

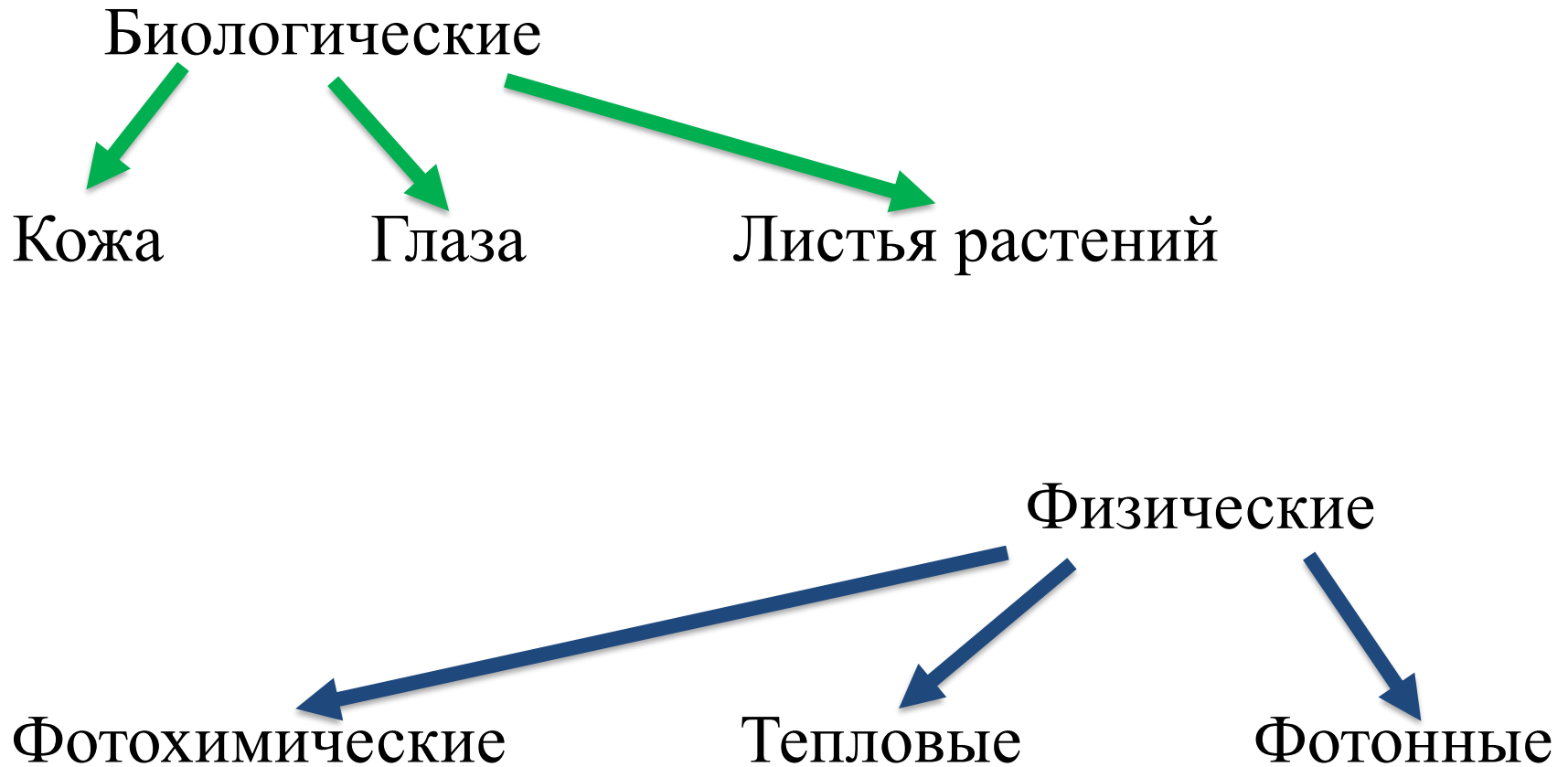
*Приёмники инфракрасного диапазона
на основе HgCdTe*

Разова Анна

аспирантка 1 года ИФМ РАН

Нижний Новгород,
9 февраля 2023 год

Виды ИК - приёмников



Параметры приёмников

Чувствительность \mathcal{S}

вольтовая

$$\mathcal{S} = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi} \left[\frac{\text{В}}{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} \right]$$

токовая

$$\mathcal{S} = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi} \left[\frac{\text{А}}{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} \right]$$

спектральная

интегральная

$$\mathcal{S}_\lambda = \frac{\Delta U}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \Phi_\lambda d\lambda}$$

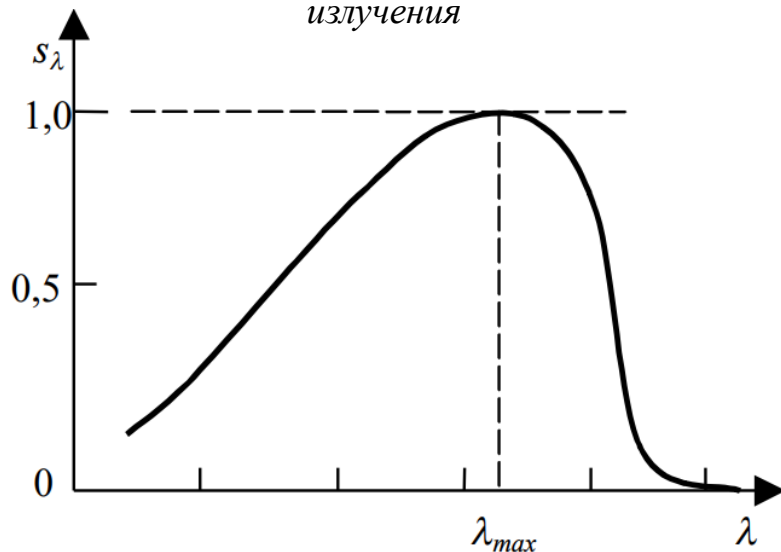
абсолютная

$$\mathcal{S}_\lambda = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi_\lambda}$$

относительная

$$s_\lambda = \frac{\mathcal{S}_\lambda}{\mathcal{S}_{\lambda_{\max}}}$$

Относительная спектральная
чувствительность приёмника
излучения



Параметры приёмников

Минимально различимый сигнал Φ_{min} [Вт]

Пороговая чувствительность в единичной
полосе частот Φ_n (NEP) [Вт/Гц^{1/2}]

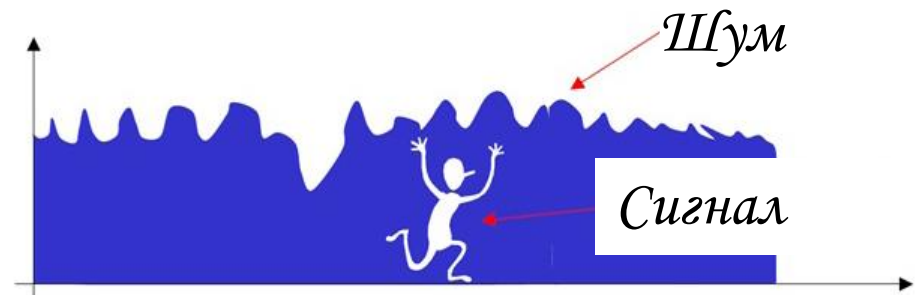
$$\Phi_n = \frac{\sqrt{U_{ш}^2}}{S_V \sqrt{\Delta f}}$$

ИЛИ

$$\Phi_n = \frac{\sqrt{I_{ш}^2}}{S_I \sqrt{\Delta f}}$$

Виды шумов: тепловой
дробовой
радиационный

генерационно-рекомбинационный



Параметры приёмников

Обнаружительная
способность \mathcal{D}

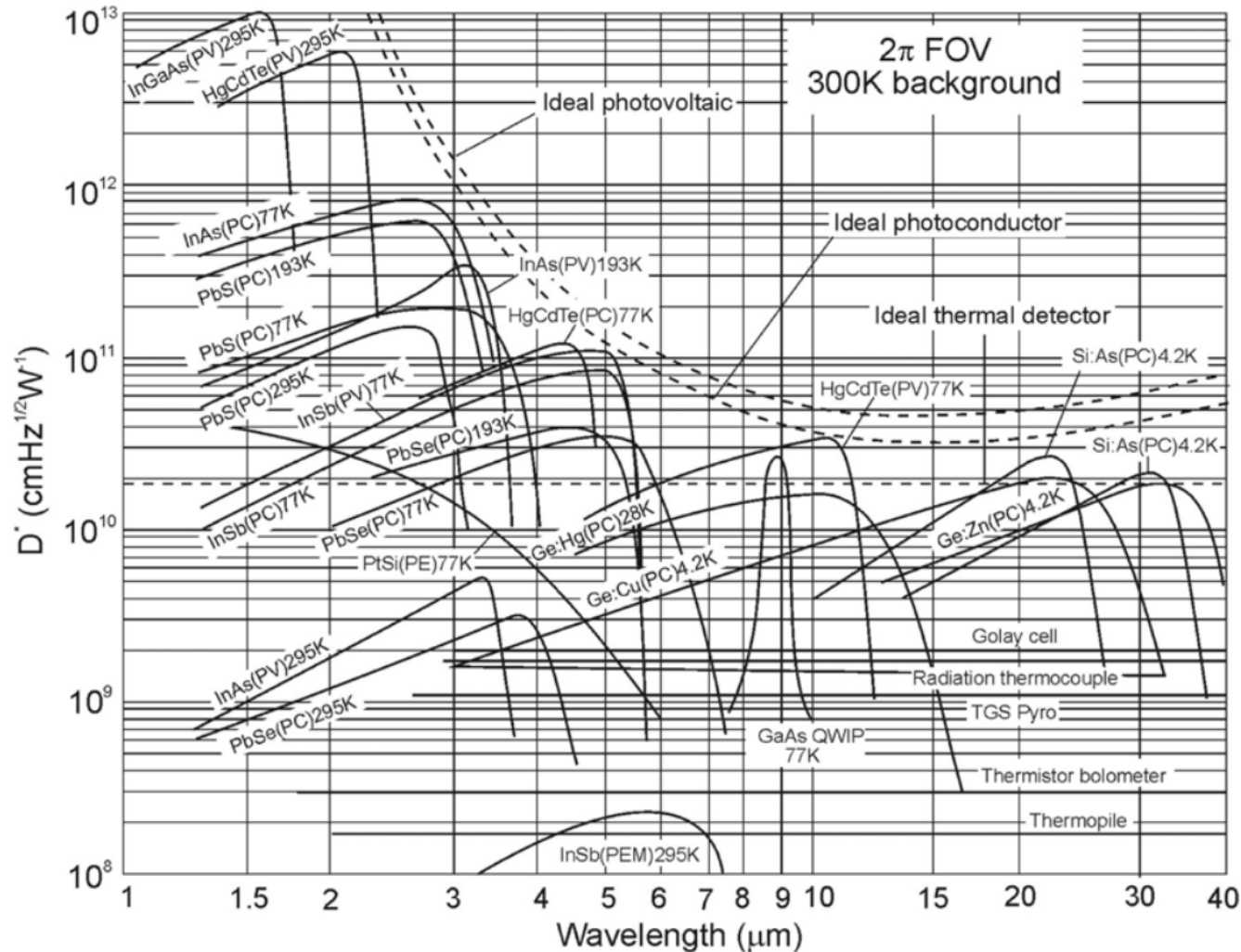
$$\mathcal{D} = \frac{1}{\mathcal{F}_n}$$

