

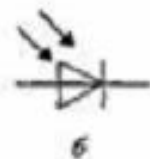
Современные тенденции развития конструкции и технологии фотоэлектрических преобразователей и модулей на их основе

Тарасенко А.Б., ОИВТ РАН

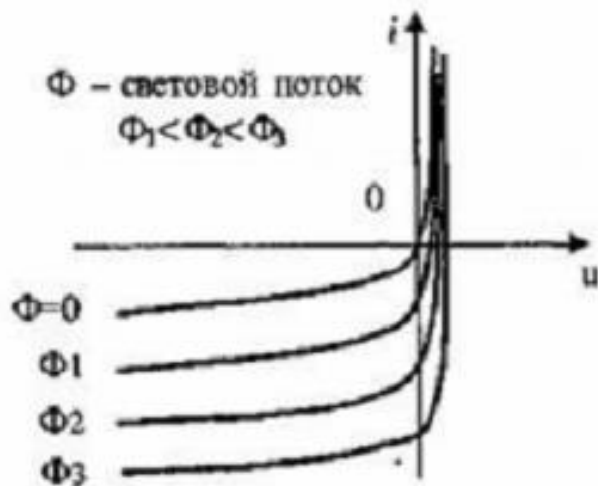
Физические основы прямого преобразования солнечной энергии в электрическую



Функциональная схема перехода



Обозначение фотопреобразователя на электрических схемах



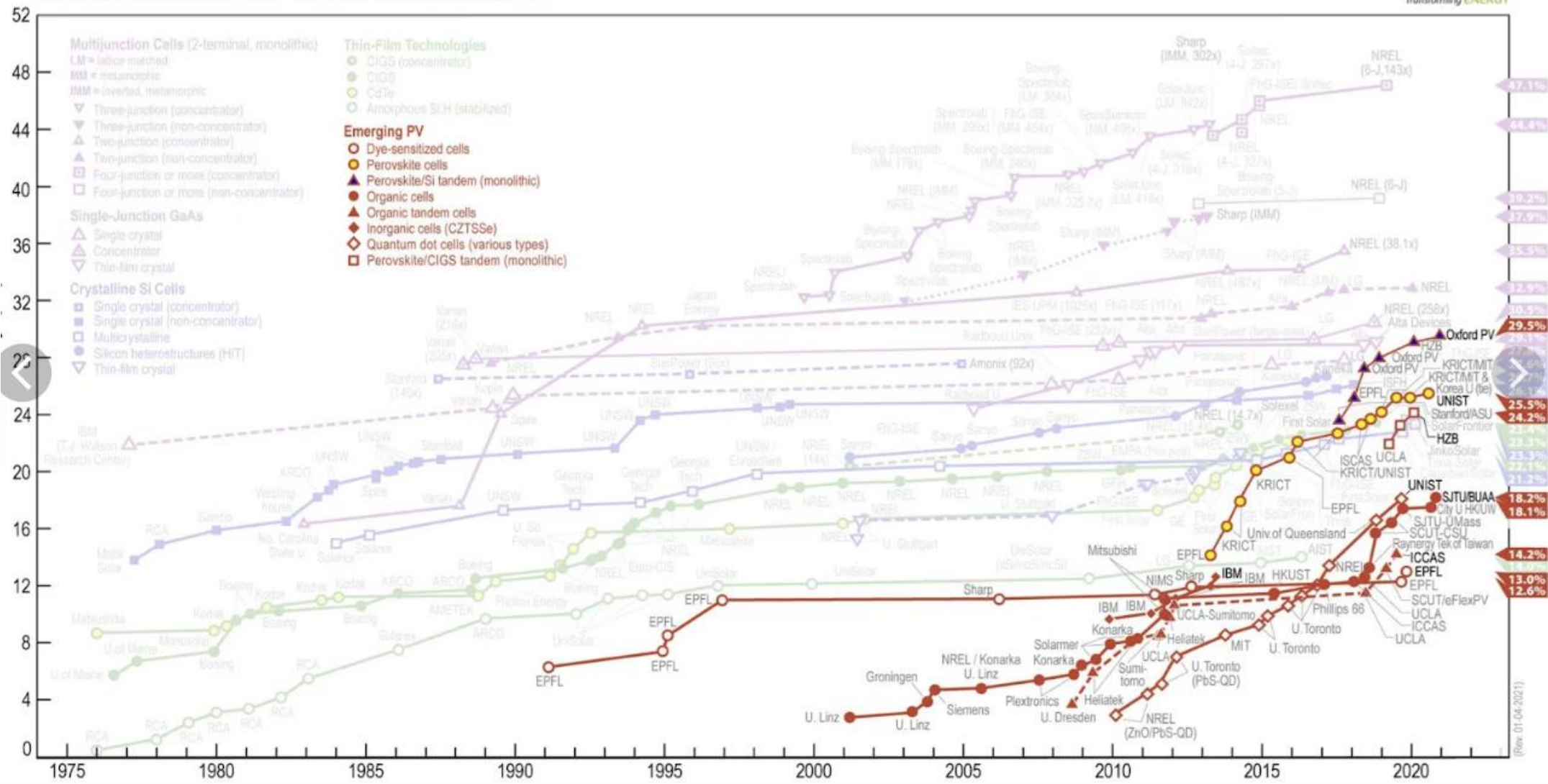
ВАХ перехода при различной интенсивности облучения

Р-п переход является физической основой фотоэлектрических преобразователей различных типов. р-п переход формируется на границе раздела двух полупроводников с различной проводимостью.

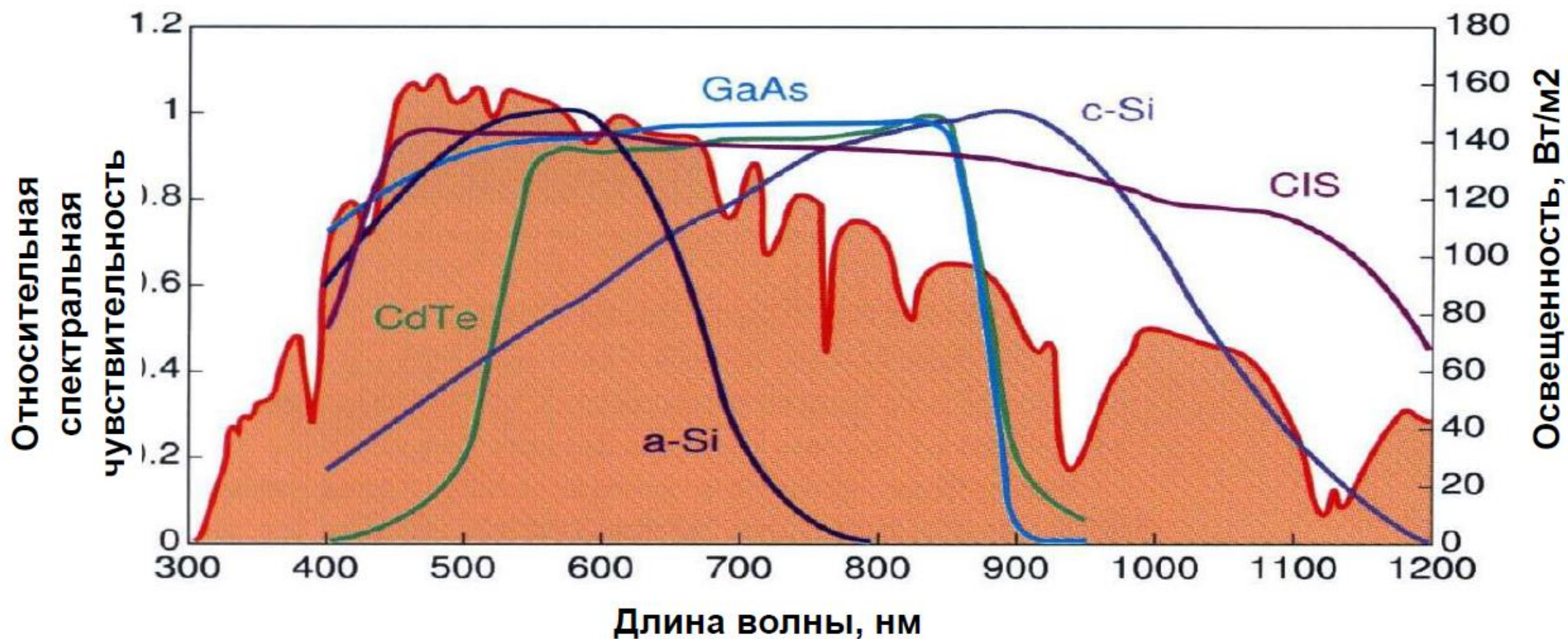
Падающие на эту область кванты света обеспечивают разделение зарядов разного знака и генерацию тока во внешней цепи.

