

Дискуссионная сессия IX «Проблемы и перспективы создания космических солнечных электростанций и беспроводной передачи энергии»

Тенденции развития каскадных фотоэлектрических преобразователей нового поколения для аэрокосмических солнечных электростанций

В.М.Андреев, Н.А.Калюжный, С.А.Минтаиров, В.С.Калиновский, М.З.Шварц
Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Содержание доклада:

- 1. Высокоэффективные радиационно-стойкие солнечные элементы для космических батарей нового поколения**
- 2. Космические и наземные солнечные модули и энергоустановки с концентраторами излучения**
- 3. Фотоэлектрические преобразователи мощного лазерного излучения**

Высокоэффективные радиационно-стойкие солнечные элементы для космических батарей нового поколения

Актуальность. Необходимость создания солнечных батарей с высокими энергетическими и эксплуатационными характеристиками и увеличенным ресурсом работы. Проблема решается путем внедрения технологии ФТИ им. А.Ф.Иоффе по наногетероструктурным фотоэлектрическим преобразователям (ФЭП) каскадного типа на основе арсенида галлия и других соединений A^3B^5 .

1969 – впервые в мире создание в ФТИ космических гетероструктурных AlGaAs/GaAs ФЭП.

1972-1990 – внедрение технологии в НПО «Квант» при производстве AlGaAs/GaAs солнечных батарей для космических аппаратов (в частности, для станции «Мир»).

1991-2000 – разработка радиационно-стойких ФЭП с Брэгговским зеркалом.

1995-2013 – разработка технологии каскадных ФЭП с КПД > 28%.

2000-2013 – разработки концентраторных модулей для космических батарей



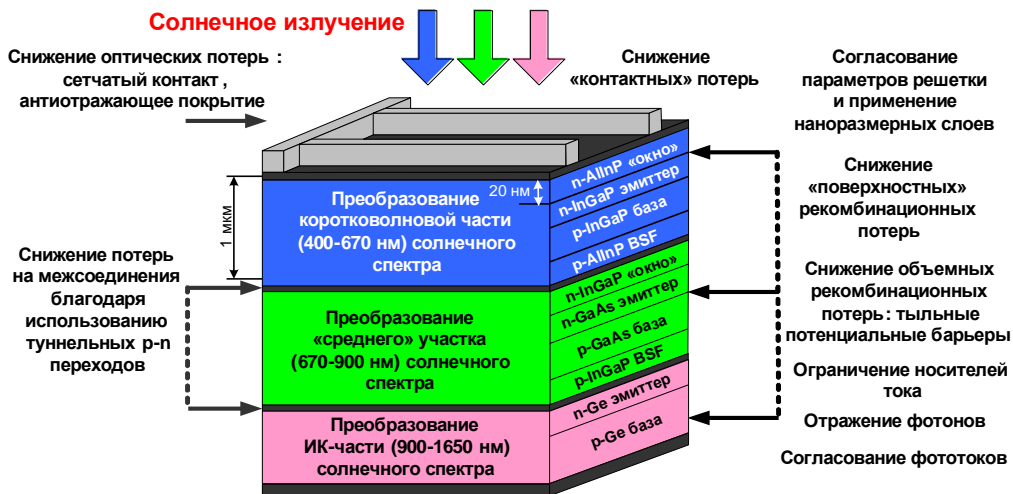
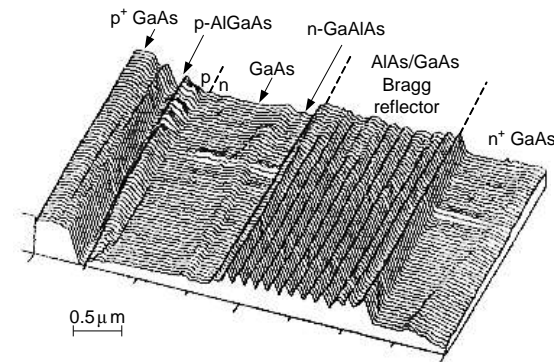
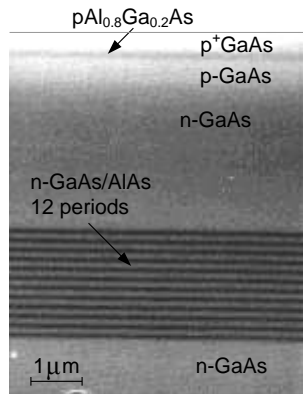
КС «Мир» с гетероструктурной солнечной батареей, изготовленной в НПП «Квант» по технологии ФТИ им.А.Ф.Иоффе

