

OPTOELECTRONICS (I)

Chapter 11: Light Sources

Mohammad Ali Mansouri- Birjandi

Department of Electrical and Computer Engineering
University of Sistan and Baluchestan (USB)

mansouri@ece.usb.ac.ir
mamansouri@yahoo.com

Contents

11. Light Sources

11-1 The LED

- Biasing and Optical Power
- Time and Frequency Response
- Emission Efficiency

11-2 The Laser Diode

- Properties of Lasers
- Types of Semiconductor Lasers

Contents

□ منابع نوری

□ دیود نور گسیل (LED)

□ منحنی مشخصه های LED

□ ساختار LED های پیشرفته

❖ لیزر (LASER)

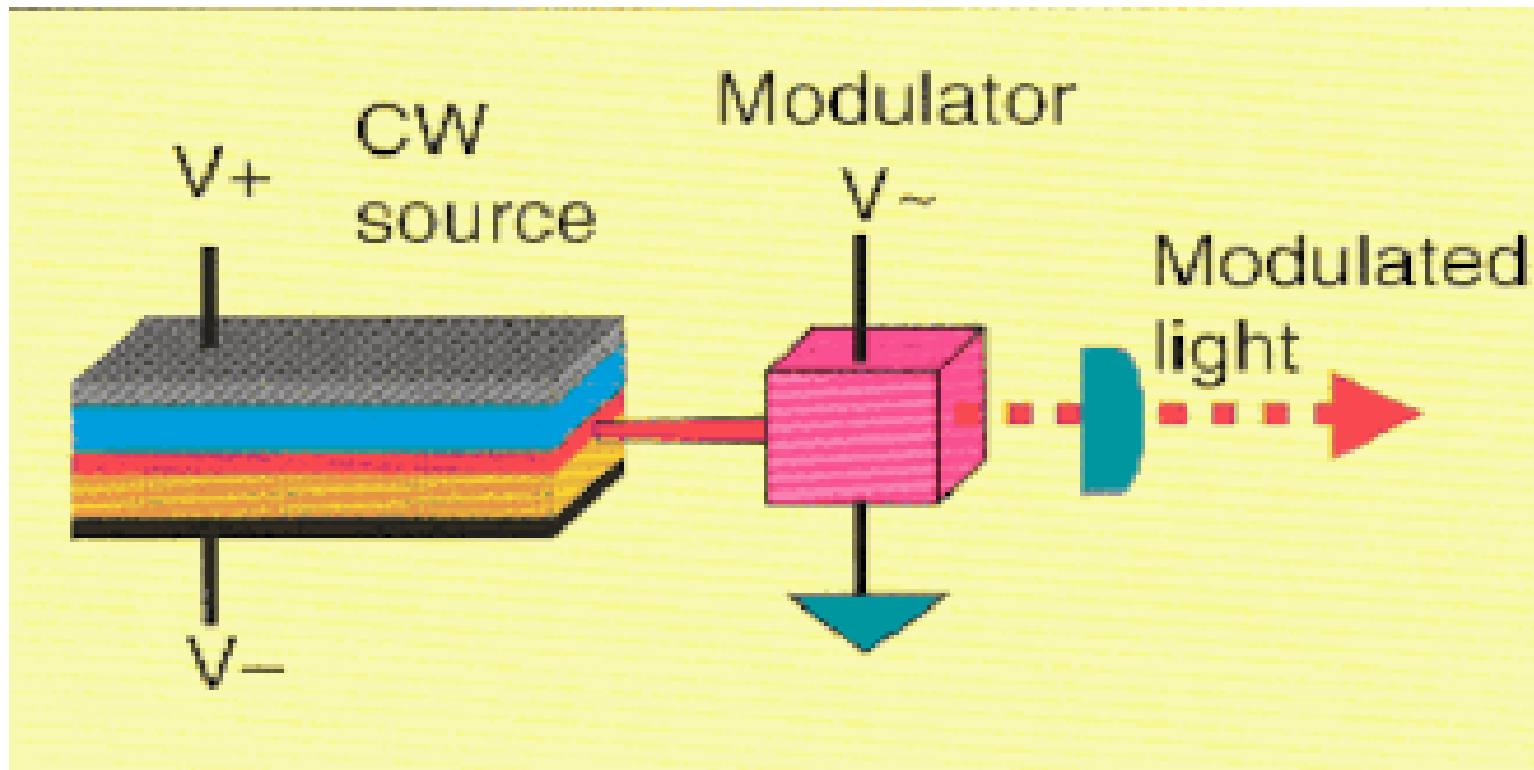
(Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation)

❖ منحنی مشخصه های لیزر

❖ انواع لیزر

❖ لیزرهای قابل تنظیم با کاواک خارجی

Light Sources



Light Sources

❖ منبع نوری ، سیگنالهای الکتریکی را به سیگنالهای نوری تبدیل می کند

❖ دو نوع قطعه در منابع نوری وجود دارد:

۱. **Light Emitting Diode(LED)**

۲. **Semiconductor LASER**

Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation

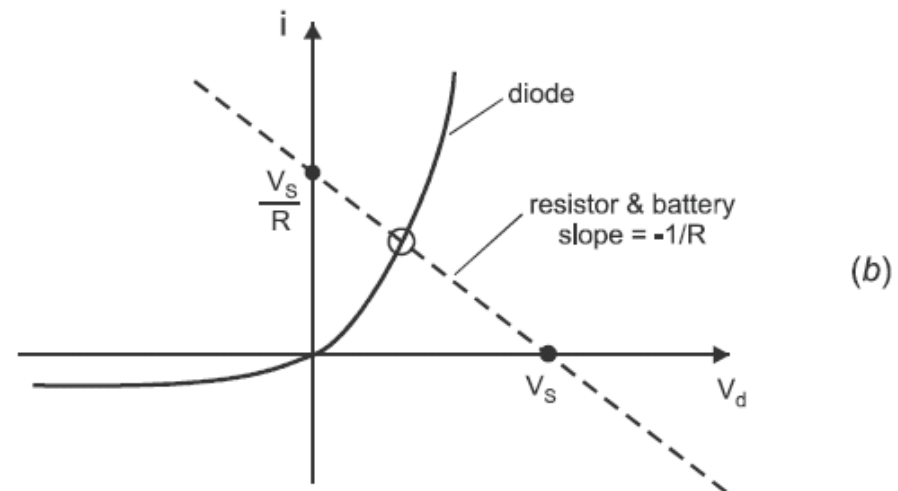
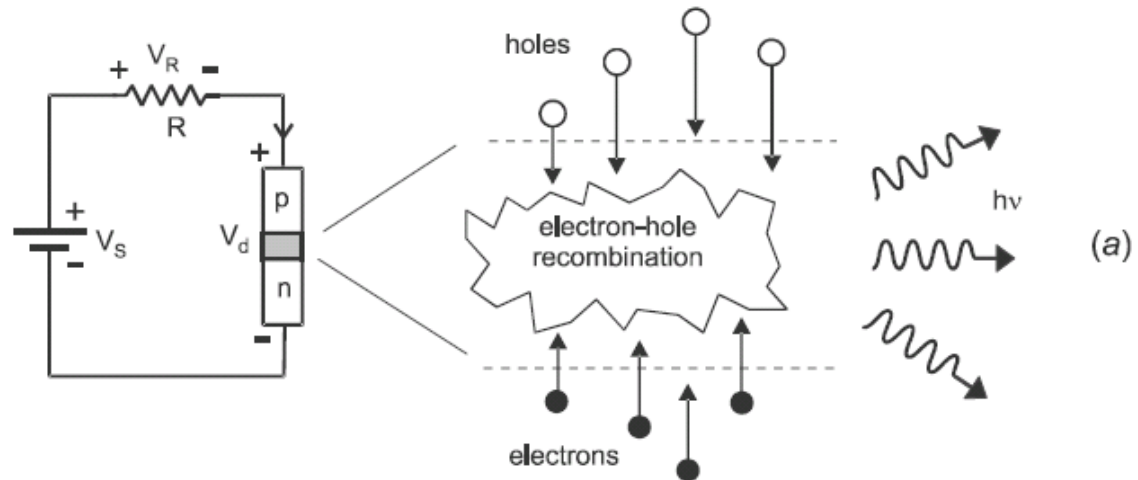
تقویت نور بوسیله گسیل تحریک شده ی نور

11-1. THE LED (*Light-Emitting Diode*)

Figure 11-1

(a) A simple circuit for biasing an LED.

(b) The operating point for this circuit occurs where the load line (dashed) intersects the diode curve (solid).



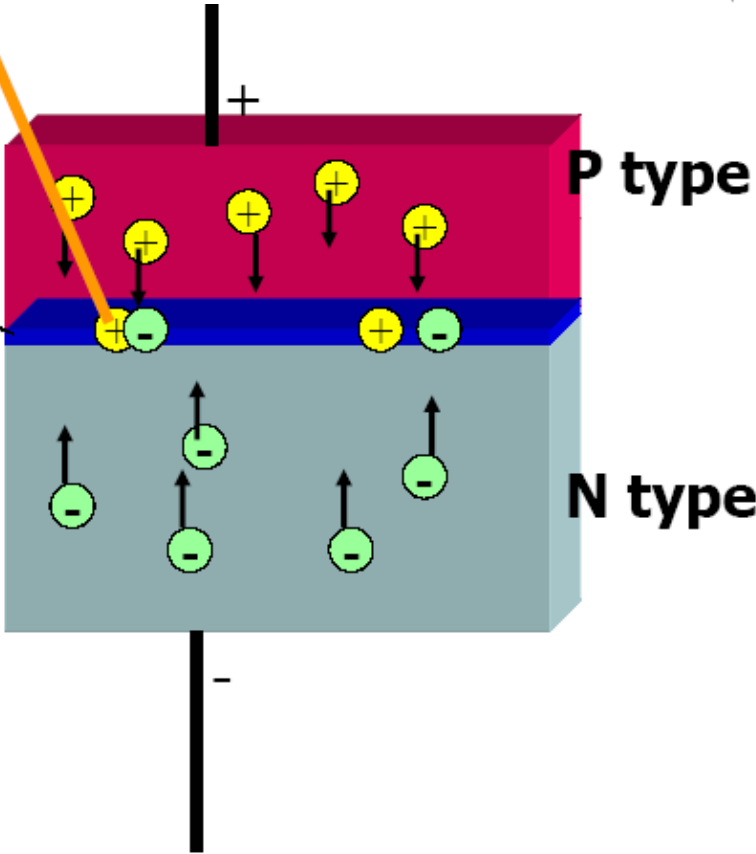
11-1. THE LED (*Light-Emitting Diode*)

$$P_{\text{opt}} = \left[\frac{\text{recombinations}}{\text{unit time}} \right] \left[\frac{\text{photons}}{\text{recombination}} \right] \left[\frac{\text{energy}}{\text{photon}} \right] = \left(\frac{i}{e} \right) \eta_i h\nu$$

$$P_{\text{opt}} \sim \eta_i P_{\text{elec}}$$

η_i : internal efficiency

unction
layer



مقدمه

❖ معایب LED:

- ۱- خروجی نور ضعیف
- ۲- طیف گسترده و غیرهمدوس
- ۳- پاسخ کند افزاره

❖ مزایای LED:

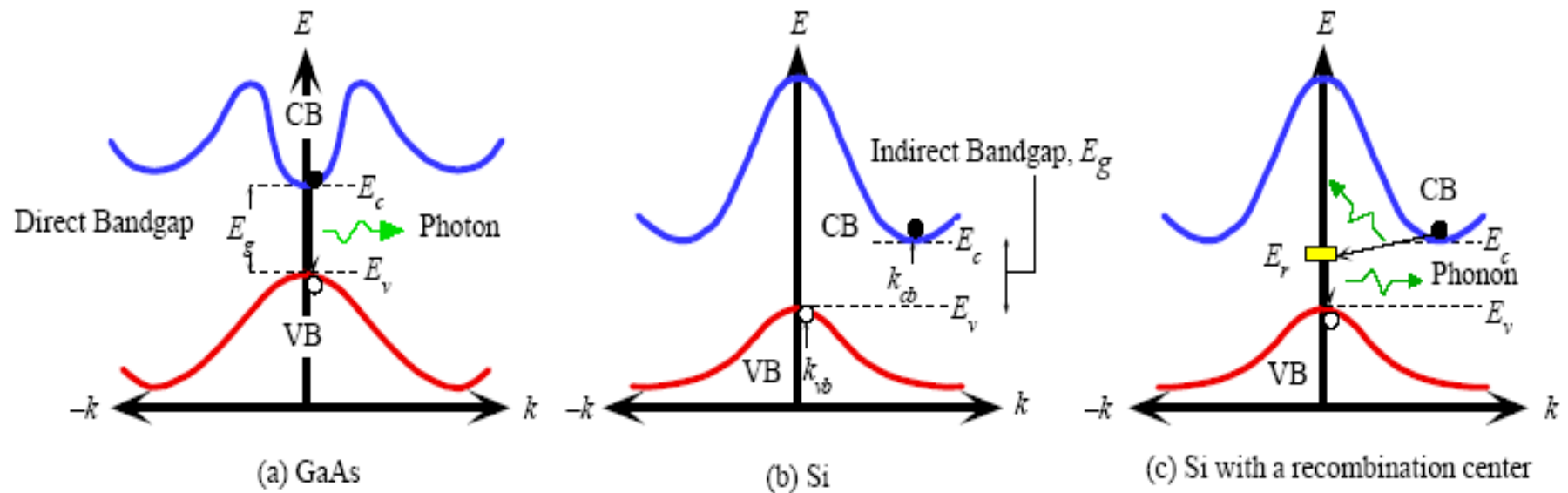
- ۱) هم به عنوان **مبدل سیگنال نوری** و هم به عنوان **نمایشگر** استفاده میشود.
- ۲) چون به هیچ کاواک خاصی برای عملکردش نیاز ندارد **ساخت آن ساده تر** است.

❖ **کاربرد دیود لیزر:** هر گاه سرعت مدوله کردن بیشتر از ۵ هرتز یا خروجی نور با طیف خاص لازم باشد.

❖ پهنای طیف نور خروجی LED از مرتبه $k_B T$ است. (متناظر با گستره طول موج $400 - 300 \text{ \AA}$ در دمای اتاق است.)

❖ **سیلیسیم در الکترونیک نوری:** به دلیل اینکه Si با شکاف انرژی غیر مستقیم است باز ترکیب تشعشی ضعیفی دارد پس جهت گسیل نور ناتوان است.

مقایسه باند انرژی مواد مستقیم و غیرمستقیم



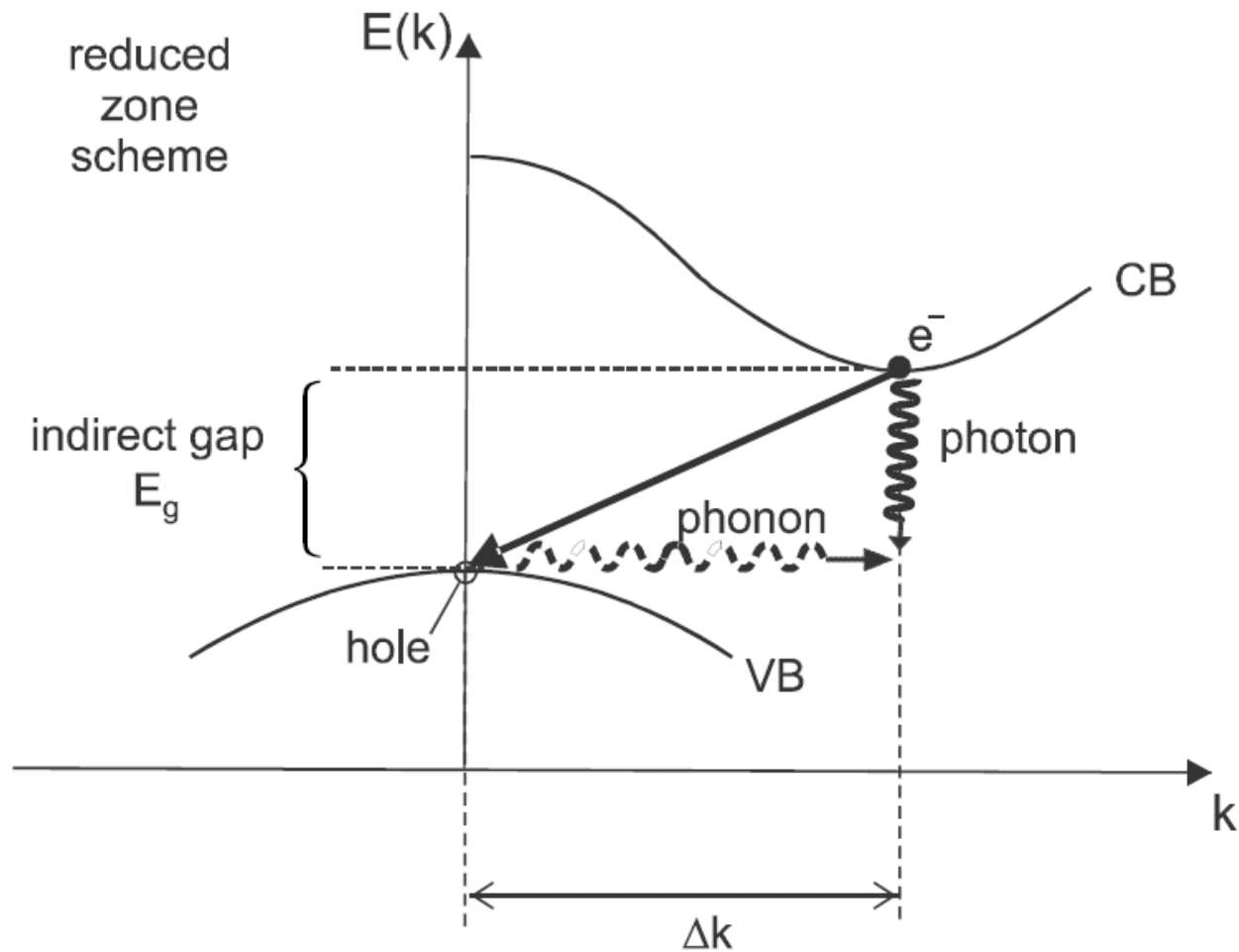


Figure 10-6 In an **indirect radiative transition**, the Δk of the electron is too large to balance the photon's momentum. A phonon simultaneously **emitted** or **absorbed** can allow momentum to be conserved.

Interaction Photon and Electron

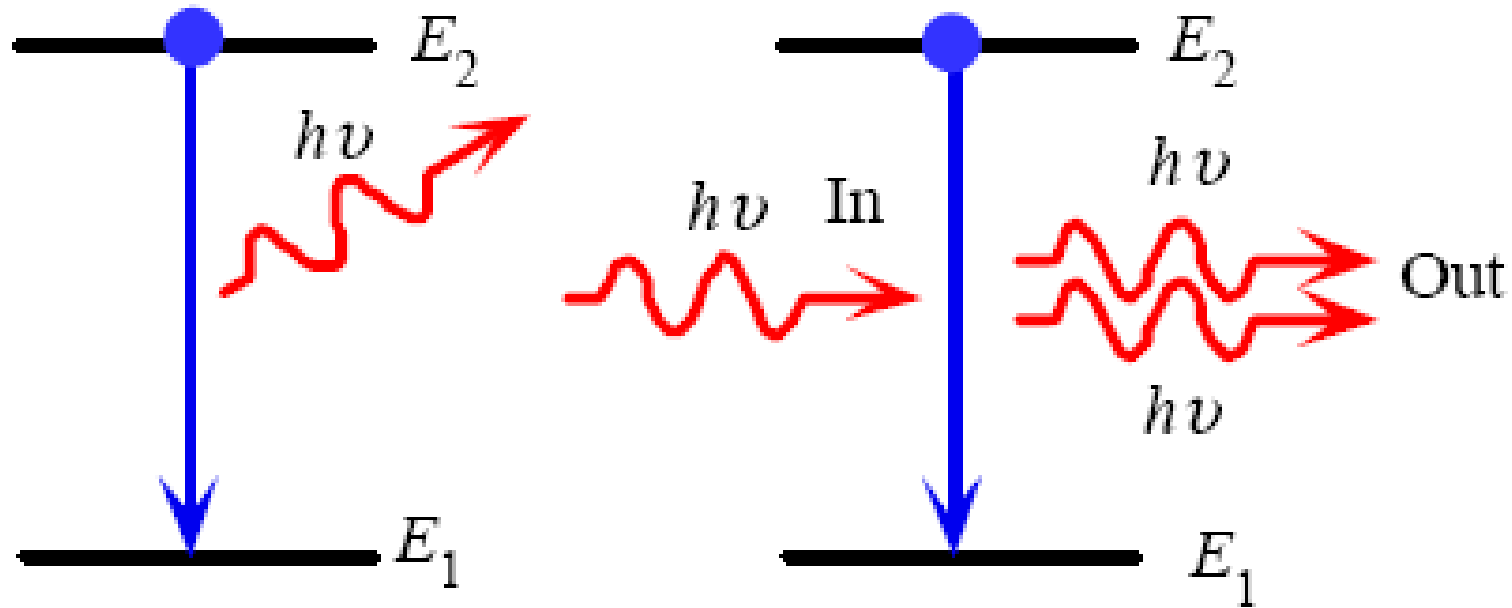
1. Emission of Photon

-Spontaneous Emission

- Stimulated Emission

2. Absorption of Photon

گسیل نور: 1- خودبخودی 2- تحریک شده



(b) Spontaneous emission (c) Stimulated emission

Recombination

➤ There are then **three different processes** by which the **electron** can decay out of the conduction band:

1. radiative decay,

$$W_r = B_r n$$

B_r : constant of proportionality

2. nonradiative decay to traps,

3. Auger relaxation.

$$W_{\text{Auger}} = C_A n^2$$

C_A : Auger constant

➤ Since the probabilities for *independent processes* add, the **total probability** that an **electron decays per unit time** is given by

$$W_{\text{total}} = A_{nr} + B_r n + C_A n^2$$

➤ $B_r \approx 10^{-11}$ to 10^{-9} cm³/s for **direct** transitions and

➤ $B_r \approx 10^{-15}$ to 10^{-13} cm³/s for **indirect** transitions.

