

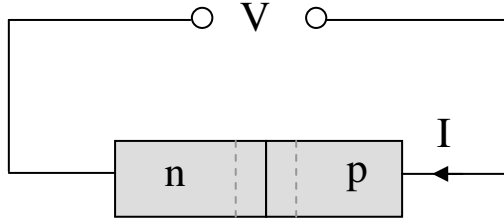
# Yarıiletken Optoelektronik Devre Elemanları

# Optoelektronik Devre Elemanları

- p-n Eklemlerinin Optoelektronik Uygulamaları
- Işık Üreteçler
  - » Işık Yayan Diyotlar (LED)
  - » Lazerler
- Işık Dönüştürücüler
  - » Işık Dedektörleri
  - » Güneş Pilleri
- Işık İleticiler: Dalga Kılavuzları
  - » Optik Fiberler
  - » Yarıiletken Dalga Kılavuzları
- Işık Modülatörleri

# Yarıiletken Eklemler: I-V Eğrileri

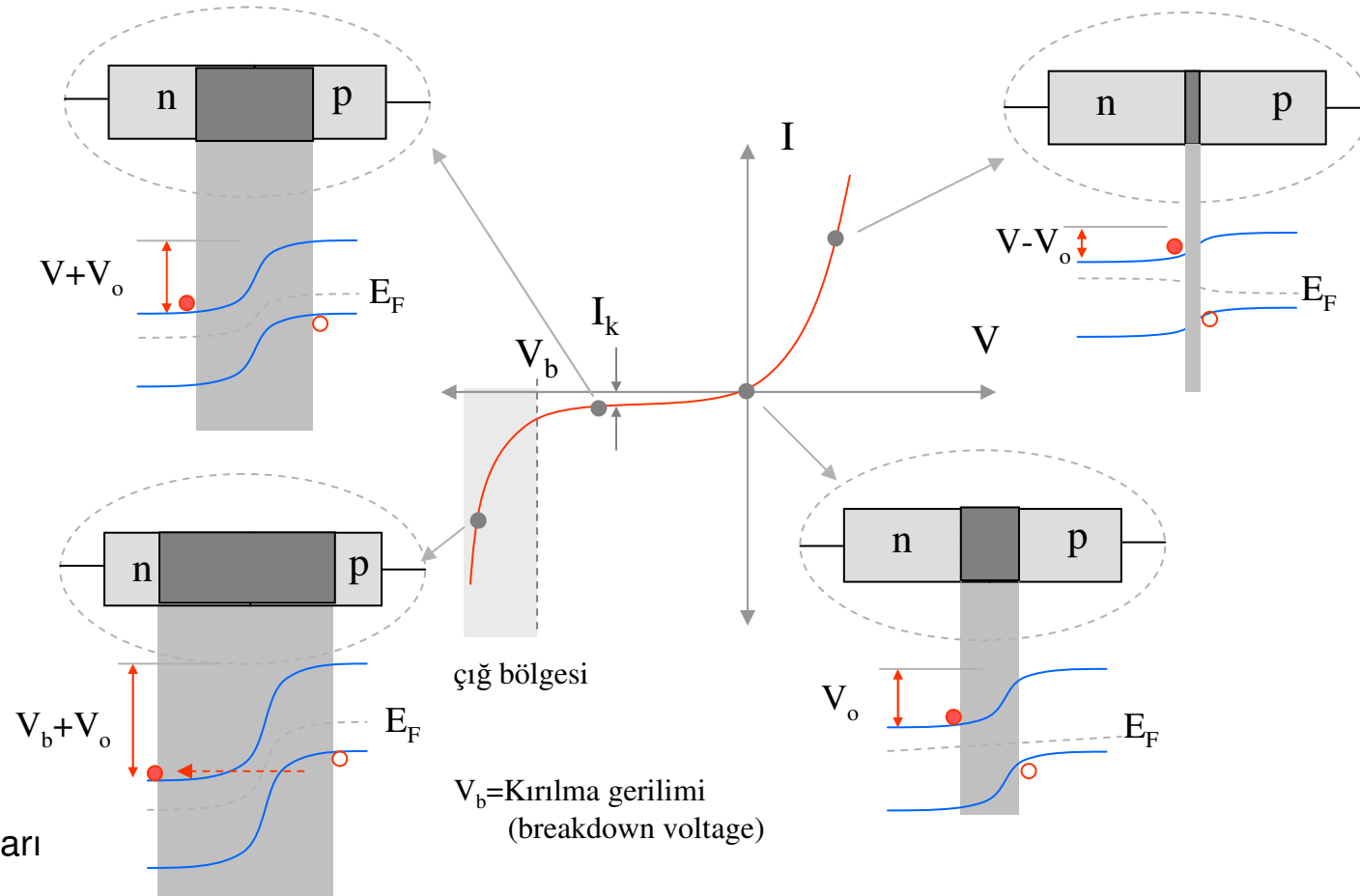
Aydınlatma Yok



$$I(V) = I_k (e^{qV/kT} - 1)$$

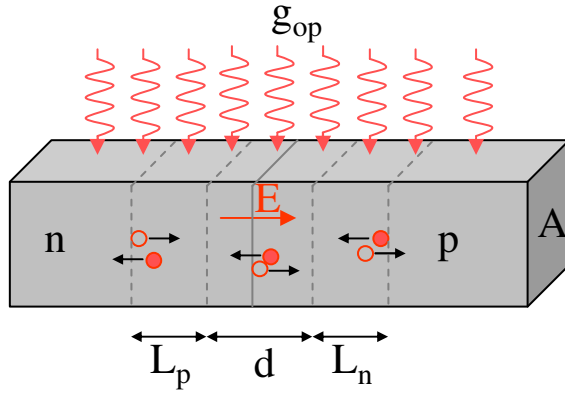
$I_k$ =karanlık akım

$$I_k = qA \left( \frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right)$$



# Işık Altında p-n Eklemi

p-n eklemi  $h\nu > E_g$  enerjili düzgün bir ışıkla aydınlatılırsa ( $g_{op}$ ) eklemin tüketim bölgesinde elektron ve deşik çiftleri oluşur.

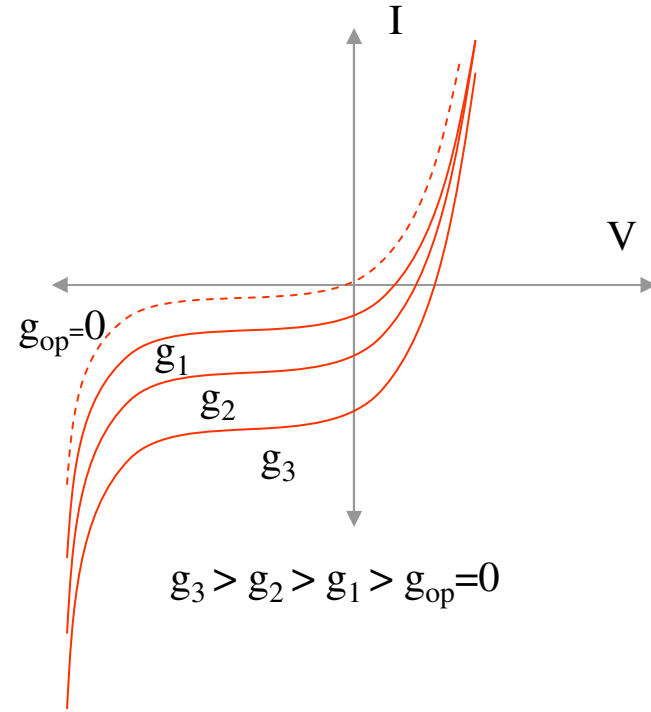


$g_{op}$  = optik güç (EHP/cm<sup>3</sup>-s)

E = yapısal elektrik alan

$L_p$  = deşik difüzyon uzunluğu

$L_n$  = elektron difüzyon uzunluğu



$g_3 > g_2 > g_1 > g_{op}=0$

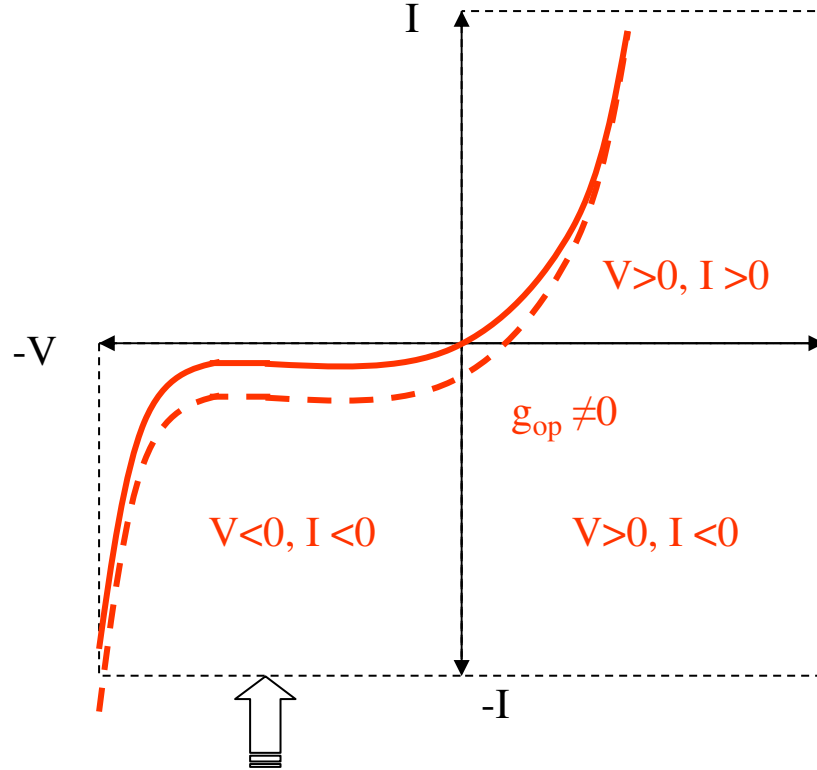
$$I = I_k (e^{qV/kT} - 1) - I_{op}$$

$$I_{op} = qAg_{op}(d + L_n + L_p)$$

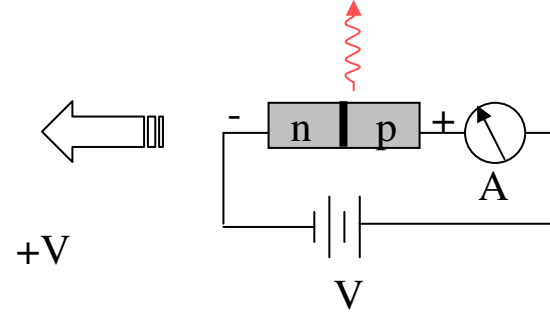
$$g_{op}=0 \quad I = I_k (e^{qV/kT} - 1)$$

# Yarıiletken Eklemlerin Optoelektronik Uygulamaları

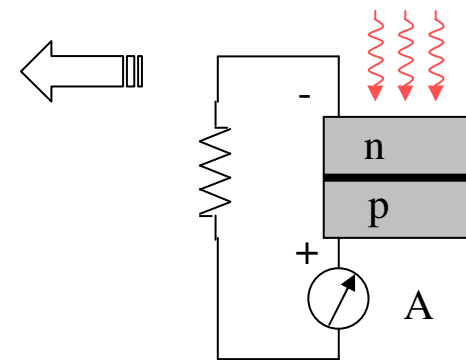
Yarıiletkenlerin optoelektronikte kullanılması farklı katkılanma ve eklemler yapılarak mümkündür



