

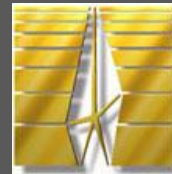
# ***Оптические и электрические потери в структурах высокоэффективных GaInP/GaAs/Ge солнечных элементов***

***С.А.Минтаиров***

группа МОСГФЭ, лаб. Фотоэлектрических преобразователей,  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

- *Санкт-Петербург, 2018*

# Актуальность использования



## Космическое применение



- КПД в более чем в 2 раза превышает КПД Si
- Срок службы в 3 раза больше

## Наземные условия

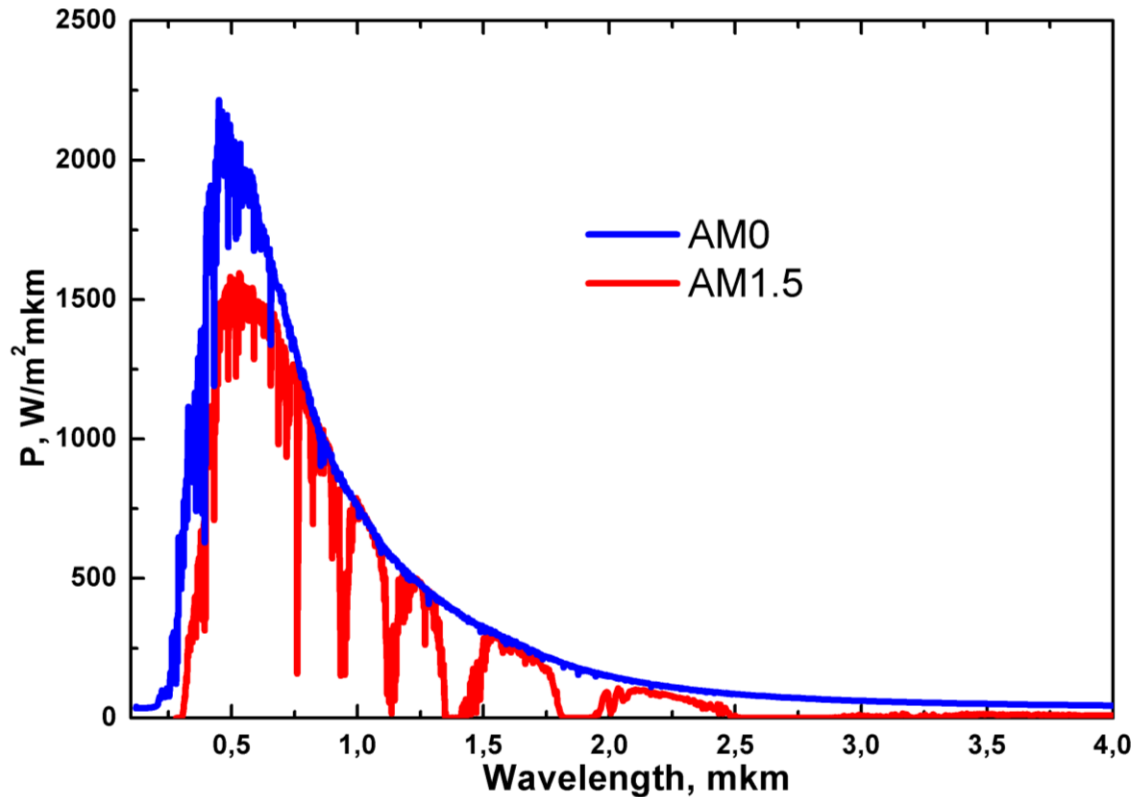


- Наивысшая эффективность
- Перспективы значительного снижения стоимости в концентраторных установках

# Солнечный спектр



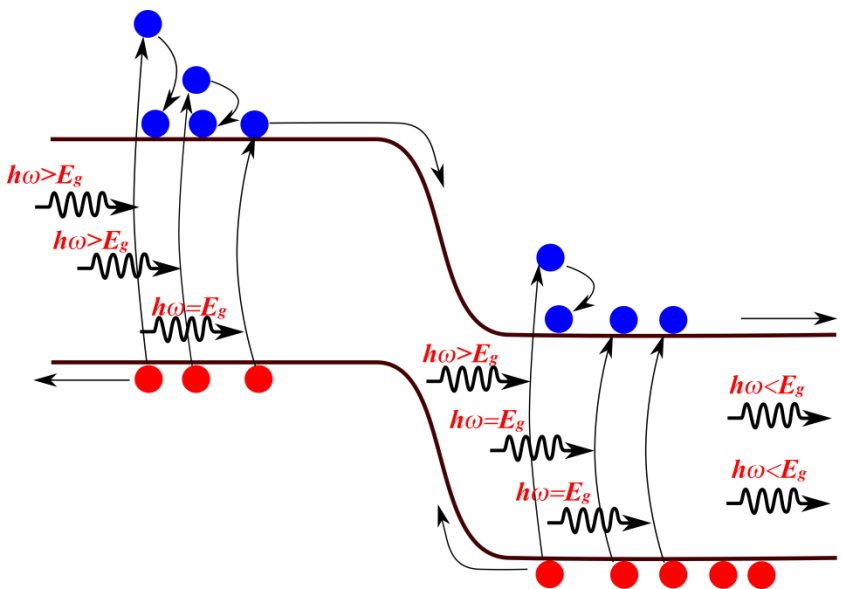
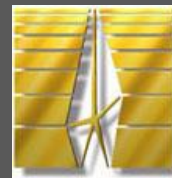
- *Космический спектр близок к спектру АЧТ при  $T=5800K$* 
  - спектр распределен в широком интервале энергий фотонов
- *Спектр характеризуется параметром «air mass» (AM)*
  - космический спектр - AM0, наземный – AM1.5



Плотность потока энергии:

- AM0 – 1366 Вт/м<sup>2</sup>,
- AM1.5 – 1000 Вт/м<sup>2</sup>

# Эффективность СЭ

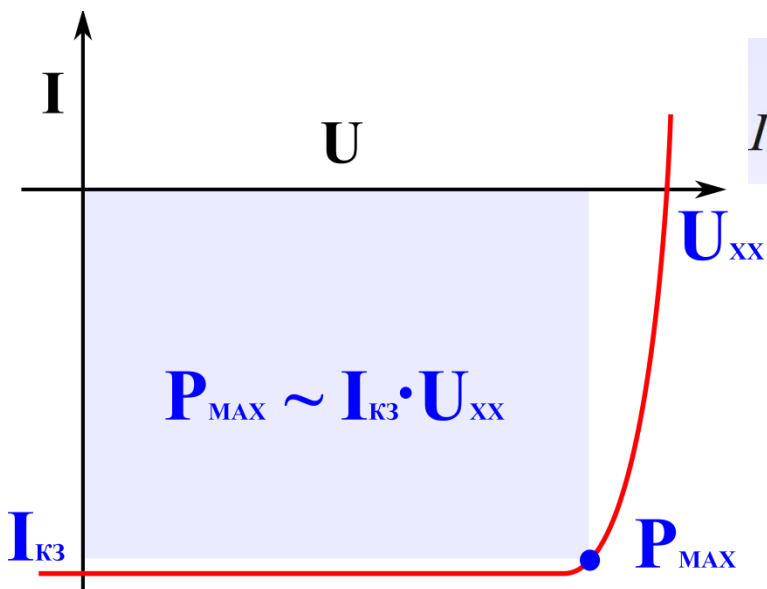


## Термализация носителей

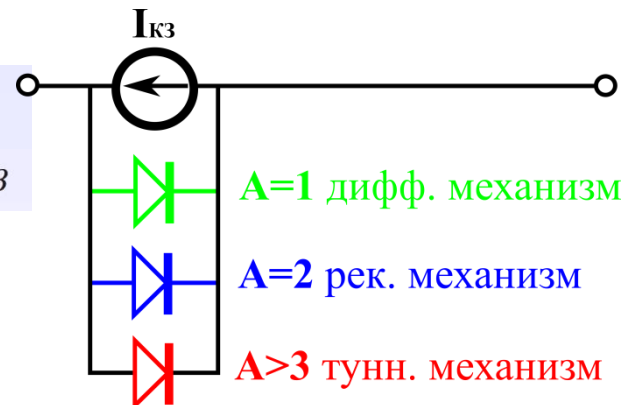
Вся избыточная энергия фотонов тратится на нагрев кристаллической решетки

