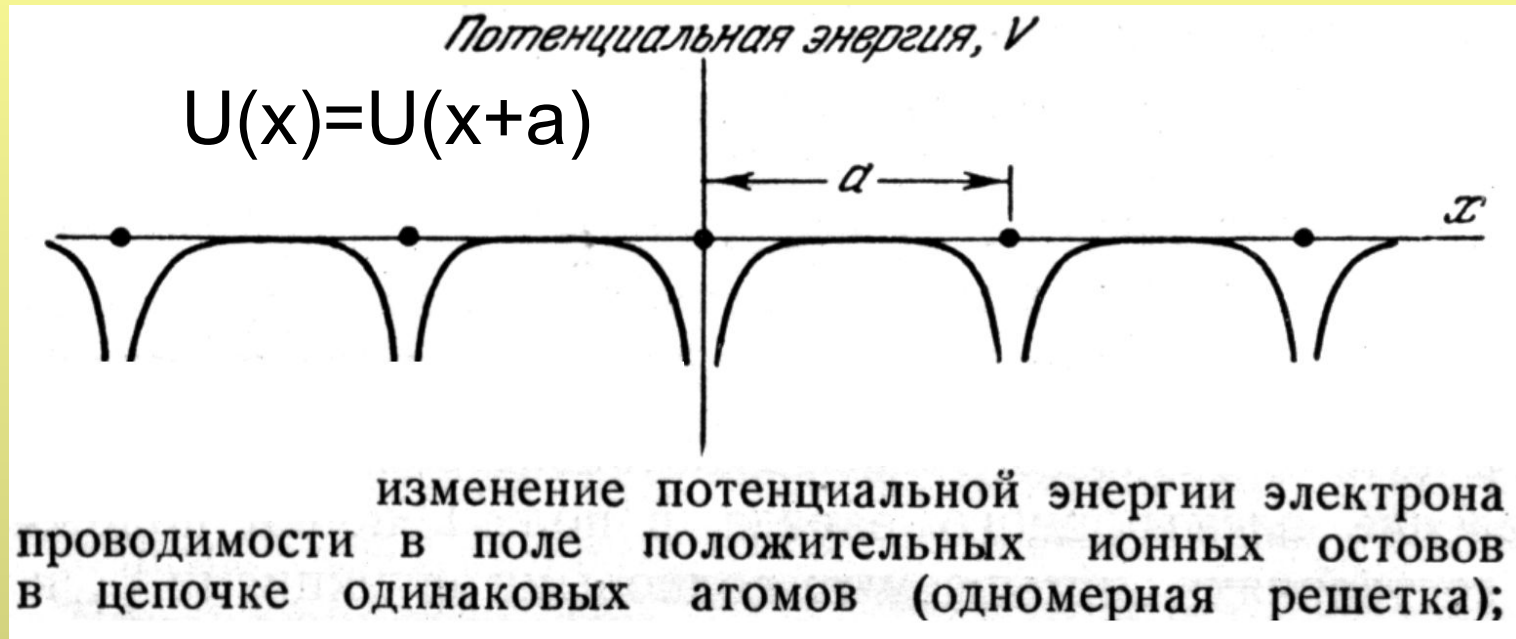


Источники оптического импульсного когерентного излучения для информационных систем II

- Полупроводниковые лазеры

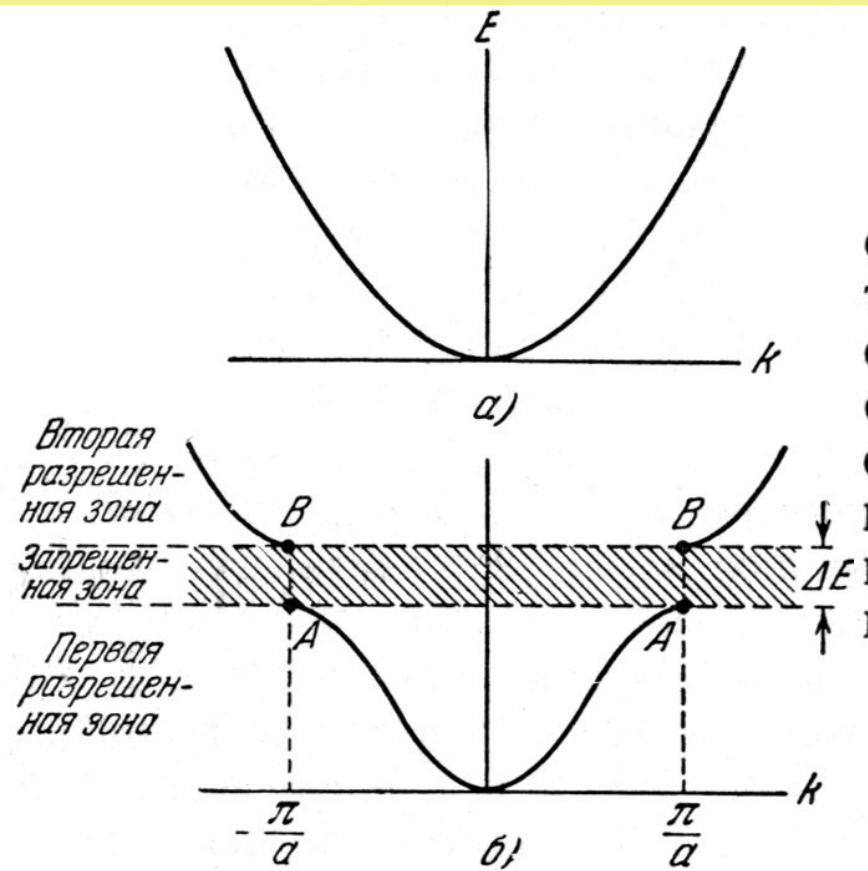
Основные свойства полупроводников



$$-\frac{\hbar^2}{2m_0} \nabla^2 \psi + U\psi = E\psi \quad \psi(\mathbf{r}) = \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})u_k(\mathbf{r})$$

$$u_k(\mathbf{r}) = u_k(\mathbf{r} + \mathbf{a}) \quad \mathbf{k} = \frac{\mathbf{p}}{\hbar}$$

Образование запрещенной зоны

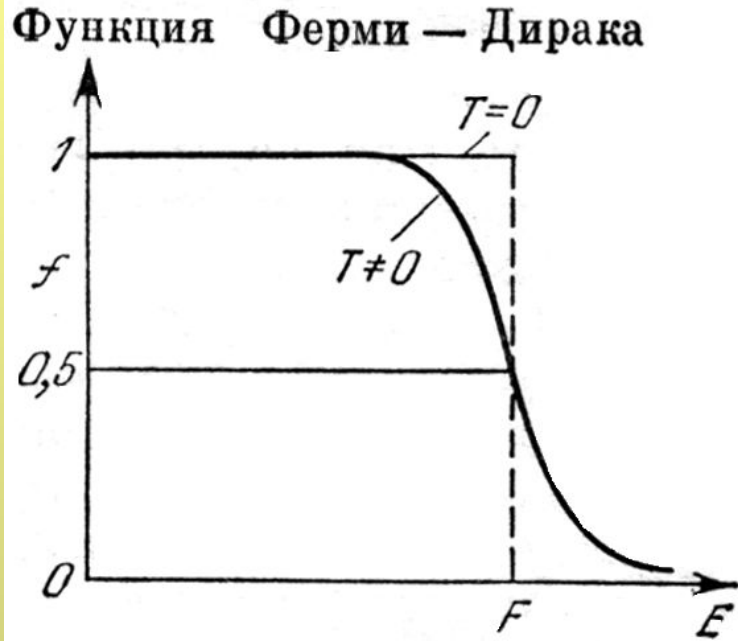


а — график зависимости энергии от волнового числа для свободного электрона; б — график зависимости энергии от волнового вектора для цепочки из одинаковых атомов (линейная решетка) с расстоянием между атомами (постоянной решетки), равным a . Показана энергетическая щель, обусловленная первым брэгговским отражением при $k = \pm \pi/a$.

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

$$k \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} \quad d \rightarrow a$$

Зонная структура полупроводников

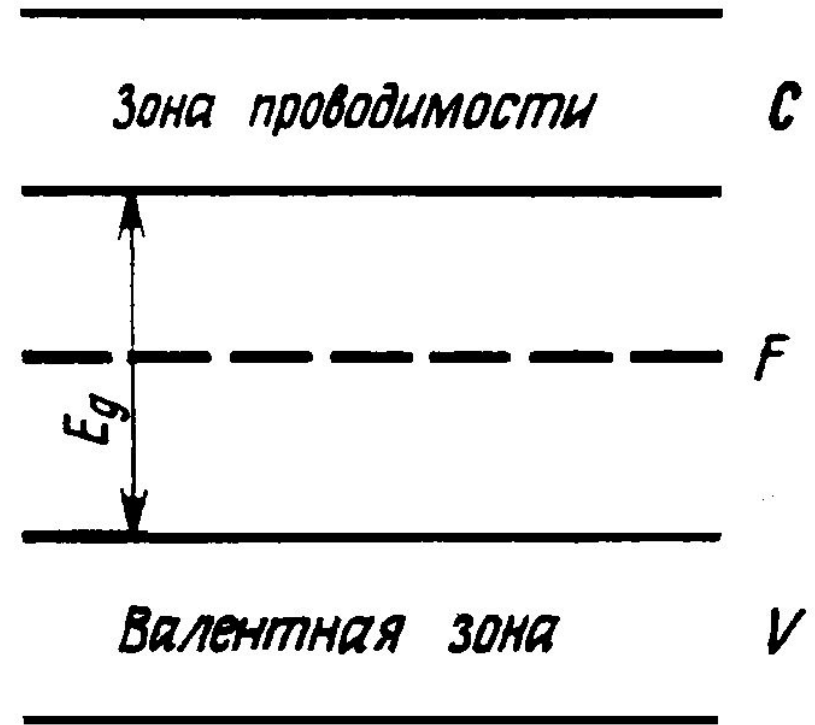


Статистика Ферми-Дирака
Распределение вероятности заполнения $f(E)$ состояния с энергией E

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - F}{kT}\right)}$$

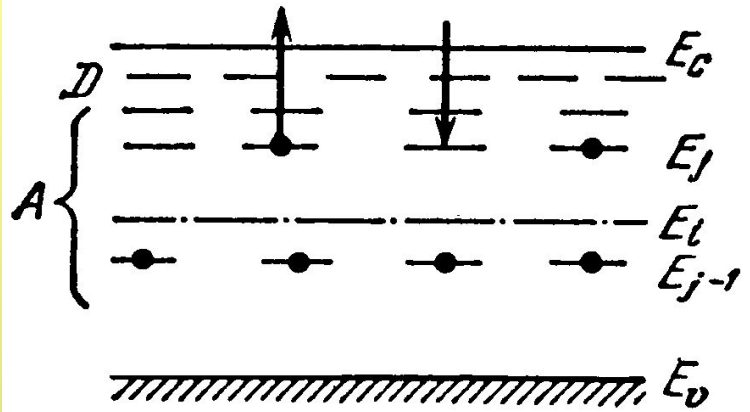
$$f = 1 \quad \text{при} \quad E < F$$

$$f = 0 \quad \text{при} \quad E > F$$

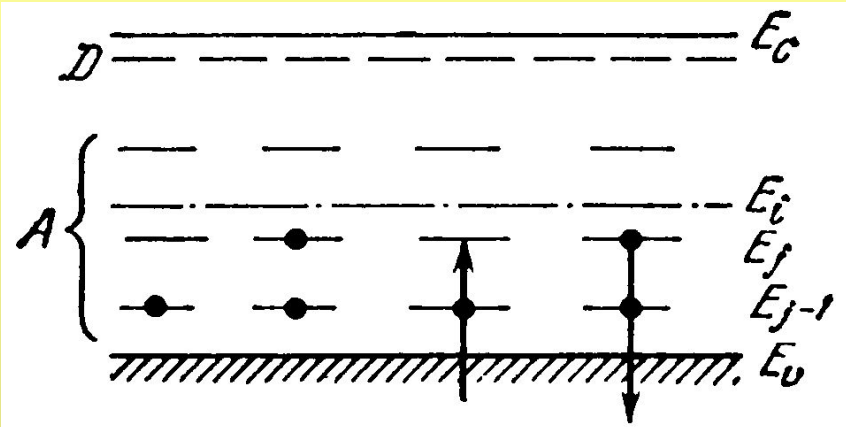


Валентная зона (V), зона проводимости (C) и уровень Ферми (F) в полупроводнике.

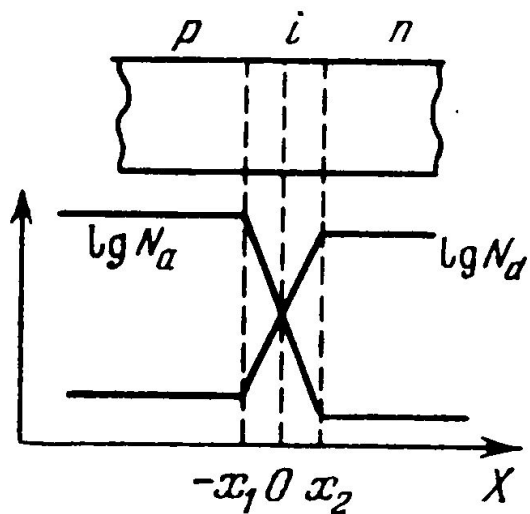
Полупроводниковый диод



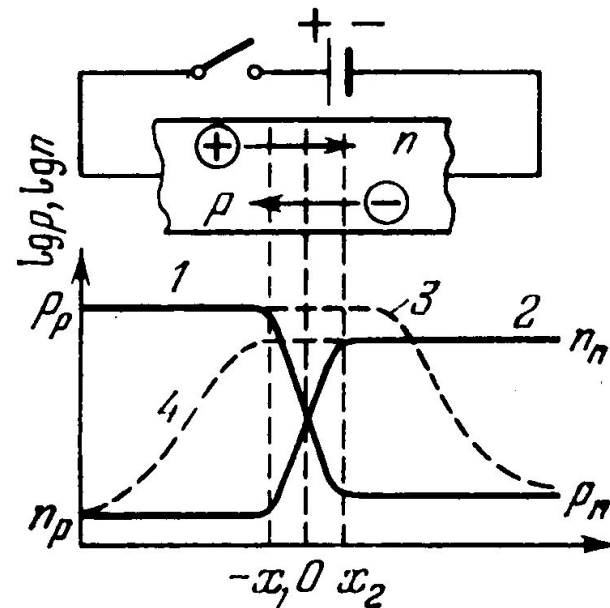
Частично компенсированные многозарядные акцепторы. Полупроводник *n*-типа



