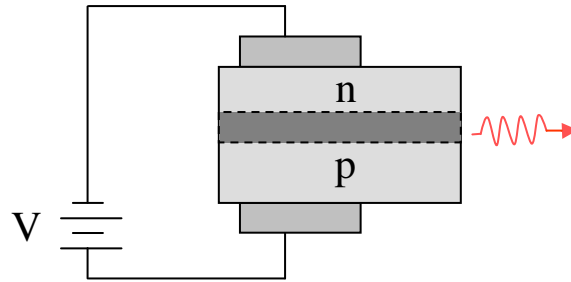


# 15. Ders

## Optoelektronik Devre Elemanları-I



Bu bölümü bitirdiğinizde,

- Işık üreten optoelektronik devre elemanlar,
- Işık yayan diyot (LED),
- Lazer,
- Yarıiletken dalga kılavuzlar,
- Optik fiber

konularında bilgi sahibi olacaksınız.

# Onbeşinci Ders: İçerik

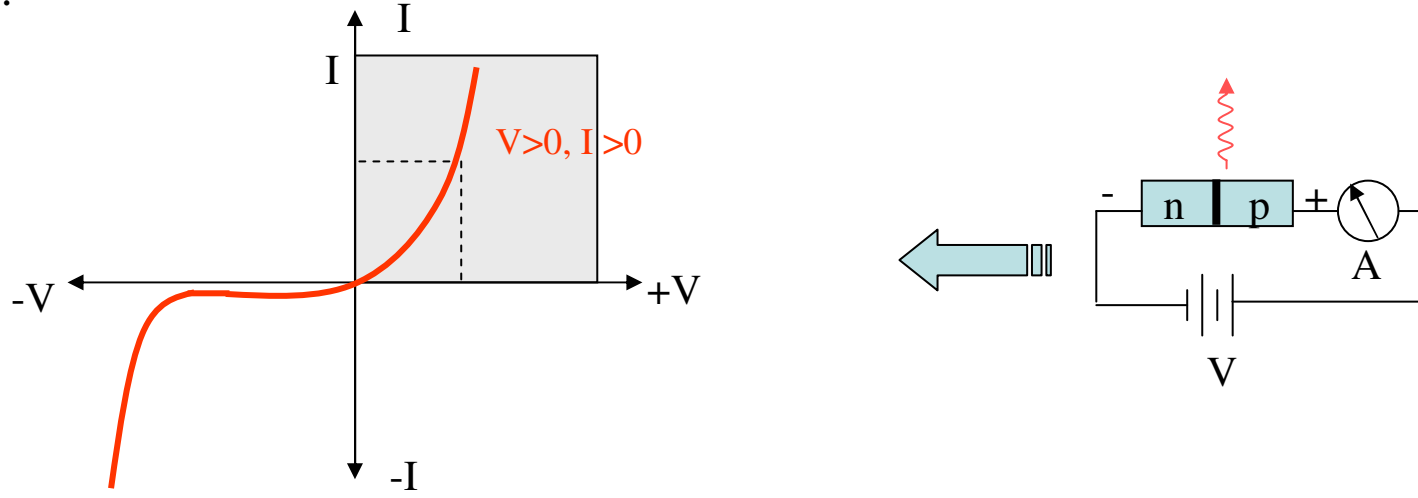
- Işık Üreteçler
  - Işık Yayan Diyotlar (LED)
  - Lazerler
- Işık İleticiler: Dalga Kılavuzları
  - Optik Fiberler
  - Yarıiletken Dalga Kılavuzları

# Işık Üreten Optoelektronik Elemanlar

- Işık Yayan Diyotlar (LED)
- Yarıiletken Lazerler

# Işık Yayan Optoelektronik Elemanlar

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



Elektron ve deşikleri en düşük gerilimle (akımla) ve en verimli şekilde birleştirecek tasarım gereklidir.

Bu amaç için:

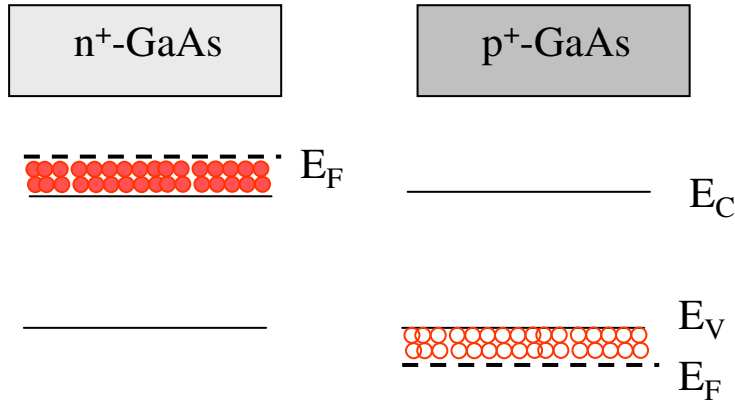
- Doğrudan bant aralığına sahip yarıiletken malzeme (verimliliği arttırmak için)
- Aşırı katkılanmış n- ve p-tipi eklemeler (eşik akımı düşürmek için)

kullanılmalıdır.

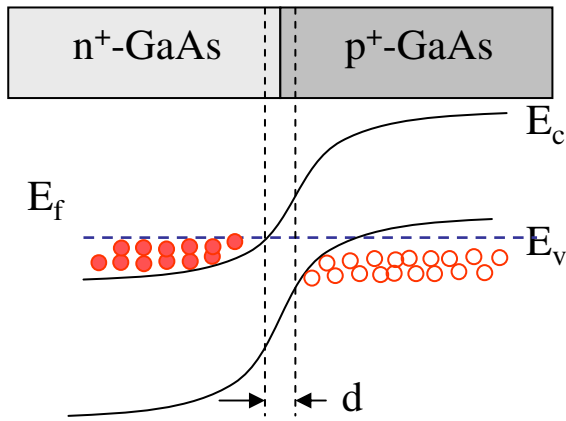
# Işık Yayan Diyotlar (LED)

Aşırı katkılanmış ( $n^+$  ve  $p^+$ ) bir yarıiletkende Fermi enerji seviyesi yasak bant aralığında değil bant içinde bulunur. Tüketim bölgesinin genişliği katkılanmanın yoğunluğuna bağlıdır.

(a) Ayrık n ve p tipi yarıiletkenler ve enerji seviyeleri

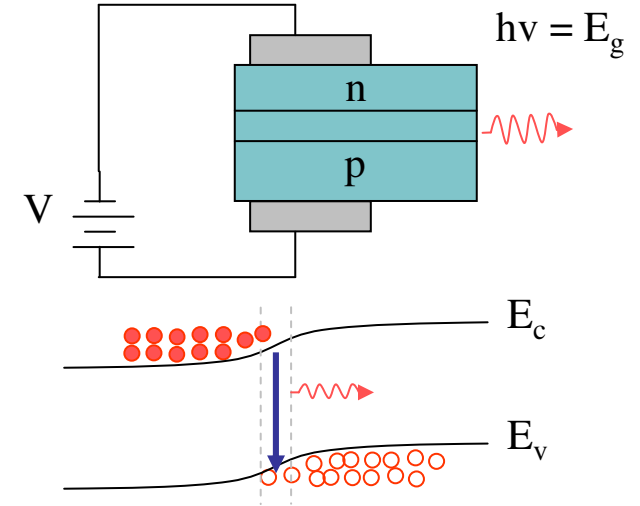


(b) Sıfır gerilim altında p-n eklemi

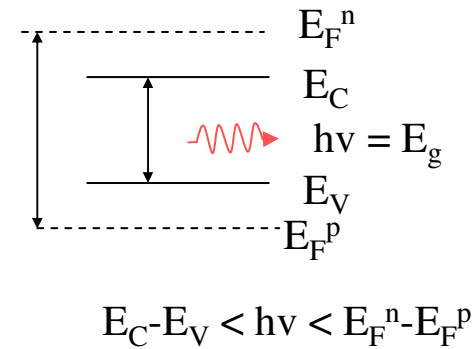


$$d = \left[ \frac{2\epsilon V_o}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2}$$

(c) İleri besleme durumu

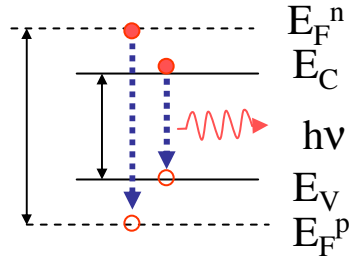


(d) Oluşacak olan ışığın frekans aralığı

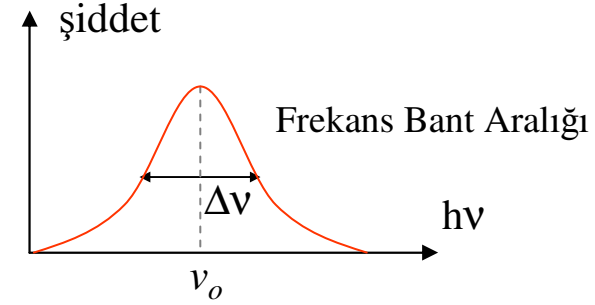


$$E_C - E_V < h\nu < E_F^n - E_F^p$$

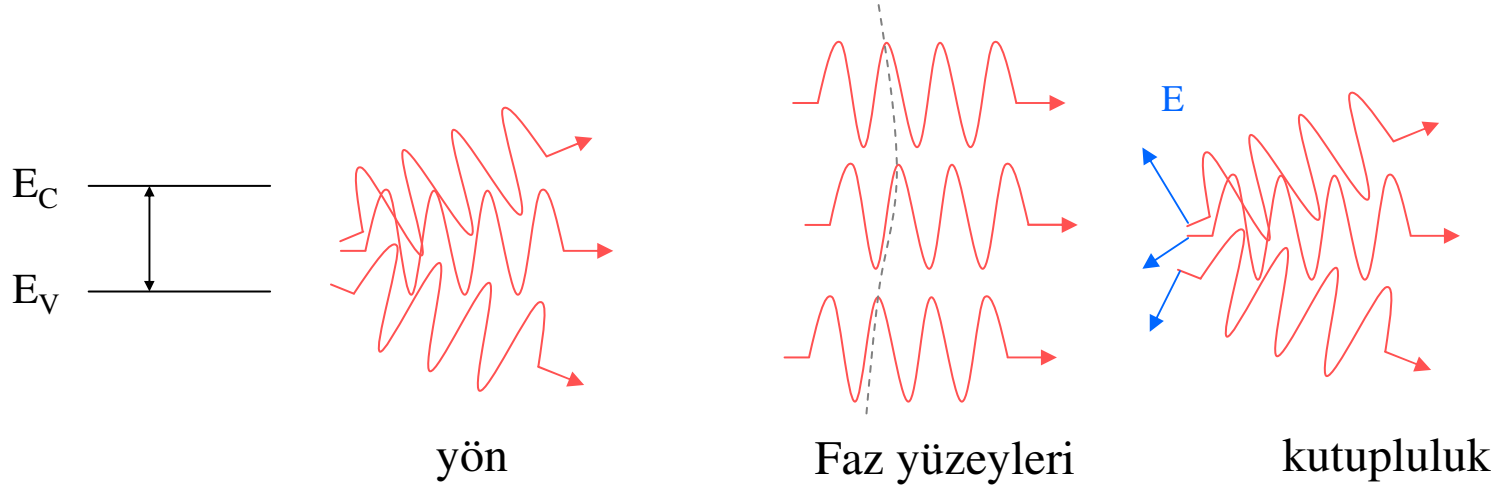
# LED Işığının Özelliği



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



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



Işık:

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

# Lazerler-Genel Kavramlar

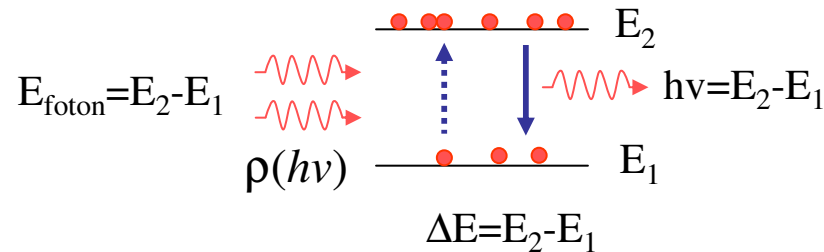
LASER: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Türkçesi LAZER

LED ışığının aksine lazer ışığının özelliği:

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

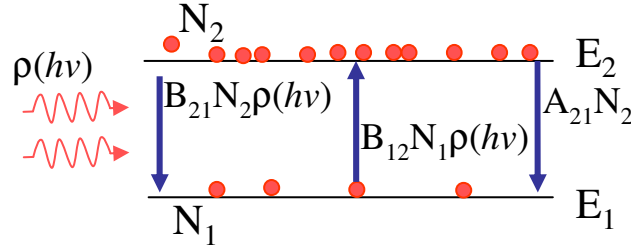
Lazerlerin çalışma prensibini anlamak için enerjileri  $E_1$  ve  $E_2$  olan iki enerji seviyesini göz önüne alalım. Enerji seviyelerindeki elektron yoğunluklarının sırası ile  $N_1$  ve  $N_2$  olduğunu, bu sistemin aynı zamanda  $\rho(h\nu)$  foton alanı içinde olduğunu düşünelim.





