



ФТИ им. А.Ф. Иоффе
лаб. Фотоэлектрических преобразователей

Высокоэффективные каскадные солнечные элементы

М.А. Минтаиров

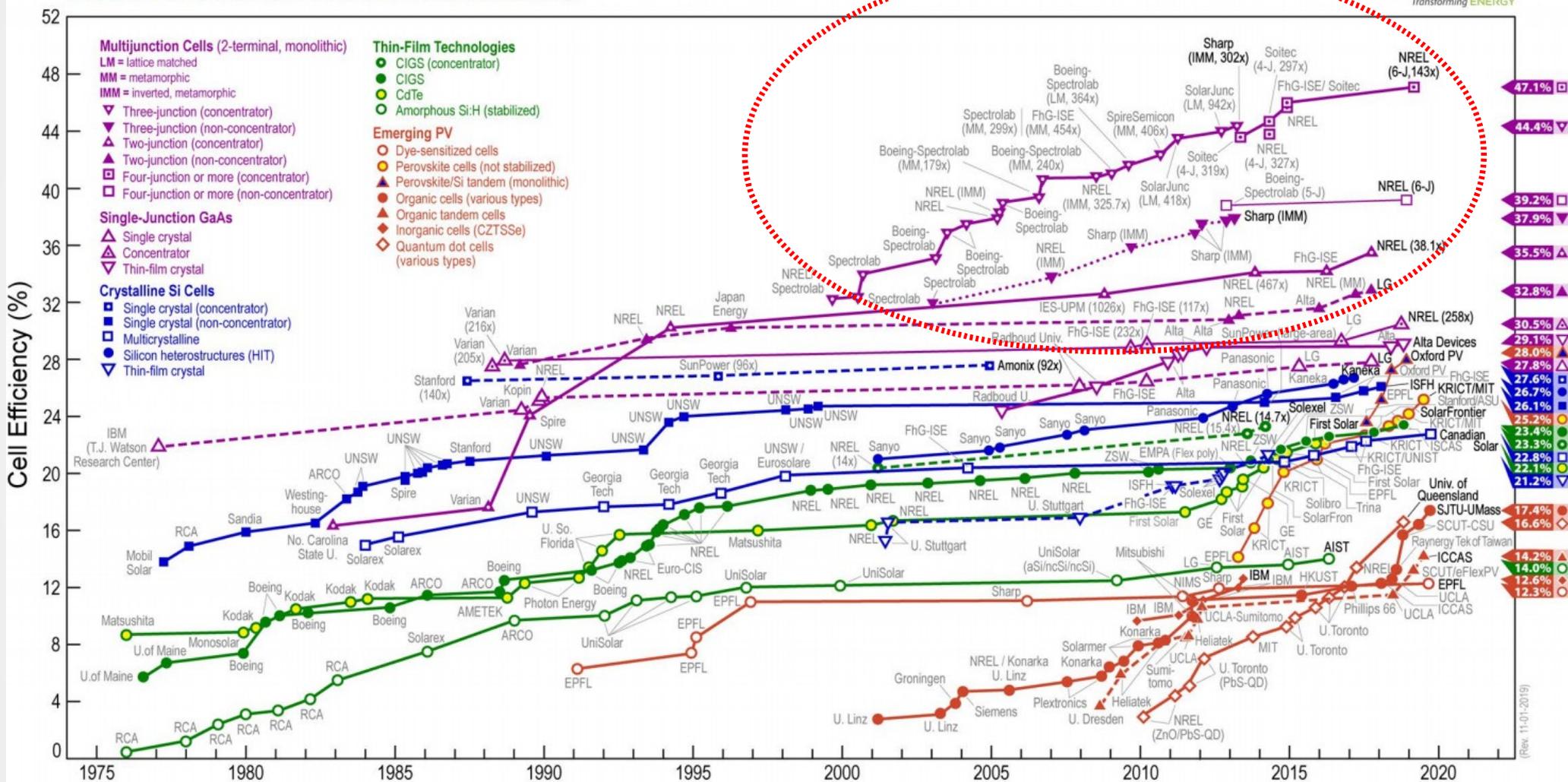
mamint@mail.ioffe.ru

194021, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 26
тел/факс: 8(812)2972173



Эффективность каскадных (многoperеходных) солнечных элементов

Best Research-Cell Efficiencies



(Rev. 11-01-2019)

Энергетические диаграммы полупроводников собственного, n- и p-типа

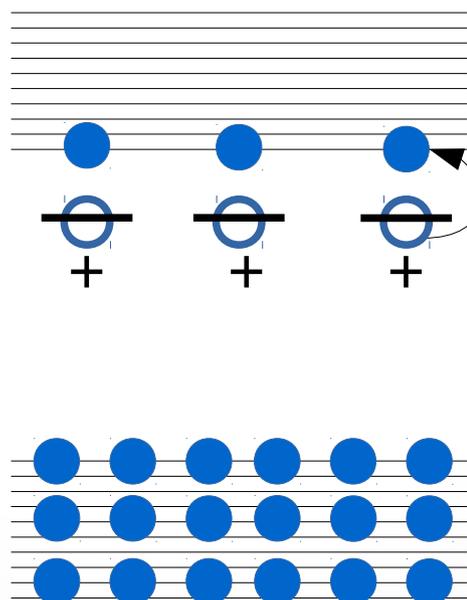
Энергия

В энергетическом спектре полупроводника есть две разрешенные зоны и запрещенная зона. В собственном полупроводнике нет свободных носителей — он изолятор



