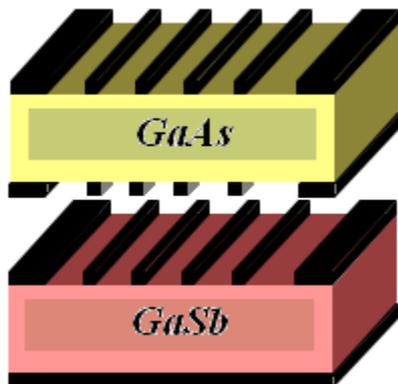




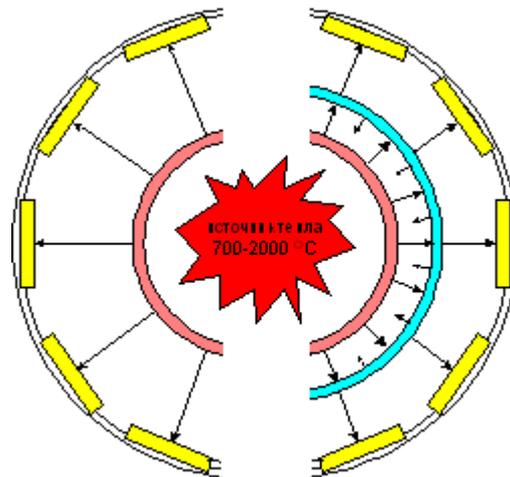
Фотоэлектрические преобразователи на основе антимонида галлия

В. Хвостиков, лаборатория фотоэлектрических преобразователей

Механически-
стыкованные каскады



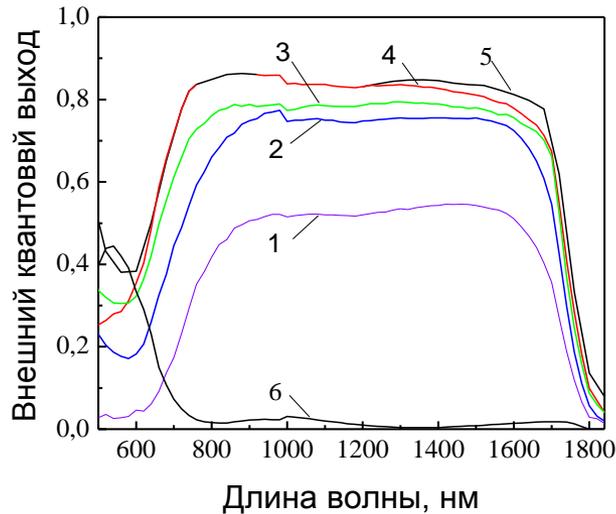
Термофотоэлектрические
генераторы



Преобразователи
лазерного излучения



Получение преобразователей на основе GaSb диффузией цинка из газовой фазы



Спектры фоточувствительности элементов на основе GaSb с различной толщиной диффузионного эмиттера:
1 - 1.1 мкм, 2 - 0.9 мкм, 3 - 0.62 мкм, 4 - 0.32 мкм, 5 - 0.14 мкм. 6 - спектр отражения от просветленной поверхности GaSb (ZnS+MgF₂)

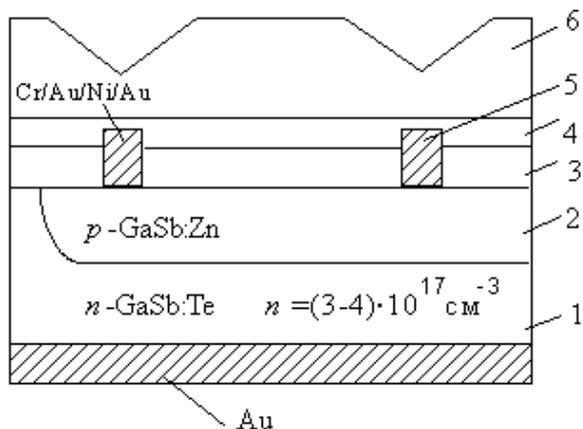


Установка жидкофазной эпитаксии для проведения ростовых и диффузионных процессов

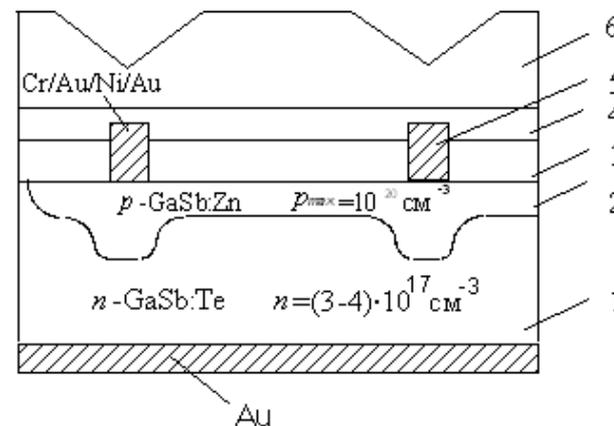


Кассета для диффузионных процессов

Конструктивные особенности преобразователей на основе GaSb (диффузия цинка из газовой фазы)

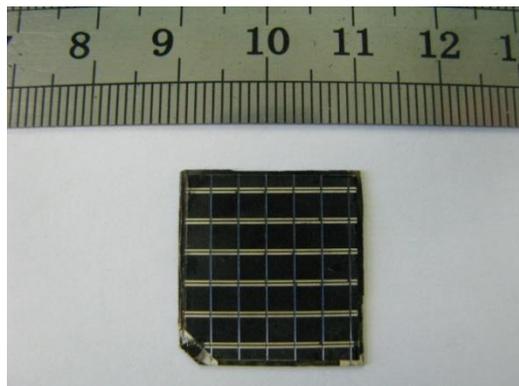
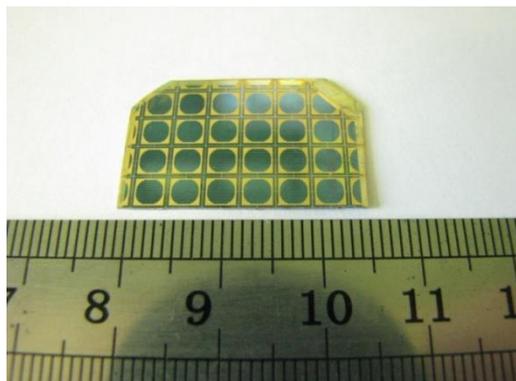


одностадийная диффузия цинка



двухстадийная диффузия цинка

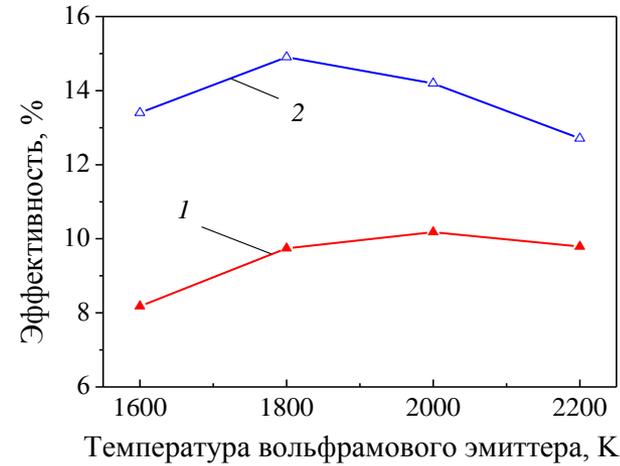
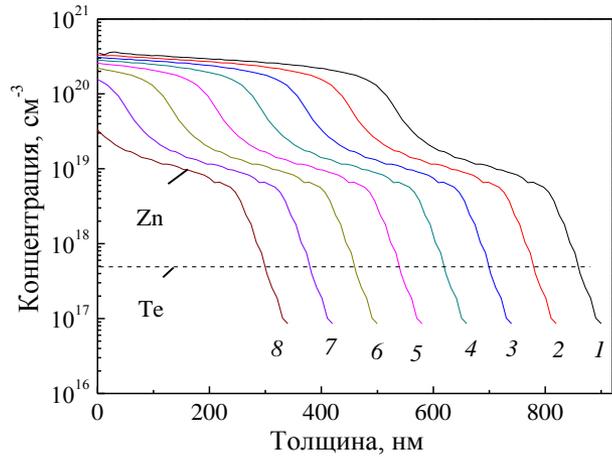
1 - подложка; 2 - диффузионная область; 3 - просветляющее покрытие; 4 - адгезионный слой; 5 - металлическая контактная сетка; 6 - призматическое покрытие.



Лучший результат
для диффузионной технологии

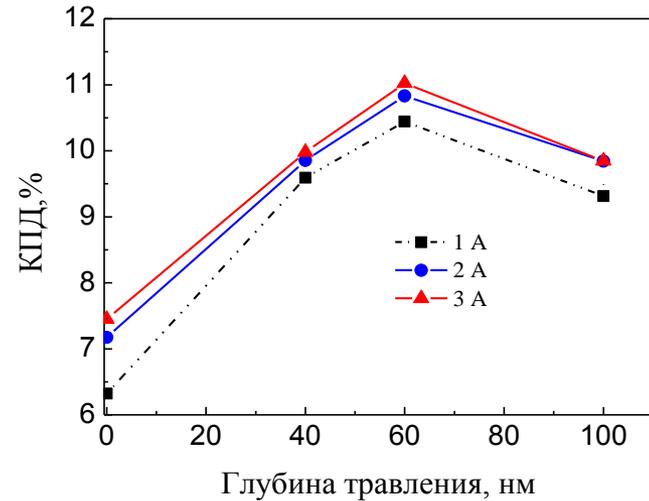
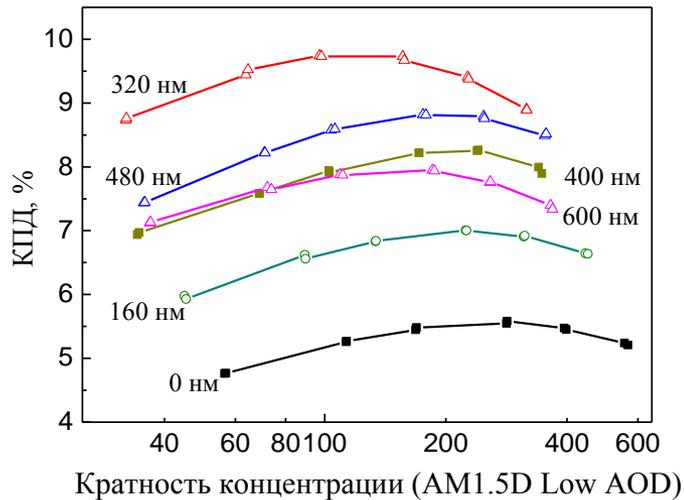
$\eta = 11.1\%$ (АМО, $K_c=102$)
 $\eta = 12.8\%$ (АМ1.5 D, $K_c=121$)

Влияние диффузионного профиля на КПД преобразователей



Распределение атомов цинка в GaSb с исходной толщиной диффузионного р-эмиттера 850 нм (1). Толщина удаленного слоя: 1 – 0 нм; 2 – 80 нм; 3 – 160 нм; 4 – 240 нм; 5 – 320 нм; 6 – 400 нм; 7 – 480 нм; 8 – 560 нм.

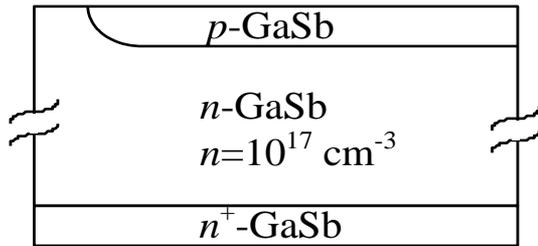
Зависимость КПД ТФЭ-элементов на основе GaSb от температуры вольфрамового излучателя: 1 – GaSb-структура без утончения р-n-перехода; 2 – при глубине травления диффузионного слоя 320 нм.



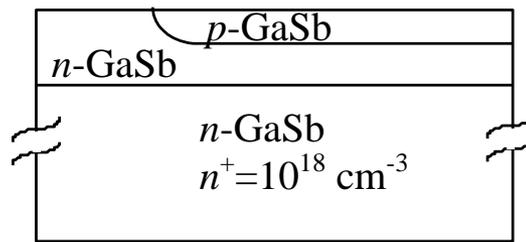
Зависимость КПД от кратности концентрирования солнечного излучения (AM1.5D, $\Delta\lambda=500-1820$ нм) при различной глубине травления эмиттера.

Зависимость КПД солнечных элементов на основе GaSb (AM1.5D, 1000 Вт/м^2) от глубины травления эмиттера при различных плотностях генерируемого фототока.

