

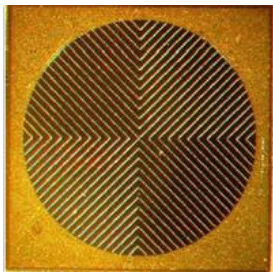
Концентраторные солнечные модули с высокой эффективностью в широком диапазоне рабочих температур

В.М.Андреев, Н.Ю.Давидюк, В.С.Калиновский, Н.А.Садчиков, А.В.Чекалин, М.З.Шварц

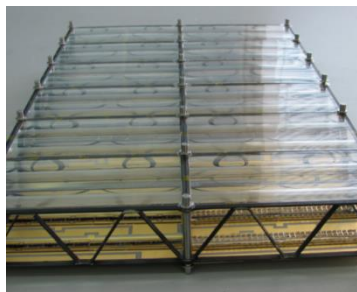
Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН, г.Санкт-Петербург

Содержание доклада

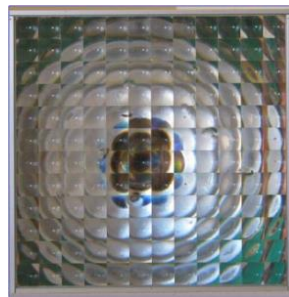
- Преимущества каскадных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП)
- Технология и параметры космических каскадных ФЭП
- Концентраторные модули для космических батарей
- Использование каскадных ФЭП в наземных фотоэнергоустановках с концентраторами солнечного излучения



Чип солнечного элемента
размером 2мм x 2мм



Космический
концентраторный
модуль (0,1м²)



Наземный
концентраторный модуль
размером 0,5м x 0,5м



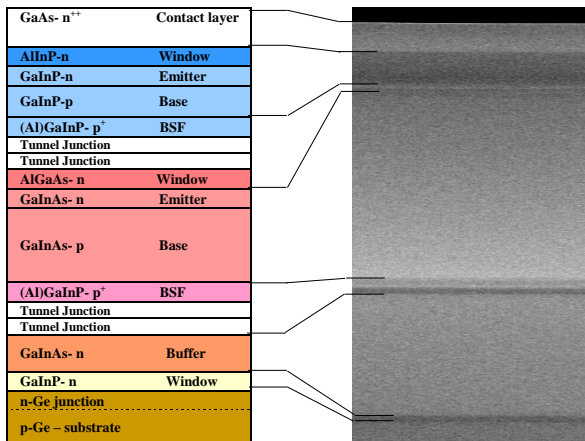
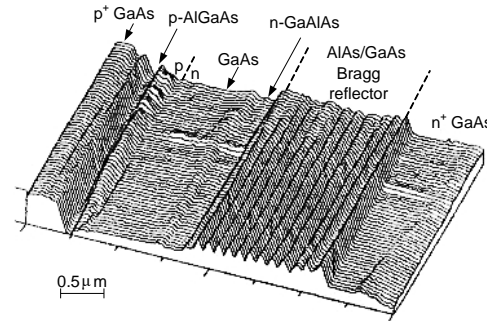
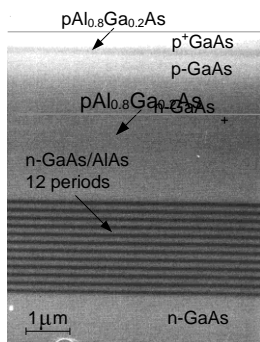
Концентраторная батарея (1м²)
на основе 576 субмодулей

Каскадные солнечные элементы (КСЭ) на основе АЗВ5 наногетероструктур

МОС-гидридная технология выращивания каскадных гетероструктур



Гетероструктуры с Брэгговским рефлектором с эффективным поглощением «подзонных» фотонов

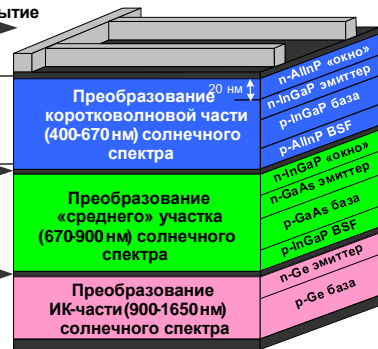
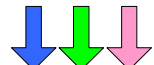


