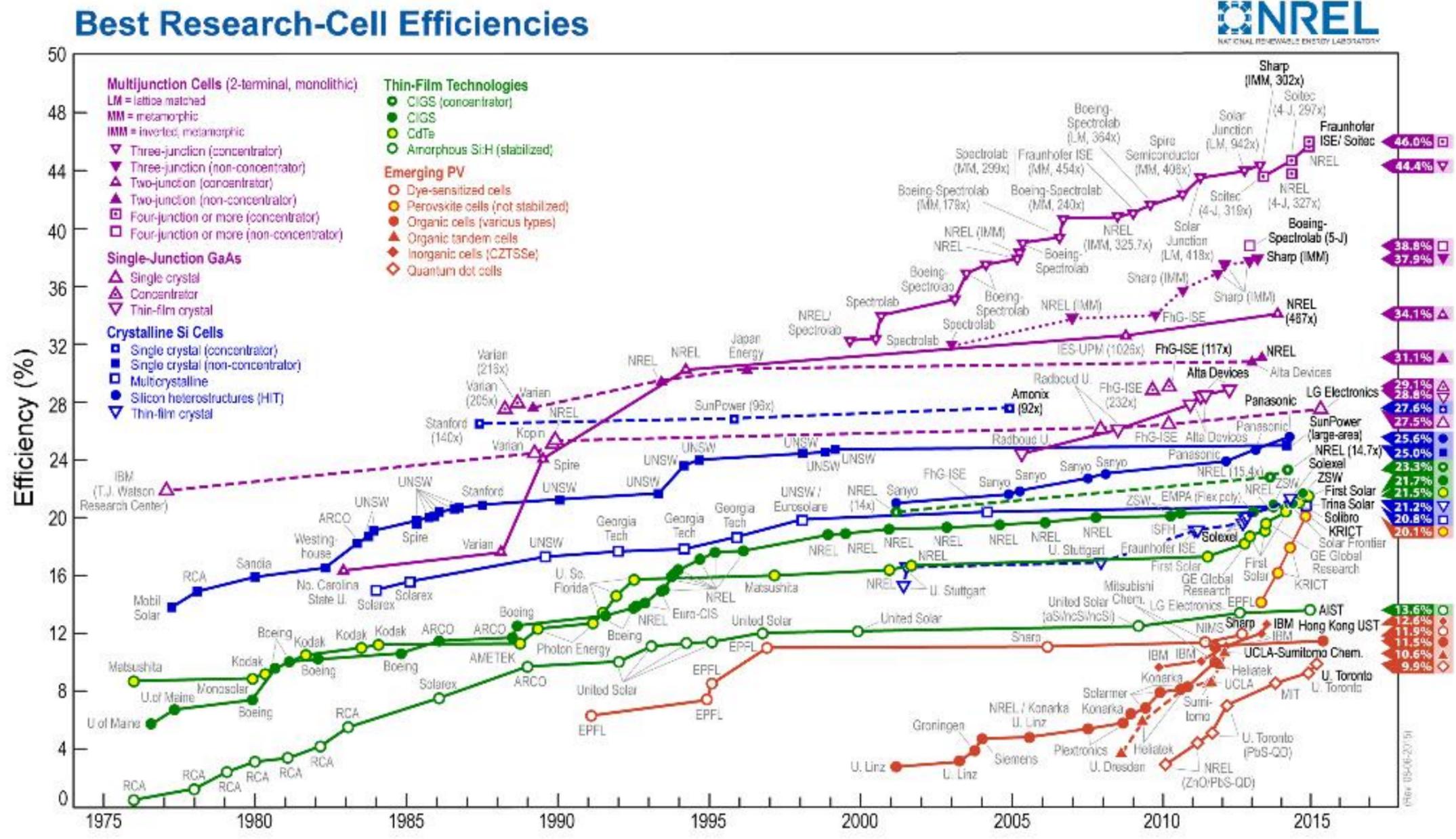


Кремниевая солнечная фотоэнергетика

**Теруков Е.И.
ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН
ООО «НТЦ ТПТ»**

**Высокоэффективные фотоэлектрические системы
Школа молодых ученых, 18 ноября 2020,
Санкт Петербург**

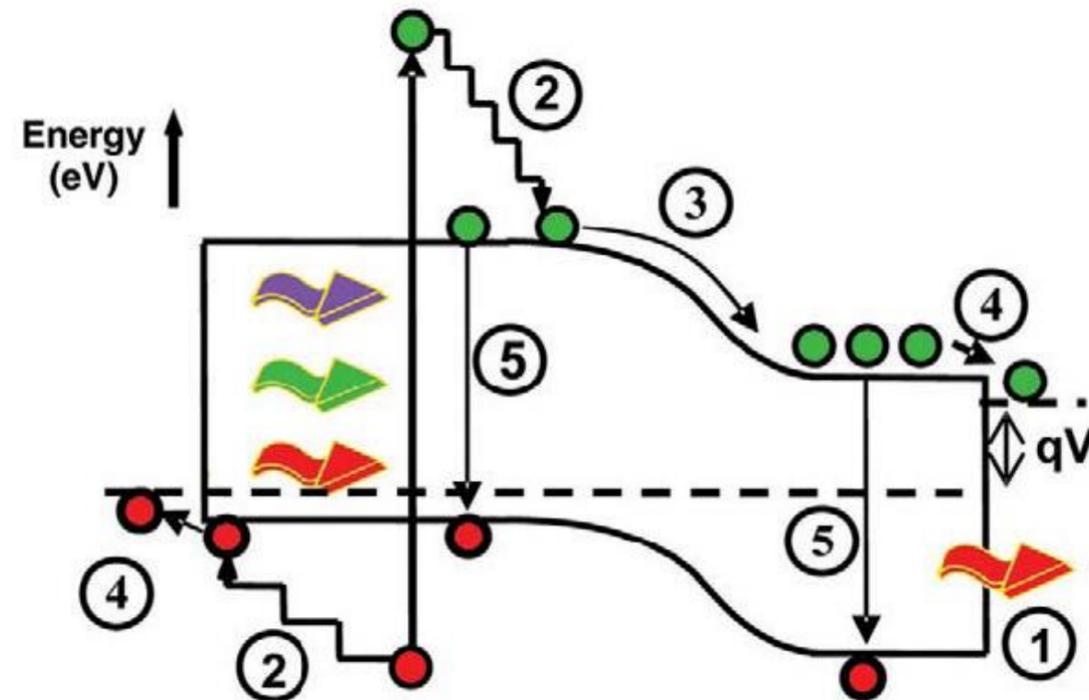
РЕКОРДЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



Тренды в кремниевой фотовольтаике

- 1. Совершенствование стандартной диффузионной технологии на p-кремнии (промышленный предел эффективности 23%)**
- 2. Увеличение размера пластин (M12 до 210 мм).**
- 3. Рост объема производства модулей по новым технологиям (IBC, TopCon, HJT)**
- 4. Переход на монокристаллический кремний и пластины n-типа.**
- 5. Поиск вариантов тандема на кремнии.**

Механизмы потерь в СЭ



Механизмы потерь в СЭ:

- 1) не возможность поглощения фотонов с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны;
- 2) потери на термализацию носителей;
- 3) потери на переходе;
- 4) потери напряжения на контактах;
- 5) рекомбинационные потери.

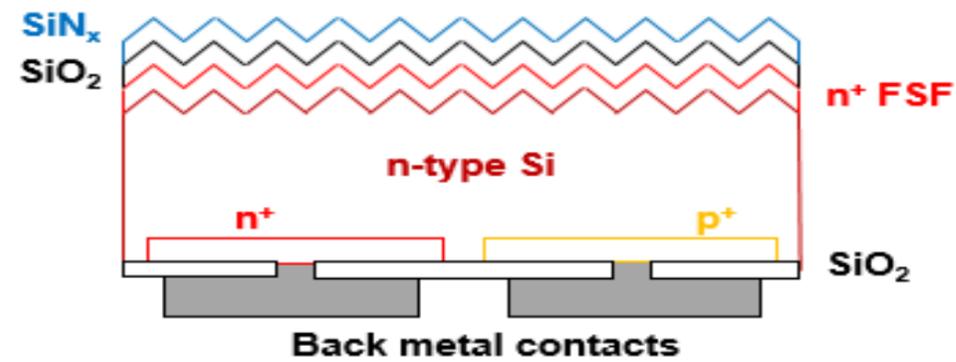
Распределение потерь энергии падающего излучения в Si СЭ

- термализация – ~30%;
- потери фотонов с $h\nu < E_g$ – ~20%;
- неполный сбор фотогенерированных носителей заряда – ~4%;
- рекомбинационные потери в р-п-переходе – ~20%;
- потери на последовательном и шунтирующем сопротивлениях – ~4%;
- потери на отражение – ~2%;
- потери на затенение поверхности контактной сеткой – ~4%;
- нефотоактивное поглощение – ~1%.

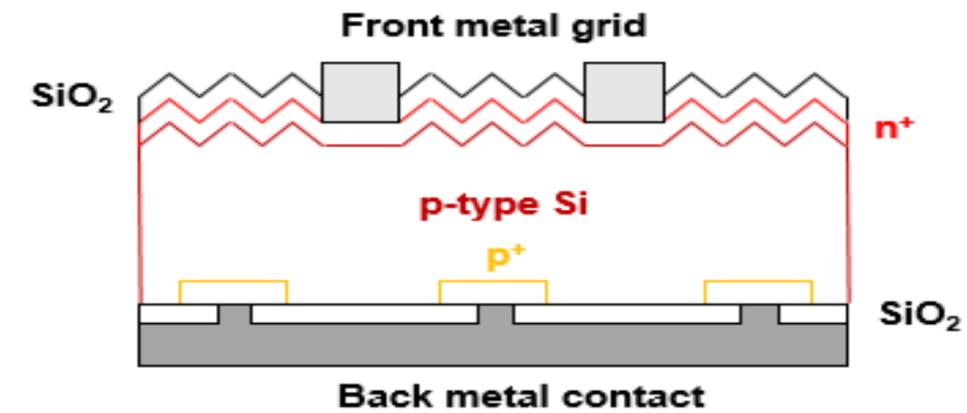
Выводы: наиболее существенны 2 первых механизма потерь, которые приводят к потере до 50% энергии падающего солнечного света.