Величина тока зависит от природы полупроводниковых материалов, интенсивности падающего излучения и температуры

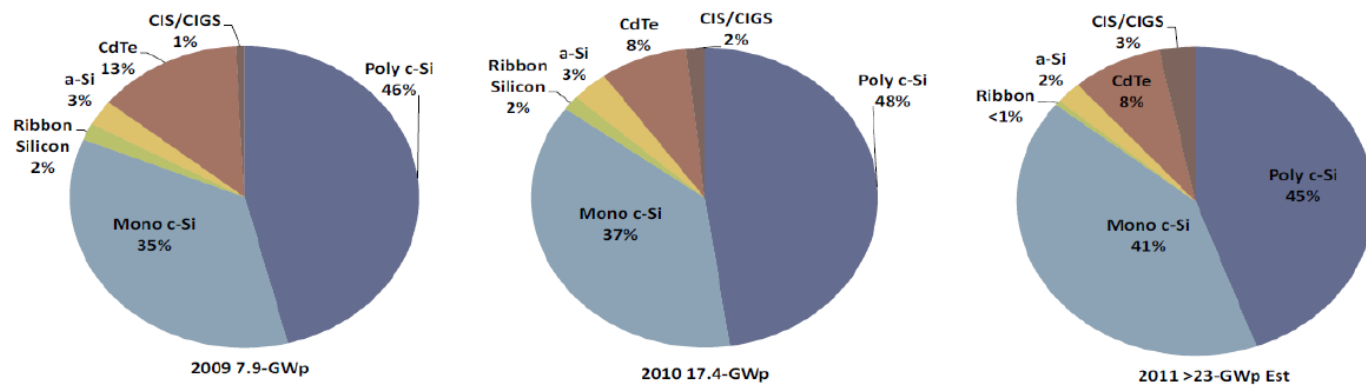
Best Research-Cell Efficiencies



Спектральная чувствительность различных фотоэлектрических преобразователей

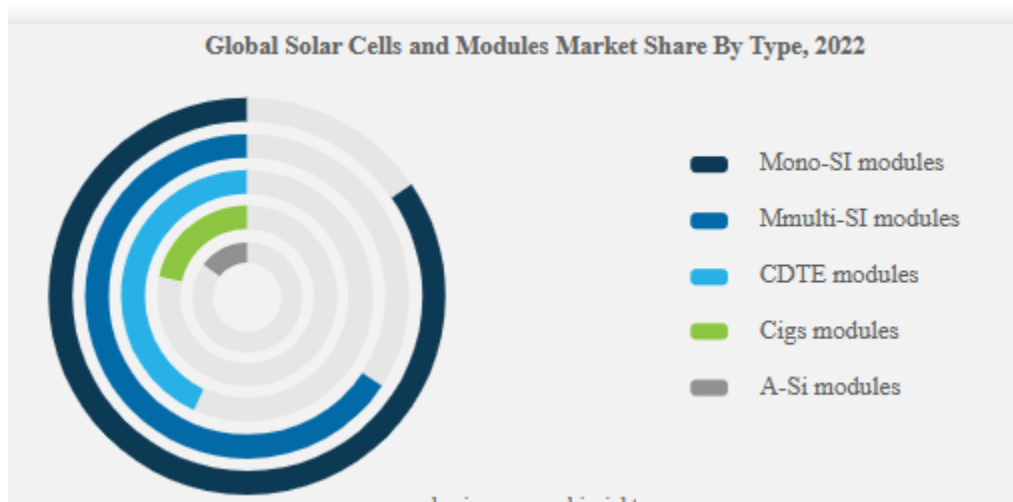
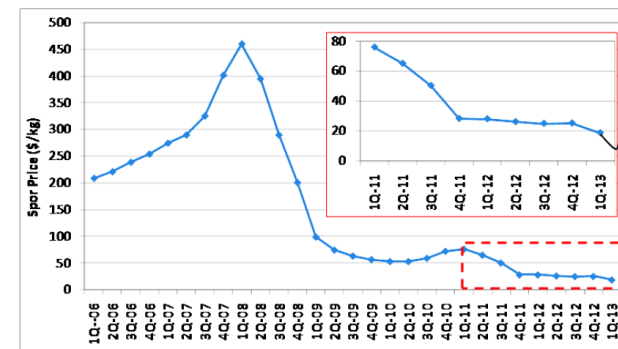


HEVEL
SOLAR

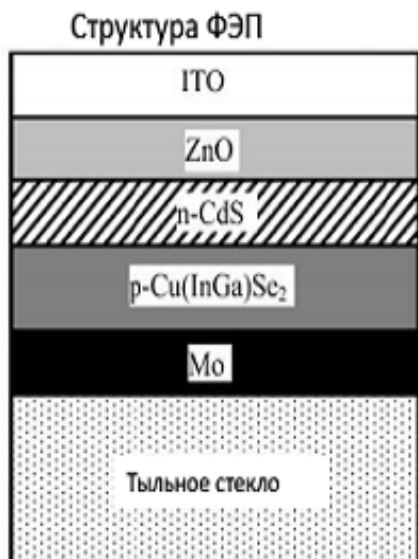


Source: Navigant Consulting

СНИЖЕНИЕ ЦЕНЫ НА ПОЛИКРЕМНИЙ С 2008 ПО 2013 гг.



Высокая доступность и отработанные технологии привели к доминированию на рынке кремниевых фотоэлектрических преобразователей с тенденцией к увеличению доли монокристаллических пластин



В случае формирования ФЭП на металлической фольге подслоя молибдена не используется

Thin-Film Solar Cells: An Overview, K. L. Chopra¹, P. D. Paulson^{2*}, and V. Dutta,
PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS
Prog. Photovolt: Res. Appl. 2004; 12:69–92 (DOI: 10.1002/plp.541)

Основные проблемы – использование кадмия (токсичный элемент) индия и галлия (редкие элементы). Перспектива – их замена на цинк и олово.



