

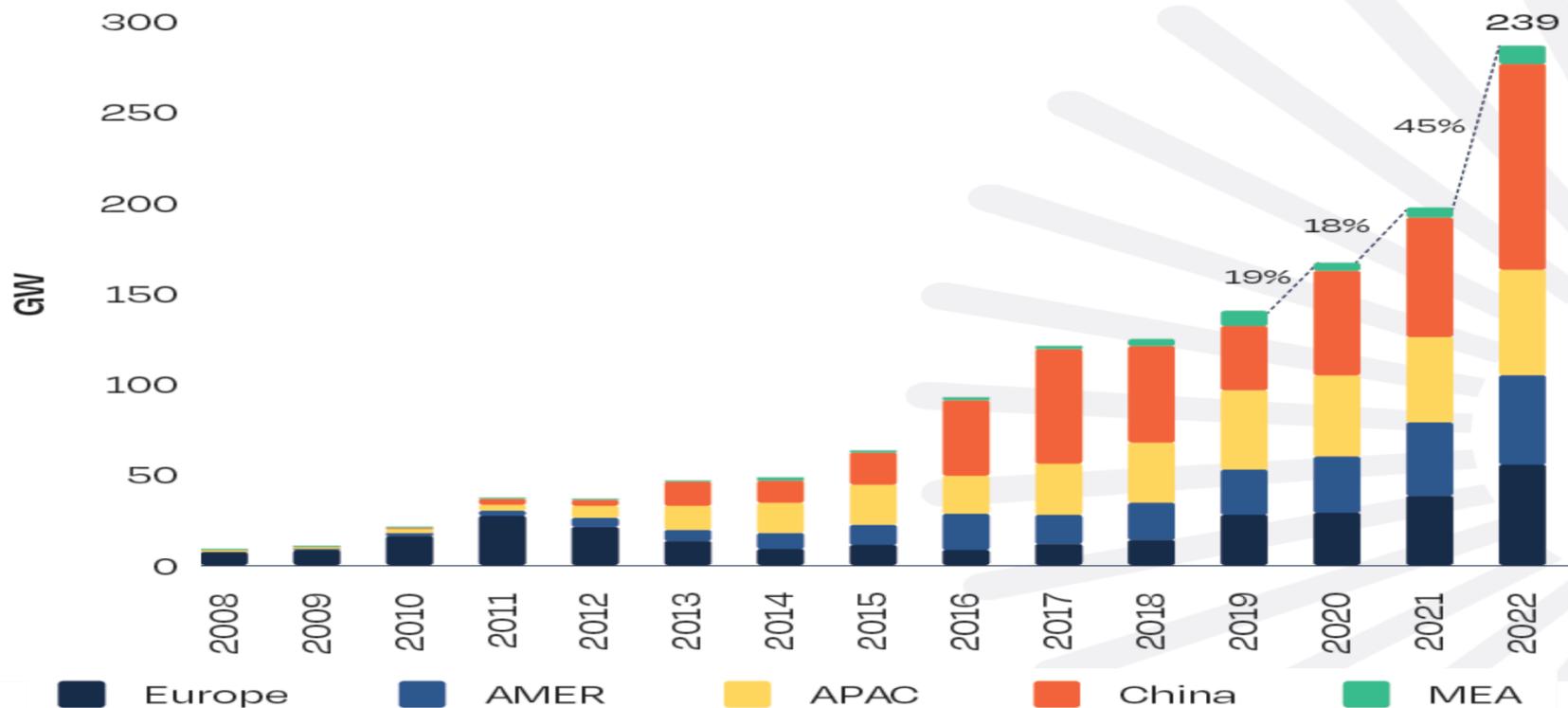
Солнечная энергетика на кремнии: основные тренды

(Школа молодых ученых , «Роль возобновляемой энергетике при переходе к углерод-нейтральной экономике), 20-19 ноября 2024, МГУ, Москва)

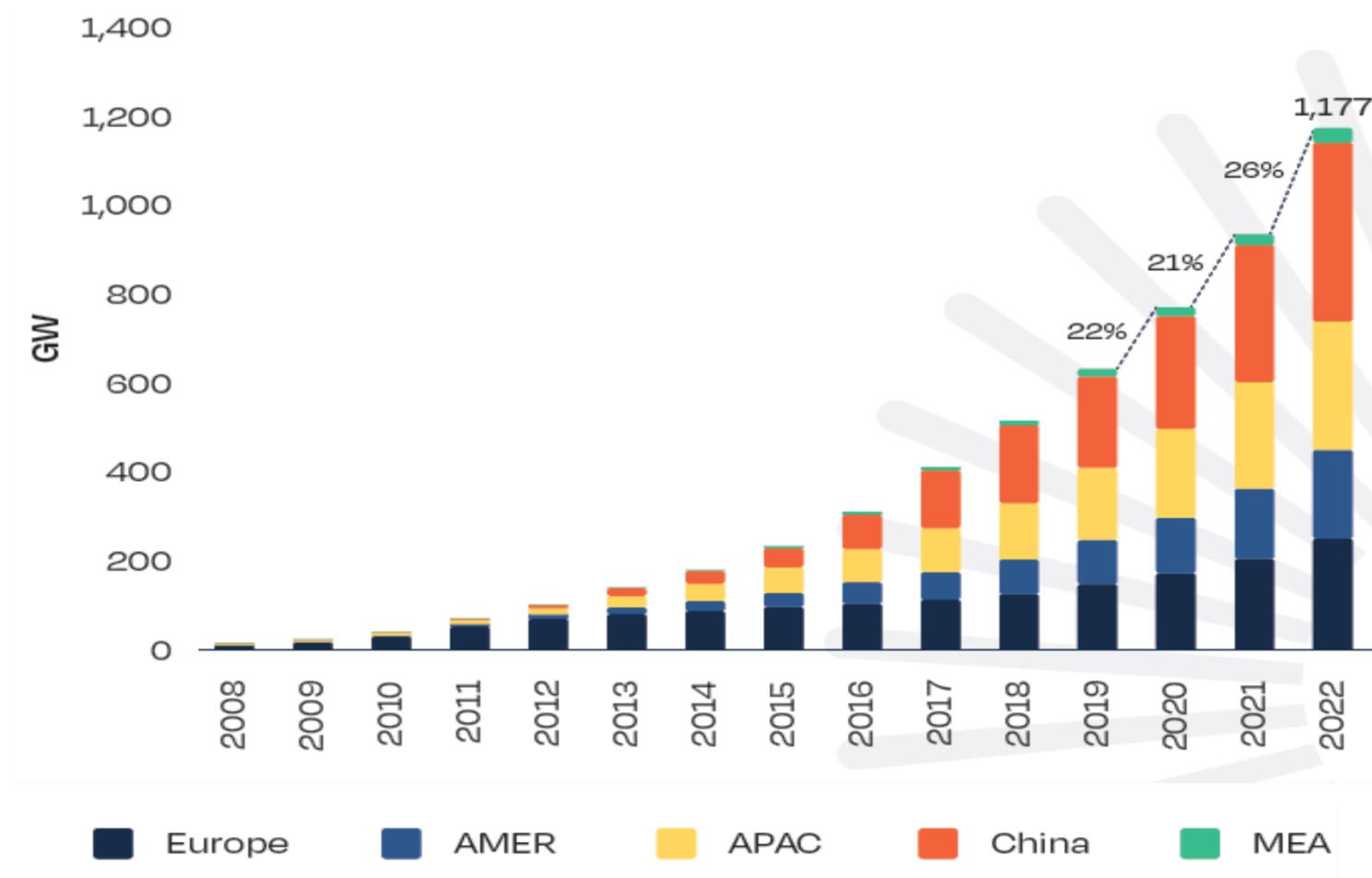


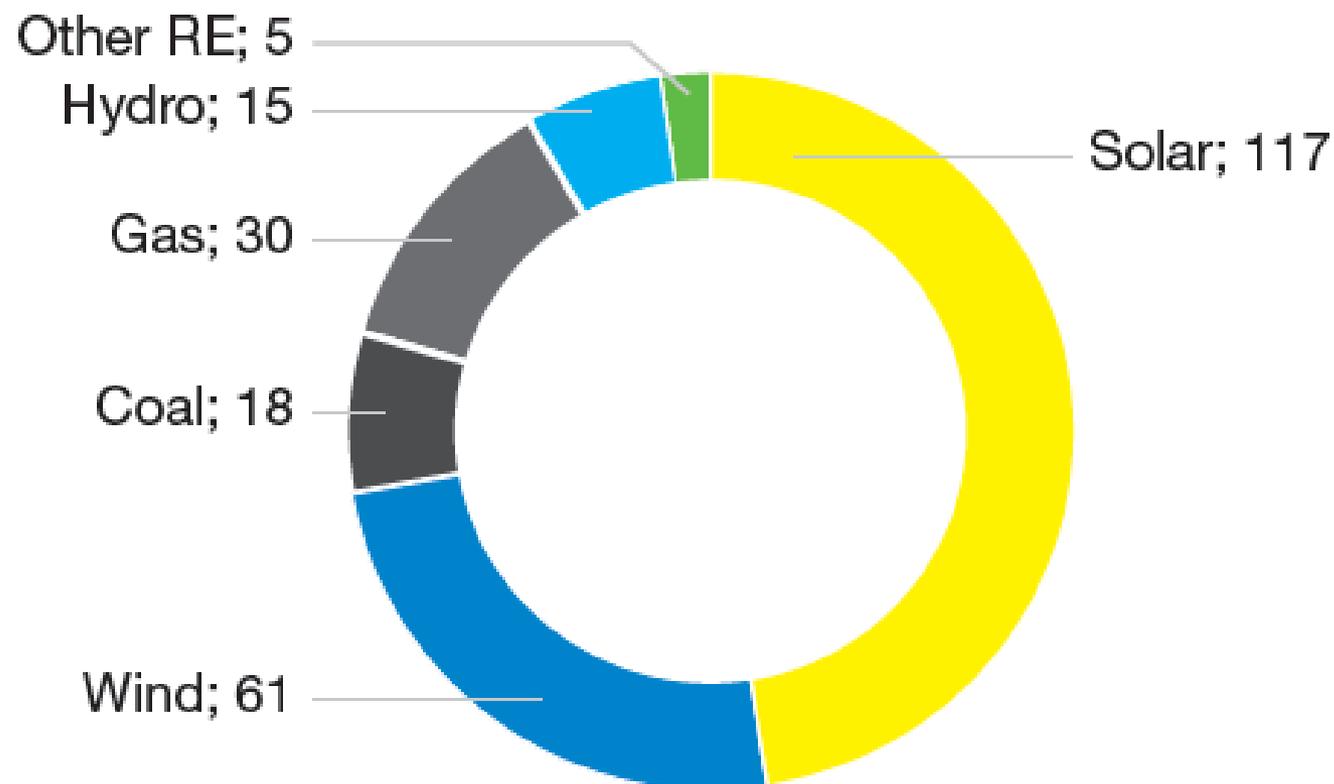
**Заместитель генерального директора
по научной работе ООО «НТЦ ТПТ»,
д.т.н. Теруков Евгений Иванович**

Ежегодный прирост установленной мощностей солнечных батарей в 2008-2022 г.г.