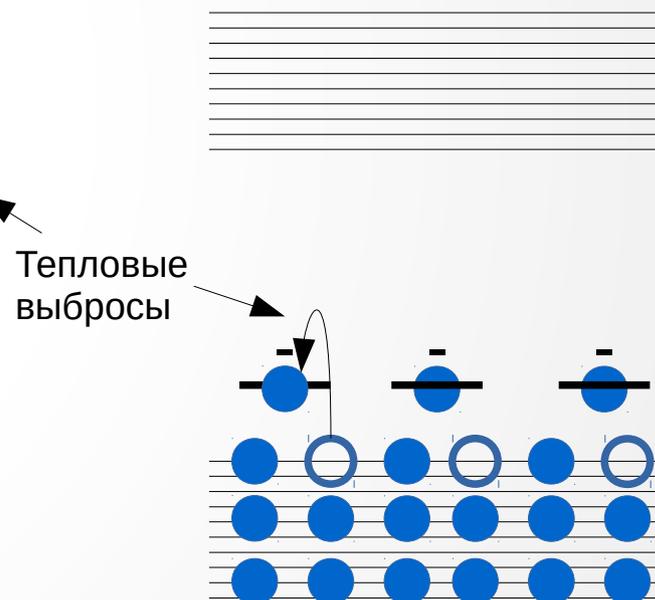
Полупроводник собственный

Легирование донорной примесью вводит в запрещенную зону уровень вместе с электроном. Электрон при комнатной температуре переходит в зону проводимости и становится свободным. Такой полупроводник обладает проводимостью n-типа (электронной)



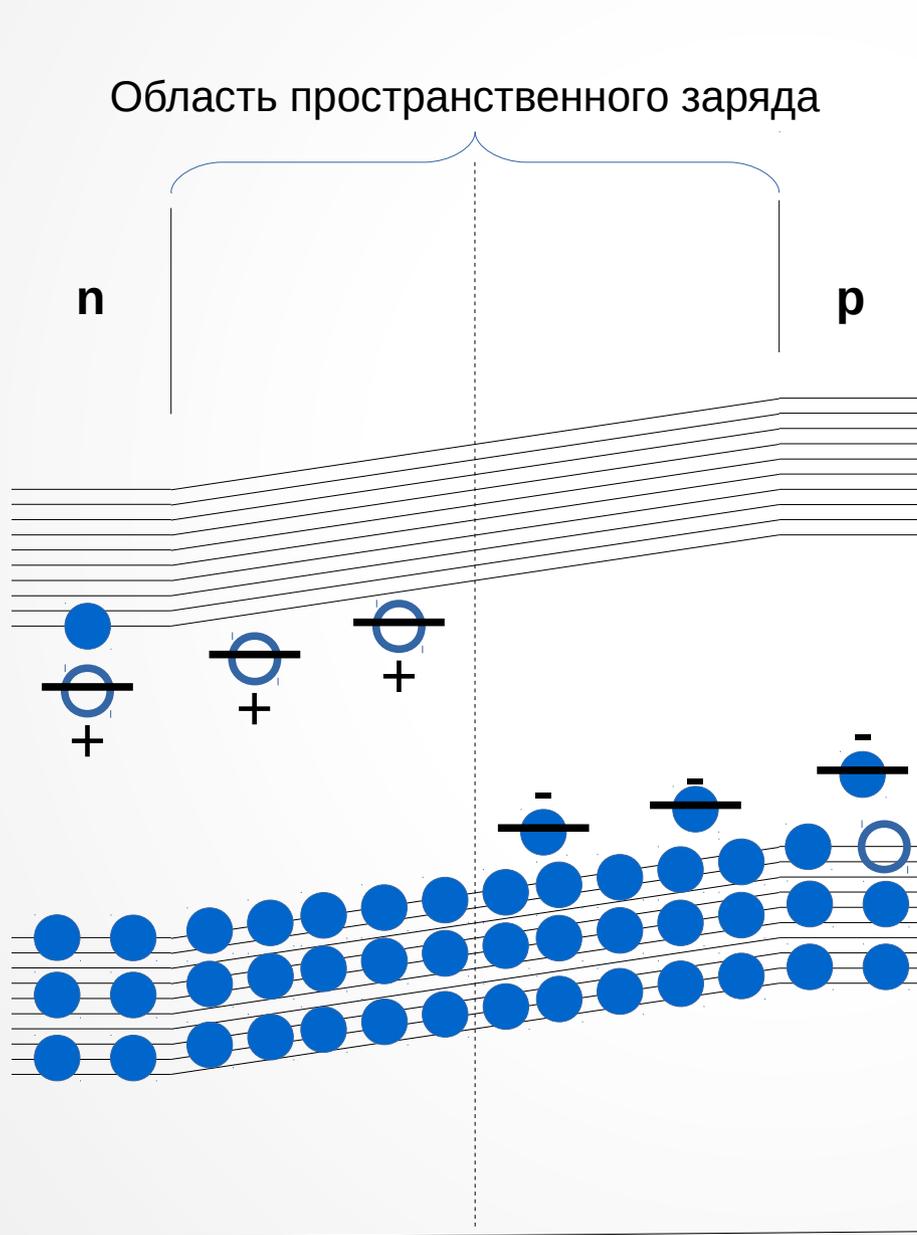
Полупроводник n-типа

Легирование акцепторной примесью вводит запрещенную зону пустой уровень. При комнатной температуре электрон из валентной зоны переходит на пустой уровень — образуются свободные дырки. Такой полупроводник обладает проводимостью p-типа (дырочной)