Технологии эпитаксиального роста гетероструктур из металло-органических соединений (МОС) каскадных фотопреобразователей (ФТИ им. А.Ф.Иоффе)

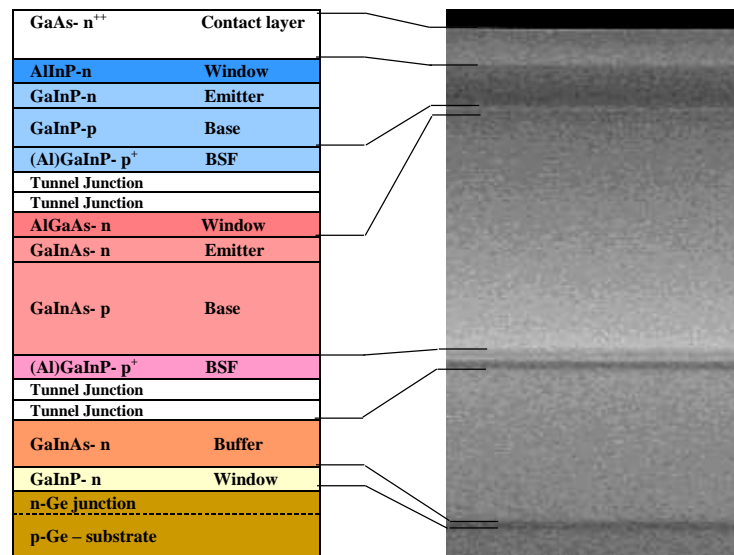
МОС-гидридная установка для выращивания каскадных гетероструктур



Изображения сколов гетероструктур с Брэгговским рефлектором

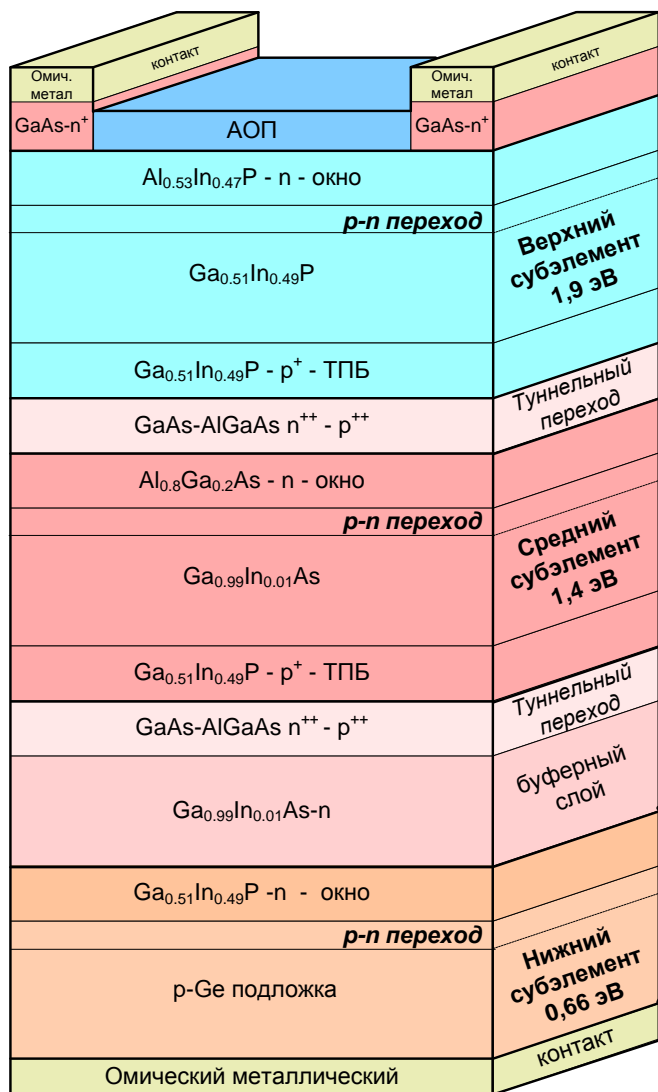


Принципы создания высокоэффективного преобразователя солнечного излучения



GaInP/GaAs/Ge гетероструктура каскадного фотоэлемента

Каскадные солнечные элементы на основе наногетероструктур AlGaInP/GaInAs/Ge – фотопреобразователи нового поколения