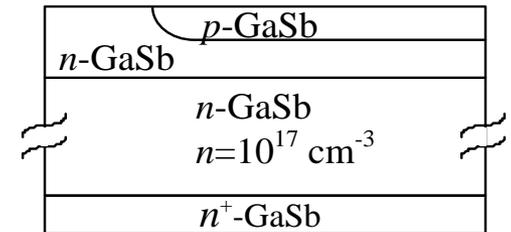
Особенности получения преобразователей на основе GaSb комбинацией жидкофазной эпитаксии и диффузии



вариант 1
(диффузия в подложку,
тыльный эпитаксиальный n^+ -слой)

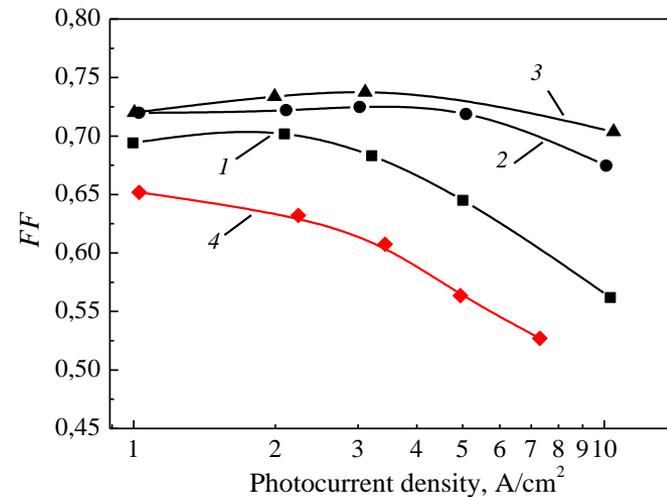


вариант 2
(диффузия в
эпитаксиальный базовый слой)

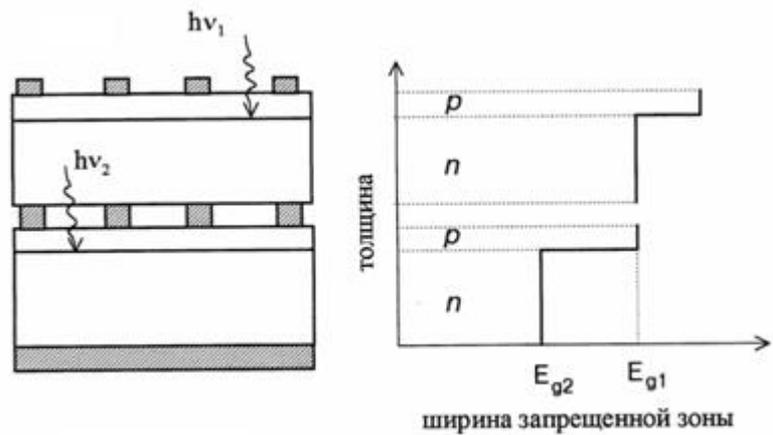
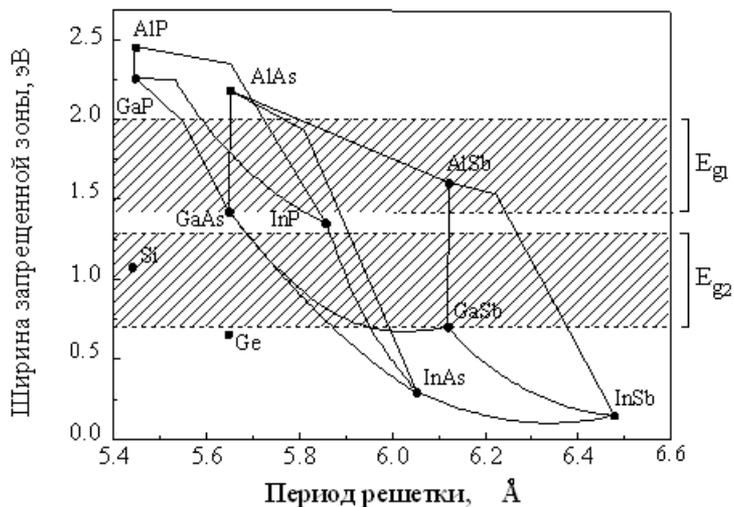


вариант 3
(с фронтальным и тыльным
эпитаксиальными слоями)

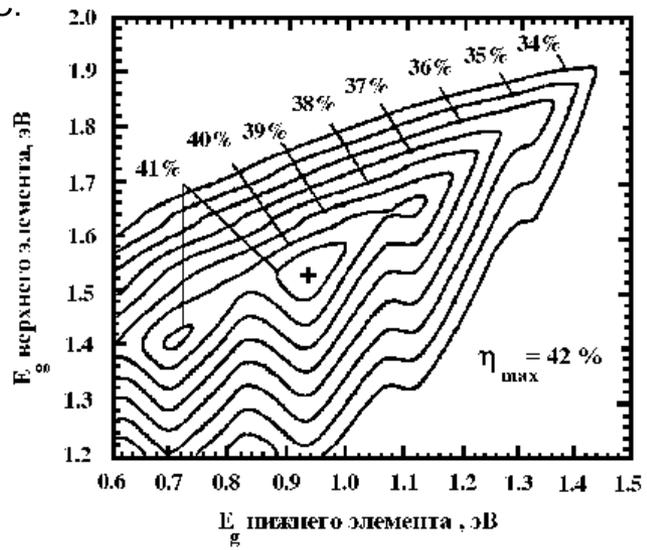
Зависимость фактора заполнения ВАХ от плотности фототока для фотоэлементов по варианту 1-3 в сравнении с диффузионным преобразователем (вариант 4).



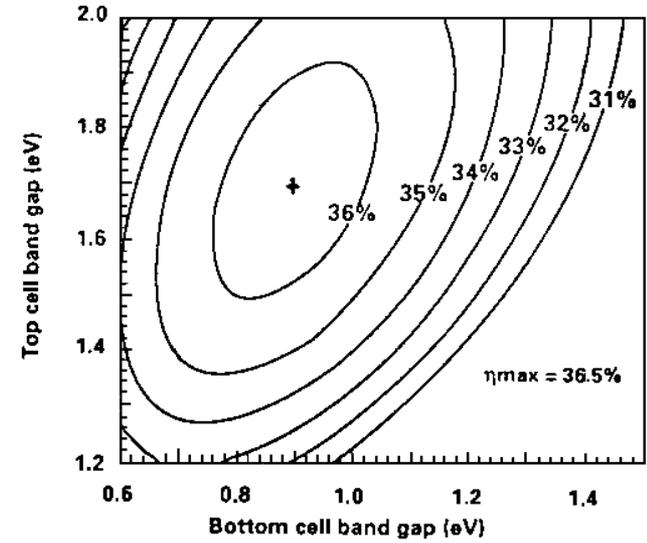
Двухпереходные механически стыкованные солнечные элементы



Эффективность преобразования солнечной энергии в тандеме из последовательно соединенных элементов, согласованных по току, в условиях AM1.5, $K_c=500$ при $T=50$ °C.



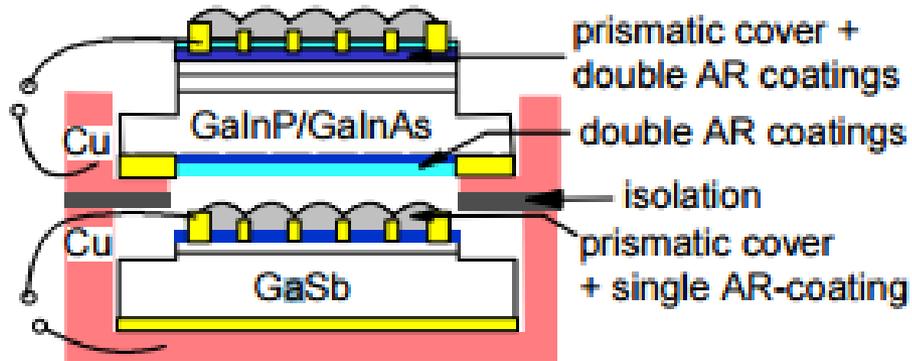
Зависимость эффективности фотоэлектрического преобразования от ширины запрещенной зоны двухпереходного каскада в условиях АМО, $K_c=100$, $T=50$ C.



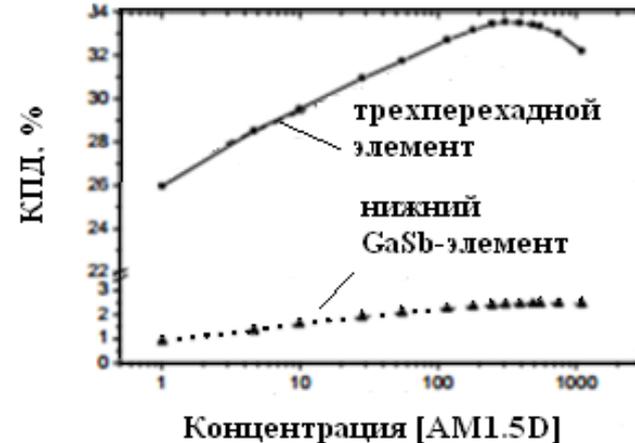
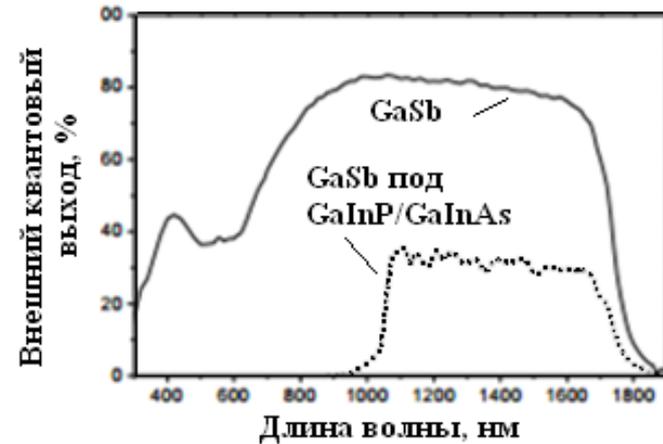
Достижения в мире двухпереходных для солнечных каскадов GaAs/GaSb

Тип элемента	Размер элемента, см ²	КПД	Условия измерений	Источник
GaSb (за GaAs)		8.3 %	AM0, Kc=240	L.Fraas, J.Avery, IEEE Transactions on Electron Devices 37(2), 1990, 443 – 449
GaAs/GaSb	0.05	30.5 %	AM0, Kc=100	S.Bailey, D.Flood, Prog. Photovolt. Res. Appl., 6, 1998, 1-14
GaAs/GaSb		31.1 %	AM1.5D, Kc=100	A.W.Bett, F.Dimroth, G.Stollwerck, O.V.Sulima. Appl. Phys. A, 69, 1999, 119-129
GaAs/GaSb	0.053	32.6 %	AM1.5, Kc=100	S.Bailey, D.Flood, Prog. Photovolt. Res. Appl., 6, 1998, 1-14
GaAs/GaSb		35.6 %	AM1.5, 25 °C	L.Fraas, J.Avery, IEEE Transactions on Electron Devices 37(2), 1990, 443 – 449
GaAs/GaSb		32.5 %	AM1.5, N.O.T.	L.Fraas, J.Avery, IEEE Transactions on Electron Devices 37(2), 1990, 443 – 449

Трехпереходные каскадные солнечные элементы

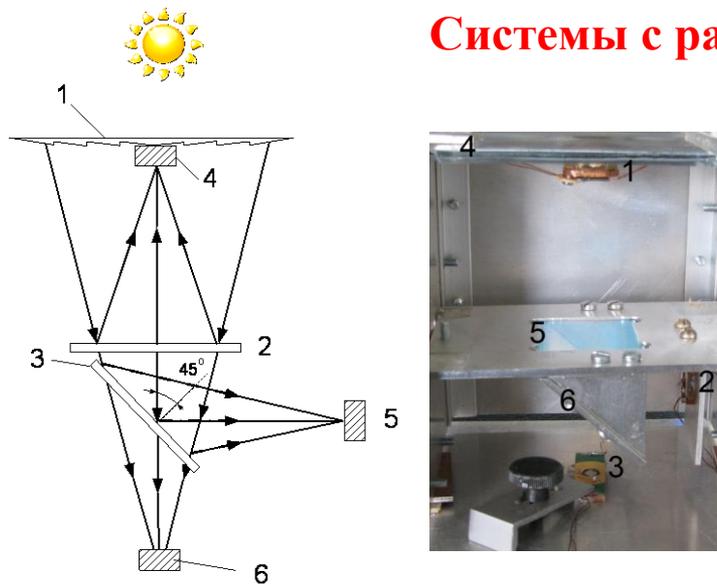


КПД тандема - 33.5% при $K_c=308$.
Прибавка за счет GaSb-фотоэлемента - 2.4%, AM1.5D.
Причины низкого (уступающего расчетному) КПД GaSb-субэлемента: высокий уровень легирования подложки и неоптимальное просветление верхнего преобразователя.