Схематический вид в разрезе высокоэффективных солнечных элементов

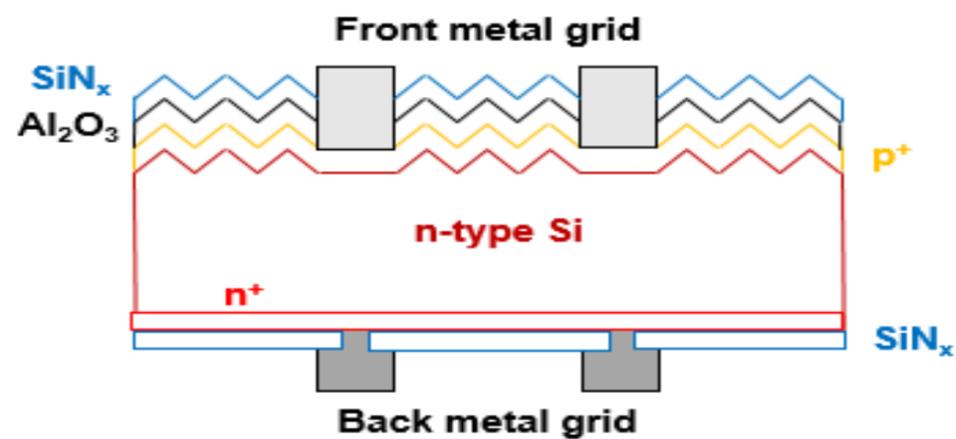
(a) IBC cell



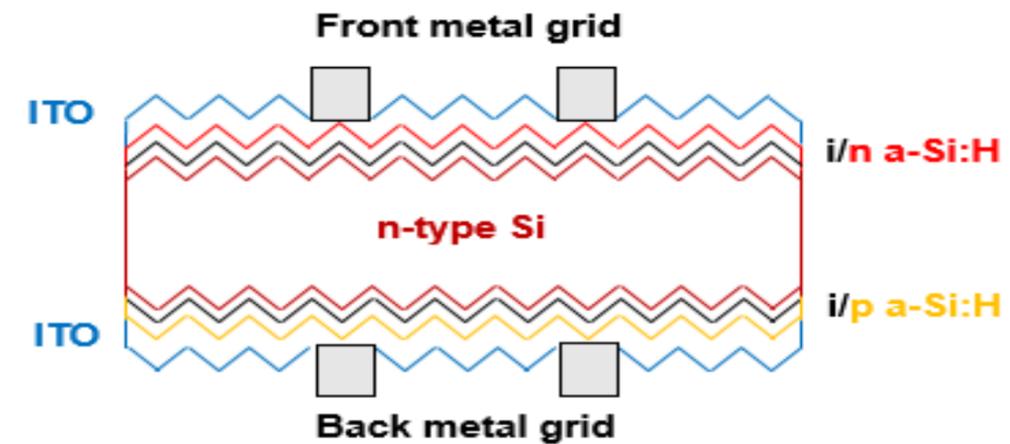
(b) PERC cell



(c) PERT cell

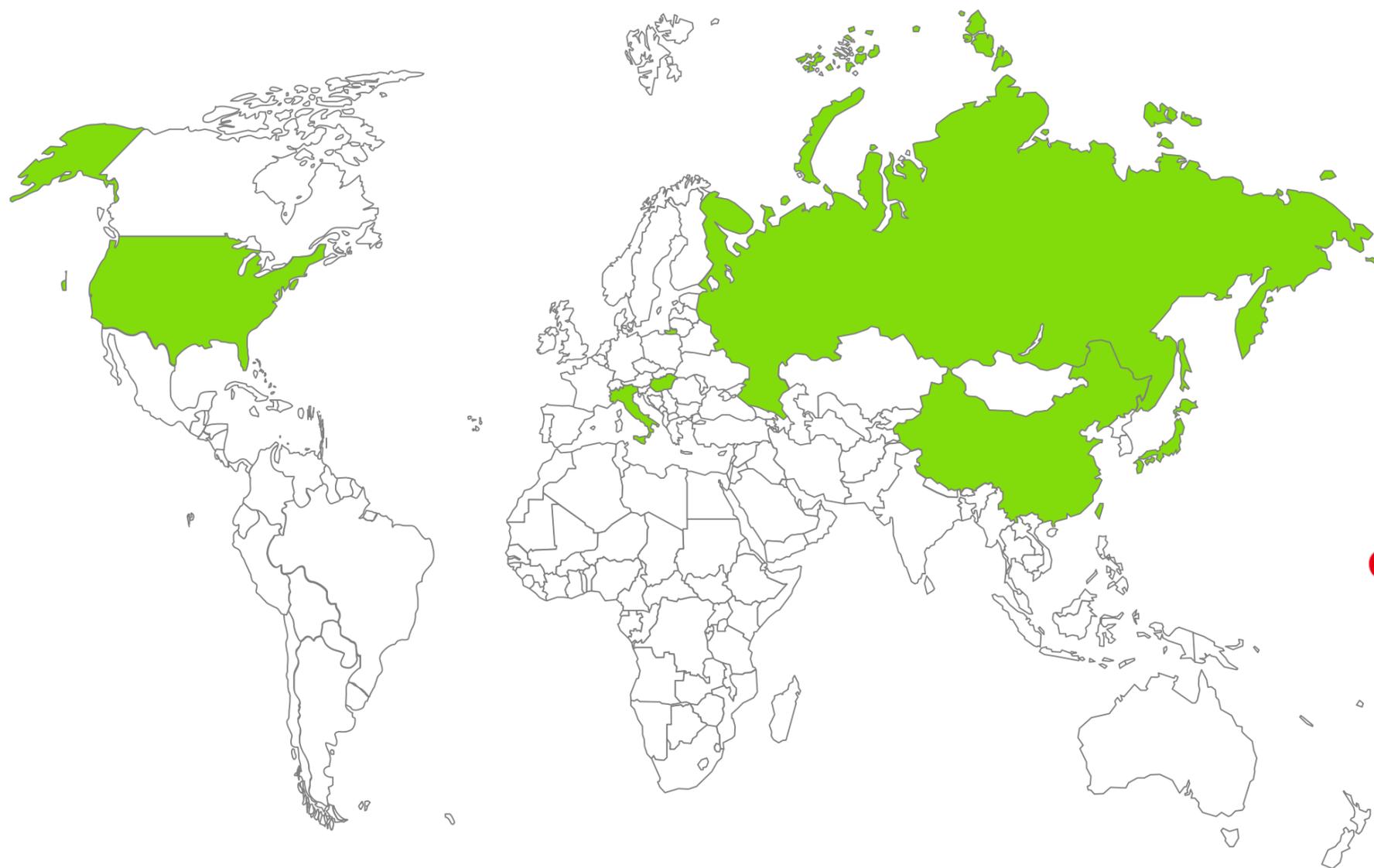


(d) SHJ cell



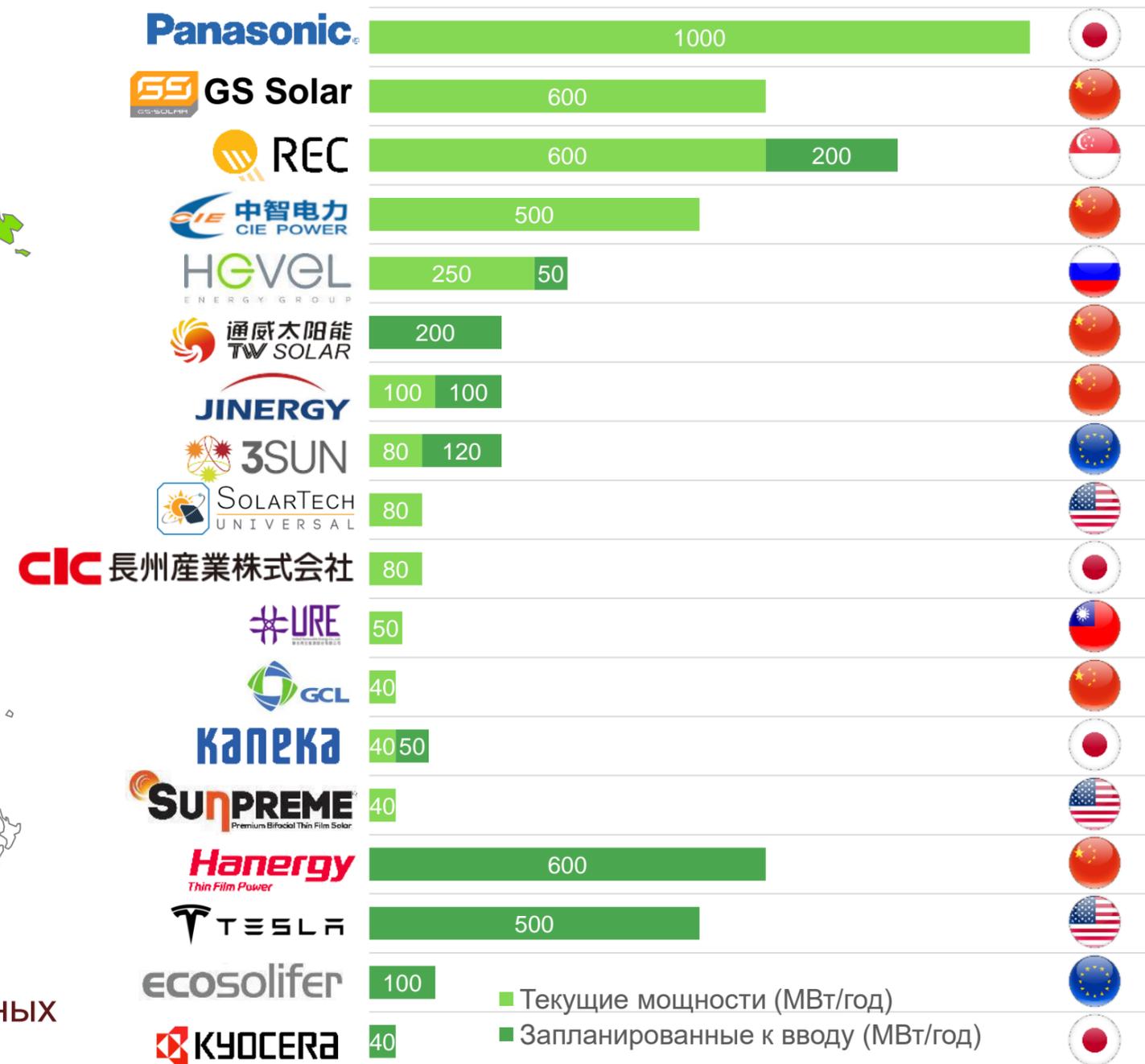
Рынок НТ: обзор основных игроков

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



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

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



Hevel Activities



RESEARCH AND DEVELOPMENT ACTIVITY

- Development of technological advantages and its implementation into production.
- Solar cell efficiency increase.
- Production cost reduction.
- Product line extension (e.g. flexible cells) and PV applications for different industries.



PRODUCTION

250 MW per year

- Solar cells.
- Solar modules.
- Located in Novocheboksarsk (Chuvash Republic), 600 km from Moscow.



ENGINEERING AND GENERATION

- Engineering and construction of on- and off-grid solar power plants of any capacity.
- Operation and Maintenance of solar power plants.

Hevel Heterojunction Cells

Bifacial N-type HJT solar cell



Produced in Russia

ISO 9001:2015 ISO 14001:2015 certified

OUTSTANDING CELL EFFICIENCY RATE

23.1%

vs. ~ 17-21 % for mass market solar cells

LOW TEMPERATURE COEFFICIENT

-0.31%/°C

vs. from -0,37 to - 0,45 % / °C for mass market solar cells

BIFACIALITY FACTOR

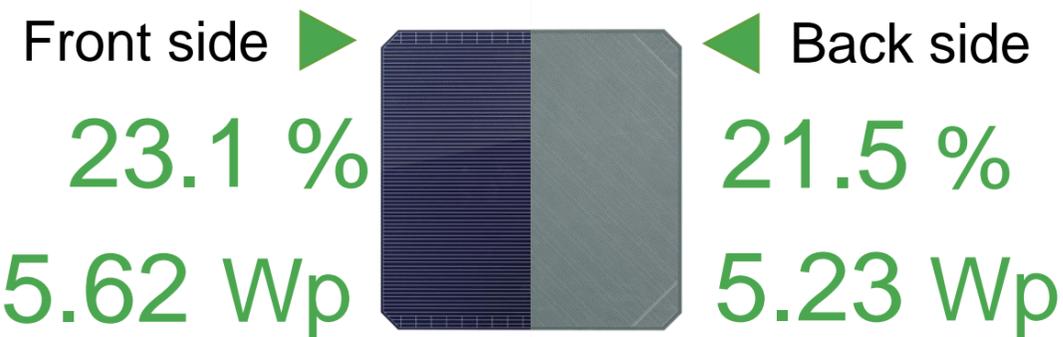
93%

vs. ~ 75 % for mass market solar cells

MINIMIZED DEGRADATION

NO LID

n-type cells lacks light induced degradation (LID), which affects p-type cells

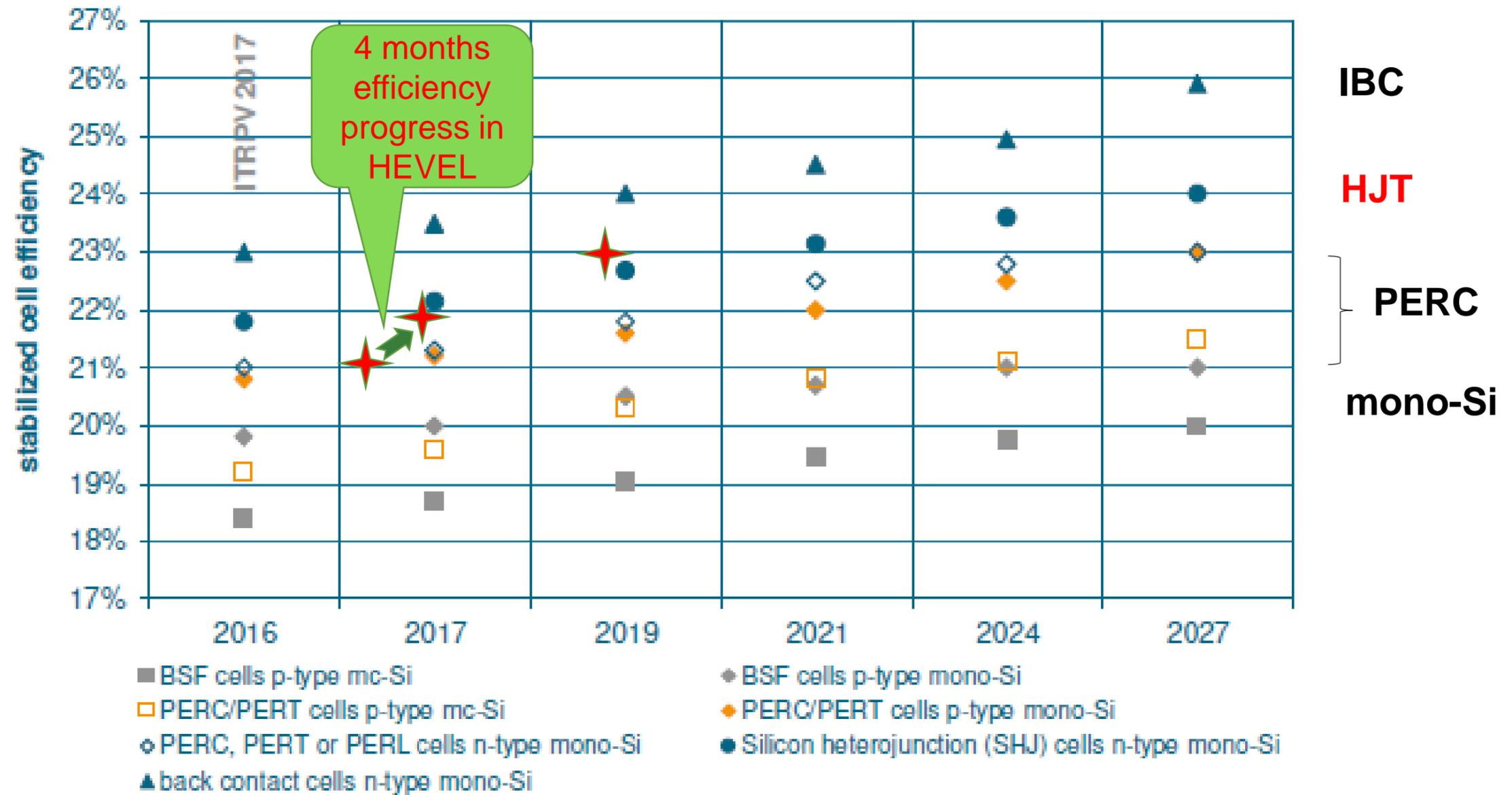


Measured with GRID^{TOUCH} contacting system. Measurement uncertainty ±3%.

- Standard dimensions: 156,75 x 156,75 mm
- Busbarless design: current collecting grid optimized for 18 wires
- High open-circuit voltages due to superior a-Si passivation

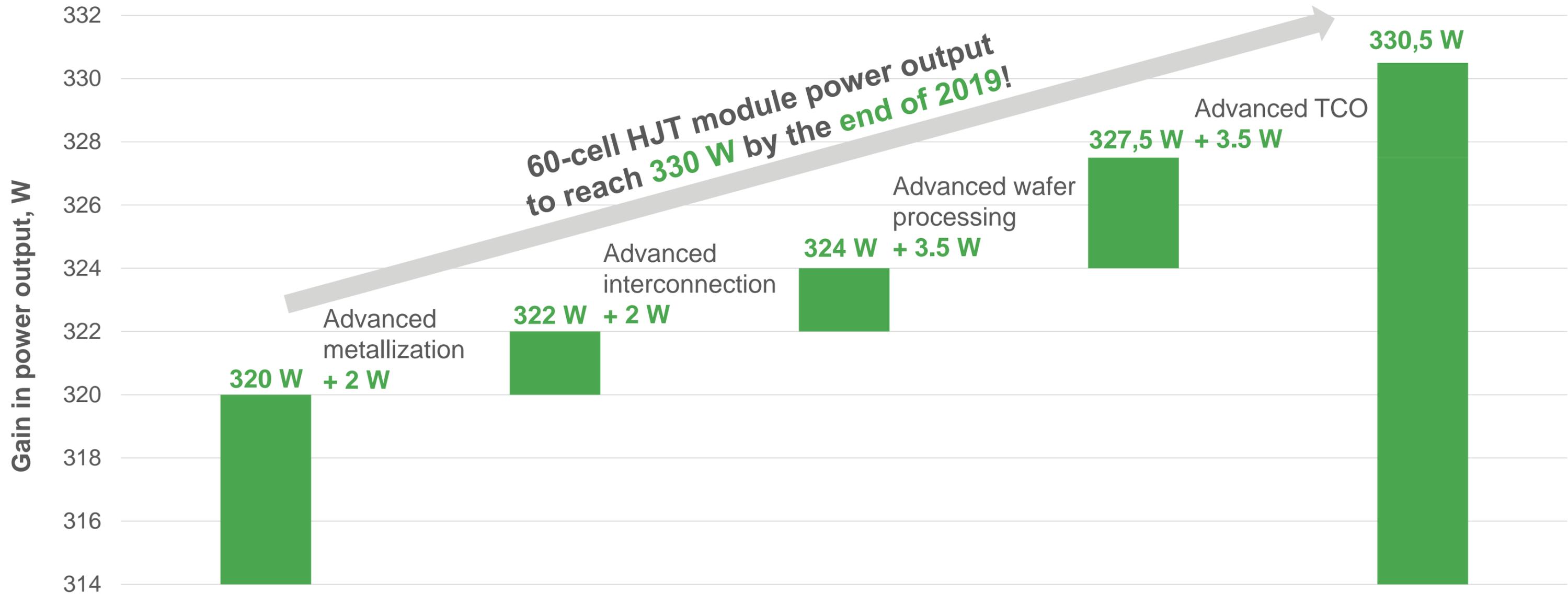
There we are currently?