Суммарная мощность установленных в мире солнечных батарей





Source: Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF (2020).

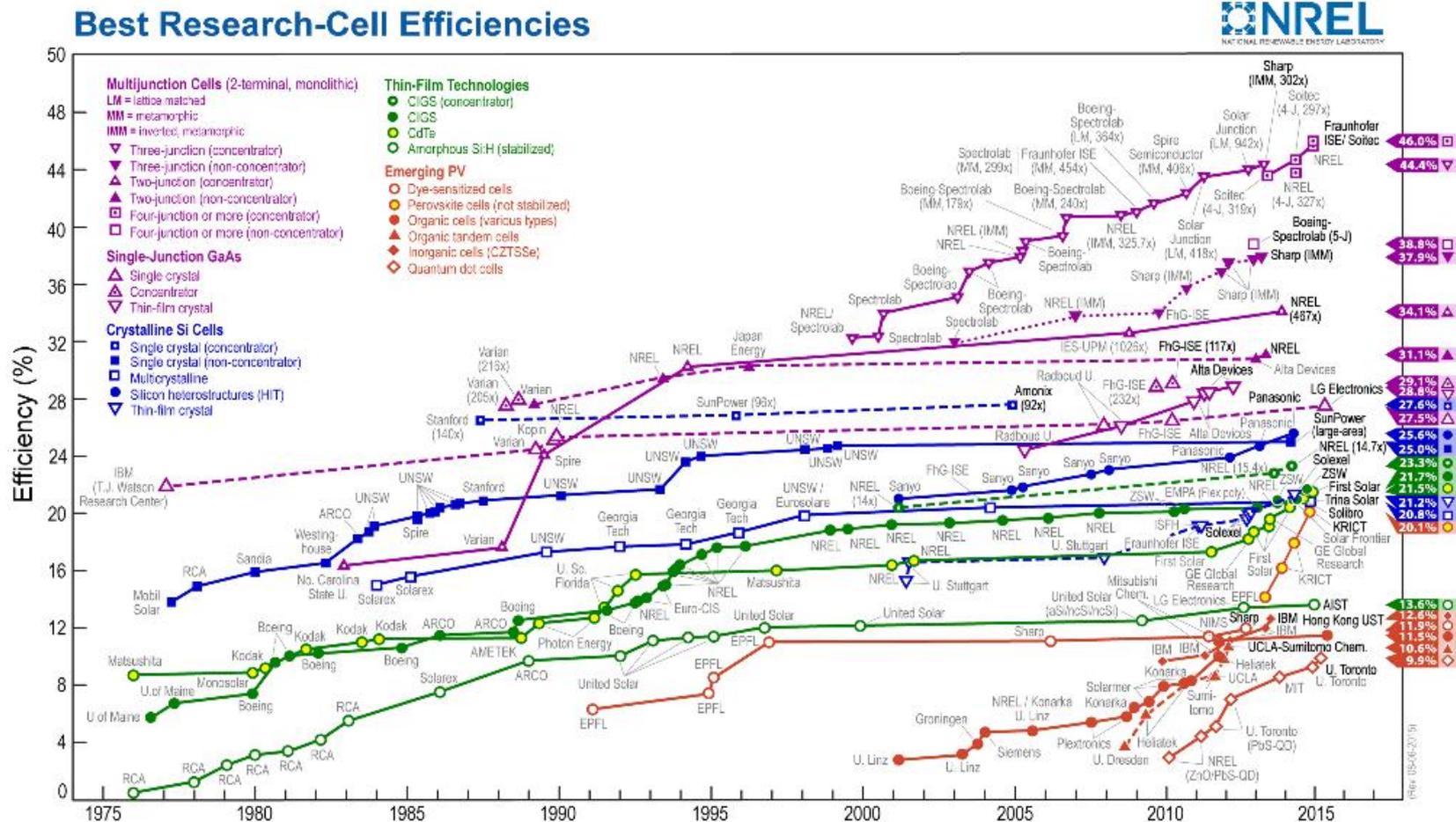
© SOLARPOWER EUROPE 2020

Тренды в кремниевой фотовольтаике

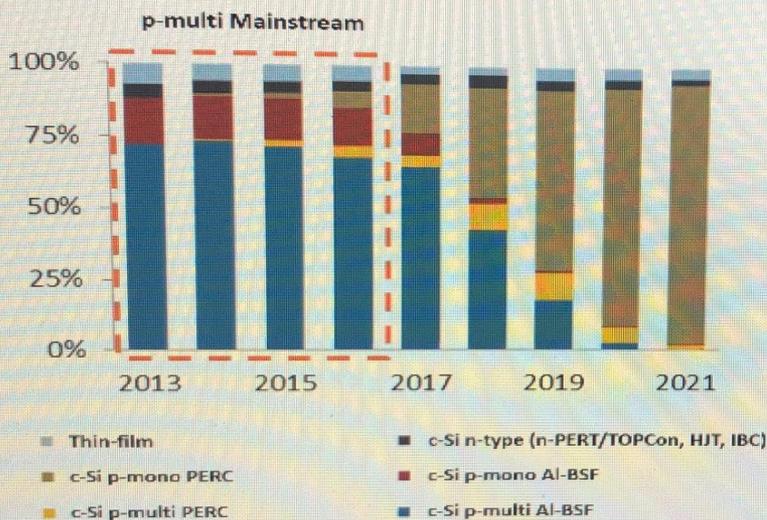
- 1. Переход на монокристаллический кремний и пластины n-типа**
- 2. Рост объема производства модулей по новым технологиям (IBC, TopCon, HJT)**
- 3. Увеличение размера пластин (M12 до 210 мм).**
- 4. Металлизация ячеек**
- 5. Тонкая пластина**
- 6. Поиск вариантов тандема на кремнии.**
- 7. Ближний космос**

Тренд 1. Переход на монокристаллический кремний и пластины n-типа

РЕКОРДЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



2013-2016: Mainstream p-multi



- Between 2013 and 2016, the industry operated with **p-multi** being the mainstream offering (AI-BSF and PERC variants).
- During this time, p-multi had about 75% market-share each year.
- The main reason for this was that (p-multi) **brick (ingot) casting offered the lowest cost solution** to the industry, and factories could be built quickly in China.

portalapp.solarmedia.eventsair.com OnAIR

ВЕРНУТЬСЯ К ВРЕМЕННОЙ ССЫЛКЕ... (10:00 утра - 12:00 вечера) View Options Информация

Recording

2017-2019: p-multi to mono Flip

Year	Thin-film	c-Si p-mono PERC	c-Si p-multi PERC	c-Si n-type (n-PERT/TOPCon, HIT, IBC)	c-Si p-mono Al-BSF	c-Si p-multi Al-BSF
2013	~10%	~10%	~55%	~10%	~10%	~5%
2015	~10%	~10%	~50%	~10%	~15%	~5%
2017	~10%	~10%	~35%	~10%	~25%	~10%
2019	~10%	~45%	~10%	~10%	~15%	~10%
2021	~10%	~85%	~5%	~10%	~10%	~0%

- It took **three years** for the industry to move from **p-type multi** as mainstream to **p-type mono**.
- This occurred between 2017 and 2019.
- PERC has not been a (substrate-type) technology change** in the industry. PERC was used for both p-multi and p-mono upgrades from 2014 onwards.
- During this period, module suppliers moved to **72-cell designs** (ground-mount), retaining 60-cell variants for rooftops. **Half-cut cells** (mono & multi) were also introduced.

© PV-Tech & Solar Media Ltd., 2021 Finlay Colville | PV HeterojunctionTech Online | 17 March 2021 8

Audio Setting Chat

ОСТАВИТЬ ВЕБИНАР

Технические Проблемы? Запустите Приложение

portalapp.solarmedia.eventsair.com OnAIR

Recording

2020-2021: Mainstream p-mono

Year	Thin-film	c-Si p-mono PERC	c-Si p-multi PERC	c-Si n-type (n-PERT/TOPCon, HJT, IBC)	c-Si p-mono Al-BSF	c-Si p-multi Al-BSF
2013	75%	10%	10%	5%	0%	0%
2015	70%	15%	10%	5%	0%	0%
2017	60%	25%	10%	5%	0%	0%
2019	40%	55%	5%	0%	0%	0%
2020	5%	90%	5%	0%	0%	0%
2021	2%	95%	3%	0%	0%	0%

- During 2020, and forecast with high probability for 2021, p-mono is totally dominant, and certainly the mainstream offering.
- The dominance of p-mono has removed p-multi from the market. In 2021, p-multi volumes are very low, and will likely move to market-irrelevance during 2022.
- Technology changes are now coming from larger wafer sizes, more cell cutting/division, and even larger panel sizes (rated powers at STC).

© PV-Tech & Solar Media Ltd., 2021 Finlay Colville | PV HeterojunctionTech Online | 17 March 2021 9

Audio Setting Chat

ОСТАВИТЬ ВЕБИНАР

Технические Проблемы? Запустите Приложение

Тренд 2. Рост объема производства модулей по новым технологиям (IBC, TopCon, HJT) ,переход на кремний n-типа

ЯЧЕЙКИ СРЕДНЕГО ДИАПАЗОНА ЭФФЕКТИВНОСТИ – C-SI

Технологии на основе кремния являются основными в электронике и фотовольтаике на протяжении многих десятилетий, что обеспечивает отработанность технологических решений.

