

---

---

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,  
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

---

---

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ (ОБЗОР)**

© 2021 г. О. С. Попель<sup>а</sup>, \*, А. Б. Тарасенко<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

\*e-mail: O\_Popel@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2021 г.

После доработки 10.03.2021 г.

Принята к публикации 17.03.2021 г.

Фотоэлектрическая энергетика по сравнению со всеми другими секторами возобновляемой энергетики развивается в мире наиболее быстрыми темпами, демонстрируя в результате совершенствования технологий и роста объемов производства значительное снижение как удельных капитальных затрат в расчете на единицу установленной мощности энергоустановок, так и приведенной стоимости генерируемой ими электроэнергии с одновременным повышением коэффициента использования установленной мощности (КИУМ). В статье представлен краткий обзор разработок, направленных на улучшение характеристик фотоэлектрических преобразователей энергии, и тенденций развития технологий кремниевой фотоэнергетики в последние годы. Рассматриваются особенности, достоинства и недостатки технологий производства кремниевых фотоэлектрических преобразователей с использованием PERC-технологии (passivated emitter and rear contact – пассивация области эмиттера и тыльного контакта), гетероструктурных модулей на основе НТТ-технологии (heterojunction with intrinsic thin layer – гетероструктурный переход на основе монокристаллического и аморфного кремния с внутренним тонким изолирующим слоем), выноса  $p-n$ -перехода на тыльную сторону пластины – IBC-технологии (interdigitated back contacts – переплетенные тыльные контакты), фрагментированных модулей, многопереходных некремниевых фотоэлектрических преобразователей. Отмечается, что в связи с приближением достигаемого КПД кремниевых фотоэлектрических преобразователей к теоретическому пределу приобретают актуальность различные методы повышения поступления солнечной радиации на поверхность модуля – концентрирование солнечного излучения, использование систем слежения за Солнцем, двусторонние модули. Расширение производства двусторонних модулей, гетеропереходных модулей на основе кремния, а в перспективе tandem-структур с использованием перовскитоподобных материалов требует модификации методик прогнозирования выработки фотоэлектрических модулей с учетом их спектральной чувствительности. Представлен краткий обзор состояния развития фотоэлектрической энергетики в России. Обсуждаются проблемы интеграции фотоэлектрических станций в сеть, включая использование накопителей электрической энергии, гибкое тарифное регулирование, а в частном секторе – стимулирование потребления энергии внутри домохозяйства, которое ее произвело. Актуальность данных проблем для России будет нарастать по мере увеличения доли солнечной генерации в энергосистеме. Отмечается, что конкурентоспособные на мировом рынке цены на фотоэлектрические модули могут быть достигнуты прежде всего благодаря увеличению объемов их производства до 1 ГВт в год и более.

*Ключевые слова:* фотоэлектрический преобразователь, технологии производства, passivated emitter and rear contact – PERC, heterojunction with intrinsic thin layer – НТТ, interdigitated back contacts – IBC, двусторонний модуль, фотоэлектрические станции, фотоэнергетика в России, меры стимулирования

**DOI:** 10.1134/S0040363621100039

За последние 20 лет возобновляемая энергетика, базирующаяся на использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ), прежде всего солнечной энергии, энергии ветра и энергии биомассы, доказала свою состоятельность и заняла устойчивое место в мировой энергетике, демонстрируя значительные успехи в улучшении технико-экономических показателей и повышении конкурентоспособности в сравнении с энергетически-

ми технологиями, основанными на использовании традиционных органических топлив.

По данным международных энергетических агентств, начиная с 2012 г. ввод энергоустановок на ВИЭ стал устойчиво превышать ввод традиционных. В 2020 г. на ВИЭ пришлось 2/3 вновь введенных электрогенерирующих мощностей в мире. Суммарная установленная мощность энерго-

**Таблица 1.** Усредненные удельные капитальные затраты, приведенная стоимость электроэнергии и коэффициенты использования установленной мощности (КИУМ) в 2010 и в 2019 гг. для различных технологий возобновляемой энергетики (данные IRENA [1])

Технология	Капитальные затраты, дол/кВт		Приведенная стоимость, дол/кВт		КИУМ	
	2010	2019	2010	2019	2010	2019
Фотоэлектрические установки	4600	1200	0.370	0.085	0.140	0.180
Солнечные тепловые электростанции	8800	5200	0.340	0.190	0.350	0.450
Ветроустановки:						
береговые	1900	1500	0.084	0.055	0.270	0.340
морские	4600	4400	0.160	0.130	0.380	0.430
Биоэнергетические установки	2600	2100	0.074	0.061	0.720	0.780
Геотермальные установки	2500	4000	0.048	0.072	0.870	0.840
Малые ГЭС	1200	1500	0.041	0.048	0.440	0.470

установок на новых технологиях использования ВИЭ (без учета объектов гидроэнергетики) сегодня приблизилась к 1.5 ТВт – более 20% суммарной мощности всех действующих в мире энергоустановок (около 7 ТВт), в то время как 10 лет назад она составляла всего 300 ГВт. Приоритетное развитие возобновляемая энергетика получает, как правило, в регионах и странах – импортерах энергоресурсов и странах, активно реализующих экологические программы, направленные на снижение выбросов в атмосферу парниковых газов. Далее представлены лидеры по введению в 2019 г. мощностей на технологиях использования ВИЭ, ГВт:

Китай .....	420
ЕС .....	350
В том числе Германия .....	120
США .....	200
Индия .....	80
Великобритания .....	45

Во многих странах выработка электрической энергии на ВИЭ уже составляет значительную долю, %:

Дания .....	52
Уругвай .....	36
Ирландия .....	30
Германия .....	27
Португалия .....	23
Испания .....	22
Греция .....	22
Великобритания .....	21

Активные научно-исследовательские и конструкторские работы в области возобновляемой энергетики (ВЭ) в этих странах начались в конце

1970-х годов, после так называемого нефтяного энергетического кризиса. Широкое практическое применение новых технологий энергетического использования ВИЭ началось в начале 2000-х годов и в большинстве стран проходит при значительной финансовой государственной поддержке. Постепенно она сокращается, и сегодня многие проекты в области ВЭ реализуются на аукционных принципах, практически без поддержки государства.

Сравнительные усредненные технико-экономические показатели различных технологий производства электроэнергии с использованием ВИЭ в 2010 и 2019 гг. по данным Международного агентства по возобновляемой энергетике IRENA приведены в табл. 1.

Среди широкого спектра энергоустановок на ВИЭ фотоэлектрические установки развиваются наиболее быстрыми темпами, демонстрируя в результате совершенствования технологий и роста объемов производства значительное снижение как удельных капитальных затрат в расчете на единицу установленной мощности, так и приведенной стоимости генерируемой ими электроэнергии с одновременным повышением КИУМ. Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что за последние 10 лет стоимость фотоэлектрических установок снизилась в среднем в 4 раза, стоимость 1 кВт · ч – почти в 4.5 раза при росте КИУМ примерно на 30%. Сегодня суммарная установленная мощность фотоэлектрических систем (по состоянию на 2019 г.) в мире составляет около 600 ГВт, увеличиваясь ежегодно более чем на 100 ГВт. Так, по данным IRENA, в 2019 г. в Китае было введено фотоэлектрических установок общей мощностью 44 ГВт, в Индии – 10.8 ГВт, в США – 10.7 ГВт, в Японии – 6.7 ГВт, в Австралии – 3.8 ГВт.

В России, энергетически независимом государстве и крупном экспортере ископаемых энер-

горесурсов, понимание необходимости развивать перспективные технологии использования ВИЭ проявилось позднее, чем в других странах. Разработка законодательной базы поддержки возобновляемой энергетики в РФ началась лишь в 2007 г., а реализация государственной программы — с 2015 г. Основными целями программы являются:

накопление в стране научно-технологических компетенций по перспективным технологиям использования ВИЭ и недопущение технологического отставания от передовых стран в этой быстро развивающейся области энергетики;

создание отечественных наукоемких промышленных производств основных компонентов возобновляемой энергетики с высокой долей локализации производств, ориентированных в том числе на экспорт конкурентоспособной продукции;

выработка предпосылок для уже сегодня экономически эффективного применения энергоустановок на ВИЭ для энергоснабжения удаленных от сетей централизованного энергоснабжения потребителей (Арктика, Крайний Север, Дальний Восток и др.).

По своим масштабам эта программа весьма скромна. В процессе ее реализации за последние годы в стране введены десятки объектов ВЭ (в основном солнечные электростанции) суммарной установленной мощностью около 1 ГВт. К 2035 г. предполагается ввести в различных регионах страны около 3 ГВт ветровых, 2,2 ГВт солнечных электростанций и около 200 МВт малых ГЭС. При этом доля выработки электрической энергии объектами возобновляемой энергетики в энергобалансе России составит всего около 1,5%.

Данная работа является логическим продолжением технологических обзоров авторов 2015 г. [2, 3]. Произошедшие за истекший период изменения позволяют уточнить взгляды на имевшиеся в то время тенденции и прогнозы. При этом отмеченный в предыдущих обзорах тренд, связанный с доминированием на рынке модулей из кристаллического кремния, остается актуальным и в настоящее время. Благодаря дальнейшему снижению цен на исходное сырье, использование монокристаллического кремния постоянно расширяется. Относительно недолгий период дефицита поликристаллического кремния (поликремния) достаточной степени чистоты для использования в фотоэнергетике, так называемого “солнечного качества” (2005–2009 гг.), ознаменовался временным ростом доли тонкопленочных технологий, позволявших снизить потребление дорогого кремния при производстве фотоэлектрических модулей. Однако захватить более 25% мирового рынка этим технологиям так и не удалось, а резкий рост объемов производства поликристаллического кремния в Китае с 2008 г. и вовсе привел к постепенному банкротству большинства компа-

ний, работавших над тонкопленочными технологиями, причем направление создания тонких пленок из аморфного кремния было ликвидировано практически полностью, включая улучшенный tandemный вариант этой технологии, разработанный компаниями Oerlikon Solar и Applied Materials (КПД составляет 8–11% против 5–6%) [4]. На рынке остались только крупные компании с собственными научно-техническими подразделениями, такие как First Solar (CdTe) [5] и Stion (CIGS) [6]. Основные причины снижения интереса к тонкопленочным технологиям кроются в том, что по КПД и ресурсным параметрам тонкопленочные модули существенно уступали кристаллическим. С этим отставанием еще можно было мириться до тех пор, пока цены на кремний и структуры из него были относительно высокими. Снижение цен на поликремний “солнечного качества” существенно сузило область применения тонких пленок: большинство потребителей стали предпочитать мультикристаллические модули с большим на 1–3% абсолютным КПД, меньшей стоимостью и практически вдвое большим сроком службы.

В последние годы разработки, направленные на улучшение характеристик фотоэлектрических преобразователей энергии, активно продолжались, и целью настоящего обзора является попытка обобщить результаты этих разработок и выявить современные тенденции развития фотоэлектрической энергетики.