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

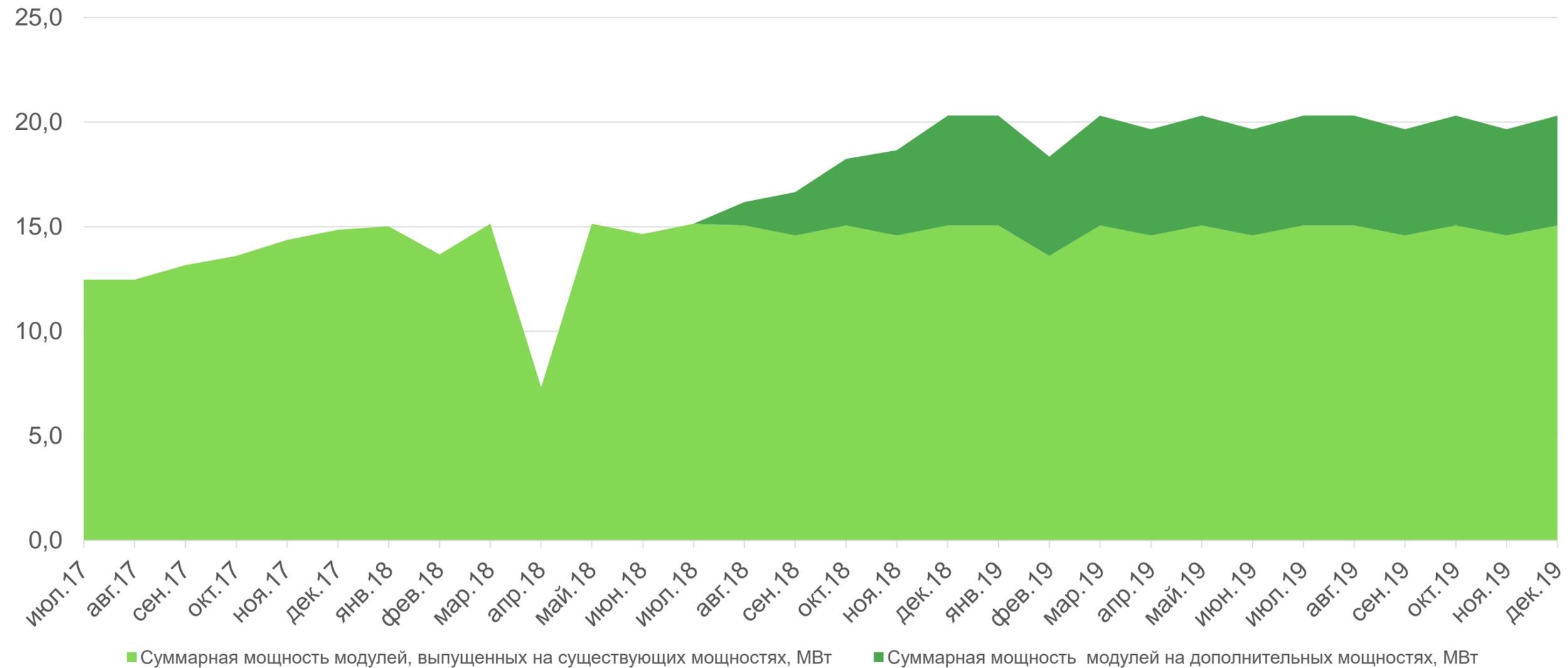
Hevel HJT 60-cell module technology roadmap



Hevel Group also is prepared to deploy **bifacial 72-cell glass-glass HJT modules** in the middle of **2019**.

Second stage of modernization

Plans for Hevel's capacity growth in 2019, MW



72 cell bifacial HJT PV module: providing the highest output possible



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:**



SNOW



WATER



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

Continuous Technology Upgrade



Technology:
Thin-film
micromorph®

156 sections

Efficiency:
9%

Power:
125 Wp



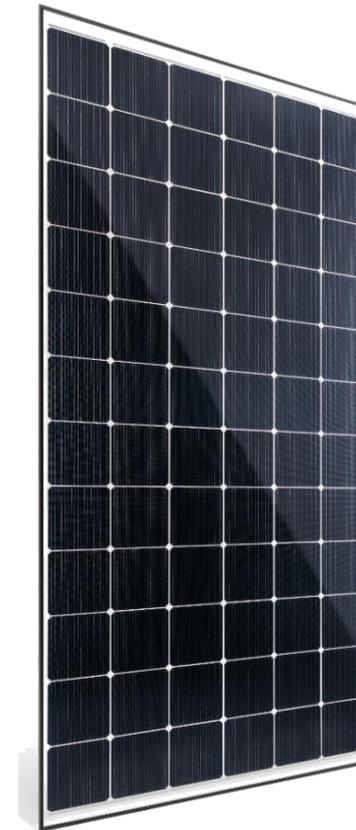
Technology:
HJT

60 cells

Cell efficiency:
23.1%

Power:
320 Wp

✓ Monofacial glass-backsheet
heterojunction PV module



Technology:
HJT bifacial

72 cells

Cell efficiency:
23%

Power:
380 Wp +

✓ Bifacial glass-glass
heterojunction PV module

2015

Thin-film micromorph®
glass-glass technology
125W module
with 9% efficiency

2017

Heterojunction (HJT)
technology
60 cell 320 Wp module
with 23.1% cell efficiency

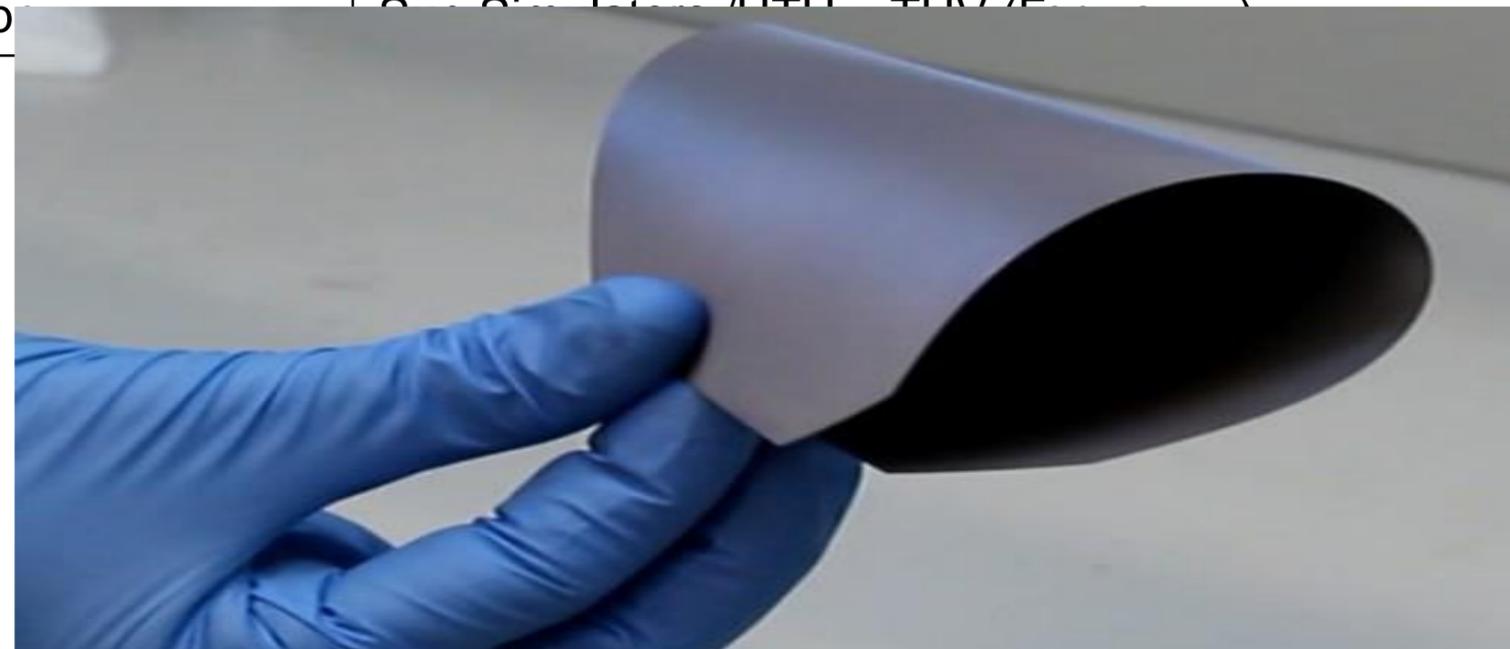
2019

HJT technology upgrade to
72 cell bifacial glass-glass
380 Wp module
with 23.1 % cell efficiency

Тонкая кремниевая пластина

Процесс изготовления 156x156 мм² гетероструктурного ФЭП

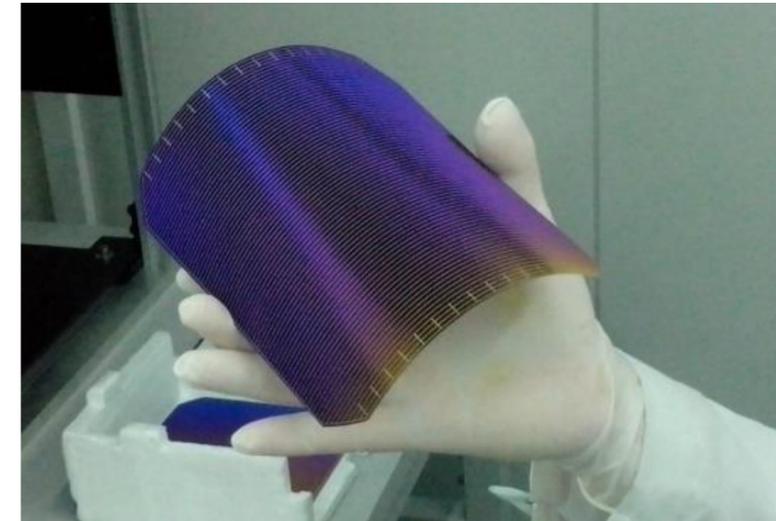
Задача	Оборудование
1. Удаление нарушенного слоя более длительное время.	Линия хим. отмывки и текстурирования
2. Текстурирование c-Si пластин	Линия хим. отмывки и текстурирования
3. Формирование a-Si/c-Si гетеропереходов	KAI реакторы
4. Нанесение ITO и Ag слоев	PVD реакторы
5. Формирование контактной сетки	Screen printing
6. Тестовые измер	С - Si, ITO, Ag / ITC, TUV / (5 - ...)



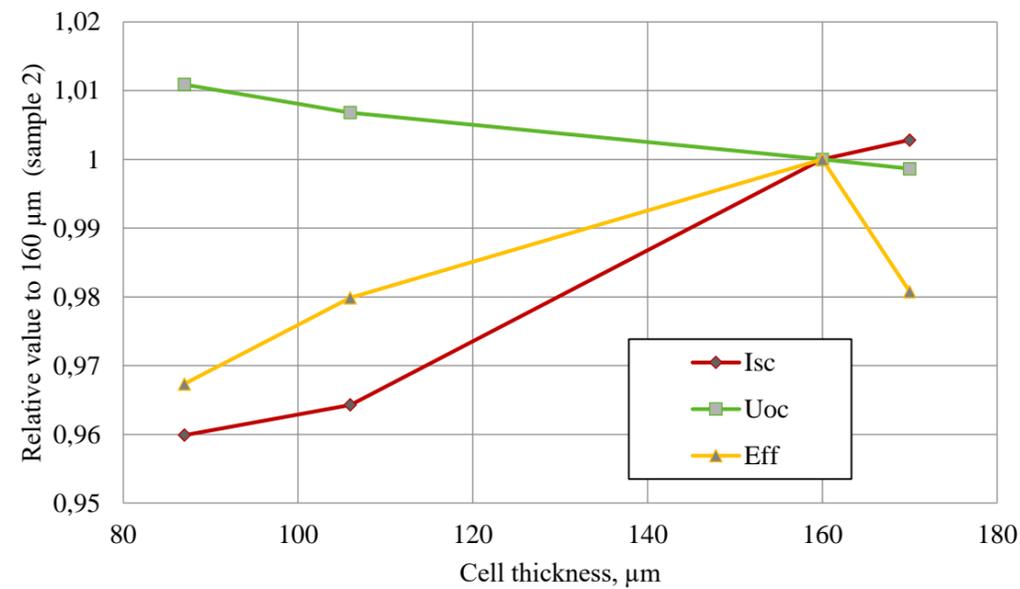
Толщина пластин Si

Параметры пластин с различной толщиной

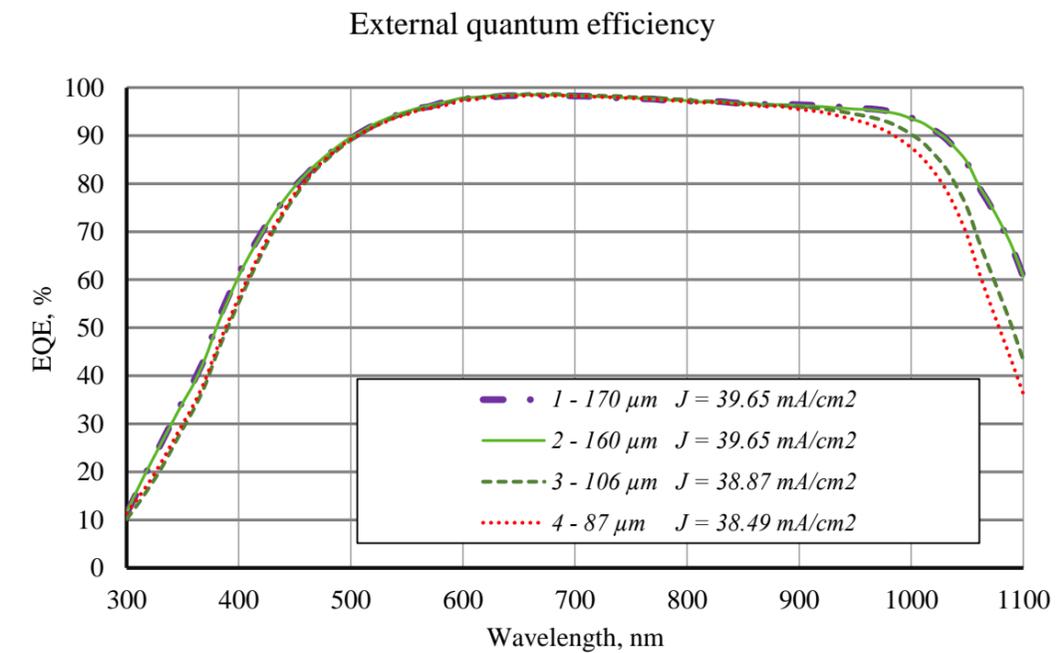
$d, \mu\text{m}$	I_{SC}, A	$U_{OC}, \text{В}$	$P_m, \text{Вт}$	$U_m, \text{В}$	I_m, A	$FF, \%$	$Eff, \%$
170 μm	9,60	0,734	5,46	0,612	8,92	77,47	22,34
160 μm	9,57	0,735	5,56	0,622	8,95	79,04	22,77
106 μm	9,23	0,740	5,45	0,635	8,59	79,80	22,31
87 μm	9,19	0,743	5,38	0,636	8,46	78,79	22,03