GalnP/GaAs/Ge гетероструктура каскадного солнечного элемента, КПД~40%

Солнечное излучение

Снижение оптических потерь сетчатый контакт антиотражающее покрытие

Снижение потерь на межсоединения благодаря использованию туннельных p-n переходов



Снижение «контактных» потерь
Согласование параметров решетки и применение наноразмерных слоев

Снижение «поверхностных» рекомбинационных потерь

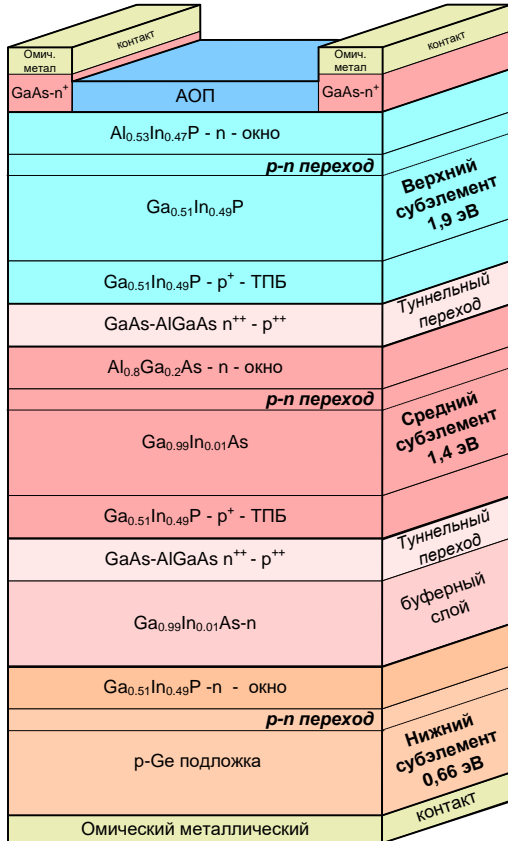
Снижение объемных рекомбинационных потерь тыльные потенциальные барьеры

Ограничение носителей тока

Отражение фотонов
Согласование фототоков

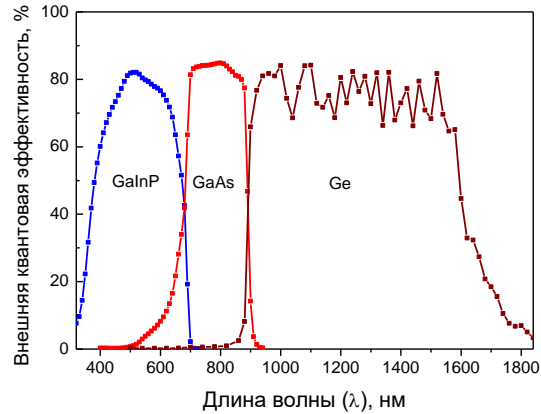
Пути увеличения эффективности каскадного солнечного элемента

Разработки космических и наземных каскадных фотоэлектрических преобразователей на основе наногетероструктур GaInP/GaInAs/Ge

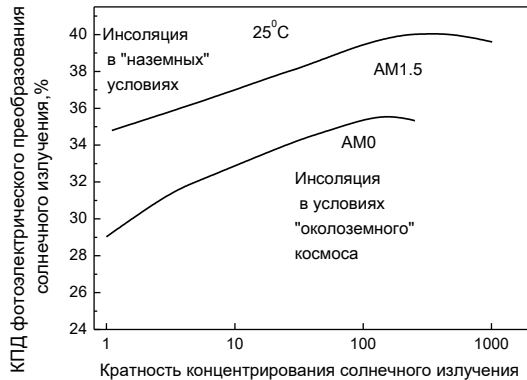


- MOCVD технология роста соединений A3B5 в системах: Al-Ga-In-P и Al-Ga-In-As для исследовательского и промышленного реакторов. (воспроизводимость, равномерность, площадь ФЭП ~30см²)
- Квантово-размерные (20-30 нм) фронтальные широкозонные «окна» AlGaInP, обеспечивающие фоточувствительность до ультрафиолетовой области спектра.
- Технология туннельных диодов (минимальные оптические потери, сильнолегированные наноразмерные слои)
- MOCVD технология роста A3B5 на Ge подложке (однодоменный рост, формирование p-n перехода в Ge, подавление автолегирования)
- Встроенные в гетероструктуру Брегговские отражатели (на основе периодических структур, образованных слоями с толщинами 50-70 нм), обеспечивающие отражение в фотоактивную область «подзонных» фотонов.
- Короткопериодные сверхрешетки для создания структур с градиентом ширины запрещенной зоны и для получения новых материалов.

