FZM450 Elektro-Optik

10.Hafta

Optoelektronik

© 2008 HSarı

10. Hafta Ders İçeriği

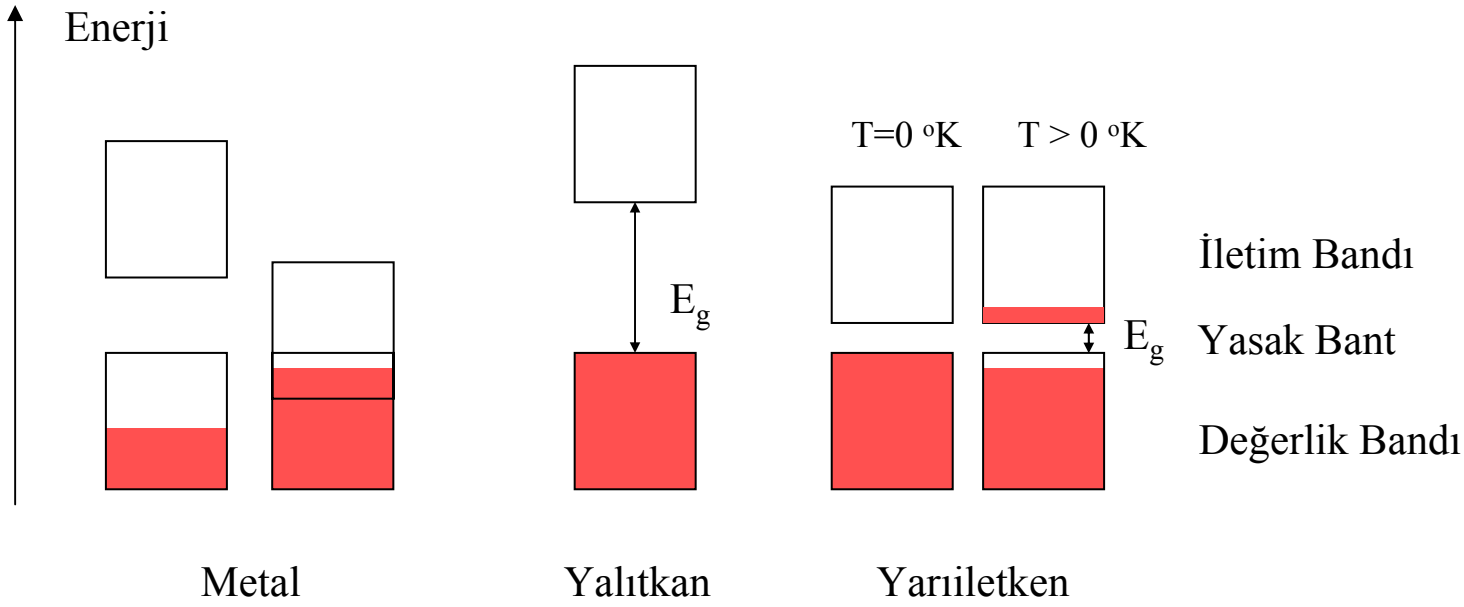
- Optoelektronik Yarıiletken Malzemeler
- p-n Eklemlerinin Optoelektronik Uygulamaları
- Güneş Pilleri
- Işık Dedektörleri
- Işık Diyotları
- Işık Yayan Optoelektronik Devre Elemanları
  - LED
  - Yarıiletken Lazereler

- Dalga Klavuzları
  - Optik Fiberler
  - Yarıiletken Dalga Klavuzları

© 2008 HSarı

İletken, Yarıiletken, Yalıtkan

Maddelerin elektriksel özellikleri bu maddelerin elektronik bant yapısı ile yakından ilgilidir



Enerji bantları tamamen dolu veya tamamen boş ise kristal yalıtkan gibi davranır çünkü elektrik alan uygulandığında bant içinde boş yerler olmadığı için elektronlar hareket edemezler (yük taşıyamazlar)!

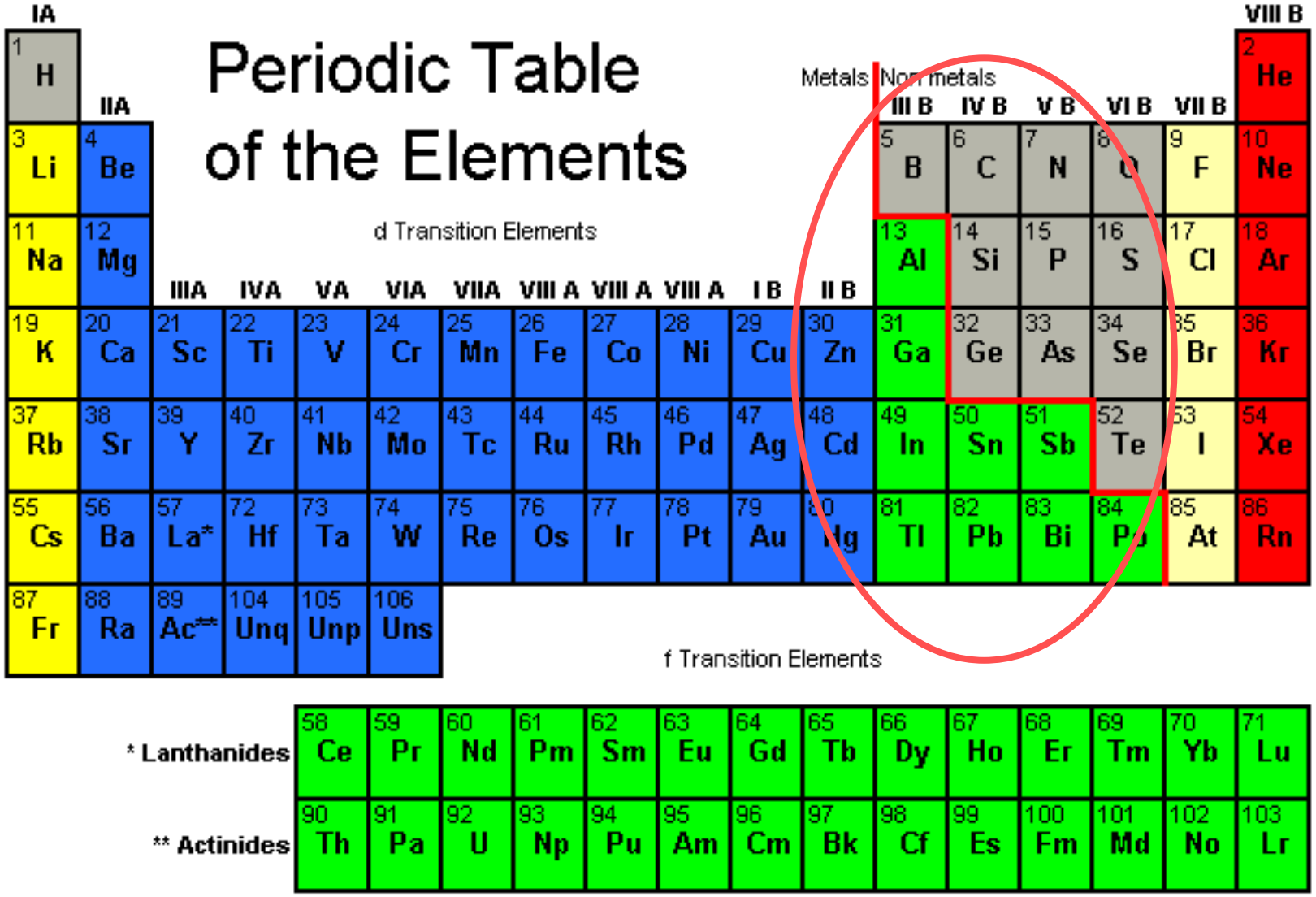
$E_g^{yalıtkan} >> E_g^{yarıiletken}$

E_g (Ge)=0,6 eV (yarıiletken)
Eg (Si)=1,12 eV (yarıiletken)
E_g (C)=5,4 eV (yalıtkan)

