



**ФИЗИКА
МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ
ПРИБОРОВ**



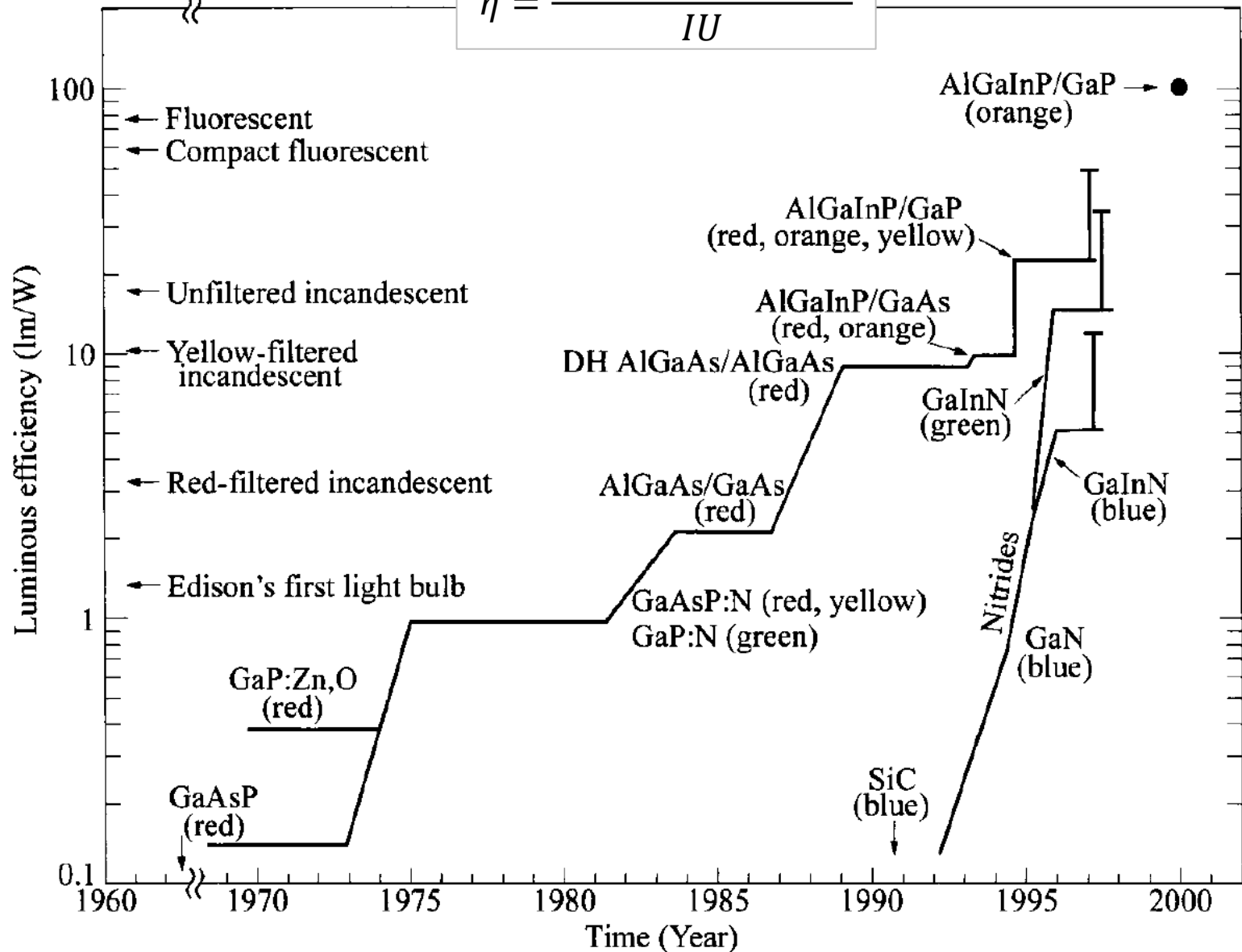
4.

Светоизлучающие устройства:
1. диоды



Светоизлучающие диоды III-V: история

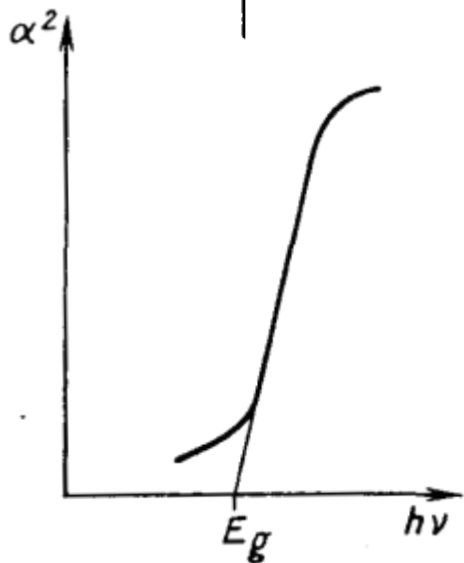
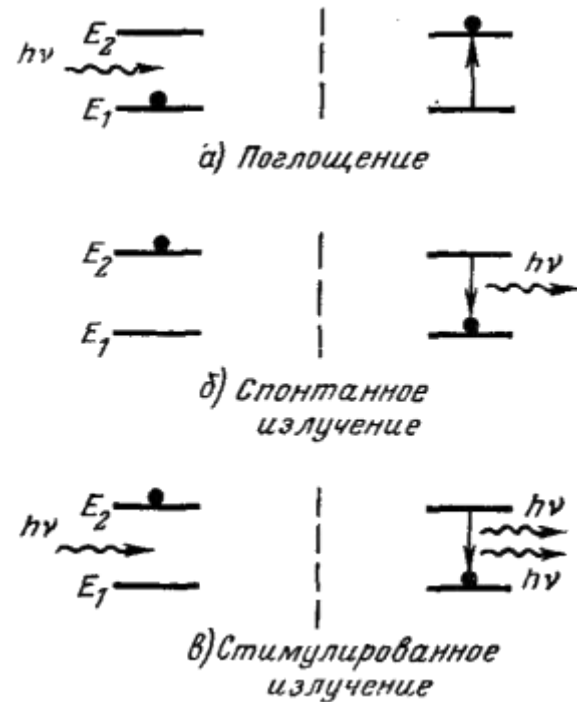
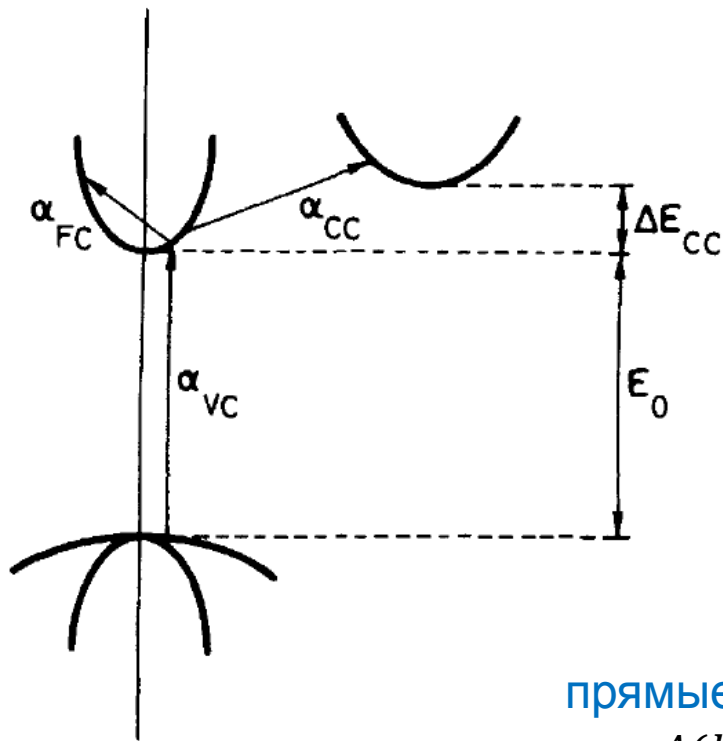
$$\eta = \frac{L_0 \int V(\lambda) P_{op}(\lambda) d\lambda}{IU}$$



Применение оптоэлектронных устройств III-V

Laser Diodes (LDs)			
Far Infrared LDs	PbSnTe/PbTe		Gas analysis
IR LDs	InGaAsP/InP		Fiber communications
Visible Light LDs			
Red LDs	AlGaAs/GaAs		CD players
	InGaAlP/GaAs		DVDs
Ultraviolet LDs	InGaN/sapphire		DVDs
Light Emitting Diodes (LEDs)			
IR LEDs	InGaAsP/InP		Fiber communications
	GaAlAs/GaAs		Detectors
Red LEDs	AlGaAs/GaAs	}	Displays
	GaAsP/GaAs		
	GaP(Zn, O)		
	GaAsP/GaP		
Orange LEDs	GaAsP/GaP		
Green LEDs	GaP(N)		
	GaP		
Blue LEDs	InGaN/sapphire		
	ZnSe/GaAs		
	ZnSe/ZnSe		
White LEDs	InGaN/sapphire		Displays, Lighting
	ZnSe/ZnSe		Displays
Ultraviolet LEDs	AlGaN/sapphire		Sterilization
Photodetectors			
Far IR	HgCdTe/CdTe		Nightvision
Middle IR	InSb		Thermoviewer
IR	InGaAs/InP		Fiber communications
Visible Light	AlGaAs/GaAs		Fiber communications

Поглощение и излучение света полупроводниками



прямые переходы:

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2}, h\nu > E_g;$$

$$\alpha = 0, h\nu \leq E_g;$$

прямые запрещённые:

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{3/2}, h\nu > E_g;$$

непрямые:

$$\alpha = \frac{A(h\nu - E_g \pm E_{ph})^2}{\mp \left(1 - \exp\left(\frac{\pm E_{ph}}{kT}\right)\right)}$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