# Lazerler-Genel Kavramlar-1

$\rho(h\nu)$  foton alanının varlığında soğurma ve kendiliğinden geçişin yanı sıra lazer olayı için kritik olan uyarılmış geçişin 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**  $\Rightarrow \frac{\text{Uyarılmış geçiş oranı}}{\text{Kendiliğinden geçiş oranı}} = \frac{B_{21}N_2\rho(h\nu)}{A_{21}N_2} = \frac{B_{21}}{A_{21}}\rho(h\nu) \dots\dots 1$

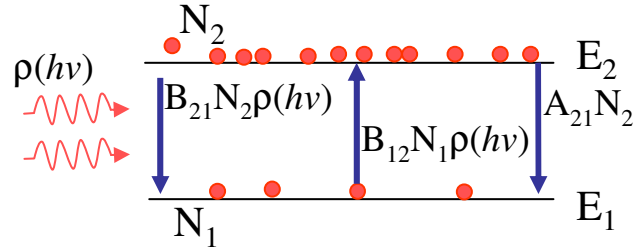
**Uyarılmış geçişi soğurmada fazla yapmak için  $N_2 > N_1$**

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

Lazer için 1 (uyarılmış geçişin kendiliğinden geçiş oranı) ve 2 nolu (uyarılmış geçişin soğurmaya oranı) eşitliklerin değerini mümkün olduğu kadar büyük tutmak gerekir.

1 nolu şart ( $\rho(h\nu) \uparrow$ ) rezonans kovuğu ile, 2 nolu şart ( $N_2 > N_1$ ) ise dış pompalama ile gerçekleştirilir.

# Lazerler-Genel Kavramlar-2



$B_{21}N_2 \rho(h\nu) =$  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 denge durumunda ve siyah cisim ışınım denklemini kullanarak

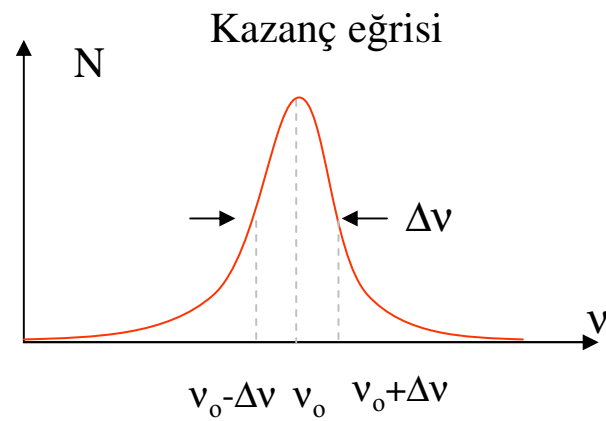
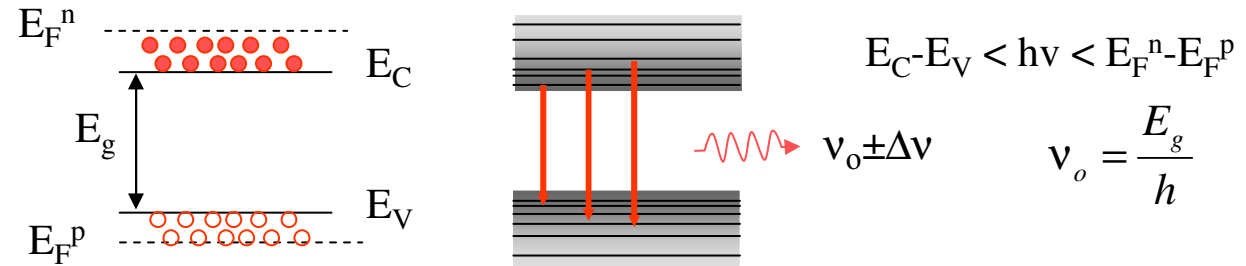
$$B_{12} = B_{21}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} = \frac{8\pi h}{\lambda^3} \quad \text{elde edilir.}$$

( Kendiliğinden geçiş ( $A_{21}$ ) / Uyarılmış geçiş ( $B_{21}$ )

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)



# Lazer Şartı

Nüfus terslemesi  $N_2 > N_1$  (Pompalama)

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

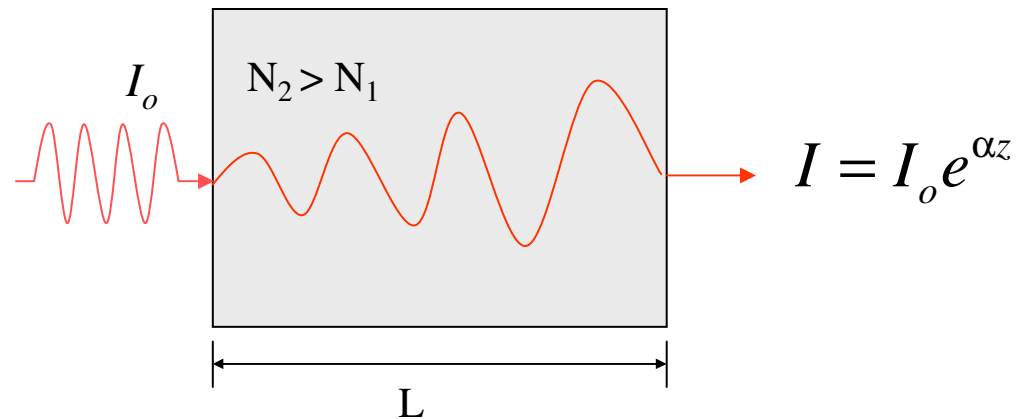
Salınım (osilasyon) olabilmesi için kazancın kayıplardan daha büyük olması gerekmektedir.

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

$$2\alpha L \ll 1$$

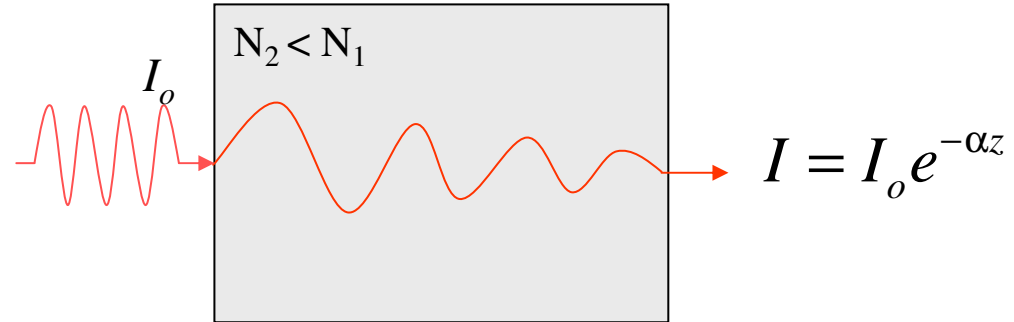
$$e^{2\alpha L} - 1 \geq \delta$$

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

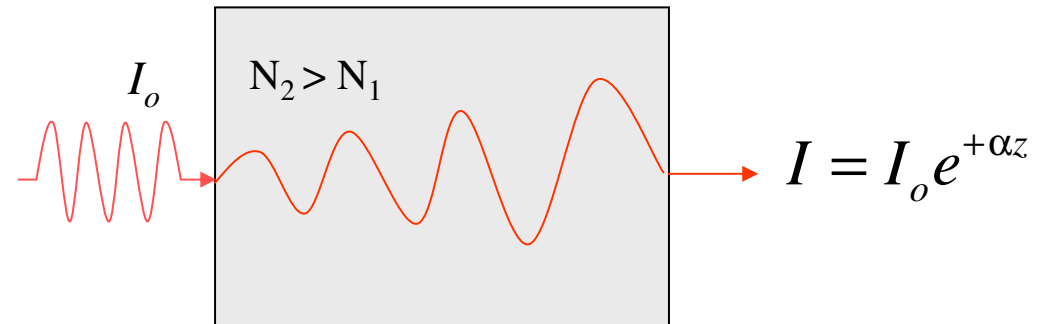


# Lazer Ortamı

Kayıplı ortam

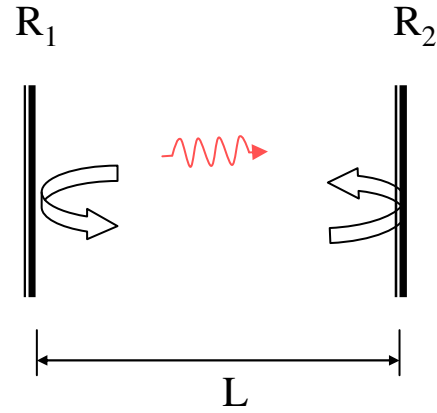


Kazanç ortamı



Dış enerji  $\longrightarrow$   $N_2 > N_1$   
(elektrik, optik vs)

# Kayıplar



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

$\alpha_s$ =saçılma ve soğurma kayıpları

$\alpha_R$ =aynalardaki yansımalarından kaynaklanan kayıp

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

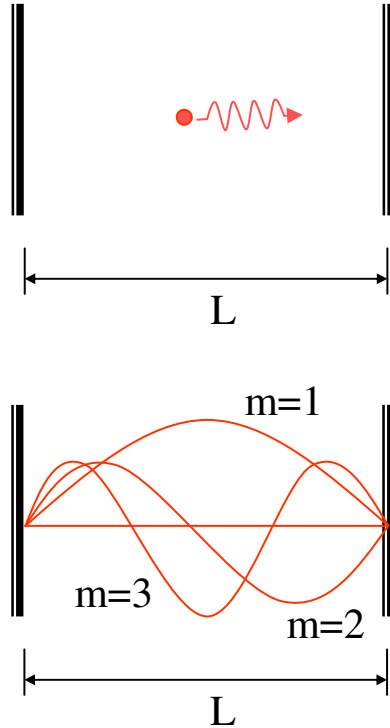
$$\alpha_r = \alpha_s + \alpha_{R_1} + \alpha_{R_2}$$

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

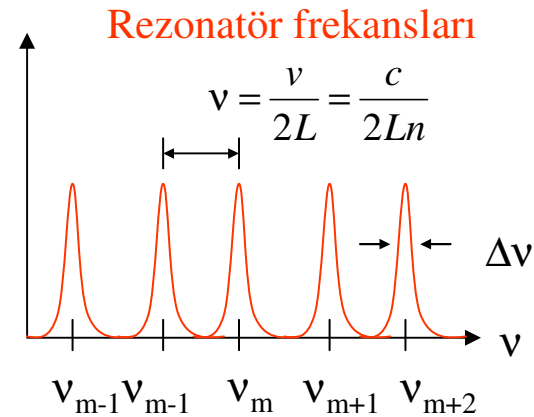


# Optik Rezonans Kovuğu (Optical Resonant Cavity)-1

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

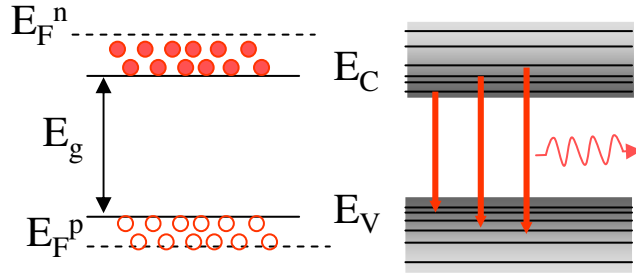


$$m = \frac{2L}{\lambda} = \frac{2Ln}{\lambda_0} \quad m=1, 2, 3\dots$$

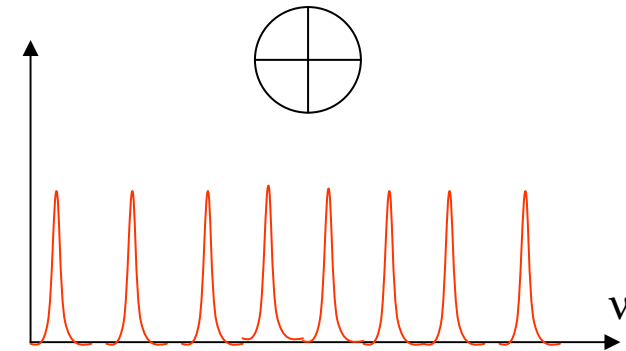
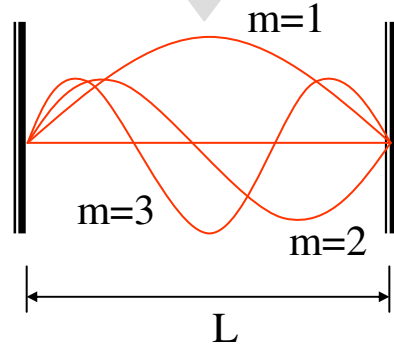


$\lambda$  = rezonatör ortamında dalgaboyu  
 $\lambda_0$  = boşluktaki dalgaboyu

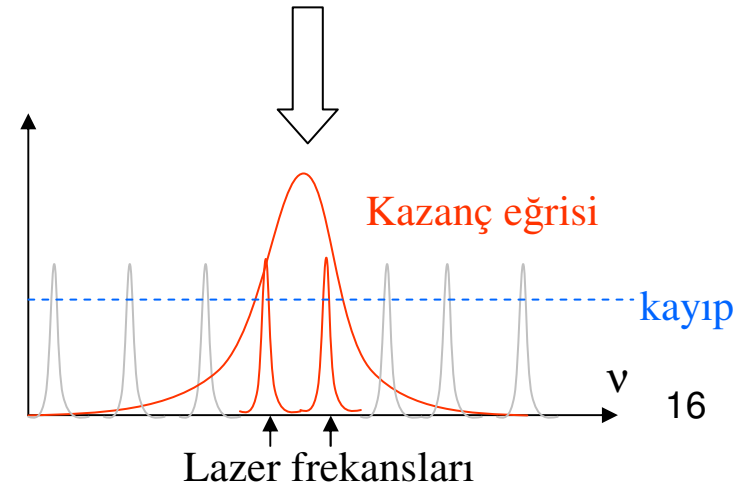
# Optik Rezonans Kovuğu-2



Enerjisi bant aralığı civarında dağılmış elektron geçişlerinden kaynaklanan fotonlar var. Bu enerjilerden (frekanslardan) hangisinin başat olacağını rezonans oyugu belirler.