## Потеря фотонов с низкой энергией

Полупроводники прозрачны для фотонов с энергией меньше  $E_g$

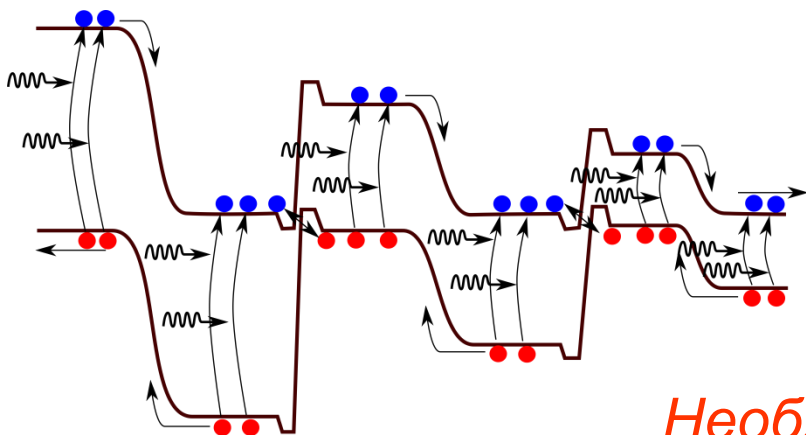
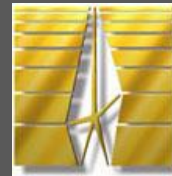


$$I = I_0 \cdot \left( e^{\frac{q \cdot U}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - I_{K3}$$



Максимум КПД 1- переходных СЭ лежит в области  $E_g$  GaAs

# Многопереходные СЭ



## Снижение потерь

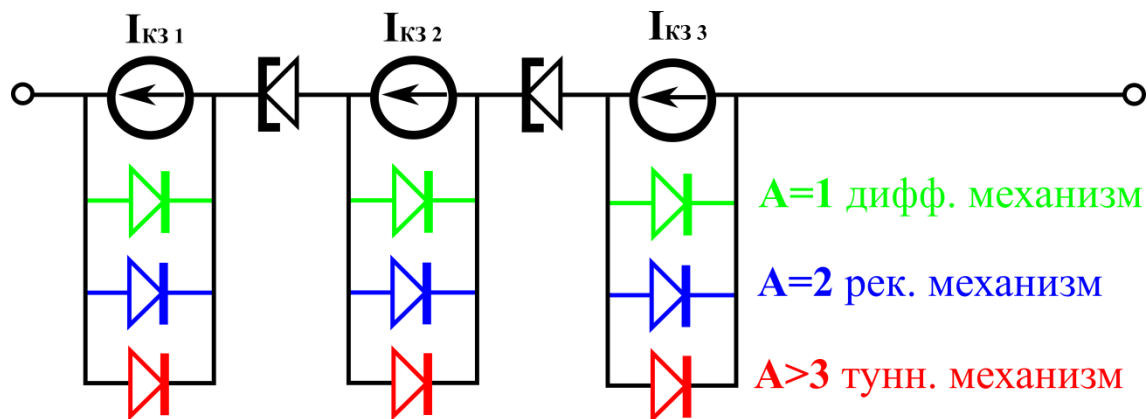
Широкозонные переходы эффективнее преобразуют фотоны высоких энергий. Узкозонные расширяют спектральную чувствительность СЭ

## Необходимость развязки p-n переходов

Туннельные диоды должны обладать минимальным сопротивлением и не поглощать полезное излучение

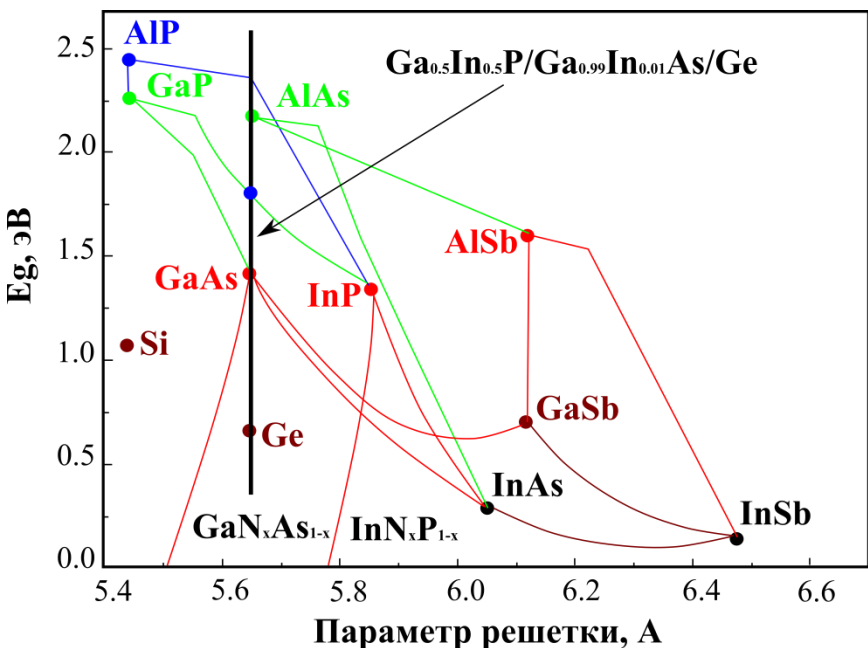
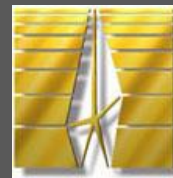
$$I_{кз} = \min(I_{кз1}, I_{кз2}, I_{кз3})$$

$$U_{хх} = \text{sum}(U_{хх1}, U_{хх2}, U_{хх3})$$



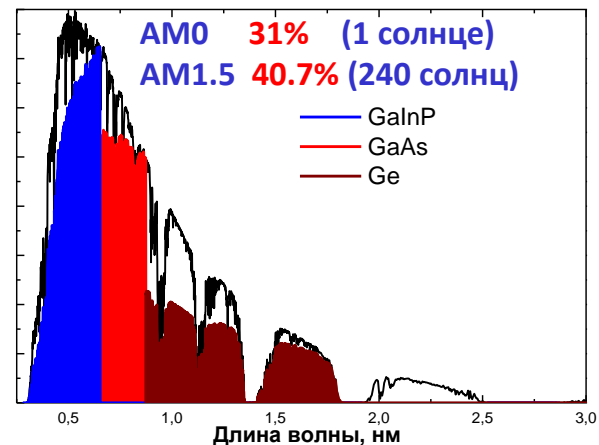
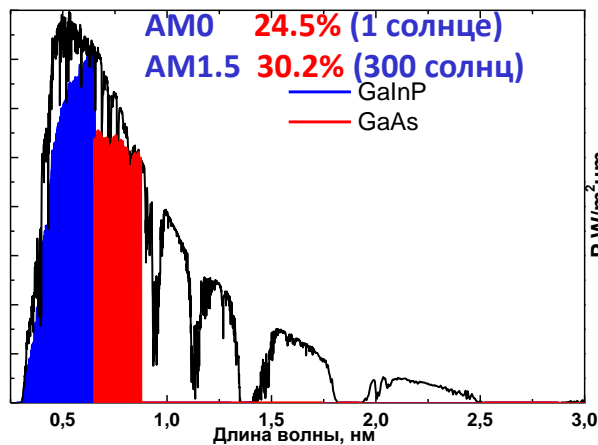
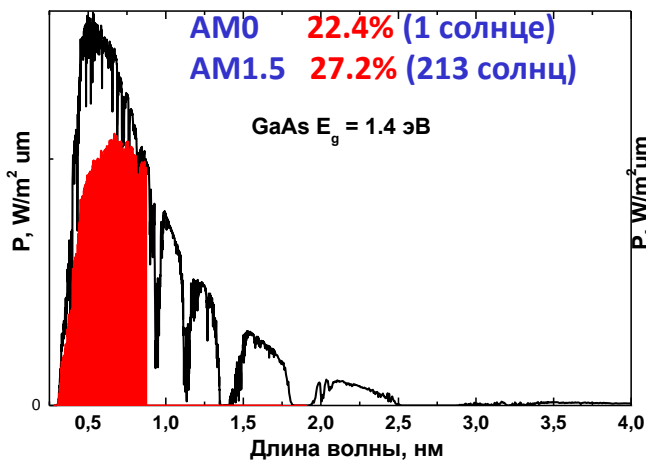
Необходимо обеспечить равенство количества фотонов, преобразуемых отдельными переходами