➤ **GaAs** has $B_r \approx 7 \times 10^{-10}$ cm³/s.

Recombination

$$W_r = B_r n$$

$$W_{\text{Auger}} = C_A n^2$$

$$W_{\text{total}} = A_{nr} + B_r n + C_A n^2$$

$$\eta_i = \frac{W_r}{W_{\text{total}}} = \frac{B_r n}{A_{nr} + B_r n + C_A n^2} \quad (\text{radiative efficiency})$$

بازده کوانتومی داخلی
برای فرایندهای تابشی

$$\eta_{Qr} = \frac{\frac{1}{\tau_r}}{\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nr}}}$$

EXAMPLE 10-2

□ Compare the **radiative efficiencies** for GaAs ($E_g = 1.42$ eV) and $\text{In}_{.53}\text{Ga}_{.47}\text{As}$ ($E_g = 0.74$ eV), for the same electron density of $n = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

➤ Take **Auger** constants of $5 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$ and $1 \times 10^{-28} \text{ cm}^6/\text{s}$, and B_r values of 7.2×10^{-10} and $4 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$ for GaAs and InGaAs, respectively.

Solution:

For GaAs, the **radiative** and **Auger** rates are

$$W_r = B_r n = \left(7.2 \times 10^{-10} \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \right) (5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}) = 3.6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$$

$$W_{\text{Auger}} = C_A n^2 = \left(5 \times 10^{-30} \frac{\text{cm}^6}{\text{s}} \right) (5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})^2 = 1.25 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$$

Solution:

EXAMPLE 10-2

➤ For $\text{In}_{.53}\text{Ga}_{.47}\text{As}$ the corresponding rates are

$$W_r = B_r n = \left(4 \times 10^{-11} \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}\right) (5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}) = 2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$W_{\text{Auger}} = C_A n^2 = \left(1 \times 10^{-28} \frac{\text{cm}^6}{\text{s}}\right) (5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})^2 = 2.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$$

➤ Note that all these rates are much larger than the **nonradiative decay** rate to traps, $A_{nr} \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$.

➤ Therefore, the **efficiency** for the two materials is

$$\text{GaAs: } \eta_i = \frac{36}{36 + 1.25} = 0.97$$

$$\text{InGaAs: } \eta_i = \frac{2}{25 + 2} = 0.074$$

This example illustrates the general trend that **Auger losses** are more significant in **smaller-bandgap** materials.

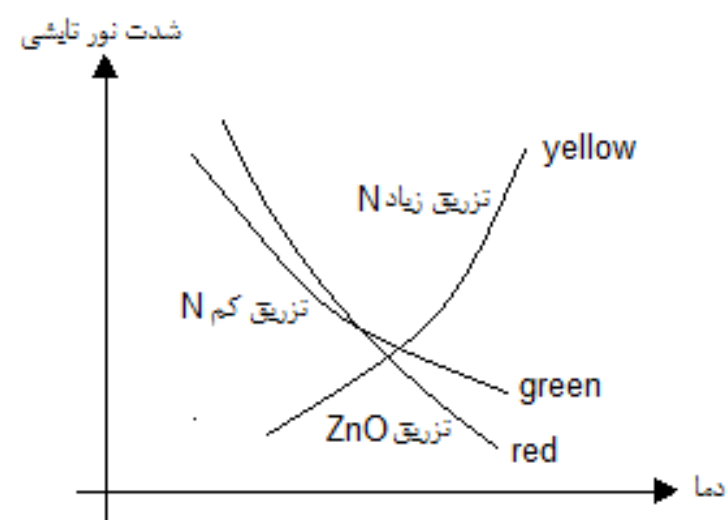
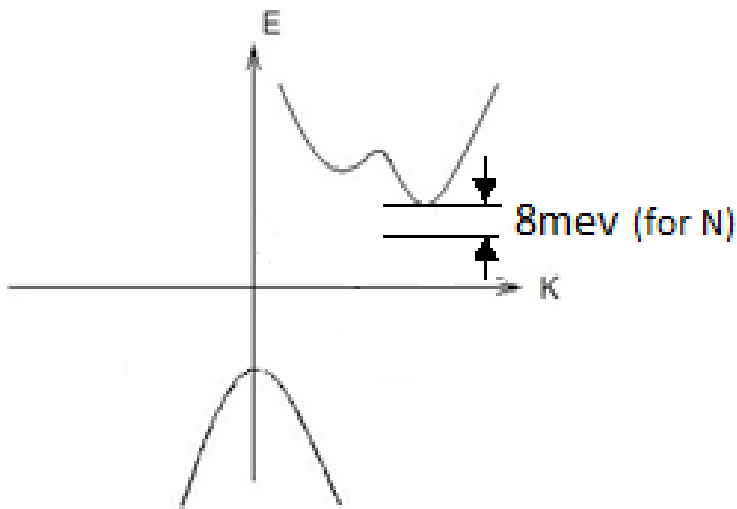
$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.2399}{E_g \text{ (eV)}}$$

Material	Wavelength Range λ (μm)	E_g (eV)
InP	0.92	1.35
InAs	3.6	3.44
GaP	0.56	2.21
GaAs	0.87	1.43
AlAs	0.59	2.10
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	0.64-0.68	1.82-1.94
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.8-0.9	1.38-1.55
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	1.0-1.3	0.95-1.24
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0.9-1.7	0.73-1.38

<i>Group 2</i>	<i>Group 3</i>	<i>Group 4</i>	<i>Group 5</i>	<i>Group 6</i>
<i>Cd</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>S</i>
<i>Zn</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>As</i>	<i>Te</i>
<i>Hg</i>	<i>Ga</i>	<i>Ge</i>	<i>P</i>	
	<i>In</i>		<i>Sb</i>	

$$E_g = 1.424 + 1.427x + 0.041x^2 \text{ eV} \quad (\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As bandgap})$$

- ❖ با تزریق بسیار کم **نیتروژن** به **GaP** که یک ماده **غیرمستقیم** است به **مستقیم** تبدیل میشود. میزان تزریق N باید طوری باشد که در شبکه به عنوان **Index** نباشد. اگر تزریق N کم باشد **نور سبز** و اگر N زیاد باشد **نور زرد** تولید می شود. (ZnS, ZnSe هم برای رنگ سبز بکار میرود)
- ❖ با تزریق **ZnO** نیز نور **قرمز** تولید می شود.
- ❖ **GaAsP**: به طور گسترده در تولید LED به کار می رود، ولی به علت پایین بودن بازده گسیل نوری برای لیزر مناسب نیست.
- ❖ **InGaAsP**: برای طول موج $1.55 \mu\text{m}$



Population Inversion

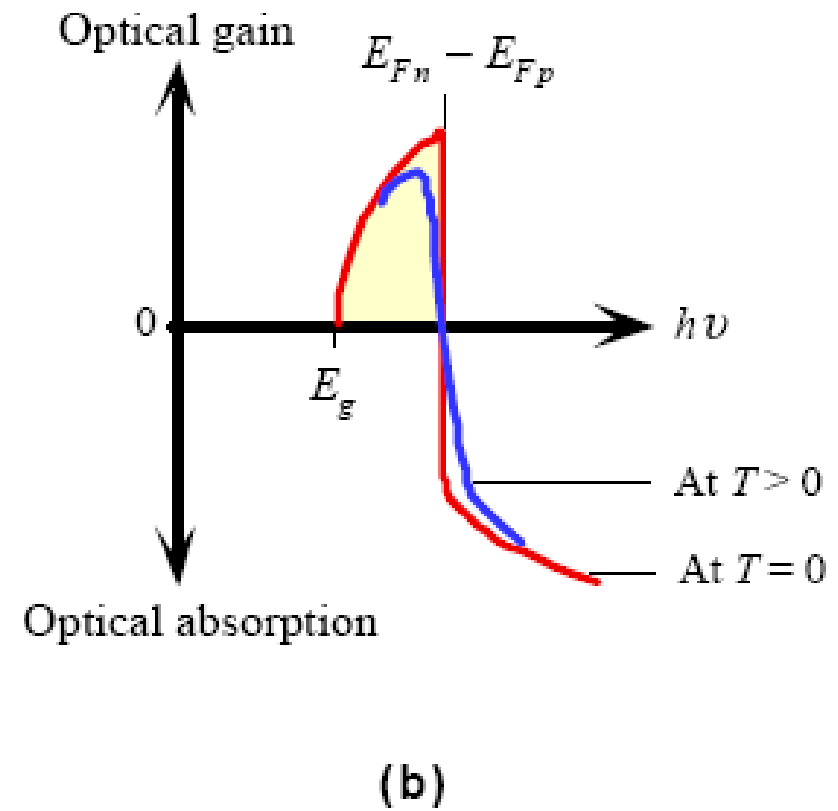
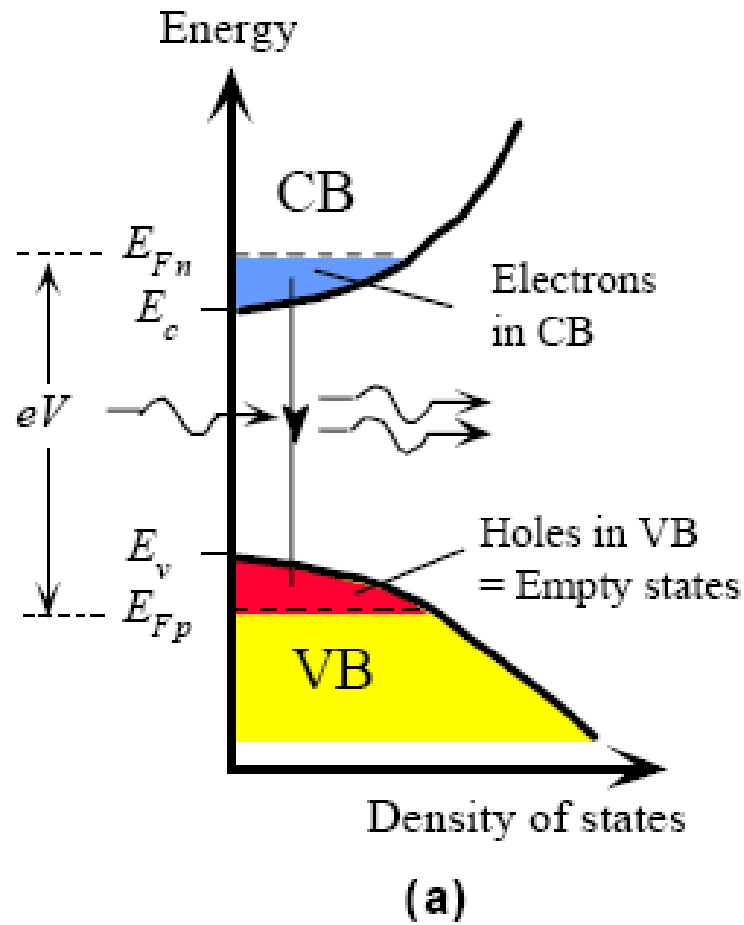
$$R_{\text{spont}} = A_{21}n_2$$

$$R_{\text{stim}} = B_{21}n_2\rho(h\nu_{12})$$

$$R_{\text{absorp}} = A_{12}n_1\rho(h\nu_{12})$$

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} = e^{-\frac{h\nu_{12}}{kT}}$$

بهره و جذب نوری



Semiconductor Heterojunctions: The Quantum Well

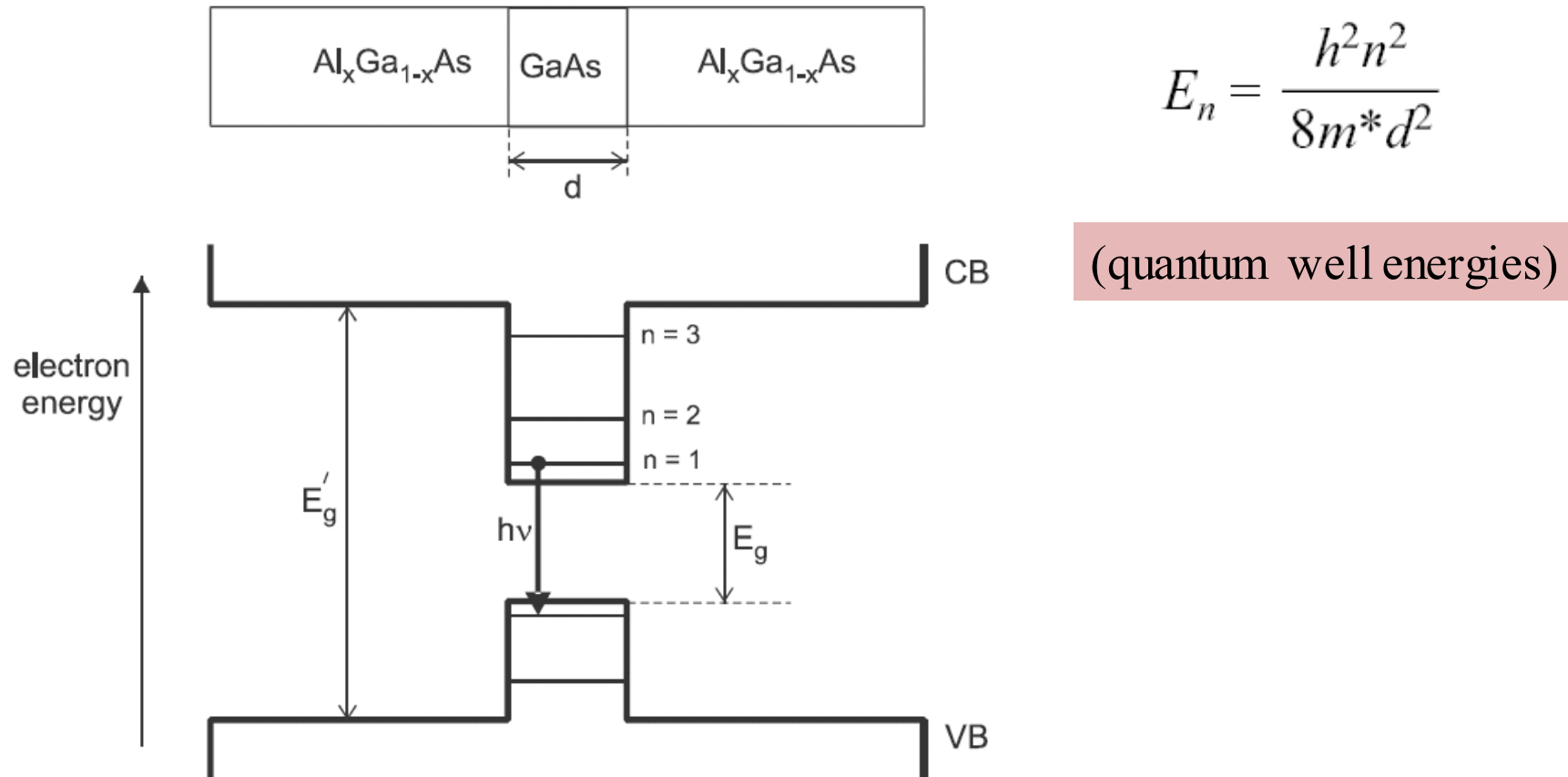
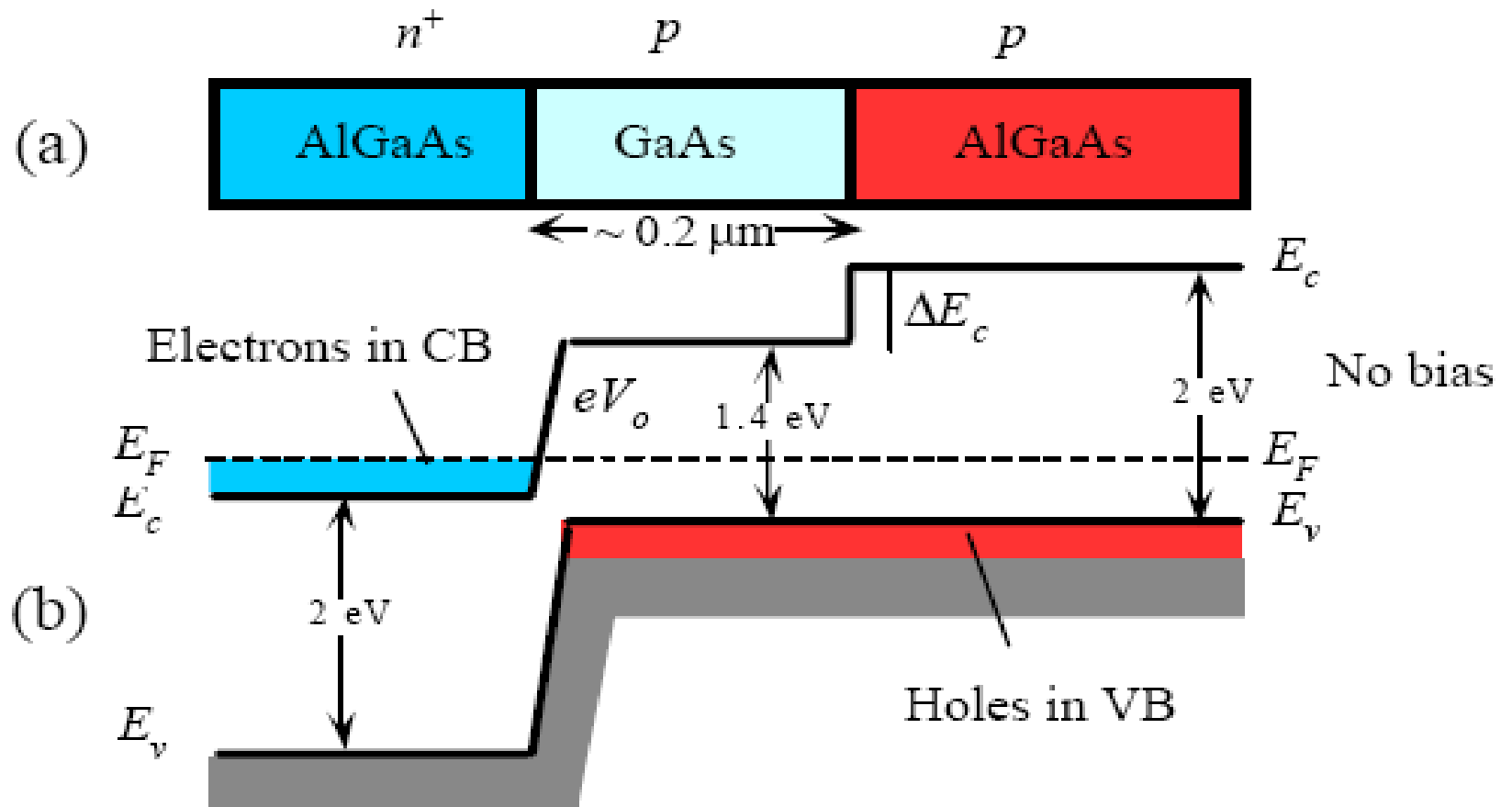


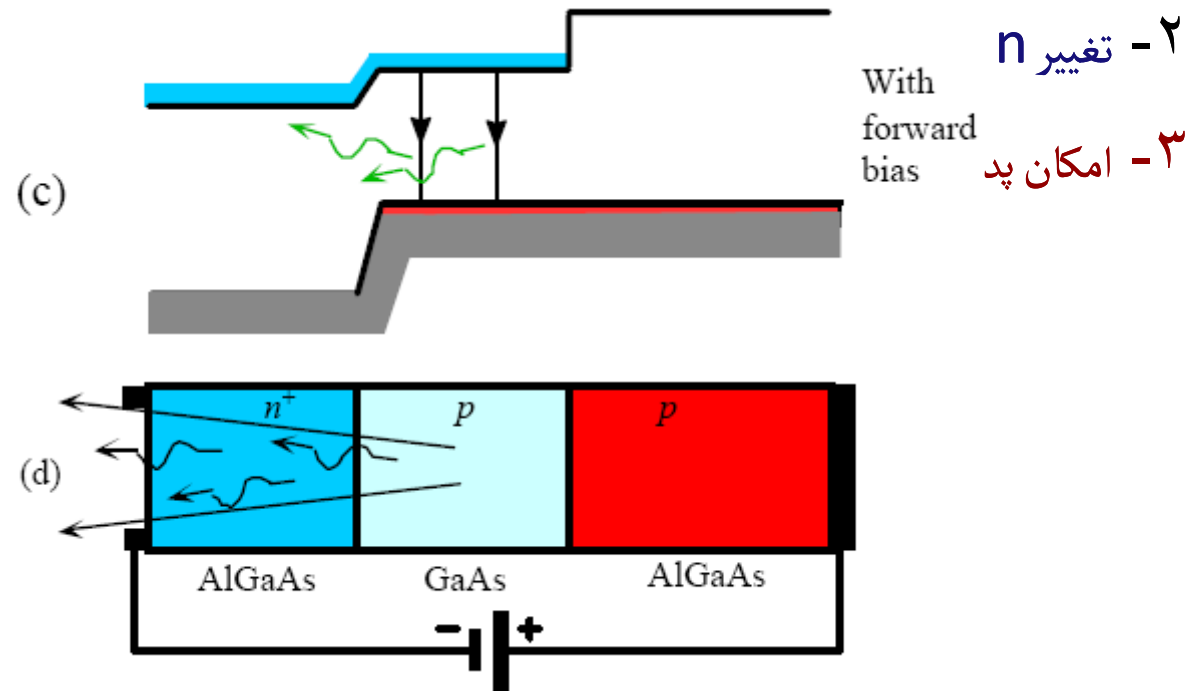
Figure 10-15 In a quantum well structure, the energy levels in the conduction and valence bands depend not only on the bandgap of the material, but also on the thickness d of the middle layer.

