

Концентраторная солнечная энергетика

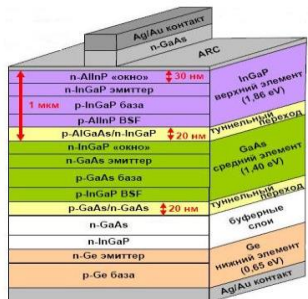
В.М.Андреев

Заведующий лабораторией Физико-технического института им.А.Ф.Иоффе РАН
Председатель секции «Фотоэлектрического преобразования энергии»
Научного совета РАН по проблеме «Методы прямого преобразования видов энергии»

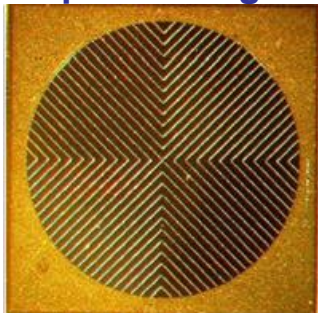
Содержание доклада

- 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

MOCVD growth of MJ cell structure



Postgrowth processing



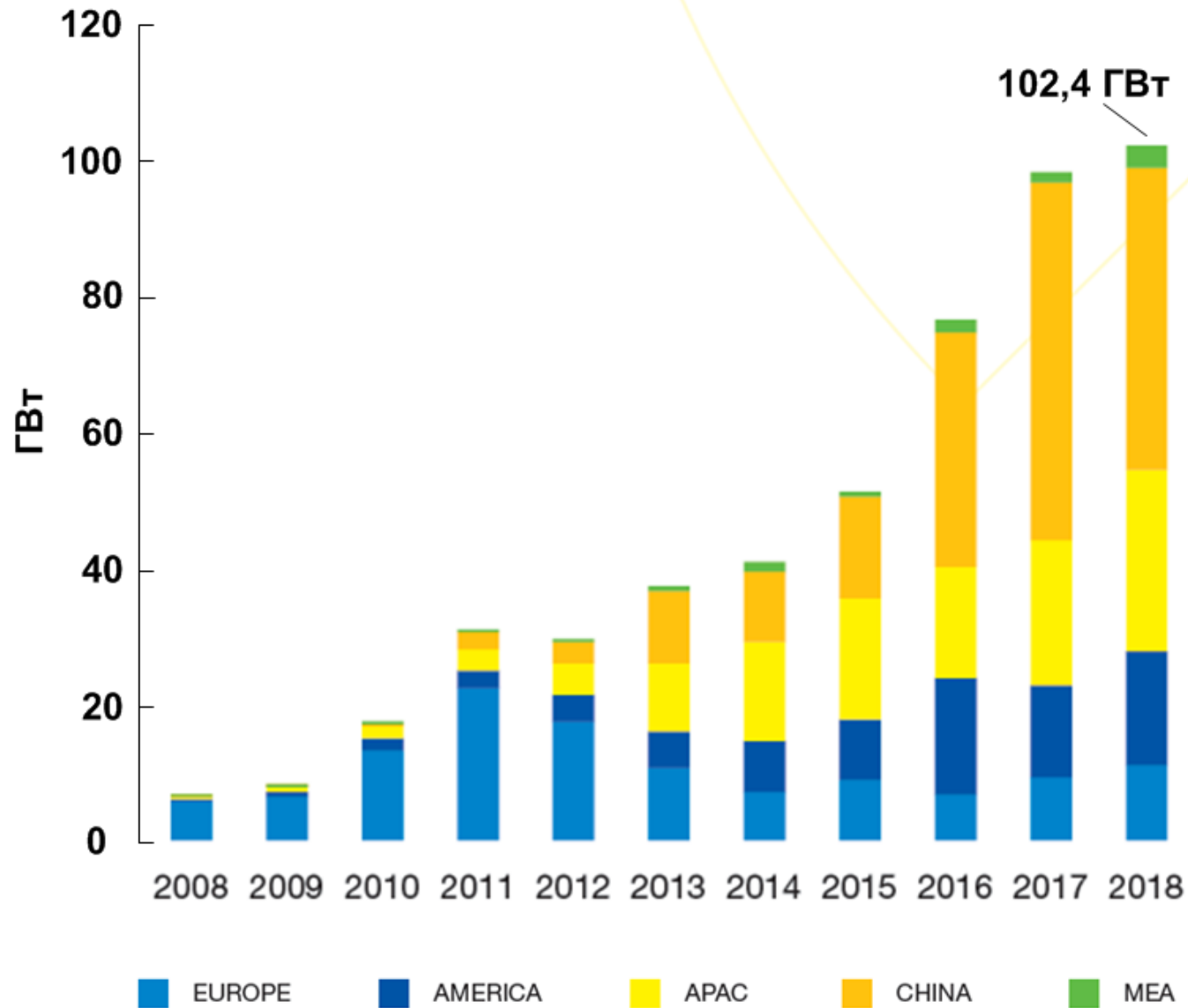
CPV modules based on MJ cells and Fresnel lenses



CPV systems with suntrackers

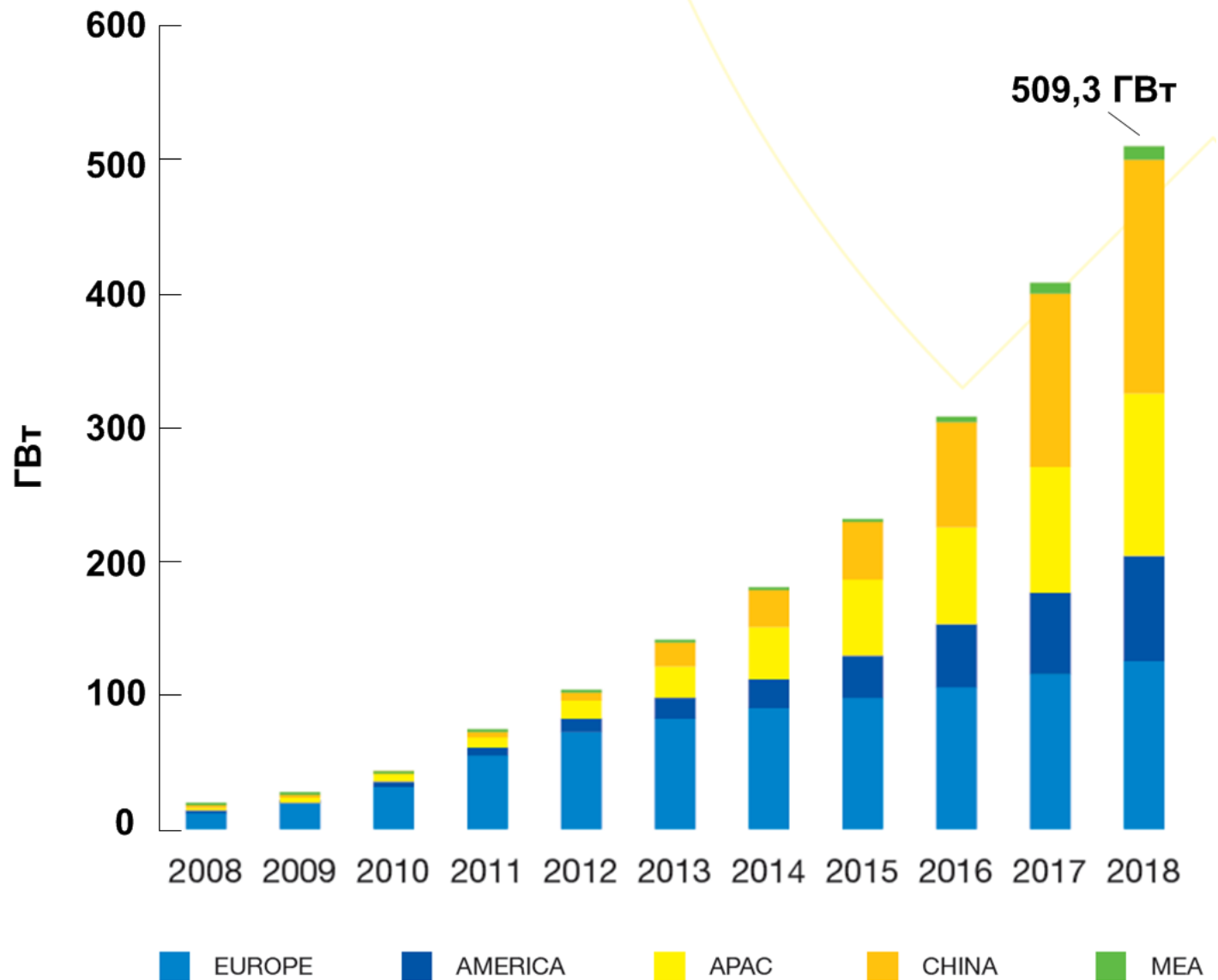


Эволюция мирового ежегодного производства солнечных фотоэнергосистем (ГВт/год)