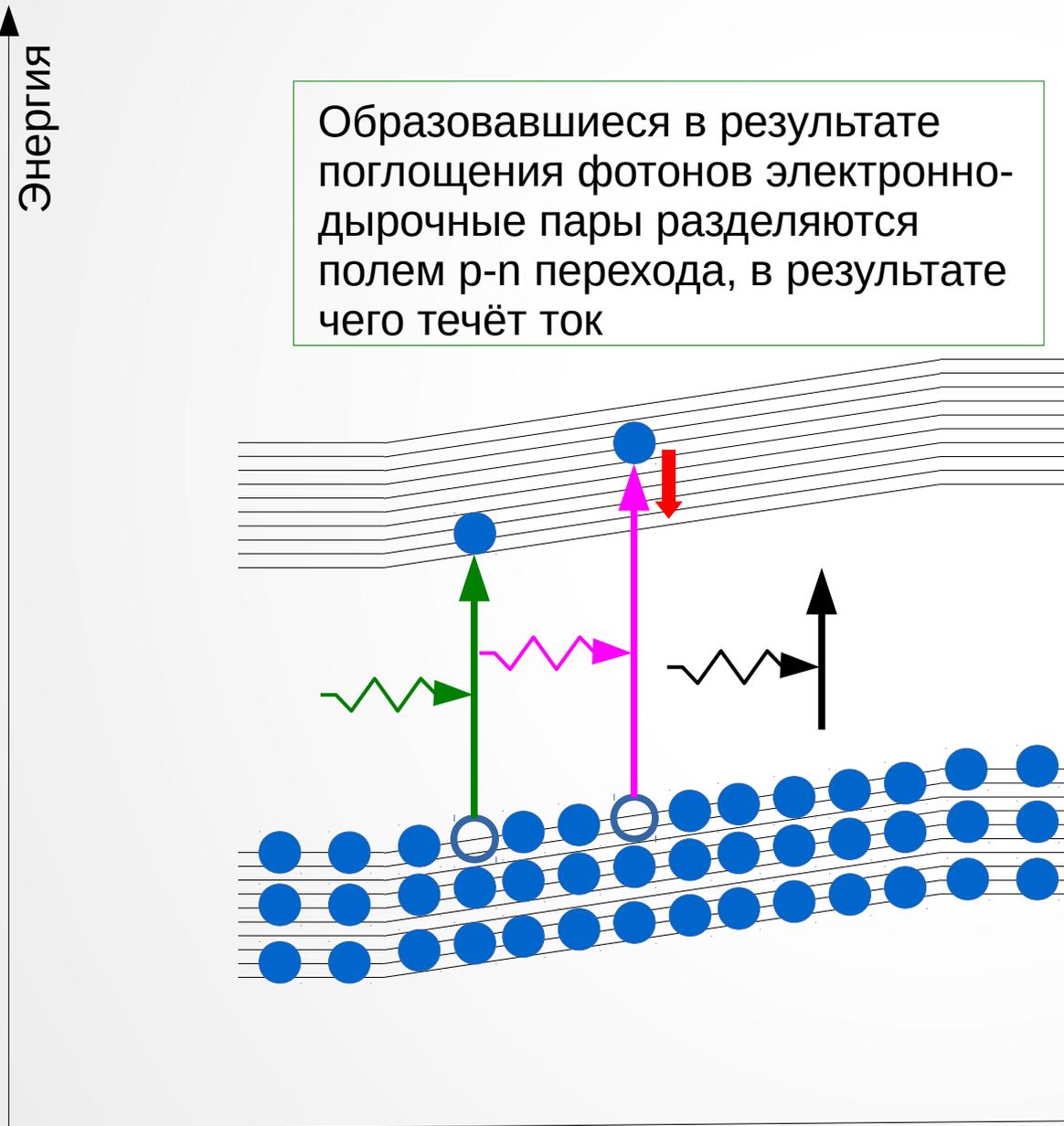
Полупроводник p-типа

Формирование р-п перехода



При контакте полупроводников n- и p-типов, часть свободных электронов (в приконтактной зоне) рекомбинирует с свободными дырками. Оставшиеся ионы (положительные в области n и отрицательные в p) создают электрическое поле. Образуется изгиб зон. Наличие электрического поля в p-n переходе лежит в основе фотовольтаического эффекта.

Фотовольтаический эффект в p-n переходе



 **Оптимальное поглощение:** Энергия фотона равна ширине запрещённой зоны

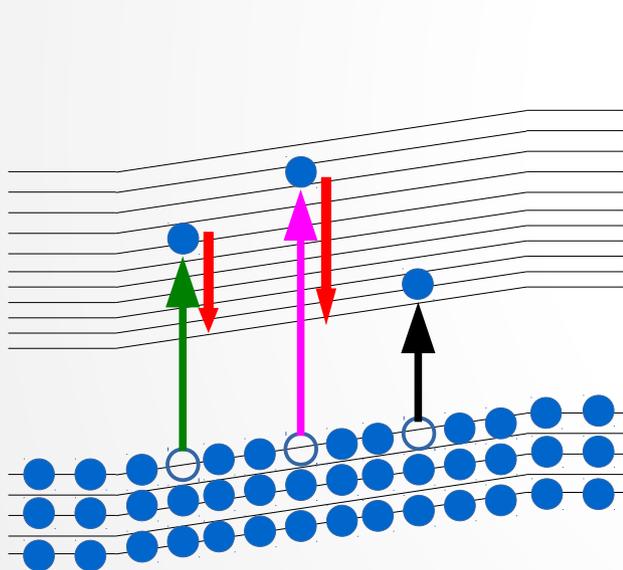
 **Поглощение с термализацией:** Часть поглощенной энергии тратится на нагрев кристаллической решетки

