

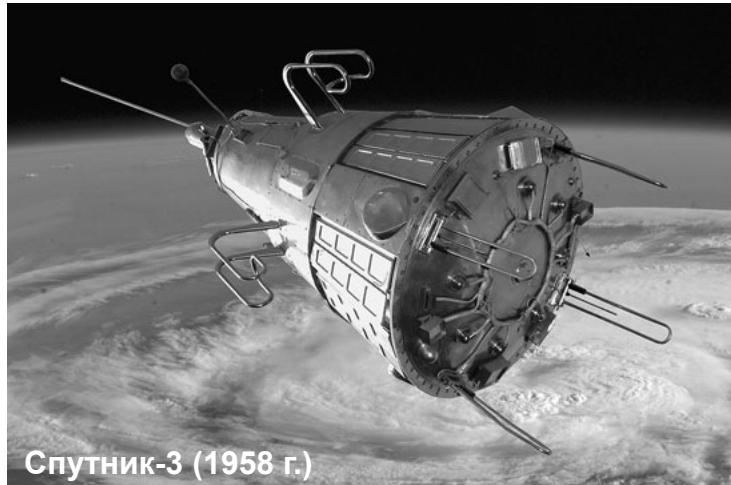
Каскадные солнечные батареи

В.М.Андреев

Содержание доклада

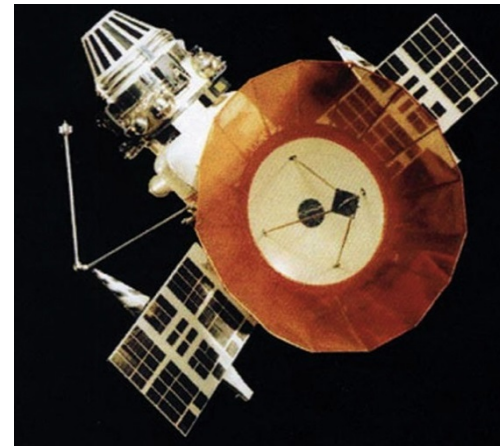
- Начальный период гетероструктурной солнечной фотоэнергетики
- Состояние солнечной фотоэнергетики в мире
- Высокоэффективные каскадные преобразователи солнечной энергии
- Космические каскадные фотопреобразователи и концентраторные модули
- Наземные концентраторные модули на основе каскадных фотопреобразователей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

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

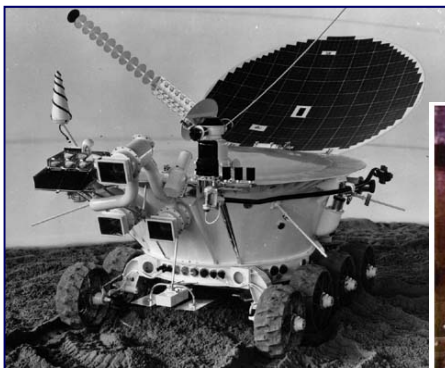


Спутник-3 (1958 г.)

Первые кремниевые солнечные элементы

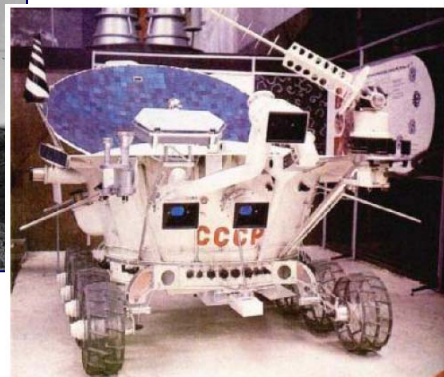


Венера-4 (1967 г.):
Первая батарея на
основе GaAs
солнечных элементов



Луноход-1 (1970 г.)

Луноход-2 (1973 г.):
Солнечные батареи на
GaAs площадью 3,5м².



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



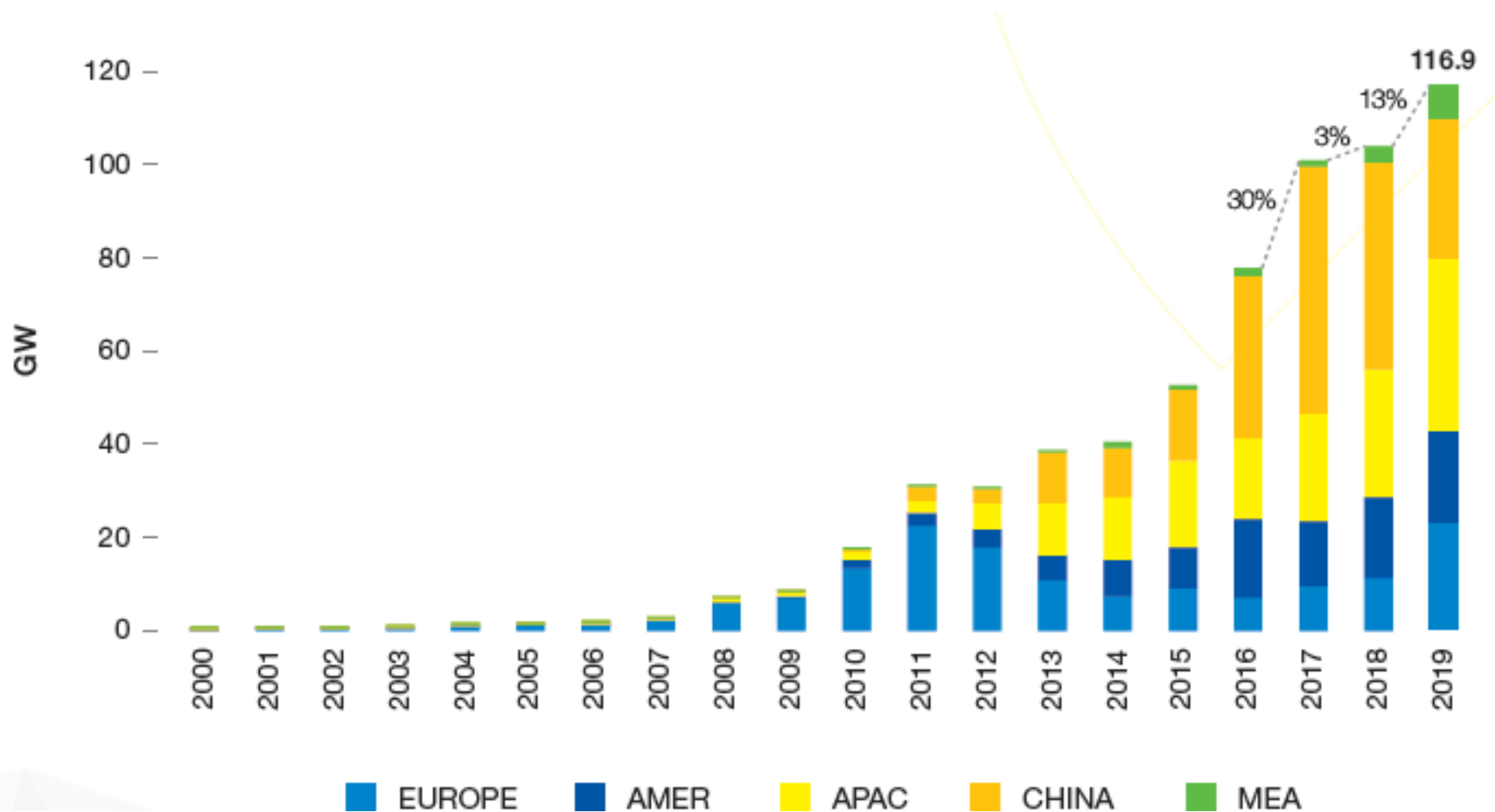
Первые наземные солнечные установки на основе гетероструктур