# Материалы для каскадных СЭ

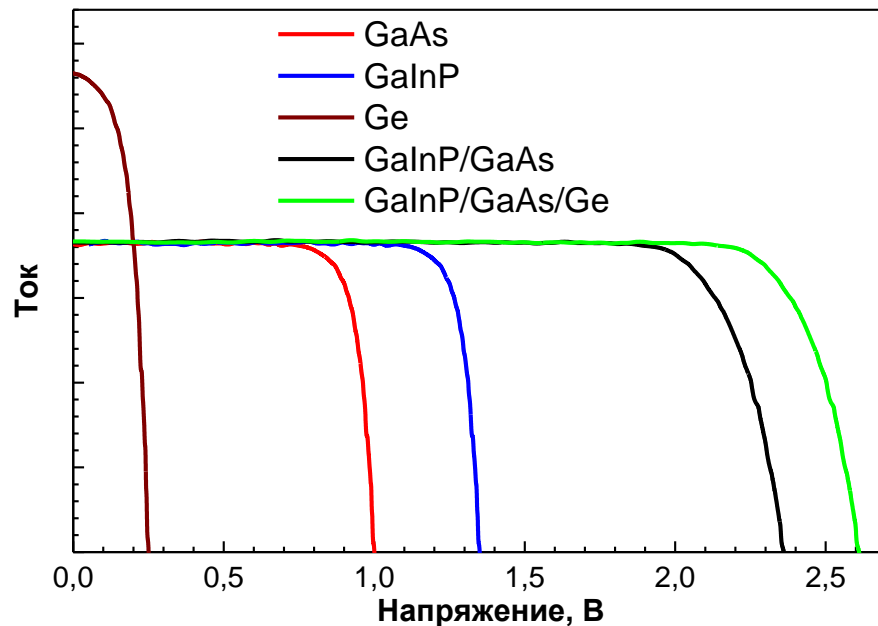
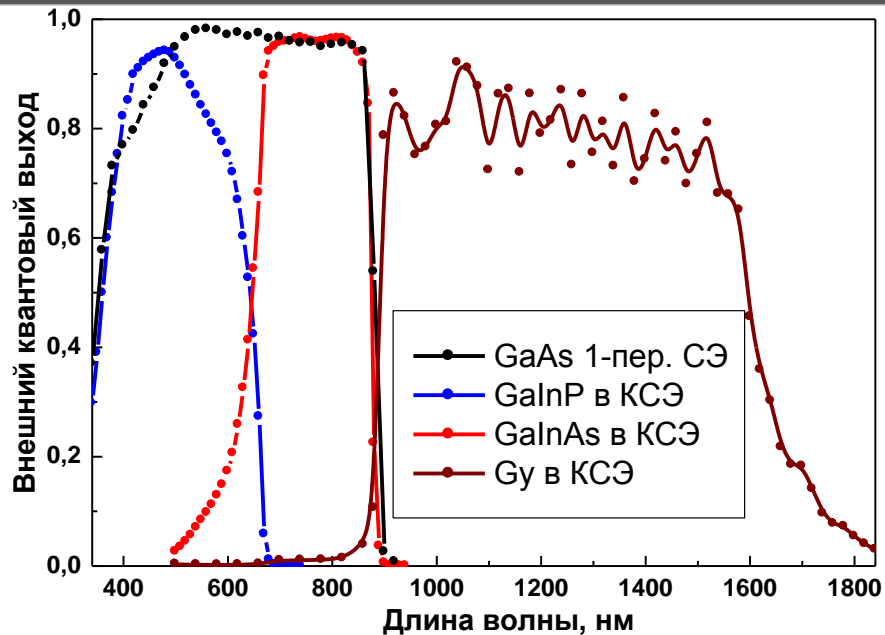
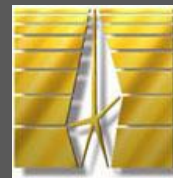


Современные каскадные СЭ включают p-n переходы из  $\text{GaInP}/\text{GaInA}/\text{Ge}$

Широкозонные переходы эффективнее преобразуют фотоны высоких энергий. Узкозонные расширяют спектральную чувствительность СЭ

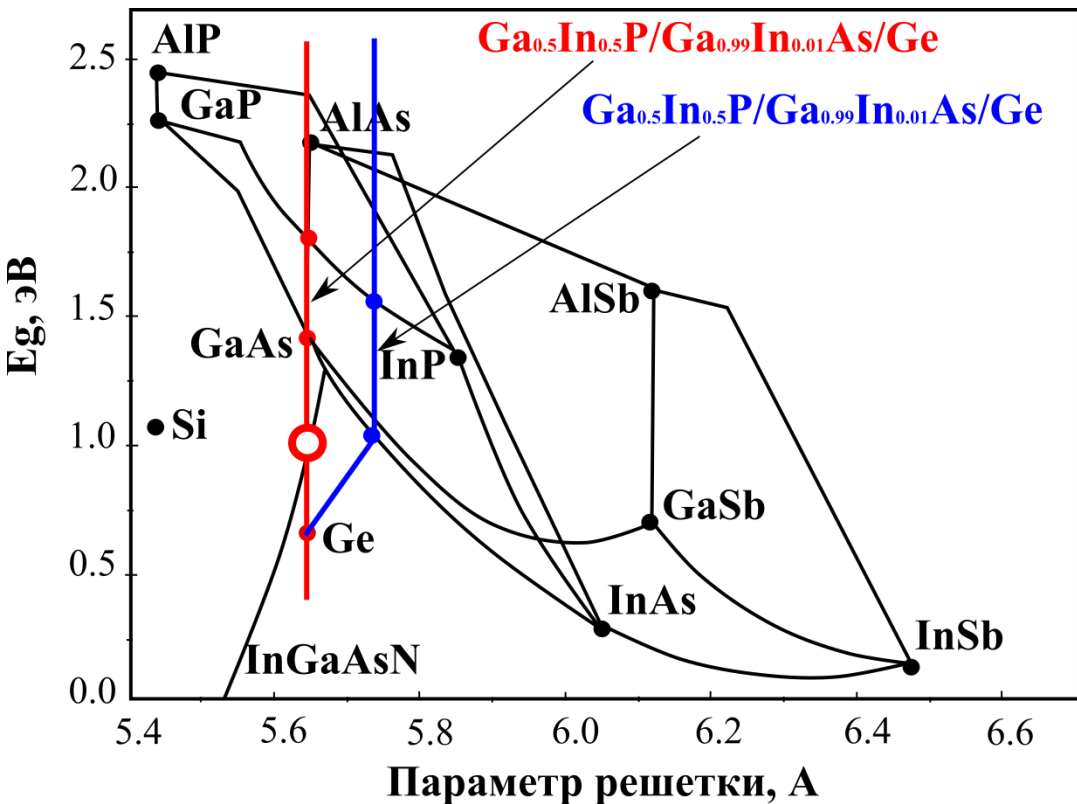
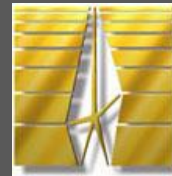


# Материалы для каскадных СЭ



СЭ	$E_g$ , эВ	Диапазон чувств., нм	Макс ток АМ0, $\text{мА/см}^2$	Макс ток АМ1.5, $\text{мА/см}^2$	Ток АМ0, $\text{мА/см}^2$	Ток АМ1.5, $\text{мА/см}^2$	$U_{\text{ХХ}}$ , (1 солн.), В
GaInP	1.9	0-670	22.43	17.58	19	15	1.35
GaInAs	1.4	0-900	39.01	33.2	35	29	1
Ge	0.66	0-1900	76.09	62.41	55	45	0.25
GaInP/GaAs	-	0-900	19.5	16.6	18	14.5	2.35
GaInP/ GaInAs/Ge	-	0-1900	19.5	19.5	18	14.5	2.6

