

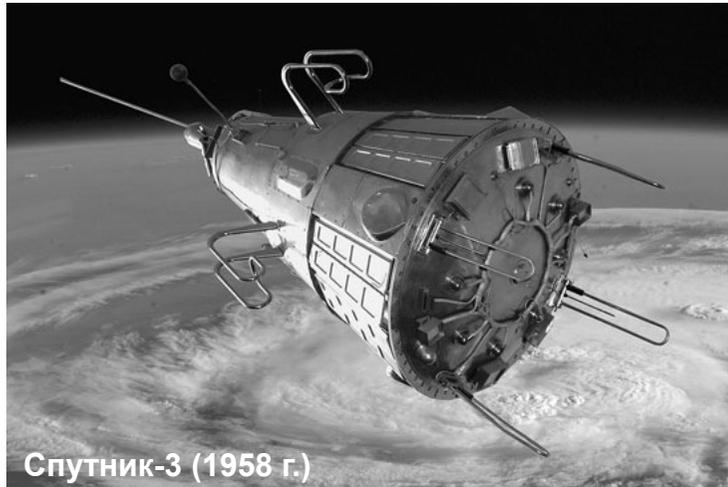
# Каскадные солнечные батареи

В.М.Андреев

## Содержание доклада

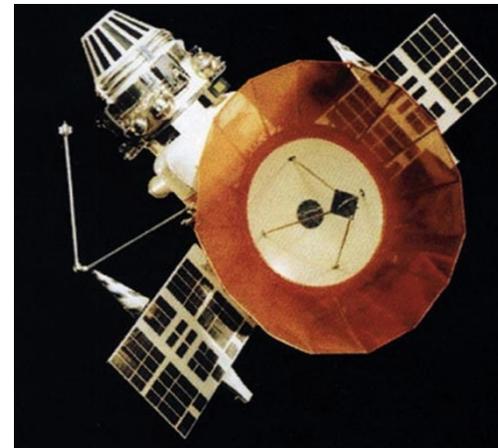
- Начальный период гетероструктурной солнечной фотоэнергетики
- Состояние солнечной фотоэнергетики в мире
- Высокоэффективные каскадные преобразователи солнечной энергии
- Космические каскадные фотопреобразователи и концентраторные модули
- Наземные концентраторные модули на основе каскадных фотопреобразователей
- Концентраторные фотоэнергосистемы со слежением за Солнцем

# Космические солнечные батареи: Вклад ФТИ им.А.Ф.Иоффе в исследования и разработки космических батарей

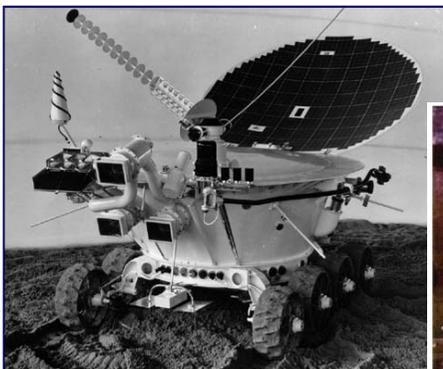


Спутник-3 (1958 г.)

Первые кремниевые солнечные элементы



Венера-4 (1967 г.):  
Первая батарея на  
основе GaAs  
солнечных элементов



Луноход-1 (1970 г.)

Луноход-2 (1973 г.):  
Солнечные батареи на  
GaAs площадью 3,5м<sup>2</sup>.



Космическая  
станция  
«Мир»

AlGaAs/GaAs  
батарея

## История солнечной фотоэнергетики: КПД от 1% до 40%



В 1930-х годах А.Ф.Иоффе высказал мысль о возможности использования полупроводниковых фотоэлементов в солнечной энергетике. В 1938 году его ученики Ю.П.Маслаковец и Б.Т.Коломиец изготовили первый серно-таллиевый фотоэлемент, **КПД которого составлял 1%. В то время это был мировой рекорд!**

В 1954 году американской фирмой Bell-telephone был создан фотоэлемент с р-п-переходом на основе кремния. **КПД составил 6%.**

В СССР работы кремниевым элементам были развернуты в начале 1955 года в Физико-техническом институте. Производство было организовано во ВНИИТ (г. Москва). Первая космическая батарея на кремниевых солнечных элементах установлена на КА «Спутник-3». **КПД разработанных элементов составил 8%.**



В 1969 году в ФТИ им. А.Ф.Иоффе под руководством Ж.И.Алферова впервые в мире были созданы солнечные элементы на основе гетероструктур в системе AlGaAs/GaAs. За несколько лет был **достигнут КПД = 19% при AM0 более 25% при концентрированном наземном солнечном облучении.**

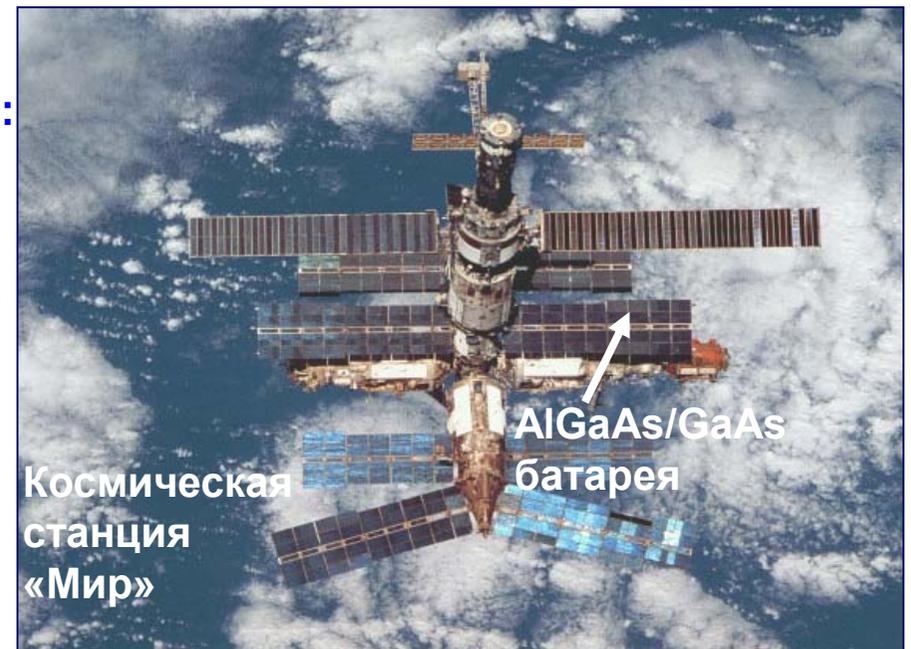
В настоящее время в гетероструктурных каскадных элементах достигнуты значения **КПД 32-35%** при облучении, соответствующем околоземному космическому пространству (AM0), **и более 40%** при 1000-кратном концентрировании «наземного» (AM1.5) солнечного излучения.

## Гетероструктурные фотопреобразователи для космических солнечных батарей

- 1969 – создание под руководством Ж.И.Алеферова впервые в мире AlGaAs/GaAs гетероструктурных космических фотоэлектрических преобразователей (ФЭП)
- С 1971 – внедрение технологии в НПО «Квант» в производстве AlGaAs/GaAs космических солнечных батарей
- С 1990 – разработка радиационно-стойких ФЭП с Брэгговским зеркалом
- С 1997 – разработка концентраторных модулей для космических батарей
- С 1999 – разработка технологии каскадных ФЭП с КПД > 30% при прямом и концентрированном «космическом» солнечном излучении
- С 2001 – внедрение технологии в ОАО «Сатурн» (г. Краснодар) в производстве каскадных AlGaInP/GaAs/Ge космических солнечных батарей

### Преимущества космических солнечных батарей на основе каскадных гетероструктур:

- КПД более 30% в условиях околоземного космоса
- Срок службы более 20 лет на геосинхронной орбите
- Двукратное увеличение удельного энергосъема и срока эксплуатации, уменьшение веса и размеров солнечных батарей