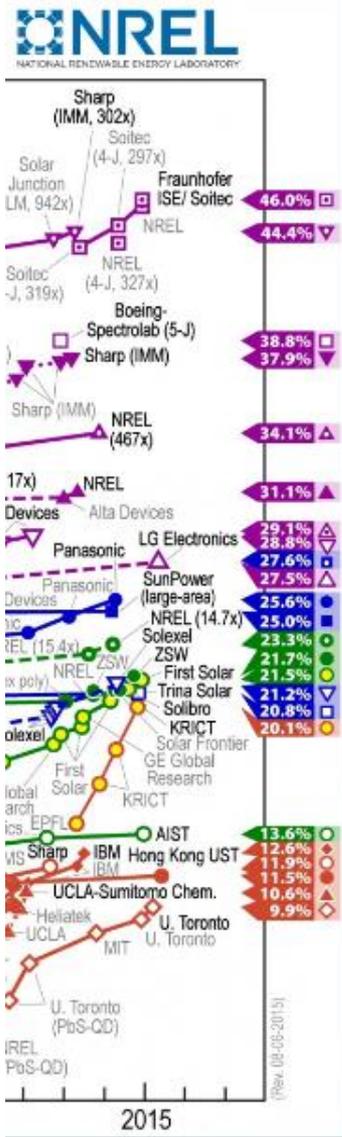
Основные особенности:

- эффективность от 20.8 до 27.6 % (с применением концентраторов);
- Солнечные ячейки изготавливаются на основе моно и мульти-кристаллического кремния. Применение мульти-кристаллического кремния приводит к меньшей эффективности;
- Без применения концентраторов **максимальную эффективность имеют HJT ячейки (25.6 %)**;
- Ячейки на основе кремния выполненные по другим технологиям требуют большого количества технологических шагов (IBC) или имеют более низкую эффективность и подвержены деградации (PERC);

Дополнительные преимущества технологии HJT:

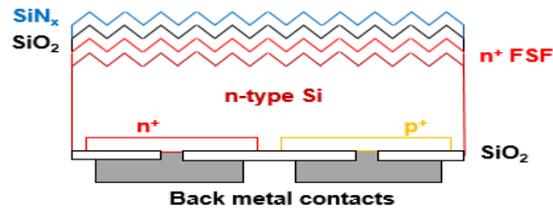
- Низкий температурный коэффициент HJT ячеек. При температуре эксплуатации 60 °C дает прирост +6 отн.% по сравнению с остальными технологиями на основе кристаллического кремния;
- Низкотемпературный процесс - возможность применения более тонких пластин по сравнению с классической технологией (BSF).

Вывод: HJT технология наиболее перспективна для применения в коммерческих наземных СЭС

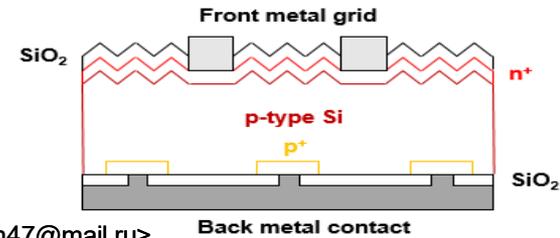


Схематический вид в разрезе высокоэффективных солнечных элементов

(a) IBC cell

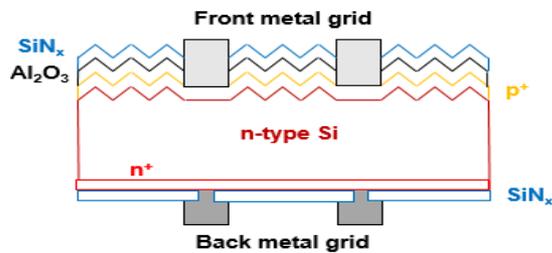


(b) PERC cell

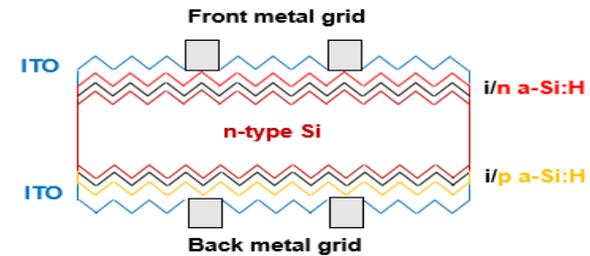


Артем Кочергин <tem47@mail.ru>

(c) PERT cell

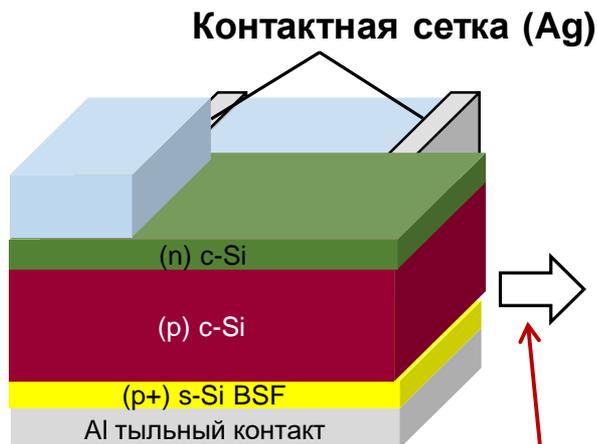


(d) SHJ cell

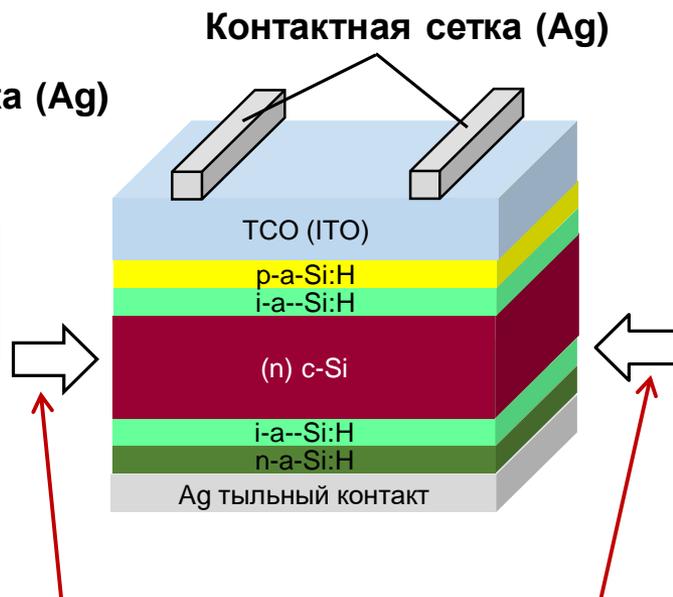


ТЕХНОЛОГИЯ HIT: ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ

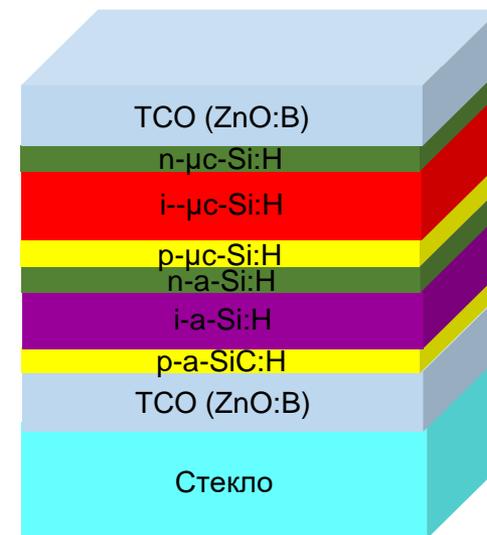
Классическая конструкция
на основе c-Si
КПД 17-19 %



На основе гетероперехода
a-Si:H/c-Si (HIT)
КПД 18-20 %



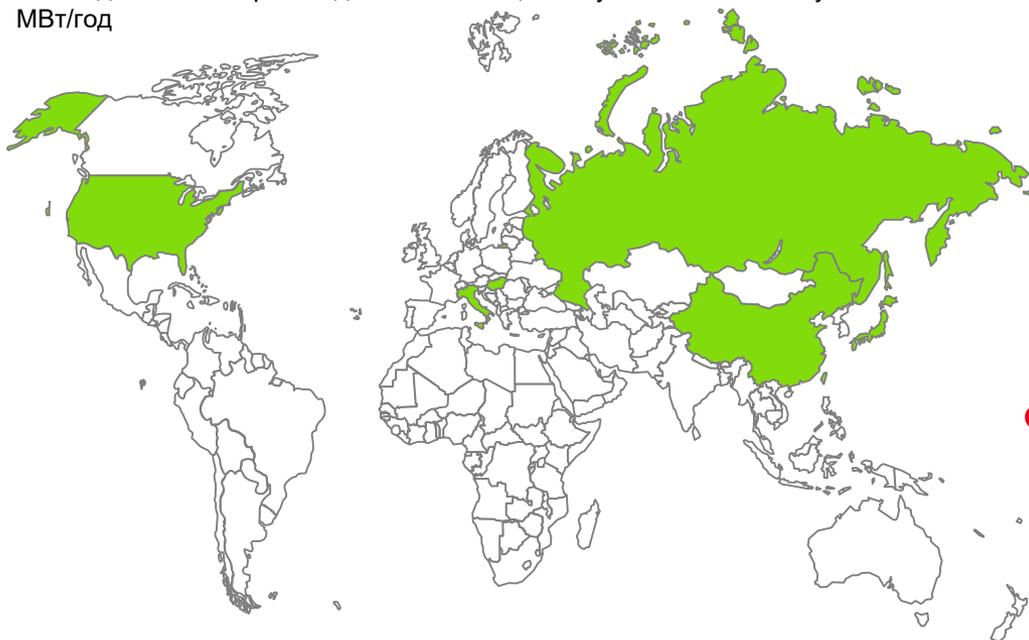
Тонкопленочные
на основе a-Si:H/ μ c-Si:H
КПД 9-11 %



HIT: c-Si подложки + тонкопленочная технология → высокая эффективность + низкий температурный коэффициент

Рынок НТТ: обзор основных игроков

По состоянию на 2019 г. производственные мощности НТТ насчитывают 3 460 МВт/год. К 2021 г. Производственные мощности увеличатся минимум на 1 960 МВт/год



Сегодня на НТТ приходится около 2,5% от общего мирового производства ФЭП/ФЭМ. В ближайшие годы доля НТТ будет быстро расти за счет появления в этом сегменте компаний-лидеров в производстве традиционных PV-технологий (REC, Hanergy, Jinery, TW Solar и др.)