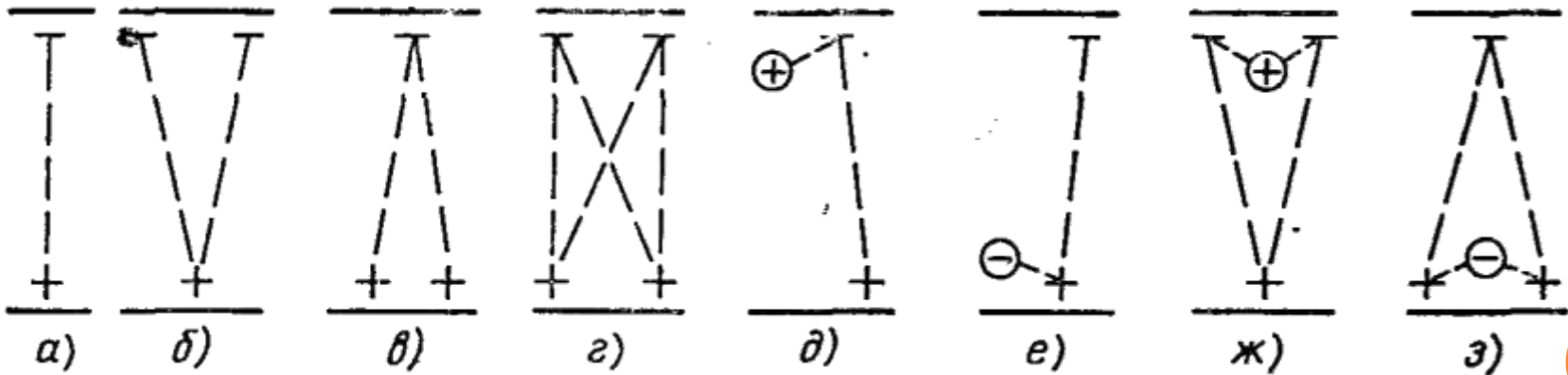
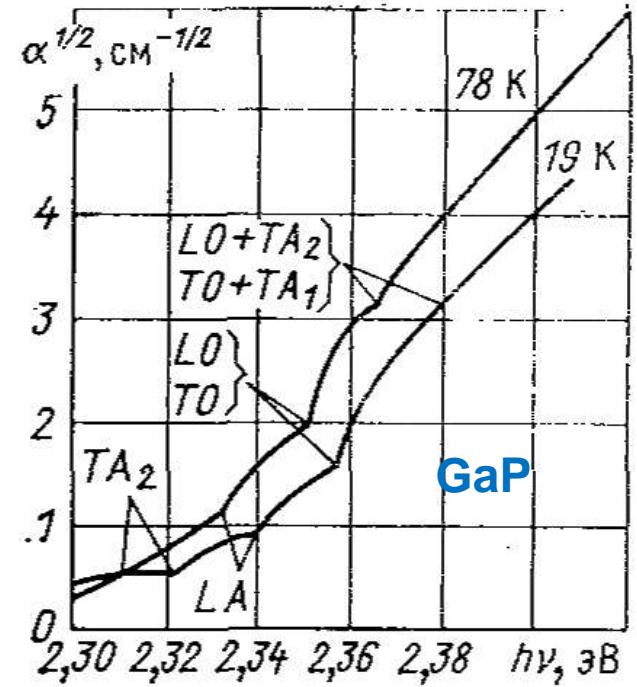
Экситонное поглощение

Экситон – квазичастица с нулевым спином и нулевым зарядом, представляющая собой связанную пару «электрон-дырка».

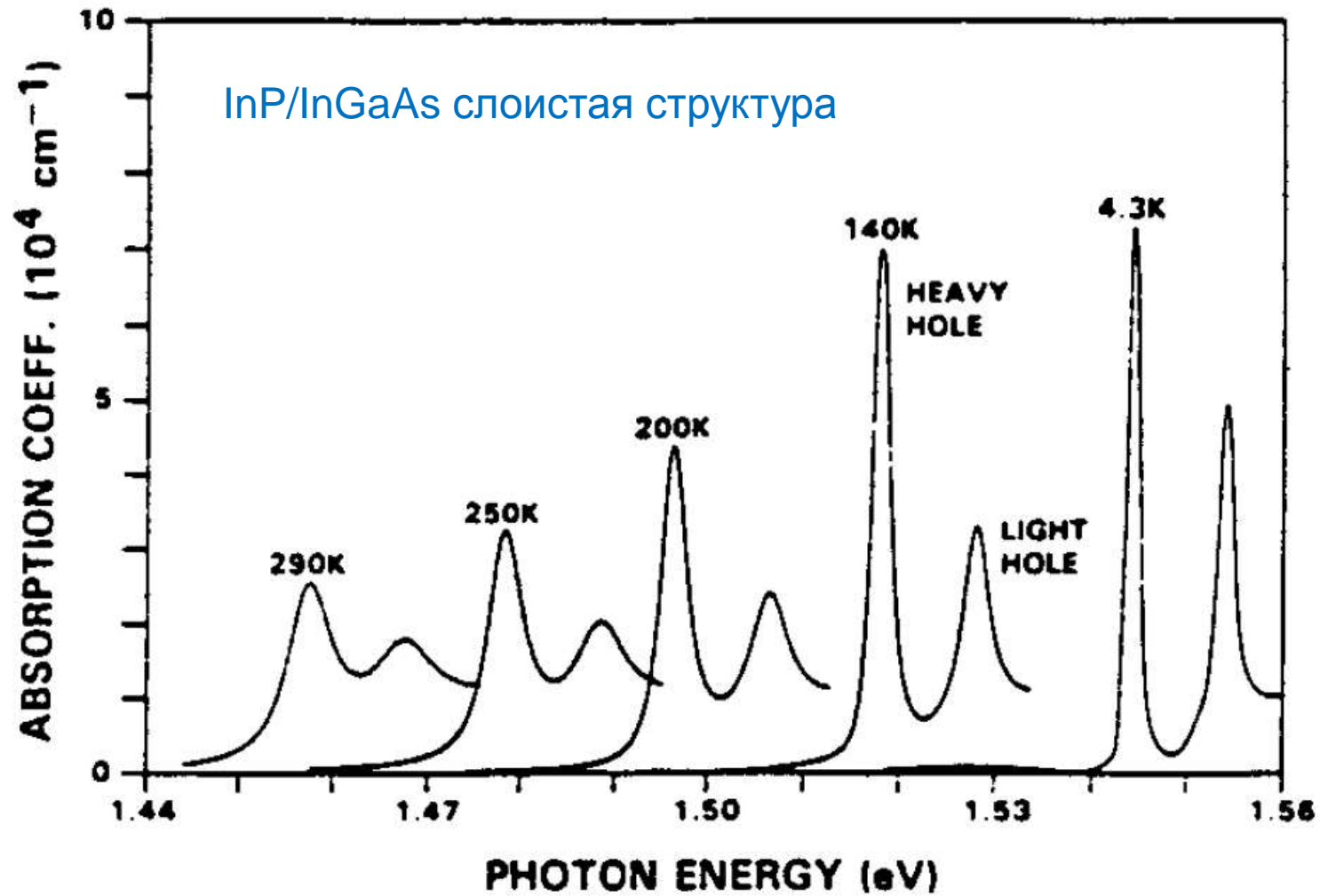
$$E_x = E_g + \frac{p^2}{2(m_n + m_p)} - \frac{m_r e^4}{2\varepsilon^2 \hbar^2 n^2}; \quad m_r = \frac{m_n m_p}{m_n + m_p}$$

Для прямых оптических переходов (при $k=0$):

$$h\nu = E_g - \frac{E_x}{n^2} \quad \text{- водородоподобная серия линий поглощения}$$



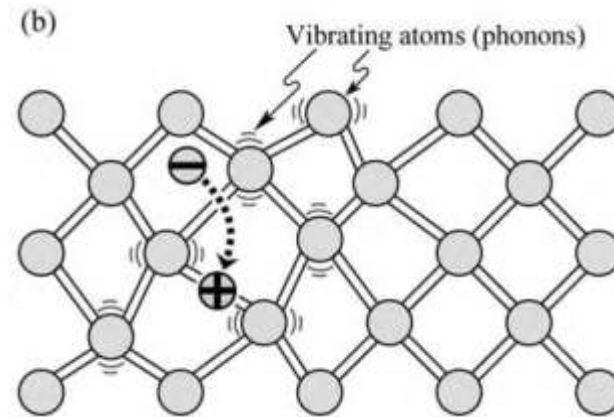
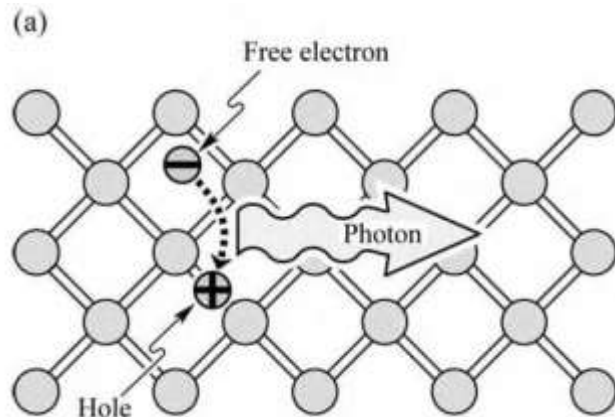
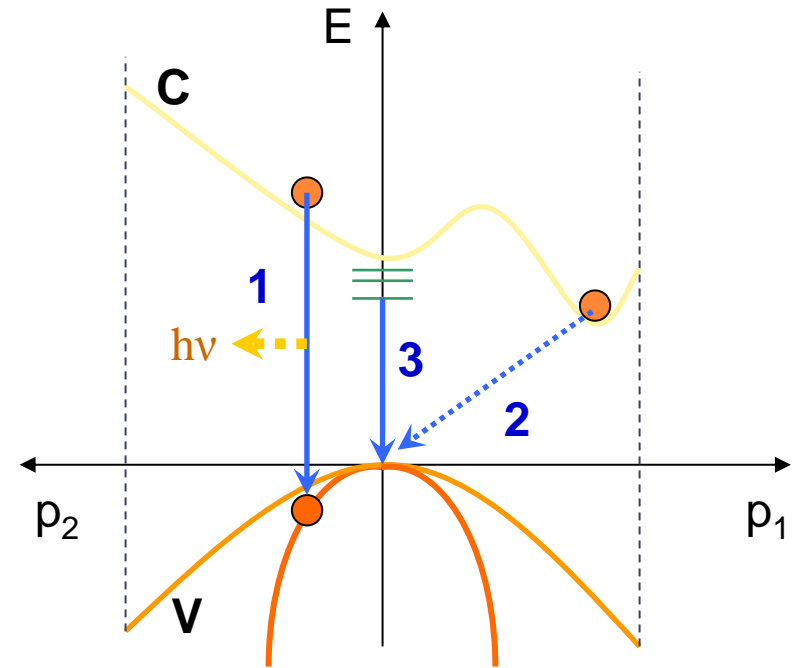
Экситонное поглощение



Люминесценция полупроводников

Виды излучательной рекомбинации:

1. переходы «зона проводимости – валентная зона»
 - а) прямые (1):
$$I(h\nu) = B(h\nu - E_g)^{1/2}$$
 - б) непрямые (2):
$$I(h\nu) = B(h\nu - E_g + E_{ph})^2$$
2. экситонная рекомбинация (3):
 - а) прямая: $h\nu = E_g - E_x$
 - б) непрямая: $h\nu = E_g - E_x - E_{ph}$
3. переходы «разрешённая зона – примесь»
4. донорно-акцепторные переходы