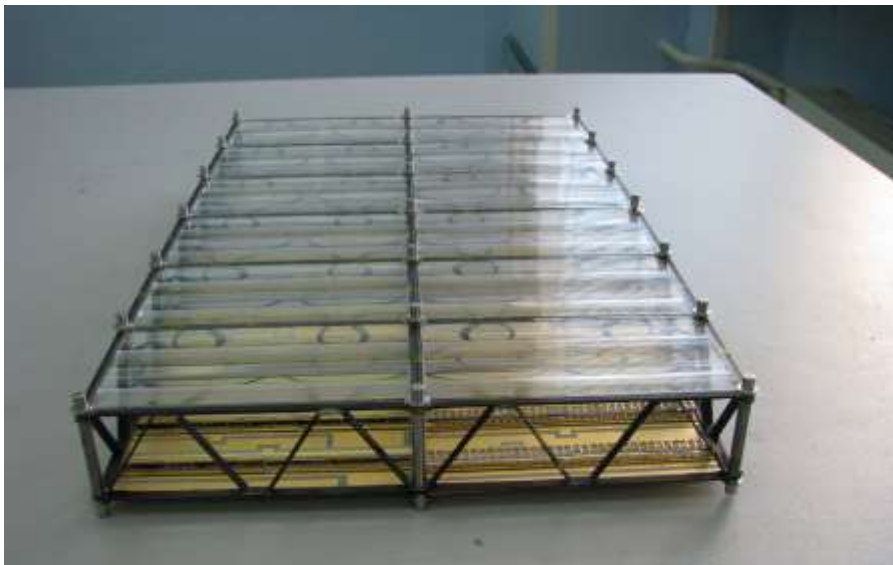


Разработанные в последние годы в ФТИ космические каскадные солнечные элементы на основе наногетероструктур AlGaInP/GaInAs/Ge обладают **КПД более 29%** и обеспечивают, по сравнению с кремниевыми солнечными батареями, **2-х кратное увеличение удельного энергосъема - более 340 Вт/м²**, **увеличение радиационной стойкости и срока службы более 17 лет** на геостационарной орбите, что обеспечивает существенное снижение затрат на доставку солнечных батарей на орбиту.

Каскадный ФЭП имеет самую сложную из всех п/п приборов «поперечную» монокристаллическую структуру:

- 25-30 эпитаксиальных слоев материалов A³B⁵ толщиной всего 7-8 микрон на инородной подложке из германия;
- широкий диапазон легирования слоев *n*- и *p*- типа (три-четыре порядка);
- размеры единичного ФЭП 4 x 8 см² при толщине всего 0,15 мм.

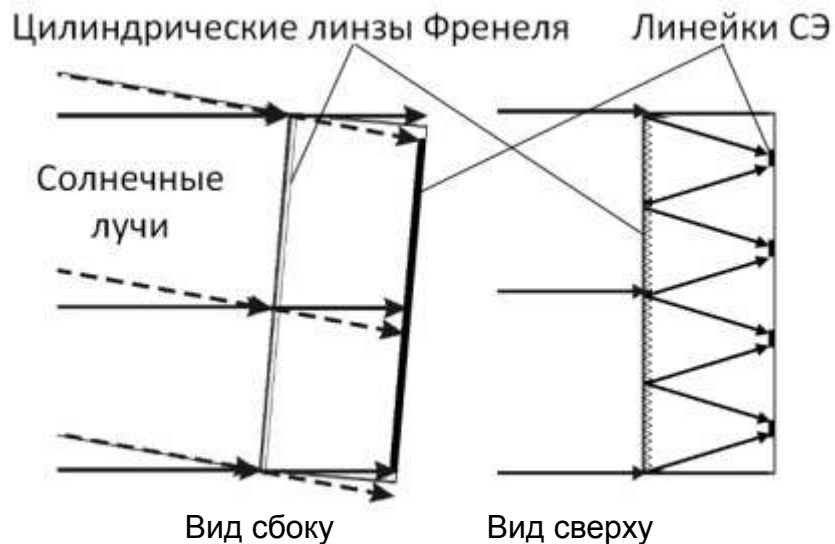
Концентраторные модули с каскадными ФЭП для космических солнечных батарей



