

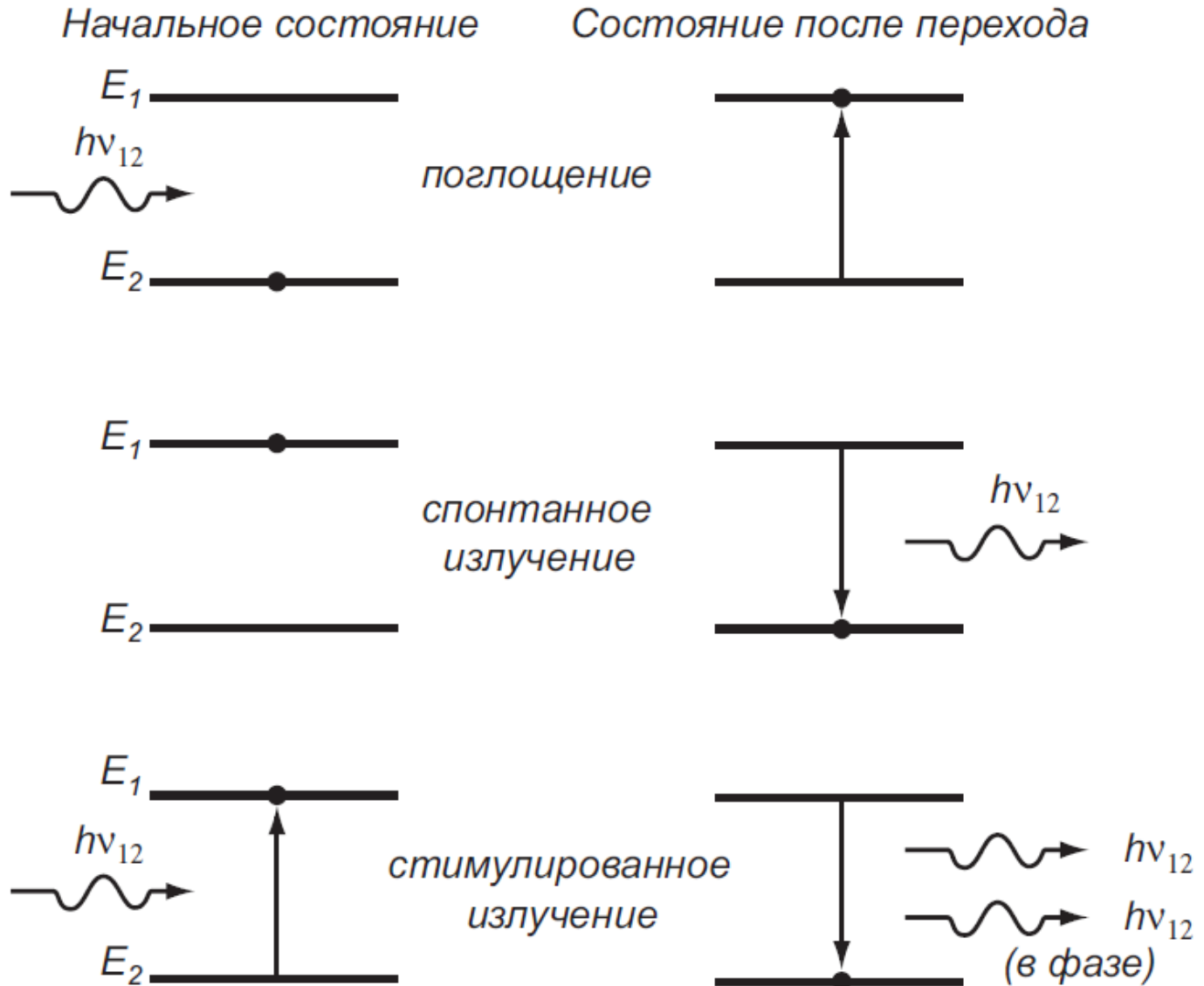
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Лáзер (англ. *laser*, акроним от *light amplification by stimulated emission of radiation*

«усиление света посредством вынужденного излучения»), или

опт́ический квáнтовый генерáтор — это устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.

Схема энергетических уровней, иллюстрирующая спонтанное и стимулированное излучение



Принципы и реализации

1. Инверсная заселенность

- реализуется путем инжекции неравновесных носителей

2. Стимулированное когерентное излучение - - реализуется путем высокого уровня инжекции (ток выше порогового значения)

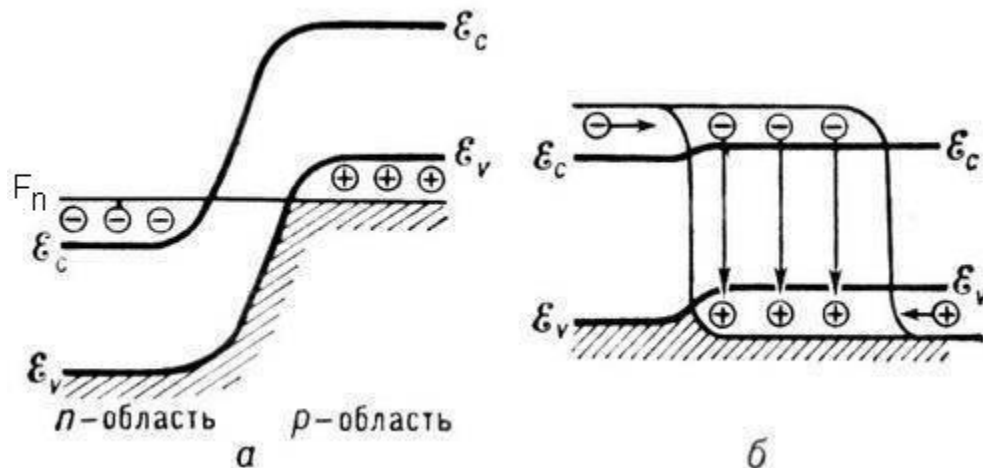
3 Узконаправленное и когерентное излучение – реализуется путем использования резонатора