Август 2019

Производители ФЭП и ФЭМ НТТ в мире (2019-21)

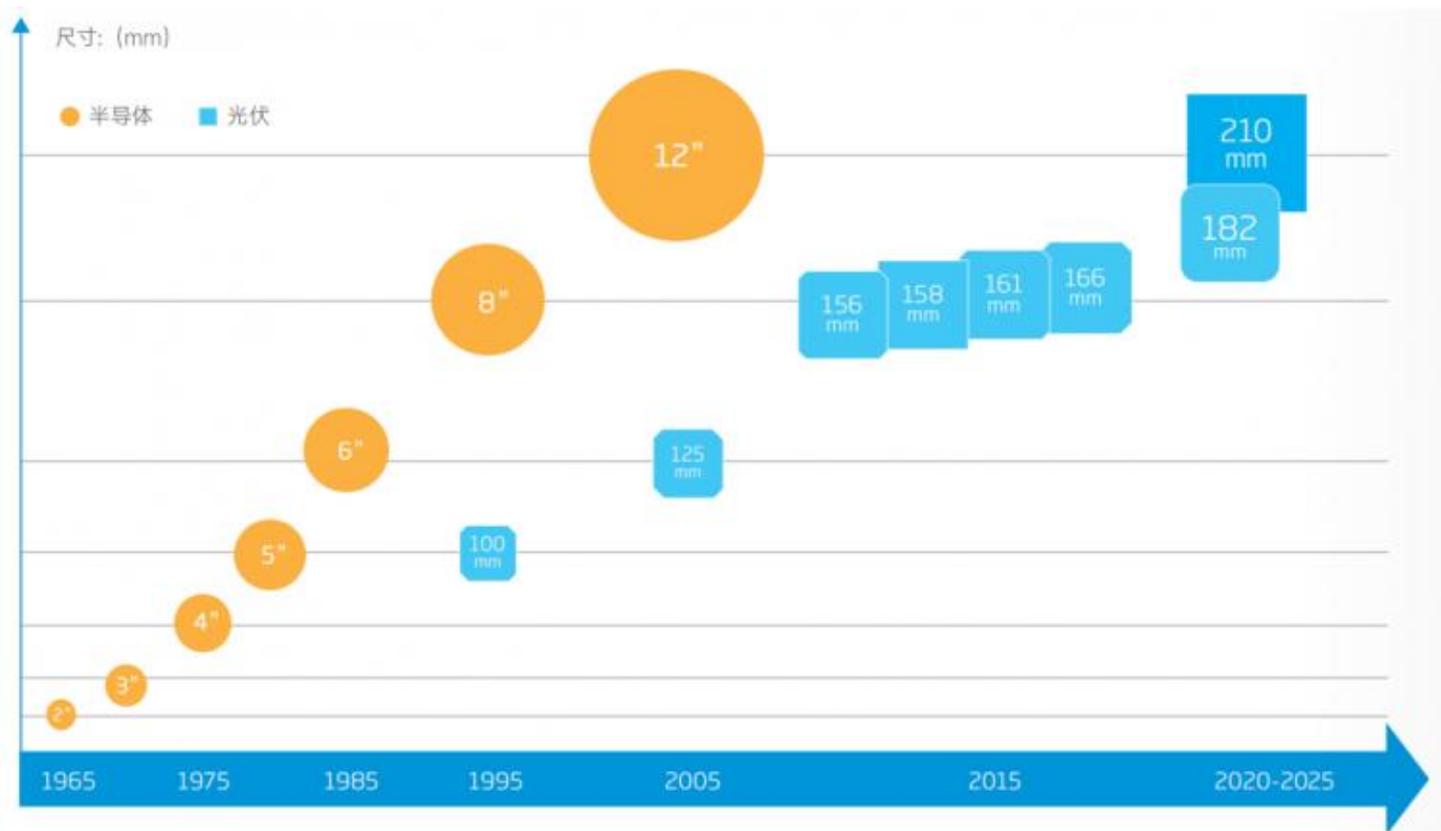


Тренд 3. Увеличение размера пластин (M12 до 210 мм).

Новый стандарт?

Согласно Международной дорожной карте для фотоэлектрических систем (ITRPV), для ростовых технологий пластин M6 (166x166 мм) наблюдается сокращение доли рынка, которая, как ожидается, будет прекращена после 2027 года, поскольку новые пластины большего размера M10 (182x182 мм) и M12 (210x210 мм) быстро захватывают доли рынка.

Куда движемся!

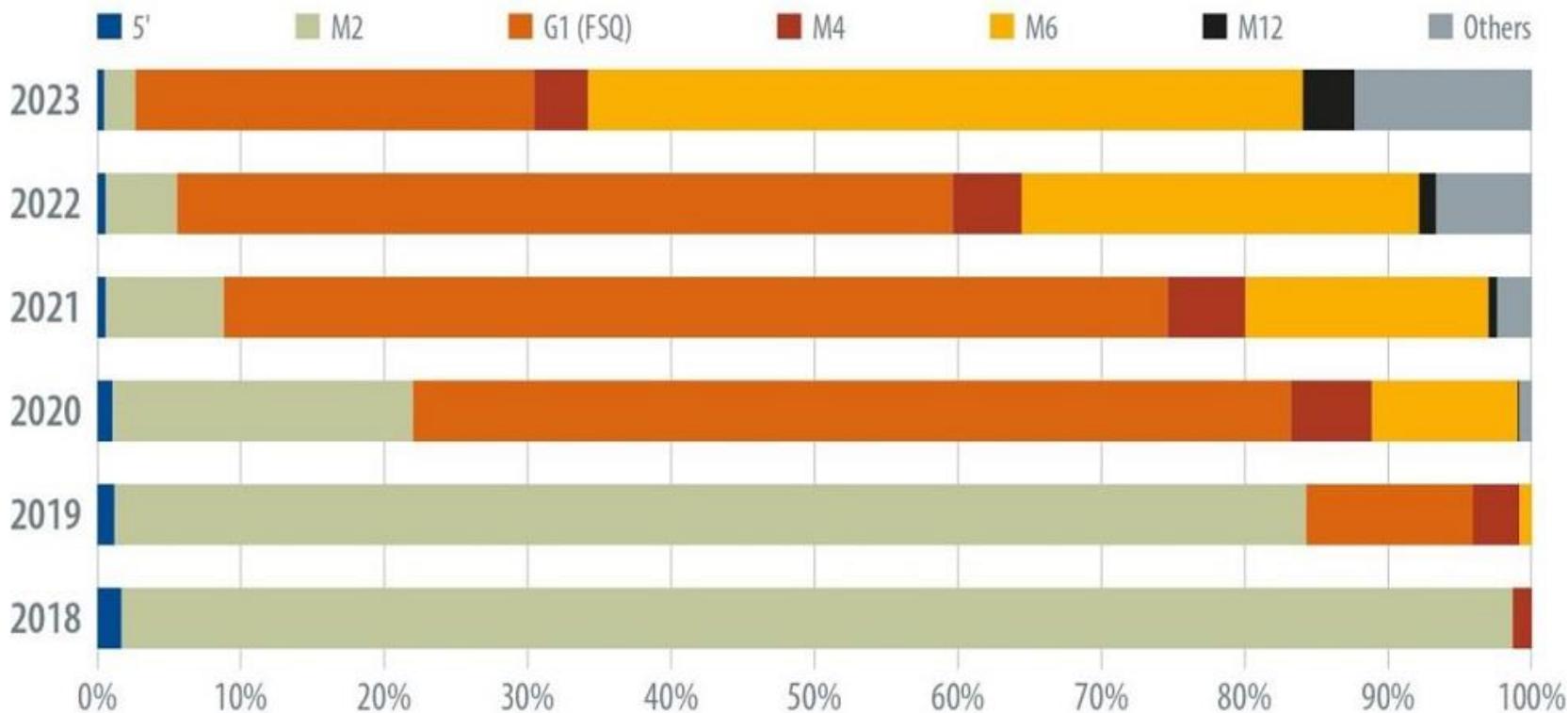


资料来源: 《天合光能 210 至尊组件产品白皮书 2.0》

Прогноз изменения рынка размера пластин

Predicted changes in wafer size

Source: PV InfoLink



Тренд 4. Тонкая кремниевая пластина

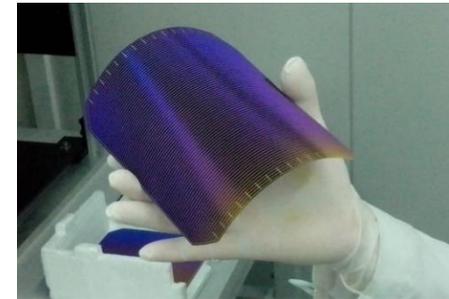
НІТ	Традиционная технология с-Si
Высокий КПД до 26% в промышленном производстве	КПД в промышленном производстве не более 25%
Есть потенциал для увеличения КПД до 27% (получено на лабораторных образцах)	Потенциал для увеличения КПД практически исчерпан
Низкий температурный коэффициент мощности (-0,30%/С) - высокая выработка электроэнергии	Высокий температурный коэффициент мощности (-0,45%/С) снижает выработку электроэнергии
Возможно использование пластин толщиной 140 мкм и менее – малый расхода материала	Минимальная толщина пластины 180 мкм определяется технологическими ограничениями
Низкая температура производства (~200°C) уменьшает процент брака	Высокая температура производства (~700 °С) увеличивает процент брака
Малое число производственных шагов (6)	На 50% больше шагов производства (более 9)