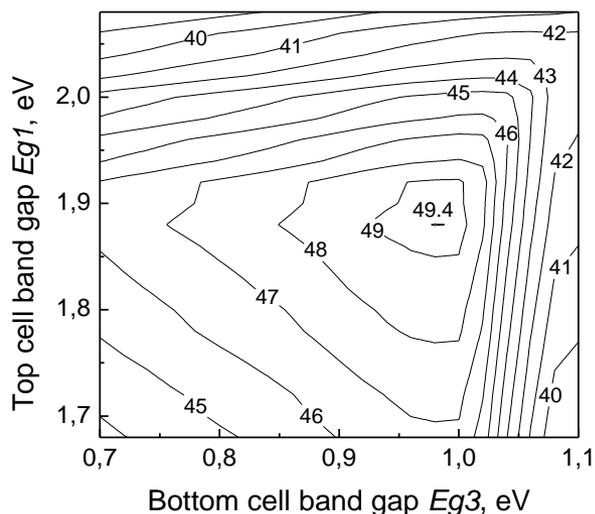


Параметры трехпереходного преобразователя и его субэлементов. [A.W.Bett et al. Proc. 17th EU-PVSEC, Munich, 2001].

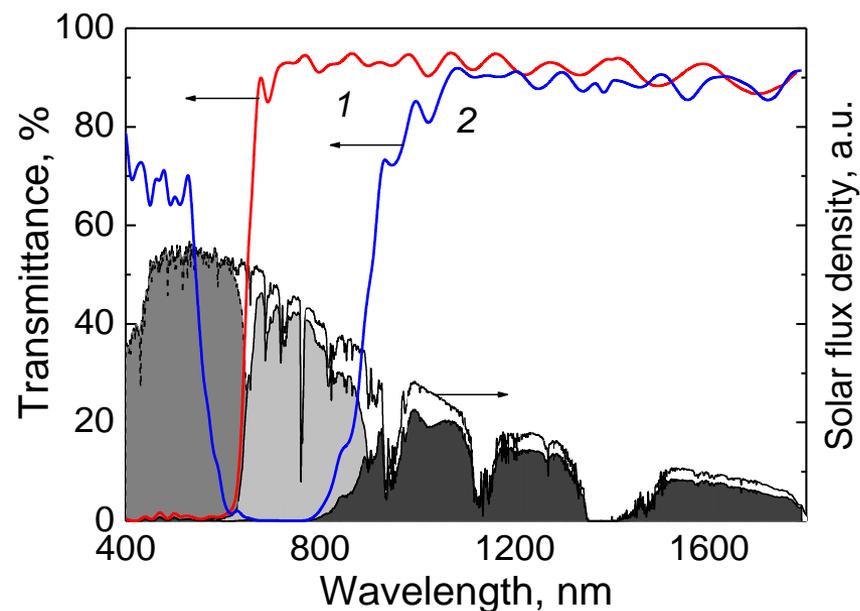
Системы с расщеплением светового потока



Оптическая схема и фотография фотоэлектрического модуля с расщеплением солнечного спектра: 1 – линза Френеля; 2,3 – дихроичные фильтры; 4 – верхний $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ фотоэлемент ($x = 0.3-0.35$); 5 – средний GaAs фотоэлемент; 6 – нижний GaSb фотоэлемент.

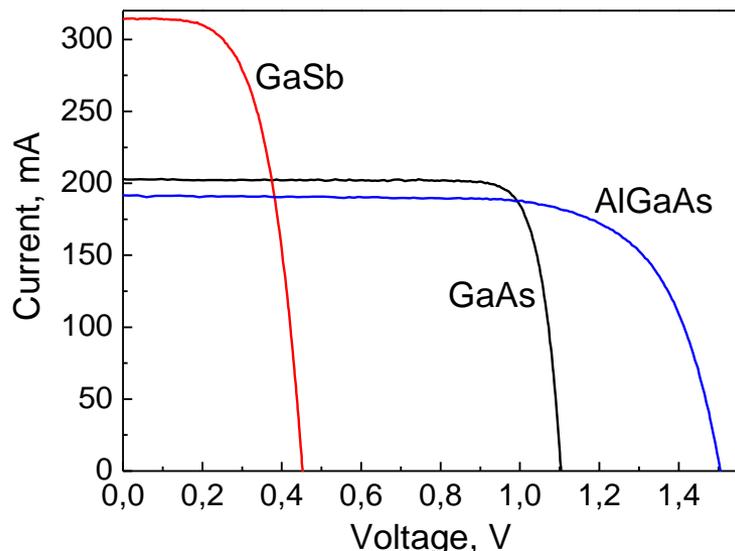


Расчетная эффективность модуля со спектральным расщеплением солнечного излучения (AM1.5D, $K_c=300$) на основе трех однопереходных элементов (средний элемент с $E_{g2}=1.42$ эВ) в зависимости от значений E_{g1} и E_{g3} .



Зависимость коэффициента пропускания селективных фильтров от длины волны падающего излучения. 1 – фильтр, отражающий солнечное излучение на широкозонный элемент, 2- фильтр, отражающий солнечное излучение на средний GaAs элемент.

Системы с расщеплением светового потока (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)



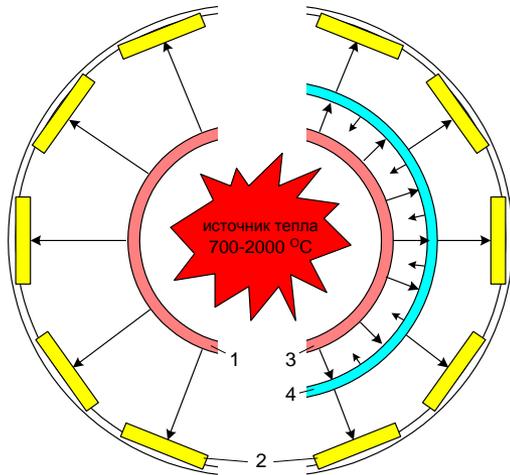
ВАХ трех однопереходных элементов, установленных в модуль со спектральным расщеплением света (импульсный солнечный имитатор, неконцентрированное излучение, AM1.5D low AOD).

Эффективность разработанных солнечных элементов для системы с расщеплением солнечного спектра

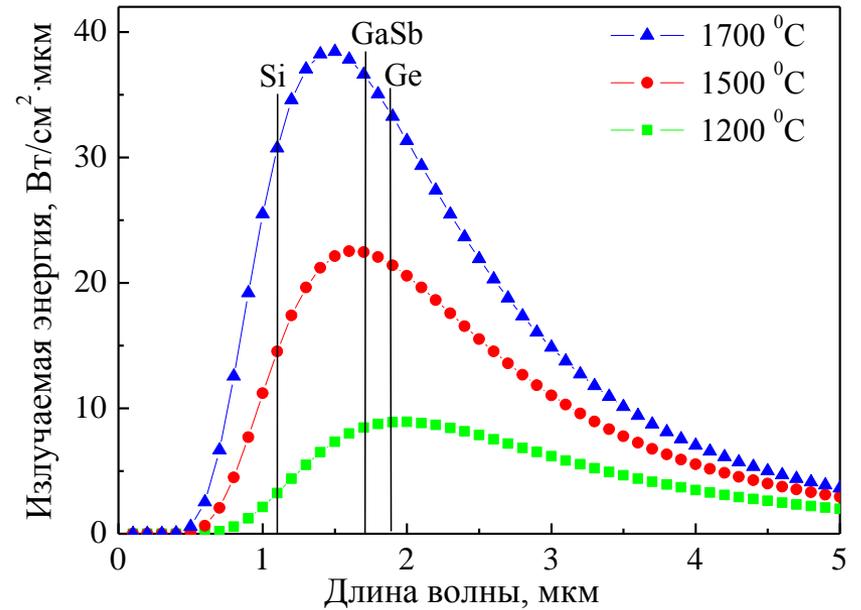


№	Тип элемента	$E_g, \text{эВ}$	Рабочий диапазон, нм	Эффективность при кратности концентрирования $K_c \sim 200$		Максимально достигнутые эффективности	
1	AlGaAs	1.86	340-688	200	17.56	66	19.01
2	GaAs	1.42	688-900	200	12.12	194	12.13
3	GaSb	0.72	900-1840	200	8.38	213	8.44
Суммарное значение эффективности					38.06		39.58

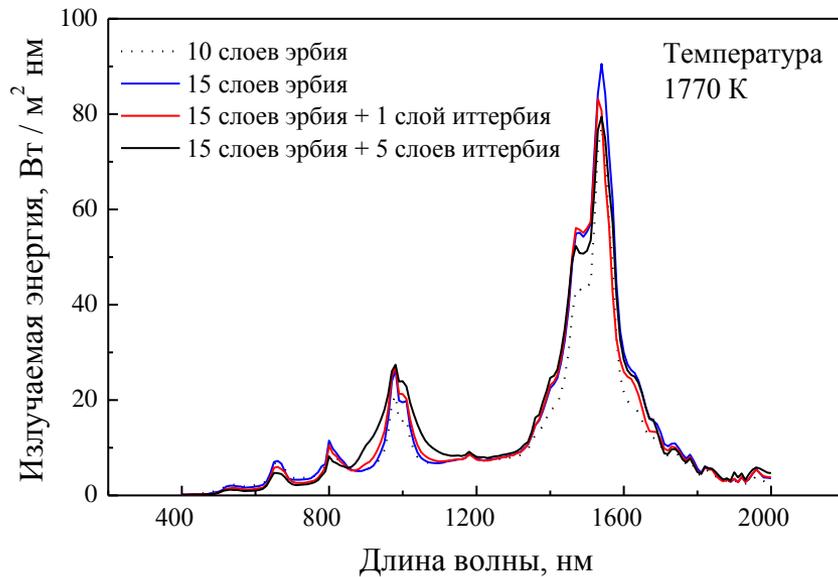
Термофотоэлектрические (ТФЭ) системы



ТФЭ-система в общий виде

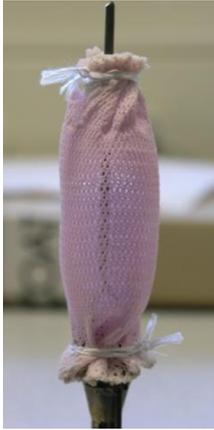


Спектры излучения абсолютно черного тела



Спектры излучения селективного эмиттера (фото) на основе Y_2O_3 с покрытием Er_2O_3 или Yb_2O_3

Селективные эмиттеры в ТФЭ-системах



Эмиттер типа «mantle» для сжигания потока газа под оболочкой, полученной с использованием растворов, содержащих редкоземельные компоненты (Yb, Er, Y). Оболочка фиксируется керамическими кольцами AlO_x на металлическом стержне.

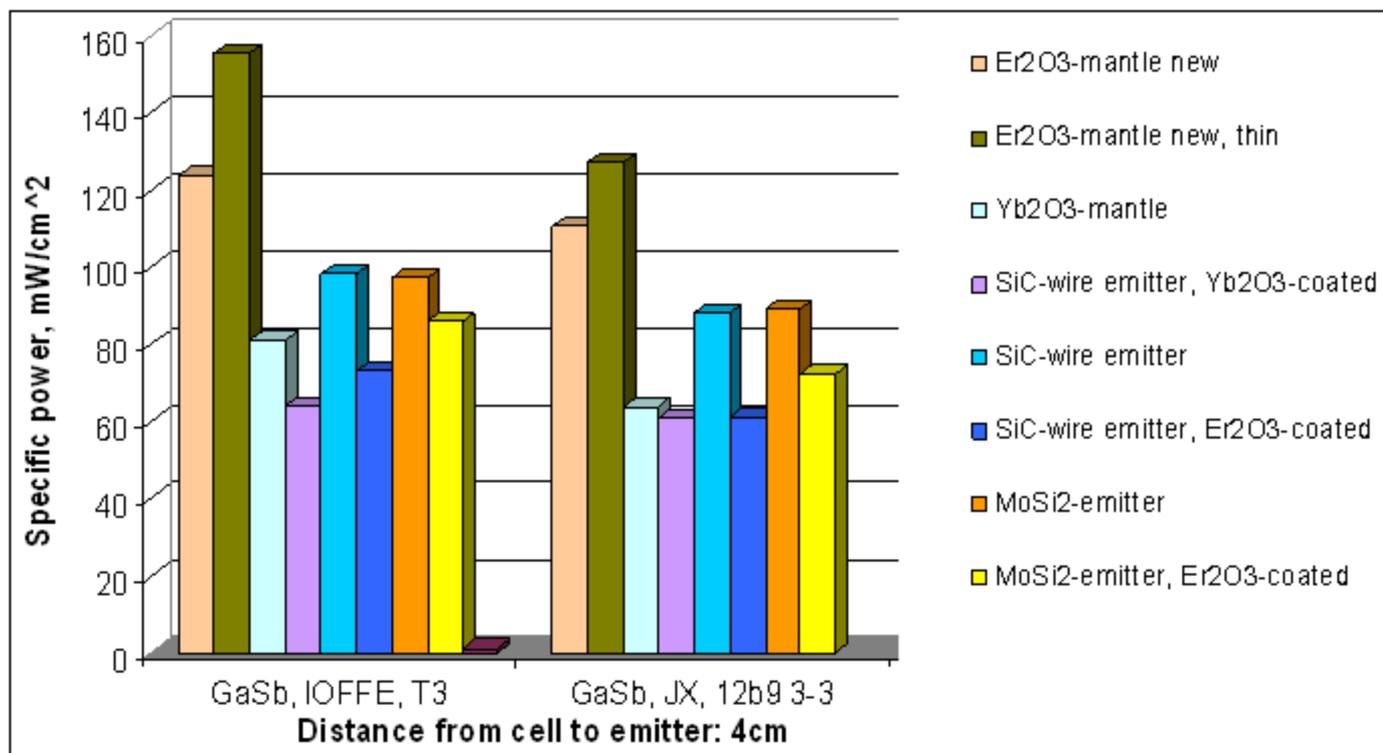


Цилиндрические перфорированные эмиттеры на основе дисилицида молибдена $MoSi_2$ без покрытия и с дополнительным нанесением Er_2O_3 . Термически устойчивы в потоке газа и температуре до $1700\text{ }^{\circ}C$.