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



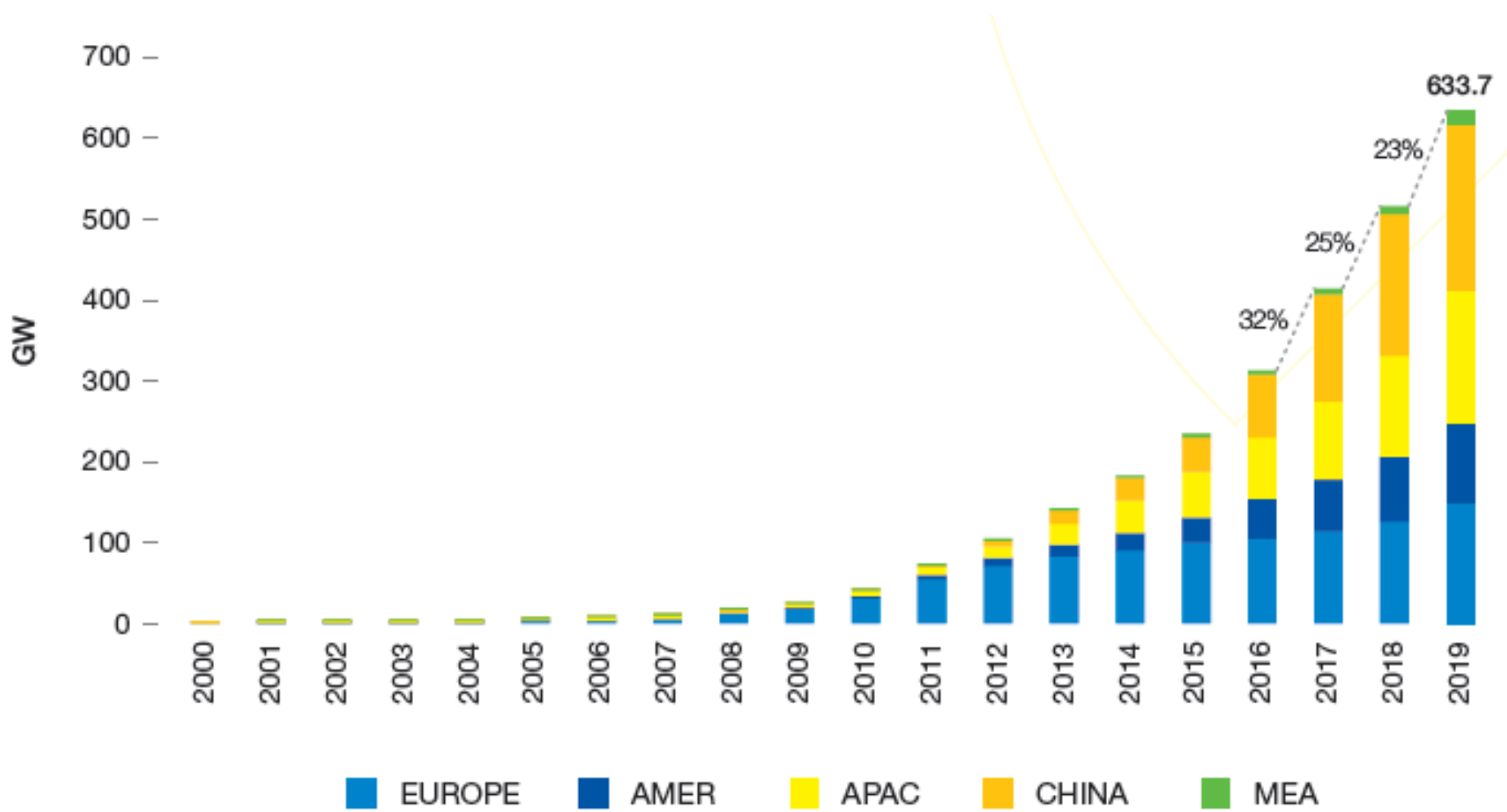
Солнечная установка на основе AlGaAs/GaAs фотоэлементов с зеркальными концентраторами излучения. Справа - Ж.И.Алферов, в центре – В.Д.Румянцев, слева – В.М.Тучкевич

Эволюция мирового ежегодного производства солнечных фотоэнергосистем (ГВт/год)



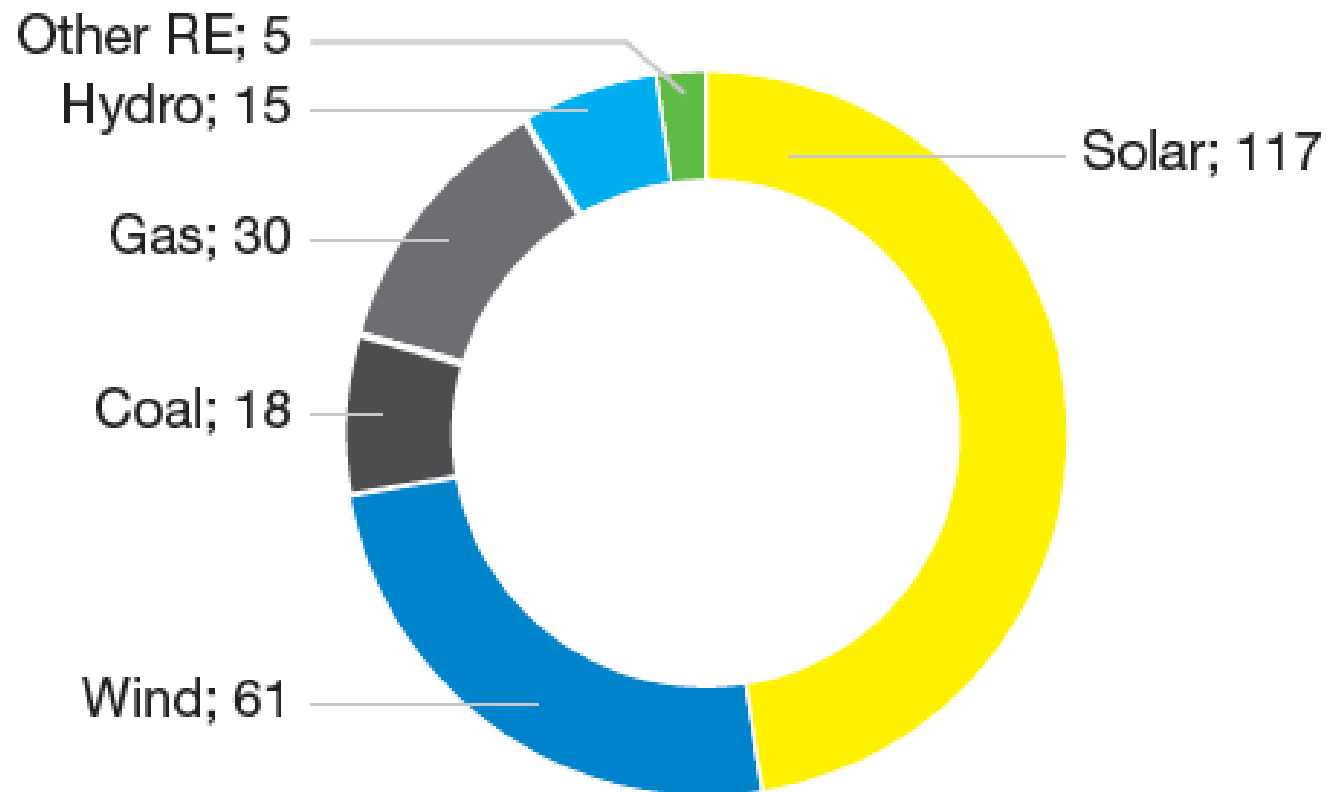
(source: Solar Power Europe 2020)

Суммарная мощность установленных в мире солнечных батарей



(source: Solar Power Europe 2020)