E_g (GaAs)=1,43 eV (yarıiletken)

© 2008 HSarı

Yarıiletken Elementler

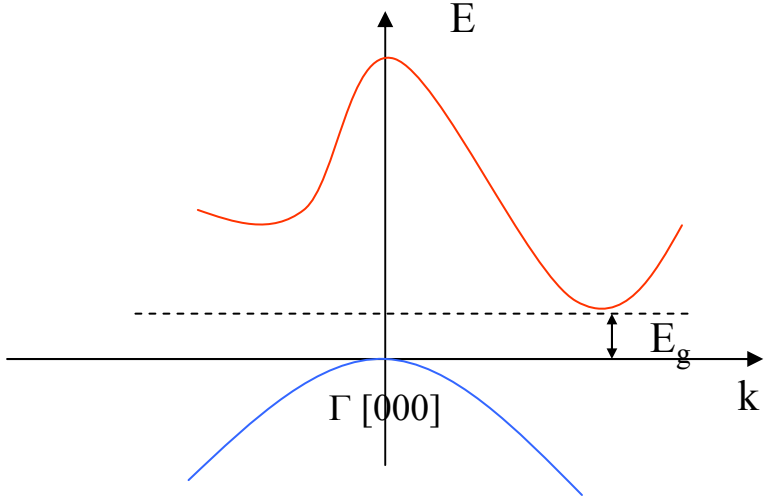


© 2008 HSarı

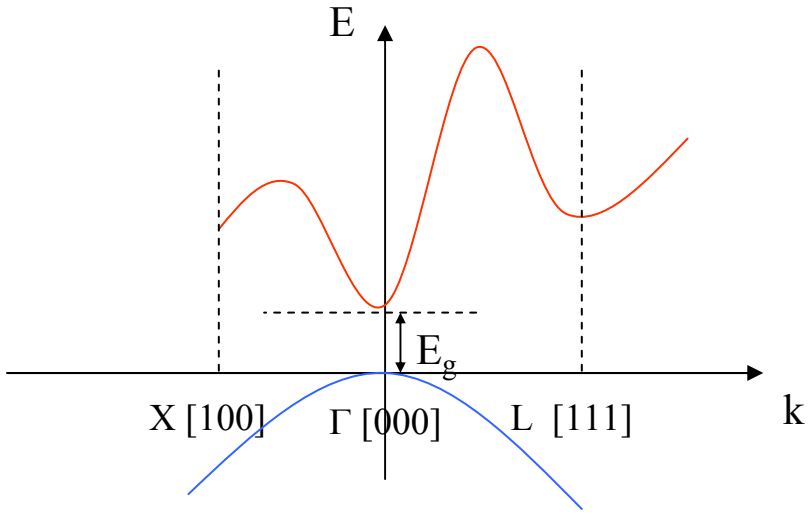
Bant Aralığı

- Yarıiletkenlerdeki taşıyıcıların enerji E-k grafiği bize önemli bilgiler verir
- Enerji bantlarının şekline göre yarıiletkenleri iki sınıfa ayırabiliriz

Eğer iletim bandı ile değerlik bandı arasındaki enerji en düşük değere k=0 da sahip ise bu yarıiletkenlere doğrudan aralıklı (direk bant aralığına sahip) yarıiletkenler denir. Örnek: GaAs



İndirek Bant aralığı



Direk Bant aralığı

Eğer iletim bandı en düşük enerjiye k ≠ 0 de sahip ise bu yarıiletkenlere indirek bant aralıklı denir
Örnek: Si, Ge

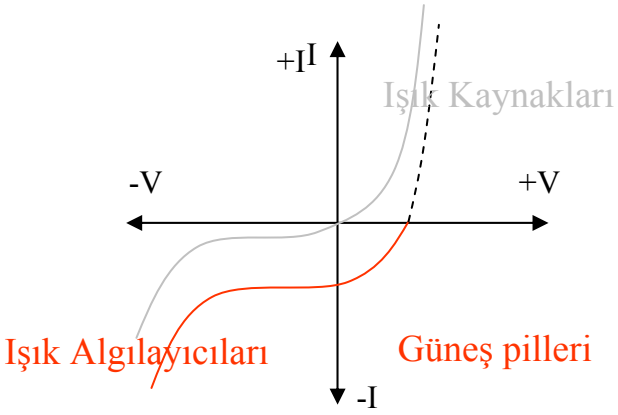
Bir yarıiletkenin direk veya indirek band aralığına sahip olması optik özelliklerini belirler ve Bu optoelektronik uygulamalar için kullanılıp kullanılmayacağı için en büyük kriterlerden biridir

© 2008 HSarı

Optoelektronik Malzemeler

- Tek Atomlu Yarıiletkenler

silikon (Si), germanyum (Ge), karbon (C)!



Dolaylı Bant yapısı (Si)

		III	IV	V	VI	VII
		B	C	N	O	F
I	II	Al	Si	P	S	Cl
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At

- Bileşik Yarıiletkenler

III-V

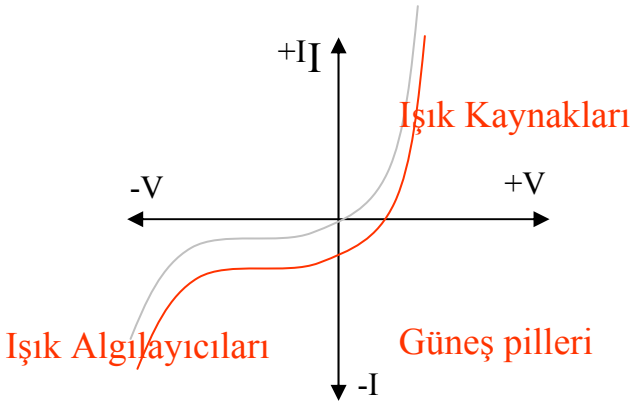
İkili (Ternary) => GaAs, AlAs, InAs, InP

Üçlü (Quaternary) => $Ga_xAl_{(1-x)}As$, $In_xAl_{(1-x)}As$

II-VI

İkili (Ternary) => HgTe, CdTe

Üçlü (Quaternary) => $Cd_xHg_{(1-x)}Te$



Dolaysız (direk) Bant yapısı (GaAs)