Rezonans kovuğunun frekanslar için getirdiği kısıtlama (izin verilen frekanslar)





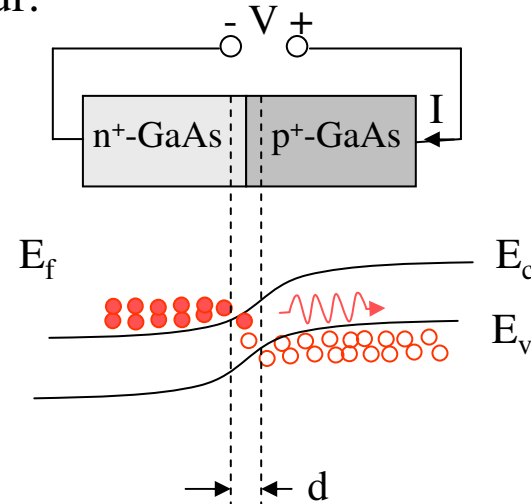
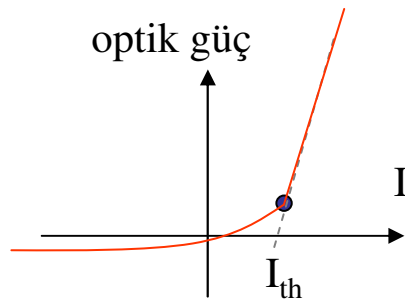
# Pompalama

Lazer olayının gerçekleşmesi için gerekli olan 2. şart, yani  $N_2 > N_1$  şartı, alt seviyedeki elektronları üst seviyeye uyararak gerçekleştirilir. Bu işleme nüfus terslemesi (*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 **pompalanma** işlemi 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.

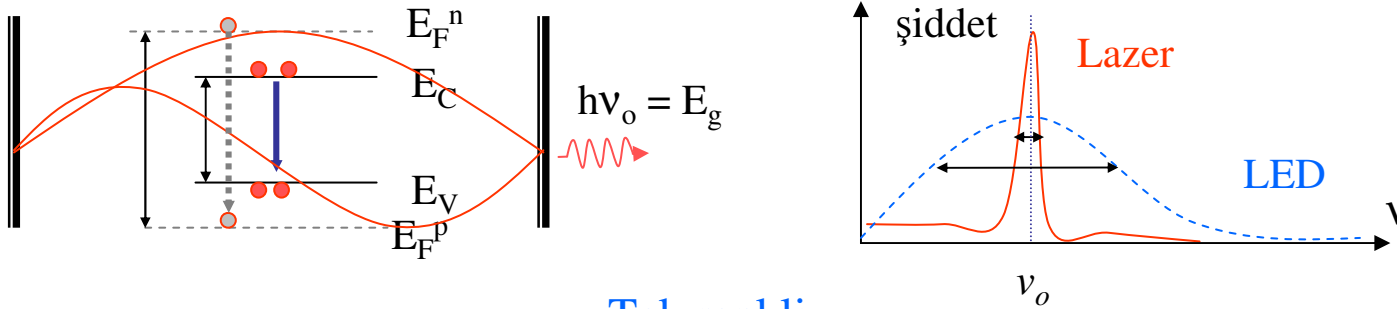


# Lazer Işığının Özelliği

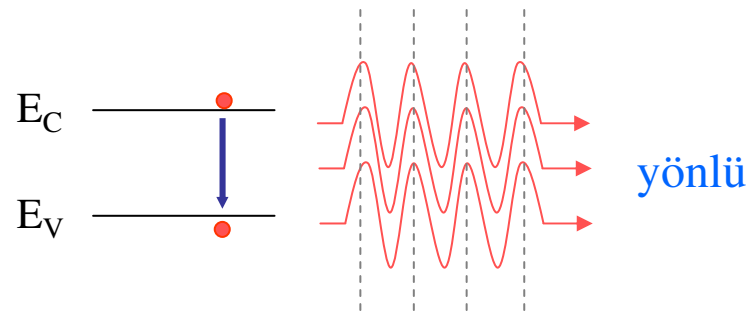
Lazer olayında, LED'den farklı olarak uygun foton rezonans kovuğu içinde kendini kolonlayarak çoğaldığı için çıkan fotonların özellikleri aynıdır.

Işık:

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



Tek renkli



yönlü

Uyumlu (Koherent)

# Lazer Işığının Özelliği-Modlar

Lazer ışığının iki farklı modundan söz edilebilir. Yayılma doğrultusu boyunca (boylamasına mod) ve yayılma doğrultusuna dik düzlem üzerindeki alan dağılımı (enlemesine mod).

- 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>

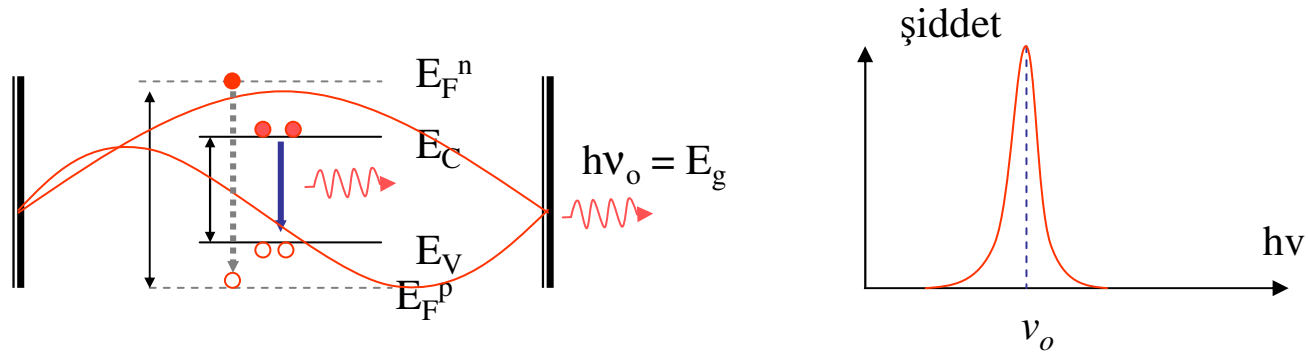
Enlemesine mod (indis)      Boylamasına Mod (frekans-Hz)

# Boylamasına Mod

- Boylamasına mod (ışığın elektrik alanının zaman içersindeki salınımı)

Lazer ışığının frekansıdır. Bu modu kazanç eğrisi ve rezonans kovuğunun özellikleri belirler.

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



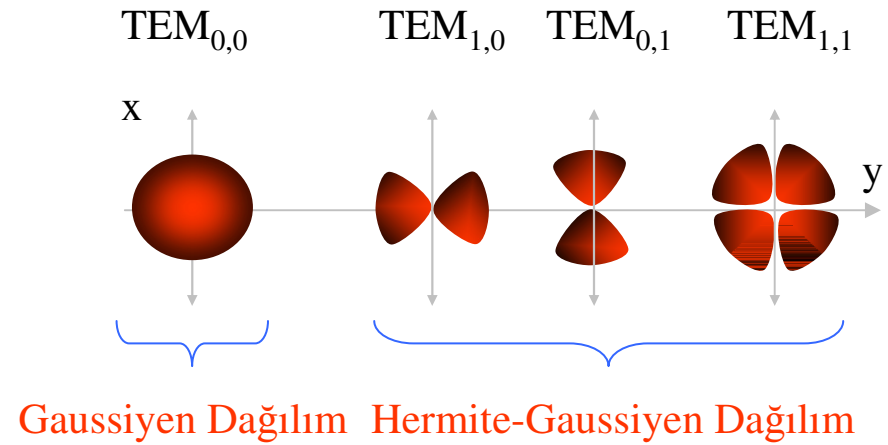
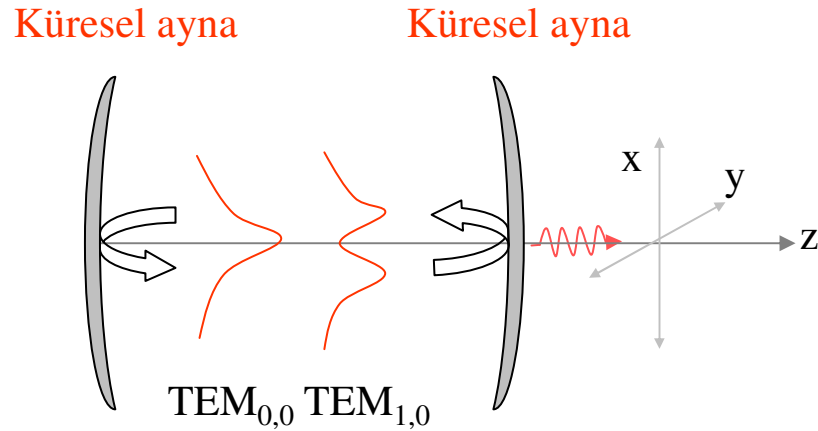
# Enlemesine Mod

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

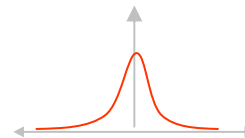
$$\vec{E}(x, y, z; t) = \vec{E}_o(x, y)e^{i(\omega t - kz)}$$

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

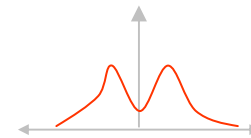
Lazer elektrik alanının uzaysal dağılımıdır. Lazer ortamı rezonan kovuğunun aynaları ve aktif ortamın geometri özellikleri belirler.