 **Поглощение отсутствует:** Энергии фотона недостаточно для образования электронно-дырочной пары

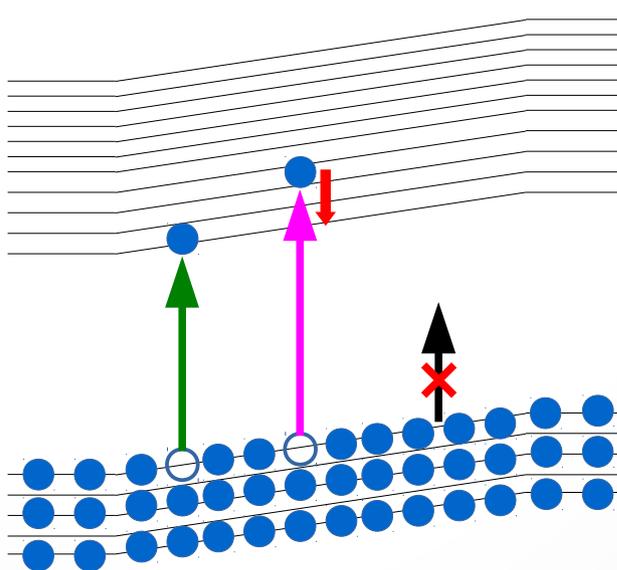
Однопереходные солнечные элементы

Энергия

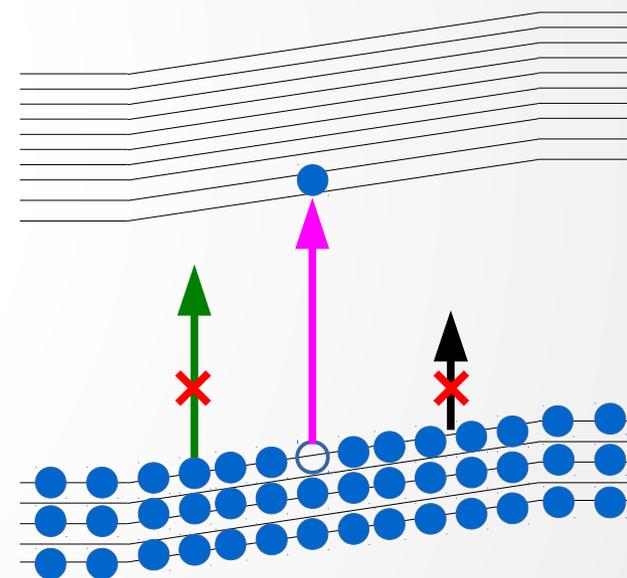
Максимальное поглощение
Максимальные потери на термализацию



Присутствуют потери и на термализацию и на неполное поглощение



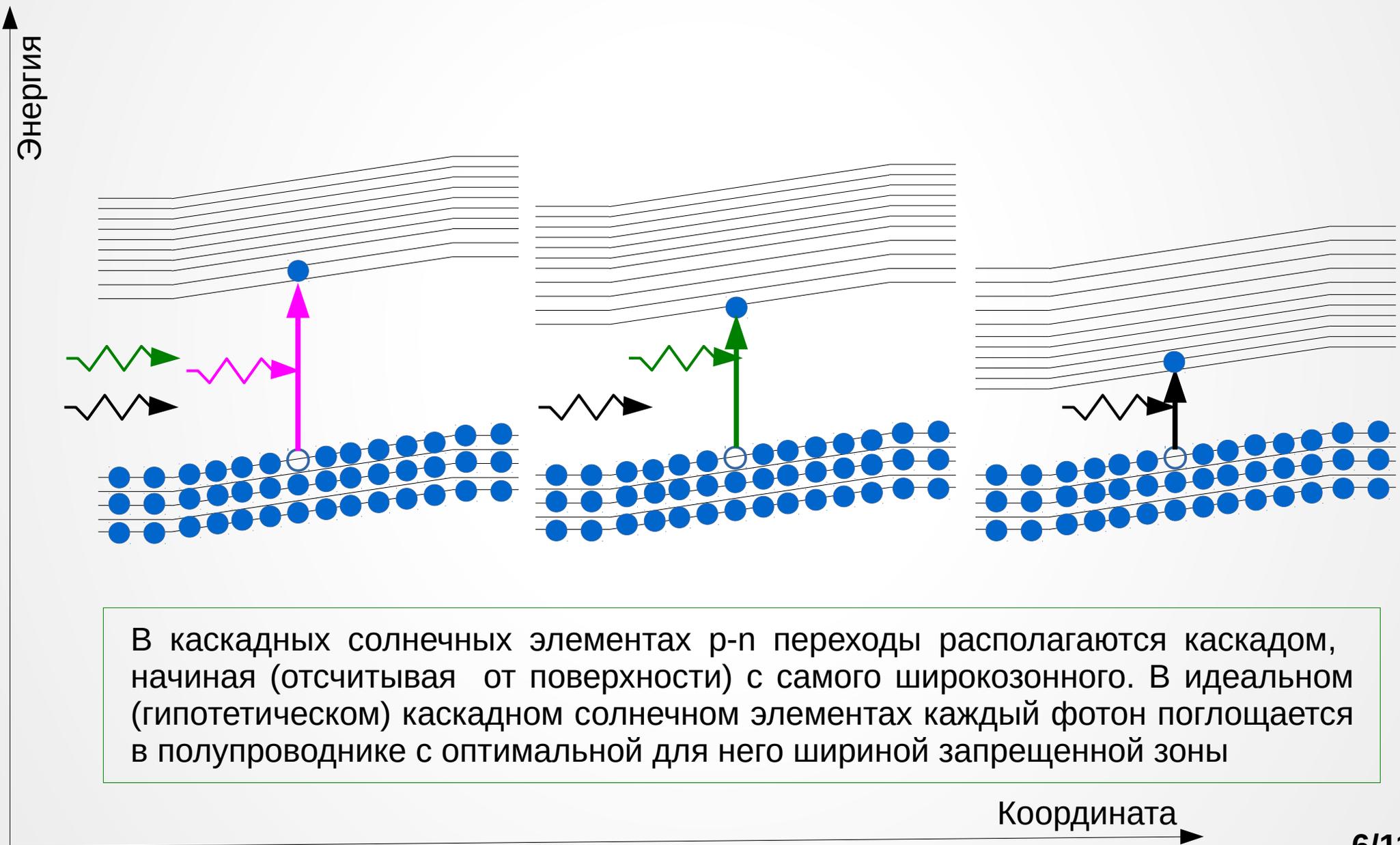
Отсутствует термализация
Максимальные потери, связанные с неполным поглощением