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ КРЕМНИЕВОЙ ФОТОЭНЕРГЕТИКИ

Характерной особенностью последних лет является существенное сближение мульти- и монокристаллических модулей по цене и КПД. Обычно первые уступают вторым по КПД около 1% (абс.), а близкие цены позволяют некоторым специалистам говорить о том, что в дальнейшем доля монокристаллических модулей на рынке будет расти при одновременном снижении объемов производства их мультикристаллических аналогов. В настоящее время цены на поликремний “солнечного качества” упали до 10 дол. США/кг, причем в основном это достигнуто благодаря росту объемов промышленного производства (масштабированию) фотоэнергетической продукции с повышением степени автоматизации производственного процесса. Внедрение более энергоэффективных, нежели традиционный Сименс-процесс, технологий выращивания кремния идет довольно медленно, что обусловлено высокими удельными капитальными затратами при применении новых технологий и огромным давлением, оказываемым на рынок китайскими производителями. Совокупная мощность только трех крупнейших китайских компаний (CGL-poly Energy, Xinte Energy, Daqo

New Energy) в 2019 г. достигла 180000 т поликремния в год с ростом мощности к концу 2020 г. в 1.5 раза. Далее следуют Германия и Южная Корея с объемом производства примерно 80000 т/год. В США производилось около 70000 т/год, однако введение Китая антидемпинговых пошлин (повышение на 57% сбора за поликремний, ввозимый из США) и отсутствие достаточного количества собственных производителей фотоэлектрических преобразователей привело к снижению объемов их производства в США. Первой об остановке своего завода в штате Вашингтон заявила компания REC Silicon, и известная как раз использованием реакторов с кипящим слоем в качестве альтернативы Сименс-процессу [7]. Продолжаются работы по созданию технологий электрорафинирования металлургического кремния, однако их уровень пока не вышел за рамки лабораторных исследований [8]. Новым трендом на рынке кремниевых пластин стало появление пластин размерами 158.7 × 158.7 мм вместо традиционных 156 × 156 мм. Несколько компаний и научных групп также работают над новыми подходами, позволяющими получать пластины прямо из расплава поликремния, минуя стадии роста слитка и его резки [9]. Работы ведутся в направлении осаждения структур пластин из газовой фазы [10] и эпитаксиального роста [11].

Развитие направления фотоэлектрических преобразователей на основе кристаллического кремния происходит под влиянием следующих двух факторов.

1. Широкое распространение получило оборудование для атомно-слоевого осаждения полупроводниковых оксидных структур, открывшее дорогу технологическим приемам пассивации различных дефектов и паразитных центров рекомбинации, известных под общим названием PERC, что позволило увеличить КПД на 2–3% (абс.) как для моно-, так и для мультикристаллических модулей [12]. С 2017 г. в Китае реализуется программа поддержки производителей, ориентированных на повышение эффективности своих преобразователей (Top Runner Program), что уже в 2018 г. привело к сокращению доли мультикристаллических фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с 68 до 54% в пользу более эффективных монокристаллических [13]. При этом важно отметить, что более простые технологически преобразователи на пластинах *p*-типа продолжают доминировать в промышленности. Технология PERC внедряется все большим числом производителей по всему миру, что позволяет достичь среднего КПД фотоэлектрического преобразователя 20–22%. Дальнейшее развитие данной технологии связано с пассивацией области контактов тонким слоем оксида кремния, селективного по отношению к туннелированию через него носителей определенного знака [14]. Технология получила назва-

ние TOPCon (tunnel oxide passivated contacts – пассивированные слоем прозрачного для туннелирования оксида контакты). Данная технология впервые позволила достичь китайской компанией Trina Solar КПД единичного полноразмерного фотоэлектрического преобразователя 24.58% без использования гетероперехода на основе монокристаллического и аморфного кремния с внутренним тонким изолирующим слоем (HJT-технологии) [15].

2. Прекращение действия патента, делавшего компанию Panasonic монополистом в области технологии HJT. Это событие открыло дорогу серийному производству высокоэффективных фотоэлектрических модулей (HJT-элементов) с КПД 19–21% другими компаниями. Однако “ахиллесовой пятой” данной технологии оказалась ее чувствительность к качеству исходных пластин монокристаллического кремния *n*-типа [16], менее доступных, более дорогих и сложных в обработке, нежели их аналоги с проводимостью *p*-типа. Кроме того, HJT-технология предъявляет повышенные требования к контактным структурам: необходимо использовать низкотемпературные пасты для печати контактной сетки во избежание разрушения водородсодержащих слоев. Поэтому HJT-технология пока не смогла стать массовой наравне с другой еще более эффективной и дорогостоящей технологией IBC (interdigitated back contacts – переплетенные тыльные контакты с выносом на тыльную сторону *p–n*-перехода). В то же время единичный элемент, созданный компанией Panasonic на основе комбинации этих технологий, продемонстрировал в лабораторных условиях КПД 25.6%, что уже достаточно близко к теоретическому пределу для кремния, равному 27.5%. Enel Green Power (подразделение по возобновляемым источникам энергии итальянской энергетической компании Enel) и Национальный институт солнечной энергии (INES) [подразделение Французской комиссии по альтернативным источникам энергии и атомной энергии (CEA)] достигли КПД 25.0% для гетероструктурного солнечного элемента с активной площадью поверхности 213 см<sup>2</sup> (156 × 156 мм). Судя по сообщению разработчиков, эффективность фронтальной стороны двустороннего элемента была улучшена примерно на 0.7% благодаря применению технологии контактных структур Smart Wire без использования шин, что, впрочем, является практически единственным возможным решением для гетероструктурного кремниевого модуля в силу чувствительности активных слоев к повышенным температурам при пайке. Солнечный элемент основан на процессах гетероперехода, разработанных Enel и INES с использованием производственного оборудования швейцарской компании Meyer Burger [17]. Несмотря на то, что данный рекорд уступает показателям Panasonic, он получен на элементе про-

мышленного перспективного типоразмера без использования дорогостоящей взрывной фотолитографии, характерной для ИВС. Это позволяет надеяться на скорую коммерциализацию данной разработки, характеризующейся лучшей масштабируемостью и меньшей стоимостью.

Слои гидрогенизированного аморфного кремния, используемые в НТТ-элементах, накладывают ограничения на методы изготовления контактных структур ФЭП. Классическая технология вжигания контактов из проводящей пасты, нанесенной трафаретной печатью, мало пригодна для таких ФЭП из-за требований нагрева пластины до температур 500–600°C, что существенно превышает допустимую температуру 250–300°C. Работа [18] посвящена сравнению различных методов формирования контактных структур для гетероструктурных ФЭП. Для формирования контактов использовались следующие способы:

трафаретная печать низкотемпературных серебряных паст с шириной “реснички” контакта 16 мкм;

гальваническое осаждение меди с газофазной эпитаксией зародышевого слоя на поверхности прозрачного проводящего оксида;

струйная печать с использованием расплавления металлизующего состава в головке принтера с частичным маскированием поверхности.

Последний способ продемонстрировал КПД единичных ФЭП на уровне от 23.1% на полноразмерных элементах до 23.9% на лабораторных макетах с площадью поверхности 4 см<sup>2</sup>.

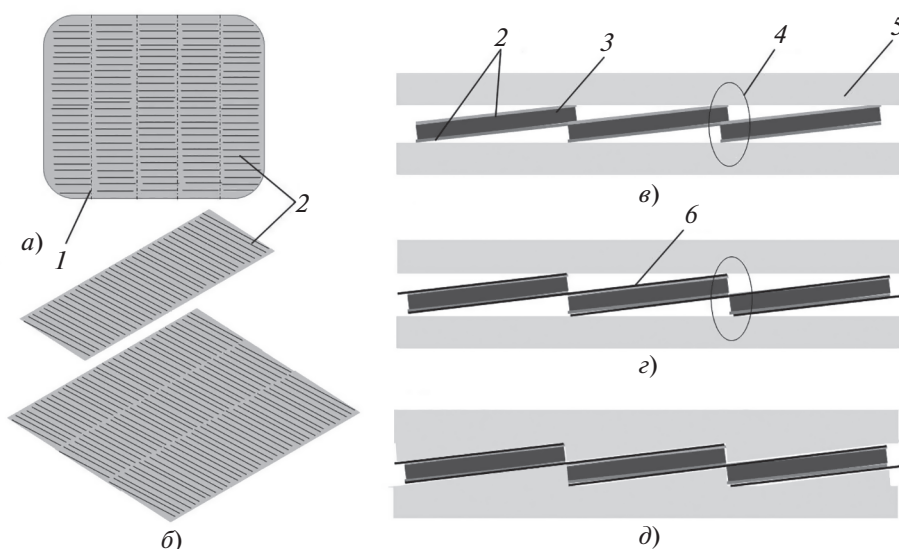
В работе [19] рассматриваются основные виды потерь в гетероструктурных солнечных элементах и методы борьбы с ними. Для обеспечения высокой эффективности ФЭП необходимо использовать высококачественные пластины из монокристаллического кремния с максимальным временем жизни основных носителей, при этом пассивирующие и легированные слои аморфного кремния должны быть тонкими – первые в силу низкой проводимости, вторые – для снижения паразитного поглощения фотонов. Широко рассматривается возможность выноса  $p-n$ -перехода на тыльную поверхность. Основной технологической проблемой при этом представляется разработка дешевого и воспроизводимого процесса формирования тыльных контактов. Рассматриваются варианты фотолитографии, селективного щелочного травления легированных слоев, их вскрытия лазером с использованием промежуточных жертвенных слоев. При обсуждении вопросов деградации пассивирующих слоев аморфного кремния показано, что фотоиндуцированная деградация характерна для отдельных внутренних пассивирующих слоев на основе гидрогенизированного аморфного кремния, в то время как для чередующихся изолирующих и легированных слоев пас-

сивация становится со временем более эффективной. Дефекты являются главным фактором, ускоряющим деградацию. Они могут быть сформированы в том числе и при осаждении слоя прозрачного проводящего оксида методом магнетронного напыления. Отмечается важность оптимизации толщины и степени легирования слоев аморфного кремния, так как слишком тонкие слои не обеспечивают надежной пассивации, а слишком толстые умножают оптические и омические потери.

Определенные надежды возлагаются на формирование нанокристаллических слоев плазмохимическими методами (в этом случае проводимость по одному из типов носителей становится резко анизотропной) и селективные контакты. В [20] предложен метод снижения потерь путем формирования селективного по отношению к электронам контакта в виде тонких пленок  $In_2S_3$  как альтернативы легирования зоны контакта фосфором с повышенной концентрацией или в результате роста тонкой пленки оксида кремния (туннельный контакт). Низкая температура реализации процесса позволяет использовать его в гетероструктурных ФЭП.

В работе [21] исследовалось влияние озона на процесс постобработки пластин после химического травления, а также оптимизировались состав пасты для печати контактов, время и температура ее спекания. Подбор технологических параметров на пилотной линии компании Meyer Burger обеспечил достижение КПД ФЭП значения 22.7%. Необходимо при этом отметить, что сама компания Meyer Burger летом 2020 г. заявила о том, что переходит от продаж технологического оборудования к производству фотоэлектрических преобразователей и модулей на основе НТТ-технологии, собственного технологического процесса и оборудования для его реализации [22]. Первая очередь должна обеспечить выпуск 400 МВт фотоэлектрических модулей в год с ростом общей мощности к 2027 г. до 6.4 ГВт/год.

Такие объемы промышленного производства ФЭП обусловлены стремлением сделать Meyer Burger конкурентоспособной с китайскими компаниями, работающими преимущественно на PERC-технологии и устанавливающими более низкие цены на свою продукцию, прежде всего благодаря огромным объемам производства. Ожидается, что столь амбициозная попытка возрождения европейской фотоэнергетической отрасли будет поддержана Европейским союзом, а для организации производства будут задействованы закрытые ранее немецкие заводы, выполнявшие заказы данного направления. Насколько успешной окажется эта попытка, покажет время. Однако с учетом современных темпов роста фотоэлектрической энерге-



**Рис. 1.** Формирование фрагментированных фотоэлектрических преобразователей.

*a* – подготовка ФЭП к фрагментированию; *б* – схема набора линейки из фрагментов; *в* – стандартная схема соединения и ламинирования линейки с использованием электропроводного адгезива; *з* – схема соединения и ламинирования линейки с использованием проводников Smart Wire; *д* – схема соединения и ламинирования линейки с использованием проводников и структурированной ламинирующей пленки.