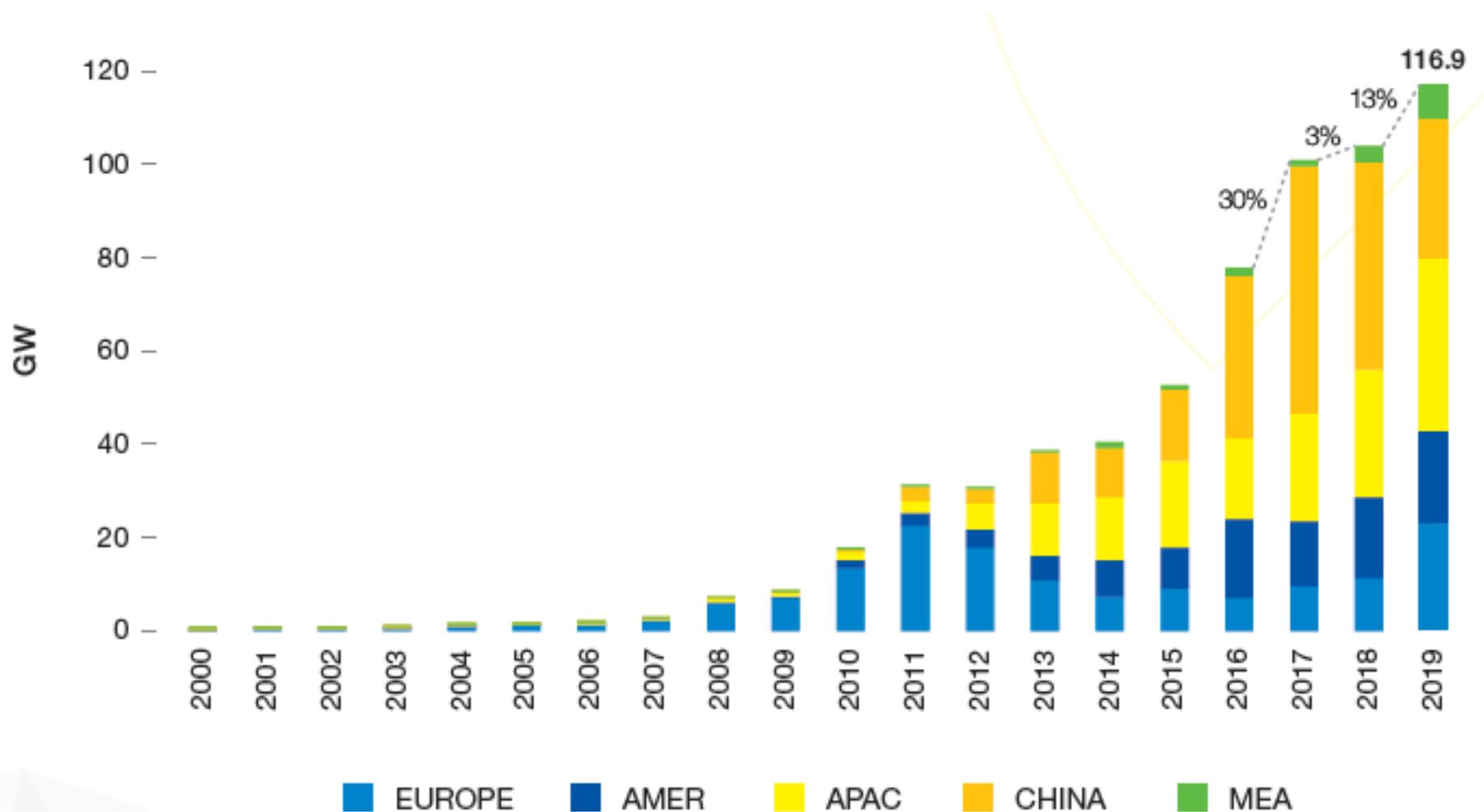
## Первые наземные солнечные установки на основе гетероструктур

**1969 – первые AlGaAs/GaAs гетероструктурные наземные солнечные элементы, созданные под руководством Ж.И.Алферова**  
**С 1976 - AlGaAs/GaAs наземные солнечные элементы с КПД > 25% при 1000 «солнцах» и первые концентраторные солнечные энергоустановки**



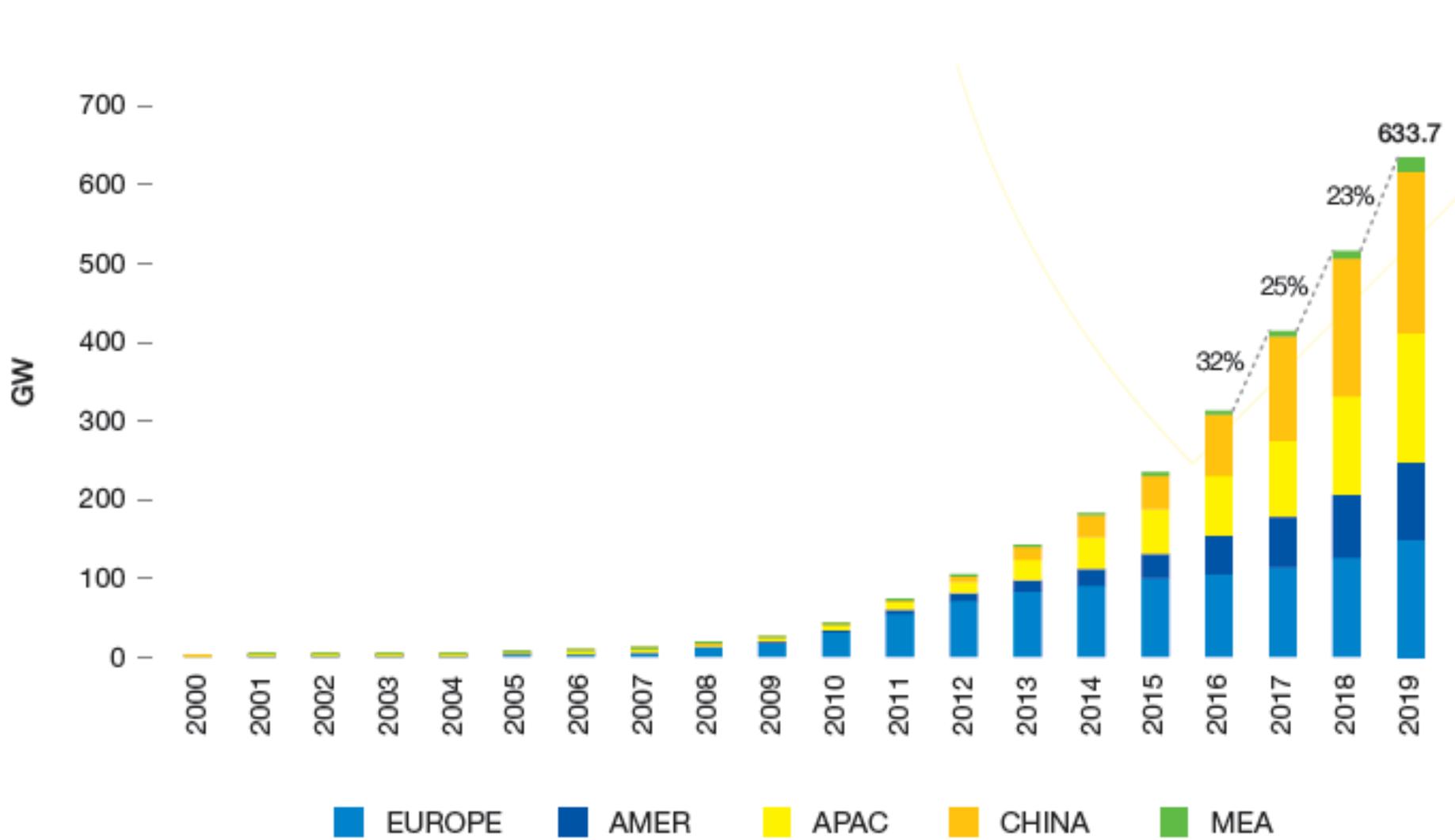
*Солнечная установка на основе AlGaAs/GaAs фотоэлементов с зеркальными концентраторами излучения. Справа - Ж.И.Алферов, в центре – В.Д.Румянцев, слева – В.М.Тучкевич*