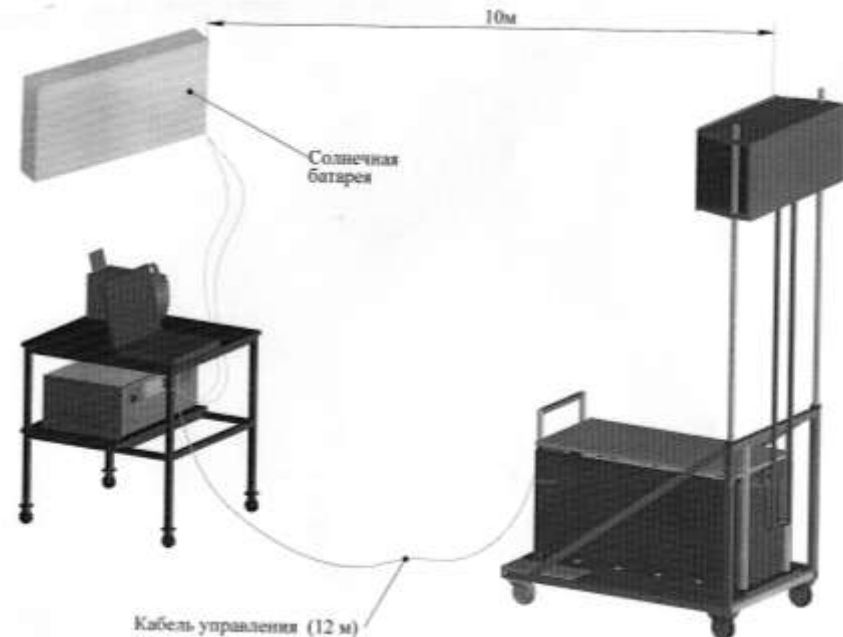
Фрагмент экспериментальной панели солнечной батареи (0,1 м²) с линзовыми концентраторами солнечного излучения, состоящий из 12 фотоэлектрических ячеек на несущем углепластиковом каркасе.

КПД ФЭП более 30% в условиях околоземного космоса с концентраторами солнечного излучения

- Срок службы более 20 лет на геосинхронной орбите
- Снижение в 7-10 раз расхода полупроводниковых фотопреобразователей в концентраторных солнечных батареях



Испытательный Стенд - импульсный тестер для измерения характеристик космических солнечных батарей размером до 2х3 м² (разработан и изготовлен в лаборатории фотоэлектрических преобразователей ФТИ, солнечный спектр АМ0, интенсивность - одна солнечная постоянная, 8 ксеноновых ламп с корректирующими фильтрами)



Солнечная батарея устанавливается на расстоянии 10 м от осветителя. Условия засветки соответствуют облученности батареи на околоземной орбите.

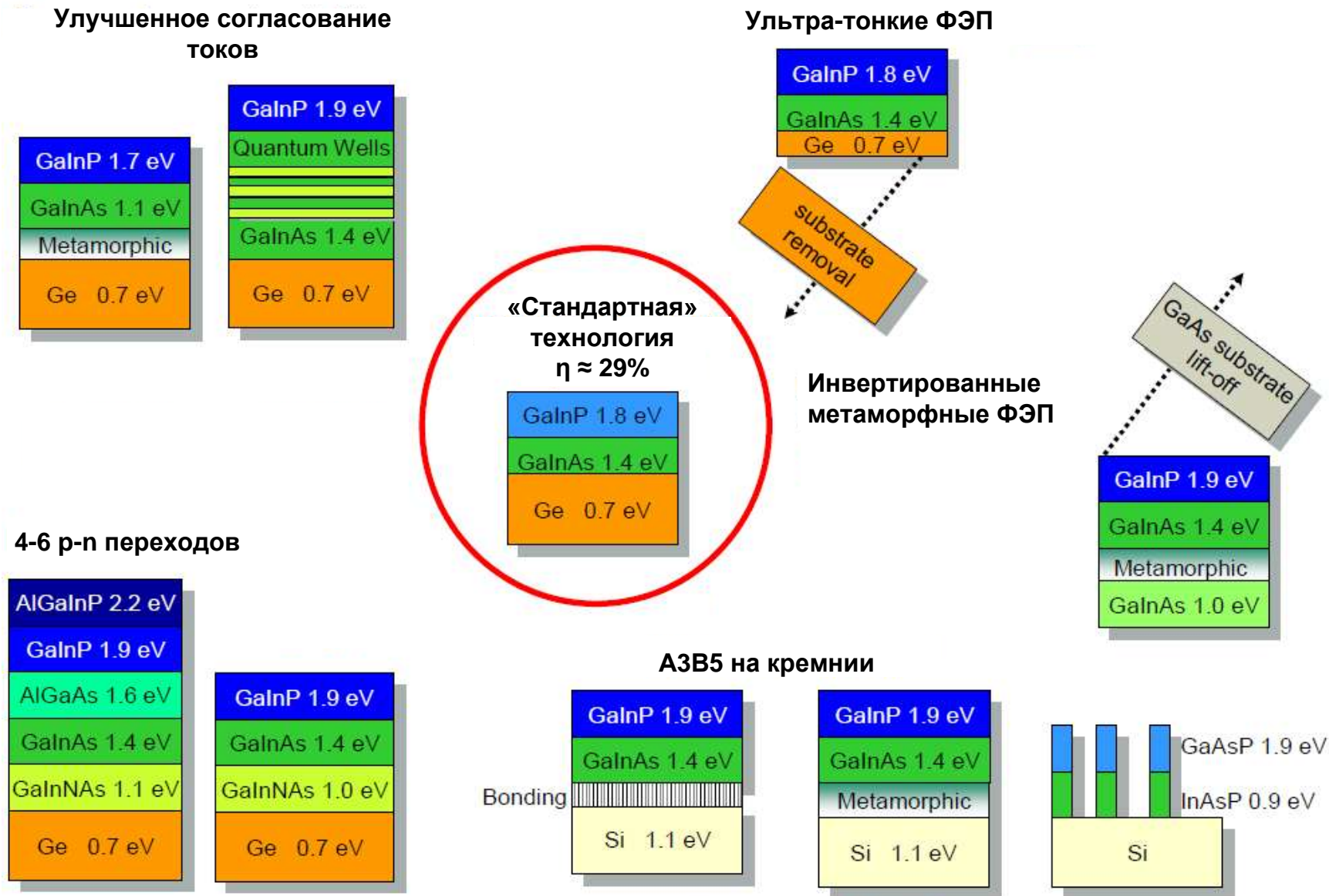
Два стенда эксплуатируются в ОАО «НПП «Квант», два стенда – в ОАО «ИСС» им. М.Ф. Решетнева.

