

Высокоэффективные фотоэнергосистемы на основе каскадных солнечных батарей

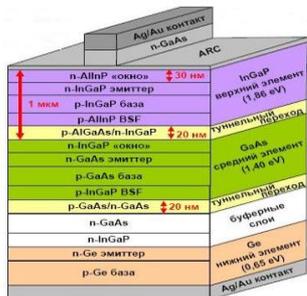
В.М.Андреев

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»

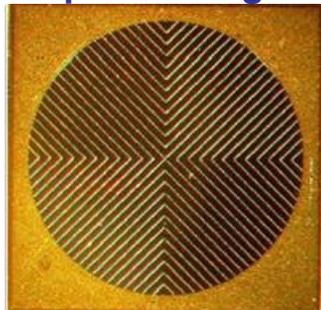
Содержание доклада

- Высокоэффективные гетероструктурные преобразователи солнечной энергии
- Каскадные фотопреобразователи и модули для космических солнечных батарей
- Наземные концентраторные модули солнечных батарей на основе каскадных фотопреобразователей
- Концентраторные фотоэнергосистемы со слежением за Солнцем

MOCVD growth of MJ cell structure



Postgrowth processing



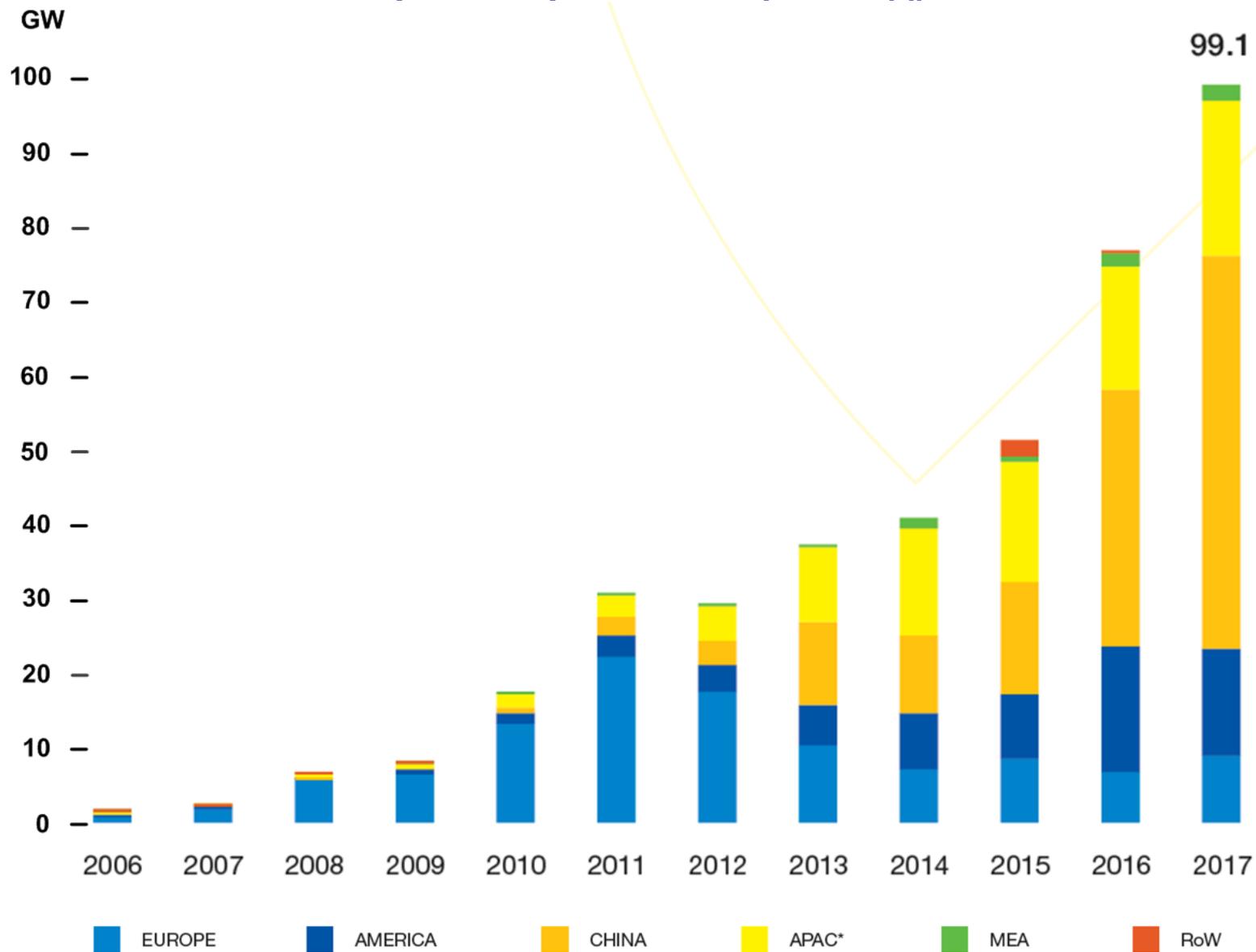
CPV modules based on MJ cells and Fresnel lenses