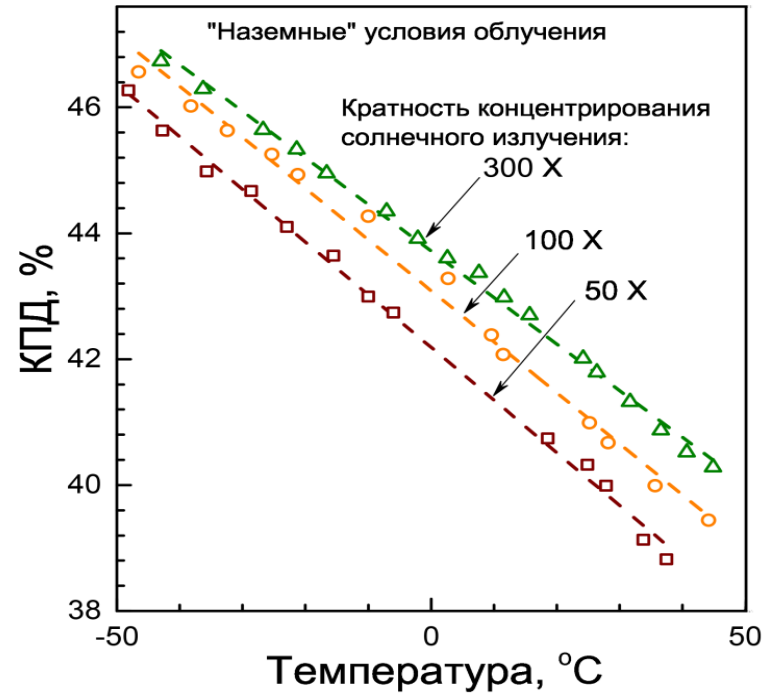
Характеристики каскадных солнечных элементов на основе гетероструктур GaInP/GaInAs/Ge



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

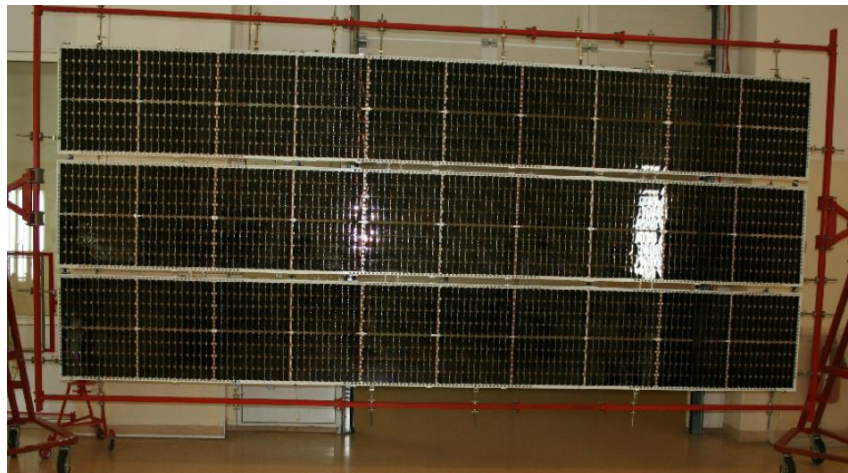
Промышленное освоение (ПАО «Сатурн») технологии ФТИ высокоэффективных радиационностойких ФЭП космического назначения

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 Бреговских отражателей позволило уменьшить толщины фотоактивных областей и тем самым резко снизить радиационное дефектообразование и поднять радиационную стойкость.

Технология внедрена на предприятии ПАО «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.