# Каскадные СЭ нового поколения



Необходим материал с  $E_g = 1$  эВ

метаморфные СЭ.  
Теоретически оптимальный дизайн

*GalnAsN*

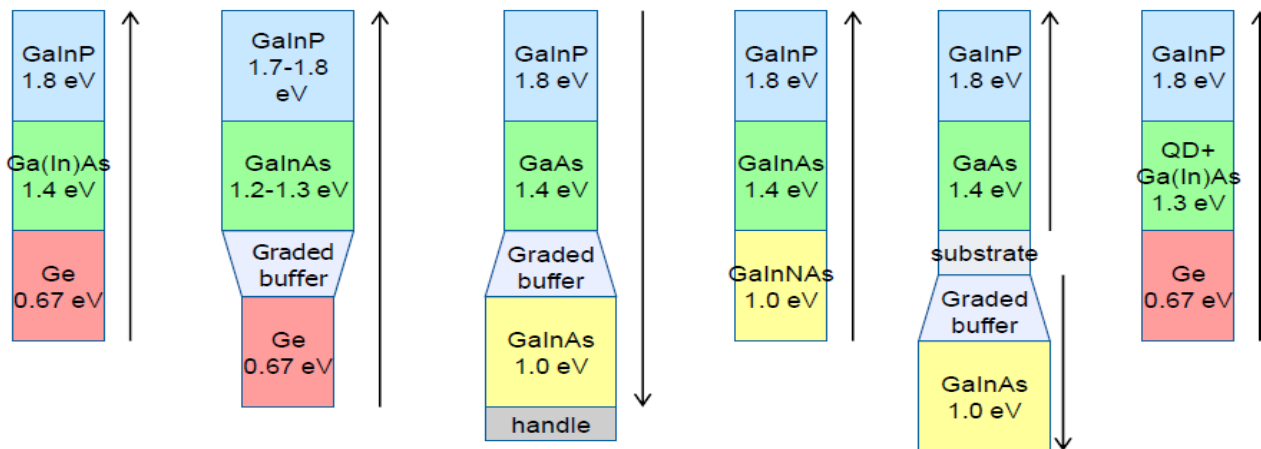
при росте происходит образование доменов GaN и InAs

*Квантоворазмерные структуры GalnAs*

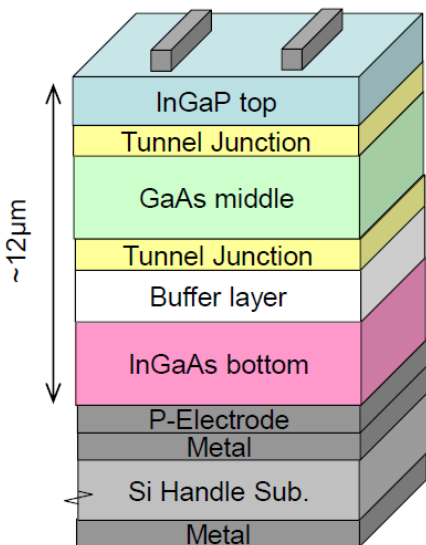
недостаток в не согласовании по параметру решетки



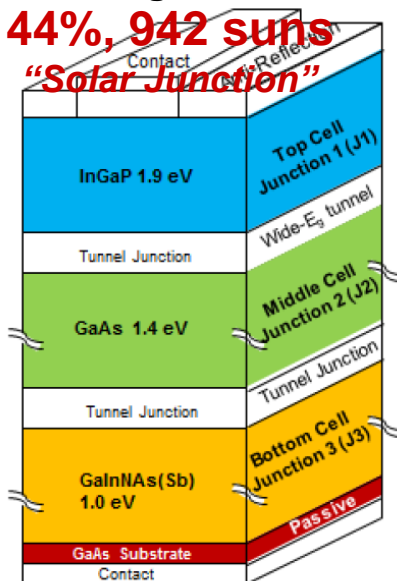
# Каскадные СЭ нового поколения



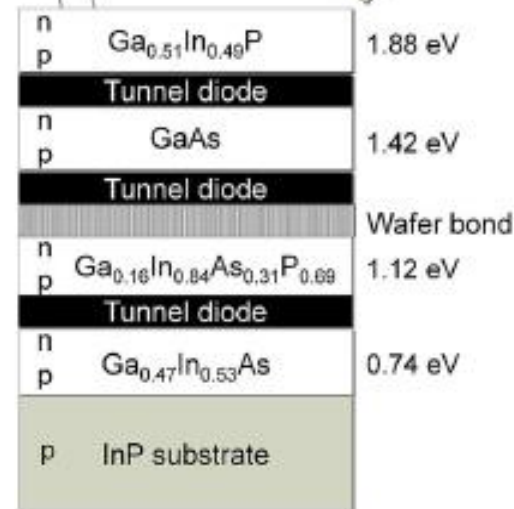
**GaInP/GaAs/GaInAs**  
 Inverted metamorphic  
**44.4%, 302 suns**  
 "Sharp"



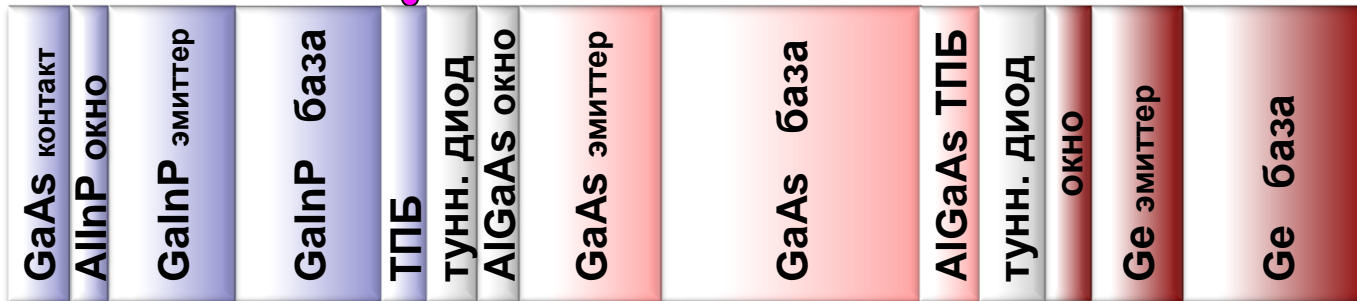
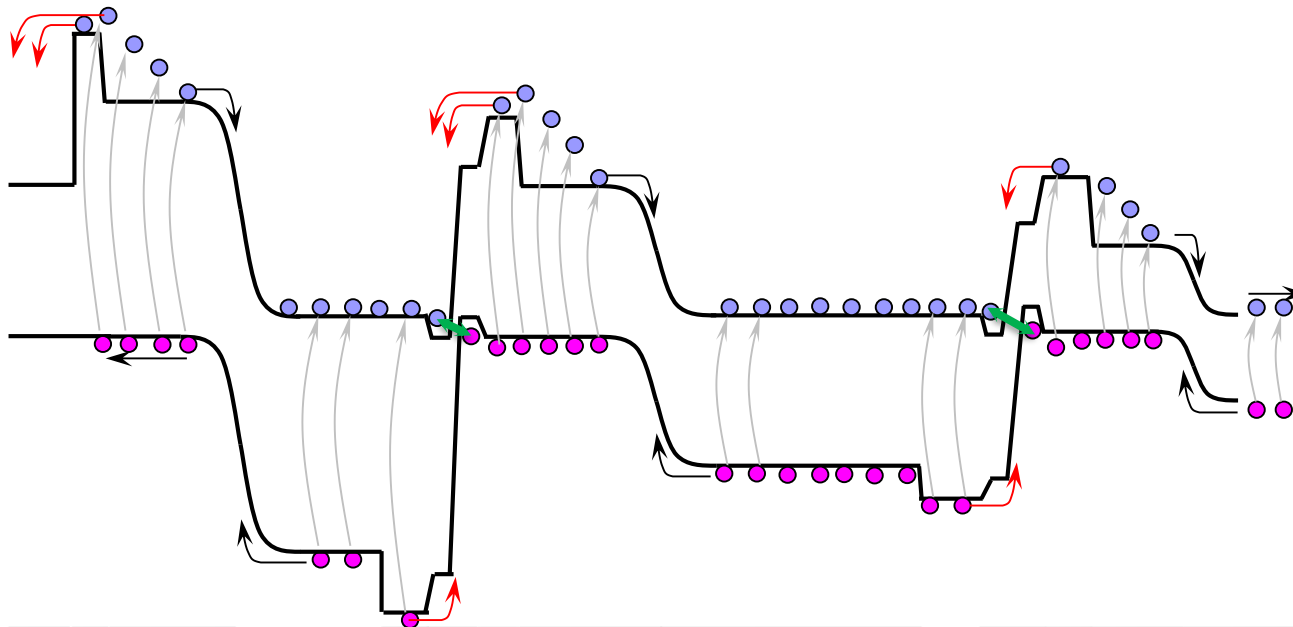
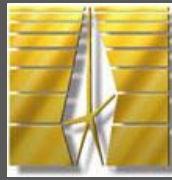
**GaInP/GaAs/GaInNAs**  
 MBE, lattice matched, dilute  
 nitrides, grown on GaAs  
**44%, 942 suns**  
 "Solar Junction"



