



Научно-Технический Центр

тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе

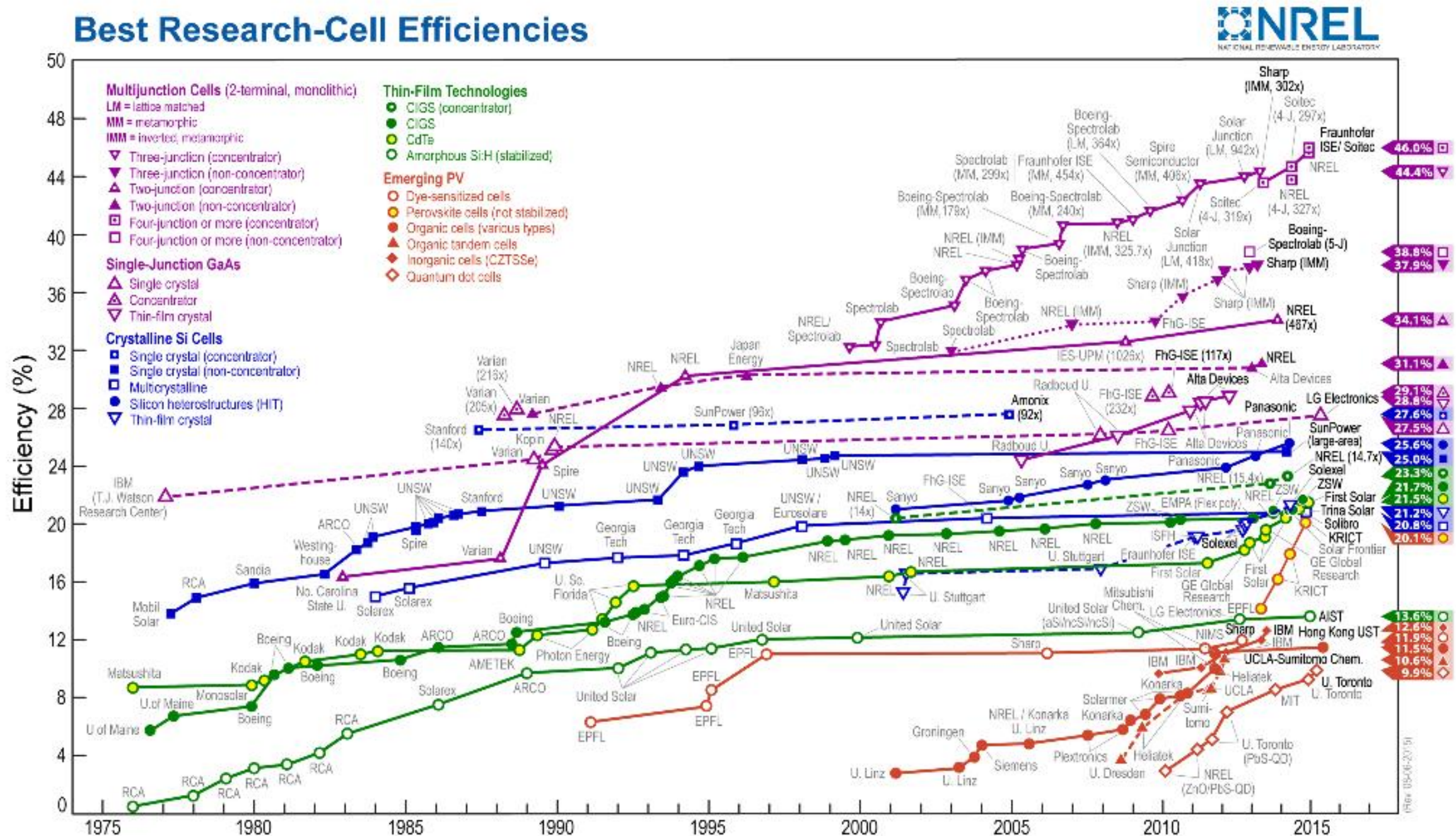
Аморфный водородизированный кремний в технологии гетероструктурных солнечных элементов на кристаллическом кремнии



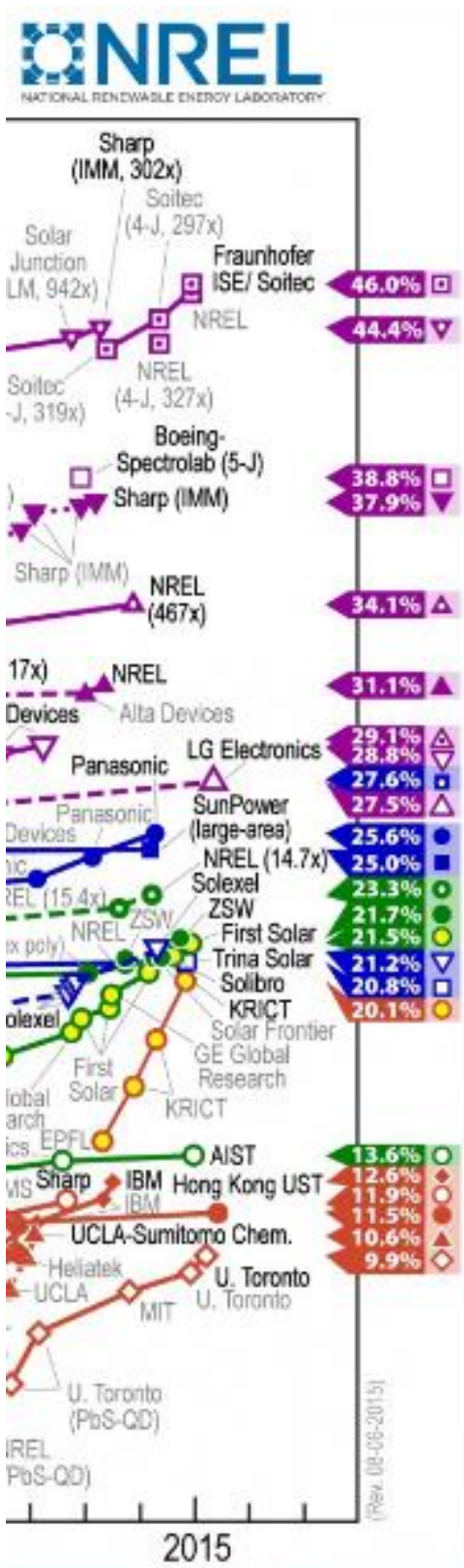
**Заместитель генерального директора
по научной работе ООО «НТЦ ТПТ»,
д.т.н. Теруков Евгений Иванович**

Рекорды эффективности различных технологий

Рекордные эффективности лабораторных солнечных ячеек изготовленных по различным технологиям (согласно данным Национальной лаборатории по возобновляемой энергетике (NREL, США))



Ячейки среднего диапазона эффективности – c-Si



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

Основные особенности:

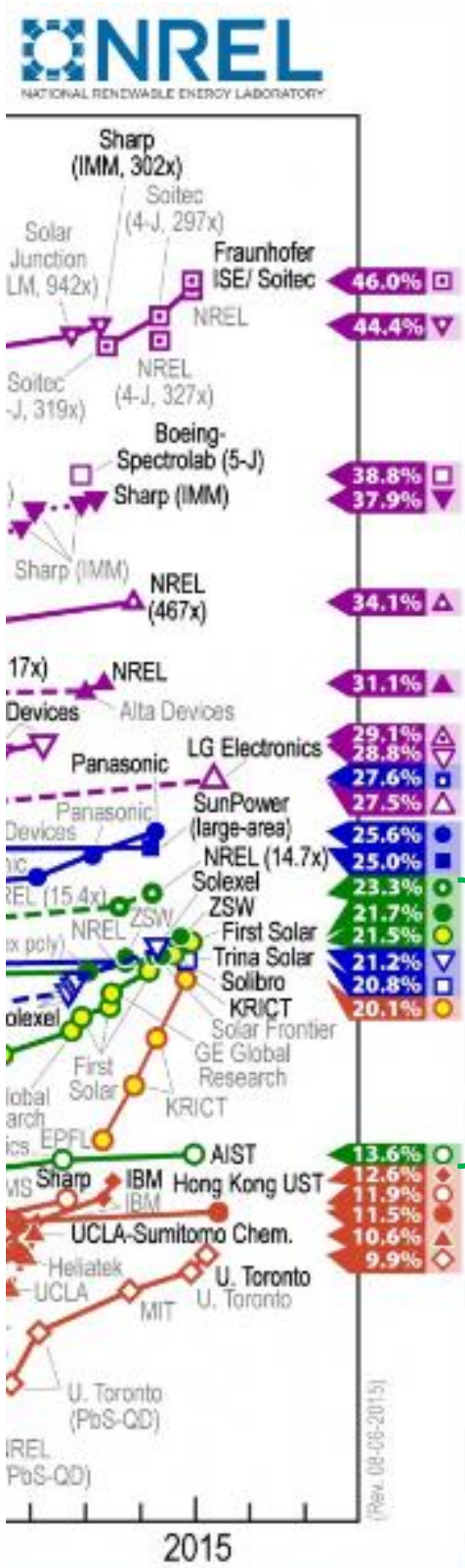
- эффективность от 20.8 до 27.6 % (с применением концентраторов);
- Солнечные ячейки изготавливаются на основе моно и мульти-кристаллического кремния. Применение мульти-кристаллического кремния приводит к меньшей эффективности;
- Без применения концентраторов **максимальную эффективность имеют HIT ячейки (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 HIT:

- Низкий температурный коэффициент HIT 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: HIT технология наиболее перспективна для применения в коммерческих наземных СЭС

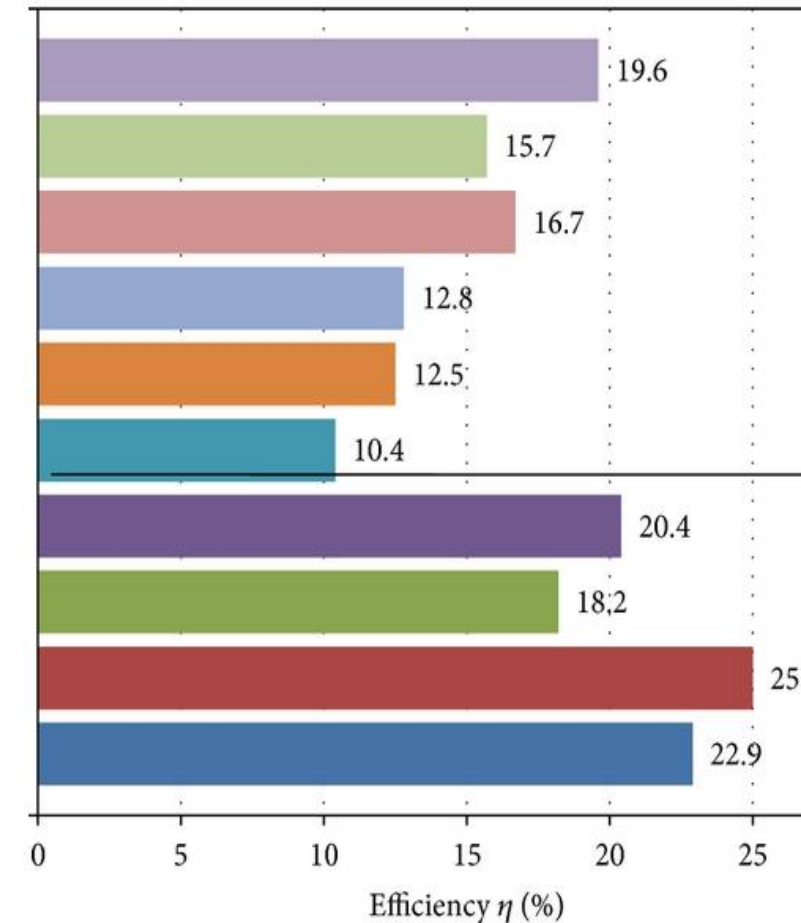
Ячейки среднего диапазона эффективности – thin film



Технологии с минимальным расходом полупроводниковых материалов. Получили развитие в период высоких цен на кремний.

Основные особенности:

- Максимальная эффективность 21.7% (CIGS);
- Тонкопленочные технологии (CdTe, CIGS) используют токсичные и редкие химические элементы;
- Проблемы с равномерностью нанесения приводят к сравнительно большой потере эффективности (20-25 отн.%) при переходе от ячеек к модулям (см. рис. справа);
- Тонкопленочные модули на основе аморфного кремния имеют небольшой КПД (13,6%) и проблемы с деградацией аморфной ячейки.