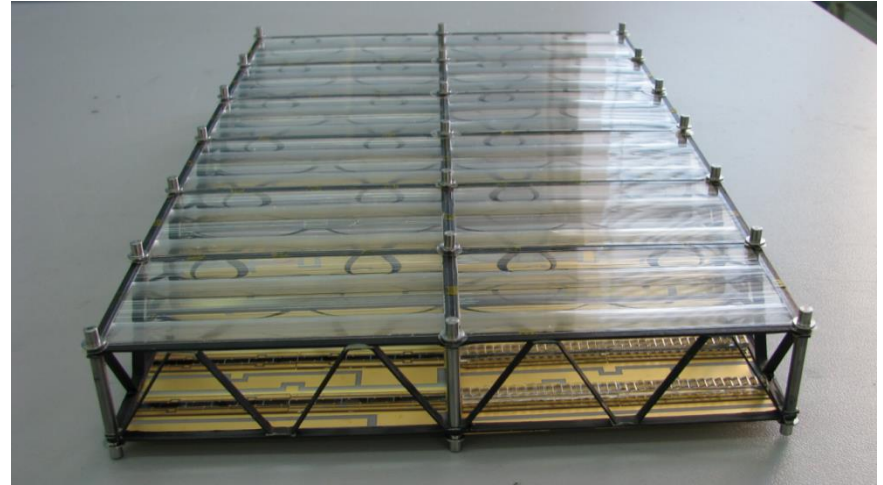


Космическая солнечная батарея (~ 10 м²) на основе каскадных фотопреобразователей, изготовленных на оборудовании ПАО «Сатурн» по технологии, разработанной в ФТИ

Концентраторные модули для космических солнечных батарей на основе каскадных фотопреобразователей



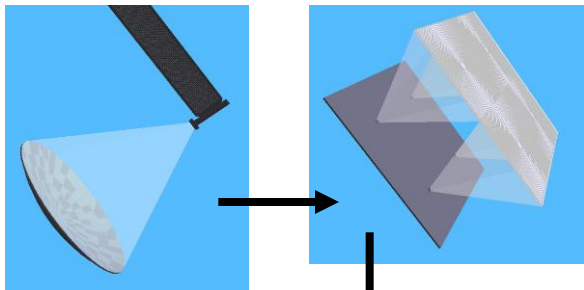
Макет первой отечественной солнечной батареи (10м^2) с линзовыми концентраторами излучения и каскадными солнечными элементами



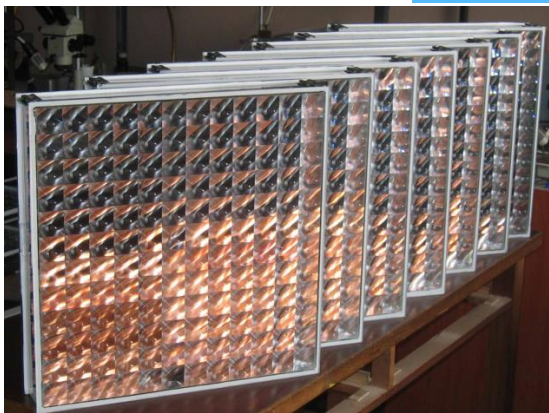
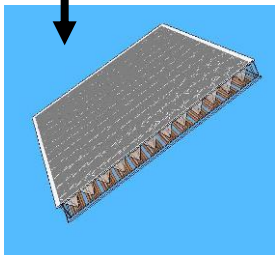
Фрагмент панели солнечной батареи ($0,1\text{м}^2$) с линзовыми концентраторами солнечного излучения, состоящий из 12 фотоэлектрических субмодулей на несущем углепластиковом каркасе

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

Совершенствование конструкций наземных концентраторных фотоэлектрических модулей



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)