**GaInP/GaAs / GaInAsP/GaInAs**  
 Four-junction, wafer bonding, lattice  
 matched grown on GaAs and InP  
**46-46,7%, 500 suns**  
 "Fraunhofer ISE (Soitec)", Emcore



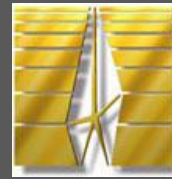
# Структура GaInP/GaAs/Ge СЭ



## Структурные потери

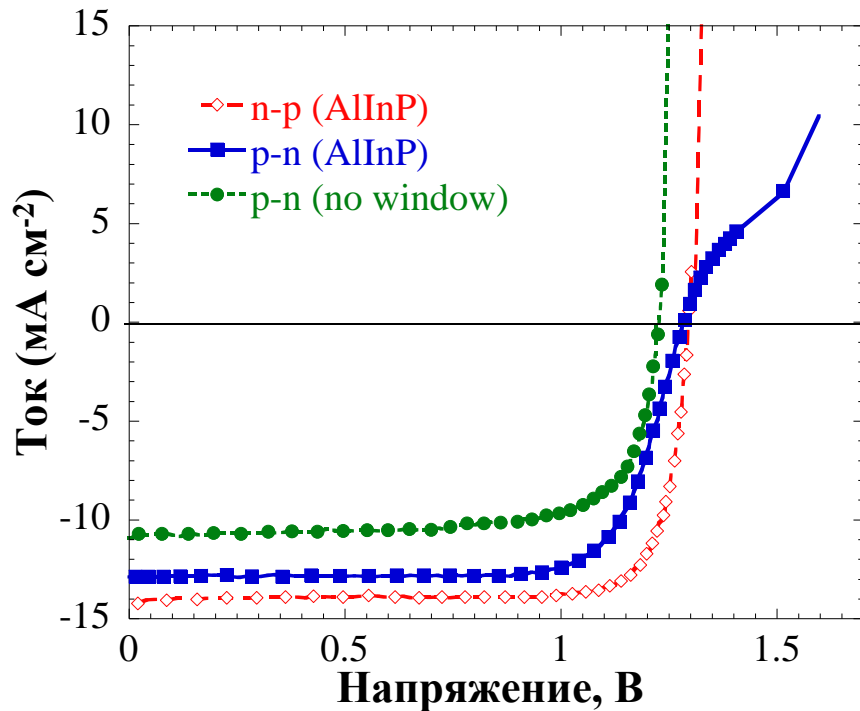
- Собираение носителей
- Согласование токов
- Поглощение в слоях ТПБ и туннельного диода
- Поглощение в слоях широкоз. окна «Горячие» носители
- Отражение от гетерограниц
- Сопротивление туннельных диодов

# СЭ на основе GaInP



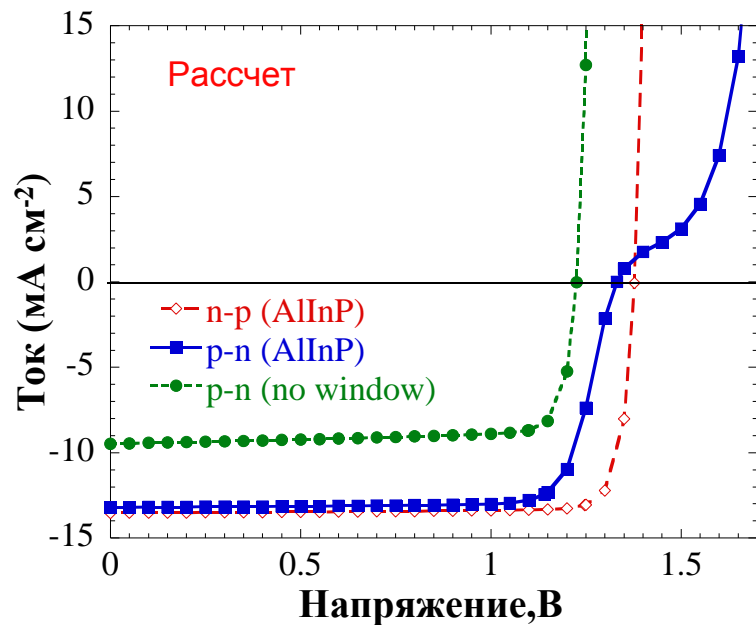
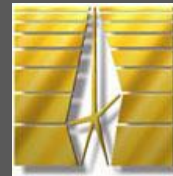
металлич. конт.	
$p^{++}$ -контактный слой	Анти-отраж. покрытие
$p$ -широкозонное окно	
$p$ -GaInP эмиттер	
$n$ -GaInP база (подложка)	
$n$ -ТПБ	
$n$ -GaAs подложка	
металлический контакт	

металлич. конт.	
$n^{++}$ -контактный слой	Анти-отраж. покрытие
$n$ -широкозонное окно	
$n$ -GaInP эмиттер	
$p$ -GaInP база (подложка)	
$p$ -ТПБ	
$p$ -GaAs подложка	
металлический контакт	

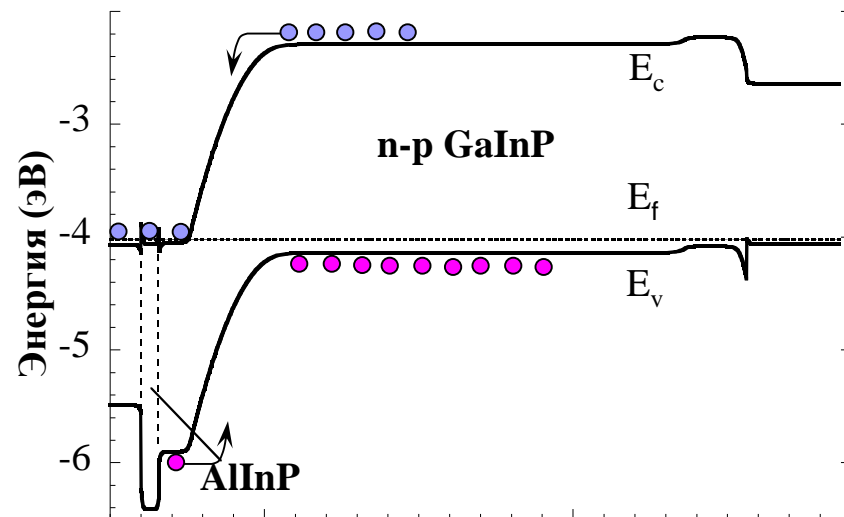
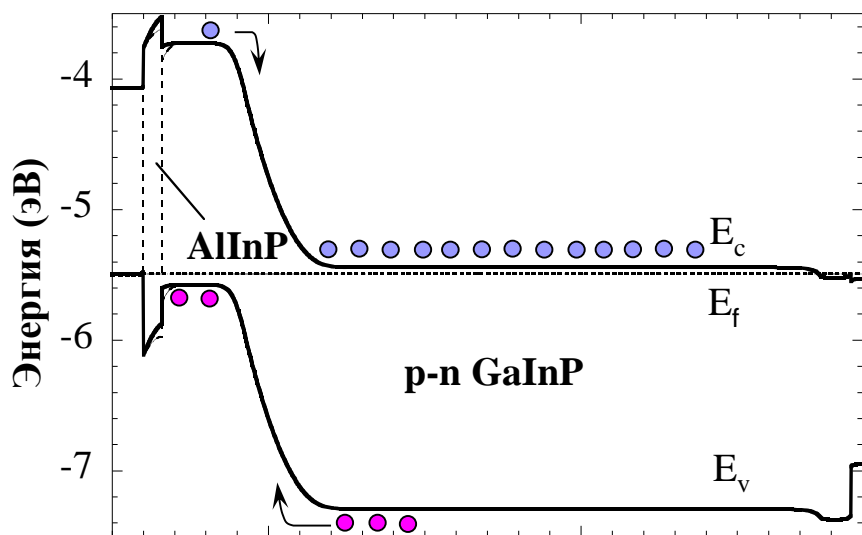