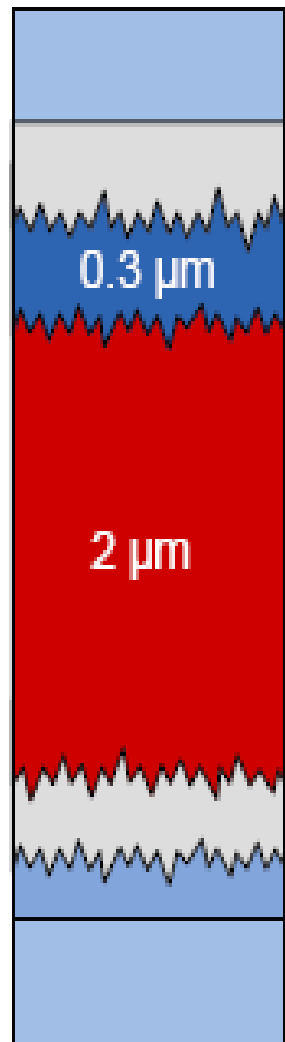
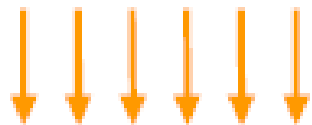


Вывод: тонкопленочные модули уступают по эффективности модулям на основе c-Si.

- CI(G)S 0.4 cm² cell
- CI(G)S 0.97 m² module
- CdTe/CdS 1 cm² cell
- CdTe 0.67 m² module
- a-Si tandem (0.27 cm² cell)
- a-Si tandem (905 cm² module)
- Multi-Si block (1 cm² cell)
- Multi-Si block (1.4709 m² module)
- Mono-Si FZ n-type (4 cm² cell)
- Mono-Si FZ n-type (778 cm² module)

Базовый двухкаскадный микроморфный модуль

Солнечный свет



Лицевое стекло –подложка для нанесения тонких пленок

Лицевой слой ZnO – оптическое окно и лицевой контакт

Переход на a-Si:H – поглощение коротковолновой части спектра

Переход на μ c-Si:H – поглощение длинноволновой части спектра

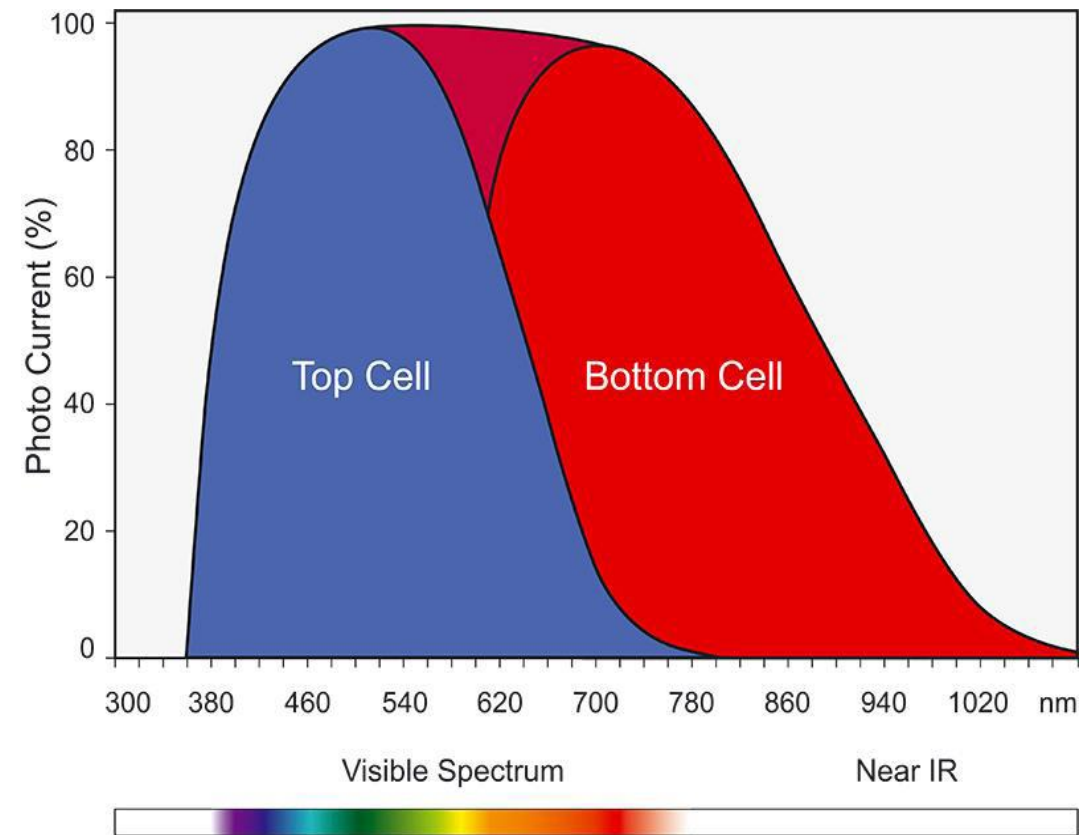
Тыльный слой ZnO – контакт, отражатель, монокристаллическое соединение ячеек

Тыльный отражатель – отражение света с низким поглощением

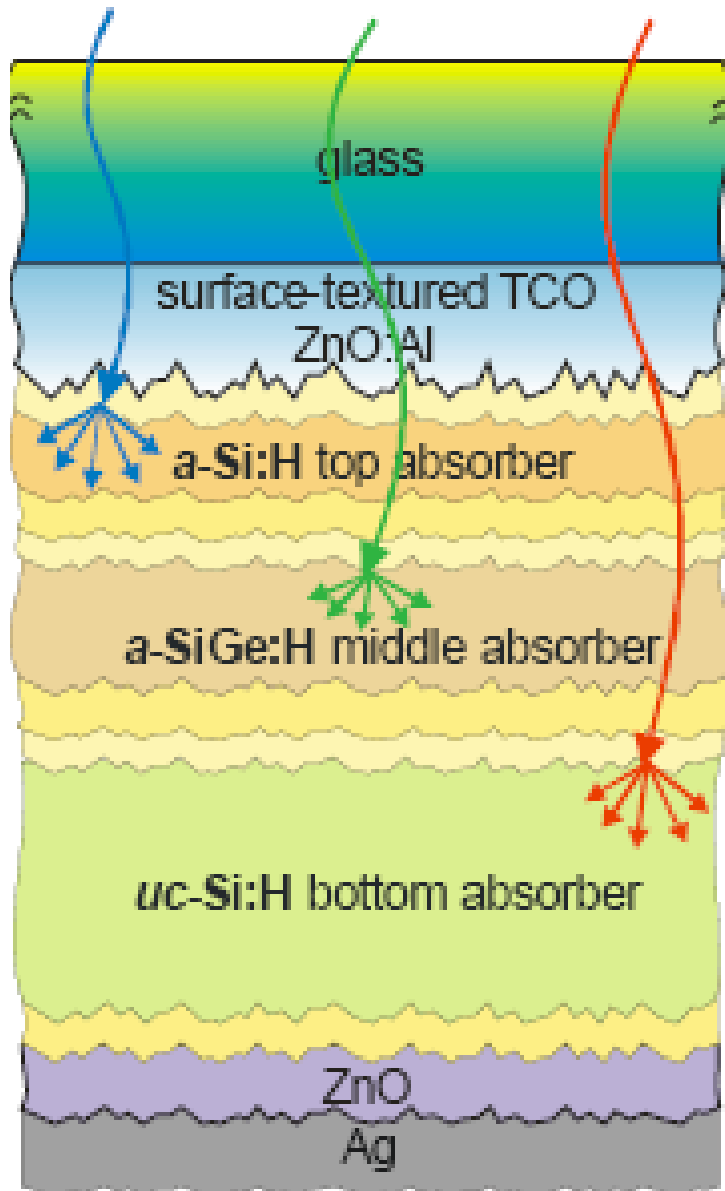
Тыльное стекло – герметизация модуля

Стартовый КПД – 8.9%

КПД, достигнутый в НТЦ - 10%

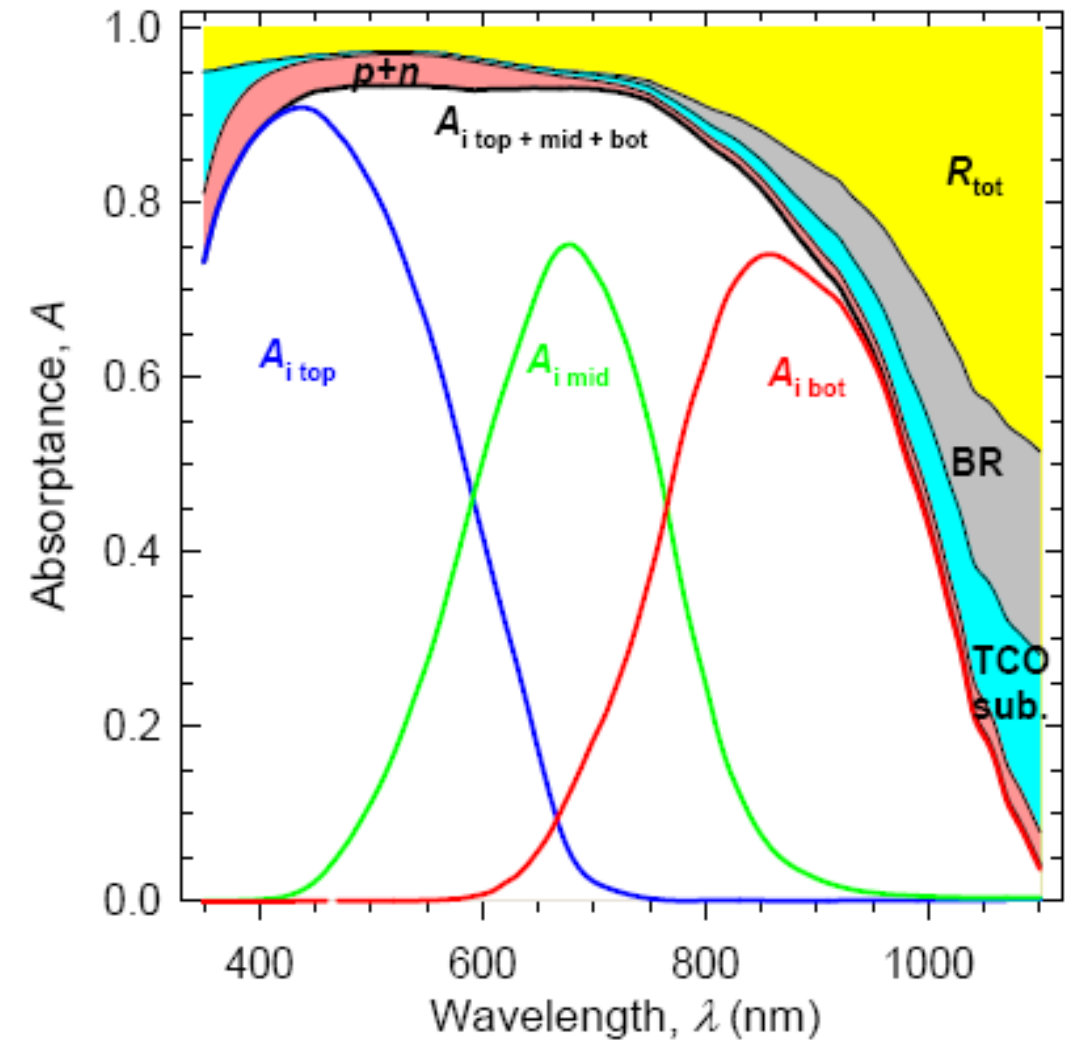


Трехкаскадный СЭ на основе a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H