Фотография образца



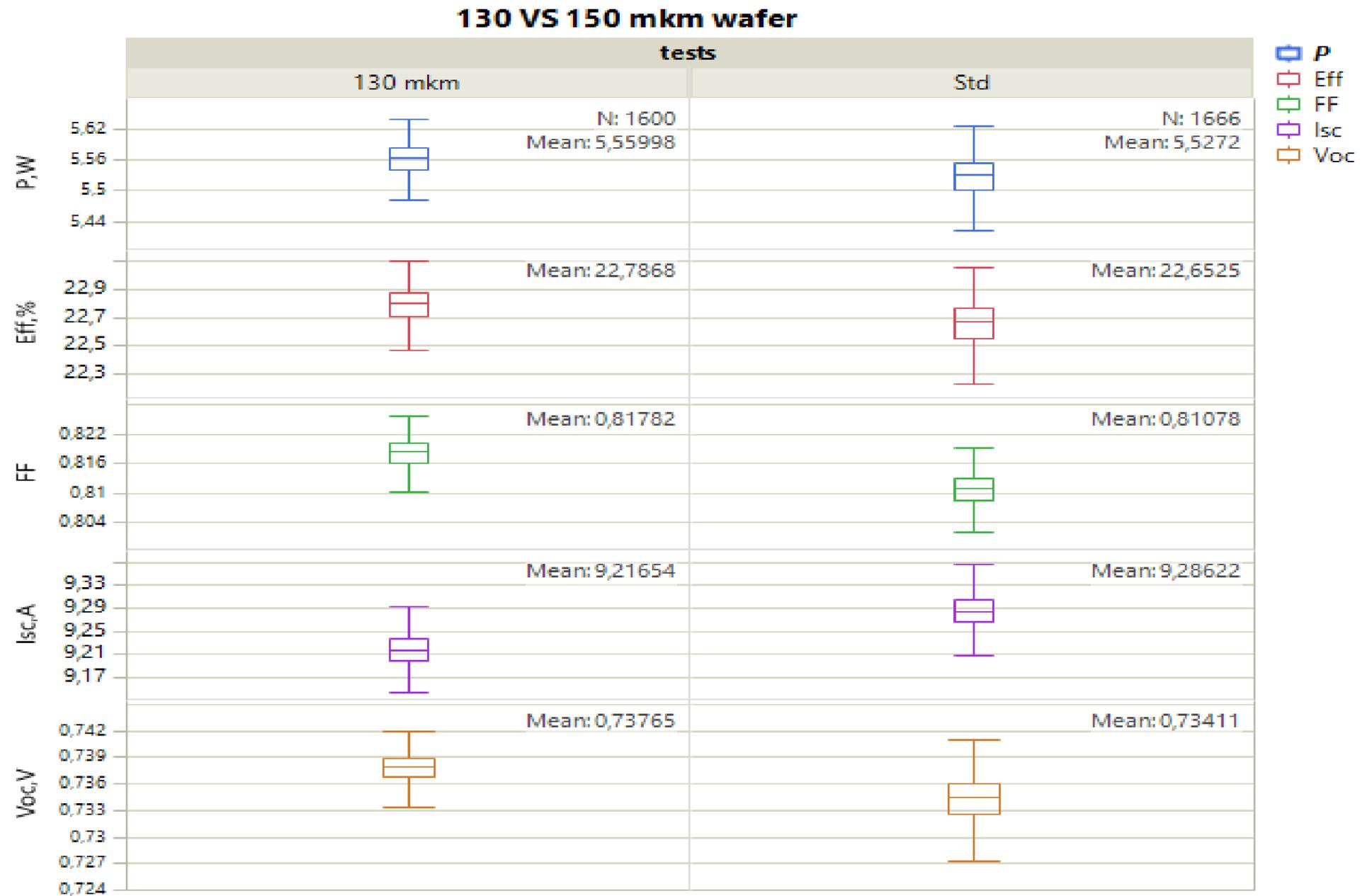
Параметры пластин с различной толщиной в отношении к пластине 160 мкм



EQE пластин с различной толщиной



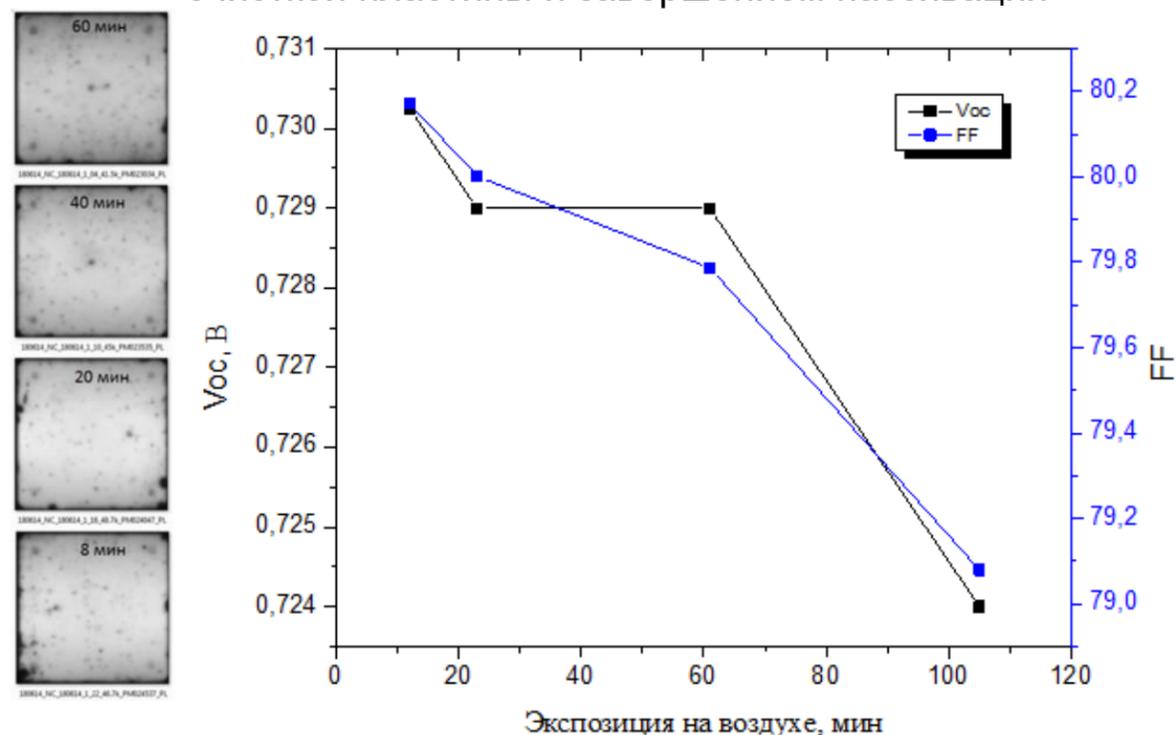
Распределения основных характеристик ФЭП для 130 и 150 мкм пластин



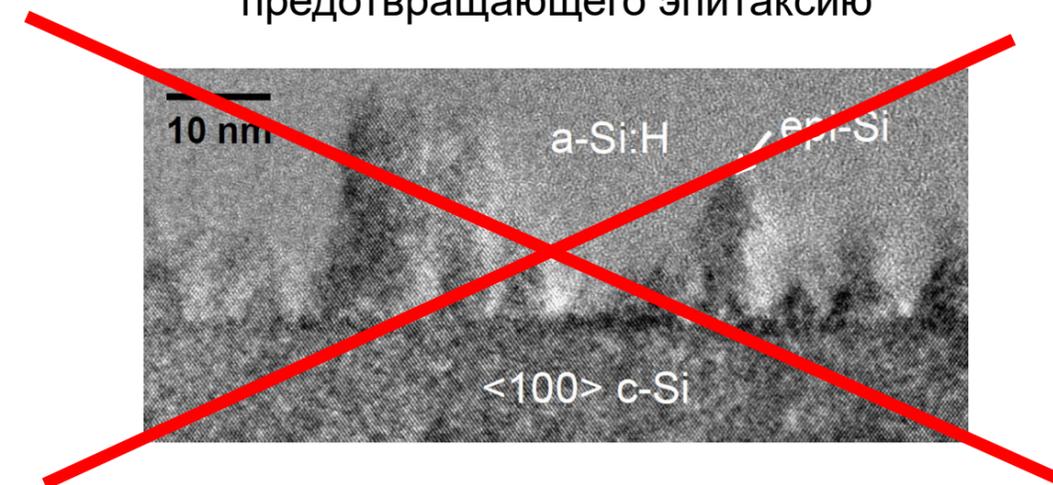
ФОТООТЖИГ

Особенность Si-HJ технологии – повышенные требования к состоянию поверхности

Требуется снижение экспозиции на воздух между очисткой пластины и завершением пассивации

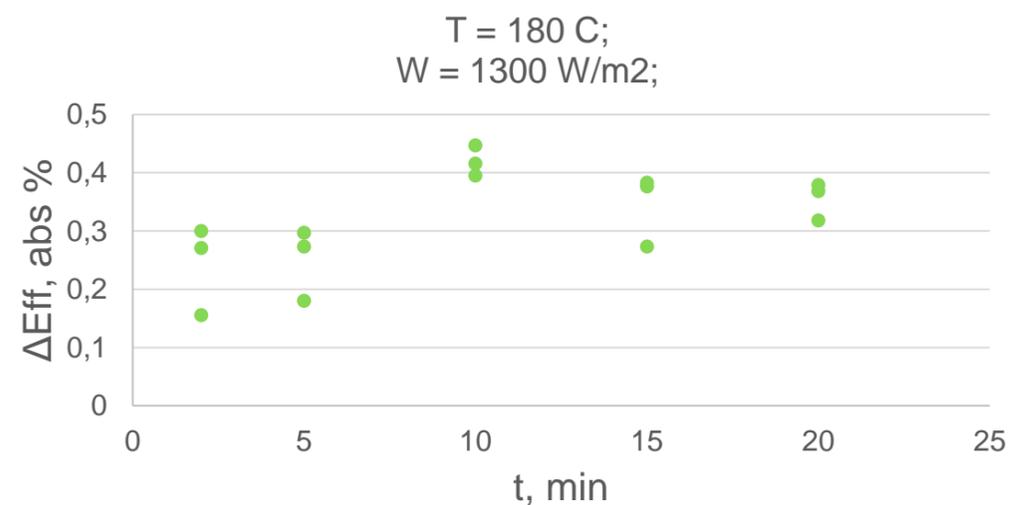
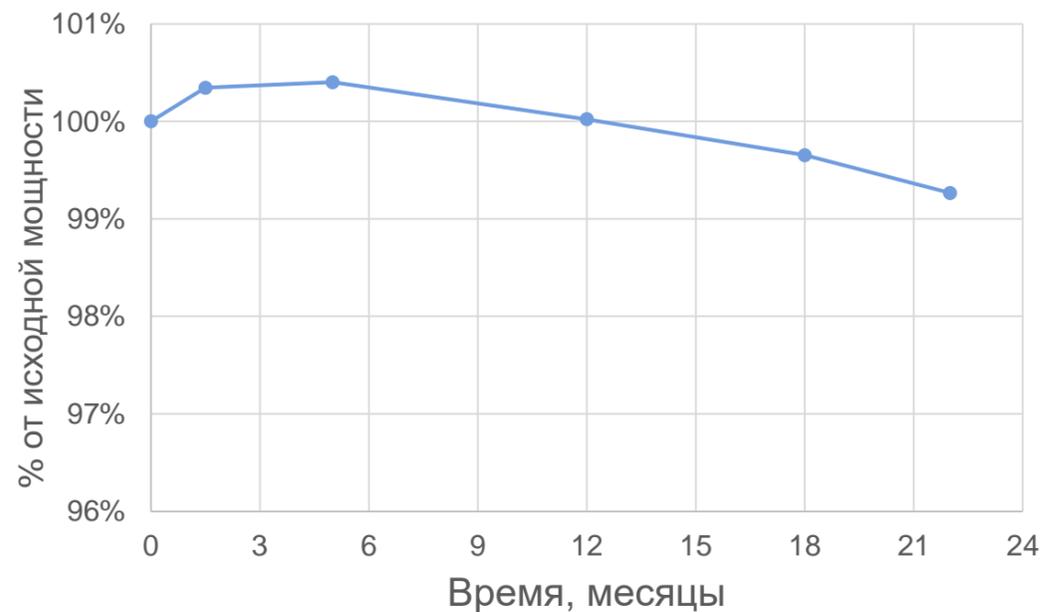


Недопустим эпитаксиальный рост – необходимо применение буфера предотвращающего эпитаксию



Подготовка пластин кремния к формированию гетероструктурного перехода требует многоступенчатого процесса очистки. Для пассивации необходимо нанесение многослойной структуры толщиной несколько нм, состоящей из буфера и пассивирующего слоя.