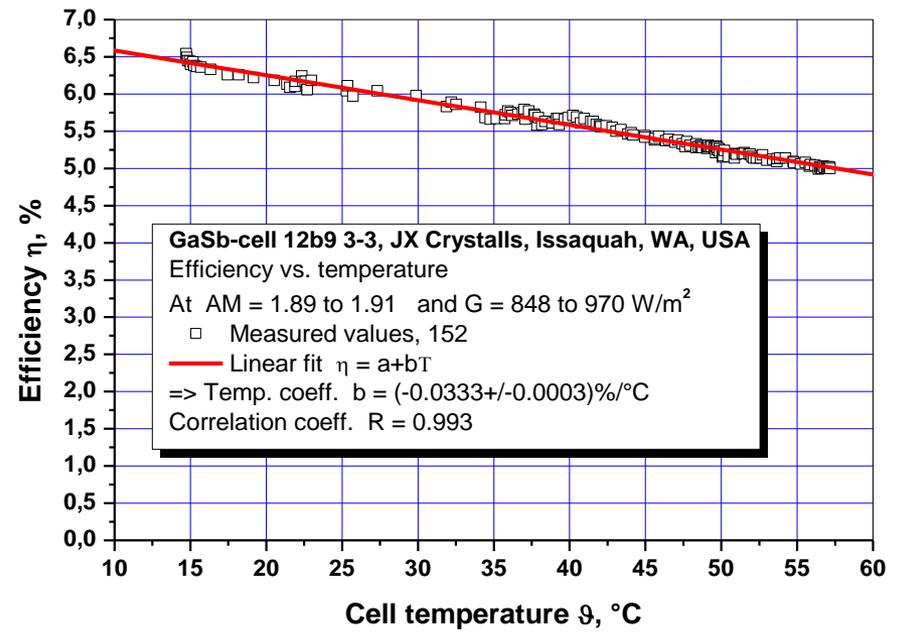
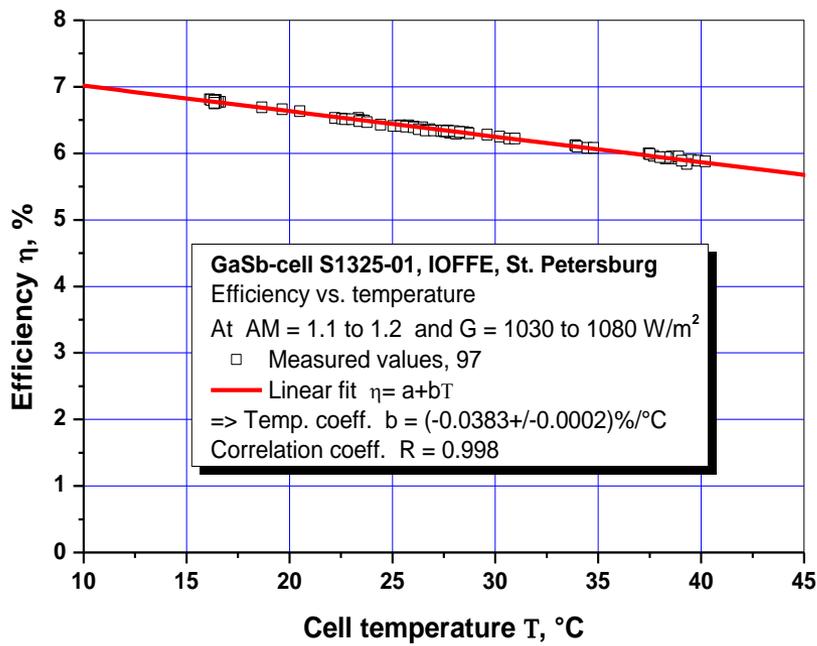


Эмиттер на основе SiC без покрытия, с покрытием иттербием и эрбием.

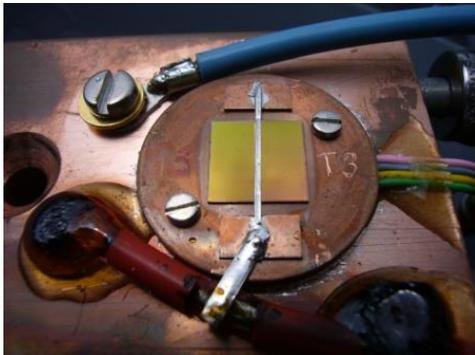
Фотоэлементы ФТИ им. А.Ф. Иоффе под селективными эмиттерами (Paul Scherrer Institute)



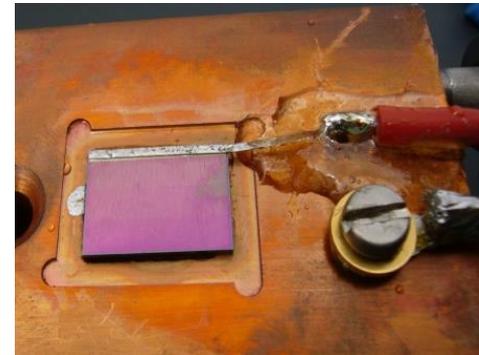
Лучшую комбинацию дают преобразователь ФТИ им. А.Ф. Иоффе и эмиттер Er2O3 (153 мВт/см² в сравнении с 125 мВт/см² для фотоэлемента JX Crystals).

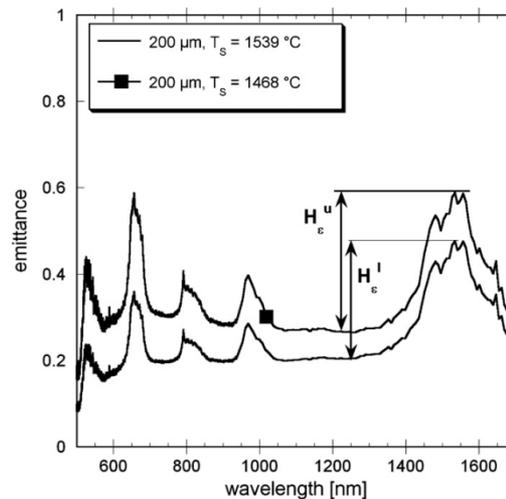
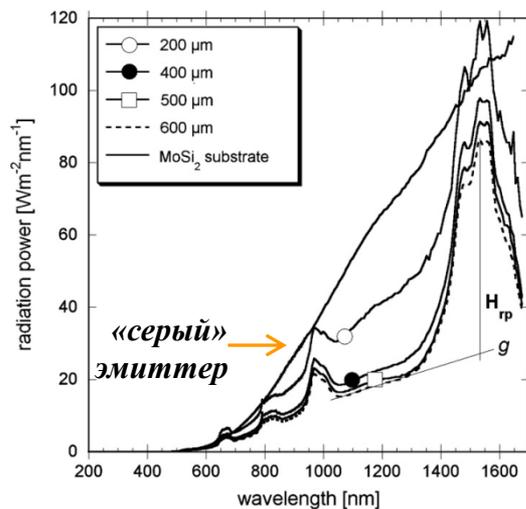


Преобразователь ФТИ



Преобразователь JX Crystals



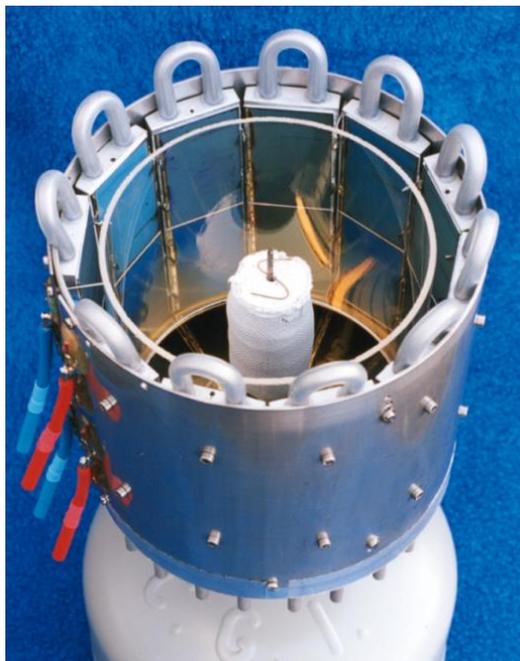


Излучаемая энергия в зависимости от толщины пленки Er:YAG (плазменное напыление) на MoSi_2 и температуры эмиттера.

Возможности ТФЭ системы с Si- и GaSb-преобразователями и эмиттерами разных типов.

Substrate/film	Photocell	I_{sc} (A cm^{-2})	V_{oc} (V)	MPP (mW cm^{-2})	FF (%)	T_p (°C)
MoSi_2 (4.5 mm)	Si	0.033	0.66	15.4	70.8	1549
	GaSb	0.237	0.41	60.7	63.2	
MoSi_2 (2 mm)	Si	0.045	0.67	21	70.2	1529
	GaSb	0.262	0.41	69.6	64	
MoSi_2 (2 mm)/2 μm Pt	Si	0.0395	0.67	18.3	69.3	1630
	GaSb	0.149	0.39	36.1	62.1	
$\text{MoSi}_2/\text{Er:YAG}$ (400 μm)	Si	0.02	0.63	8.5	67.6	1607
	GaSb	0.135	0.39	32.2	61.5	
$\text{MoSi}_2/\text{Er}_2\text{O}_3$ (100 μm)	Si	0.019	0.63	8	66.1	1572
	GaSb	0.155	0.39	37.9	62	
$\text{MoSi}_2/\text{Yb}_2\text{O}_3$ (140 μm)	Si	0.05	0.68	23.9	70.7	1650
	GaSb	0.222	0.41	57.1	63.1	
Er_2O_3 (400 μm)	Si	0.063	0.69	32.3	74.8	
	GaSb	0.336	0.42	92.3	65.1	
SSiC (2 mm)	Si	0.04	0.67	18.4	69.1	1490
	GaSb	0.375	0.43	104.3	65	