$$[\Gamma_{\text{ц}}^{1/2} / \text{ВТ}]$$

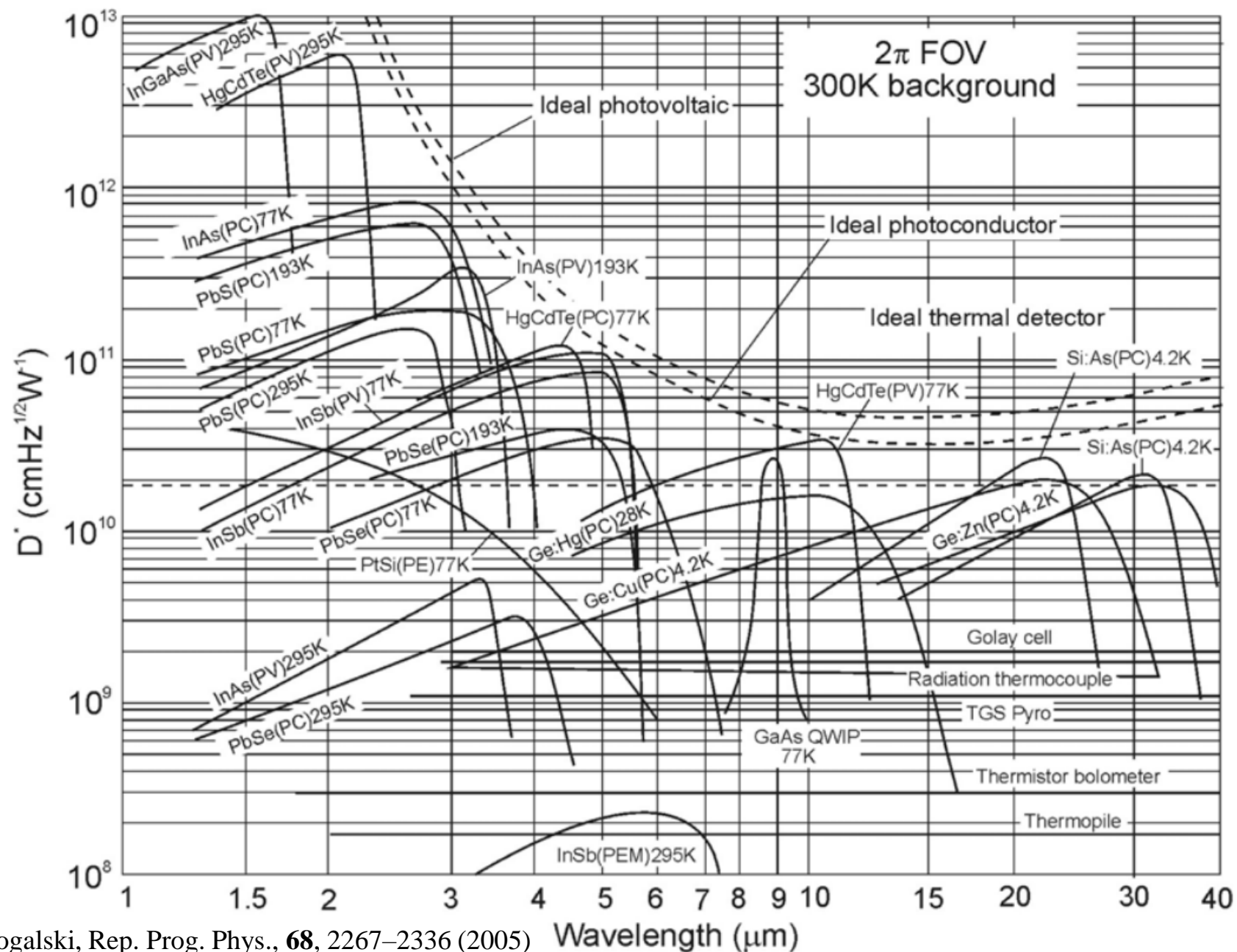
Удельная
обнаружительная
способность \mathcal{D}^*

$$\mathcal{D}^* = \frac{S_V}{\sqrt{U_{\text{ш}}^2}} s \sqrt{\Delta f}$$

$$[\text{см} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} / \text{ВТ}]$$

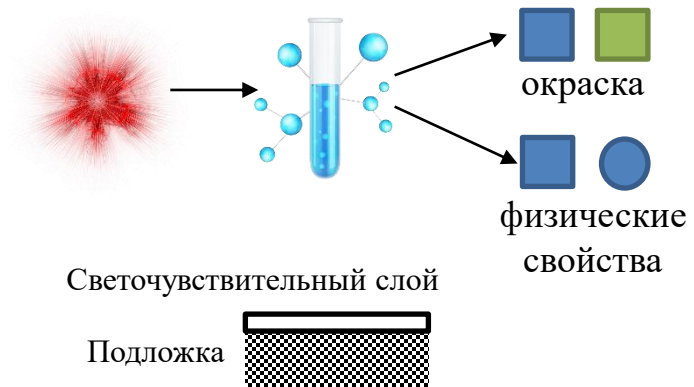


Параметры приёмников



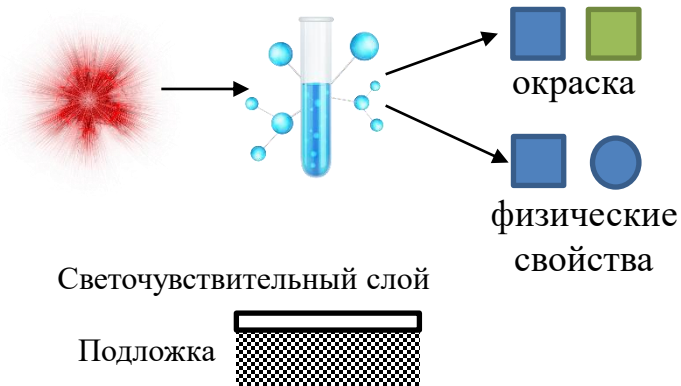
Виды ИК - приёмников

Фотохимические Селективные

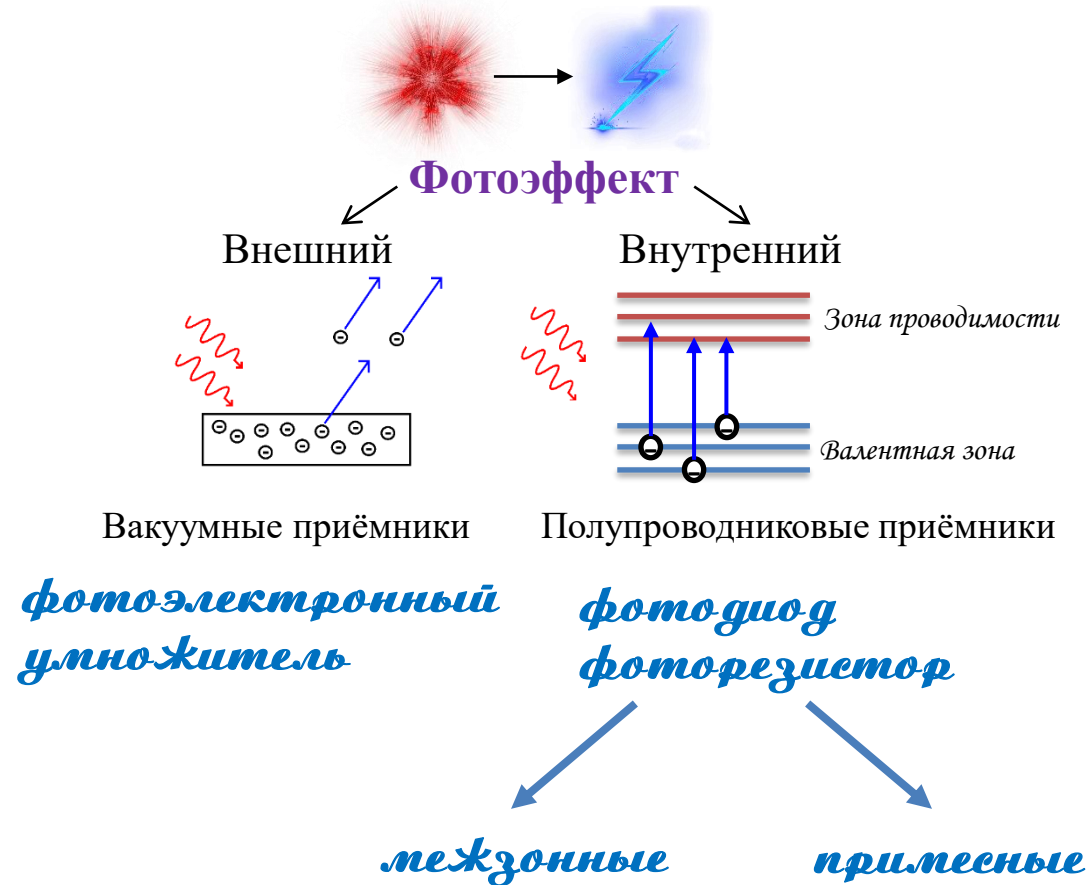


Виды ИК - приёмников

Фотохимические Селективные

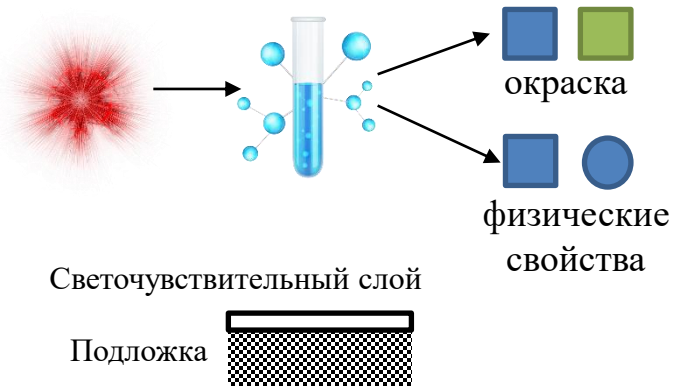


Фотонные Селективные

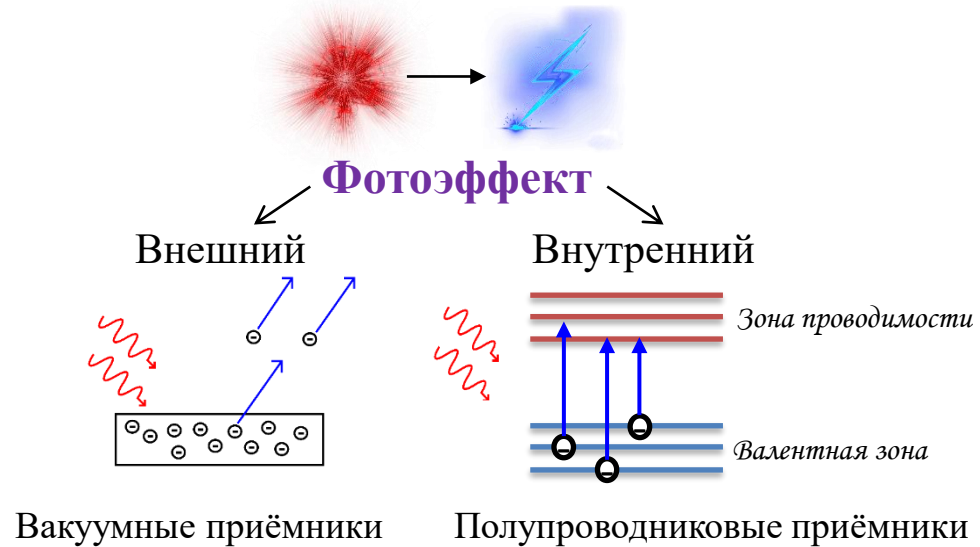


Виды ИК - приёмников

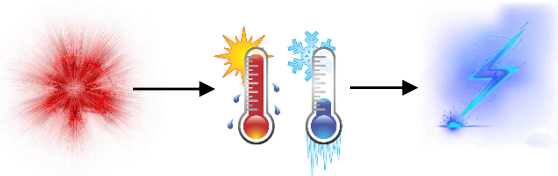
Фотохимические Селективные



Фотонные Селективные



Тепловые Неселективные



*фотозлектронный
умножитель*

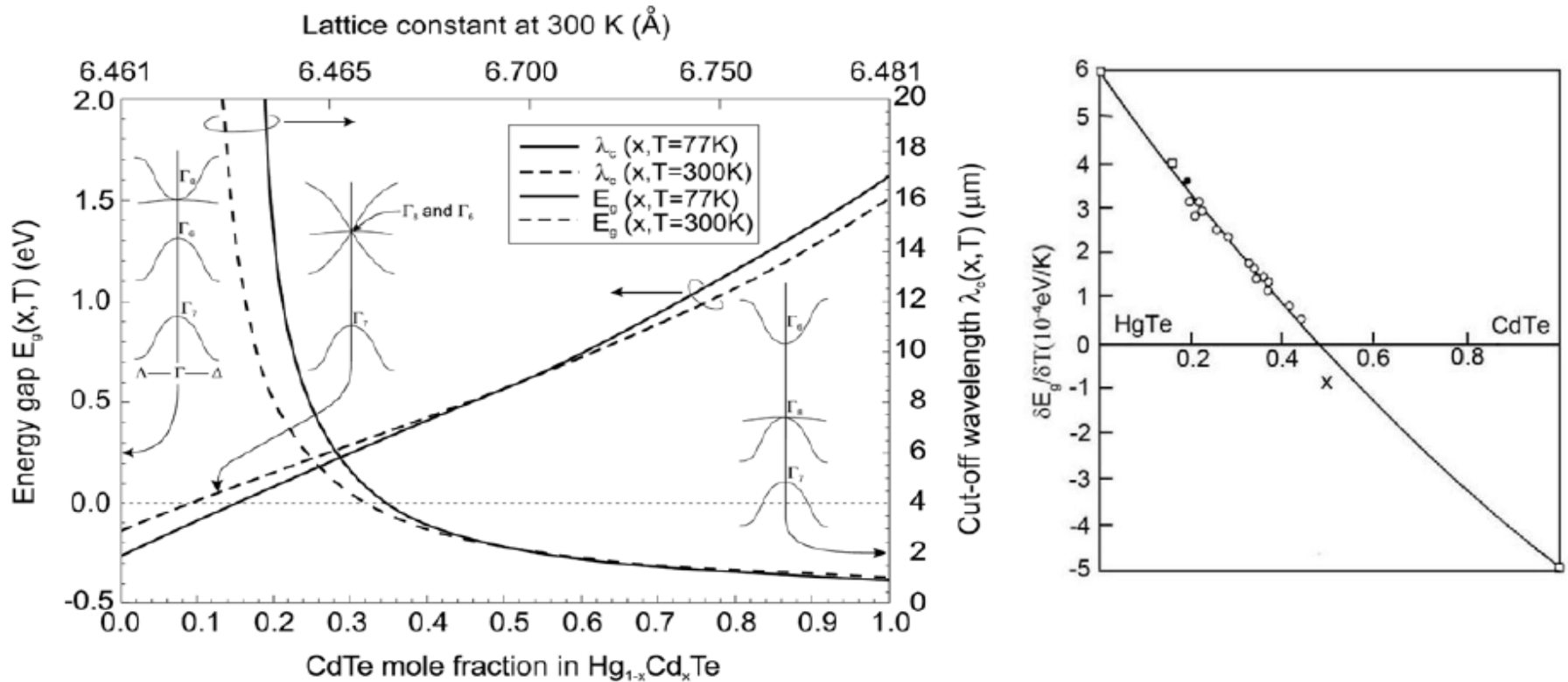
*фотодиод
фоторезистор*

тежзонные

примесные

*Болометр
приемник Толя
пирозлектрики*

Свойства HgCdTe



КРТ приёмники



АО «ШВАБЕ»