CPV systems with suntrackers

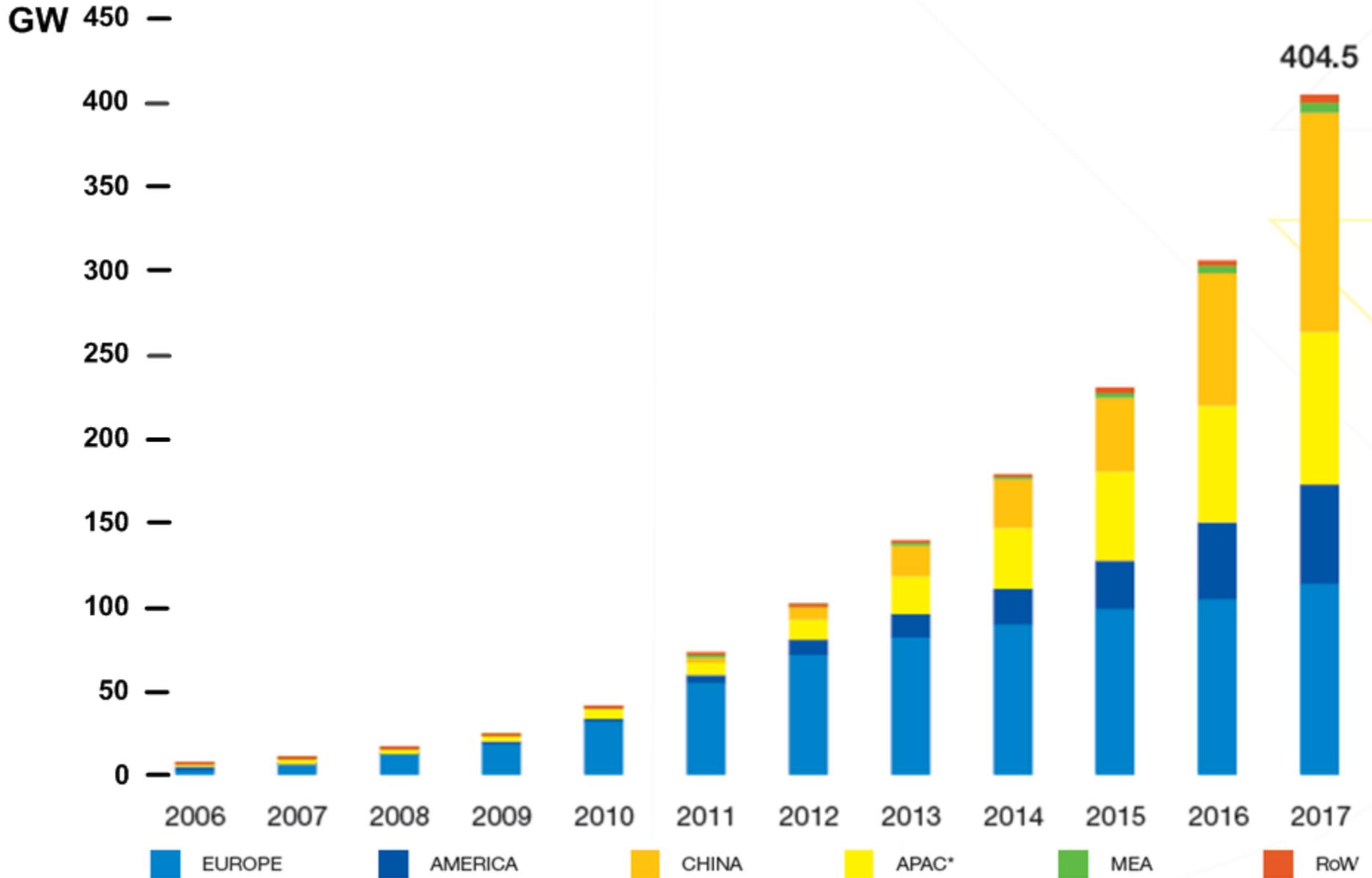


Эволюция мирового ежегодного производства солнечных фотоэнергосистем (ГВт/год)



(source: Solar Power Europe 2018)

Суммарная мощность установленных в мире солнечных батарей



(source: Solar Power Europe 2018)

Three generations of terrestrial solar photovoltaics:

I



Crystalline silicon

II



Thin Film α -Si, CdTe, CIGS

III



III-V solar cells with concentrators

Concentrator photovoltaic installations based on III-V solar cells with Sun



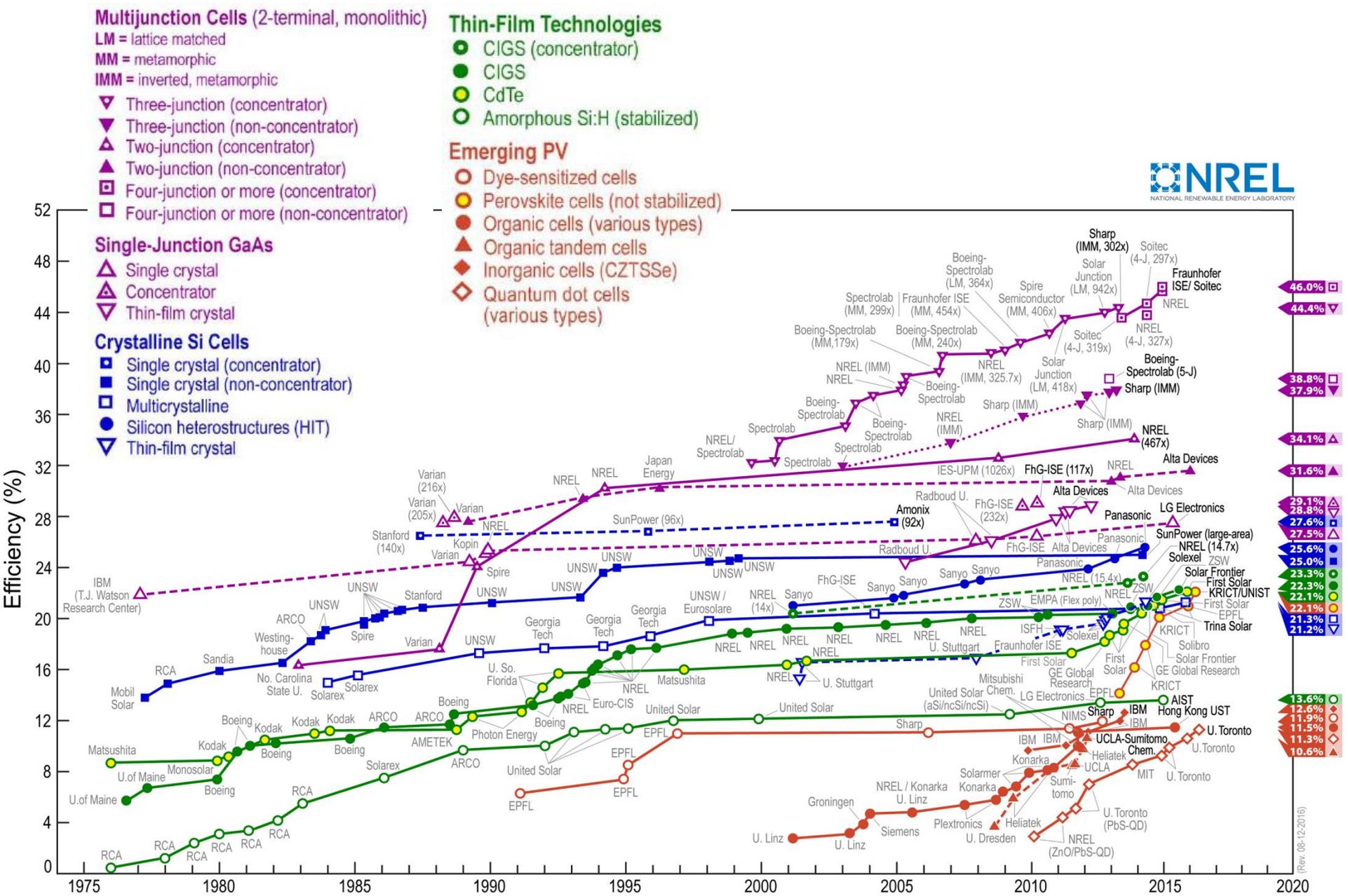
Ioffe Institute



“Solar Systems”



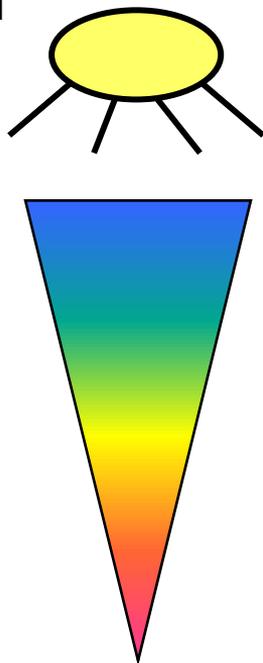
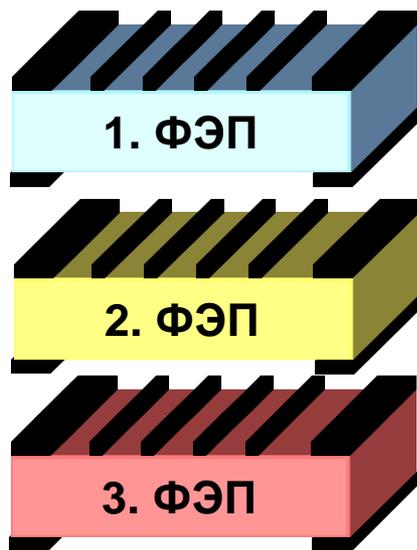
“Isofoton”