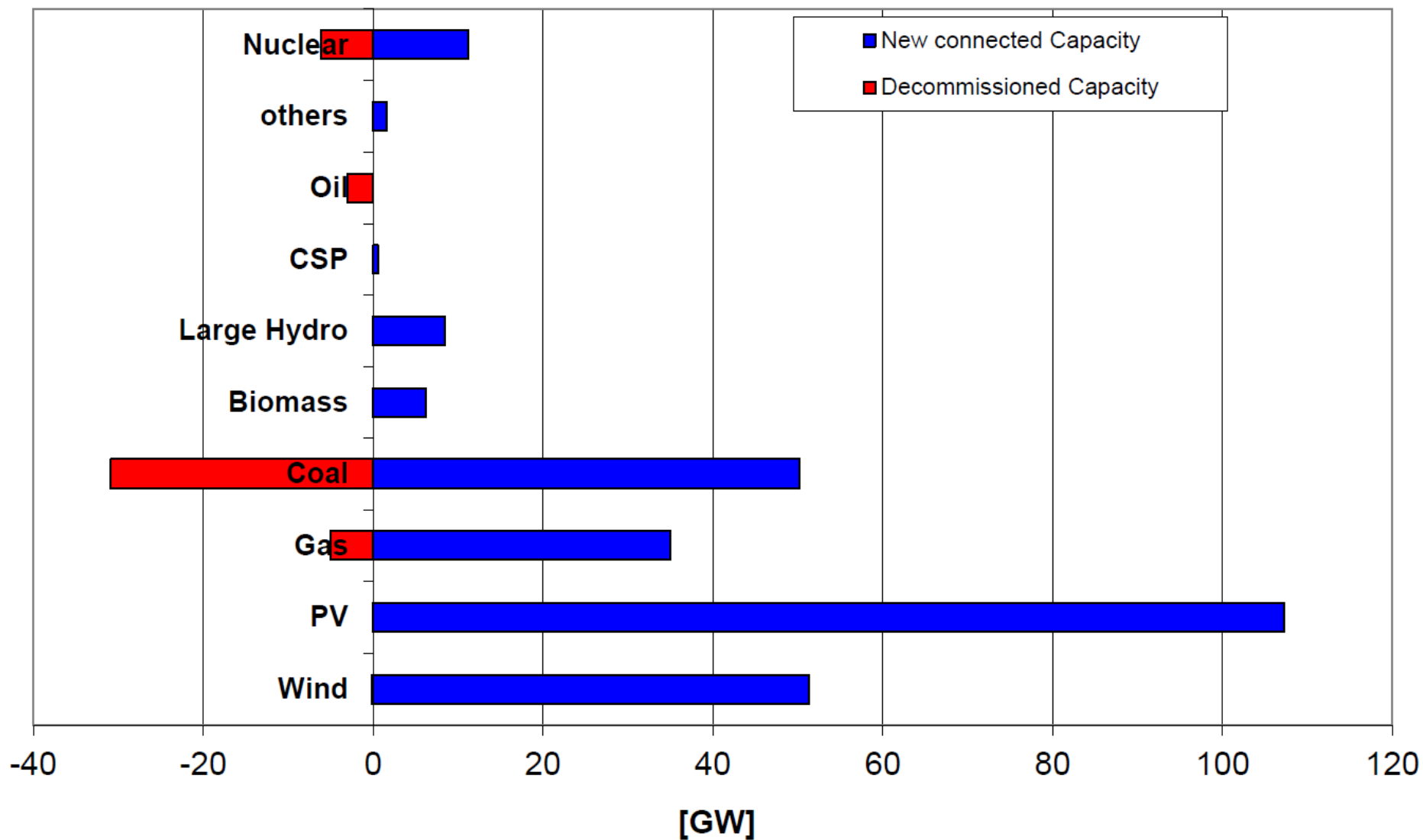
Мощности электрогенерации, добавленные в мире в 2019 г.