Heterojunctions (Practical LED)

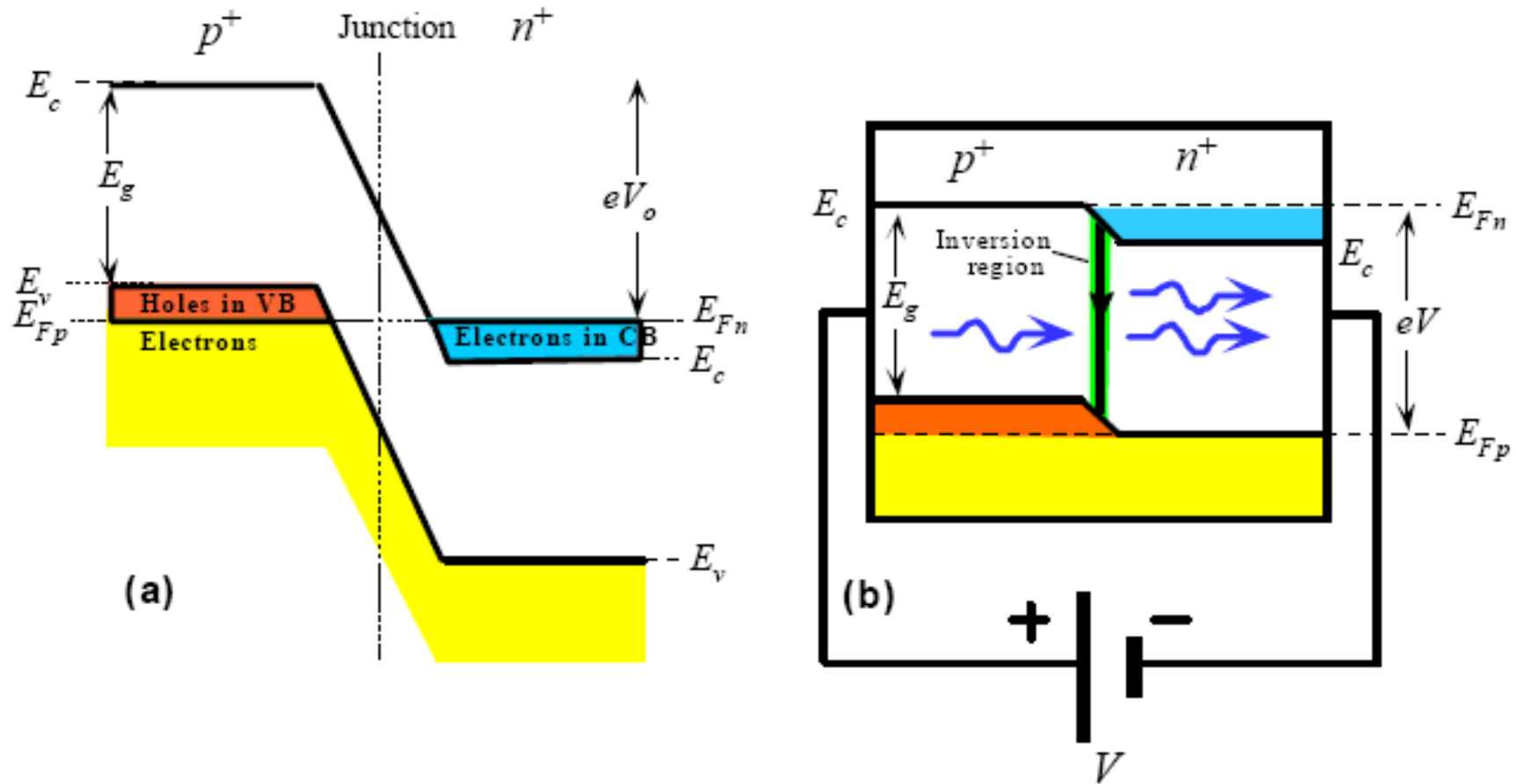


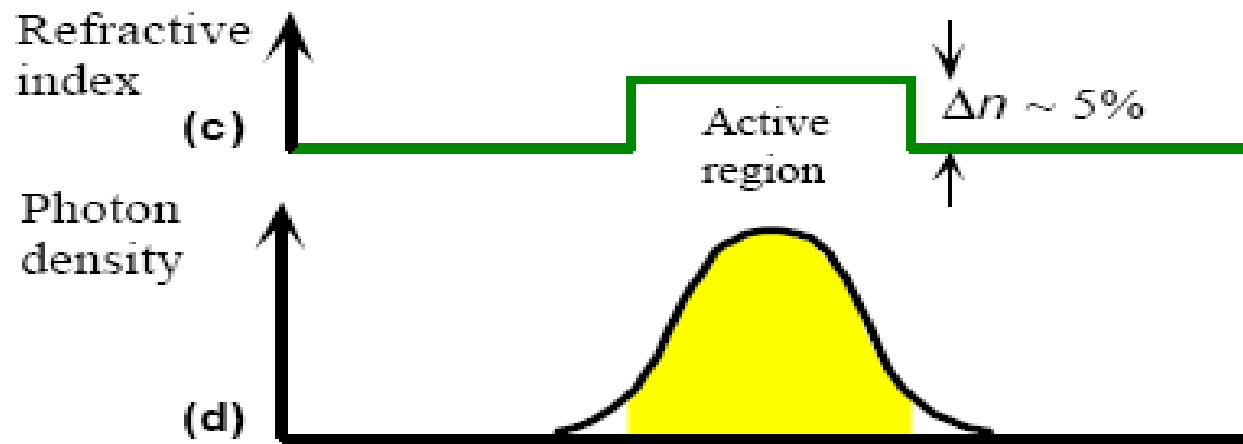
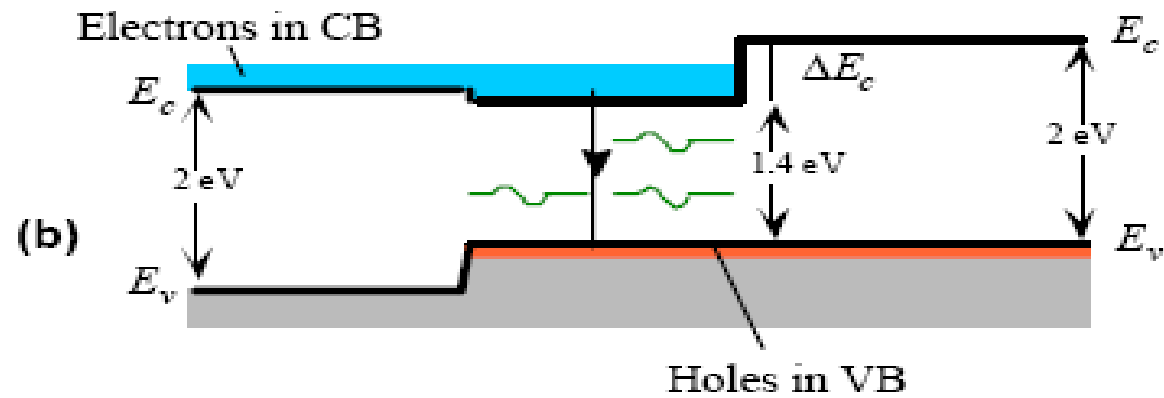
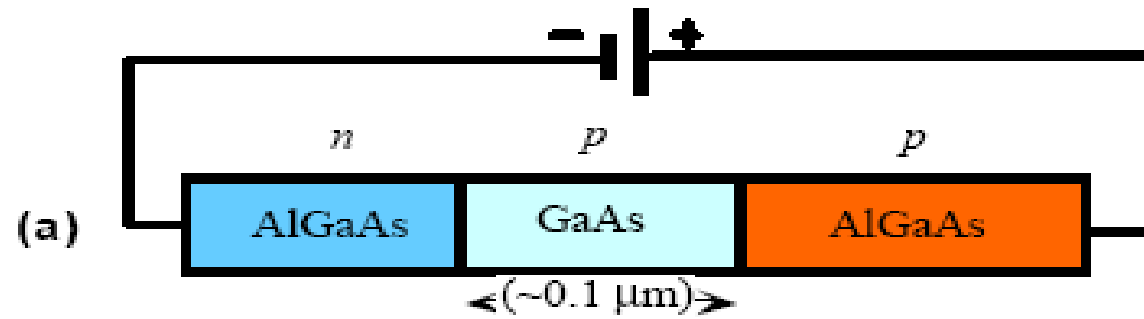
مزایای هتروجانکشن:

۱- تغییر E_g : باعث محبوس شدن حامل (Carrier Confinement)

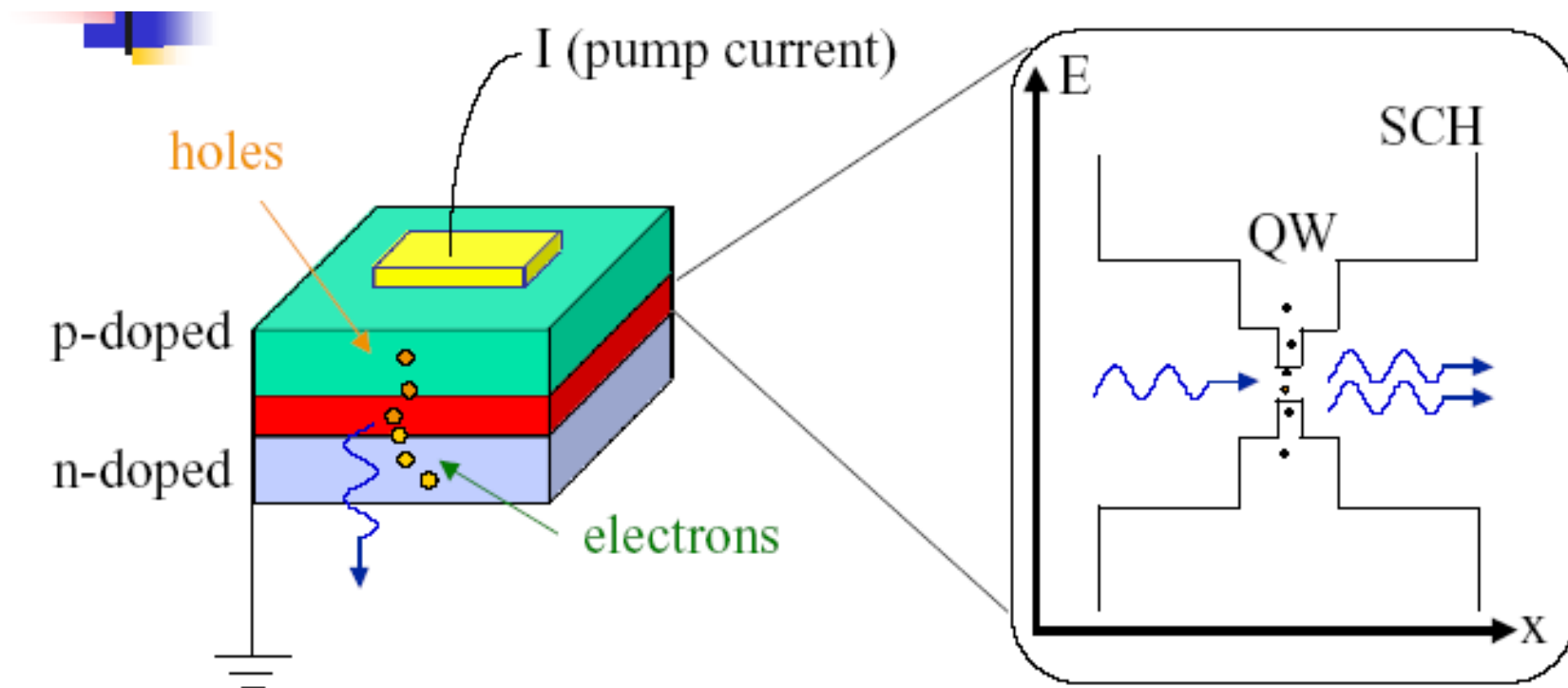


گسیل تحریک شده نور در نیمه هادی

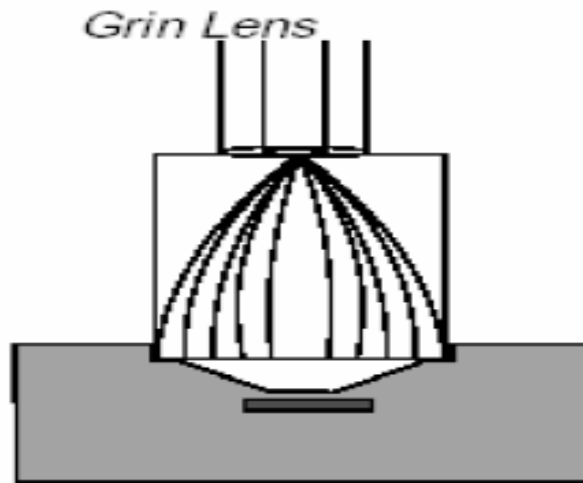




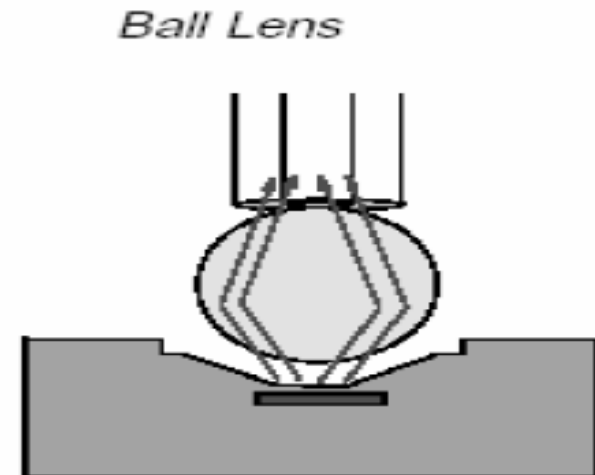
گسیل تحریک شده نور در هتروجانکشن



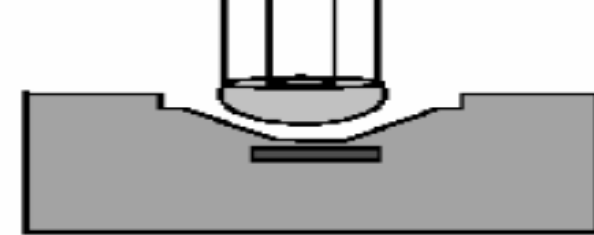
کوپلینگ به فیبر



Direct coupling



Lensed fibre end



بازده کوانتومی خارجی (External Quantum efficiency)

❖ برای بیرون آوردن فوتونها از قطعه، باید دقت زیادی در طراحی به عمل آورد.

❖ سه نحوه اتلاف برای فوتونهای گسیل شده وجود دارد:

۱- جذب فوتونها

۲- انعکاس فوتونها در فصل مشترک هوا-نیمه هادی

۳- بازتابش کلی داخلی فوتونهایی که با زاویه بزرگتری از زاویه بحرانی به سطح برخورد می کنند.

$$R = \left(\frac{n_{r1} - n_{r2}}{n_{r1} + n_{r2}} \right)^2$$

$$\theta_C = \sin^{-1} \left(\frac{n_{r2}}{n_{r1}} \right)$$

ضریب بازتاب برای نور عمودی:

n_{r1} : ضریب شکست نیمه هادی

n_{r2} : ضریب شکست هوا

راه حل: بکارگیری محفظه گنبدی شکل

بازده کوانتومی خارجی (External Quantum efficiency)

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\Omega}{4\pi} T$$

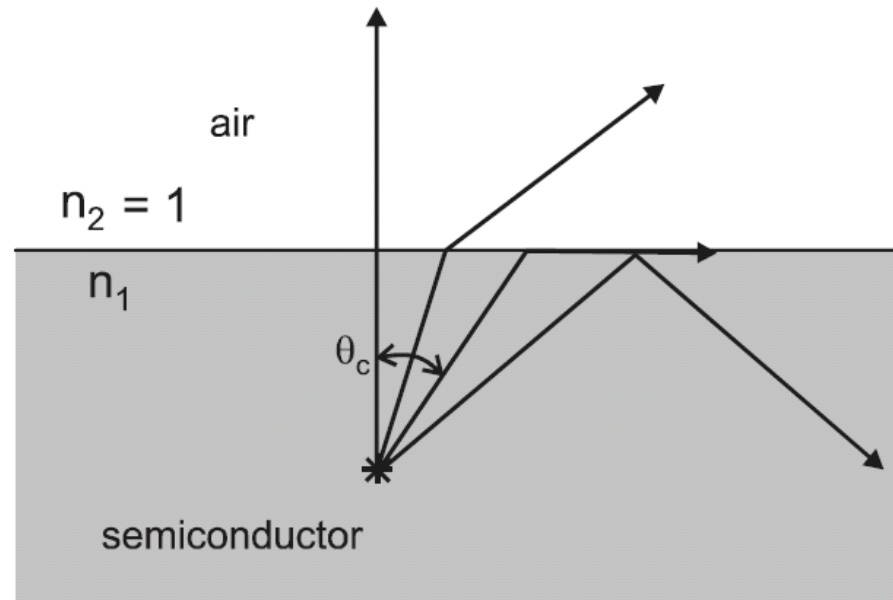
(external efficiency)

(11-15)

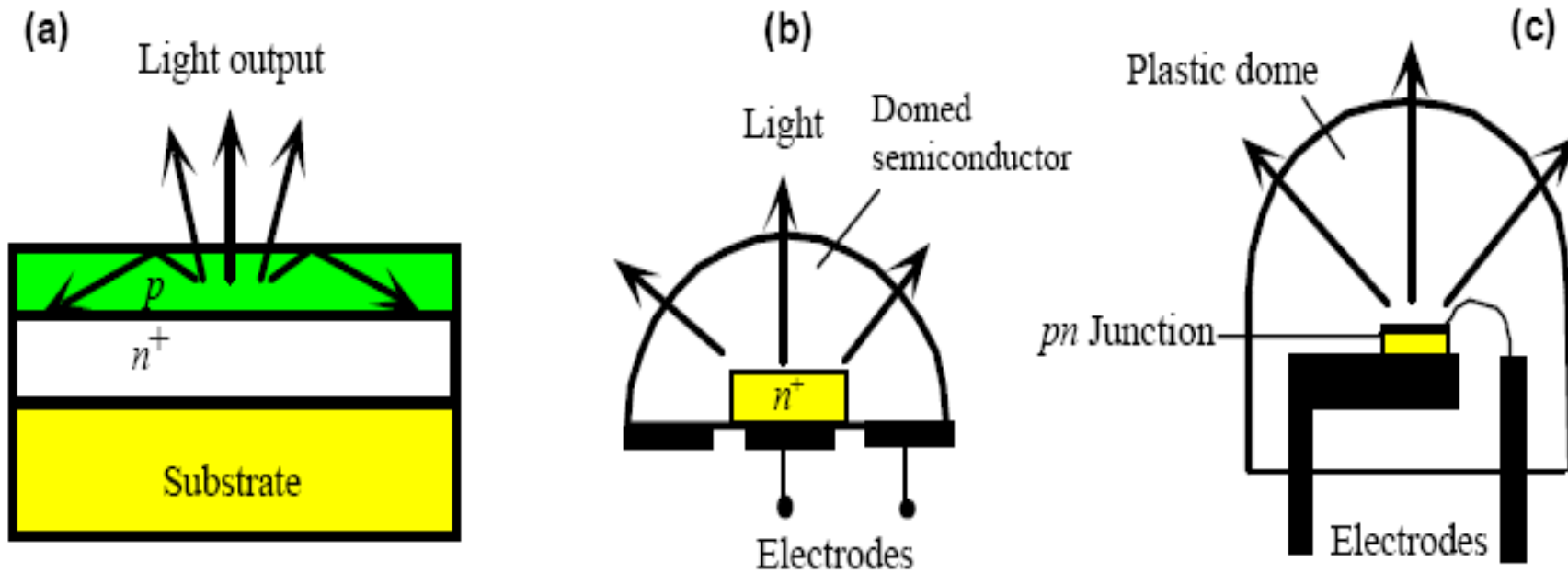
$$T = 1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

(Fresnel reflection losses)