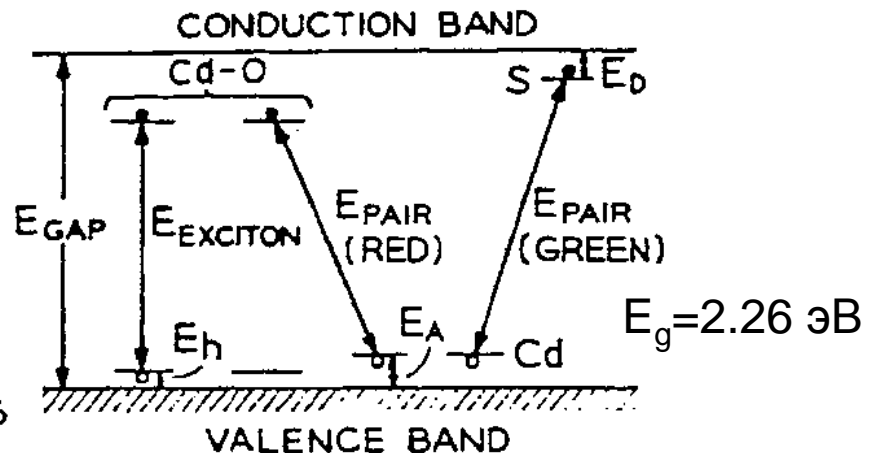
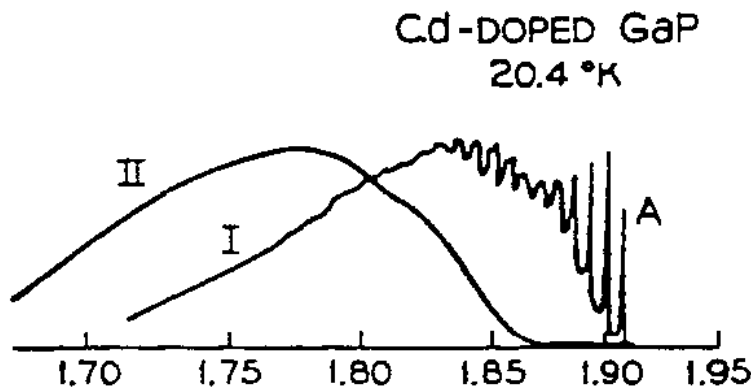
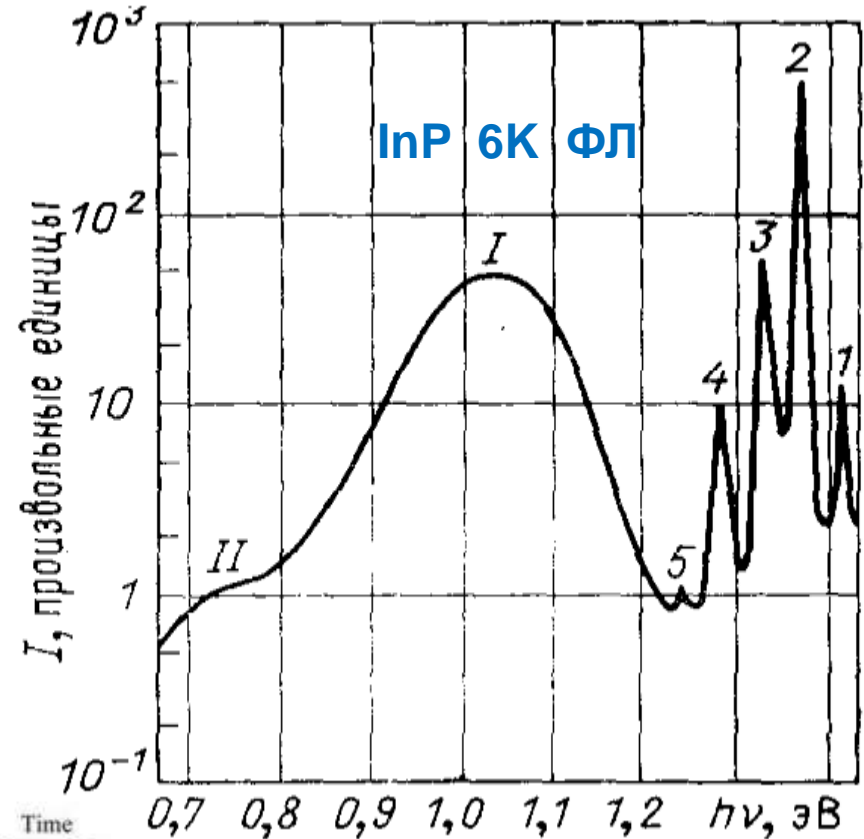
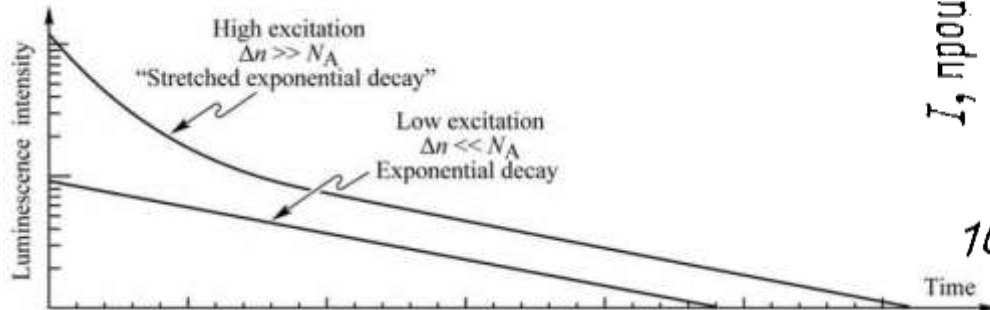
Люминесценция полупроводников

Для внутрицентовой люминесценции:

$$I(h\nu) = Ce^{-t/\tau}$$

Общий случай:

$$I(h\nu) = Ce^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta}$$



Люминесценция полупроводников

Квантовый выход ФЛ η – отношение числа испущенных квантов к числу поглощённых квантов возбуждающего излучения

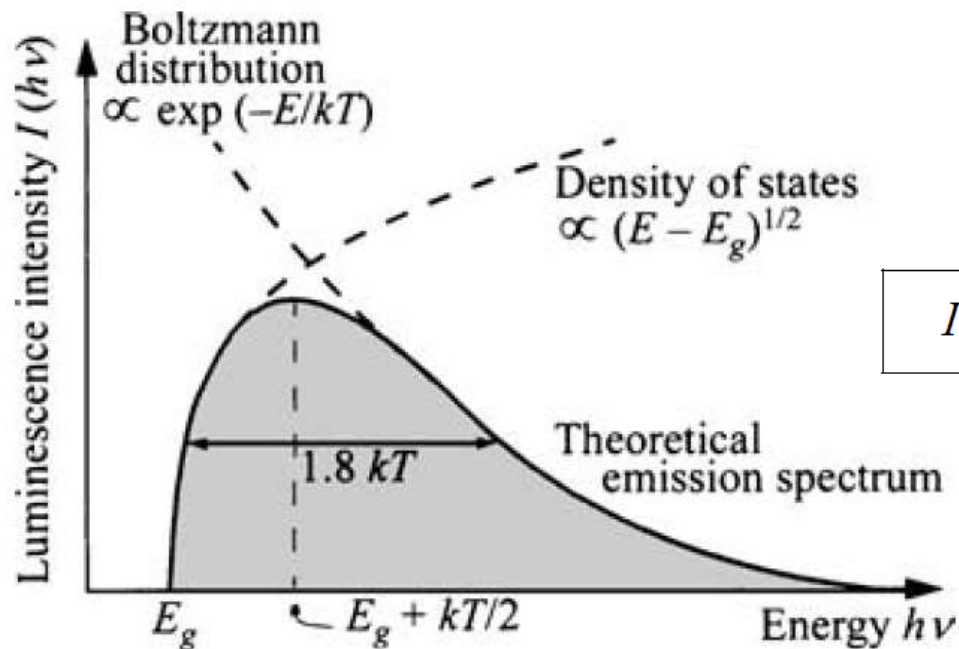
$$\eta = \frac{\tau_{NL}}{\tau_L + \tau_{NL}}$$

Как правило, $0 < \eta < 1$ (но не обязательно)

Энергетический выход ФЛ η_E – отношение энергии люминесцентного излучения к поглощённой энергии

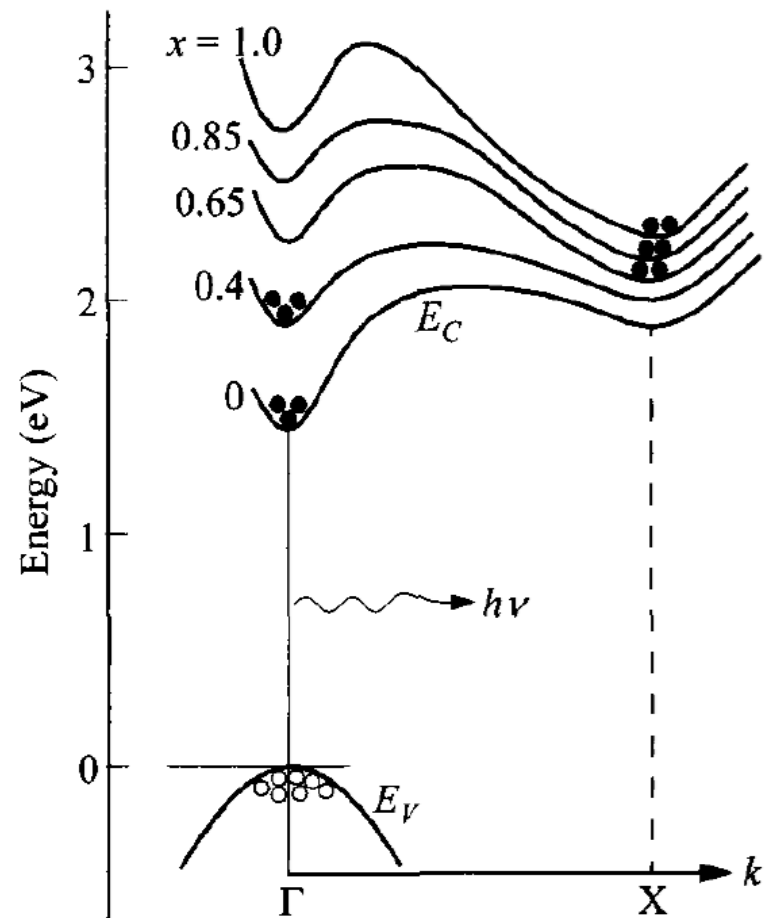
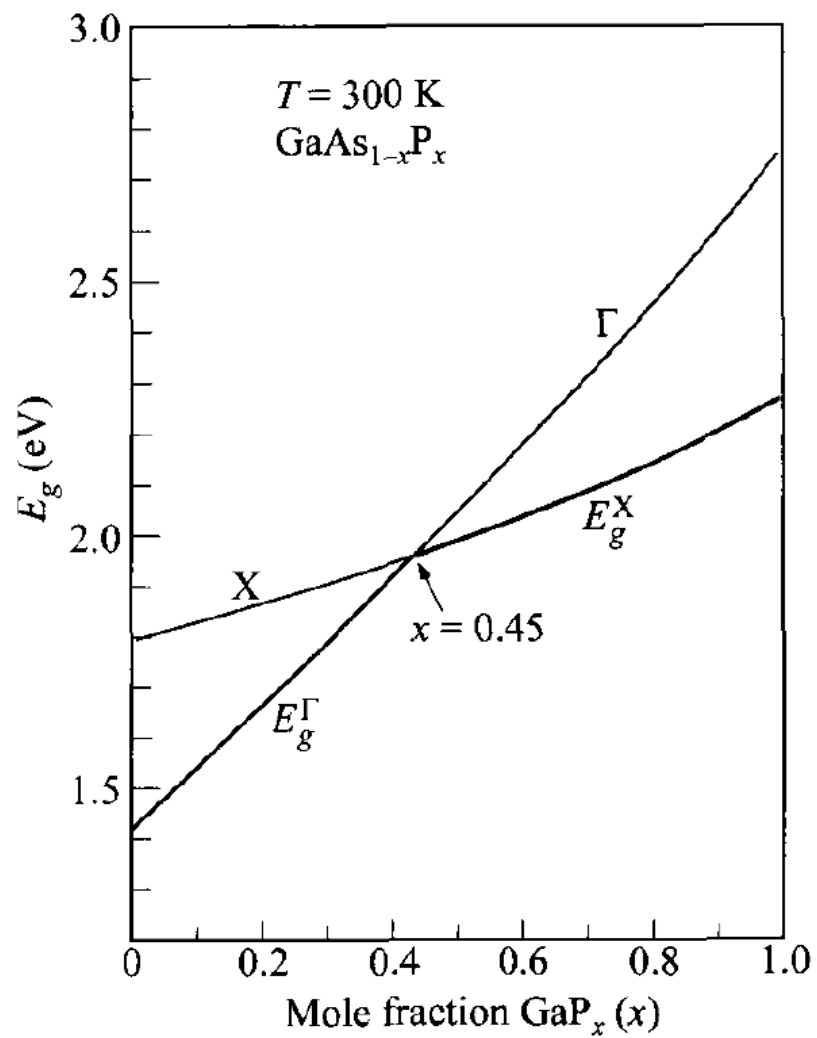
$$\eta = \frac{P_L}{P_L + P_{NL}}$$