$$(1, m) \Rightarrow (0, 0)$$



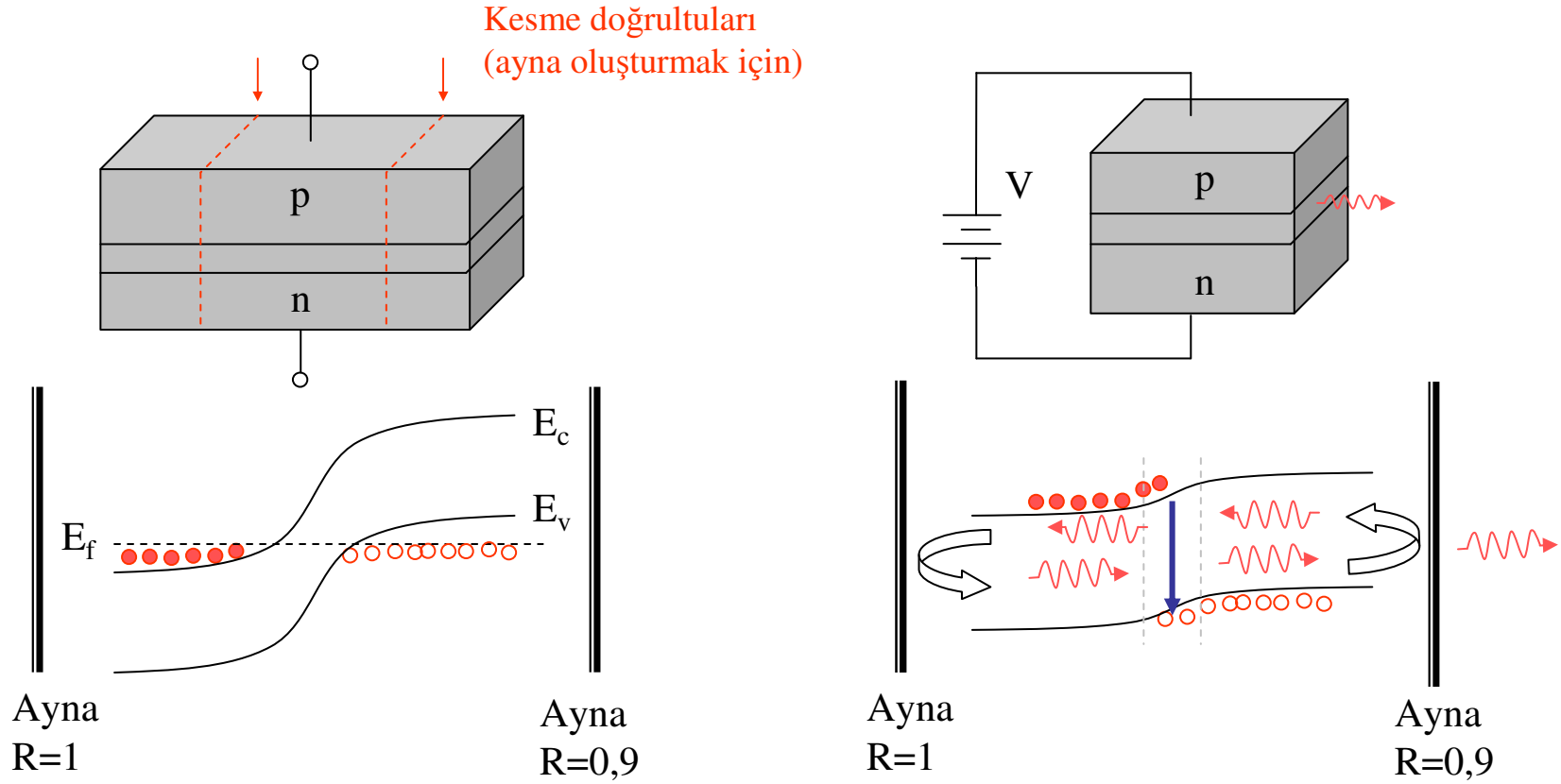
$$(1, m) \Rightarrow (1, m)$$



# Yarıiletken Lazerler-1

- Doğrudan bant aralıklı ve aşırı katkılanmış n ve p tipi yarıiletkenlerle oluşturulan bir p-n ekleminden lazer ışığı elde edilebilir. Bir yarıiletken lazer, rezonans kovuğu içine konmuş LED'den farklı değildir. Yarıiletken lazerlerin diğer lazer türlerine göre birçok olumlu yanı vardır;
- Rezonans kovuğu, yarıiletkenlerin kenarlarından yapılan kesme (cleave) işlemi ile oluşturulur,
- Küçük boyutlara sahiptirler (tipik boyutlar 0,1x0,1x0,3 mm),
- Yüksek verimlidirler,
- Lazer çıkışı, eklemlere uygulanan akım ile kolaylıkla kontrol edilebilir,
- Optoelektronik tümleşik devreleri ile kolaylıkla bütünleştirilebilir,
- Yarıiletken lazerler fiber optik iletişimde yaygın olarak kullanılmaktadır.

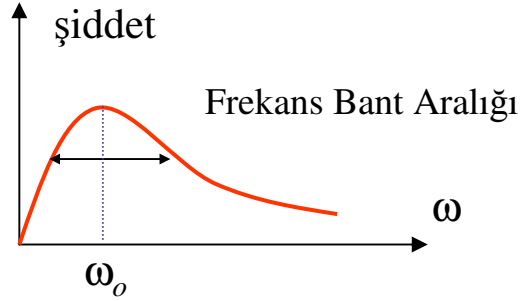
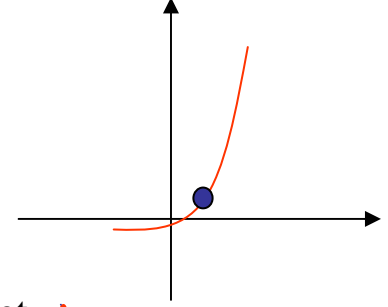
# Yarıiletken Lazerler-2



# Yarıiletken Lazerler-3

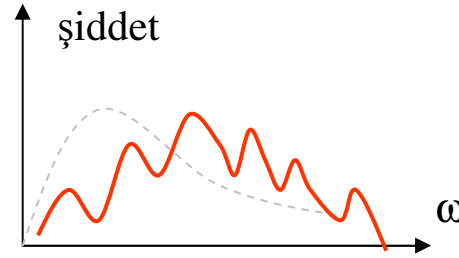
Aşırı katkılanmış yarıiletken eklemelin ileri besleme durumunda elektronlarla deşikler aynı bölgede birleşmeye hazır duruma gelirler.

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



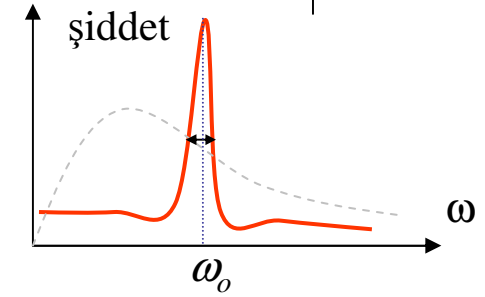
Eşik değerin altındaki durum  
(Koherent olmayan ışımaya)

(a)



Eşik değerin hemen  
altındaki durum

(b)



Eşik değerin üstünde  
lazer ışınımı

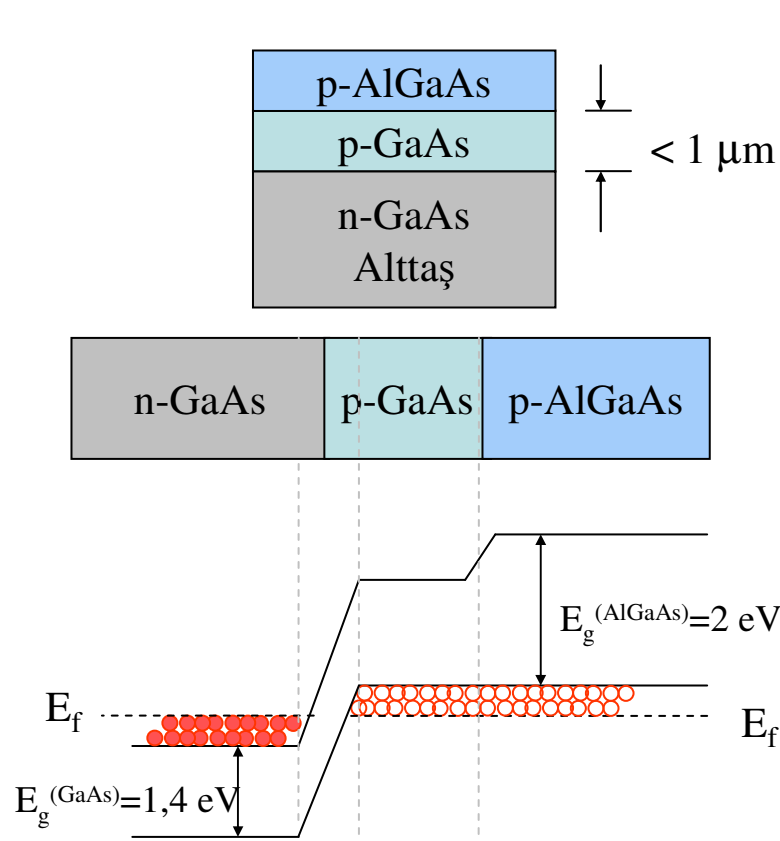
(c)

- (a) LED ışımaya 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 kovuğuna 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 kovuğundaki bir frekans diğerlerini bastırarak başat hale gelir. Bu frekansta bant aralığı oldukça küçüktür ve ışık koherentdir.

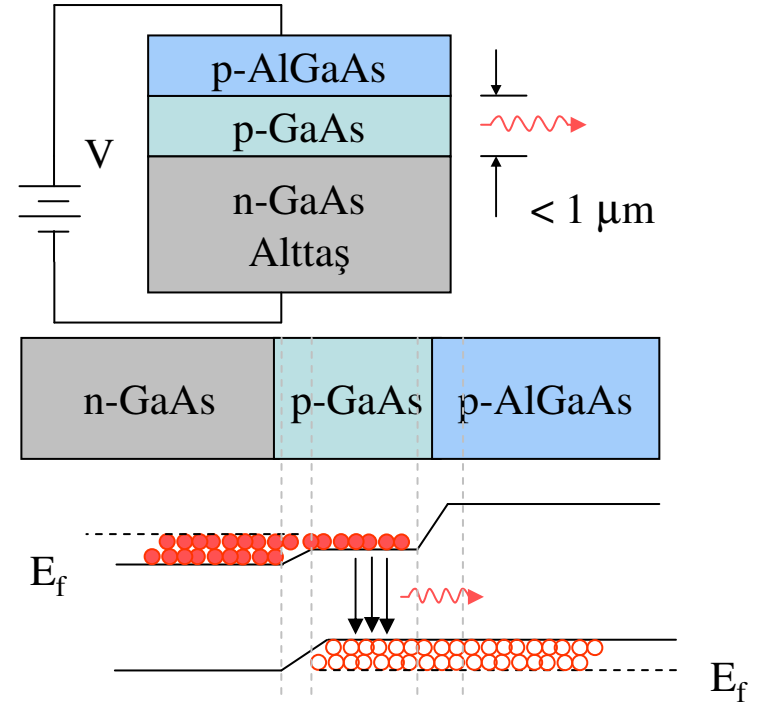


# Heteroeklemlü Yarıiletken Lazerler

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



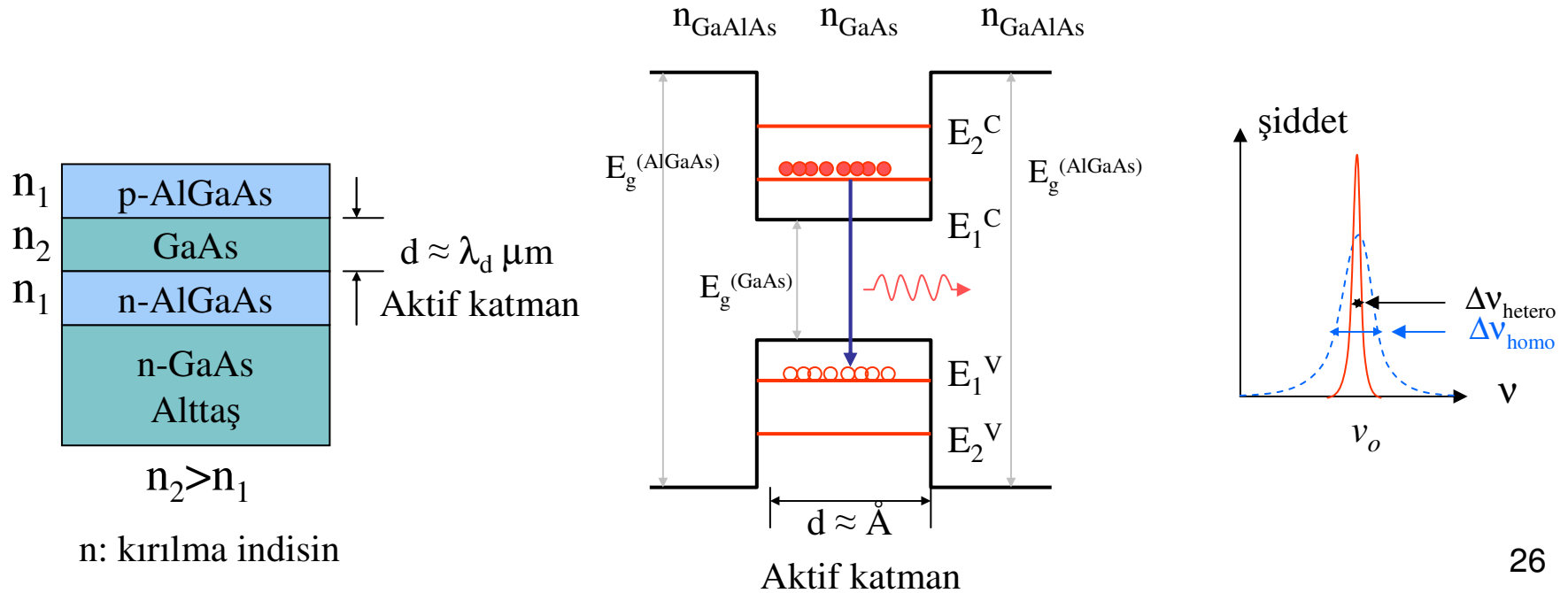
Kullanılan geniş bant aralıklı AlGaAs sayesinde Elektronların tümüyle p-GaAs de kalması sağlanır.