© 2008 HSarı

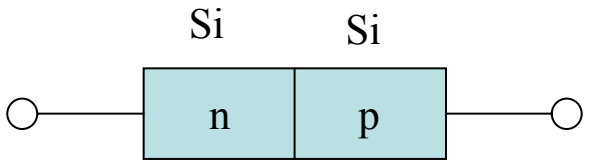
Yarıiletken Eklemler

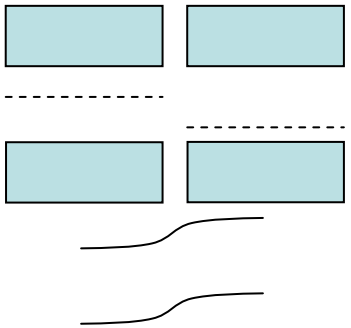
• Yarıieltkenlerden yararlanma bunlardan farklı tip katkılanmış olanlarını biraraya getirerek eklemler oluşturmak ile gerçekleştirilir

• İki farklı eklemlerden bahsedebiliriz:

i) Aynı tür eklemler (Homojunction):

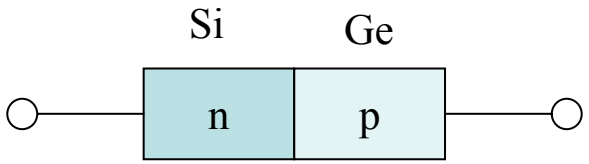
Aynı tür yarıiletkenden oluşturulmuş n- ve p-tipi yarıiletkeni birleştirerek oluşturulan eklemler (örneğin Si:Si, Ge:Ge)

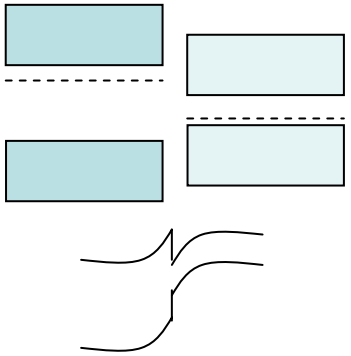




ii) Farklı tür eklemler (Heterojuction):

Farklı tür yarıiletkenleri birleştirerek oluşturulan eklemler (örneğin Si:Ge, GaAs:GaAlAs)



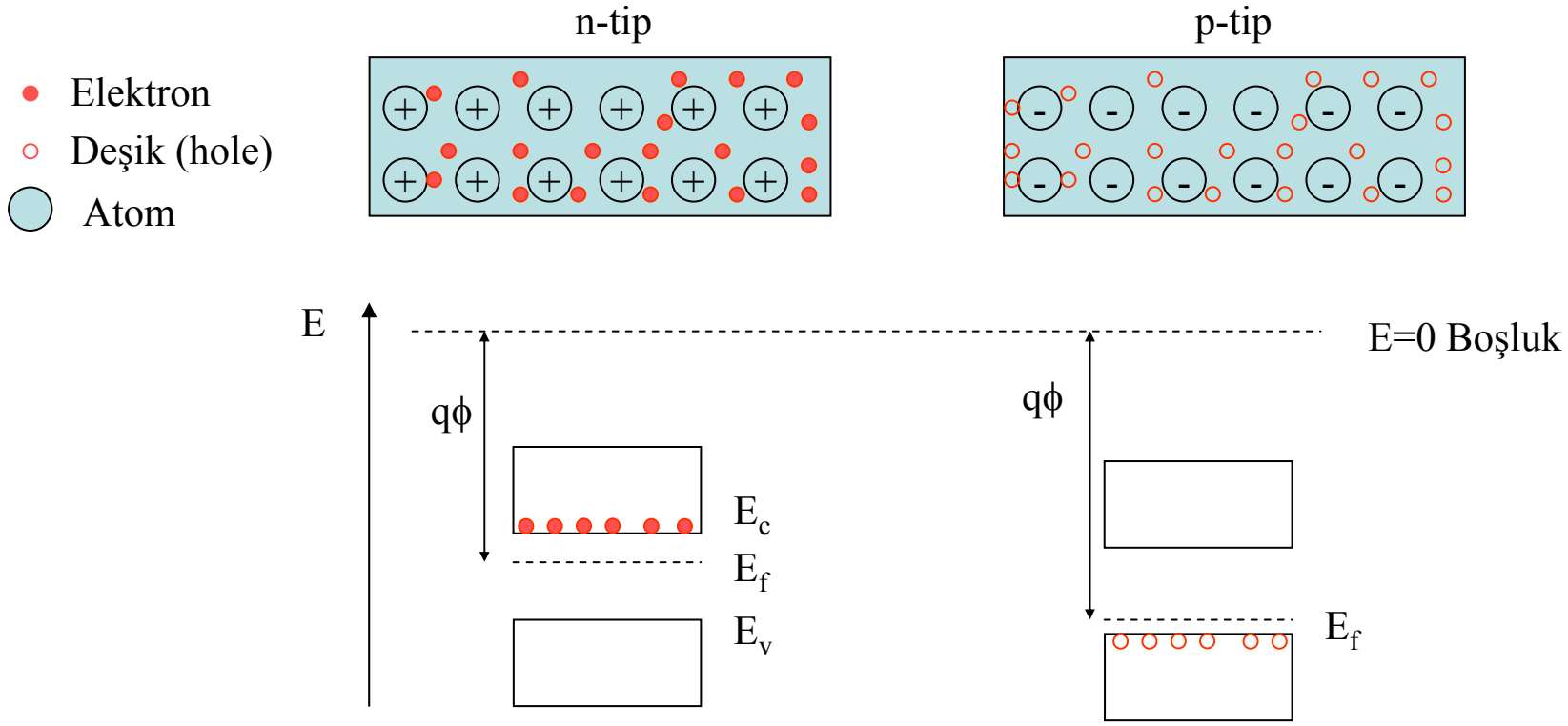


© 2008 HSarı

Aynı Türden Eklemler (Homojunction)