Температурное тушение люминесценции $P_{NL} = P_0 e^{-\frac{E^*}{kT}}$

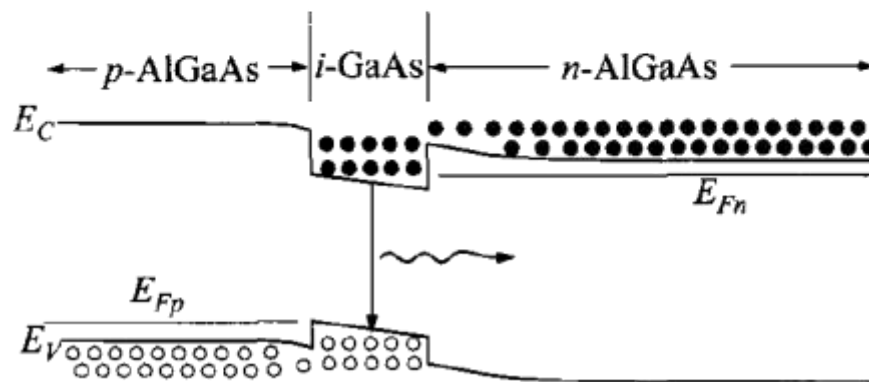
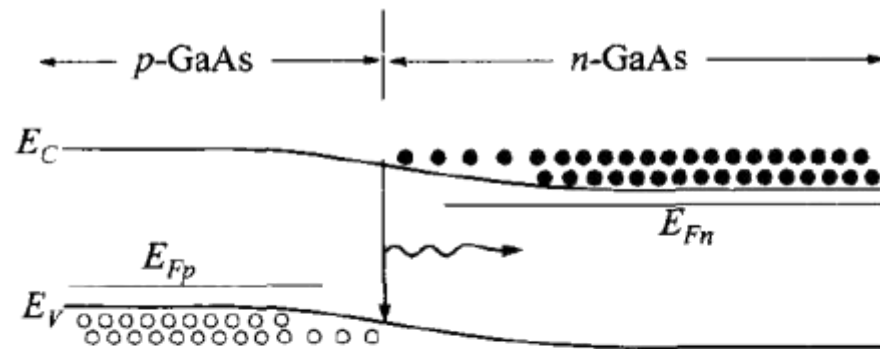
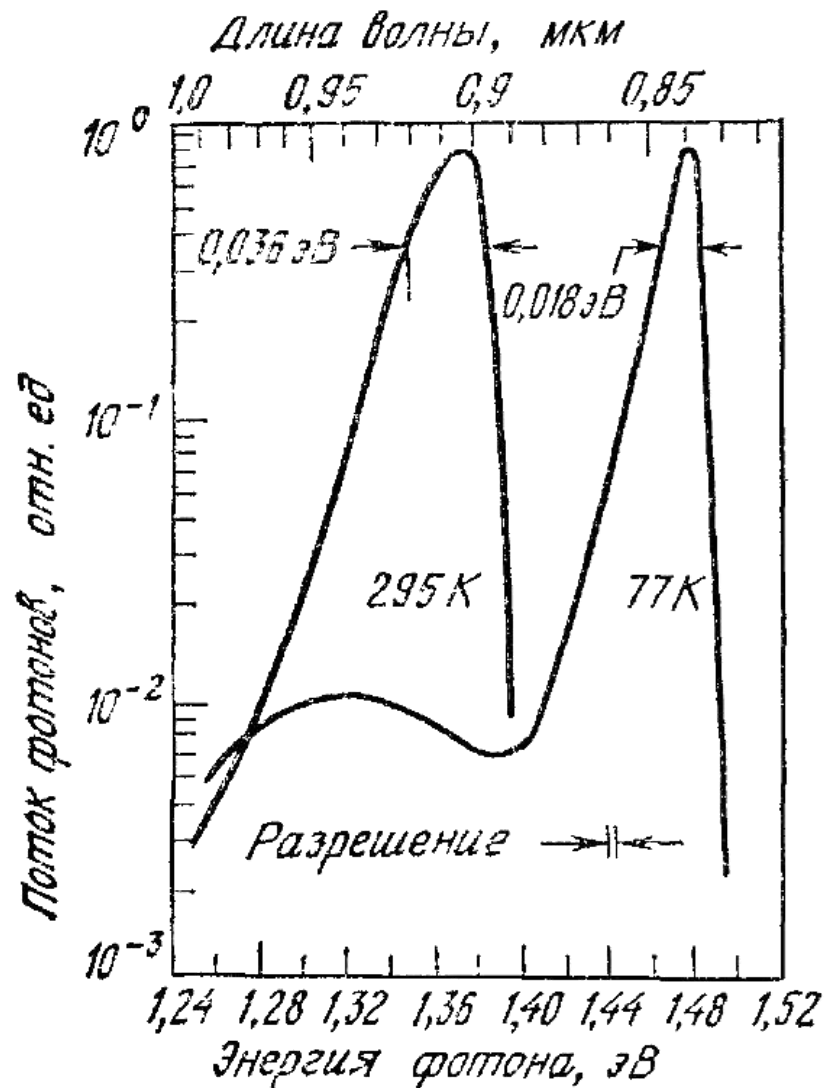