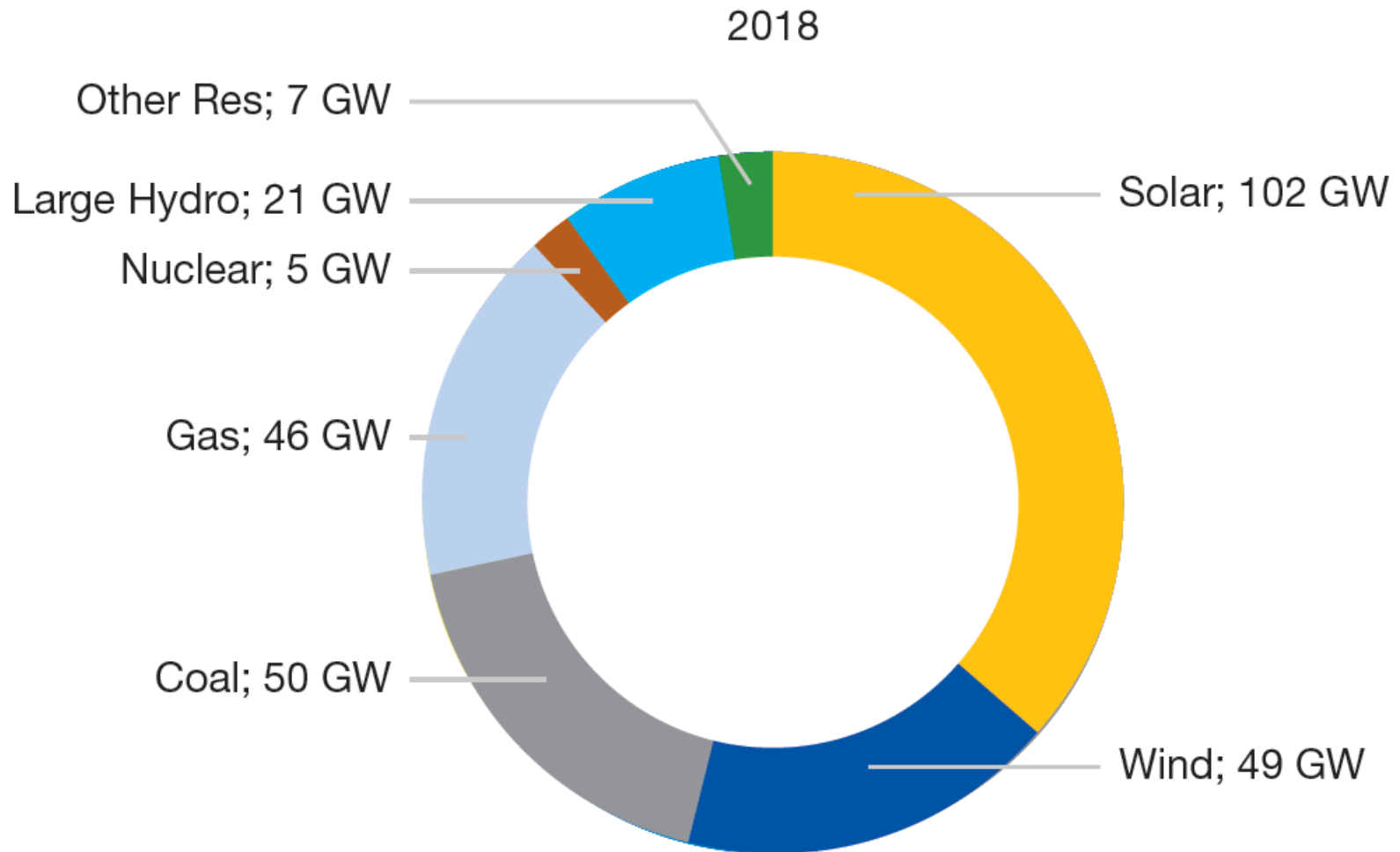
(source: Solar Power Europe 2019)

Суммарная мощность установленных в мире солнечных батарей



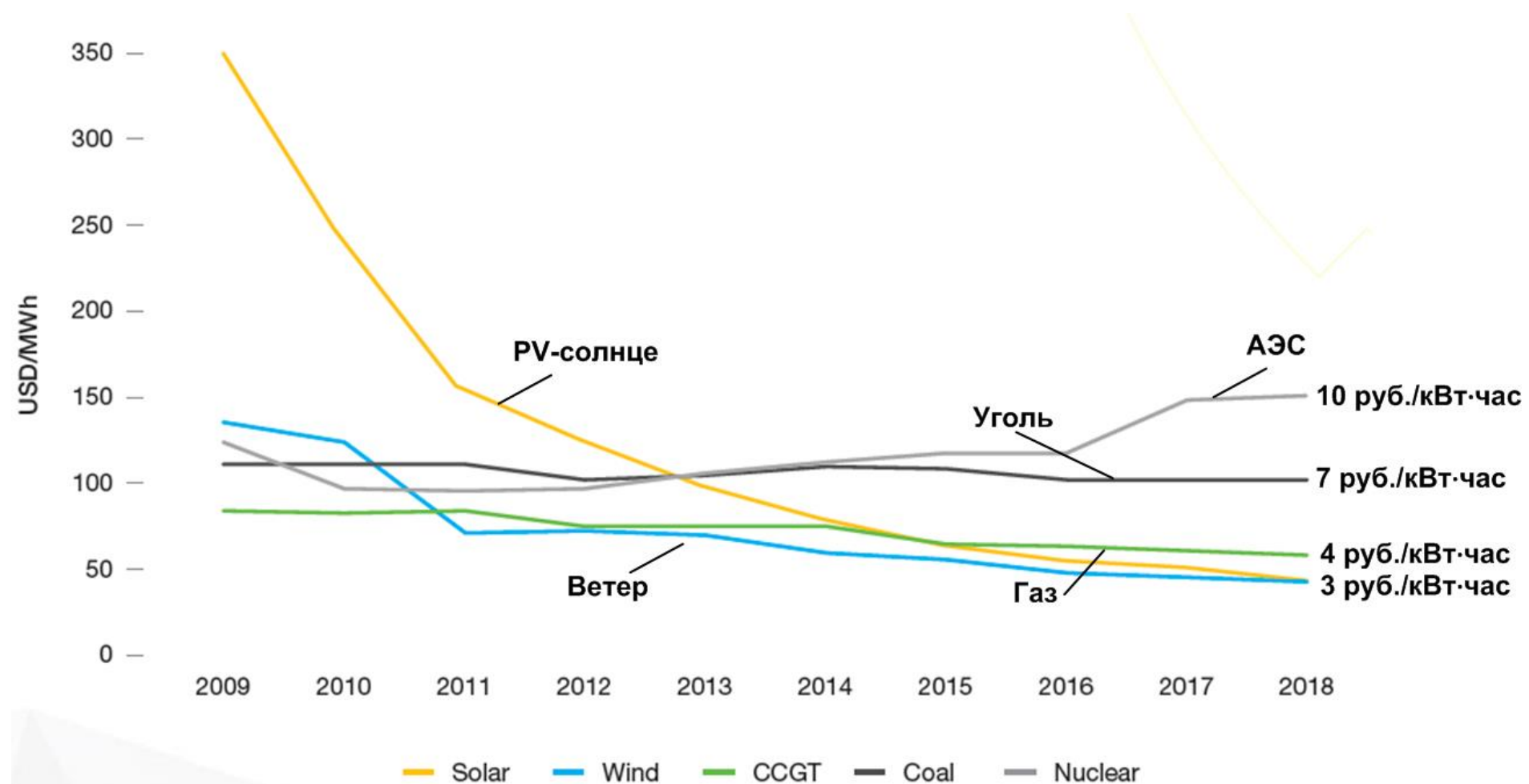
(source: Solar Power Europe 2019)

Мощности электрогенерации, добавленные в мире в 2018 г.