*1* – разметка под лазерную или механическую резку ФЭП; *2* – контактная сетка, напечатанная на поверхности ФЭП; *3* – фрагмент ФЭП; *4* – зона перекрытия соседних фрагментов; *5* – ламинирующая пленка под стеклом; *6* – проводники Smart Wire

тики уже становится очевидной бессмысленность создания производств меньшей мощности.

Широкое развитие в последние годы получили фрагментированные или “чешуйчатые” модули, в которых стандартные единичные ФЭП размером  $156 \times 156$  мм фрагментируются на три–шесть элементов. При этом соединение таких элементов осуществляется без использования шин, а формирование сети контактных “ресничек” на исходном ФЭП ведется с пробелами, по которым затем осуществляется фрагментация с использованием лазерной или механической резки. Далее края фрагментов совмещаются таким образом, что плюсовая контактная сетка одного фрагмента через электропроводный адгезив сопрягается с минусовой сеткой соседнего (рис. 1).

В работе [23] говорится о важности пассивации краев элементов в заготовках для фрагментированных модулей для обеспечения снижения рекомбинации по их краям. Предложено по краям элементов прорезать дополнительные щели глубиной 25–50 мкм, материал в которых затем подвергать пассивации, в результате чего может быть достигнут рост КПД от 0.7 до 2.3% (абс.).

Согласно [24], фрагментация ФЭП позволяет отказаться от использования традиционных шин, затеняющих часть поверхности, а также снижает риск повреждения ФЭП в ходе пайки линеек. В работе [23] проведены исследования по оптимизации контактной структуры сетки на поверхно-

сти ФЭП под процесс фрагментирования. С помощью математического моделирования установлен оптимальный шаг контактной сетки. Для верификации результатов моделирования были изготовлены и испытаны образцы мини-модулей с делением исходного ФЭП на различное число фрагментов (от трех до шести) с разным шагом контактной сетки. На основе экспериментов и результатов моделирования показано, что оптимальное число фрагментов стандартного мультикристаллического ФЭП равно пяти. По мнению авторов работы [23], основными достоинствами предложенной схемы сборки модуля являются увеличение используемой поверхности модуля и снижение площади затенения контактами, а недостатком – незначительный рост сопротивления модуля.

В [25] рассмотрены вопросы адаптации стандартных технологий пайки линеек к технологии фрагментированных модулей, а также ее использования для двусторонних модулей. В отличие от ставшего традиционным подхода с применением проводящего адгезива, здесь обеспечивается снижение контактных потерь и расхода серебра. Соединение ячеек осуществляется короткими и тонкими проводниками с помощью стандартного технологического оборудования. Благодаря отказу от адгезива нет необходимости в перекрытии, которое обычно достигает 1 мм в ширину, одним соседним элементом другого. Для снижения механиче-

ских нагрузок при ламинировании использован структурированный ламинирующий материал с формами под размещение каждого фрагмента. Исходные элементы выполнены по НТТ-технологии на оборудовании Meyer Burger [26], в качестве проводников использовалась стандартная сетка Smart Wire, поставляемая этой же компанией. В полномасштабном модуле ( $3694 \text{ см}^2$ ) был достигнут КПД 22.1% в стандартных условиях тестирования. После сборки не выявлено разрушений элементов. Проведены механические испытания и 200 термоциклов ускоренного старения (в диапазоне температур от  $-45$  до  $+85^\circ\text{C}$ ), которые также не привели к разрушению отдельных элементов или модуля в целом.

Проблема интеграции во фрагментированный модуль защитных диодов для стабильной работы в условиях полного или частичного затенения обсуждалась в [27]. Отмечено, что увеличение числа параллельно соединенных линеек из фрагментов ФЭП позволяет установить большее число диодов и положительно влияет на работу модуля в условиях затенения.

Во многих работах отмечается тенденция к повышению рабочего напряжения фрагментированного фотоэлектрического модуля [28]: повышенное напряжение обеспечивает равную мощность модуля при меньшем токе, что несколько снижает потери эффективности как из-за джоулевых потерь тепла в шинах и контактах, так и вследствие меньшего разогрева этим теплом модуля, в результате чего мощность снижается не так существенно.

Одной из тенденций последних лет является развитие технологии ФЭП с выносом  $p$ - $n$ -перехода на тыльную сторону элемента. Несмотря на опасения, связанные с высокой стоимостью подобных ФЭП и сложностью их изготовления, в Китае уже началось промышленное внедрение данной технологии. Работа [29], как и ряд других работ, демонстрирует интерес к ИВС-технологии, считающейся весьма дорогой из-за операций с тонкими пластинами  $n$ -типа. Суть технологии заключается в полном использовании фронтальной поверхности ФЭП, поскольку переход вынесен на тыльную часть, что требует применения взрывной фотолитографии для создания контактов для  $n$ -слоя, который со стороны тыла закрыт  $p$ -слоем. При этом КПД ФЭП повышается до 23%. В [29] предложена концепция “плавающего” фронтального эмиттера, когда  $p$ - $n$ -переход создается также и на фронтальной части пластины, что позволяет расширить зону обратного поля в элементе и повысить эффективность его работы. Кроме того, такой подход дает возможность оптимизировать структуру контактов в тыльной части, которая в классических ИВС-элементах жестко связана с соотношением  $p$ - и  $n$ -площадок на тыльной сторо-

не пластины, для которых соотношение площадей ограничено как раз задачей создания эффективно обратного поля, блокирующего паразитную рекомбинацию носителей в зоне контактов.

Для реализации проекта в ECN (Energy Centre of Nederland) использовано оборудование проекта *n-pasha* (двусторонние симметричные ФЭП на основе пластин  $n$ -типа с высоким уровнем пассивации). Концепция токосъема через проводящие шины, напечатанные на тыльной стороне модуля (полимерной пленке), заимствована из другого проекта ECN – MWT-элементов, в которых на тыльные шины выведены контакты фронта. Наибольший достигнутый КПД на промышленном элементе размерами  $156 \times 156 \text{ мм}$  составил 21.1%.

Основные проблемы в настоящее время связаны с отработкой процесса металлизации контактов, проходящих через  $p$ -слой, без ухудшения параметров пассивации этой зоны. Авторы [29] заявляют о том, что данный процесс увеличивает количество технологических операций по сравнению с *n-pasha* всего на одну и получение ИВС-элементов со стоимостью такой же, как у  $n$ -PERC-элементов, может быть реальным. Кроме того, процесс формирования контактов при данном подходе основан на трафаретной печати, а не на фотогальваническом осаждении, как в классической ИВС-технологии, что позволяет широко использовать оборудование, уже имеющееся у участников проекта *n-pasha*. Промышленное внедрение ИВС-технологии ведет китайская компания Yingli Solar.

Достоинство трафаретной печати – возможность адаптации этой технологии для промышленного применения [30]. Повышение КПД достигается благодаря пассивации зоны контактов оксидом кремния. Тонкая пленка оксида кремния позволяет электронам туннелировать через нее, но при этом существенно снижаются рекомбинационные потери, в результате образуется селективный по электронам контакт. Слой эмиттера ( $p$ -тип) выполнен на основе аморфного кремния, осажденного из газовой фазы в плазме и затем подвергнутого термообработке. В отличие от [29], здесь химическое текстурирование велось только с фронтальной стороны, в то время как в первом случае исходно планировалось использовать двусторонний ФЭП. Тем не менее, антиотражающее покрытие на основе аморфного кремния наносится и на тыльную сторону элемента. Затем вскрытие просветляющего покрытия,  $p$ -слоя и слоя оксида для подвода контактов к  $n$ -пластине осуществляется лазером, так же как и для подвода контактов к  $p$ -слою. Всего процесс изготовления ФЭП включает в себя 9 основных технологических операций, классическая же ИВС-технология – 22 операции (т.е. количество операций существен-

но меньше). Ожидается, что подобный процесс позволит на уровне ФЭП достичь КПД 23.9%.

Авторы [31] справедливо отмечают, что главные сложности реализации классической ИВС-технологии связаны с необходимостью четкого разделения зон с различными типами проводимости, расположенных через одну на тыльной стороне пластины, и максимального подавления переноса заряда между ближайшими зонами одного типа. В [32] реализовано формирование сплошного по всей тыльной стороне пластины  $p$ -слоя. Во избежание переноса заряда по этому слою при его создании использовался анизотропный рост пленки наноструктурированного гидрогенизированного кристаллического кремния  $p$ -типа, что позволило обеспечить высокую проводимость в направлении, перпендикулярном поверхности пластины, и низкую – в направлении, параллельном ее поверхности. Упрощение технологии по сравнению с оригинальным способом производства ИВС-ФЭП в данном случае связано с отсутствием требования фрагментирования  $p$ -слоя с применением фотолитографии. Для расширения спектра поглощаемого излучения как на фронтальную, так и на тыльную сторону пластины нанесены пленки гидрогенизированного аморфного кремния и прозрачное проводящее покрытие, что позволяет реализовать концепцию двустороннего фотоприемника. Достигнутое для лабораторных образцов значение КПД составило 23.9%.

Работа [33] посвящена моделированию фотоэлектрического преобразователя ИВС-типа при различных концентрациях легирующих примесей в эмиттере, а также фронтальных и тыльных слоях, формируемых на краях пластины для подавления паразитной рекомбинации носителей заряда. Выполненная с помощью верифицированной по итогам испытаний фактически изготовленных образцов ФЭП оптимизация добавок бора и фосфора показала возможность достижения КПД ФЭП значения 24.79%.

### МНОГОПЕРЕХОДНЫЕ НЕКРЕМНИЕВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Несмотря на большие усилия, направленные на разработку перовскитных [34] и органических [35] фотоэлектрических систем, полученные на этом пути результаты пока трудно считать рыночным продуктом. Как для тех, так и для других серьезной проблемой остается высокая скорость фотоиндуцированной деградации даже в тех случаях, когда достигнуты приемлемые значения КПД [35]. Существуют также определенные проблемы устойчивости подобных структур к воздействию высоких температур при формировании контактов и ламинировании.

Значительно большие надежды возлагаются на тандемные структуры на основе перовскитов и традиционных технологий, таких как CIGS ( $\text{CuInGaSe}_2$ ) или кристаллические кремниевые фотоэлектрические преобразователи. Многопереходные фотоэлектрические модули известны довольно давно. В России и за рубежом ведутся работы над композитами на основе галлия и мышьяка, известными как структуры типа  $A_3B_5$  [36]. Высокий КПД подобных модулей физически можно объяснить формированием структуры из различных  $p-n$ -переходов в одном преобразователе, что позволяет захватывать фотоны из различных областей спектра солнечного излучения.

На подобном принципе построены также упомянутые ранее НТТ-элементы, где слои гидрогенизированного аморфного кремния (тоже не обладающие высокими ресурсными показателями) располагаются поверх кремниевого монокристалла и играют роль абсорбера, существенно расширяющего спектр поглощаемого излучения [16]. Создание подобных структур на базе монокристаллического кремния [37] и CIGS с тонкими пленками перовскитоподобных материалов позволило получить значения КПД на уровне 28% для кремниевой основы и 23.26% для основы в виде пленок CIGS [38]. Ведутся также исследования в направлении расширения спектра поглощения CdTe-фотоэлектрических преобразователей путем формирования тандемной структуры с перовскитоподобным материалом [39]. Ожидается, что, как и для НТТ-структур, ресурс тандема будет значительно выше, чем у чистого перовскитоподобного материала, что позволит вывести на рынок первыми именно такие тандемные структуры.

### УВЕЛИЧЕНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ФОТОПРИЕМНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Помимо многопереходных фотоэлектрических преобразователей существуют другие способы увеличения выработки электроэнергии. Вновь проявляется интерес к концентрированию солнечного излучения на поверхности преобразователя [40]. Такое концентрирование обычно требует использования систем слежения за Солнцем, которые также позволяют увеличить выработку энергии фотоэлектрической станцией [41]. Нанесение люминофоров на поверхность преобразователей и модулей дает возможность, как и в случае тандемных систем, захватить большую часть спектра с последующим ее переизлучением уже в нужном диапазоне [42]. В последнее время все более широкую популярность приобретают и двусторонние фотоэлектрические модули.



При должной ориентации фотоэлектрического модуля поступление дополнительного излучения на тыльную сторону ФЭП позволяет увеличить выработку модулями энергии на 10–40% [43] благодаря повышенной fotocувствительности тыльной поверхности элемента. В классических двусторонних модулях для генерации используется фронтальный  $p-n$ -переход. С тыльной стороны модуля удаляется защитная пленка Tedlar, формируется изотипный переход (например,  $p-p^+$ -переход), который, прежде всего, служит своеобразным зеркалом, отталкивающим заряды от тыльного контакта для предотвращения их паразитной рекомбинации на его дефектах (это — основная мотивация для внедрения изотипного перехода; двусторонность является положительным дополнительным эффектом). На тыльной стороне модуля формируется контактная сетка, симметричная той, что и на фронтальной поверхности. Главными источниками увеличения стоимости ФЭП при этом являются наличие еще одного (тыльного) стекла вместо пленки Tedlar, дополнительное легирование основной примесью тыла пластины и контактная сетка тыла (серебросодержащая паста в качестве исходного сырья). Однако при использовании пластины  $p$ -типа увеличение затрат может быть скомпенсировано ее меньшей стоимостью, более простым составом травителя и упрощенной процедурой удаления боросиликатных стекол (относительно фосфоросиликатных). Следует отметить, что сопоставимый с двусторонним по КПД односторонний модуль можно получить, используя НТТ-технологии, а превосходящий его — ИВС-технологии с применением высококачественных пластин  $n$ -типа. Двусторонний ФЭП может быть реализован и на мультикристаллическом кремнии, но с потерей КПД [44].

Определенный вклад в стоимость (уже всей станции) вносит организация должной “подсветки” тыльной стороны модуля путем использования отражателей, систем слежения за Солнцем и других технических средств. В зарубежной литературе содержатся оценки, свидетельствующие о том, что двусторонний модуль (300 Вт) способен обеспечить выработку энергии, сопоставимую с односторонним модулем мощностью 335 Вт [45].

Нужно отметить, что российская группа компаний “Хевел”, выпускающая фотоэлектрические преобразователи и модули с использованием НТТ-технологии, уже организовала производство двусторонних модулей.

При этом следует иметь в виду, что достоверная оценка выработки двусторонними модулями на основе стандартных математических моделей и данных связана с определенными трудностями. Существующие отраслевые стандарты ориентированы на тестирование модулей засветкой фронтальной

поверхности спектром, соответствующим полностью прозрачной земной атмосфере в отсутствие облачности, а на выработку энергии тыльной стороной и спектр отраженного излучения существенно влияет подстилающая поверхность. Типичные значения коэффициента отражения (доля отраженного излучения, %) солнечного излучения от нескольких поверхностей, которые могут быть использованы в качестве отражателей для двусторонних модулей, приведены далее:

Зеленая трава .....	23
Бетон .....	16
Бетон, окрашенный белой краской .....	60–80
Белый гравий .....	27
Белая металлическая кровля .....	56
Светло-серая гидроизолирующая мембрана .....	62
Белая гидроизолирующая мембрана .....	Более 80

Разброс значений для бетона, окрашенного белой краской, связан с типом краски и толщиной ее слоя.

География производства фотоэлектрических преобразователей постоянно расширяется. Помимо Китая, США, Тайваня, Японии и Южной Кореи, имеющих традиционно сильные позиции в этой области, планку в 1 ГВт/год недавно преодолели производители из Малайзии, Тайланда и Вьетнама. Наблюдается возрождение производства фотоэлектрических преобразователей в европейских странах, чему способствовали развитие НТТ-технологии и уход с рынка ряда производителей тонкопленочных фотоэлектрических модулей. Так, новое производство НТТ-элементов начало функционировать в 2019 г. в Италии [46]. В табл. 2 и 3 представлены технико-экономические параметры нескольких характерных фотоэлектрических модулей, производимых зарубежом по описанным в данном обзоре технологиям.

Как следует из табл. 2, компания Sun Power по-прежнему остается рекордсменом не только по КПД, но и по ценам производимых модулей, поскольку используемый вариант технологии ИВС включает в себя дорогостоящий этап взрывной фотолитографии  $p$ -слоя на тыльной стороне пластины для доступа к контактам  $n$ -пластины. Видно также, что цена коррелирует не столько с эффективностью, сколько со страной-производителем и, видимо, объемами производства. Китайские модули существенно дешевле американских и европейских аналогов.

Параметры мультикристаллических модулей китайских производителей представлены в табл. 3. При этом практически все модули на пол-

**Таблица 2.** Технико-экономические параметры высокоэффективных зарубежных фотоэлектрических модулей (источник: интернет-магазин фотоэлектрических модулей Europe-Solar Store, <https://www.europe-solarstore.com/>, дата обращения 13.10.2020 г.)

Модуль	Производитель	Мощность (пиковая), Вт	Площадь, м <sup>2</sup>	Паспортный КПД, % (STC)	Цена, дол. США	Приведенная цена, дол/Вт	Технология	Страна происхождения
AXIpremium XL HC 350-375MH/120S	AXITEC	360	1.82	19.8	103.00	0.29	Монокристалл, PERC HALF-CELL	ФРГ
SunPower SPR-MAX3-390	Sun Power	390	1.77	22.0	434.28	1.11	Монокристалл, IBC	США
Panasonic VBHN325KJ01	Panasonic	325	1.67	19.5	315.71	0.97	Монокристалл, HJT	Япония
Trina HoneyBlack TSM-320DD06M.05(II)	Trina Solar	320	1.76	18.2	185.71	0.58	Монокристалл, PERC	КНР
BIFI mono solar panel 60cells 300~310w	Topsky Energy	310	1.66	18.7	71.30	0.23	Монокристалл, PERC, двусторонний	КНР
STP290S-20/Wem	Suntech	275	1.62	16.9	237.14	0.86	Монокристалл, PERC	КНР
REC 285 TP2 BLK	REC	285	1.65	17.3	212.86	0.75	Монокристалл, PERC, шины уменьшенной ширины	Норвегия
ECO 380-400M 66SA	ECO DELTA POWER Co	380	1.88	20.2	76.00	0.20	Монокристалл, PERC, фрагментированные элементы	КНР
Lightway Solar Technology	LW 350 72M	350	1.94	18.0	53.55	0.15	Монокристалл, PERC, фрагментированные элементы	КНР
PolyCrown Solar Technology	NSB 360S-166SS	360	1.83	19.7	58.32	0.16	Монокристалл, HJT, двусторонний	КНР

**Таблица 3.** Мультикристаллические модули китайского производства (источник: интернет-ресурс Enfsolar, <https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet>, дата обращения 01.02.2021 г.)

Модуль	Производитель	Мощность (пиковая), Вт	Площадь, м <sup>2</sup>	Паспортный КПД, % (STC)	Цена, дол. США	Приведенная цена, дол./Вт	Технология
EL-270-295P-60	East Lux Energy Co.	280	1.63	17.2	43.96	0.16	Двусторонний, PERC
JS270P	Yixing JS Solar Co.	270	1.65	16.4	54.00	0.20	Мультикристаллический кремний без PERC
JS350P	Yixing JS Solar Co.	350	2.00	17.5	70.00	0.20	Half-cell
RS6T 330P	Resun Solar	330	1.90	17.1	42.24	0.13	Мультикристаллический кремний без PERC
RS6D 225P	Yixing JS Solar Co.	225	1.50	15.3	34.20	0.15	Мультикристаллический кремний без PERC

норазмерных пластинах (без фрагментирования) имеют монокристаллические аналоги.

### СИСТЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

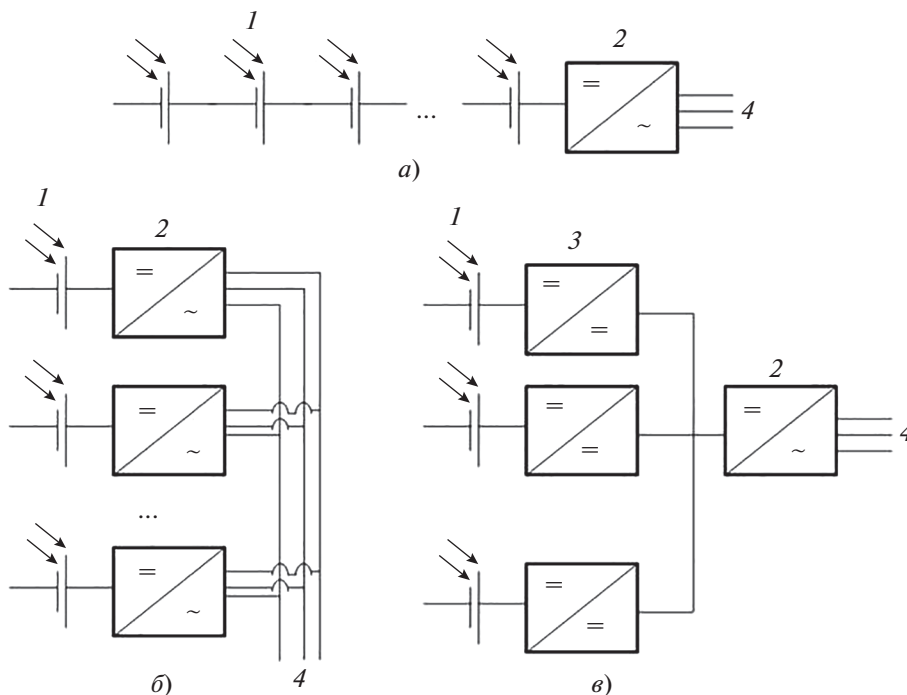
Одной из принципиальных проблем фотоэлектрики является низкая поверхностная плотность потока солнечной энергии, вследствие этого при создании электростанций большой мощности требуются большие площади. В этой связи одной из новых тенденций стало то, что солнечные электростанции, вслед за ветровыми, начали осваивать водные пространства. Число плавучих фотоэлектрических систем неуклонно растет [47].

Другая ключевая проблема на пути развития солнечной энергетики – нестабильность генерации, связанная с суточными, сезонными и погодными изменениями в поступлении солнечного излучения на поверхность фотоэлектрических преобразователей. Рост установленной мощности фотоэлектрических установок на практике все чаще приводит к необходимости искать эффективные способы поддержания баланса генерации и потребления электроэнергии с обеспечением стабильной частоты и напряжения сети [48]. Один из основных путей решения этой проблемы связан с использованием накопителей энергии. В частности, представляет интерес возможность комбинирования фотоэлектрических систем с гидроэлектрическими и гидроаккумулирующими станциями [49]. В Германии, стране, развивающей преимущественно использование фотоэлектрических установок у конечных потребителей электроэнергии (в домохозяйствах, на предприятиях и т.п.), а не строительство крупных сетевых

солнечных электростанций, активно применяются локальные накопители электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов. Крупные промышленные сетевые накопители внедряют Южная Корея и Австралия [50]. В частности, в качестве экономичного решения рассматривается использование выработавших ресурс на электромобилях аккумуляторных батарей для создания накопителей энергии в домохозяйствах (снижение емкости на 20% номинальной), что должно существенно снизить стоимость накопителей [51].