Silikondan yapılmış n-tipi ve p-tipi katkılanmış yarıiletken malzemeyi düşünelim

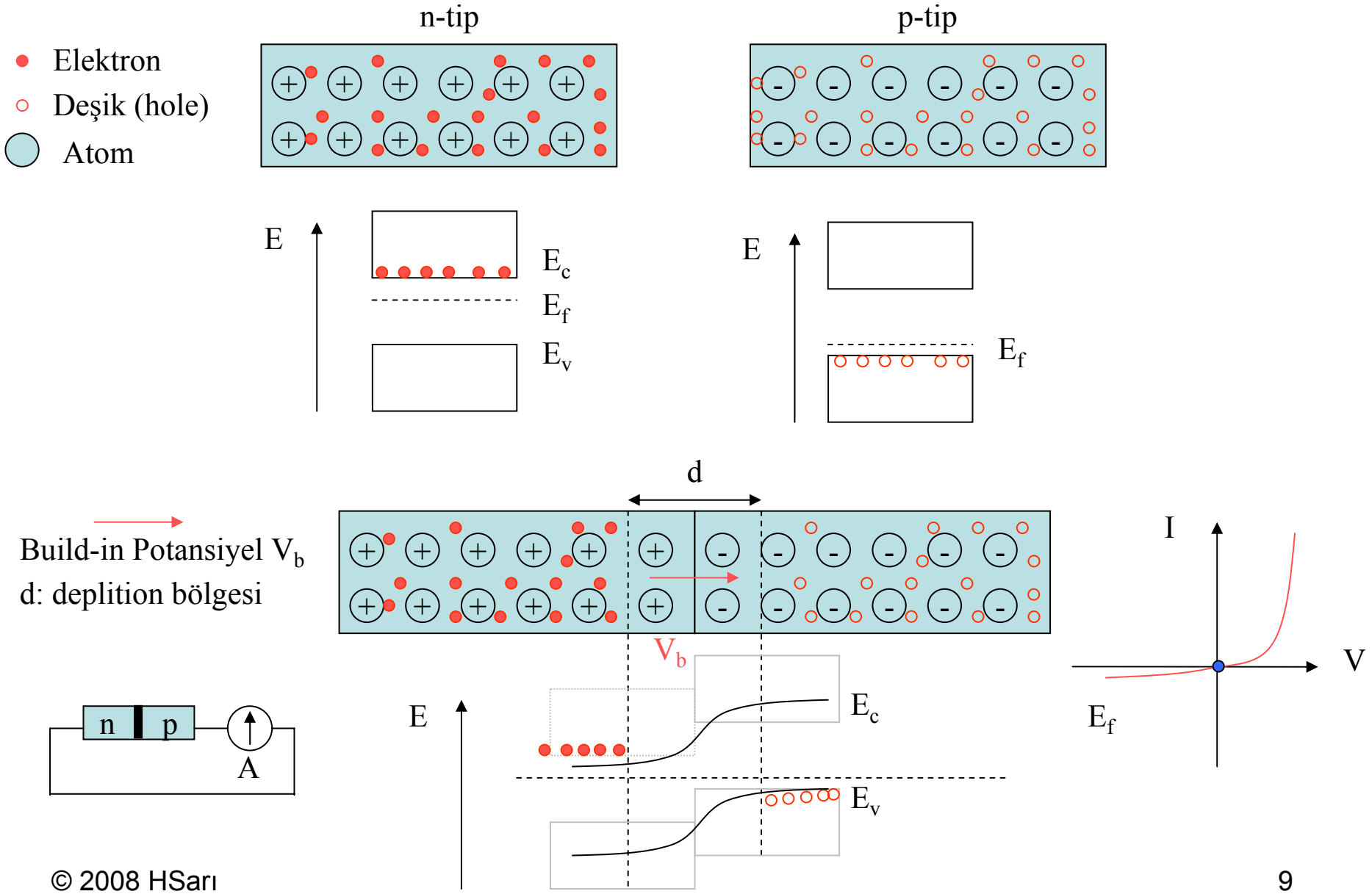
Malzemeler aynı olduğu için (silikon) n- ve p- tipi malzemenin bant aralığı da aynı olacaktır



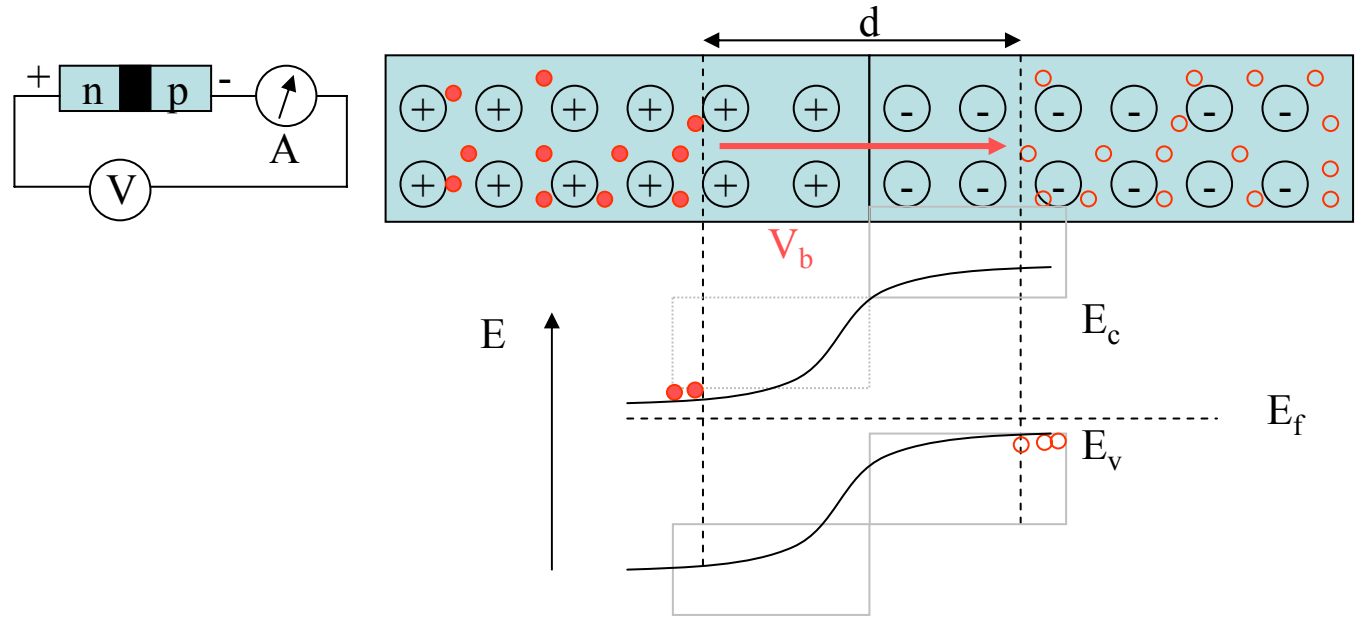
qϕ(iş fonksiyonu): Bir elektronu iletim bandından (E_c) boşluğa götürmek için gereken enerji