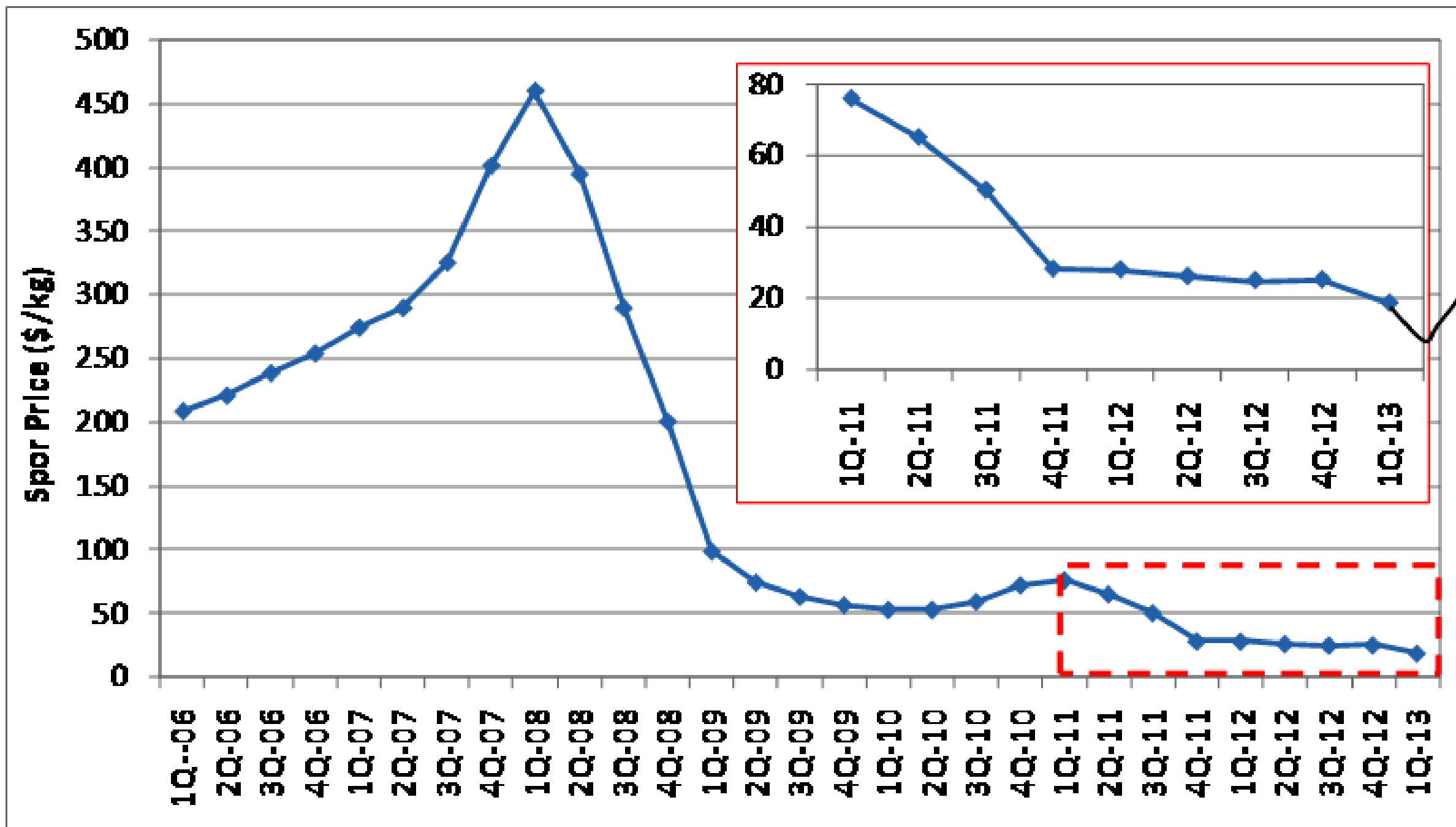
Основные проблемы:

- осаждение высококачественного a-SiGe:H, устойчивого к фотоиндуцированной деградации
- TCO с низким поглощением в ИК области

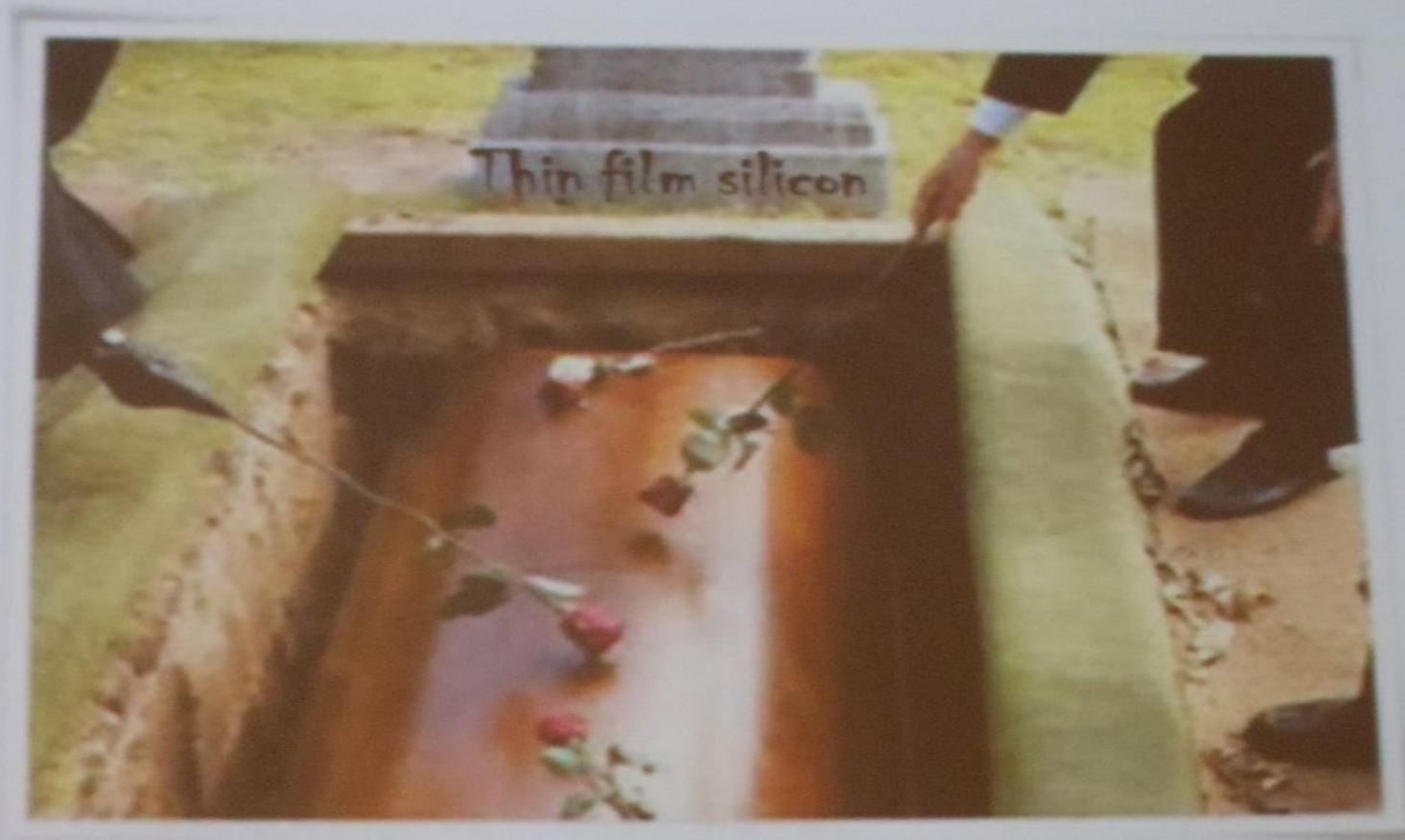


Теоретическая эффективность около 17 %

Снижение цены на поликремний с 2006 по 2013 г.

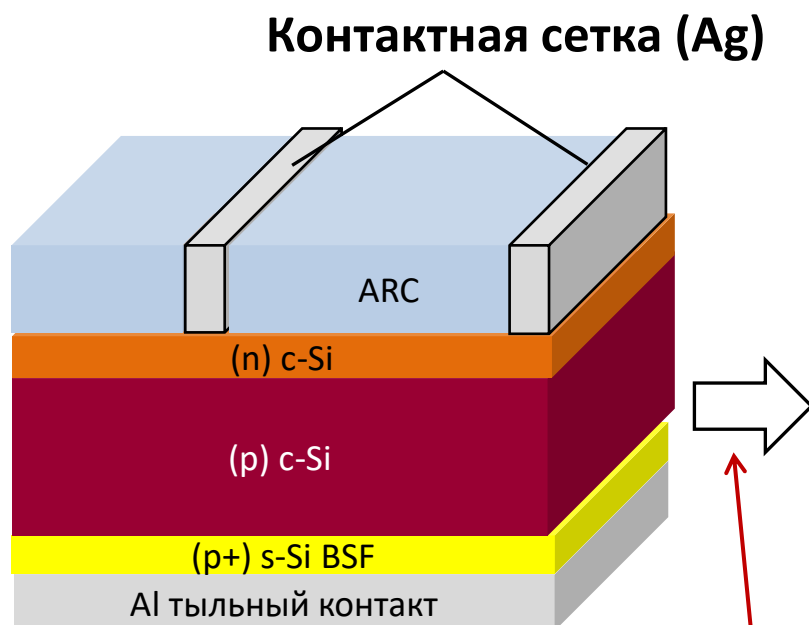


A keynote speech on thin film silicon...?



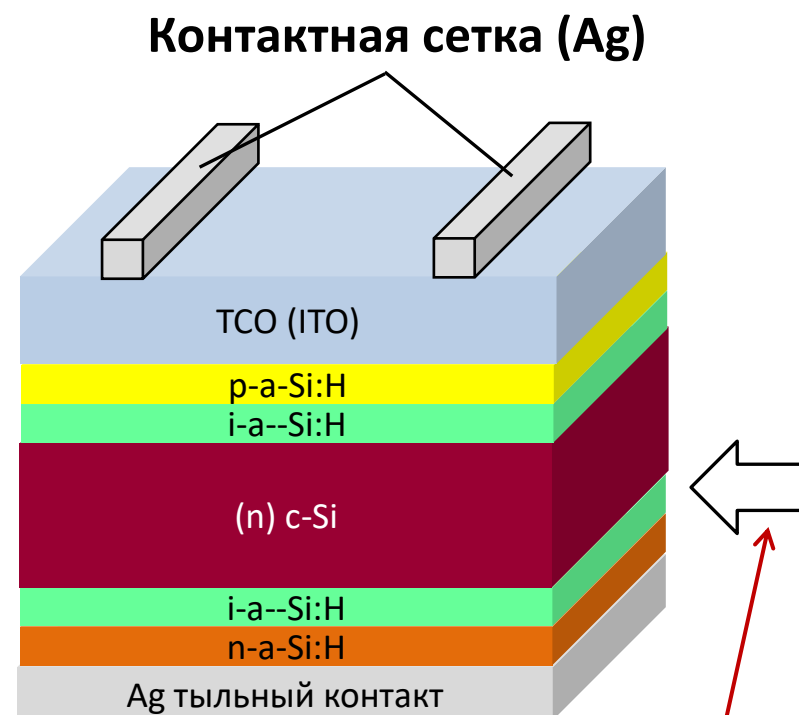


Классическая конструкция
на основе c-Si
КПД 17-19 %

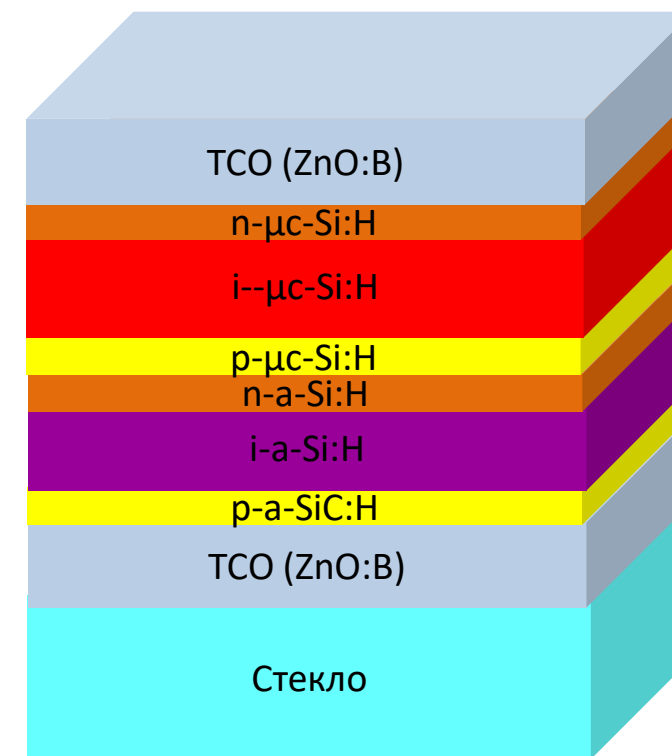


На основе гетероперехода
a-Si:H/c-Si (HIT)