В солнечных элементах из одного р-п перехода всегда присутствуют фундаментальные потери. Выбор ширины запрещённой зоны осуществляется исходя из минимизации суммарных потерь для конкретного спектра

Координата

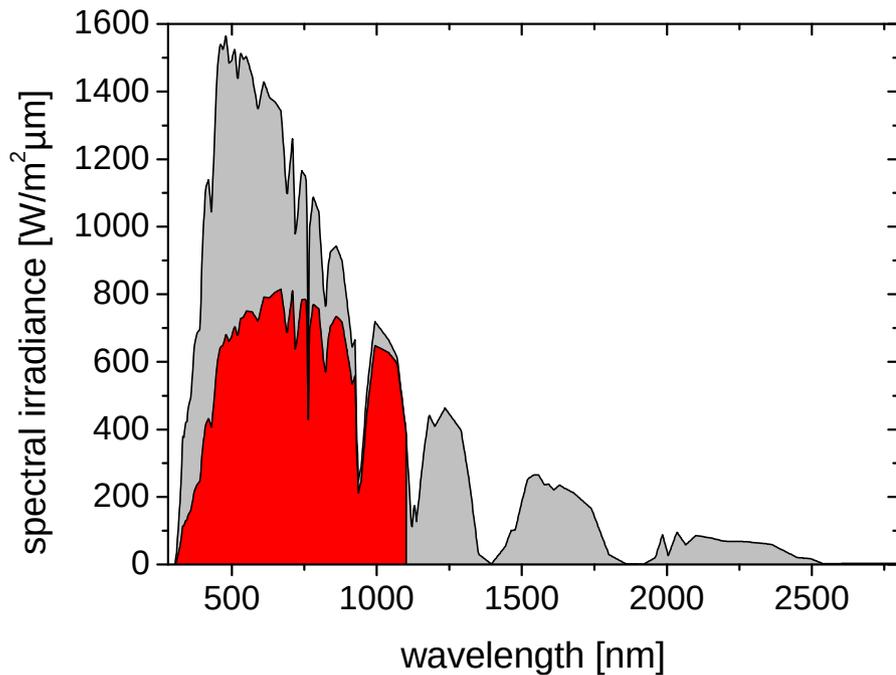
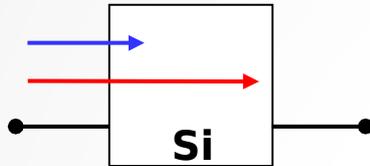
Принцип работы каскадного солнечного элемента



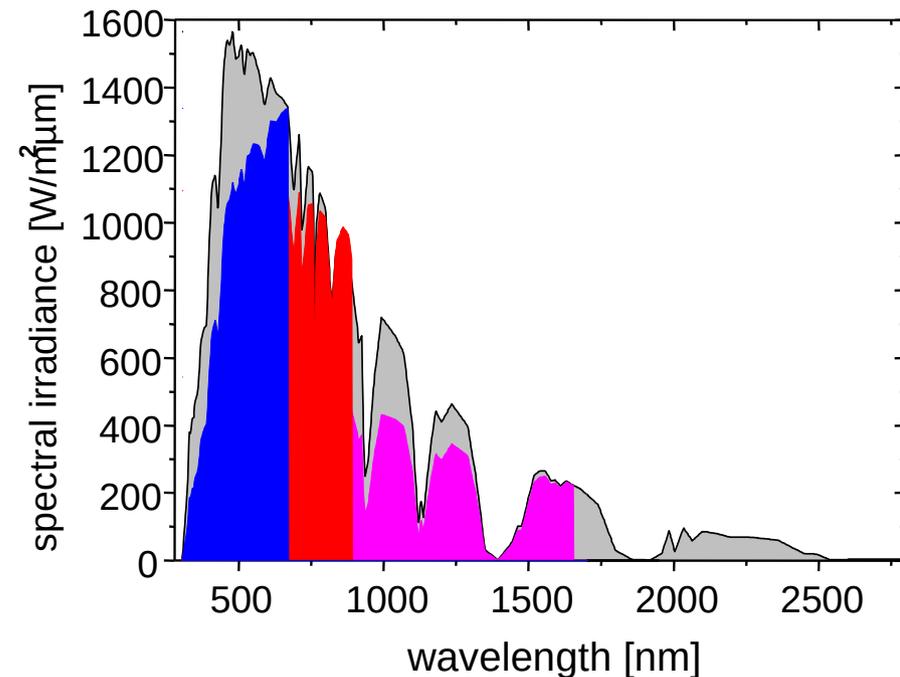
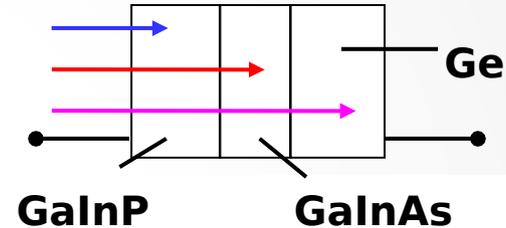
В каскадных солнечных элементах р-п переходы располагаются каскадом, начиная (отсчитывая от поверхности) с самого широкозонного. В идеальном (гипотетическом) каскадном солнечном элементе каждый фотон поглощается в полупроводнике с оптимальной для него шириной запрещенной зоны