Одним из эффективных путей решения проблемы негативного влияния на электрическую сеть нестабильной генерации представляется максимальное потребление выработанной фотоэлектрическими установками энергии на месте ее производства. В некоторых европейских странах стимулируется самопотребление путем ограничения продажи избытков энергии в сеть. В [52] проводится технико-экономический сравнительный анализ водонагревательных систем и аккумуляторных батарей как средства запасаания избыточной выработки солнечной батареи. При этом фотоэлектрическая установка рассматривается присоединенной к централизованной сети, но ставится задача свести обмен энергией с сетью до минимума, особенно в часы пиковой выработки солнечной батареи. Показано, что накопление горячей воды в часы пиковой выработки солнечных батарей и последующее сокращение за счет этого энергозатрат на горячее водоснабжение оказываются выгоднее аккумуляирования электроэнергии.

В [53] обсуждаются вопросы оптимизации компонентов систем теплоснабжения (мощность насоса и емкость бака-аккумулятора) с учетом



**Рис. 2.** Возможные схемы построения сетевой фотоэлектрической станции.

1 – фотоэлектрические модули; 2 – инвертор; 3 – преобразователь постоянного тока; 4 – подключение к централизованной электрической сети

действующих во многих странах гибких тарифов на электрическую энергию и возможностей использования солнечных батарей для нужд теплоснабжения. Применение фотоэлектрических модулей для получения горячей воды и для нужд теплоснабжения в условиях малоэтажных зданий в северных регионах рассматривается в [54] как часть концепции здания с нулевым потреблением ресурсов.

Аналогичные исследования по использованию фотоэлектрических преобразователей не только для электроснабжения, но и для нагрева воды в условиях России выполнены в работах [55, 56]. Они показали перспективность такого их применения в составе систем микрогенерации в нескольких изолированных энергорайонах и в некоторых неценовых зонах энергетического рынка.

Автоматическая система оптимального управления работой фотоэлектрических преобразователей, базирующаяся на использовании контроллеров и инверторов с функцией экстремального регулирования мощности (МРРТ-контроллеров), обеспечивающих максимальный отбор мощности от фотоэлектрической установки, является в настоящее время неотъемлемой составляющей практически любой фотоэлектрической станции. В [57] показано, что оптимизация алгоритмов оптимального управления отбором мощности позволяет увеличить выработку станции на 10–30%.

В последние годы в результате совершенствования параметров полупроводниковых электронных компонентов, их миниатюризации и крупносерийного производства фотоэлектрический рынок стал насыщен компактными и недорогими изделиями как для малых энергоустановок, так и для крупных станций с интегрированным преобразованием энергии в переменный ток на выходе [58]. При этом дискуссионным остается вопрос о том, где и сколько устанавливать преобразователей и МРРТ-устройств в составе фотоэлектрической станции. Пока еще преобладающим решением остается использование одного инвертора с МРРТ-контроллером для всей энергоустановки или для линейки последовательно соединенных фотоэлектрических модулей (рис. 2, а). Однако такое решение не является энергетически оптимальным. Дело в том, что, как правило, имеется заметный разброс в значениях внутреннего сопротивления и мощности фотоэлектрических модулей даже внутри одной партии, что связано с различными технологическими причинами. Кроме того, в течение дня происходит частичное или полное затенение модулей в линейке, особенно характерное для городских условий эксплуатации фотоэлектрических установок, что сказывается на их текущих электрофизических параметрах. При этом тень в течение дня, как правило, перемещается по всей линейке модулей, изменяя параметры то одного, то другого из них. Очевидно,

что схема автоматического управления с общим МРРТ-контроллером в сетевом инверторе, работающем со всей линейкой ФЭМ, будет регулировать выработку по худшему из модулей [59], формируя некие усредненные напряжения и токи, что приведет к снижению отбора мощности от установки относительно максимально возможной.

Более энергетически эффективной представляется схема со встраиванием микроинверторов с интегрированными в них МРРТ-контроллерами в каждый фотоэлектрический модуль [60] (рис. 2, б). При этом обеспечивается максимально возможная простота коммутации: все модули сразу коммутируются по общей шине переменного тока нужного напряжения с минимумом контактов и защитной аппаратуры. Вместе с тем такое решение пока ограничивается все еще высокой стоимостью преобразовательного оборудования и схема по рис. 2, а, как правило, оказывается более выигрышной по капитальным затратам. Промежуточный подход может быть связан с комбинацией двух вышеописанных схем: на каждом модуле устанавливается согласующий преобразователь постоянного тока с функцией МРРТ-контроллера, модули соединяются по общей шине постоянного тока, которая выходит на сеть переменного тока через инвертор уже без функции МРРТ (рис. 2, в).

Все большее внимание при создании и эксплуатации фотоэлектрических станций уделяется проблемам затенения модулей [61] и их запыления [62]. Для повышения выработки в подобных условиях применяются как улучшенные алгоритмы управления станцией [59], так и различные ручные и автоматизированные системы очистки модулей от пыли и грязи. Разрабатываются методы прогнозирования выработки фотоэлектрических систем в подобных условиях [63].

### МЕРЫ СТИМУЛИРОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Меры поддержки применения возобновляемой, в том числе и солнечной, генерации в большинстве стран по-прежнему сводятся к выкупу энергии, получаемой от таких источников, по повышенному тарифу (feed-in-тариф). Однако необходимо отметить постепенное снижение этого тарифа во всех европейских странах [64]. По состоянию на конец 2019 г. средняя стоимость 1 кВт · ч солнечной энергии в США составляла 0.085 дол. (см. табл. 1), а во многих случаях снизилась до 0.05 дол. [65].

В некоторых странах, таких как Бельгия, Норвегия, Румыния, действуют так называемые “зеленые” сертификаты, побуждающие местных производителей электроэнергии генерировать или покупать определенное количество энергии

от возобновляемых источников. Для отдельных технологий возобновляемой энергетики вводятся повышающие коэффициенты. При этом, конечно, оплата “зеленых” сертификатов ложится на потребителей через рост тарифа.

В Китае, а также нескольких европейских странах предусмотрены субсидии и/или налоговые льготы на строительство фотоэлектрических станций, однако обычно такая мера поддержки применяется только в отношении малых станций, вводимых отдельными домохозяйствами.

Косвенно внедрение фотоэнергетики и других возобновляемых источников энергии стимулируется повышением налогов на выбросы углекислого газа от энергоустановок на ископаемых топливах. Подобные меры введены в Китае и Канаде, причем в Канаде налог варьируется между провинциями в зависимости от уровня экологической нагрузки в каждом конкретном случае. Повышенные сборы за выбросы парниковых газов приняты и в Европе.

В 2013 г. в России официально начато субсидирование использования возобновляемой энергии для объектов, подключенных к Единой энергетической системе и имеющих установленную мощность свыше 5 МВт [66]. Основой для получения субсидий [фактически для компенсации затрат инвестора на строительство фотоэлектрической станции (ФЭС)] являются:

выполнение требований по достижению среднегодового значения КИУМ ФЭС;

удовлетворение требований по локализации производства компонентов станции;

минимальная стоимость строительства энергообъекта, заявляемая при конкурсном отборе проекта в рамках договора поставки мощности на оптовый рынок.

Продажа электроэнергии, выработанной ФЭС в России, осуществляется по ценам оптового рынка, при этом почасовой график поставки мощности согласуется с диспетчерским управлением сетей региона на сутки вперед. Однако в нашей стране основным источником возврата инвестиционных затрат являются не поступления от продажи электроэнергии, а поступления от платежей за поставку мощности. В большинстве же зарубежных стран окупаемость инвестиций происходит исключительно за счет установленного повышенного тарифа на электроэнергию от ФЭС [67]. Таким образом, зарубежные собственники ФЭС оказываются в большей степени заинтересованными в увеличении объемов продаж электроэнергии, чем российские, и первостепенное внимание уделяют повышению выработки энергии электростанциями и точности планирования суточного (почасового) графика выдачи мощности в сеть [48] на основе развития современных методов краткосрочного прогнозирования прихода солнечной радиации [68].

Аналогичные исследования по отработке методов краткосрочного прогнозирования ФЭС в России ведутся в ОИВТ РАН [69].

Тезис о ключевом значении КПД в российской фотоэнергетике остается пока спорным. Сокращение площади поверхности земли, занимаемой станцией, числа опорных конструкций, объемов перевозимых грузов и выполняемых строительно-монтажных работ, конечно, стимулирует использование более эффективных модулей. Однако с учетом структуры стоимости станции, невысокой арендной платы за землю и условий конкурсного отбора проектов на основе минимальных капитальных затрат ключевым фактором становится все-таки цена модулей, что заставляет искать подходы к созданию как эффективных, так и дешевых структур фотоэлектрических элементов.

Требования локализации компонентов ФЭС, бесспорно, дают положительный эффект для развития фотоэнергетической отрасли, так как благодаря этим мерам в относительно короткое время было создано несколько новых производств. В то же время вопросы вызывает вклад отдельных компонентов и технологических операций в степень локализации станции. Отчасти этим объясняется тот печальный факт, что в стране до сих пор не создано ни одного значительного производства поликремния.

### СОСТОЯНИЕ ФОТОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В РОССИИ

Благодаря появлению в России соответствующей законодательной и нормативной базы, гарантирующей инвестору возврат средств на создание крупных фотоэлектрических станций (пиковой мощностью свыше 5 МВт) при соблюдении норм локализации компонентов, в стране удалось создать два крупных кластера по производству фотоэнергетической продукции. Главенствующая роль крупных сетевых объектов обусловлена их высокой мощностью, что позволяет создать гарантированный рынок сбыта фотоэлектрических модулей примерно 300 МВт/год. Мощность автономных объектов значительно меньше.

В России также существует нормативная база по поддержке локальной генерации с использованием ВИЭ, однако ее влияние на темпы ввода объектов в эксплуатацию и на производство фотоэнергетической продукции пока невелико. Во-первых, она (нормативная база) не содержит требований по локализации производства компонентов (что в условиях Сибири и Дальнего Востока в силу логистических причин делает более конкурентоспособной продукцию восточно-азиатских производителей), во-вторых, продажа энергии производится по цене рынка без каких-либо преференций для ВИЭ.

Два крупных кластера сформированы вокруг группы компаний (ГК) “Хевел” и ГК “Солар Системс”. Первый кластер (см. web-сайт ГК “Хевел”, <https://www.hevelsolar.com>) включает в себя:

производство НТ-фотоэлектрических преобразователей и модулей (в том числе и двусторонних) на их основе в Новочебоксарске. Мощность производства в пересчете на произведенные модули превышает 320 МВт/год;

научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике (Санкт-Петербург), ориентированный на улучшение заводской технологии, а также на решение локальных нестандартных задач малой мощности (до 100 кВт/год), таких, например, как гибкие модули для транспортных применений;

компания-инсталляторы “Авелар Солар Технолоджис” и “Грин Энерджи Рус”, ориентированные на строительство крупных сетевых объектов, а также ООО “Хевел-ритейл”, работающее на розничный рынок и автономных потребителей. Если ООО “Хевел-ритейл” наряду с готовыми решениями и компонентами предлагает сами модули, то две другие компании работают исключительно на создание сетевых объектов.

В ГК “Хевел” локализованы все технологические переделы создания сетевых станций, за исключением производства пластин, слитков и поликремния. Локализацию производства сетевых инверторов в интересах “Хевел” осуществляет ООО “Шнейдер Электрик Рус”. Группа компаний “Хевел” уже имеет опыт экспорта своей продукции за рубеж. К сильным сторонам стратегии ГК “Хевел” следует причислить относительную уникальность используемой технологии и ее высокие потребительские качества, к слабым — дороговизну по сравнению с наиболее распространенными китайскими PERC-модулями, а также существенную зависимость от импорта дорогостоящих тонких пластин *n*-типа. Также нужно отметить, что практически все производственное оборудование поставлено европейскими производителями, техническое обслуживание также осуществляется ими. На сегодняшний день в активе группы около 1 ГВт построенных станций, имеется опыт продажи нескольких готовых объектов ПАО “Фортум”.