Компания Nanosolar (США):

- Жидкофазное осаждение (струйная печать) обоих полупроводниковых слоев на алюминиевую фольгу (отсутствие молибденового подслоя);
- Использование слоя ITO
- Введение селена в процессе формирования чернил
- Сборка безрамочного модуля из отдельных ФЭП на фольге

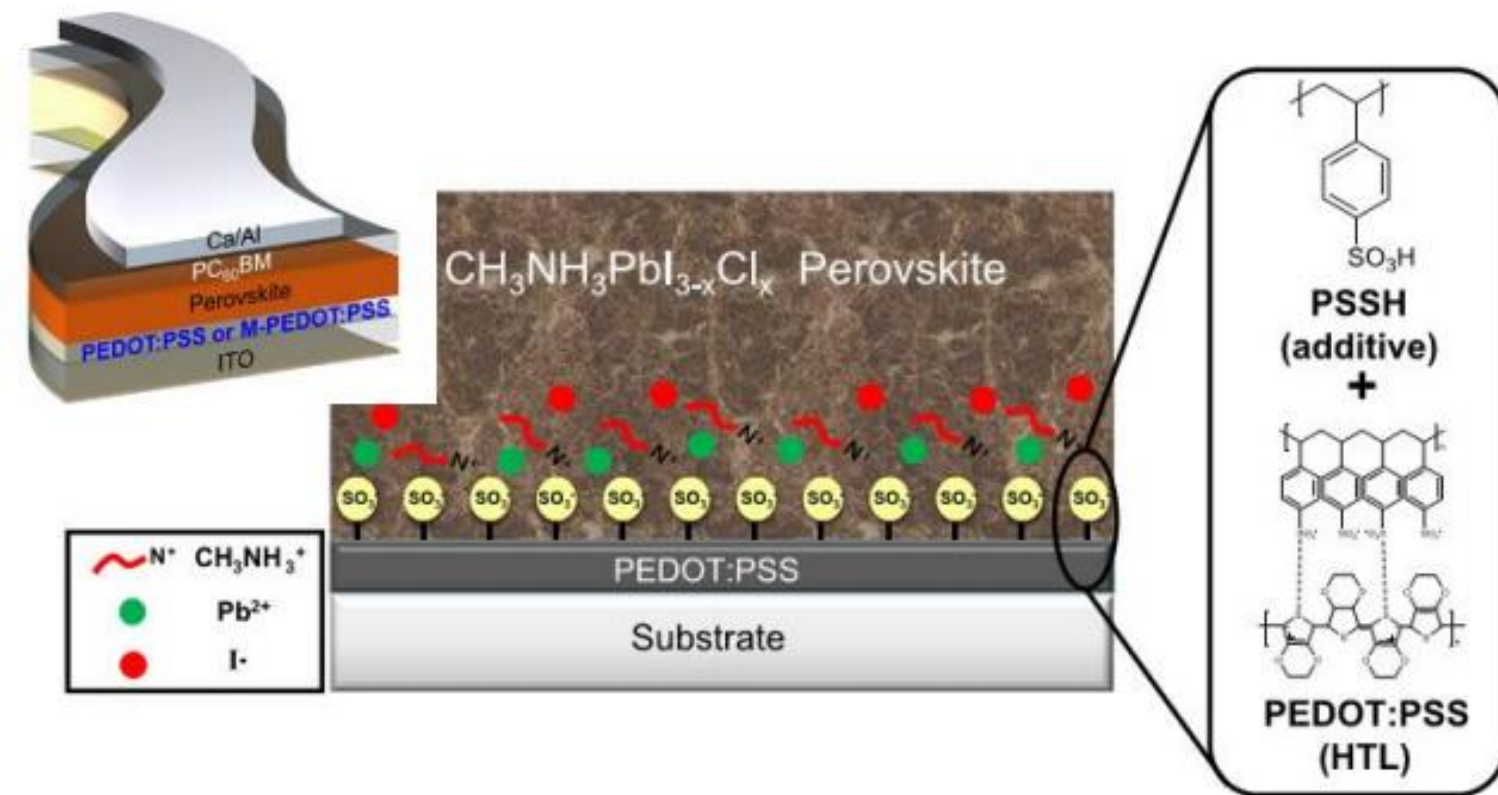
Кпд модуля 9-10%

Компания Stion (США):

- формирование p-слоя методом магнетронного напыления с последующим газофазным введением серы и селена;
- Использование слоя оксида цинка
- Рамочный полноразмерный модуль формируется сразу на стекле с использованием промежуточного подслоя Mo|SiO₂

Кпд модуля 12-13%

На лабораторном уровне достигнут кпд 20,4%



H. Back et al. / Solar Energy Materials & Solar Cells 144 (2016) 309–315

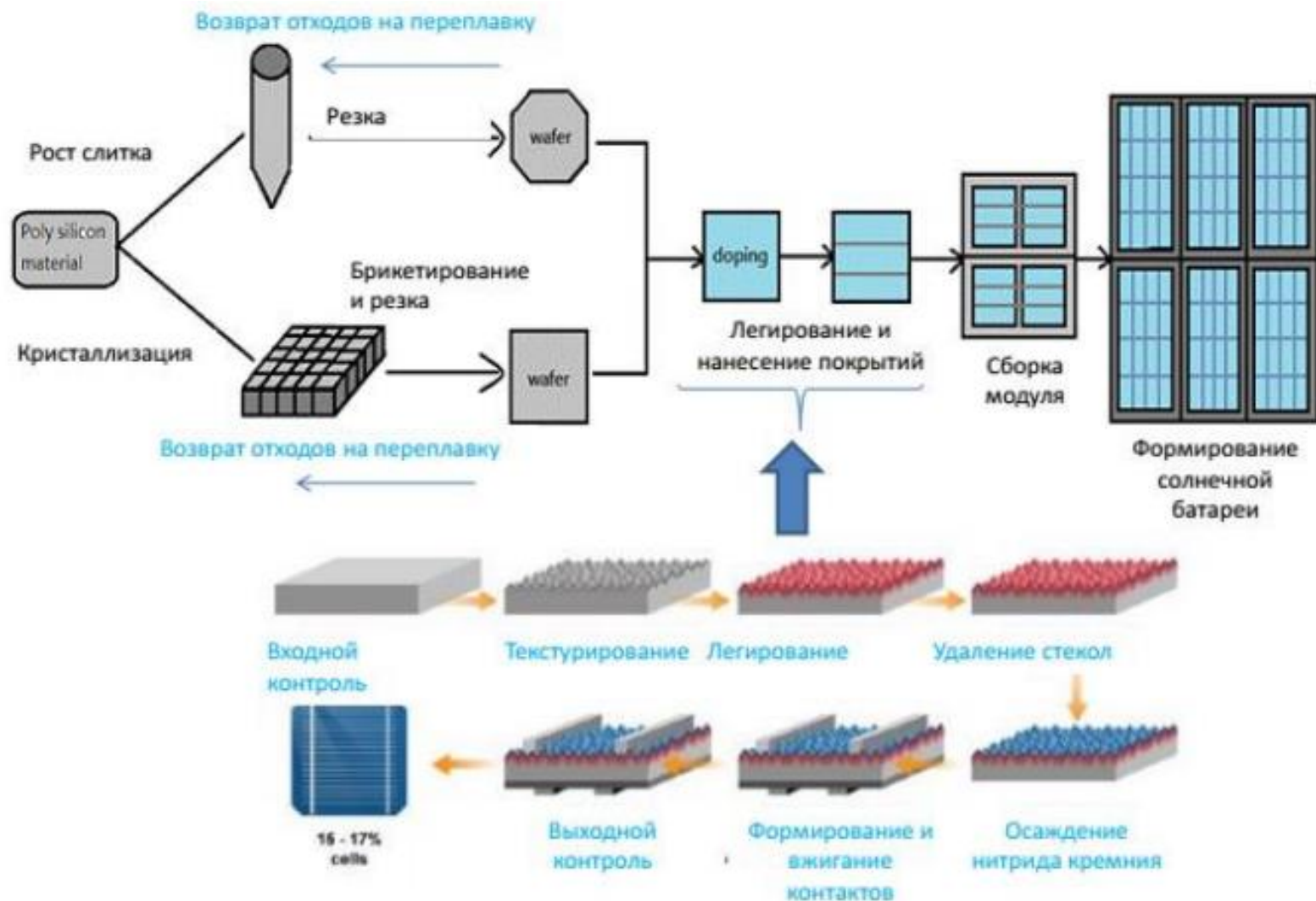
Достоинства перовскитоподобных материалов:

- Большая ширина запрещенной зоны;
- Высокая подвижность носителей заряда;
- Большая длина пробега экситона.