Поглощение солнечного спектра однопереходным и каскадным СЭ

Однопереходный
ФЭП



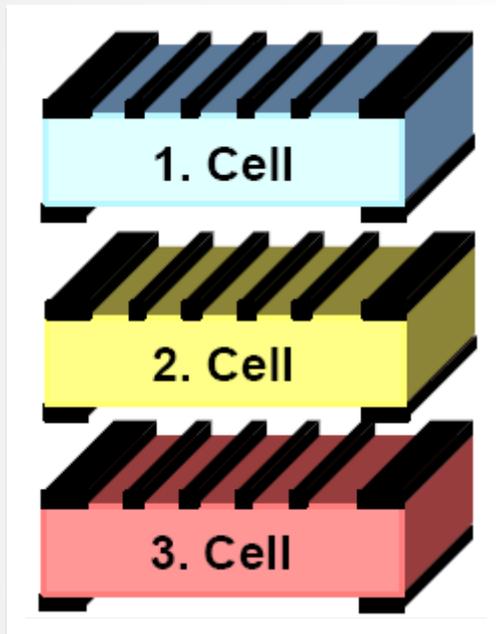
Трёхпереходный
(каскадный) ФЭП



Каскадные солнечные элементы расширяют спектральный диапазон и более эффективно поглощают солнечный спектр

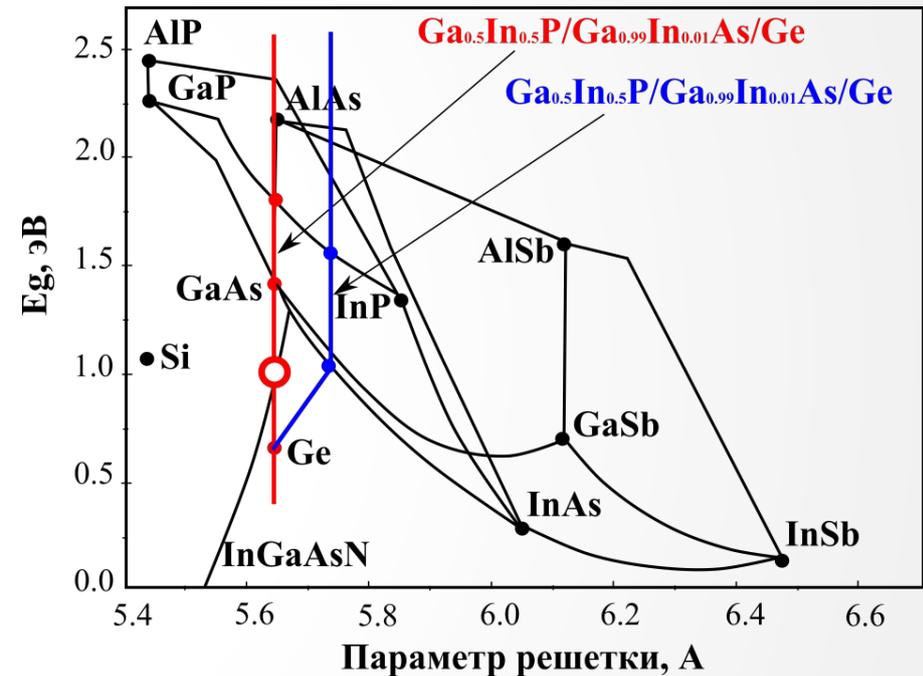
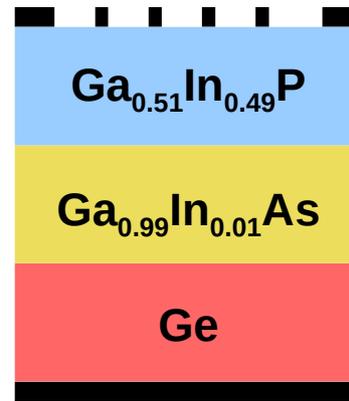
Варианты реализации каскадного солнечного элемента