I. Bölge ( $V > 0, I > 0$ ): LED ve Lazerler

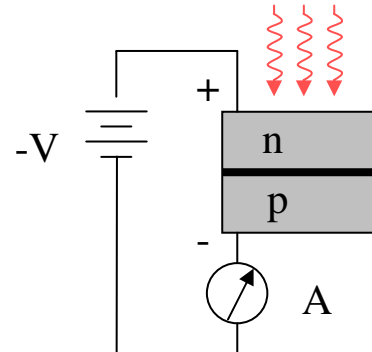


IV. Bölge ( $V > 0, I < 0$ ): Güneş Pilleri



III. Bölge ( $V < 0, I < 0$ ): Dedektörler

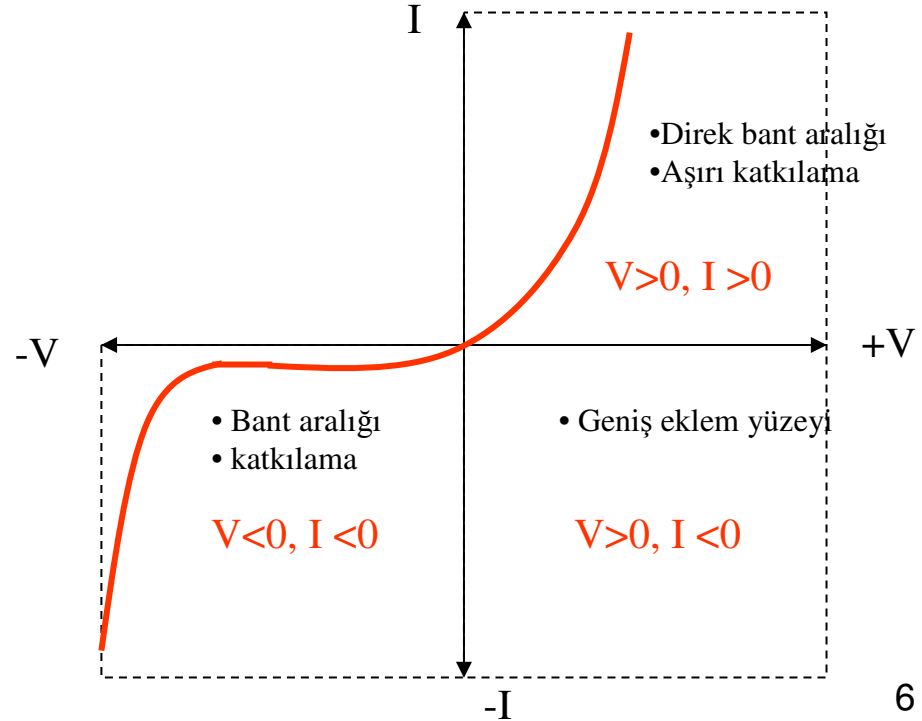
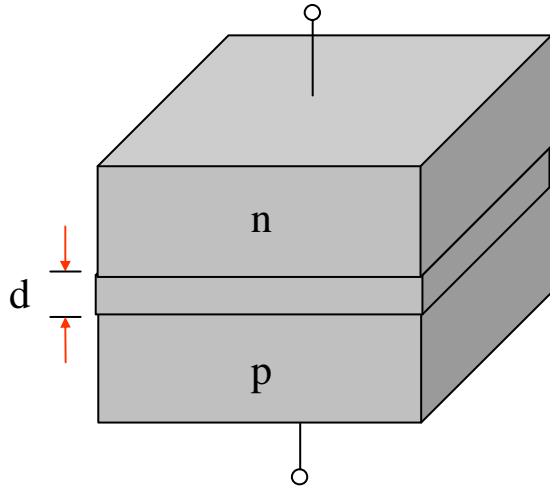
Akım gerilimden bağımsız, optik şiddet ile orantılı



# Yarıiletken Eklemlerin Optoelektronik Uygulamaları

Yarıiletkenlerin optoelektronikte kullanılması farklı katkılanma ve eklemler yapılarak mümkündür

- Eklemlerde kullanılan malzemenin bant yapısı-direk-indirek (ışık algılayıcı-ışık yayıcı)
- Malzemenin yasak bant aralığı (yayılan veya algılanan ışığın frekansı)
- Katkılama oranı (tüketim bölgesinin genişliği-d)
- Boyut kuantalanması (verimli optoelektronik devre elemanları)

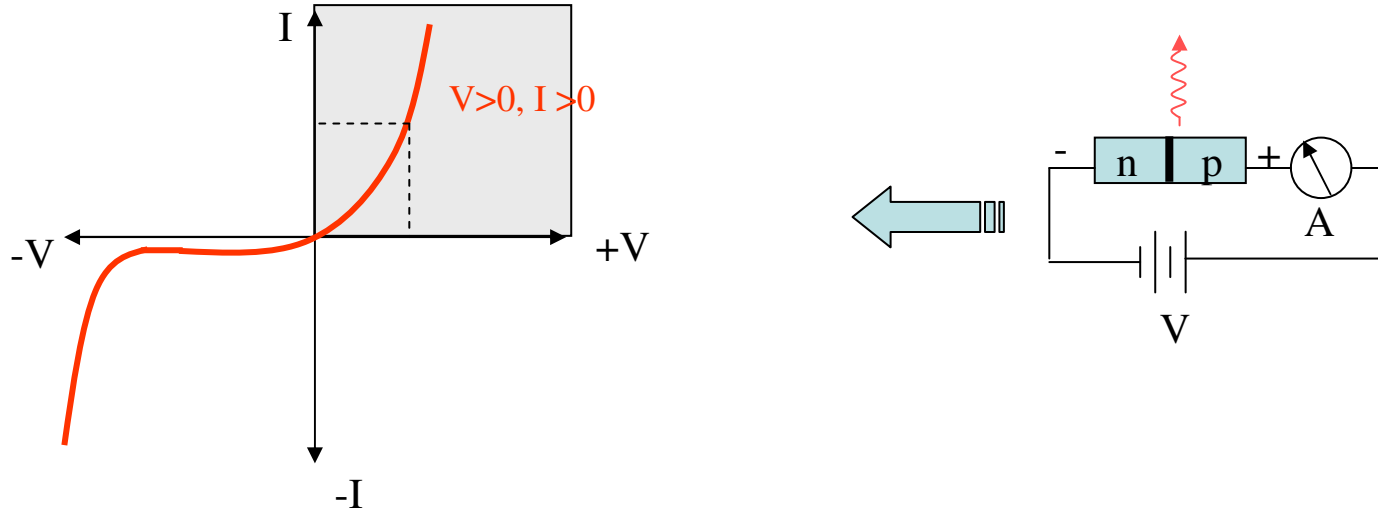


# Işık Yayan Optoelektronik Elemanlar

## LED LAZER

# Işık Yayan Optoelektronik Elemanlar

Uygun bir p-n eklemi I-V eğrisinin I. bölgesinde çalıştırılırsa eklem tüketim bölgesinde elektron ve deşikler belli bir eşik gerilimin üstünde eklem bölgesinde birleşerek dalgaboyu bant aralığına eşit ışık yayabilir



Elektron ve deşikleri en düşük gerilimle ve en verimli şekilde birleştirecek tasarım

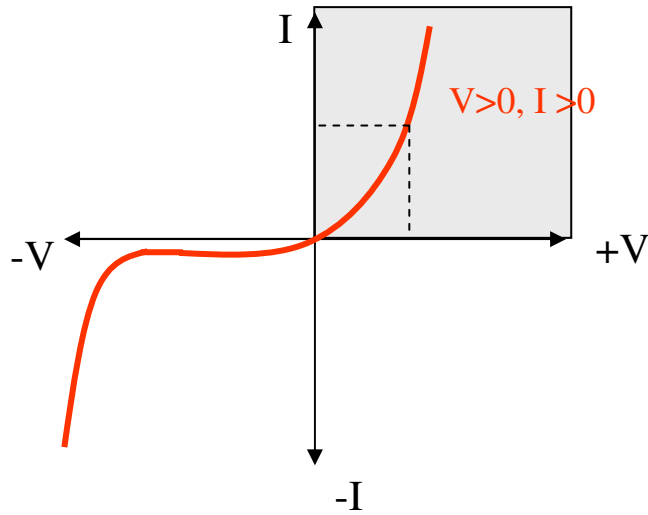
Bu amaç için:

- Direk bant aralığına
- Aşırı katkılanmış n ve p tipi eklemler kullanılmalıdır



# Işık Yayan Optoelektronik Elemanlar-Genel Özellikler

Uygun bir p-n eklemi I-V eğrisinin I. bölgesinde çalıştırılırsa eklemin tüketim bölgesinde elektron ve deşikler belli bir eşik gerilimin üstünde eklem bölgesinde birleşerek dalgaboyu bant aralığına eşit ışık yayabilir

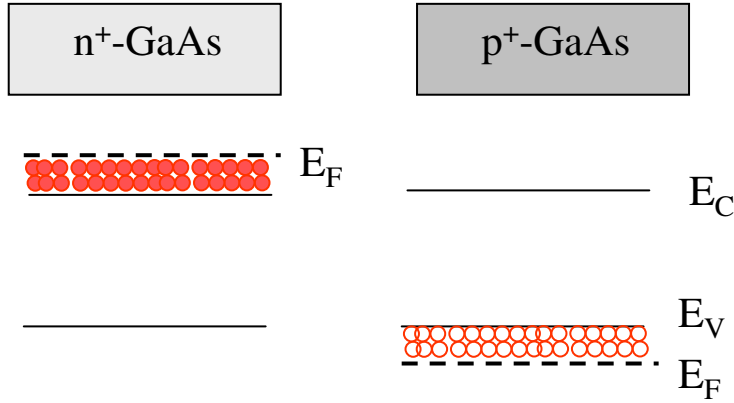


- Kuantum Verimlilik
- Eşik Akım
- Frekans Bantgeniřliđi

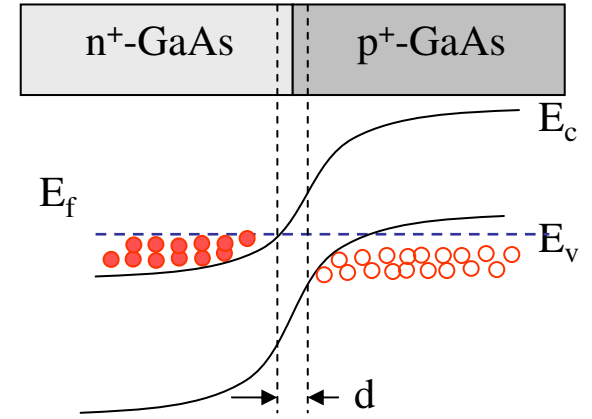
# Işık Yayan Diyotlar (LED)

Aşırı katkılanmış  $n^+$  ve  $p^+$  tipi eklemlerde Fermi enerji seviyesi bant aralığından ziyade bant içinde bulunur. Tüketim bölgesinin genişliği katkılanmanın yoğunluğuna bağlıdır.