## Эволюция мирового ежегодного производства солнечных фотоэнергосистем (ГВт/год)



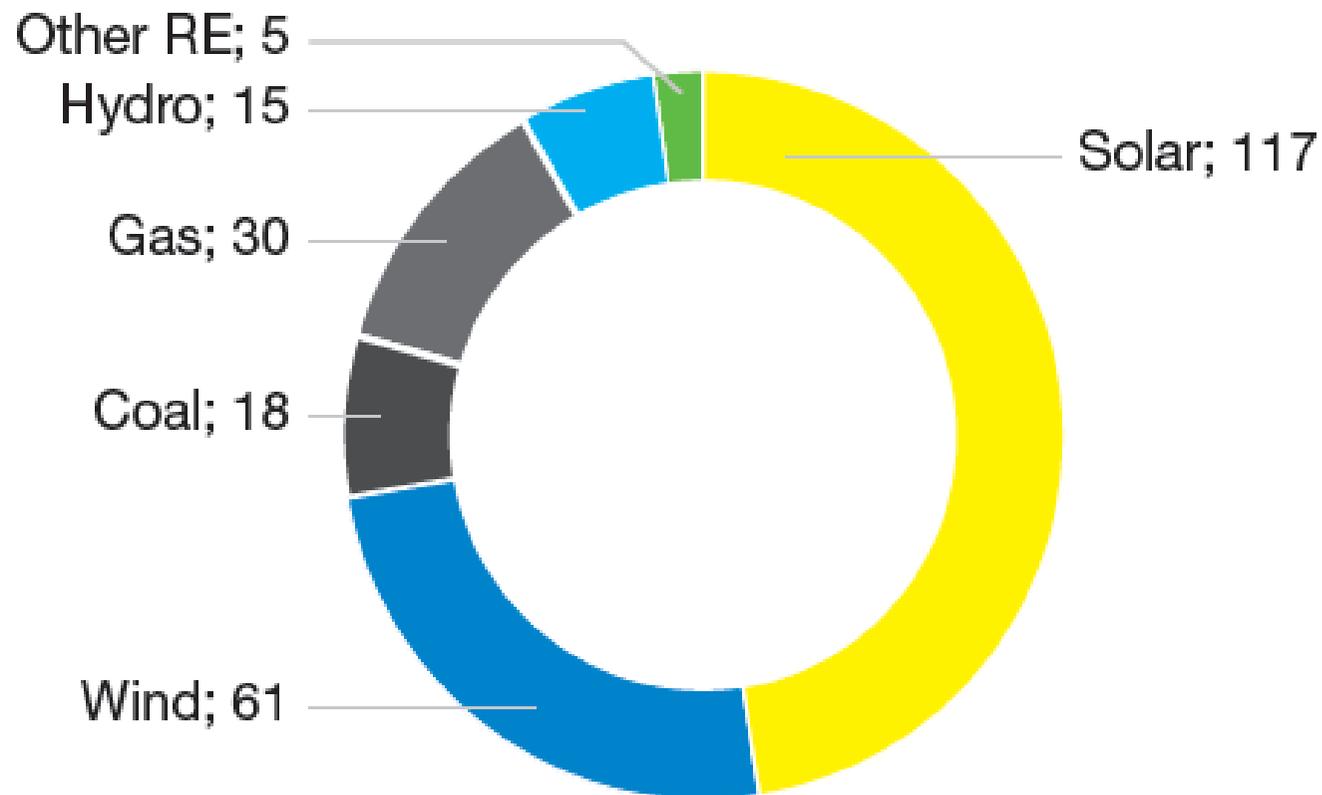
(source: Solar Power Europe 2020)

# Суммарная мощность установленных в мире солнечных батарей



(source: Solar Power Europe 2020)

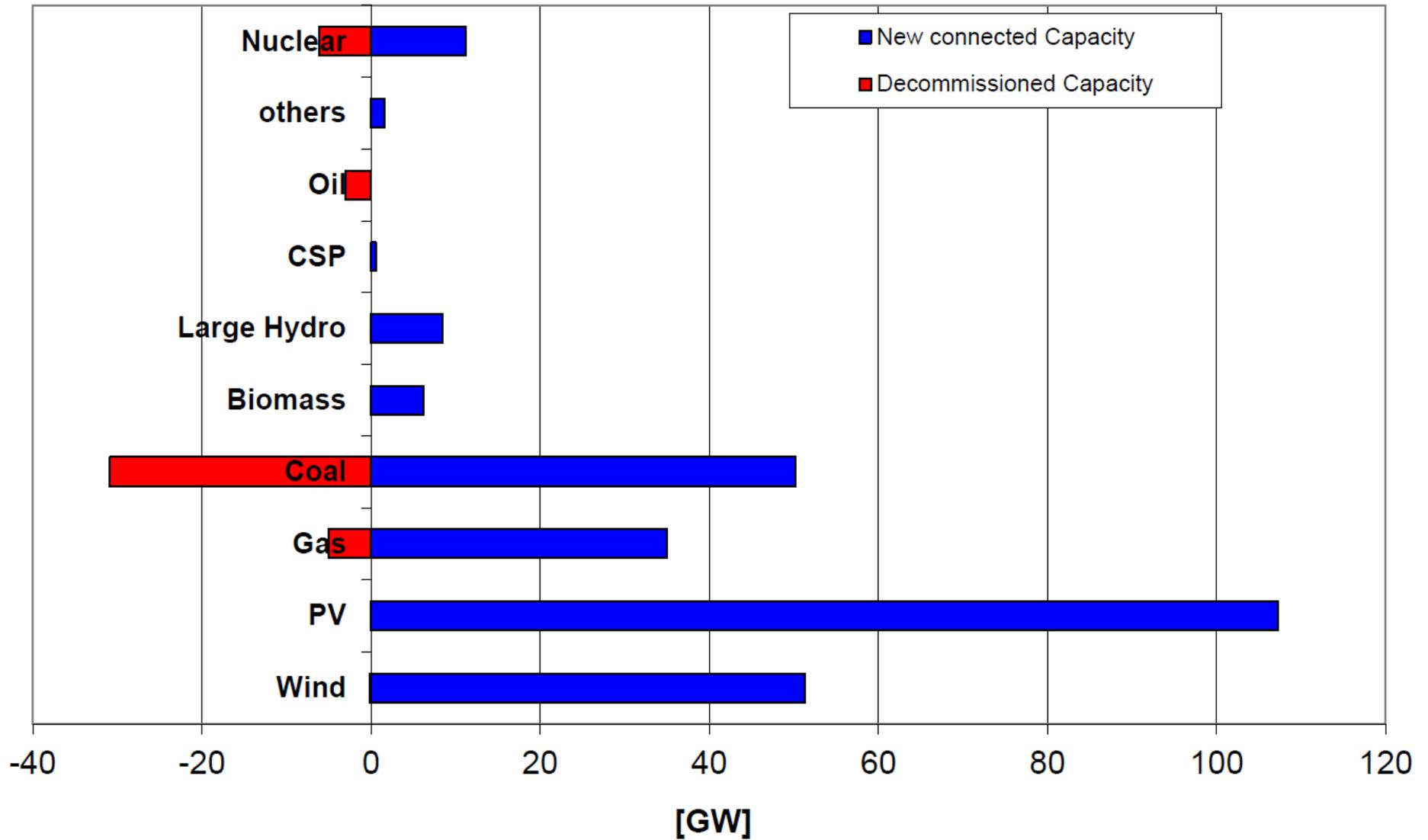
## Мощности электрогенерации, добавленные в мире в 2019 г.