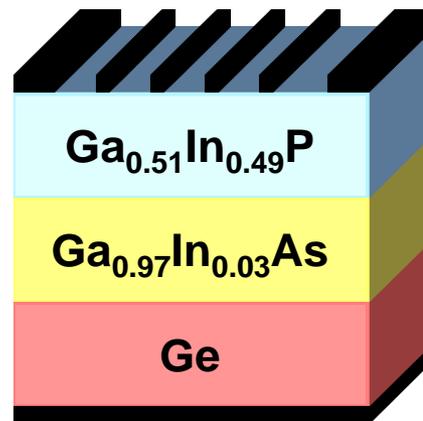
* This plot is courtesy of the National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO

Структуры каскадных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП)

Механически-стыкованный каскадный ФЭП



Монолитный каскадный ФЭП

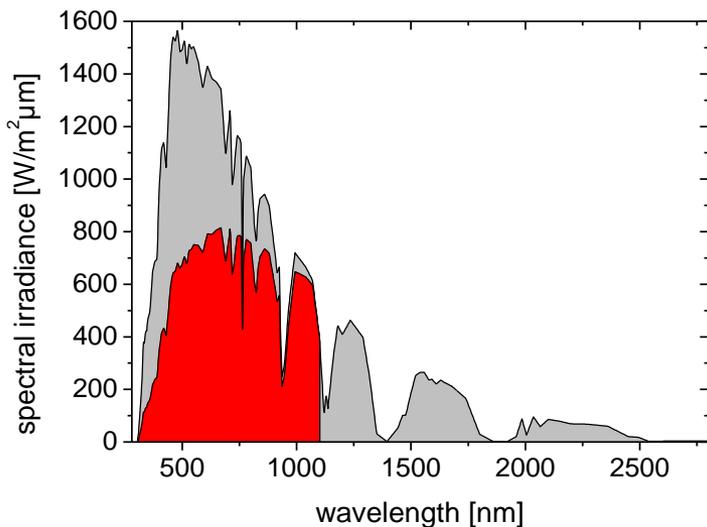
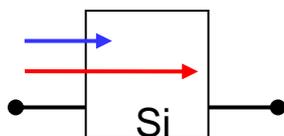


↓
Уменьшение
ширины
запрещенной
зоны
↓

В монолитных каскадных солнечных элементах достигнуты значения КПД:
> 30% для космического солнечного излучения (AM0);
> 40% для концентрированного наземного солнечного излучения
(500-1000 «солнц», AM1.5)

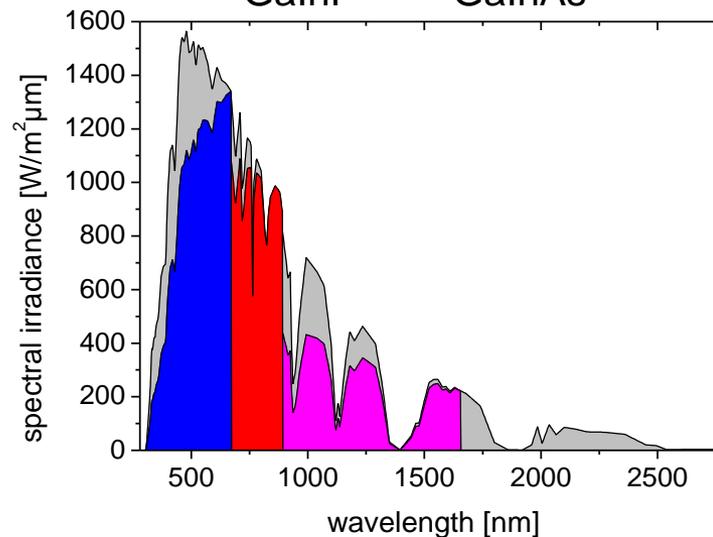
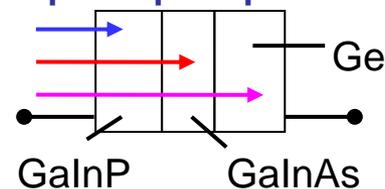
Преимущество каскадных фотопреобразователей солнечной энергии: более эффективное использование энергии солнечного излучения

Кремниевые
фотопреобразователи



Доля спектра солнечного излучения, преобразуемая кремниевыми солнечными элементами

Каскадные
фотопреобразователи



Увеличение доли солнечного спектра, преобразуемого каскадными фотопреобразователями на основе нано-гетероструктур

Early developments of III-V-heterostructure solar cells and terrestrial CPV installations at the Ioffe Institute

1967 – discovery of “ideal” AlGaAs/GaAs heterojunctions

1969 – the first AlGaAs/GaAs heterostructure solar cells

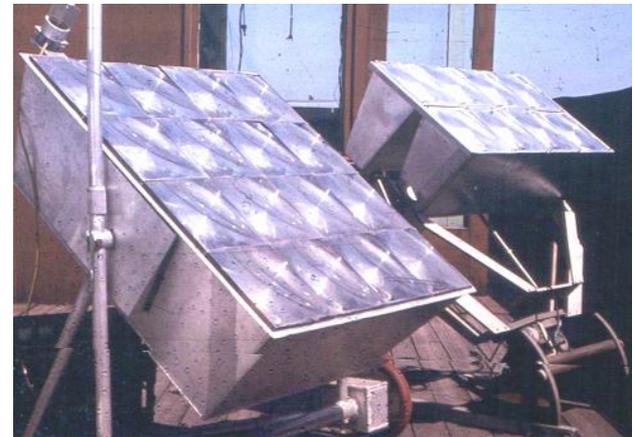
1976 - AlGaAs/GaAs concentrator solar cells with efficiency of >25% at 1000 suns

1980 – the first CPV installations with III-V heterostructure solar cells

1986 – CPV modules and installations based on Fresnel lens panels and sun trackers



CPV installation based on parabolic mirrors (1981). Rightmost: Prof. Zh.Alferov, center – Dr.Rumyantsev, left – Prof.Tuchkevich



CPV installation based on Fresnel lenses (1986)

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 энергоъема и срока эксплуатации, уменьшение веса и размеров солнечных батарей

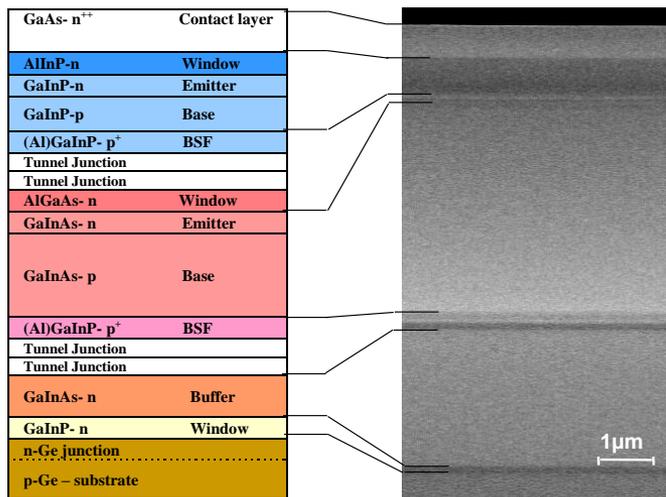
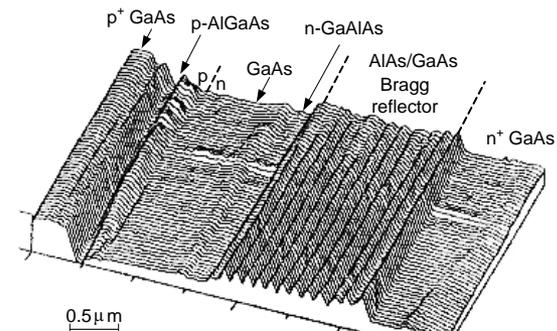
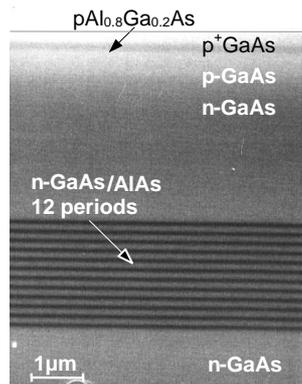