(a) Ayırık  $n$  ve  $p$  tipi yarıiletkenler ve enerji seviyeleri

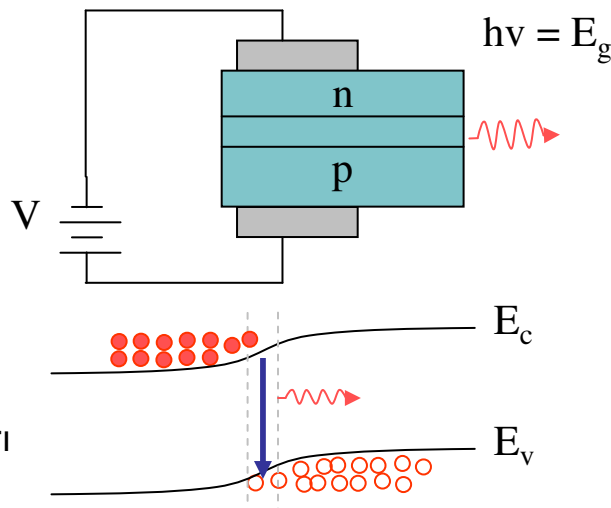


(b) Sıfır gerilim altında  $p$ - $n$  eklemi

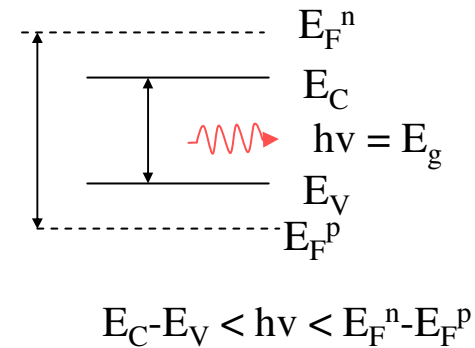


$$d = \left[ \frac{2\epsilon V_o}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2}$$

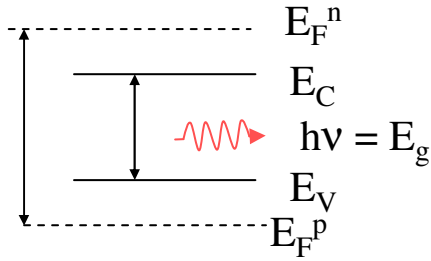
(c) İleri besleme durumu



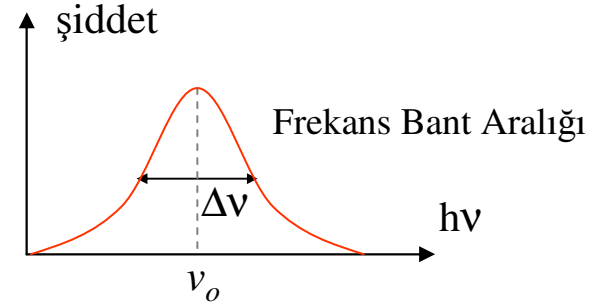
(d) Oluşacak olan ışığın frekans aralığı



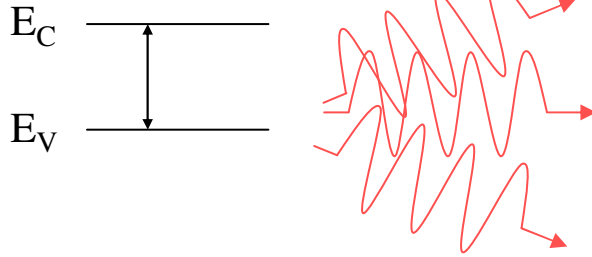
# LED Işığının Özelliği



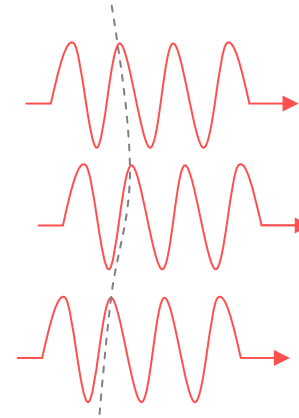
$$E_C - E_V < h\nu < E_F^n - E_F^p$$



Eşik değerin altındaki durum  
(uyumsuz (koherent olmayan) ışımaya)



yön



Faz yüzeyleri

Işık:

- Uyumlu (koherent) değildir
- Tek renkli (monokromatik) değildir
- Yönlü değildir
- Kutuplu değildir

# Lazerler-Genel Kavramlar

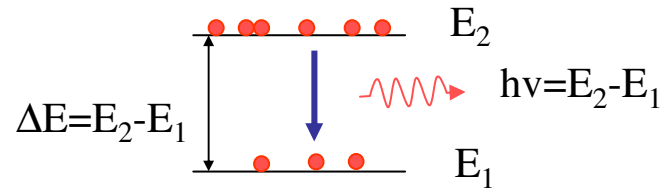
LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Türkçesi LAZER

Lazerler ışığının özelliği

- Uyumlu (Koherent)
- Tek renkli (Monokromatik)
- Yönlü
- Kutuplu

Lazerlerin çalışma prensibini anlamak için enerjileri  $E_2$  ve  $E_1$  olan iki enerji seviyesini göz önüne alalım

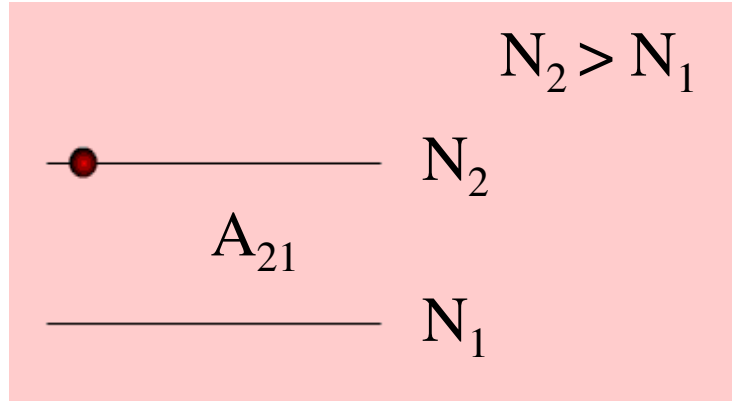


# Optik Geçişler

## Kendiliğinden Geçiş (Işıma)

(spontaneous emission)

$$A_{21}N_2$$



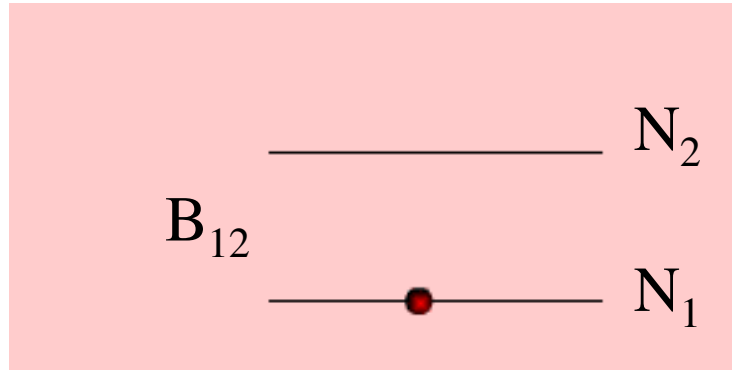
kendiliğinden geçiş

$\tau_k$

## Soğurma

(absorption)

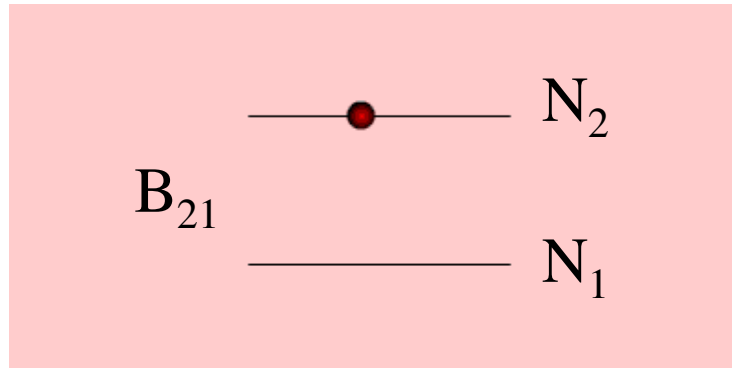
$$B_{12}N_1\rho(h\nu)$$



## Uyarılmış Geçiş (Işıma)

(stimulated emission)

$$B_{21}N_2\rho(h\nu)$$

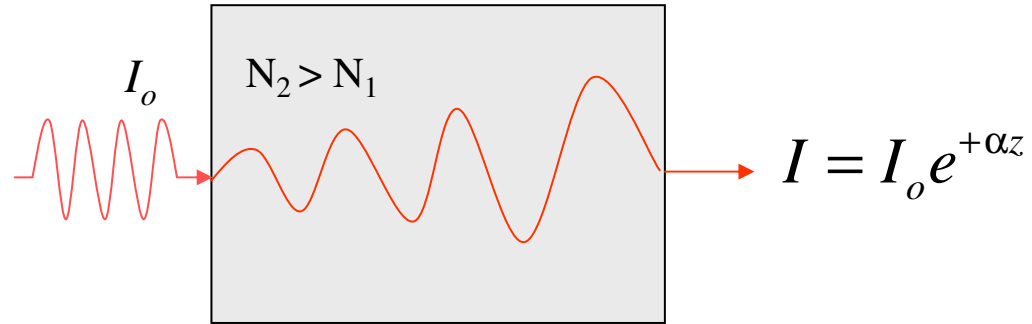


Uyarılmış geçiş

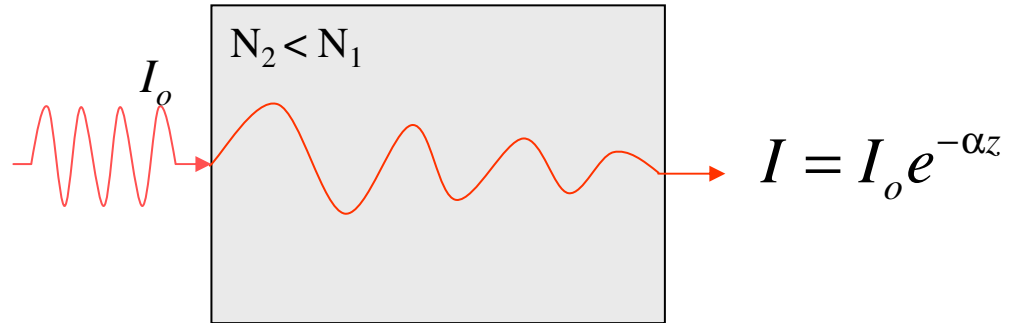
$\tau_u \approx 10^{-8} \text{ s} \ll \tau_k$

# Lazer Ortamı

Kazanç ortamı



Kayıplı ortam



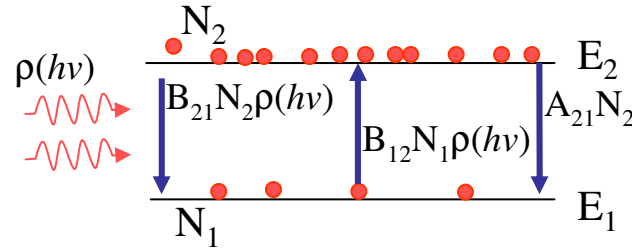
# Lazerler-Genel Kavramlar

$\rho(h\nu)$  foton alanının varlığında uyarılmış geçişin yanı sıra soğurma ve kendiliğinden geçiş oluşur

$$B_{21}N_2 \rho(h\nu) = \text{Uyarılmış geçiş oranı}$$

$$B_{12}N_1 \rho(h\nu) = \text{Soğurma oranı}$$

$$A_{21}N_2 = \text{Kendiliğinden geçiş oranı}$$



**Foton alanı durumunda**  $\Rightarrow$  
$$\frac{\text{Uyarılmış geçiş oranı}}{\text{Kendiliğinden geçiş oranı}} = \frac{B_{21}N_2\rho(h\nu)}{A_{21}N_2} = \frac{B_{21}}{A_{21}}\rho(h\nu) \dots\dots 1$$