Частично компенсированные многозарядные акцепторы. Полупроводник *p*-типа



p — *n*-переход

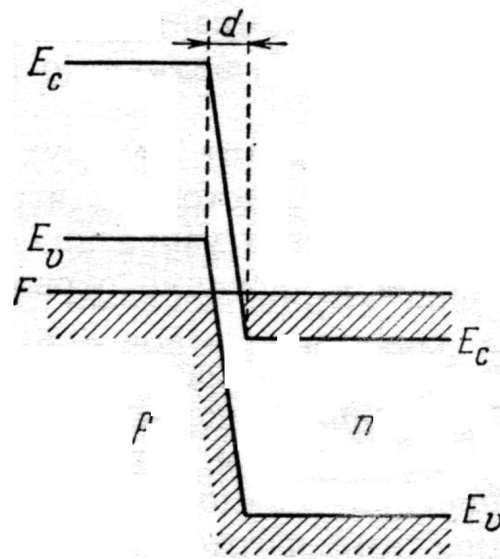
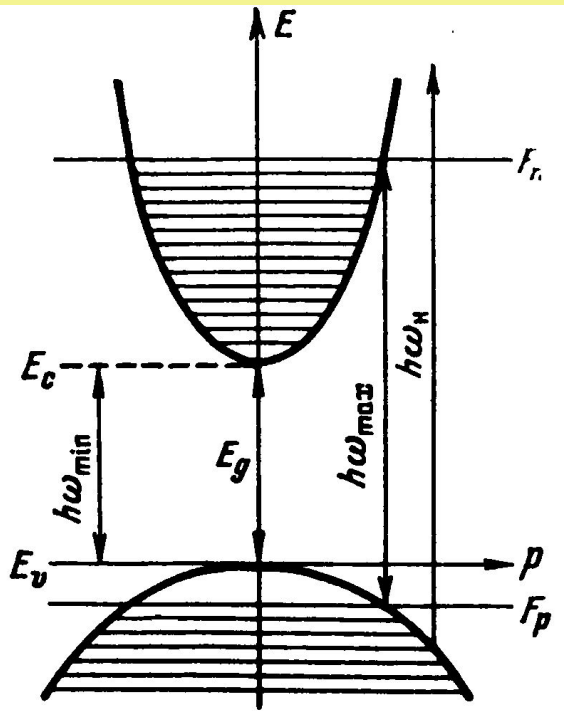


Инжекция в *p* — *n*-переходе

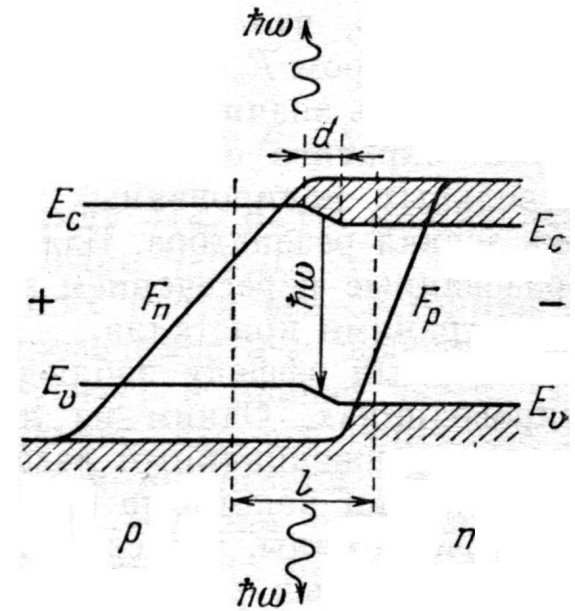


Светодиоды

Простейший полупроводниковый лазер



a

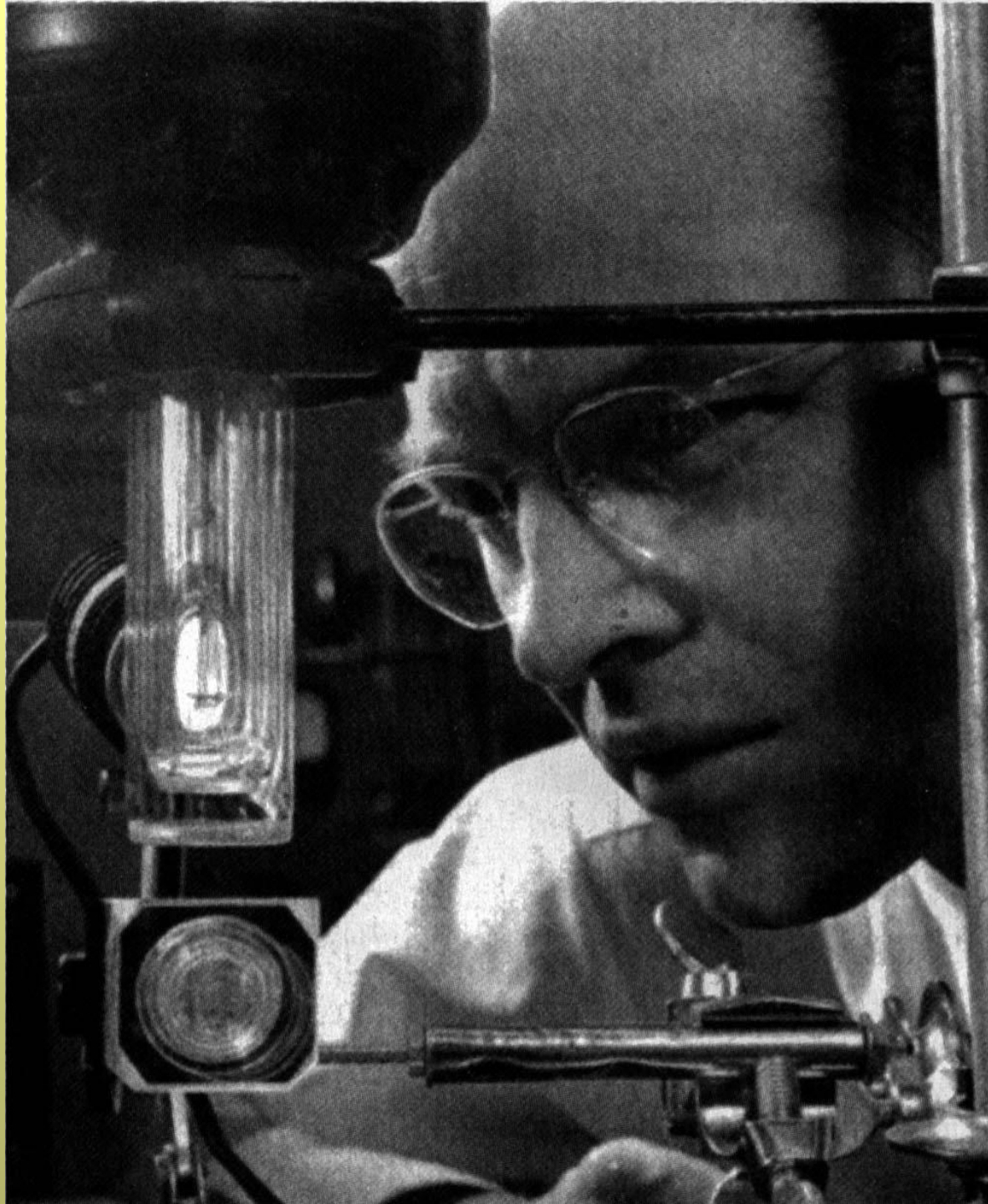


b

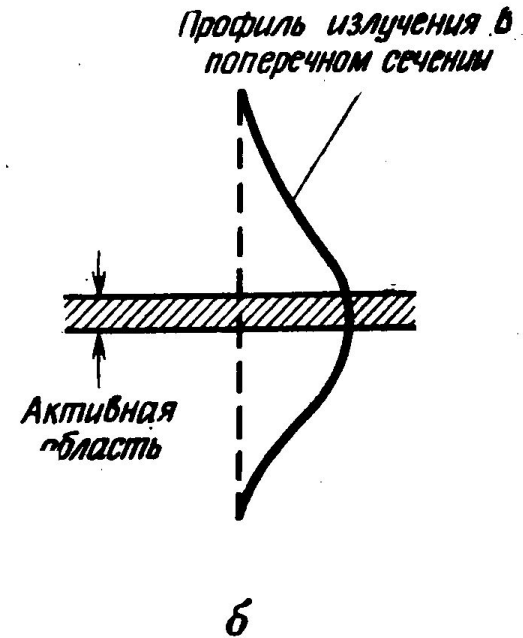
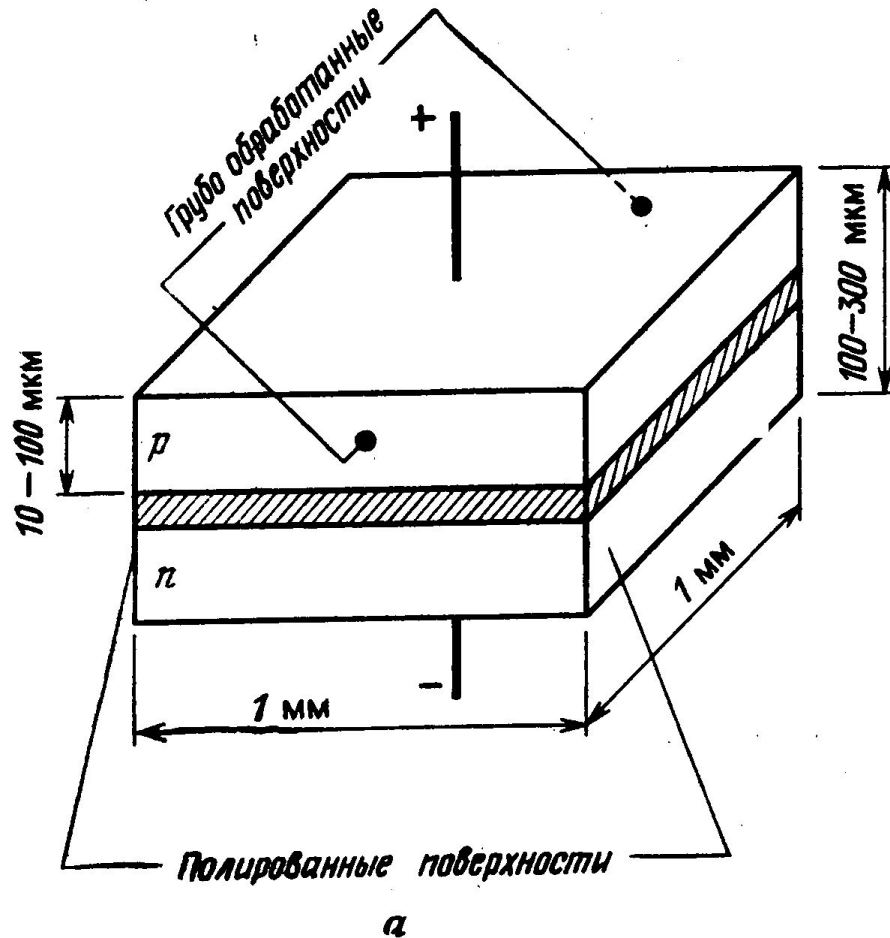
Энергетическая диаграмма инжекционного полупроводникового лазера. *a* — Вырожденный $p-n$ -переход без внешнего напряжения, *b* — Вырожденный $p-n$ -переход при положительном напряжении, d — технологическая ширина перехода, l — ширина активной области ($F_n - F_p \geq E_g$)