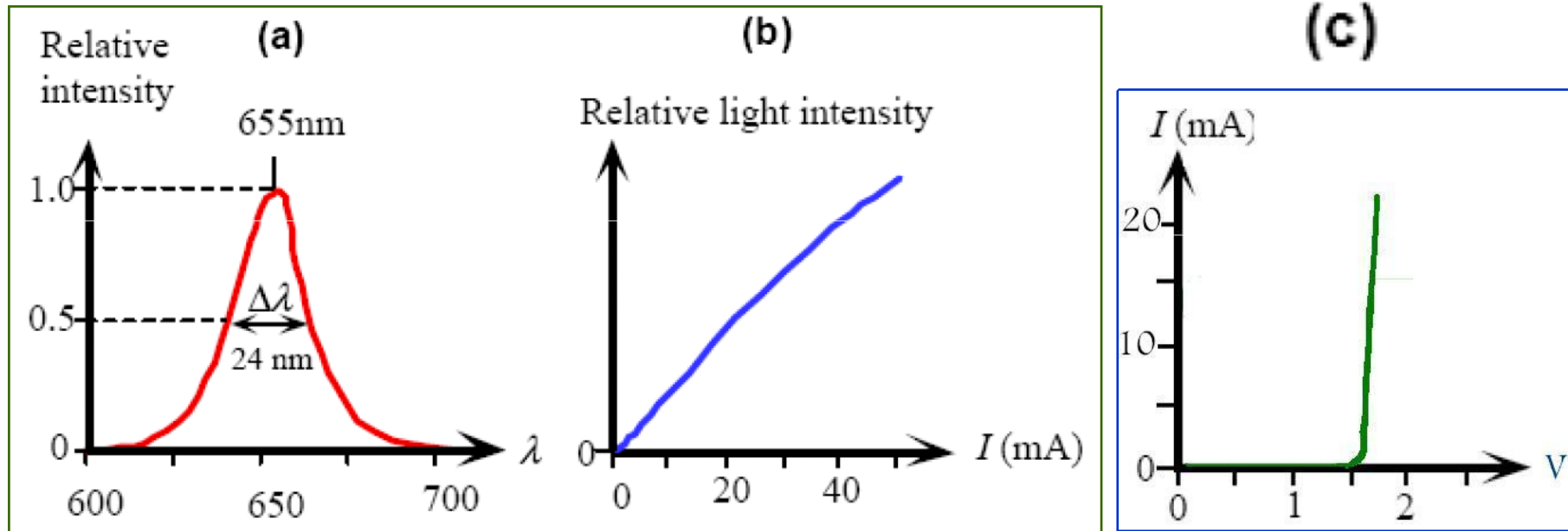
$$\Omega = \pi\theta_c^2$$



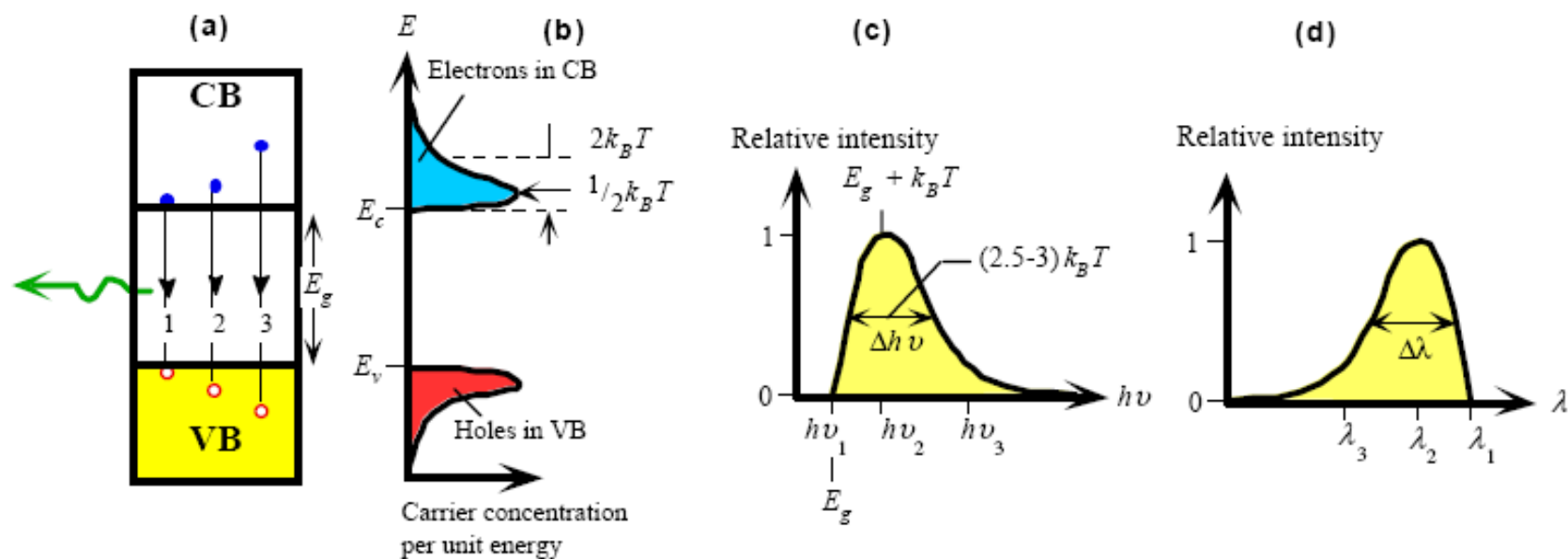
پوشش گنبدی LED



منحنی مشخصه های LED



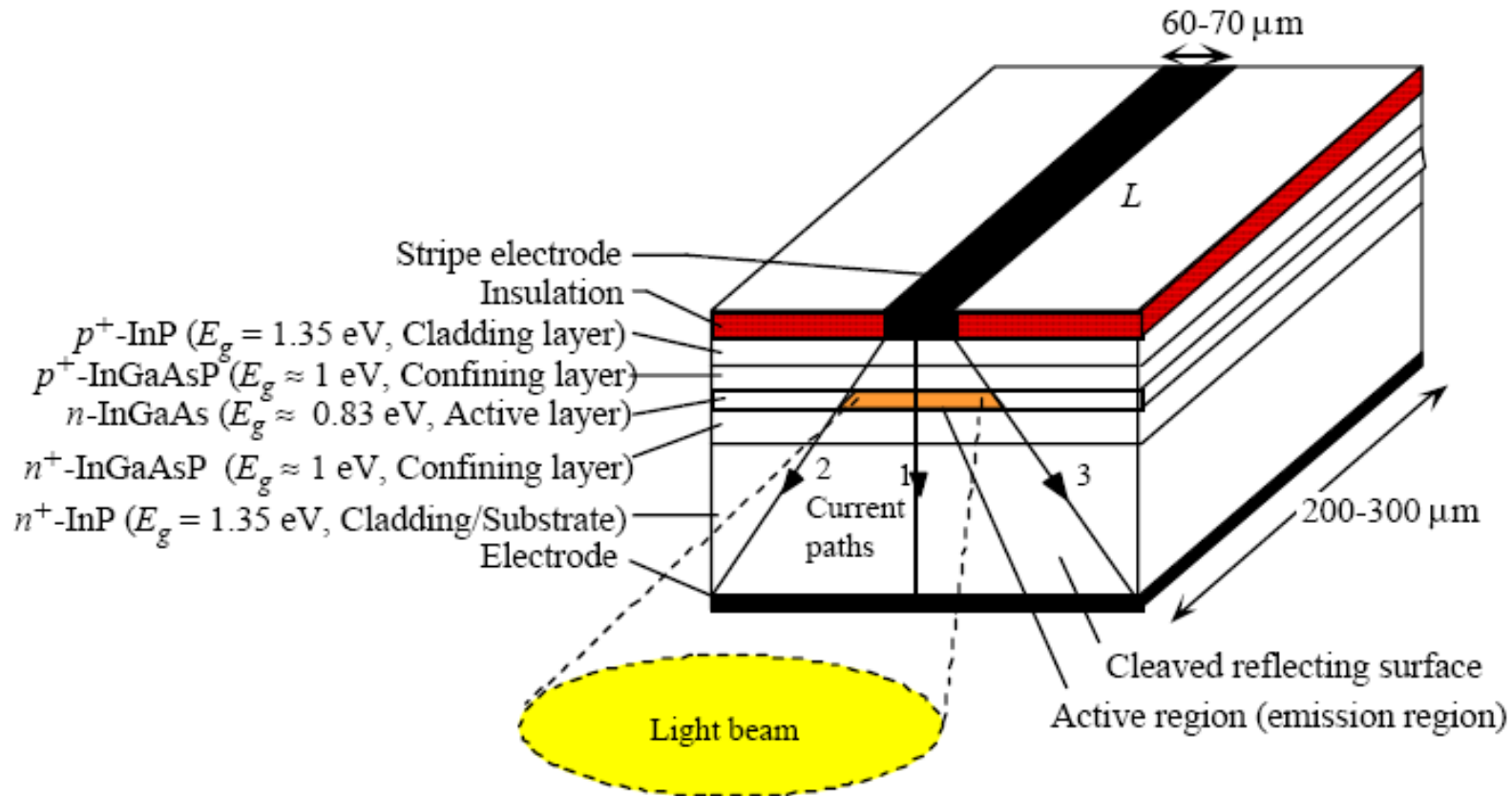
پهنای خط LED



مشخصات LED

- ارزان
- توان کم (در حدود میکرووات)
- پهنای خط بزرگ (در حدود ۵۰ - ۳۰ nm)
- دارای نور غیرهمدوس
- سرعت مدولاسیون پایین (کوچکتر از ۳۰۰ Mbps)

ساختار LED های پیشرفته

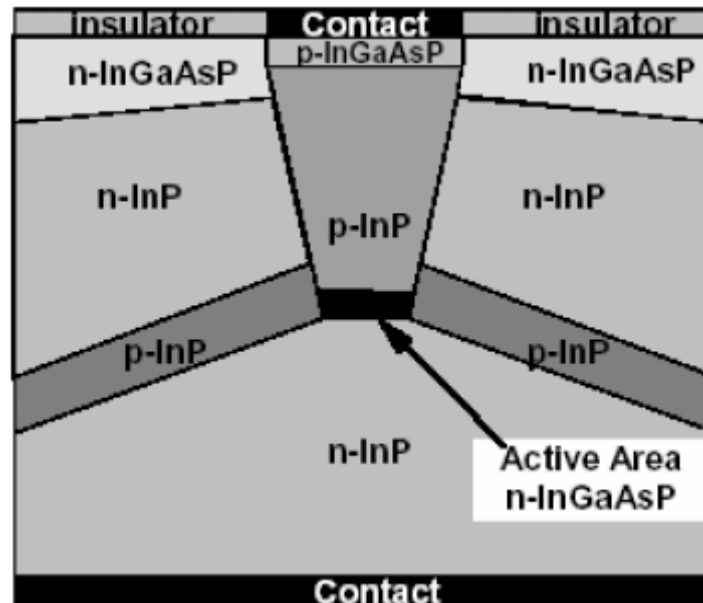


Schematic illustration of the the structure of a double heterojunction stripe contact edge emitting LED

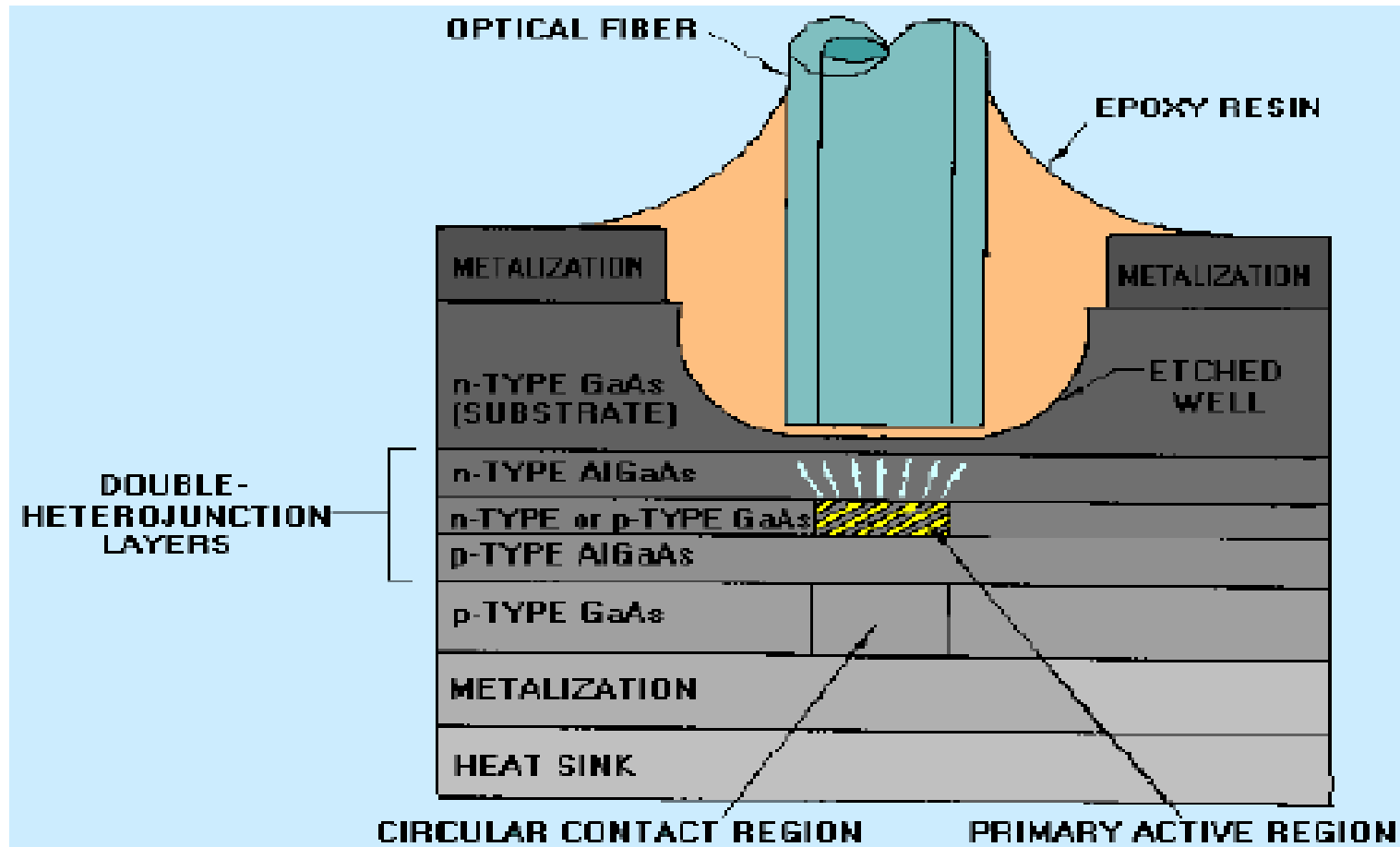
LED Structures:

1. Edge-Emitting LED
2. Surface-Emitting (Burris)

1. Edge-Emitting LED



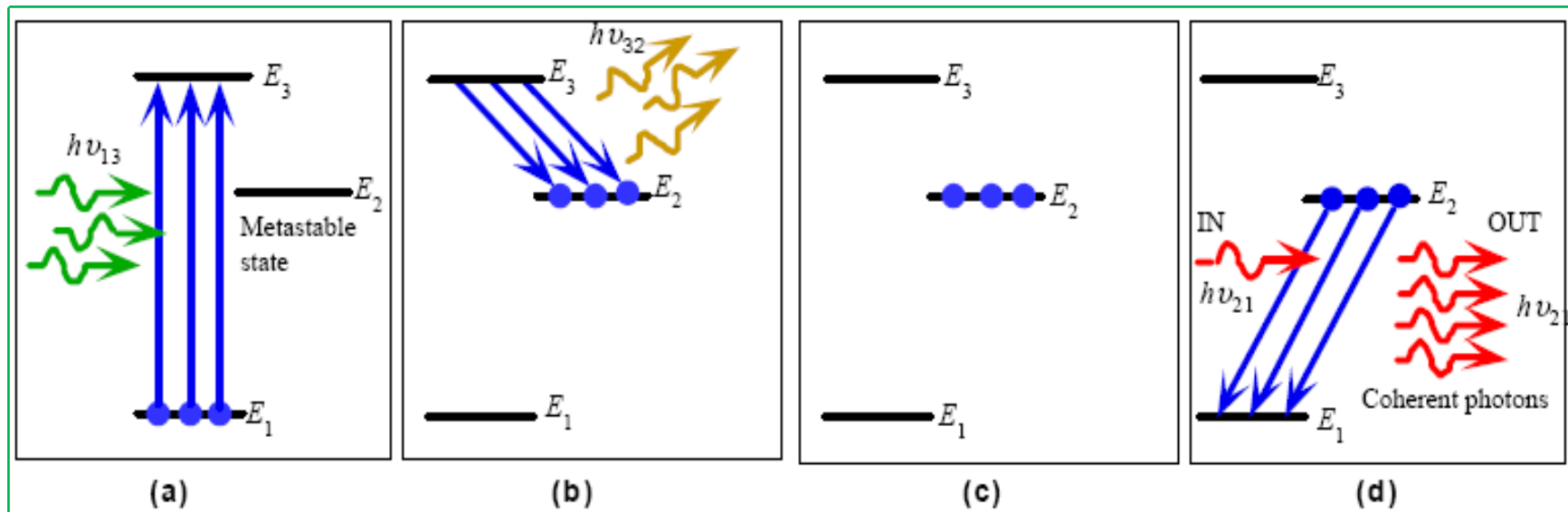
λ -Surface-Emitting (Burrus)



LASER:

Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation

تقویت نور بوسیله گسیل تحریک شده ی نور



- تقویت نور به وسیله گسیل های تحریکی تابش
- تابش های تحریک شده هم دوس هستند.
- همه ی امواج سازنده چنین تابش هایی ، هم فاز هستند.

خواص نور لیزر

❖ تک فام (دارای یک رنگ) (یک طول موج) (Monochromatic)

❖ جهت دار (مانند نور معمولی پخش نمی شود) (Directional)

❖ همدوسی (همه امواج همفاز هستند) (Coherence)

❖ پهنای خط باریک

❖ پهنای باند مدوله کردن زیاد (حتی بالاتر از 50GHz)

❖ (Brightness درخشندگی)

اجزاء مختلف لیزر

۱- محیط فعال (کاواک لیزر)

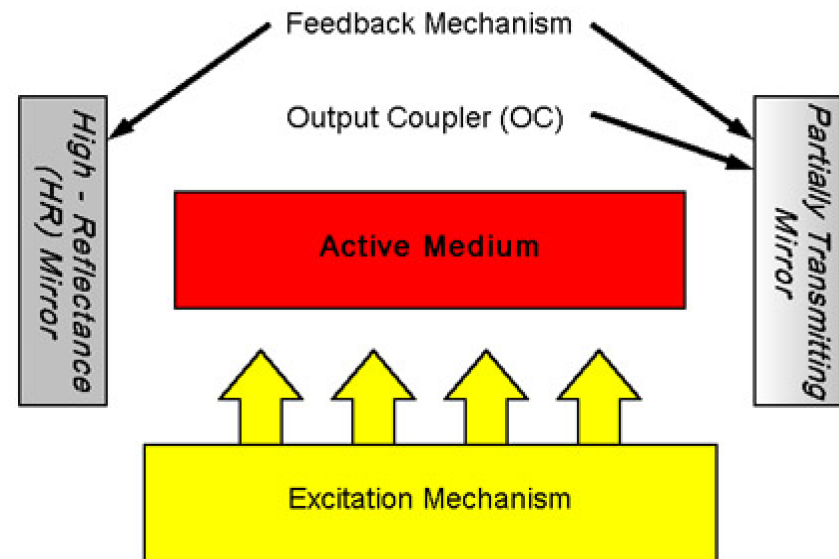
۲- مکانیزم تحریک

۳- مکانیزم فیدبک (دو آینه)

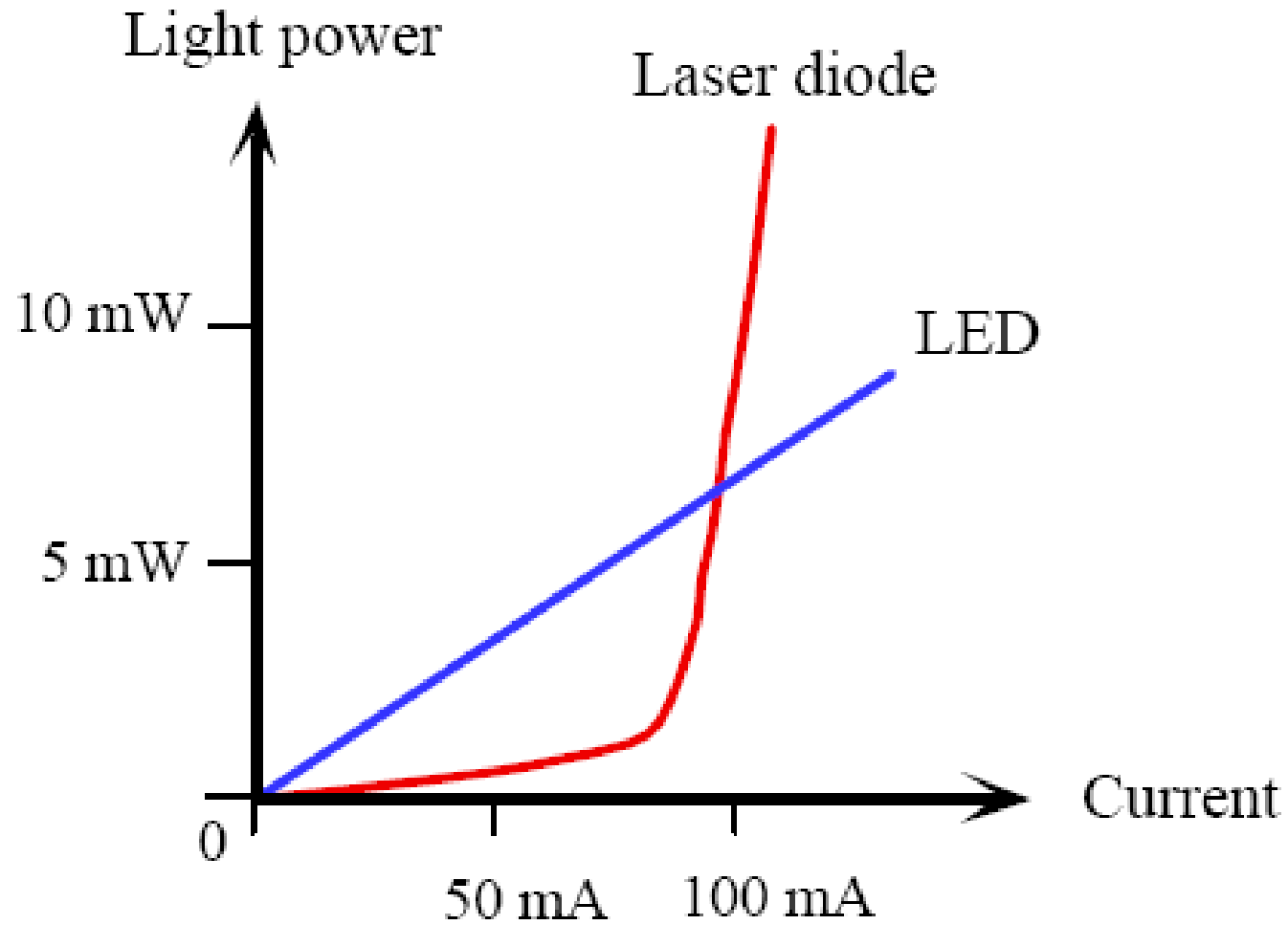
۴- کوپلر خروجی

❖ یک آینه ، بطور صد درصد نور را منعکس می کند.