**Uyarılmış geçişi soğurmadan fazla yapmak için  $N_2 > N_1$**

$$\frac{\text{Uyarılmış geçiş oranı}}{\text{Soğurma oranı}} = \frac{B_{21}N_2\rho(h\nu)}{B_{12}N_1\rho(h\nu)} = \frac{B_{21}N_2}{B_{12}N_1} \dots\dots 2$$

# Lazerler-Genel Kavramlar

$B_{21}N_2 \rho(h\nu)$  = Uyarılmış geçiş oranı

$B_{12}N_1\rho(h\nu)$  = Soğurma oranı

$A_{21}N_2$  = Kendiliğinden geçiş oranı

Denge durumunda

$$B_{12}N_1\rho(h\nu)=A_{21}N_2 + B_{21}N_2\rho(h\nu)$$

$B_{12}, A_{21}, B_{21}$  : Einstein katsayıları

Isıl dengede durumunda ve siyah cisim ışınım denklemini kullanarak

$$B_{12} = B_{21}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} = \frac{8\pi h}{\lambda^3}$$

Ödev: Einstein katsayılarının

$$B_{12} = B_{21}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

olduğunu gösteriniz

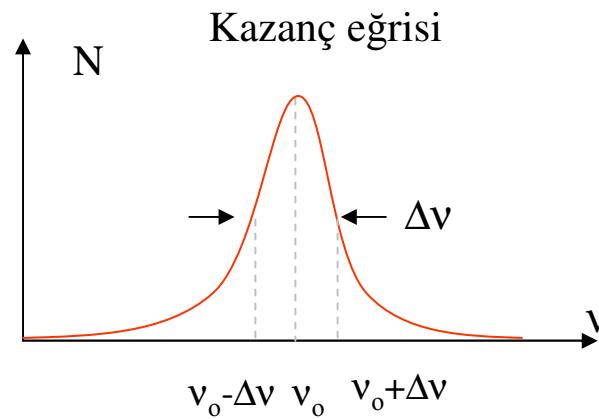
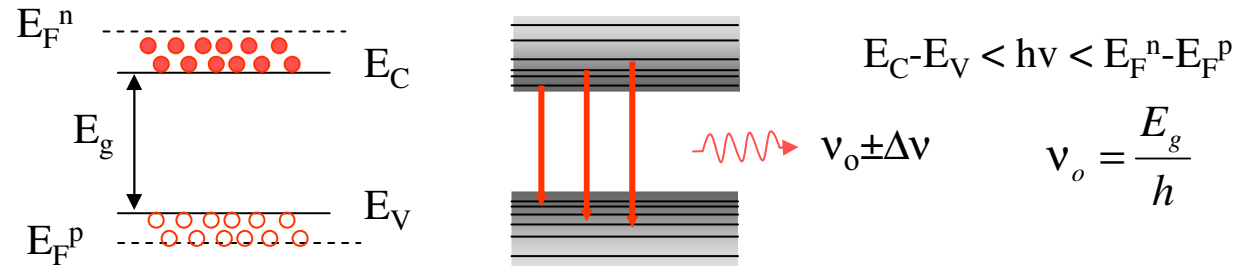


# Lazerler-Genel Kavramlar

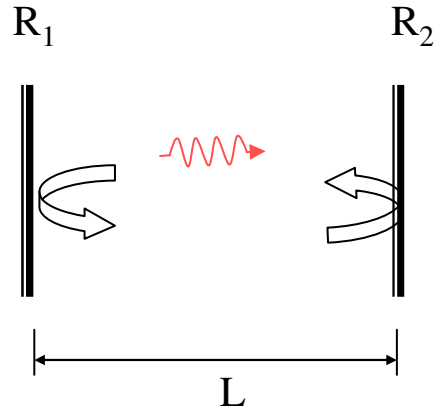
$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} = \frac{8\pi h}{\lambda^3}$$

Lazer olayı için  $A_{21}/B_{21}$  oranını küçük tutmak gerekir.  
Bu oran dalgaboyunun küpü ile ters orantılı (frekans ile doğru) olduğu için yüksek frekanslarda (gama-ışınlarında) lazer yapmak teknik olarak daha zordur

# Spektral Dağılım (Lineshape)



# Kayıplar



$\alpha_r$ =toplam kayıp katsayısı (birim uzunluk başına)

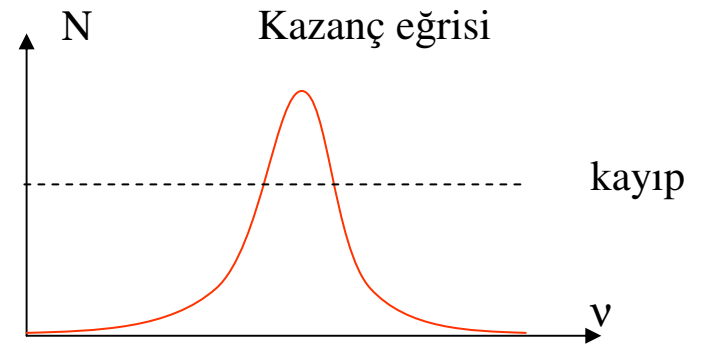
$\alpha_r$ =saçılma ve soğurma kayıpları

$\alpha_R$ =aynalardaki yansımalarından kaynaklanan kayıp

$$\alpha_R = \alpha_{R_1} + \alpha_{R_2} = \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$$

$$\alpha_r = \alpha_s + \alpha_{R_1} + \alpha_{R_2}$$

$$e^{-2\alpha_r L} = R_1 R_2 e^{-2\alpha_s L}$$



# Lazer Şartı

Nüfus terslemesi  $N_2 > N_1$  (Pompalama)

$$I = I_o e^{+\alpha z}$$

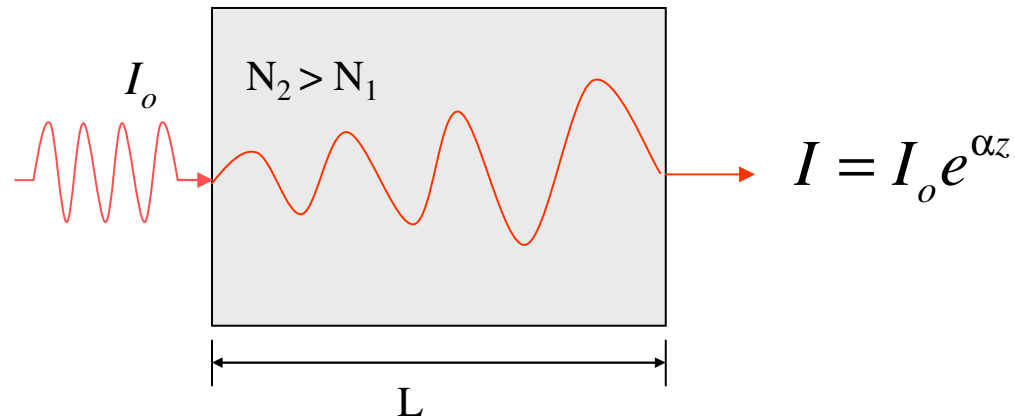
Osilasyon olabilmesi için kazancın kayıplardan daha büyük olması gerekmektedir

$$I - I_o \geq \delta I$$

$$2\alpha L \ll 1$$

$$e^{2\alpha L} - 1 \geq \delta$$

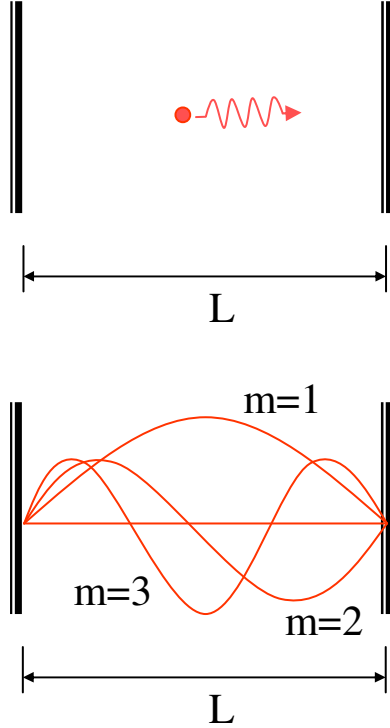
$$2\alpha L \geq \delta$$



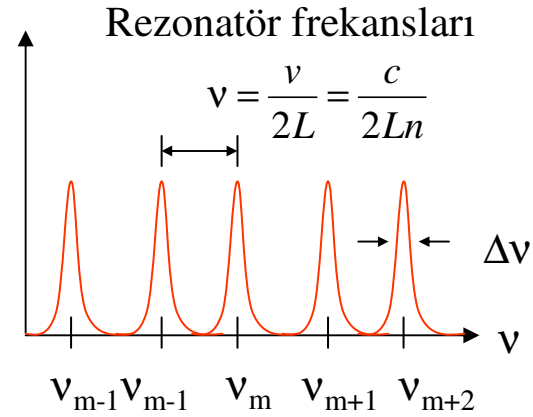
kayıp

# Optik Rezonans Oyuğu (Optical Resonant Cavity)

Bunun için rezonans oyuğu (resonant cavity) kullanılır. Bu rezonans oyuğu sayesinde foton alanı  $\rho(h\nu)$  sürekli artırılır. Bu oyuk fotonu yansıtacak bir ayna olabilir.