(b) İleri beslenme durumu

# Düşük Boyutlu Yarıiletken Lazerler

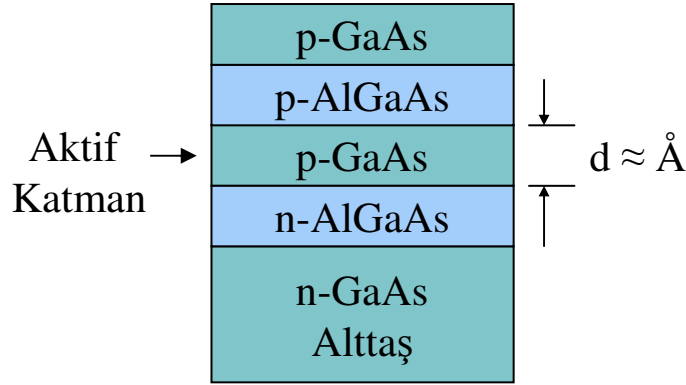
*Düşük boyutlu yapılar kullanılarak lazerlerin performansı daha da arttırılabilir*

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



# Kuantum Kuyusu Yarıiletken Lazerler

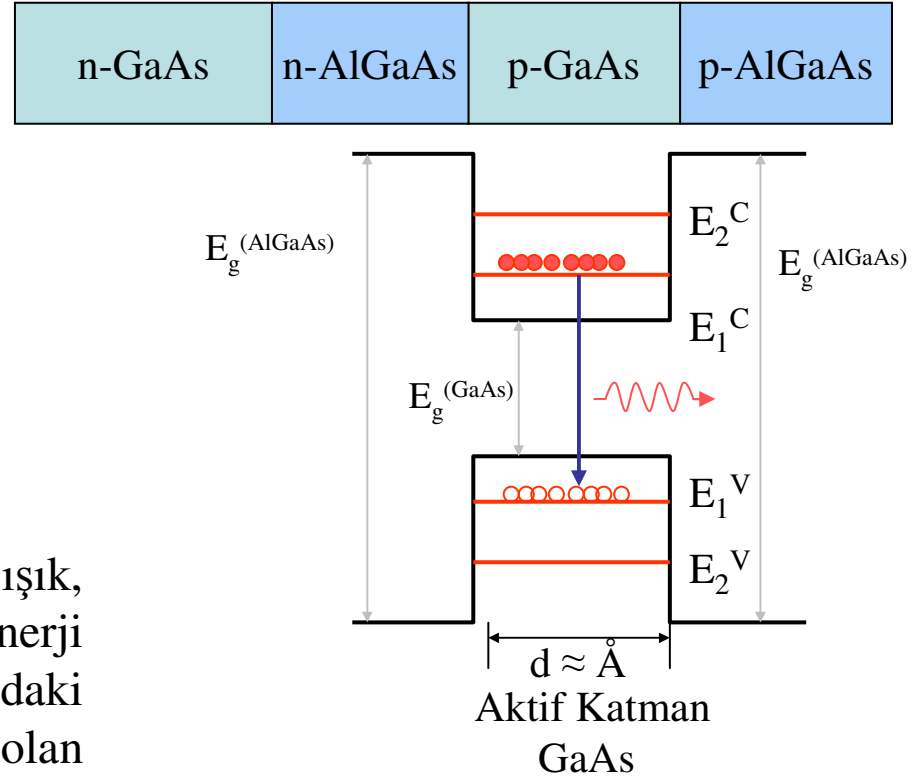
- Aktif bölgenin kalınlığı daha da çok düşürülerek (elektronun de Broglie dalga boyu mertebesinde) verimli ve frekans bant aralığı daha küçük lazerler elde edilebilir.
- Kuantum kuyusu lazerlerde tipik olarak eşik akım değerinde 10 kat azalma sağlanabilir.



Kuantum kuyusu lazer yapısı

Kuantum kuyusu lazerlerde çıkan ışık, iletim bandındaki kesikli bir enerji seviyesinden ( $n=1$ ) değerlik bandındaki kesikli bir deşik seviyesine ( $n=1$ ) olan geçişlerden kaynaklanır.

$$\text{Işığın frekansı } \omega = \frac{(E_g + E_n^e + E_n^h)}{\hbar}$$



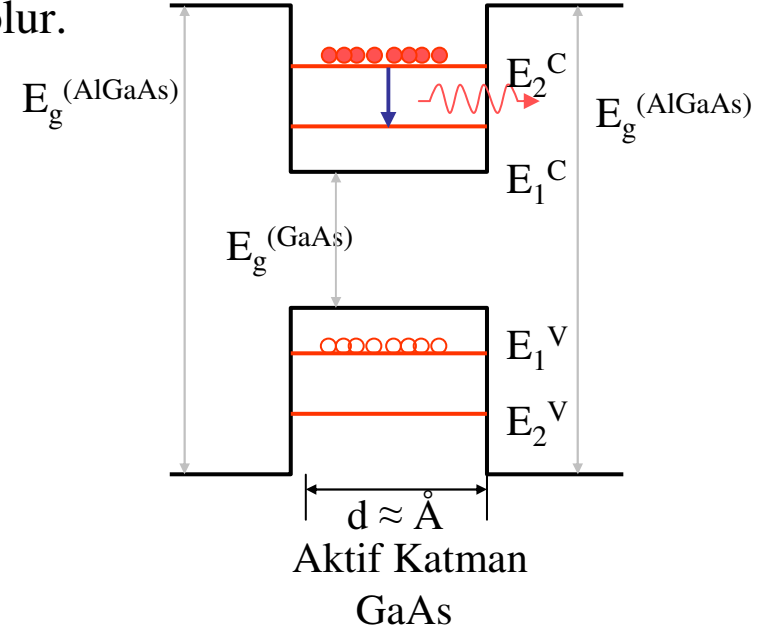
Kuantum kuyusu lazerin enerji seviyeleri

# Bant içi Yarıiletken Lazerler

- Tipik bir kuantum çukurlu lazerlerde çıkan ışık, iletim bandındaki kesikli bir enerji seviyesinden (n=1) değerlik bandındaki kesikli bir deşik seviyesine (n=1) olan geçişlerden kaynaklanır.
- Uygun şekilde oluşturulan ve nüfus terslemesi yapılan kuantum çukurlarında geçişler iletim bandındaki kesikli bir üst enerji seviyesinden bant içindeki kesikli bir diğer enerji seviyesine de olabilir.
- Geçişler sadece izinli enerji seviyeleri arasında olur.
- Uzun dalgaboylu ışık elde edilebilir

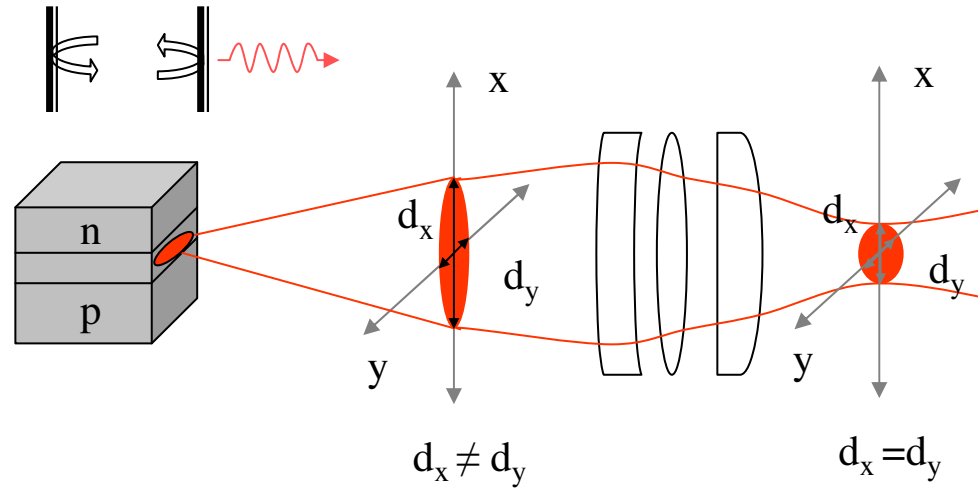
Lazer ışığı, iletim bandındaki kesikli enerji seviyesinden (n=2) aynı bandtaki kesikli alt enerji seviyesine (n=1) olan geçişlerden oluşur.

$$\text{Işığın frekansı } \omega = \frac{(E_{n=1}^e + E_{n=2}^e)}{\hbar}$$



# 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 (x) yaklaşık  $\mu\text{m}$  mertebesinde, diğer boyutun (y) ise mm mertebesinde olduğu düşünülürse ebatlardaki bu oran lazer ışığının asimetrik genişlemesine sebep olabilmektedir. Pratikte bunu düzeltmek için fazladan optik sistem kullanmak gerekir.
- Bu tür lazerlerin bir başka eksikliği ise lazer dizileri yapmak mümkün değildir.

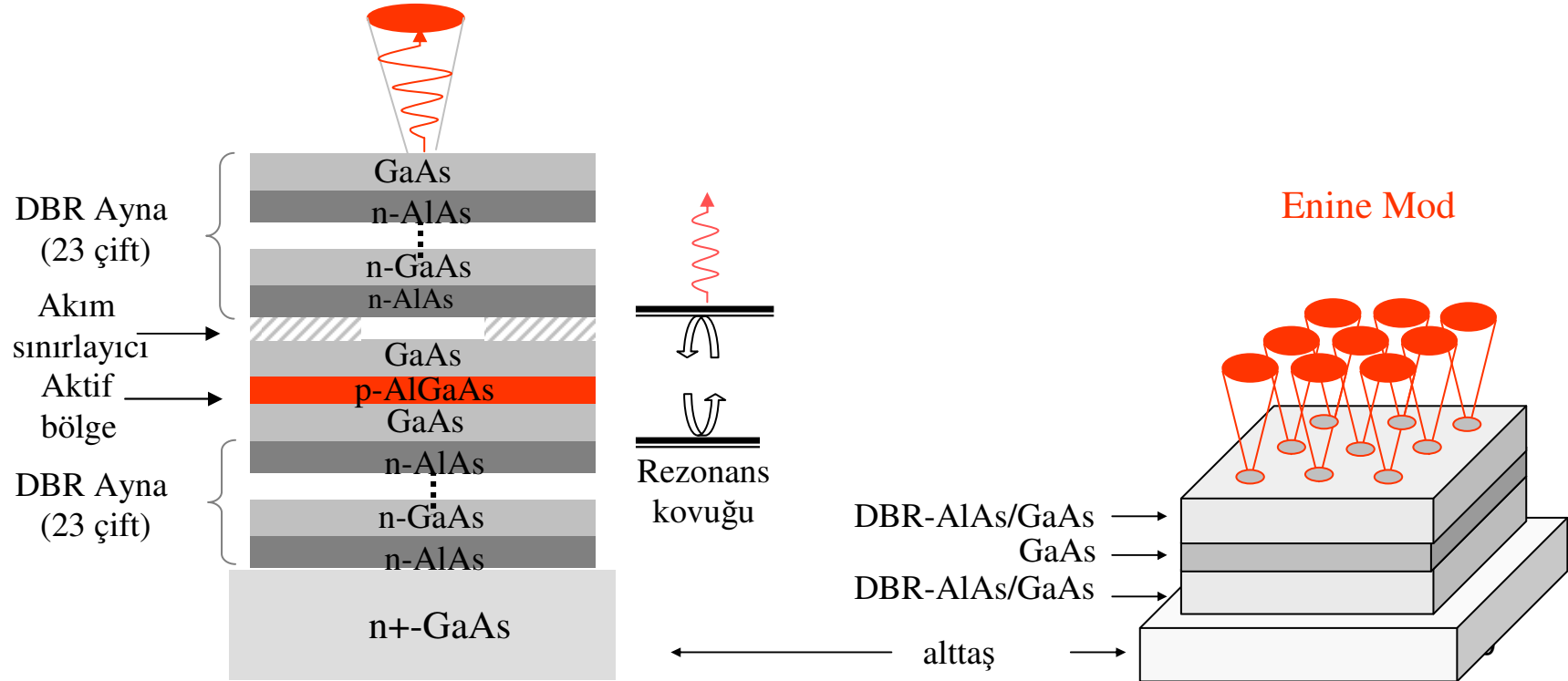


Bazı uygulamalarda tek bir lazerden ziyade lazer dizilerine ihtiyaç duyulabilir, örneğin bir yüzeyin ışıkla taranması gibi.

*Yüzeyden salım yapan lazerlerle yukarıdaki sorunlar çözülebilir.*

# Yüzey Salımlı Lazerler (VCSEL)-2

- Eğer bir yarıiletken lazerde aktif bölgenin alt ve üstünde uygun şekilde aynalar oluşturulursa rezonans kovuğu yüzeye dik oluşturulmuş olur. Bu durumda lazer ışığı kenarlardan değil yüzeyden dışarıya alınabilir.
- Bu aynalar farklı kırılma indisine sahip ve ışığın dalgaboyu mertebesinde özel kalınlıklı katmanların uygun sayıda büyütülmesi ile elde edilebilirler. Bu aynalara Dağıtılmış Bragg Aynası (DBR) denir.
- Bu şekilde oluşturulmuş lazerler ışık yüzeyden salındığı için Yüzey Salımlı Lazerler, kısaca VCSEL (**V**ertical **C**avity **S**urface **E**mitting **L**asers (**VCSELs**)) olarak adlandırılır.



# Lazer Yapımında Kullanılan Malzemeleri

## GaAlAs/GaAs Tabanlı Yarıiletkenler:

Hem doğrudan bant aralıklı hem de değişik kompozisyonlarda büyütülmesinde problem olmadığı (örgü sabitleri arasındaki fark çok küçük) için kolaylıkla üretilebilmektedir.

## InGaAsP/InP Tabanlı Yarıiletkenler:

Değişik dalgaboyunda ışık üretimine elverişli ve sorunsuz büyütülebilmektedir. In yüzdesi değiştirilerek  $\lambda=1,3-1,55$   $\mu\text{m}$  aralığında herhangi bir dalgaboyuna ayarlanabilir.