Каскадные солнечные элементы (КСЭ) на основе АЗВ5 наногетероструктур

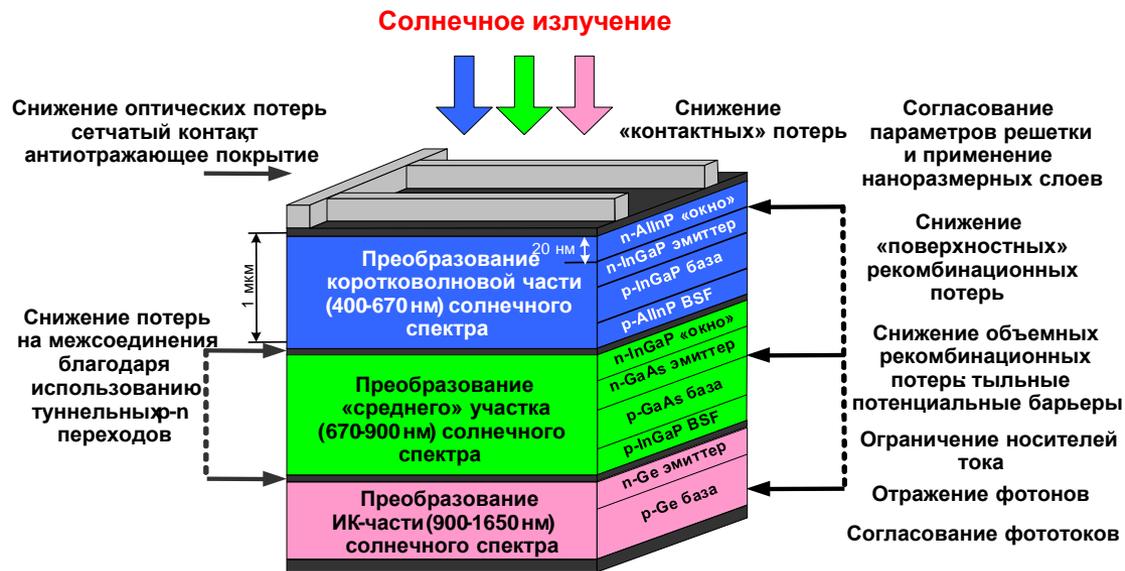
МОС-гидридная технология выращивания каскадных гетероструктур



Гетероструктуры с Брэгговским рефлексором с эффективным поглощением «подзонных» фотонов



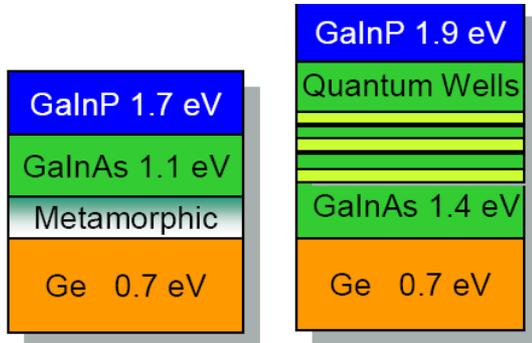
GaInP/GaAs/Ge гетероструктура каскадного солнечного элемента, КПД~40%



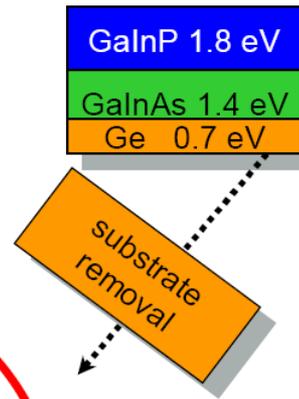
Пути увеличения эффективности каскадного солнечного элемента

The ways of efficiency increase of multijunction SC

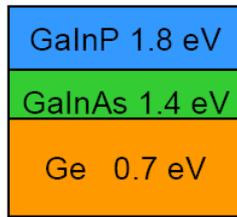
Improved current matching



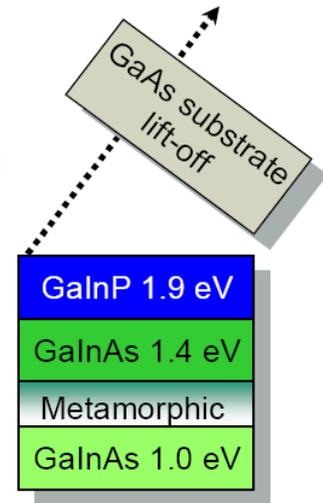
Ultra-thin lift-off devices



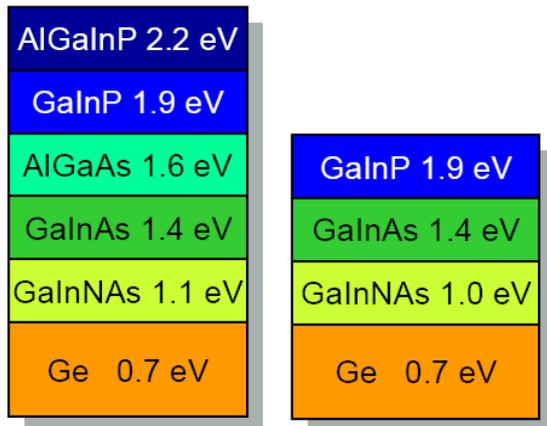
Industry Standard $\eta=40\%$



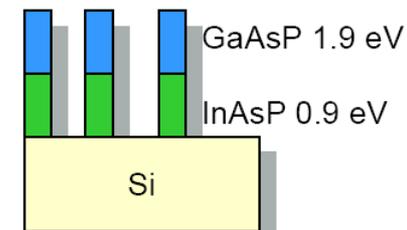
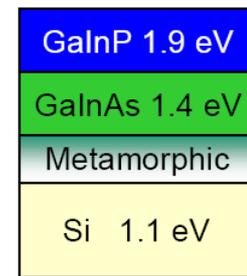
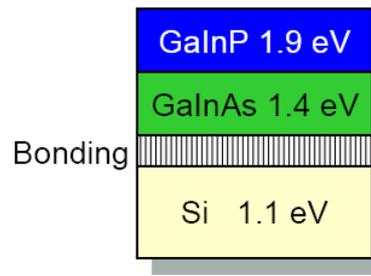
Inverted devices