Методы инжекции

Основным методом создания неравновесных носителей в оптоэлектронных устройствах является инжекция неосновных носителей через прямосмещённый электронно-дырочный переход (р-п-или гетеропереход)

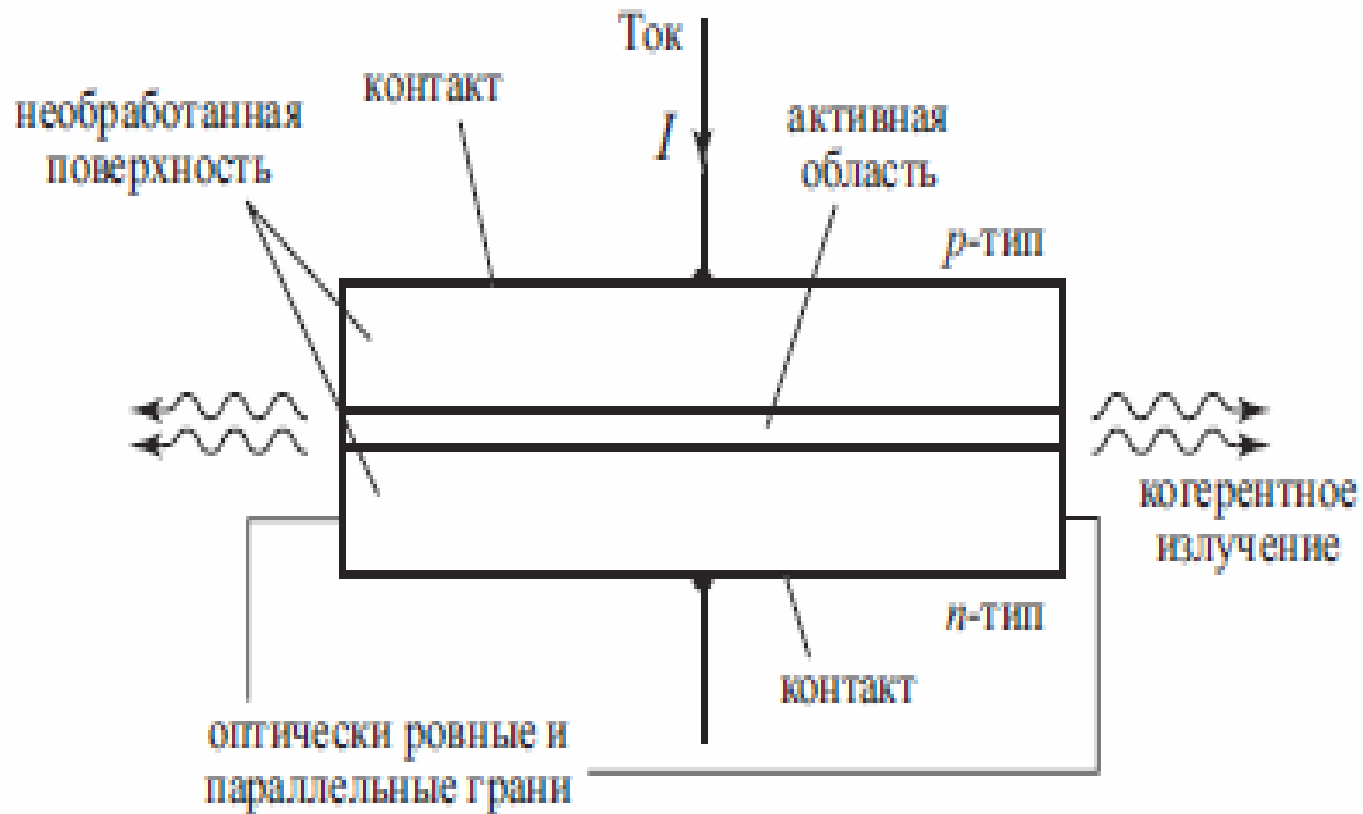
Зонная диаграмма

Инверсная населенность, необходимая для стимулированного когерентного излучения, формируется путем инжекции через прямосмещенный *p-n*-переход. **Резонатор**, необходимый для усиления когерентного излучения, формируется путем шлифовки граней кристалла. Для того чтобы **переходы с излучением преобладали над переходами с поглощением**, необходимо область рекомбинации в полупроводниковом лазере легировать до вырождения. При такой концентрации уровень Ферми F_n для *p*-области попадает в валентную зону, а уровни Ферми F_n для *n*-области — в зону проводимости.