КПД 18-20 %

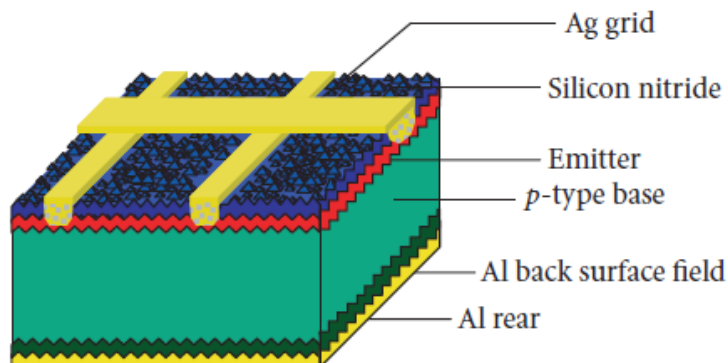


Тонкопленочные
на основе a-Si:H/ μ c-Si:H
КПД 9-11 %

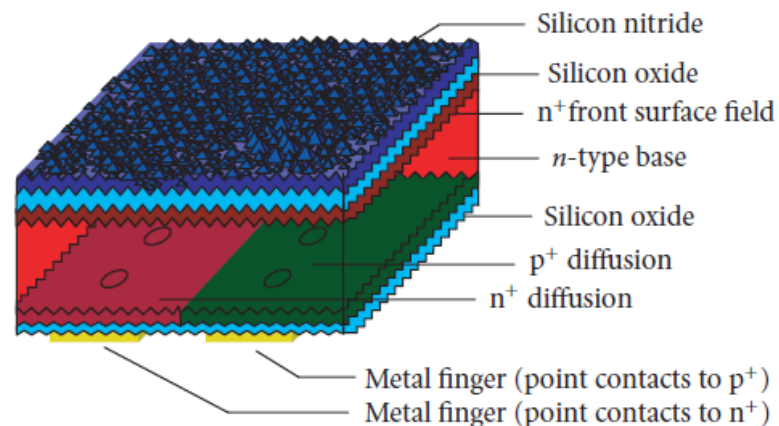


**HIT: c-Si подложки + тонкопленочная технология →
высокая эффективность + низкий температурный коэффициент**

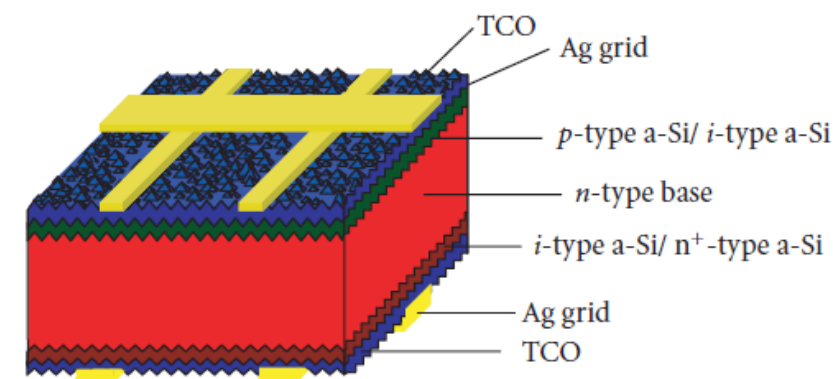
Классическая c-Si ячейка



Односторонняя (IBC) c-Si ячейка



a-Si/c-Si (HIT) ячейка



10 технологических шагов

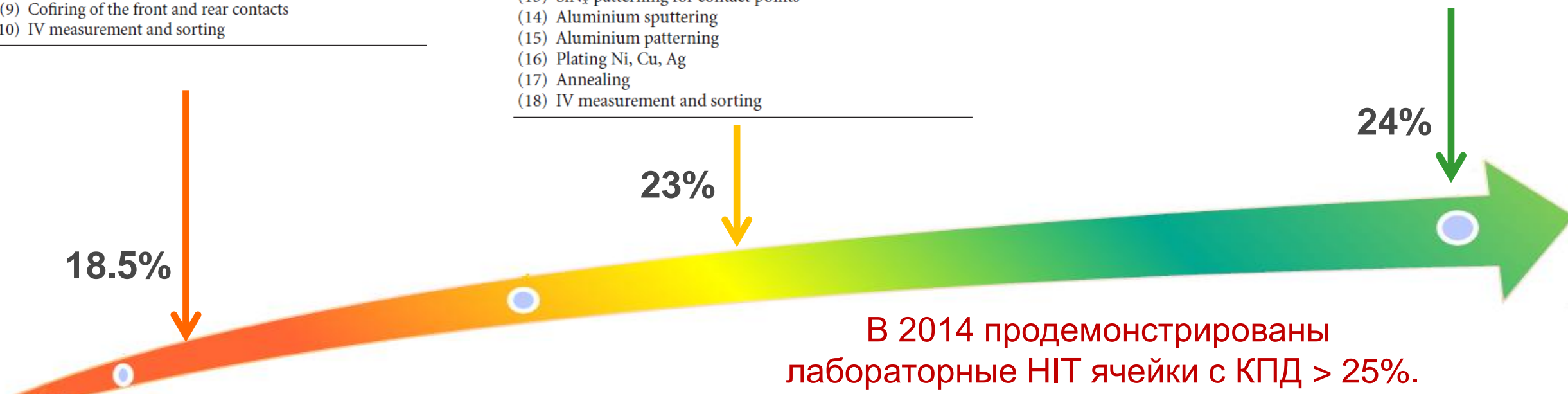
- (1) Saw damage removal, texture, and cleaning of *p*-type silicon wafer
- (2) Phosphorus diffusion
- (3) Plasma edge isolation (alternatively, this process is often replaced by a single-side etching step integrated into the wet bench for phosphorus glass removal or by laser edge isolation placed after the firing step)
- (4) Phosphorus glass removal (and single-side etching for edge isolation)
- (5) Silicon nitride deposition
- (6) Ag screen printing of the front contact and drying
- (7) Al/Ag screen printing of the rear busbars and drying
- (8) Al screen printing of the rear and drying
- (9) Cofiring of the front and rear contacts
- (10) IV measurement and sorting

18 технологических шагов

- (1) Saw damage removal and cleaning of *n*-type silicon wafer
- (2) Boron diffusion
- (3) Boron glass removal
- (4) Rear-side SiN_x
- (5) Front-side boron etching
- (6) Oxidation
- (7) Pattern of rear side for phosphorus diffusion
- (8) Rear-side phosphorus diffusion
- (9) Front-side oxide etching and texture
- (10) Front-side phosphorus diffusion
- (11) Diffusion glass removal
- (12) Silicon nitride deposition on front and rear sides
- (13) SiN_x patterning for contact points
- (14) Aluminium sputtering
- (15) Aluminium patterning
- (16) Plating Ni, Cu, Ag
- (17) Annealing
- (18) IV measurement and sorting

10 технологических шагов

- (1) Saw damage removal, texture and cleaning of *n*-type silicon wafer
- (2) Deposition of *i*-type and of *p*-type a-Si:H to the front side
- (3) Deposition of *i*-type and *n*-type a-Si:H to the rear side
- (4) Deposition of TCO to the front side
- (5) Deposition of TCO to the rear side
- (6) Silver silk screen contact print to the front side
- (7) Silver silk screen contact print to the rear side
- (8) Contact sintering
- (9) Contact solder coating
- (10) IV measurement and sorting



Технология НІТ: преимущества

Ключевыми преимуществами технологиями является: высокий КПД, низкая себестоимость, экономия материалов, стабильность параметров.

Основные характеристики	Тонкопленочные модули на основе a-Si/ μ c-Si (tandem)	Модули на основе c-Si	Модули на основе гетероперехода a-Si/ c-Si (НІТ)
Эффективность модуля, %	9 - 11	17 - 19	19 - 20
Температурный коэффициент мощности, %/К	(0,3)	(0,40) – (0,45)	(0,3)
Световая деградация	Есть	Отсутствует	Отсутствует
Суммарная производительность линии Хевел, МВт/год	86	невозможно	от 90 до 200
Продукция завода	модули	модули, ФЭП	модули, ФЭП
Доля на рынке, %	~2-3%	>75%	~1-2% (Panasonic)
Себестоимость модуля, EUR/Вт*	0,60-0,80	0,37 - 0,44	0,48 - 0,52

*EUR/USD = 1,35

Market data is based on current estimates (Bloomberg New Energy Finance, 2014), NPD SolarBuzz(2013 and 2014), GTM Research (2013).

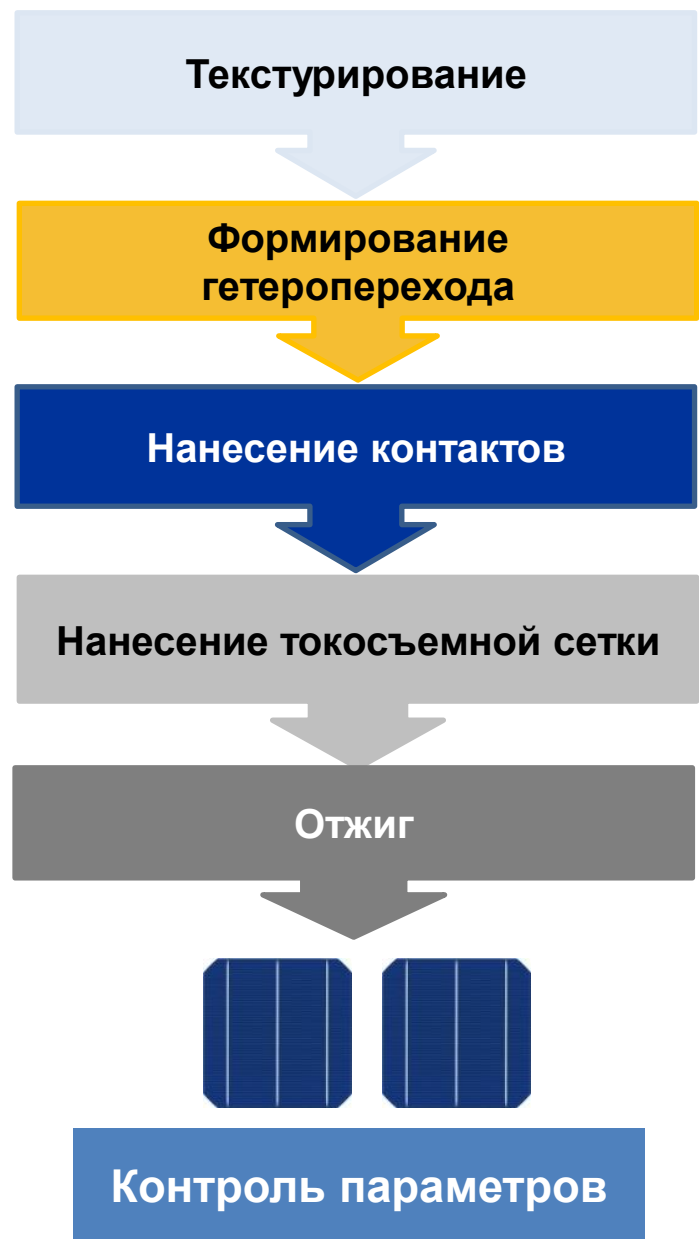
Описание технологии НТ

Итак, основа технологии НТ это формирование солнечных элементов (СЭ) на основе гетероперехода «аморфный (a-Si:H) - кристаллический кремний (c-Si)»

