. С. Границы раздела в солнечных элементах на основе гетероструктур. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. 159 с.

5. Tao C. S., Jiang J., Tao M. Natural Resource Limitations to Terawatt-Scale Solarcells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011. Vol. 95. P. 3176–3180.
6. Solar cell efficiency tables / M. F. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop // *Progress in Photovoltaics: Research and application*. 2014. Vol. 22. P. 701–710.
7. Sinton R. A., Cuevas A. Contactless Determination of Current-Voltage Characteristics and Minority-Carrier Lifetimes in Semiconductors from Quasi-Steady-State Photoconductance Data // *Appl. Phys. Lett.* 1996. Vol. 69, iss. 17. P. 2510–2512.

V. P. Afanasiev
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

E. I. Terukov
Scientific and Technical Center of Thin-Film Technologies at Ioffe Institute of RAS

Thin Films of Amorphous Hydrogenated Silicon and Solar Modules based on them

Solar energy is one of the most promising sectors of renewable energy. In Russia the mass development of solar energy in connection with the organization launched in February 2015 at "Hevel" production of thin film solar modules based on amorphous silicon, which is intended to create a full-fledged high-tech industry of solar energy as an alternative to traditional energy sources. For support and development of this production open JSC "Scientific and technical center of thin film technology" begin operation at the Ioffe Institute of RAS in 2012, whose main task – improvement of the basic parameters of Solar modules based on amorphous silicon in the interests of "Hevel".

Solar Modules, Thin Film Technologies, Amorphous Silicon, Monocrystal Silicon, Heterojunction, Training for Solar Energy
Статья поступила в редакцию 22 апреля 2016 г.