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

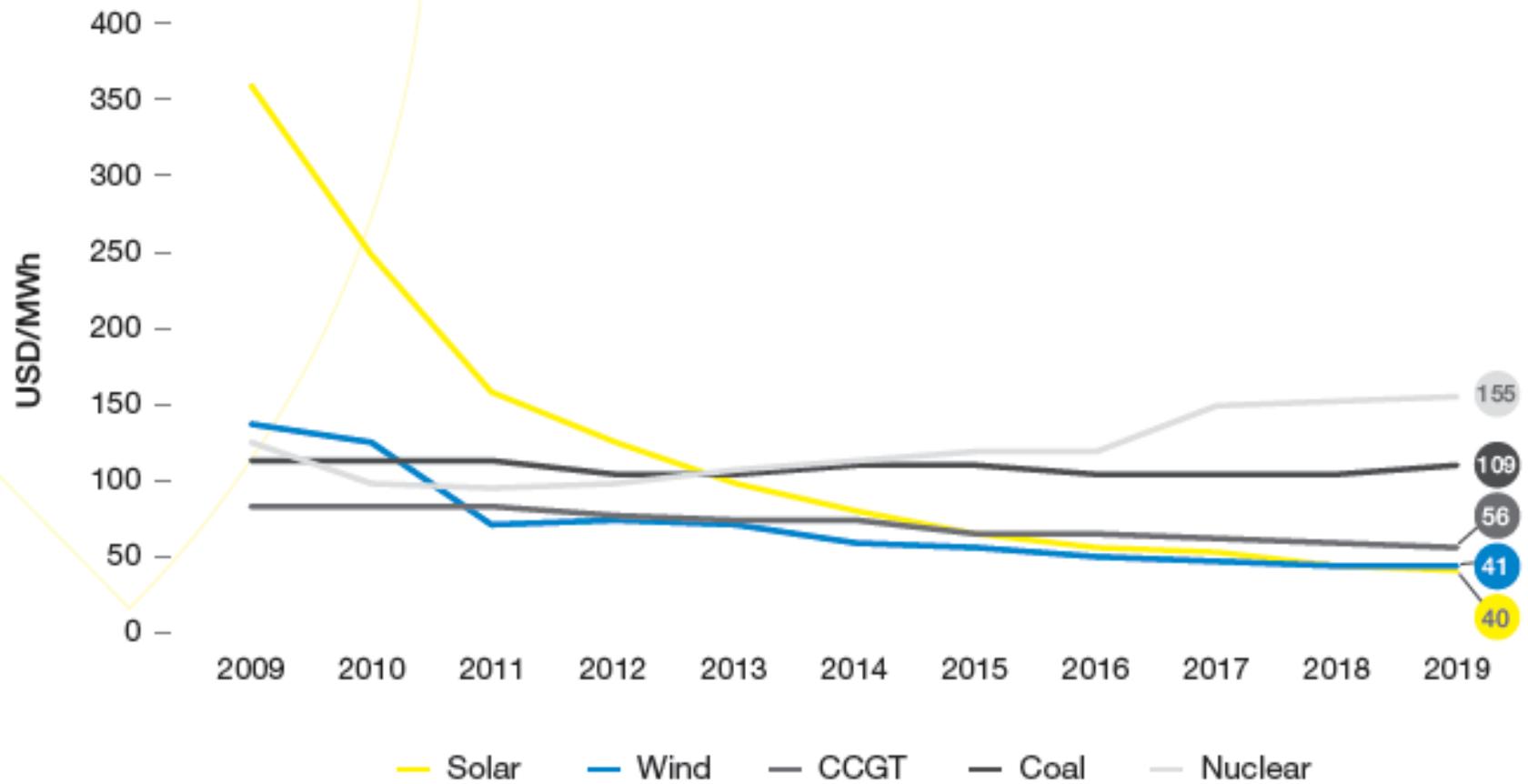
© SOLARPOWEREUROPE 2020

## Мощности введенных и **выведенных** электростанций в мире в 2018 году, ГВт



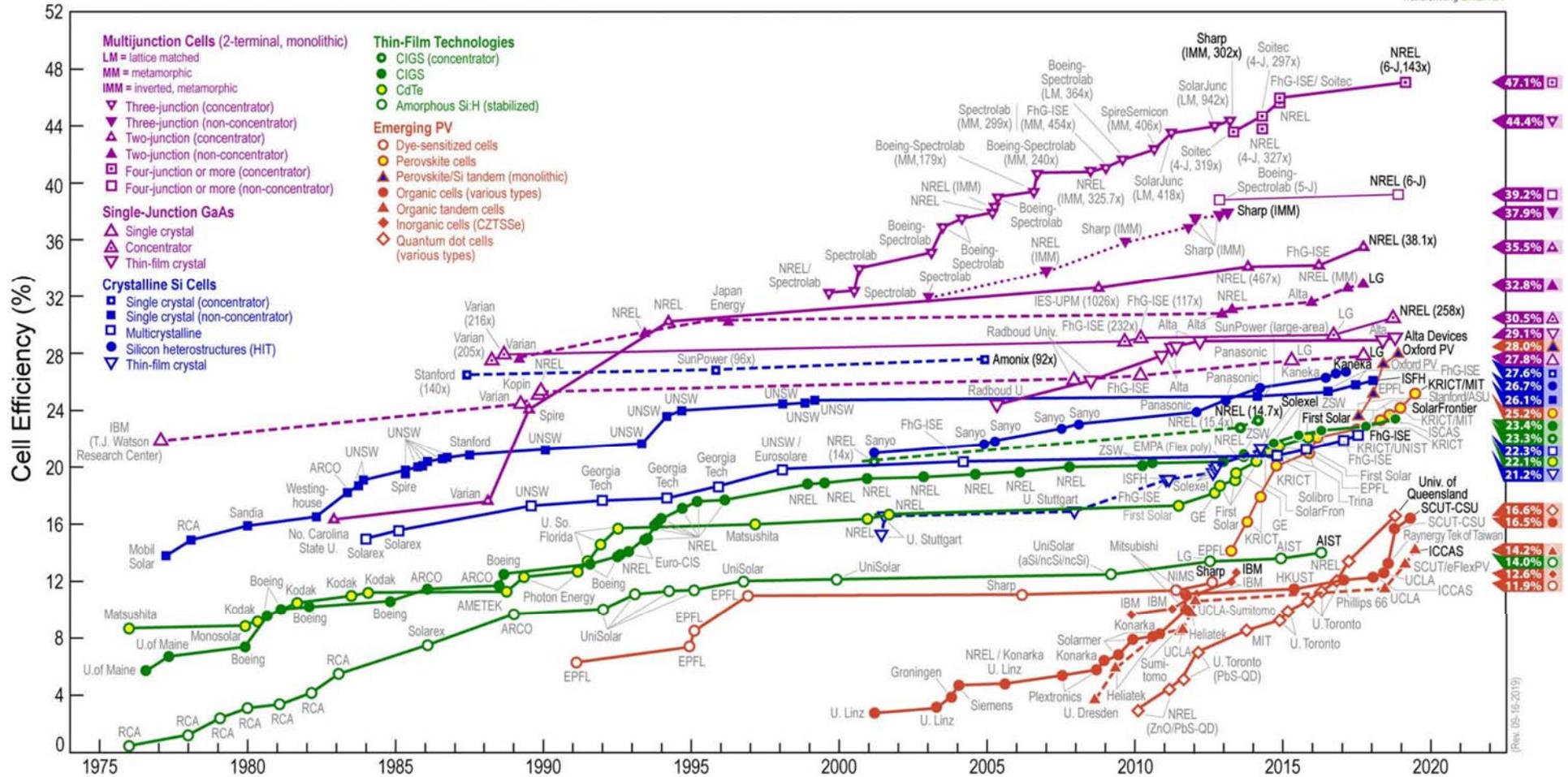
(source: PV Status Report 2019)

## Стоимость электричества, генерируемого различными источниками энергии



(source: Solar Power Europe 2020)

# Best Research-Cell Efficiencies



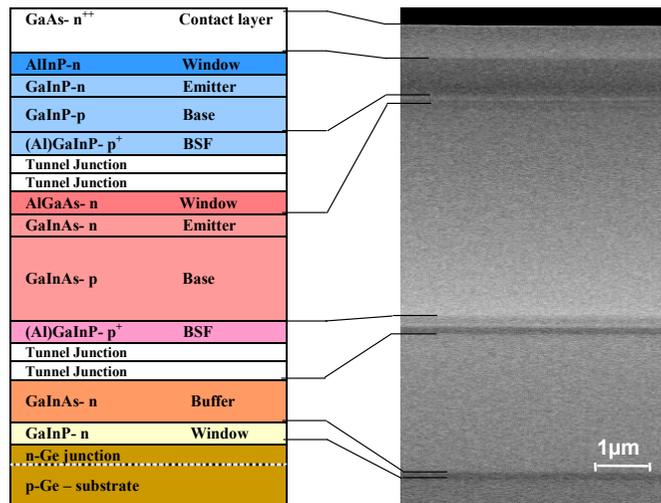
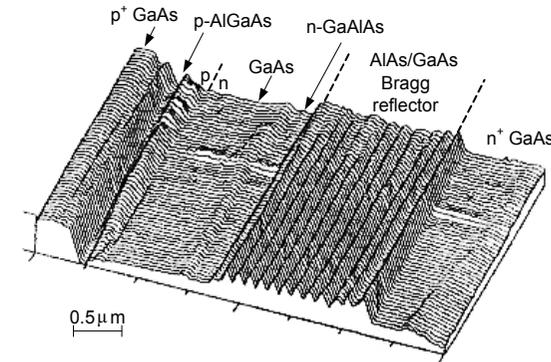
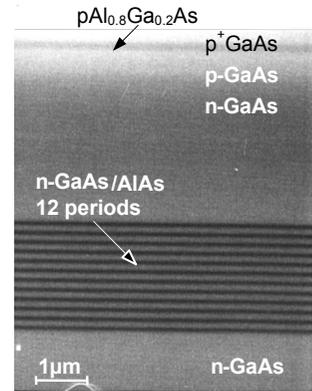
\* This plot is courtesy of the National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO

# Каскадные солнечные элементы на основе АЗВ5 наногетероструктур

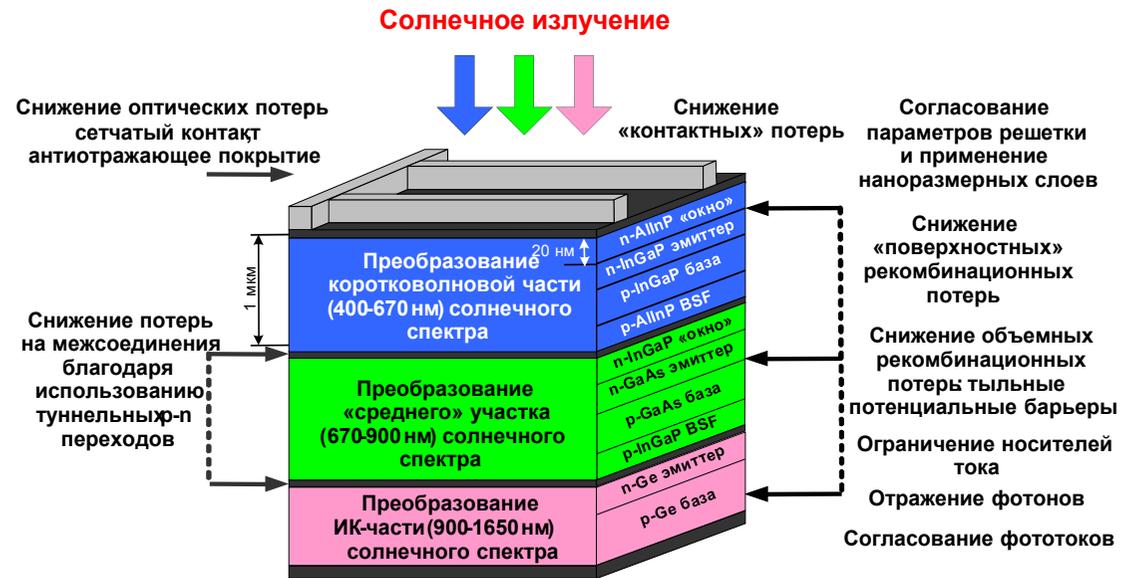
МОС-гидридная технология выращивания каскадных гетероструктур