## GaAs<sub>(1-x)</sub>P<sub>x</sub> Yarıiletkenler:

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

LED'ler için kullanılan en uygun GaAs<sub>0,6</sub>P<sub>0,4</sub> Bu aralıkta malzeme doğrudan bant özelliğine sahiptir ve 1,9 eV enerji ile kırmızı bölgeye düşer. Bu LED'ler hesap makinelerinde ve diğer ışıklı göstergelerin yapımında kullanılır.

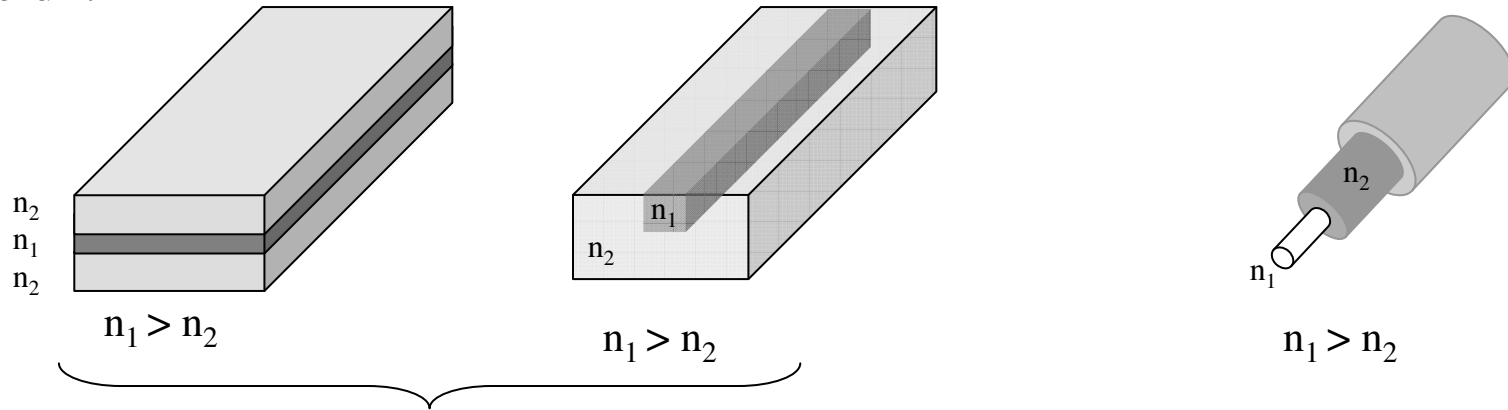
# Işık İleticiler: Dalga Kılavuzları

- Optik Fiberler
- Yarıiletken Dalga Kılavuzları



# Optik Dalga Kılavuzları-Genel

- Dalga kılavuzlarının fonksiyonu ışığın özelliğini bozmadan ve en az kayıpla bir noktadan başka bir noktaya iletmektir.
- Bu asıl fonksiyonlarının yanı sıra optik modülatör veya optik anahtar olarak da kullanılabilir.
- İletimi amacı ile kullanıldığında ya aynı yonga (çip) üzerindeki ya da birbirlerinden kilometrelerce uzaklıkta bulunan optoelektronik devre elemanları arasında ışığın iletimini sağlar.
- İletken tellerdeki elektrik akımının tersine dalga kılavuzlarında ışık farklı kiplerde (mod) ilerler.
- **Yarıiletken dalga kılavuzları** daha çok elektronik yongalar üzerindeki (< cm) iletişimi sağlamada ve elektro-optik modülatörlerde kullanılır
- Uzun mesafeler arasında (km) ışığı taşımada kullanılan en yaygın dalga kılavuzları **optik fiber**lerdir.

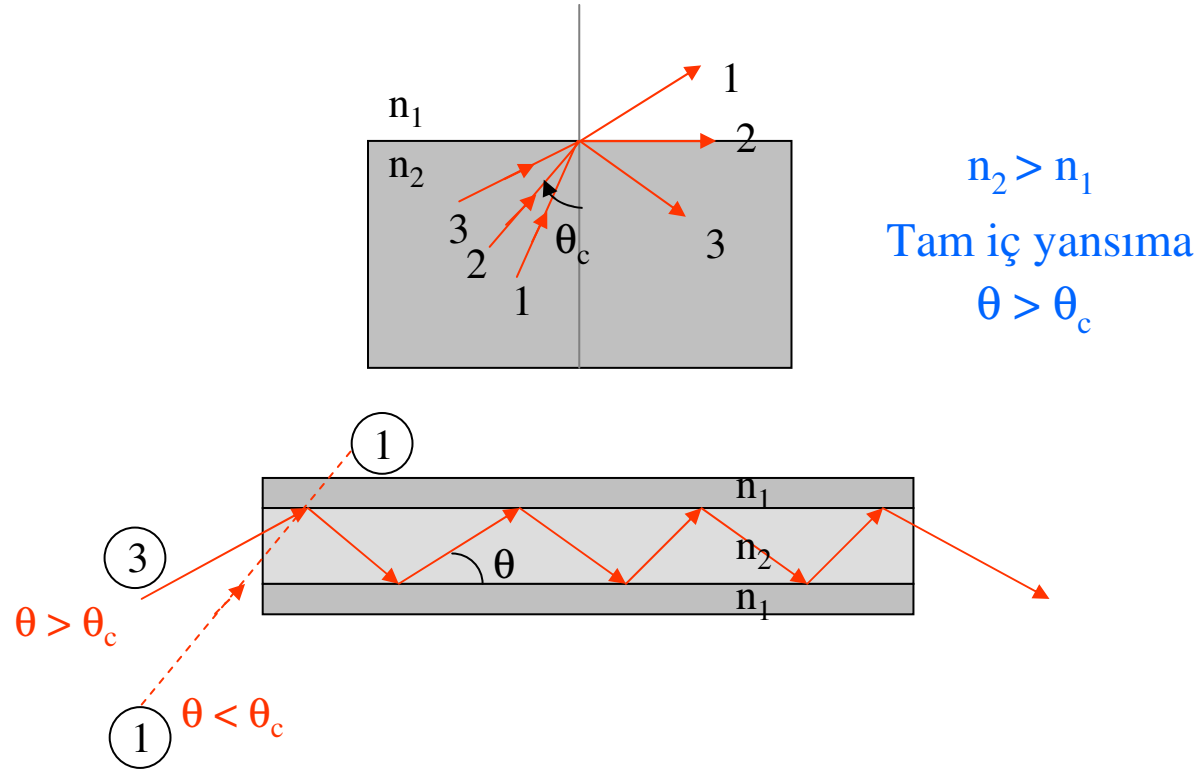


Yarıiletken Dalga Kılavuzları

Fiber Optik Dalga Kılavuzları

# Optik Dalga Kılavuzları-2

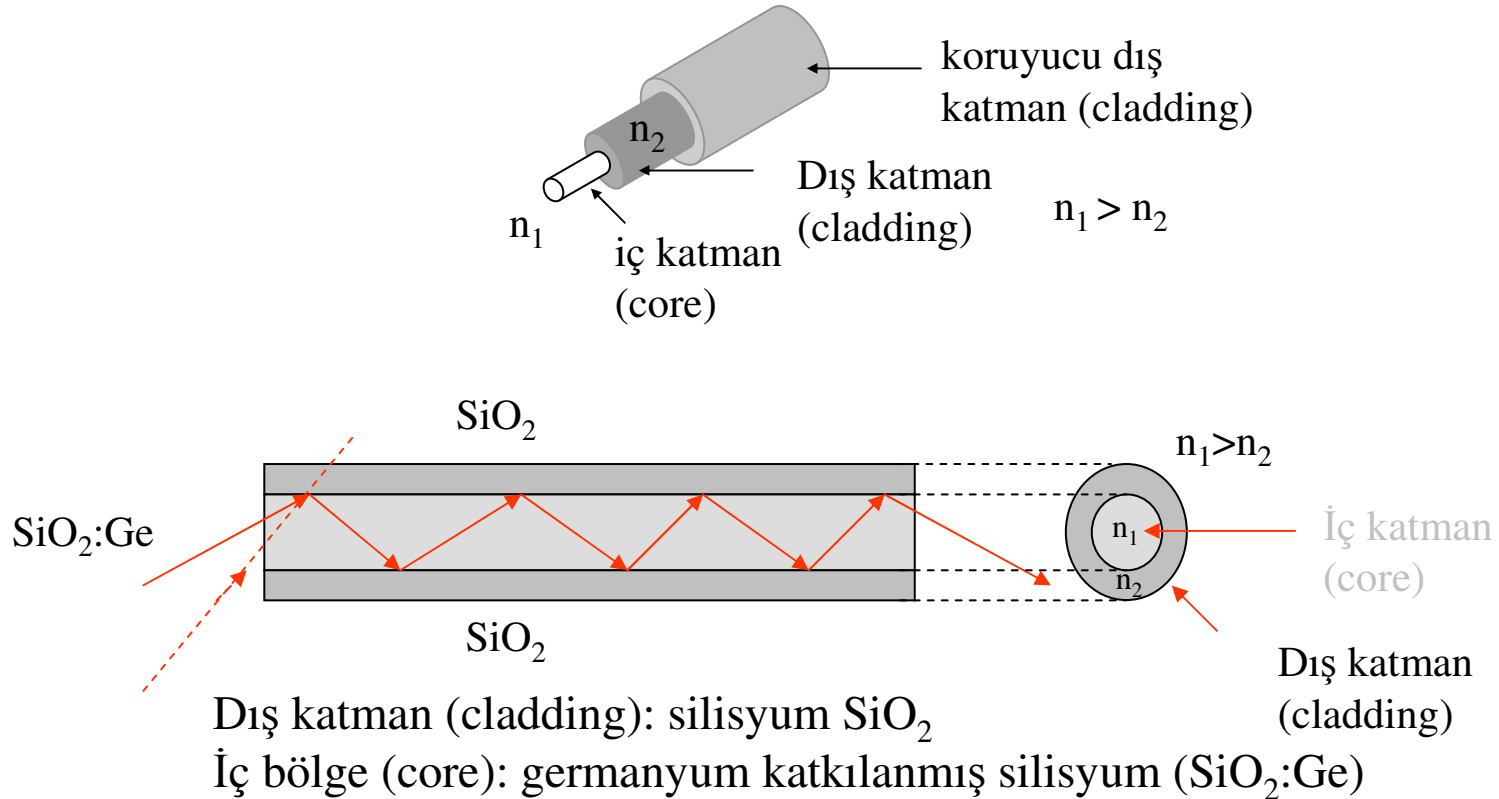
Dalga kılavuzları, kırılma indisi büyük olan bir katmanın kırılma indisi daha küçük bir katman ile kaplanarak oluşturulur. Işık iletimi tam iç yansıma esasına göre gerçekleşir.



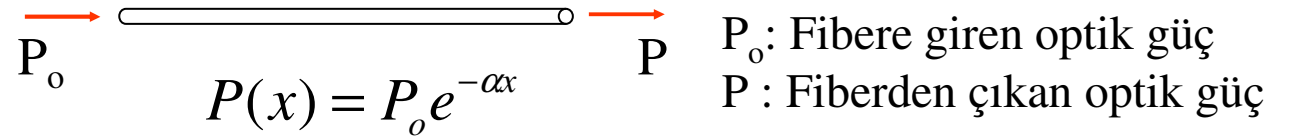
Geliş açısı kritik açıdan küçük olan ışık (1),  $n_1$  ortamına geçer ve dalga kılavuzundan ayrılır. Geliş açısı kritik açıdan büyük olan ışık (3) ise  $n_1$  katmanına geçmez ve  $n_2$  katmanında kalarak dalga kılavuzu boyunca iletilir.

# Optik Fiberler

- Uzun mesafeler arasında ışığı taşımada kullanılan en yaygın dalga kılavuzları optik fiberlerdir.
- Optik fiberler ışığı taşıyan yüksek kırılma indisli iç katmanın (core) düşük kırılma indisli malzeme (cladding) ile silindirik geometride yapılırlar.
- Optik fiberler genellikle silisyumdan yapılır.