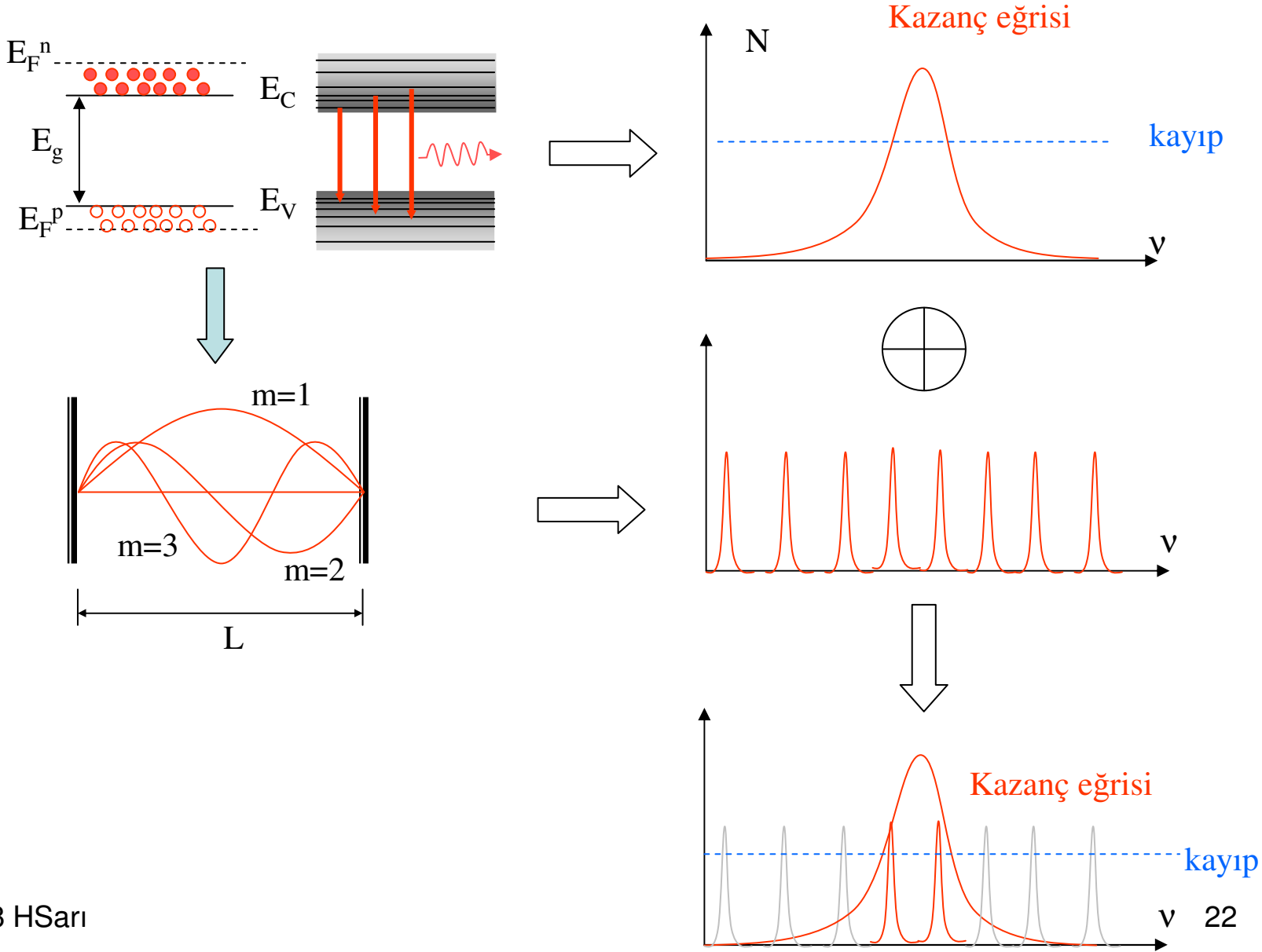


$$m = \frac{2L}{\lambda} = \frac{2Ln}{\lambda_0} \quad m=1, 2, 3\dots$$

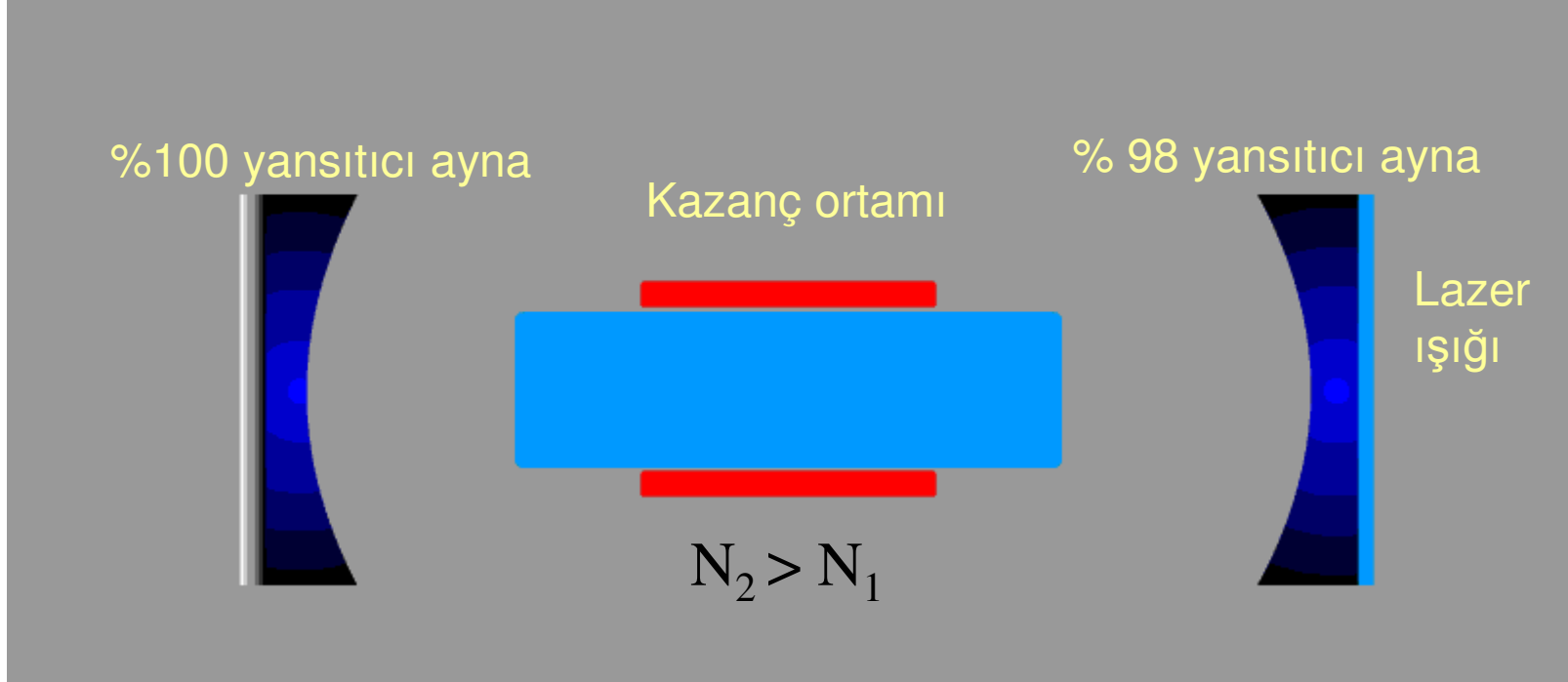


$\lambda$  = rezonatör ortamında dalgaboyu  
 $\lambda_0$  = boşluktaki dalgaboyu

# Optik Rezonans Oyuğu (Optical Resonant Cavity)



# Lazer



**Basitleştirilmiş tipik bir lazer şeması**

# Pompalama

Lazer olayının gerçekleşmesi için gerekli olan 2. şart, yani  $N_2 > N_1$  şartı, alt seviyedeki elektronları üst seviyeye uyararak gerçekleştirilir. Bu işleme *nüfus terslenmesi* (*population inversion*) denir.

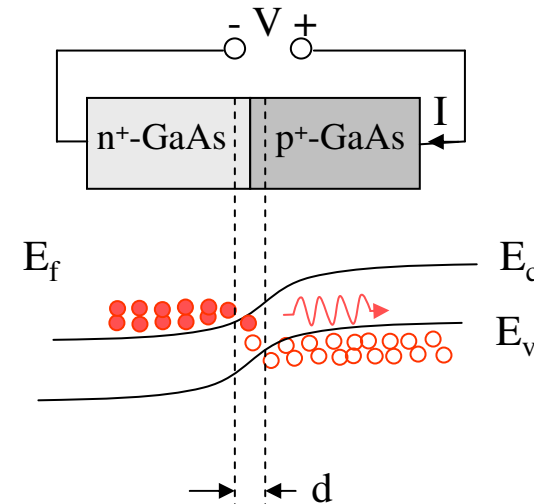
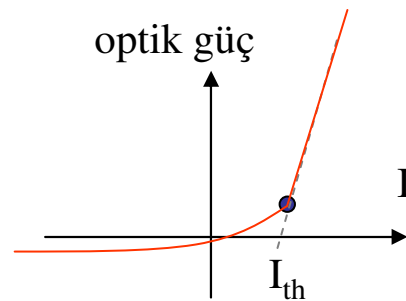
Uyarılmış geçişi soğurmadan fazla yapmak için  $N_2 > N_1$

$$\frac{\text{Uyarılmış geçiş oranı}}{\text{Soğurma oranı}} = \frac{B_{21}N_2\rho(h\nu)}{B_{12}N_1\rho(h\nu)} = \frac{B_{21}N_2}{B_{12}N_1}$$

$N_2 > N_1$  koşulu **pompalama** işlemi ile yapılır. Lazerlerde bu optik veya elektrik akımı ile yapılır.

Yarıiletken lazerlerde pompalama işlemi aşırı katkılanma sayesinde eklem üzerinden akım geçirerek sağlanır

Akımın belli bir değerinde (eşik akım ( $I_{\text{eşik}}$ ) (threshold)  $N_2 > N_1$  şartı sağlandığında lazer özelliği gösteren ışık elde edilmiş olur

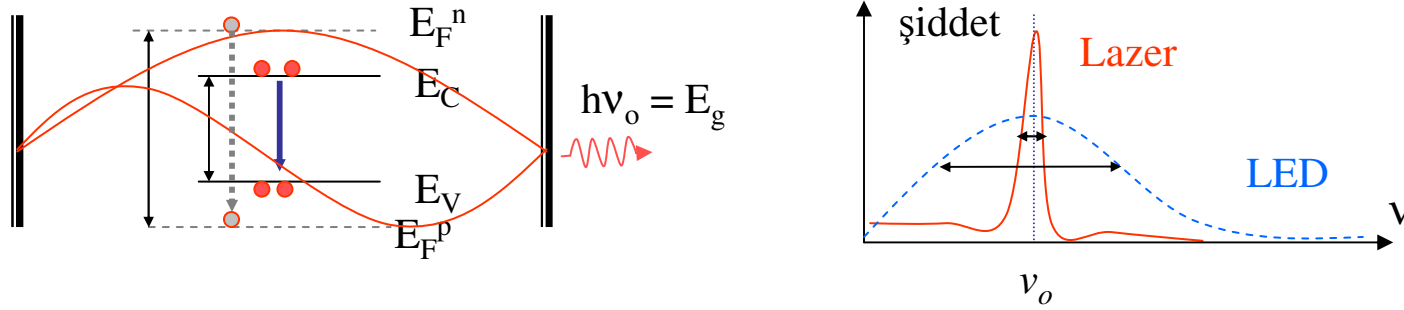




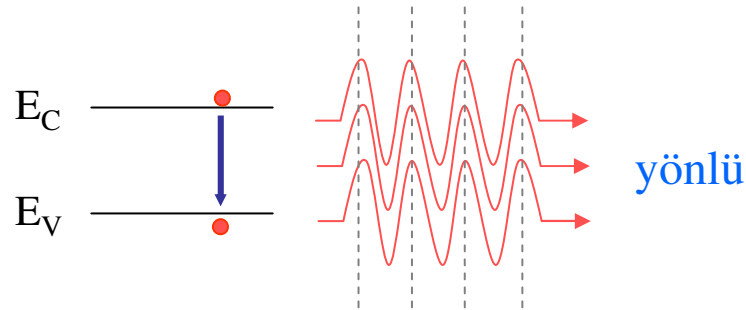
# Lazer Işığının Özelliği

Işık:

- Uyumlu (koherent)
- Tek renkli (monokromatik)
- Yönlü
- Kutuplu



Tek renkli



yönlü

Uyumlu (Koherent)