Механически
стыкованные
субэлементы



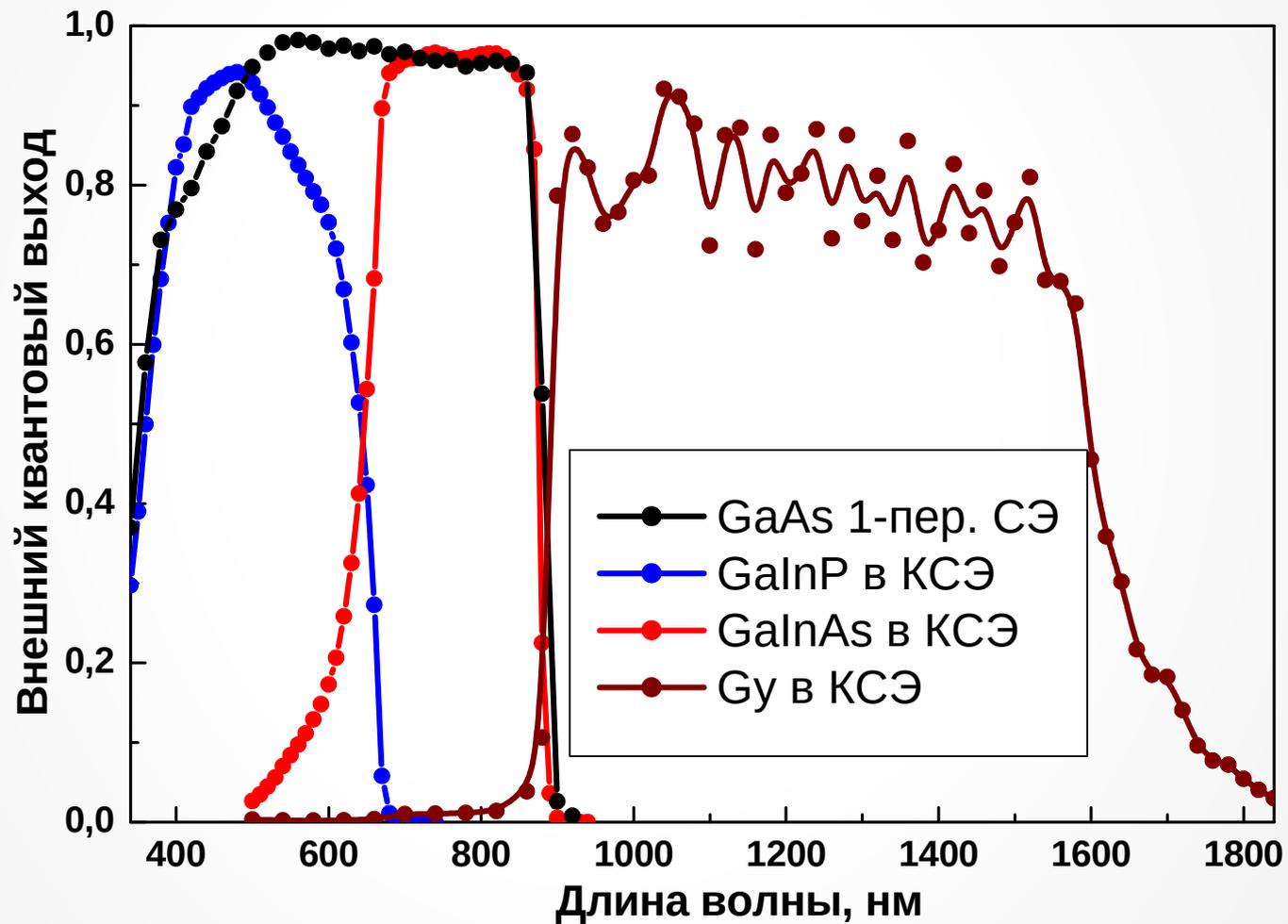
Механическая
стыковка —
сложный В
производстве
процесс