Гетероструктуры с Брэгговским рефлектором с эффективным поглощением «подзонных» фотонов

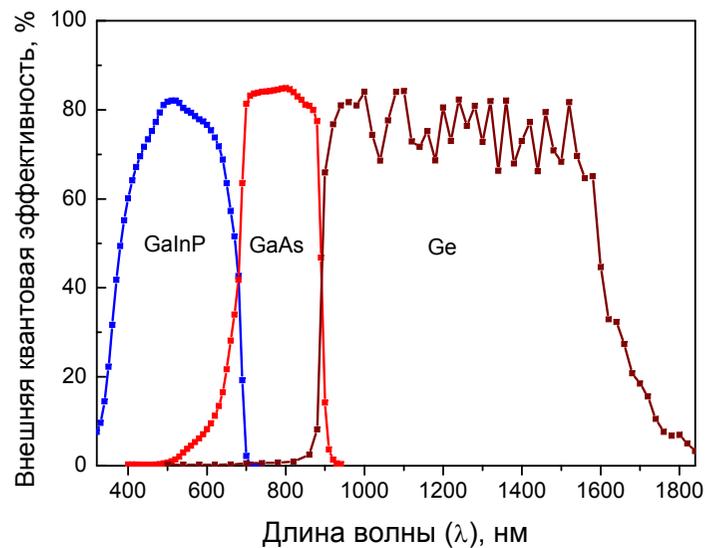


GaInP/GaAs/Ge гетероструктура каскадного солнечного элемента, КПД~40%

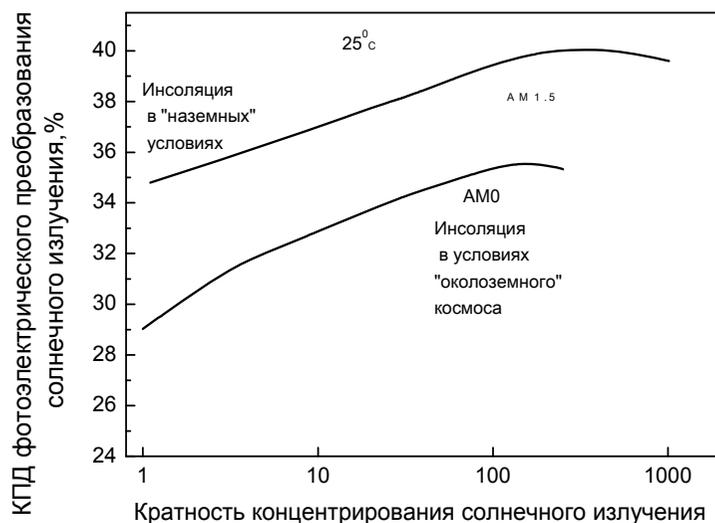


Пути увеличения эффективности каскадного солнечного элемента

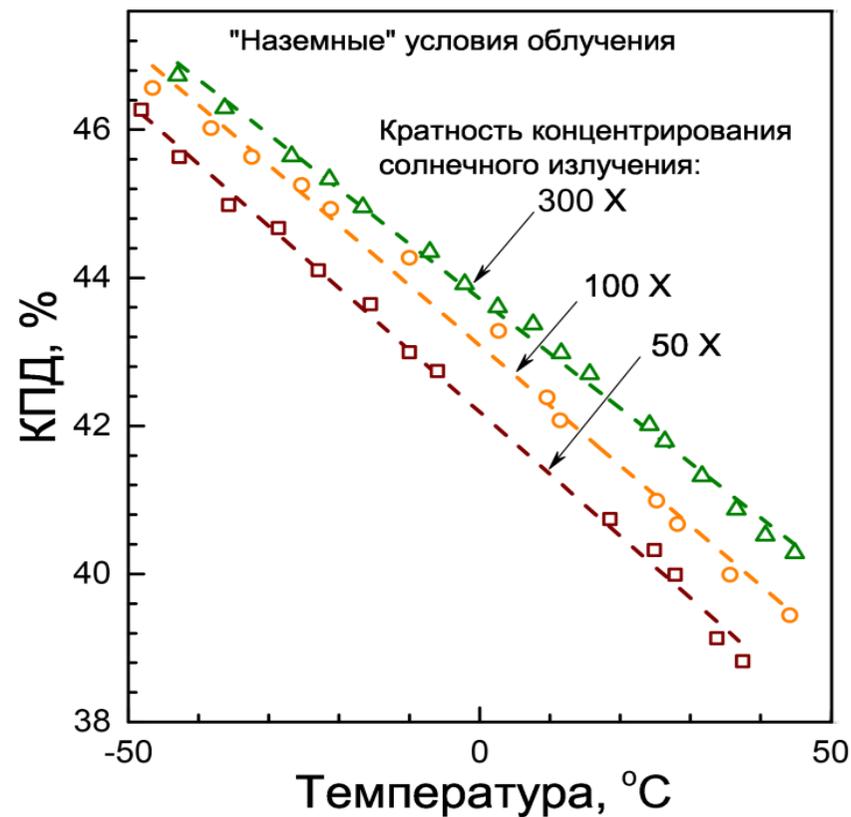
## Характеристики каскадных солнечных элементов на основе гетероструктур GaInP/GaInAs/Ge



Спектр фотоответа трехпереходного солнечного элемента GaInP/GaAs/Ge



**КПД >40% (1000 солнц) в «наземном» каскадном солнечном элементе на основе GaInP/GaAs/Ge**



**Зависимость КПД каскадного солнечного элемента от температуры при различных кратностях концентрирования солнечного излучения**

Трехкаскадный InGaP/GaAs/Ge гетероструктурный СЭ,  
размер 8см x 4см



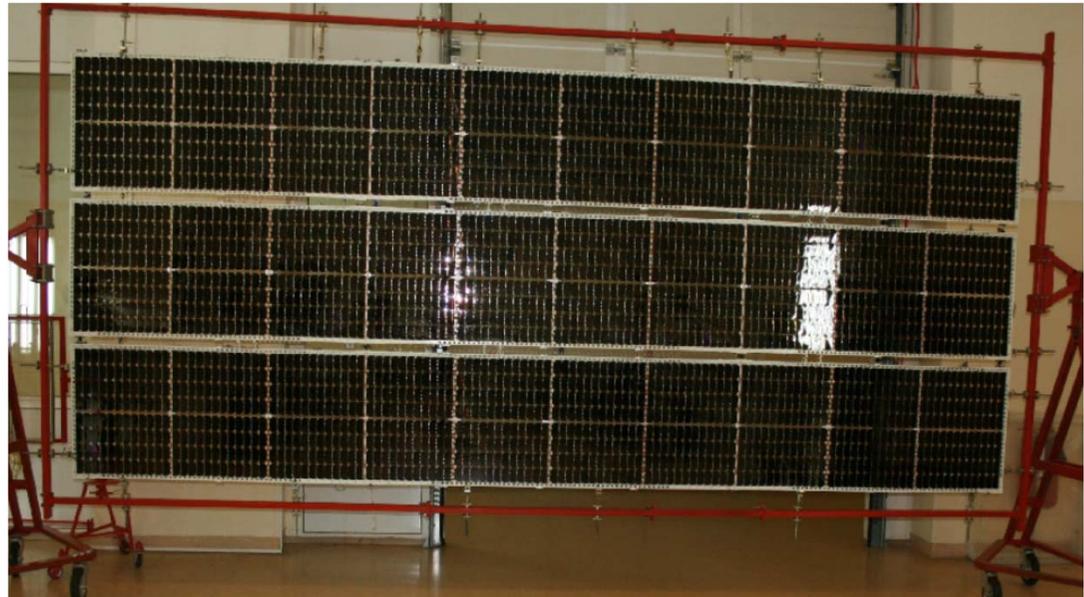
## **Промышленное освоение (ПАО «Сатурн») высокоэффективных радиационнстойких каскадных фотоэлектрических преобразователей космического назначения**

Разработана технология каскадных фотопреобразователей на основе наногетероструктур AlGaInP/GaInAs/Ge с повышенной эффективностью и радиационной стойкостью (более 15 лет на геосинхронной орбите).

Увеличение эффективности достигнуто за счет “внутреннего расщепления” солнечного излучения в гетероструктурах на три спектральных диапазона, преобразуемых тремя, последовательно включенными фотоактивными областями.

Использование в структуре фотопреобразователя встроенных Брегговских отражателей позволило уменьшить толщины фотоактивных областей и тем самым резко снизить радиационное дефектообразование и поднять радиационную стойкость.