- АО «НПО «Орион»
(охлаждаемые и неохлаждаемые ФПУ на всех типах полупроводниковых материалов)
- АО «МЗ «Сапфир»
(охлаждаемые и неохлаждаемые ФПУ на основе Si, InSb, CdHgTe, PbS)
- АО «НИИ «Полюс»
(неохлаждаемые ФПУ на основе InGaAs, охлаждаемые ФПУ на основе квантовых ям)

Частные предприятия

- АО «ОКБ Астрон»
(неохлаждаемые ФПУ на оксиде ванадия и охлаждаемые ФПУ на КРТ совместно с ИФП СО РАН и микрохолодильной системы Астрон-МКС500)

АО «РОСЭЛЕКТРОНИКА»

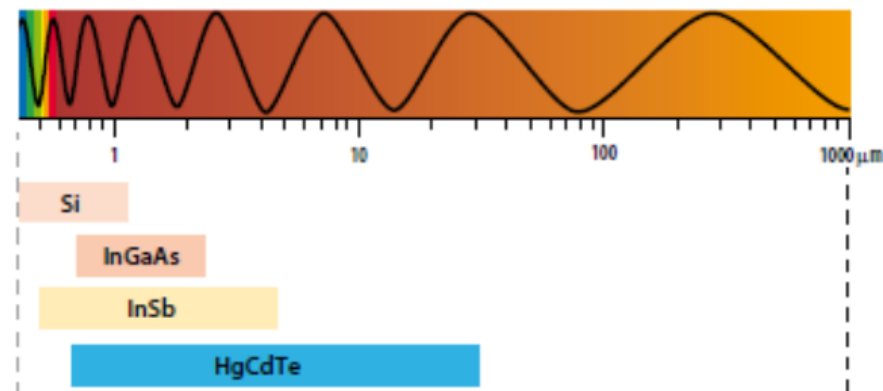
- АО «НПП «Пульсар»
(фото-ПЗС для видимой области на основе Si)
- АО «ЦНИИ «Электрон»
(охлаждаемые ФПУ с барьером Шоттки на основе PtSi, тепловизионные каналы)
- АО «ЦНИИ «Циклон»
(Неохлаждаемые ФПУ на основе микроболометров, охлаждаемые ФПУ на основе квантовых ям)
- АО «НПП «Восток»
(неохлаждаемые и охлаждаемые ФПУ на основе Si, в том числе примесного, пироэлектрики)



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (Сибирское отделение)

- ИФП СО РАН
(полупроводниковые материалы и ФПУ на основе CdHgTe, InAs, микроболометров, квантовых ям, тепловизионные каналы)

Фотодиоды и фоторезисторы
Длина волны – 3-24 мкм
С охлаждением и без

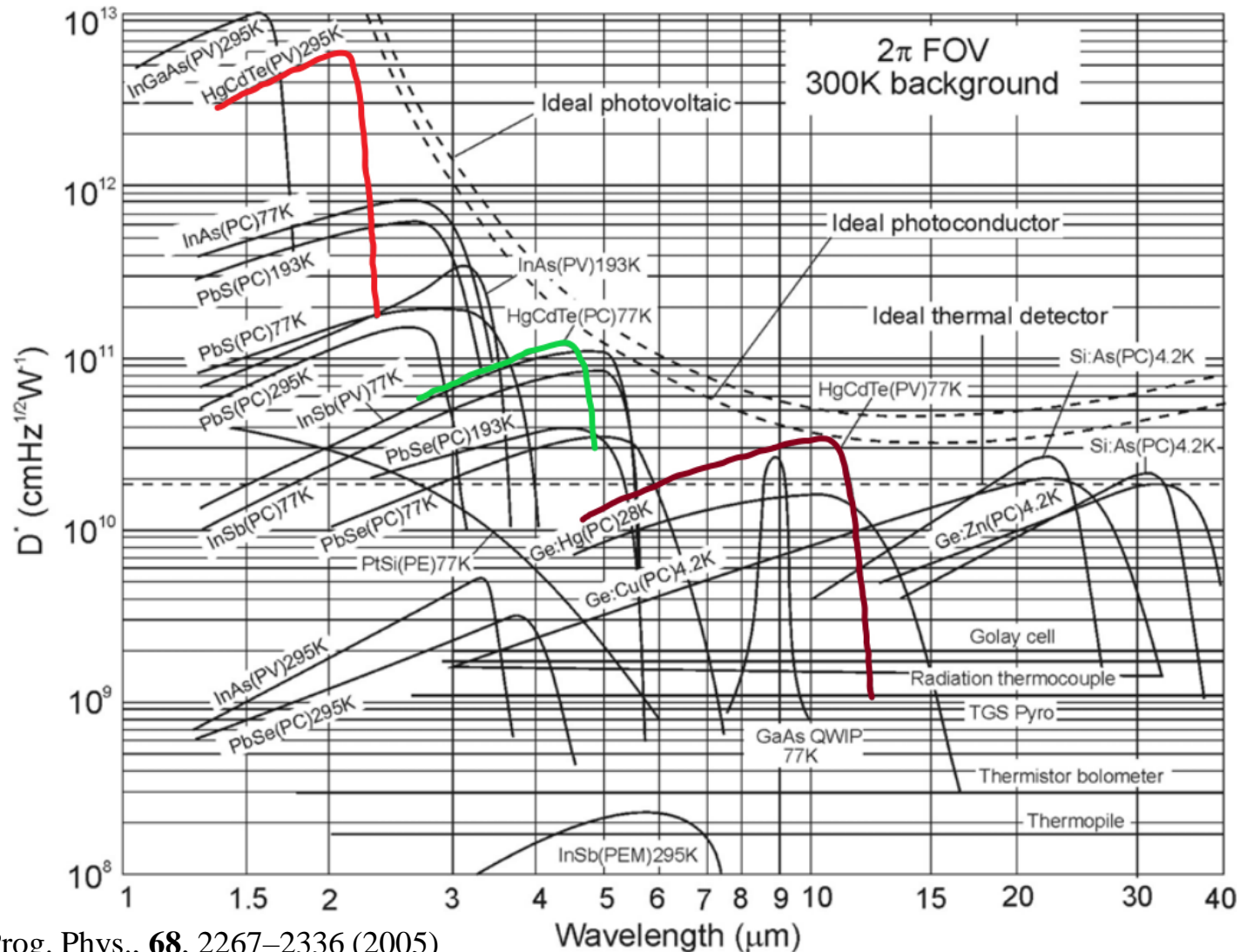


КРТ приёмники

2 мкм: D до $5 \cdot 10^{12}$ (295 K) $\text{см} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} / \text{Вт}$

3-5 мкм: D до 10^{11} (77 K) $\text{см} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} / \text{Вт}$

8-14 мкм: $D =$ до $4 \cdot 10^{10}$ (77 K) $\text{см} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} / \text{Вт}$

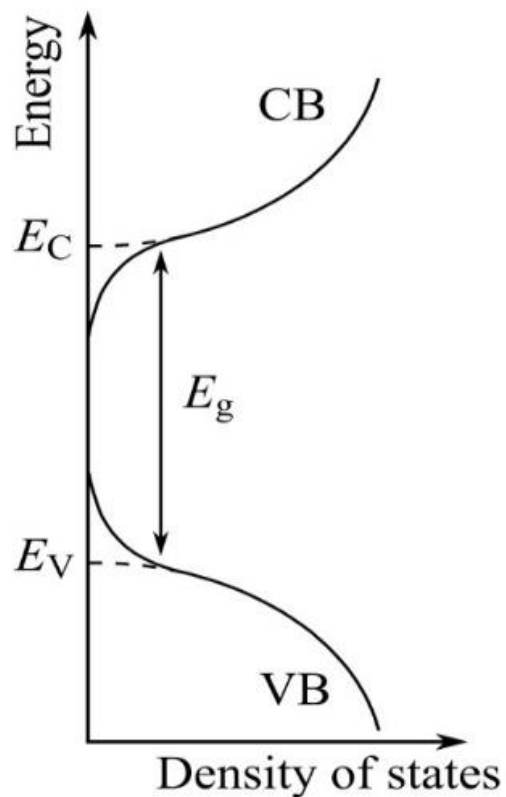


Энергия Урбаха

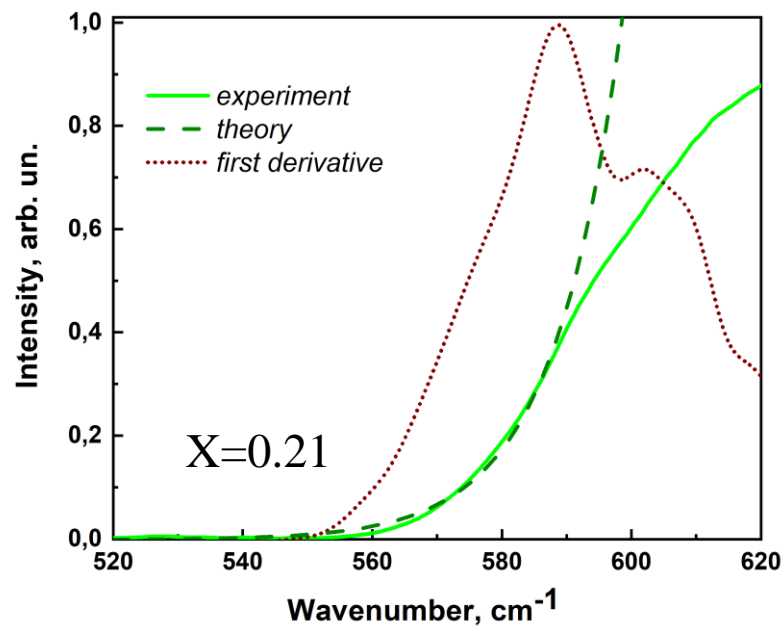
$$I \sim \exp\left(\frac{h\nu - E_0}{W}\right)$$

$h\nu$ – энергия фотона

W – энергия Урбаха



Спектры фотопроводимости



Номер структуры	x	d, нм	W, мэВ (4.2 К)
1	0.183	8000	0.95 ± 0.25
2	0.189	4200	1.5 ± 0.4
3	0.191	3840	1.4 ± 0.25
4	0.22	3940	-
5	0.23	5960	2.35 ± 0.25
6	0.21	3840	1.2 ± 0.2

Энергия Урбаха

$$I \sim \exp\left(\frac{h\nu - E_0}{W}\right)$$

$h\nu$ – энергия фотона

W – энергия Урбаха

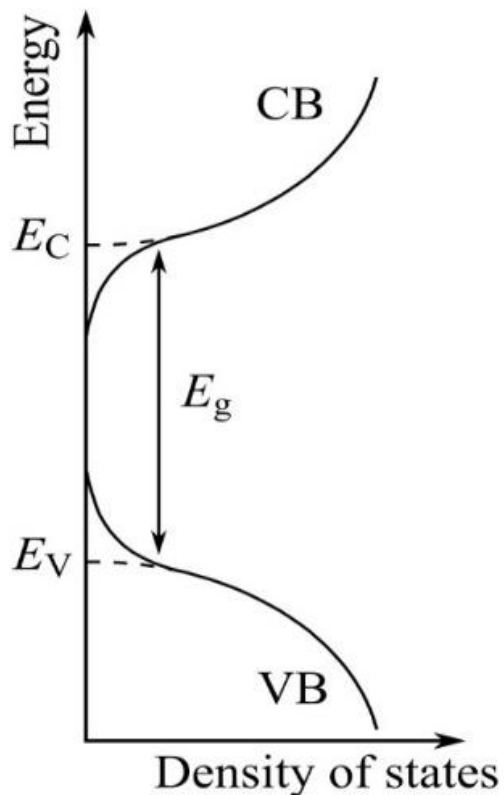


Table I. Fitting Results of Temperature-Dependent Urbach Tail Energy (eV)