Инверсное распределение электронов в однодолинном полупроводнике

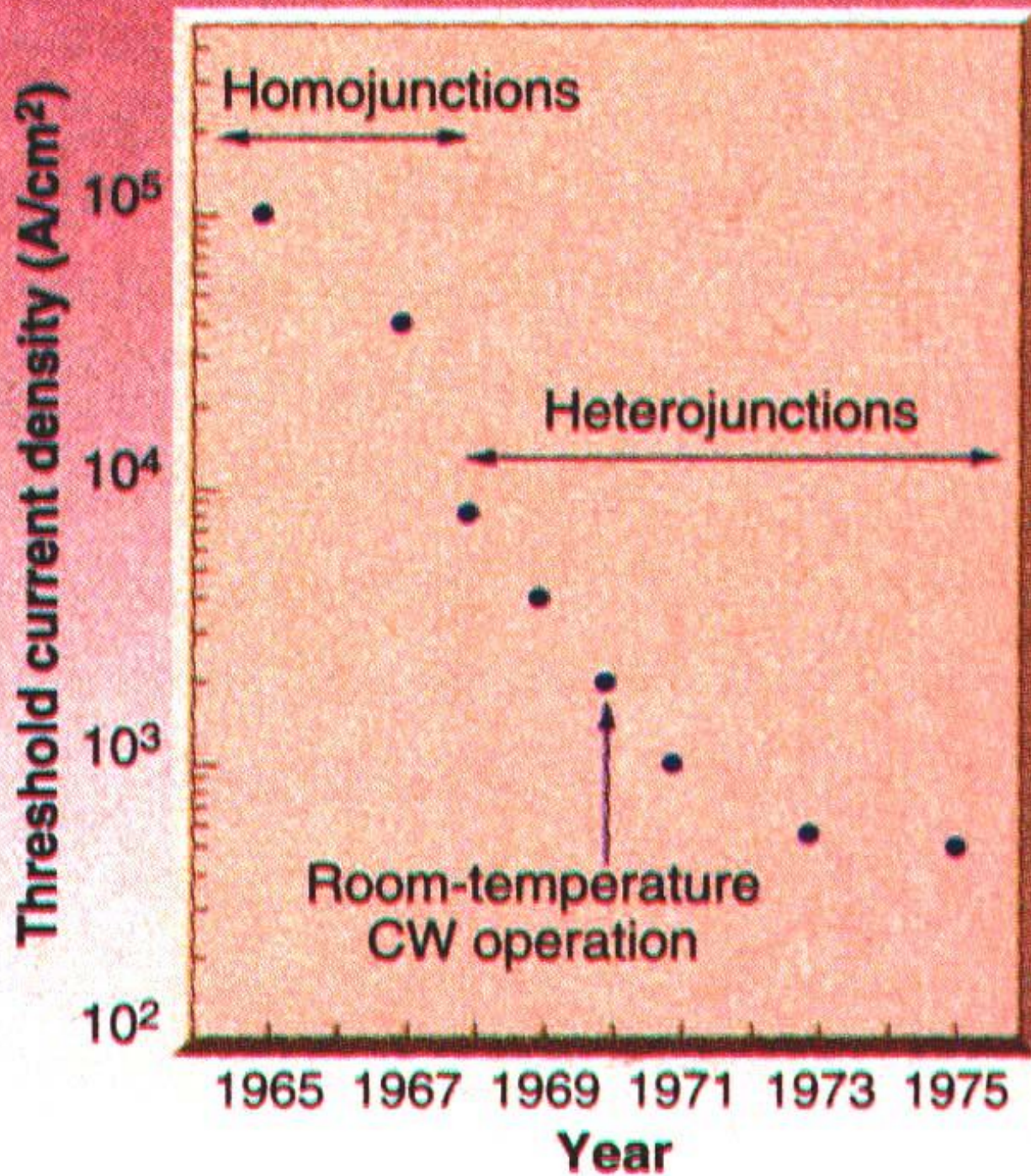
Роберт
Холл и
первый
GaAs
лазер



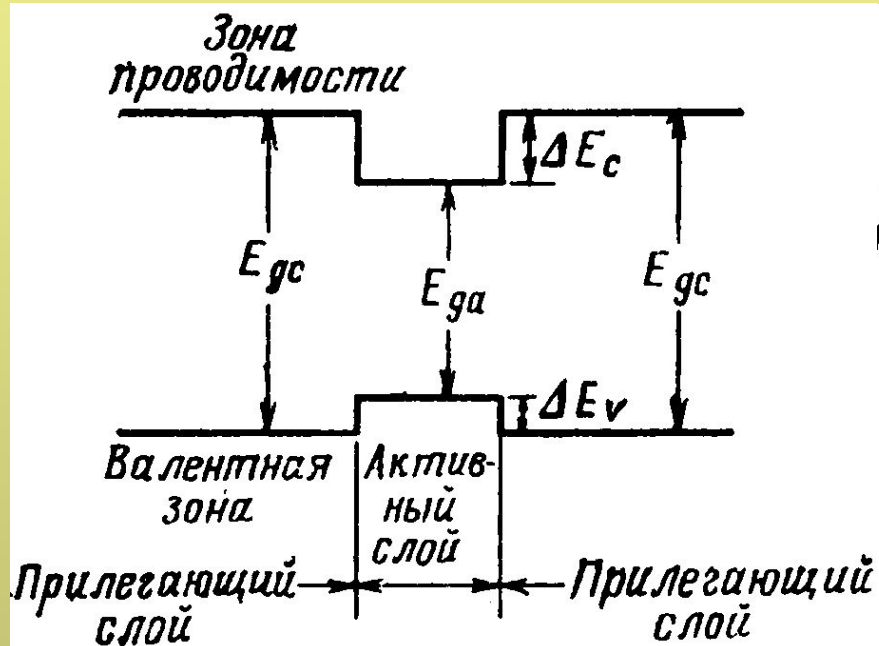
Простейший полупроводниковый лазер



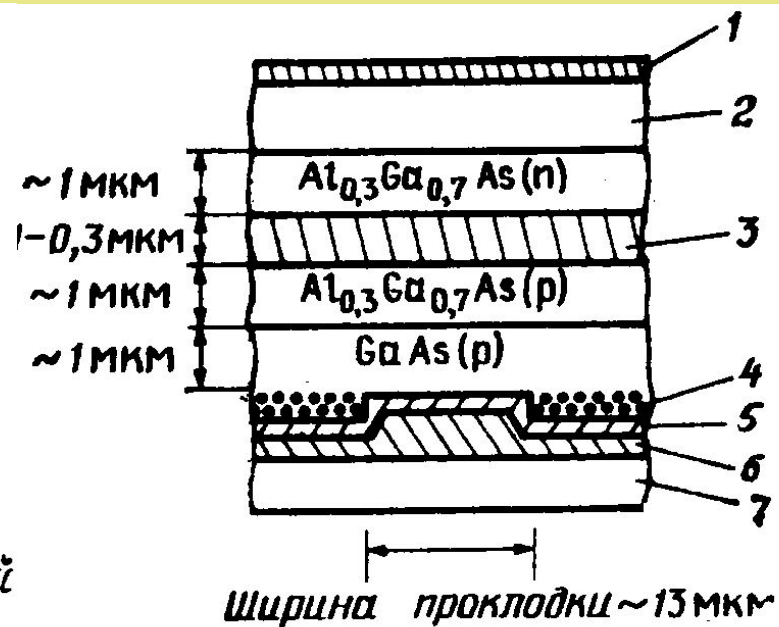
а — схема устройства полупроводникового лазера; **б** — распределение интенсивности излучения лазера в поперечном сечении.



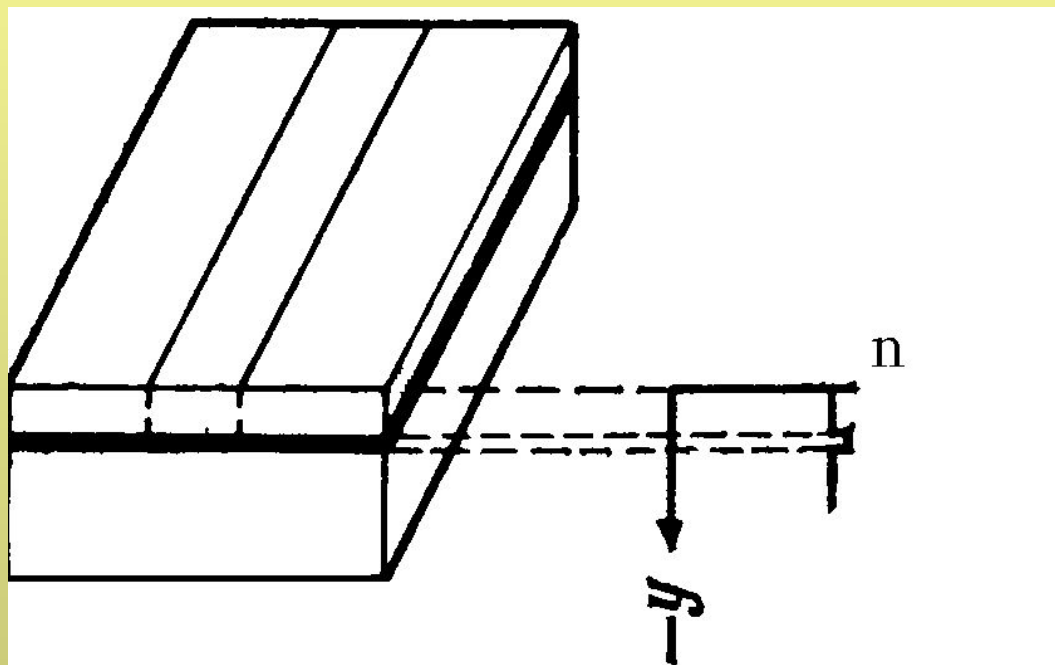
Полупроводниковые лазеры с гетероструктурами



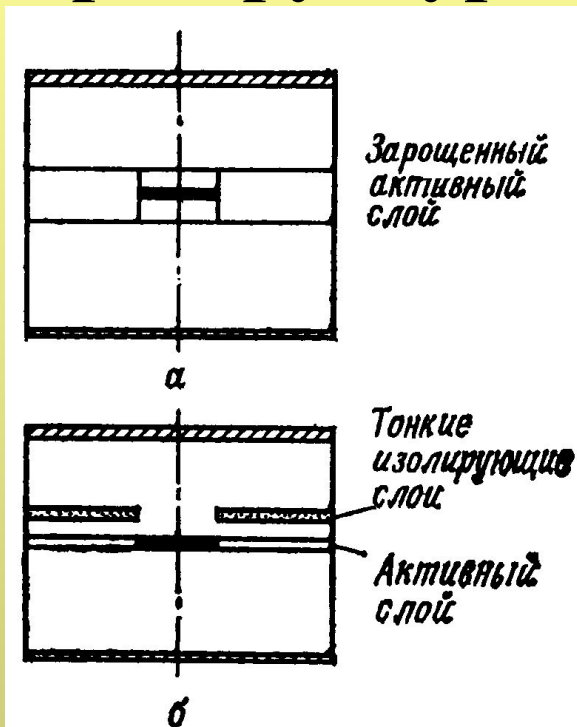
Удержание носителей в двойной гетероструктуре.



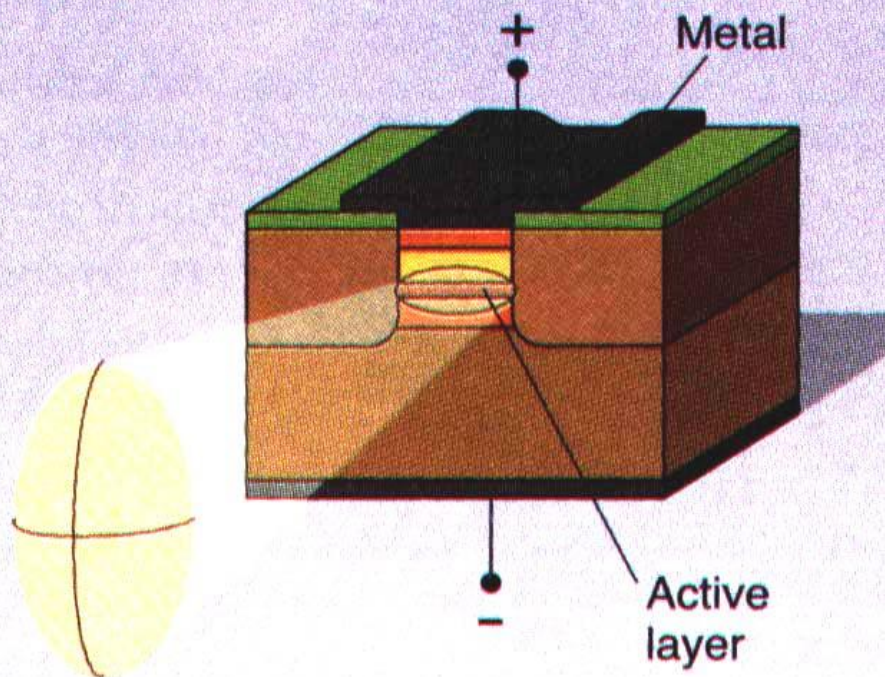
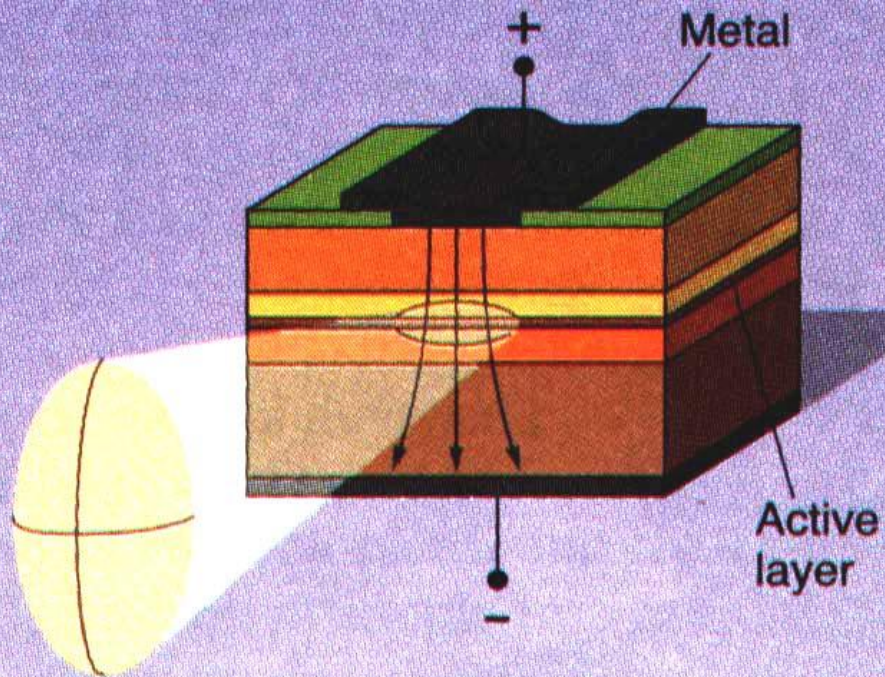
Волноводные свойства гетероструктур



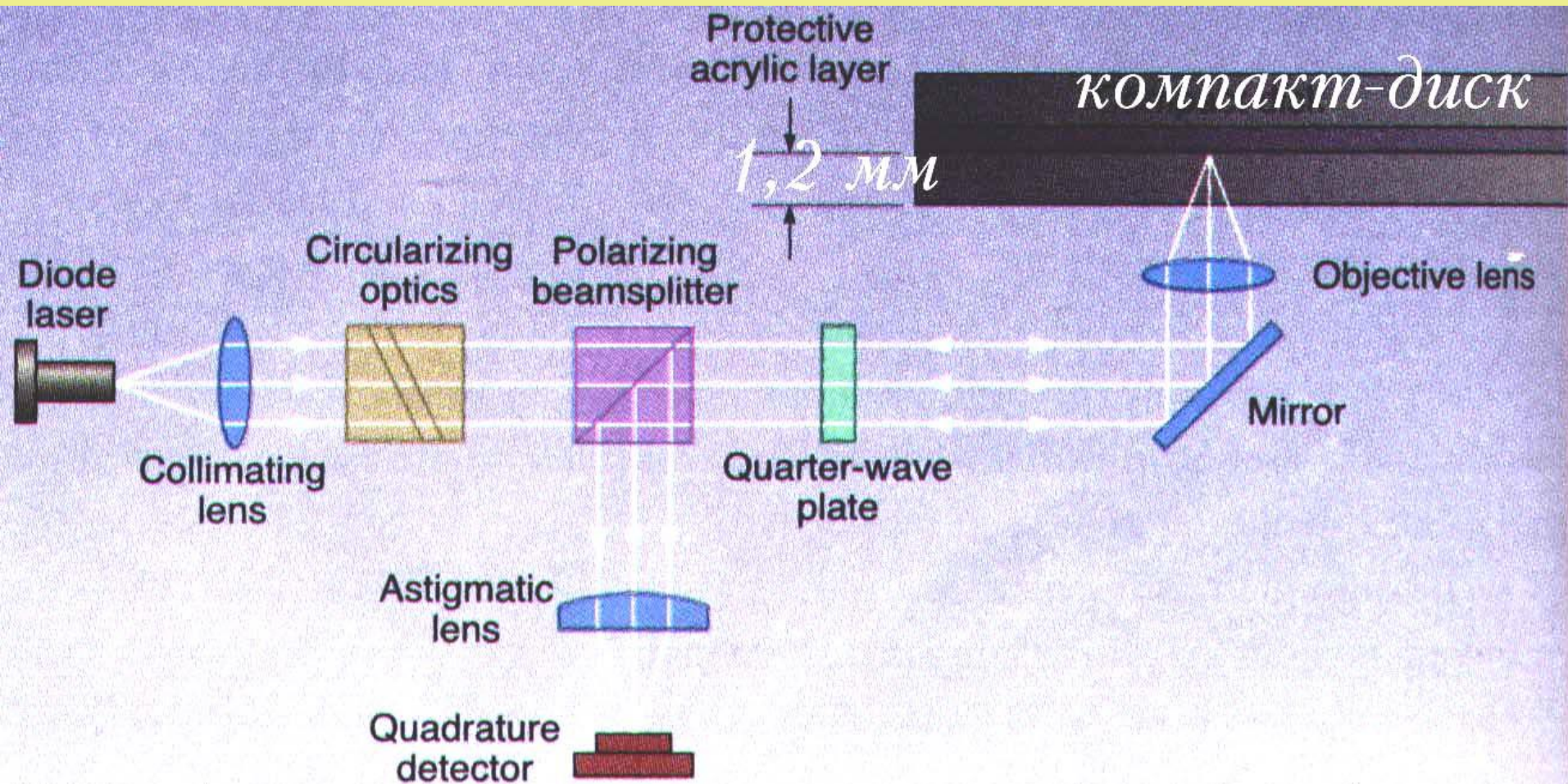
Полупроводниковый лазер и его волновод.