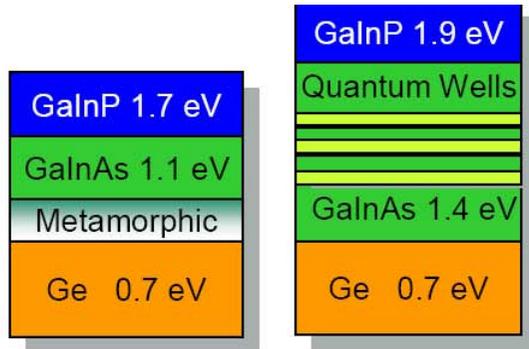
Технология внедрена на предприятии ОАО «Сатурн» (г. Краснодар) на первом в России производстве каскадных космических батарей и обеспечила более, чем двукратное увеличение удельного энергосъема и ресурса работы по сравнению с ранее выпускавшимися кремниевыми батареями.



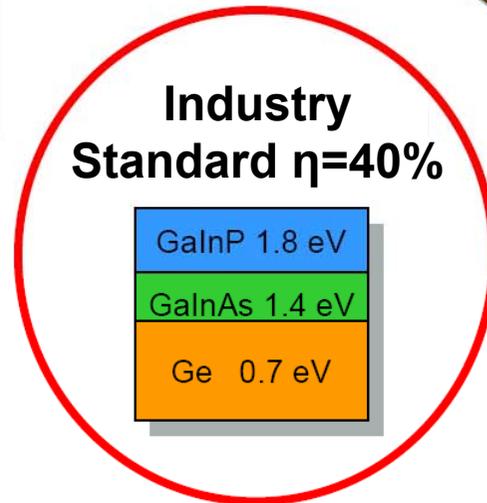
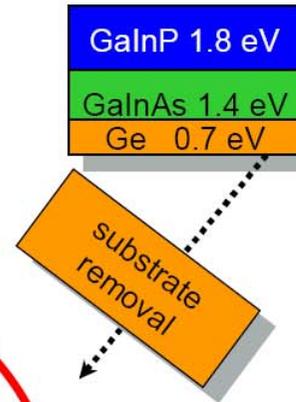
**Космическая солнечная батарея (~ 10 м<sup>2</sup>) на основе каскадных фотопреобразователей, изготовленных ПАО «Сатурн» по технологии, разработанной в ФТИ им. А.Ф.Иоффе**

# Пути увеличения эффективности солнечных элементов

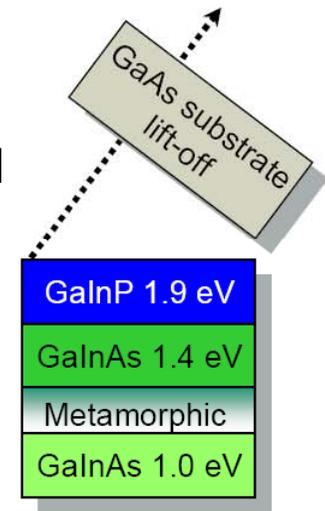
## Improved current matching



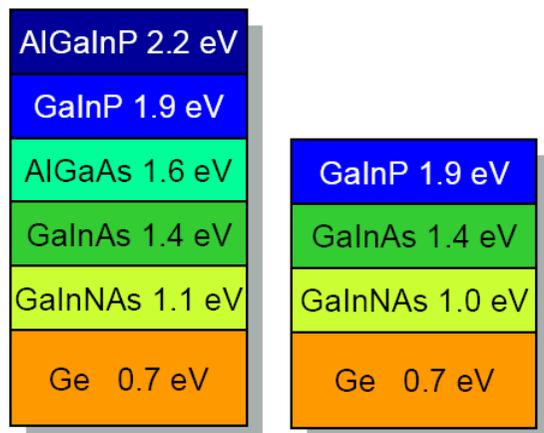
## Ultra-thin lift-off devices



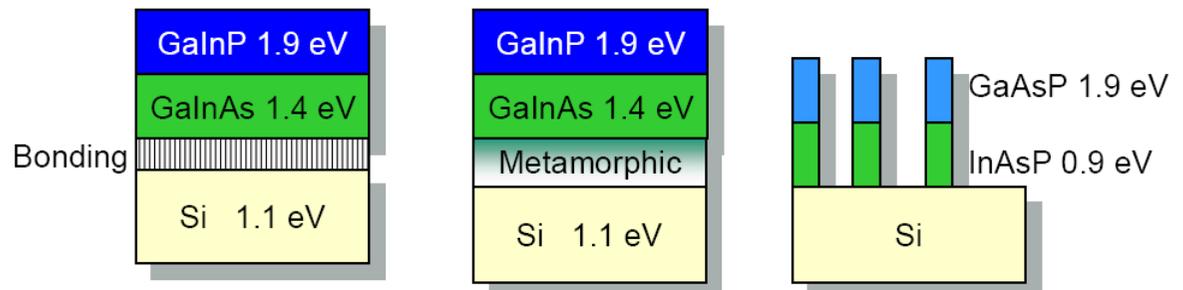
## Inverted devices



## More junctions



## III-V Solar cells on Si



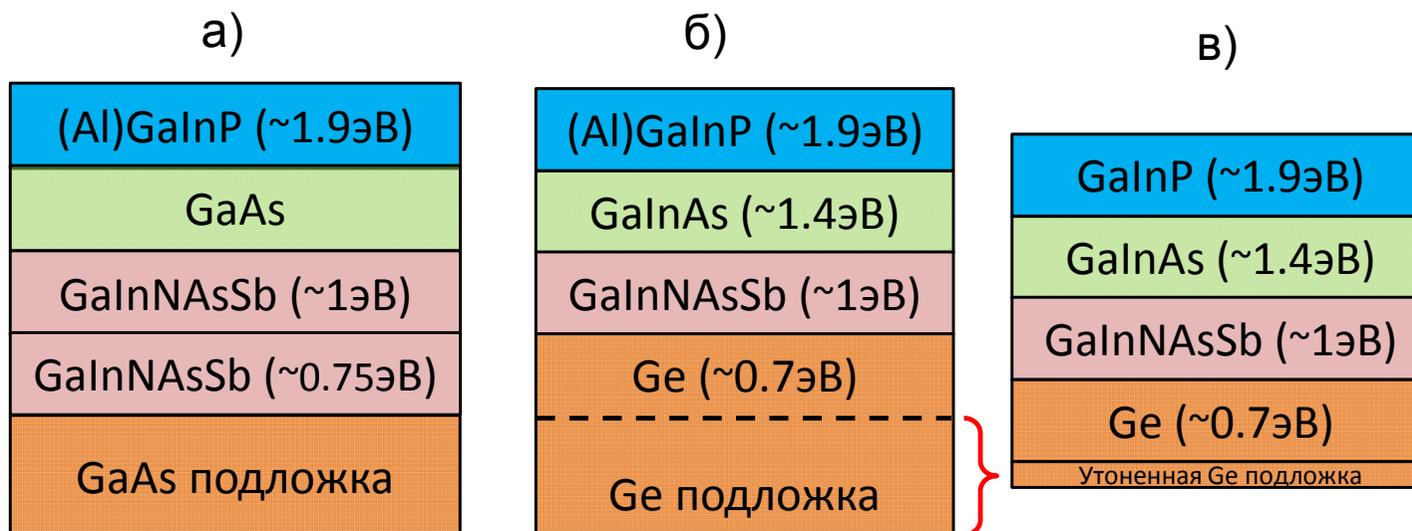
## Разработка гибридной «молекулярно-лучевая (МЛЭ) + МОС-гидридная» технологии каскадных фотоэлектрических преобразователей.

Методом МЛЭ будет разработана технология роста GaInAsNSb слоев, изорешеточных к GaAs и Ge, с шириной запрещенной зоны в диапазоне 1...1,1 эВ и 0,75...0,8 эВ для включения в состав 3-х и 4-х переходных гибридных «МЛЭ+МОС» КФЭП.