Структура элемента НТ

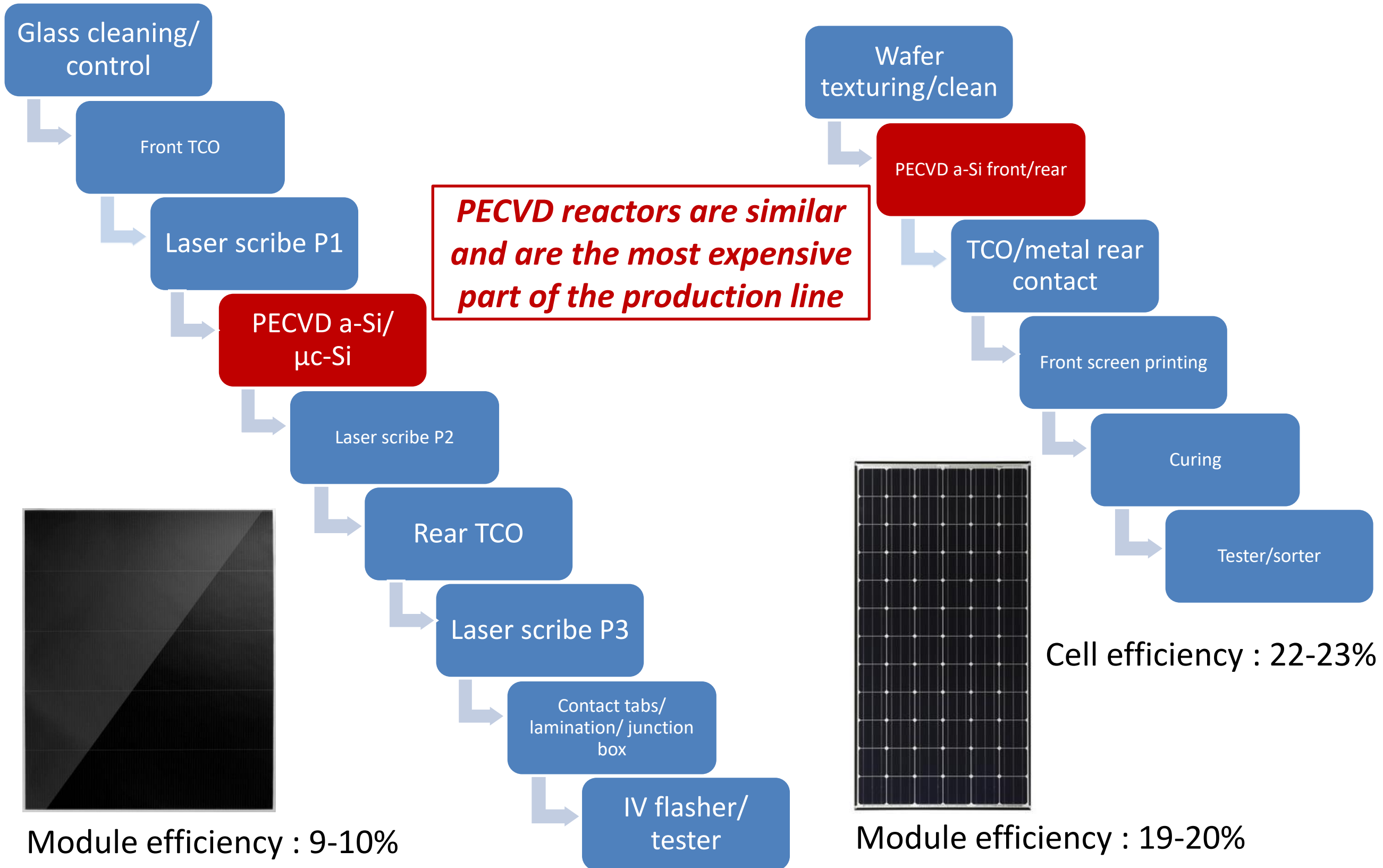


Этапы формирования элемента НТ



Мировой рекорд 2014 г. среди солнечных ячеек на основе кремния – 25,6 %

From *micromorph* to *heterojunction* technology



Экспериментальный технологический комплекс



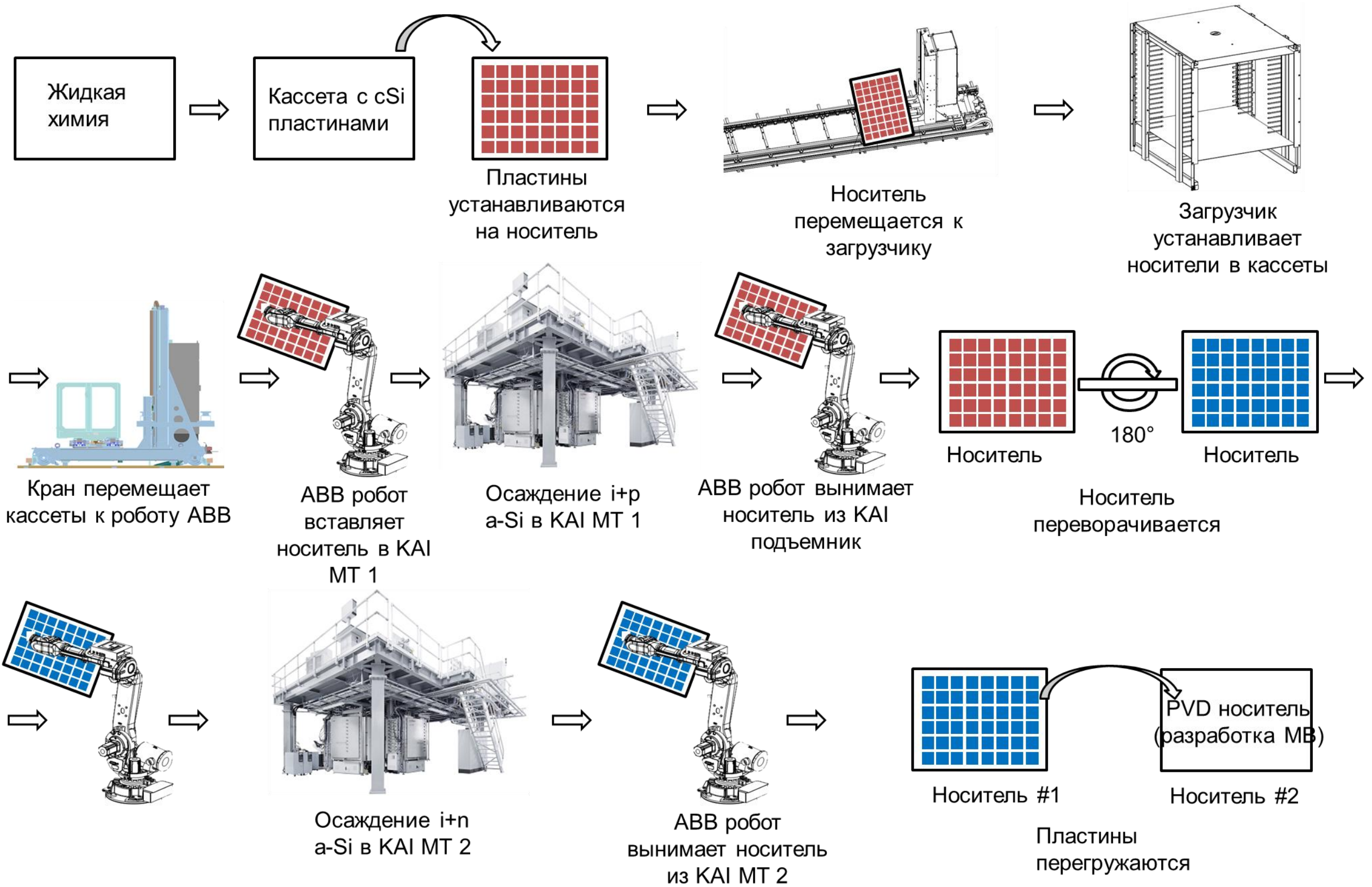
Пилотная линия НТЦ ТПТ



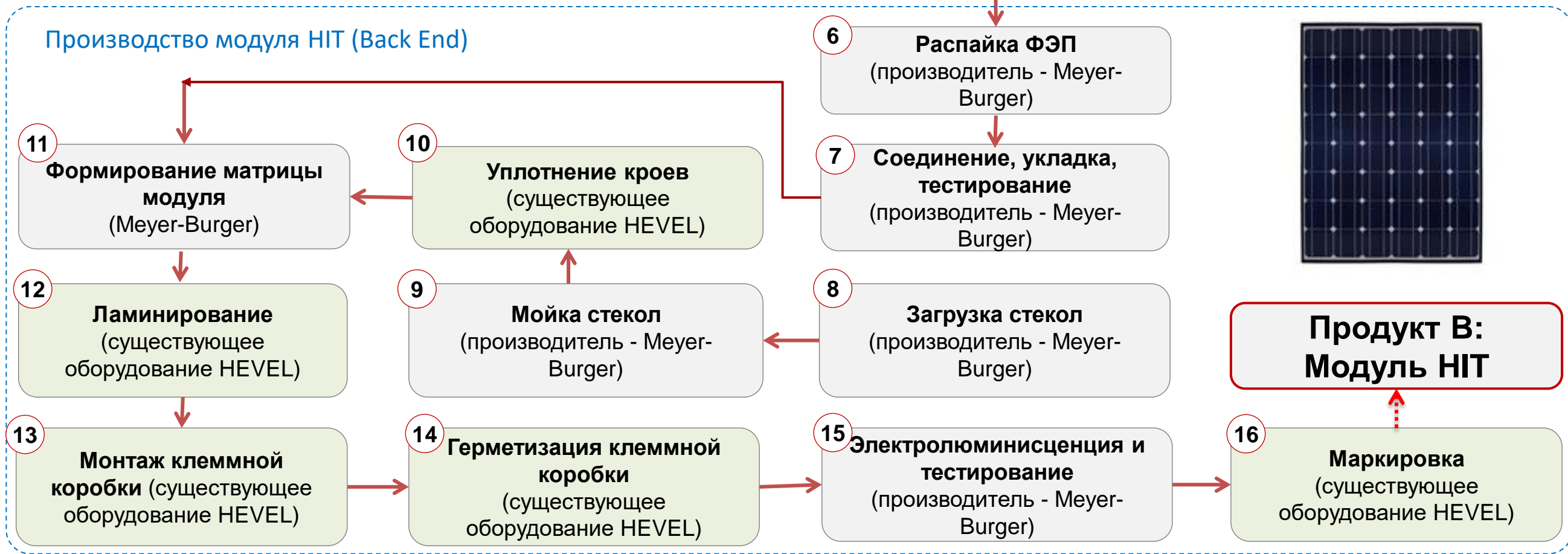
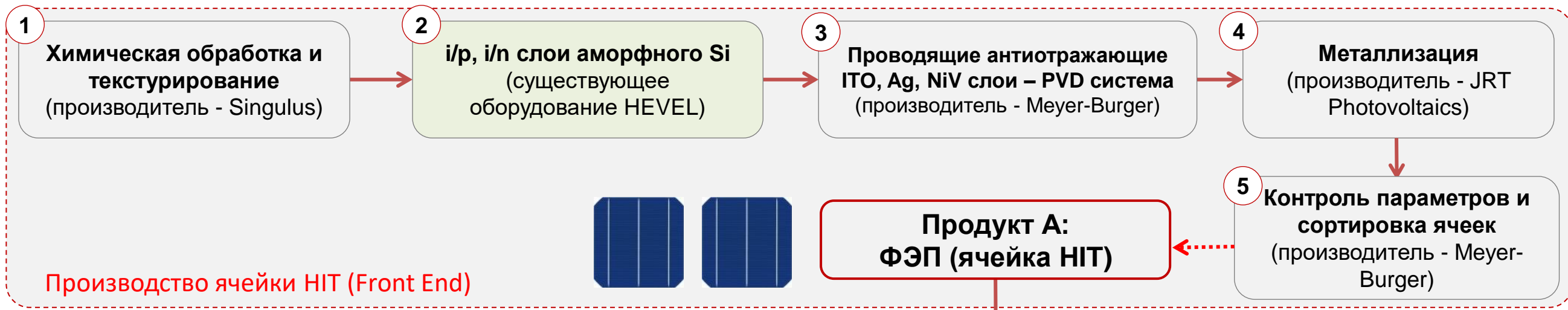
ООО «Хевел», г.Новочебоксарск



Автоматизация процесса изготовления НІТ с использованием установок КАІ



ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НТТ на существующем производстве ООО «Хевел»



- существующее оборудование



- дополнительно приобретаемое оборудование

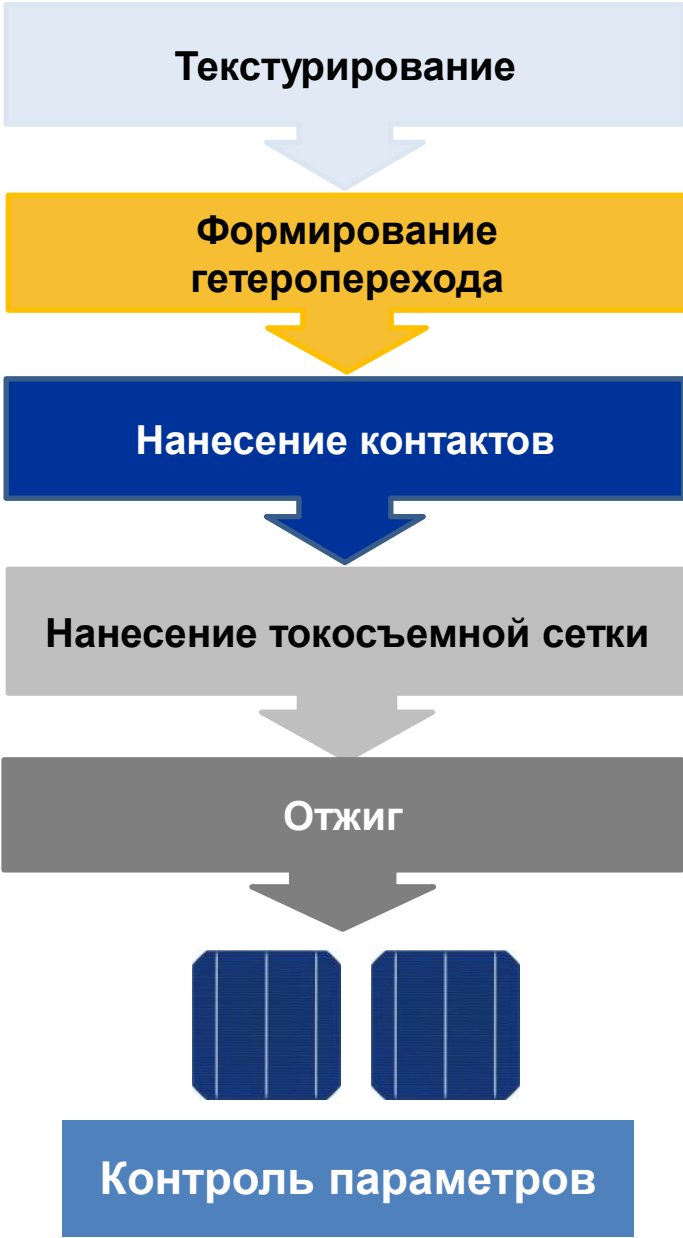
Описание технологии НТ

Итак, основа технологии НТ это формирование солнечных элементов (СЭ) на основе гетероперехода «аморфный (a-Si:H) - кристаллический кремний (c-Si)»