Технология НІТ обладает значительными технологическими преимуществами, потенциалом увеличения КПД и снижения себестоимости производства

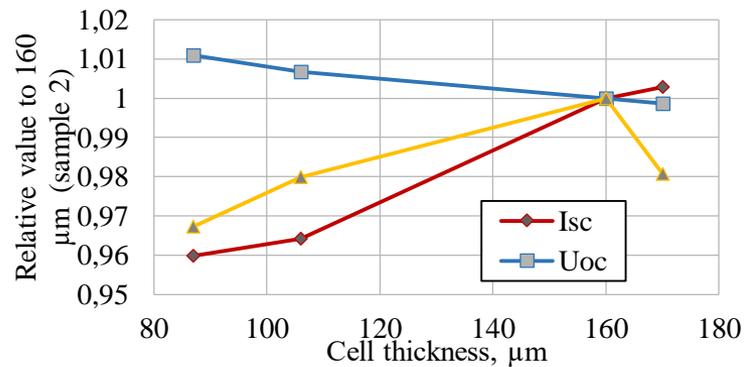
Толщина пластин Si

Параметры пластин с различной толщиной

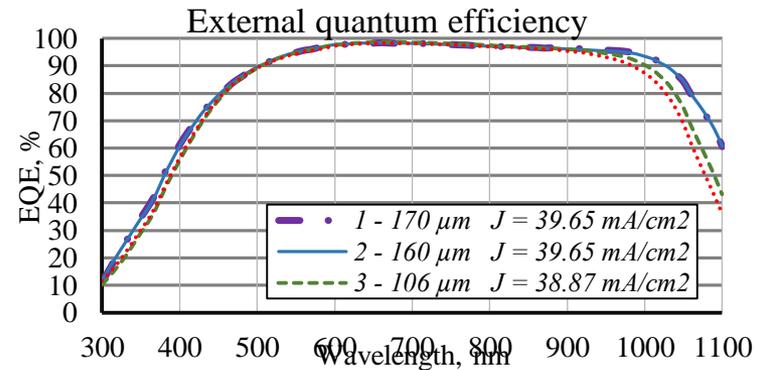
$d, \mu\text{m}$	I_{SC}, A	U_{OC}, B	$P_m, \text{Вт}$	U_m, B	I_m, A	$FF, \%$	$Eff, \%$
170 μm	9,60	0,734	5,46	0,612	8,92	77,47	22,34
160 μm	9,57	0,735	5,56	0,622	8,95	79,04	22,77
106 μm	9,23	0,740	5,45	0,635	8,59	79,80	22,31
87 μm	9,19	0,743	5,38	0,636	8,46	78,79	22,03



Фотография образца



Параметры пластин с различной толщиной в отношении к пластине 160 мкм



EQE пластин с различной толщиной

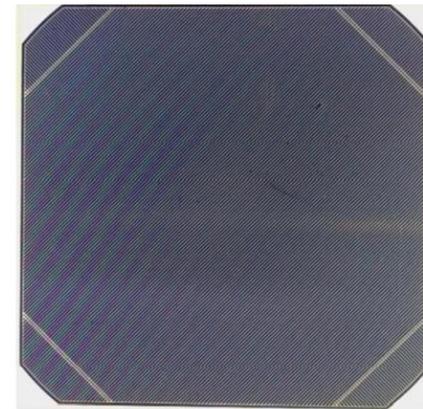
▶ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

Тренд 5. Металлизация ячеек (контактная сетка).

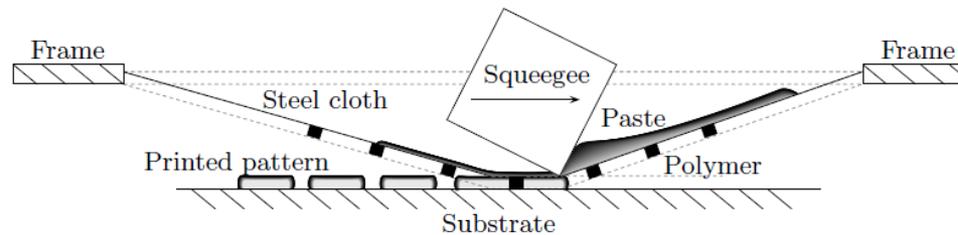
Трафаретная печать



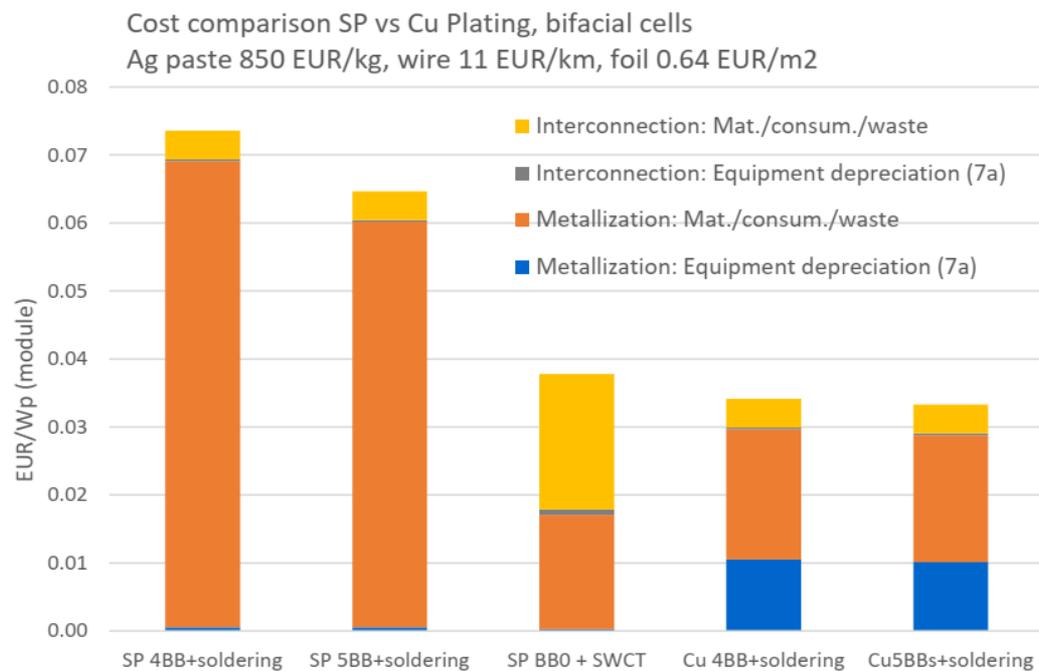
Фронтальная
сторона ФЭП



Тыльная
сторона ФЭП



Сравнение стоимости различных видов металлизации



Преимущества и недостатки гальваники

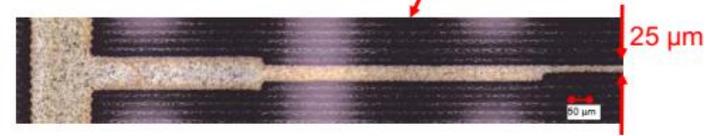
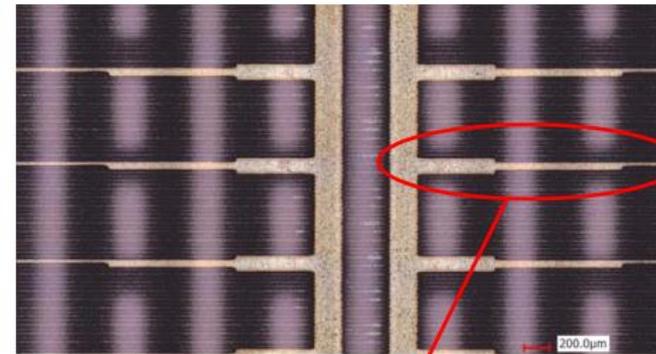
Преимущества

- Используется намного меньше серебра
- У сетки лучше проводимость
- Высокая адгезия
- Подходит для пайки
- Требует меньшей ширины фингеров
- BVCT или SWCT

Недостатки

- Более сложный процесс
- Очистка PVD от меди
- Требуется очистка стоков
- Нет промышленного подтверждения

Контактная сетка



Промышленное оборудование



Струйная печать
1200 пл/ч



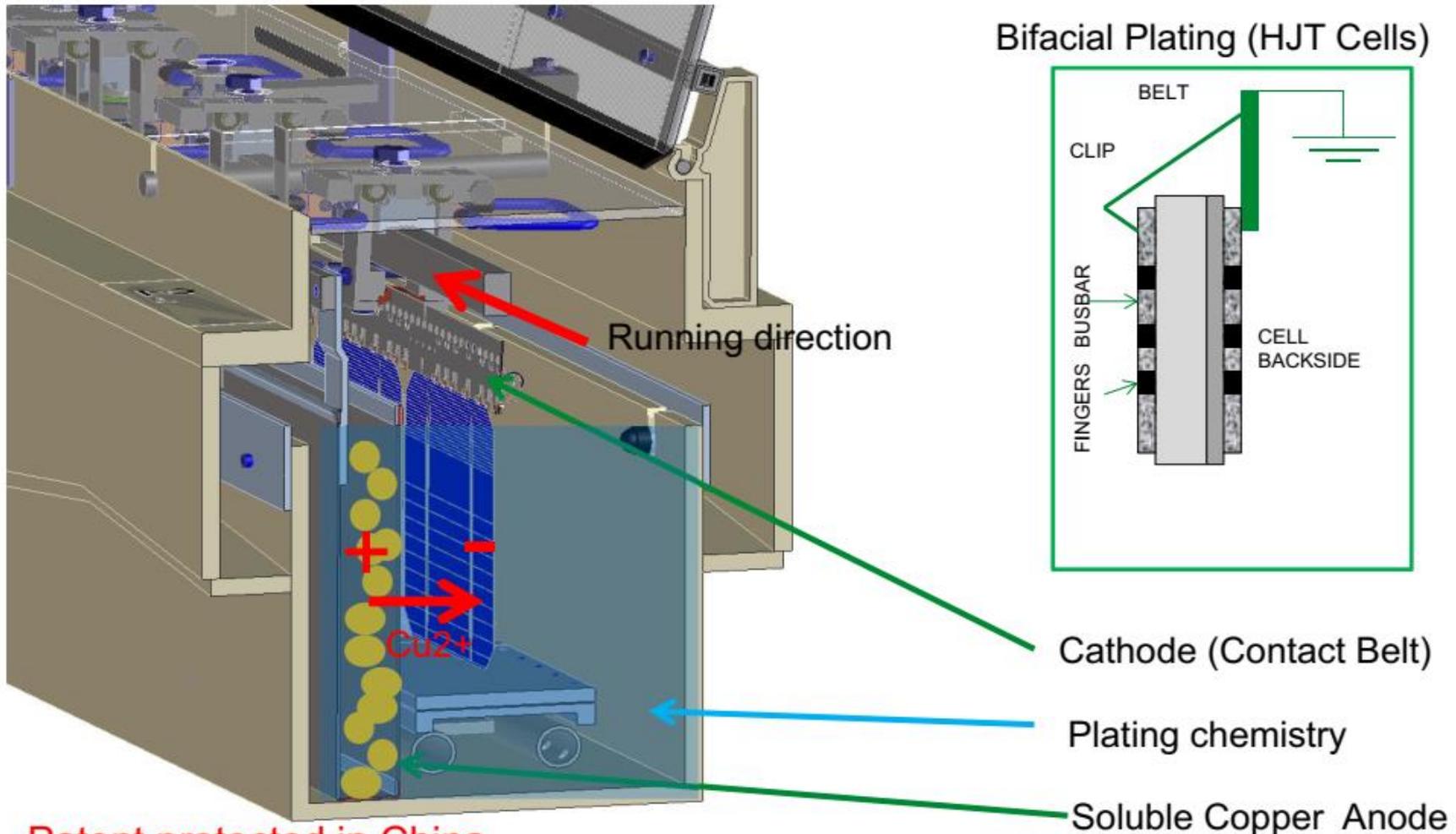
Гальваническая линия
2000 пл/ч (до 4000 пл/ч)