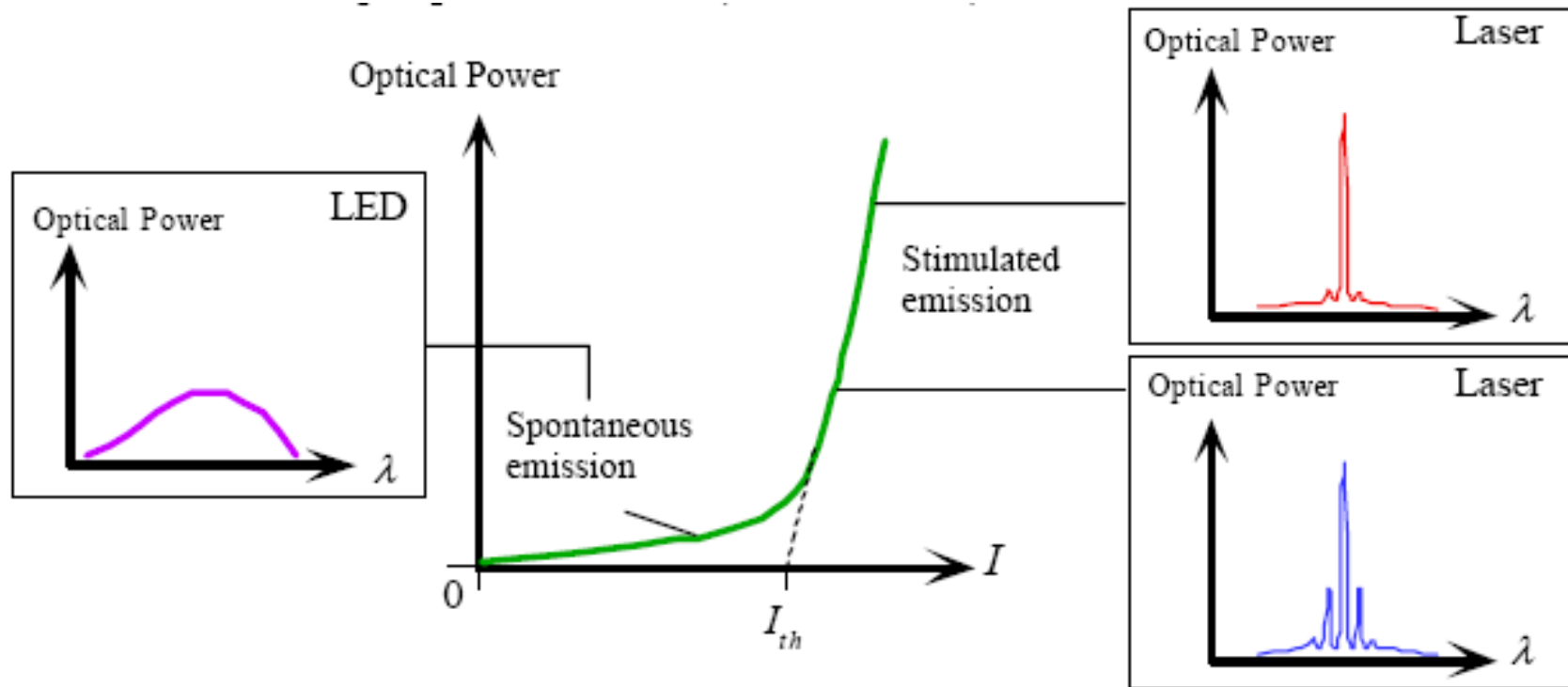
❖ یک آینه به صورت جزئی، قسمت زیادی از نور را منعکس و کسری از نور را عبور می دهد.



مقایسه منحنی مشخصه LASER و LED



منحنی مشخصه لیزر



Types of Semiconductor LASER

□ Fixed Wavelength:

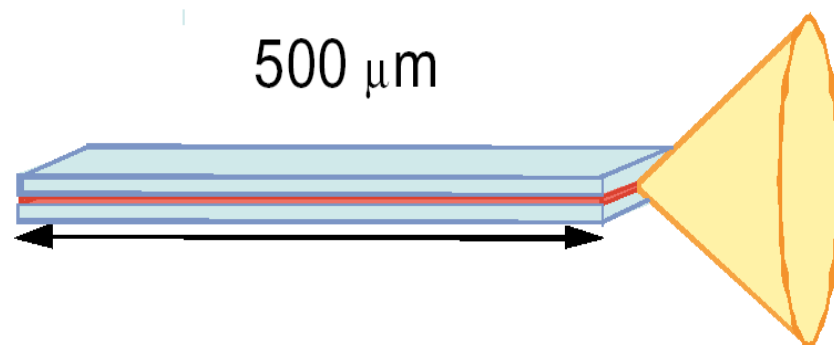
- I. Fabry-Perot (FP)
- II. Distributed FeedBack (DFB)
- III. Distributed Bragg Reflector (DBR)
- IV. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSEL)

□ Multi-Wavelength:

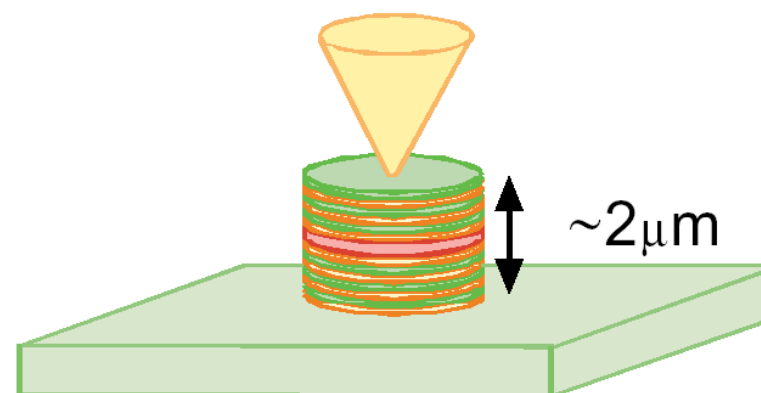
- a. Laser array
- b. Tunable Laser

لیزر گسیل لبه ای و گسیل سطحی

Edge Emitting Lasers

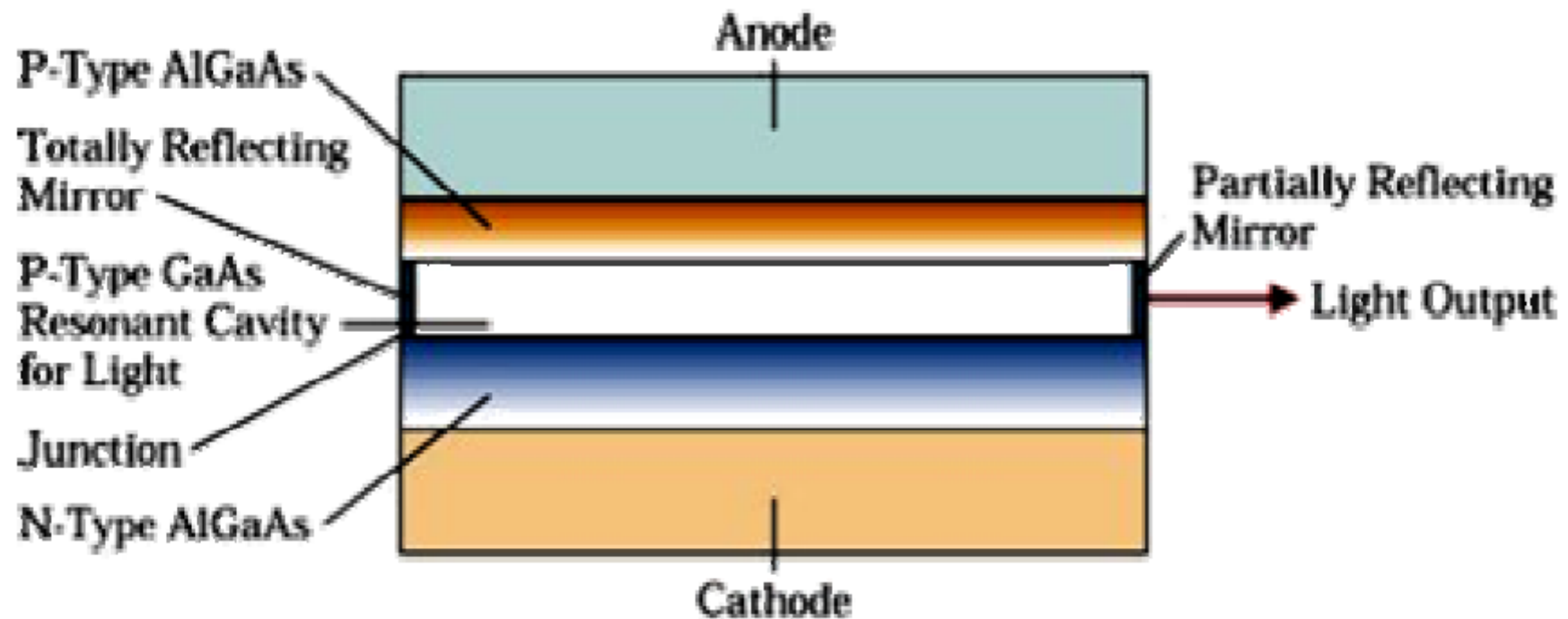


VCSELs

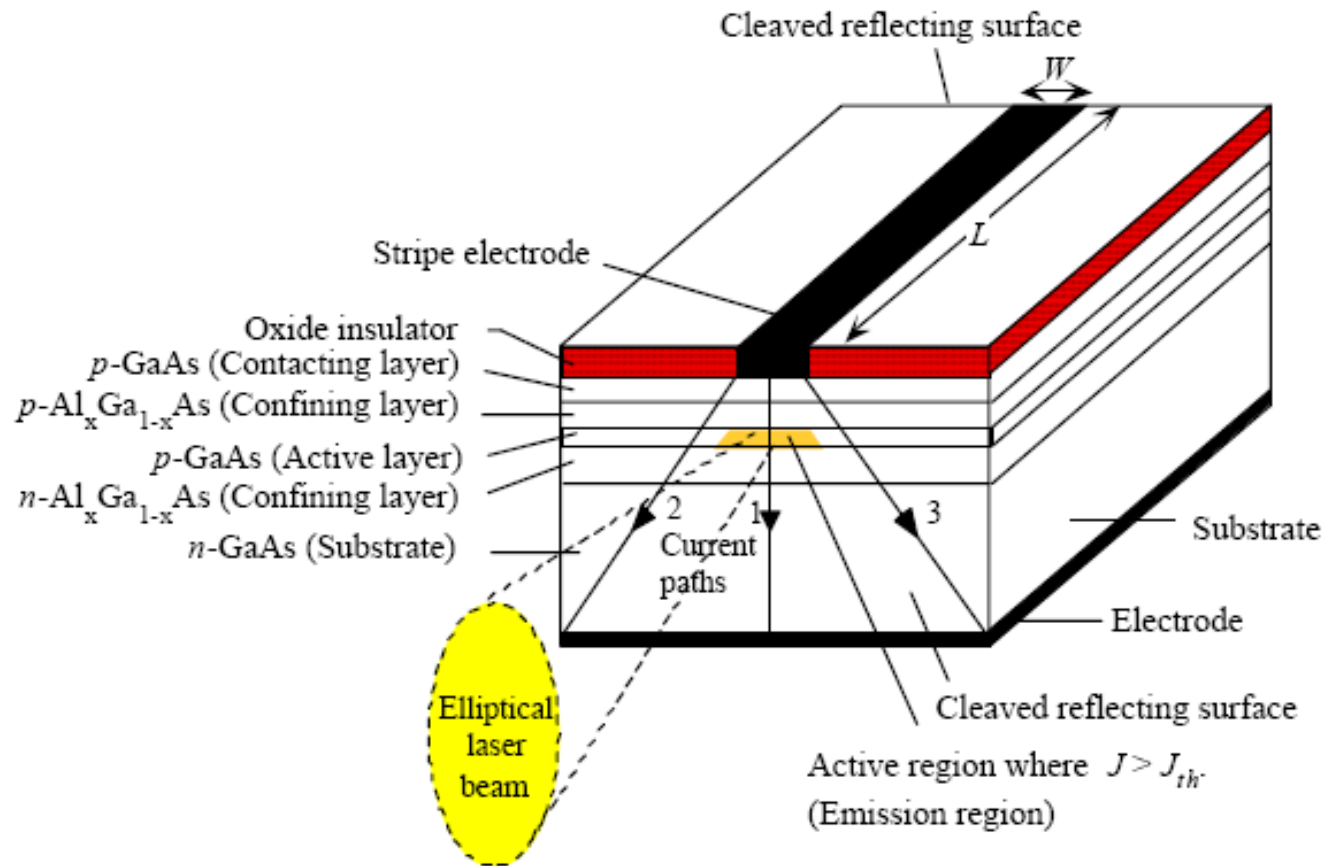


Fabry-Perot Laser (FP)

❖ پرکاربردترین لیزر
❖ یک LED با یک جفت آینه

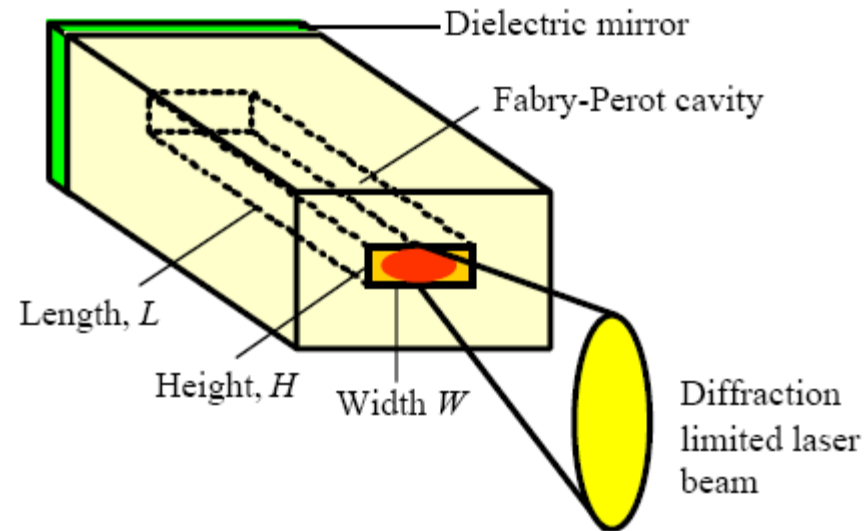


Fabry-Perot Laser (FP)

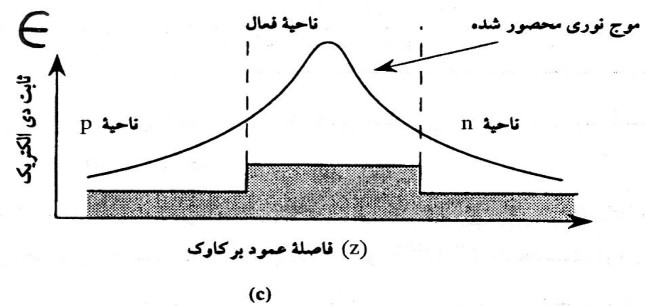
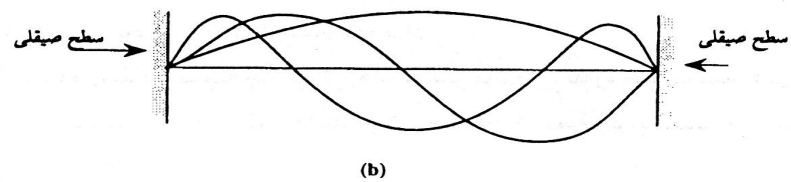
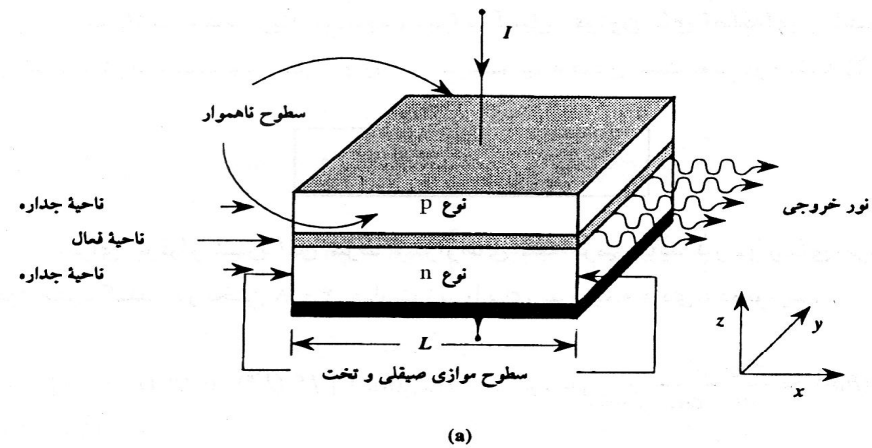


Schematic illustration of the the structure of a double heterojunction stripe contact laser diode

Fabry-Perot Laser (FP)



Fabry-Perot Laser (FP)



Double Heterostructure laser (DH)

Figure 11-15 The **light distribution** is more confined in a double heterostructure (DH) laser, due to **index guiding** in the waveguide structure.

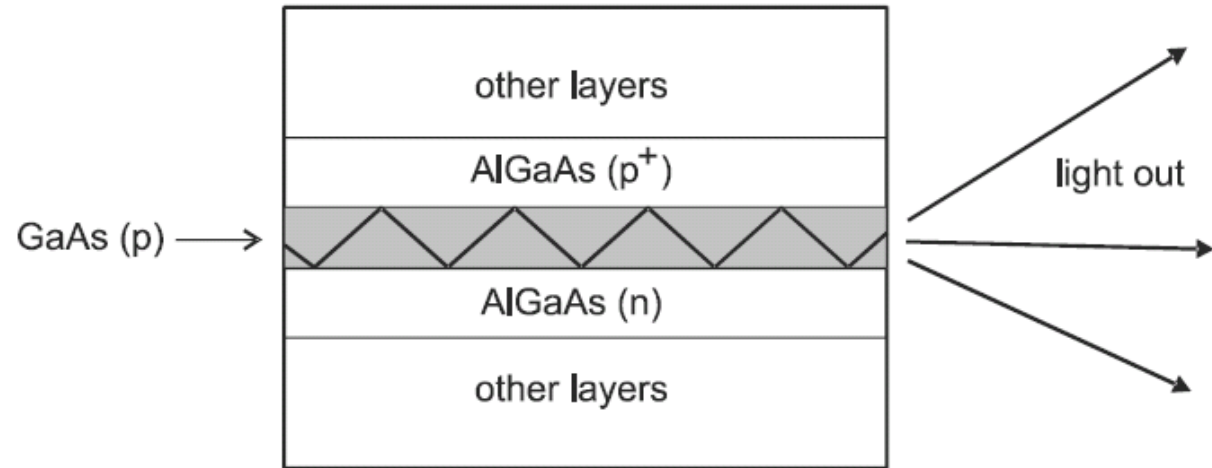
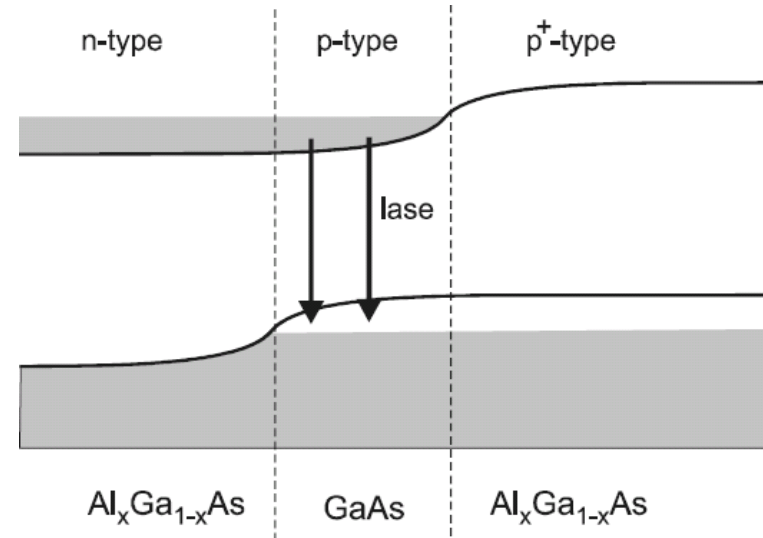


Figure 11-16 In a **DH laser**, the energy bands are shifted so as to permit overlap of free electrons and holes in a **well-defined active region**.