$$I(E) \propto \sqrt{E - E_g} e^{-E/(kT)}$$

Особенности люминесценции компаундов

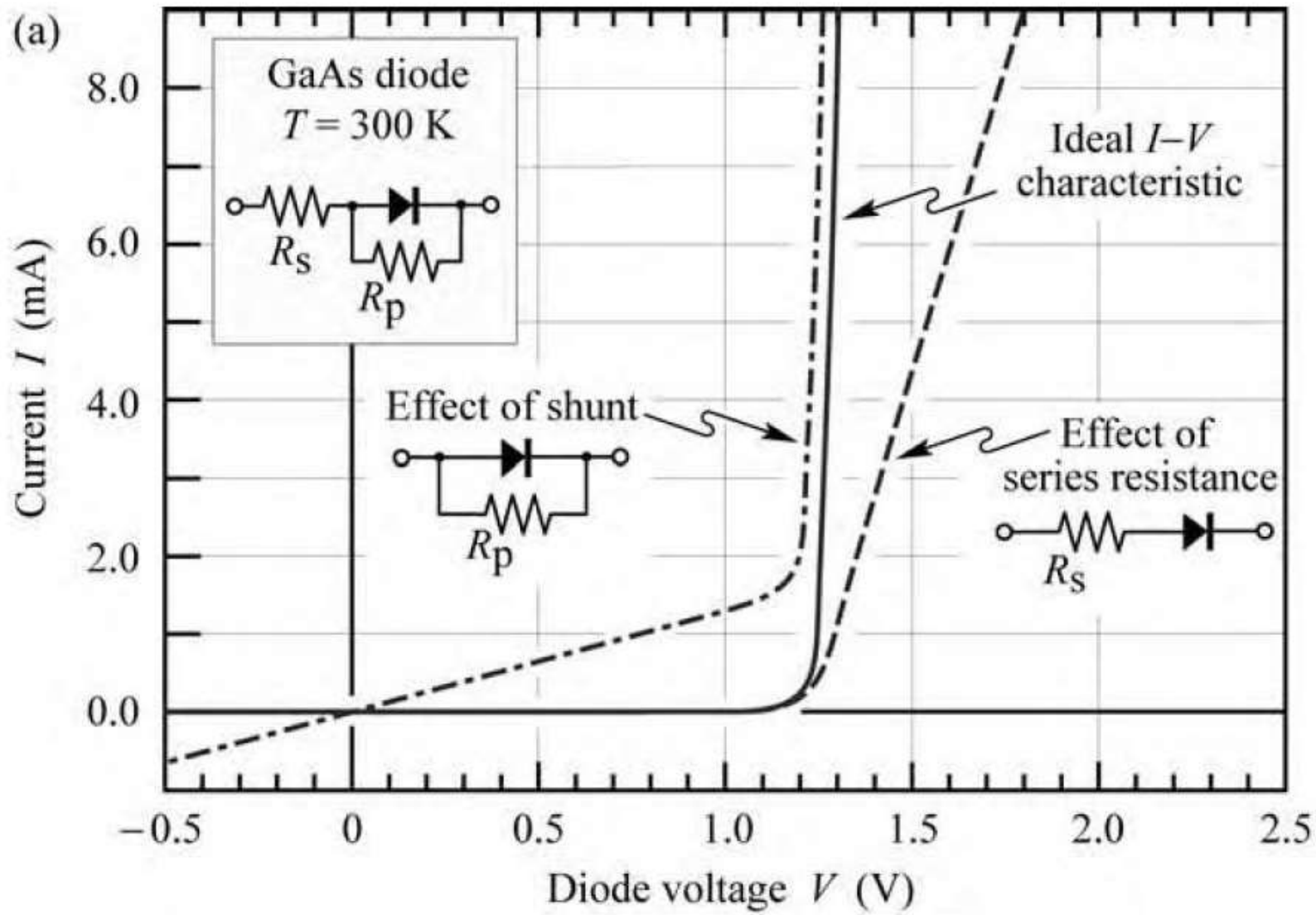


Генерация излучения в диодных структурах

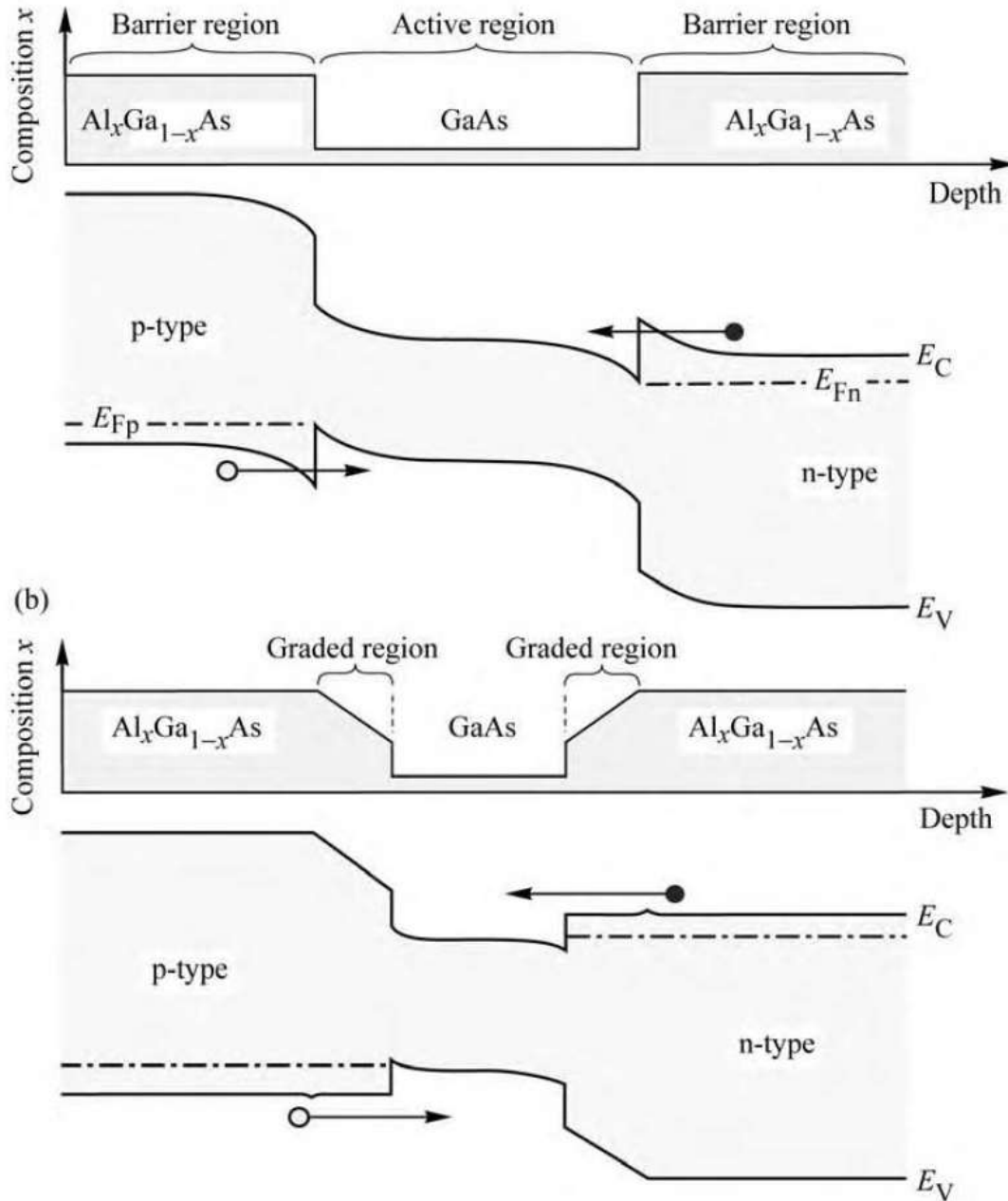


$$I = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right) \left(e^{eV/kT} - 1 \right)$$

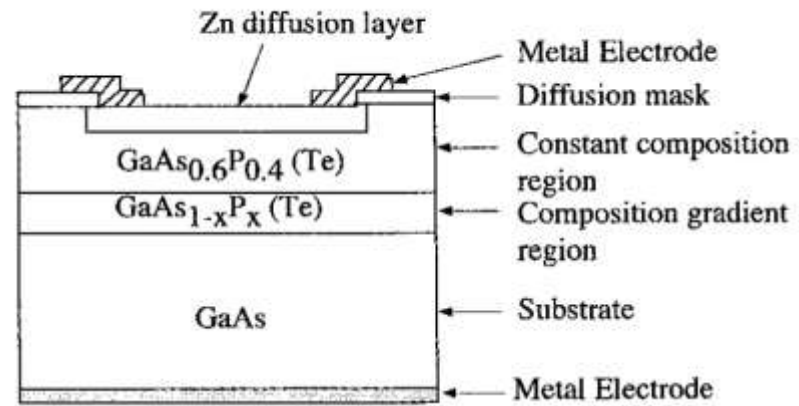
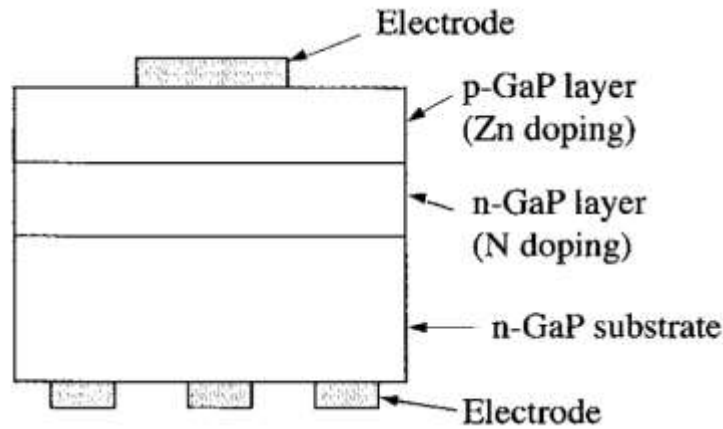
ВАХ светодио́дов



Светодиоды с двойным гетеропереходом

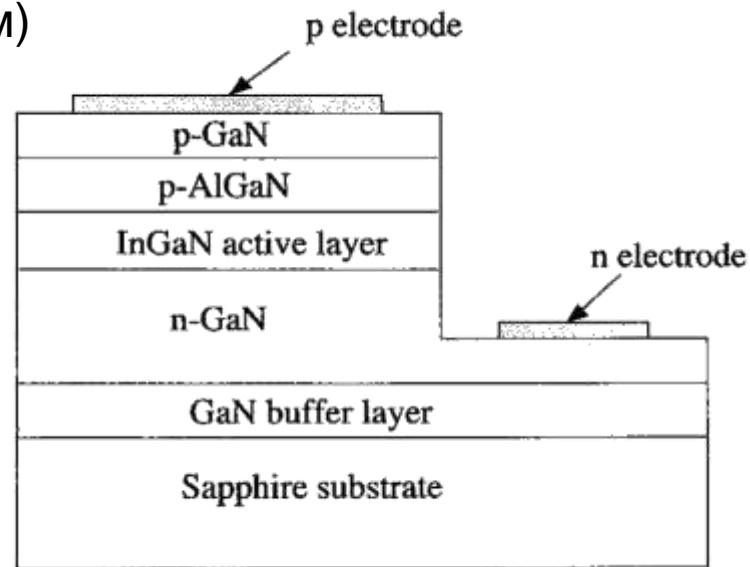


Конструкции светодиодов



красные, жёлтые, зелёные

GaP: $E_g = 2.26$ эВ (555 нм)

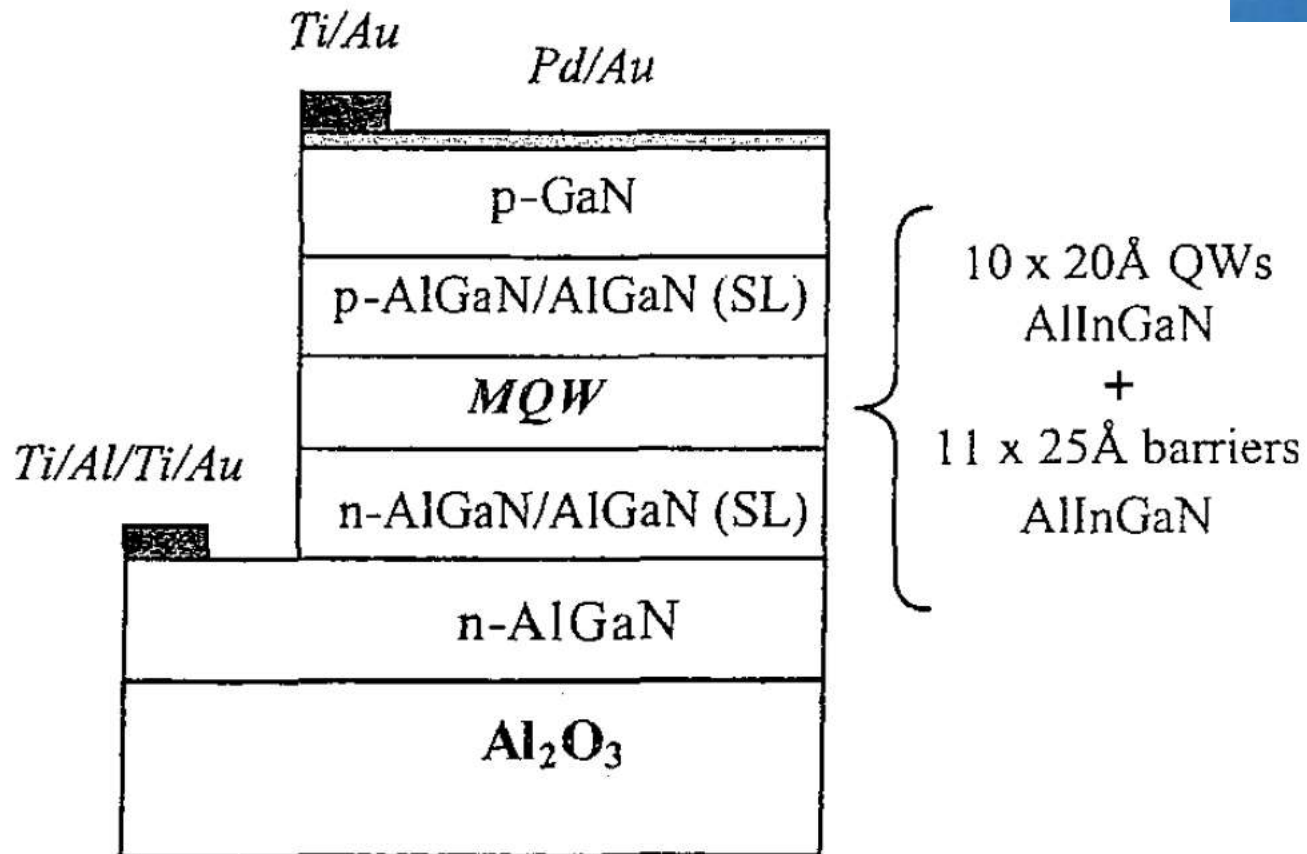
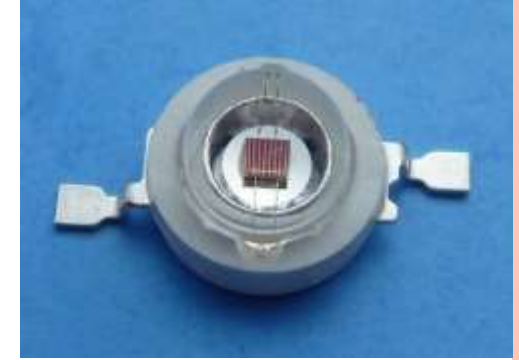