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

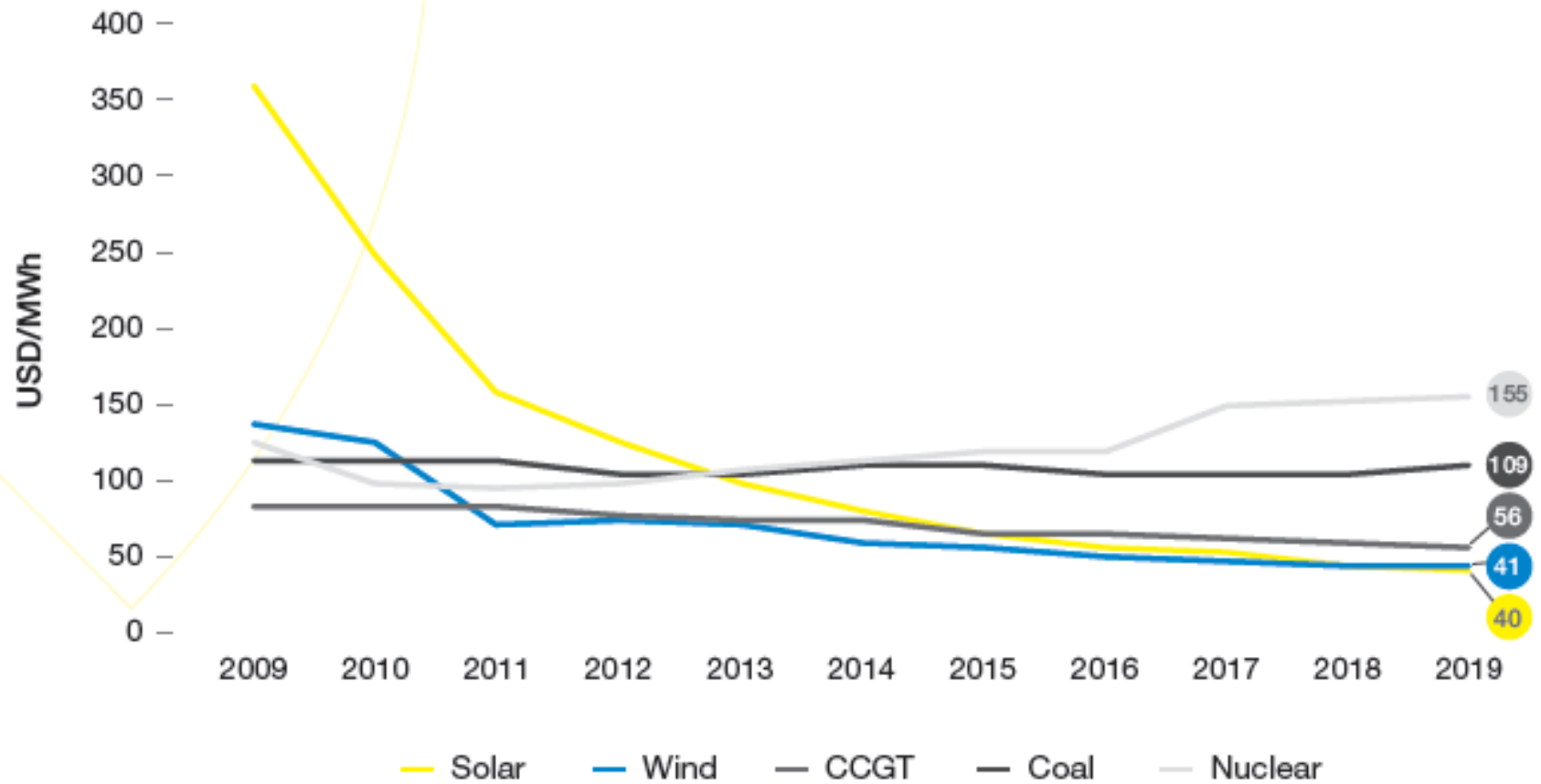
© SOLARPOWEREUROPE 2020

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



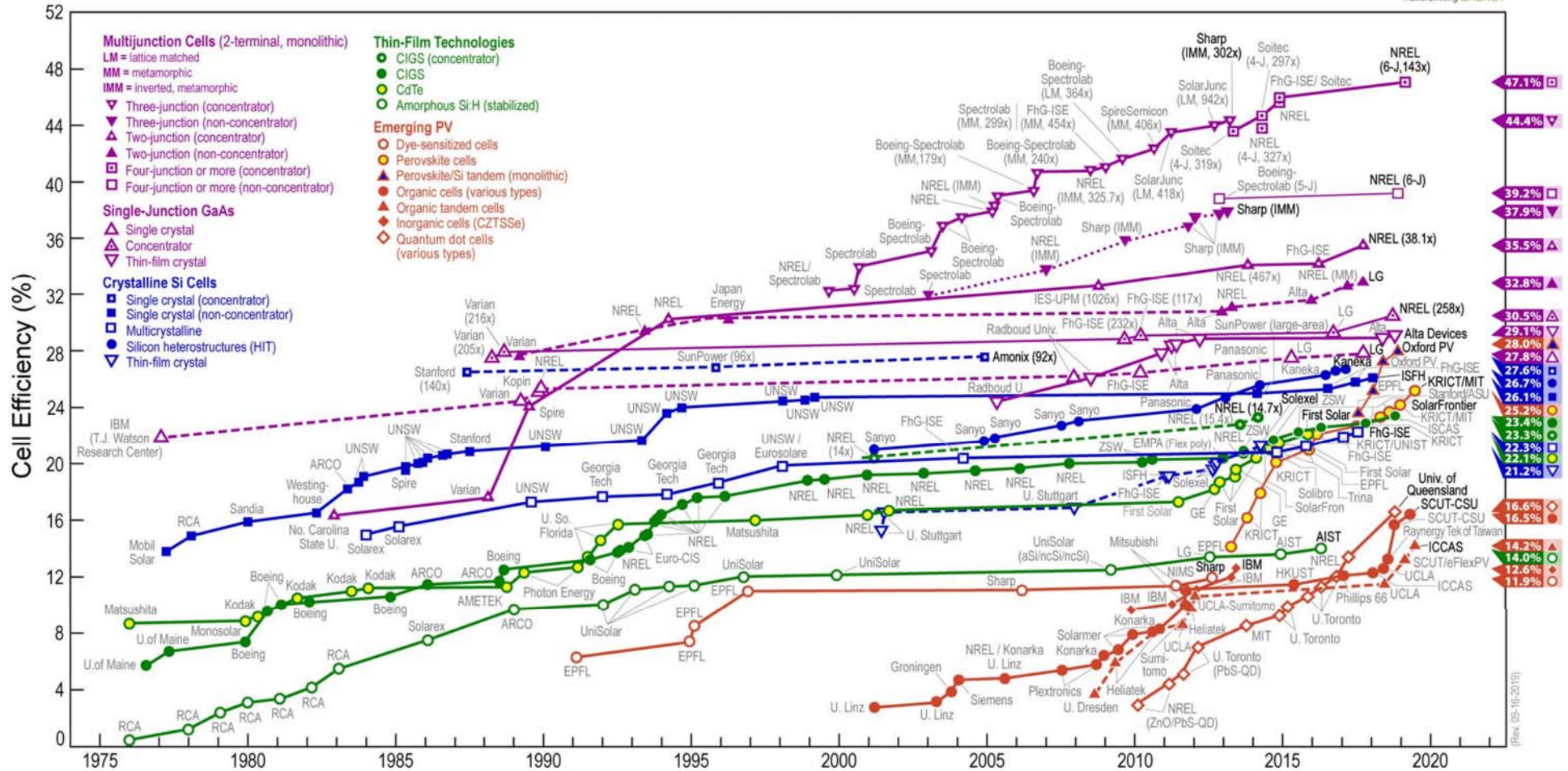
(source: PV Status Report 2019)

Стоимость электричества, генерируемого различными источниками энергии



(source: Solar Power Europe 2020)

Best Research-Cell Efficiencies



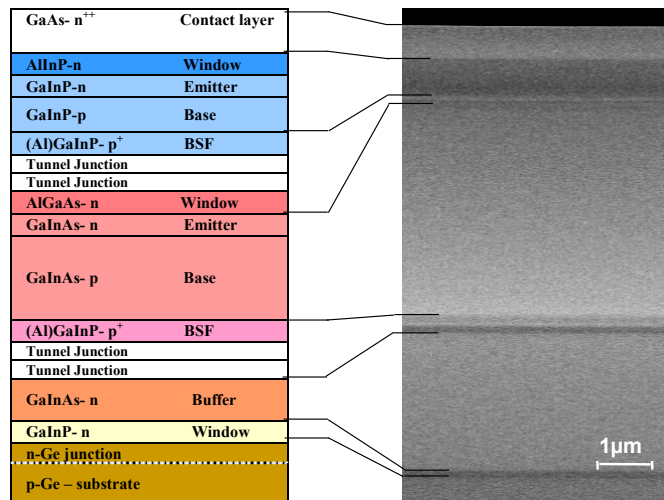
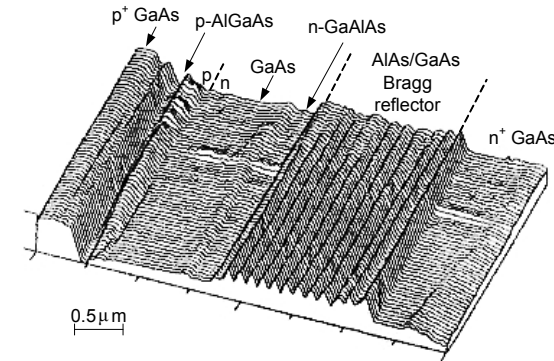
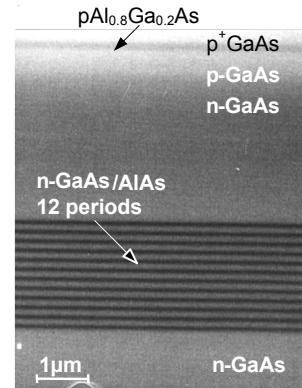
* This plot is courtesy of the National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO

Каскадные солнечные элементы на основе АЗВ5 наногетероструктур

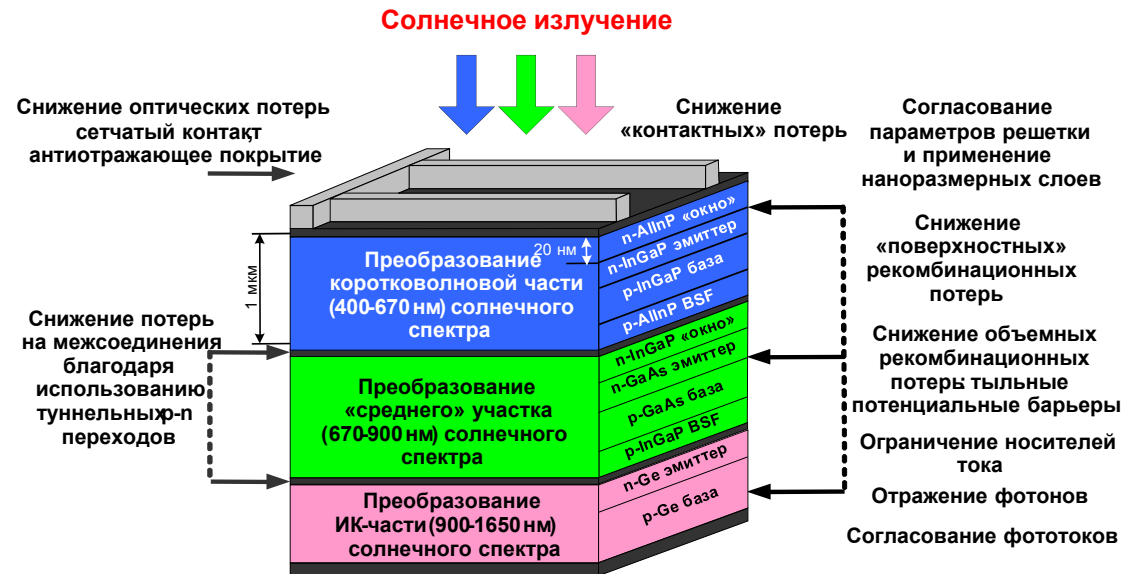
МОС-гидридная технология выращивания каскадных гетероструктур



Гетероструктуры с Брэгговским рефлектором с эффективным поглощением «подзонных» фотонов