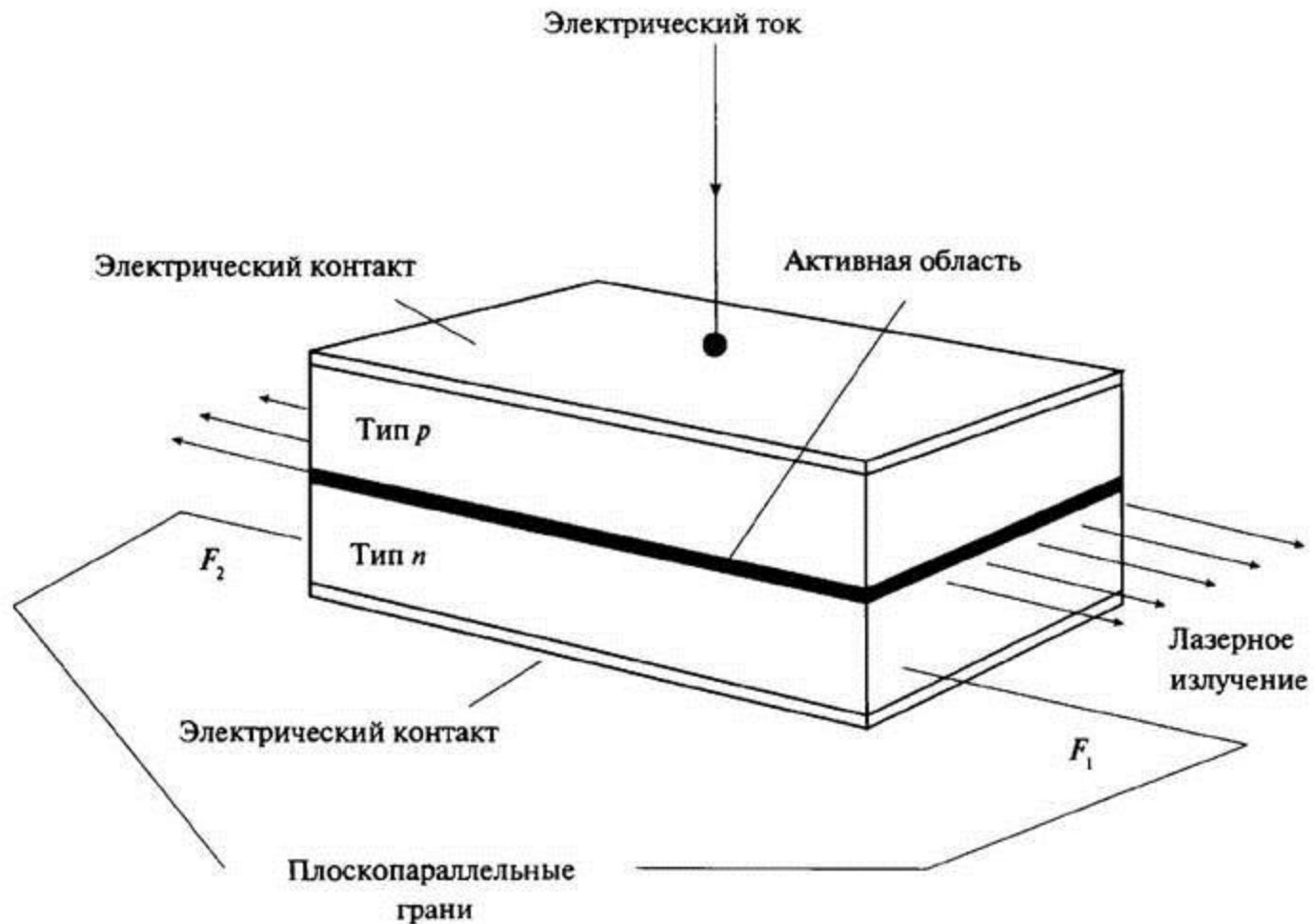
$$\Delta E = eU$$

Структура полупроводникового лазера на р-п гомопереходе



Структура полупроводникового лазера на гомопереходе.

Устройство простого полупроводникового лазера



Условие односторонней инжекции в р-п гомопереходе

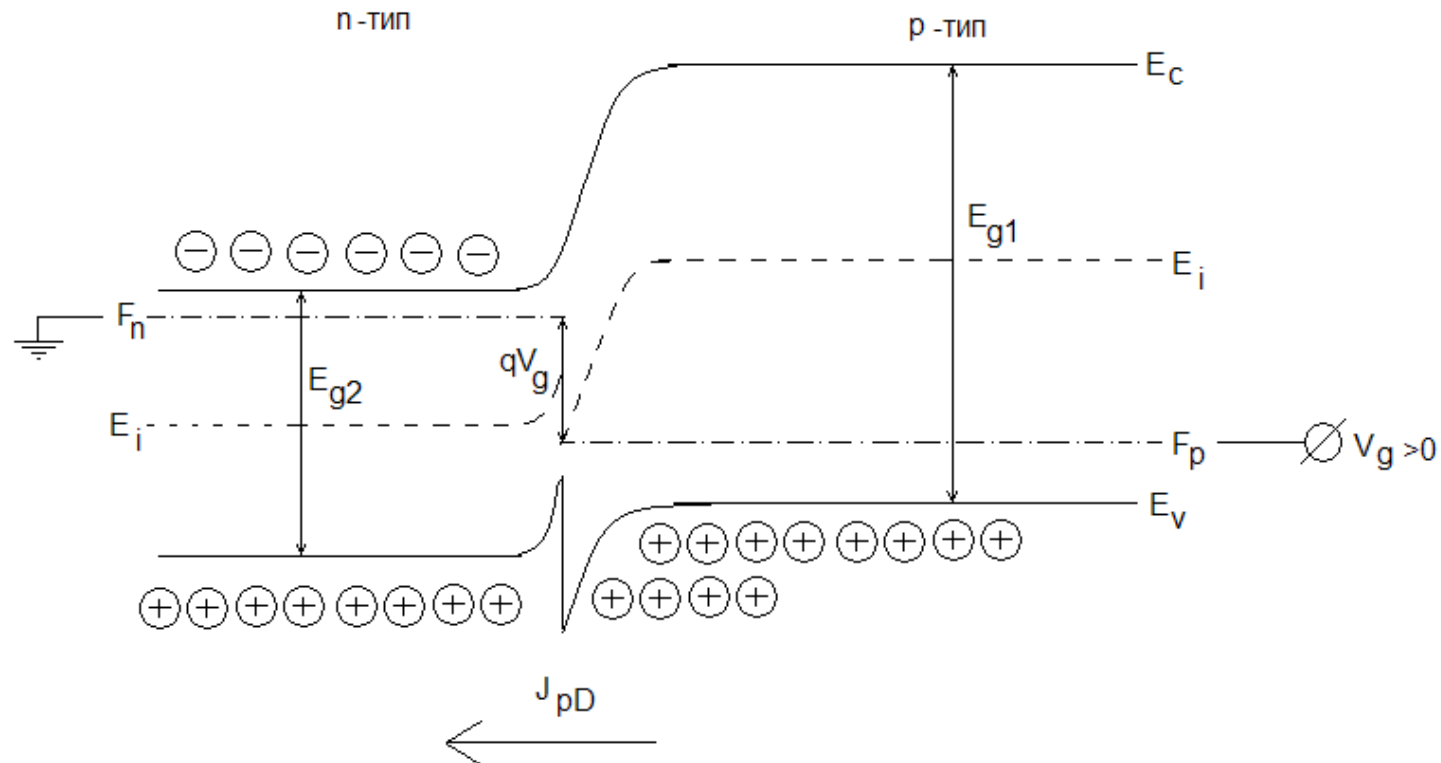
Из предыдущего соотношения следует, что доминирующая инжекционная компонента будет того типа, концентрация основных носителей в котором выше, т.е. в несимметричных р-п-переходах будет происходить преимущественно инжекция дырок (в случае р+ - п) или электронов (в случае п+ - р) соответственно.