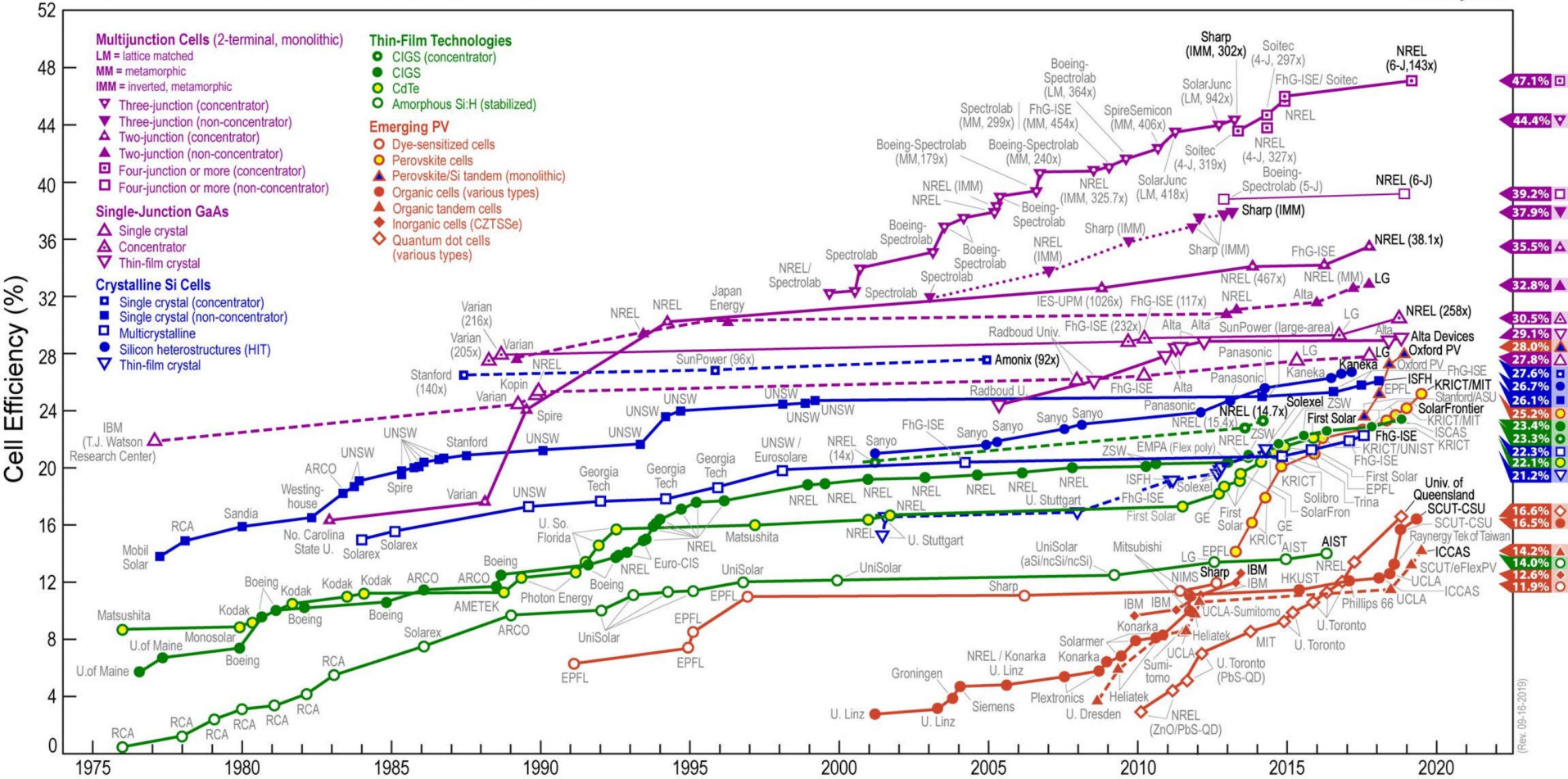
Source: Global Energy Monitor (2019); IRENA (2019); SolarPower Europe (2019).

Стоимость электричества, генерируемого различными источниками энергии, USD/MWh



Source: Lazard (2018). All prices in 2019 USD.

Best Research-Cell Efficiencies



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

Гетероструктурные фотопреобразователи для космических солнечных батарей

- 1969 – создание в ФТИ им.А.Ф.Иоффе впервые в мире AlGaAs/GaAs гетероструктурных космических фотоэлектрических преобразователей (ФЭП)
- С 1972 – 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

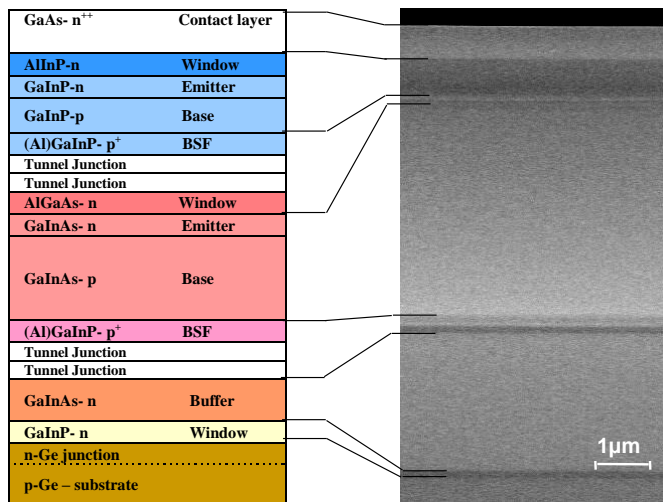
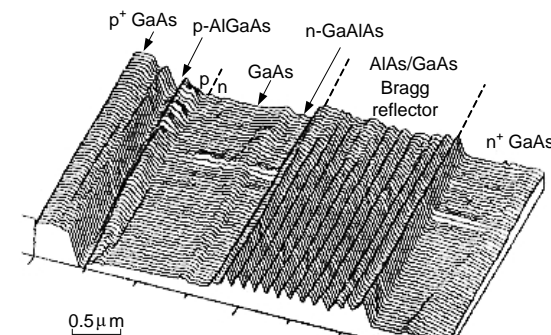
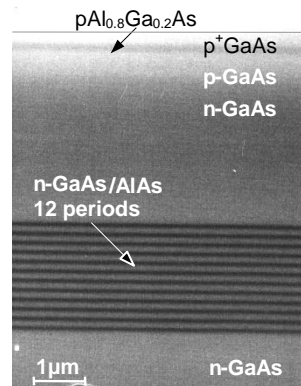


Каскадные солнечные элементы (КСЭ) на основе АЗВ5 наногетероструктур

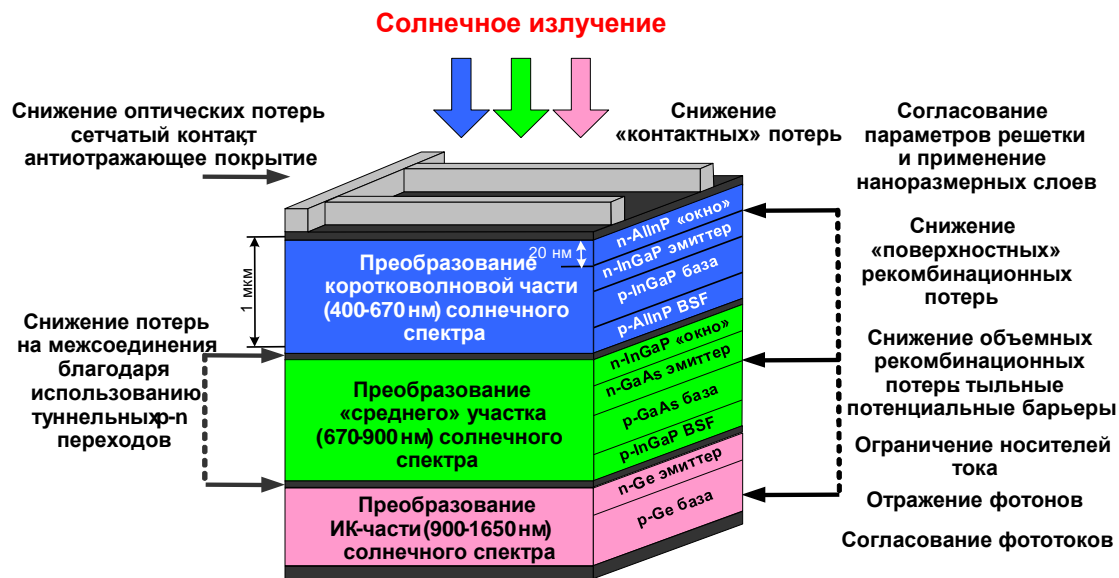
МОС-гидридная технология выращивания каскадных гетероструктур