# Lazer Işığının Özelliği-Modlar

- Enlemesine (Transverse) mod
- Boylamasına (Longitudinal) mod

$$\vec{E}(x, y, z; t) = \vec{E}_o(x, y) e^{i(\omega t - kz)}$$

Enlemesine mod      Boylamasına mod

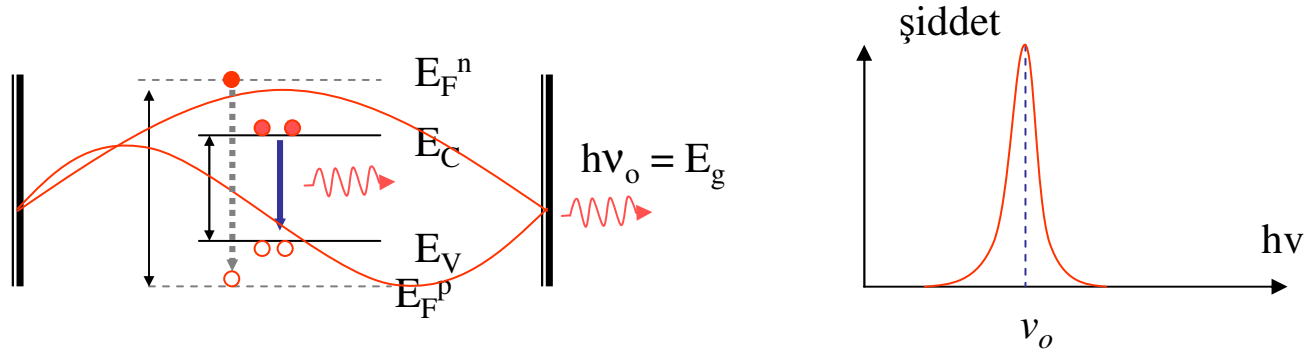
TransverseElectroMagnetic wave-TEM<sub>(l,m,q)</sub>

Enlemesine mod (indis)      Boylamasına Mod (frekans-Hz)

# Boylamasına Mod

- Boylamasına mod (ışığın elektrik alanının zaman içerisindeki salınımı)

$$\vec{E}(x, y, z; t) = \vec{E}_o(x, y)e^{i(\omega t - kz)}$$

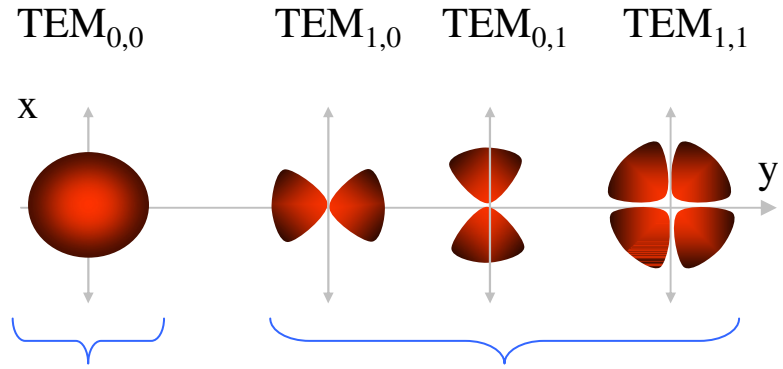
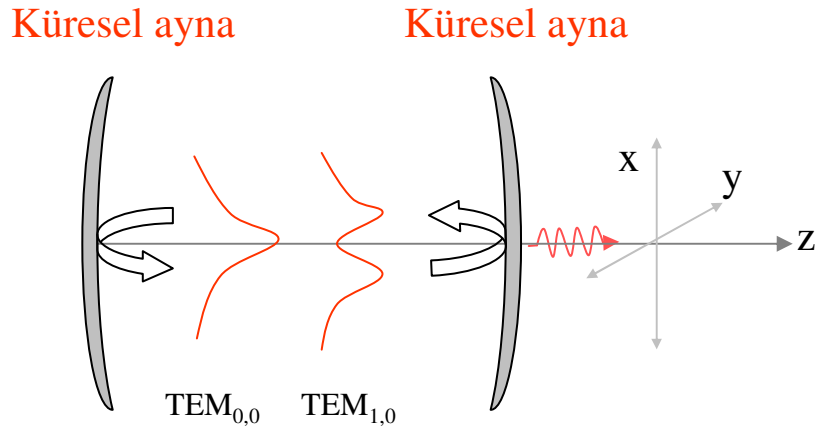


# Enlemesine Mod

- Enlemesine mod (ışığın yayılma doğrultusuna dik düzlemdeki elektrik alan dağılımı)

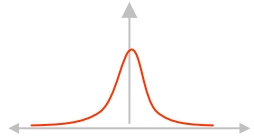
$$\vec{E}(x, y, z; t) = \vec{E}_o(x, y)e^{i(\omega t - kz)}$$

↑  
Transverse ElectroMagnetic (TEM<sub>l,m</sub>)

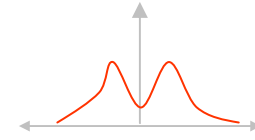


Gaussiyen Dağılım Hermite-Gaussiyen Dağılım

(1,m) =>(0,0)



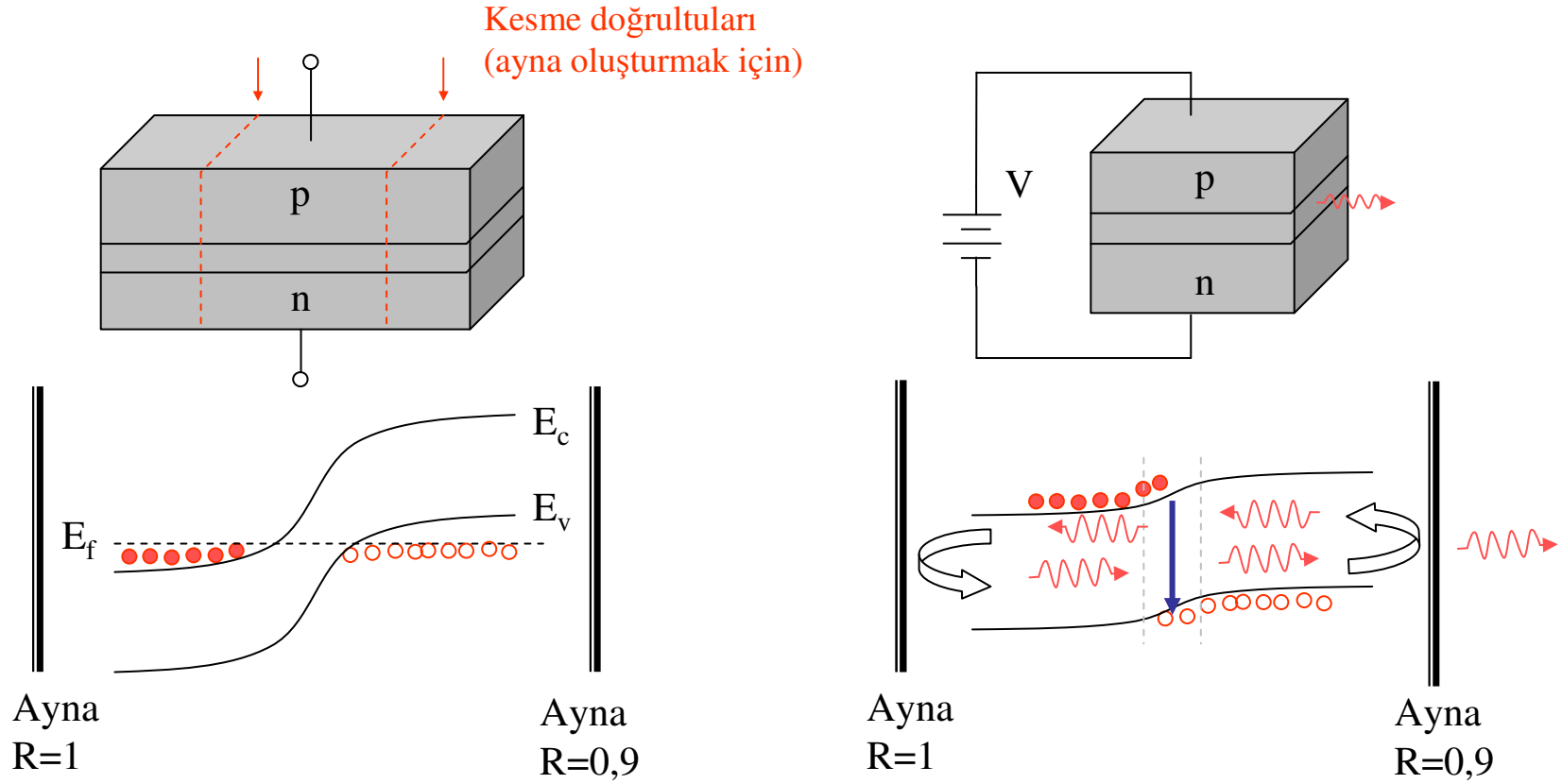
(1,m) =>(1,m)



# Yarıiletken Lazerler

- Aşırı katkılanmış n ve p tipi direk bant aralığına sahip yarıiletkenlerle oluşturulan eklemler lazerlerin yapımında kullanılabilirler
- Yarıiletken lazerler, rezonans oyuğu içine konmuş LED'lerden farklı değildir
- Rezonans oyuğu, yarıiletkenlerin kenarlarından yapılan kesme (cleave) işlemi ile oluşturulur
- Yarıiletken lazerler diğer lazer türlerinden farklılık gösterirler. Bunların en başlıcası boyutlarının oldukça küçük oluşudur (tipik boyutları 0,1 x 0,1 x 0,3 mm)
- Yüksek verimlidir
- Lazer çıkışı eklemlere uygulanan akım ile kolaylıkla kontrol edilebilir
- Yarıiletken lazerler, optoelektronik tümleşik devreleri ile kolaylıkla bütünleştirilebilir
- Yarıiletken lazerler fiber optik iletişimde oldukça kullanışlıdır

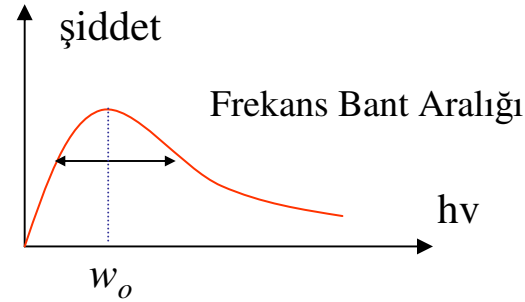
# Yarıiletken Lazerler



# Yarıiletken Lazerler

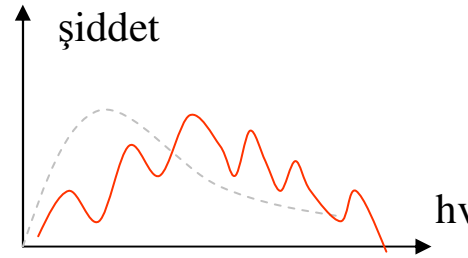
Aşırı katkılanmış yarıiletken eklemin ileri besleme durumunda elektronlarla deşikler aynı bölgede birleşmeye hazır duruma gelirler

Böylece lazerin oluşması için gereken  $n_2 > n_1$  şartı sağlanmış olur.