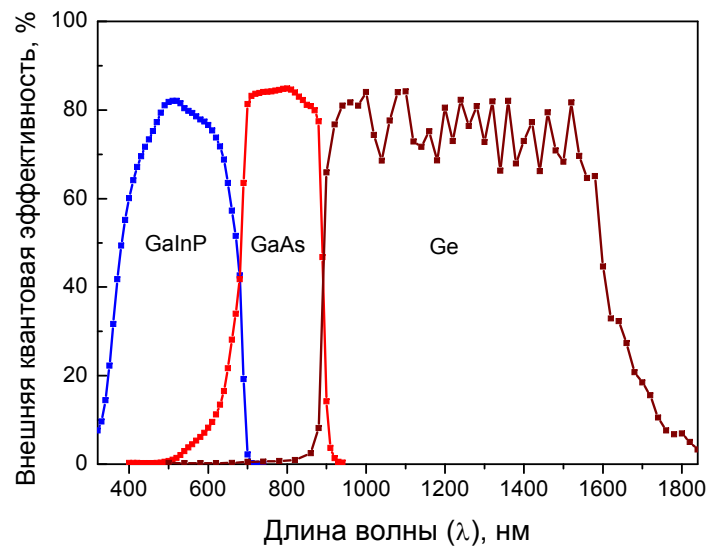


GaInP/GaAs/Ge гетероструктура каскадного солнечного элемента, КПД~40%

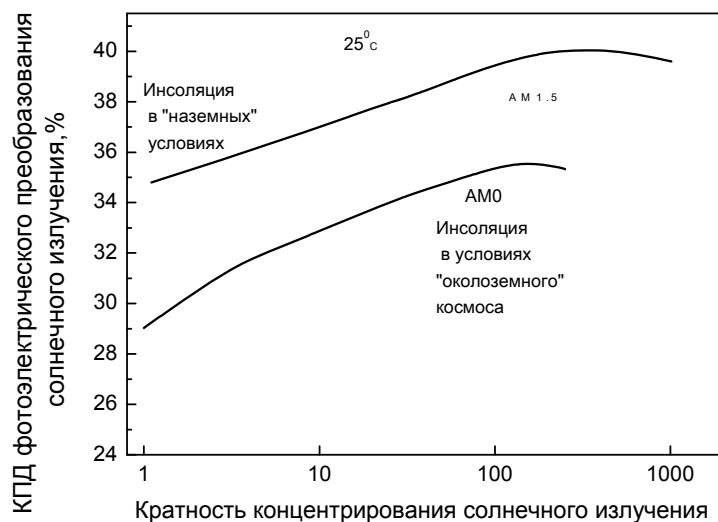


Пути увеличения эффективности каскадного солнечного элемента

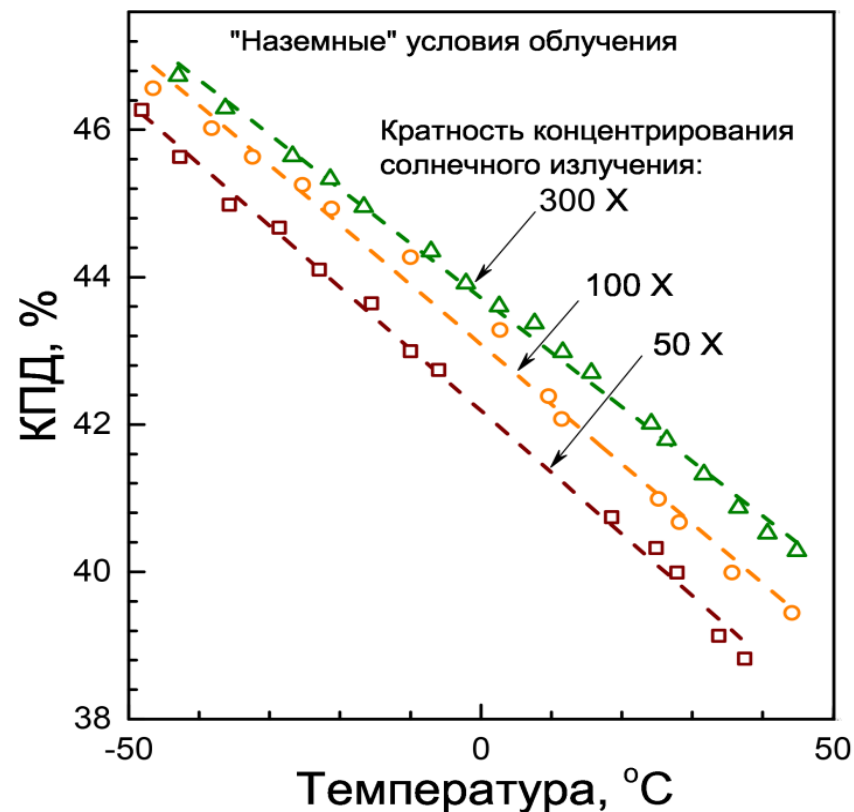
Характеристики каскадных солнечных элементов на основе гетероструктур GaInP/GaAs/Ge



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



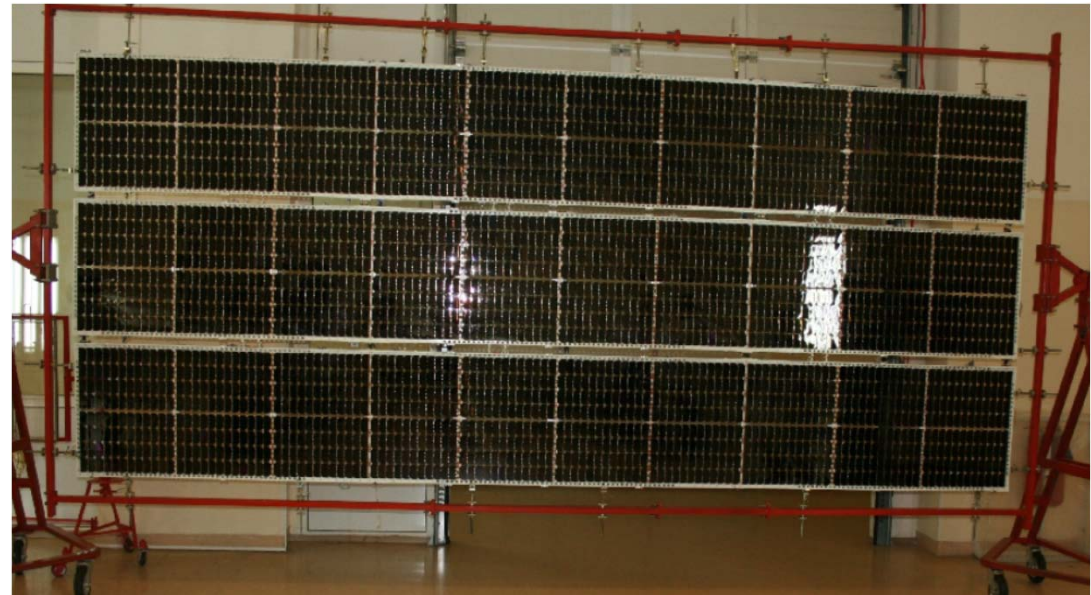
Промышленное освоение (ПАО «Сатурн») высокоэффективных радиационнстойких каскадных фотоэлектрических преобразователей космического назначения

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.

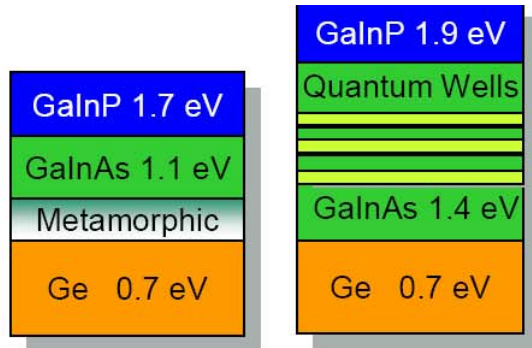
Технология внедрена на предприятии ОАО «Сатурн» (г. Краснодар) на первом в России производстве каскадных космических батарей и обеспечила более, чем двукратное увеличение удельного энергосъема и ресурса работы по сравнению с ранее выпускавшимися кремниевыми батареями.



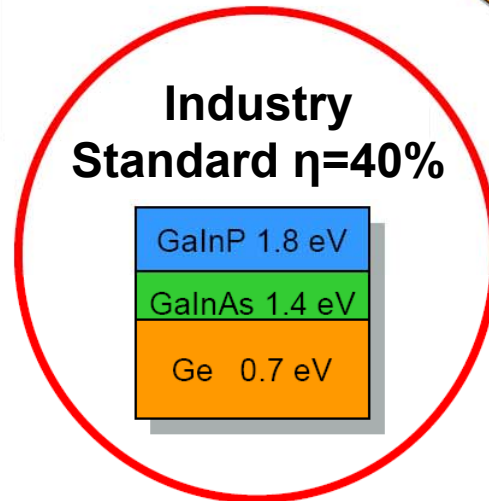
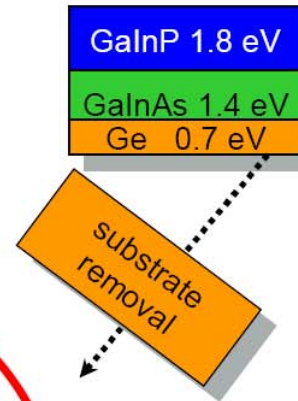
Космическая солнечная батарея (~ 10 м²) на основе каскадных фотопреобразователей, изготовленных ПАО «Сатурн» по технологии, разработанной в ФТИ им. А.Ф.Иоффе