В ГК “Ренова” помимо ГК “Хевел” входит ООО “Гелиос-ресурс”. Это предприятие было выкуплено в период модернизации завода в Новочебоксарске в связи с переходом на НТ-технологии для покрытия потребности в отечественных модулях на уже реализуемых проектах сетевых станций. Компания “Гелиос-ресурс” существует с начала 2000-х годов (производственная площадка находится в г. Мытищи) и специализируется на производстве слитков и пластин мультикристаллического кремния. В средствах массовой информации появлялись сообщения о локализации

производства ФЭП и модулей, а также инверторов в Саранске (см. web-сайт технопарка “Мордовия”, <http://www.technopark-mordovia.ru/resident/electronnoe-priborostroenie/ooo-khelios-resurs/>).

Группа компаний “Солар Системс” была создана в 2013–2014 гг. с участием китайского капитала именно для реализации крупных сетевых проектов в России. Ядром производства компании является завод в г. Подольск (результат выкупа и реконструкции части активов Подольского химико-металлургического завода, специализировавшегося на выпуске фотоэнергетической продукции еще в советское время). Завод производит слитки и пластины как моно-, так и мультикристаллического кремния (см. web-сайт Группы компаний “Солар Системс”, <http://solarsystems.msk.ru/>). Далее они направляются в Китай, где на заводах китайских партнеров производятся ФЭП и модули, которые затем возвращаются в Россию для строительства станций. На ранних этапах развития компании рассматривалось создание собственного производства ФЭП и модулей (в том числе и двусторонних) на промплощадке в г. Елабуга. Локализацию производства сетевых инверторов осуществляет ЗАО “Связь-Инжиниринг”. В состав группы “Солар Системс” также входит компания-инсталлятор ООО “Кремниевые технологии”. Суммарная мощность построенных, строящихся и планируемых группой станций составляет около 500 МВт.

Конкурсные отборы проектов по солнечной энергетике в 2019 г. показали, что планируемые капитальные затраты достигли 50 тыс. руб/кВт установленной мощности (см. web-сайт АО “Администратор торговой системы”, <https://www.atsenergo.ru/vie/proresults/>).

Среди ветеранов фотоэлектрической отрасли, сохранивших производство еще с 90-х годов XX в., необходимо отметить Рязанский завод металлокерамических приборов (РЗМКП) и ООО “Телеком-СТВ” (г. Зеленоград). Первое предприятие ранее производило модули из покупных мультикристаллических ФЭП в объеме до 30 МВт/год, затем производство было прекращено. Однако в 2017–2018 гг. на рынке снова появились модули RZMP – товарного знака РЗМКП (см. web-сайт Рязанского завода металлокерамических приборов, <http://www.rmcip.ru/solarcells/>). Второе предприятие также специализируется на выпуске модулей из покупных ФЭП, однако спектр ФЭП существенно выше:

моно- и мультикристаллические в основном тайваньского производства;

двусторонние;

на основе технологии IBC (см. web-сайт АО “Телеком-СТВ”, [http://telstv.ru/?page=ru\\_solar\\_modules](http://telstv.ru/?page=ru_solar_modules));

производства ГК “Хевел”.

Объем производства по современным меркам довольно мал и ориентирован на решение в основном нестандартных задач – производство гибких и складных модулей, в том числе и для спецтехники. Ранее также выпускалось оборудование для сборки модулей – импульсные тестеры для входного контроля ФЭП и ламинаторы. С участием “СТВ-Телеком” было оснащено небольшое предприятие “Дагкремний” в Дагестане на базе научно-исследовательского института “Волна”. Это предприятие специализируется на сборке модулей из покупных ФЭП и оснащению ими малых потребителей, включая муниципальные объекты (см. web-сайт Федеральной лезгинской национально-культурной автономии, <https://flnka.ru/aktualnoe/5088-dagestan-vkladyvaet-v-solnce.html>).

Наиболее тяжелая ситуация в России сложилась с производством исходного сырья для кремниевых технологий ФЭП – поликремния. В советское время большая часть поликремния производилась в Запорожье. Из постсоветских проектов, дошедших до стадии реализации, можно отметить группу компаний “Нитол”, созданных при участии АО “Роснано” в г. Усолье-Сибирское (позже это предприятие называлось “Усолье-Силикон”), а также АО “Завод полупроводникового кремния” в г. Железногорск (Красноярский край) под эгидой госкорпорации “Росатом” и при участии ГК “Конти” (Москва). Становление обоих предприятий и выход их на рынок пришлось на период 2010–2012 гг., когда в Китае уже вводились аналогичные производства мощностью от 5000 т/год, до чего отечественные аналоги не дотягивали. Оба предприятия в производстве поликремния ориентировались на Сименс-процесс. В настоящее время оба проекта закрыты.

Основным российским производителем силовой и управляющей электроники для автономных фотоэлектрических систем является ООО “Микроарт” (Москва). Предприятие предлагает инверторы и контроллеры собственной разработки для построения локальных и присоединенных к сети энергосистем, использующих солнечную, ветровую энергию, а также аккумуляторные батареи (см. web-сайт ООО “Микроарт”, <http://www.invertor.ru/>).

Обзор фотоэлектрической отрасли не будет полным, если не упомянуть компании дистрибьюторы, инсталляторы и системные интеграторы, реализующие различные компоненты фотоэлектрических станций, а также осуществляющие их строительство и пусконаладочные работы в интересах как организаций, так и частных лиц. Наиболее известными являются московские ООО “Солнечная корона”, “Ваш Солнечный дом”, “Промсолар”, “Альтэко”, ООО “Санвейс”, а также ООО “Энергия солнца” (Республика Алтай) и ООО НПФ “Энергия” (г. Новосибирск). В 2016–2017 гг. фотоэлектрические модули, контроллеры

заряда и свинцово-кислотные гелевые аккумуляторы на короткое время появлялись в ассортименте крупных строительных магазинов, поставляющих электротовары, таких как “Леруа-Мерлен” и МПО “Электромонтаж”.

Помимо перечисленных предприятий кремниевой фотоэнергетики два завода (НПП “Квант” в Москве и АО “Сатурн” в г. Краснодар) осуществляют мелкосерийное производство модулей и ФЭП по технологии  $A_3B_5$  для космической отрасли (см. web-сайт АО “Сатурн”, <http://saturn-kuban.ru/produksiya/solnechnye-batarei/>). Основным научным партнером, позволившим за 11 лет полностью локализовать производство ФЭП на АО “Сатурн”, является ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург).

Исследования в области фотоэнергетики в России ведутся научными группами широкого спектра. Наиболее сильные школы сформированы в ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе по гетероструктурным фотоэлектрическим преобразователям на основе как структур  $A_3B_5$ , так и кремния. В этом институте также имеется сильная научная группа по метрологии фотоэлектрических преобразователей [70]. В последнее время НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ РАН, созданный совместно с ГК “Хевел”, проявляет интерес к перовскитоподобным структурам ФЭП и тандемным системам на их основе. Аналогичными исследованиями занимаются в МГУ, НИТУ МИСиС, Сколковском институте науки и технологий, ИПХФ РАН, Владимирском государственном университете. В НИЯФ МГУ уже длительное время ведутся работы по созданию двусторонних модулей и контактных структур для них, представляющих собой аналоги швейцарского Smart Wire [71]. В сферу интересов этой научной группы попадают и фотоэлектрические преобразователи со встроенными концентраторами солнечного излучения, а также гетероструктурные фотоэлектрические преобразователи [72]. В ОИВТ РАН, Санкт-Петербургском политехническом университете, МГУ, НИУ МЭИ, ИСЭМ им. Л.А. Мелентьева СО РАН ведутся исследования в области системных вопросов фотоэнергетики. Сотрудниками МГУ при участии специалистов ОИВТ РАН создана геоинформационная система “Возобновляемые источники энергии России” (см. <https://www.gisre.ru/>), отражающая информацию о ресурсах возобновляемой энергетики, существующих и строящихся объектах, а также основных научных и промышленных организациях, работающих в отрасли.

## ВЫВОДЫ

1. Рост объемов производства фотоэнергетической продукции и мощностей фотоэлектрических станций в мире неуклонно продолжается. Кристал-

лические кремниевые фотоэлектрические модули остаются доминирующей технологией современной фотоэнергетики. Именно огромные объемы вводов служат основным источником снижения цен на фотоэлектрические модули. Вместе с тем, с запуском программы повышения КПД модулей в Китае (Top Runner Program) можно говорить о постепенном переходе от экстенсивного роста (обусловленного наращиванием производства простых и дешевых мультикристаллических модулей без использования PERC-технологии) к росту интенсивному, связанному с увеличением доли монокристаллических модулей на рынке, внедрением PERC как де-факто отраслевого стандарта для моно- и мультикристаллических модулей. Широкое использование PERC-технологии позволило существенно увеличить КПД наиболее распространенных фотоэлектрических преобразователей на основе кремния *p*-типа с достижением значений, близких к КПД гетеропереходных кремниевых модулей (НТ), но с меньшими затратами. Производство гетеропереходных кремниевых модулей также расширяется, существенными производственными мощностями на основе данной технологии обладает и Россия. При этом анализ цен и паспортных данных гетероструктурных модулей не показывает их существенных преимуществ перед PERC-технологией. Более того, зарубежные производители оказались способными предложить весьма узкий круг PERC-модулей, превосходящих НТ по паспортному КПД. Прежде всего речь идет о фрагментированных модулях, допускающих более полное использование площади фронтальной поверхности модуля, а также о технологии выноса контактных шин на тыльную сторону пластины (MWT). Возможно, эта ситуация будет переломлена в результате ввода новых производственных мощностей по гетероструктурным модулям благодаря росту объема производства и спроса на качественные пластины *n*-типа. Так, следует ожидать роста производства на заводах ГК “Хевел” – до 400 МВт/год и более, а компания Meyer Burger к 2027 г. планирует создать производственные мощности, способные производить 6–7 ГВт/год с использованием НТ-технологии. В то же время даже эти цифры не выглядят столь впечатляющими на фоне достижений китайских заводов по производству модулей по PERC-технологии, где производительность 1 ГВт/год уже является нижней границей. Возможно, НТ, как прежде и ИВС, займет часть премиального сегмента высококачественных, но дорогостоящих модулей.

2. Работы в области создания ИВС-элементов с широким использованием задела по технологиям PERC и MWT позволили снизить стоимость их производства и организовать несколько конкурирующих с компанией Sun Power (Тайвань) производств в Китае. Прослеживается стремление к объединению технологий НТ и ИВС в одном вы-



сокоэффективном ФЭП, но со стоимостью существенно меньшей, нежели у прототипа фирмы Капека. Использование отработанных технологий производства и серийно выпускаемого оборудования позволило нивелировать в экономическом плане возврат от фотогальванического осаждения меди к трафаретной печати серебросодержащей пасты.

3. Широкомасштабные исследования в области перовскитной фотоэнергетики пока не смогли привести к появлению высокоресурсного промышленного модуля, однако открыли широкий простор для комбинирования перовскитоподобных материалов с традиционными технологиями фотоэнергетики, что даст возможность увеличить область спектра солнечного излучения, преобразуемого в электрическую энергию.

4. В связи с приближением достигаемого КПД кремниевых фотоэлектрических преобразователей к теоретическому пределу особую актуальность приобретают различные методы повышения поступления солнечной радиации на поверхность модуля – концентрирование солнечного излучения, использование систем слежения за Солнцем, двусторонние модули. Расширение производства двусторонних модулей, гетеропереходных модулей на основе кремния (а в перспективе тандемных структур с применением перовскитоподобных материалов) требует модификации методик прогнозирования выработки фотоэлектрических модулей с учетом спектральной чувствительности.