Наибольшее значение кпд, достигнутое в лабораторных условиях, составило 19%

Важным технологическим преимуществом полимерных материалов солнечной энергетики является возможность использования технологий струйной и трафаретной печати, напыления, осаждения из жидкой фазы с последующей термообработкой для формирования фотоактивных слоев



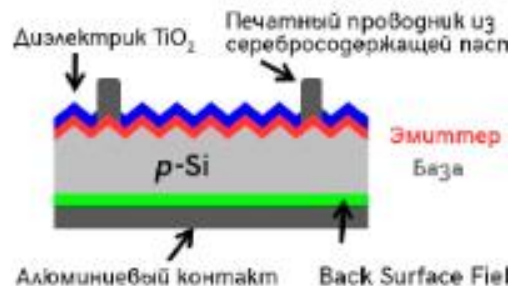


A. Goodrich et al. / Solar Energy Materials & Solar Cells 114 (2013) 110–135

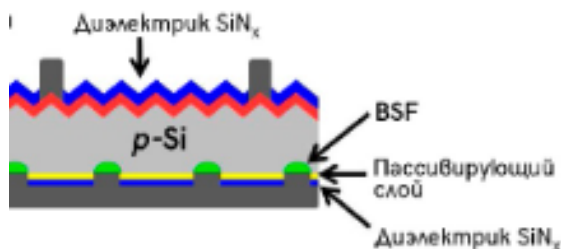
Основные усилия по развитию технологий направлены на:

- Переход на исходные пластины n-типа (снижение деградации);
- Пассивацию краев кристалла и областей контактов;
- Создание «зеркал» для носителей заряда за счет усиленного легирования областей, прилегающих к контактам;
- Оптимизация структуры контактов ФЭП;
- Снижение себестоимости исходных пластин (снижение толщины, уменьшение потерь при резке, использование квазимонокристаллического кремния).

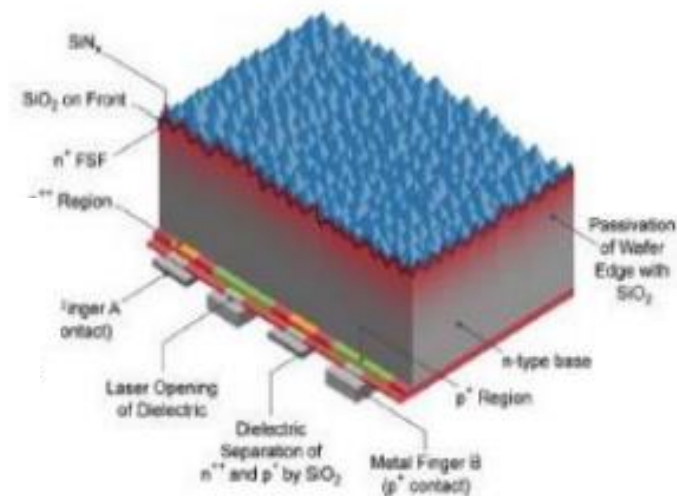
AL-BSF



PERC



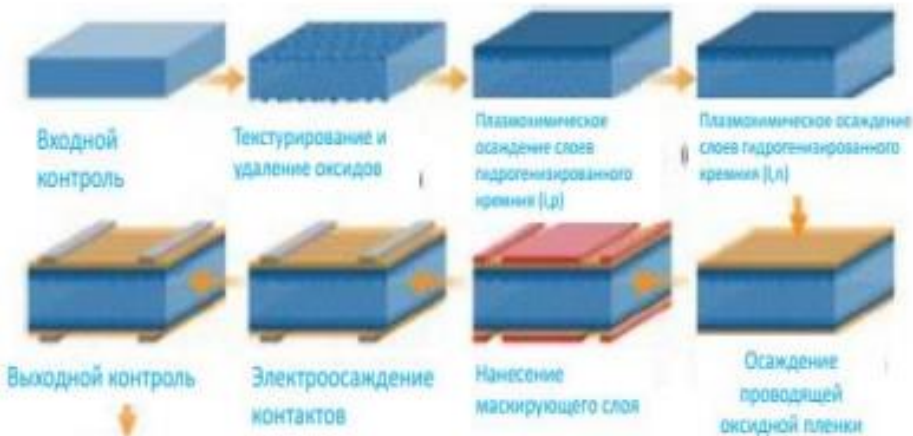
Вынос контактов на тыльную сторону IBC (Interdigitated Back Contact)



A. Goodrich et al. / Solar Energy Materials & Solar Cells 114 (2013) 110–135

Данный вариант обеспечивает рекордные значения КПД, однако очень чувствителен к качеству исходных пластин

HIT- гетероконтактная структура с тонким внутренним слоем



На сегодняшний день данная технология обладает самым существенным потенциалом для резкого увеличения КПД ФЭП:
-Высокий КПД монокристаллического кремния сочетается с повышенной температурной устойчивостью и расширенной областью поглощения света, характерными для технологий аморфного кремния

Вместе с тем остаются вопросы, связанные с качеством исходных кремниевых пластин, капитальными и эксплуатационными вопросами. Промышленное внедрение осуществлено только фирмой Panasonic (HIT Photovoltaic Module VBHN240SA06, 21,6% КПД)



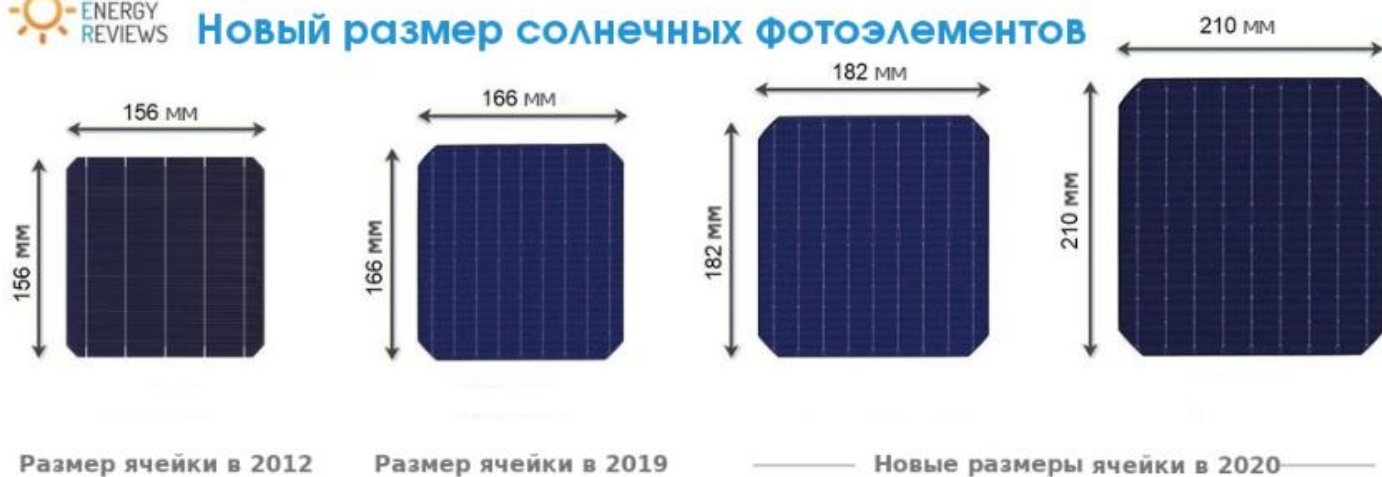
Solarhome.ru

- Ключевым событием для отрасли послужила разработка Мартином Грином в 1992-1997 г технологий эффективной пассивации дефектов в ФЭП
- Только к 2011 году появились промышленные технологии для реализации данного подхода
- Для дальнейшего роста мощности был реализован переход на сегментированные фотоэлектрические преобразователи, соединенные параллельно
- Массовое внедрение мультишинных контактов