Пути увеличения эффективности солнечных элементов

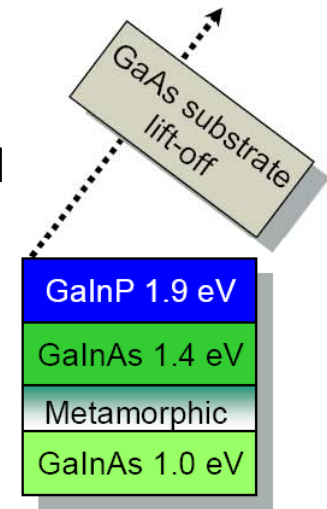
Improved current matching



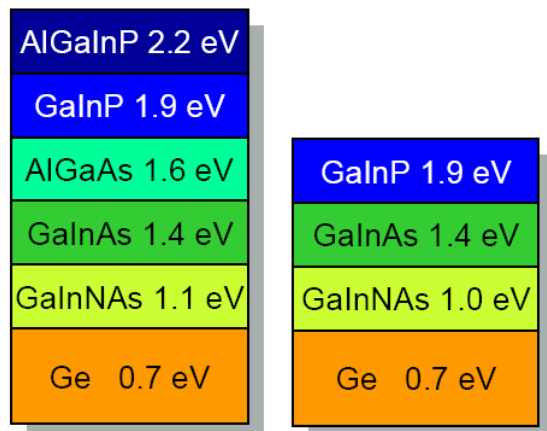
Ultra-thin lift-off devices



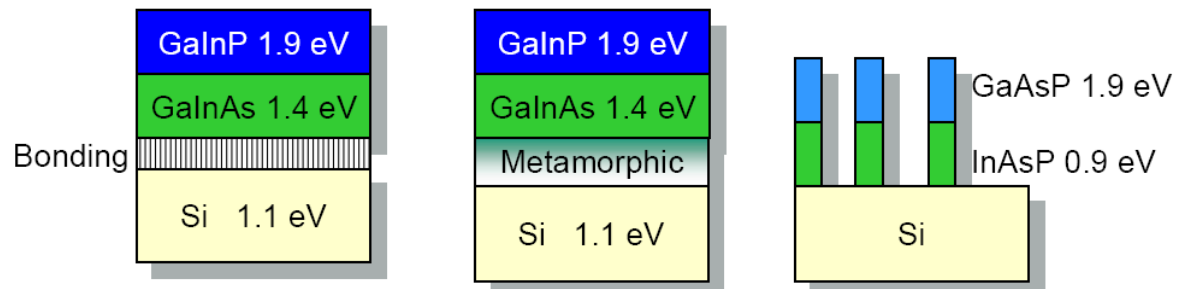
Inverted devices



More junctions



III-V Solar cells on Si



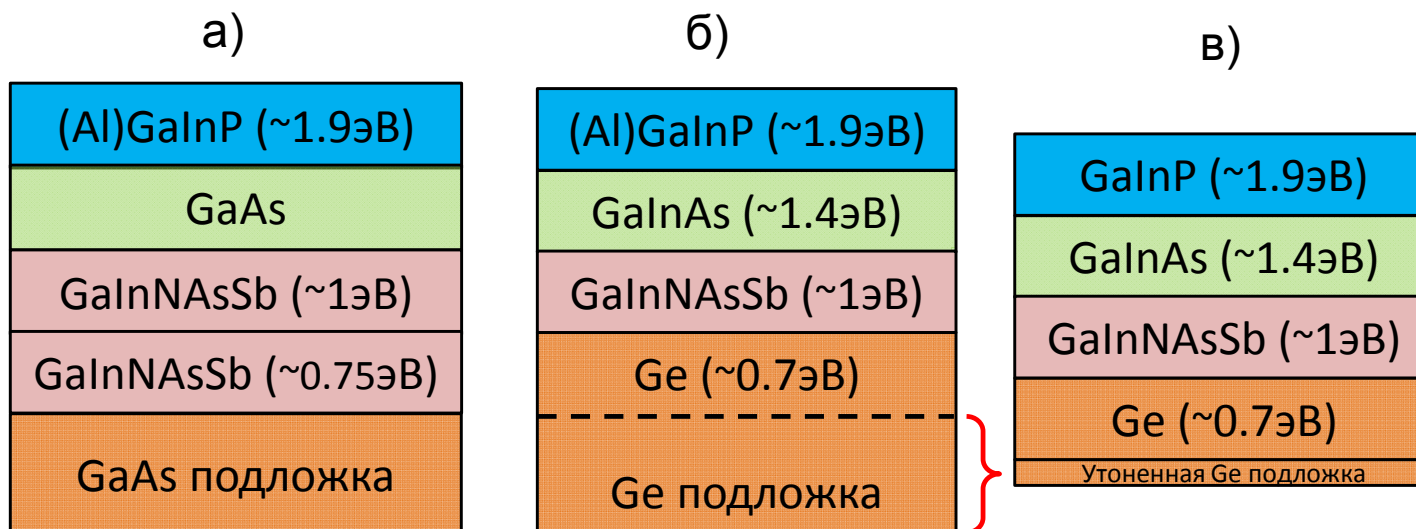
Разработка гибридной «молекулярно-лучевая (МЛЭ) + МОС-гидридная» технологии каскадных фотоэлектрических преобразователей.

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.

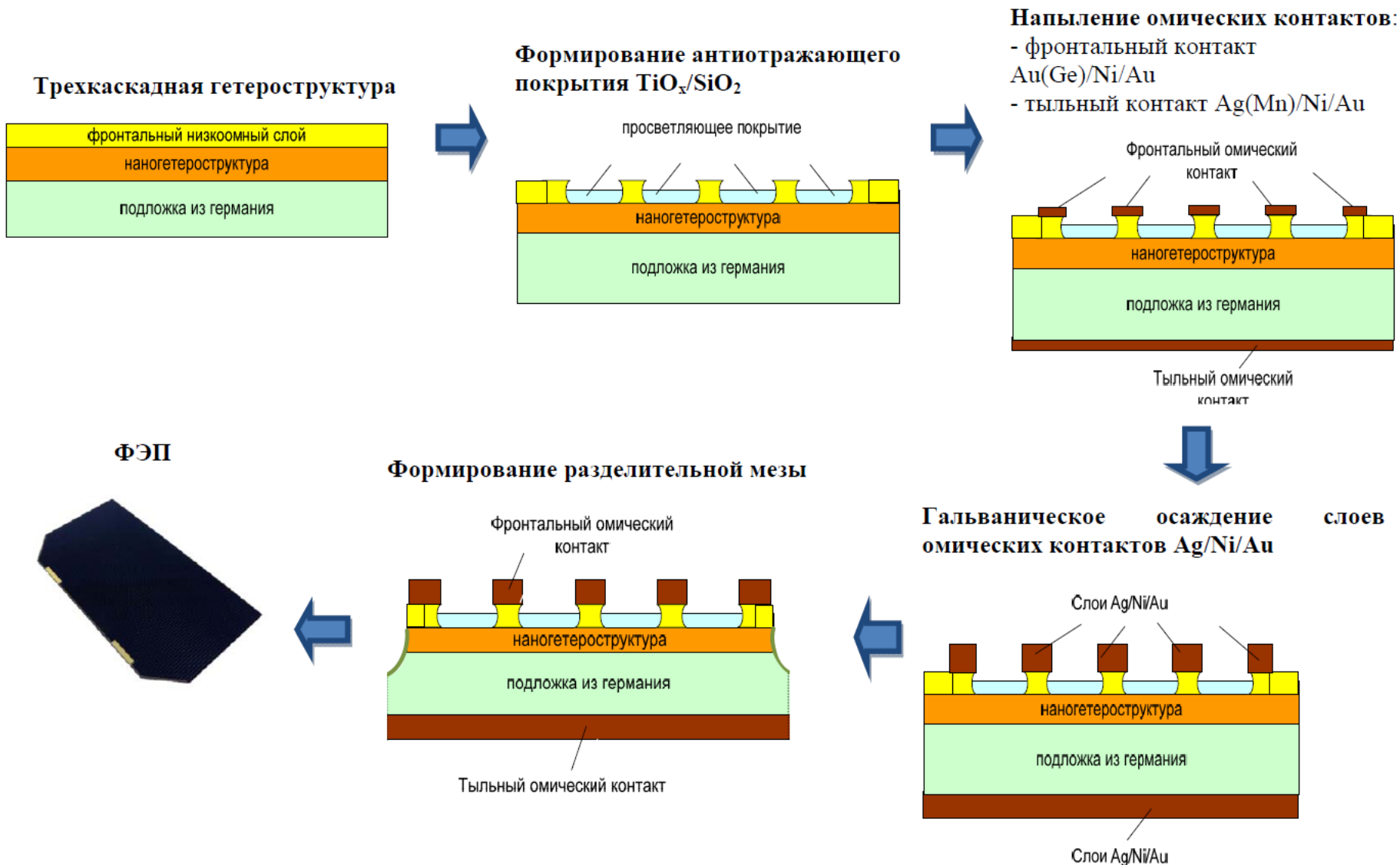
Будет разработана гибридная технология, включающая формирование «узкозонных» гетероструктур GaInAsNSb(1 эВ)/GaInAsNSb(0,75 эВ) или GaInAsNSb(1 эВ)/Ge(0.7 эВ) методом МЛЭ, с последующим дополнением широкозонными слоями GaInAs ($E_g = 1.4$ эВ) и (Al)GaInP ($E_g = 1.9$ эВ), выращиваемыми методом МОС-гидридной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