Структура элемента НТ



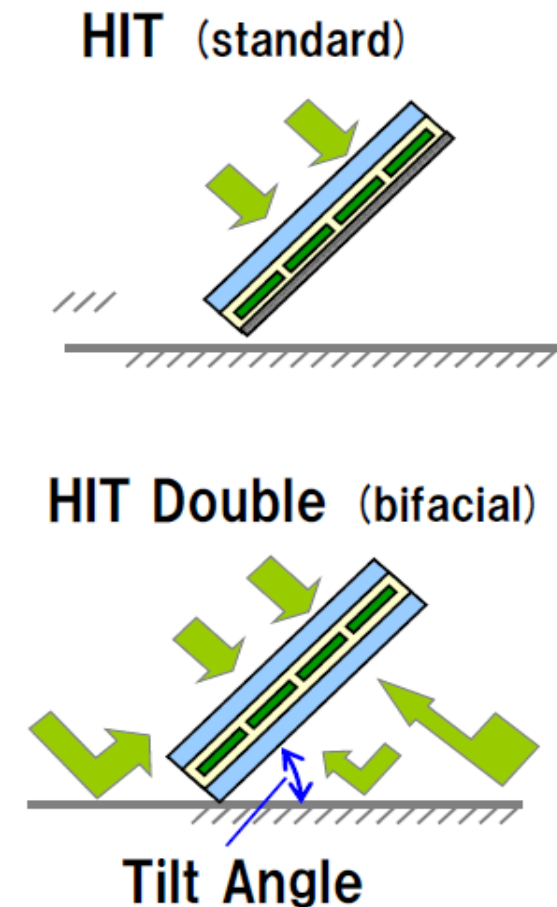
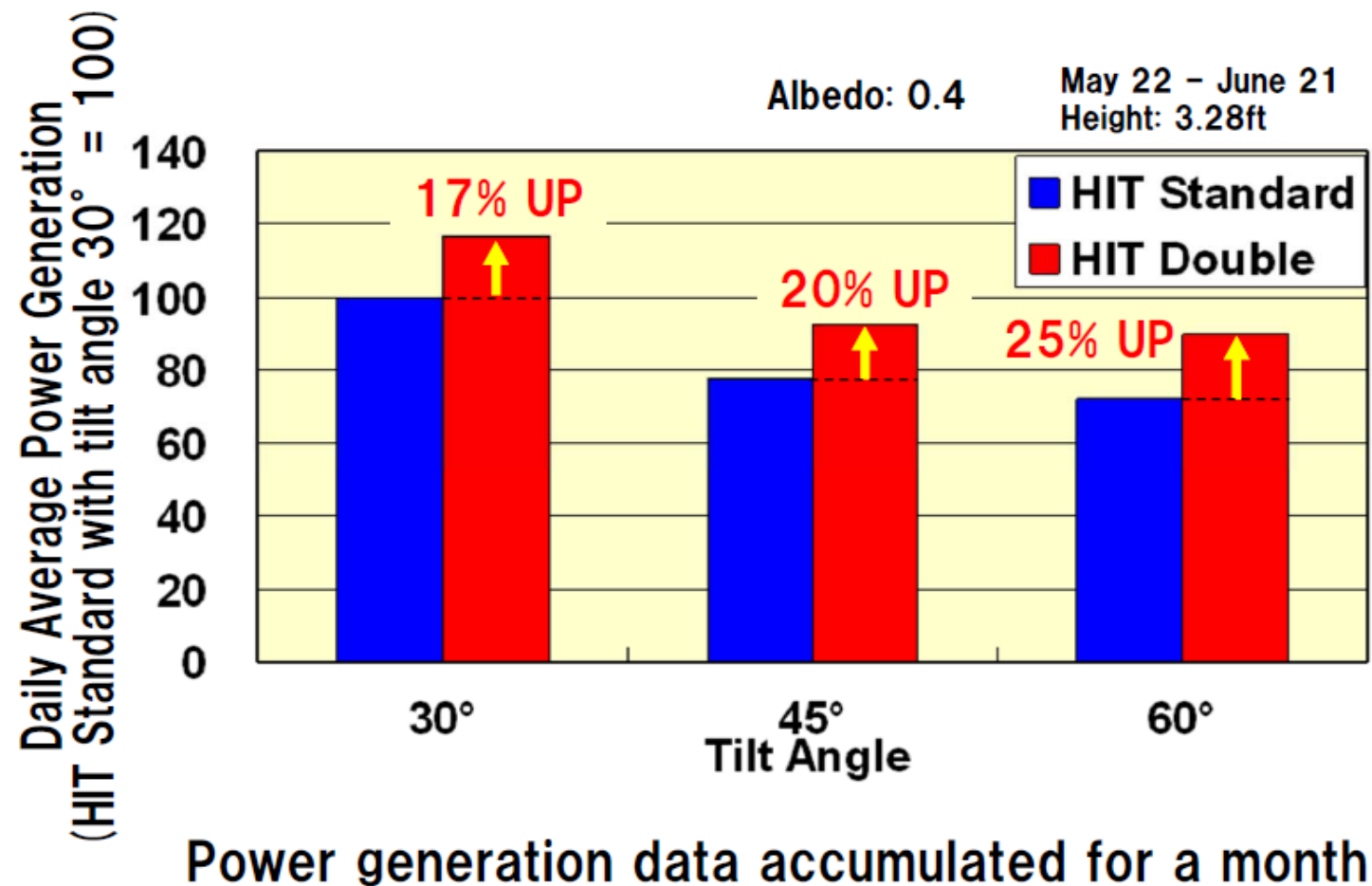
Этапы формирования элемента НТ



Мировой рекорд 2014 г. среди солнечных ячеек на основе кремния – 25,6 %

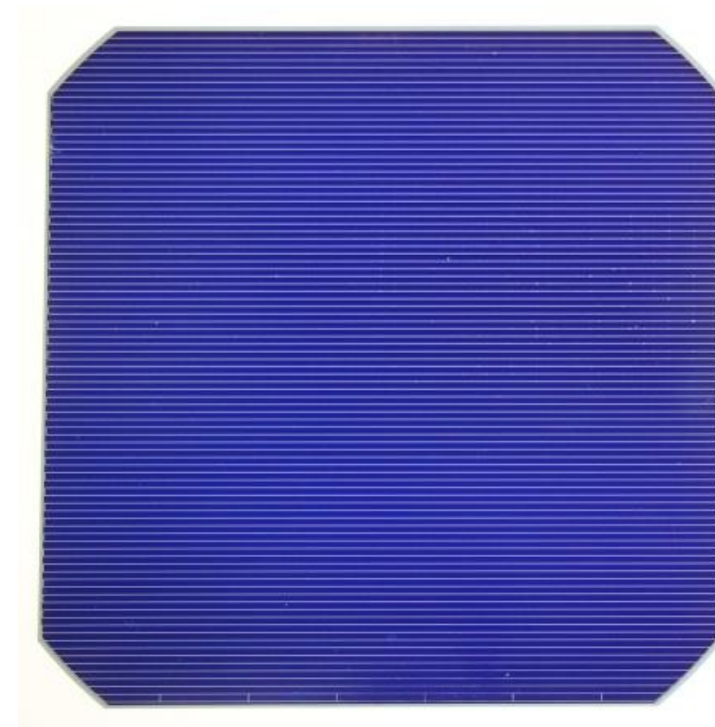
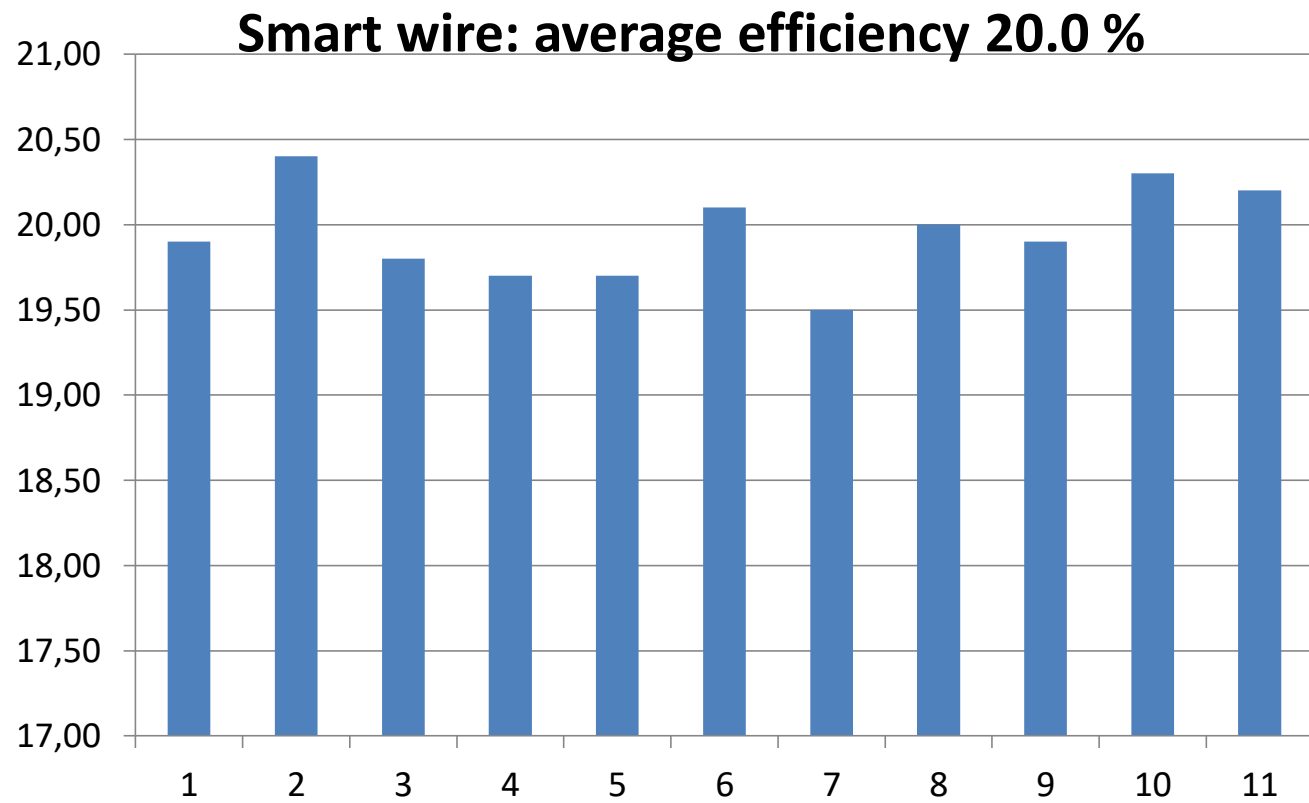
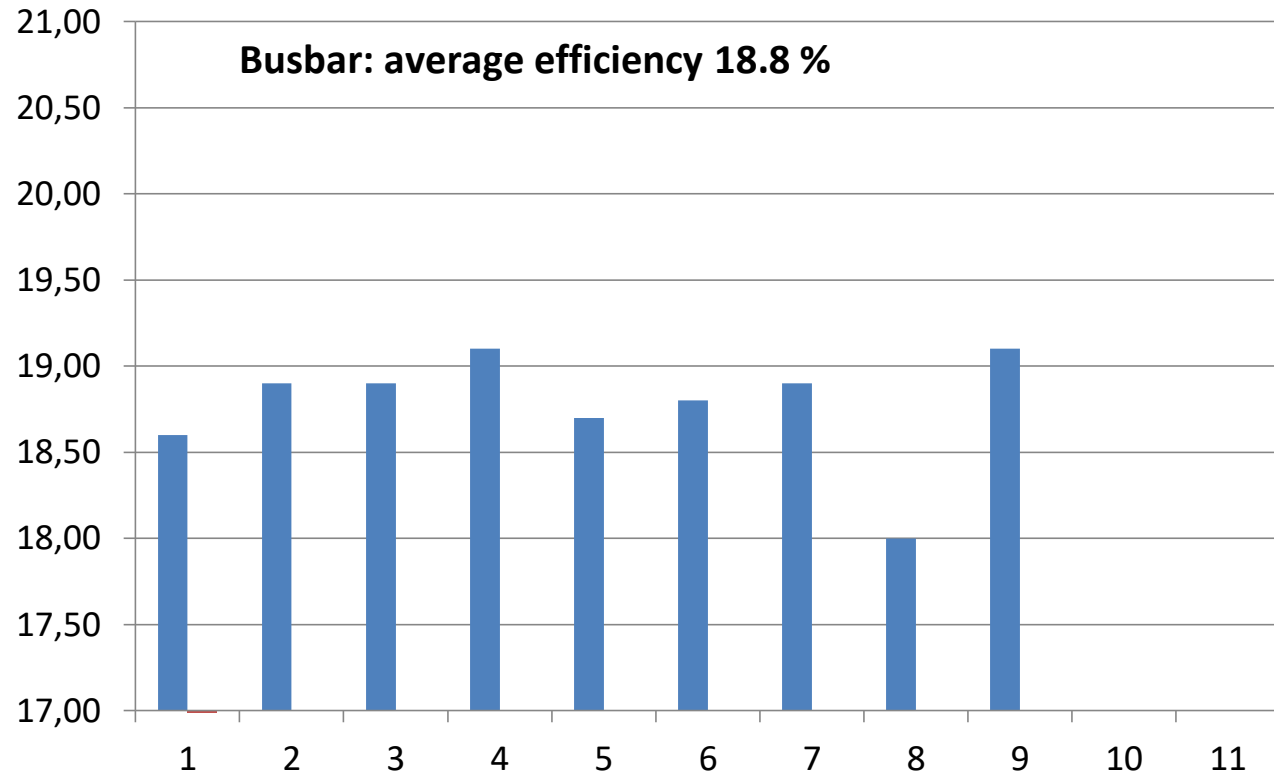
HIT monofacial vs. bifacial: performance