ТФЭ генераторы с Si-фотоэлементами



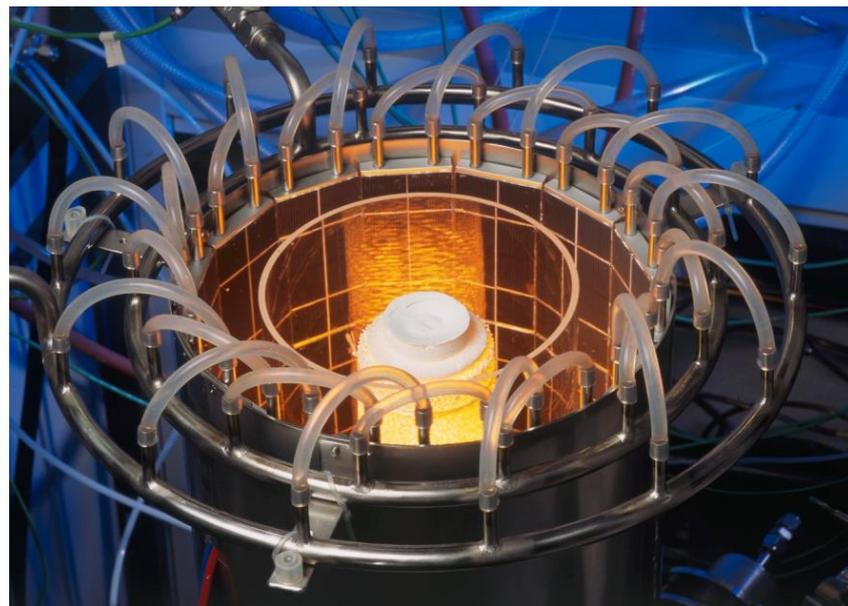
Эмиттер: Yb_2O_3

Водяное охлаждение

Подводимая тепловая мощность: 1985 Вт

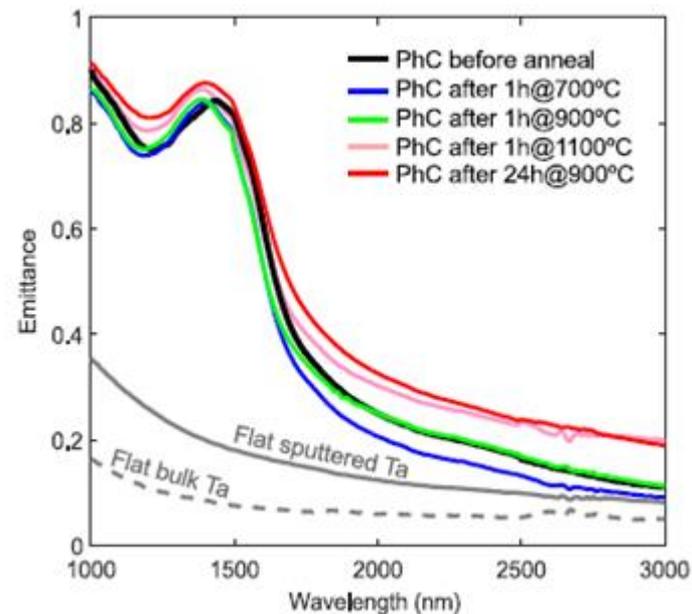
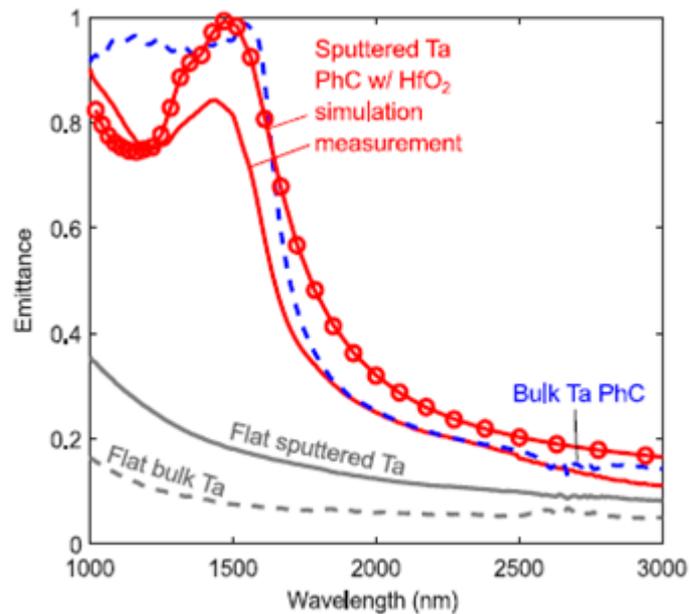
Выходная электрическая мощность: 56 Вт

КПД системы: 2.8 %

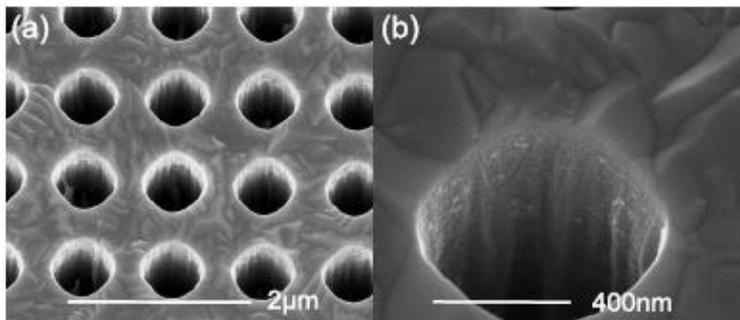


КПД системы: от 0.54 %
(при SiC-эмиттере) до 1.0 % (при
иттербиевом эмиттере)

Эмиттеры на основе фотонных кристаллов



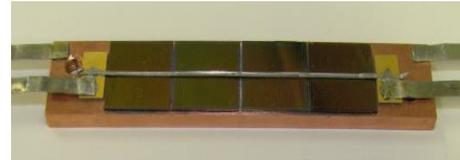
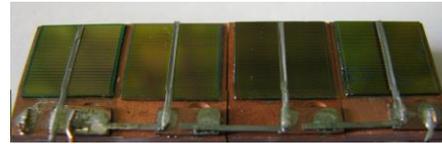
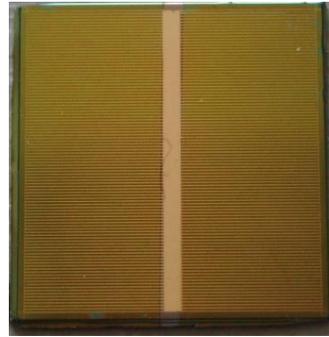
Спектры излучения фотонных кристаллов



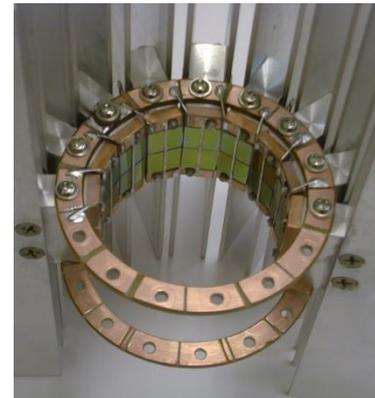
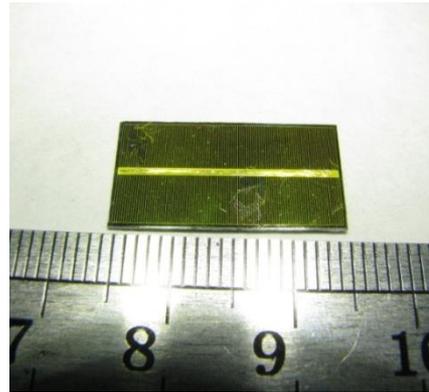
Внешний вид фотонных кристаллов

Монтаж преобразователей в ТФЭ-модуль

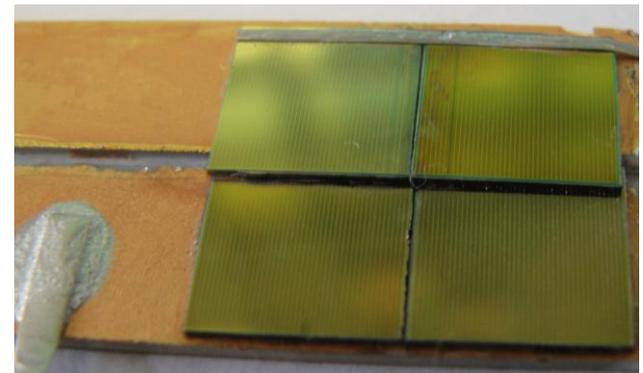
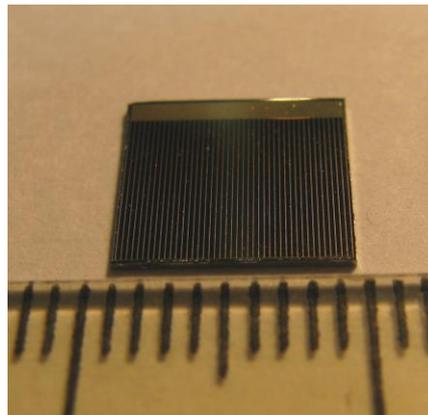
24 или 32 преобразователя
площадью $1 \times 1 \text{ см}^2$



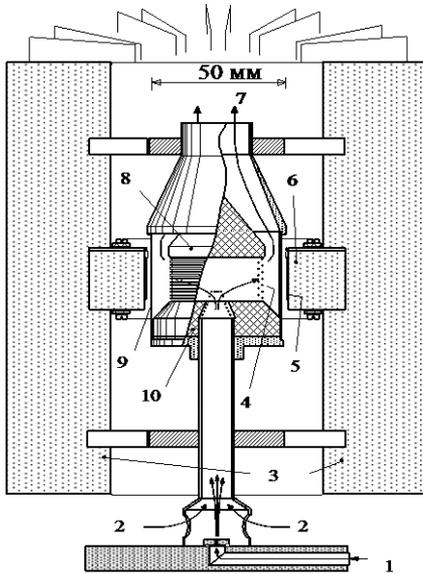
15 последовательно
соединенных
преобразователей
площадью $1 \times 2 \text{ см}^2$.



Террасированные
фотоэлементы
8 мм x 9 мм

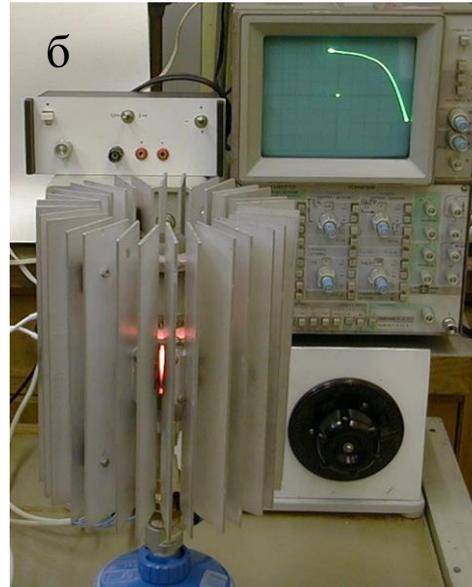


Топливные термофотозлектрические генераторы ФТИ им. А.Ф.Иоффе



← Поперечный разрез и фотография генератора:
1-подача пропана или бутана; 2-подача воздуха; 3- конвекционно-охлаждаемый радиатор; 4-танталовый ИК-эмиттер; 5-фотозлектрический преобразователь; 6-теплоотвод; 7-отходящие газы; 8-крышка; 9- кварцевое окно; 10-тепловая изоляция.

Экспериментальные портативные генераторы ФТИ им. А.Ф. Иоффе - с малогабаритной спиртовкой (а) и газом (бутан) (б-в, 7-10 Вт электрической мощности).

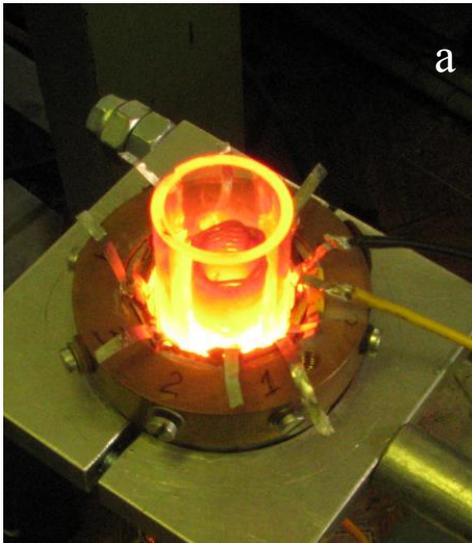


Эмиттеры для топливных ТФЭ-систем (ФТИ им. А.Ф.Иоффе)