# Optik Fiberler-Kayıplar

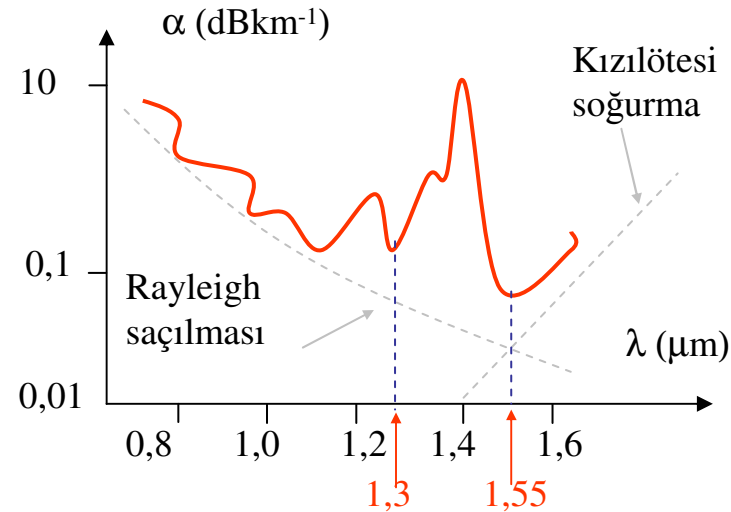


$$dB = -10 \log(P/P_o)$$

$$\alpha = -\frac{10 \log(P/P_o)}{x} = \frac{dB}{x}$$

**Kayıp (attenuation) katsayısı**

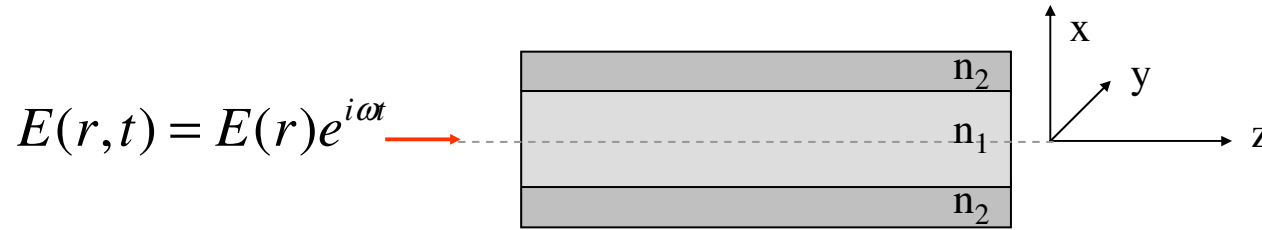
Işığın şiddetindeki azalma (soğrulması) bütün dalgaboyları için aynı değildir. Bu sebepten dalga kılavuzunun hangi dalgaboyu için kullanılacağı önemlidir.



Optik fiberlerde soğurmanın en düşük olduğu dalgaboyları 1,3 ve 1,55  $\mu\text{m}$  olduğundan optik iletişimde bu dalgaboylarındaki ışık kullanılır.

# Dalga Kılavuzları: Modlar-Genel Durum

Dalga kılavuzlarında ışık belli modlarda yayılır. Bu modları bulabilmek için Maxwell denklemleri kırılma indisleri farklı katmanlar için yazarak çözümleri bulmak gerekir.



$$\nabla^2 E(r,t) = \left[ \frac{n^2(r)}{c^2} \right] \frac{\partial^2 E(r,t)}{\partial t^2}$$

$$E(r,t) = E(r)e^{i\omega t}$$

Zaman ve uzaysal bileşenler ayrılırsa  $\nabla^2 E(r) + k^2 n^2(r) E(r) = 0$   $k = \omega/c$

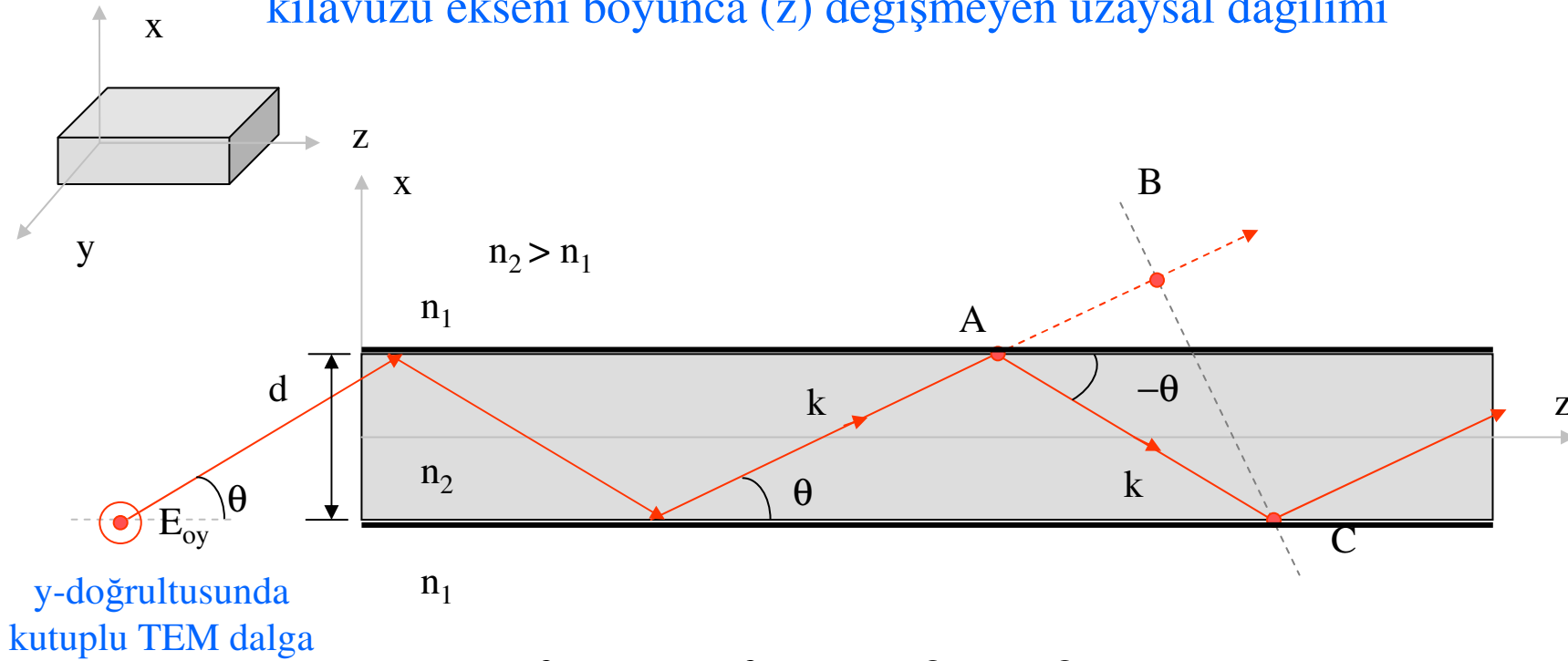
z-eksenini boyunca ilerleyen Işığın uzaysal dağılımı  $E(r) = E(x, y)e^{-i\beta z}$   $\beta =$  yayılma sabiti (z-doğrultusundaki dalga vektörü)

$$\frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial y^2} + [k^2 n^2(r) - \beta^2] E(x, y) = 0$$

Bu diferansiyel denklemi sağlayan  $\beta$  değerleri dalganın olası modlarını (elektrik alanın uzaysal dağılımını) verecektir.

# Optik Dalga Kılavuzları: Modlar-1

Mod: Işığın kutuplanma doğrultusu ve enlemesine alanı ( $E$ ,  $H$ ) dalga kılavuzu eksenine boyunca ( $z$ ) değişmeyen uzaysal dağılımı

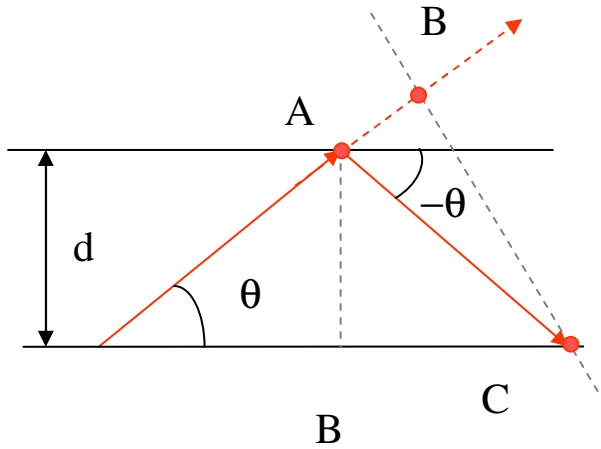


$$faz_{AC} - faz_{AB} - 2\pi = 2\pi q \quad q=0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} AC - \frac{2\pi}{\lambda} AB - 2\pi = 2\pi q$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} (AC - AB) = 2\pi(q + 1) = 2\pi m \quad m=(q+1)=1,2,3, \dots$$

# Optik Dalga Kılavuzları: Modlar-2



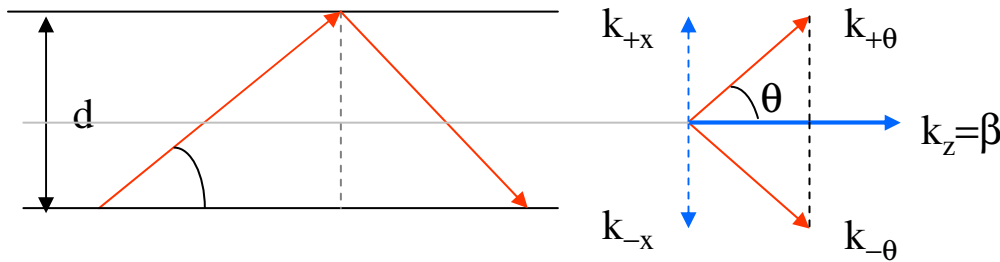
$$AC - AB = 2d \sin \theta$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} (AC - AB) = 2\pi m \quad m=(q+1)=1,2,3\dots$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2d \sin \theta = m2\pi$$

$$\sin \theta_m = m \frac{\lambda}{2d}$$

Her  $m$ , farklı bir geliş açısına ( $\theta_m$ ) karşı gelmektedir.  $m$ 'in karşı geldiği alanın uzaysal dağılımına *m. mod* denir.



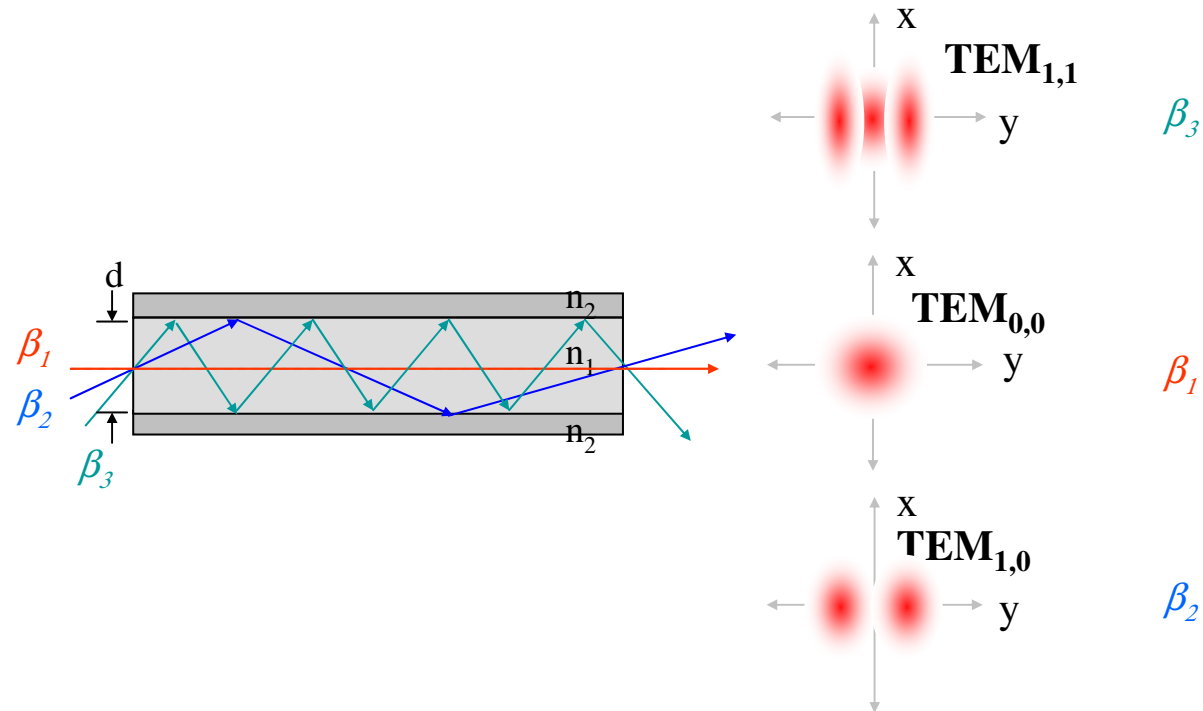
$$\beta = k_z = k \cos \theta$$

$\beta$ =Yayıma sabiti

$$k_m = m \frac{\pi}{d}$$

$$\beta_m^2 = k^2 - \frac{m^2 \pi^2}{d^2}$$

# Optik Dalga Kılavuzları: Modlar-3



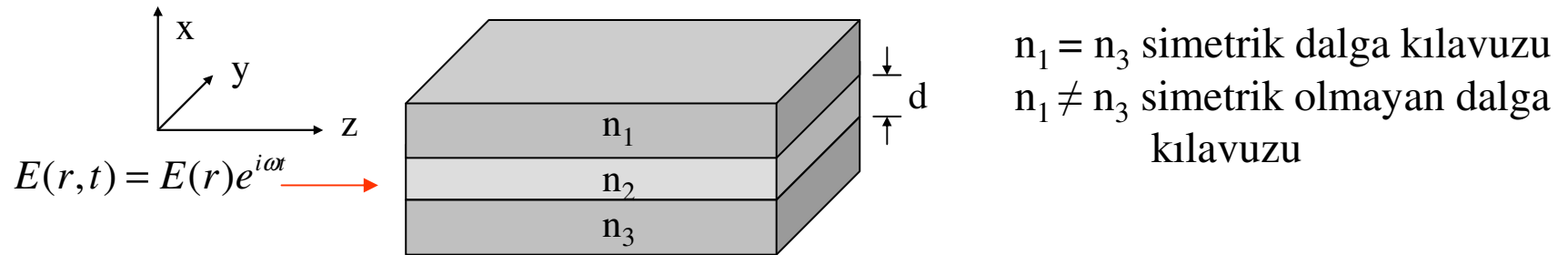
$$\beta_m^2 = k^2 - \frac{m^2 \pi^2}{d^2}$$

$$k_m = m \frac{\pi}{d}$$



# Yarıiletken Dalga Kılavuzları-1

- Büyük kırılma indisli yarıiletken bir malzeme ( $n_2$ ) kırılma indisi daha küçük yarıiletken malzemeler tarafından sandivçlenirse kırılma indisi büyük olan katman ışığı dağıtmadan iletebilir.
- Böyle bir yapı epitaksiyel büyütme yöntemleri ile kolaylıkla büyütülebilir.
- Yarıiletken malzemeler kullanılarak yapılan bu dalga kılavuzlarına *yarıiletken optik dalga kılavuzları* denir.
- Kayıpların en az olabilmesi için kılavuz olarak kullanılan katmanın bant aralığının iletilecek ışığın enerjisinden daha büyük olması gerekir.