Аномальные» фотоиндуцированные эффекты в гетероструктурном ФЭП

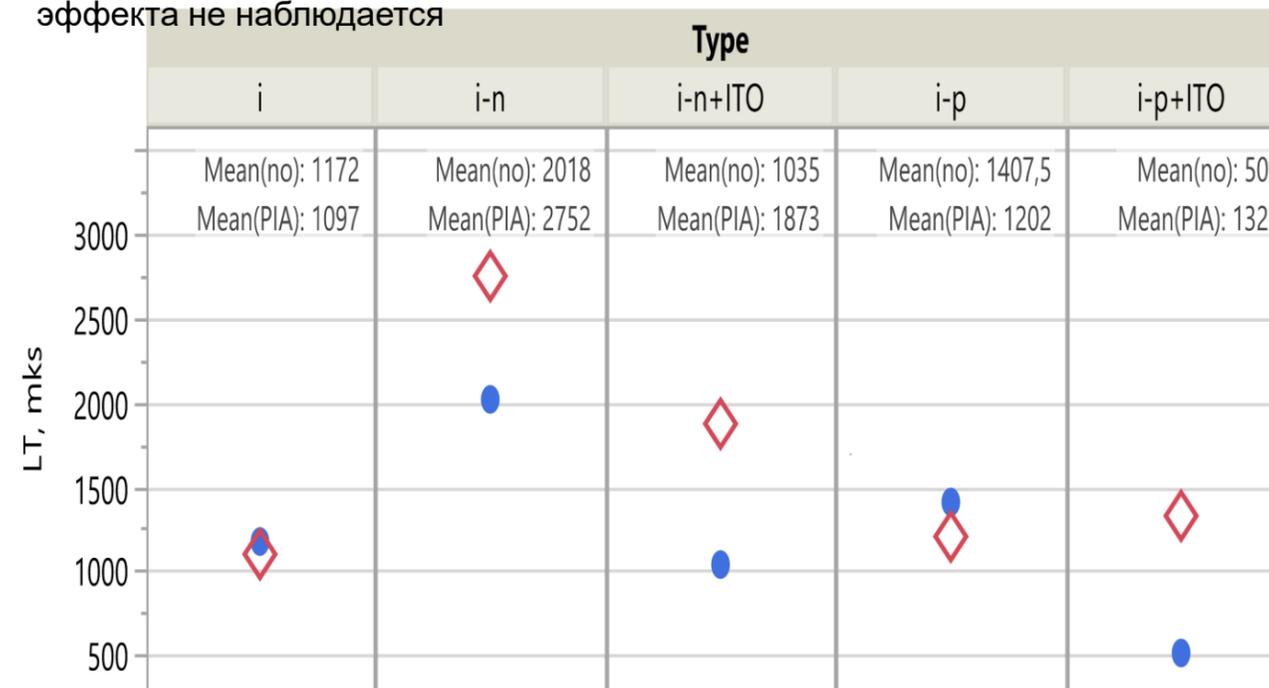


НТТ ФЭП и модули:

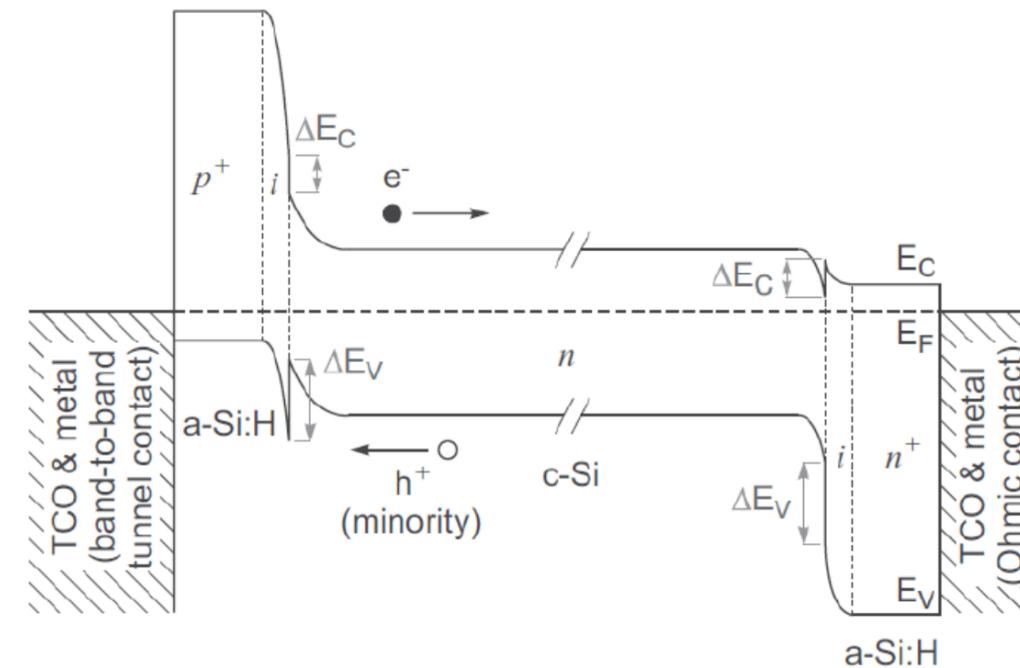
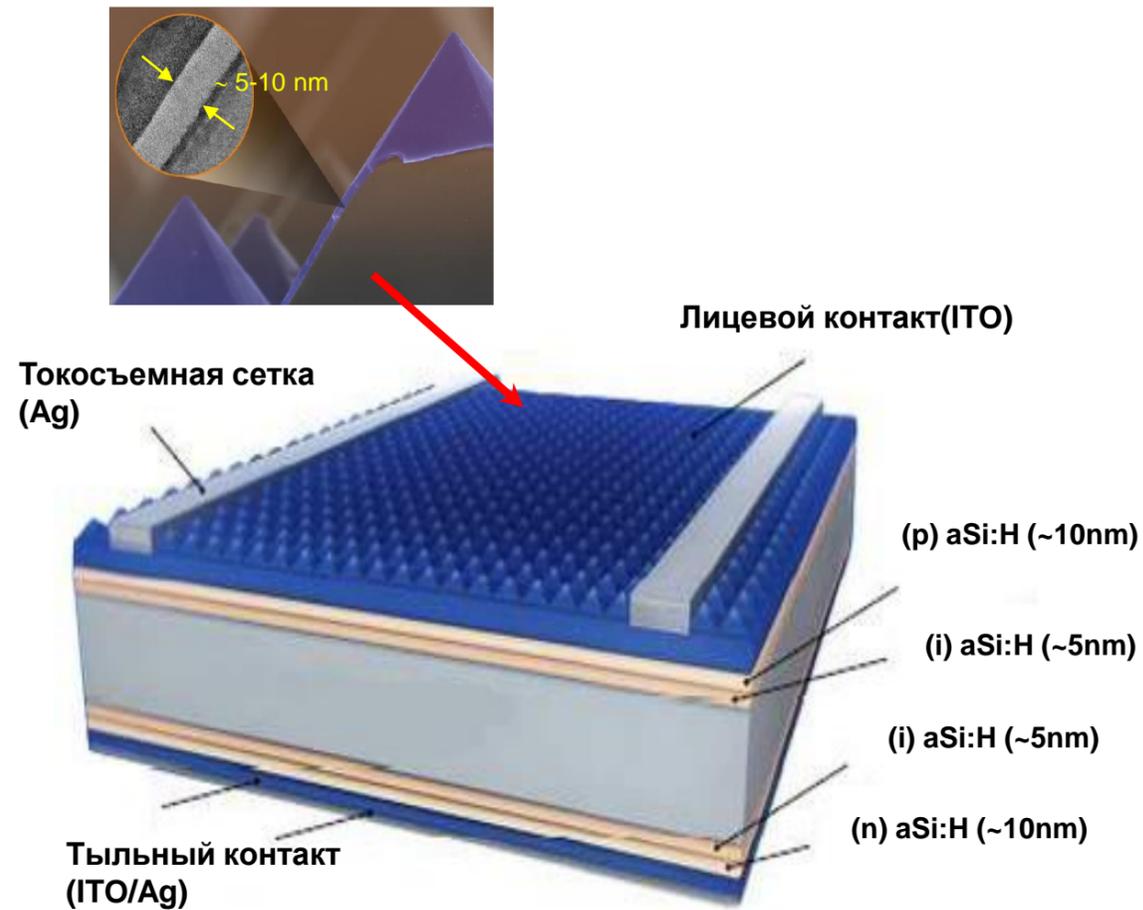
- Обнаружено увеличение мощности Si-HJ модулей в начальный период эксплуатации и при пропускании тока в прямом направлении (в режиме инжекции носителей заряда);
- Интенсивное освещение при повышенной температуре приводит к увеличению эффективности Si-HJ ФЭП.

Измерения времени жизни

- Интенсивное освещение при повышенной температуре приводит к увеличению времени жизни в n-i-cSi-i-n структурах, в p-i-cSi-i-p и пассивированных пластинах эффекта не наблюдается



Гетероструктурная кремниевая технологи (Si-HJ)



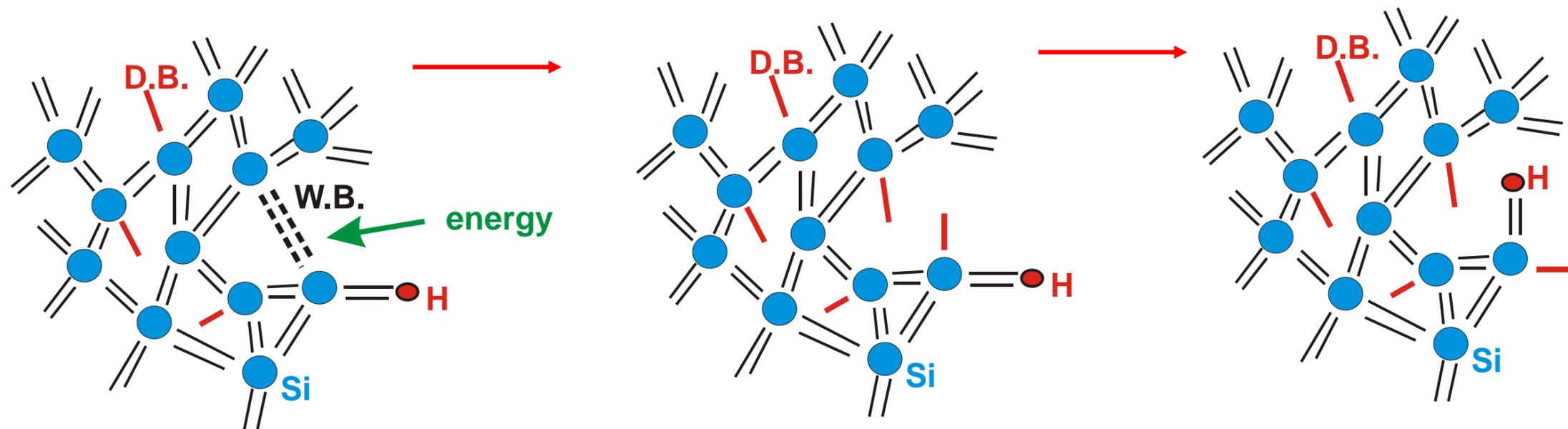
Рекордные эффективности для c-Si ФЭП – 25.2% при двухстороннем контактировании
26.7% при одностороннем контактировании

Фотоиндуцированные метастабильные состояния в a-Si:H

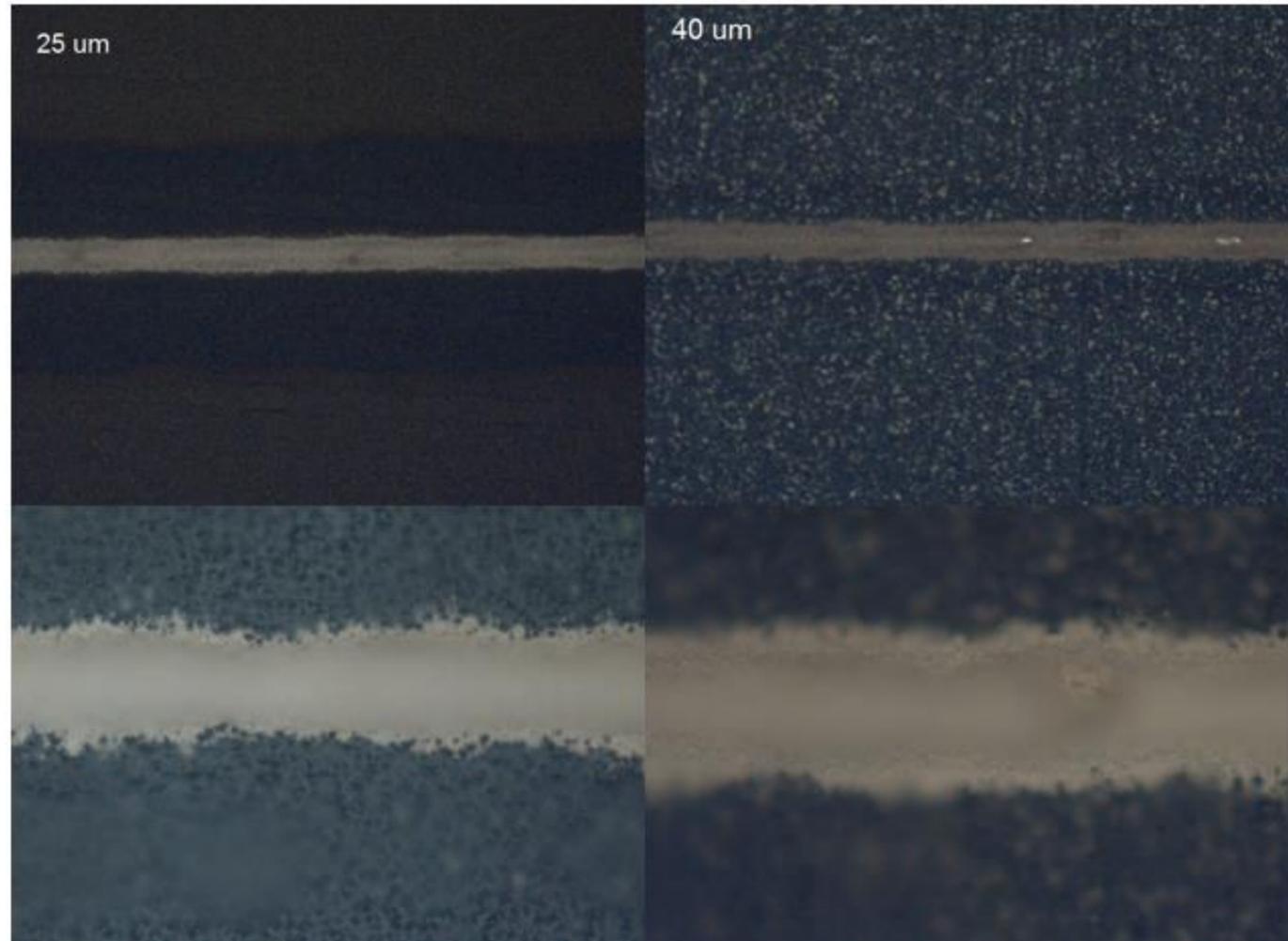
- Освещение a-Si:H → увеличение концентрации дефектов (оборванных связей) → уменьшение проводимости и фотопроводимости (эффект Стеблера-Вронского)
- Отжиг при $T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$ → восстановление исходных параметров