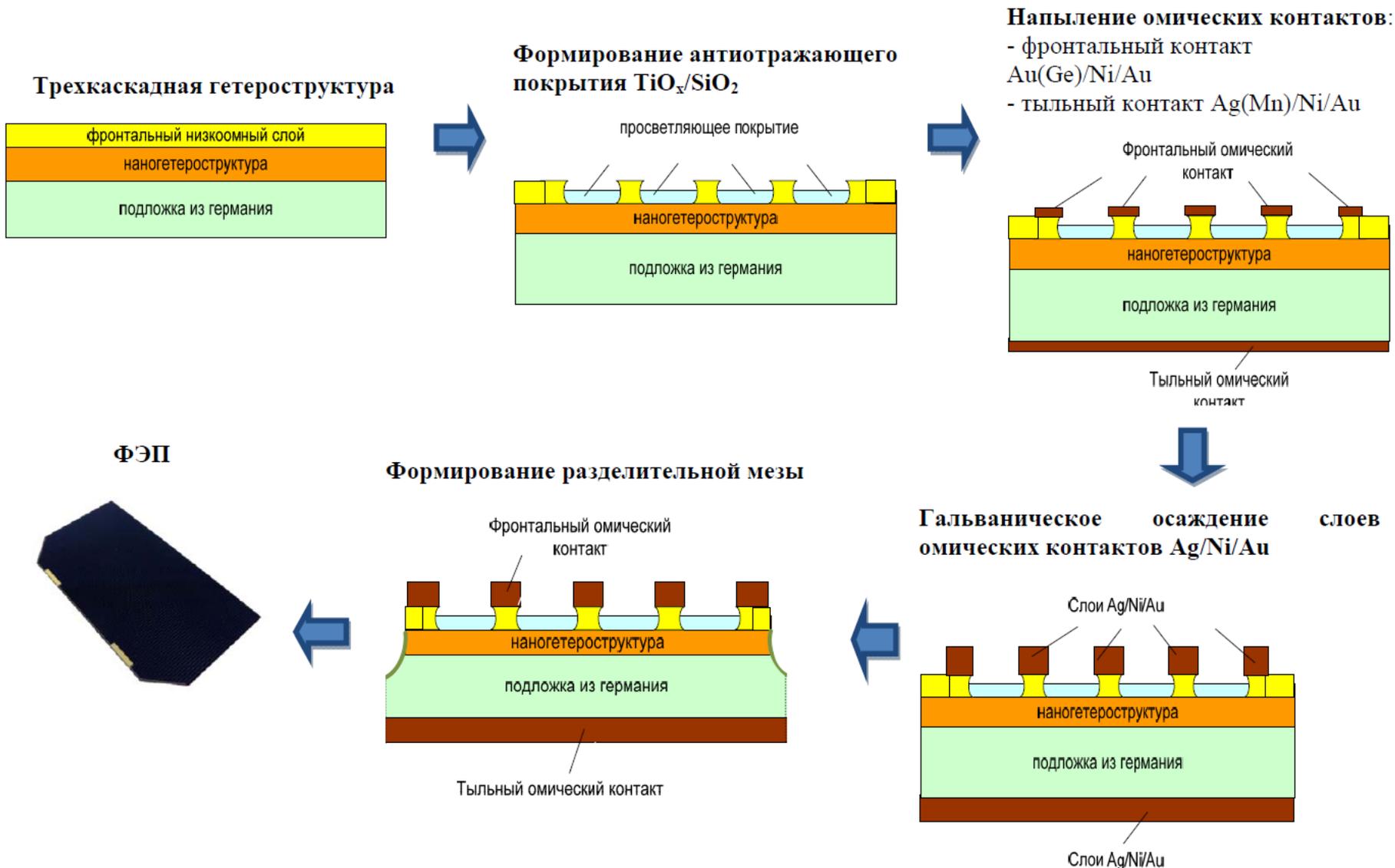
Будет разработана гибридная технология, включающая формирование «узкозонных» гетероструктур GaInAsNSb(1 эВ)/GaInAsNSb(0,75 эВ) или GaInAsNSb(1 эВ)/Ge(0.7 эВ) методом МЛЭ, с последующим дополнением широкозонными слоями GaInAs ( $E_g = 1.4$  эВ) и (Al)GaInP ( $E_g = 1.9$  эВ), выращиваемыми методом МОС-гидридной технологии, с получением 4-х переходных гибридных КФЭП.

Цель: достижение КПД более 32% в 4-х переходных космических КФЭП и более 43% в наземных ФЭП.

### Структуры четырехпереходных гибридных «МЛЭ+МОС» КФЭП с InGaAsNSb изорешеточными субэлементами на GaAs (а) и Ge (б, в) подложках.



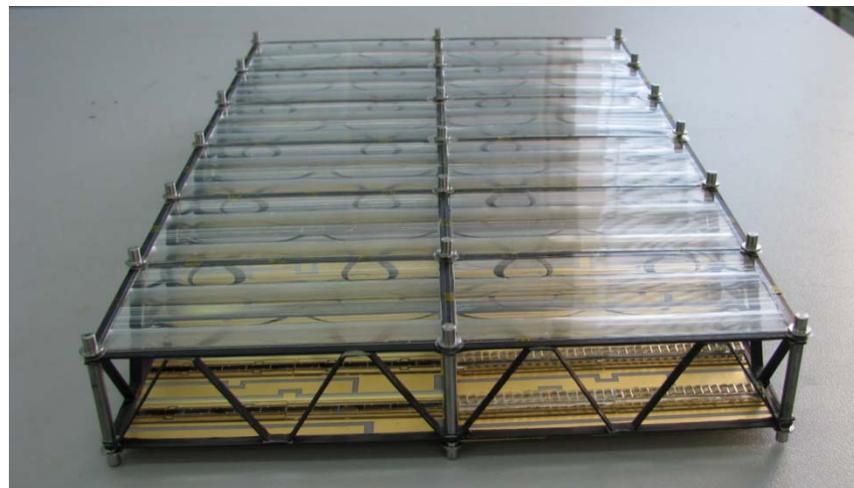
# Постростовая технология создания космических каскадных ФЭП



## Концентраторные модули для космических солнечных батарей на основе каскадных фотопреобразователей

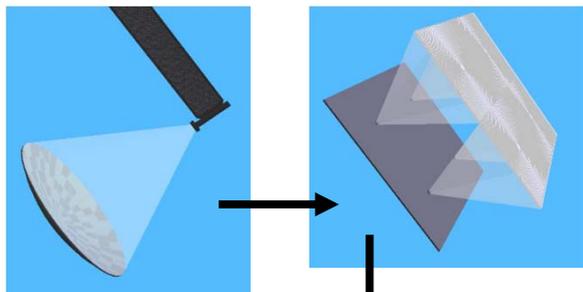


**Макет первой отечественной солнечной батареи (10м<sup>2</sup>) с линзовыми концентраторами излучения и каскадными солнечными элементами**

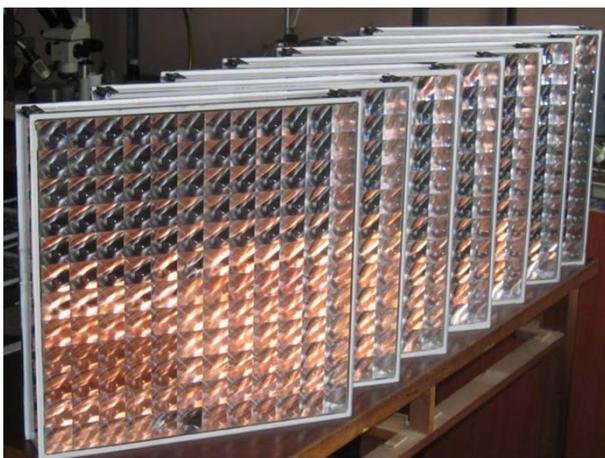


**Фрагмент панели солнечной батареи (0,1м<sup>2</sup>) с линзовыми концентраторами солнечного излучения, состоящий из 12 фотоэлектрических субмодулей на несущем углепластиковом каркасе**

## Совершенствование конструкций наземных концентраторных фотоэлектрических модулей



Тенденция развития конструкций концентраторных модулей: от больших зеркал к минилинзам Френеля



Концентраторные модули размером 0.5м x 0.5м на основе 144 минилинз Френеля (4см x 4см)



Схема концентраторного модуля с минилинзами Френеля

# Эволюция концентраторных солнечных установок в ФТИ им. А.Ф.Иоффе

parabolic mirrors

1980



1981

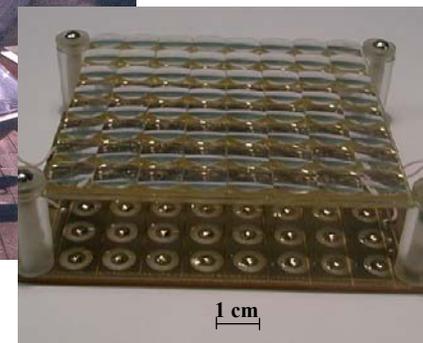


1985



Fresnel lenses

1990



1998



2004



2005



Fresnel lens panels (“silicone on glass” design)

## Преимущества солнечных энергоустановок с каскадными солнечными элементами :

- Снижение площади полупроводниковых СЭ в 500-1000 раз пропорционально кратности концентрирования;
- Низкое значение температурного коэффициента снижения КПД ( $K_T = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) в каскадных солнечных элементах – в три раза меньше, чем в кремниевых батареях
- Увеличение в 2-3 раза (в отношении к солнечным элементам на основе кремния и тонких пленок) количества электроэнергии, вырабатываемой концентраторными солнечными модулями с единицы площади за счет большей эффективности СЭ и слежения за Солнцем;
- Время возврата электроэнергии, затраченной на изготовление энергоустановок, составляет менее 1 года.