X	0.40	0.30	0.21
A	0.0190 ± 0.0002	0.0112 ± 0.0003	0.0124 ± 0.0005
B	0.0012 ± 0.0001	0.0008 ± 0.0001	0.00067 ± 0.00027

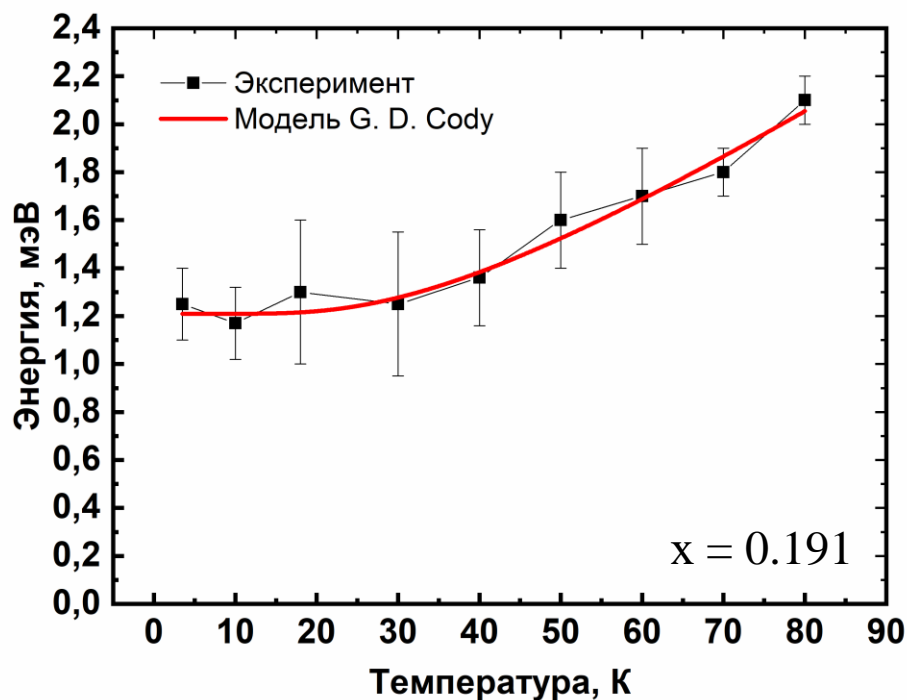
Y. Chang et al., Journal of ELECTRONIC MATERIALS, **33** (6), 709-713 (2004)

Номер структуры	x	d, нм	W, мэВ (4.2 К)
1	0.183	8000	0.95 ± 0.25
2	0.189	4200	1.5 ± 0.4
3	0.191	3840	1.4 ± 0.25
4	0.22	3940	-
5	0.23	5960	2.35 ± 0.25
6	0.21	3840	1.2 ± 0.2

Энергия Урбаха

$$W(T) = A \left\{ \frac{1 + P}{2} + N \left[\exp\left(\frac{T_0}{T}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad \Theta_D = 4T_0/3$$

G. D. Cody et al., Phys. Rev. Lett., **47** (20), 1480 (1981); S. M. Wasim et al., J. Appl. Phys., **84**, 5823 (1998)



$$N = 1$$

$$P = 0.25 \pm 0.25$$

$$\Theta_D = (144 \pm 27) \text{ K}$$

Энергия Урбаха

Номер структуры	x	d, нм	W, мэВ (4.2 К)
1	0.183	8000	0.95 ± 0.25
2	0.189	4200	1.5 ± 0.4
3	0.191	3840	1.4 ± 0.25
4	0.22	3940	-
5	0.23	5960	2.35 ± 0.25
6	0.21	3840	1.2 ± 0.2

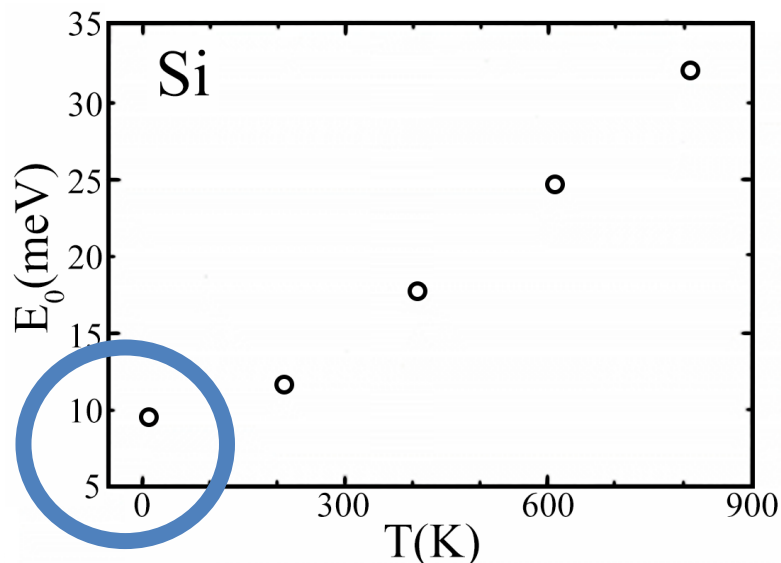


FIG. 4. The Urbach tail width parameter $E_0(T)$ due to electron-longitudinal phonon interactions in Si at temperatures 10 K to 810 K.

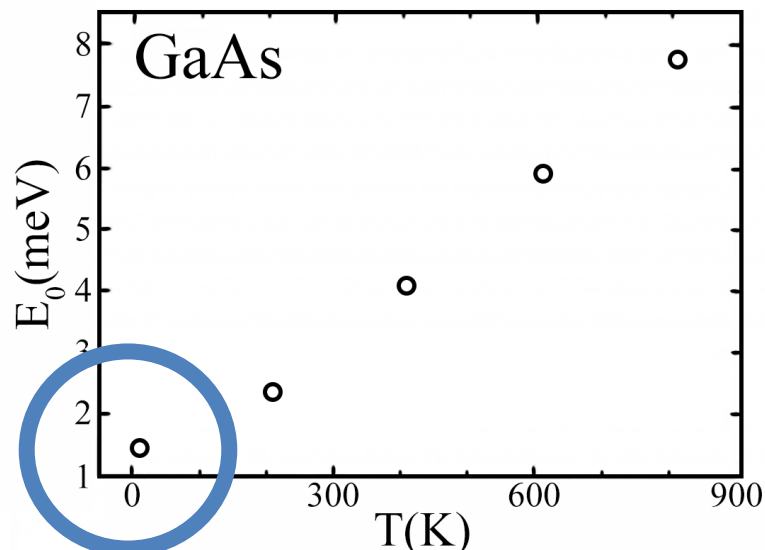
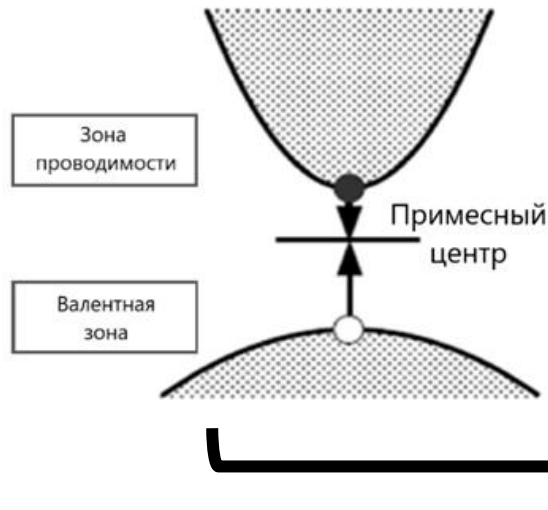


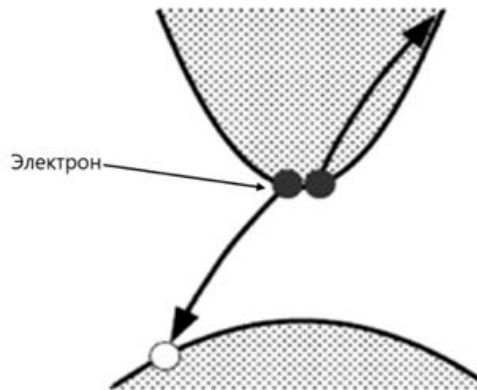
FIG. 6. Urbach tail width parameter $E_0(T)$ in GaAs due to electron-phonon interactions at temperatures 10 K to 810 K.