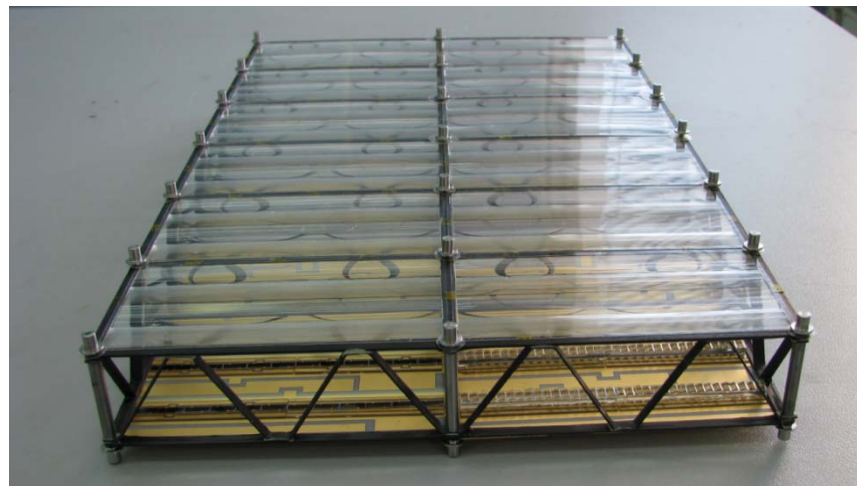
Постростовая технология создания космических каскадных ФЭП



Концентраторные модули для космических солнечных батарей на основе каскадных фотопреобразователей

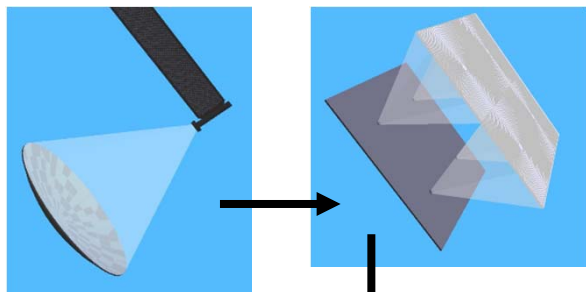


Макет первой отечественной солнечной батареи (10м²) с линзовыми концентраторами излучения и каскадными солнечными элементами

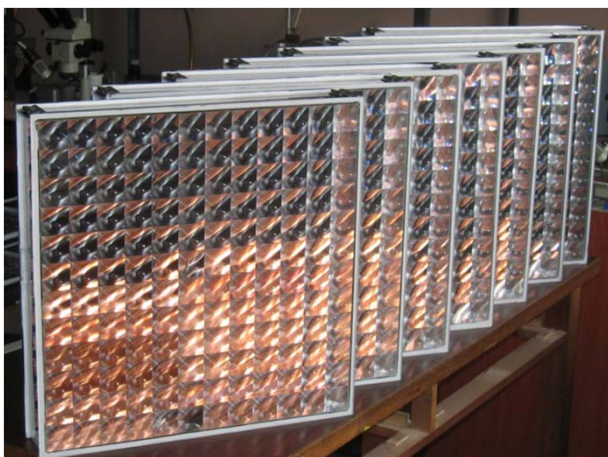


Фрагмент панели солнечной батареи (0,1м²) с линзовыми концентраторами солнечного излучения, состоящий из 12 фотоэлектрических субмодулей на несущем углепластиковом каркасе