5. Несколько предприятий фотоэнергетической отрасли сегодня находятся на некотором перепутье. Основной вопрос даже не в том, что лучше: PERC или HJT. Вопрос в том, где быть контактам. Снижение стоимости IBC-элементов приводит к тому, что в перспективе эта технология с учетом повышенного КПД, скорее всего, сможет конкурировать с HJT и PERC. Однако если ориентироваться в будущем на тыльные контакты, нет никакого смысла внедрять фрагментирование ФЭП, которое становится все более популярным среди производителей PERC и может быть применено и в комбинации с HJT (что актуально для ГК “Хевел”). Переход в перспективе на тандемы IBC–HJT, HJT–перовскит, IBC–перовскит сделает этот подход бесполезным, так как нет смысла сопрягать контакты на тыльной стороне пластины с контактами на ее фронтальной поверхности, если последние отсутствуют. Проблема полного использования фронтальной поверхности может быть решена путем предварительного формирования контактной сетки на тыльной подложке модуля. В то же время вынос контактов на тыльную сторону решает несколько концептуальных проблем для тандемных ФЭП с перовскитоподобными структурами и аморфным кремнием, устойчи-

вость которых к высоким температурам на переделах формирования контактов минимальна.

6. Рост объемов производства фотоэнергетической продукции уже привел к существенному снижению капитальных затрат на создание систем различного уровня мощности. На этом фоне постепенно снижаются объемы государственной поддержки фотоэнергетической отрасли. Введенные мощности во многих странах таковы, что сегодня на повестке дня стоит вопрос об их адекватной интеграции в сеть, включая использование накопителей электрической энергии, гибкое тарифное регулирование, а в частном секторе – стимулирование потребления энергии внутри домохозяйства, которое ее произвело. В этой связи увеличивается значимость краткосрочного прогнозирования выработки энергии солнечными станциями в целях диспетчеризации всей системы. Также все большее внимание уделяется работе фотоэлектрических станций в условиях загрязнения модулей и их частичного затенения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Global-Trends>
2. **Тарасенко А.Б., Попель О.С.** Промышленные технологии фотоэнергетики и возможные пути их развития в России (обзор). Ч. 1. Общие подходы к созданию ФЭП и базовые кремниевые технологии // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 61–69. <https://doi.org/10.1134/S0040363615110089>
3. **Тарасенко А.Б., Попель О.С.** Промышленные технологии фотоэнергетики и возможные пути их развития в России (обзор). Ч. 2. Модификации технологий производства фотоэлектрических преобразователей, совершенствование контактных структур и выбор перспективных технологий для расширения производства ФЭП в России // Теплоэнергетика. 2015. № 12. С. 29–39. <https://doi.org/10.1134/S0040363615120097>
4. **Radue C., van Dyk E.E.** A comparison of degradation in three amorphous silicon PV module technologies // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2010. V. 94. Is. 3. P. 617–622. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.12.009>
5. **Sustainability** evaluation of CdTe PV: An update / V. Fthenakis, C. Athias, A. Blumenthal, A. Kulur, J. Magliozzo, D. Ng // Renewable Sustainable Energy Rev. 2020. V. 123. P. 109776. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109776>
6. **Bermudez V.** Economical and operational issues for CIGS in the future PV panorama // Sol. Energy. 2017. V. 146. P. 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.023>
7. **REC Silicon** moves nearer shutdown of US polysilicon facility // Интернет-ресурс: PV Magazine. <https://www.pv-magazine.com/2019/05/09/rec-silicon-moves-nearer-shutdown-of-us-polysilicon-facility> [Дата обращения 09.05.2019.]

8. **Jiang T., Xu X., Chen G.Z.** Silicon prepared by electro-reduction in molten salts as new energy materials // *J. Energy Chem.* 2020. V. 47. P. 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.11.005>
9. **Frank van Mierlo, Jonczyk R., Qian V.** Next generation Direct Wafer® technology delivers low cost, high performance to silicon wafer industry // *Energy Procedia.* 2017. V. 130. P. 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.403>
10. **Photovoltaic** performance of c-Si wafer reclaimed from end-of-life solar cell using various mixing ratios of HF and HNO<sub>3</sub> / J.-K. Lee, J.-S. Lee, Y.-S. Ahn, G.-H. Kang, H.-E. Song, J.-I. Lee, M.-G. Kang, C.-H. Cho // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2017. V. 160. P. 301–306. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.10.034>
11. **Solar** cells with 20% efficiency and lifetime evaluation of epitaxial wafers / M. Drießen, D. Amiri, N. Milenkovic, B. Steinhauser, S. Lindekugel, J. Benick, S. Reber, S. Janz // *Energy Procedia.* 2016. V. 92. P. 785–790. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.069>
12. **Life cycle** assessment on PERC solar modules / M.M. Lunardi, J.P. Alvarez-Gaitan, N.L. Chang, R. Corkish // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2018. V. 187. P. 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.08.004>
13. **China's 'Top Runner'** solar program becomes dominated by P-type mono PERC modules // <https://www.pv-tech.org/news/chinas-top-runner-solar-program-becomes-dominated-by-p-type-mono-perc-module> [Дата обращения 01.03.2021.]
14. **Lozac'h M., Nunomura S., Matsubar K.** Double-sided TOPCon solar cells on textured wafer with ALD SiO<sub>x</sub> layer // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2020. V. 207. P. 110357. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110357>
15. **24.58%** total area efficiency of screen-printed, large area industrial silicon solar cells with the tunnel oxide passivated contacts (i-TOPCon) design / D. Chen, Y. Chen, Z. Wang, J. Gong, C. Liu, Y. Zou, Y. He, Y. Wang, L. Yuan, W. Lin, R. Xia, L. Yin, X. Zhang, G. Xu, Y. Yang et al. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2020. V. 206. P. 110258.
16. **Silicon** heterojunction solar cells: towards low-cost high-efficiency industrial devices and application to low-concentration PV / A. Descoedres, C. Allebé, N. Badel, L. Barraud, J. Champiaud, F. Debrot, A. Faes, A. Lachowicz, J. Levrat, S. Nicolay, L. Sansonnens, M. Despeisse, C. Ballif // *Energy Procedia.* 2015. V. 77. P. 508–514. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.072>
17. **Enel** и Институт INES достигли эффективности солнечного элемента HJT в 25%. <https://renew.ru/enel-i-institut-ines-dostigli-effektivnosti-solnechnogo-elementa-hjt-v-25/> [Дата обращения 01.03.2021.]
18. **Low-temperature** processes for passivation and metallization of high efficiency crystalline silicon solar cells / A. Descoedres, C. Allebé, N. Badel, L. Barraud, J. Champiaud, G. Christmann, F. Debrot, A. Faes, J. Geissbühler, J. Horzel, A. Lachowicz, J. Levrat, S. Martin de Nicolas, S. Nicolay, B. Paviet-Salomon et al. // *Solar Energy.* 2018. V. 175. P. 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.074>
19. **Silicon** heterojunction solar cells: Recent technological development and practical aspects – from lab to industry / J. Haschke, O. Dupré, M. Boccard, C. Ballif // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2018. V. 187. P. 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.018>
20. **Indium** sulfide-based electron-selective contact and dopant-free heterojunction silicon solar cells / L. Meng, Z. Yao, L. Cai, W. Wang, L.K. Zhang, K. Qiu, W. Lin, H. Shen, Z. Liang // *Solar Energy.* 2020. V. 211. P. 759–766. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.082>
21. **Recent** developments in the industrial heterojunction silicon process chain enabling efficiencies up to 22.7% / A. Moldovan, A. Fischer, J. Temmler, M. Bivour, T. Dannenberg, D. Erath, A. Lorentz, D. Sontag, J. Zhao, A. Wiessen, F. Clement, M. Zimmer, J. Rentsch // *Energy Procedia.* 2017. V. 124. P. 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.310>
22. **Meyer Burger** становится производителем солнечных модулей с фабриками в ФРГ. <https://renew.ru/meyer-burger-stanovitsya-proizvoditelem-solnechnyh-modulej/?fbclid=IwAR2ewT4BnXlwFEUe-blV1pB6sgtp3gafHEN0wk32Zk6TQGYwLq7oZQ612nk> [Дата обращения 01.03.2021.]
23. **26%-efficient** and 2 cm narrow interdigitated back contact silicon solar cells with passivated slits on two edges / S. Schafer, F. Haase, C. Hollemann, J. Hensen, J. Krugener, R. Brendel, R. Peibst // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2019. V. 200. P. 11002. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110021>
24. **Design** of a solar cell electrode for a shingled photovoltaic module application / W. Oh, J. Park, C. Jeong, J. Park, J. Yi, J. Lee // *Appl. Sol. Energy.* 2020. V. 510. P. 145420. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145420>
25. **Interconnect-shingling:** Maximizing the active module area with conventional module processes / H. Schulte-Huxe, S. Blankemeyer, A. Morlier, R. Brendel, M. Kontges // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2019. V. 200. P. 109991. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109991>
26. **>24% silicon** heterojunction solar cells on meyer burger's on mass production tools and how wafer material impacts cell parameters / J. Zhao, M. König, Y. Yao, Y.C. Wang, R. Zhou, T. Xie, H. Deng // *Proc. of the 45th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. Waikoloa, HI, USA.* 10–15 June 2018. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547908>
27. **A new** and simple split series strings approach for adding bypass diodes in shingled cells modules to reduce shading loss / Z. Wen, J. Chen, X. Cheng, H. N., X. Luo // *Solar Energy.* 2019. V. 184. P. 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.099>
28. **A novel** electrical approach to protect PV modules under various partial shading situations / H. Hanifi, M. Pander,