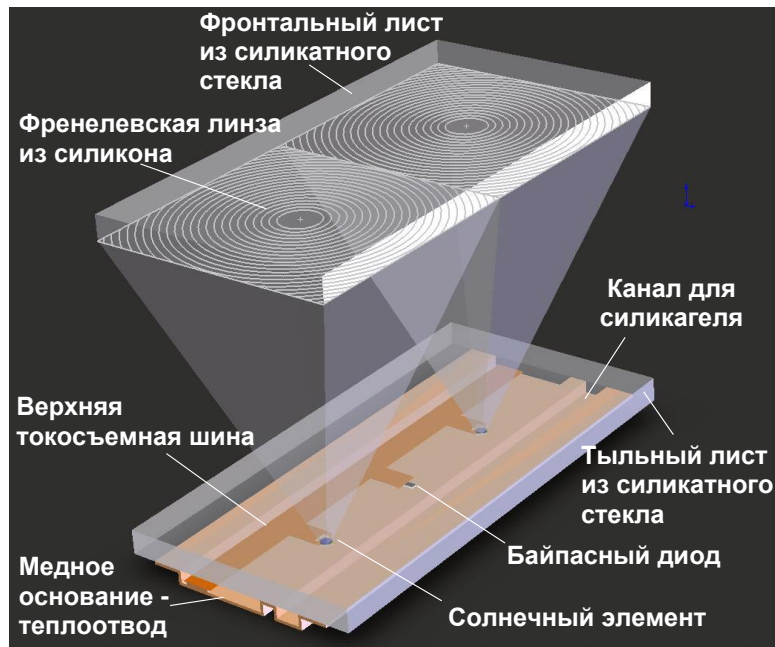
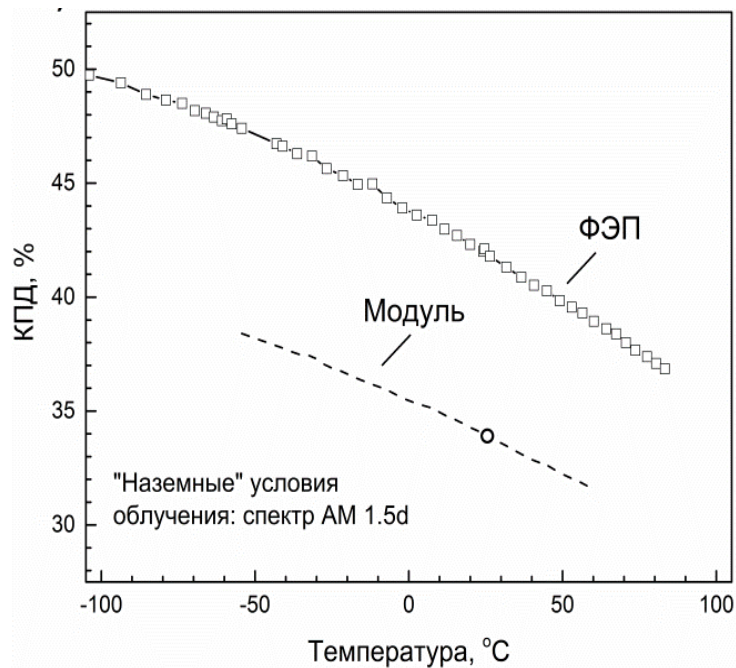
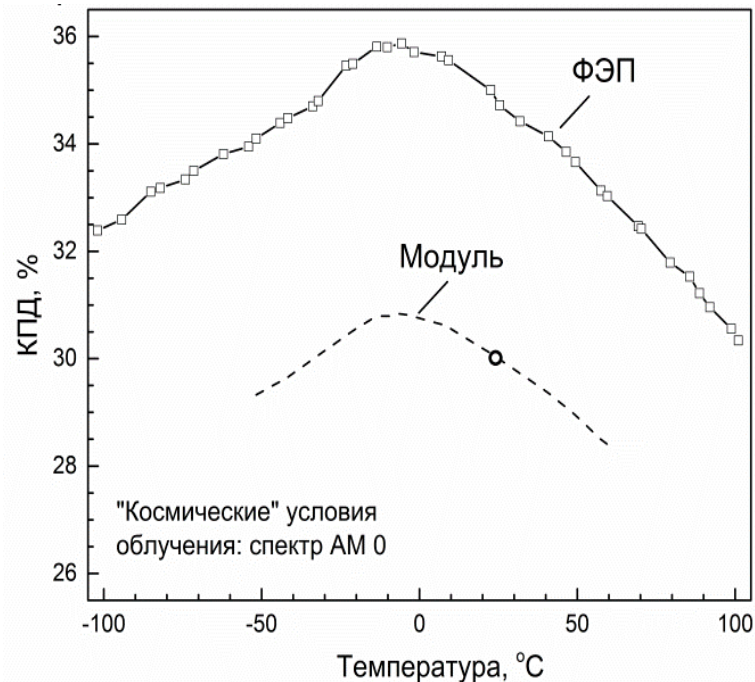