$$E(r) = E(x, y)e^{-i\beta z} \quad \beta = \text{İlerleme sabiti}$$

$$\frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial y^2} + [k^2 n^2(r) - \beta^2] E(x, y) = 0$$

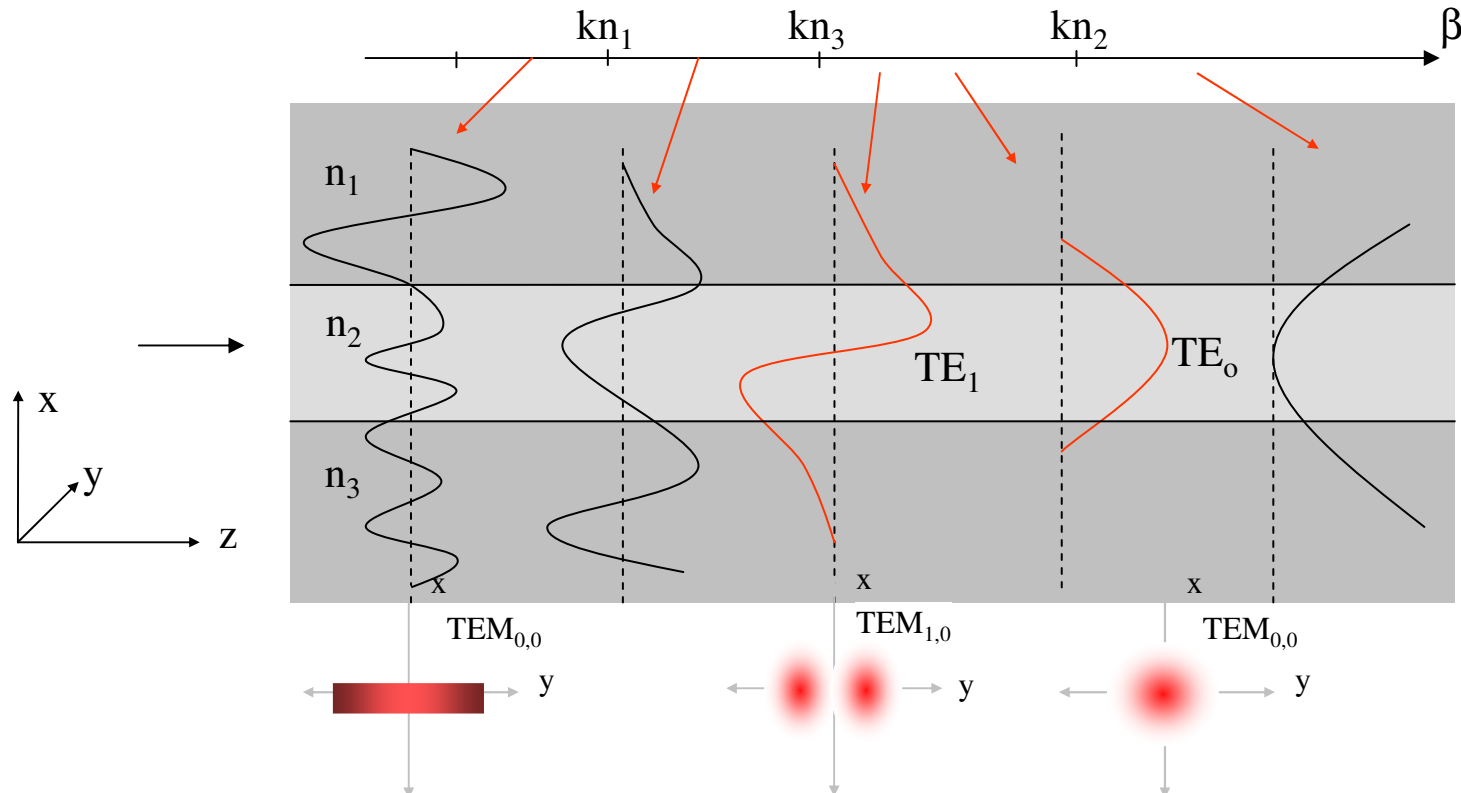
# Yarıiletken Dalga Kılavuzları-2

Işığın kılavuzlanması için

$$d \ll y$$

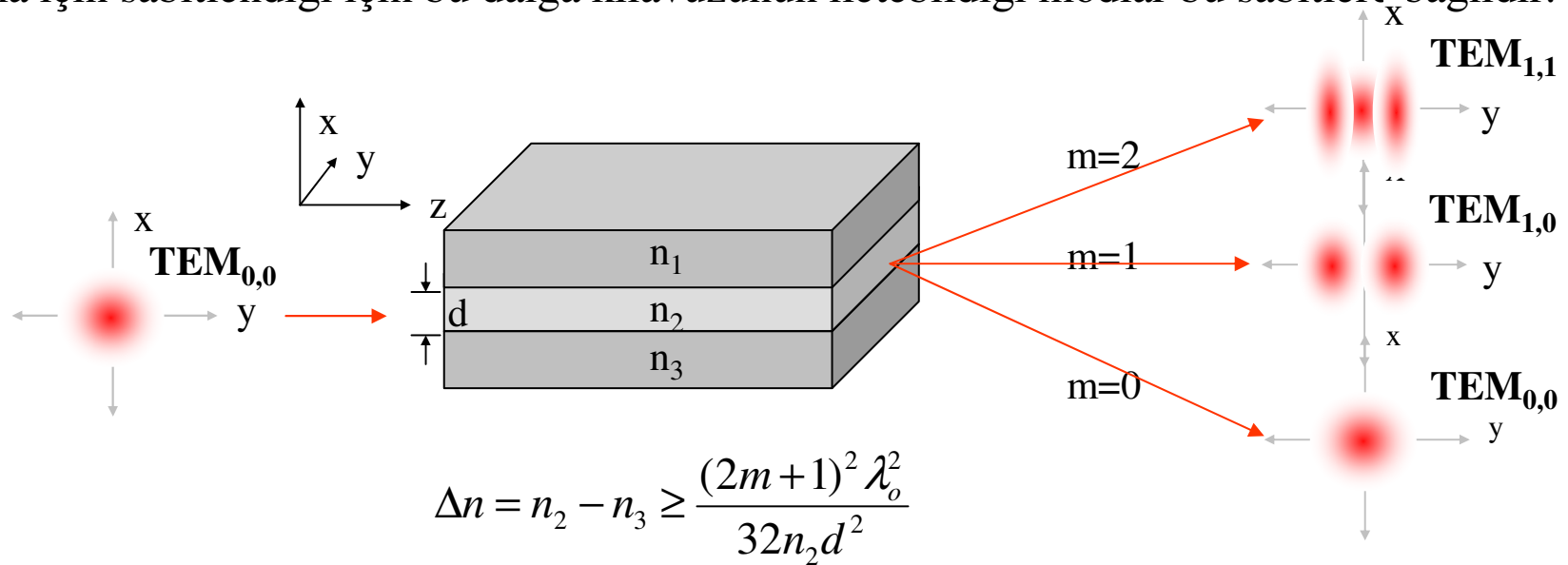
1. Bölge ( $n_1$ )	$\frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + [k^2 n_1^2 - \beta^2] E(x, y) = 0$	$\beta > kn_1$
2. Bölge ( $n_2$ )	$\frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + [k^2 n_2^2 - \beta^2] E(x, y) = 0$	$\beta < kn_2$
3. Bölge ( $n_3$ )	$\frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + [k^2 n_3^2 - \beta^2] E(x, y) = 0$	$\beta > kn_3$

$(k^2 n^2 - \beta^2)$  ifadesinin işaretine bağlı olarak çözümler periyodik veya üsteldir. Işığın dalga kılavuzunda kalabilmesi için  $n_2$  katmanında periyodik,  $n_1$  ve  $n_3$  katmanında da üstel azalan çözümleri veren  $\beta$  değerlerini bulmak gerekir.



# Yarıiletken Dalga Kılavuzları-3

- $\beta$ 'nin farklı değerleri farklı yayılma modlarına karşı gelmektedir.
- Dalga kılavuzunda ilerleyecek modların sayısı dalga kılavuzunun kalınlığına ( $d$ ), dalganın frekansına ve  $n_1$ ,  $n_2$  ve  $n_3$  değerlerine bağlıdır.
- Bir dalga kılavuzu için verilen üsteki değerler için belli bir frekansın altındaki dalgaları iletmediği bir kesim frekans (*cutoff frequency*) değeri vardır.
- Dalga kılavuzunda kalınlık ( $d$ ), dalganın frekansına ( $\omega$ ),  $n_1$ ,  $n_2$  ve  $n_3$  değerlerini belli bir uygulama için sabitlendiği için bu dalga kılavuzunun iletebildiği modlar bu sabitlere bağlıdır.



Burada  $m=0, 1, 2, \dots$  mod sayısı,  $\lambda_o$  ise yayılan ışığın boşluktaki dalgaboyudur.

Örneğin GaAs da  $n_2=3,6$  ve kalınlığı dalgaboyu mertebesinde olduğu durumda  $10^{-2}$  lik indis farkı  $TE_0$  modunun yayılmasına yetecektir.

# Özet

Bu derste optoelektronik teknolojisinde kullanılan ışık kaynakları ve ışık ileticileri incelenerek çalışma ilkeleri anlatılmıştır.

Bir p-n eklemi I-V grafiğinin I. bölgesinde çalıştırılırsa, tüketim bölgesinde elektron ve deşiklerin verimli bir şekilde birleşmesi sağlanarak ışık elde edilebilir. Böyle bir yapı uygun şekilde tasarlanarak amaca yönelik ışık elde etmede kullanılabilir.

Bu sayede elde edilen ışık (LED ışığı) diğer ışık kaynaklarına göre daha verimlidir ancak uyumlu, tekrenkli ve kutuplu değildir. Bir p-n eklemi uygun şekilde oluşturulursa (kenarlarına aynalar yapılırsa) çıkan ışık çok farklı özellikler gösterir. Bu durumda çıkan ışık tek renkli, kutuplu ve uyumludur, yani lazer ışığıdır. Yarıiletken lazerlerin verimliliği düşük boyutlu sistemler kullanılarak daha da artırılabilir. Düşük boyutlu sistemler hem elektron ve deşiğin verimli bir şekilde birleşmelerine hem de optik foton alanını artmasına katkı sağlar. Yarıiletken lazerlerde aktif bölgenin alt ve üstüne DBR aynalar yaparak ışığın kenardan değil de yüzeyden çıkması sağlanabilir. VCSEL olarak bilinen bu yarıiletken lazerler sayesinde ışık dizileri oluşturmak mümkündür.

Işığın iletimi de üretimi kadar önemlidir. Işık iletiminde optik dalga kılavuzları kullanılır. Uzun mesafeler için optik fiberler, kısa mesafeler (çip) için de yarıiletken dalga kılavuzları kullanılmaktadır. Optik dalga kılavuzlarında ışık belli modlarda ilerler. Dalga kılavuzlarının kırılma indisi ve kalınlıkları ayarlanarak sadece belli moda sahip ışığın iletilmesi sağlanabilir.

## **UADMK - Açık Lisans Bilgisi**

Bu ders malzemesi öğrenme ve öğretme yapanlar tarafından açık lisans kapsamında ücretsiz olarak kullanılabilir. Açık lisans bilgisi bölümü yani bu bölümdeki, bilgilerde değiştirme ve silme yapılmadan kullanım ve geliştirme gerçekleştirilmelidir. İçerikte geliştirme değiştirme yapıldığı takdirde katkılar bölümüne sadece ekleme yapılabilir. Açık lisans kapsamındaki malzemeler doğrudan ya da türevleri kullanılarak gelir getirici faaliyetlerde bulunulamaz. Belirtilen kapsam dışındaki kullanım açık lisans tanımına aykırı olduğundan kullanım yasadışı olarak kabul edilir, ilgili açık lisans sahiplerinin ve kamunun tazminat hakkı doğması söz konusudur.