## Концентраторные фотоэнергоустановки различных компаний



**Concentrix Solar/Soitec**  
[www.soitec.com](http://www.soitec.com)



**SolFocus (США)**  
[www.solfocus.com](http://www.solfocus.com)



**Emcore (США)**  
[www.emcore.com](http://www.emcore.com)



**Amonix Inc., USA**  
[www.amonix.com](http://www.amonix.com)

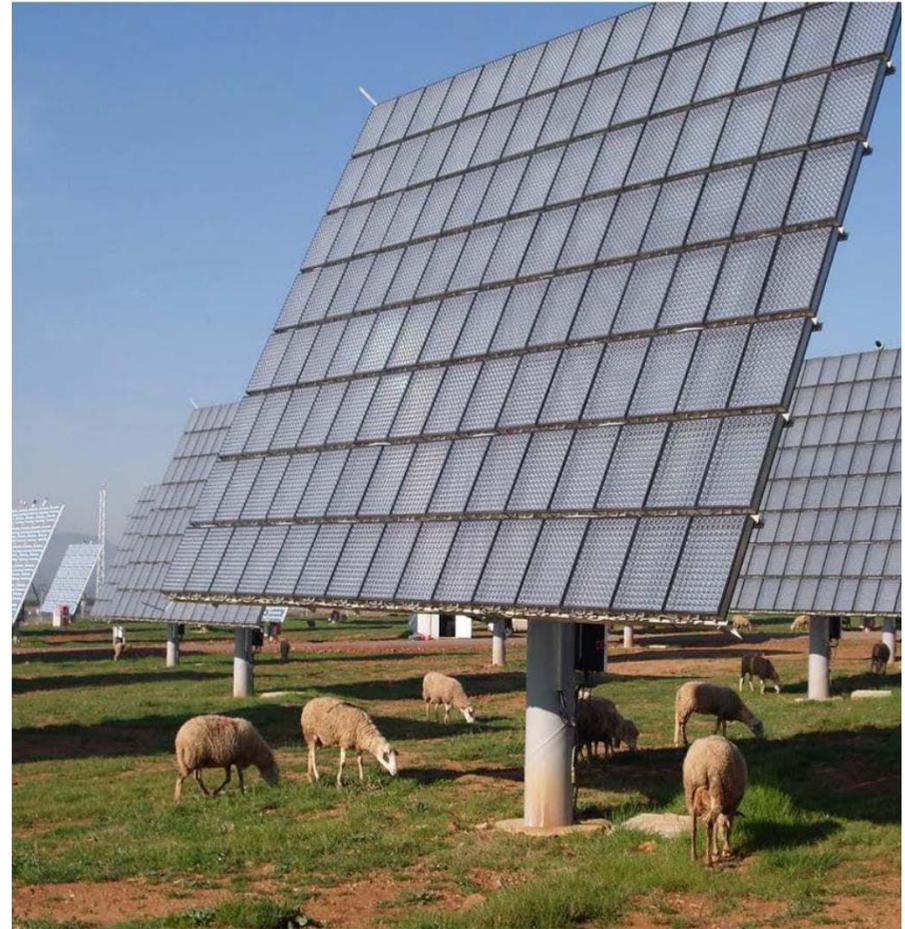


**GreenVolts, Inc., USA**



**SolarSystems,**  
<http://solarsystems.com.au>

**Эффективное использование земли  
под концентраторными энергоустановками: солнечная агроэнергетика**



## High power CPV stations

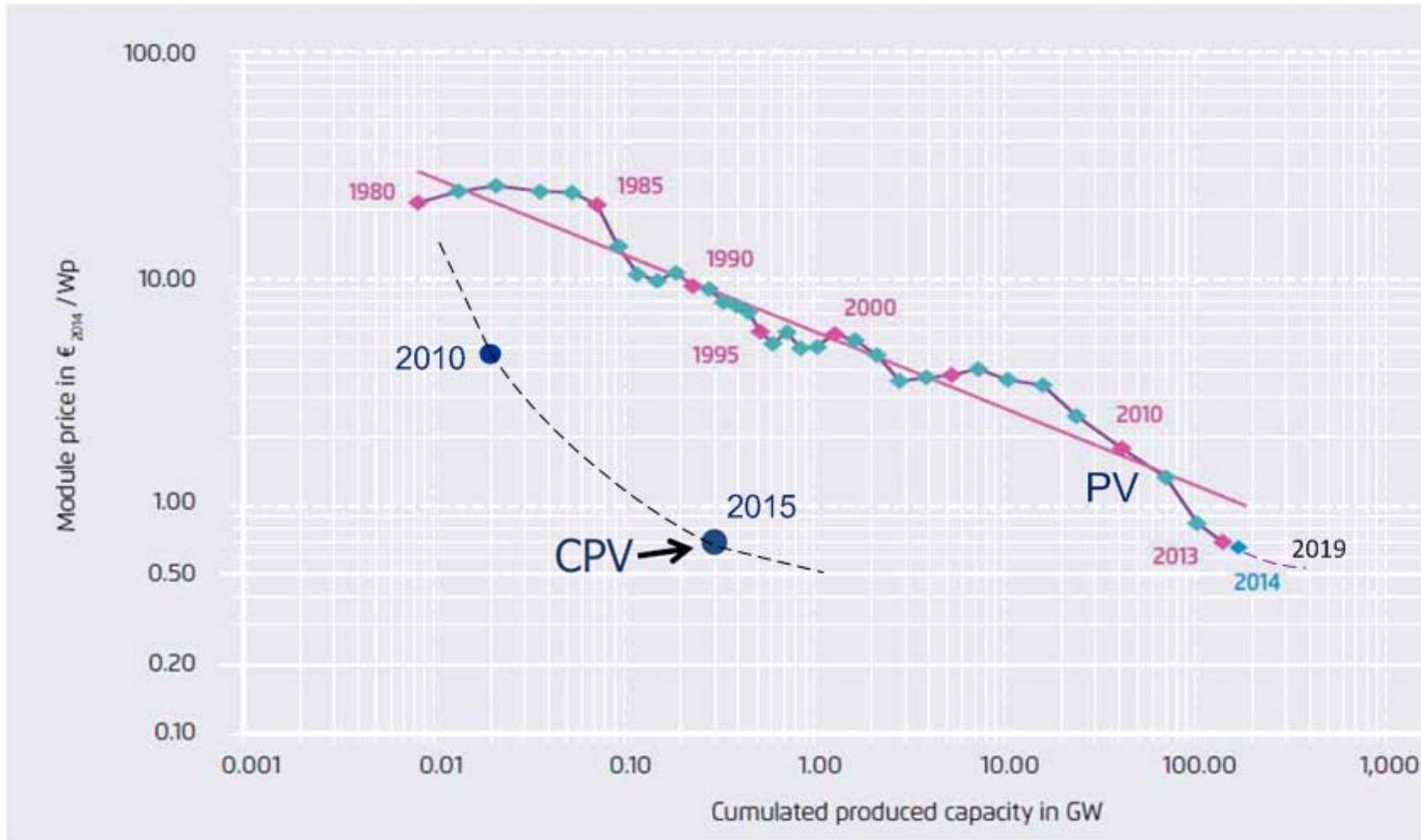


50 MW in Golmud, China



22 MW in Touwsrivier, South Africa

# Сравнение стоимости фотоэлектрических модулей: «обычных» (PV) и концентраторных (CPV) от суммарного объема установленной мощности, ГВт



## Опыт создания в ФТИ им.А.Ф. Иоффе оборудования для характеристики наземных и космических солнечных батарей

Солнечный спектр AM1,5 или AM0, интенсивность – от одной солнечной постоянной до кратностей концентрирования порядка 10000 «солнц», расходимость лучей 32 угл. мин., квазистационарность  $\pm 2\%$



Изделия эксплуатируются в АО «НПП «Квант», «ИСС» им. М.Ф. Решетнева, «ВПК» «НПО машиностроения», РКК «Энергия», в исследовательских и учебных заведениях С.-Петербурга, Новосибирска, Дубны и др.

Зарубежные заказчики оборудования:

RSE, Италия

OSRAM, Германия

**Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE)**, Германия

**Spectrolab, Inc. (a Boeing company)** Sylmar CA, США

Everphoton Energy Corp. Taipei, Taiwan, the Republic of China

SolarTec AG, Мюнхен, Германия

**National Renewable Energy Laboratory**, Golden, CO, США

2012

2012

2000, 2011, 2012

2009

2009

2006, 2007, 2008

2005, 2006

Всего поставлено  
около 30 единиц  
оборудования

## **Заключение**

**Исследования и разработки в области АЗВ5 гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей под руководством Ж.И.Алферова заложили основу для создания высокоэффективных солнечных батарей космического и наземного применения.**

**В настоящее время значительная часть космических аппаратов оснащается высокоэффективными гетероструктурными каскадными солнечными элементами.**

**Каскадные фотоэнергосистемы имеют также большие перспективы развития и применения с концентраторами солнечного излучения и системами слежения за Солнцем в наземной и космической солнечной фотоэнергетике.**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**