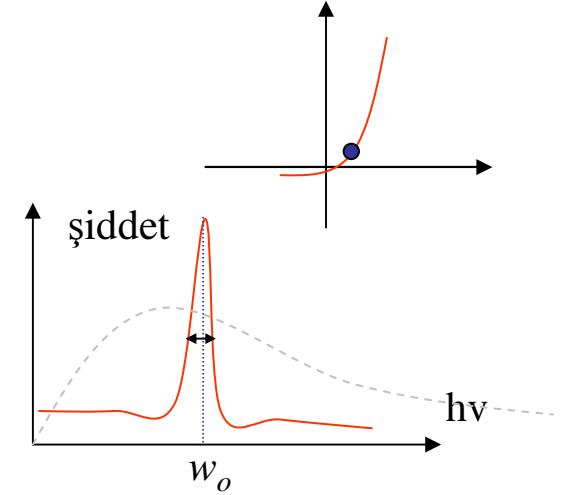
Eşik değerin altındaki durum  
(Koherent olmayan ışıma)

(a)



Eşik değerin hemen altındaki  
durum

(b)



Eşik değerin üstünde lazer ışınımı

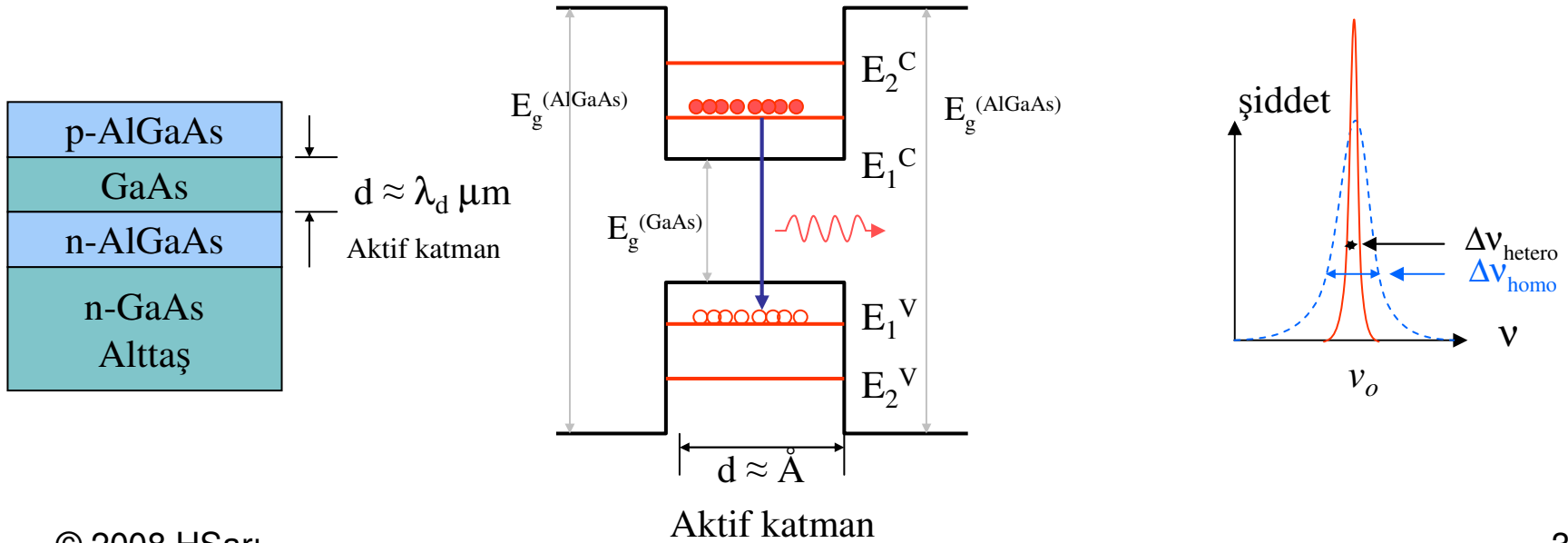
(c)

- (a) LED ışınmasına karşı gelmektedir. Tek renkli ışık elde edilmesine rağmen frekans bant aralığı oldukça geniştir ve elde edilen ışıkta lazerler için gerekli olan 1. şart sağlanmadığı için koherentlik yoktur
- (b) Akım eşik değerin hemen altında birçok rezonans oyuğuna karşı gelen dalgaboyunda ışık elde edilir Bunlardan birinin başat olması için gereken  $n_2 > n_1$  şartı henüz sağlanmış değildir
- (c) Akım eşik değerin üstünde olduğunda rezonans oyuğundaki bir frekans diğerlerini bastırarak başat hale gelir. Bu frekansta band aralığı oldukça küçüktür ve ışık koherentdir

# Düşük Boyutlu Yarıiletken Lazerler

Düşük boyutlu yapılar kullanılarak lazerlerin performansı arttırılabilir

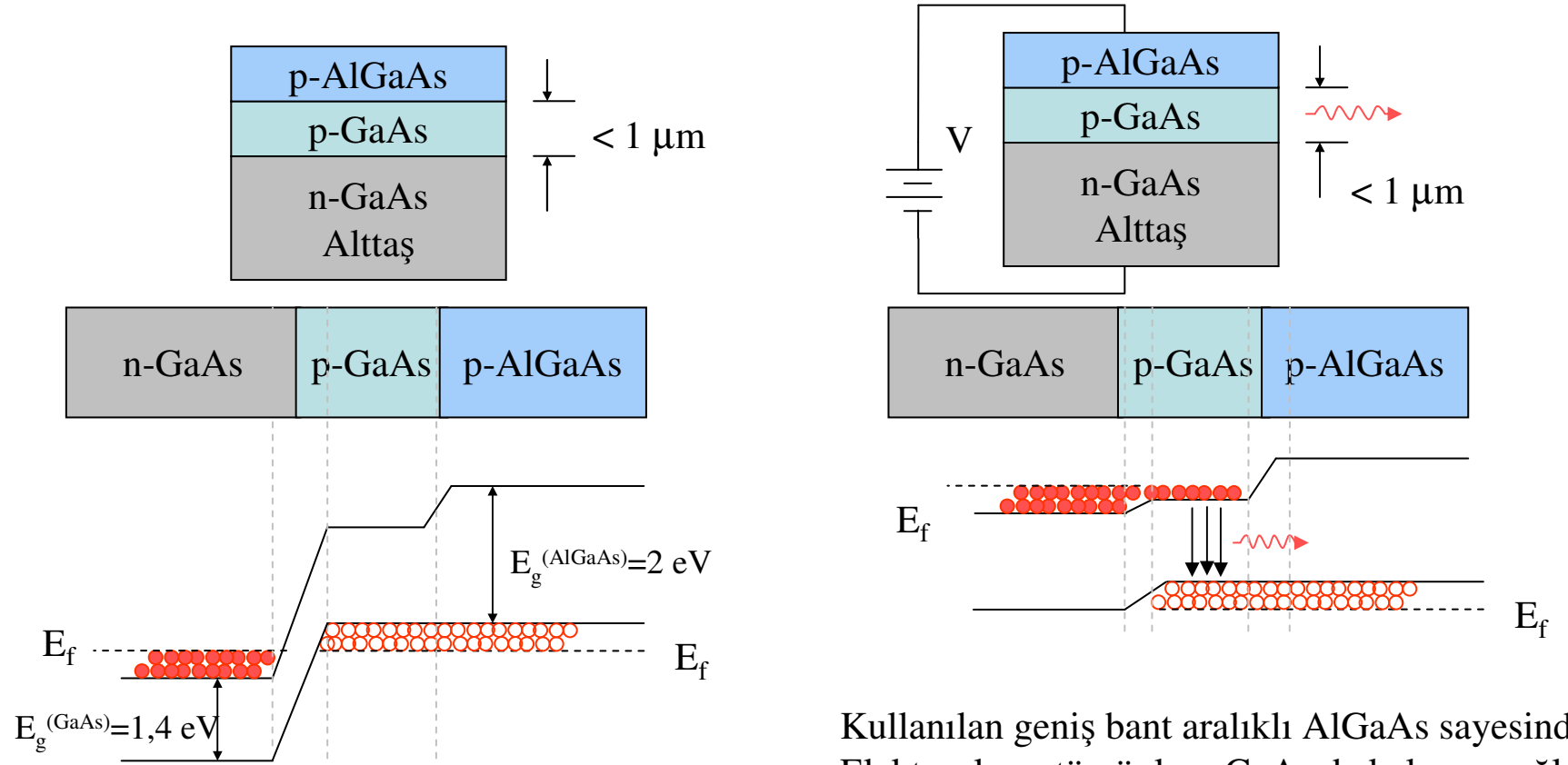
- Işığın frekansı ayarlanabilir
- Enerji seviyeleri kuantalı olduğu için (bant değil!) frekans bant genişliği daha dardır
- Elektronlar ve deşikler uzayın belli bir bölgesine hapsedildiği için birleşme verimliliği yüksektir (düşük eşik akım- $I_{eşik}$ )
- Optik sınırlamadan dolayı foton alanı  $\rho(h\nu)$  yüksek (yüksek verimlilik)





# Heteroeklemlı Yarıiletken Lazerler

Farklı türden yarıiletken malzemeler kullanılarak yarıiletken lazerlerin verimliliği artırılabilir. Bant aralıkları farklı yarıiletkenlerle oluşturulan eklemlerde elektron ve fotonlar eklem bölgesinde tutularak eşik akım değerinin düşürülmesi sağlanır