Монолитная гетероструктура

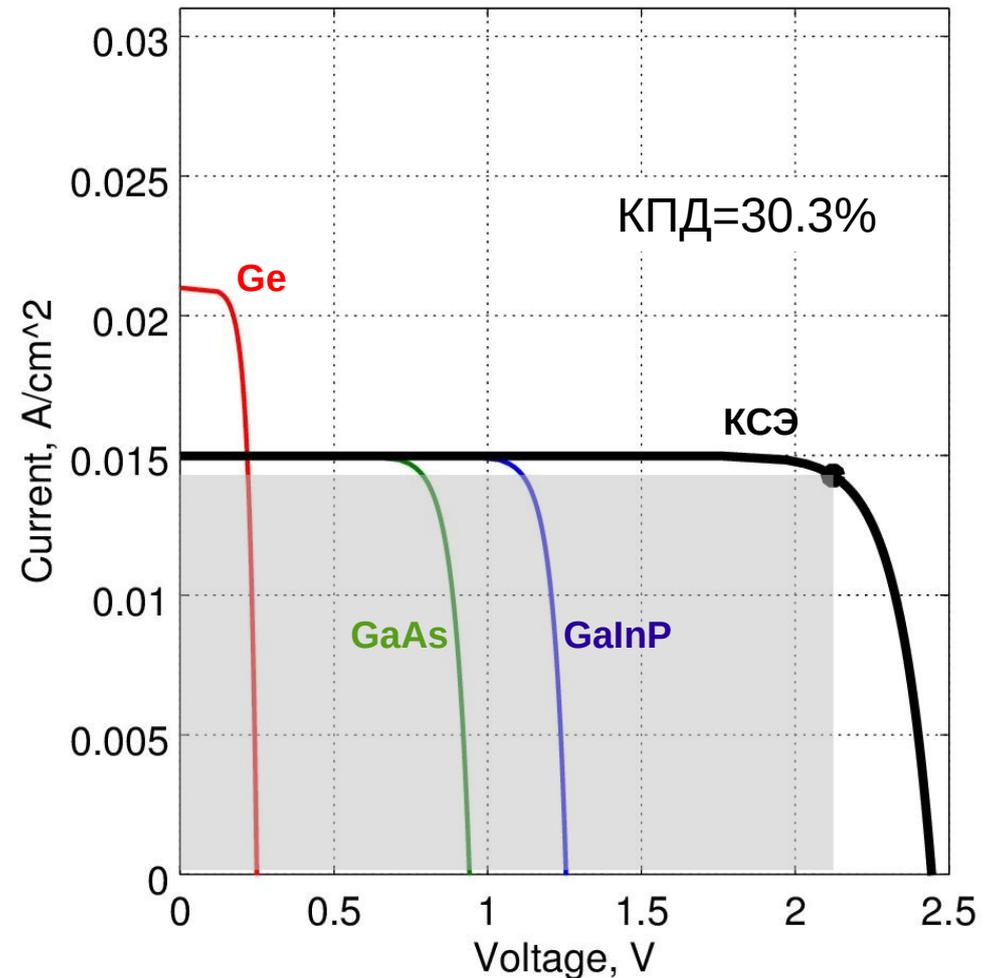
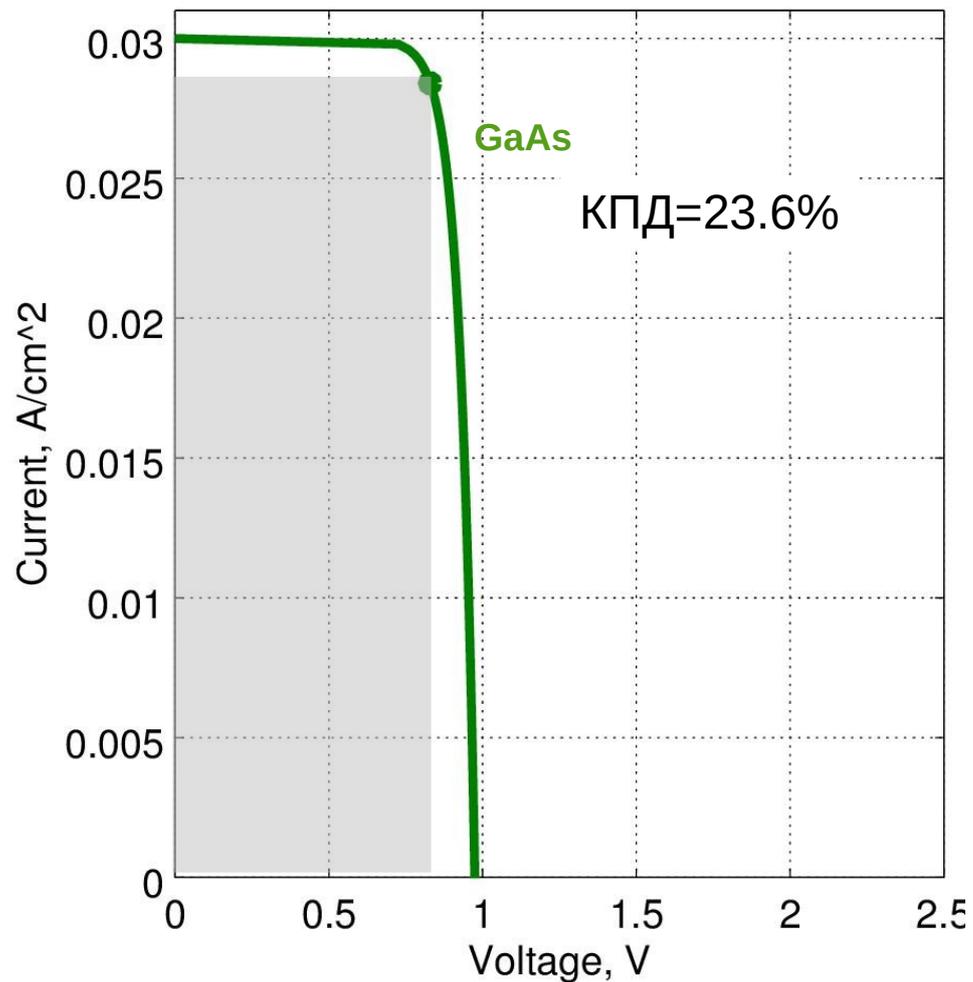


Монолитный рост производственно оправдан, но есть ограничение — все материалы используемые в структуре должны иметь близкие параметры кристаллической решетки

Формирование спектральных характеристик каскадных ФЭП



Формирование вольт-амперных характеристик каскадных ФЭП



КПД современных каскадных солнечных элементов

Прямое солнечное излучение

Кол-во переходов	Комментарий	кпд
6	2.19/1.76/1.45/1.19/.97/0.7 eV	39.2 ± 3.2
5	2.17/1.68/1.40/1.06/0.73 eV	38.8±1.2
3	InGaP/GaAs/InGaAs	37.9 ± 1.0
2	GaInP/GaAs	32.8 ± 1.0
1	GaAs	25.1 ± 0.8

Концентрированное солнечное излучение

Кол-во переходов	Комментарий	кпд
6	AlGaInP/AlGaAs/GaAs/GaInAs (2.15/1.72/1.41/1.17/0.96/0.70 eV)	47.1 ± 2.6
5		
4	GaInP/GaAs/GaInAs/GaInAs	45.7 ± 2.3
3	GaInP/GaAs/Ge	41.6 ± 2.5
2	GaInAsP/GaInAs	35.5 ± 1.2
1	GaAs	29.3 ± 1.2



ФТИ им. А.Ф. Иоффе
лаб. Фотоэлектрических преобразователей

Спасибо за внимание!!!

М.А. Минтаиров

mamint@mail.ioffe.ru

194021, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 26
тел/факс: 8(812)2972173