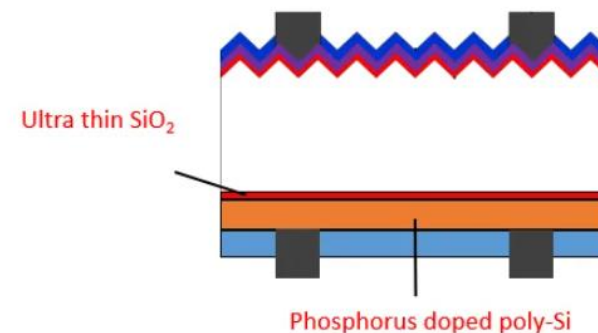
Физические основы прямого преобразования солнечной энергии в электрическую



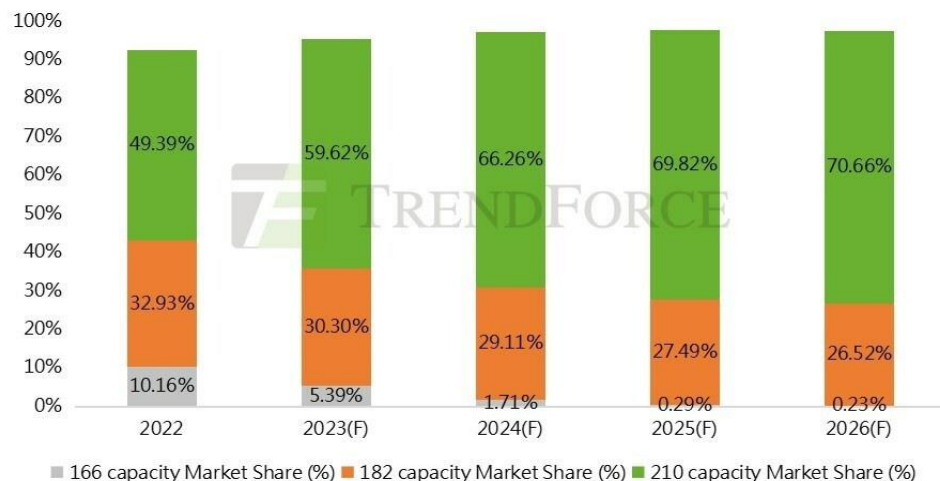
Новый размер солнечных фотоэлементов



Solarhome.ru

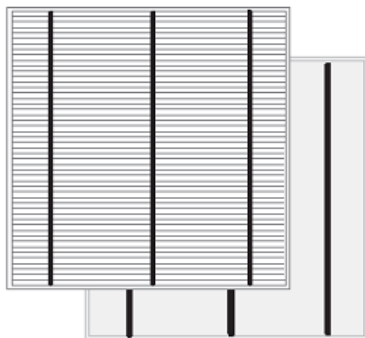


(b) n-type TOPCON solar cell

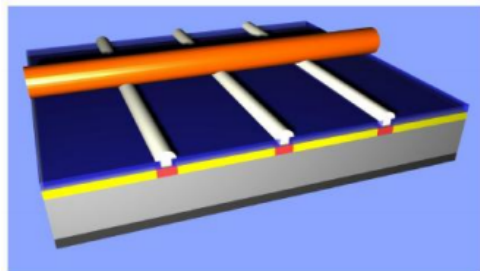


Туннельный контакт (TOPCon) как дальнейшая эволюция PERC и дальнейшее снижение паразитной рекомбинации носителей в контактной зоне
Широкое распространение двусторонних модулей

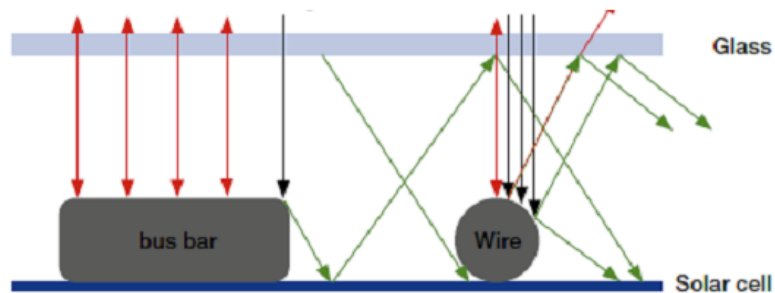
Различные схемы контактных структур



- Классическая технология контактных структур – «реснички» и контактные площадки, формируемые методом трафаретной печати серебросодержащих паст с последующим спеканием.

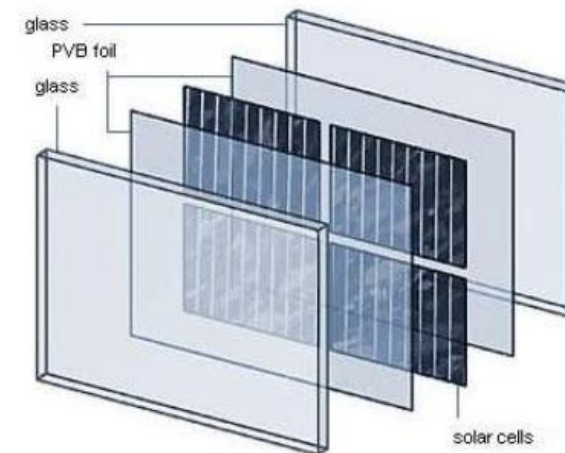


- Подход компании Schmid (ФРГ) – формирование «ресничек» из сплавов меди и никеля (гальваническое осаждение) и переход от 2-3 шин на 10-15 проволок