Meco SOLAR

Plating equipment : schematic concept



Besic

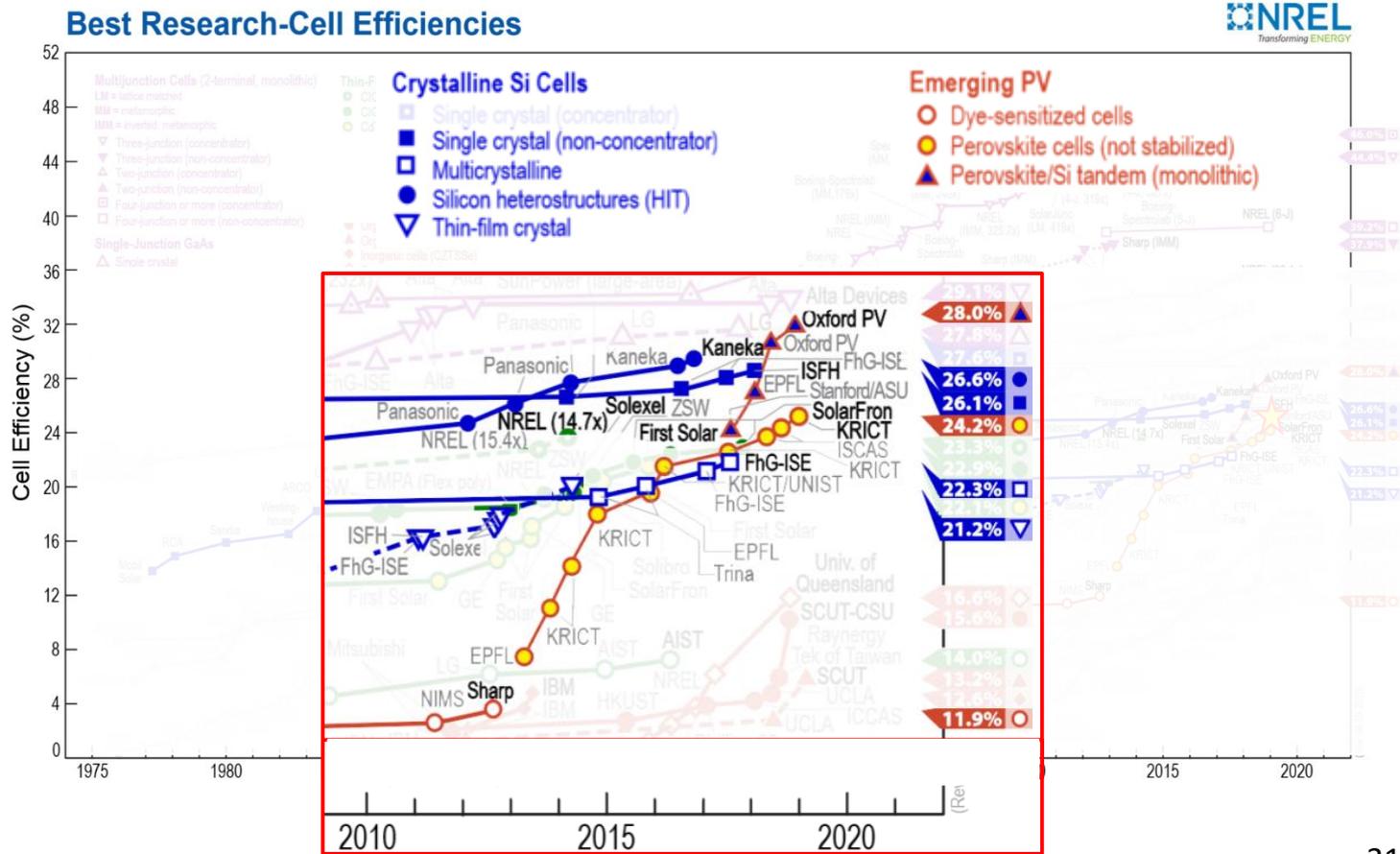


Patent protected in China

Тренд 6. Тандем кремний-перовскит

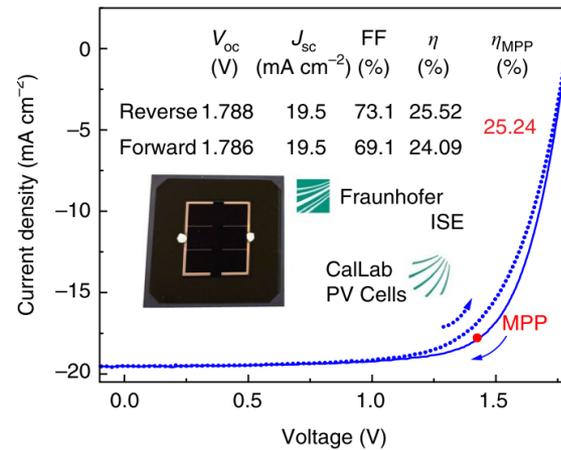
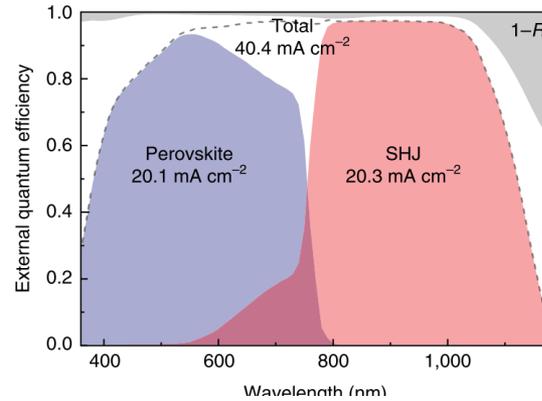
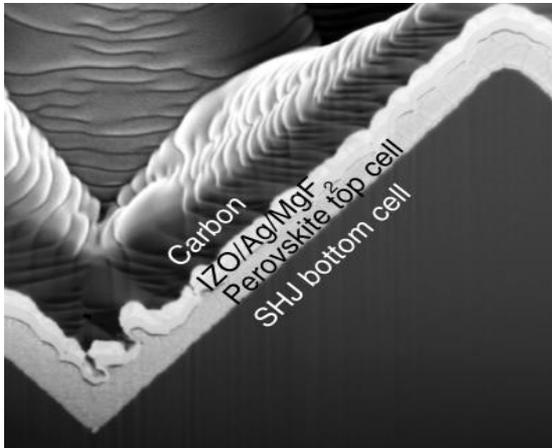
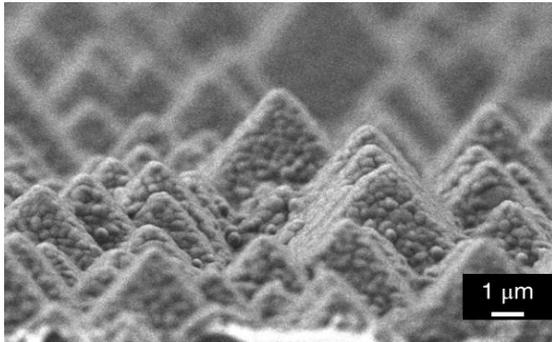


Перовскит и кремний: борьба или сотрудничество?