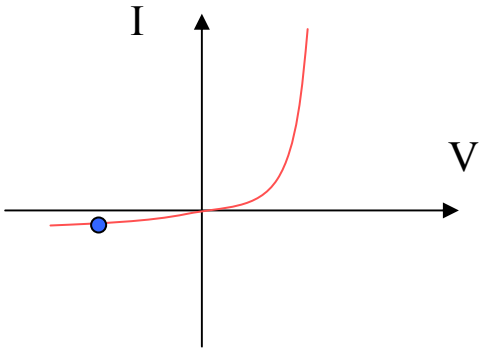
© 2008 HSarı

Yarıiletken Eklemler

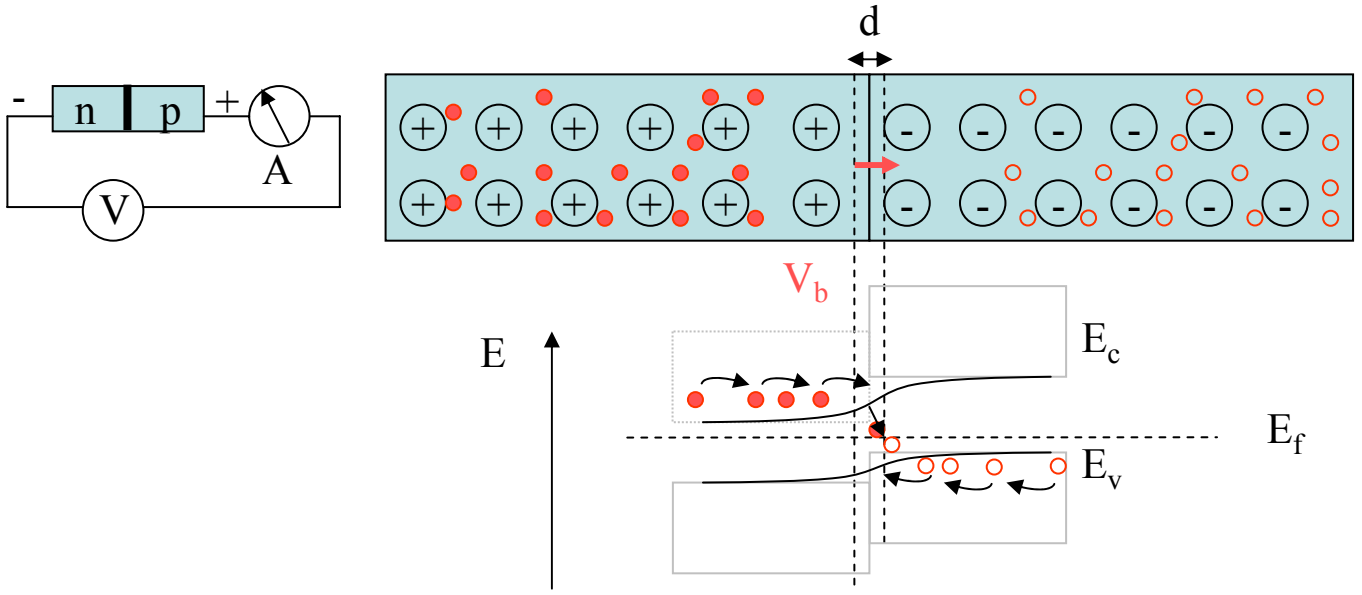


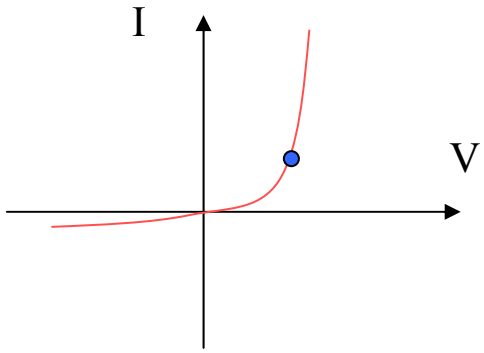
© 2008 HSarı





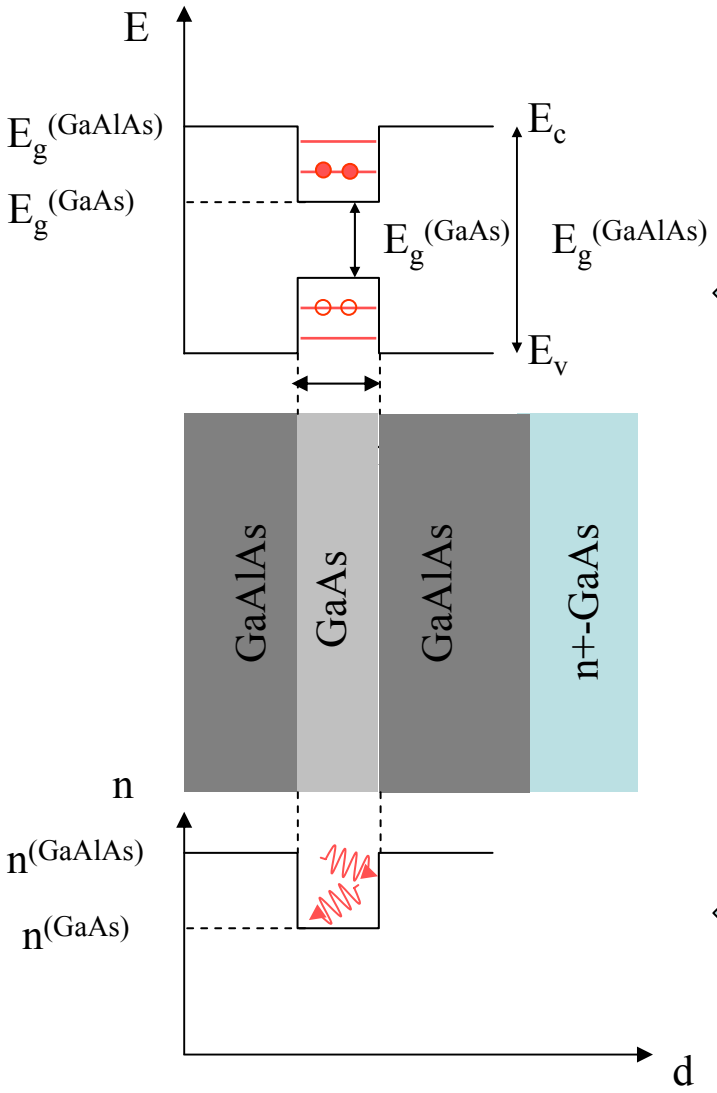
Ters besleme

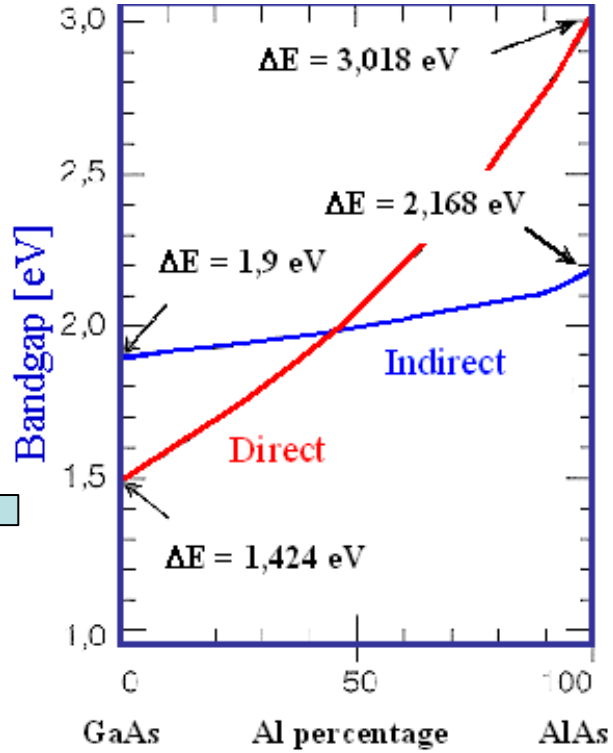


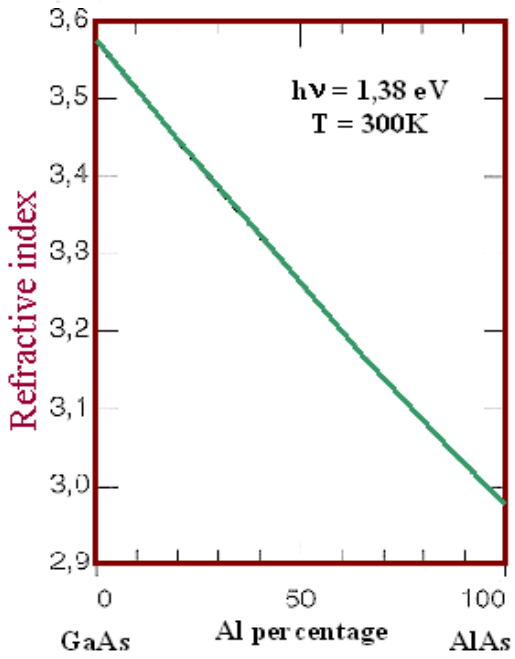


İleri besleme

© 2008 HSarı


E
$E_g^{(GaAlAs)}$
$E_g^{(GaAs)}$
E_c
$E_g^{(GaAs)}$
$E_g^{(GaAlAs)}$
E_v
GaAlAs
GaAs
GaAlAs
n+-GaAs
n
$n^{(GaAlAs)}$
$n^{(GaAs)}$
d


Bandgap [eV]
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
ΔE = 3,018 eV
ΔE = 2,168 eV
ΔE = 1,9 eV
ΔE = 1,424 eV
Indirect
Direct
0
50
100
GaAs
Al percentage
AlAs


Refractive index
3,6
3,5
3,4
3,3
3,2
3,1
3,0
2,9
hν = 1,38 eV
T = 300K