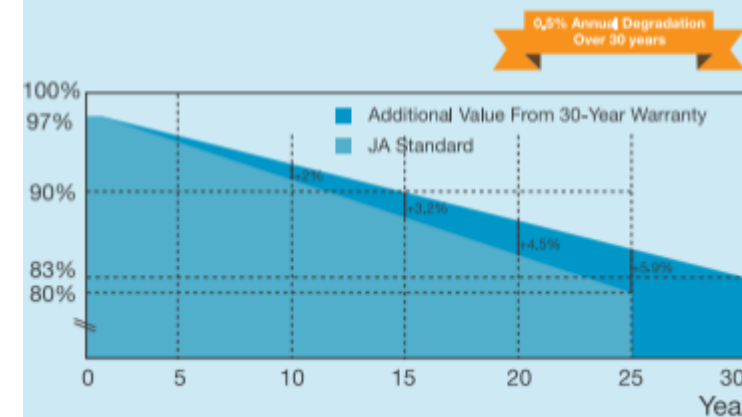


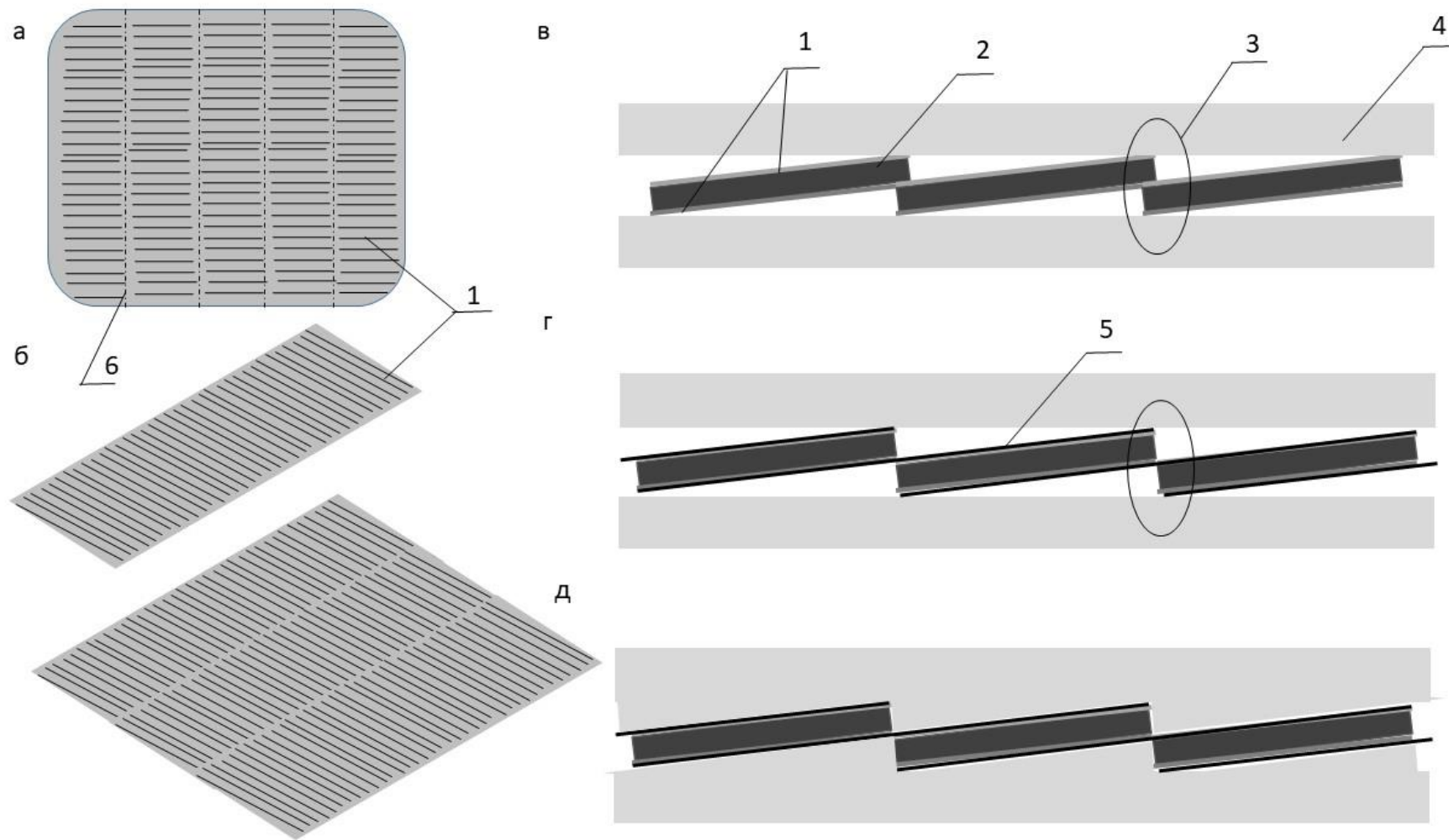
- Подход компании Meyer Burger (Швейцария) – проволочной контактной сетки на пленке с последующим ее соединением с ФЭП

Переход к конструкции с двумя стеклами – увеличение прочности и срока службы



- 10-year product warranty
- 30-year linear power output warranty





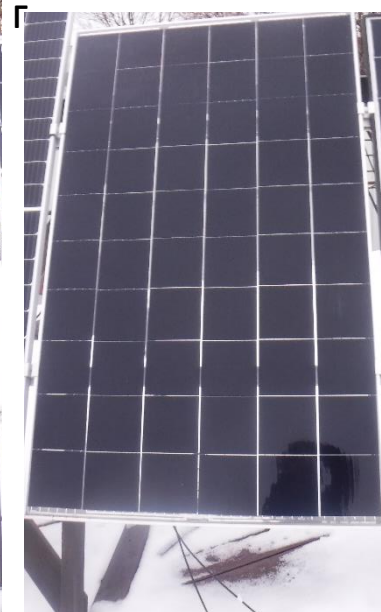
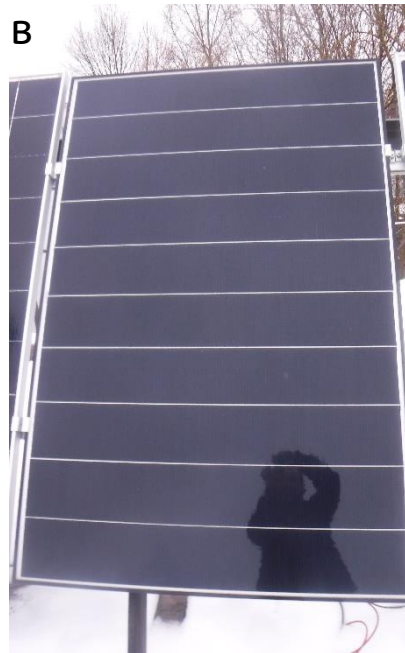
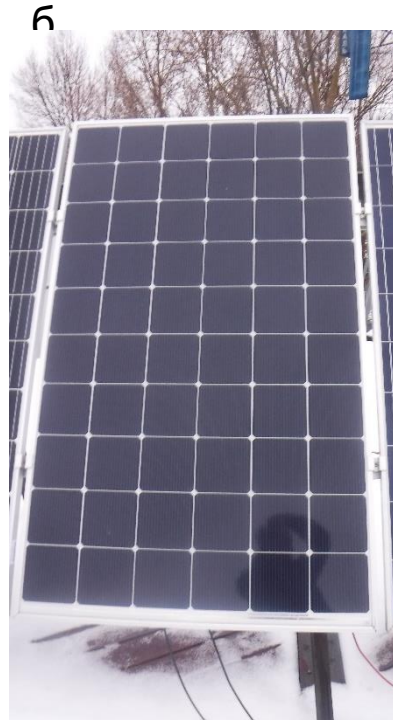
подготовка ФЭП к фрагментированию, б- схема набора линейки из фрагментов, в – стандартная схема соединения и ламинирования линейки с использованием электропроводного адгезива, г – схема соединения и ламинирования линейки с использованием проводников Smart Wire, д – схема соединения и ламинирования линейки с использованием проводников и структурированной ламинирующей пленки.
1 – контактная сетка, напечатанная на поверхности ФЭП, 2 – фрагмент ФЭП, 3 – зона перекрытия соседних фрагментов, 4 – ламинирующая пленка под стеклом, 5 – проводники Smart Wire, 6 – разметка под лазерную или механическую резку ФЭП.

2022 г

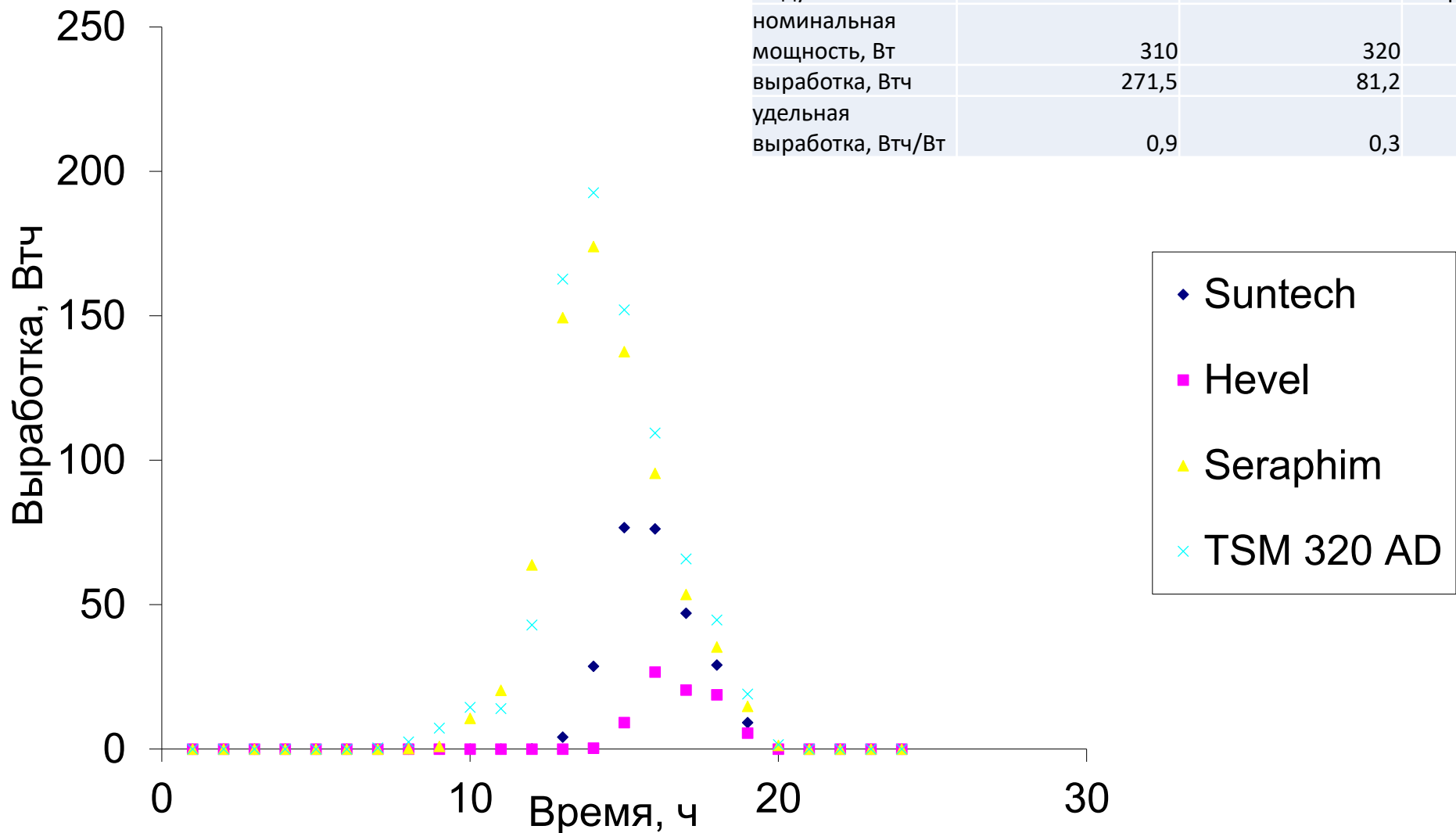
- Доминирование PERC-технологии, пока в р-варианте;