синие

GaN: $E_g = 3.39$ эВ (369 нм)

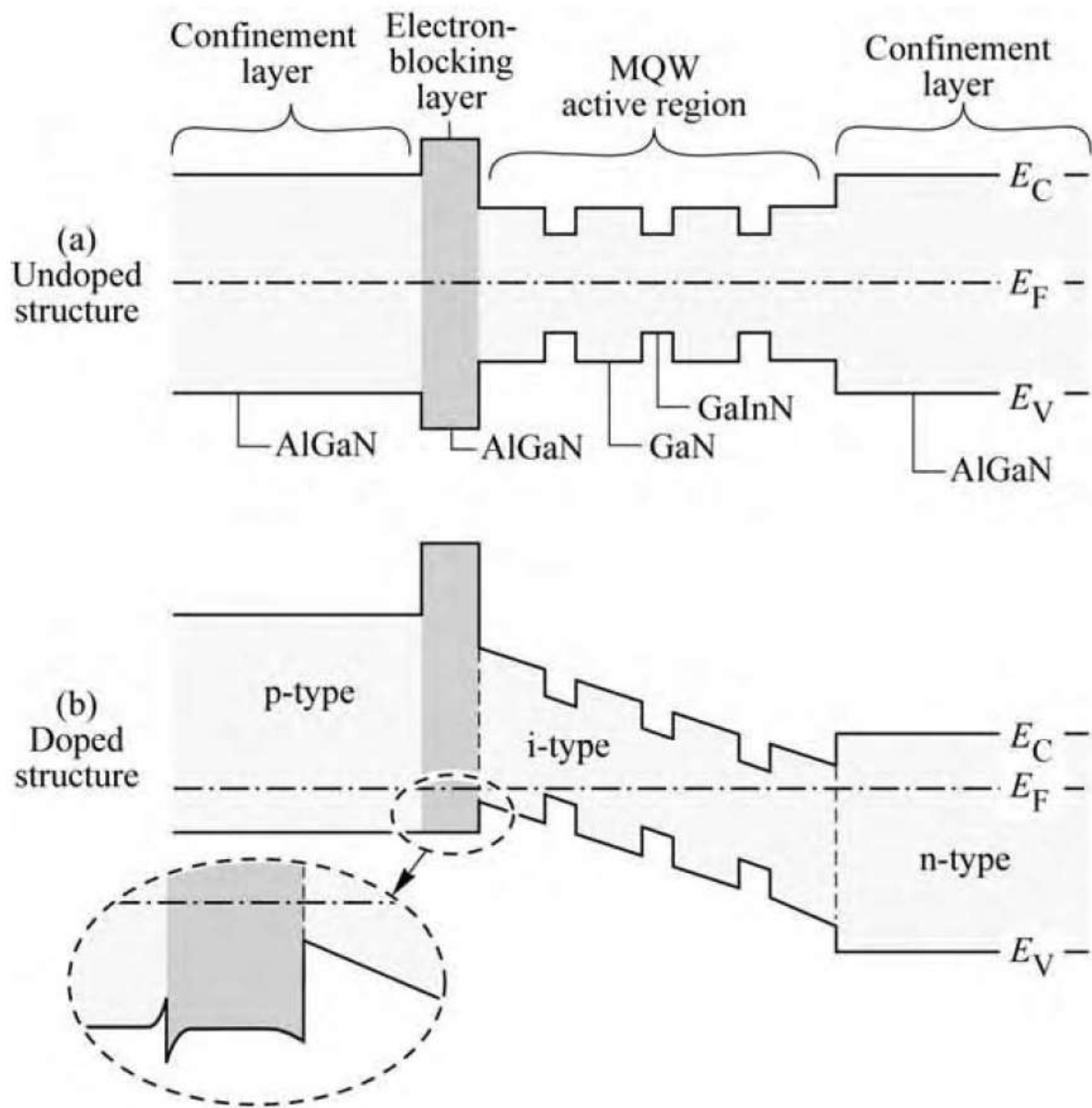


Конструкции светодиодов

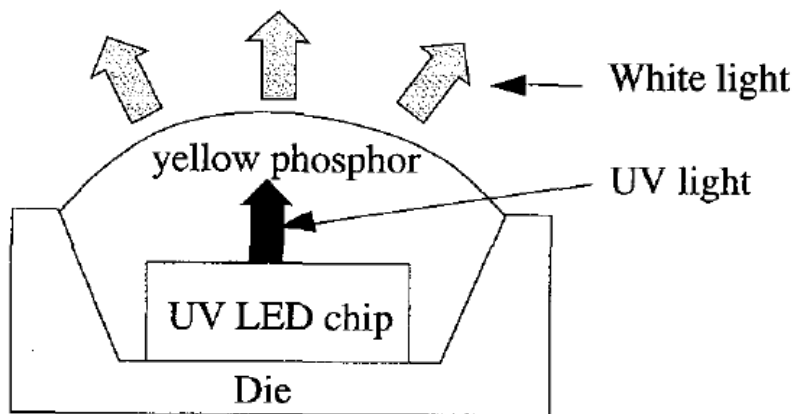


ультрафиолетовые

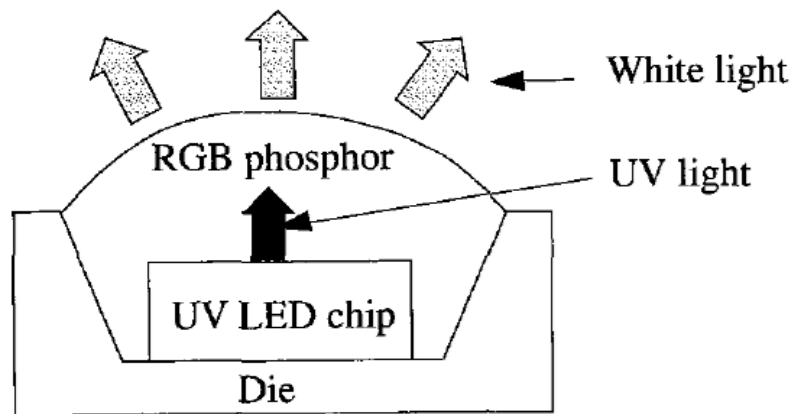
Зонная диаграмма MQW



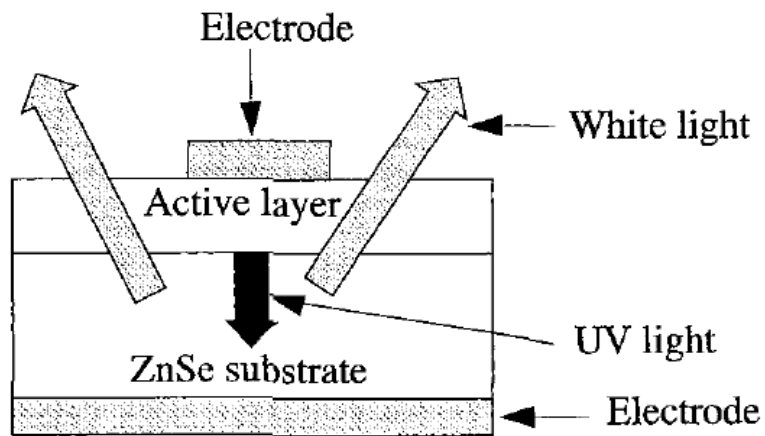
Конструкции светодиодов



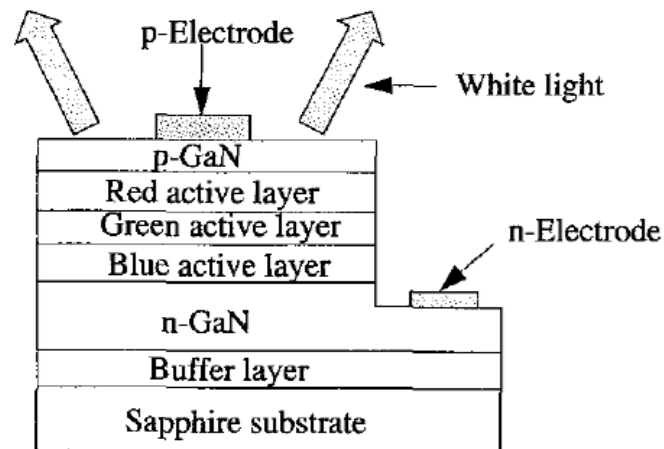
(b)



(c)