0
50
100
GaAs
Al percentage
AlAs

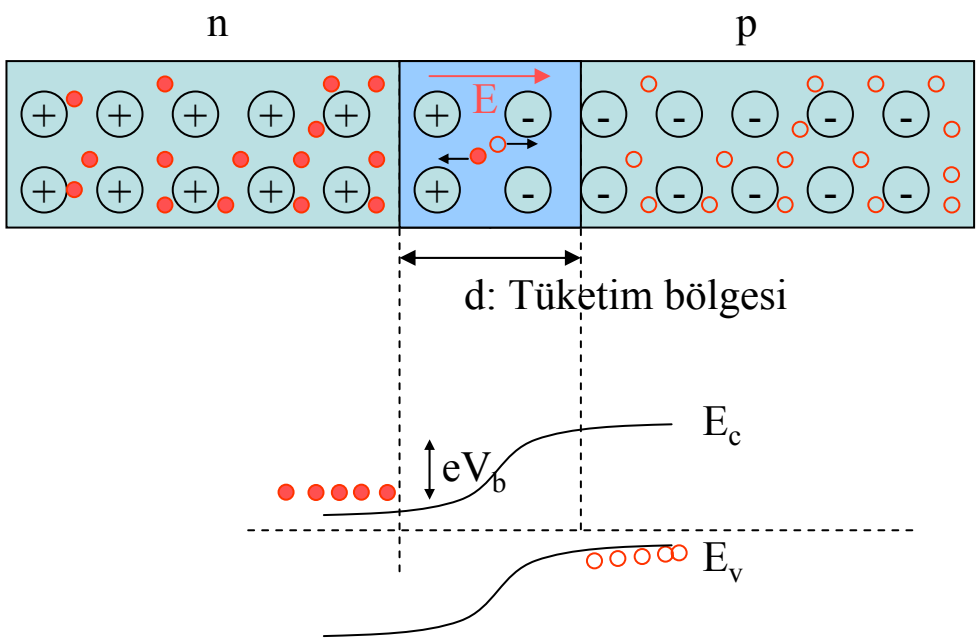
© 2008 HSarı

Yarıiletken Eklemlerin Optoelektronik Uygulamaları

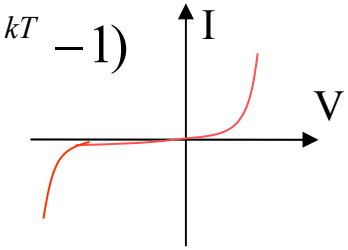
© 2008 HSarı

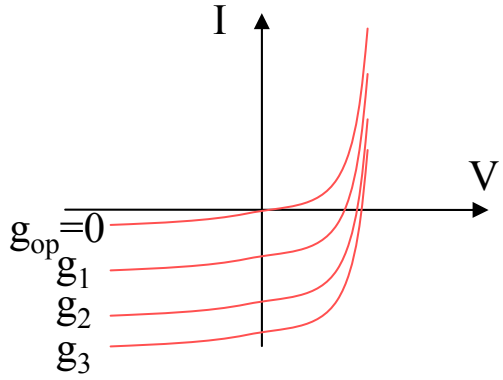
Yarıiletken Eklemlerin Optoelektronik Uygulamaları-1

Yarıiletken eklemler elektrik enerjisini ışığa etkin şekilde çevirecek şekilde tasarlanır



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



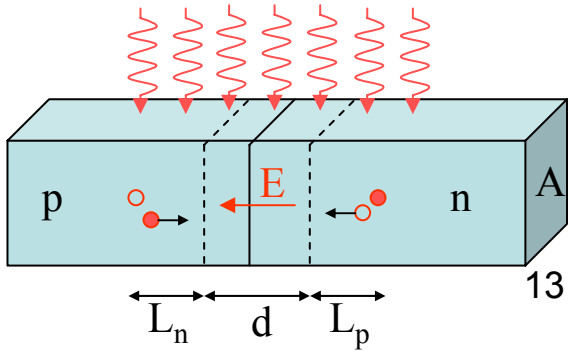


p-n eklemi hv > E_g enerjili düzgün bir ışıkla aydınlatılırsa (I_{op}) eklemin tüketim bölgesinde elektron ve deşik çiftleri oluşur. Devrede oluşacak olan akım

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

g_{op}= (EHP/cm^3-s)