Причина – разрыв слабых связей:

Поглощение света → неравновесные носители заряда → рекомбинаций → выделение энергии → разрыв связей



Металлизация ячеек с использованием метода гальванического осаждения меди



Current status

Exchange programme between TFTE and ASYS:

1. Increase of print speed (decrease of tact time)
-5200 vs 4800 , 40 mkm

2. New pastes implementation

Проблемы: разные эталоны для сравнения, разные режимы нанесения (скорость, отжиг), BB vs SWCT

3. Stencilprozess

Modules	Module parameters					Cell parameters					
	Isc, A	Voc, B	Voc / cell, B	Pmpp, Вт	FF, %	Isc, A	Voc, B	Pmpp, Вт	FF, %	Eff, %	CTM, %
1_40mkm	9,29	43,95	0,732	320,7	79	9,27	0,735	5,54	81,3	22,73	4,59
2_25mkm	9,35	43,87	0,731	319,04	78	9,32	0,735	5,58	81,4	22,87	9,58

Преимущества и недостатки гальваники

Преимущества

Используется намного меньше серебра

У сетки лучше проводимость

Высокая адгезия

Подходит для пайки

Требует меньшей ширины фингеров

VBCT или SWCT

Недостатки

Более сложный процесс

Очистка PVD от меди

Требуется очистка стоков

Нет промышленного подтверждения

Технологический процесс

1. Отжиг ITO
2. PVD осаждение подслоя с двух сторон
 - Адгезионный слой
 - Слой для проводимости (м. б. медь)
3. Нанесение маски с двух сторон струйным принтером (Hot Melt Ink)
4. Электрохимическое осаждение меди
5. Химическое осаждение серебра
 - Подготовка поверхности меди
 - Осаждение серебра
6. Снятие маски
 - Органический растворитель или раствор КОН
7. Травление PVD-подслоя металла непокрытого медью и серебром
 - Разбавленный раствор кислоты

Размеры фингеров

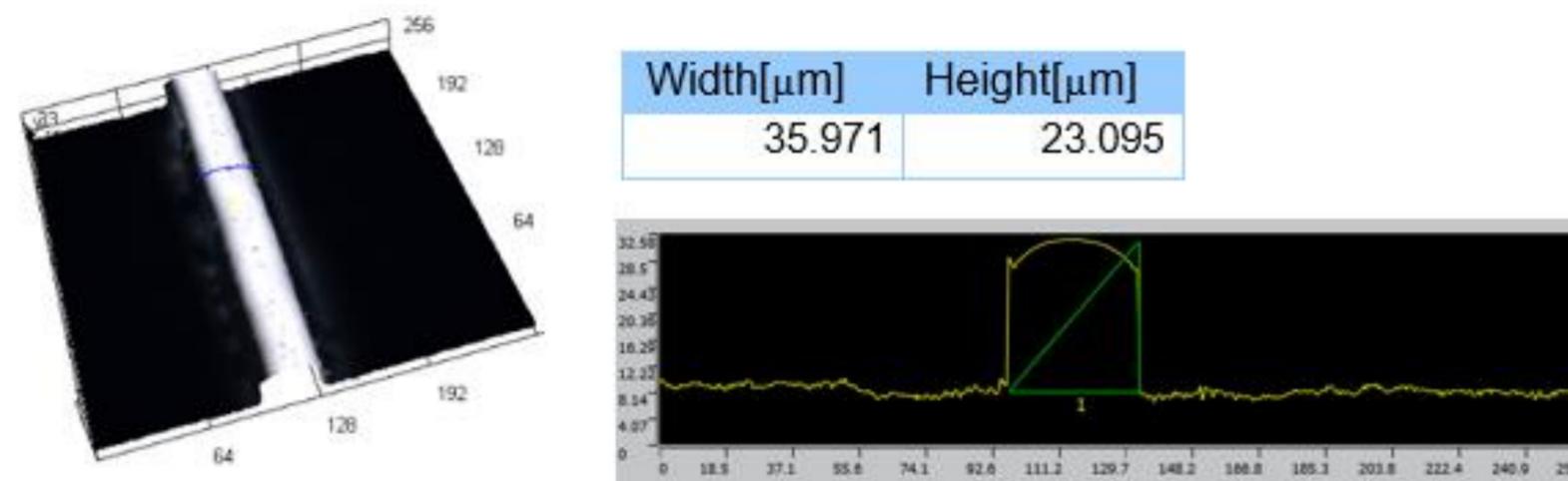


Fig. 1.1.2. Finger dimensions on the front side (measurement in the centre of the cell)

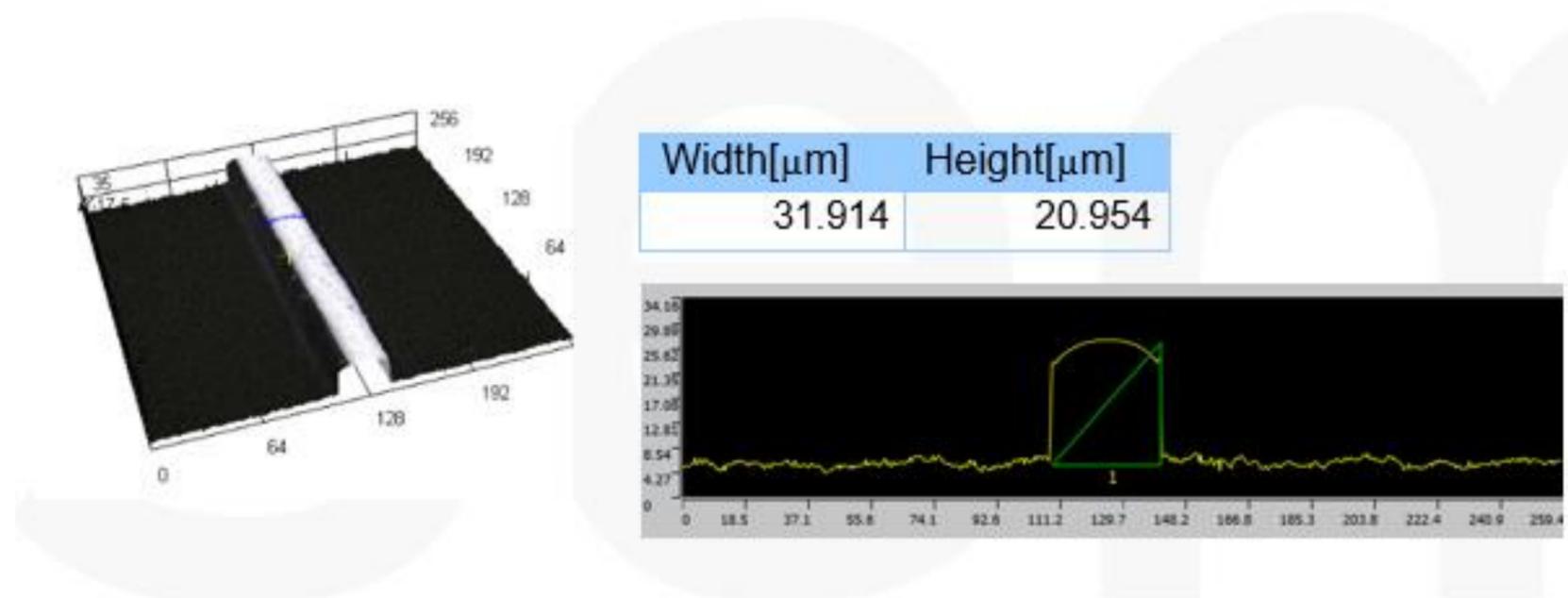
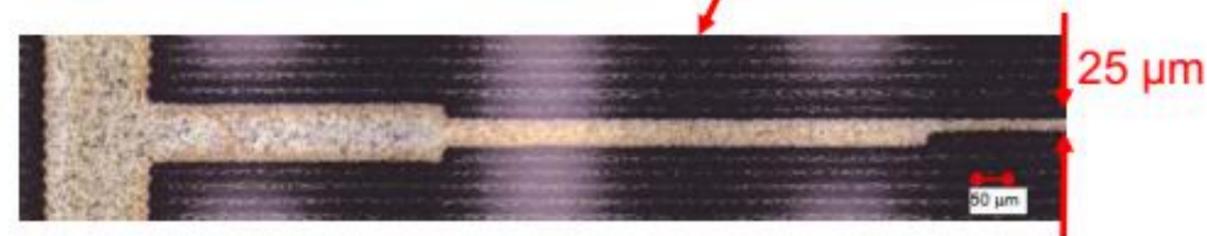
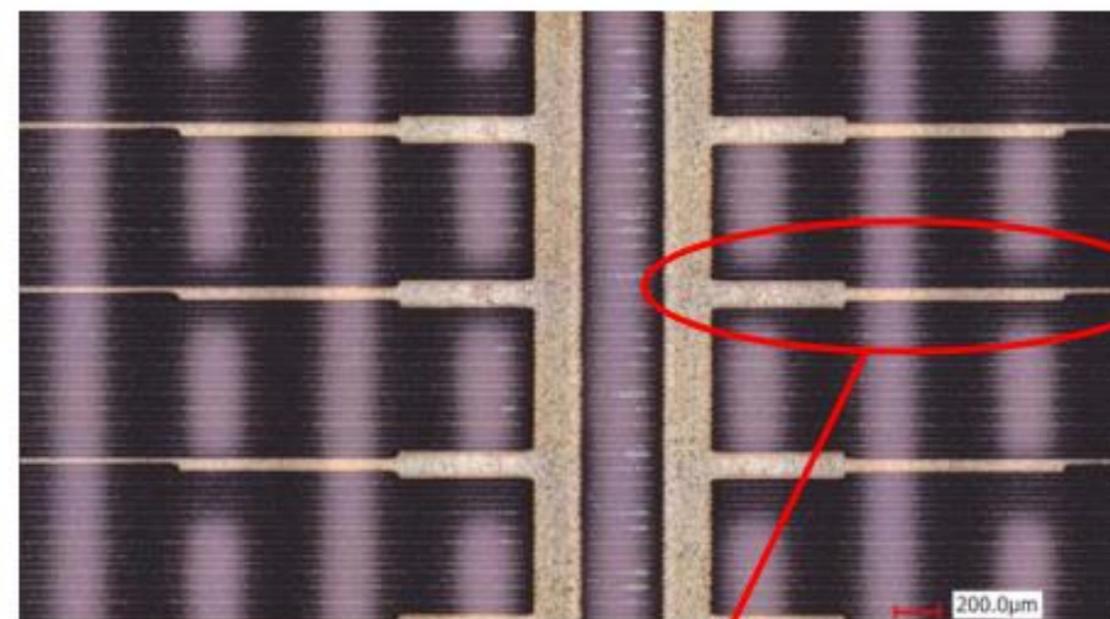
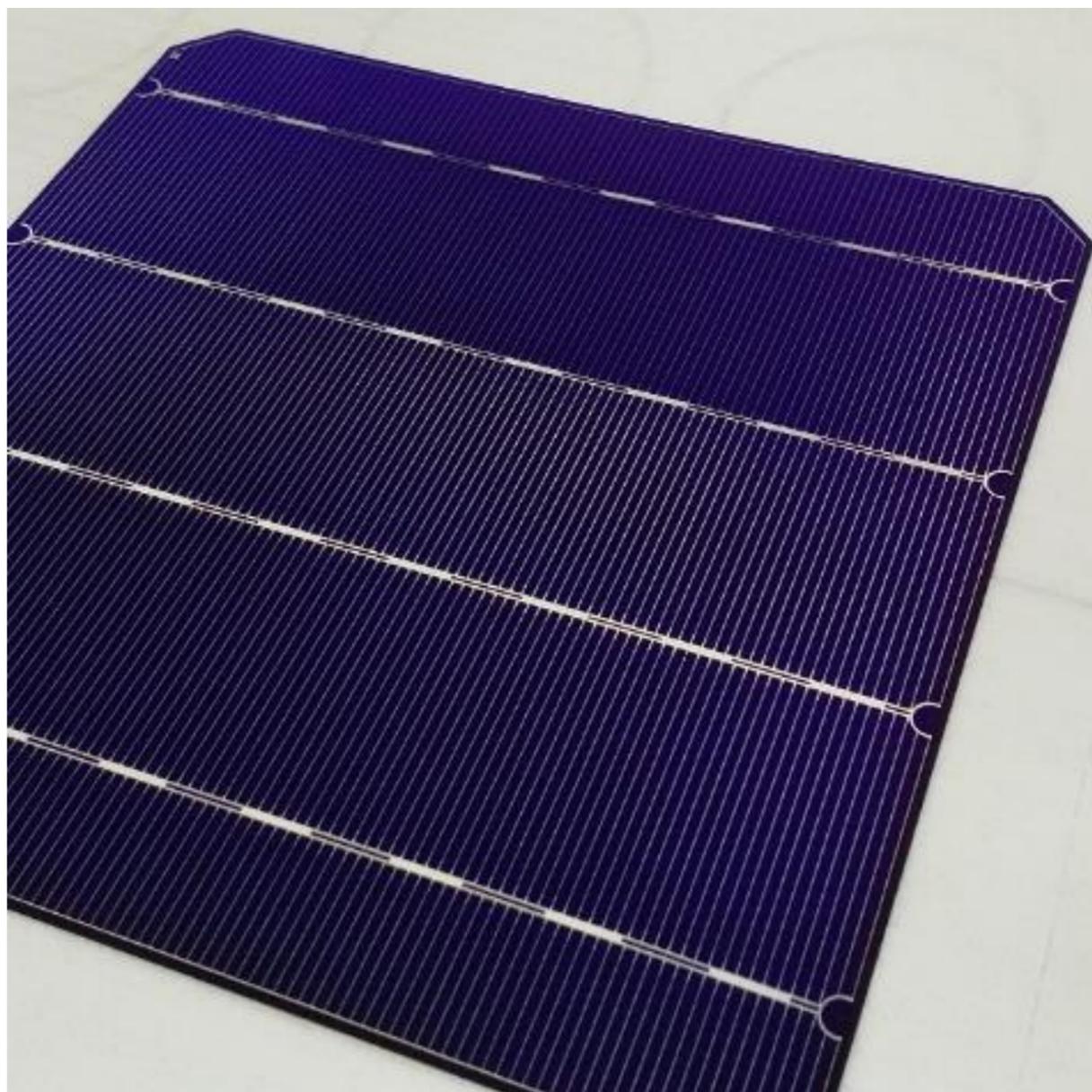