HIT Double generates 17% to 25% more power depending on the tilt angle.



Both **Panasonic & Meyer Burger** work on **HIT bifacial technology**

Параметры ячеек: busbar и smartwire



ТФЭС Хевел, Новочебоксарск



Установлены три группы модулей:

- Avelar мультикристаллический 3шт.
- Модули HJT стекло-пленка 3 шт.
- Модули HJT стекло-стекло 3 шт.

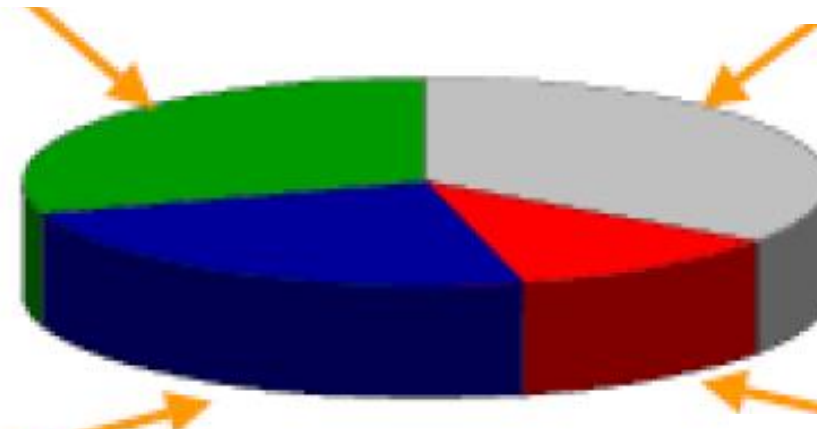
Спасибо за внимание



Возможность снижения стоимости

**Изготовление кремниевого кристалла
30%**

**Сборка модуля
35%**



24%

Изготовление кремниевой пластины

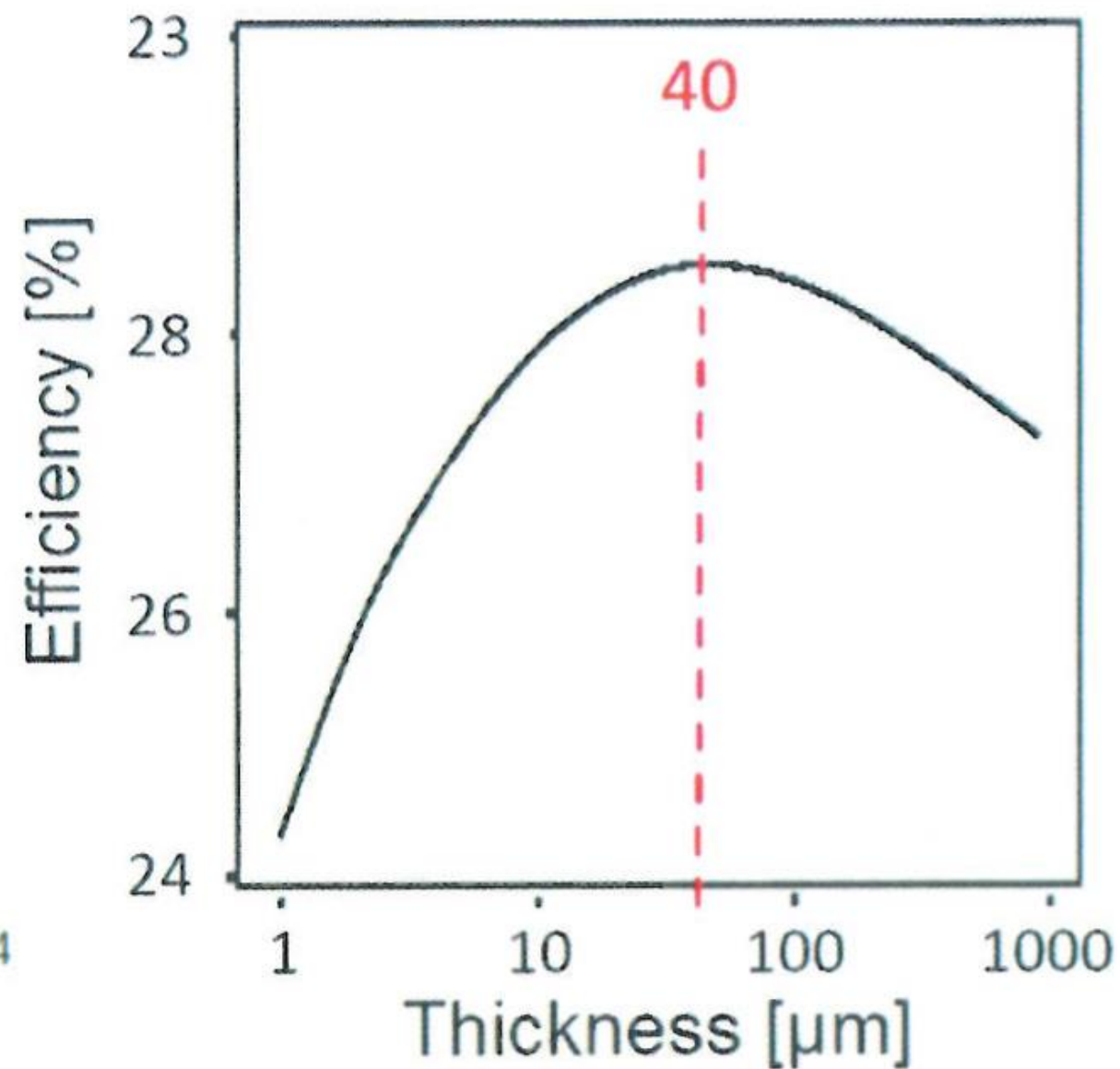
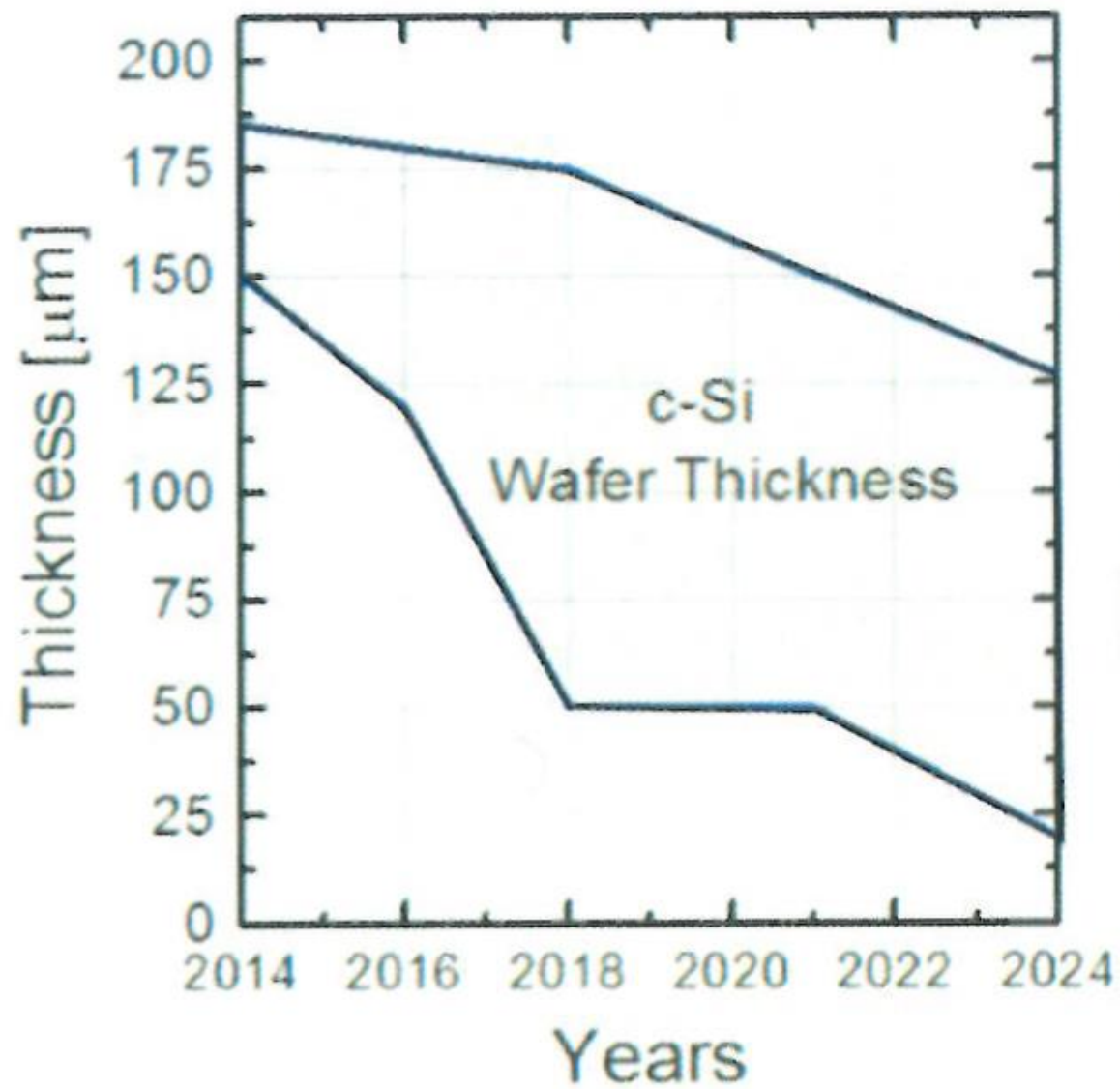
11%

Изготовление ячейки

Ограничение возможности снижения цены связаны со стоимостью кристаллического кремния и пластин.