Гетероструктуры с Брэгговским рефлектором с эффективным поглощением «подзонных» фотонов

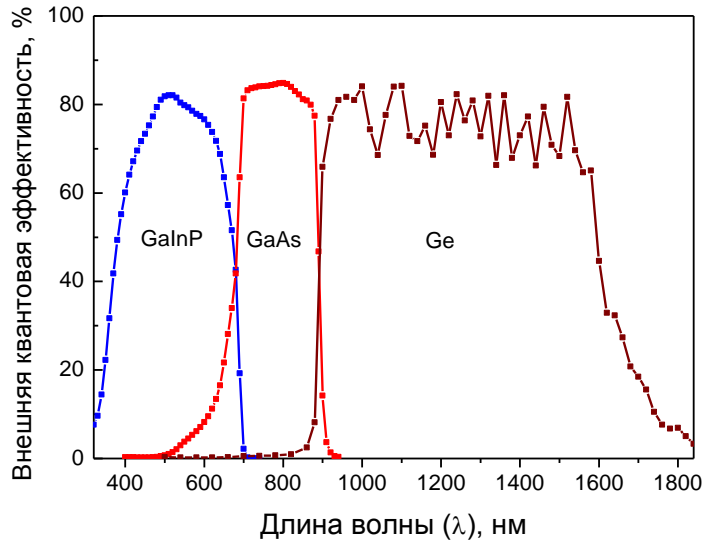


GaInP/GaAs/Ge гетероструктура каскадного солнечного элемента, КПД~40%

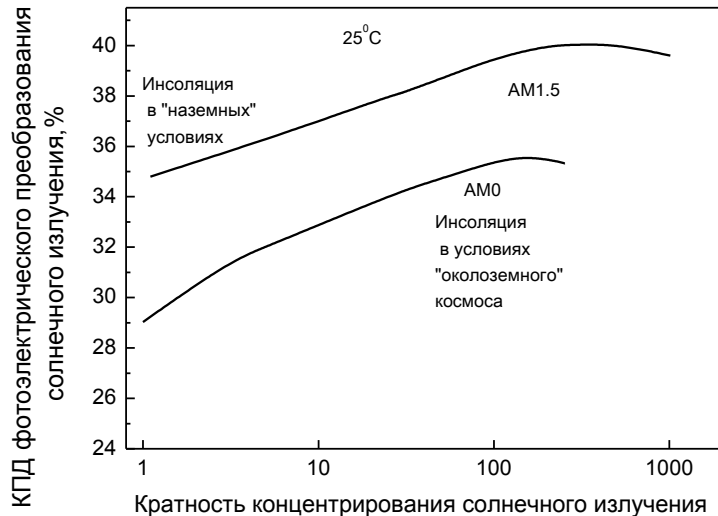


Пути увеличения эффективности каскадного солнечного элемента

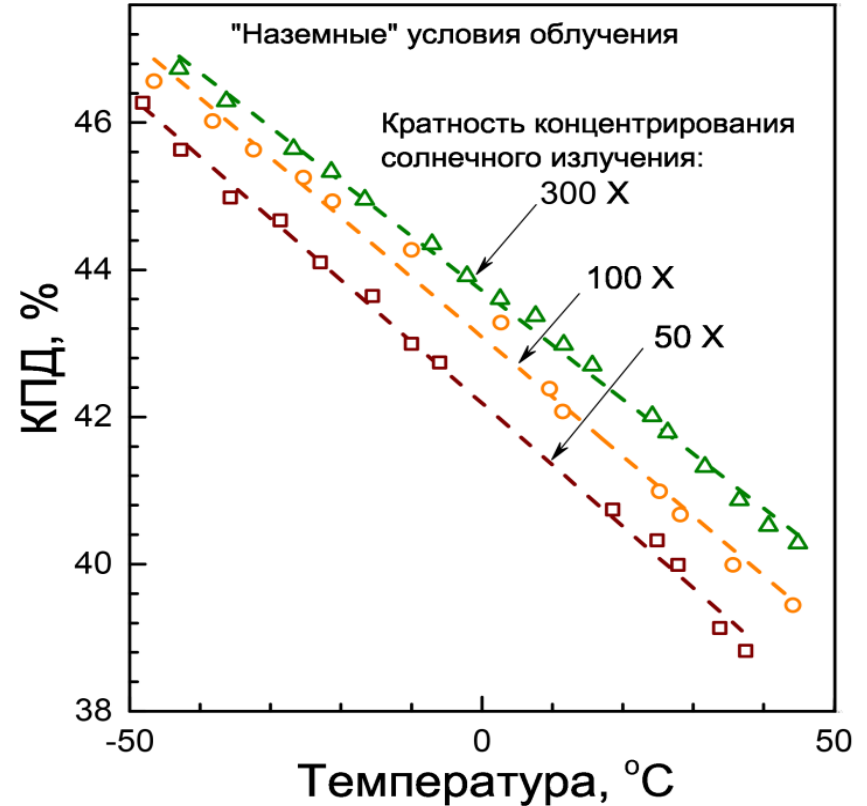
Характеристики каскадных солнечных элементов на основе гетероструктур GaInP/GaAs/Ge



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

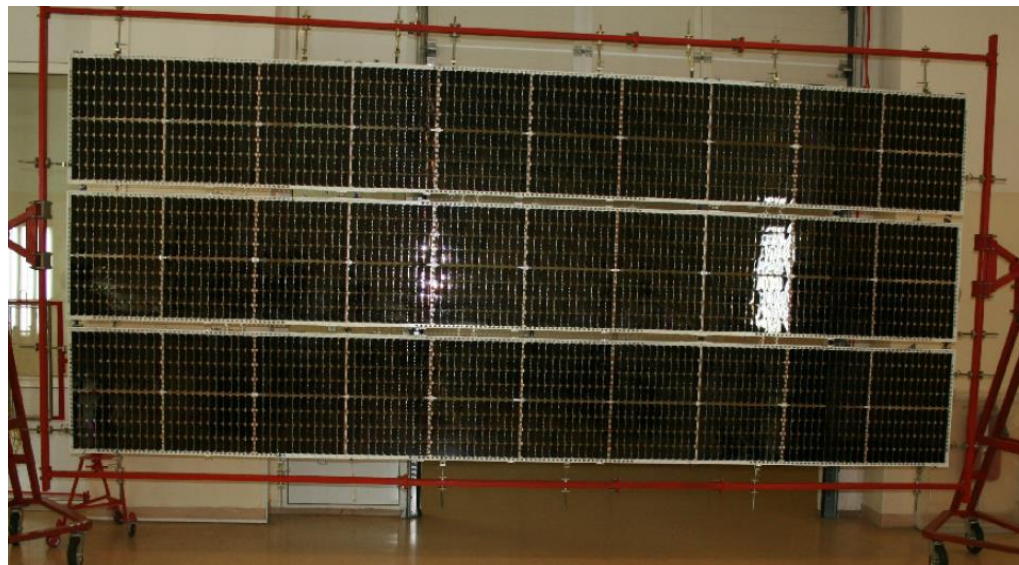
Промышленное освоение (ПАО «Сатурн») высокоэффективных радиационностойких каскадных фотоэлектрических преобразователей космического назначения

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.

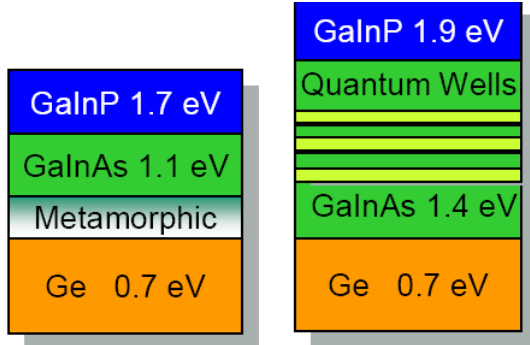
Технология внедрена на предприятии ОАО «Сатурн» (г. Краснодар) на первом в России производстве каскадных космических батарей и обеспечила более, чем двукратное увеличение удельного энергосъема и ресурса работы по сравнению с ранее выпускавшимися кремниевыми батареями.