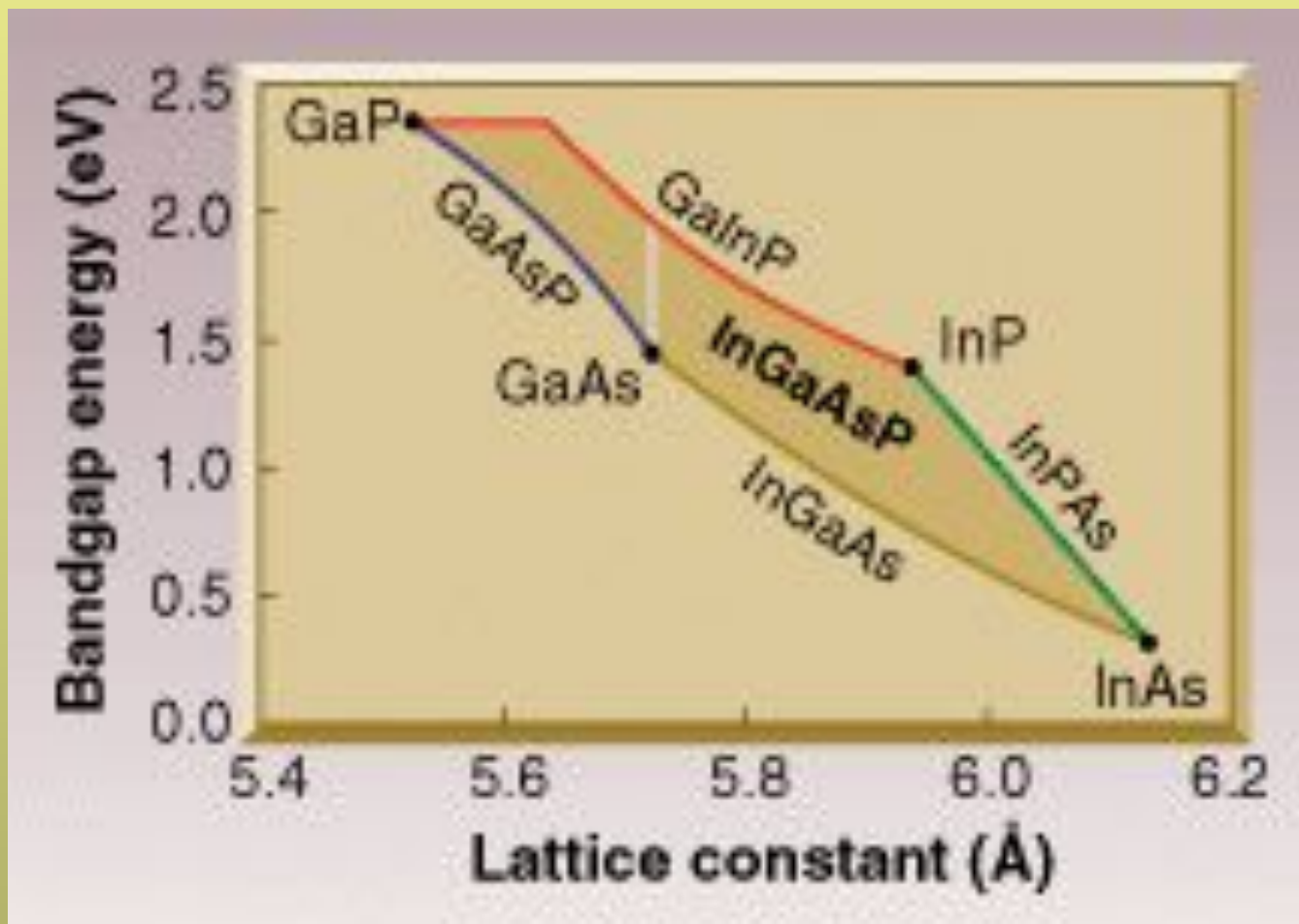
а — поперечное сечение полупроводникового лазера, удерживающего излучение в боковом направлении благодаря специальному профилю показателя преломления (встроенный волновод); *б* — лазер с волноводным эффектом в плоскости *p-n*-перехода, который обусловлен направляющим эффектом усиления.



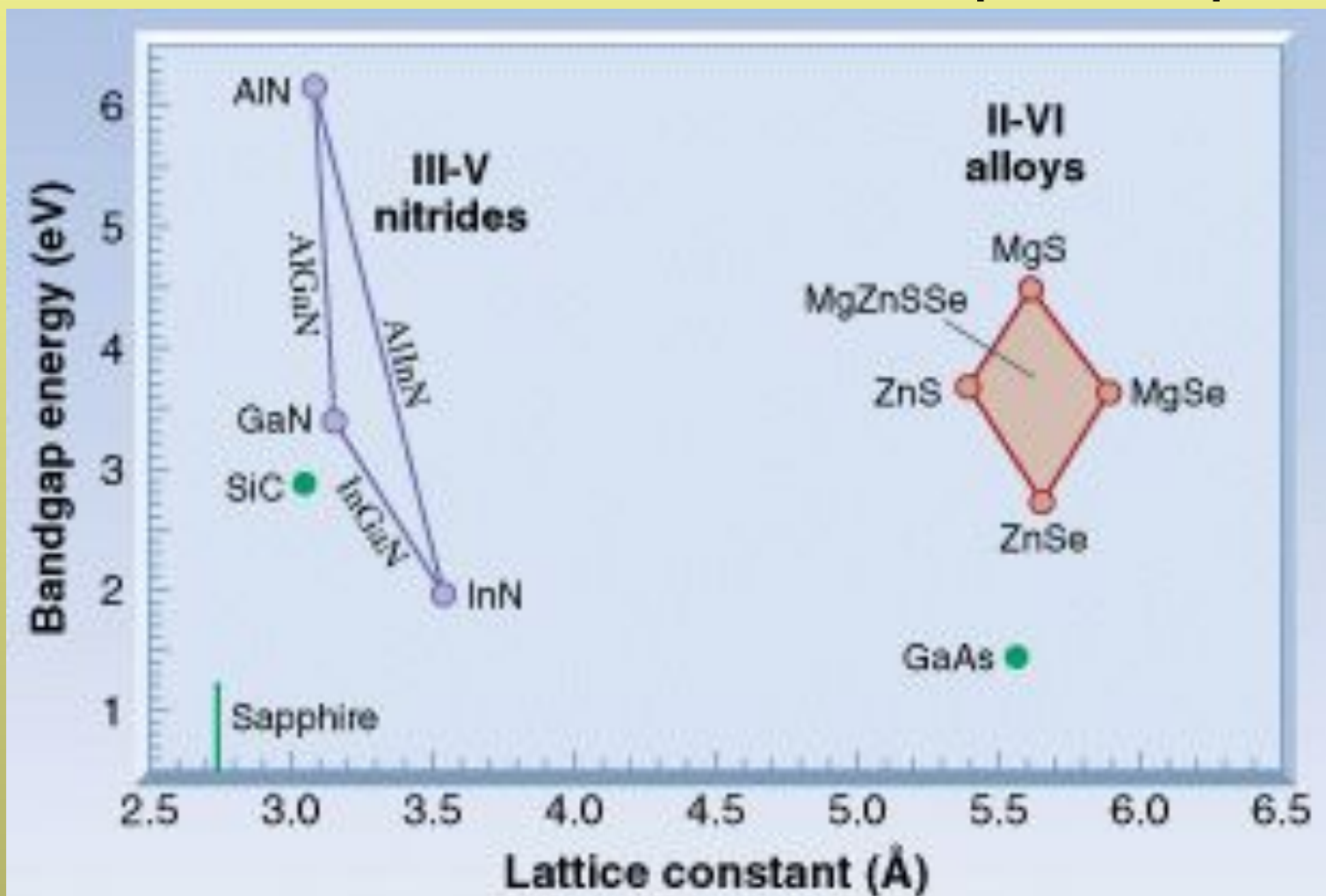
Оптическая схема считывания информации в CD-ROM



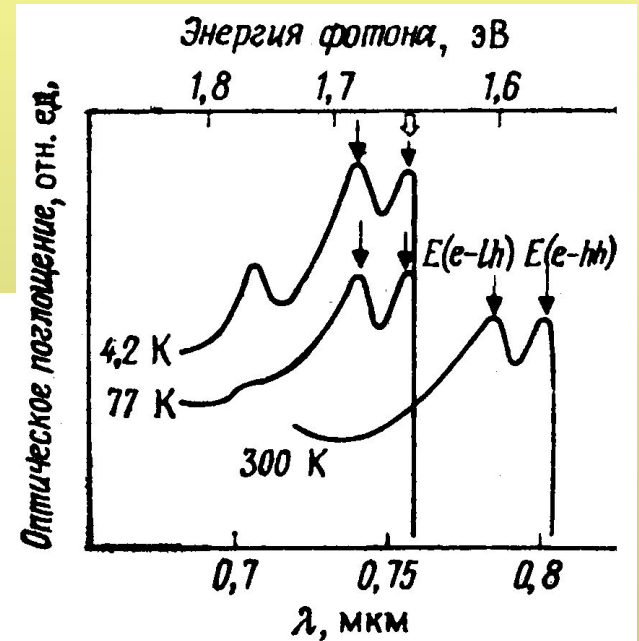
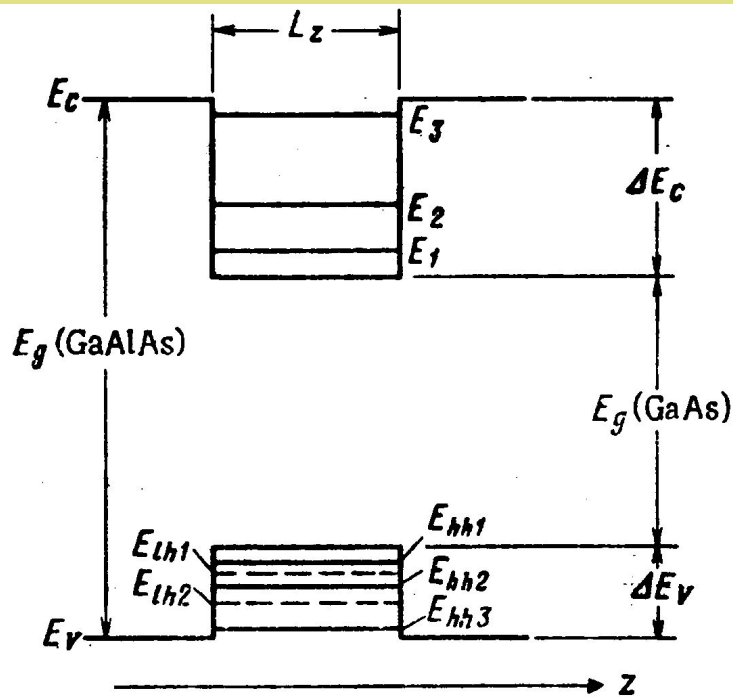
Зависимость энергии запрещенной зоны от постоянной кристаллической решетки двойных соединений и их растворов



Зависимость энергии запрещенной зоны от постоянной кристаллической решетки двойных соединений и их растворов



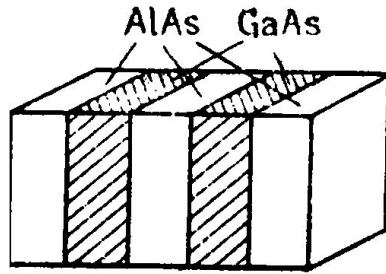
Квантово-размерная структура



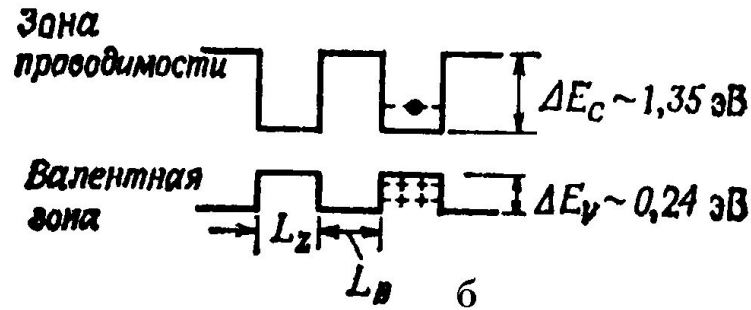
Спектры оптического поглощения в сверхрешетке структуры GaAs — AlAs при различных температурах ($L_z = 54 \text{ \AA}$; нелегированная; для удобства наблюдения спектры параллельно смещены по оси ординат).