- Наличие неомичного последовательного сопротивления сильно ограничивает эффективность  $p$ - $n$  полярности
- Неомичность возникает в слое широкозонного окна

# СЭ на основе GaInP



- Большой разрыв зон для гетеропереходов GaAs/AlInP и AlInP/GaInP для *p-n* полярности
- Использование слоя *p+*-GaInP в качестве тыльного барьера для *n-p* полярности



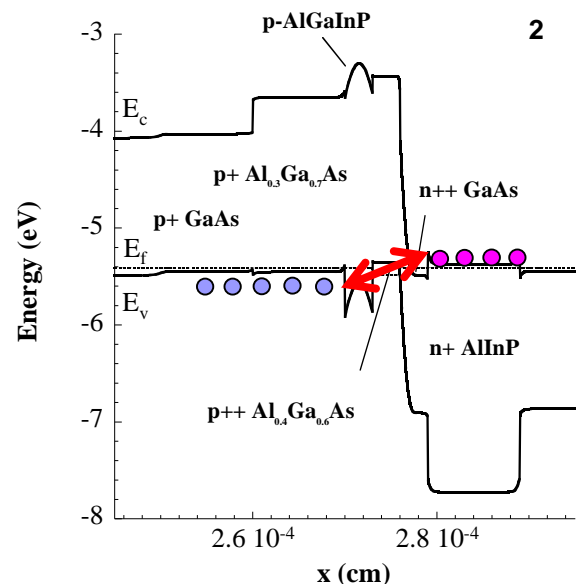
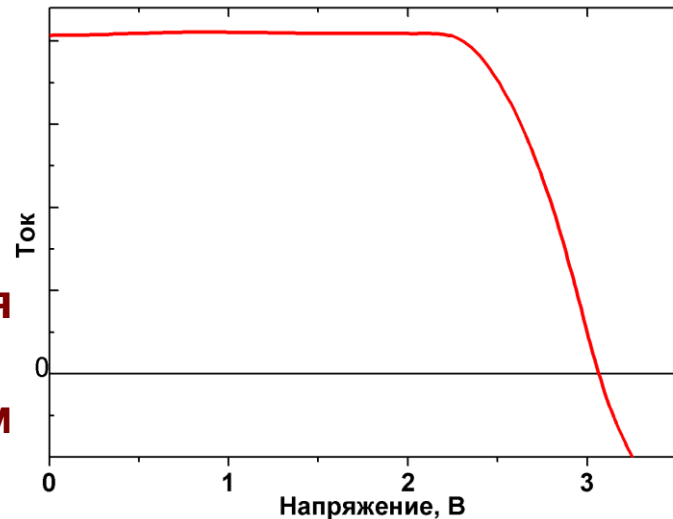
# Барьер в нижнем туннельном диоде



n+-GaAs контакт	
n-AlInP окно	
n-GaInP эмиттер	50 нм
p-GaInP база	400-800 нм
p+-GaInP ТПБ	100 нм
тунн. диод	
n-AlGaAs окно	30 нм
n-GaAs эмиттер	100 нм
p-GaAs база	3200 нм
p-AlGaAs ТПБ	100 нм
p-AlGaInP барьер для ТД	
тунн. диод	
n-AlGaInP барьер для ТД	
n-GaInP окно	
Ge эмиттер	
Ge база	

■ Возникал потенциальный барьер для протекания носителей с нижнем туннельном диоде

■ Как и в случае GaInP элементов большие разрывы зон для гетеропереходов GaAs/AlInP и AlInP/GaInP для p-n полярности