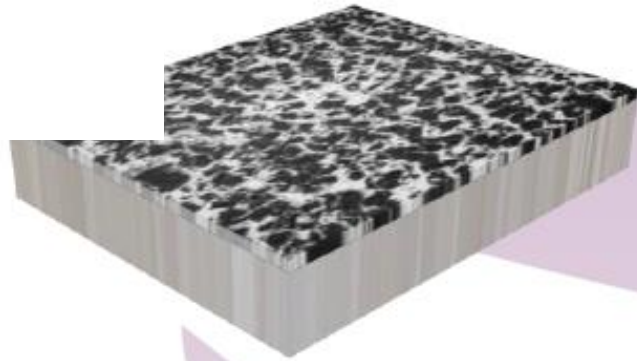
Незначительное снижение цены возможно за счет усовершенствования технологии.

Кремниевая подложка



От стекла к кремнию на стекле

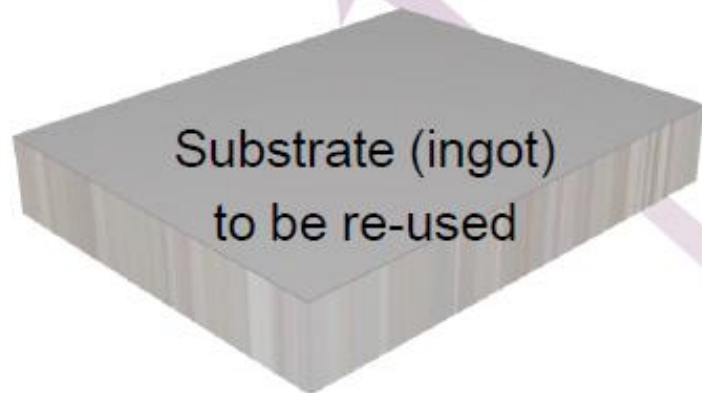
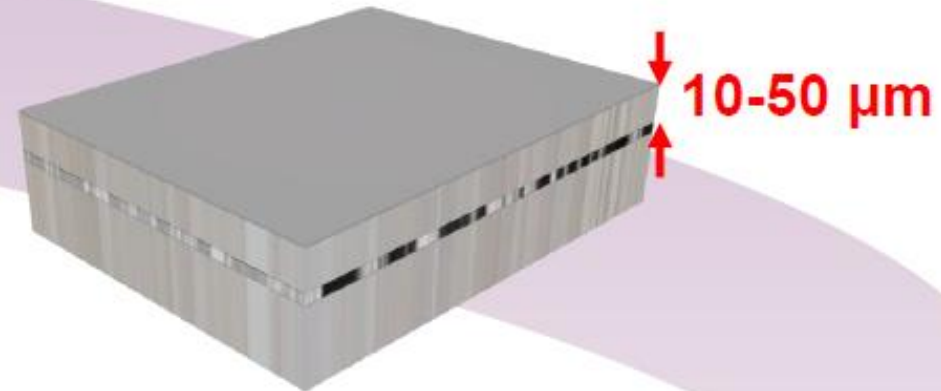
Формирование пористого кремния



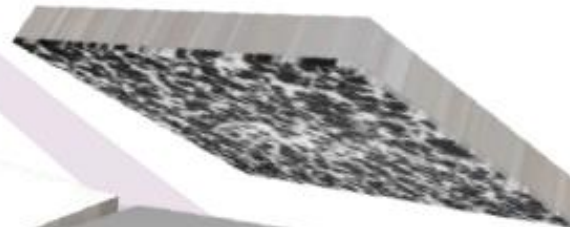
Отжиг в атмосфере водорода



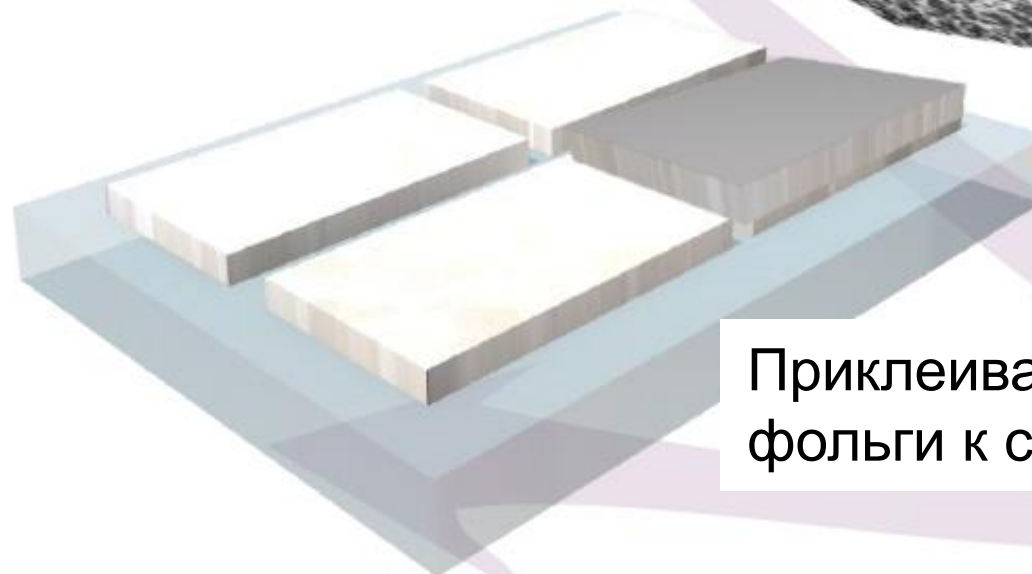
Эпитаксия методом термохимического осаждения



Формирование фронтальной поверхности



Кремний может быть использован повторно



Отсоединение

Приклеивание тонкой фольги к стеклу



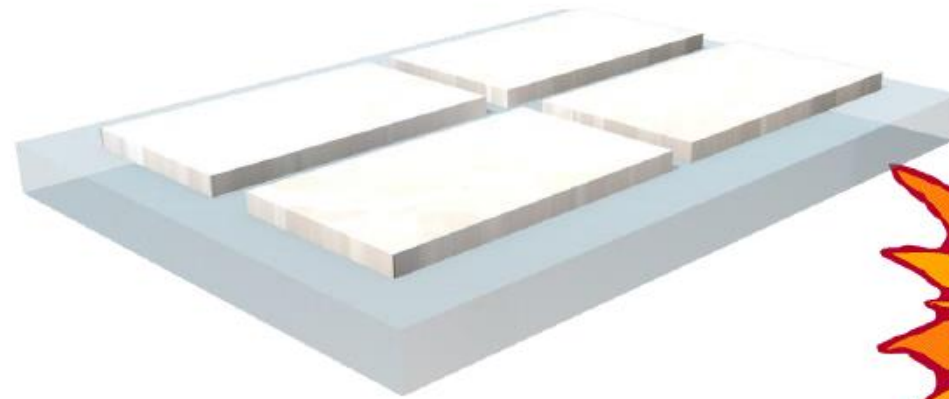
Подход ИМЕК*: использование стеклянной подложки



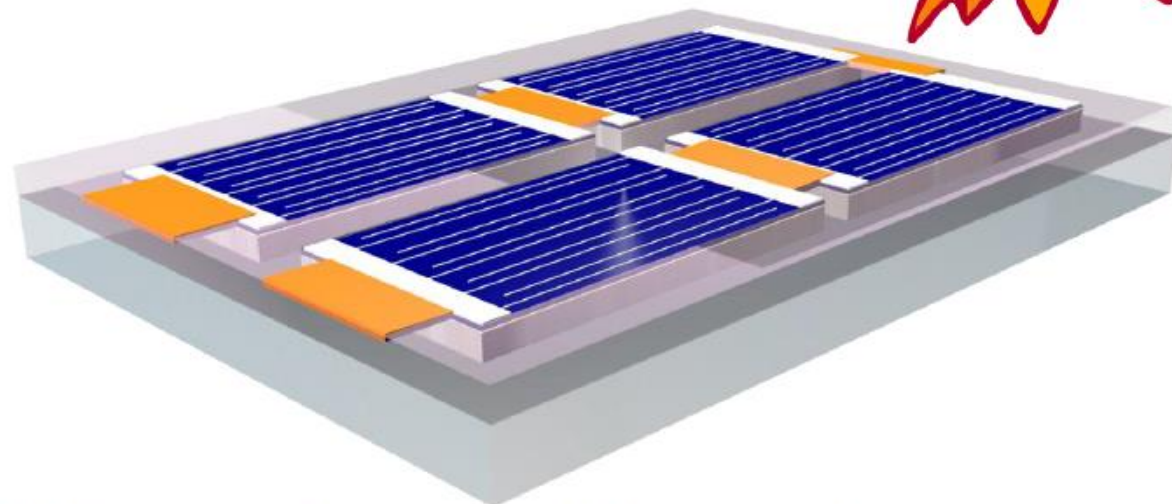
- ▶ Исходный материал - стекло



- ▶ На стекле размещают пластины кристаллического кремния

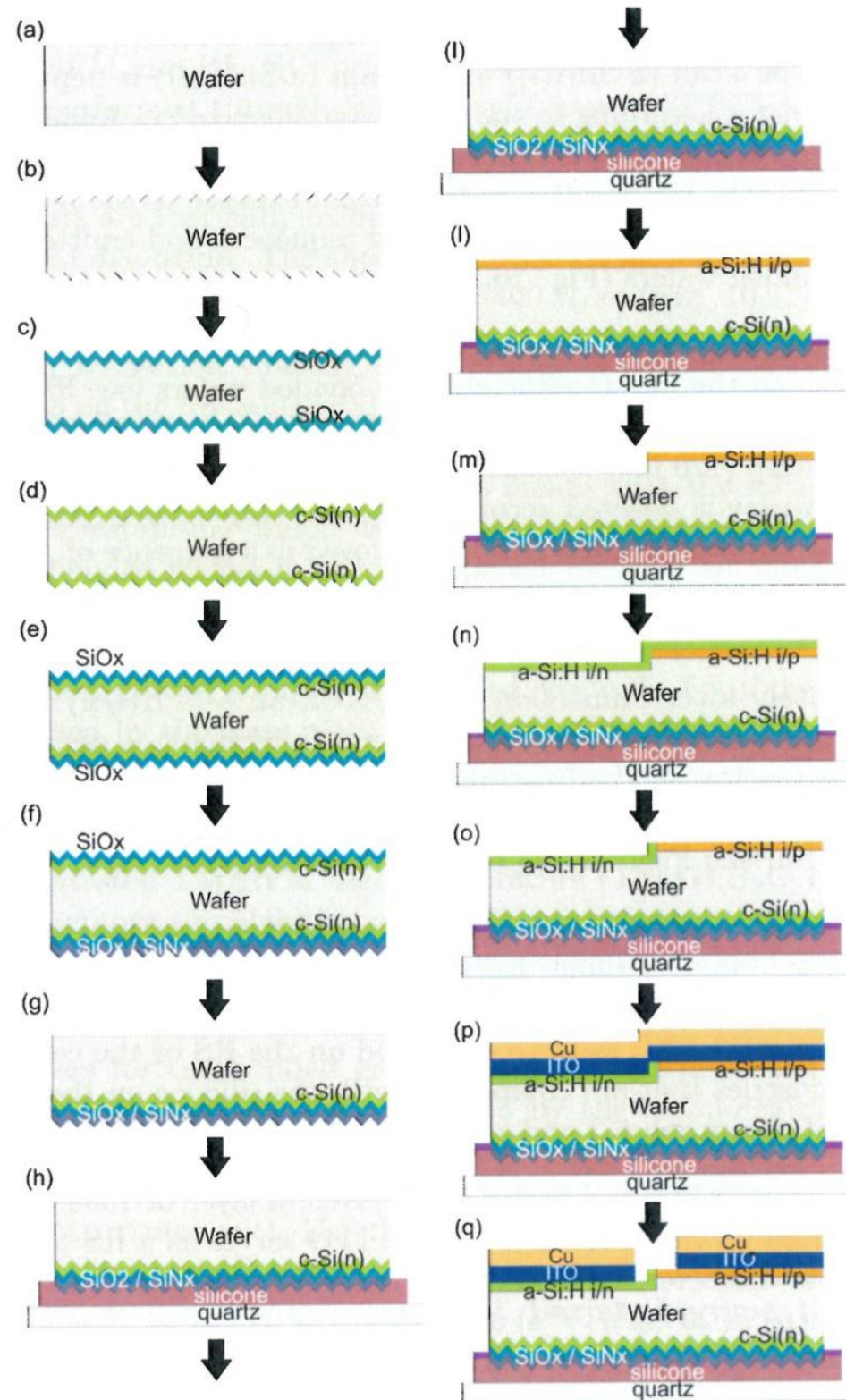


- ▶ Сборка полномасштабного модуля



* ИМЕК - IMEC (Interuniversity Microelectronics Centre) микро- и наноэлектронный научный центр в Лёвене, Бельгия

Этапы изготовления СЭ на стекле



Спасибо за внимание