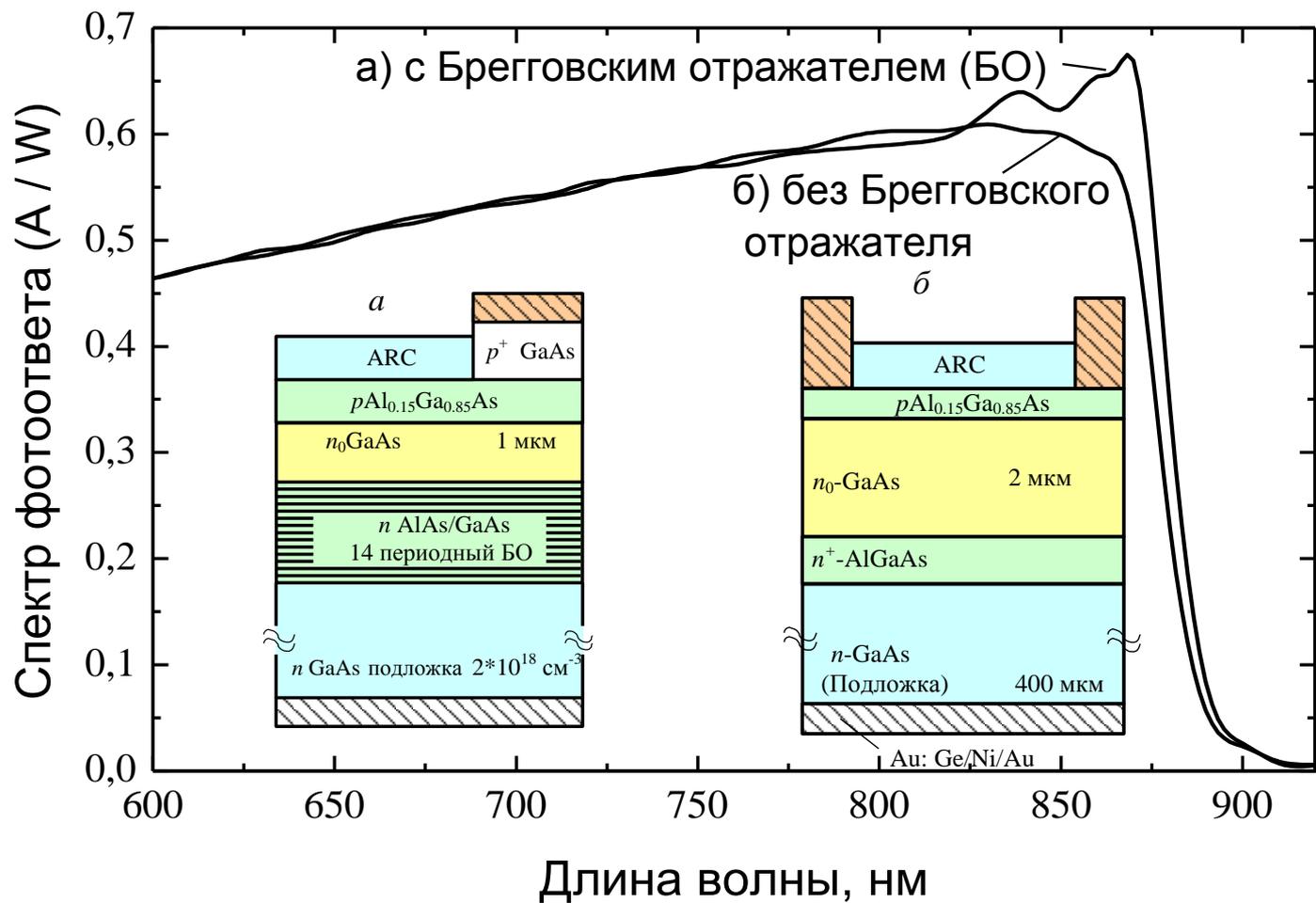


More junctions



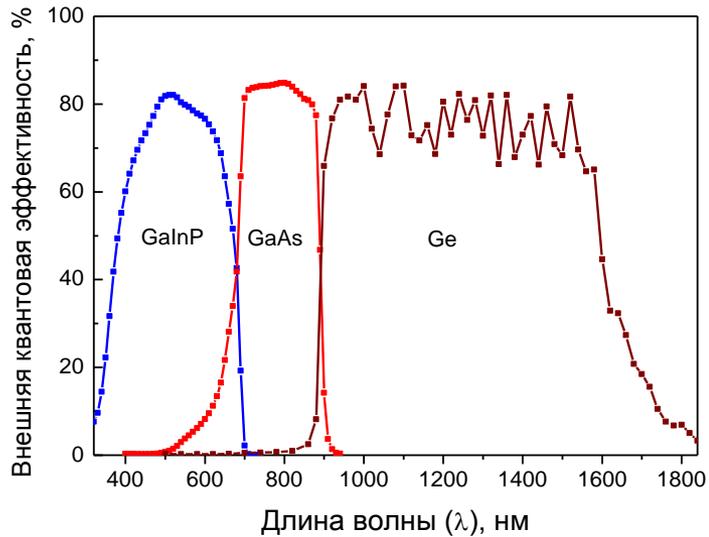
III-V Solar cells on Si



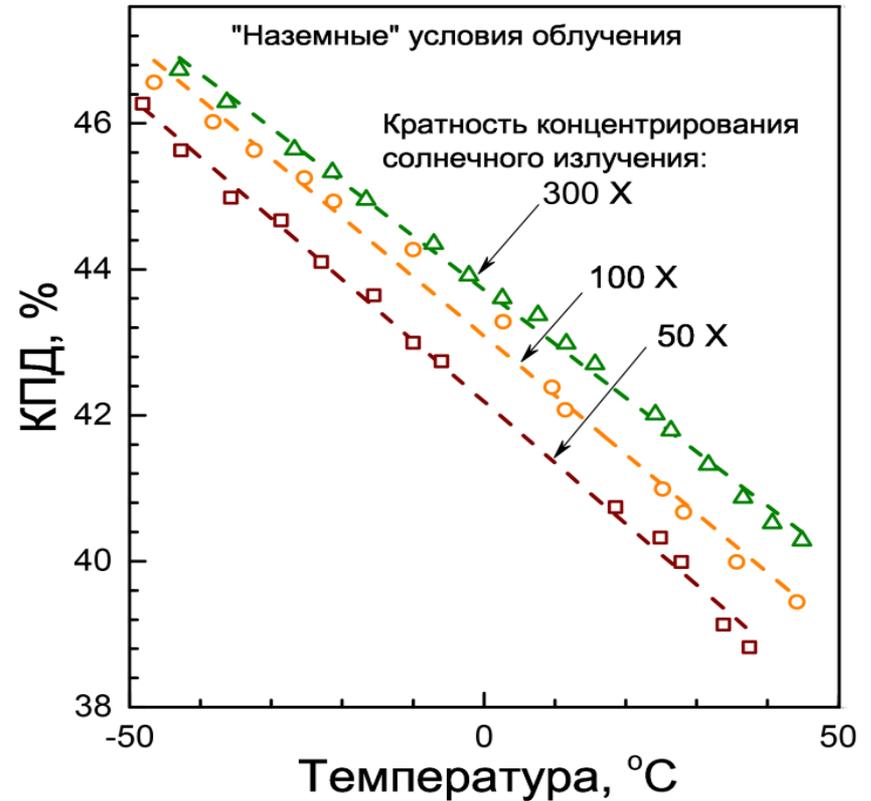
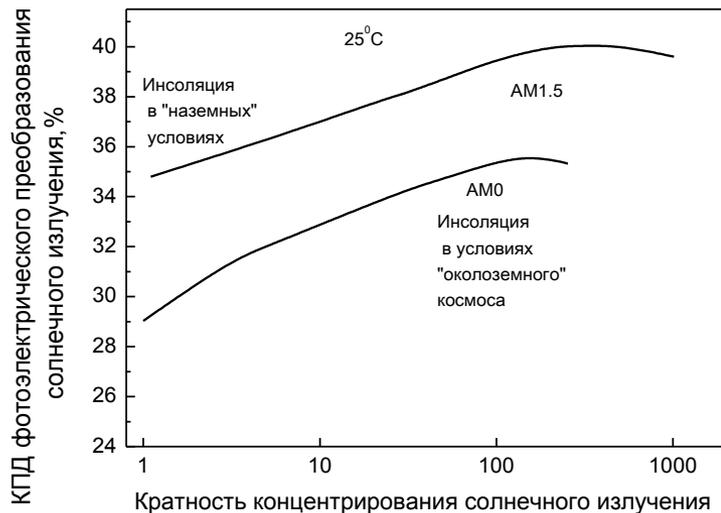


Фотоответ в AlGaAs/GaAs фотопреобразователях двух типов: с Брегговскими отражателями (БО) и без отражателя.