В стадии завершения Стенд (импульсный тестер) для измерения сборок (модулей) размером до 0,4м x 0,6м.

Направления разработок каскадных солнечных элементов для космических батарей

1. Улучшение «традиционных» трехпереходных GaInP-GaInAs-Ge СЭ (КПД=32%, AM0, 25°C).
 - Брегговские отражатели для повышения радиационной стойкости
 - Увеличение ширины запрещенной зоны верхнего GaInP-элемента
 - Метаморфные структуры с уменьшенной шириной запрещенной зоны среднего GaInAs (1,2 эВ) элемента
 - Ультратонкие СЭ с толщиной Ge – менее 10 мкм (технология lift-off)
 - Сверхрешетки, в т.ч. короткопериодные. Квантовые точки
2. Инвертированные ультратонкие (менее 10 мкм) трехпереходные GaInP/GaAs/GaInAs (1эВ) СЭ с отделённой подложкой.
3. Изорешеточные трехпереходные GaInP/GaAs/InGaAsNSb ($E_g=1\text{эВ}$) СЭ (КПД=33%) с азотом и сурьмой (МВЕ-технология).
4. Трехпереходные GaInP/GaInAs/Si, GaPAsN/A3B5/Si на кремниевых подложках.
5. Четырехпереходные GaInP/GaAs/InGaAsNSb (1 эВ)/Ge СЭ (КПД > 35%) с азотом и сурьмой.
6. Пяти- и шести-переходные СЭ с КПД > 35%.
7. Концентраторные СЭ и модули с линейными линзами Френеля.

Пути увеличения КПД каскадных фотопреобразователей для космических батарей нового поколения



Стандартная структура 3-х переходного элемента с КПД = 29% (в центре) и возможности для увеличения КПД до значений более 35%