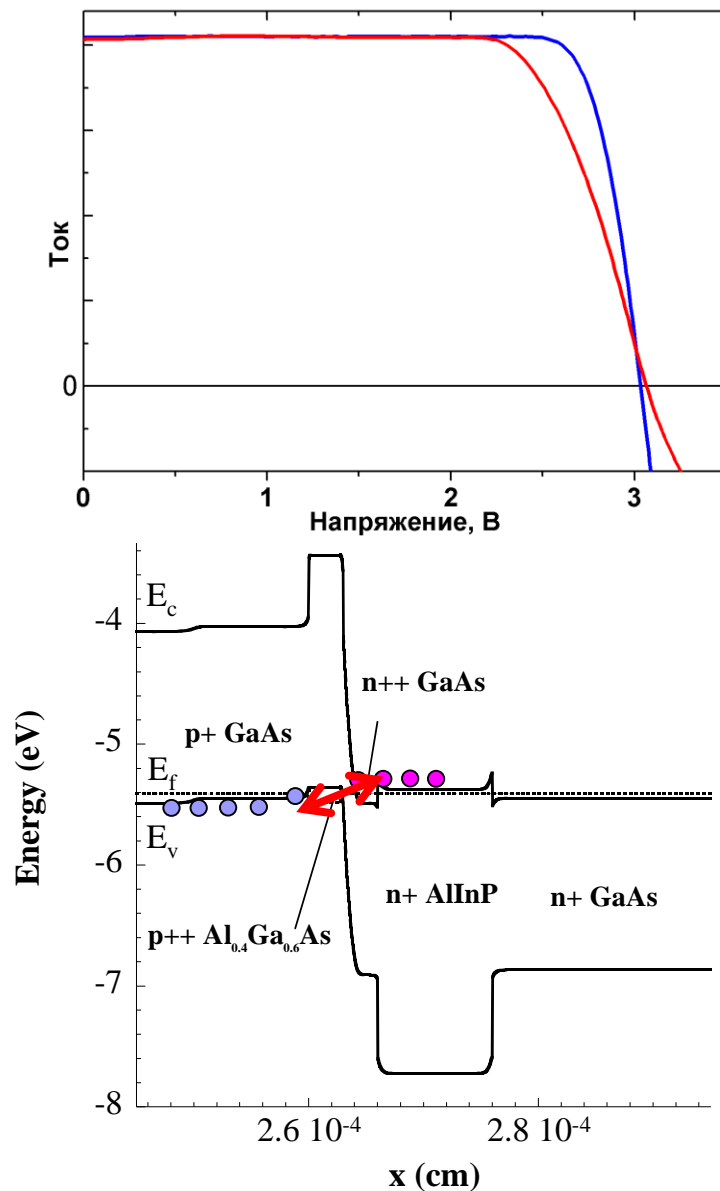
# Барьер в нижнем туннельном диоде



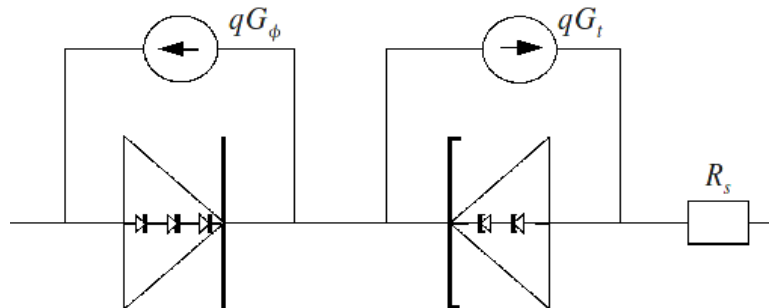
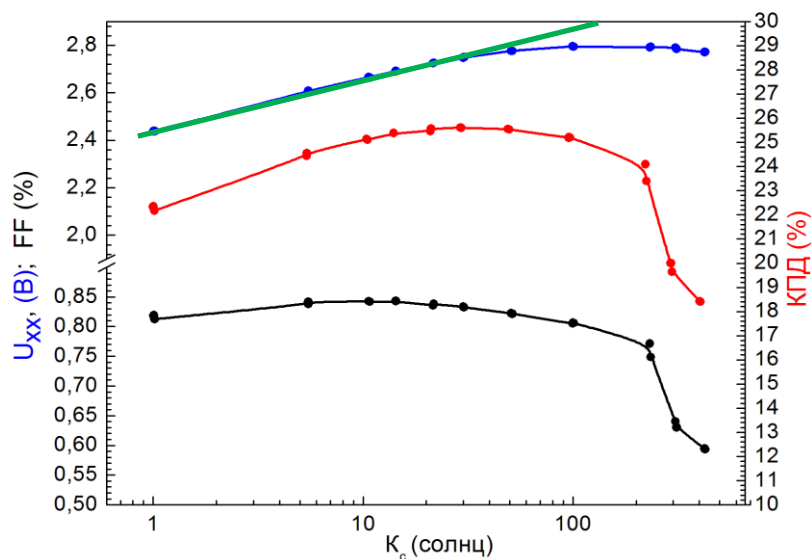
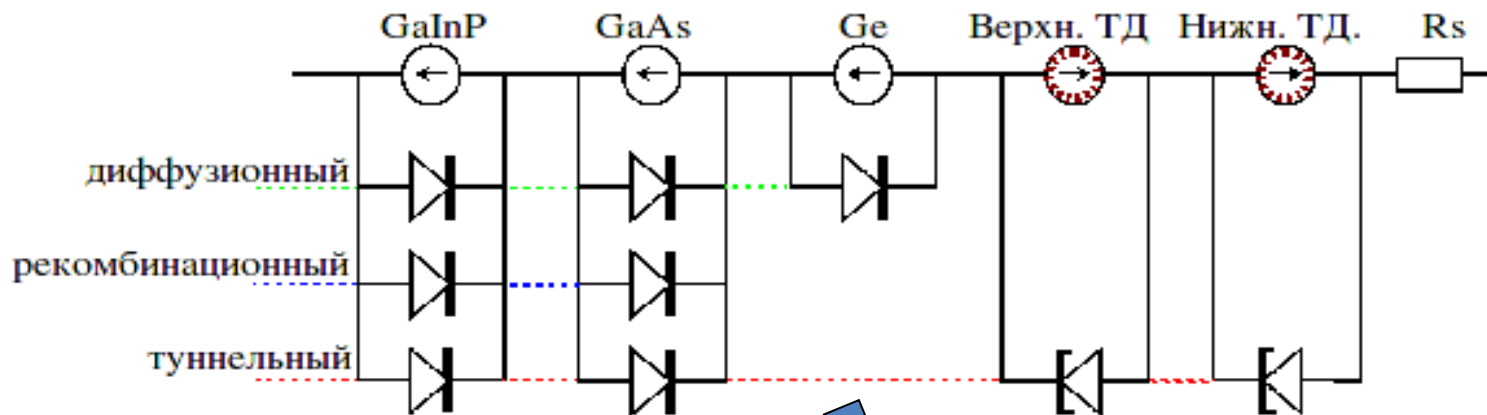
n+-GaAs контакт	
n-AlInP окно	
n-GaInP эмиттер	50 нм
p-GaInP база	400-800 нм
p+-GaInP ТПБ	100 нм
тунн. диод	
n-AlGaAs окно	30 нм
n-GaAs эмиттер	100 нм
p-GaAs база	3200 нм
p-GaInP ТПБ	100 нм
тунн. диод	
n-AlGaInP барьер для ТД	
n-GaInP окно	
Ge эмиттер	
Ge база	

Использование слоя *p*-GaInP в качестве тыльного барьера GaAs каскада и широкозонного барьера нижнего туннельного диода

КПД повысился на 3%

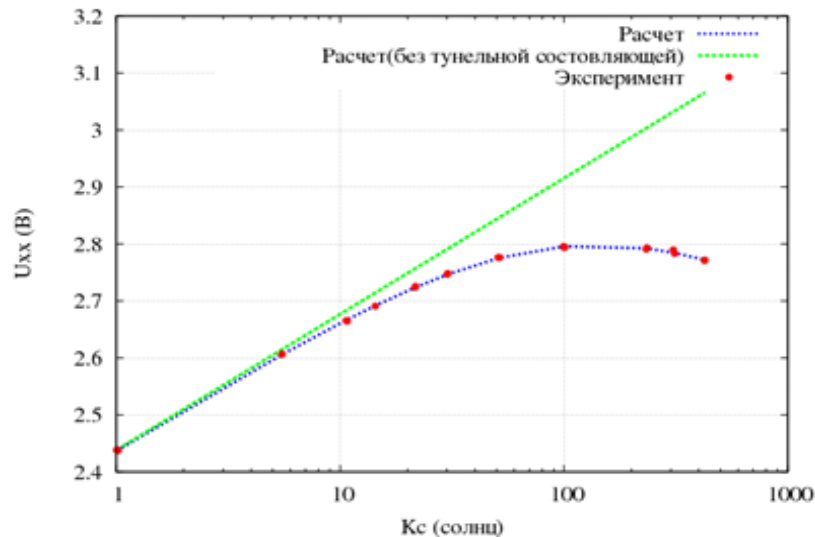
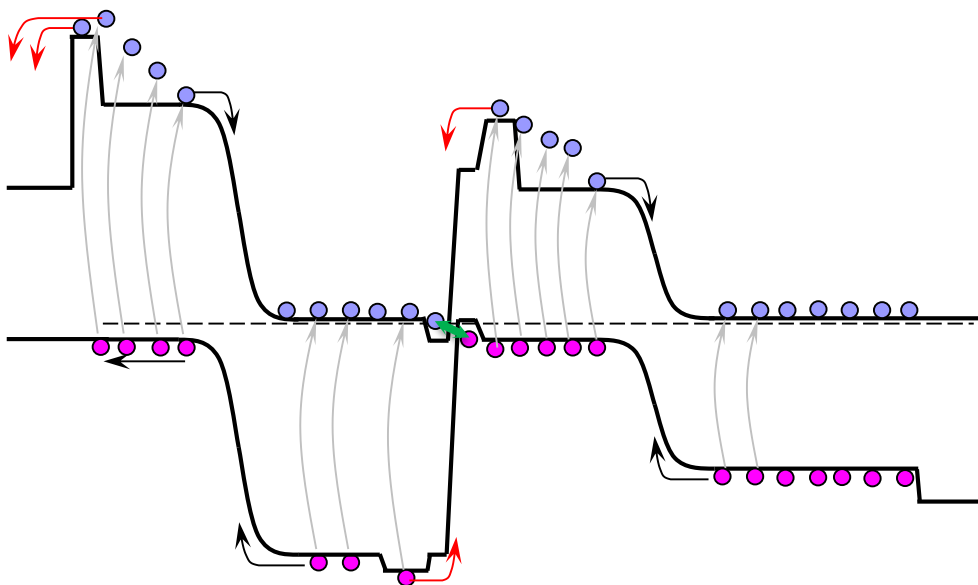


# Встречная фотоЭДС



- Обнаружена встречная фотоЭДС, проявляемая при кратности более 30солнц
- Составлена упрощенная эквивалентная схема каскадного элемента