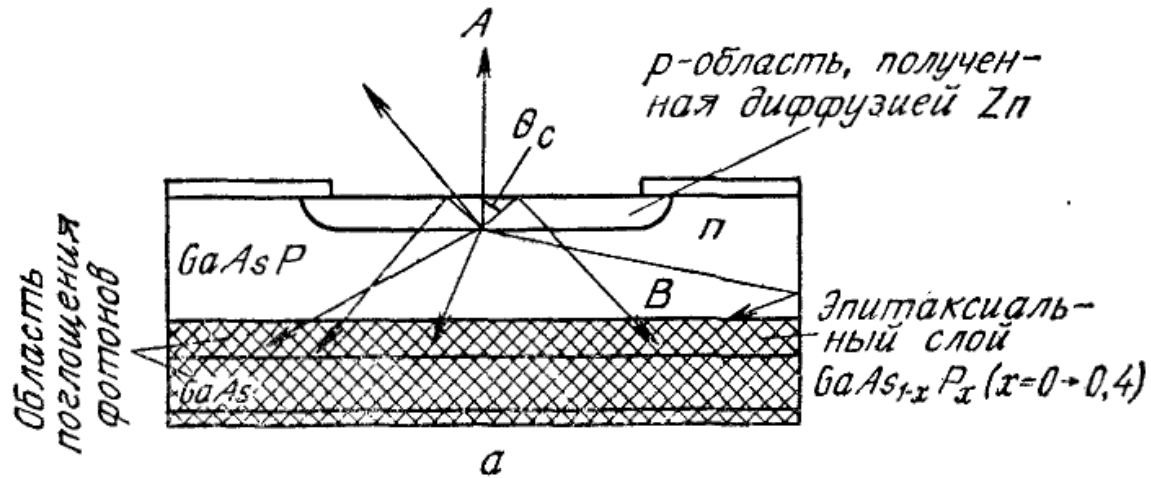
(d)



(e)

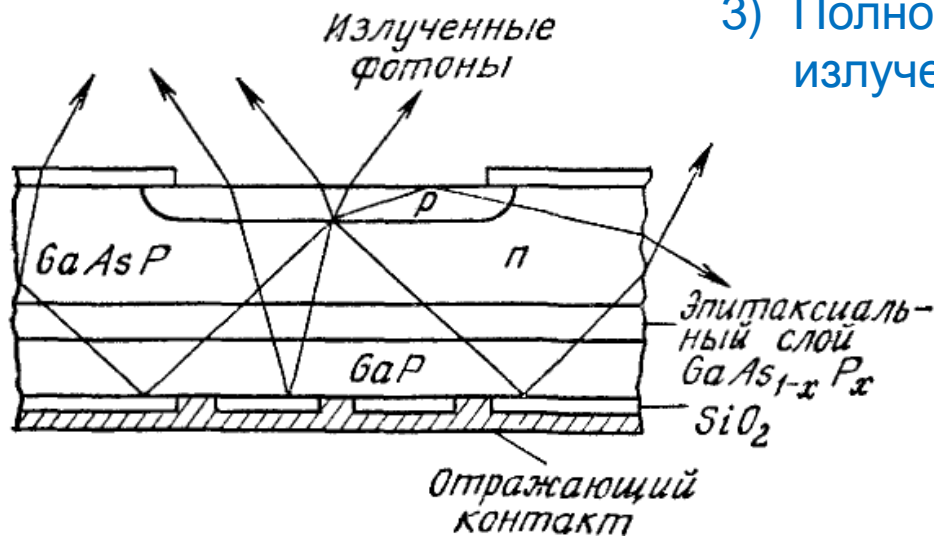
белые

Конструкции светодиодов



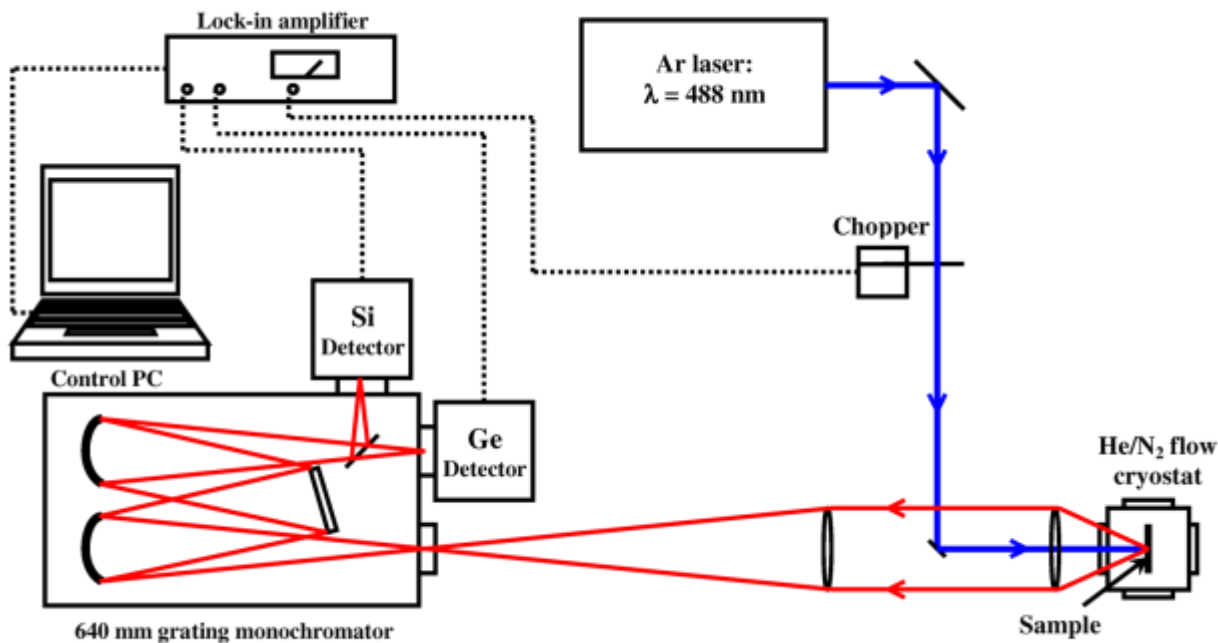
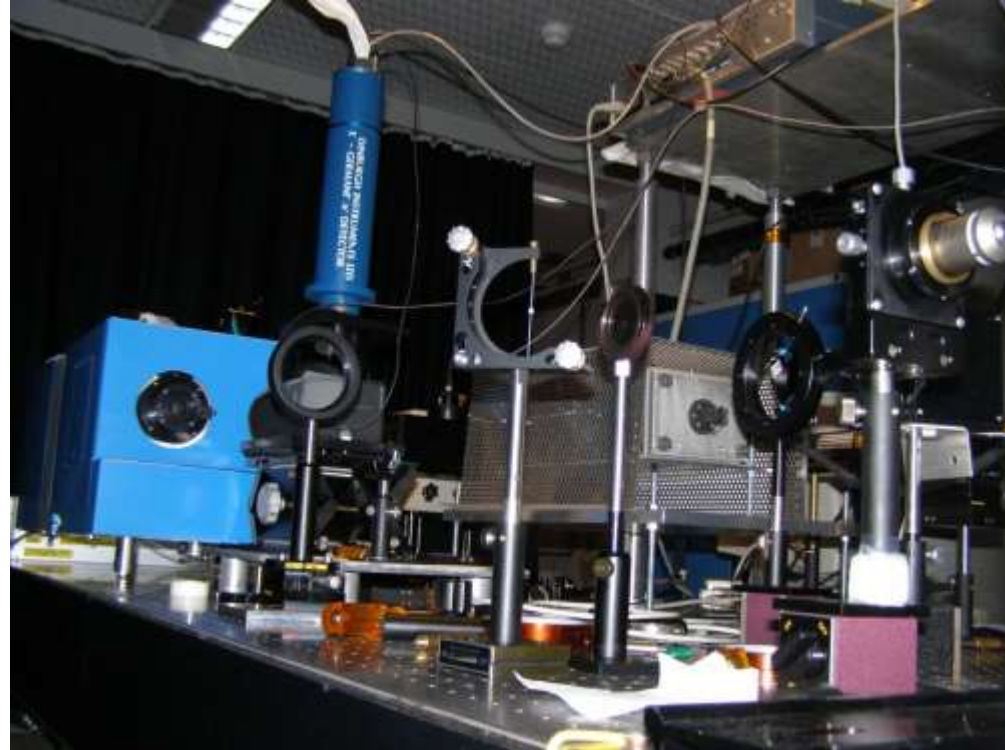
Потери в светодиодах:

- 1) Поглощение в подложке
- 2) Отражение в среду с меньшим n
- 3) Полное внутреннее отражение излучения



ФЛ спектроскопия для диагностики GaAs

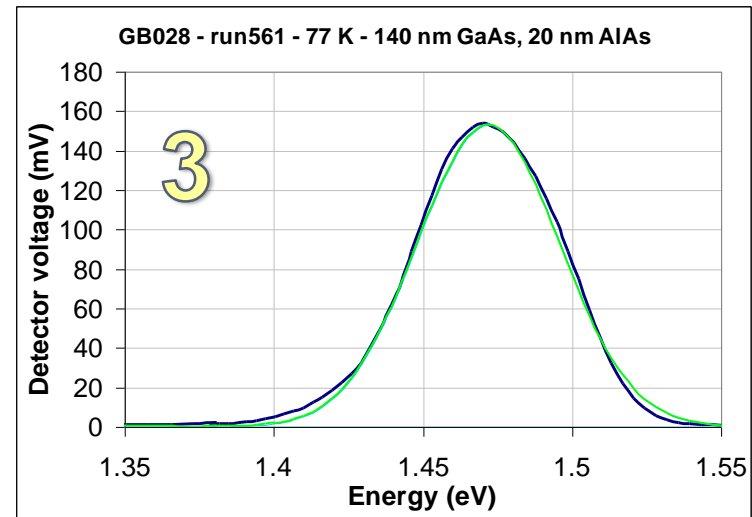
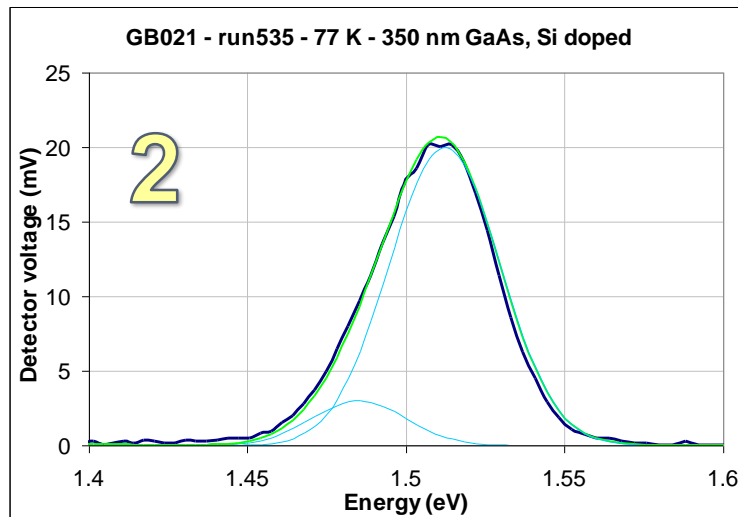
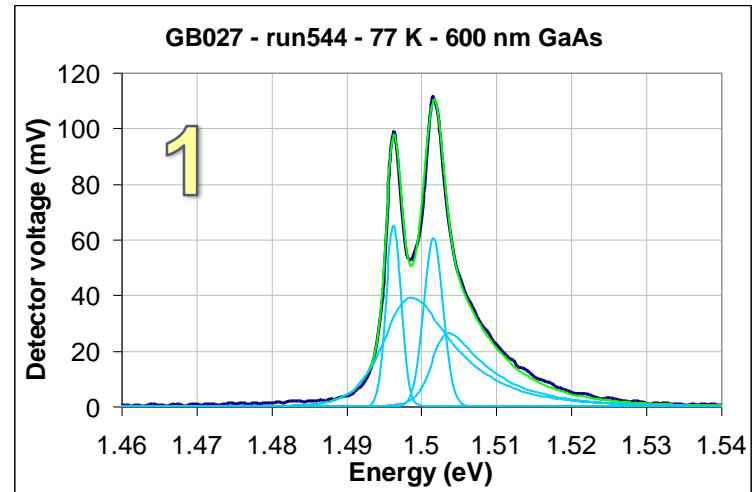
Semiconductor	Surface recombination velocity
GaAs	$S = 10^6$ cm/s
GaN	$S = 5 \times 10^4$ cm/s
InP	$S = 10^3$ cm/s
Si	$S = 10^1$ cm/s