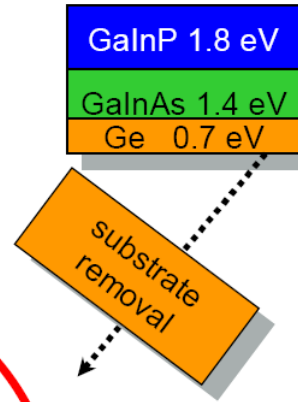
Космическая солнечная батарея (~ 10 м²) на основе каскадных фотопреобразователей, изготовленных на оборудовании ПАО «Сатурн» по технологии, разработанной в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН

The ways of efficiency increase of multijunction SC

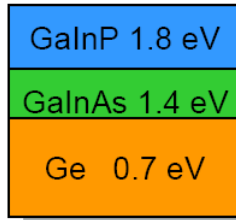
Improved current matching



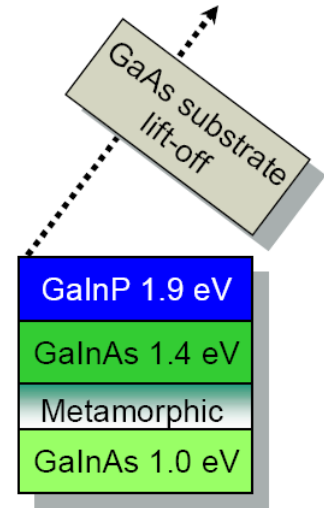
Ultra-thin lift-off devices



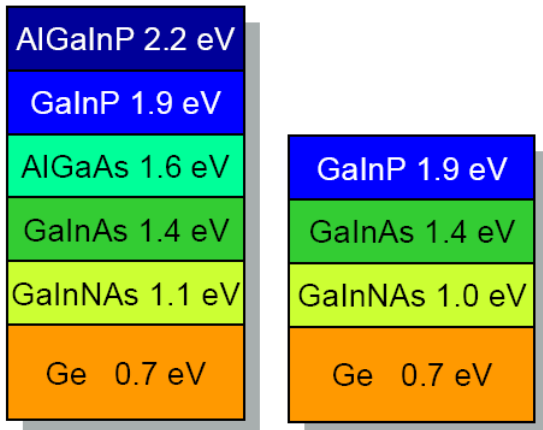
Industry Standard $\eta=40\%$



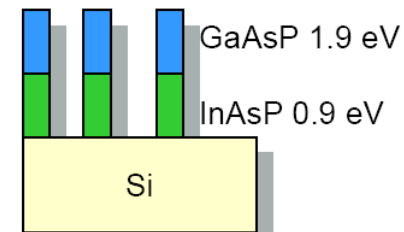
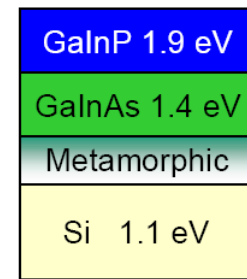
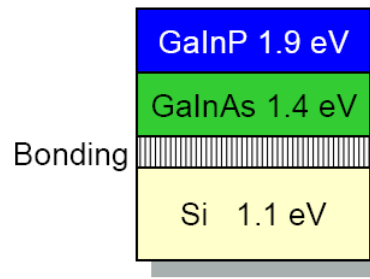
Inverted devices

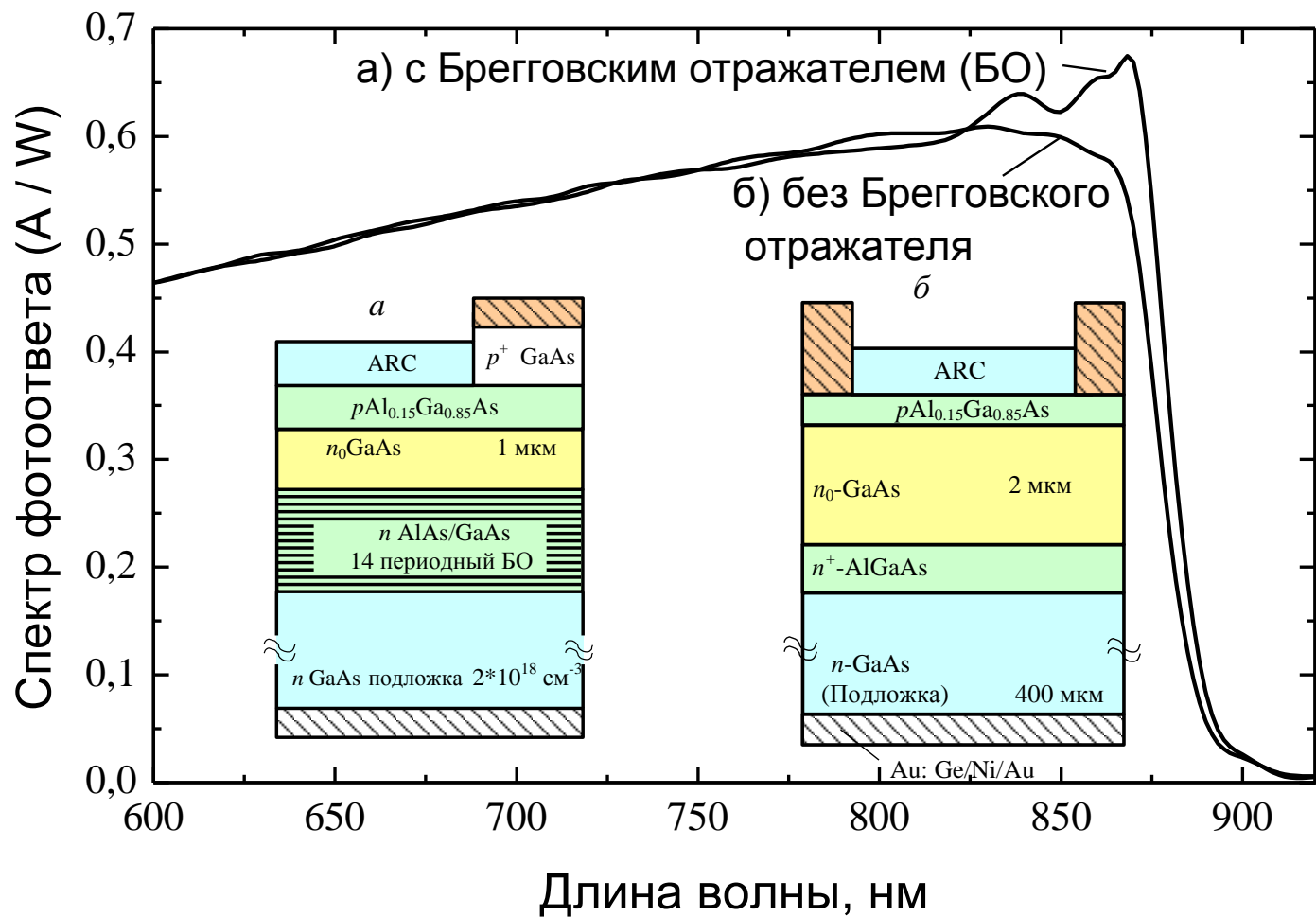


More junctions



III-V Solar cells on Si





Фотоответ в AlGaAs/GaAs фотопреобразователях двух типов: с Брегговскими отражателями (БО) и без отражателя.

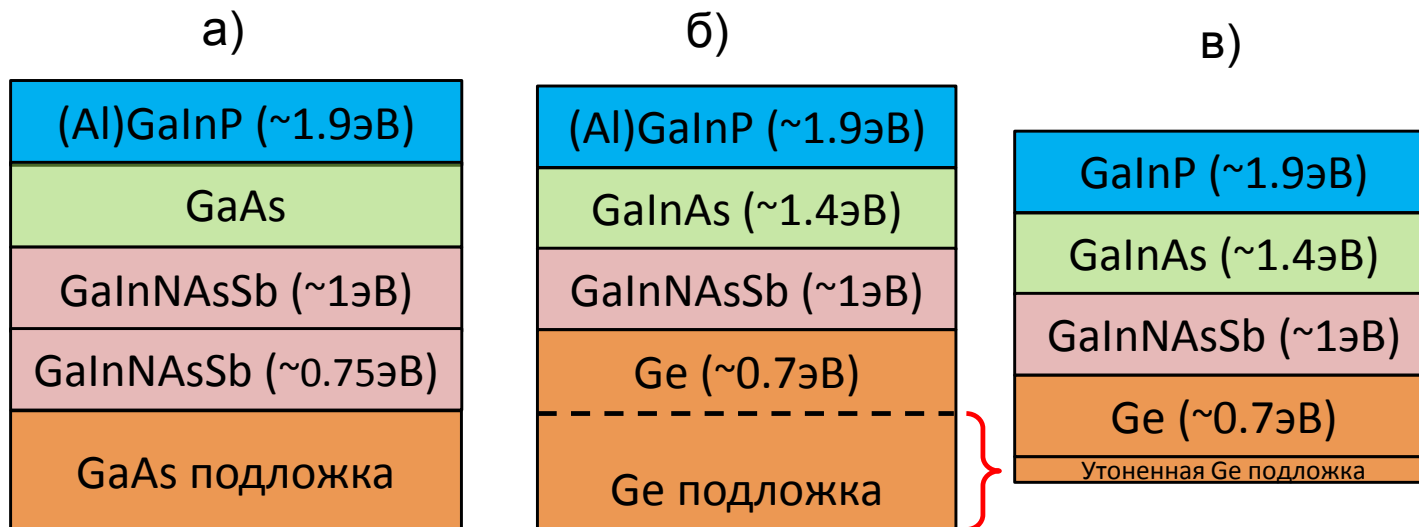
Разработка гибридной «молекулярно-лучевая (МЛЭ) + МОС-гидридная» технологии каскадных фотоэлектрических преобразователей.