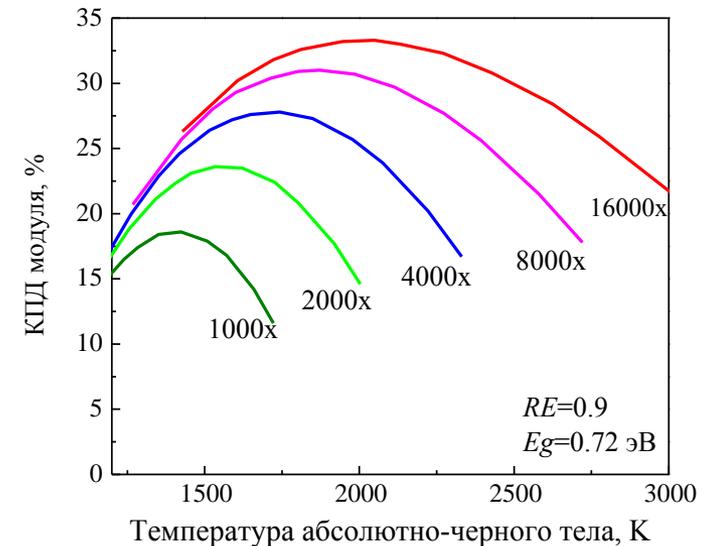
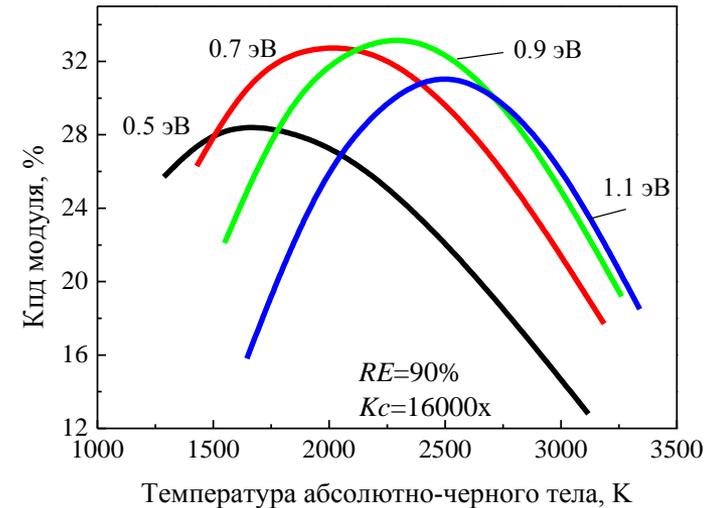
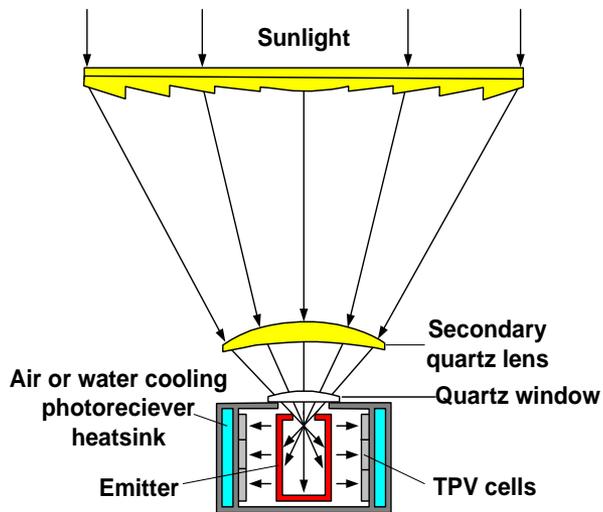


Зона сгорания топлива в термофотоэлектрическом генераторе

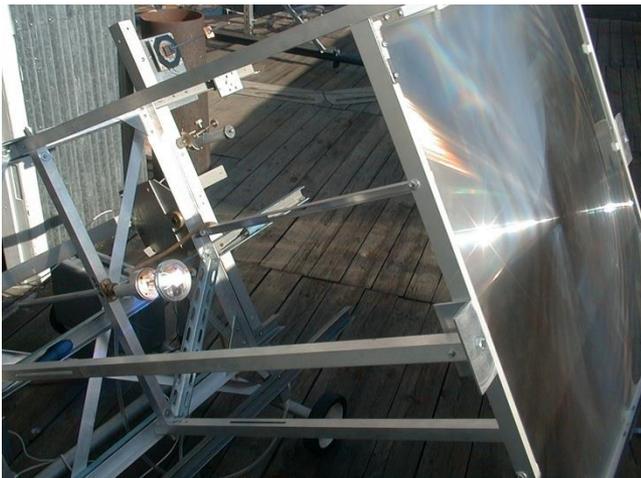
Металлический (а, б) и SiC (в, г) эмиттеры, нагреваемые газовой горелкой



Термофотоэлектрические генераторы с концентрированным солнечным излучением (ФТИ им. А.Ф.Иоффе)



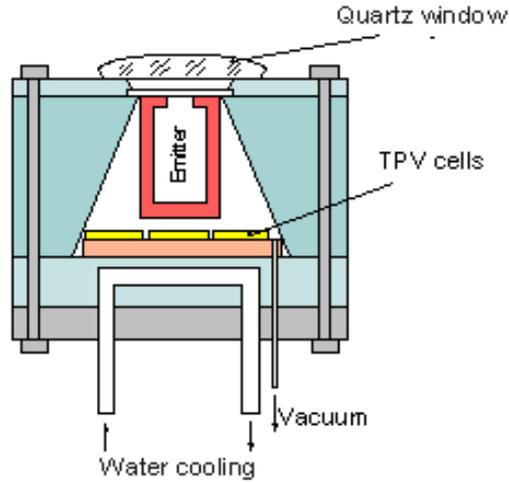
Металлический эмиттер под концентрированным солнечным излучением линзы Френеля



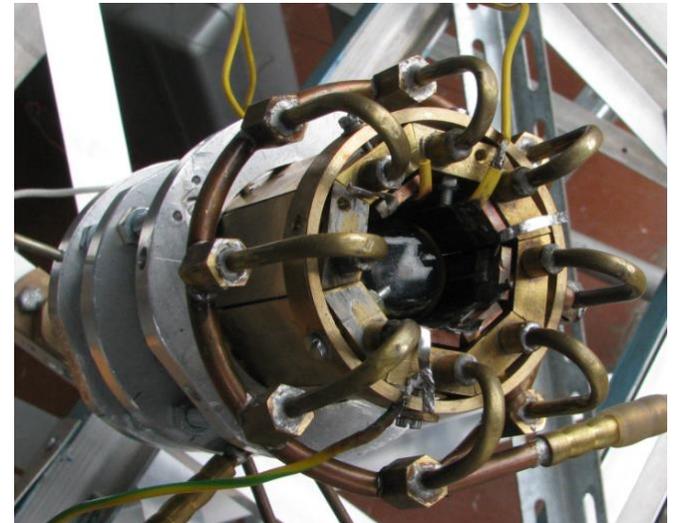
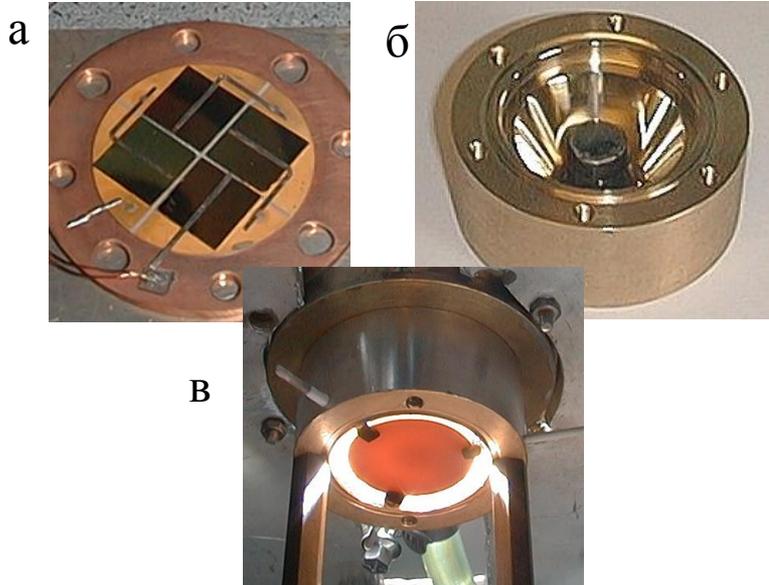
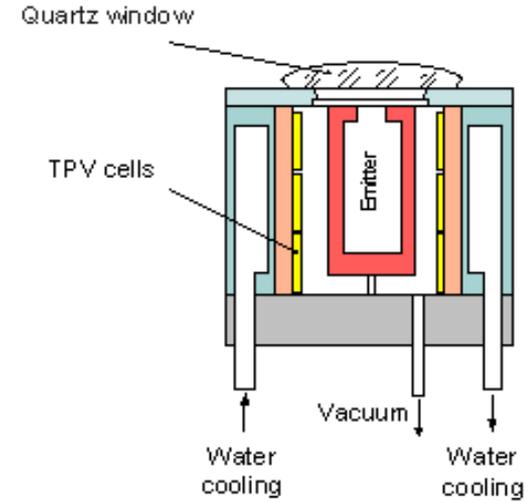
Расчетные зависимости эффективности фотоэлектрического преобразования в СТФЭ модуле на основе GaSb от температуры эмиттера.

Конструктивные особенности термофотоэлектрических генераторов

генератор конического типа с плоским фотоприёмным модулем (а), вольфрамовым (б) или SiC (в) эмиттером

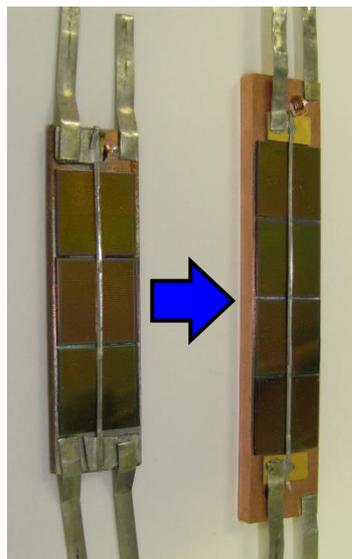
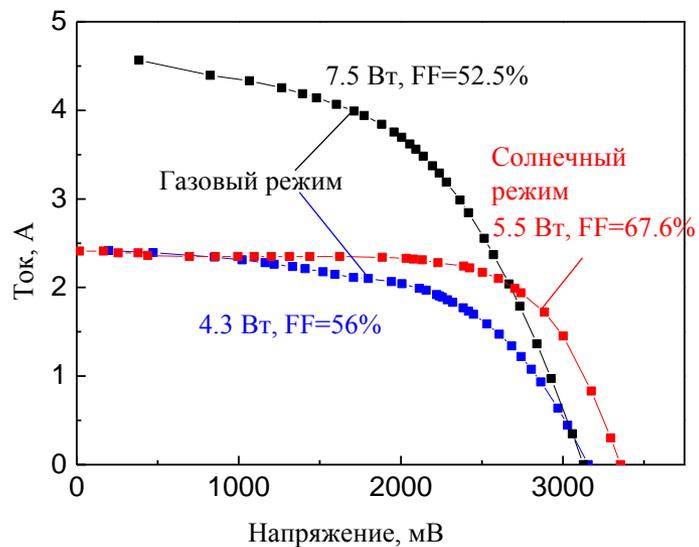


генератор цилиндрического типа

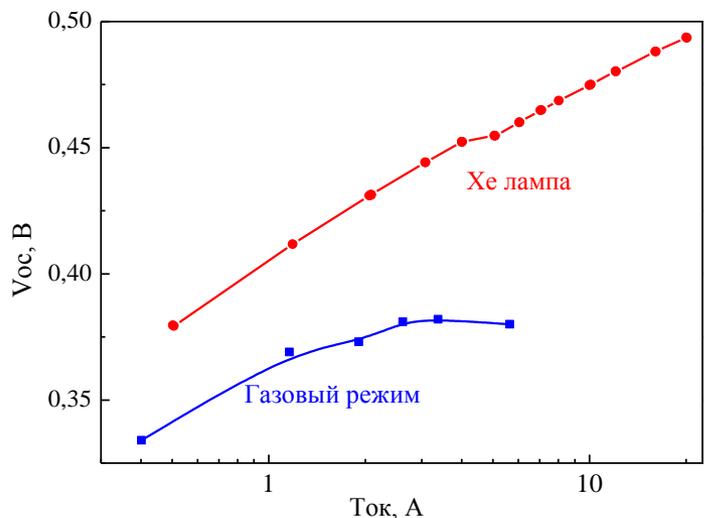
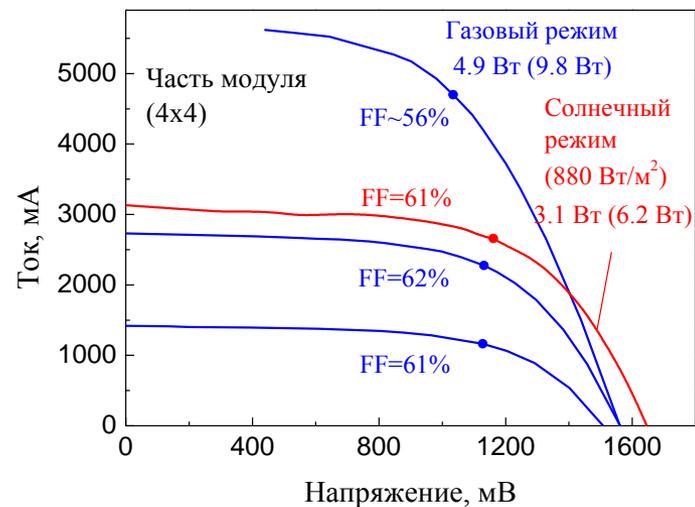


Характеристики цилиндрической ТФЭ системы с металлическим эмиттером, нагреваемых концентрированным солнечным излучением или газовой горелкой