I_{op}= g$A g_{op}(L_p+L_n+d)$



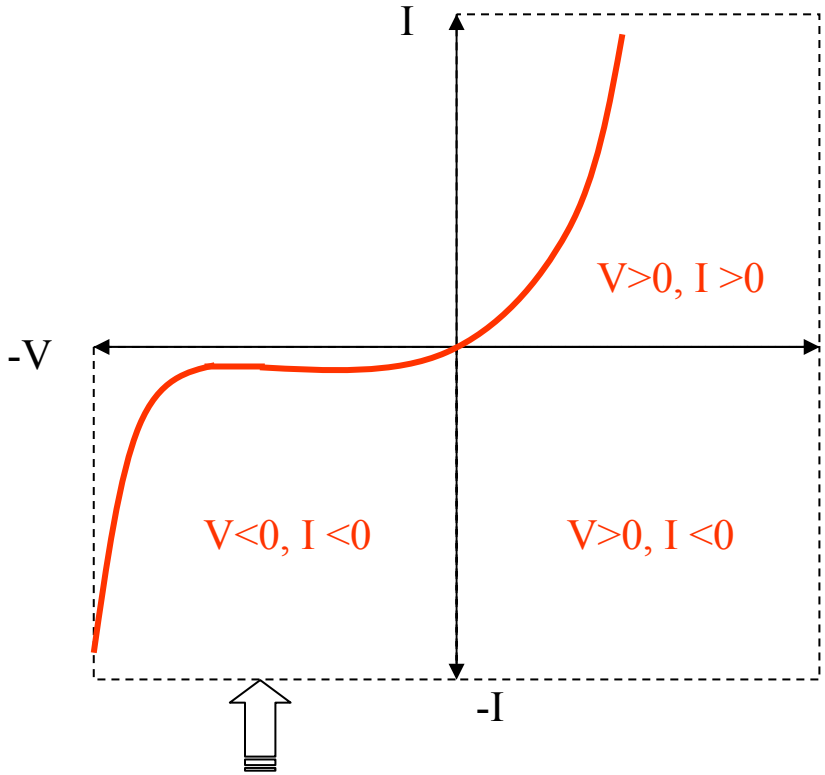
L_p=Deşik difüzyon uzunluğu

L_n=Elektron difüzyon uzunluğu

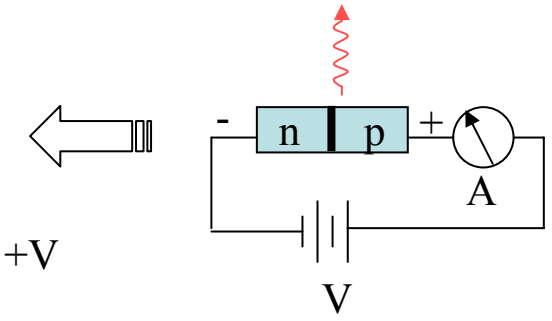
© 2008 HSarı

Yarıiletken Eklemlerin Optoelektronik Uygulamaları-2

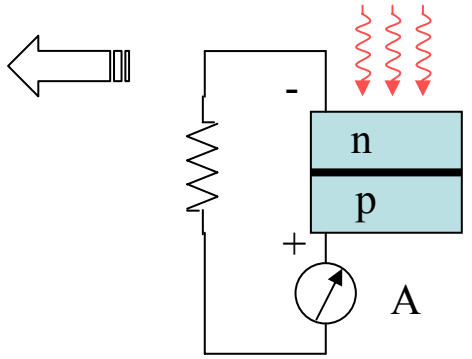
Yarıiletkenlerin optoelektronikte kullanılması farklı katkılanma ve eklemler yapılarak mümkündür



I. Bölge (V>0, I >0): LED ve Lazerler

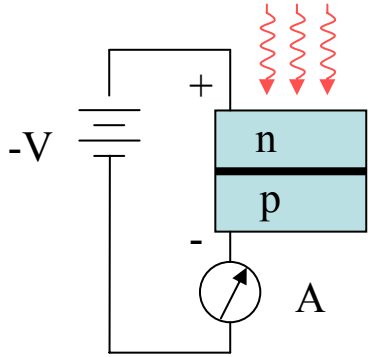


IV. Bölge (V>0, I <0): Güneş Pilleri



III. Bölge (V<0, I <0): Dedektörler

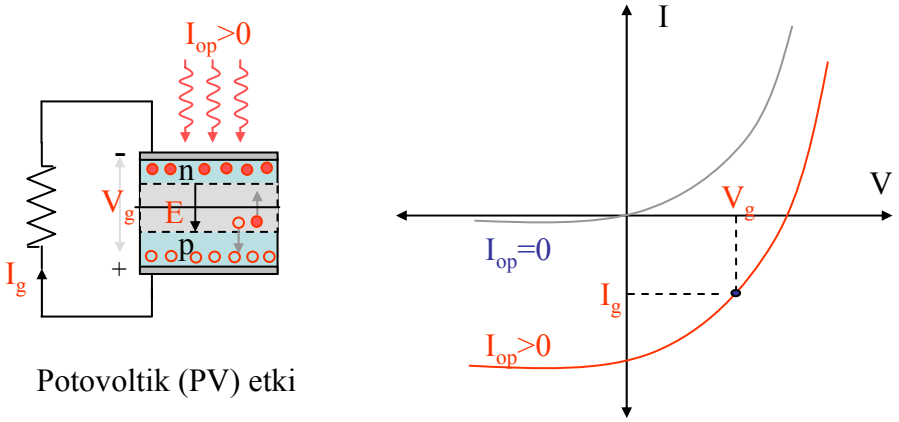
Akım gerilimden bağımsız, optik şiddet ile orantılı



© 2008 HSarı

Güneş Pilleri-1

Uygun bir p-n eklemi I-V eğrisinin V. bölgesinde çalıştırılırsa eklem üzerine gelen ışığın oluşturacağı elektron-deşik çifti toplanarak dış devreye elektriksel güç sağlayabilir



Potovoltik (PV) etki

Elektron-deşik çiftinin yaratılması ile p-n ekleminin uçları arasında oluşacak olan gerilim kullanılan yarıiletken malzemenin bant aralığından daha düşük olur. Örneğin Si'de bu gerilim < 1 V

Akım ise aydınlatılan yüzeye bağlıdır. 1 cm^3'lik alan için 10-100 mA arasında değişir

Gerilim düşük olduğundan yüksek güç elde etmek için büyük yüzey alanları kullanmak gerekmektedir