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.

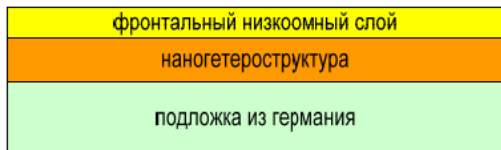
Предполагаемые результаты работы: достижение КПД более 32% в 4-х переходных КФЭП.

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

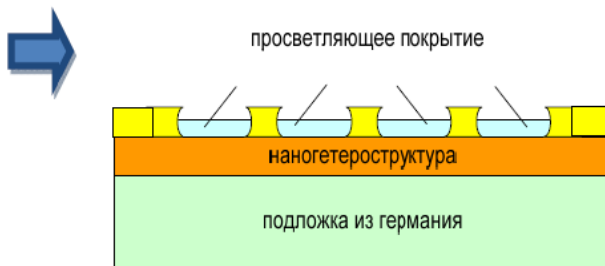


Постростовая технология создания космических каскадных ФЭП

Трехкаскадная гетероструктура

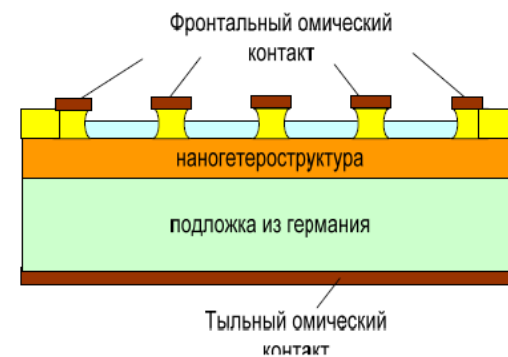


Формирование антиотражающего покрытия TiO_x/SiO_2



Напыление омических контактов:

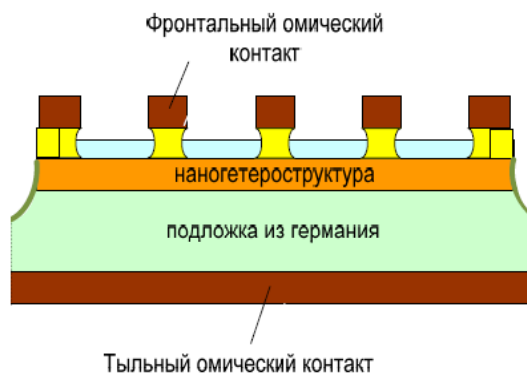
- фронтальный контакт $Au(Ge)/Ni/Au$
- тыльный контакт $Ag(Mn)/Ni/Au$



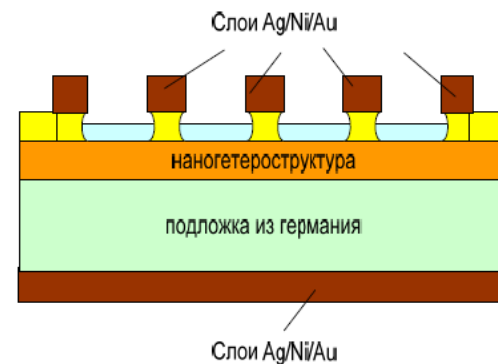
ФЭП



Формирование разделительной мезы



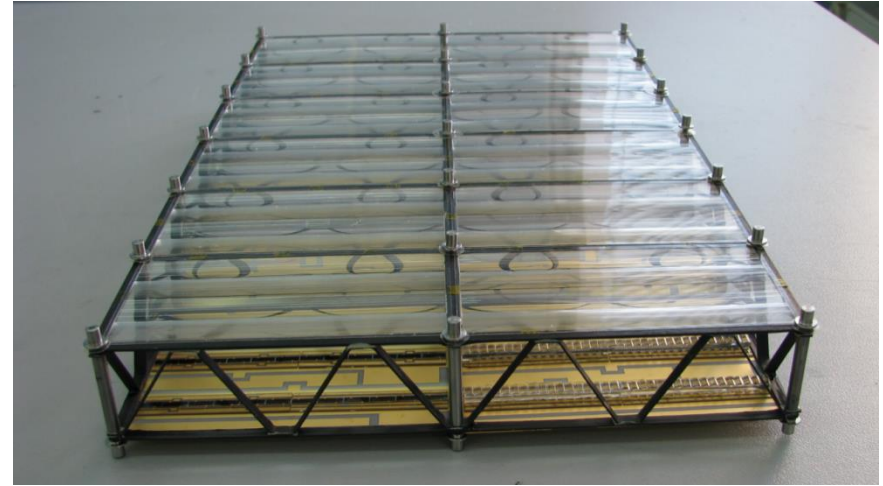
Гальваническое осаждение слоев омических контактов $Ag/Ni/Au$



Концентраторные модули для космических солнечных батарей на основе каскадных фотопреобразователей



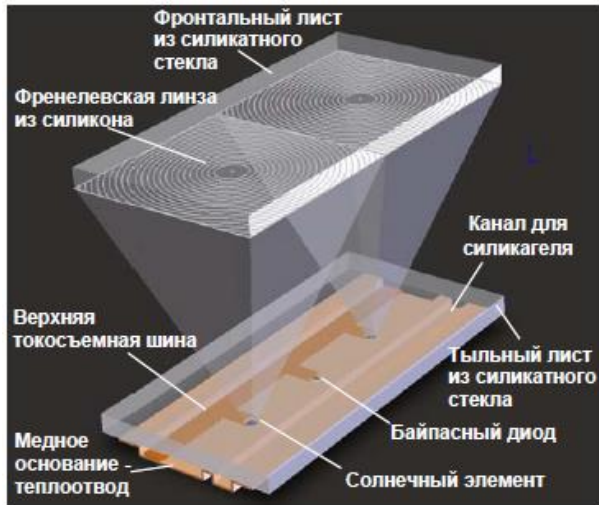
Макет первой отечественной солнечной батареи (10м²) с линзовыми концентраторами излучения и каскадными солнечными элементами на несущем углепластиковом каркасе, предназначенный для проведения комплекса предполетных испытаний



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

Отечественная технология каскадных солнечных элементов обеспечивает импортозамещение при создании космических солнечных батарей

Возможности использования разрабатываемых космических каскадных солнечных элементов в наземных солнечных энергоустановках с концентраторами



Фрагмент наземного концентраторного модуля на основе каскадных СЭ и круговых линз Френеля

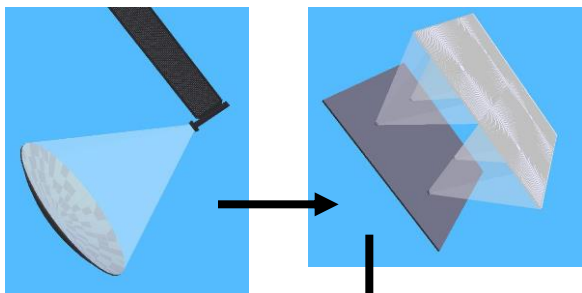


Солнечная энергоустановка на основе 2592 линз Френеля и каскадных солнечных элементов

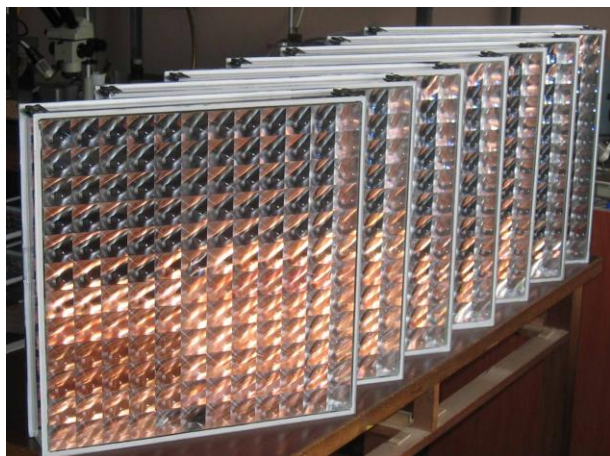
Наземные солнечные энергоустановки с каскадными солнечными элементами обеспечивают:

- 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.