Fig. 1.1.2. Finger dimensions on the rear side (measurement in the centre of the cell)

Контактная сетка



Промышленное оборудование



Струйная печать
1200 пл/ч



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

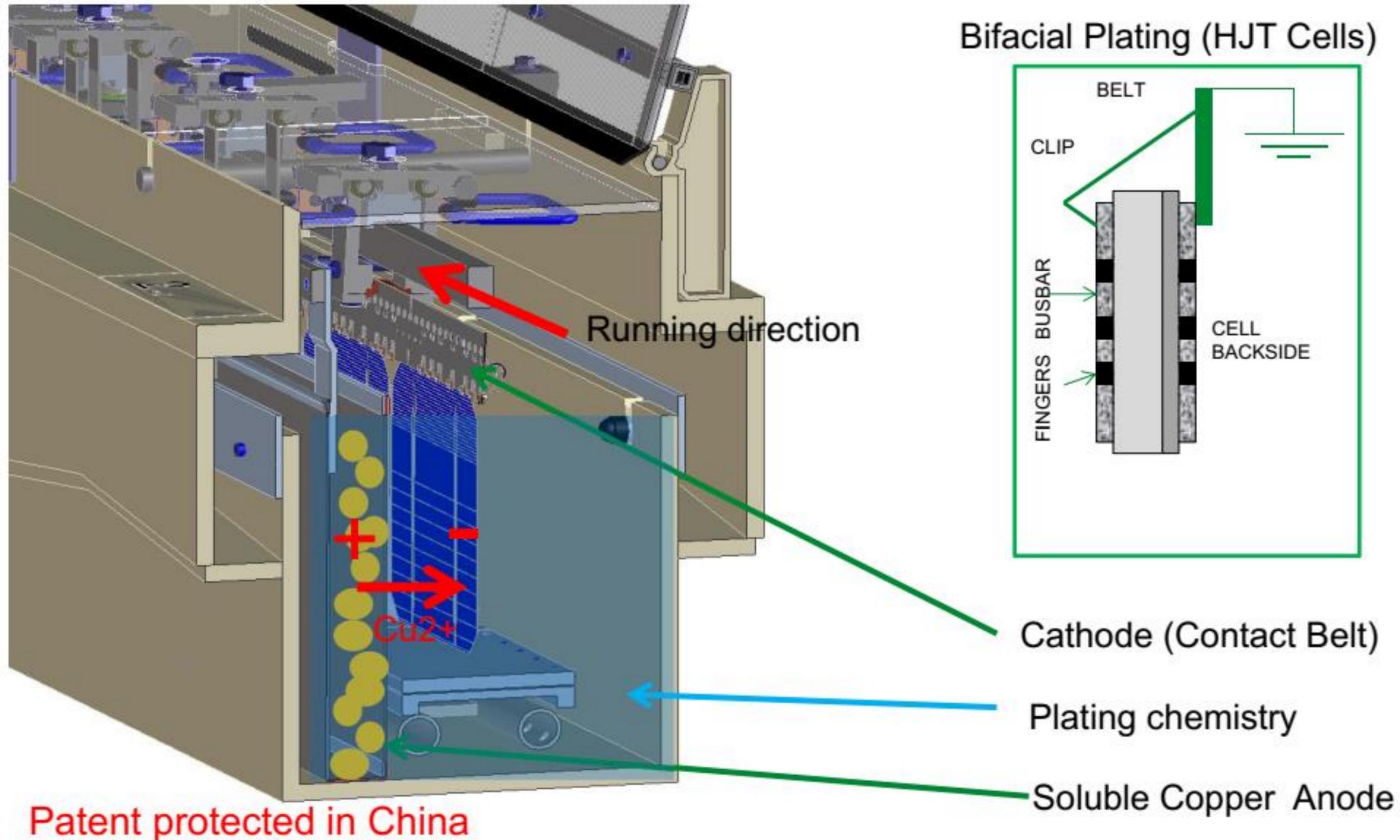
Схема

Meco SOLAR

Plating equipment : schematic concept

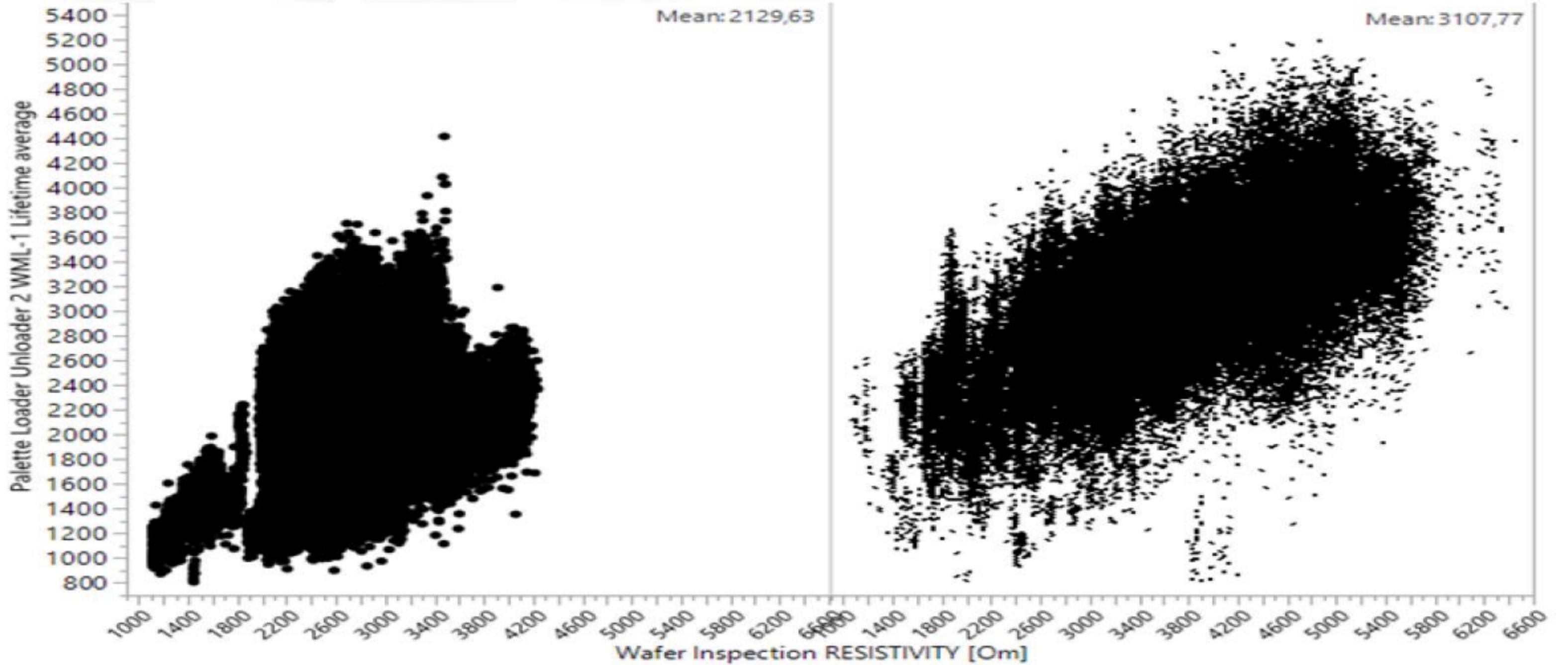


Besic



Кремниевая пластина

Recent developments: 2 different wafer suppliers

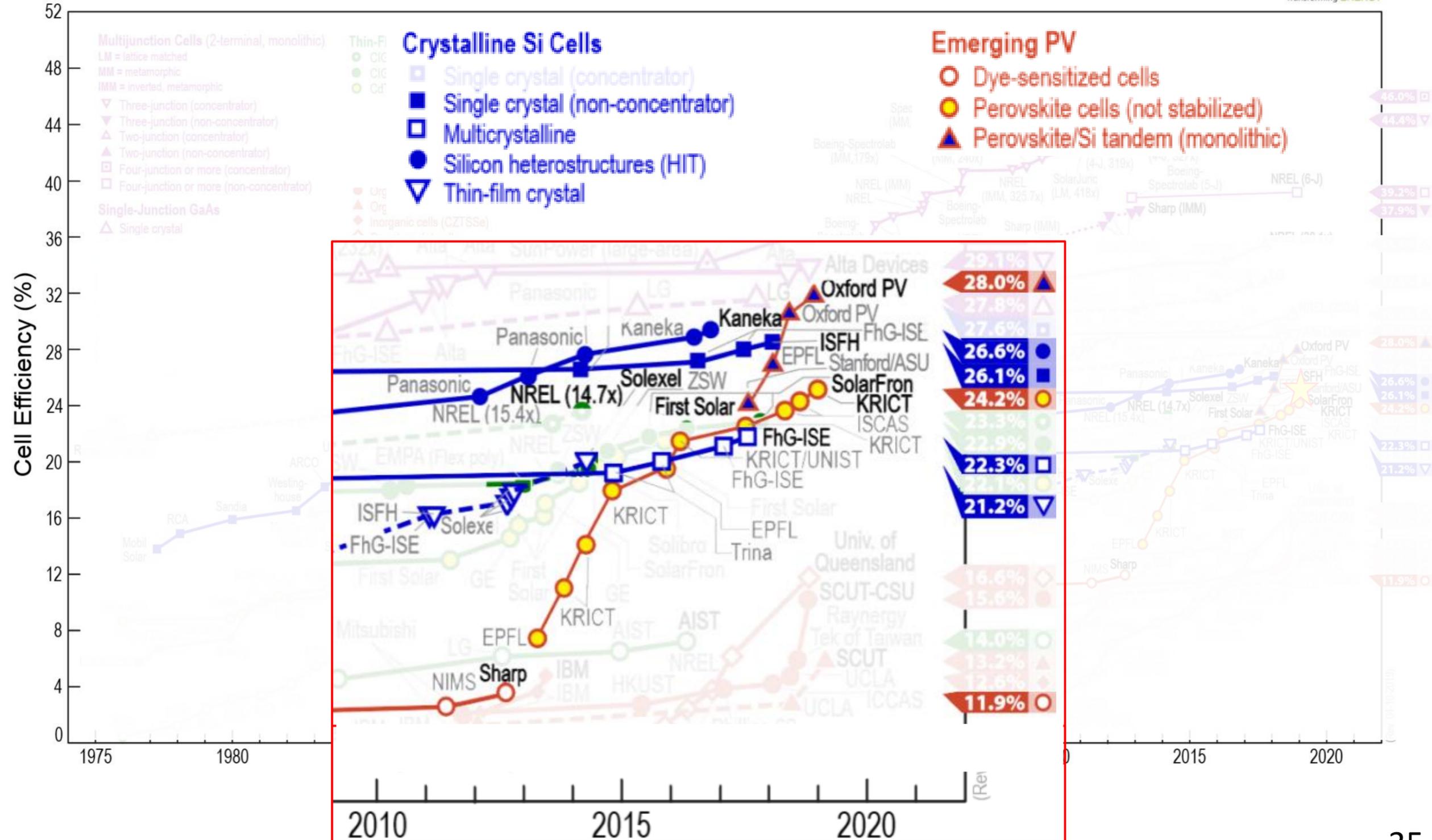


Тандем кремний-перовскит



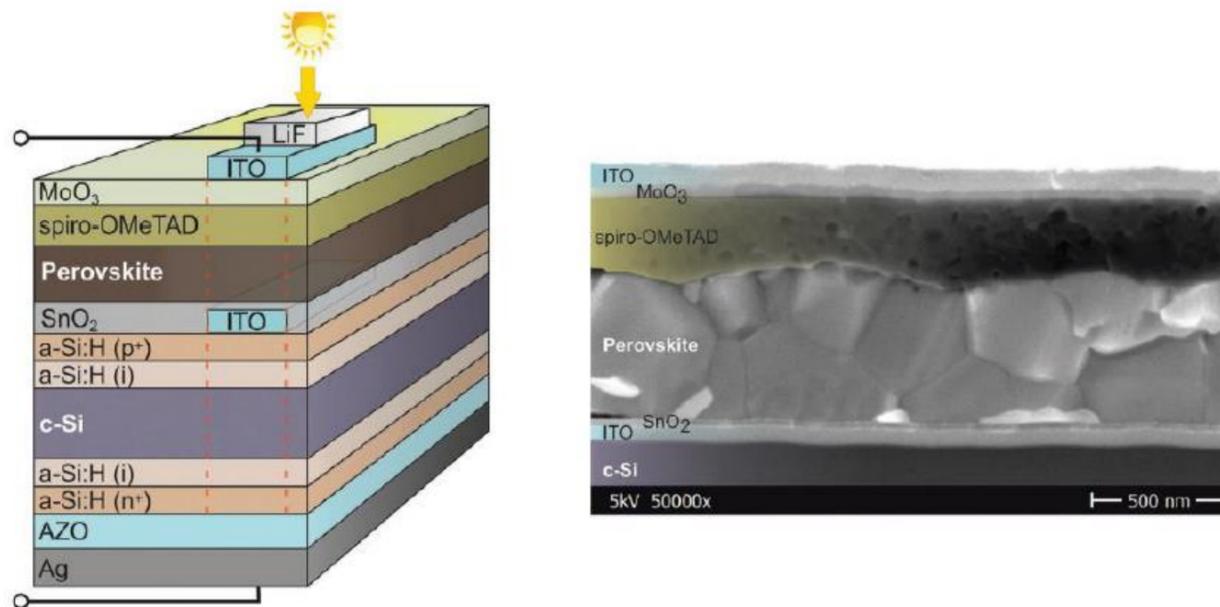
Перовскит и кремний: борьба или сотрудничество?