Для несимметричных р-п-переходов величина основной инжекционной компоненты в токе р-п-перехода выражается соотношением:

$$\frac{j_p}{j_{p-n}} = \frac{j_p}{j_p + j_n} = \frac{1}{1 + \frac{j_n}{j_p}} = \frac{1}{1 + \frac{N_{ДБ}}{N_{АЭ}}} \approx 1 - \frac{N_{ДБ}}{N_{АЭ}}$$

Зонная диаграмма р-n гетероперехода

Рассмотрим р-n-переход, у которого ширина запрещённой зоны n-полупроводника больше, чем у р-полупроводника.



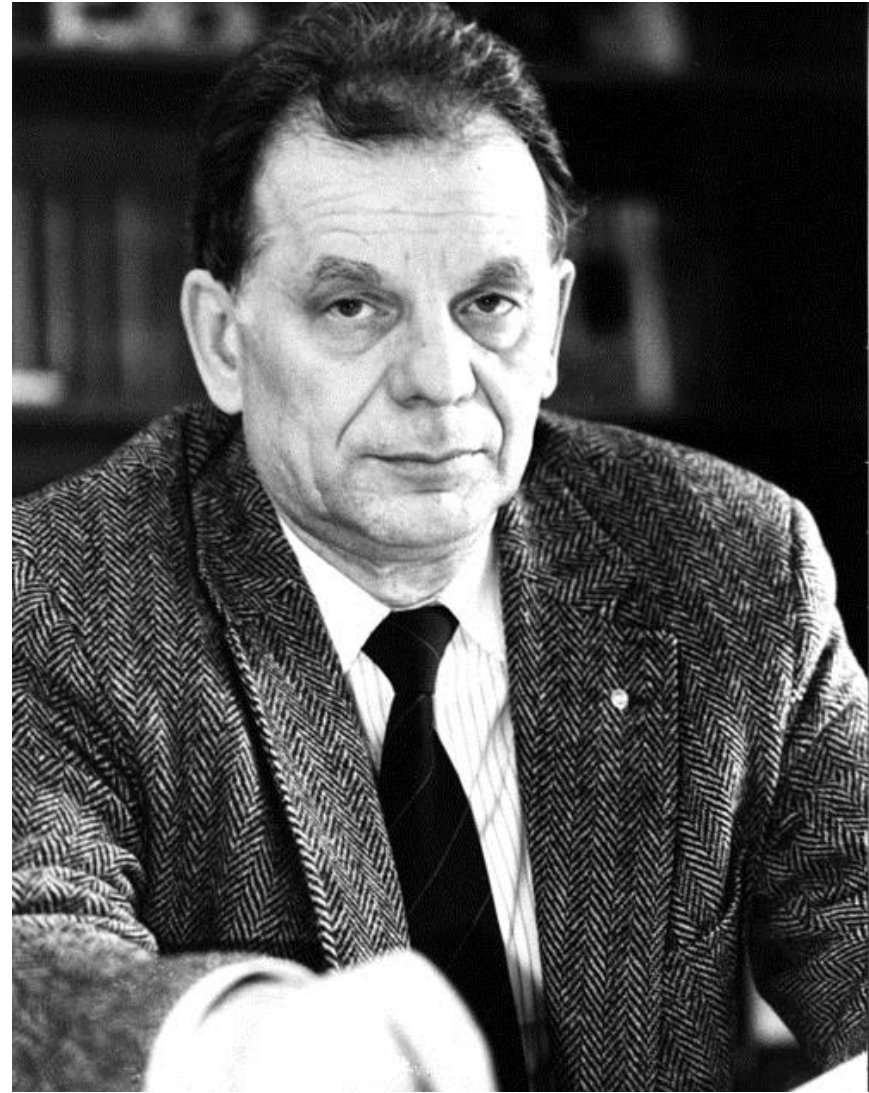
Условие односторонней инжекции в гетеропереходе

Как правило, в гетеропереходах ширина запрещённой зоны компонент гетероперехода отличается в 1.5-2 раза. Вследствие этого значение собственной концентрации n_i , будут отличаться на много порядков. Если электронное сродство одинаково, для гетеропереходов доля инжекционного тока в полном токе гетероперехода будет:

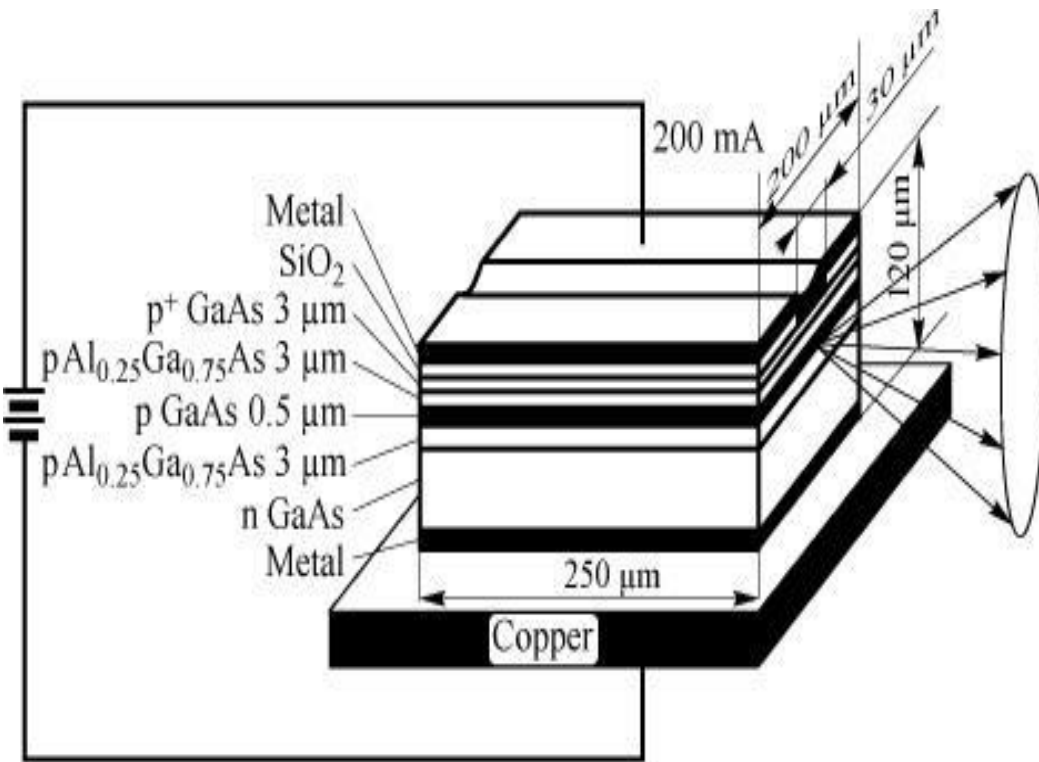
$$\frac{j_p}{j_{p-n}} = \frac{j_p}{j_p + j_n} = \frac{1}{1 + \frac{j_n}{j_p}} = \frac{1}{1 + \frac{n_{iЭ}^2}{n_{iБ}^2} \frac{N_{ДБ}}{N_{АЭ}}} \approx 1 - \frac{n_{iЭ}^2}{n_{iБ}^2} \frac{N_{ДБ}}{N_{АЭ}}$$

Из уравнения следует, что при прочих равных условиях инжекционная компонента тока из широкозонного полупроводника будет всегда выше, чем из узкозонного. Использование гетеропереходов может обеспечить одностороннюю инжекцию из слаболегированного полупроводника в сильнолегированный, что невозможно для p-n гомопереходов.

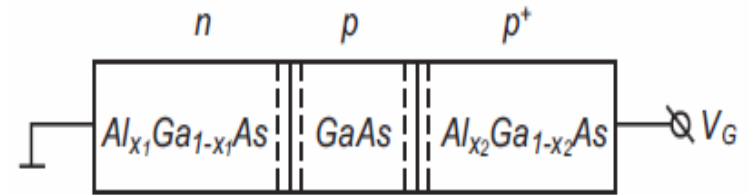
Чтобы соблюсти все условия, одного р-п-перехода в кристалле оказывается недостаточно, и приходится изготавливать многослойные полупроводниковые структуры, так называемые гетероструктуры, за изучение которых российский физик академик Жорес Алферов получил Нобелевскую премию 2000 года.



Лазеры на гетероструктурах

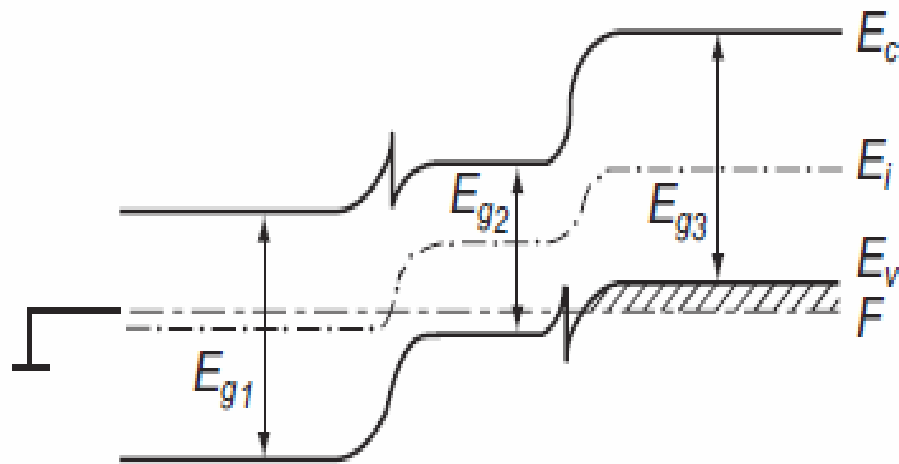


Схематичное изображение первого в мире п/п лазера, работавшего в непрерывном режиме при комнатной температуре.