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)

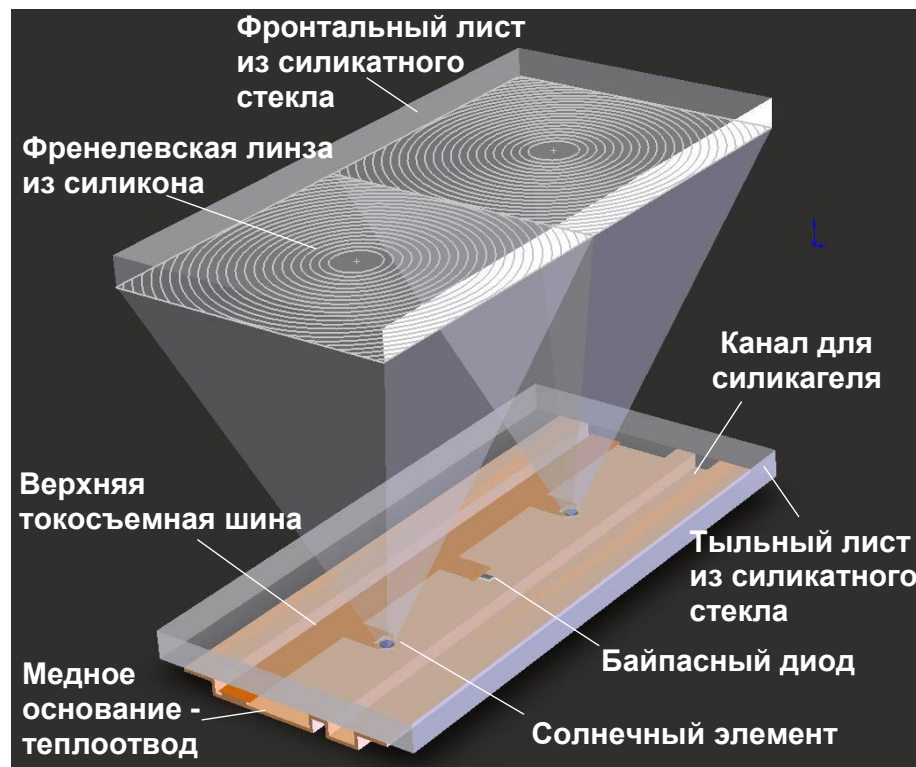
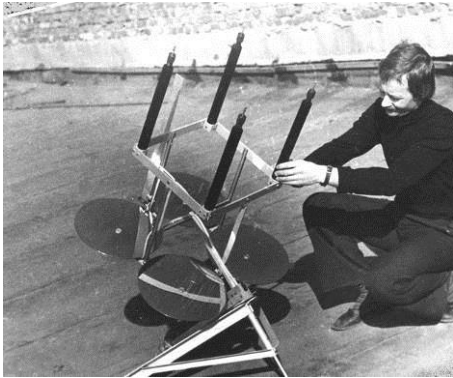


Схема концентраторного модуля с минилинзами Френеля

High concentration solar PV concept at the Ioffe Institute

parabolic mirrors

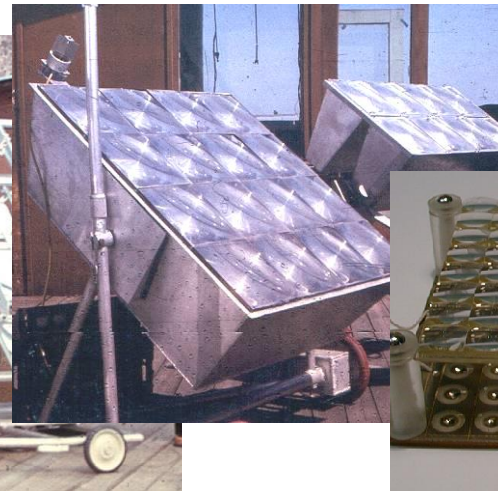
1980



1981

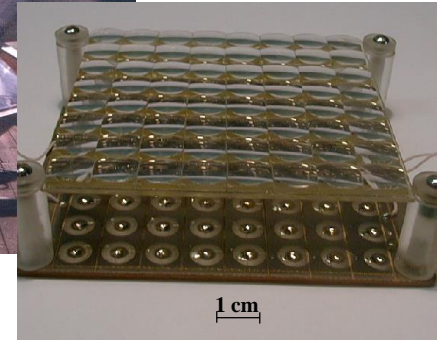


1985

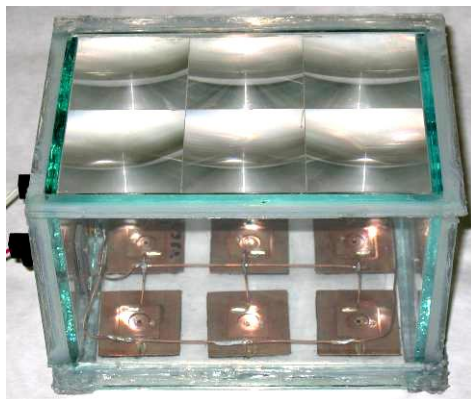


Fresnel lenses

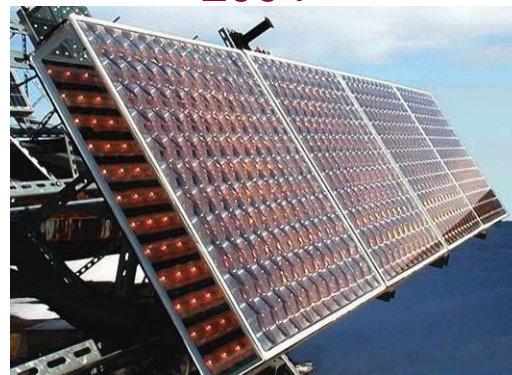
1990



1998



2004



2005



Fresnel lens panels (“silicone on glass” design)