Double Heterostructure laser (DH)

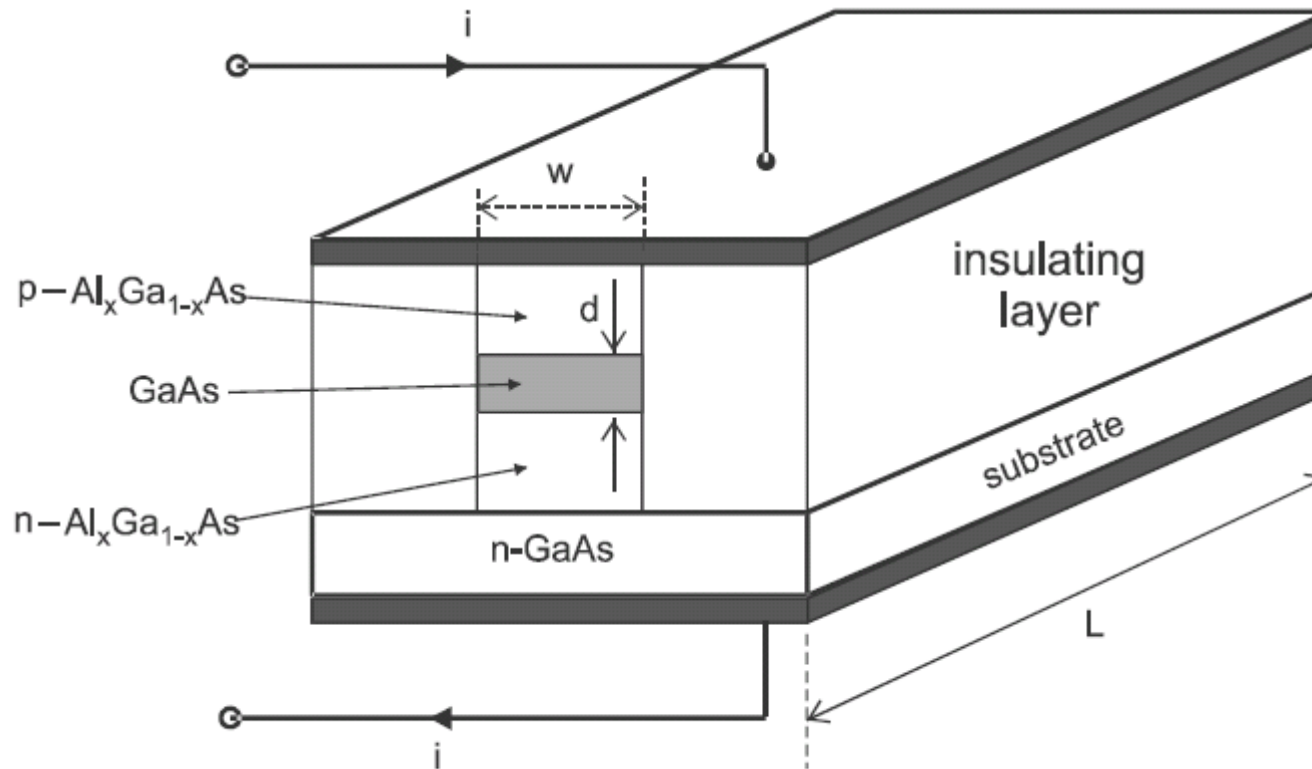
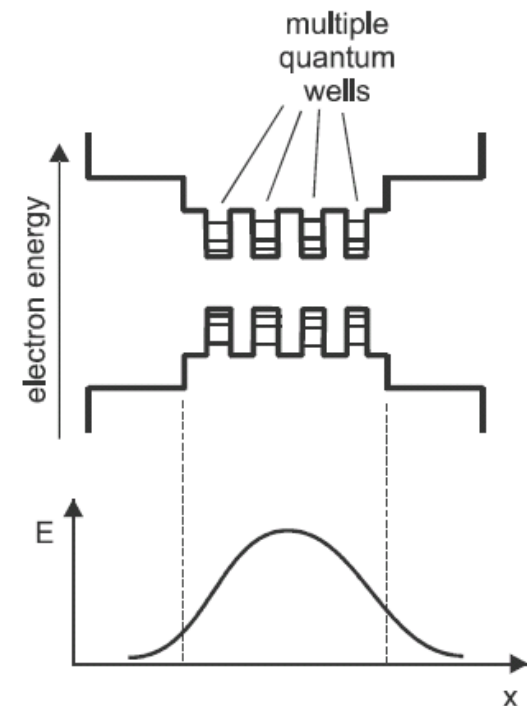
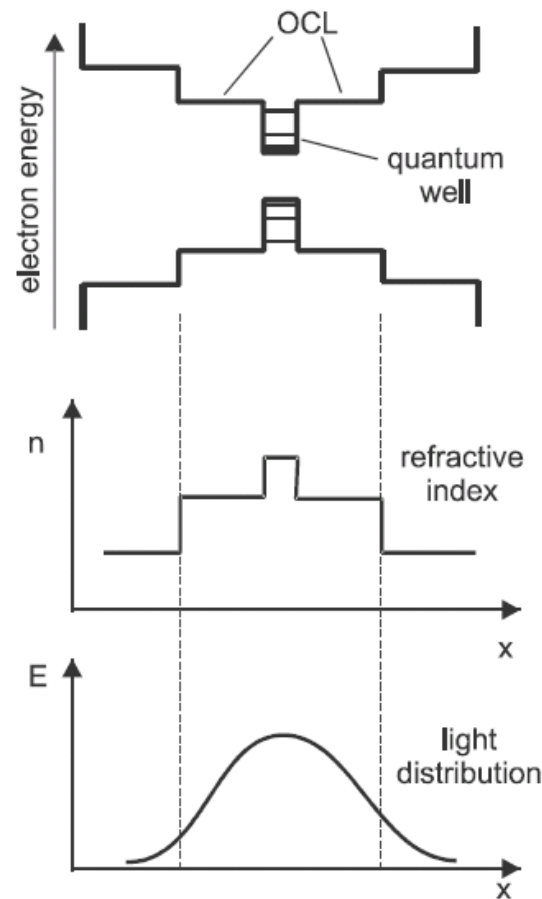


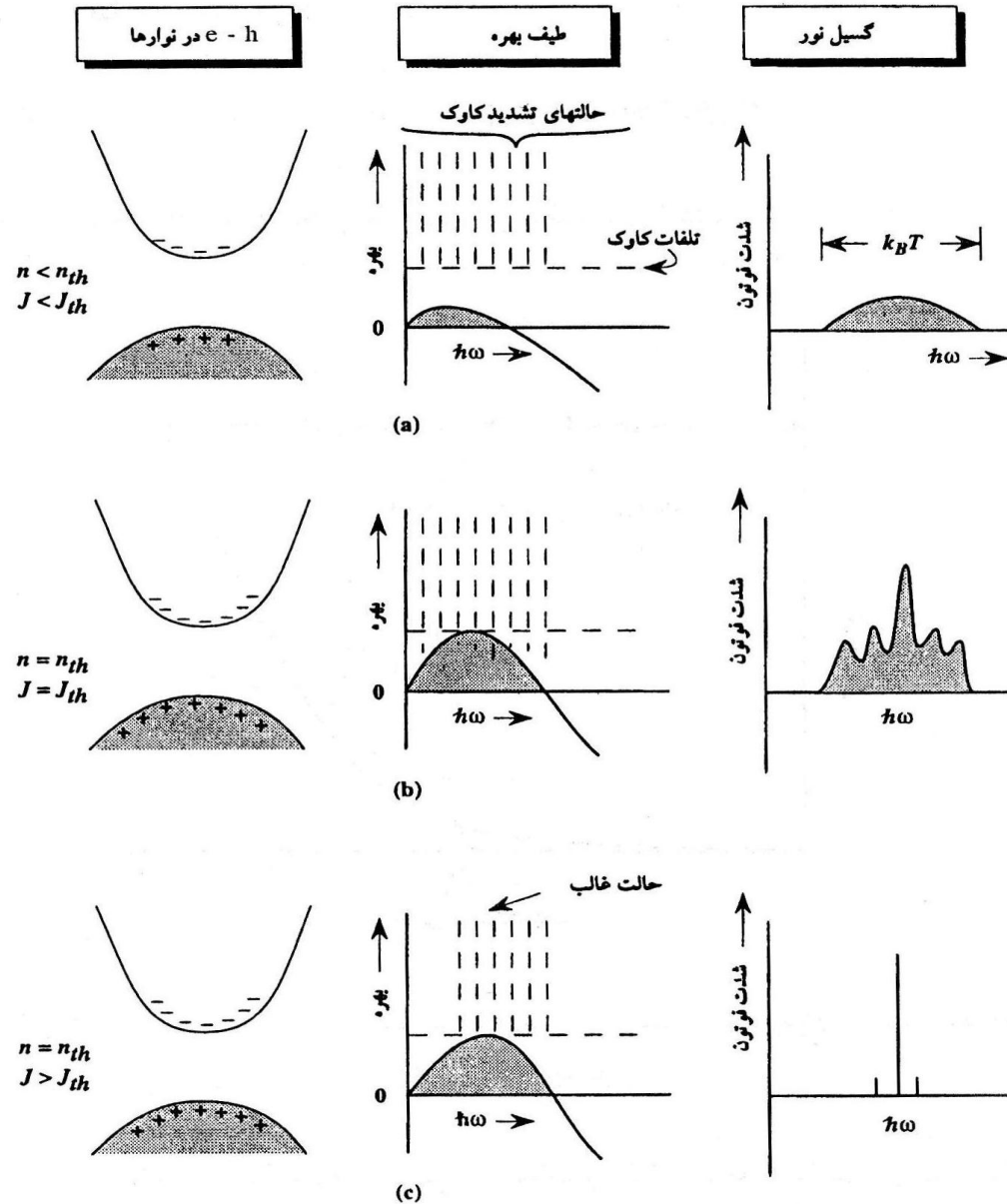
Figure 11-18 In the stripe geometry **laser**, the waveguide width w is reduced for **improved mode** stability. Shown is the buried heterostructure configuration, with the active **GaAs** region surrounded by other materials.

Quantum Well Laser

Figure 11-19 (a) In a **separate confinement heterostructure laser**, the light wave is guided by **optical confinement layers (OCLs)**, whereas the electrons and holes are confined inside the quantum well.

(b) In a **multiple quantum well (MQW)** device, electrons and holes in each quantum well interact with the same light field.



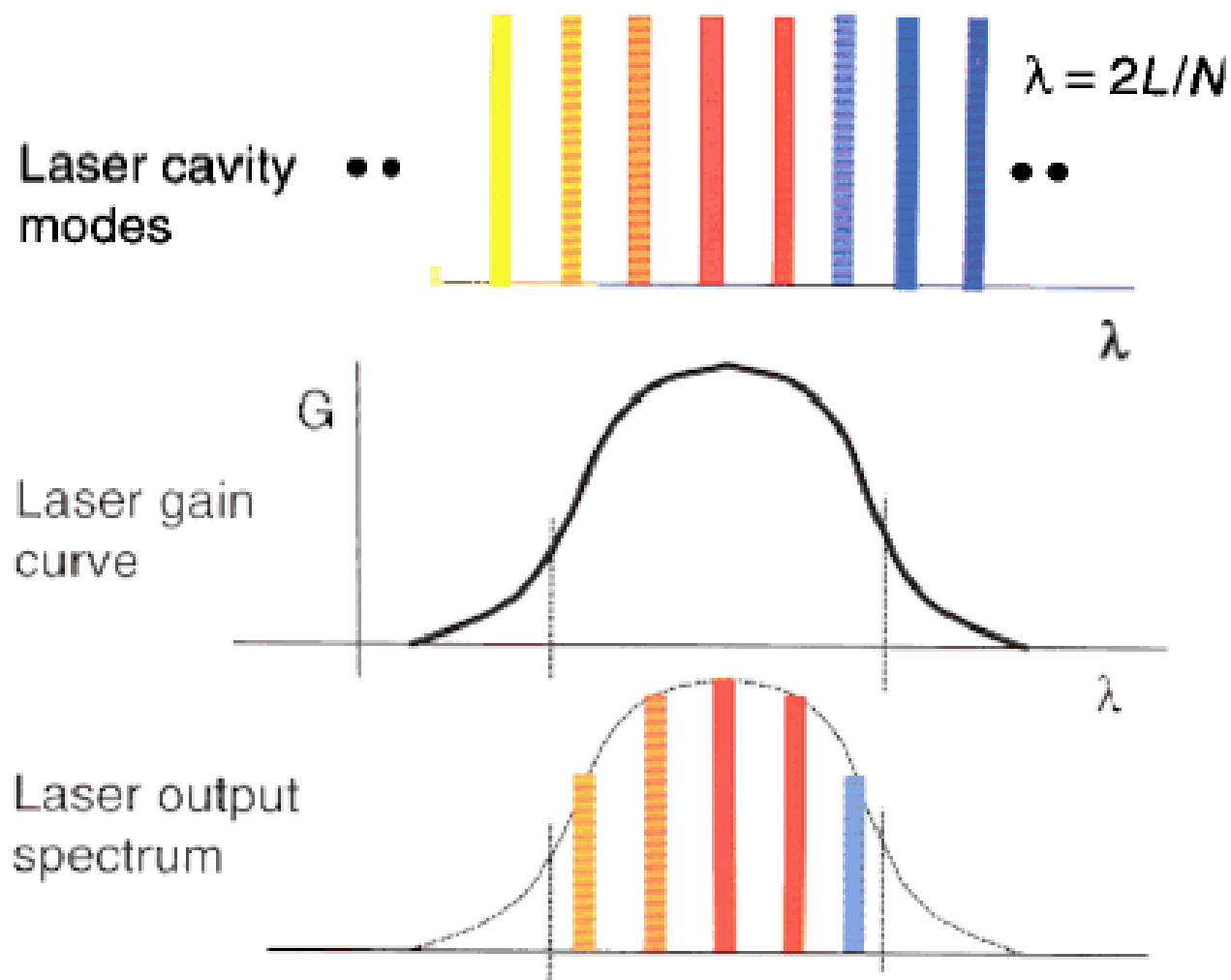


(a) لیزر زیر آستانه:
بهره کمتر از تلفات کاواک است.

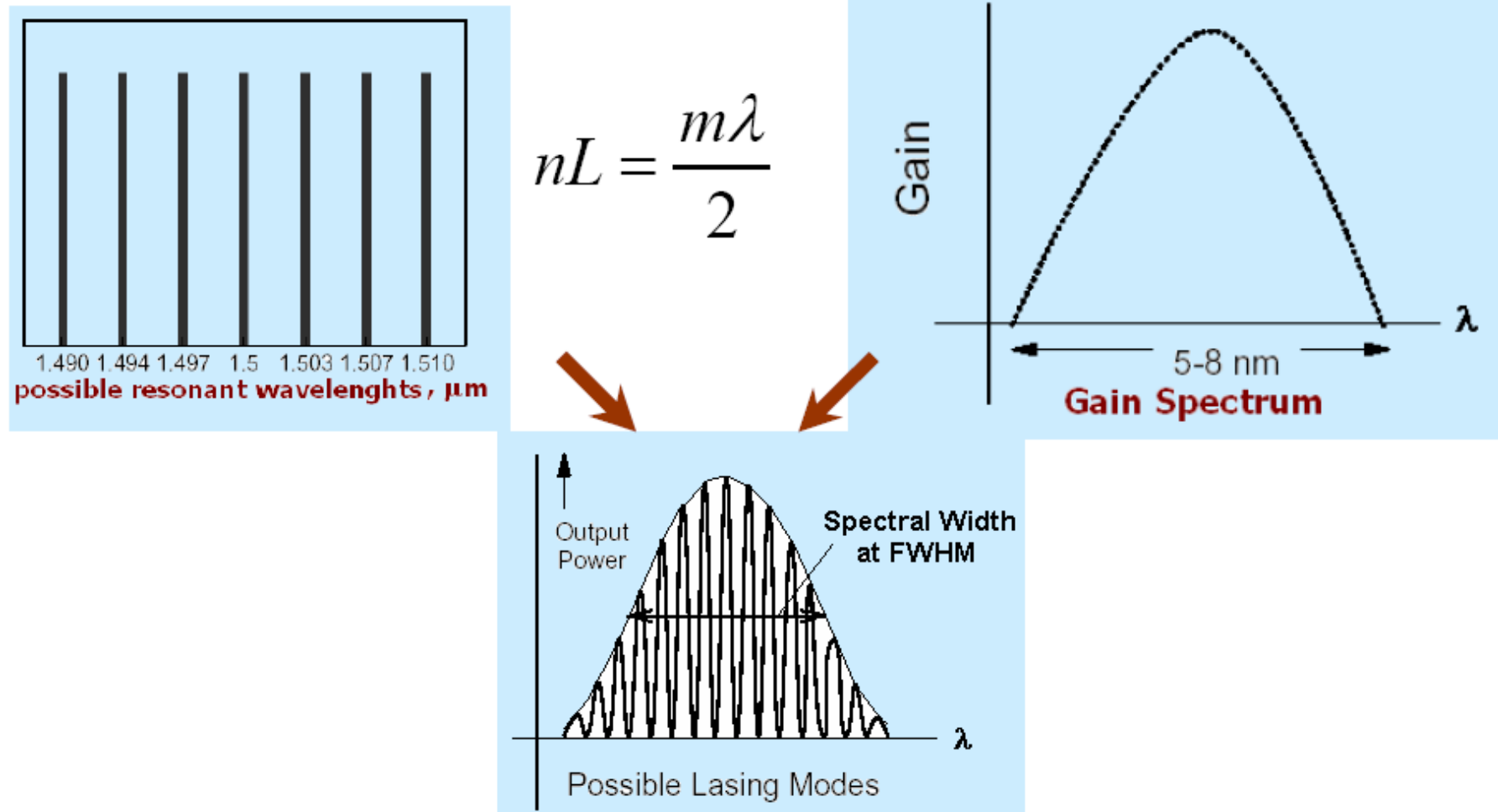
(b) لیزر در آستانه:
چیرگی برخی حالت بر طیف
گسیل، آغاز میشود.

(c) لیزر بالای آستانه:
طیف بهره تغییر نمی کند، ولی
به دلیل گسیل تحریک شده،
حالت غالبی بر گسیل نور چیره
می شود.

مودهای خروجی در لیزر فابری پرو

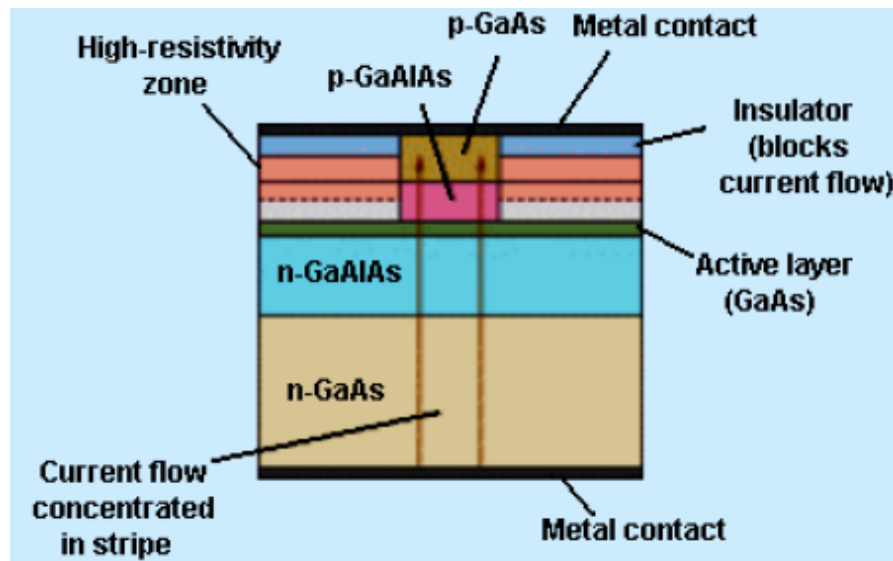


مودهای خروجی در لیزر فابری پرو

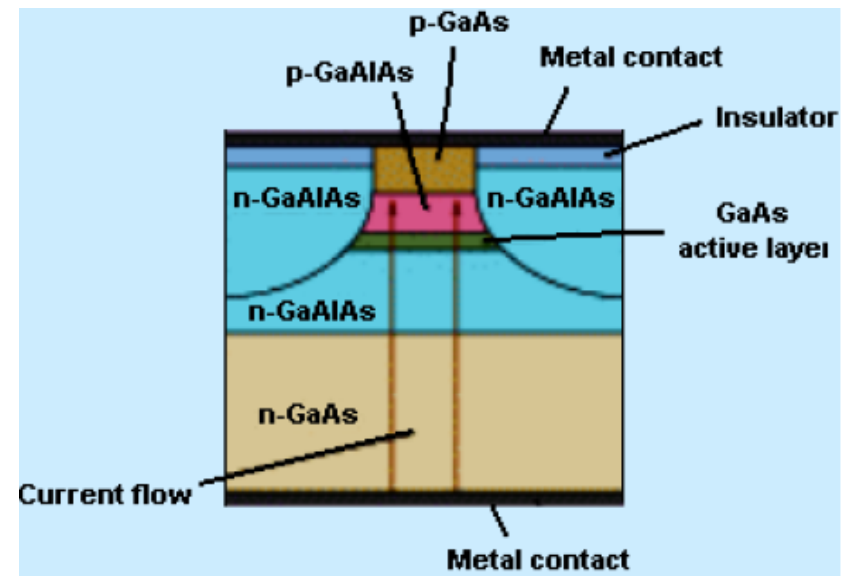


روشهای هدایت نور در لیزر

Gain-Guided



Index-Guided



Grating

❖ چون در لیزر **FP** تعداد طول موجهای زیادی وجود دارد ، لذا برای وضعیت های زیر مناسب نمی باشند:

مالتی پلکسینگ
طول موج

فواصل طولانی

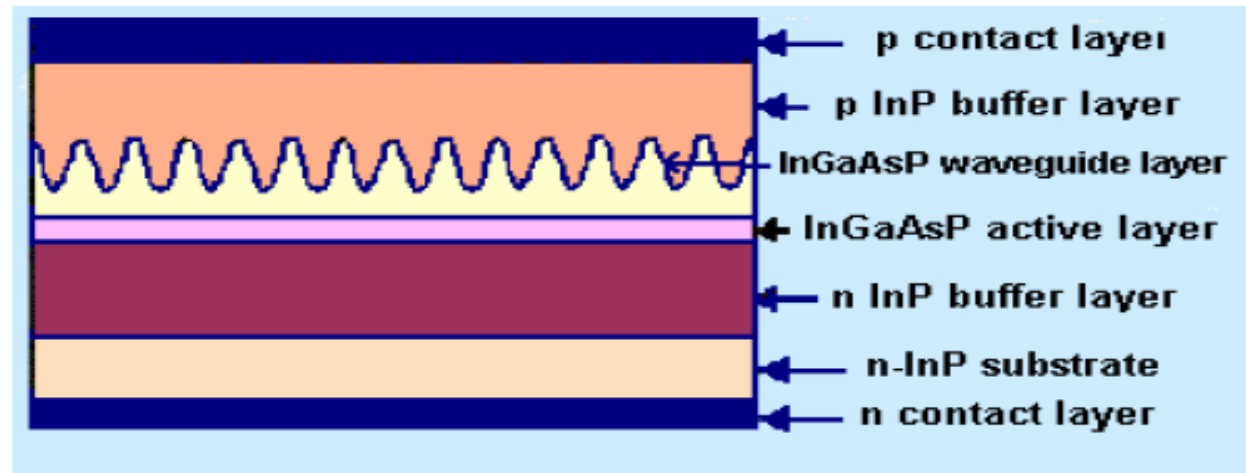
بنابراین:

اصلاحات بوسیله جایگذاری **توریهای پراش** درون کاواک صورت میگیرد.