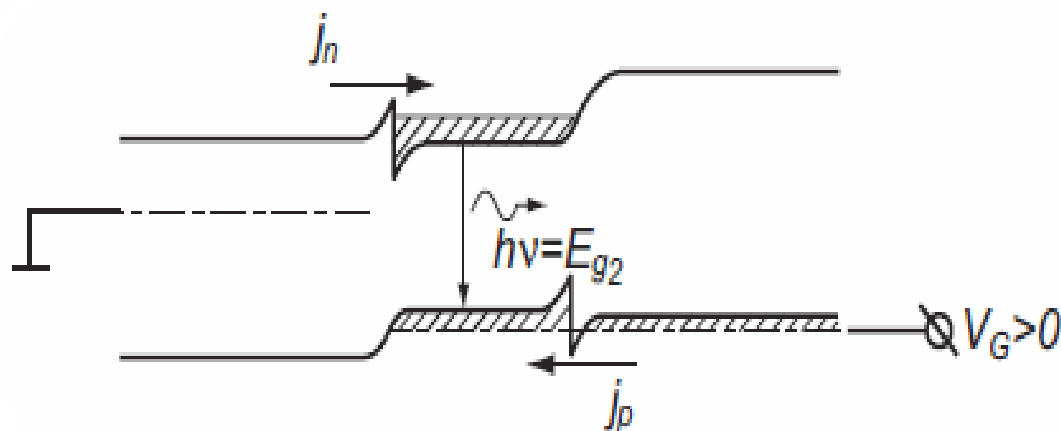


- * Один гетеропереход - $n\text{-GaAs-pGe}$,
- * $p\text{-GaAs-nAl}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$;
- * Два гетероперехода - $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - p\text{-GaAs} - p^+\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Зонная диаграмма двойной гетероструктуры