Процессы рекомбинации

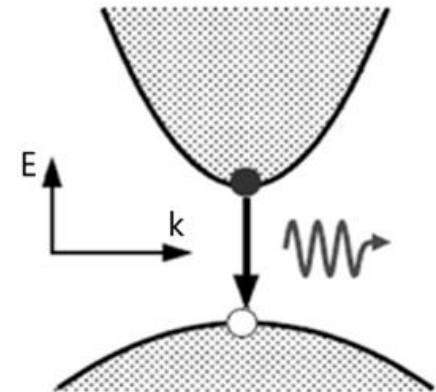
Рекомбинация
Шокли – Рида - Холла



Оже - рекомбинация



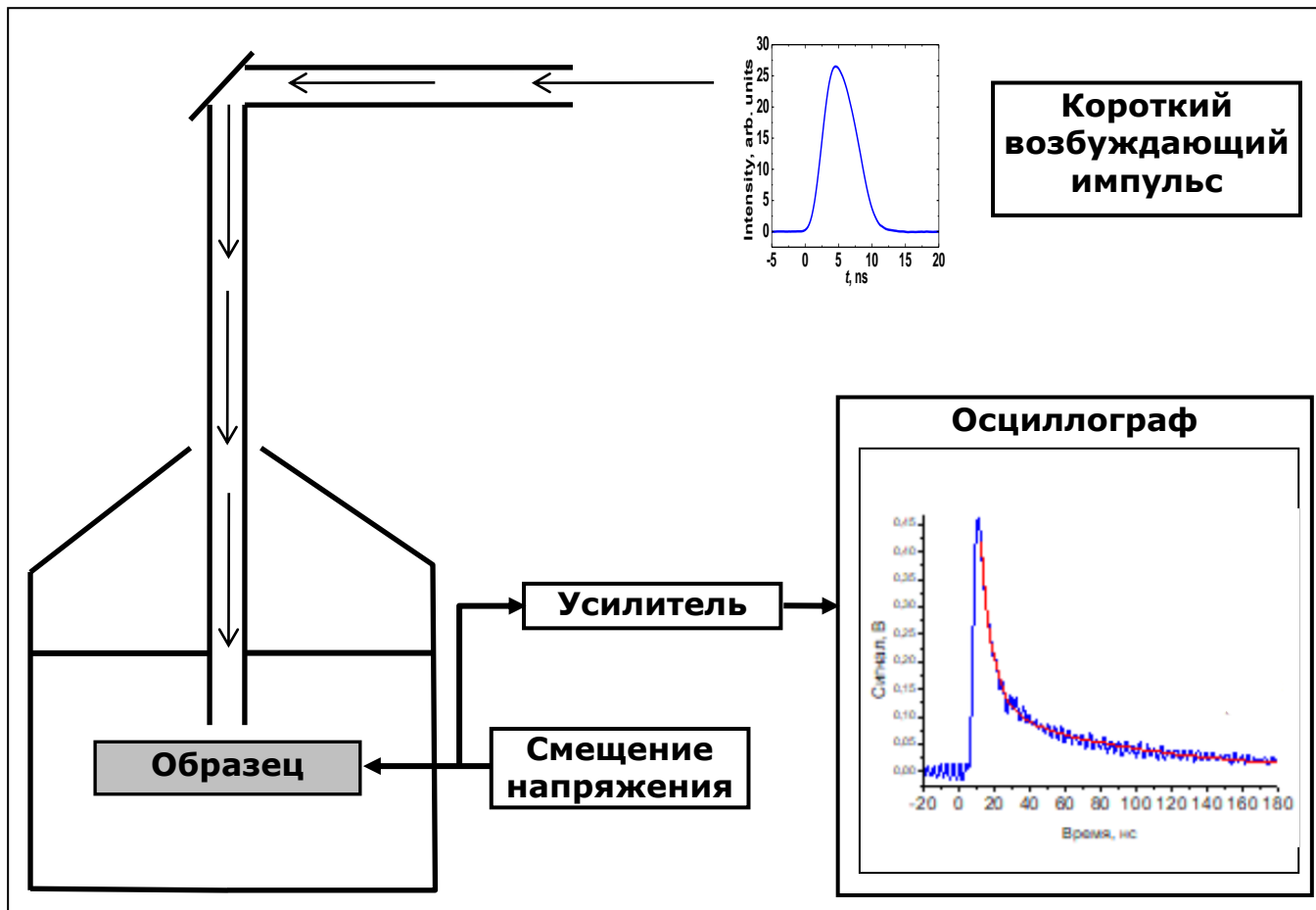
Излучательная
рекомбинация



Безызлучательные процессы

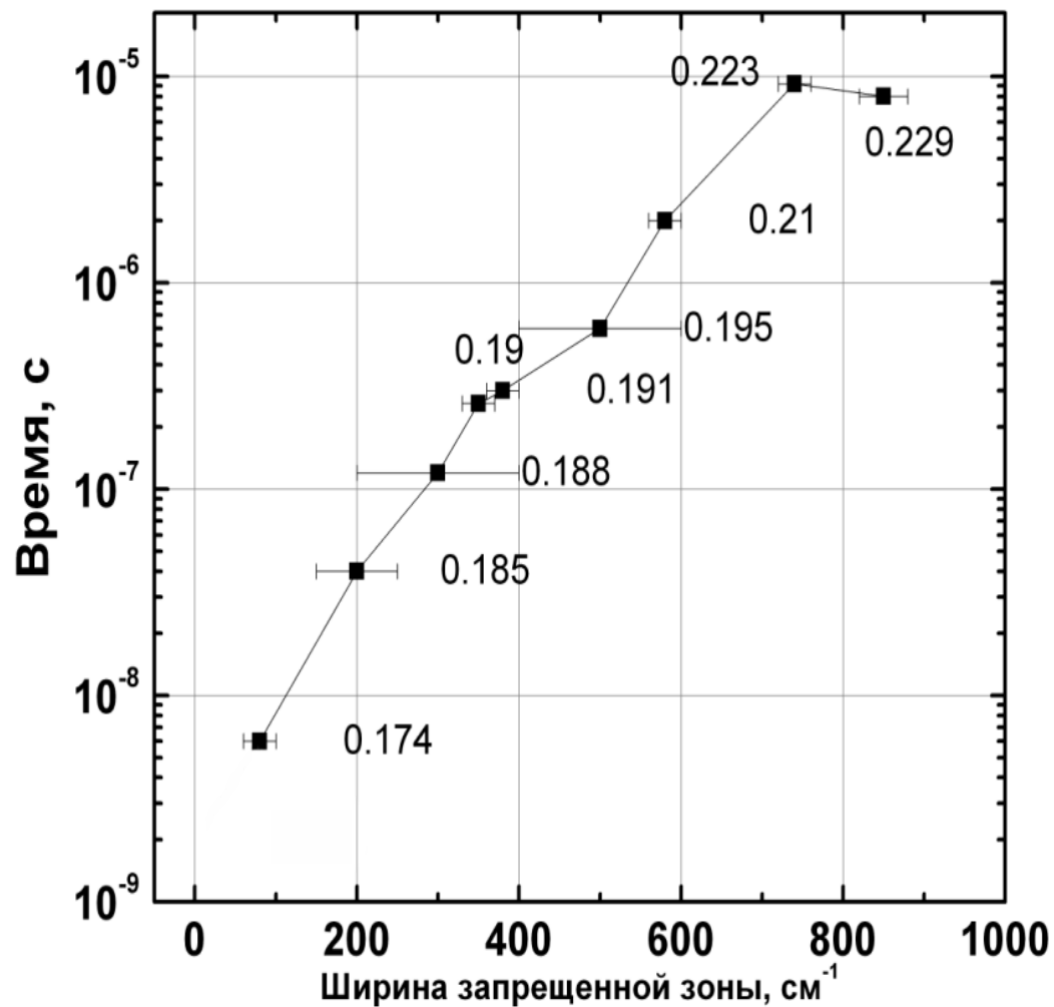
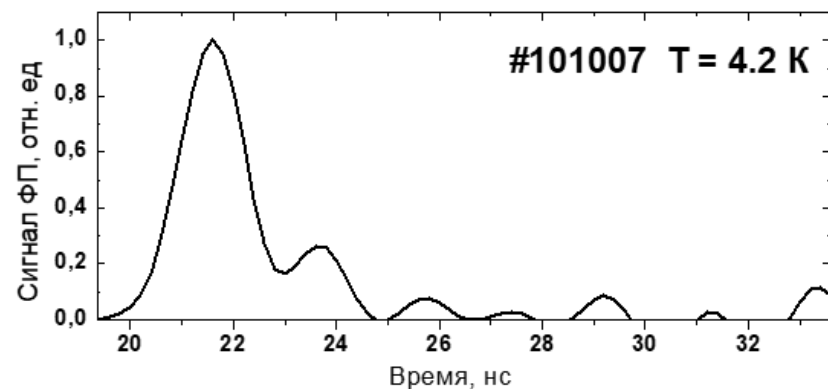
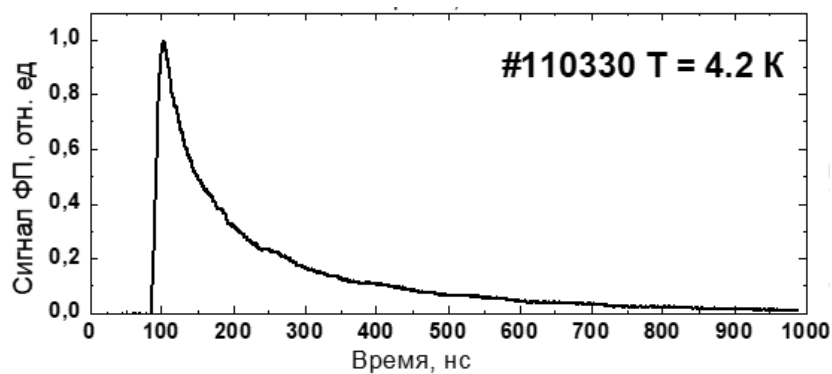
В КРТ концентрация примеси/дефекты 10^{14} см^{-3}

Времена релаксации кинетики фотопроводимости



Румянцев В.В. Фотопроводимость и $\langle \dots \rangle$: дис. на соиск.
уч. ст. к.ф.-м.н.: 05.27.01 / Румянцев Владимир
Владимирович. – Нижний Новгород. – 2014. – 126 с.

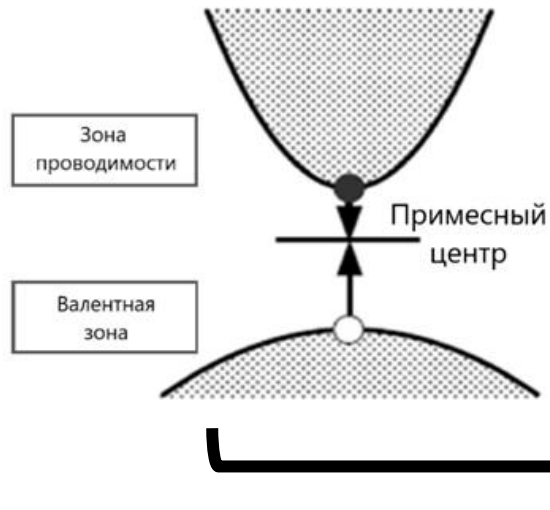
Времена релаксации кинетики фотопроводимости



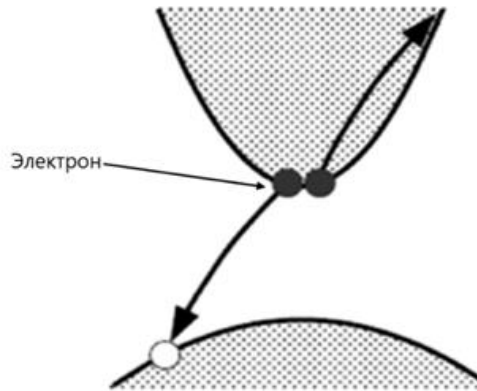
Румянцев В.В. Фотопроводимость и $\langle \dots \rangle$: дис. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н.: 05.27.01 / Румянцев Владимир Владимирович. – Нижний Новгород. – 2014. – 126 с.

Процессы рекомбинации

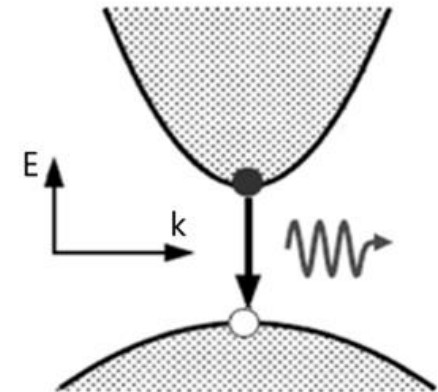
Рекомбинация
Шокли – Рида - Холла



Оже - рекомбинация



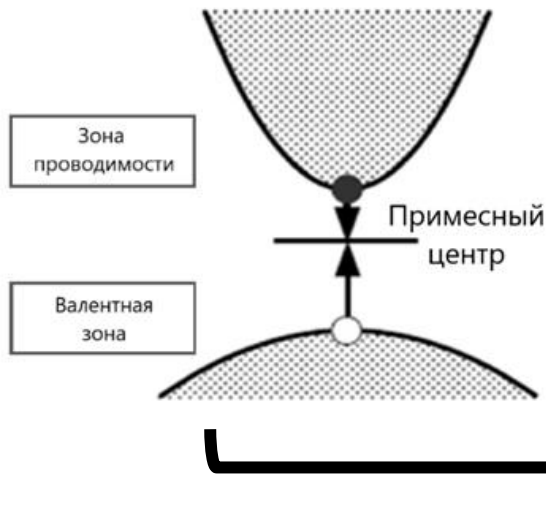
Излучательная
рекомбинация



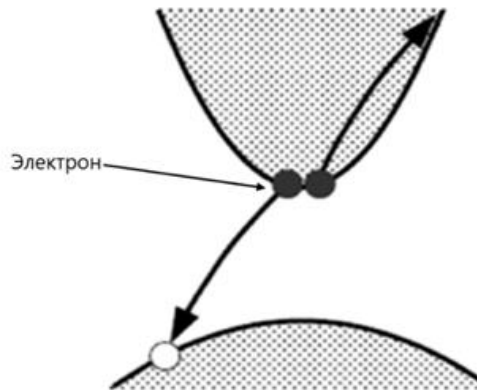
Безызлучательные процессы

Процессы рекомбинации

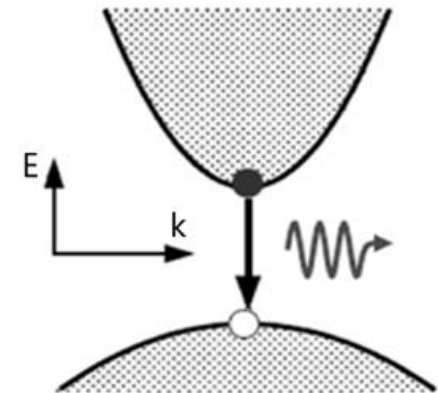
Рекомбинация
Шокли – Рида - Холла



Оже - рекомбинация



Излучательная
рекомбинация

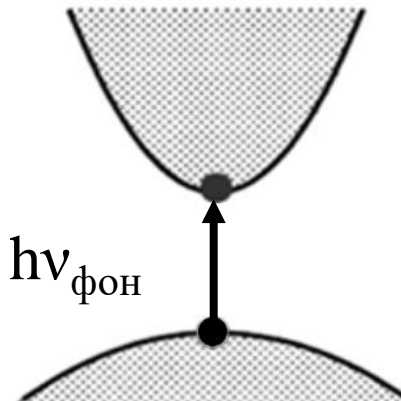


Безызлучательные процессы



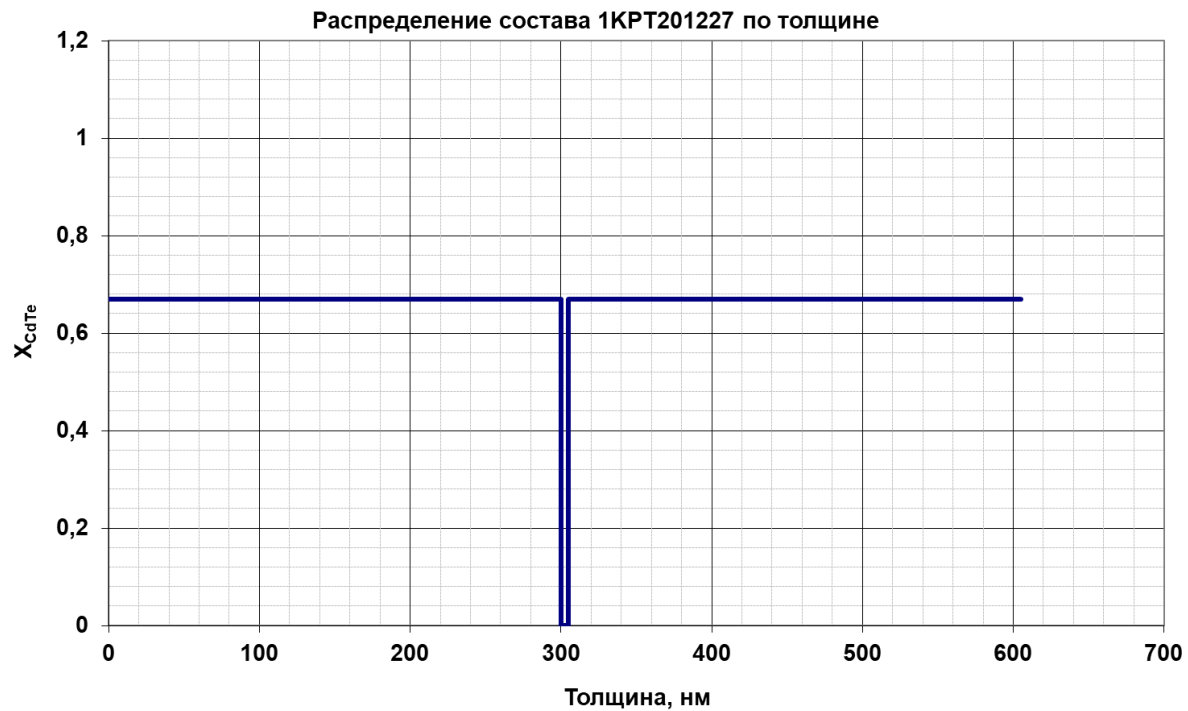
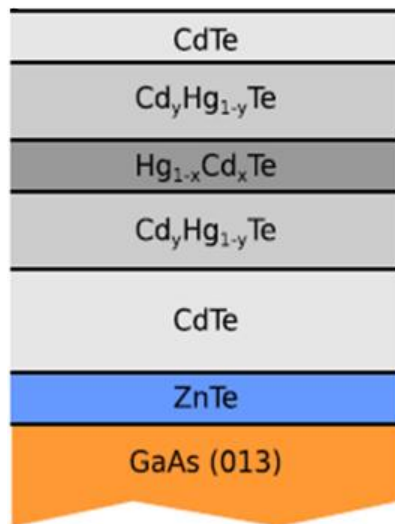
Прямая фононная рекомбинация