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



Конструкция концентраторного модуля на основе двух линз Френеля

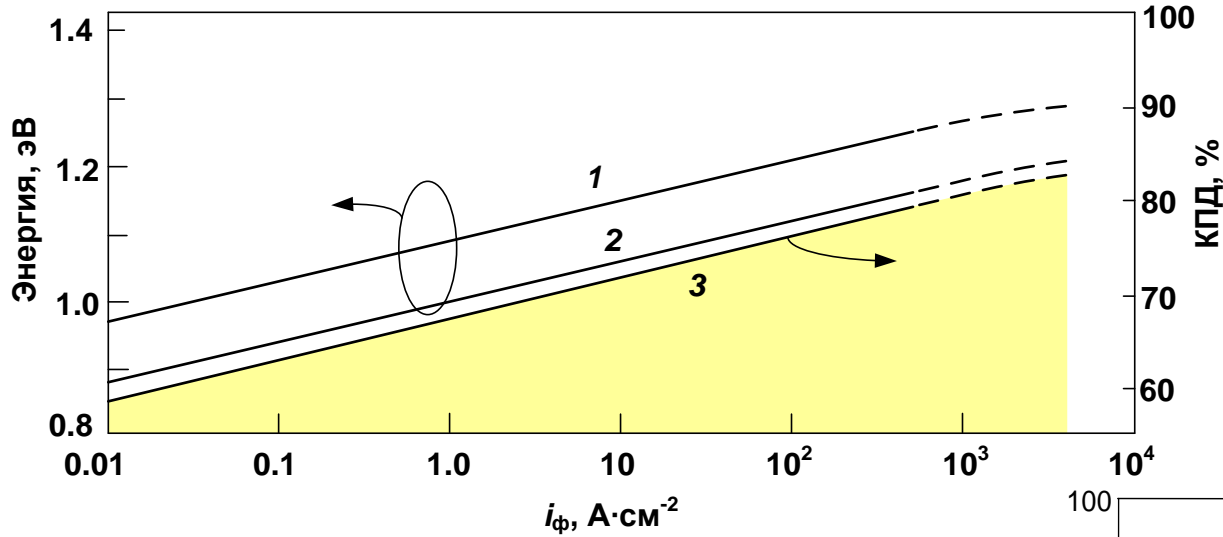


Солнечная энергоустановка на основе 2592 линз Френеля и каскадных солнечных элементов

Преимущества наземных солнечных энергоустановок с каскадными солнечными элементами

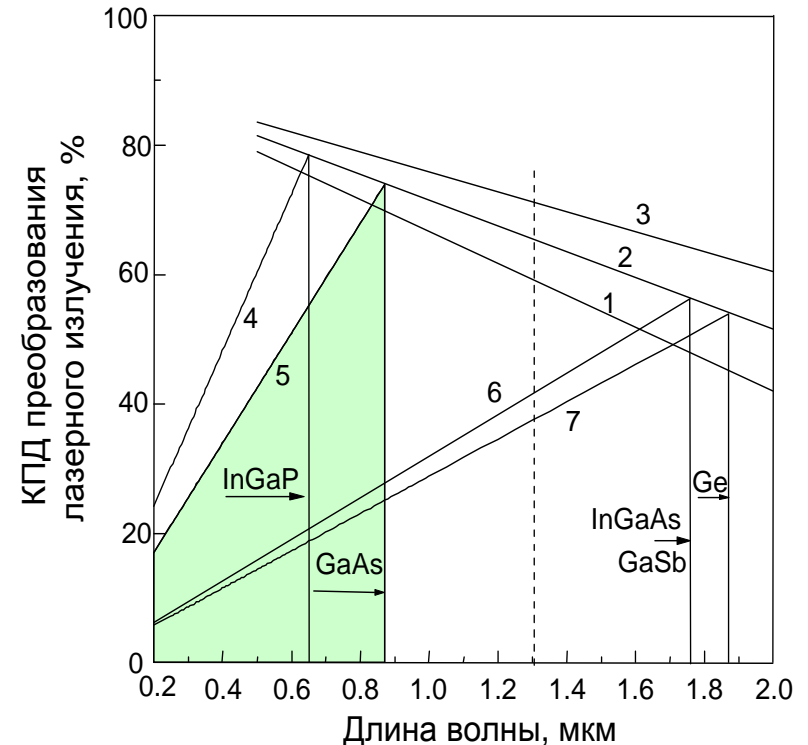
- снижение площади полупроводниковых ФЭП в 500-1000 раз пропорционально кратности концентрирования;
- низкое значение температурного коэффициента снижения КПД ($K_T = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) в каскадных солнечных элементах – в три раза меньше, чем в кремниевых батареях
- увеличение в 2-3 раза (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 в серийном производстве 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 менее 1 года;
- достижение паритета стоимости «солнечной» и «сетевой» электроэнергии при использовании в регионах с высокой инсоляцией.