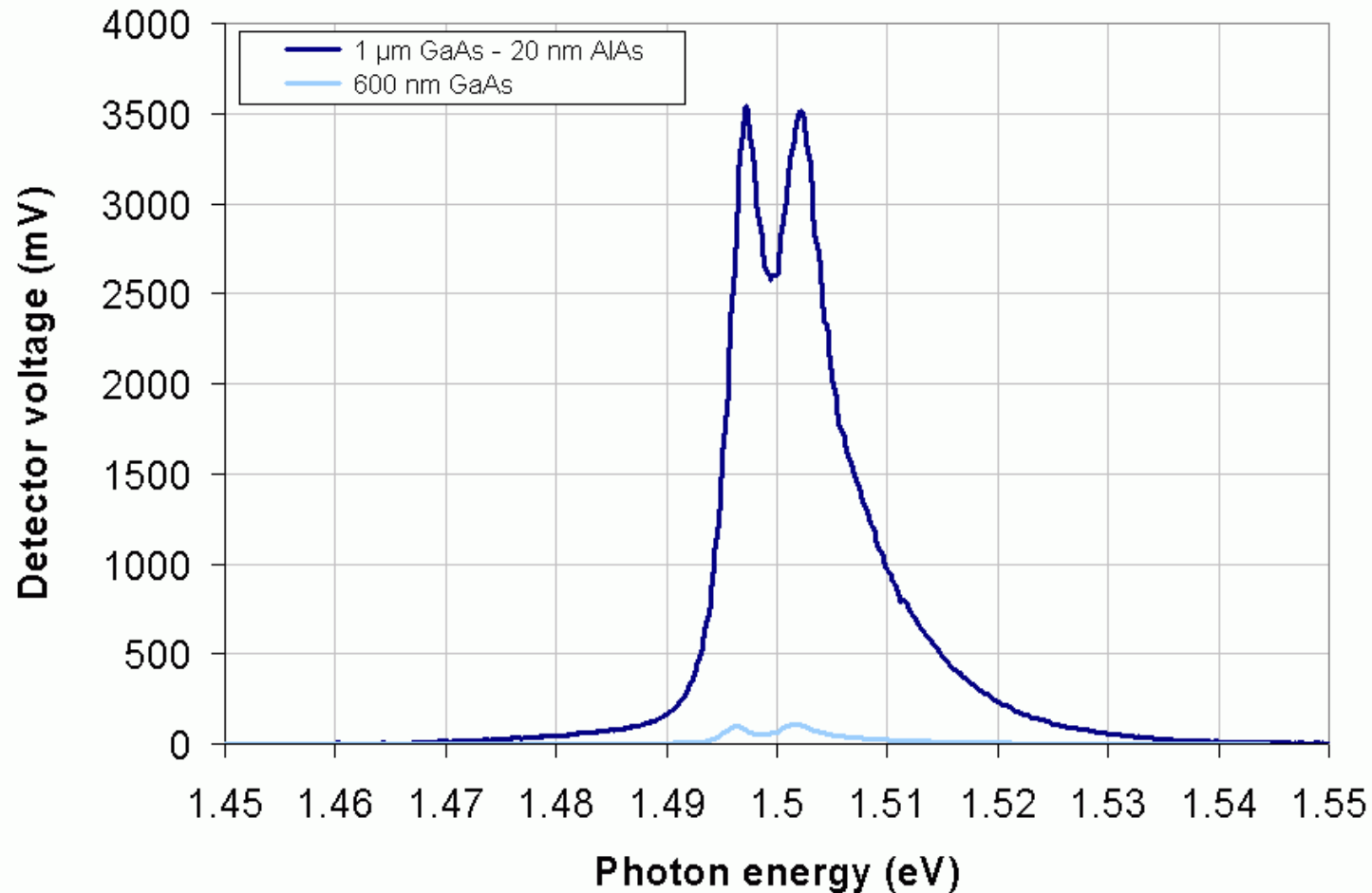
ФЛ спектроскопия для диагностики GaAs

Примеры спектров для трёх структур GaAs на Ge:

1. собственный полупроводник
2. легированный GaAs
3. тонкая наноплёнка GaAs

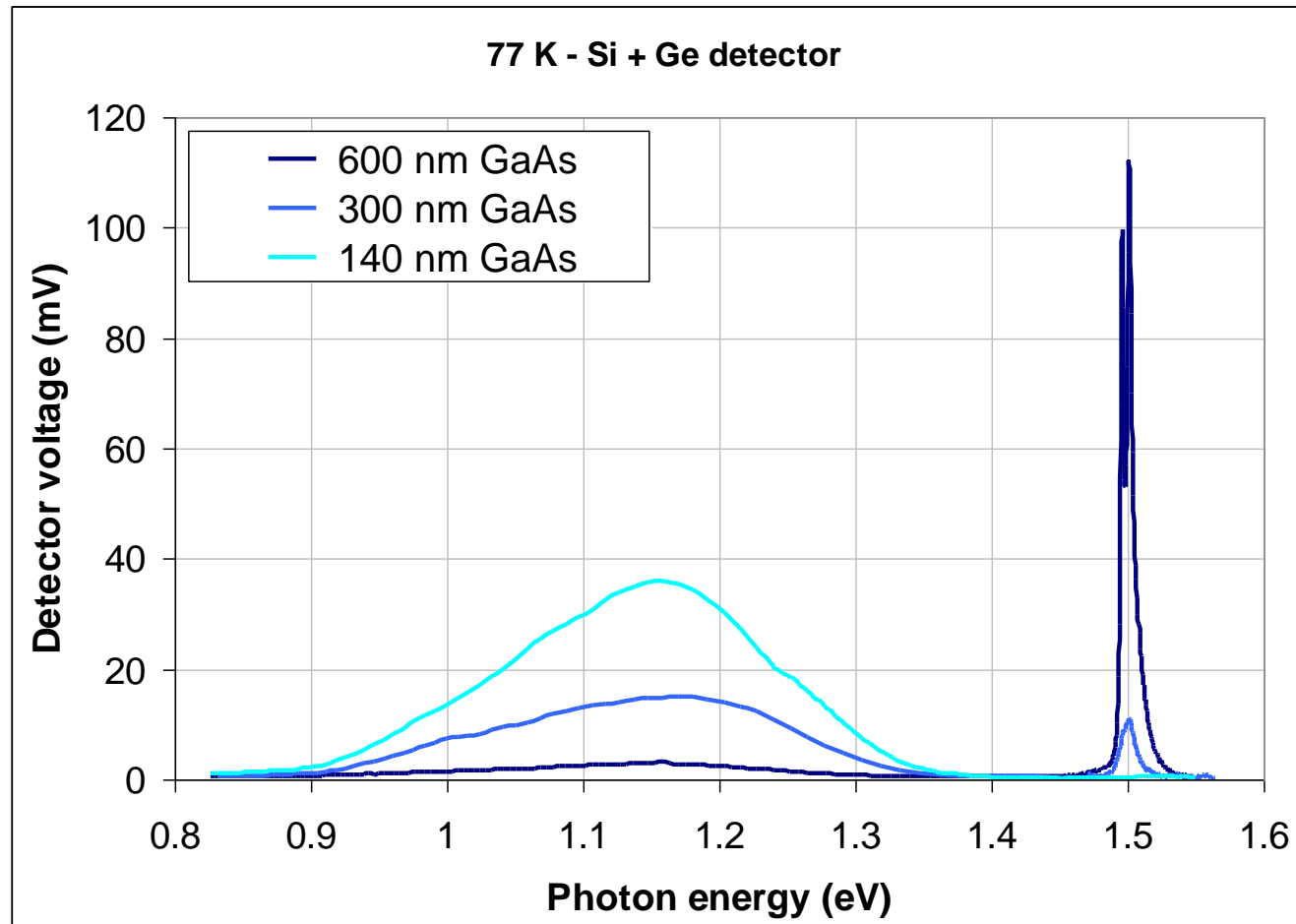


ФЛ спектроскопия для диагностики GaAs



Эпитаксия тонкого слоя широкозонного полупроводника (2.17 эВ) существенно увеличивает интенсивность люминесценции

ФЛ спектроскопия для диагностики GaAs



Широкий пик внутризонной люминесценции связан с наличием дефектов на границе Ge-GaAs.

ФЛ спектроскопия для диагностики GaAs

Exciton Peaks

1.5153	(F,X) $n=1$	free exciton, $n=1$ state of upper polariton branch
1.515	(F,X)	free exciton, lower polariton branch
1.5150-1.5145	(Do,X)	excited states of exciton bound to neutral donor
1.5133(6)	(D+,X)	exciton bound to ionized donor
1.5128	(Ao,X), $J=1/2$	exciton bound to neutral acceptor
1.5124	(Ao,X), $J=3/2$	
1.5122	(Ao,X), $J=5/2$	

Impurity related peaks

1.4931(2)	FB	conduction band to C(As)
1.4915	FB	Be(Ga)
1.4911(4)	FB,	conduction band to Mg(Ga)
1.4894	FB	Zn(Ga)
1.4891(2)	DAP,	neutral donor to C(As)
1.4875	DAP,	neutral donor to Mg
1.4854	DAP	Zn(Ga)
1.4850(1)	FB,	conduction band to Si(As)
1.4848	FB	Cd(Ga)
1.4814(6)	DAP,	neutral donor to Si(As)
1.4781-1.479	FB,	conduction band to Ge(As)
1.4745(6)	DAP,	neutral donor to Ge(As)
1.406	FB	Mn-related
1.356	FB	Cu-related

aspire invent achieve