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



Спектр фотоответа трехпереходного солнечного элемента GaInP/GaAs/Ge



Зависимость КПД каскадного солнечного элемента от температуры при различных кратностях концентрации солнечного излучения

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

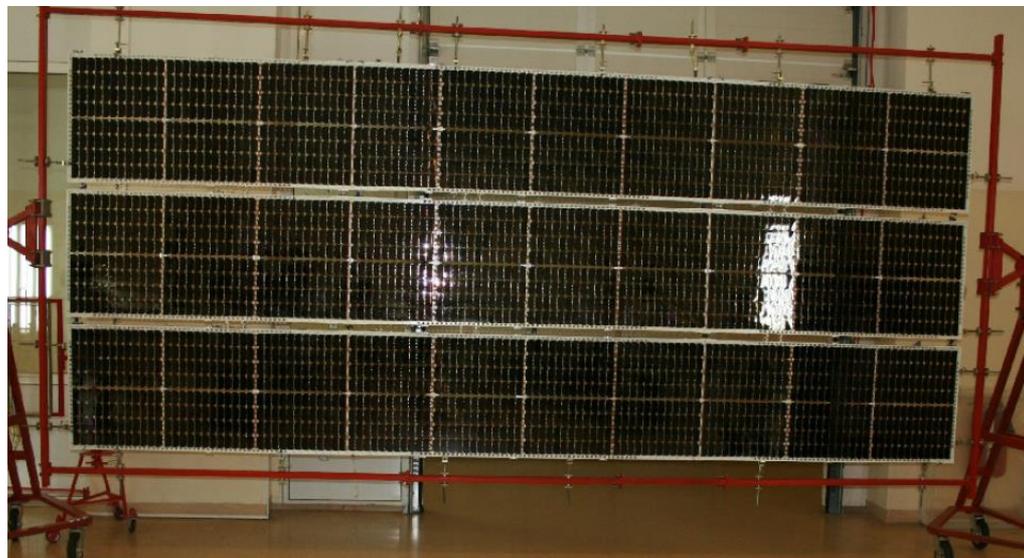
Промышленное освоение (ПАО «Сатурн») высокоэффективных радиационнстойких каскадных фотоэлектрических преобразователей космического назначения

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.

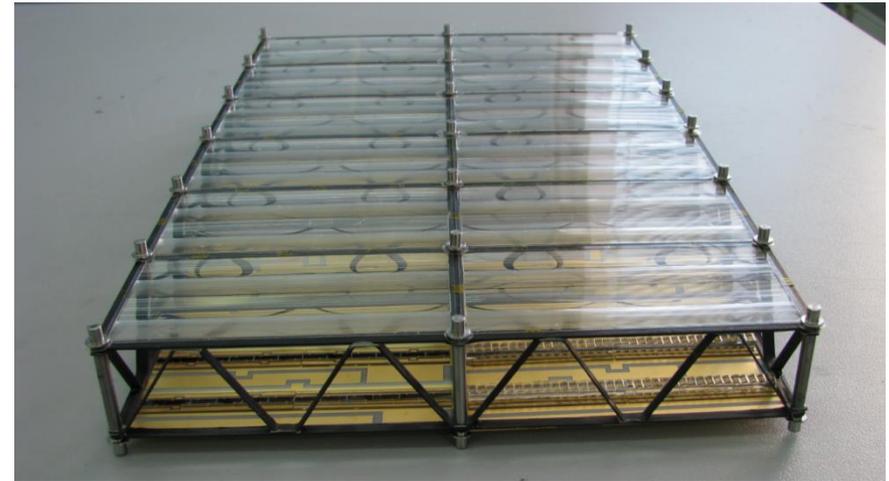


Космическая солнечная батарея (~ 10 м²) на основе каскадных фотопреобразователей, изготовленных на оборудовании ПАО «Сатурн» по технологии, разработанной в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН

Концентраторные модули для космических солнечных батарей на основе каскадных фотопреобразователей



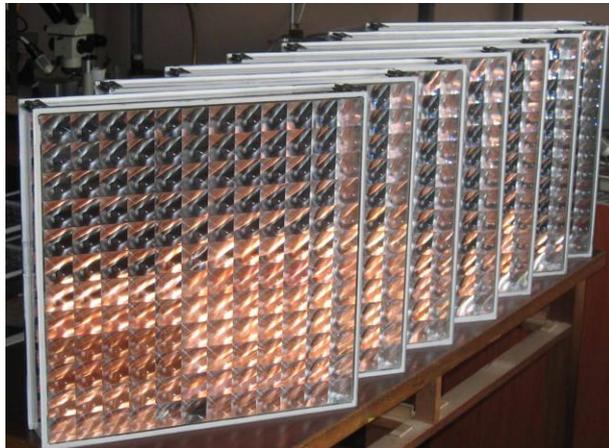
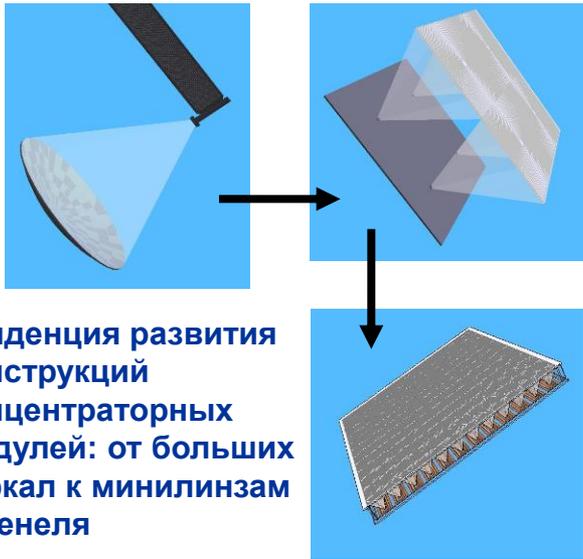
Макет первой отечественной солнечной батареи (10м²) с линзовыми концентраторами излучения и каскадными солнечными элементами на несущем углепластиковом каркасе, предназначенный для проведения комплекса предполетных испытаний