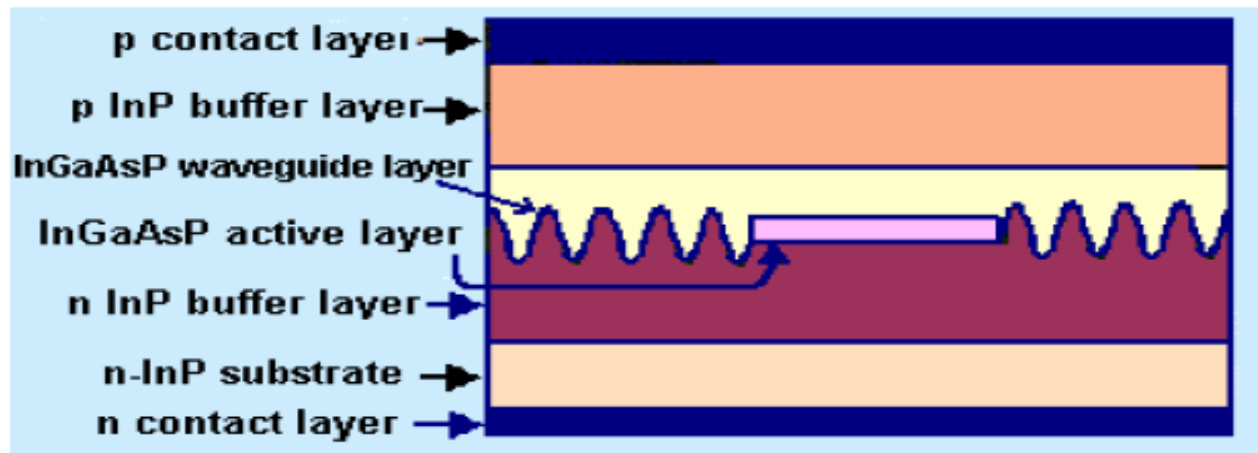
Grating نقش اینه و انتخابگر طول موج را خواهد داشت:

← لیزرهای **DFB** و **DBR** (پهنای خط طیفی باریک در حدود 0.2 تا 0.3 nm)

Distributed Feedback Laser (DFB)



Distributed Bragg Reflector (DBR)



Single-Frequency Laser

1. DFB

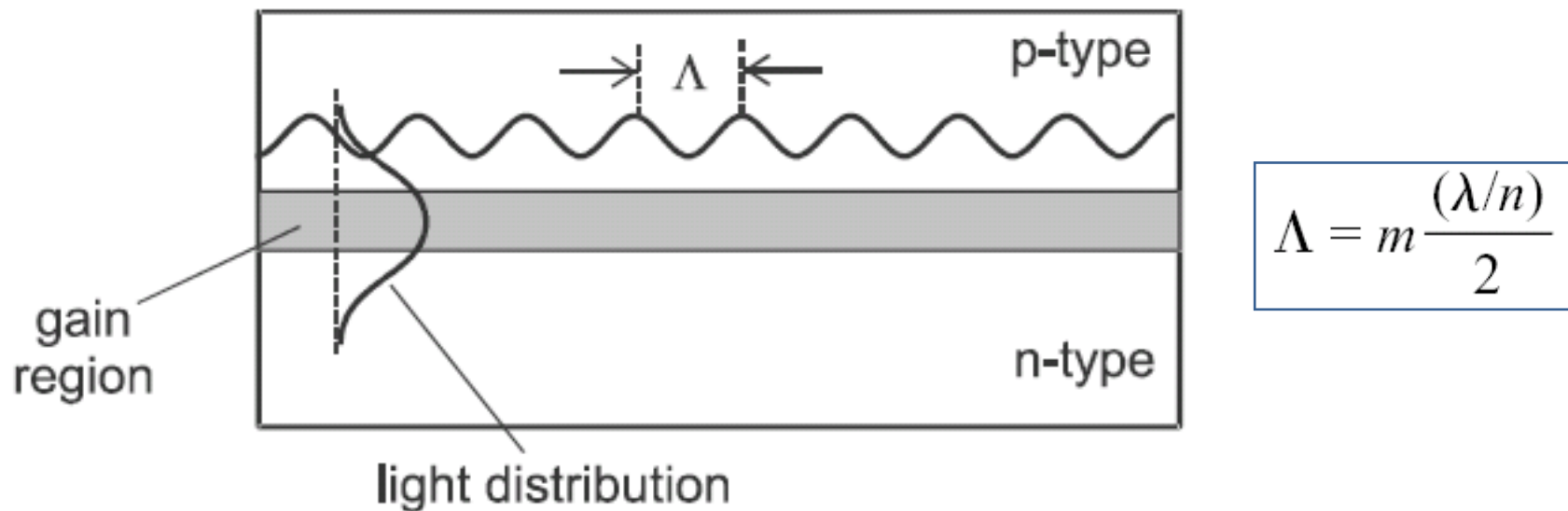
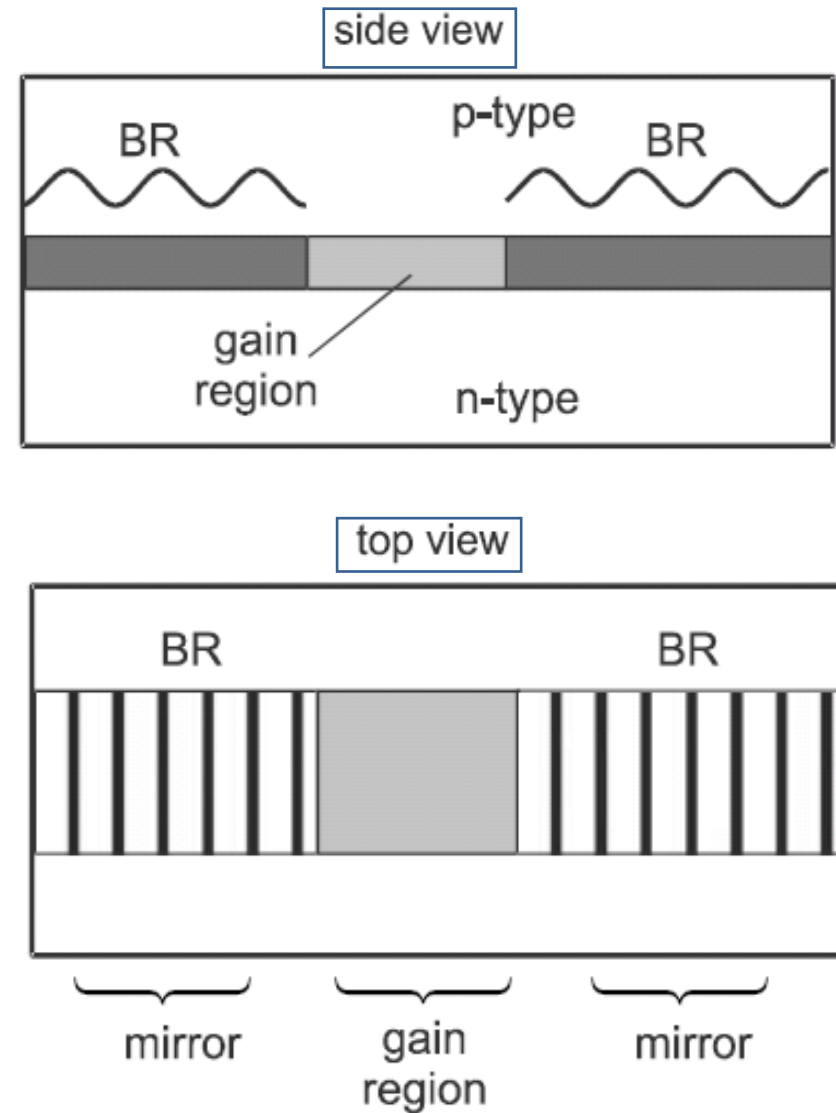


Figure 11-20 In a distributed feedback (DFB) laser, single-frequency operation is obtained by Bragg reflection from corrugations near the gain region.

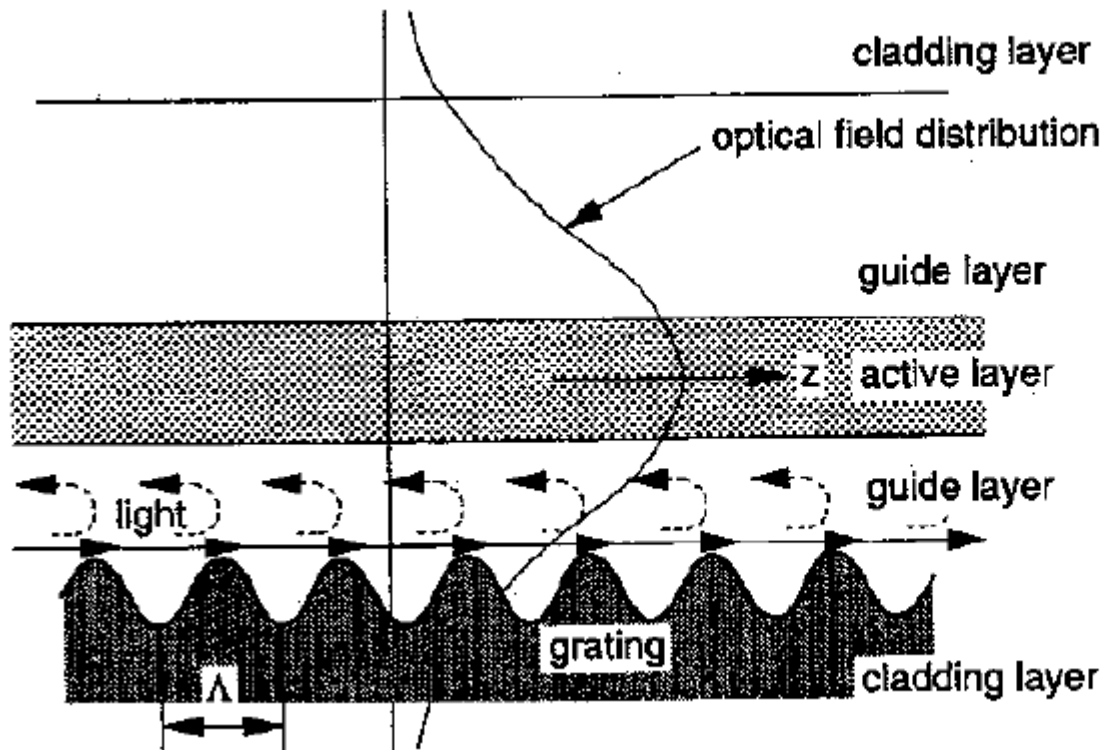
2. DBG

Figure 11-21

In a **distributed Bragg grating (DBG) laser**, single-frequency operation is obtained by reflection from **Bragg gratings** that are separate from the **gain region**, and which act like mirrors.



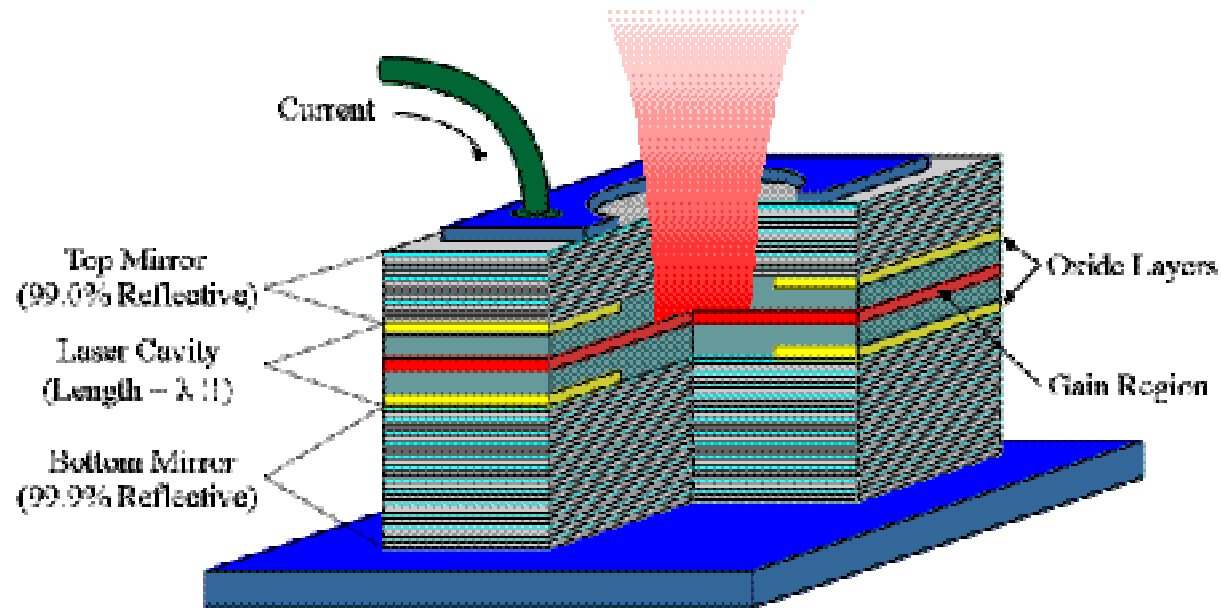
❖ در لیزرهای **DFB** و **DBR** برای طول موجهای براگ انعکاسات از قسمتهای مشخصی از **Grating** بصورت هم فاز هستند و تداخل سازنده رخ میدهد.



$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

لیزرهای گسیل سطحی با کاواک عمودی

Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSEL)



آینه‌ها بصورت لایه‌های یک درمیان از موادی با ضریب شکست مختلف ساخته می‌شوند.

چینه‌های لایه بصورت گریتینگ براگ می‌باشند که آینه انتخاب طول موج می‌باشد.

3. VCSEL

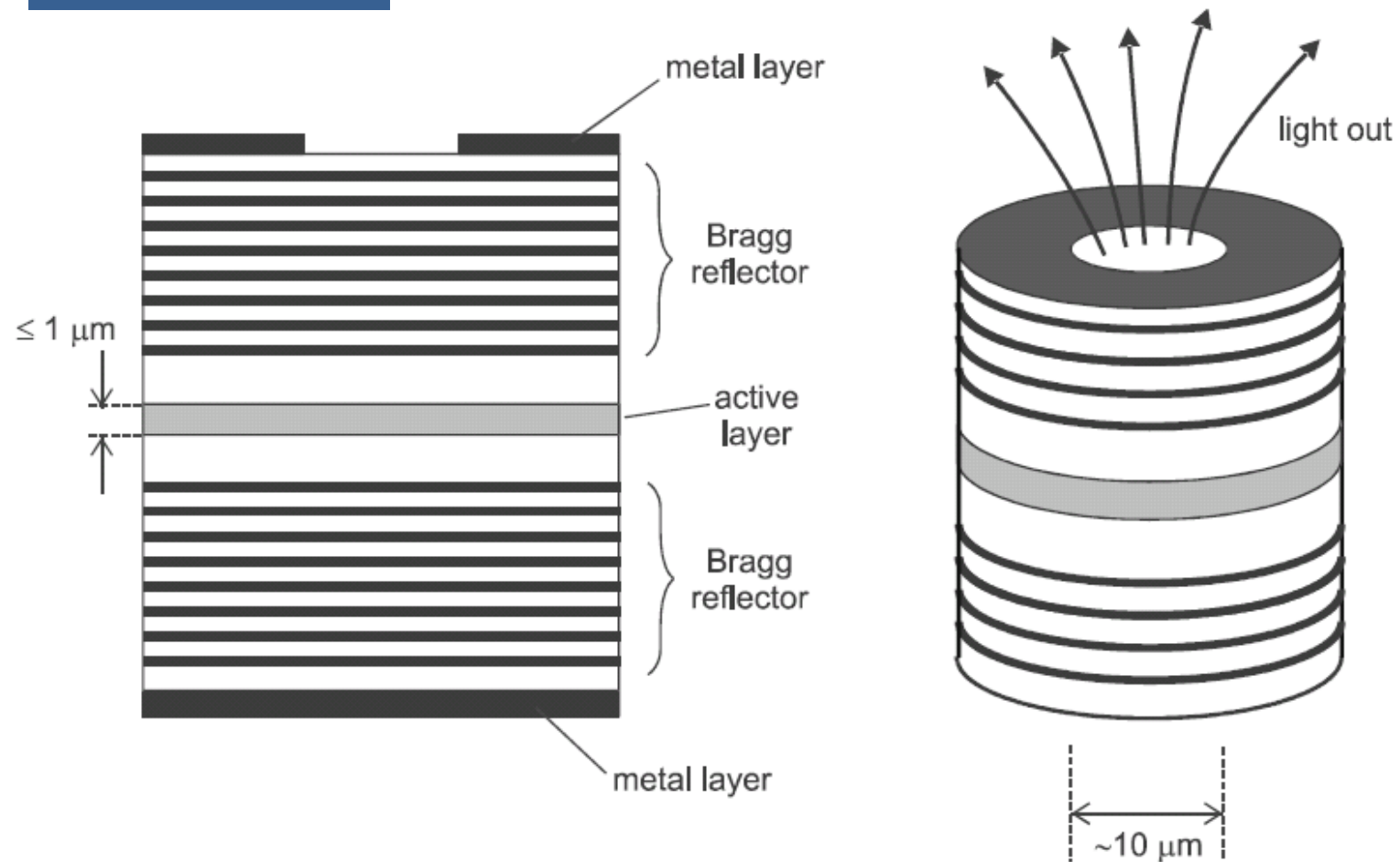


Figure 11-22 In a **vertical cavity surface-emitting laser (VCSEL)**, the laser cavity is perpendicular to the **active layer**, with feedback provided by **Bragg reflectors**.

LED vs. laser spectral width

Single-frequency laser
(<0.4 nm)

Laser output is many times
higher than LED output; they
would not show on same scale

Standard laser
(1-3 nm wide)

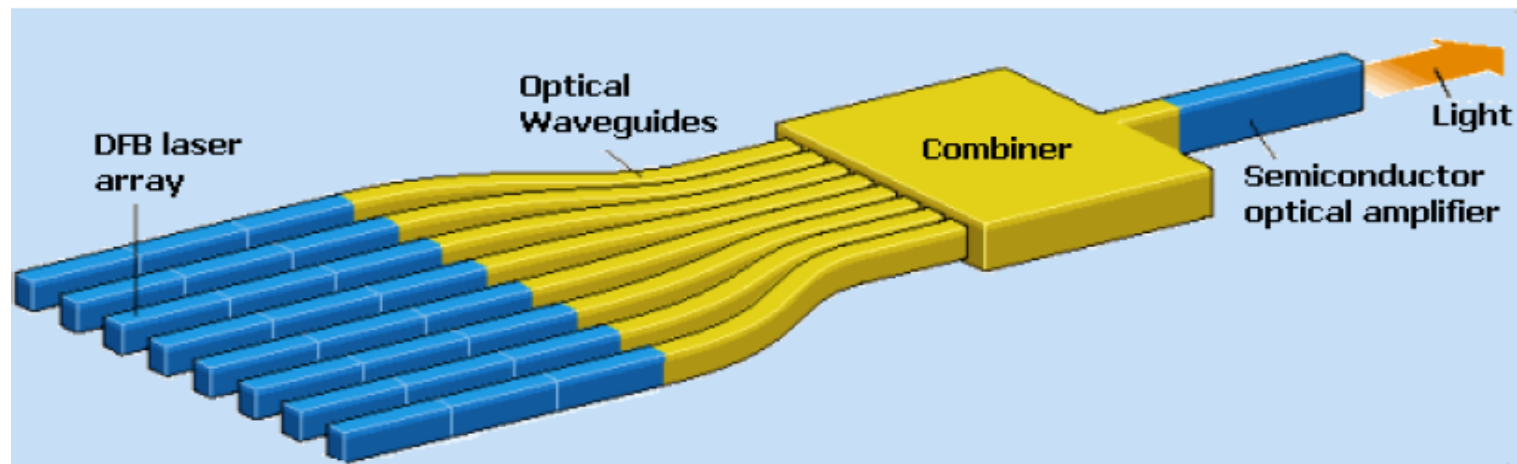
LED (30-50 nm wide)

Wavelength



Multi-Wavelength LASERS

a) Laser Arrays



b) Tunable Lasers

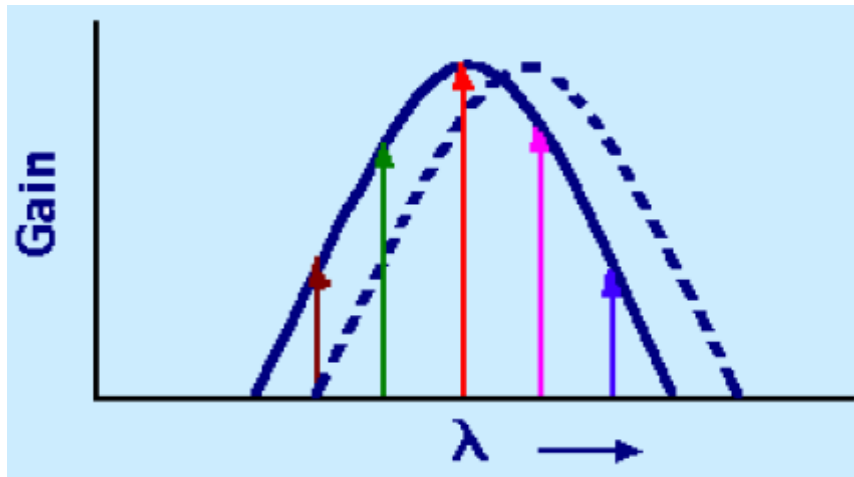
- **External Cavity tunable lasers**
- **Monolithic Integrated Tunable Lasers**