Best Research-Cell Efficiencies



TANDEM CELL

Dual junction cell design:



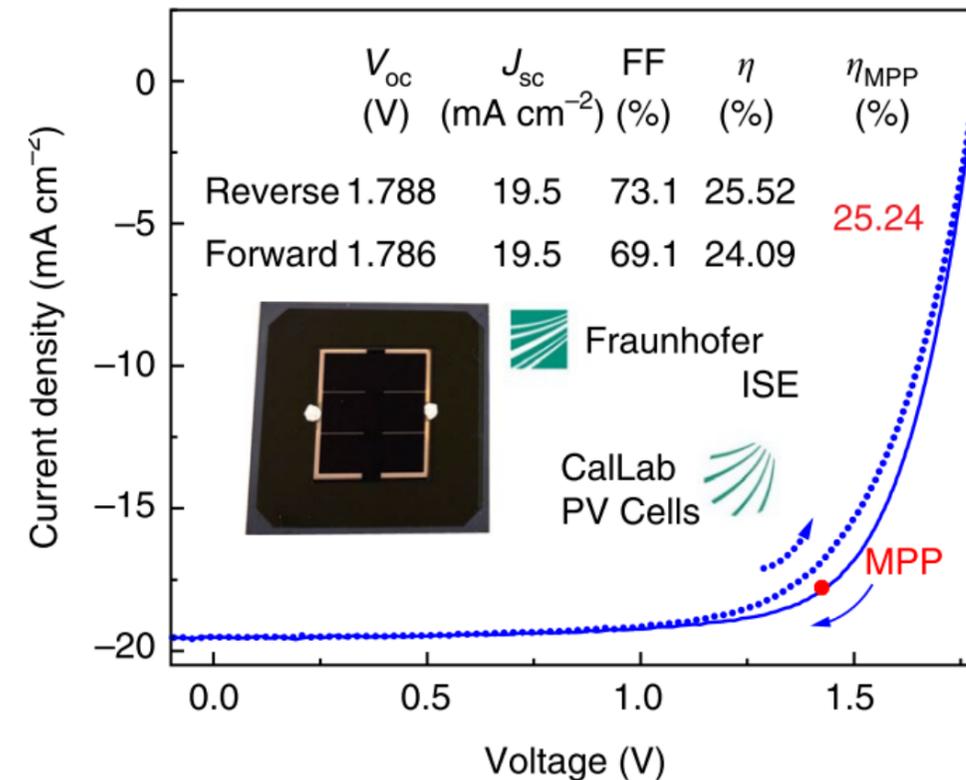
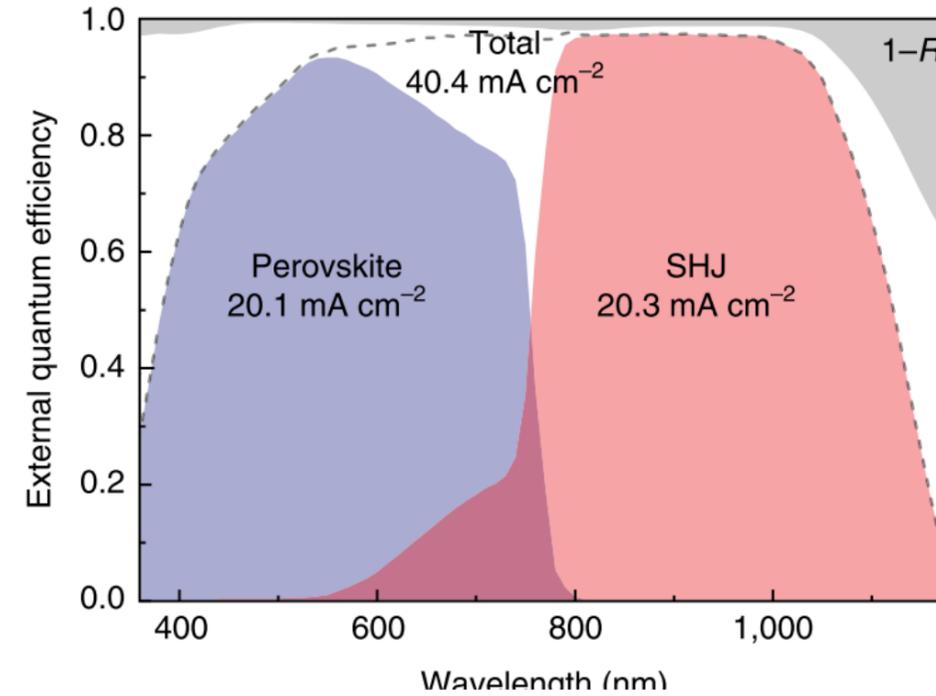
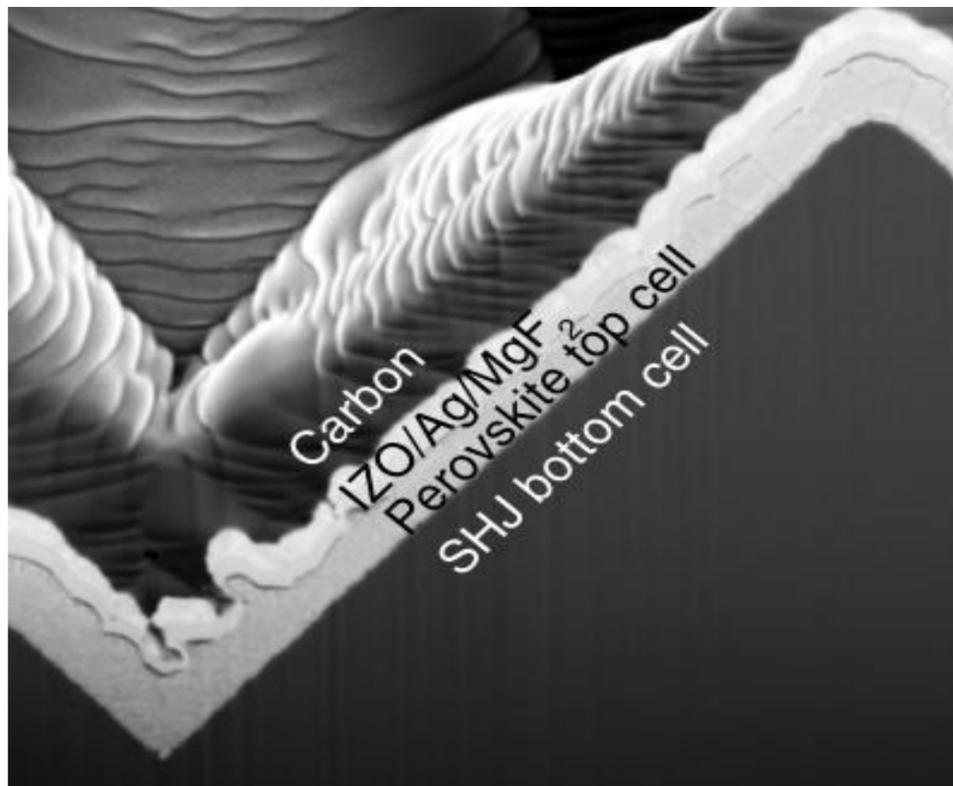
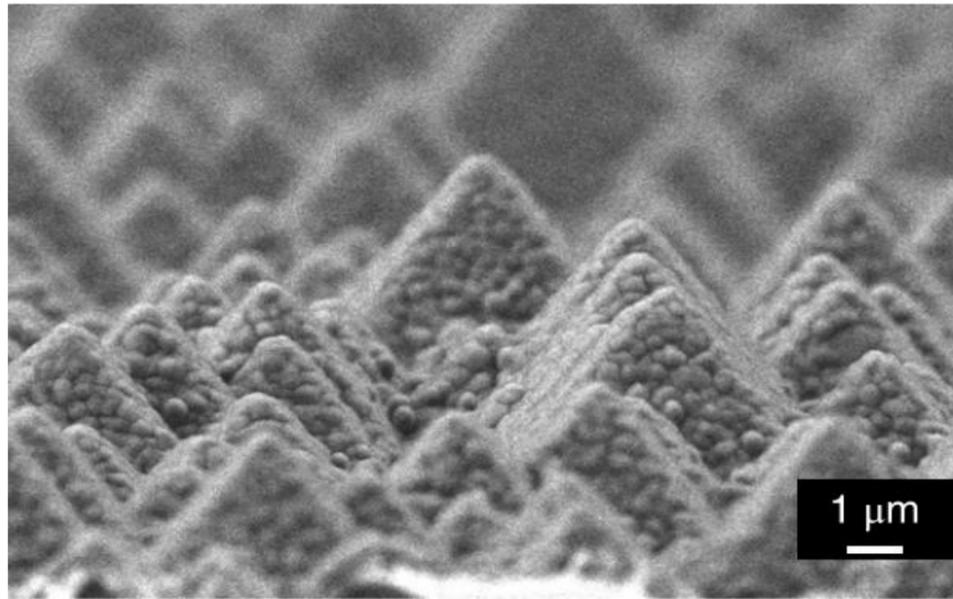
From: S. Albrecht et al., Energy&Environmental Science 10/2015, HZB Berlin

TANDEM CELL:

- Still R&D level
- Top cell with Perovskite
- Bottom cell HIT Cell or PERC cell
- VA offers solution for TOP Cell (TCO and Absorber materials)
- Perovskite material evaporated with jet stream line evaporator
- SCALA platform



Тандемные солнечные элементы перовскит@Si потенциальный прорыв для кремниевой фотовольтаики





Разработка перовскит-кремниевых тандемов требует плотной коллаборации с кремниевой индустрией



Пилотная линия Oxford PV (приобретенный кремниевый завод), 17,000 м²



Проблемы перовскитной фотовольтаики

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

Примеры использования гетероструктурных ФЭМ

Hevel Implemented Projects: Utility-scale



IMPLEMENTED PROJECTS



ORENBURG REGION

85 MW

BASHKORTOSTAN

44 MW

SARATOV REGION

45 MW

REPUBLIC OF ALTAY

45 MW

REPUBLIC OF BURYATIA

10 MW



VOLGOGRAD REGION

10 MW

ASTRAKHAN REGION

75 MW

PV products for non-conventional applications

High-efficiency SHJ cells are perfect for reliable, efficient and technologically advanced PV solutions as well as for customized products.

Hevel Group is working on a **wide range of PV solutions** for non-conventional applications, such as:

- Flexible PV modules for mobile applications;
- Building and vehicle integrated PV solutions;
- PV modules to be used in extremely cold climates (subarctic and arctic);
- Ultralight PV modules for wearable solar products and aerospace applications.



For such applications **SHJ-IBC platform** is highly attractive and is also being developed by **Hevel Group**.



Unbemannte Bothe



БУК-600



Storm-600



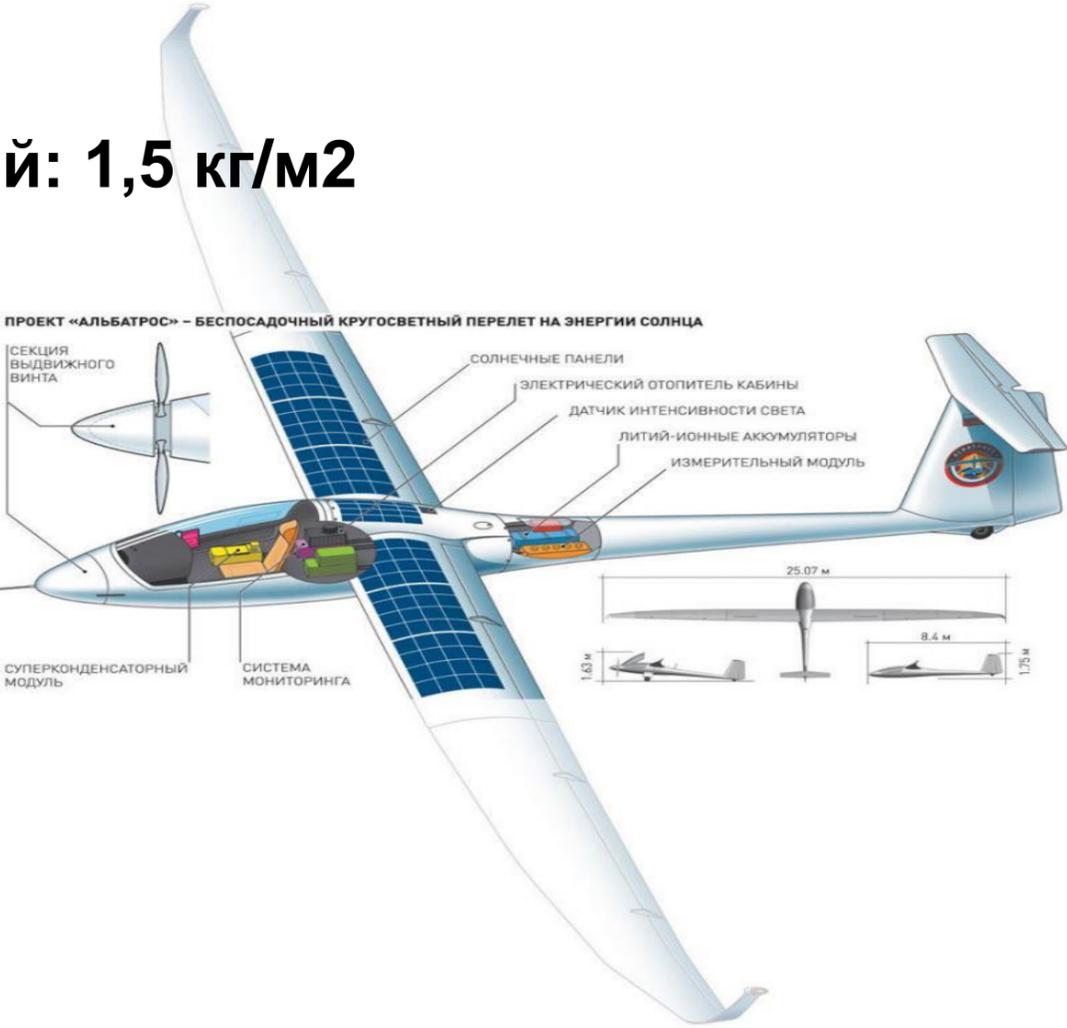
Kadet-M



Fliegende Labor“Albatros”



На базе самолета Stemme S12
Удельный вес солнечных модулей: 1,5 кг/м²



- Непрерывное развитие гетероструктурной технологии с увеличением эффективности ячейки на +0,85 % и мощности модуля на +15 W за последний год;
- Мощность производства ООО «Хевел» достигла 340 МВт в год;
- 325 W мощность промышленного модуля стекло -полимер;
- 380+ мощность промышленного двухстороннего модуля стекло-стекло;
- Построено только в РФ более 600 МВт СЭС;
- Разработана технология гибких гетероструктурных кремниевых модулей для мобильных применений. Запущено производство.

В планах:

Создание гигаватного производства кремниевых пластин и ФЭП в Калининградской области к началу 2023 года.

Спасибо за внимание