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

Совершенствование конструкций наземных концентраторных фотоэлектрических модулей



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

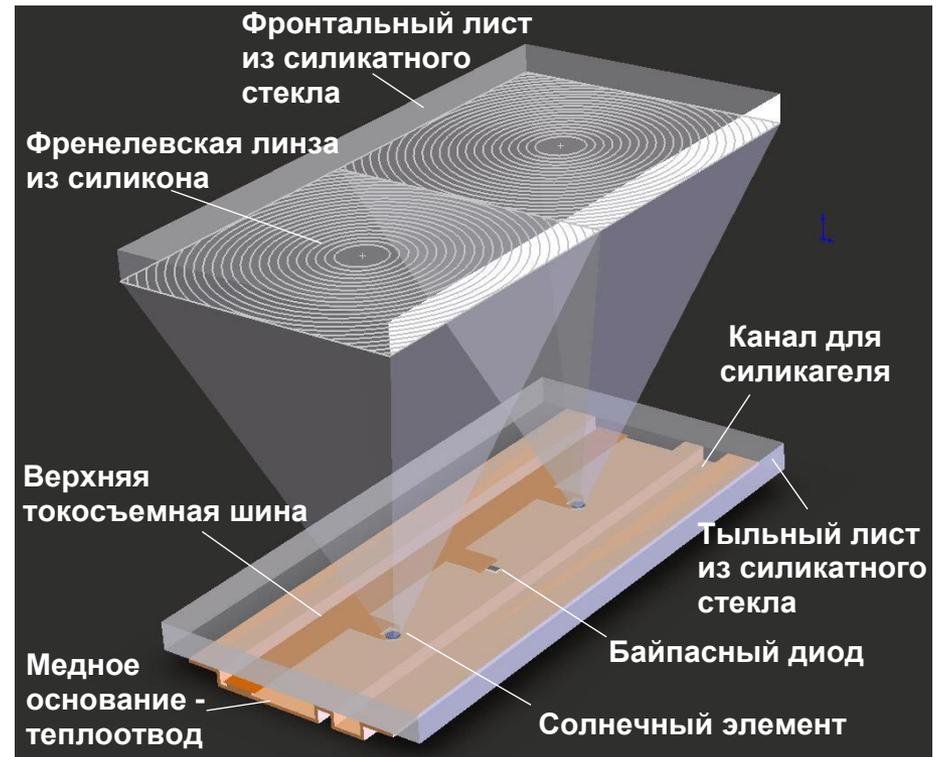
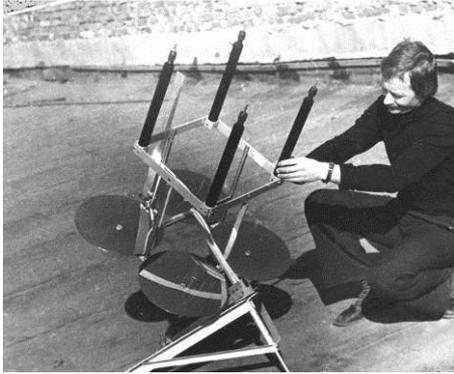


Схема концентраторного модуля с минилинзами Френеля

High concentration solar PV concept at the Ioffe Institute

parabolic mirrors

1980



1981

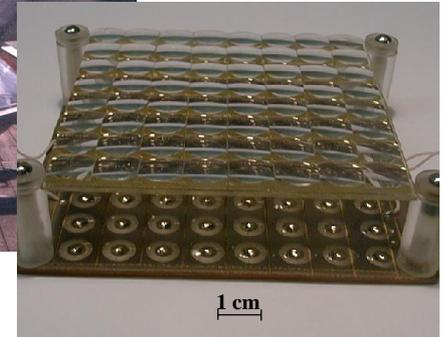


1985



Fresnel lenses

1990



1998



2004



2005

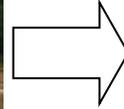


Fresnel lens panels ("silicone on glass" design)

25 years co-operation with Fraunhofer ISE



Sun tracker for 1 kWp in Fraunhofer ISE (2000)



The same tracker after four years of operation on the roof of the Fraunhofer-ISE



Sun tracker for 5 kWp in Fraunhofer ISE (2002)



Solar installation for 1 kWp installed in Adlershof (2005)



A version of sun tracker for 1 kWp installed in NREL (Golden, Colorado; Dec. 2004)

Концентраторные солнечные энергоустановки с каскадными ФЭП и системами слежения за Солнцем

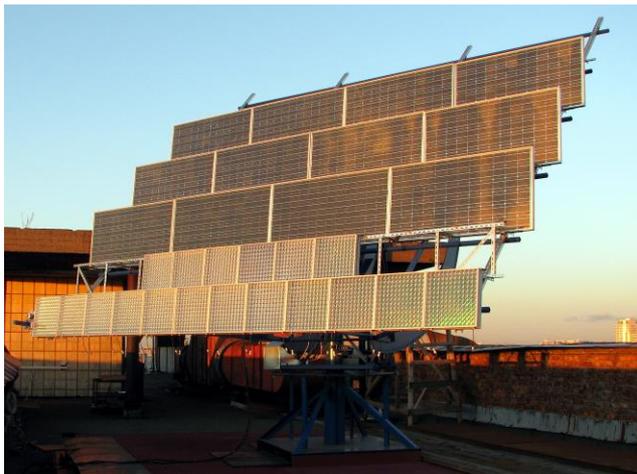


Фотоэнергоустановка на трекере башенного типа

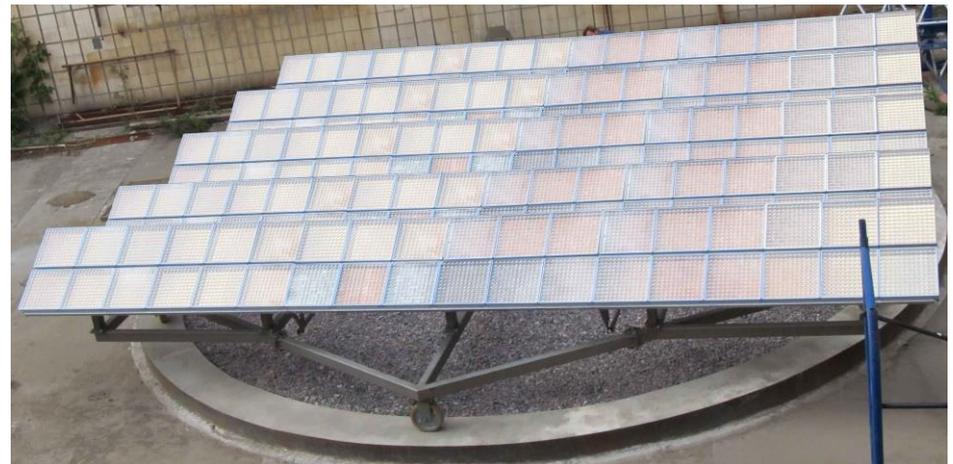
1 кВт



Тыльная сторона фотоэнергоустановки



Фотоэнергоустановка (5кВт) с двумя рядами концентраторных модулей (снизу) и кремниевыми модулями (сверху)



Фотоэнергоустановка (10 кВт) на основе 25920 минимодулей

Concentrator PV installation on the roof of Academician University, St.Petersburg