- Переход к Half-cell элементам
- Интерес к HJT и тандемам;
- Двусторонние модули;
- Интерес к пластинам n-типа.

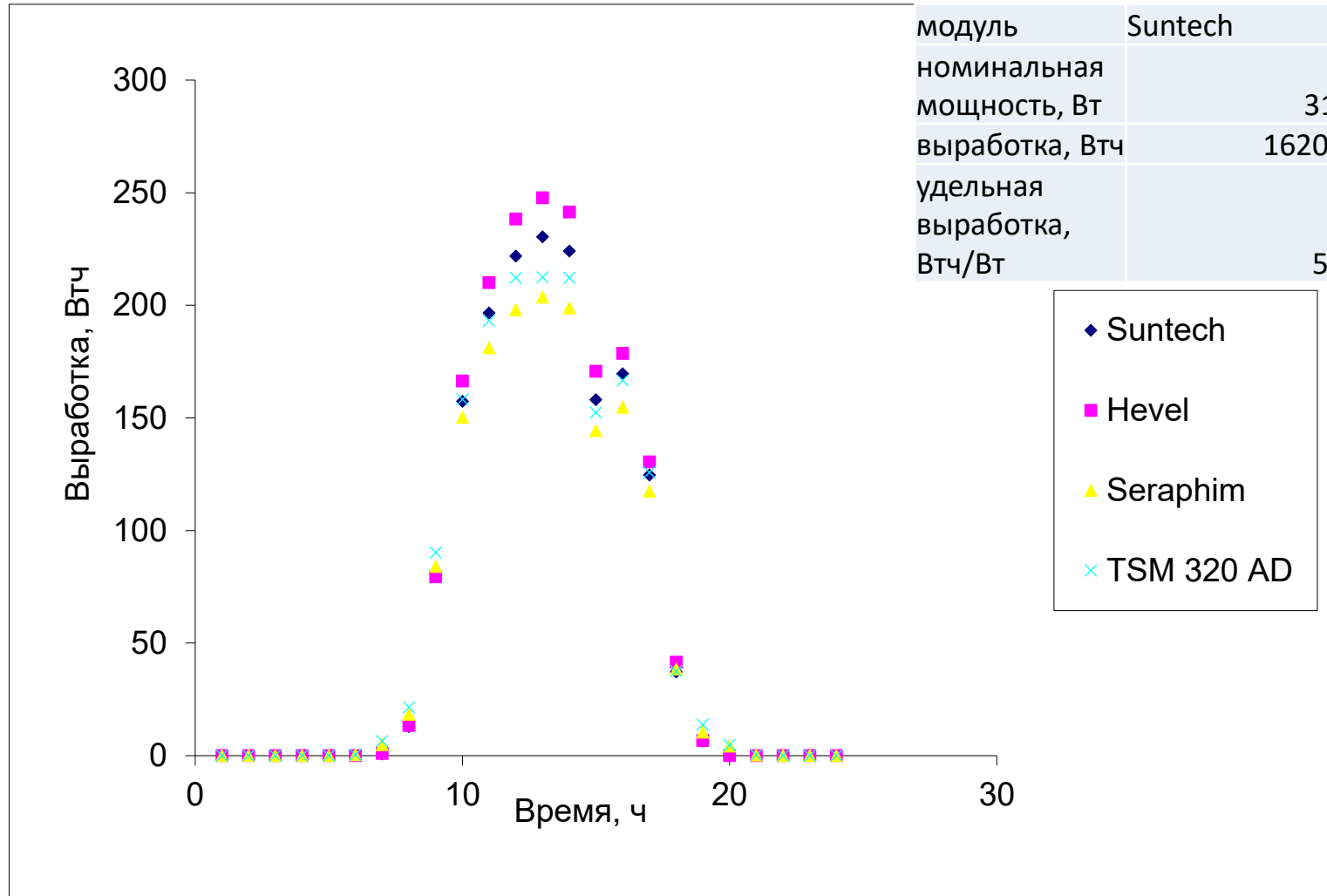
На неопределенное время приостановился выпуск чешуйчатых модулей, упал интерес к IBC-системам, несмотря на успешные работы ECN по их удешевлению



модуль	Suntech	Hevel	Seraphim	TSM 320 AD
номинальная мощность, Вт	310	320	320	320
выработка, Втч	271,5	81,2	757,7	830,3
удельная выработка, Втч/Вт	0,9	0,3	2,4	2,6