Диаграмма энергетических уровней КРС на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

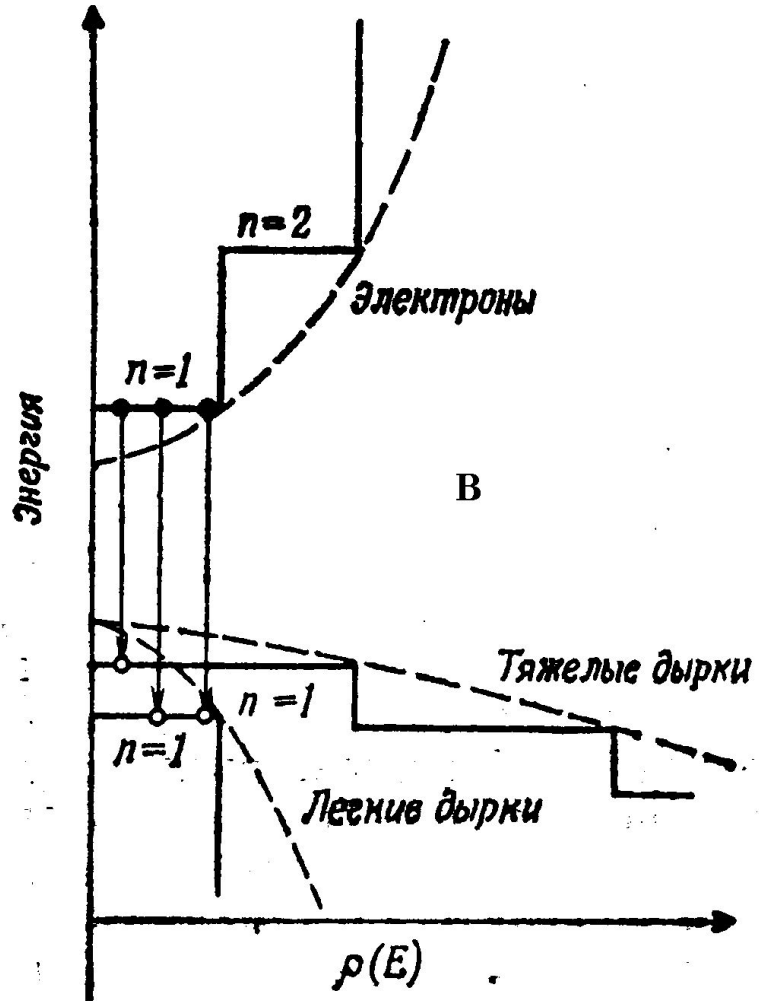
Многослойная КРС

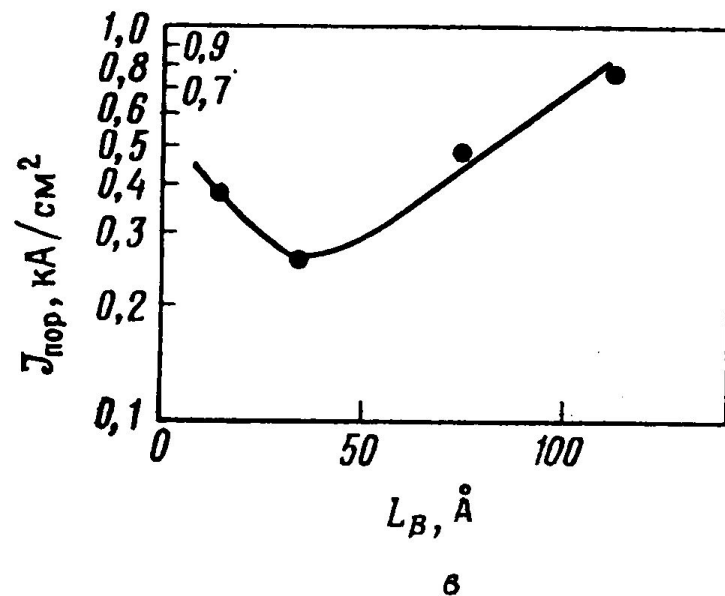
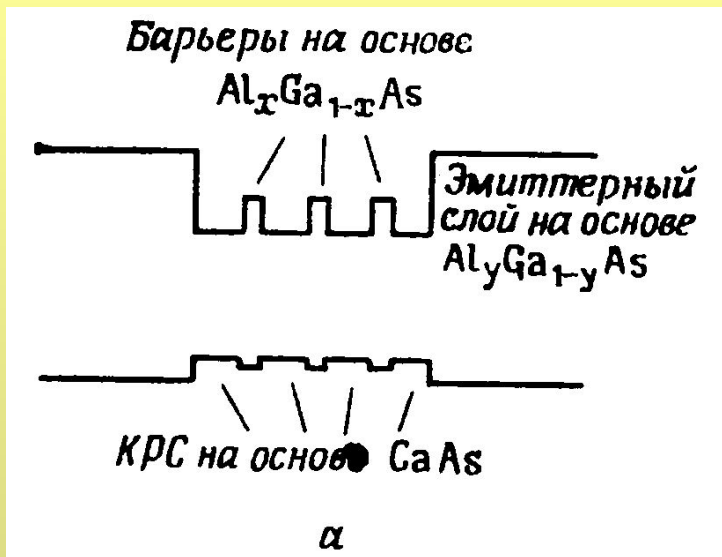


а

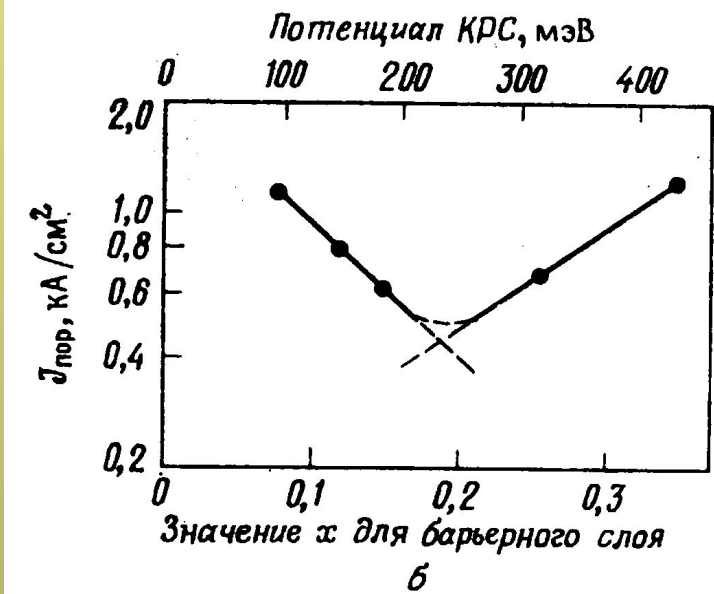


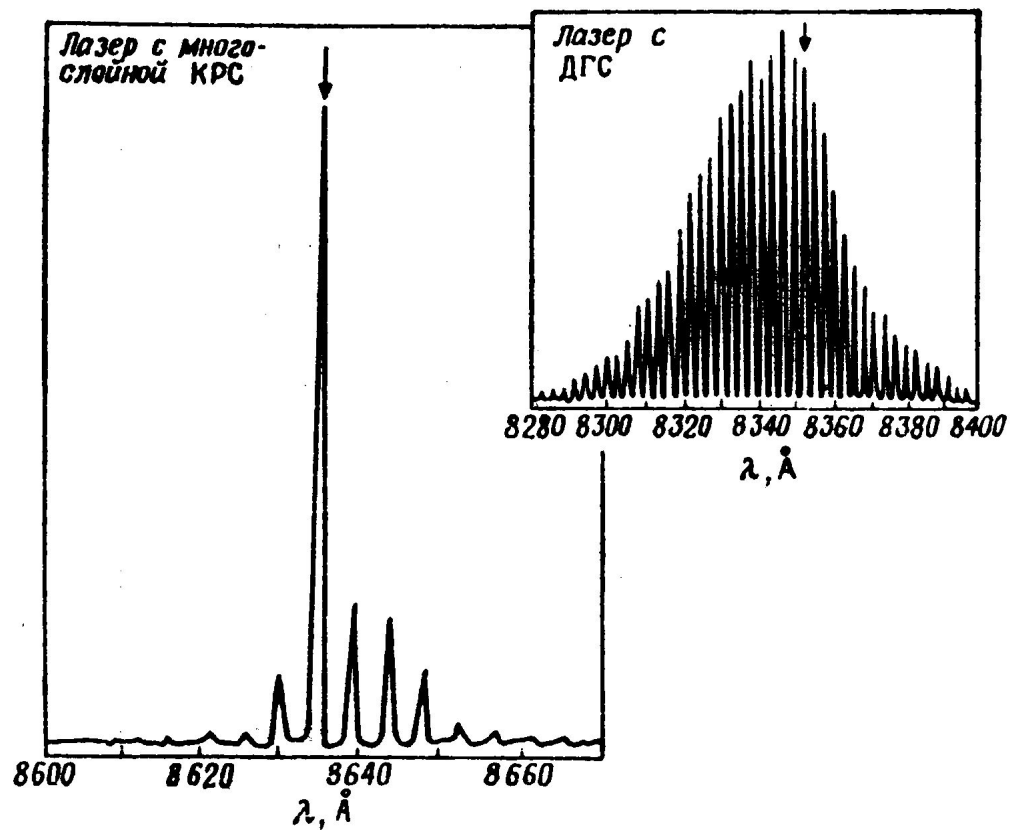
а — модель сверхрешетки на основе GaAs — AlAs; б — зонная структура в сверхрешетке; в — энергетическая диаграмма в сверхрешетке. (Штриховые кривые соответствуют зонам для объемного кристалла GaAs.)



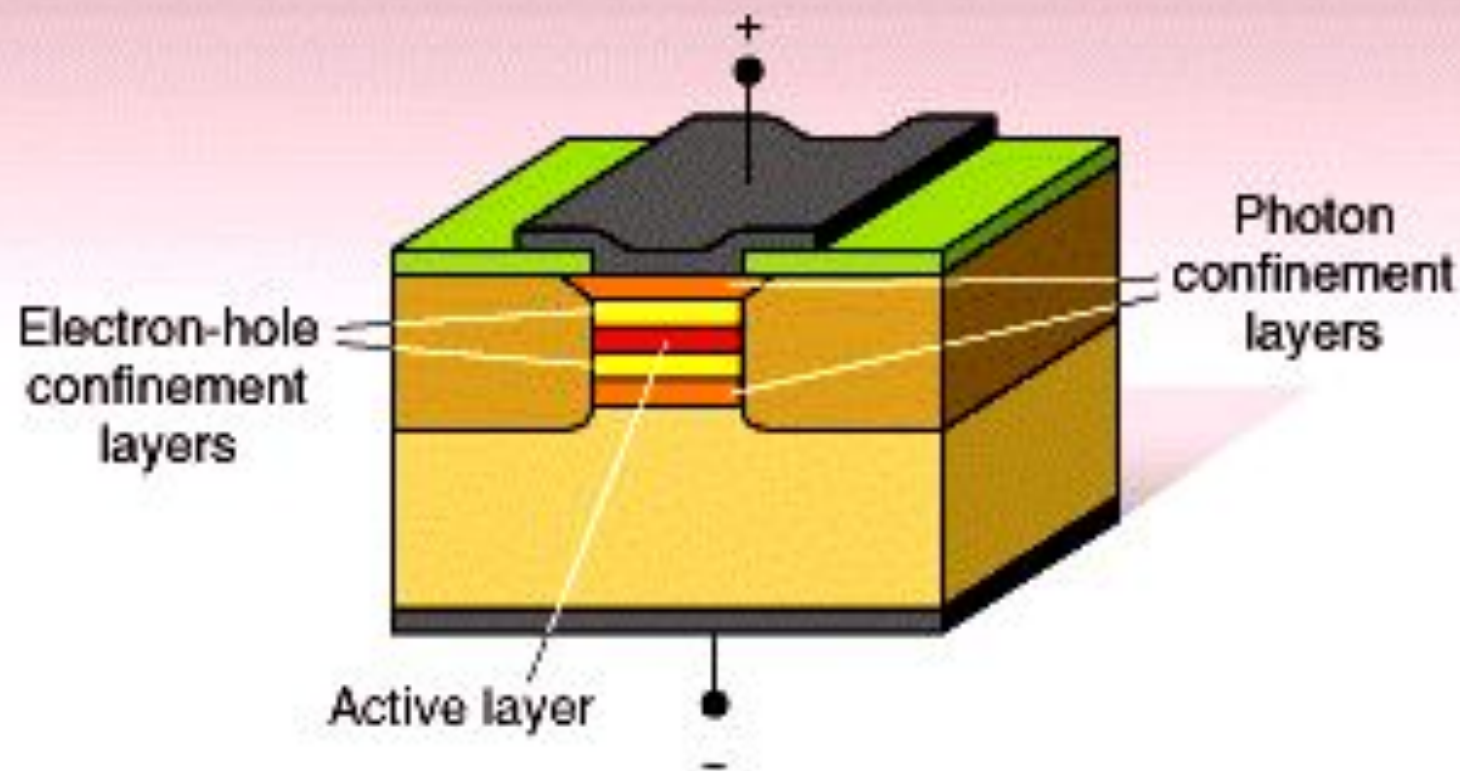


Модель лазера с модифицированной многослойной квантово-размерной структурой (а), зависимость плотности порогового тока от стехиометрического коэффициента x барьерного слоя (б) и толщины барьерного слоя в $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ (в). (В эмиттерном слое $y = 0,3-0,36$)



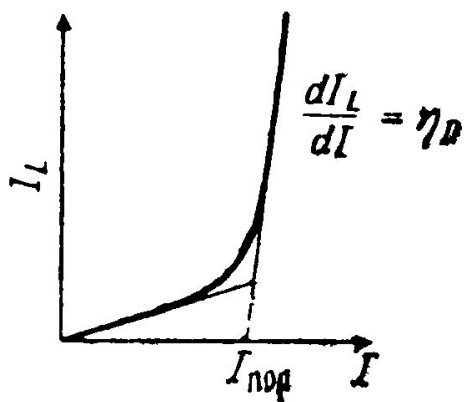


Сравнение модуляционных характеристик многослойного квантово-размерного лазера и обычного лазера с двойной гетероструктурой (ДГС).

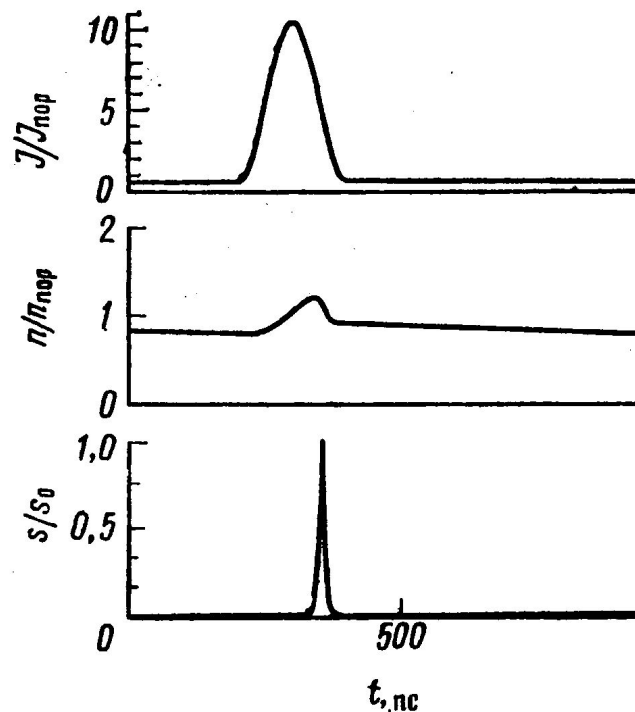


Quantum-well structure of an early gallium indium phosphide visible-output laser diode includes an active layer of less than 20-nm thickness (the layers are not drawn to scale). Aluminum was mixed with gallium indium to form the confining layers.