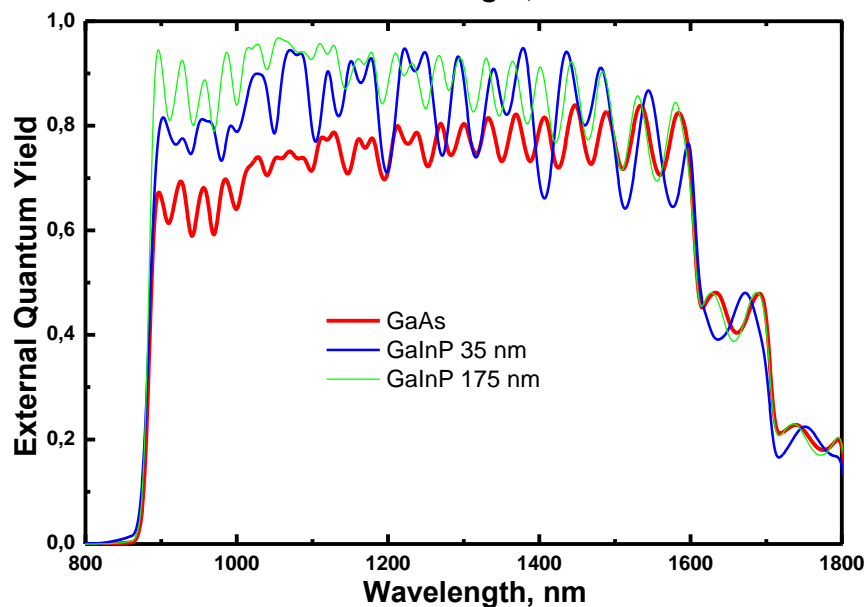
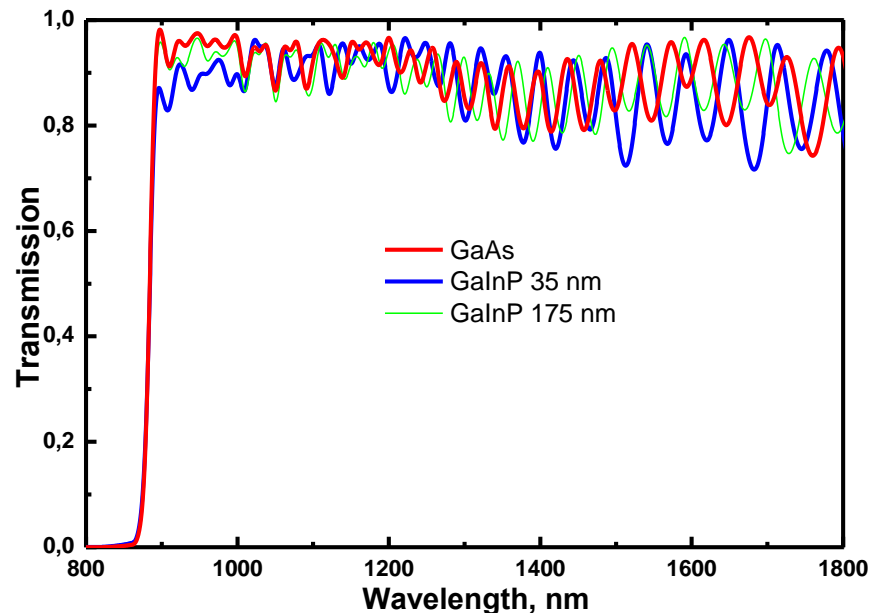
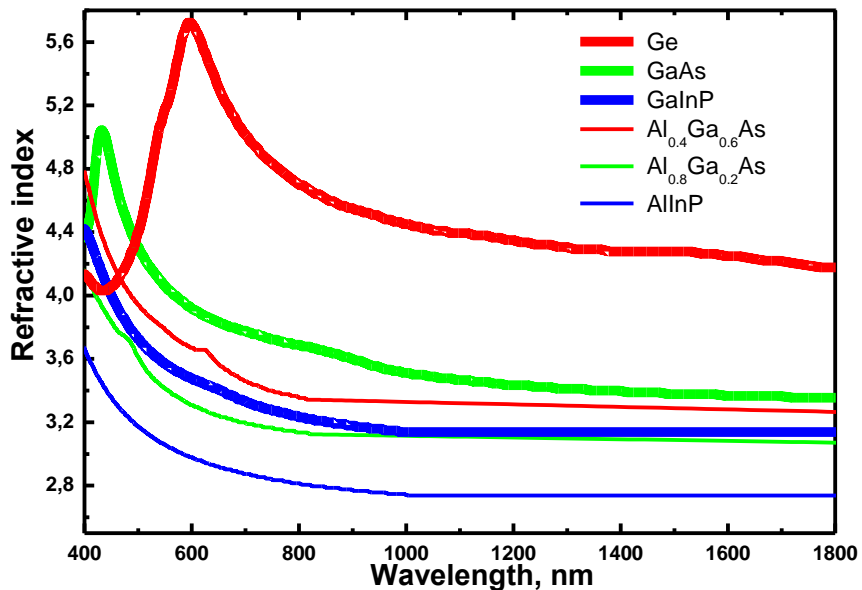
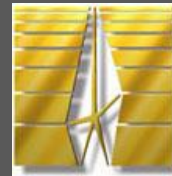
# Встречная фотоЭДС



- Использован слой  $p\text{-(Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8})_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  в качестве ТПБ верхнего субэлемента ( $E_g=2.06$  эВ (600 нм))
- Использование слоя  $p\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  при « $x$ »<25% не создает барьера для основных носителей
- КПД повысился на 4%

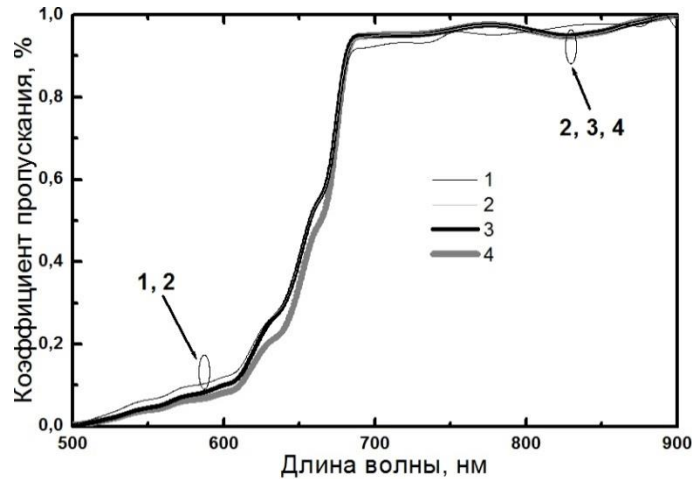


# Оптические потери

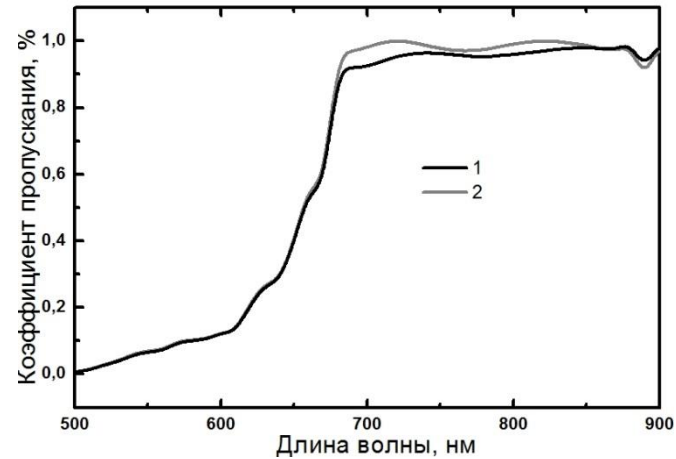


- ток, генерируемый Ge каскадом, повышается на 4.5 мА/см<sup>2</sup> при замене GaInAs окна на GaInP
- использование оптимальной толщины GaInP слоя (170-180 нм) приводит к дополнительному возрастанию фототока на 1.5 мА/см<sup>2</sup>

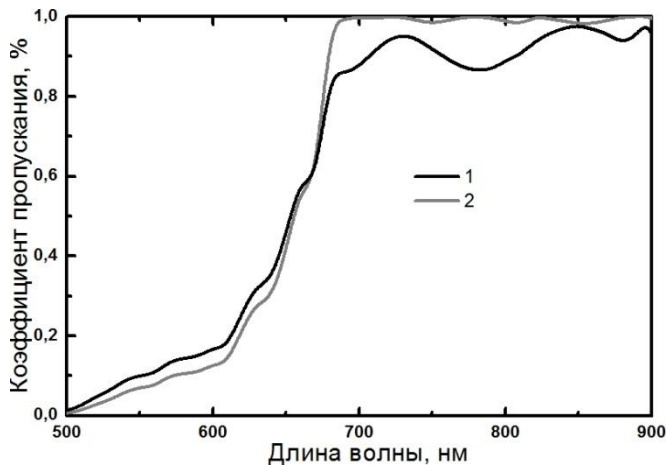
# Оптические потери



- 1 -  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  толщиной 30 нм,
- 2 -  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  толщиной 115 нм,
- 3 -  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  толщиной 110 нм,
- 4 -  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  толщиной 100 нм.



- 1 -  $\text{p}^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  (20 нм)/ $\text{n}^{++}\text{-GaAs}$ (20 нм),
- 2 -  $\text{p}^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  (15 нм)/ $\text{n}^{++}\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ (20 нм).



- 1 -  $\text{p-Al}_{0.53}\text{In}_{0.47}\text{P}$  (50 нм)/ $\text{n-Al}_{0.53}\text{In}_{0.47}\text{P}$ ,
- 2  $\text{p}^{++}\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ (50 нм)/ $\text{n-Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  (115 нм).

- использования оптимизированных толщин широкозонного окна повышает ток на 0.5 мА/см<sup>2</sup>
- ток возрастает на 1.5 мА/см<sup>2</sup> за счет оптимизации поглощения в верхнем туннельном диоде
- использование материала  $\text{AlInP}$  между  $\text{GaInP}$  и  $\text{GaInAs}$  субэлементами приводит к увеличению отражения света

***Спасибо за внимание***