Тандемные солнечные элементы перовскит@Si потенциальный прорыв для кремниевой фотовольтаики

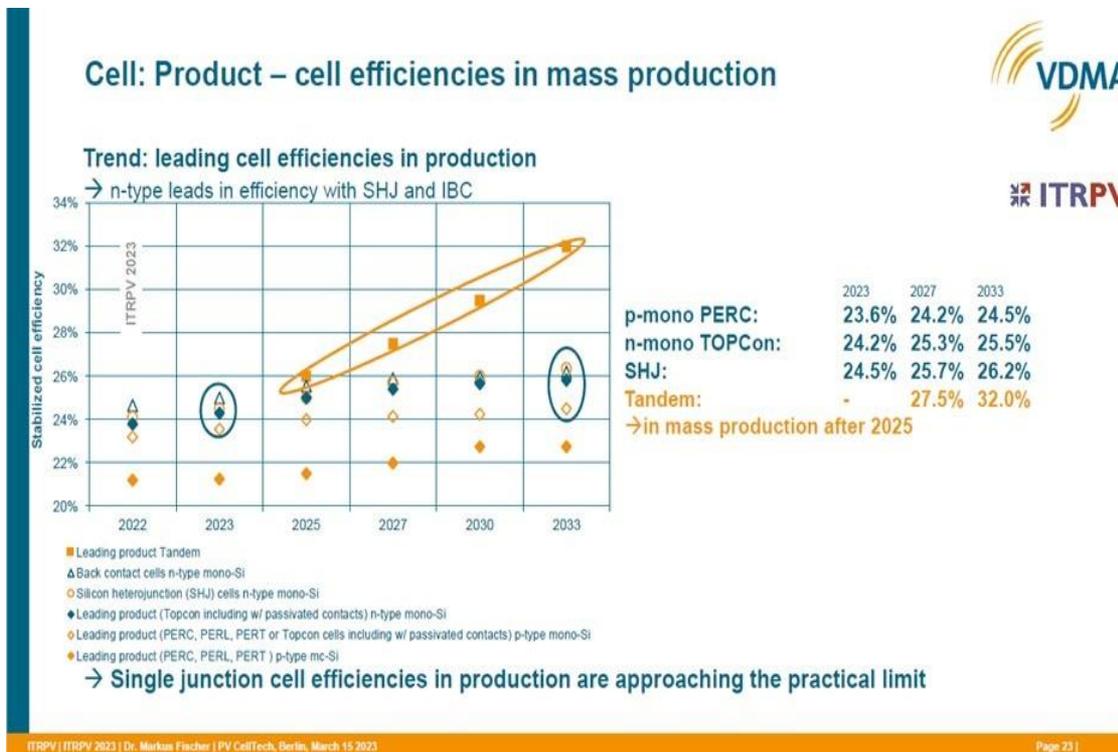


Sahli, F. *et al.* // *Nature Materials*, 17, 820–826 (2018).

Проблемы перовскитной фотовольтаики

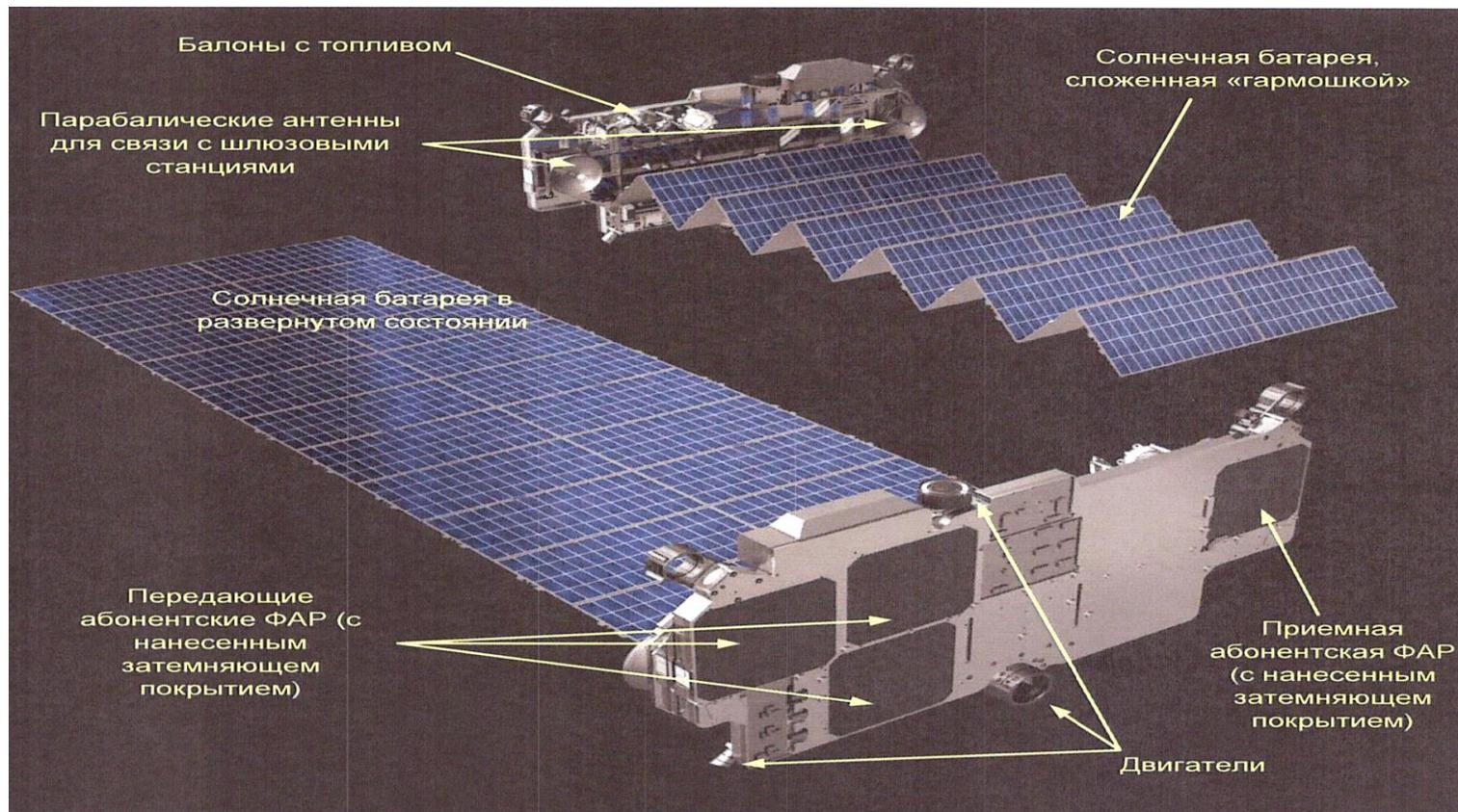
1. Стабильность (25 лет)
2. Масштабируемость (размер и производительность)
3. Токсичность (Pb?)
4. Совместимость с кремниевой технологией (TCO, проводящая паста, ламинация)
5. Цена (сегодня стоимость модуля на кремнии менее 30 Cent/Wt)

Прогноз развития кремниевых солнечных элементов



Тренд 7. Ближний космос

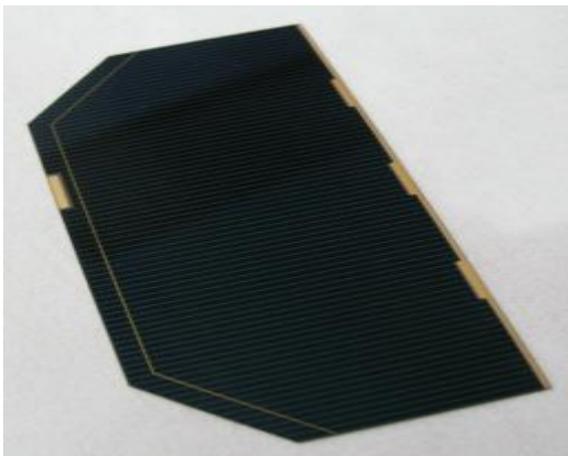
Компоновка КА Starlink версии 1.5



Солнечная батарея КА Starlink

- Солнечная батарея сложена гармошкой и имеет 12 сегментов, с размером сегмента 3×0.8 м. Площадь всей батареи $12 \times 3 \times 0.8 = 28.8$ м².
- При допущении коэффициента заполнения 0.9, и плотности потока солнечного излучения 1300 Вт/м², КПД панелей 18 %.
- При таких допущениях получим примерно 6 кВт электрической мощности
- По экспертным оценкам стоимость всего КА **составляет 200-500 тыс. долларов США**. КА Starlink стал первым в истории космической индустрии серийным спутником, который выпускается на заводах в промышленных масштабах

ФЭП для космических аппаратов на основе арсенида галлия



Экономика

Арсенид галлия

Стоимость 1 Вт в СБ – порядка 600 долларов

Батарея 1500 Вт - $1500 \times 600 = 900\ 000$ долларов

Кремний

Стоимость 1Вт в СБ-порядка 25 долларов

Батарея 1500 Вт- $1500 \times 25 = 37\ 500$ долларов

Количество спутников в группировке -1000 и более

Развитие солнечной энергетики в РФ

ГК Хевел и Юнигрин: структура компании



ПРОИЗВОДСТВО – завод ХЕВЕЛ (Новочебоксарск)



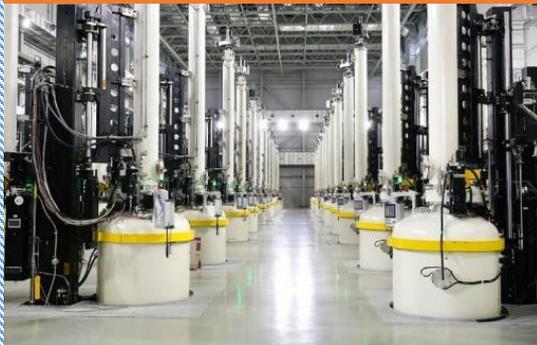
- >500 МВт/год
- НТТ ФЭП и ФЭМ с 2016
- Две фазы расширения производства ФЭП
- Три фазы омоложения производства ФЭМ

ГК Хевел и Юнигрин (Москва)



- Управление ГК
- Проектирование СЭС и управление строительством СЭС
- Операционное управление СЭС

ПРОИЗВОДСТВО – завод ЭНКОР (Калининград)



- 1,3 ГВт пластин моно кремния
- 1 ГВт ФЭП НТТ

Научно-Технический Центр (Санкт-Петербург)



- Разработка и внедрение технологических процессов и материалов
- Разработка технологии ФЭП и конструкции ФЭМ
- НИОКР, перспективные технологии

Собственная технология кремниевых гетероструктурных ФЭП и ФЭМ

Отечественное высокотехнологичное производство кремниевых гетероструктурных модулей на оборудовании фирмы Орликон Солар



Производство кремниевых слитков и пластин ООО «Энкор» (г.Черняховск, Калининградская область).