سه راهکار اصلی برای تنظیم کردن طول موج لیزر:

۱. تغییر مشخصه بهره (تغییر n یا اینه های انتخابگر)

۲. شیفیت دادن طیف مد شانه ای (تغییر nL)

۳. تغییرهمزمان n, L با هم



$$nl = m \frac{\lambda}{2}$$

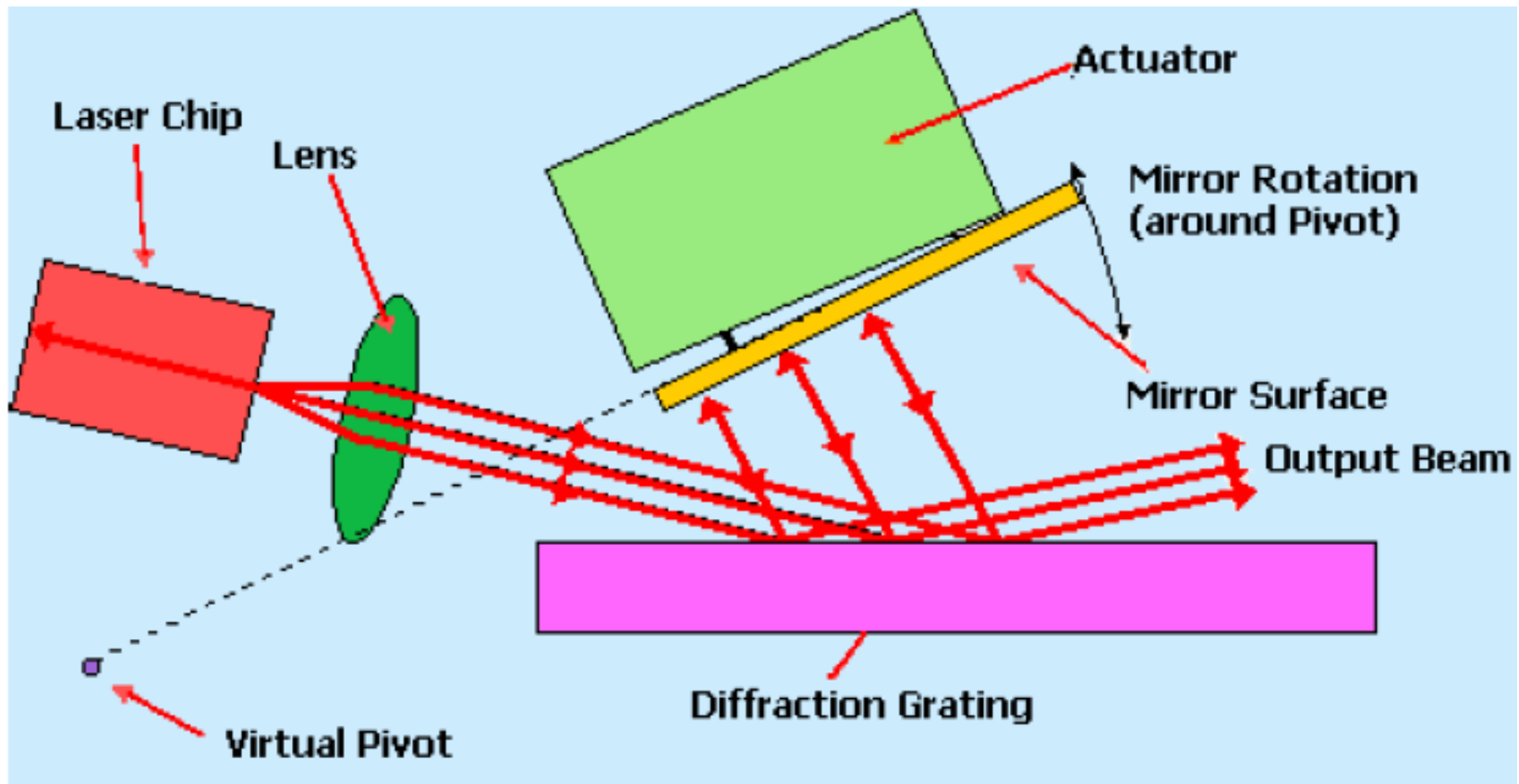
توجه: ضریب شکست وابسته به چگالی حاملهاست

تغییر جریان ناحیه فعال ← تغییر ضریب شکست ← تغییر طول موج

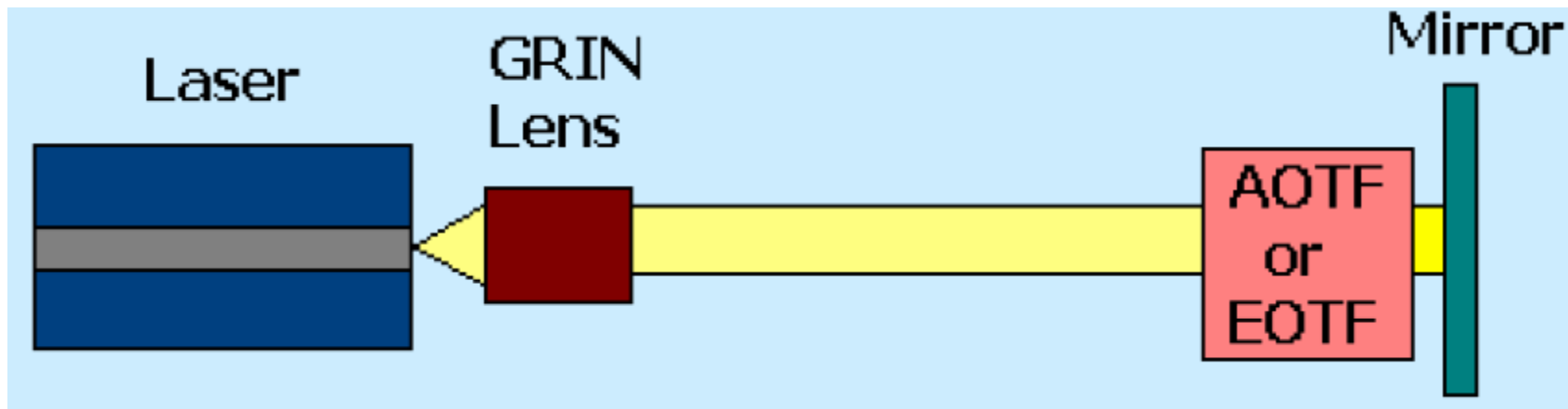
لیزرهای قابل تنظیم با کاواک خارجی

1. **MEMS: Micro-Electro-Mechanical Systems**
2. **AO: Acousto-Optically**
3. **EO: Electro-Optically Tunable Laser**
4. **VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser**

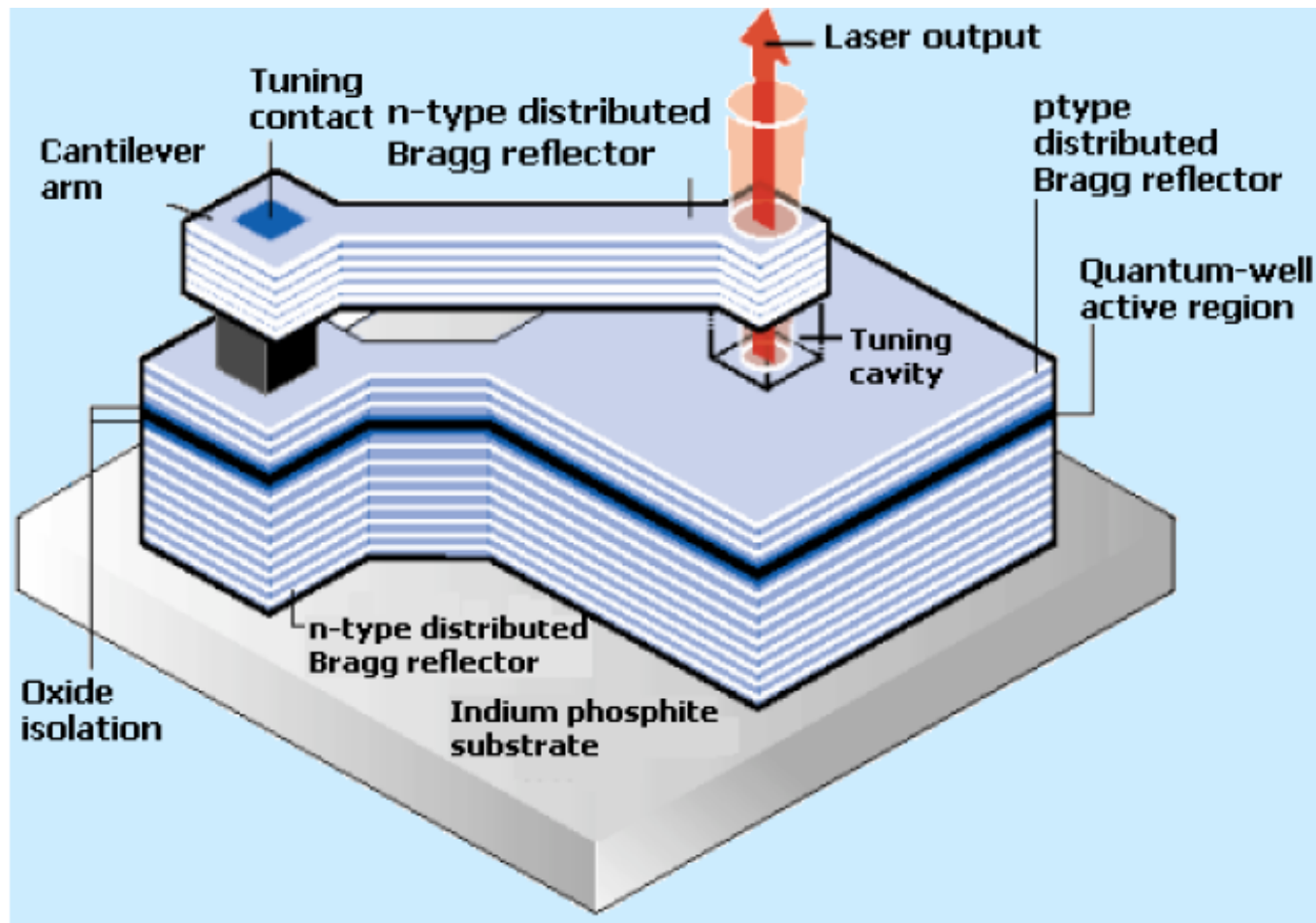
1-MEMS :Micro-Electro-Mechanical Systems



2. Acousto-Optically (AO)
3. Electro-Optically (EO)
Tunable Laser



4. Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)



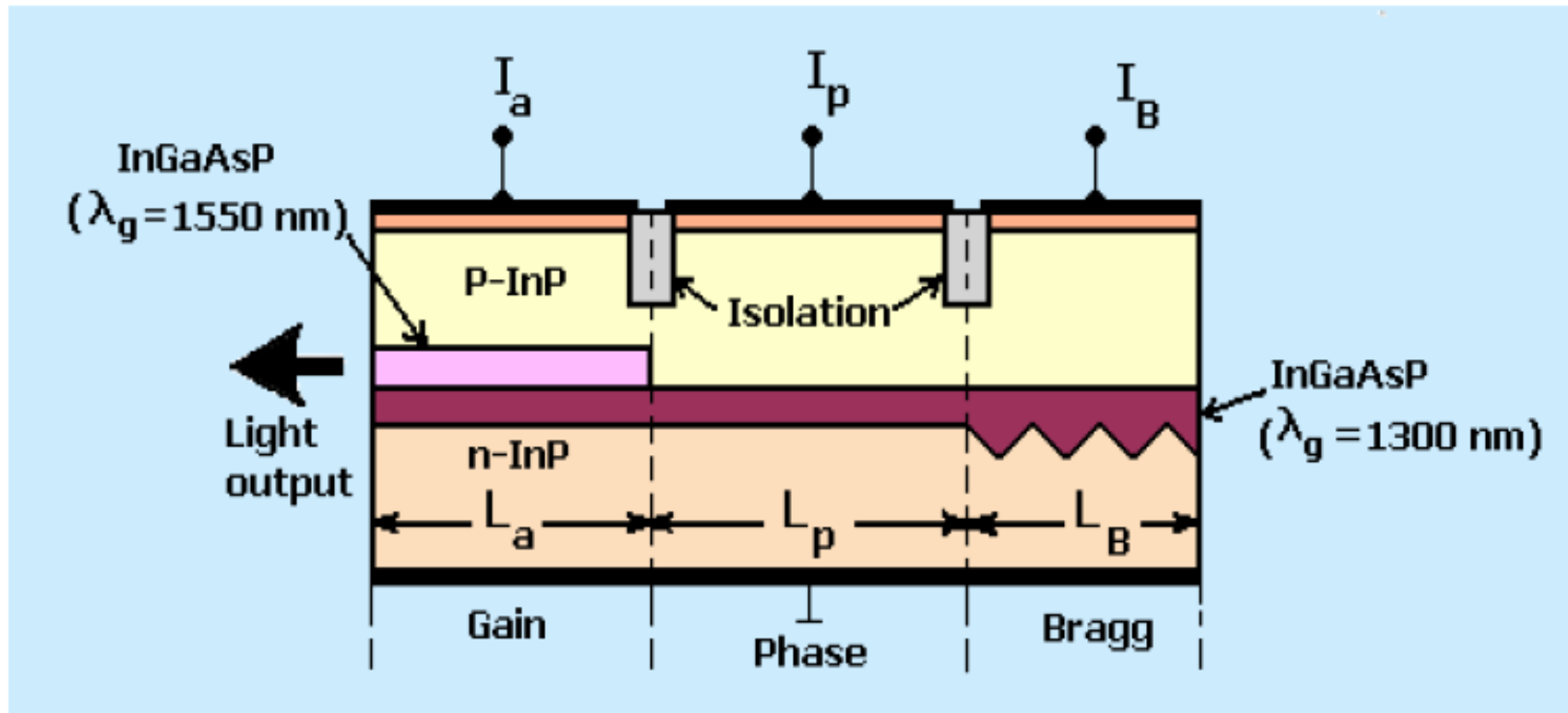
لیزرهای قابل تنظیم که بصورت یکپارچه مجتمع شده اند:

1. Three-Section DBR Laser

2. Three-Section DFB Laser

3. Sampled Grating-DBR(SG-DBR)

1-three-section DBR laser

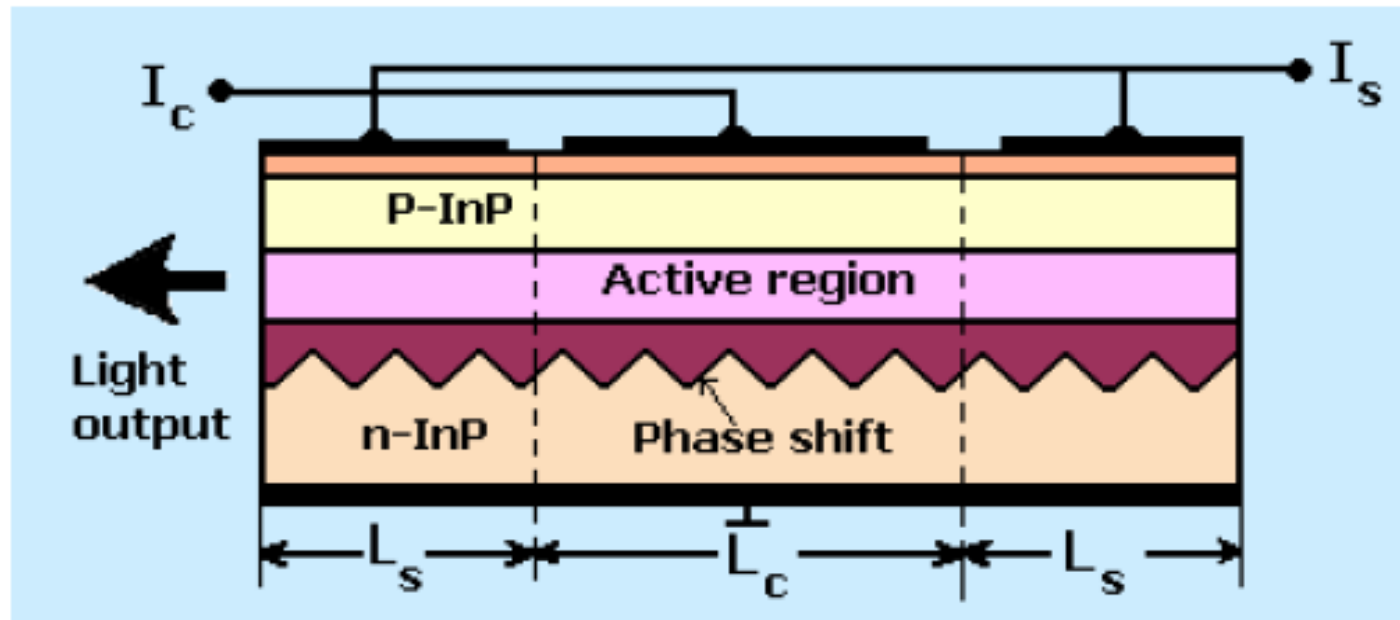


I_a , optical gain

I_p , location of comb-mode spectrum

I_B , Cavity gain peak wavelength(Bragg wavelength)

2-three-section DFB Lasers



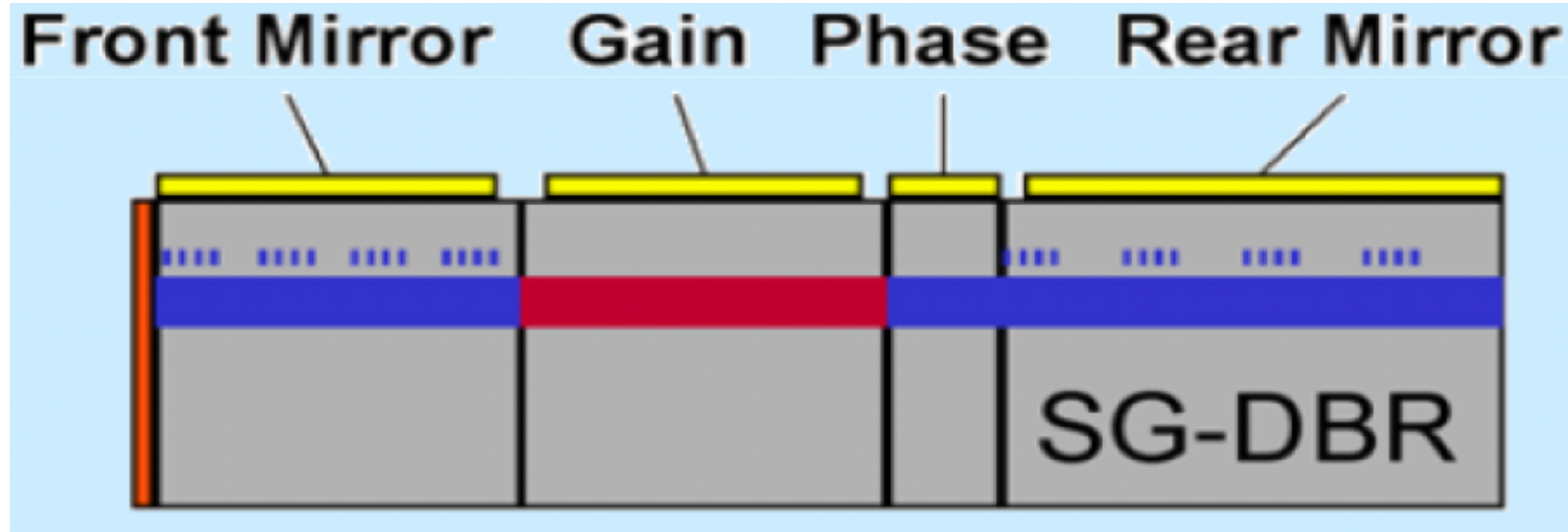
I_s , optical gain (higher than threshold current)

I_c , tuning current that is a little less than or equal to threshold current)

۳- لیزر قابل تنظیم با گریٹینگ نمونه برداری (Sampled Grating – DBR)

قسمت هایی از گریٹینگ به طور متناوب در امتداد طول آن حذف می شود. به عبارتی از گریٹینگ نمونه برداری می شود.

- ❖ در قسمت بهره، تزریق جریان توان خروجی را کنترل می کند.
- ❖ در قسمت آینه ها، وارد کردن حامل های تزریقی، تغییر در ضریب شکست ایجاد می کند که طول موج لیزر را از طریق شیفت در طیف انعکاسی DBR تنظیم می کند.
- ❖ قسمت فاز مدهای کاواک را تنظیم می کند.



مشخصات لیزرهای قابل تنظیم

مدت زمان تنظیم (میکرو ثانیه)	محدوده تنظیم (نانومتر)	نوع منبع
۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی ثانیه	۱۰ تا ۲۰	لیزرهای قابل تنظیم مکانیکی
ده ها میکرو ثانیه	۱۰ تا ۲۰	لیزرهای قابل تنظیم صوتی - نوری و الکتریکی - نوری
۰.۵ تا ۱۰ نانو ثانیه	۴	لیزرهای قابل تنظیم با تزریق جریان
کمتر از ۶۵ پیکو ثانیه	سوییچ شدنی	منابع سوییچ شده
۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی ثانیه	۱۶ کانال با فواصل ۲۰۰ گیگا هرتز	آرایه های فازی (گریتینگ موجبر آرایه ای)
۱ تا ۱۰ نانو ثانیه		آرایه ساده (DFB)