Генерация сверхкоротких импульсов



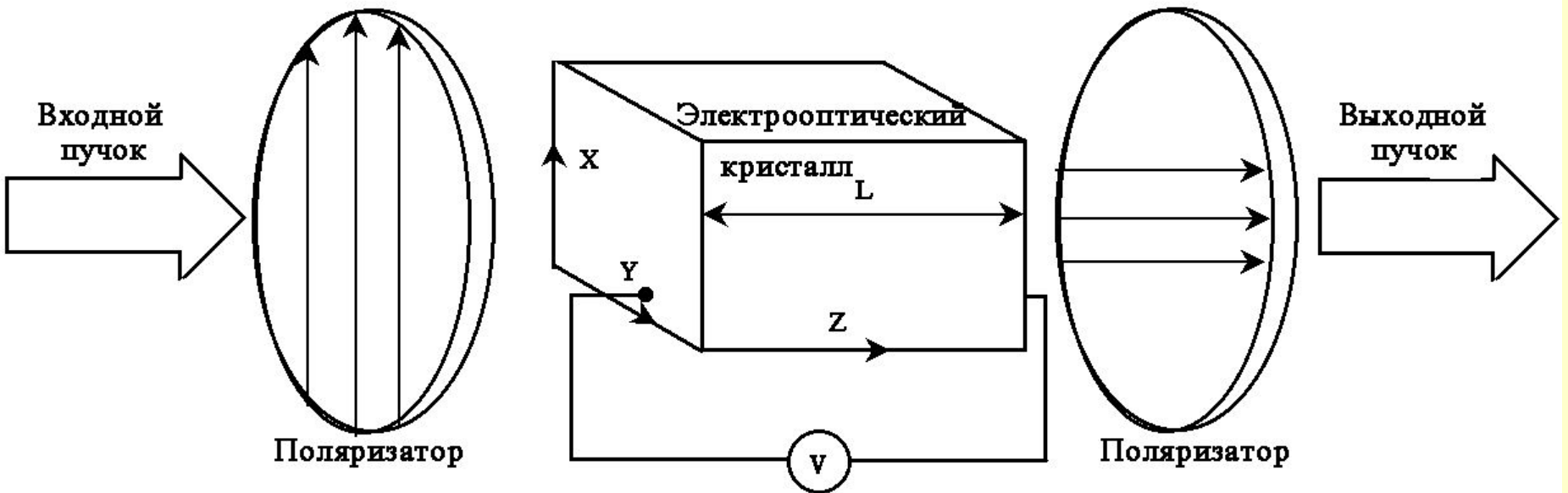
Зависимость интенсивности излучения от тока (к определению дифференциального квантового выхода). $\eta_Q = (I_L/h\nu)/(I/e) = (e/h\nu)\eta_D$.



Образование сверхкороткого импульса вследствие нелинейности при возбуждении полупроводникового лазера коротким импульсом тока. Ширина импульса тока 100 пс, ширина оптического импульса 10 пс. J — плотность тока, n — концентрация носителей, s — концентрация фотонов.

Электрооптические модуляторы света

Ячейка Погкельса



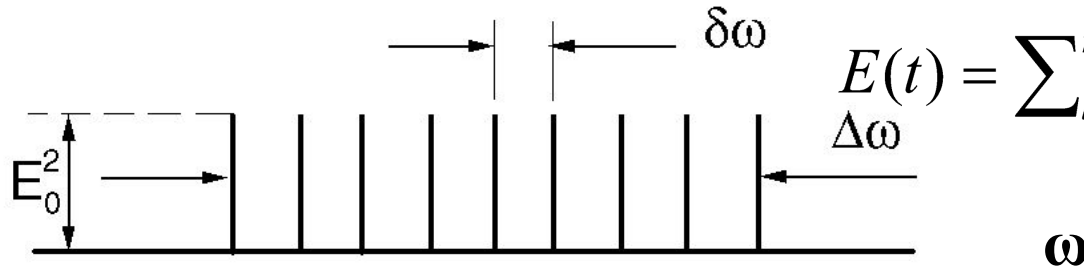
$$\Delta n_X = -\frac{1}{2} r_{13} n_0 E_Z$$

$$\delta\varphi = 2\pi (\Delta n_X - \Delta n_Y) \frac{L}{\lambda}$$

$$\Delta n_Y = -\frac{1}{2} r_{33} n_e E_Z$$

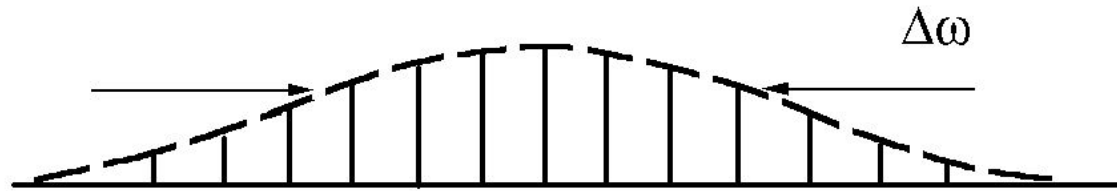
Минимальное время переключения ~ 1 пс

Синхронизация продольных мод в резонаторе



$$E(t) = \sum_{l=-n}^n E_0 \exp\{i[(\omega_0 + l\Delta\omega)t + l\varphi]\}$$

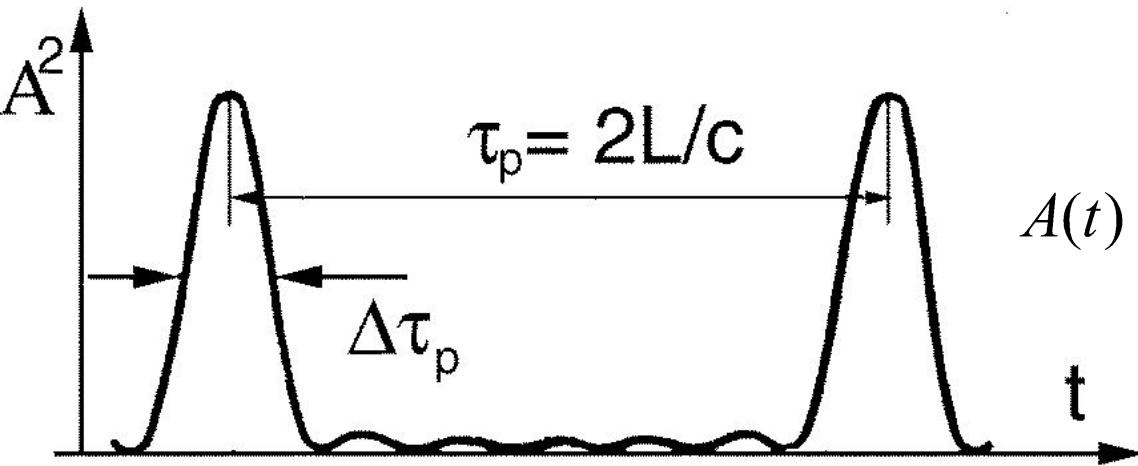
ω



ω

$$\Delta\omega = \frac{\pi c}{L}$$

$$\varphi = \varphi_l - \varphi_{l-1}$$

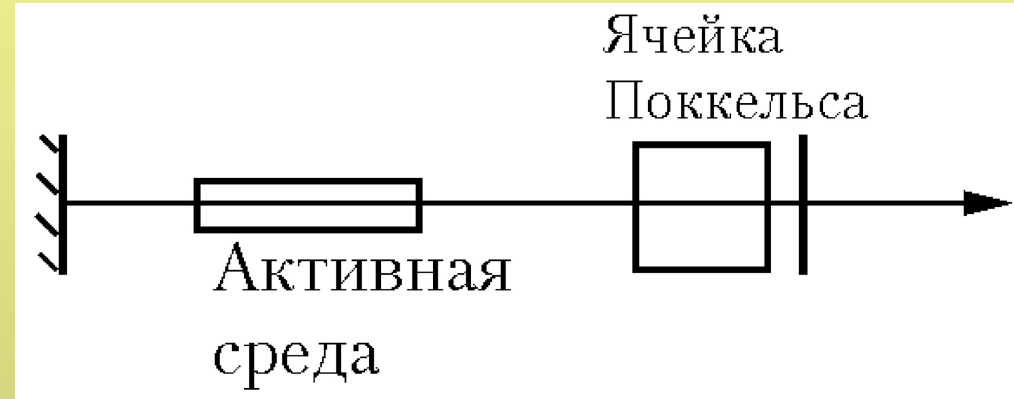
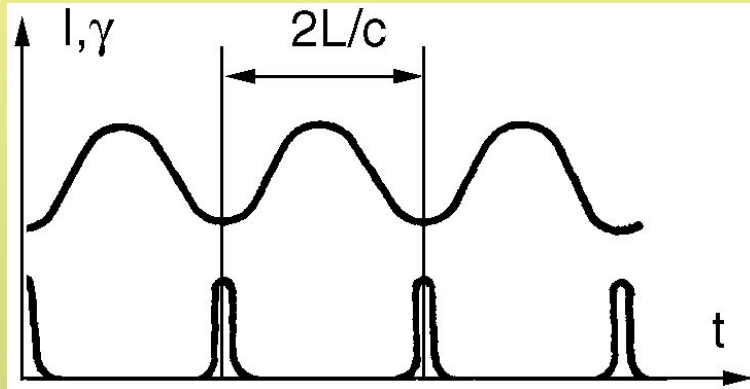


$$A(t) = E_0 \frac{\sin[(2n-1)(\Delta\omega t + \varphi)/2]}{\sin[(\Delta\omega t + \varphi)/2]}$$

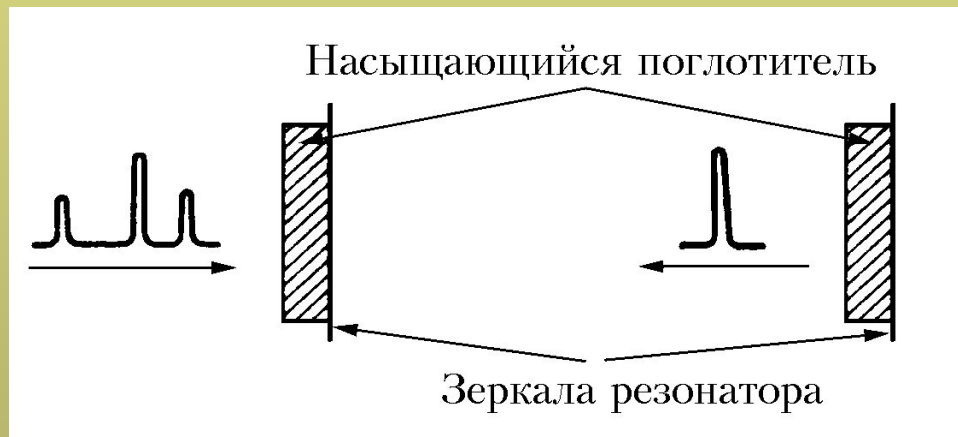
$$\Delta\tau_p \approx \frac{2\pi}{(2n+1)\Delta\omega}$$