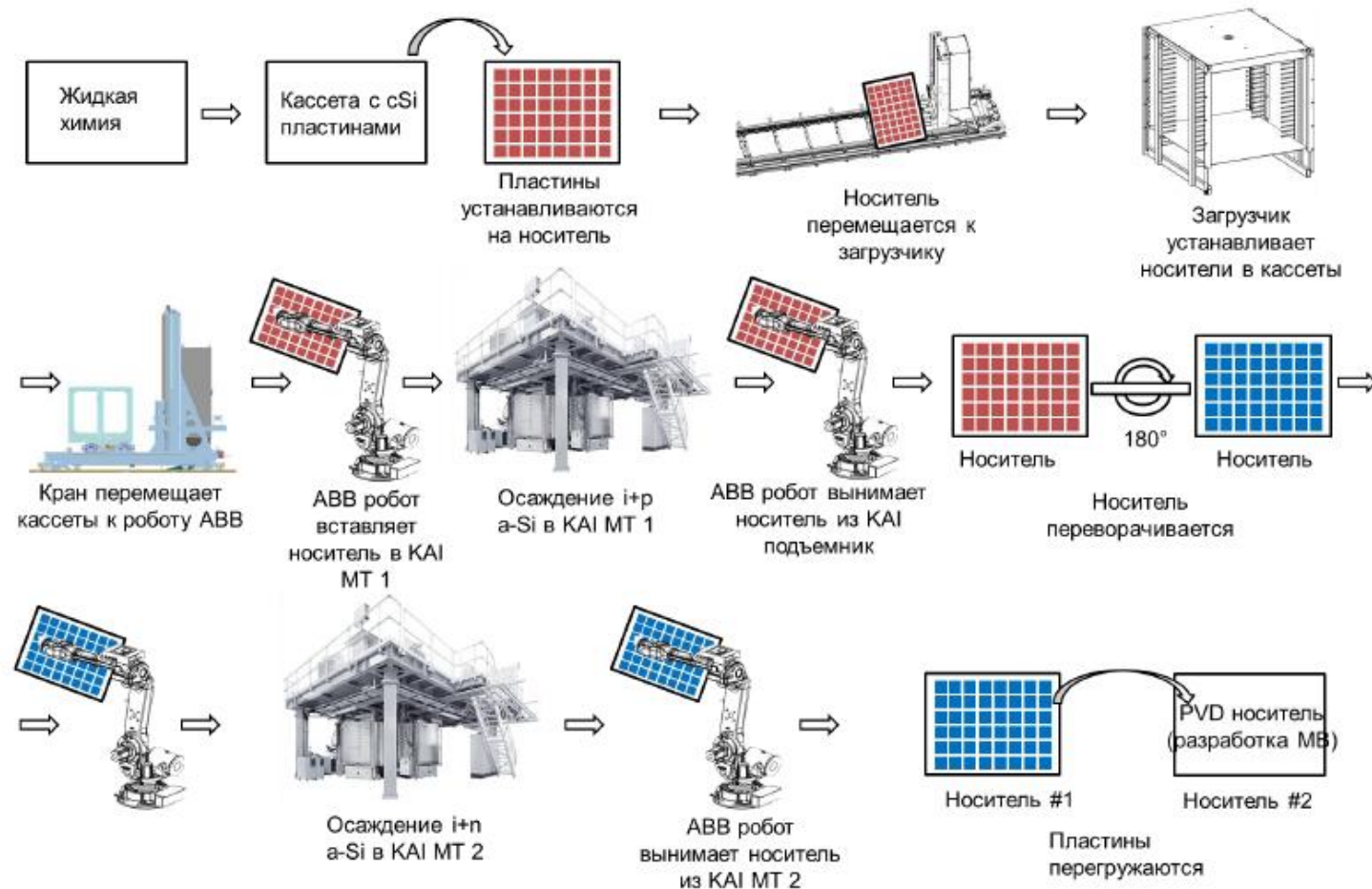


Работа модулей в жаркую погоду

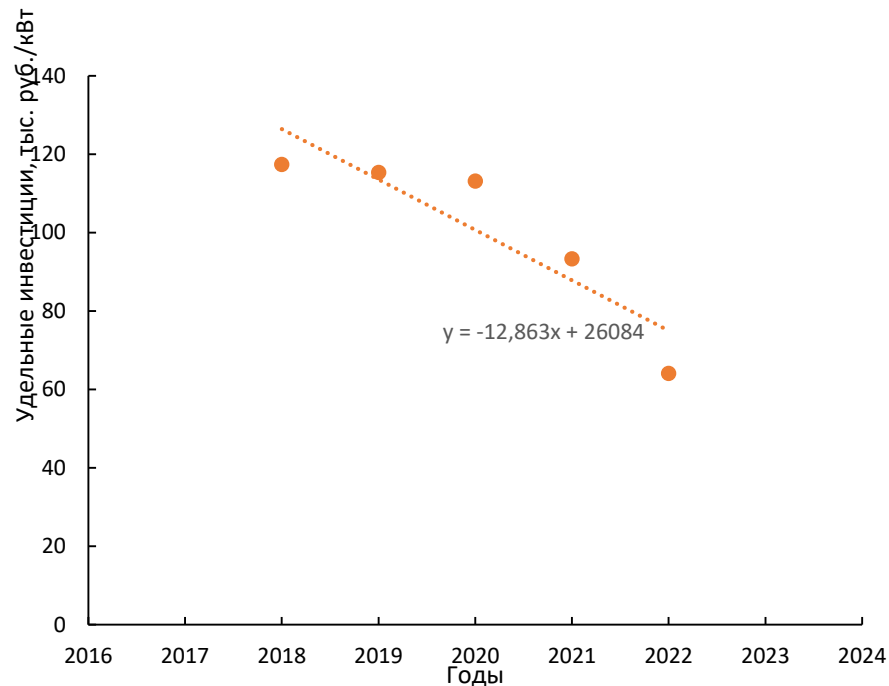


модуль	Suntech	Hevel	Seraphim	TSM 320 AD
номинальная мощность, Вт	310	320	320	320
выработка, Втч	1620,9	1725,8	1509,0	1607,6
удельная выработка, Втч/Вт	5,2	5,4	4,7	5,0

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ НJT С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТАНОВОК KAI



- 300 МВт/год – сейчас (Новочебоксарск)
- +1 ГВт, локализация производства пластин – план (ЭНКОР, Калининград)
- Переход на Half-cell (182 mm)



Тенденции изменения удельных инвестиций для сетевых ФЭС установленной мощностью более 25 МВт.



Оценки замещенных применением ФЭС выбросов CO2

Всего по ЕЭС, т								за 2014-21 гг
оптимистичный сценарий, млн.т.	5061	49711	379785	517069	866315	1333039	1513226	4664206
реалистичный сценарий, млн. т.	4173	40985	315341	432390	728942	1126601	1279805	3928236

Некоторые параметры современных фотоэлектрических модулей

Модуль	LONGi, LR5-54HTH 445 M (HIMO6)	Suntech Ultra V STP-405S-C54	Suntech Ultra V Pro STP-420S-C54	Suntech Ultra X STP-665S-D66	Хевел HVL 445MBB	HVL-390/HJT MBB
Технология	IBC, half-cell	PERC, half-cell	TOPCon, half-cell	PERC, half-cell	HJT, Half-cell	HJT, mbb
Пиковая мощность фотоэлектрического модуля (STC – стандартные условия тестирования), Вт	445	405	420	665	445	390
площадь модуля, м2	1,9	1,9	1,9	3,1	2,2	2,0
напряжение холостого хода, В	39,7	37,24	38,46	46,25	53,14	53,08
напряжение в рабочей точке, В	33,44	31,38	31,96	38,25	44,94	44,71
ток в рабочей точке, А	13,31	12,91	13,14	17,39	10,91	8,76
температурный коэффициент мощности, %/°C	-0,29	-0,34	-0,3	-0,34	-0,26	-0,285
установившаяся рабочая температура ФЭП (Noct),°C	45	42	42	42	38,8	38,8
стоимость модуля, руб.	10426	9940	11246	15580	25790	27190
деградация мощности, %/год	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6

- Можно констатировать, что типовой модуль 2023 года сделан на основе монокремниевых пластин р-типа увеличенного размера в конструкции half-cell, по технологии PERC, имеет кпд 19-20%, мощность 450-550 Вт и габариты около 2 м². В подавляющем большинстве случаев этот модуль или по крайней мере ФЭП для него произведены в Китае.
- Средняя мощность китайского завода составляет более 10 ГВт/год.
- В России доминирующей технологией остается кремниевая гетероструктурная.
- К преимуществам гетероструктурных модулей следует отнести пониженный температурный коэффициент мощности, однако паспортное значение этого параметра для современных half-cell PERC модулей за счет оптимизации конструкции токосъема оказывается пока сопоставимым.
- В условиях оснежнения и, видимо, других типов частичного затенения конструктивное разбиение модуля на несколько параллельно соединенных электрически фрагментов полностью оправдывает себя, в то время как отказ от ошиновки в пользу токопроводного клея ухудшает выработку в жаркую погоду. (адекватная работа модуля в жаркую погоду все-таки важнее устойчивости к оснежнению даже в российских условиях, поскольку именно на жаркие месяцы года приходится максимум поступающей солнечной радиации и, соответственно, выработки).
- Следующим этапом развития мировой фотоэнергетики вероятнее всего станет массовое технологии TOPCon, модернизацией существующих производств на основе PERC. Возможно также возвращение к чешуйчатым конструкциям с оптимизированными шинами вместо электропроводного клея.