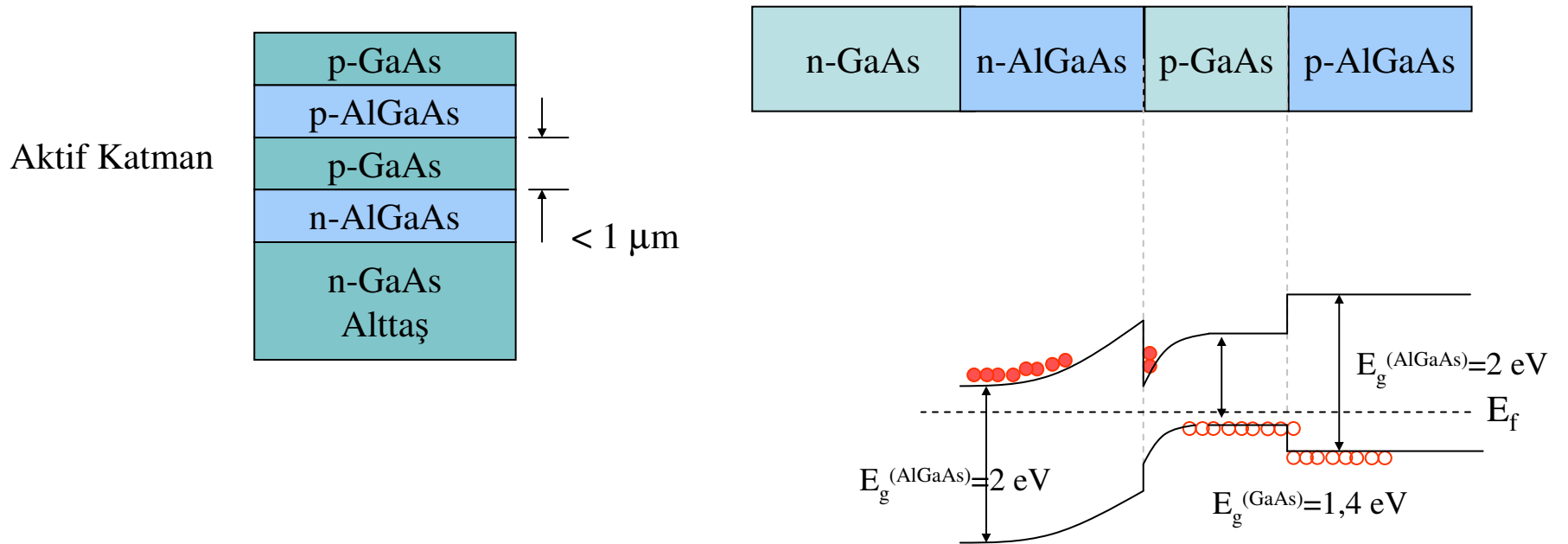


(a) Sıfır beslenme durumu

(b) İleri beslenme durumu

# Çift Heteroeklemlı Yarıiletken Lazerler

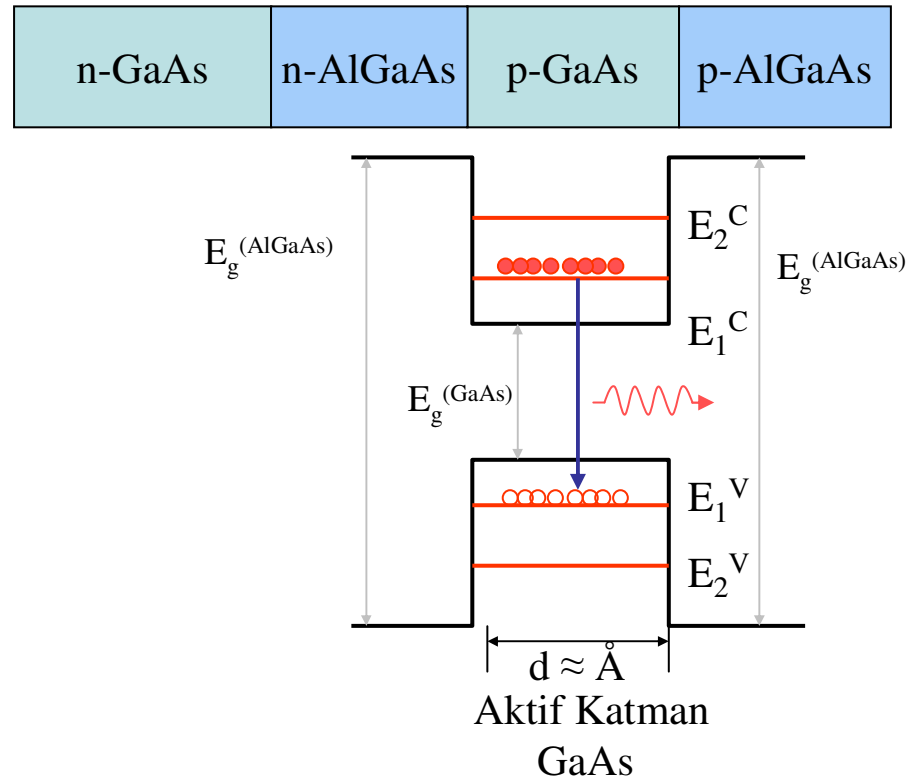
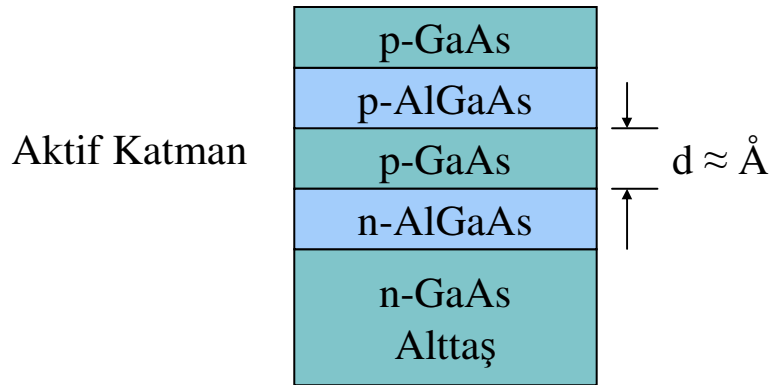
Çift Heteroyapılı lazerler (Double Heterostructures): Daha verimli lazer yapılar oluşturulabilir



# Kuantum Çukurlu Yarıiletken Lazerler

Lazerin aktif bölgesinin kalınlığı daha da çok düşürülerek (elektronun de Broglie dalga boyu mertebesinde) verimli ve frekans band aralığı daha küçük lazerler elde edilebilir.

Kuantum çukurlu lazerlerde tipik olarak eşik akım değerinde 10 kat azalma sağlanabilir



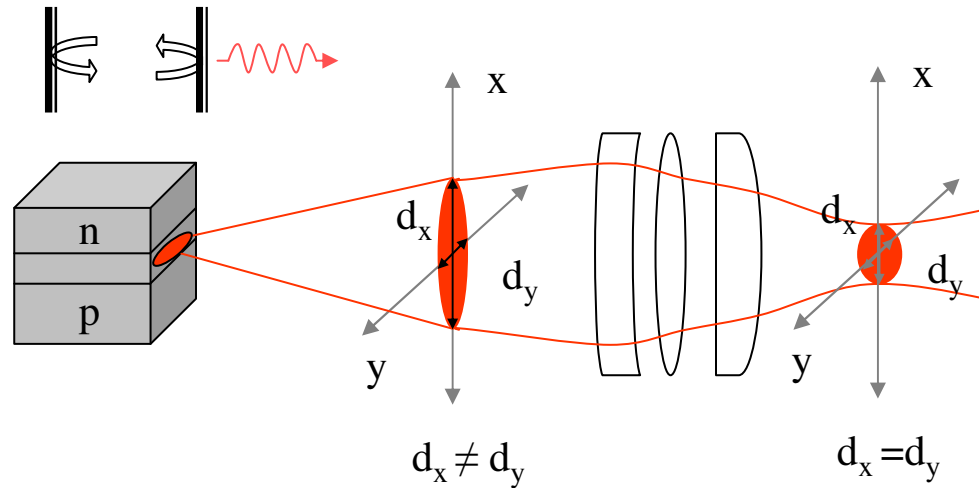
# Yüzey Salımlı Lazerler (VCSEL)

Yarıiletken lazer yapılarında ışık, aynanın yan yüzeylerde oluşundan dolayı yan yüzeylerden dışarıya çıkar. Bu tür lazerlere yüzey salımlı lazerler (edge emitting lasers) denir.

Aktif bölgenin yaklaşık  $\mu\text{m}$  kalınlıkta olduğu düşünülürse lazer ışığının genişlemesinde asimetrik etkiye sebep olabilmektedir

Yüzeyden salınım yapan lazer geometrisi ile lazer dizileri yapmak mümkün değildir

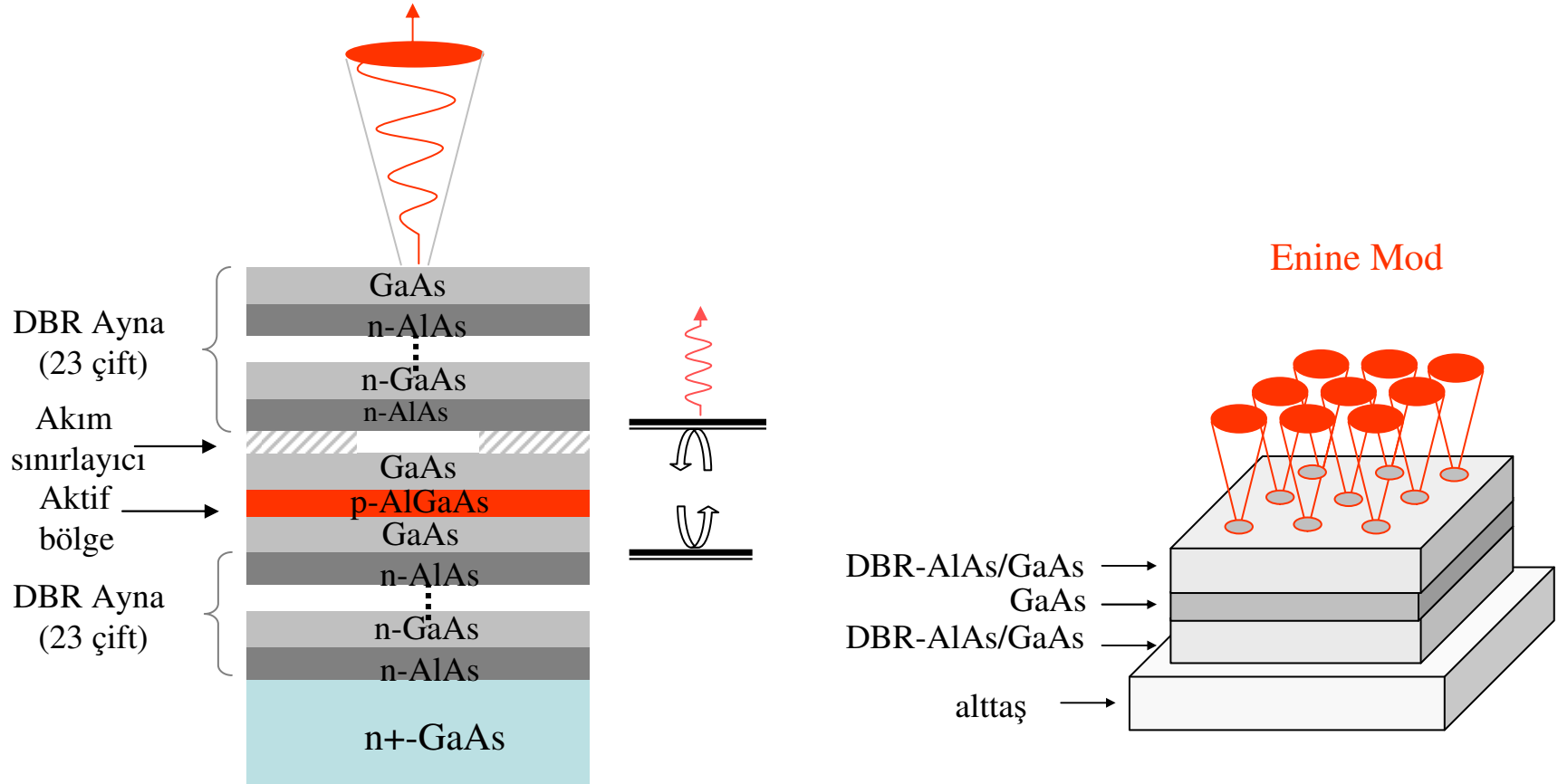
Bazı uygulamalarda tek bir lazerden ziyade lazer dizilerine ihtiyaç duyulabilir. Örneğin bir yüzey alanının ışıkla taranması gibi



# Yüzey Salınımlı Lazerler (VCSEL)

## Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSELs)

Yüzeyden salınım yapan lazer geometrisi ile lazer dizileri(array) yapmak mümkün değildir



# Lazer Yapımında Kullanılan Malzemeleri

## GaAlAs/GaAs tabanlı yarıiletkenler:

Hem direk bant aralığına sahip hem de değişik kompozisyonlarda büyütülmesinde problem olmadığı (örgü sabitleri arasındaki fark çok küçük olduğu için) üretilebilmektedir.

## InGaAsP/InP tabanlı yarıiletkenler:

Değişik dalgaboyunda ışık üretimine elverişli ve sorunsuz büyütülebildiği için  $\lambda=1,3-1,55 \mu\text{m}$  aralığında herhangi bir dalgaboyuna ayarlanabilir



Bant aralığı  $x$  ile doğrusal olarak değişir ve  $x=0,45$ 'e kadar direk bant aralığına sahiptir

LED'ler için kullanılan en uygun  $\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$  Bu aralıkta bant direktir ve 1,9 eV enerji ile kırmızı Bölgeye düşer. Bu LED'ler hesap makinelerinde ve diğer ışıklı göstergelerin yapımında kullanılır