- B. Jaeckel, J. Schneider, W. Maier // *Solar Energy*. 2019. V. 193. P. 814–819.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.035>
29. **Enablers** for IBC: integral cell and module development and implementation in PV industry / I. Cesar, N. Guillevin, A.A. Meve, P. Spinelli, A.R. Burgers, V. Rosca, L.A.G. Okel, B.J. Geerligs, A.W. Weeber, S. Sawallich, M. Nagel // *Energy Procedia*. 2017. V. 124. P. 834–841.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.355>
30. **Development** of TOPCon tunnel-IBC solar cells with screen-printed fire-through contacts by laser patterning / P. Wang, R. Sridharan, X.R. Ng, J.W. Ho, R. Stangl // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2021. V. 220. P. 110834.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110834>
31. **Interdigitated** back contact silicon heterojunction solar cells featuring an interband tunnel junction enabling simplified processing / B. Paviet-Salomon, A. Tomasi, D. Lachenal, N. Badel, G. Christmann, L. Barraud, A. Descoedres, J. Geissbühler, A. Faes, Q. Jeangros, J.P. Seif, S. Nicolay, B. Strahm, S. de Wolf, C. Ballif, M. Despeisse // *Solar Energy*. 2018. V. 175. P. 60–67.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.066>
32. **Nour El Islam Boukortt**. Optimization of IBC c-Si (n) solar cell using 2D physical modeling // *Optik*. 2019. V. 185. P. 707–715.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.088>
33. **A review** on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status / P. Roy, N.K. Sinha, S. Tiwari, A. Khare // *Solar Energy*. 2020. V. 198. P. 665–688.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.080>
34. **Kadro J.M., Hagfeldt A.** The end-of-life of perovskite PV // *Joule*. 2017. Is. 1. P. 29–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.013>
35. **Energy-based** metric for analysis of organic PV devices in comparison with conventional industrial technologies / A.M. Gracia-Amillo, G. Bardizza, E. Salis, T. Huld, E.D. Dunlop // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2018. V. 93. P. 76–89.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.029>
36. **Comparative** studies of optoelectrical properties of prominent PV materials: Halide perovskite, CdTe, and GaAs / F. Zhang, J.F. Castaneda, S. Chen, W. Wu, M.J. di Nezza, M. Lassise, W. Nie, A. Mohite, Y. Liu, S. Liu, D. Friedman, H. Liu, Q. Chen, Y.-H. Zhang, J. Huang, Y. Zhang // *Materials Today*. 2020. V. 36. P. 18–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.01.001>
37. **Computational** study of stack/terminal topologies for perovskite based bifacial tandem solar cells / U.B. Qasim, H. Imran, M. Kamran, M. Faryad, N.Z. Butt // *Solar Energy*. 2020. V. 203. P. 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.078>
38. **Energy** yield of bifacial textured perovskite/silicon tandem photovoltaic modules / J. Lehr, M. Langenhorst, R. Schmager, F. Gota, U.W. Paetzold // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2020. V. 208. P. 110367.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110367>
39. **Development** of wide bandgap perovskites for next-generation low-cost CdTe tandem solar cells / T.D. Siegler, T.M. Shimpi, W.S. Sampath, B.A. Korgel // *Chem. Eng. Sci.* 2019. V. 199. P. 388–397.  
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.01.003>
40. **Investigation** on designed fins-enhanced phase change materials system for thermal management of a novel building integrated concentrating PV / W. Lu, Z. Liu, J.-F. Flor, Y. Wu, M. Yang // *Appl. Energy*. 2018. V. 225. P. 696–709.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.030>
41. **Review** on sun tracking technology in solar PV system / A. Awasthi, A.K. Shukla, M. Manohar S.R., C. Dondariya, K.N. Shukla, D. Porwal, G. Richhariya // *Energy Rep.* 2020. V. 6. P. 392–405.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypr.2020.02.004>
42. **Reisfeld R.** New developments in luminescence for solar energy utilization // *Opt. Mater.* 2010. V. 32. Is. 9. P. 850–856.  
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2010.04.034>
43. **Солнечный** элемент из кремния n-типа, двусторонний, концентраторный / Г.Г. Унтила, Т.Н. Кост, А.Б. Чеботарева, М.Б. Закс, А.М. Ситников, О.И. Солoduха, М.З. Шварц // *Физика и техника полупроводников*. 2012. Т. 46. Вып. 9. С. 1217–1223.
44. **Bifacial** Solar Photovoltaic Modules. Electric Power Research Institute (EPRI), Sept., 2016.
45. **Samuel L.M., Stein J.S., Burnham L.** Performance results for the prism solar installation at the New Mexico Regional Test Center: Field data from February 15 to August 15 2016. Sandia National Laboratories, U.S. Techn. Rep. SAND2016-9253.  
<https://doi.org/10.2172/1431472>
46. **Meyer Burger** scores 200 MW bifacial HJT supply deal in Italy. <https://www.pv-magazine.com/2017/10/25/meyer-burger-scores-200-mw-bifacial-hjt-supply-deal-in-italy> [Дата обращения 01.03.2021.]
47. **Optimization** and assessment of floating and floating-tracking PV systems integrated in on- and off-grid hybrid energy systems / P.E. Campana, L.Wästhage, W. Nookuea, Y. Tan, J. Yan // *Sol. Energy*. 2019. V. 177. P. 782–795.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.045>
48. **Chen Y., Strothers M., Benigni A.** All-day coordinated optimal scheduling in distribution grids with PV penetration // *Electr. Power Syst. Res.* 2018. V. 164. P. 112–122.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.07.028>
49. **Rauf H., Gull M.S., Arshad N.** Integrating floating solar PV with hydroelectric power plant: Analysis of Ghazi Barotha reservoir in Pakistan // *Energy Procedia*. 2019. V. 15. P. 816–821.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.214>
50. **Gomes I.S. F., Perez Y., Suomalainen E.** Coupling small batteries and PV generation: A review // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2020. V. 126. P. 109835.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109835>
51. **Economic** evaluation of a PV combined energy storage charging station based on cost estimation of second-use

- batteries / X. Han, Y. Liang, Y. Ai, J. Li // *Energy*. 2018. V. 165. Part A. P. 326–339.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.022>
52. **Parra D., Walker G.S., Gillott M.** Are batteries the optimum PV-coupled energy storage for dwellings? Techno-economic comparison with hot water tanks in the UK // *Energy Build.* 2016. V. 116. P. 614–621.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.039>
53. **Impact** of PV and variable prices on optimal system sizing for heat pumps and thermal storage / D. Fischer, K.B. Lindberg, H. Madani, C. Wittwer // *Energy Build.* 2016. V. 128 P. 723–733.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.008>
54. **Zero** energy level and economic potential of small-scale building-integrated PV with different heating systems in Nordic conditions / J. Hirvonen, G. Kayo, A. Hasan, K. Sirén // *Appl. Energy*. 2016. V. 167. P. 255–269.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.037>
55. **Габдерахманова Т.С., Попель О.С.** Результаты анализа конкурентоспособности фотоэлектрических систем микрогенерации в условиях Российской Федерации // *Докл. АН*. 2019. Т. 486. № 5. С. 543–546.  
<https://doi.org/10.31857/S0869-56524865543-546>
56. **Использование** фотоэлектрических водонагревателей в условиях жаркого климата / С.Е. Фрид, Н.В. Лисицкая, А.Б. Тарасенко, Н.Д. Фролова, М.Ж. Сулейманов // *Проблемы региональной энергетики*. 2020. № 3 (47). С. 92–100.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4018982>
57. **Alik R., Jusoh A.** An enhanced P&O checking algorithm MPPT for high tracking efficiency of partially shaded PV module // *Sol. Energy*. 2018. V. 163. P. 570–580.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.050>
58. **Active** power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart PV inverters / A.M. Howlader, S. Sadoyama, L.R. Roose, Y. Chen // *Appl. Energy*. 2020. V. 258. P. 114000.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114000>
59. **Fathy A.** Recent meta-heuristic grasshopper optimization algorithm for optimal reconfiguration of partially shaded PV array // *Sol. Energy*. 2018. V. 171. P. 638–651.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.014>
60. **Kim K.-S., Jeong S.-G., Kwon B.-H.** Single power-conversion DAB microinverter with safe commutation and high efficiency for PV power applications // *Sol. Energy*. 2019. 193. P. 676–683.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.087>
61. **Chandrasekaran K., Sankar S., Banumalar K.** Partial shading detection for PV arrays in a maximum power tracking system using the sine-cosine algorithm // *Energy Sustainable Dev.* 2020. V. 55. P. 105–121.  
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.01.007>
62. **Comprehensive** review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques / V. Gupta, M. Sharma, R.K. Pachauri, K.N.D. Babu // *Sol. Energy*. 2019. V. 191. P. 596–622.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.079>
63. **From** video games to solar energy: 3D shading simulation for PV using GPU / J. Robledo, J. Leloux, E. Lorenzo, C.A. Gueymard // *Sol. Energy*. 2019. V. 193. P. 962–980.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.041>
64. **Candas S., Siala K., Hamacher Th.** Sociodynamic modeling of small-scale PV adoption and insights on future expansion without feed-in tariffs // *Energy Policy*. 2019. V. 125. P. 521–536.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.029>
65. **Trends** in photovoltaic applications. Rep. IEA PVPS T1-36, 2019. [https://iea-pvps.org/trends\\_reports/2019-edition/](https://iea-pvps.org/trends_reports/2019-edition/) [Дата обращения 17.05.2021.]
66. **Постановление** Правительства РФ от 28.05.2013 № 449 (ред. от 27.09.2018) “О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности” (вместе с “Правилами определения цены на мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии”).
67. **Report** from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Renewable energy progress report Brussels. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b13b42a0-5ab2-11e9-9151-01aa75ed71a1/language-en>. [Дата обращения 01.03.2021.]
68. **Deep** solar radiation forecasting with convolutional neural network and long short-term memory network algorithms / S. Ghimire, R.C. Deo, N. Raj, J. Mi // *Appl. Energy*. 2019. V. 253. P. 113541.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113541>
69. **Киселева С.В., Лисицкая Н.В., Фрид С.Е.** Прогнозирование выработки солнечных станций и фотоэлектрических установок: основные подходы и результативность // *Альтернативная энергетика и экология*. 2020. № 7–18(330–341). С. 24–43.  
<https://doi.org/10.15518/isjaee.2020.07-18.024-043>
70. **Аронова Е.С., Емельянов В.М., Шварц М.З.** Прогнозирование энергопроизводительности многопереходных фотопреобразователей  $A_3B_5$  с оптическими концентраторами в различных географических районах // *Приборы и техника физического эксперимента*. 2013. Т. 177. № 3. С. 115–122;
71. **Untila G.G., Kost T.N., Chebotareva A.B.** Bifacial IFO/(n<sup>+</sup>pp<sup>+</sup>)Cz-Si/ITO solar cells with full-area Al-alloyed BSF and Ag-free multi-wire metallization suitable for low-concentration systems // *Sol. Energy*. 2019. V. 193. P. 992–1001.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.048>
72. **Untila G.G., Kost T.N., Chebotareva A.B.** ITO/SiO/n-Si heterojunction solar cell with bifacial 16.6%/14.6% front/rear efficiency produced by ultrasonic spray pyrolysis: Effect of conditions of SiO<sub>x</sub> growth by wet-chemical oxidation // *Sol. Energy*. 2020. V. 204. P. 395–405.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.076>

## Modern Development Trends in Photovoltaics (Review)

O. S. Popel<sup>a,\*</sup> and A. B. Tarasenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Joint Institute of High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

\*e-mail: O\_Popel@mail.ru

**Abstract**—Photovoltaics is developing around the world at the fastest rate in comparison with all other renewable energy sectors and demonstrates, owing to the improvement of relevant technologies and growing amounts of equipment manufacture, a significant decrease in both specific capital outlays per unit installed capacity of power installations and in the reduced cost of electricity generated by them with a simultaneous increase in the capacity utilization factor (CUF). The article briefly reviews the developments aimed at improving the characteristics of photovoltaic converters and development trends in the silicon photovoltaics technologies that have been seen in recent years. The article discusses the specific features, advantages, and shortcomings of the technologies for manufacturing silicon photovoltaic converters using passivated emitter and rear contact (PERC) technology, heterojunction modules that use HJT technology (a heterojunction on the basis of monocrystalline and amorphous silicon with intrinsic thin insulating layer), that with the *p-n*-junction brought to the wafer's rear side known as IBC technology (interdigitated back contacts), fragmented modules, and multijunction nonsilicon photovoltaic converters. It is pointed out that, in view of the fact that the achieved efficiency of silicon photovoltaic converters is approaching its theoretical limit, various methods for increasing the amount of solar radiation falling on the module surface, such as concentration of solar radiation, use of solar tracking systems, and use of bifacial modules, are becoming of special importance. The growing production of bifacial modules, silicon-based heterojunction modules, and, in the future, tandem structures with the use of perovskite-like materials generates the need to modify the methods used to predict the power output generated by photovoltaic modules with taking into account their spectral sensitivity. The state of photovoltaics development in Russia is briefly reviewed. Problems connected with the integration of photovoltaic stations into the grid are discussed, including matters concerned with using electric energy storage devices and flexible tariff regulation, and, as far as the private sector is concerned, promoting consumption of the energy inside the household in which it was produced. These problems will become increasingly more topical with a growth in the share of solar generation in the grid. It is pointed out that prices for photovoltaic modules can reach a competitive level in the world's market primarily owing to increasing the amounts of their manufacture up to 1 GW per annum or more.

*Keywords:* photovoltaic converter, production technologies, passivated emitter and rear contact (PERC), heterojunction with intrinsic thin layer (HJT), interdigitated back contacts (IBC), bifacial module, photovoltaic stations, photovoltaics in Russia, stimulation measures