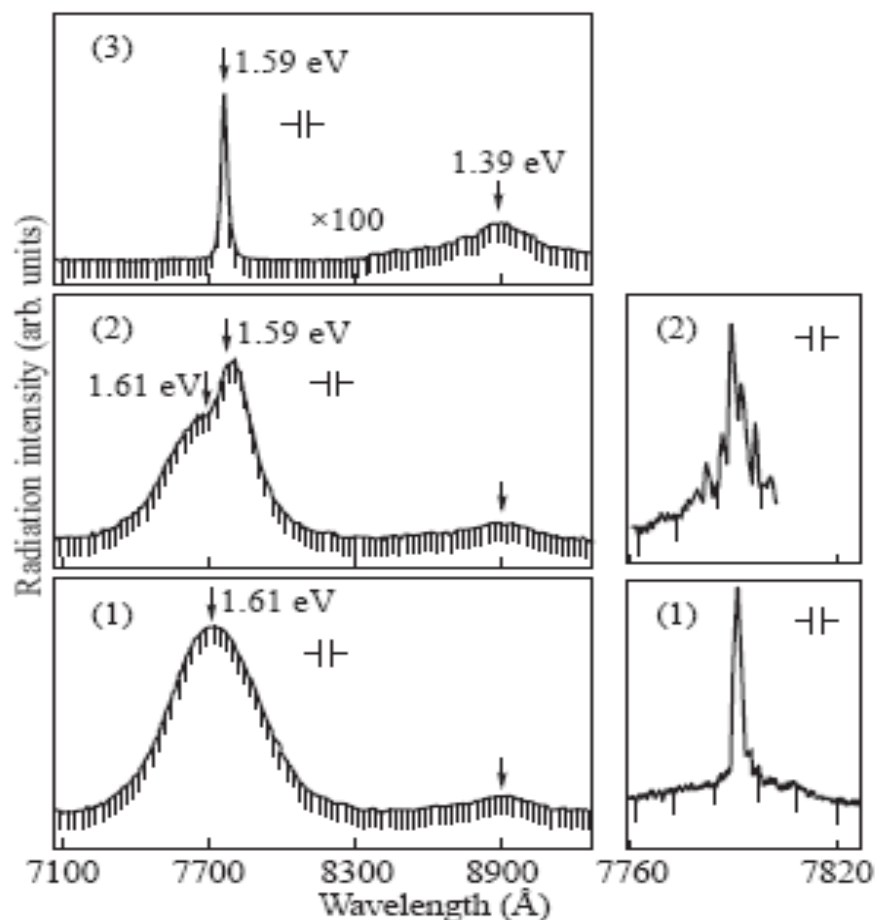
при нулевом
напряжении



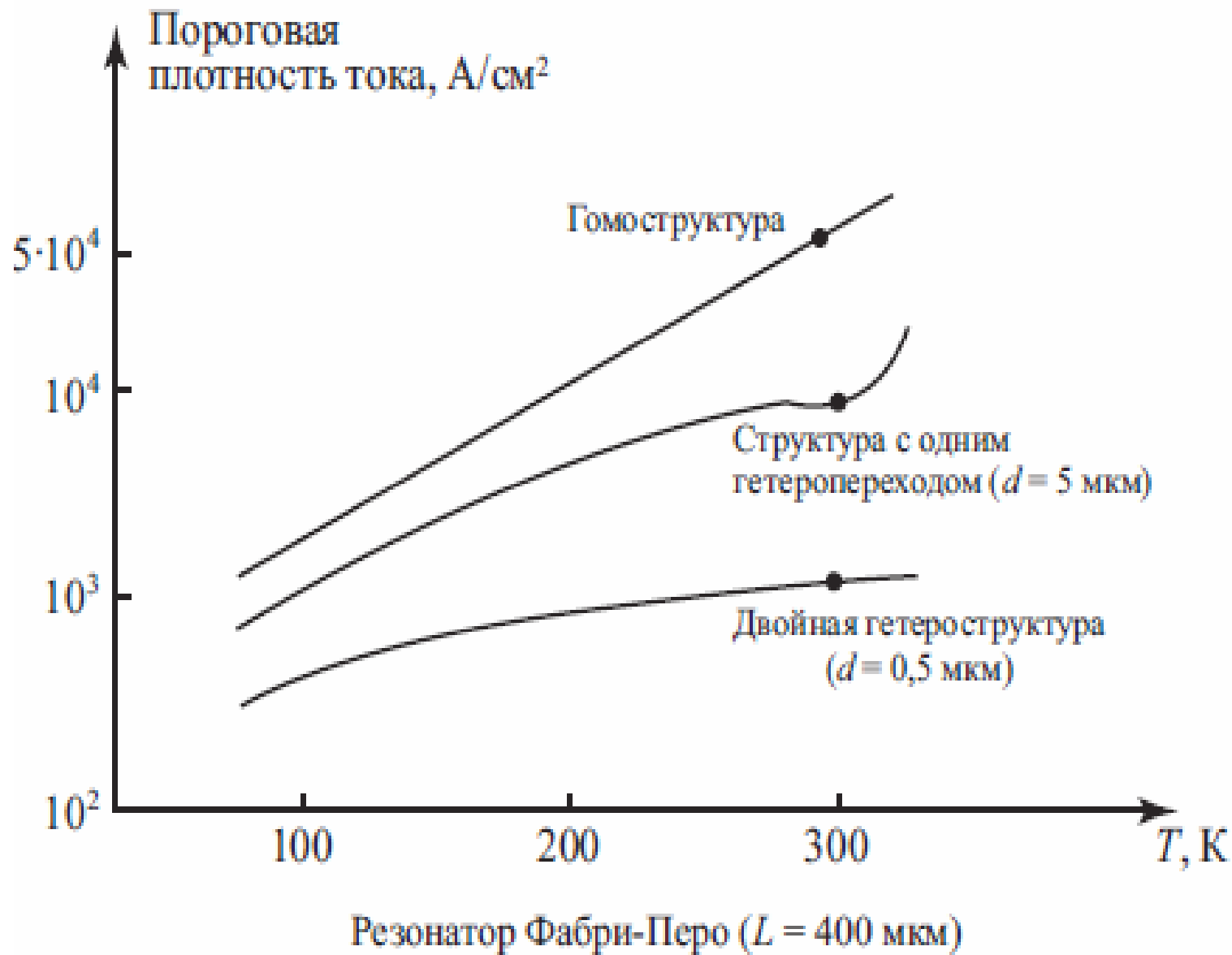
в активном режиме
генерации
лазерного
излучения

Лазерный пик

1970г. – реализован непрерывный режим лазерной генерации на ДГС.



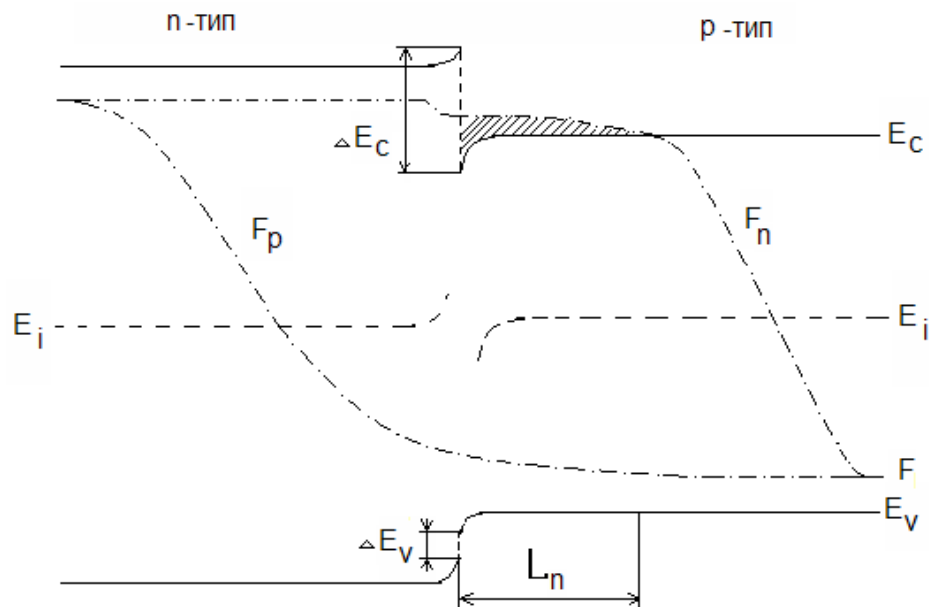
Спектр генерации первого низкорогового AlGaAs - ДГС лазера, работающего при комнатной температуре (300К).
 $J_{th} = 4300 \text{ A/cm}^2$. Ток возрастает от 0.7А (1) до 8.3А (2) и 13.6А (3).



Явление сверхинжекции в гетеропереходах

Использование гетеропереходов позволяет реализовать явление сверхинжекции, не наблюдаемое в гомопереходах.