Модуль из 24 фотоэлементов

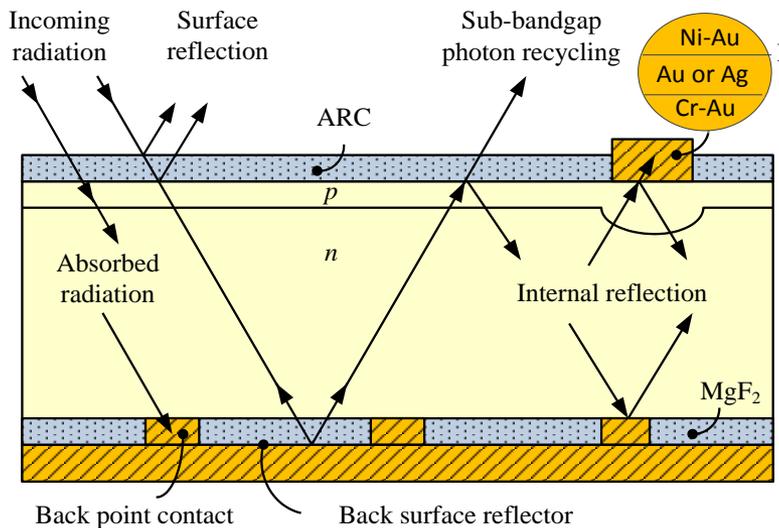
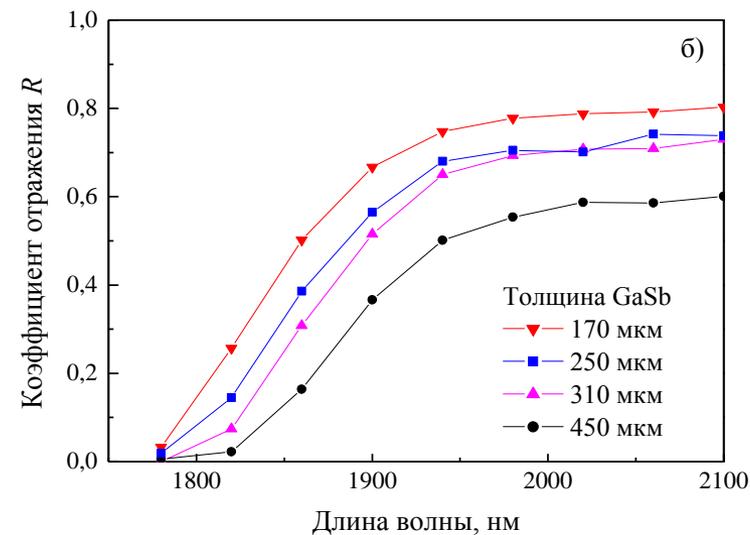
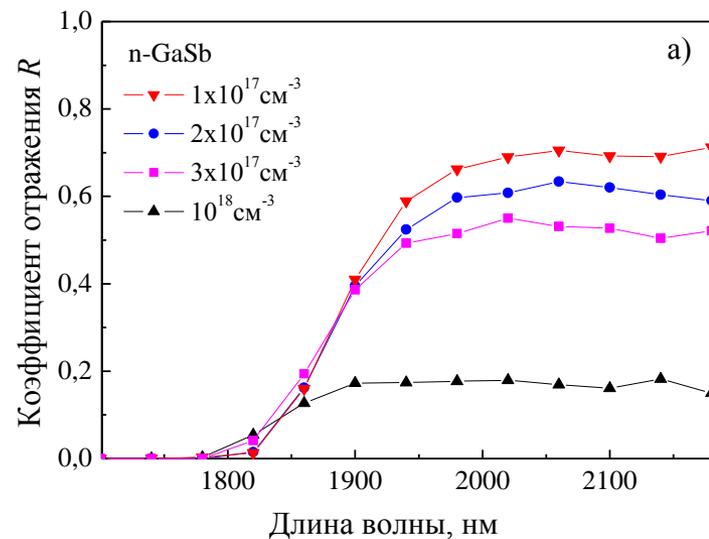
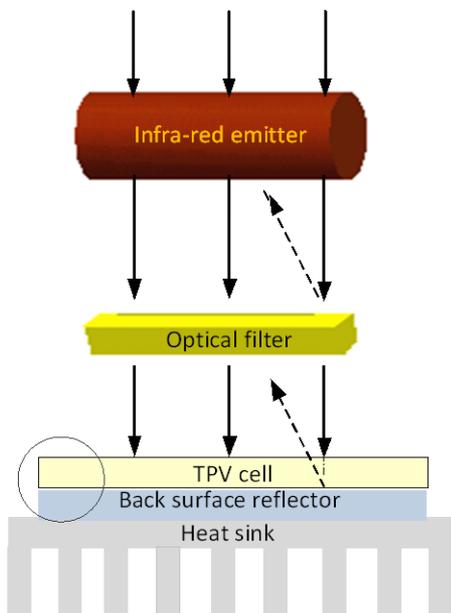


Модуль из 32 фотоэлементов



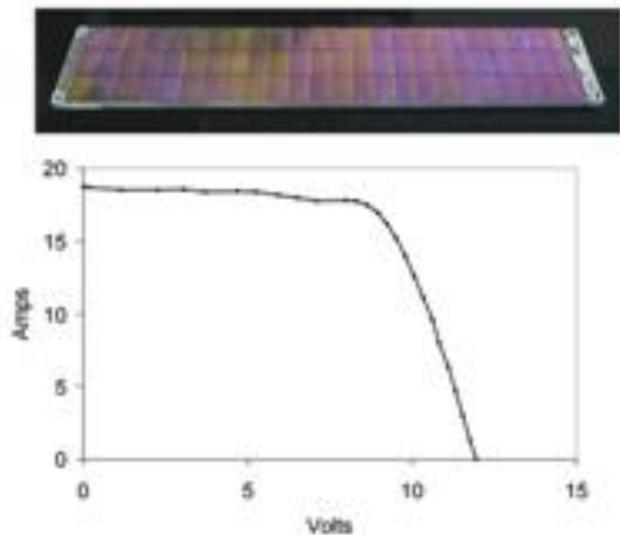
Вольфрамовый эмиттер под галогенной лампой 150 Вт

Формирование тыльного зеркала



Зависимость коэффициента отражения «подзонных» фотонов а) от концентрации свободных носителей заряда (толщина подложки 450 мкм); б) от толщины подложки ($n = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).

Разработки JX Crystals Inc. в области термофотоэлектрических генераторов с преобразователями на основе GaSb



72 фотопреобразователя в панели 5 см х 26 см:

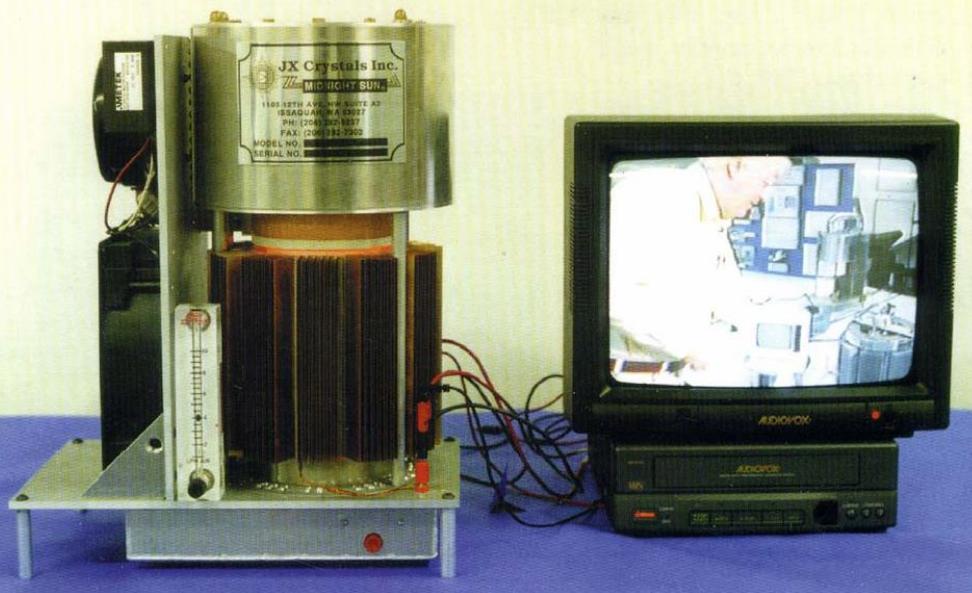
$$V_{oc} = 11.94\text{В}$$

$$FF = 0.68$$

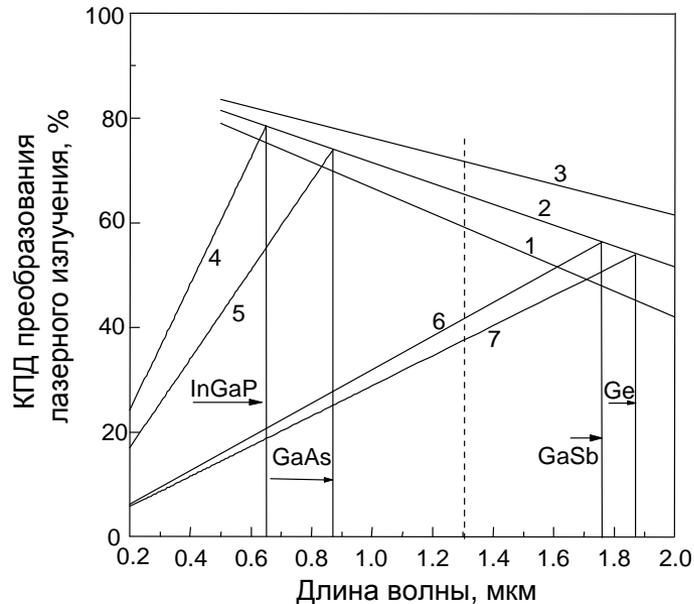
$$I_{sc} = 18.76\text{ А}$$

$$P_{max} = 152\text{ Вт}$$

Создана линейка генераторов от 20 Вт до 4 кВт, в частности, Midnight Sun (12 В, 80 Вт) и портативный генератор с воздушным охлаждением (показан в работе с радио).



Преобразователи лазерного излучения

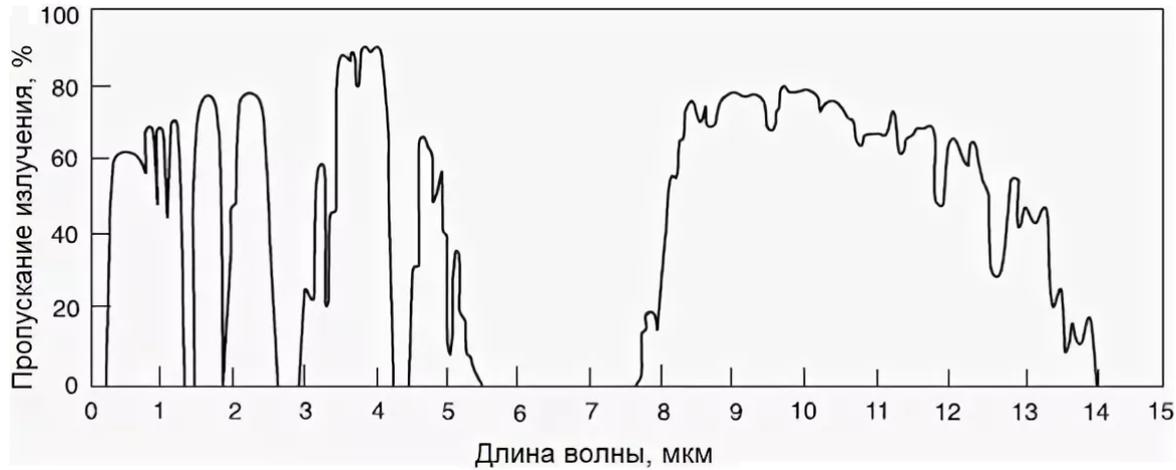


Максимальные значения монохроматического КПД для величин фототока $i_{\phi} = 0.1, 1.0, 10 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ (линии 1, 2, 3 соответственно) в зависимости от граничной длины волны полупроводникового материала ФЭП; 4, 5, 6, 7, – КПД преобразования энергии монохроматического излучения для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

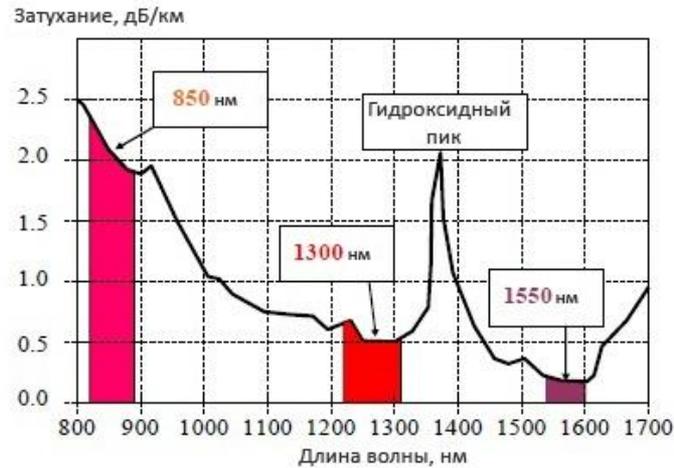
Теоретический предел КПД фотопреобразователей на основе GaAs и GaSb для излучения лазеров, выполненных на основе различных материалов