Методы синхронизации мод

Активная синхронизация мод



Пассивная синхронизация мод

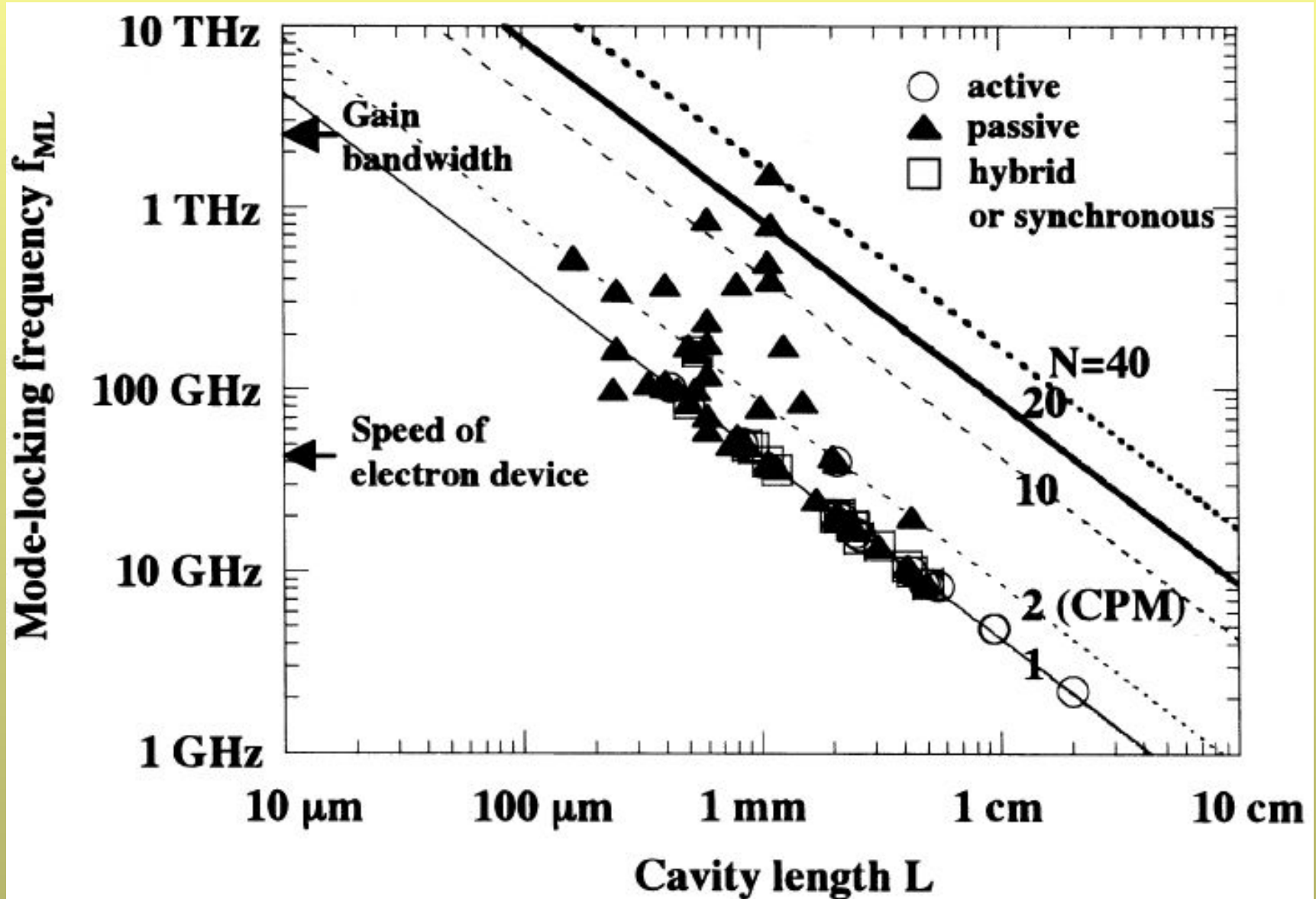


Методы генерации сверхкоротких импульсов

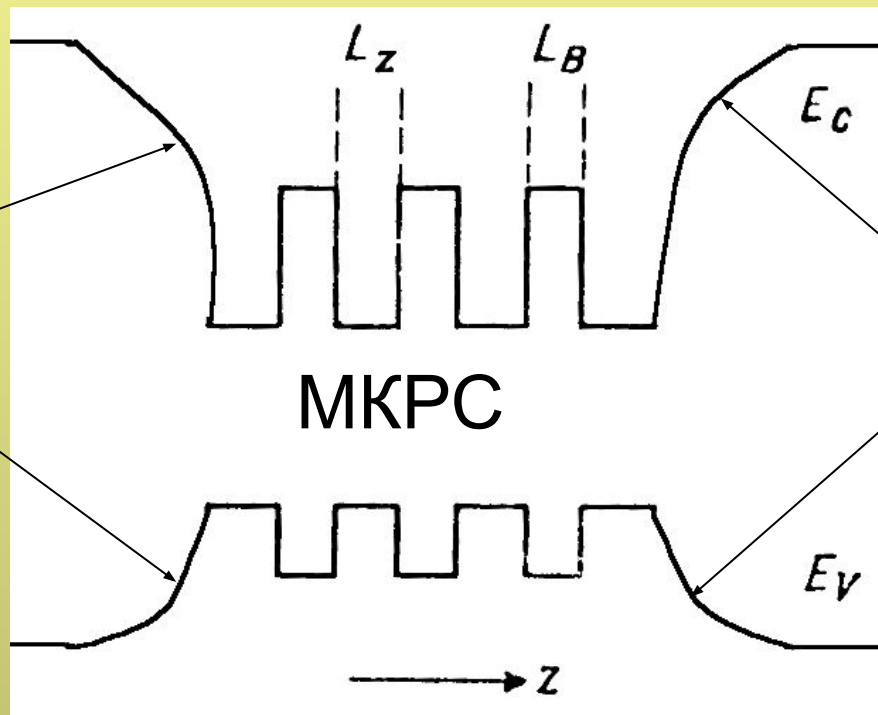
	Способ генерации	Длительность импульса эксперимент (теория)	Особенности
Модуляция добротности	Активная	— (~ 10 пс)	Большая максимальная выходная мощность; трудности в изготовлении элементов *; трудности в управлении работой элементов **
	Пассивная	20—100 пс (~ 10 пс)	
Модуляция усиления	Сильная гармоническая модуляция; возбуждение коротких импульсов тока	10—100 пс (~ 10 пс) 10—30 пс/ (~ 10 пс)	Простота и удобство; легкость реализации; позволяет менять частоту повторения импульсов
Синхронизация мод	Активная	10 пс — 30 пс/ / ($\sim 0,1$ пс)	Когерентность импульсов; необходимость внешнего резонатора; длительность импульсов близка к теоретическому пределу **
	Пассивная	0,6 пс — 30 пс/ / ($\sim 0,1$ пс)	

* Главным образом в активном режиме. ** Главным образом в пассивном режиме.

Частота синхронизации мод в современных полупроводниковых лазерах



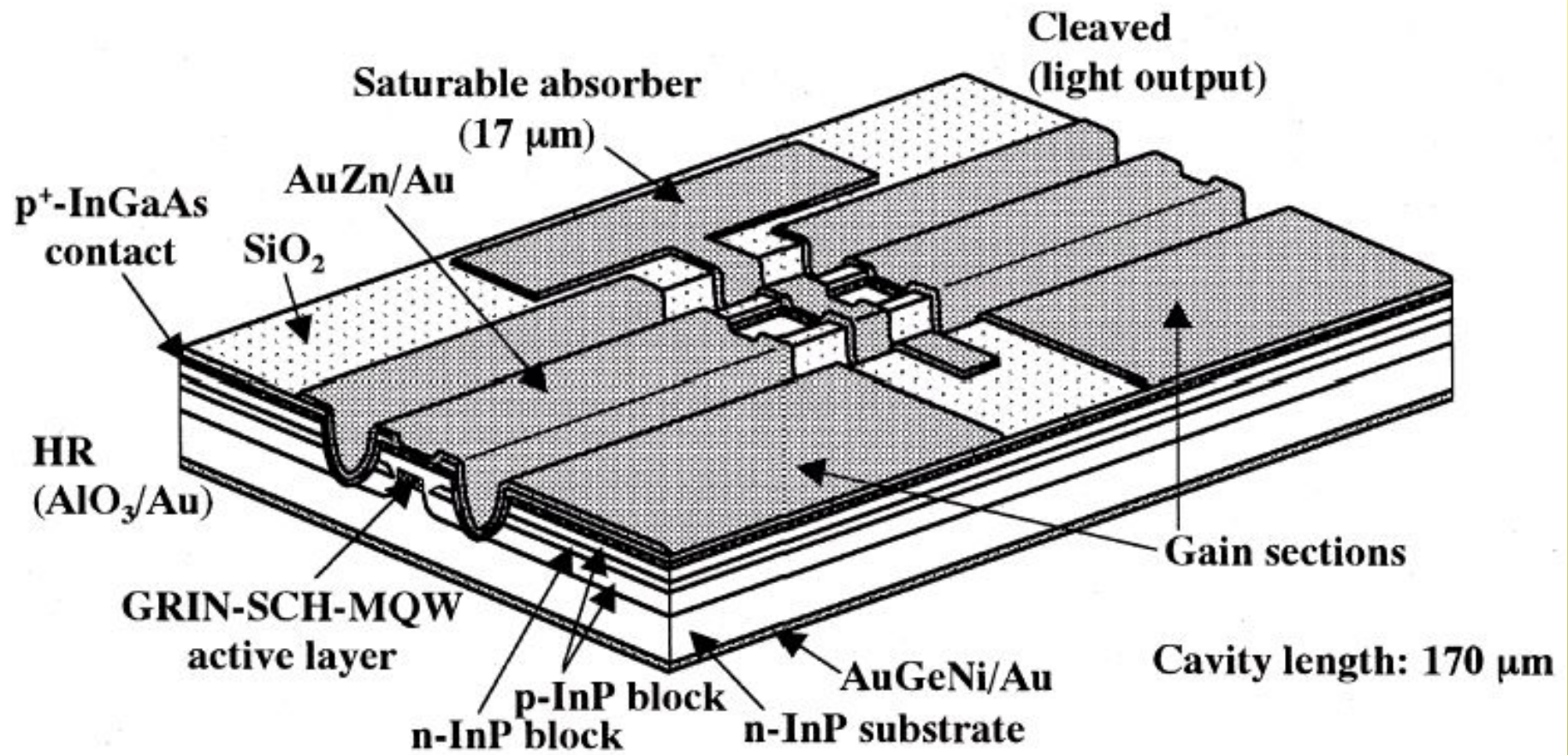
Структура лазера типа GRIN-SCH с многослойной квантоворазмерной структурой



градиентные
слои

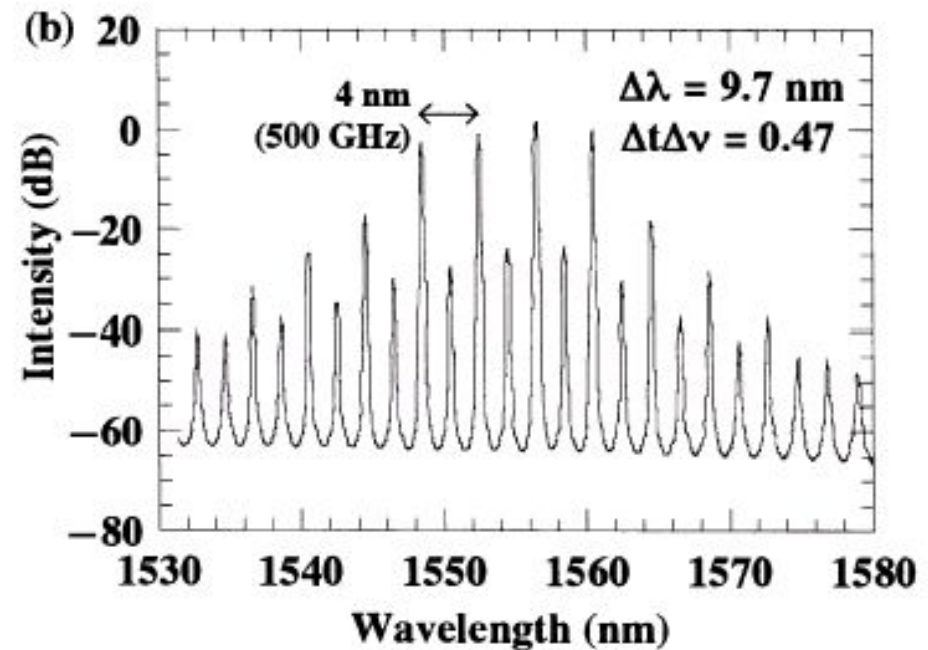
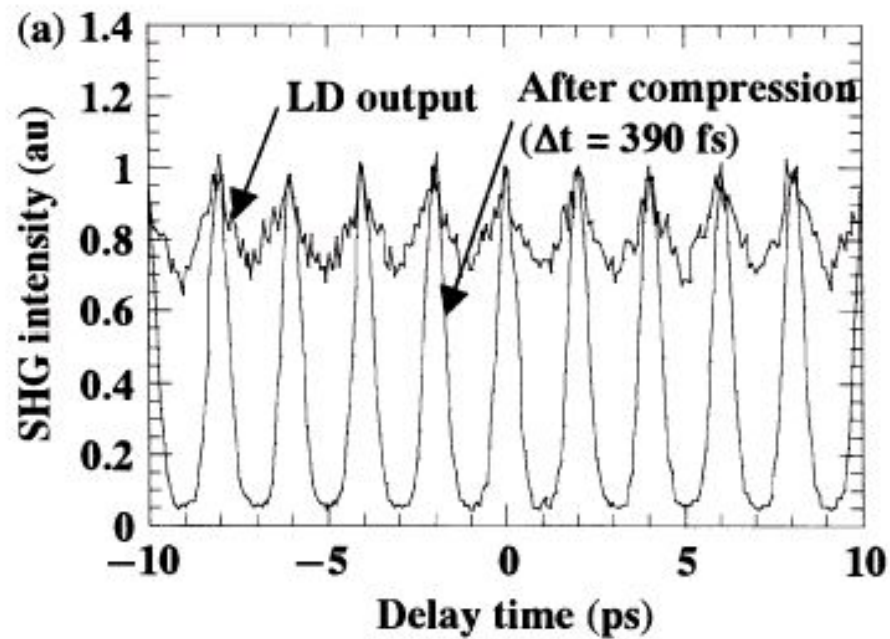
градиентные
слои

graded-index separated confinement heterostructure
colliding-pulse mode-locked LD (CPM-LD)

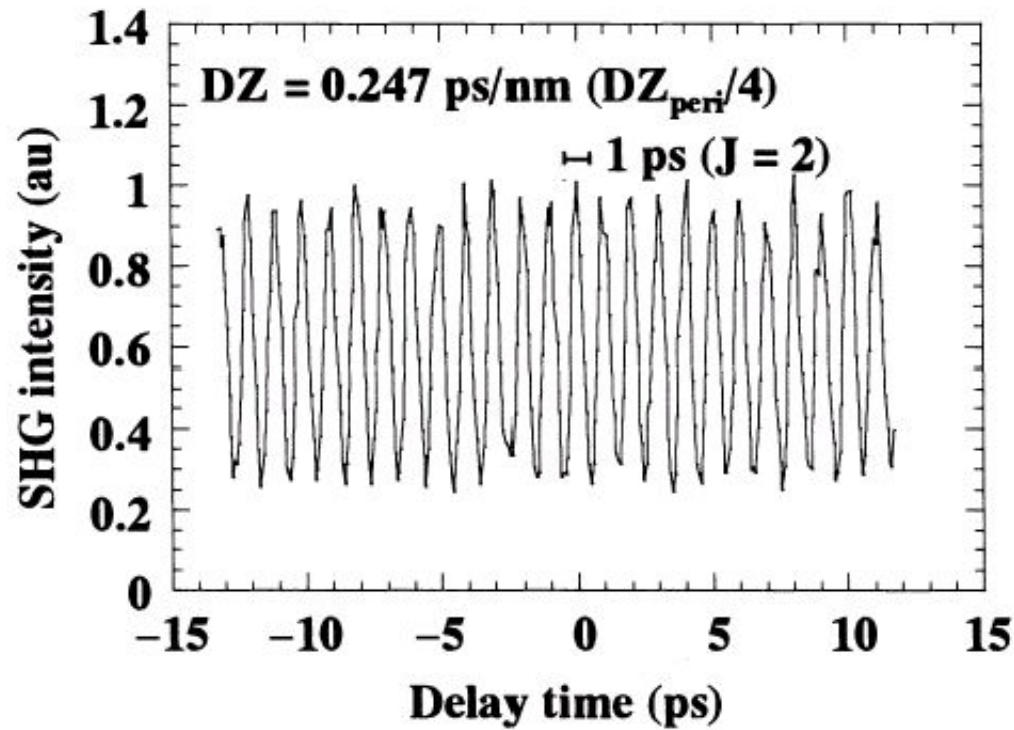


Device structure of a short-cavity GRIN-SCH-MQW CPM-LD.