Схема концентраторного модуля с минилинзами Френеля

Зависимости от температуры значений КПД ФЭП и модулей



Для ФЭП и модулей наземного применения, кратность концентрирования 300 «солнц»



Для космических ФЭП и модулей, кратность концентрирования 300 «солнц»

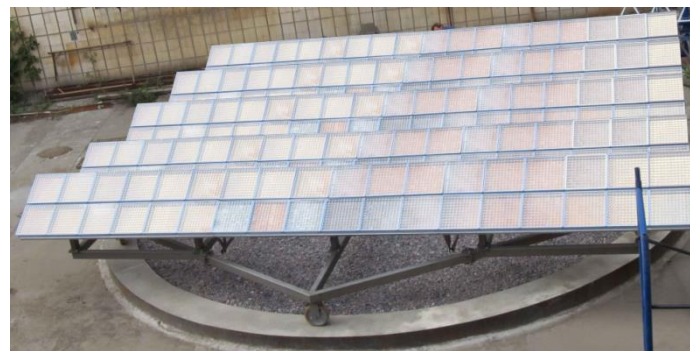
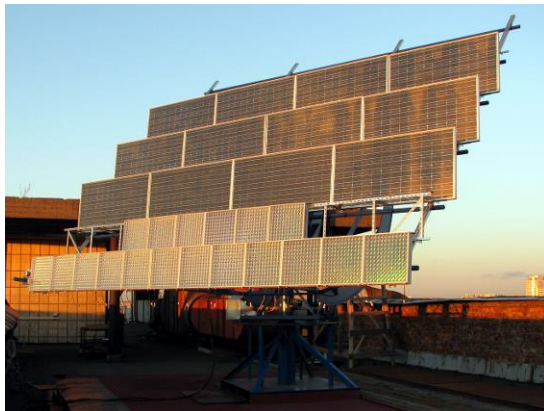
Концентраторные энергоустановки со слежением за Солнцем

Фотоэнергоустановка на трекере башенного типа (1кВт)



Концентраторная энергоустановка (2кВт) на крыше СПб Академического университета

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



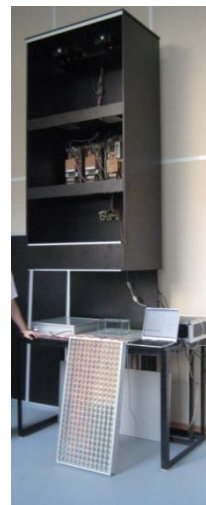
Фотоэнергоустановка (10 кВт) на основе 25920 минимодулей на трекере карусельного типа

Разработанные наземные фотоэнергоустановки обеспечивают:

- **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;**
- **низкую себестоимость ($< \$1.5/\text{Вт}$) концентраторных фотоэнергоустановок вследствие малой материалоемкости фотоэнергосистем;**
- **1 грамм каскадного элемента в солнечной концентраторной фотоэнергоустановке эквивалентен по вырабатываемой за 25 лет работы электроэнергии 5 тоннам нефти;**
- **время возврата электроэнергии, затраченной на изготовление энергоустановок, составляет около 1 года;**
- **достижение паритета стоимости «солнечной» и «сетевой» электроэнергии при использовании в регионах с высокой инсоляцией.**

Оборудование, созданное в ФТИ для тестирования 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

Заключение: Направления дальнейших работ по каскадным ФЭП и солнечным батареям

- Увеличение КПД космических каскадных ФЭП до значений более 40% (AM0) с использованием МОС-гидридной и молекулярно-лучевой технологий.
- Увеличение удельного энергосъема (>400 Вт/м²) космических солнечных батарей.
- Повышение срока службы космических солнечных батарей до >20 лет на геосинхронной орбите.
- Совершенствование фотоэлектрических модулей с промежуточным концентрированием солнечного излучения, обеспечивающих снижение расхода полупроводниковых материалов для ФЭП и повышение радиационной стойкости СБ.
- Разработка наземных фотоэнергосистем с каскадными ФЭП (КПД $> 50\%$), обеспечивающих достижение паритета стоимости «солнечной» электроэнергии со стоимостью «сетевой» электроэнергии.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!