Теоретические значения КПД фотопреобразователей лазерного излучения

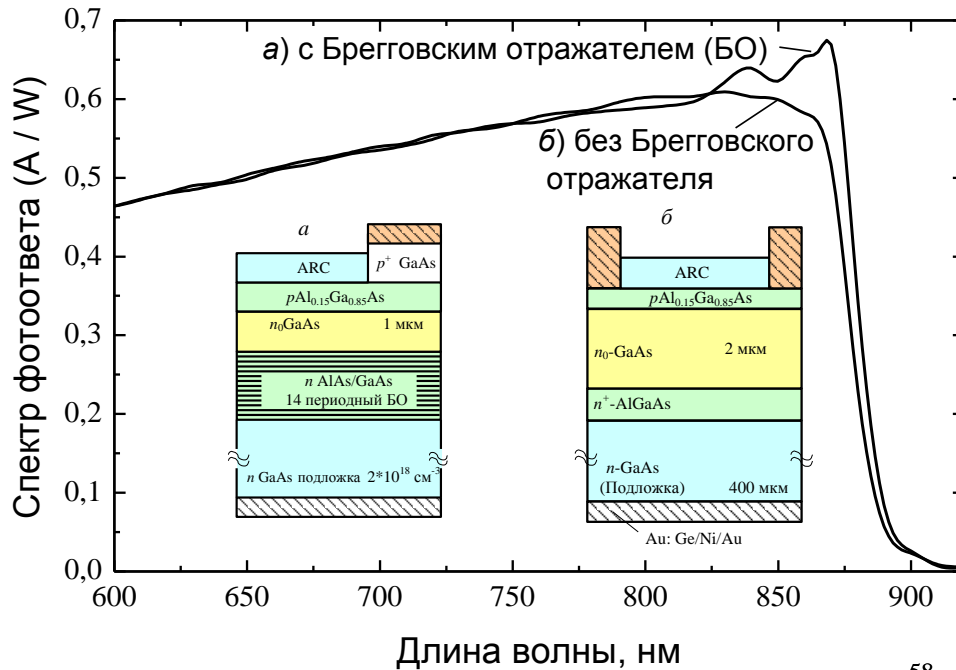


Теоретические зависимости энергетических величин qU_{xx} (1), $qU_{опт}$ (2) и КПД (3) от плотности фототока для GaAs ФД. Линия 3 и правая ось – зависимость КПД от плотности фототока.

Максимальные значения монохроматического КПД для величин фототока $i_{\phi} = 0.1, 1.0, 10 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ (1, 2, 3 соответственно) в зависимости от граничной длины волны полупроводникового материала ФП; 4, 5, 6, 7 – КПД преобразования энергии монохроматического излучения для идеализированных ФП на основе InGaP, GaAs, GaSb и Ge соответственно в зависимости от длины волны преобразуемого излучения.

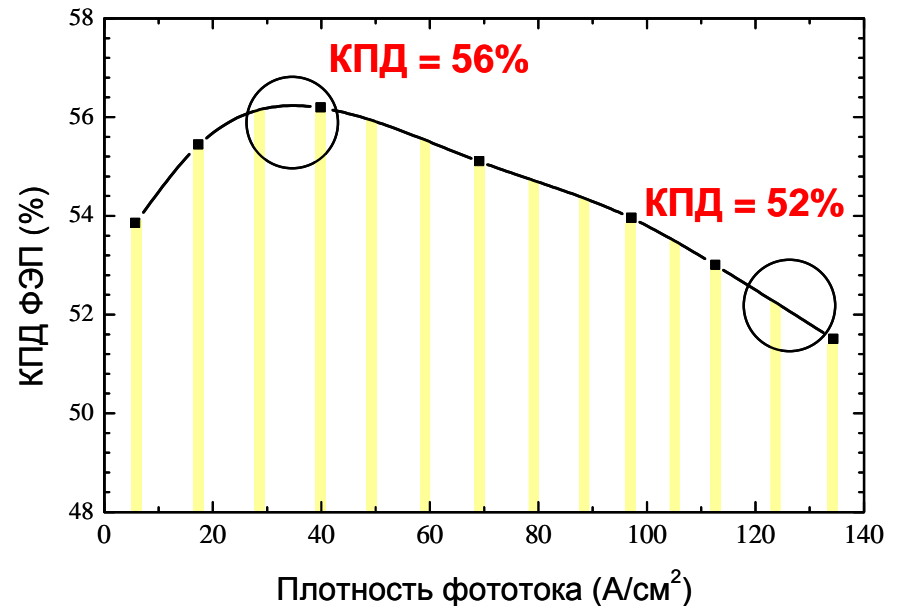


Демонстрация КПД более 50% и возможности улучшения быстродействия в AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователях мощного лазерного излучения



Фотоответ в AlGaAs/GaAs фотопреобразователях с Брегговским отражателем и без отражателя. Отражатель обеспечивает уменьшение толщины поглощающей области в 2 раза (до 2 мкм).