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

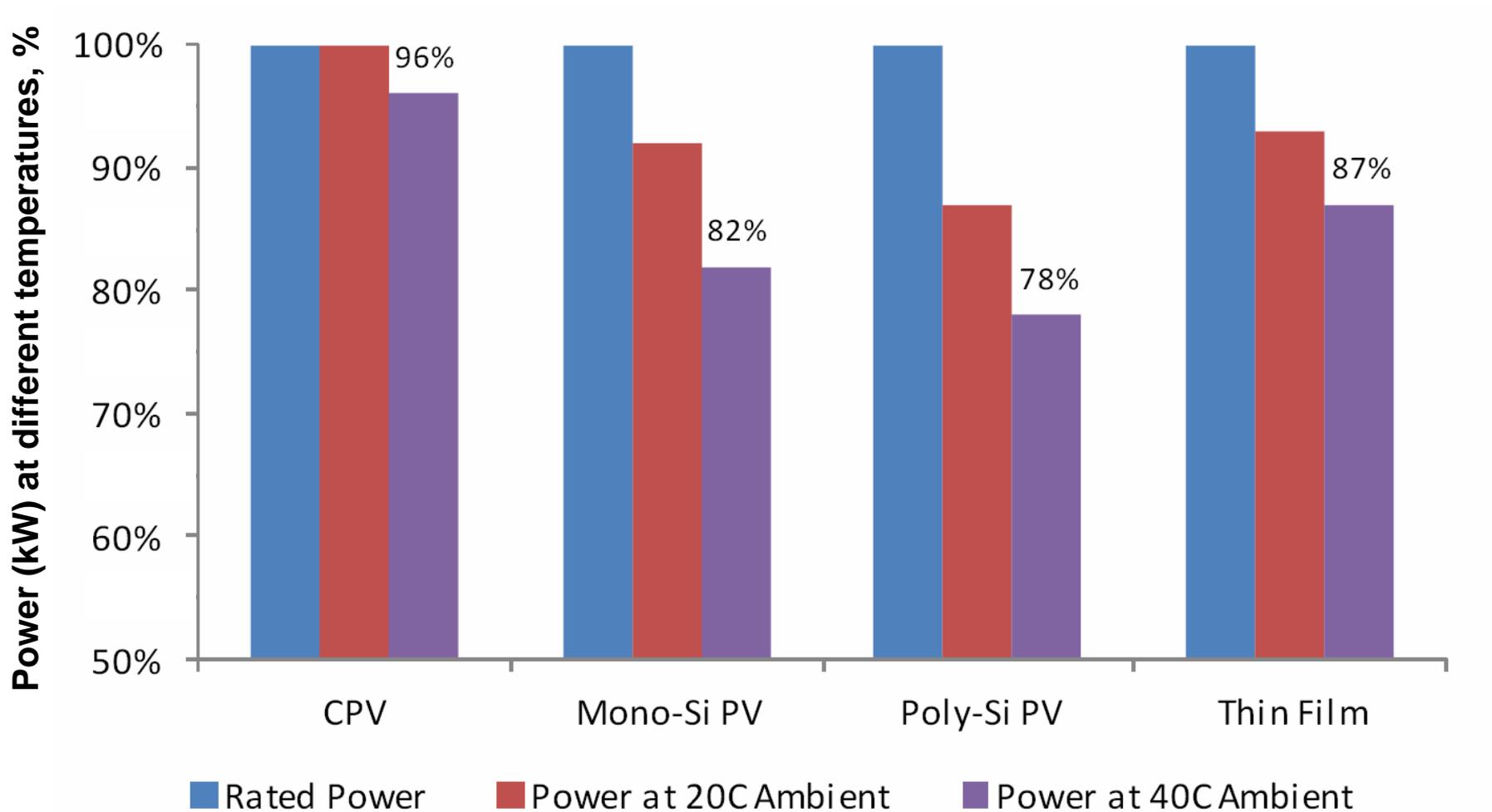


GreenVolts, Inc., USA



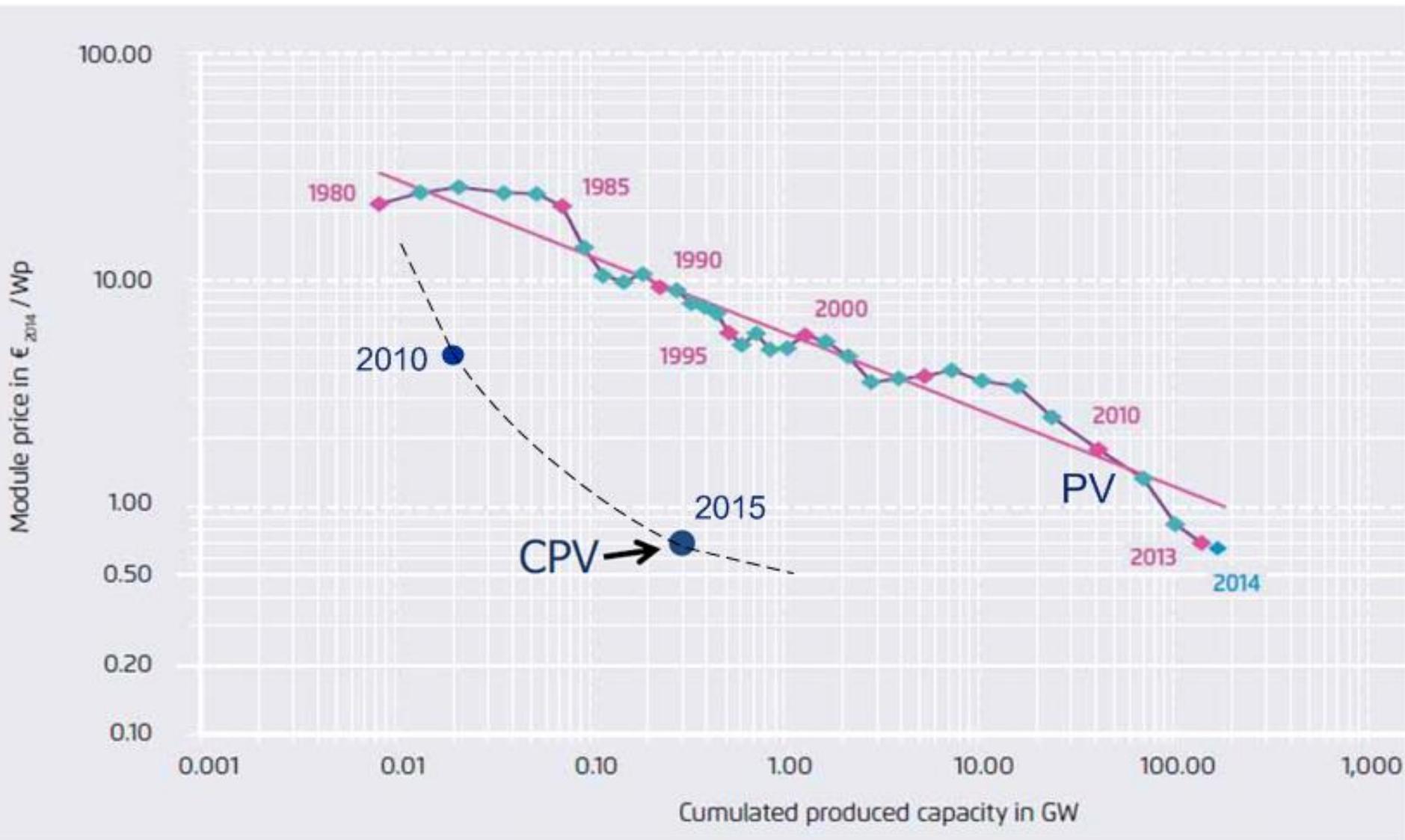
SolarSystems,
<http://solarsystems.com.au>

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



Эффективное использование земли под концентраторными энергоустановками



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!