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

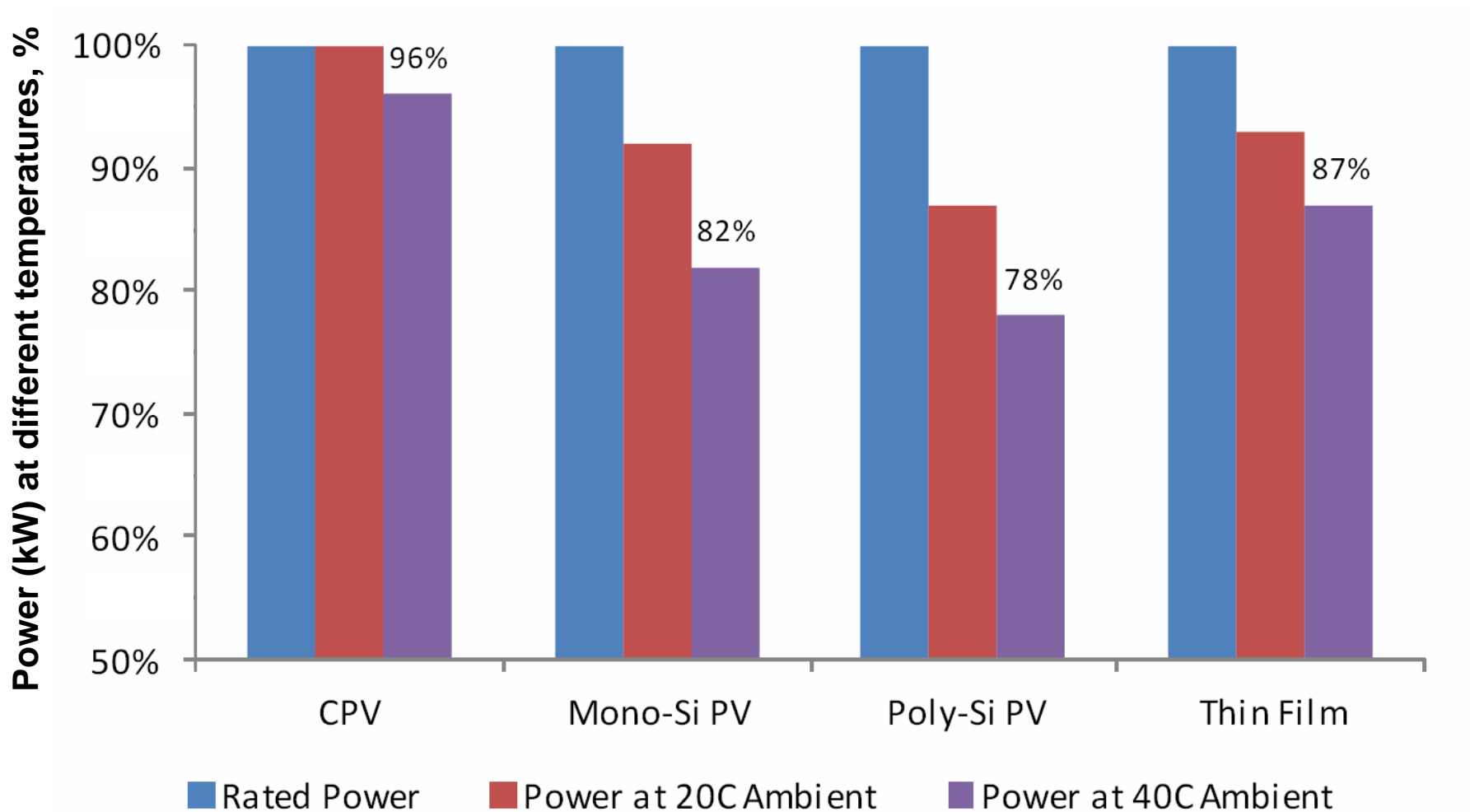


GreenVolts, Inc., USA



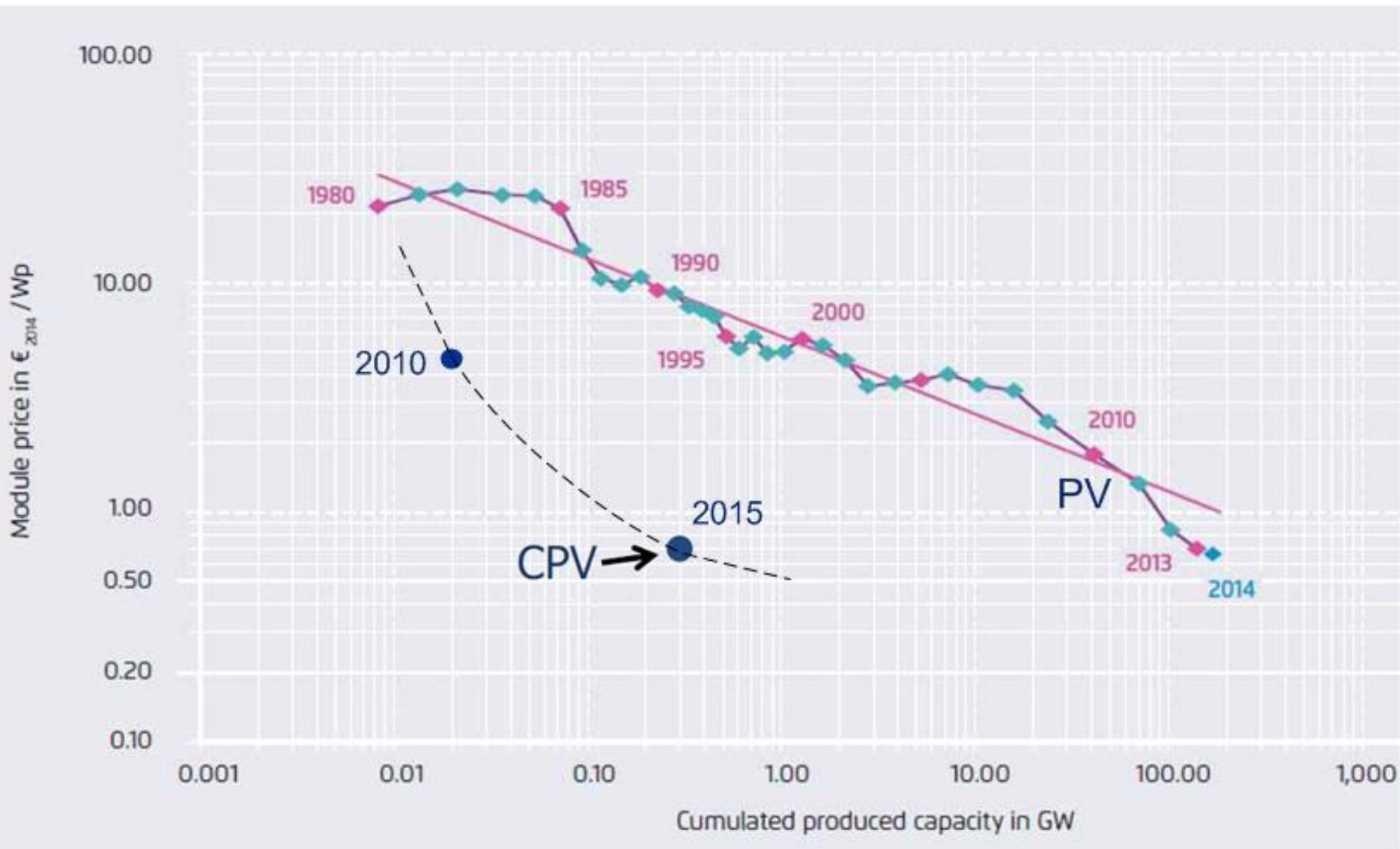
SolarSystems,
<http://solarsystems.com.au>

CPV is better at high temperature



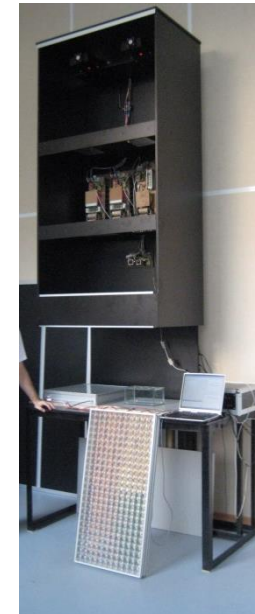
Source: V.Shah, CPV Technology Roundtable, Santa Barbara, 2012

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

ФТИ им. А.Ф.Иоффе совместно с ОАО «Элеконд»

Реализуемый проект «Высокоэффективные фотоэнергосистемы на основе каскадных солнечных батарей» президентской программы грантов (Российский научный фонд)

Цели проекта:

- Разработка высокоэффективных фотоэнергосистем на основе каскадных солнечных батарей, в том числе, развитие технологии изготовления каскадных солнечных элементов для преобразования высококонцентрированного (до 1000 крат) солнечного излучения
- Развитие конструкций концентраторных модулей системами слежения за положением Солнца
- Системы мониторинга и системы интеллектуального распределения энергии для использования в составе автономных энергосистем.
- Передача выполненных разработок в промышленность (ОАО «Элеконд») и запуск производства фотоэнергосистем позволит вывести на рынок продукцию нового поколения, которая способна улучшить качество жизни граждан Российской Федерации

Достиженные результаты:

- Разработаны концентраторные фотоэлектрические модули с КПД более 30%
- Разработаны системы слежения с повышенной устойчивостью к ветровой нагрузке
- Разработана система мониторинга за работой фотоэнергоустановок
- Разработан проект технологической линии производства концентраторных фотоэлектрических модулей

Эффективное использование земли под концентраторными энергоустановками: солнечная агроэнергетика



Заключение

Преимущества концентраторных фотоэнергосистем:

- Повышение КПД каскадных фотопреобразователей до 40% при 500-1000 «солнцах»;
- Снижение площади полупроводниковых ФЭП в 500-1000 раз пропорционально кратности концентрирования;
- Увеличение в 2-3 раза (к солнечным элементам на основе кремния и тонких пленок) количества электроэнергии, вырабатываемой концентраторными солнечными модулями с единицы площади за счет большей эффективности ФЭП и слежения за Солнцем;
- Низкая себестоимость концентраторных фотоэнергостановок вследствие малой материалоемкости фотоэнергосистем;
- время возврата электроэнергии, затраченной на изготовление энергоустановок, составляет около 1 года.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!