Лазер		КПД фотодетекторов	
Материал лазера	Длина волны, нм	ФЭП на основе GaAs	ФЭП на основе InGaAs и GaSb
AlGaInP	650	55	20
AlGaAs	840	75	27
YAG:Nd	1060	-	35
InGaAsP	1300	-	40
InGaAsP	1550	-	45

Передача лазерной энергии на расстояние



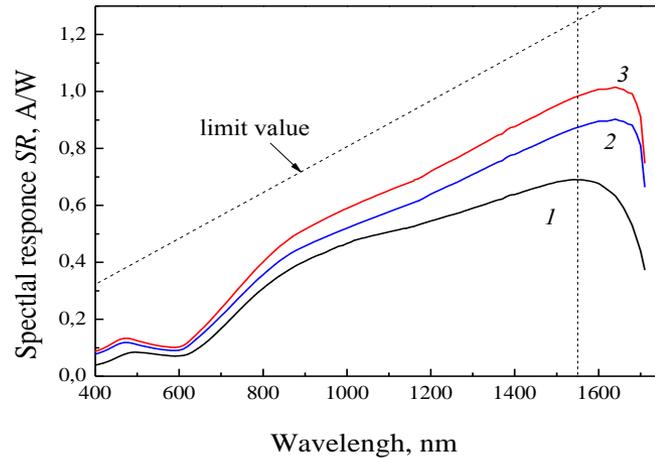
а)



б)

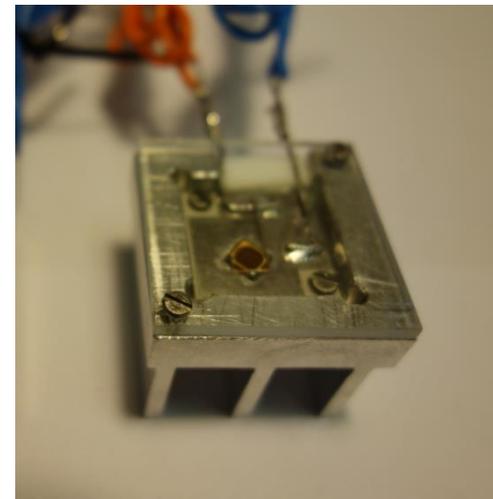
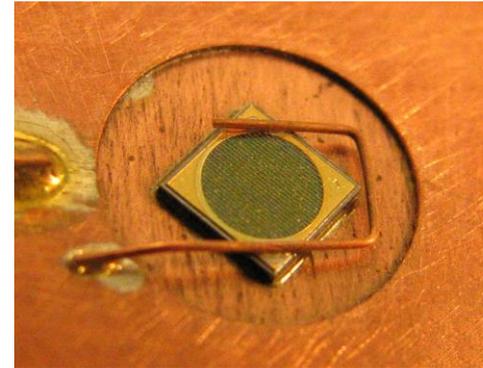
Окно прозрачности атмосферы (а) и оптического волокна (б)

Параметры преобразователей лазерного излучения в зависимости от метода их получения



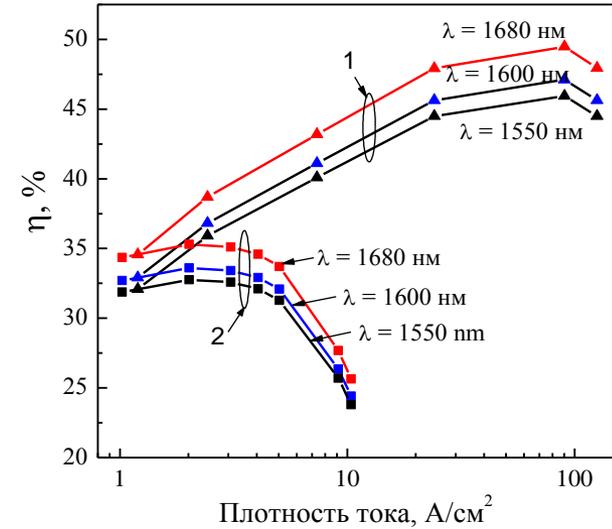
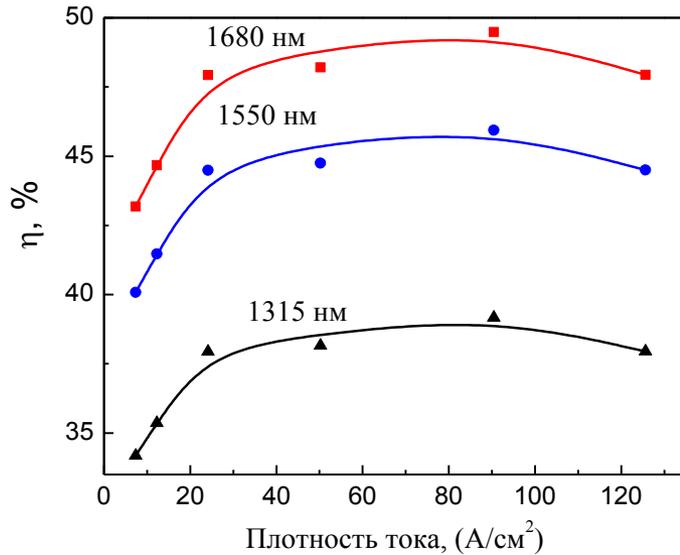
Спектральная чувствительность преобразователей, полученных диффузией в подложку (1) и в эпитаксиальный базовый слой (2, 3). Коэффициент затенения 20% (1, 2) и 10% (3).

Напаянные на теплоотвод приемники лазерного излучения с круглой фотоактивной поверхностью



Длина волны лазера, нм	КПД, %		
	Диффузия в подложку, затенение 20%	Диффузия в эпитаксиальный слой, затенение 20%	Диффузия в эпитаксиальный слой, затенение 10%
1550	28.4	35.8	40.3
1640	25.9	37.0	41.6
1700	18.1	32.9	36.6

Эффективность преобразователя на разных длинах волн лазера

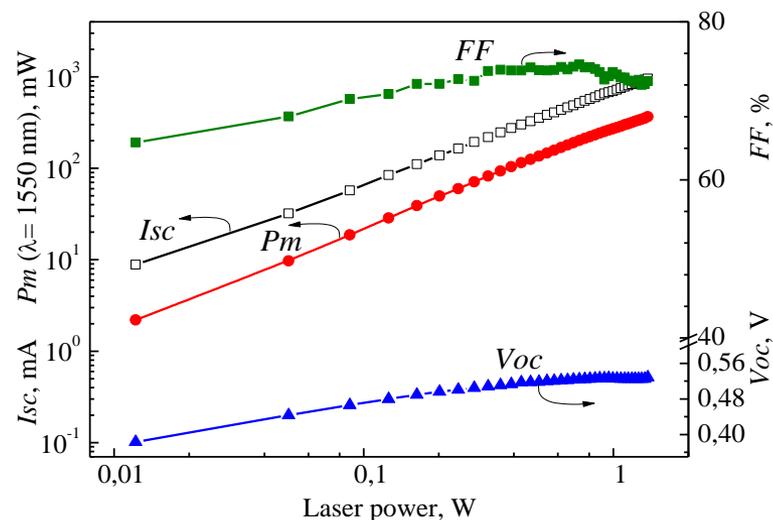
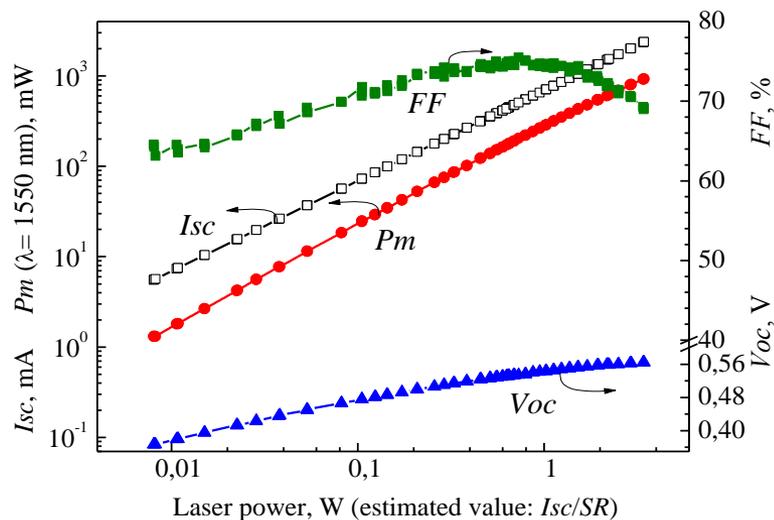


Зависимость КПД преобразования фотоэлементов площадью 2 мм² от плотности фототока при их облучении монохроматическим излучением с длиной волны: 1 – 1680 нм, 2 – 1550 нм, 3 – 1315 нм.

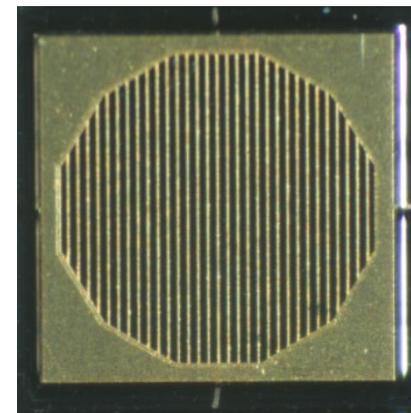
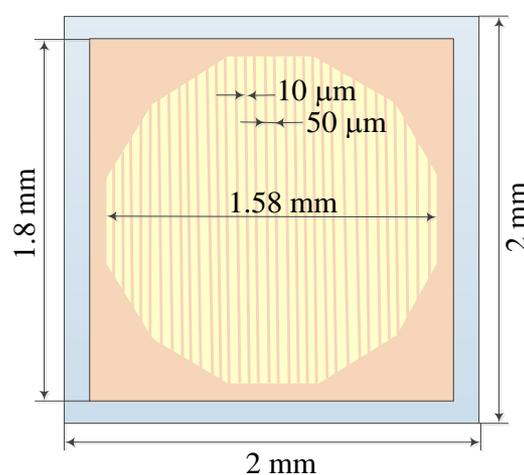
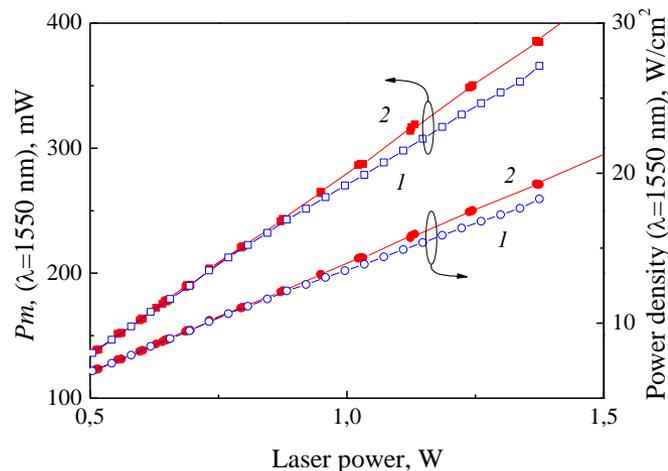
Зависимость КПД преобразования GaSb фотоэлементов на основе GaSb площадью 0,02 см² (1) и 1 см² (2) от плотности фототока для длин волн падающего излучения 1550, 1600 и 1680 нм.

N	Длина волны, мкм	J, А/см ²	КПД, %
1	1.315	до 100	38.0
2	1.55		45.0
3	1.68		49.0
4			

Преобразователи при однородном и неоднородном лазерном излучении



Зависимость выходных параметров преобразователя при однородной (слева) и (справа) частично неоднородной (лазер с длиной волны 1550 нм) засветкой. Размер фотоэлемента 2 мм x 2 мм.



P_m преобразователя площадью $S=4$ мм² при однородном (Xe-лампа, 1) и неоднородном (2, лазерный луч) распределении излучения на фоточувствительной поверхности.

Перспективы использования преобразователей лазерного излучения

- дистанционное энергопитание беспилотных летательных аппаратов и передача энергии из космоса на Землю посредством лазерного луча;
- энергоснабжение в наземных условиях в качестве альтернативы традиционным кабельным линиям электропередачи;
- беспроводная зарядка малогабаритной электроники бытового назначения;
- беспроводная зарядка элементов питания имплантируемых кардиостимуляторов и других медицинских автономных аппаратов поддержания жизнедеятельности организма;
- функционирование робототехнических устройств и телекоммуникационного оборудования в опасных для человека районах;
- передача электроэнергии по оптическому волокну для питания сейсмических датчиков и создания на Арктическом шельфе сети морских станций точного картирования землетрясений, подводных ядерных взрывов, движения океанических плит, определение зон сейсмической опасности, месторождений углеводородов и т. п.