$$E_g = h\nu_{\text{фон}}$$

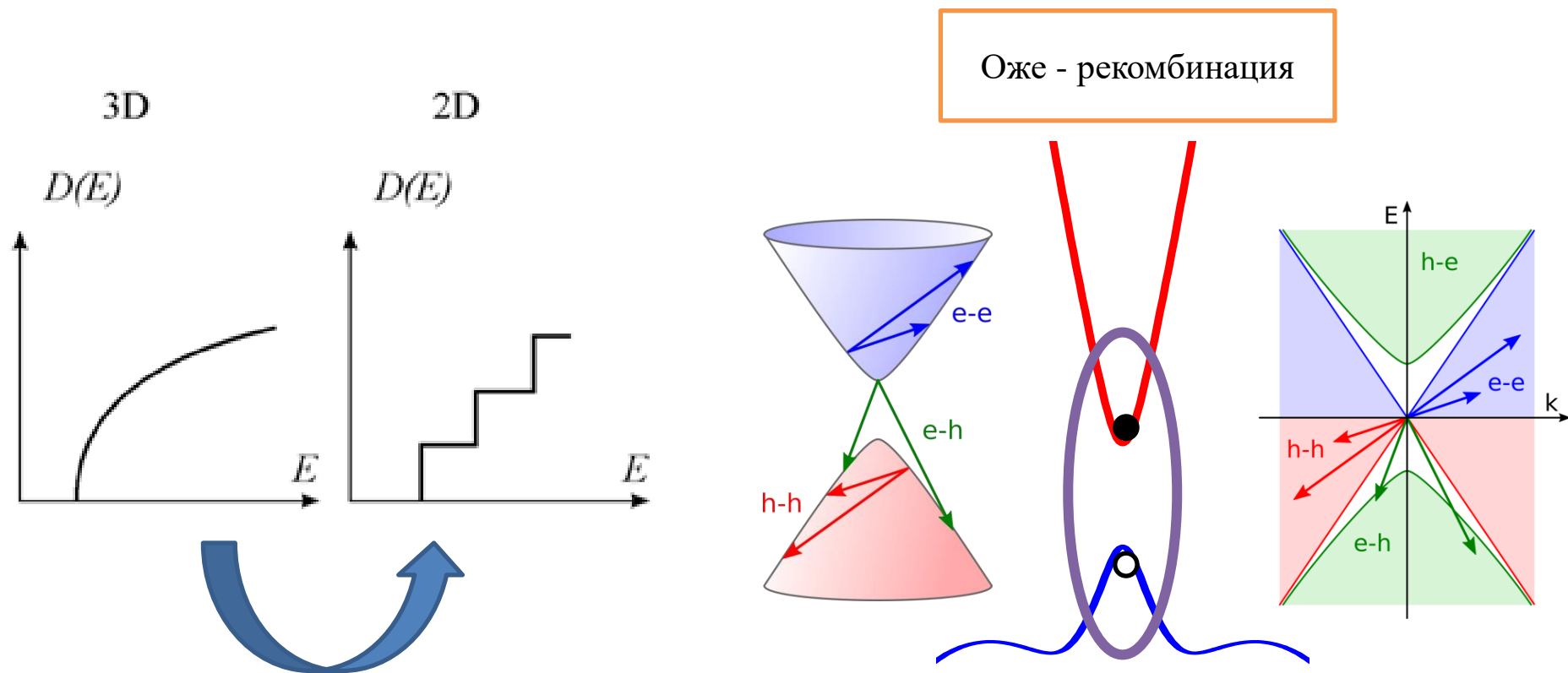


Структуры с квантовыми ямами HgCdTe

Рост структур:
Н.Н. Михайлов
С.А. Дворецкий,
ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН,
Новосибирск

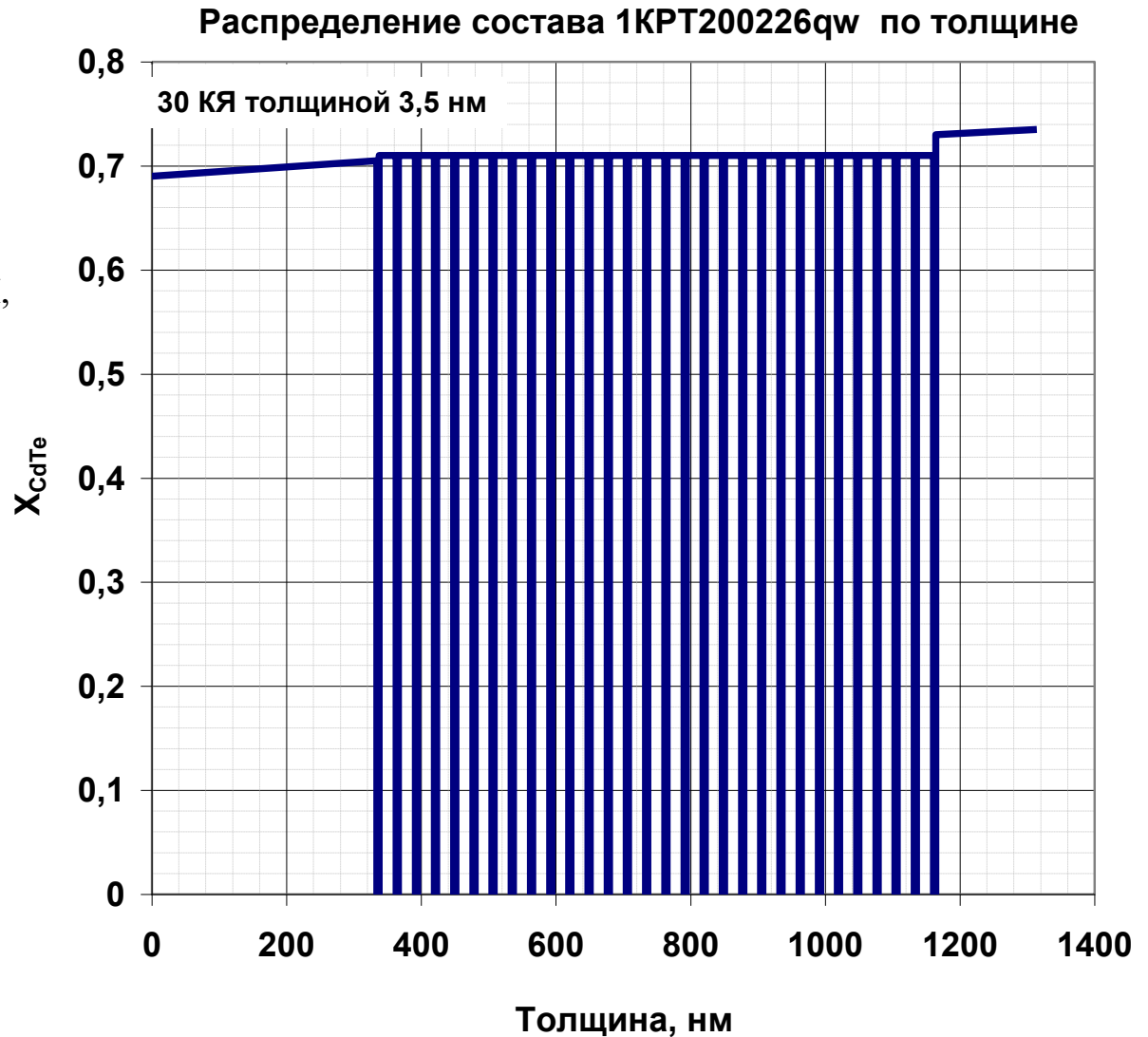
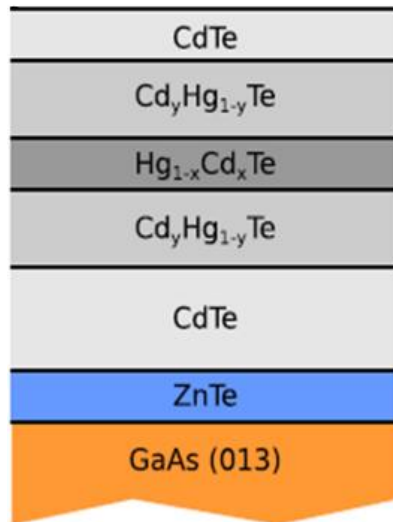


Преимущества структуры с квантовыми ямами HgCdTe



Структуры с квантовыми ямами HgCdTe

Рост структур:
Н.Н. Михайлов
С.А. Дворецкий,
ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН,
Новосибирск



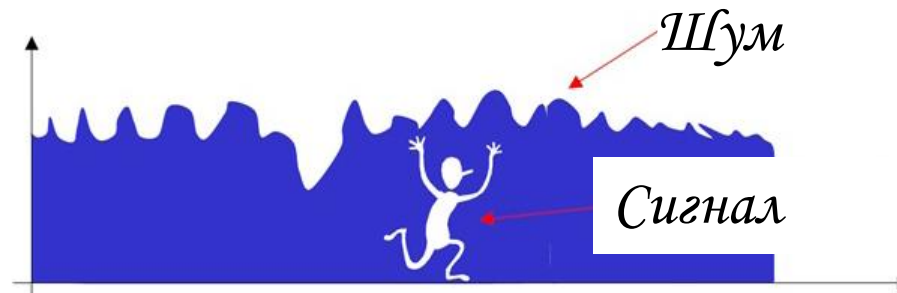
Спасибо за внимание!

Параметры приёмников

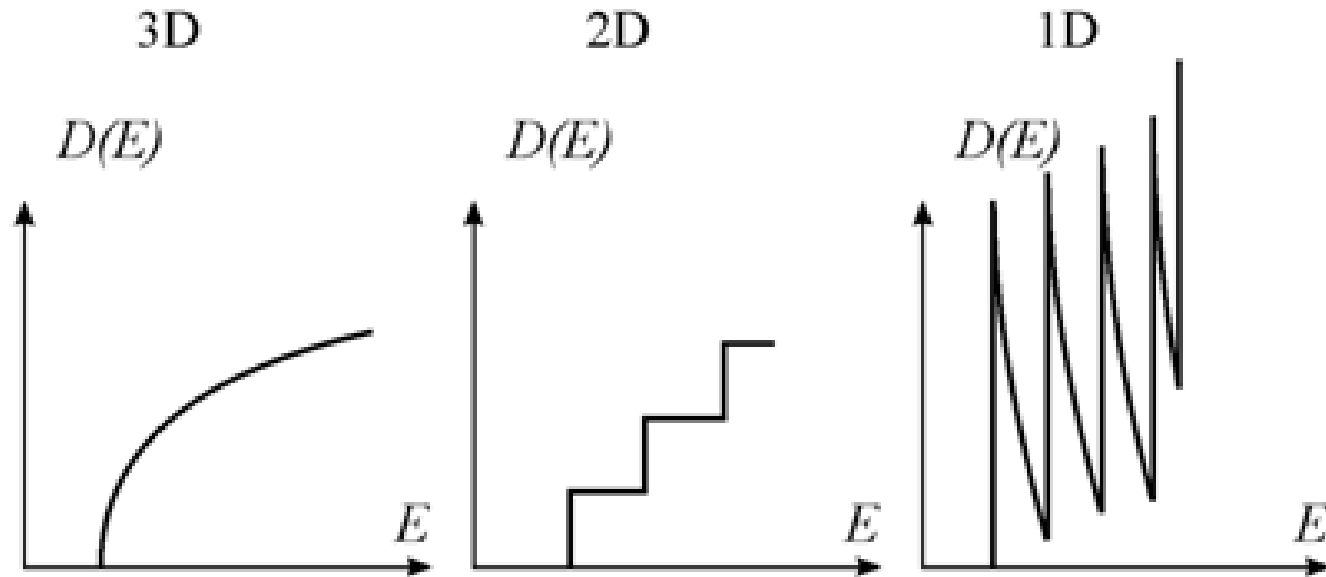
Виды шумов: тепловой
дробовой
радиационный
генерационно-рекомбинационный

$$\sigma_u = \sqrt{4kTR_T\Delta f}$$

$$\sigma = 2eI_0\Delta f$$



Плотность состояний



$$g^{3D}(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \varepsilon^{\frac{1}{2}}$$

$$g^{1D}(\varepsilon) = \frac{\sqrt{2m}}{\pi\hbar} \varepsilon^{-\frac{1}{2}}$$

$$g^{2D}(\varepsilon) = \frac{m}{\pi\hbar^2}$$

Оже-рекомбинация

Закон сохранения импульса и энергии:

$$p_1 + p_2 + p_3 = p_4$$

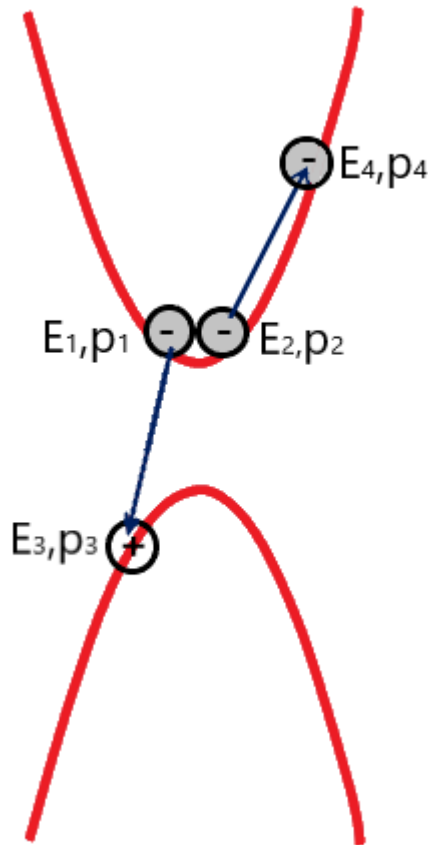
$$E_{\text{kin}} = \frac{p_1^2}{2m_e} + \frac{p_2^2}{2m_e} + \frac{p_3^2}{2m_{hh}}$$