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

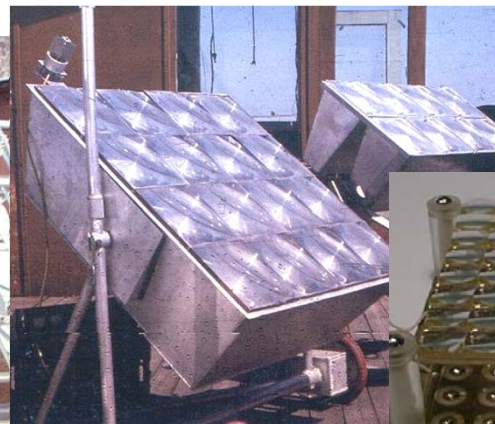
1980



1981

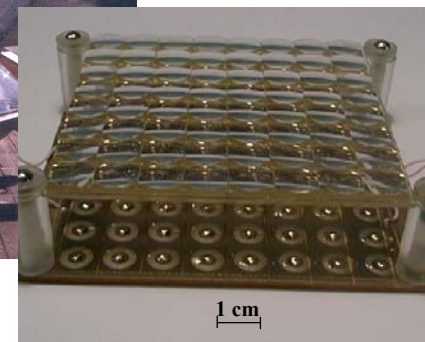


1985

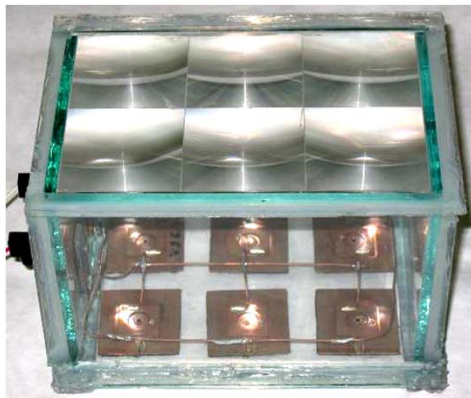


Fresnel lenses

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



SolFocus (США)
www.solfocus.com



Emcore (США)
www.emcore.com



Amonix Inc., USA
www.amonix.com

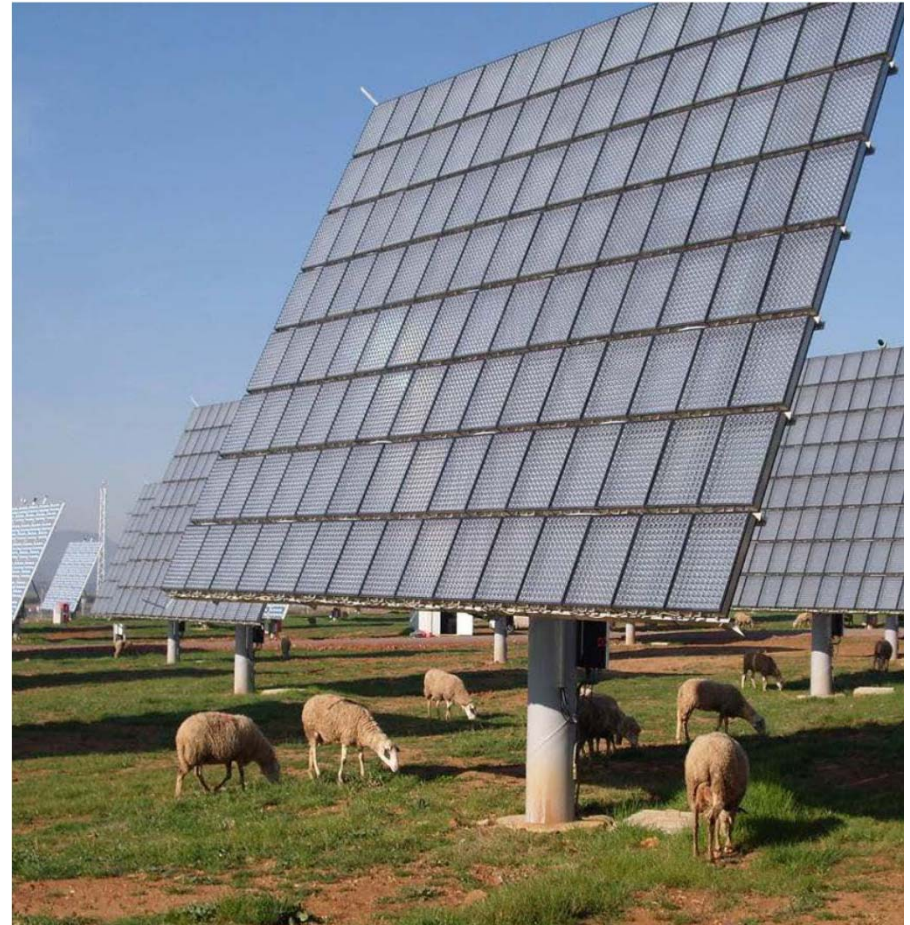


GreenVolts, Inc., USA



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

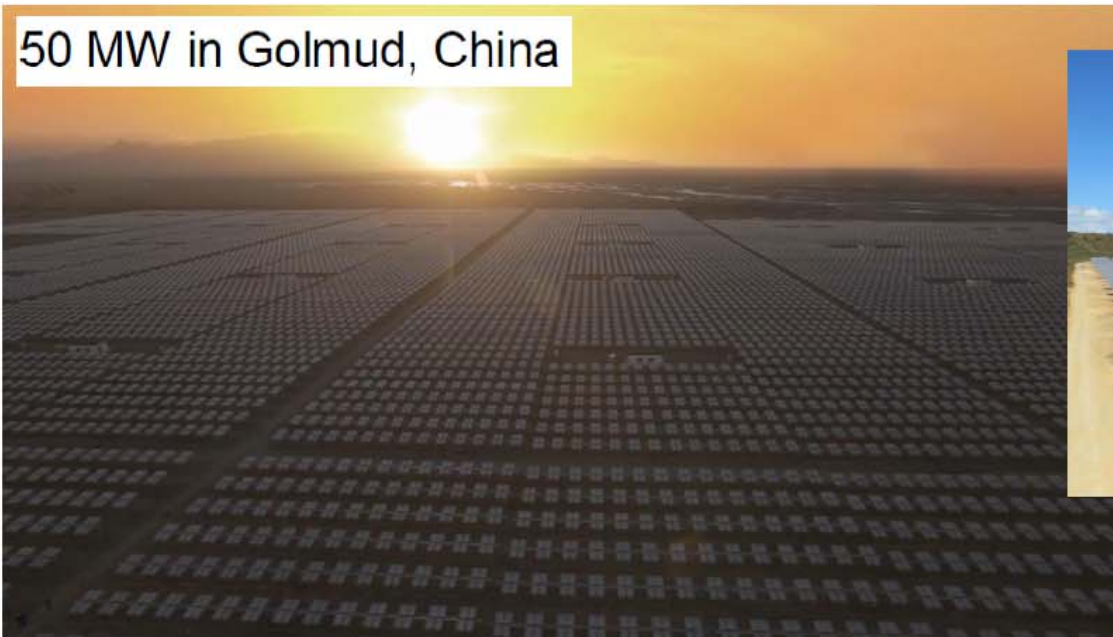
**Эффективное использование земли
под концентраторными энергоустановками: солнечная агроэнергетика**



High power CPV stations

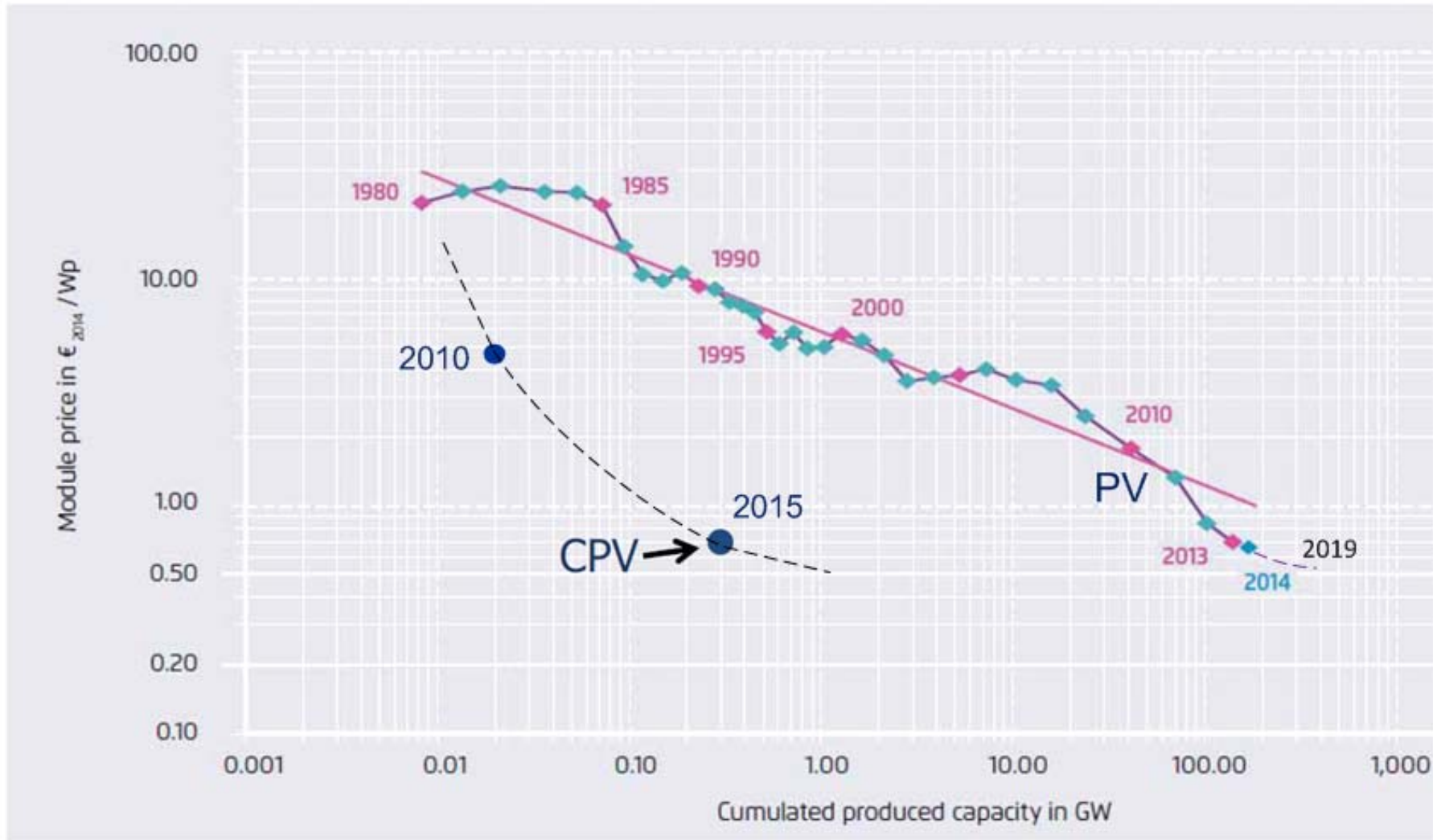


50 MW in Golmud, China



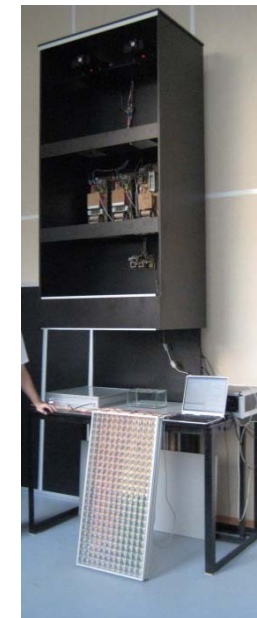
22 MW in Touwsrivier, South Africa

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!