Зависимость КПД преобразования лазерного излучения ($\lambda = 840 \text{ нм}$) от плотности фототока в AlGaAs/GaAs ФЭП



Основные патенты разработчика (ФТИ им.А.Ф.Иоффе) по каскадным фотопреобразователям

- «Способ изготовления фотоэлектрических преобразователей на основе многослойной структуры». Патент на изобретение № 2354009, дата приоритета 07.12.2007.
- «Способ изготовления чипов многослойных фотопреобразователей». Патент на изобретение № 2368038, дата приоритета 07.12.2007
- «Многослойный фотопреобразователь». Патент на изобретение № 2364007, дата приоритета 22.01.2008
- «Способ получения структуры многослойного фотоэлектрического преобразователя». Патент на изобретение № 2366035, дата приоритета 14.05.2008.
- «Способ изготовления каскадных солнечных элементов (варианты)». Патент на изобретение № 2391745 дата приоритета 23.01.2009.
- «Каскадный фотопреобразователь и способ его изготовления». Патент на изобретение № 2382439, дата приоритета 05.06.2008.
- «Способ получения чипов солнечных фотоэлементов». Патент на изобретение № 2419918 дата приоритета 24.02.2010.
- «Способ формирования контакта для наногетероструктуры фотоэлектрического преобразователя на основе арсенида галлия». Патент на изобретение № 2428766 дата приоритета 24.05.2010.
- «Способ изготовления чипов концентраторных солнечных фотоэлементов». Патент на изобретение № 2436194 дата приоритета 31.08.2010.
- «Многопереходный преобразователь». Патент на изобретение № 2442242 дата приоритета 20.10.2010.
- «Способ изготовления чипов многослойных фотоэлементов». Авторы: Андреев В.М., Ильинская Н.Д., Лантратов В.М., Малевская А.В., Задиранов Ю.М., Усикова А.А. Заявка на патент № 2012110438 от 19.03.2012. Решение о выдаче патента от 04.04.2013

Всего по фотоэнергетике – 63 патента ФТИ им. А.Ф.Иоффе

Заключение (1): Результаты разработок ФТИ им. А.Ф.Иоффе

1. «Космические» каскадные солнечные элементы и концентраторные модули:

- КПД 29-31% в СЭ при концентрации солнечного излучения 6-50 солнц
- «Космические» концентраторные модули ($S = 100 \text{ см}^2$) на основе линейных линз Френеля и фотогенерирующих линеек с радиационной стойкостью улучшенной за счет дополнительной защиты солнечных элементов концентратором и теплоотводящим основанием

2. «Наземные» каскадные солнечные элементы: КПД > 37% при кратности концентрирования 200-800 солнц.

3. «Наземные» солнечные концентраторные фотоэнергоустановки на основе каскадных СЭ, линз Френеля и систем слежения за Солнцем обеспечивают увеличение в 2,5 раза удельного ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) энергосъема за счет большего КПД и слежения за Солнцем и, как следствие этого, снижение стоимости солнечного электричества.

4. Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения:

- КПД = 56% при $I_{\phi} = 40 \text{ А}/\text{см}^2$ и КПД = 52% при $I_{\phi} = 130 \text{ А}/\text{см}^2$ в AlGaAs/GaAs ФЭП при

$\lambda = 0,84 \text{ мкм}$

- КПД = 49% при $I_{\phi} \sim 100 \text{ А}/\text{см}^2$ в GaSb ФЭП при $\lambda = 1,68 \text{ мкм}$

Заключение (2): Практическая реализация результатов

➤ Практическая значимость разработок каскадных ФЭП:

Создание отечественного производства каскадных ФЭП для космических солнечных батарей нового поколения позволит оснащать космические аппараты компактными солнечными батареями с повышенным удельным энергосъемом (более 380 Вт/м²) и увеличенным ресурсом работы (более 20 лет), что чрезвычайно важно для обеспечения обороноспособности страны.

➤ Направления практической реализации результатов разработок:

- Проведение комплекса ОКР для создания производственных технологий высокоэффективных радиационно-стойких ФЭП.**
- Проведение комплекса испытаний, включая летные испытания в космосе разработанных батарей.**
- Создание в ФТИ им.А.Ф.Иоффе пилотной линии по выпуску высокоэффективных наногетероструктурных солнечных элементов.**
- Использование разработок в организации серийного производства солнечных элементов нового поколения.**