Экспериментальные данные по получению цуга фемтосекундных импульсов в полупроводниковом лазере с синхронизацией мод (GRIN-SCH-MQW-CPM)

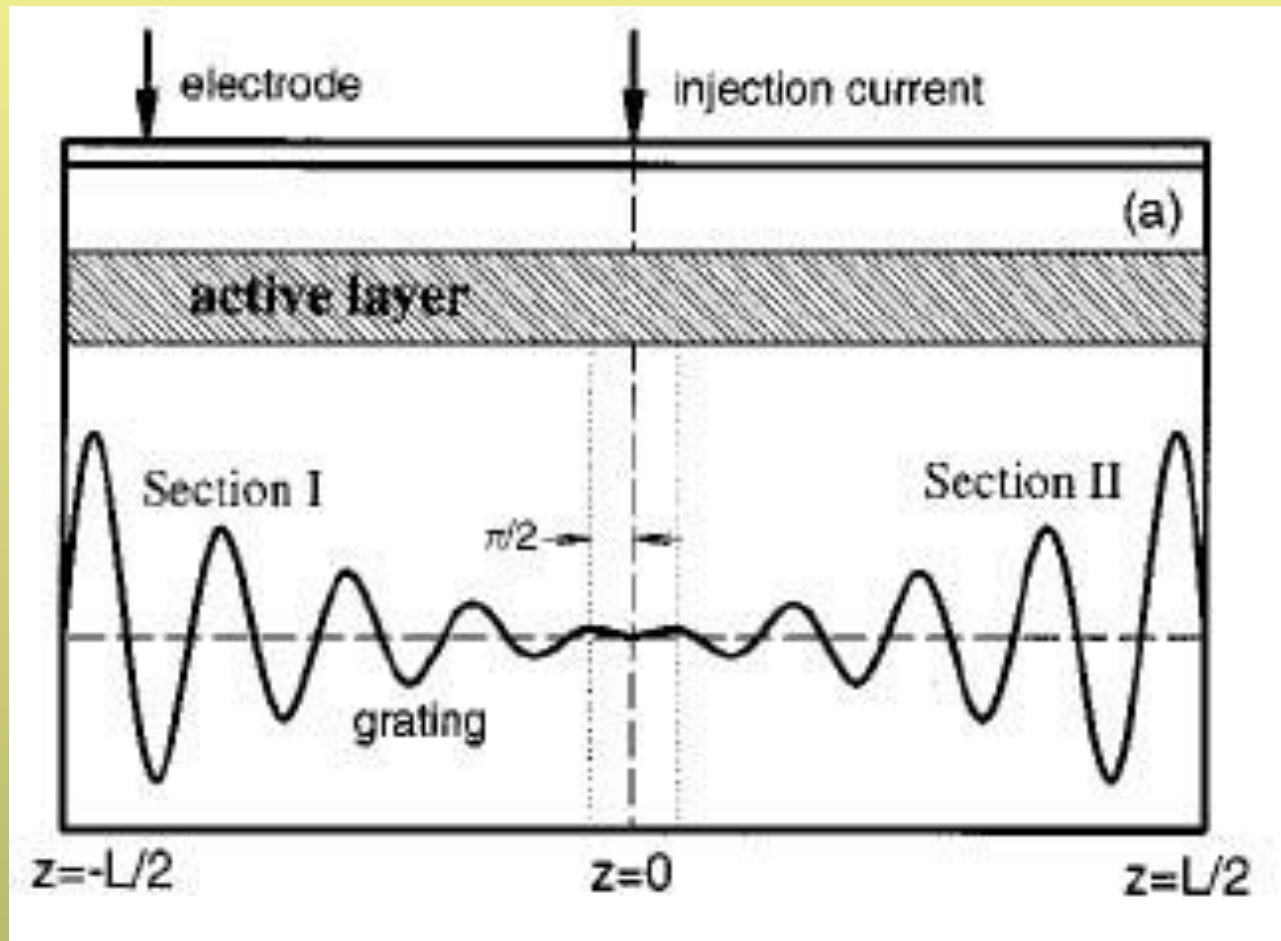


Временной цуг импульсов GRIN-SCH-MQW-CPM лазера с частотой 1 ТГц

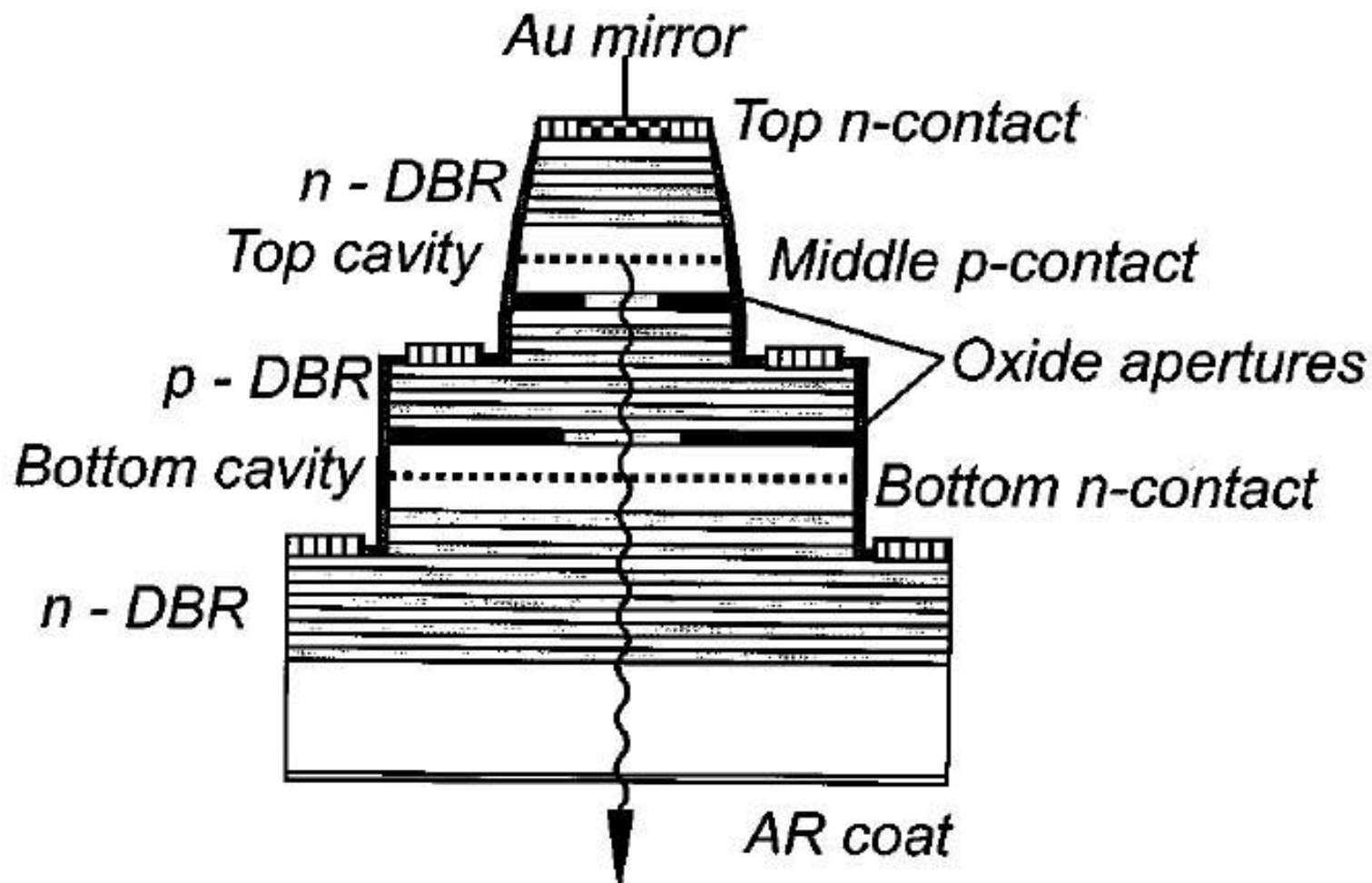


SHG correlation trace of 1 THz optical pulse train obtained by two-times multiplication of a 500-GHz CPM-LD.

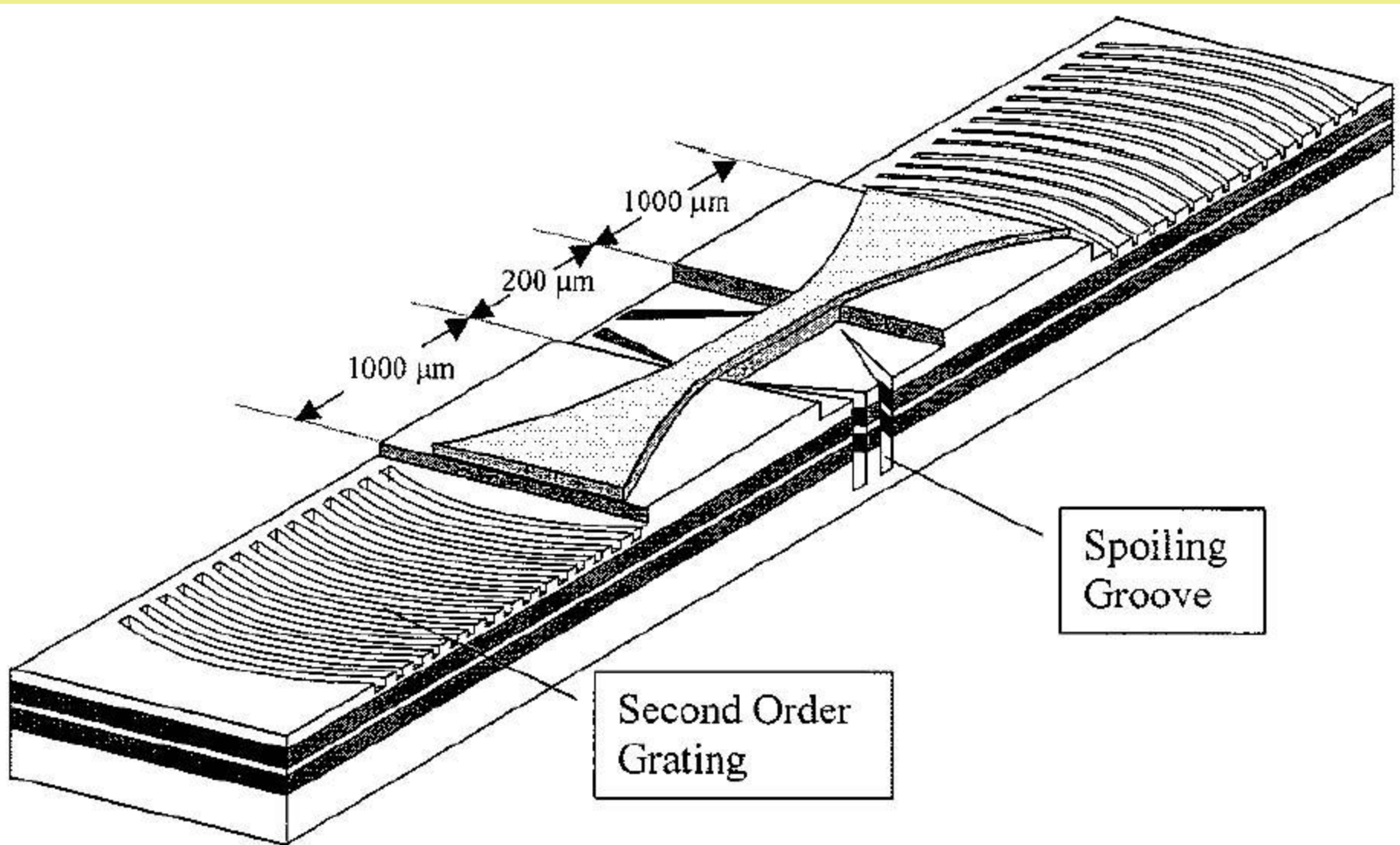
Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью

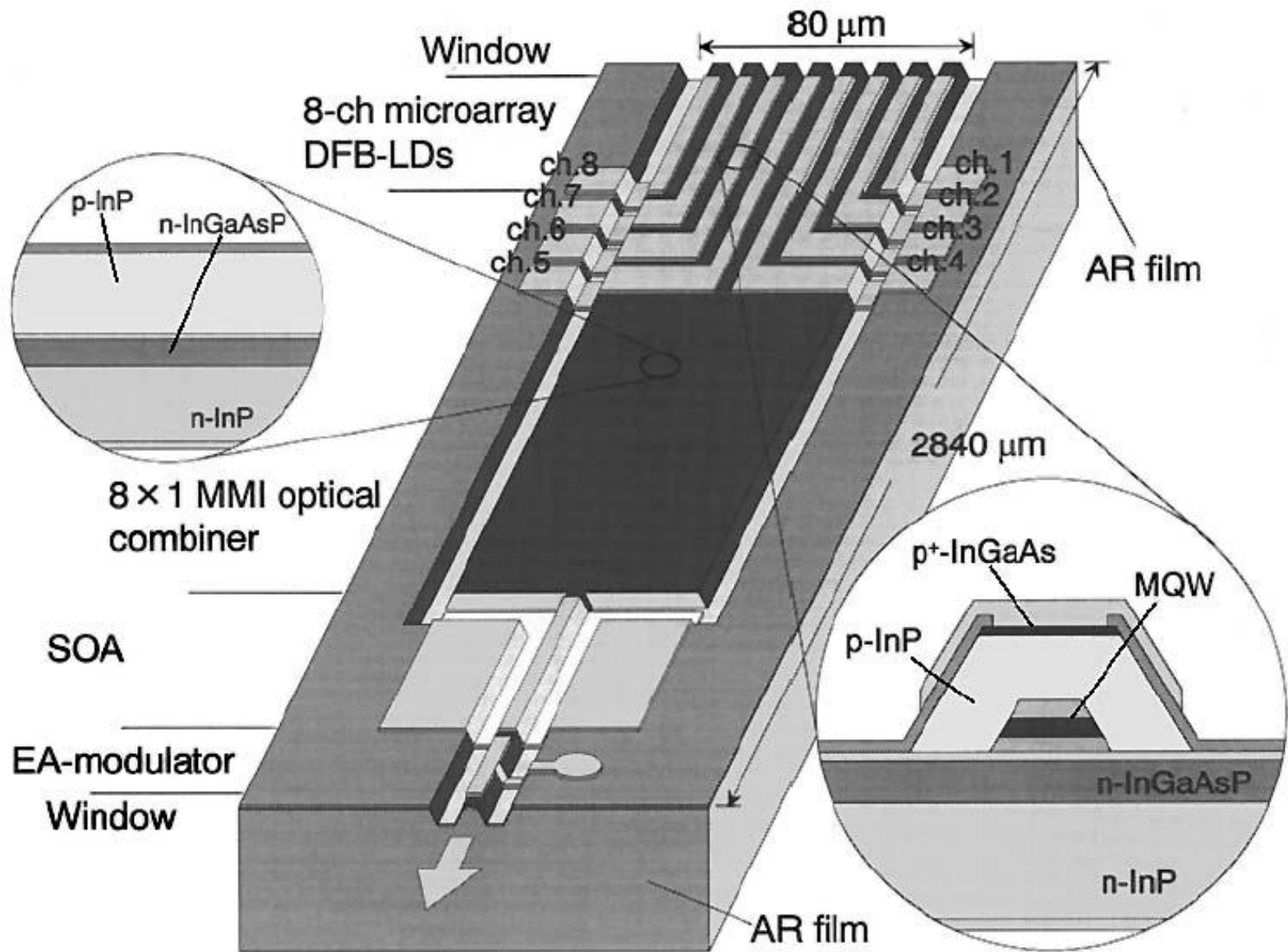


Вертикально-излучающий полупроводниковый лазер на двух длинах волн с брэгговскими зеркалами (DBR)



Вертикально-излучающий полупроводниковый лазер с брэгговскими зеркалами





Schematic structure of the wavelength-selectable eight-stripe microarray DFB-LD's with monolithically integrated MMI, SOA, and MOD.

Литература

- О.Звелто. Принципы лазеров.-М.:Мир, 1984
- Физика полупроводниковых лазеров.- М.:Мир, 1989
- Laser Focus World, 2000, Vol. 36, No. 4, 5, 6, 7
Semiconductor Lasers 2000.
www.optoelectronics-world.com