Минимизация кинетической энергии:

$$p_3 \gg p_1, p_2 \Rightarrow p_3 \sim p_4 \sim \sqrt{2m_e E_g} \quad m_{hh} \gg m_e$$

$$E_{\text{kin}} \sim \frac{p_3^2}{2m_{hh}} = \frac{2m_e}{2m_{hh}} E_g = \frac{m_e}{m_{hh}} E_g = \mu E_g = E_{th}$$

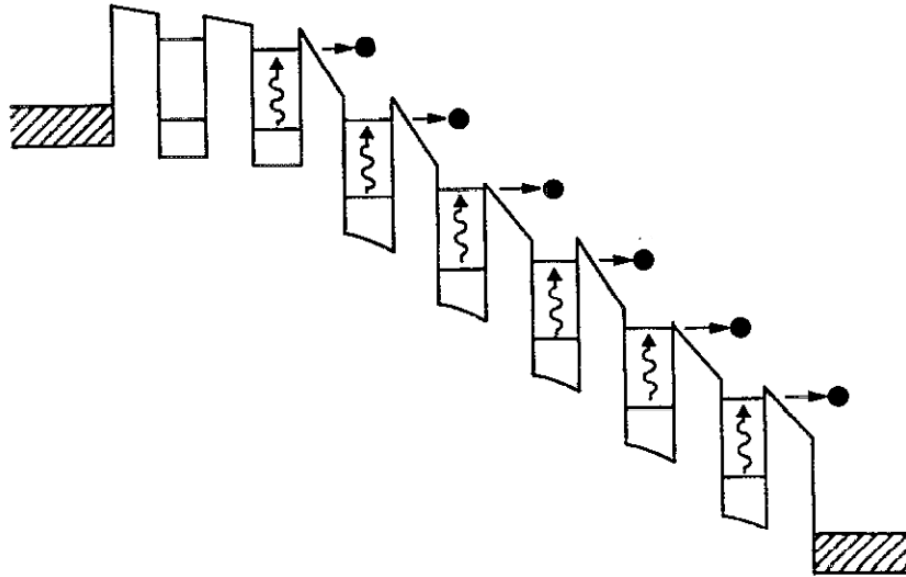
$$E_{th} \sim \frac{m_e}{m_h} E_g$$



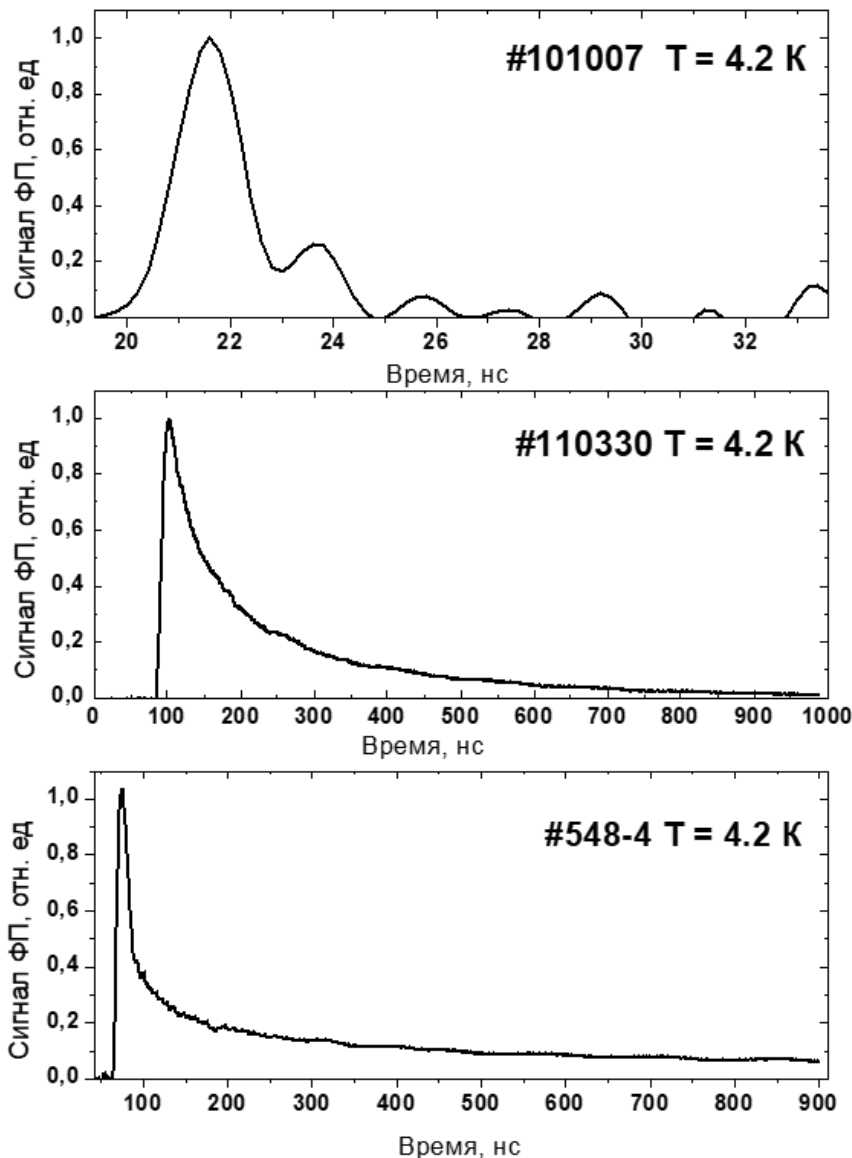
Для параболического закона дисперсии:

$$E_{th} = \frac{\mu}{1+\mu} E_g, \mu = \frac{m_e}{m_h}$$

Приемники на основе множественных квантовых ям



Времена релаксации кинетики фотопроводимости



Румянцев В.В. Фотопроводимость и $\langle \dots \rangle$: дис. на соиск.
уч. ст. к.ф.-м.н.: 05.27.01 / Румянцев Владимир
Владимирович. – Нижний Новгород. – 2014. – 126 с.

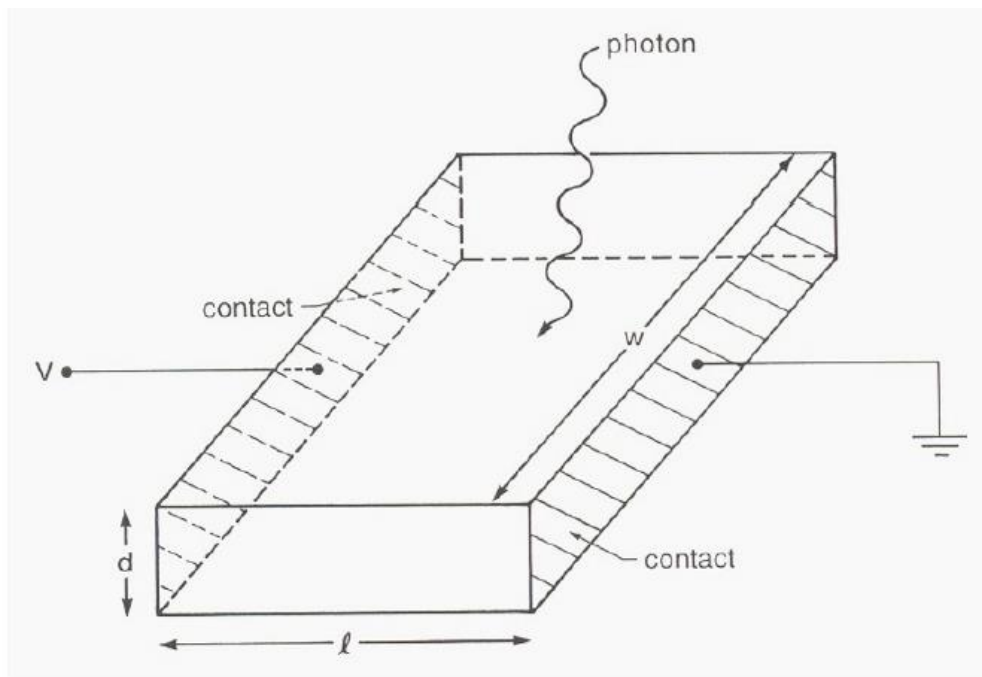
Чувствительность приемников HgCdTe

$$I_{ph} = e(\mu_n n + \mu_p p) w d E$$

$$n = p = G\tau = \frac{\eta \phi \tau}{w d l}$$

$$\phi h\nu = P$$

$$S_I = \frac{I_{ph}}{P} = \frac{e\mu \frac{\eta \phi \tau}{w d l} w d E}{\phi h\nu} = \eta \frac{e}{h\nu} \frac{\tau \mu E}{l} = \eta \frac{e}{h\nu} \frac{l_d}{l}$$



Виды ИК - приёмников

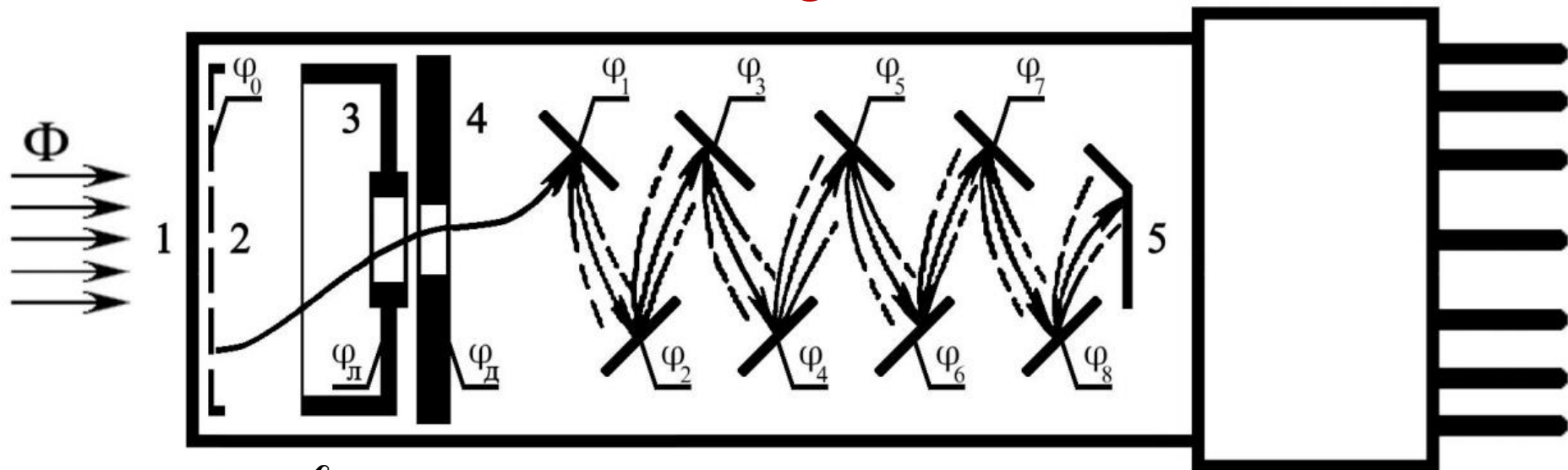
Фотохимические

Тепловые

Фотонные

Вакуумные фотоприёмники

Фотоэлектронный умножитель



- 1 - входное окно
- 2 - фотокатод
- 3 - линза
- 4 - диафрагма
- 5 - анод



Виды ИК - приёмников

Фотохимические

Тепловые

Фотонные

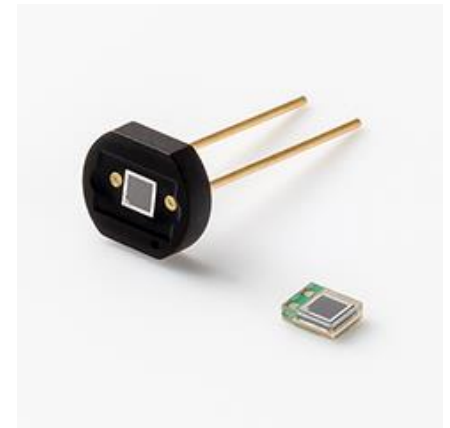
Вакуумные фотоприёмники

Фотоэлектронный умножитель

Постоянная времени – $10^{-8} \dots 10^{-10}$ с

Длина волны – 150-1700 нм

Коэффициент усиления до 10^{10}



Недостатки ФЭУ:

- высокое напряжение
- откачка
- необходимость защиты от внешних магнитных и электростатических полей
- сравнительную сложность схемы включения
- большие габаритные размеры

Виды ИК - приёмников

Фотохимические

Тепловые

Фотонные

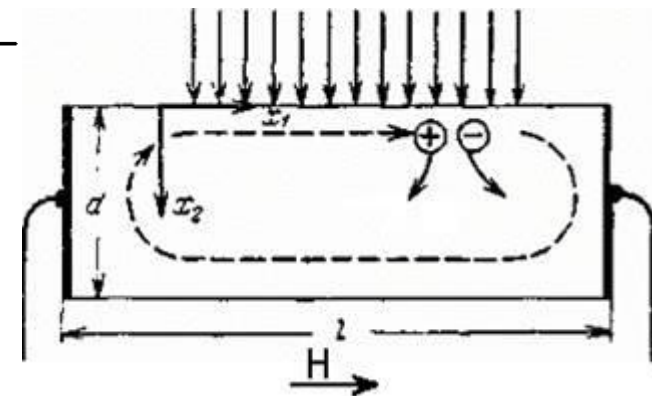
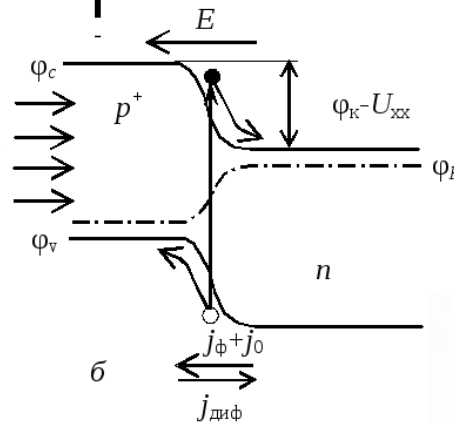
Полупроводниковые фотоприёмники

Внутренний фотоэффект

фотопроводимость

фотогальванический эффект

фотоэлектромагнитный эффект



Виды ИК - приёмников

Фотохимические

Тепловые

Фотонные

Полупроводниковые фотоприёмники

фоторезистор

Собственная фотопроводимость



Примесная фотопроводимость

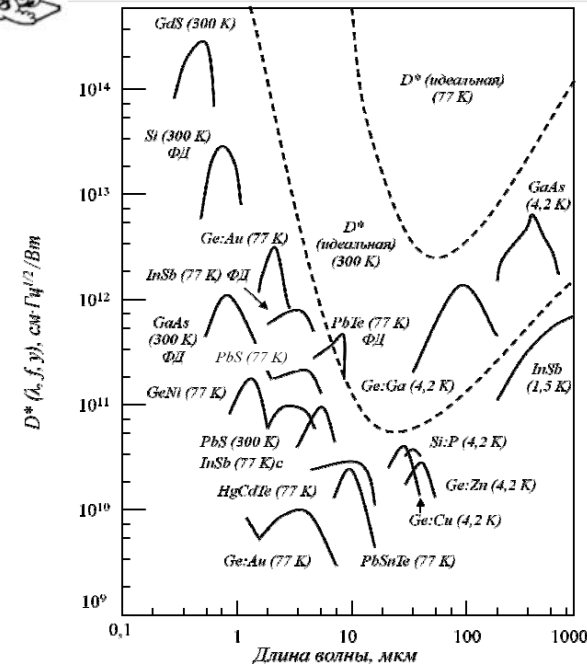


Длина волны – 0.3-1000 мкм

С охлаждением и без

D от 10^{10} до 10^{14} см·Гц^{1/2}/ Вт

τ = от мкс до сотен мс



Виды ИК - приёмников

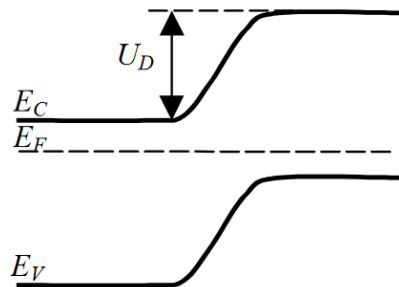
Фотохимические

Тепловые

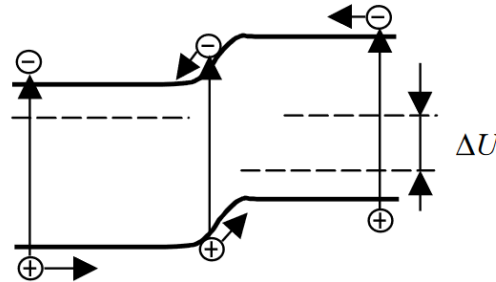
Фотонные

Полупроводниковые фотоприёмники

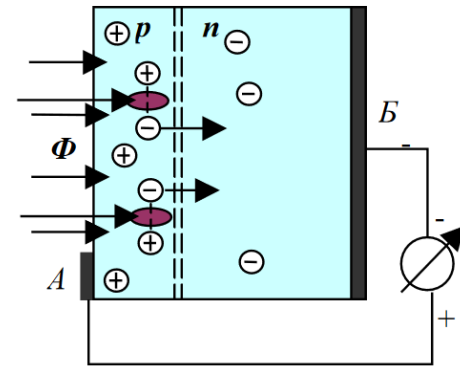
фотодиод



а)



б)



в)

Виды ФД:

- гомогенный p-n-переход
- гетерогенный p-n-переход
- p-i-n-переход
- барьер Шоттки
- лавинные

Длина волны – 0.2-10 мкм

С охлаждением и без

$D = 10^{11} - 10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{ВТ}$

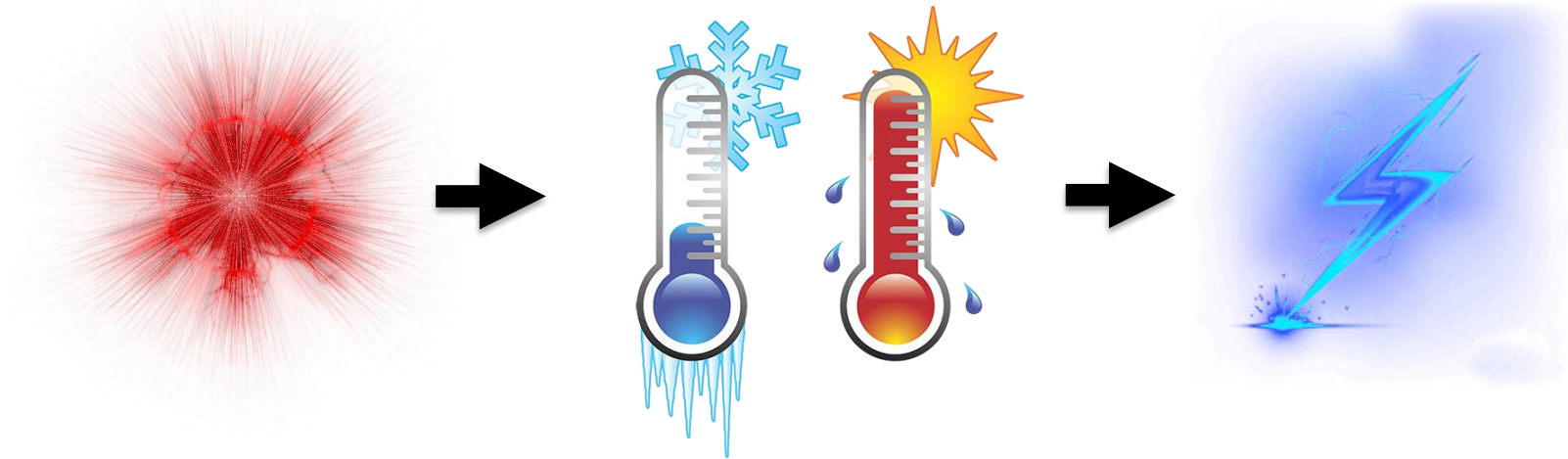
τ до 10^{-10} с

Виды ИК - приёмников

Фотохимические

Тепловые

Фотонные



Неселективные

Болометр

Виды:

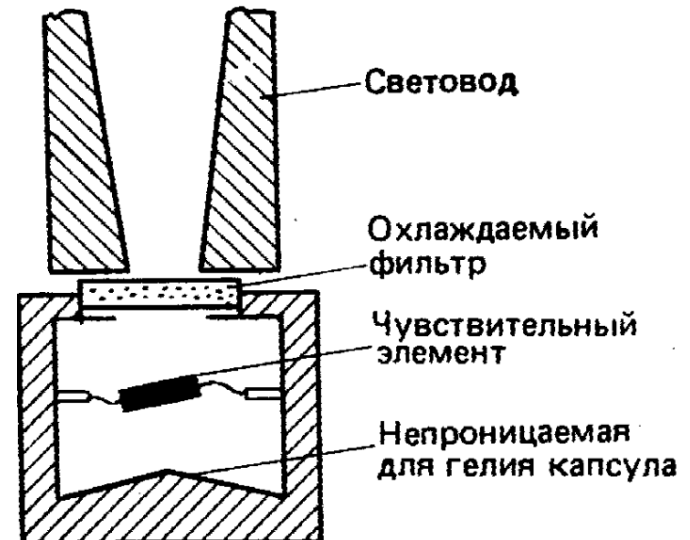
- металлический
- сверхпроводящий
- полупроводниковый

Длина волны – 1-5000 мкм

С охлаждением

D до 10^{10} см·Гц^{1/2}/ Вт

τ от мкс до мс

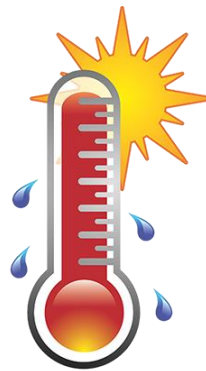
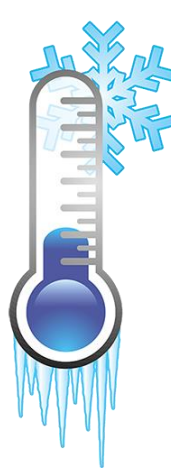
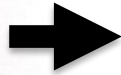
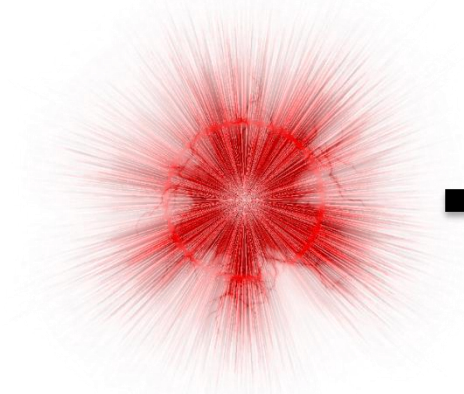


Виды ИК - приёмников

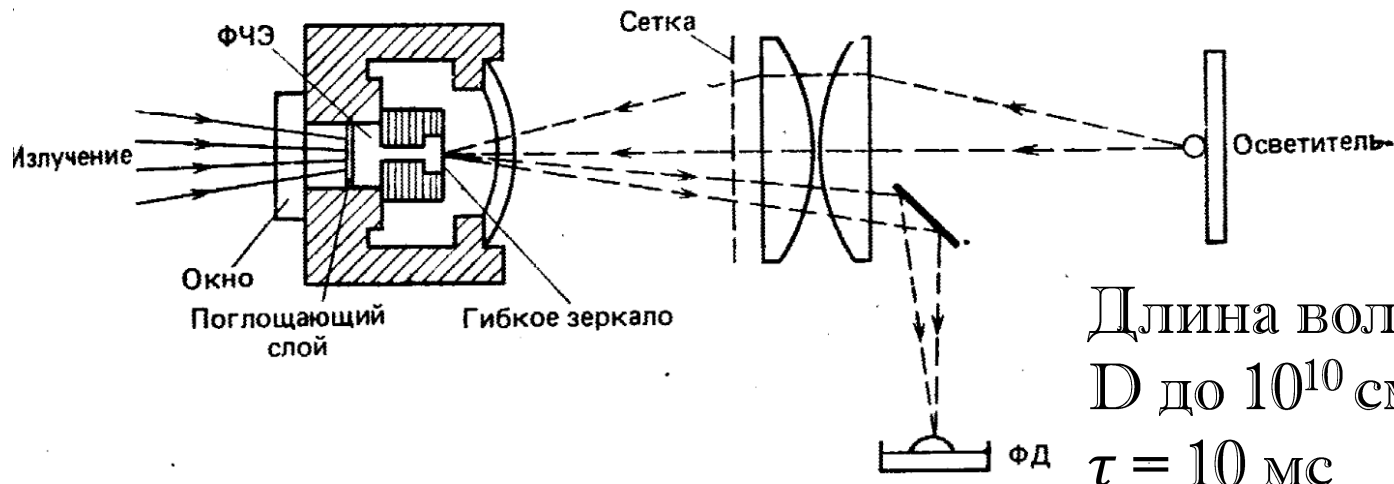
Фотохимические

Тепловые

Фотонные



ячейка Голя



Длина волны – 0.3-1000 мкм

D до 10^{10} см·Гц^{1/2}/ Вт

$\tau = 10$ мс