Сверхинжекцией называют процесс инжекции через прямосмещённый гетеропереход, позволяющий получить концентрацию инжектированных неосновных носителей в базе выше, чем основных носителей в эмиттере. Схематично явление сверхинжекции приведено на рисунке:



НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Рабочее вещество	Т, К	λ , мкм	Пороговая плотность тока, кА/см ²	Мощность излучения, Вт	
				непрерывная	импульсная
GaAs	4—20	0,84	0,1	12	—
	77—90	0,85—0,86	0,5	3—4	5—100
	300	0,89	1	0,2	10
	400	0,92	7,5	—	—
Al _x Ga _{1-x} As	77	0,66	—	0,05	—
	300	0,77	2—3	0,01	—
InAs	4—20	3,2	1	0,05	0,1
InSb	4,2	5,2	0,5	—	—
PbS	4,2	4,3	0,35	0,01	—
Pb _{1-x} Sn _x Te	12	9—11	0,05—0,4	0,001	0,01

ПОЛУПРОВОДНИКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ГЕТЕРОЛАЗЕРАХ

Активный слой	Широкозонные эмиттеры	Подложка	Диапазоны длин волн, мкм	Рабочая темп-ра, К
GaInPAs	GaInP; GaInPAs	GaAs	0,575—0,800	77
			0,637—0,660	300
GaPAs	AlGaPAs	»	0,74—0,80	300
AlGaAs	AlGaAs; AlGaAsP	»	0,69—0,90	300
GaAs	AlGaAs; AlGaAsP; GaInP	»	0,88—0,90	300
GaAsSb	AlGaAsSb	»	0,945—1,00	300
GaInAs	GaInP	»	0,90—1,15	300
GaInAsP	InP; GaInAsP	InP	1,0—1,67	300
GaSb	AlGaAsSb	GaSb	1,6—1,8	300
AlGaAsSb	AlGaAsSb	»	1,3—1,6	300
GaInAsSb	GaSb	»	1,8—2,0	77
PbSSe	PbS	PbS	4,1—6,4	20—180
PbSnTe	PbTe	PbTe	10—16	4—110

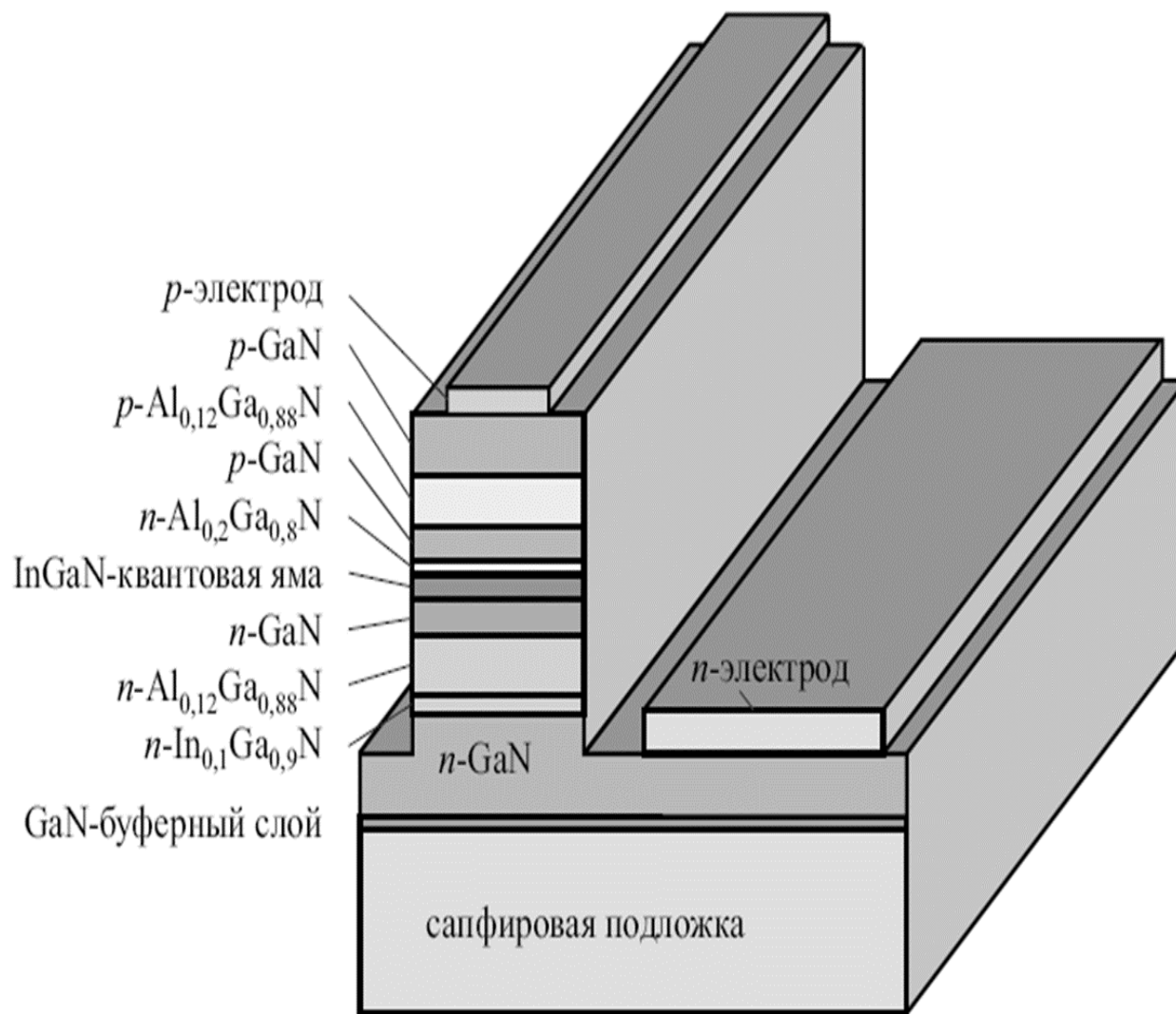


Схема голубого инжекционного лазера на основе нитрида галлия с двойной гетероструктурой и квантовой ямой

Применение полупроводниковых лазеров

Системы записи и считывания информации.

Считывающие головки в компакт-дисковых системах, оптические диски для ПЗУ и ОЗУ.

Волоконно-оптическая связь (GaAs).

Использован лазер на четверном сплаве InGaAsP с большим сроком службы (около 5×10^5 часов).

Оптические коммуникации.

Чувствительные химические детекторы.

Анализаторы загрязнения атмосферы.