Крупные СЭС на основе гетероструктурной технологии ФЭМ в РФ

Limansky Solar Power Plant, Astrakhan Region



Yashkul Solar Power Plant, Republic of Kalmykia



Nura Solar Power Plant, Republic of Kazakhstan
One of the largest solar power plants in the CIS



- Алтай – 120 МВт • Бурятия – 70 МВт • Калмыкия – 120 МВт • Астраханская – 165 МВт • Оренбургская – 140 МВт • Саратовская – 150 МВт

Разработки в области ВИЭ

Burzyansky Solar Power Plant, Republic of Bashkortostan
Russia's largest solar power plant with industrial energy storage



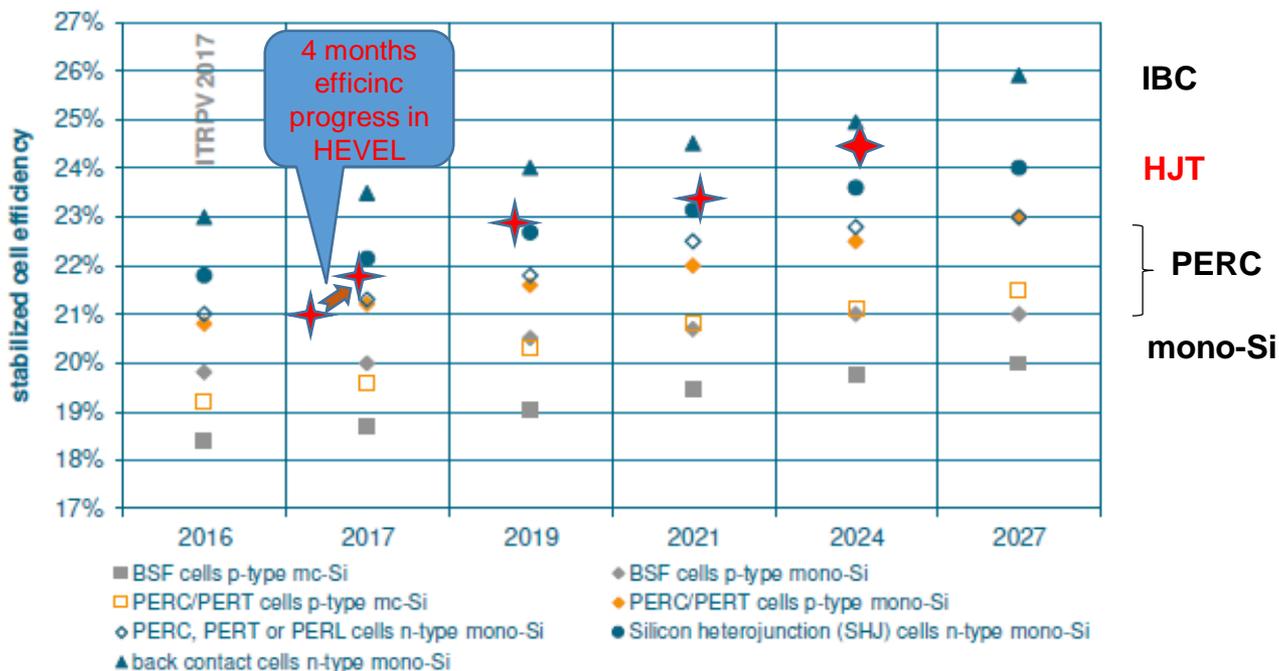
Republic of Tuva, villages of Mдgдl-дксы and Кызыл-Кылаа (pop. 6,000)
Stand-alone diesel-solar power plant



ГК Хевел реализовано более 100 проектов с общей установленной мощностью >1.5 ГВт

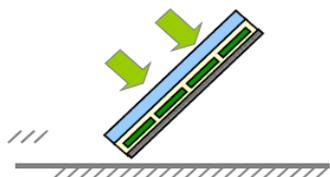
There we are currently?

Average stabilized efficiency values for Si solar cells (156x156mm²)

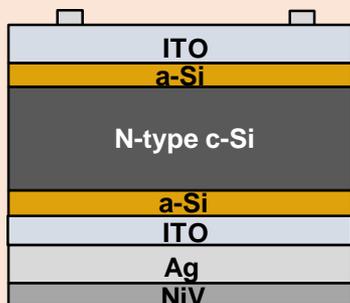


Being raised up from 21 to 21,7 % within 4 months, mass production average cell efficiency get close to the general trend of Si cells

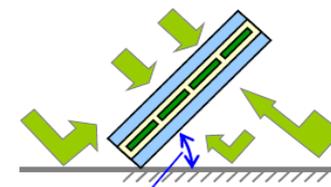
ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ МОДУЛЯ НТ - ОДНОСТОРОННИЙ И ДВУХСТОРОННИЙ



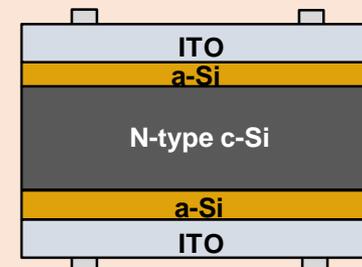
HJT monofacial
(односторонние)



Параметры	Односторонний СМ	Двусторонний СМ
Фронтальная контактная сетка	да	да
Слои	толщина, нм	
Фронтальное ITO	120	120
Тыльное ITO	40	120
Ag	120	--
NiV	50	--
Тыльная контактная сетка	--	да



HJT bifacial
(двухсторонние)



Увеличение выработки до 25% по сравнению с односторонними модулями в зависимости от угла наклона и уровня альбедо

- 1) Двухсторонние элементы позволяют использовать свет, отраженный от поверхности земли, что особенно актуально для регионов со снежным покровом
- 2) Наличие оборудования для изготовления двухсторонних элементов позволяет провести диверсификацию продукции завода с учетом требования заказчика и региона установки



PEAK POWER
380 Wp +
70 Wp bifacial gain*

MODULE EFFICIENCY
19 – 22,5* %

CELLS INTERCONNECTION
5 BB

TEMPERATURE RATIO
– 0,31 %/°C

DIMENSIONS
1996 x 1002 x 30 mm
with anodized
aluminum frame*

OPERATING TEMPERATURES
from -40°C to +85°C

*additional BiFi output

**also available in frameless configuration

Bifacial HJT modules
show energy gain over
monofacial modules at
**all weather and
seasonal conditions**

up to **25%**

additional output from back side depending
on the season and weather conditions

YIELD OF BIFACIAL HJT MODULES IS ESPECIALLY HIGH IN SUCH ENVIRONMENT CONDITIONS AS:



**SNO
W**



**WATE
R**



SAND

Energy gain of **up to 25%** is observed with water or ground covered by
snow or sand

GUARANTEED POWER

86,4 %

by the end of 30-year life cycle:
2% in first year, 0,4% per year thereafter

EXTENDED WARRANTY

30 years

+ 5 years to the life cycle of glass-
backsheet PV modules due to highly reliable
double glass encapsulation

Летные образцы космических аппаратов с СБ на основе кремния



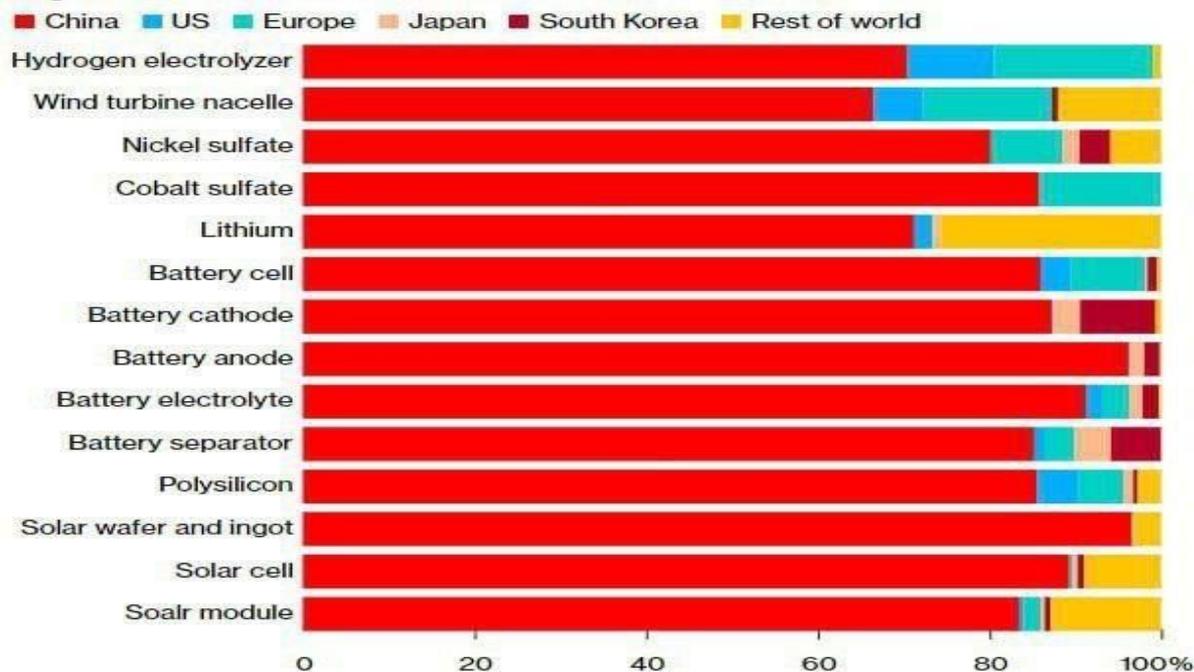
Наши результаты.

- Эффективность гетероструктурного ФЭП формата M10 составляет 25%.
- Мощность двухстороннего модуля стекло-стекло составляет 540 Вт .
- Запущено производство кремниевых пластин n-типа на 1.3 ГВт ООО «Энкор».
- Запущено производство гетероструктурных ФЭП формата M10 мощностью 1 ГВт в годна ООО «Энкор»
- Мощность производства модулей на ООО «Хевел» достигло 800 МВт в год;
- Разработана технология гибких гетероструктурных кремниевых модулей для мобильных и космических применений.
- Группой компании ООО «Хевел» построено только в РФ более 1.5 ГВт СЭС;

Китайская экспансия на рынке возобновляемой энергетики

China Extends Dominance of Clean-Tech Supply Chains

Its share of global manufacturing capacity is now above 80% in 11 clean-tech segments



Source: BloombergNEF

Note: Capacity is by physical facility location, not manufacturer headquarters. Lithium refers to lithium hydroxide and carbonate.



Спасибо за внимание!

п. Иня, Алтай

Спасибо за внимание