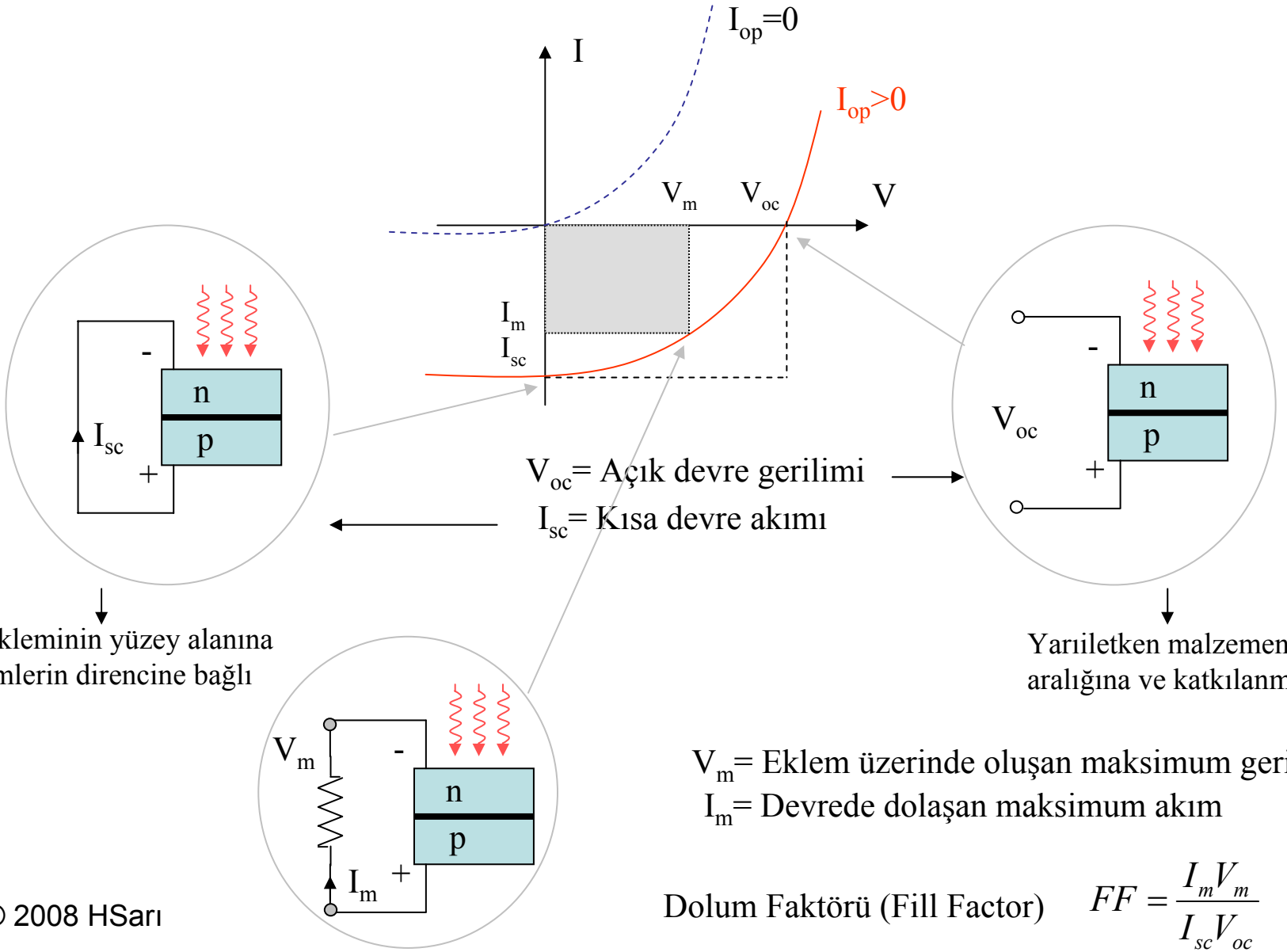
Güneş spektrumundaki bütün dalgaboylarının eklem tarafından soğrulması arzulanır

Silikon, ucuz oluşundan dolayı güneş pillerinde yaygınca kullanılmaktadır

© 2008 HSarı

Güneş Pilleri-2

Güneş pillerinin verimliliği: (oluşturulan e-h sayısı) / (gelen foton sayısı)



V_{oc}= Açık devre gerilimi

I_{sc}= Kısa devre akımı

p-n ekleminin yüzey alanına
Eklemlerin direncine bağlı

Yarıiletken malzemenin bant aralığına ve katkılanmaya bağlı

V_m= Eklem üzerinde oluşan maksimum gerilimi

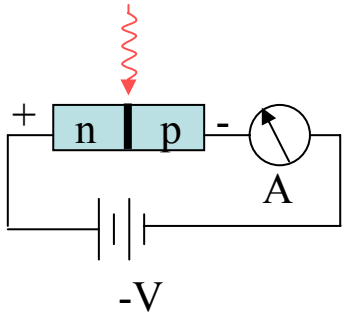
I_m= Devrede dolaşan maksimum akım

Dolum Faktörü (Fill Factor) $FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$

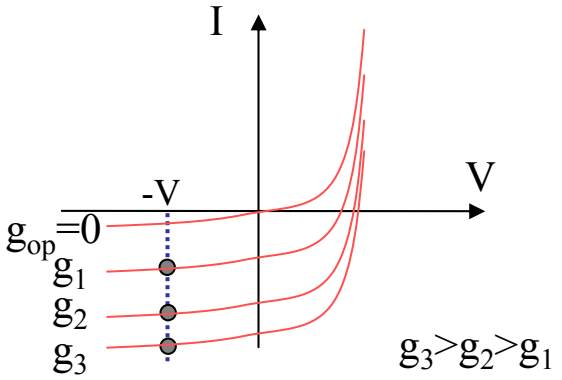
© 2008 HSarı

Işık Algılayıcıları (Dedektörler)-1

p-n ekleminin I-V grafiğinin III. bölgesinde akım gerilimden bağımsız, fakat akım, ışık şiddeti ile orantılıdır



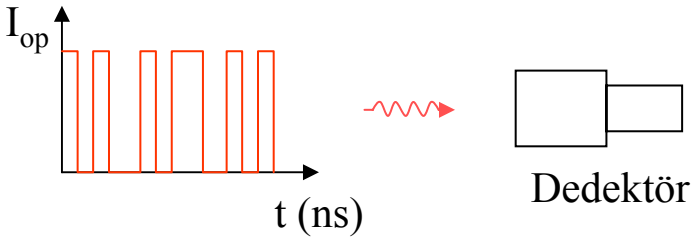
$$I \alpha I_{op}$$



Bu bölgede çalışan optik devre elemanı (dedektör) zamanla değişen optik sinyali elektrik sinyaline çevirmede kolaylıkla kullanılabilir

Dedektörlerde kullanılan malzemenin bant aralığı algılanacak ışığın enerjisinden küçük olmalıdır

Dedektörlerde tepki zamanı önemlidir. Örneğin bir sıra 1 ns aralıklarla değişen ışık sinyallerine duyarlı bir dedektörde oluşan elektrik yükleri 1 ns den daha kısa zaman aralığında ekleme ulaşmalıdır



© 2008 HSarı

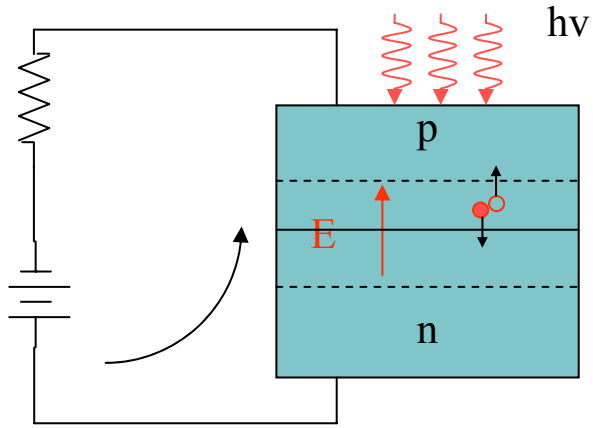
Işık Algılayıcıları (Dedektörler)-2

Tüketim bölgesi dışında yaratılan elektron-deşik çiftinin difüzyon ile tüketim bölgesine ulaşması uzun zaman alacağı için dedektörün tepki zamanını artırır.

Bu sebepten dolayı tüketim bölgesi geniş tutularak ışığın yüksüz olan n- veya p- bölgesinden ziyade tüketim bölgesinde elektron-deşik oluşturması sağlanır

Tüketim bölgesinde yaratılan elektron ve deşik çifti bu bölgede var olan elektrik alanı sayesinde n ve p bölgelerine iletilerek akıma dönüşmeleri sağlanır

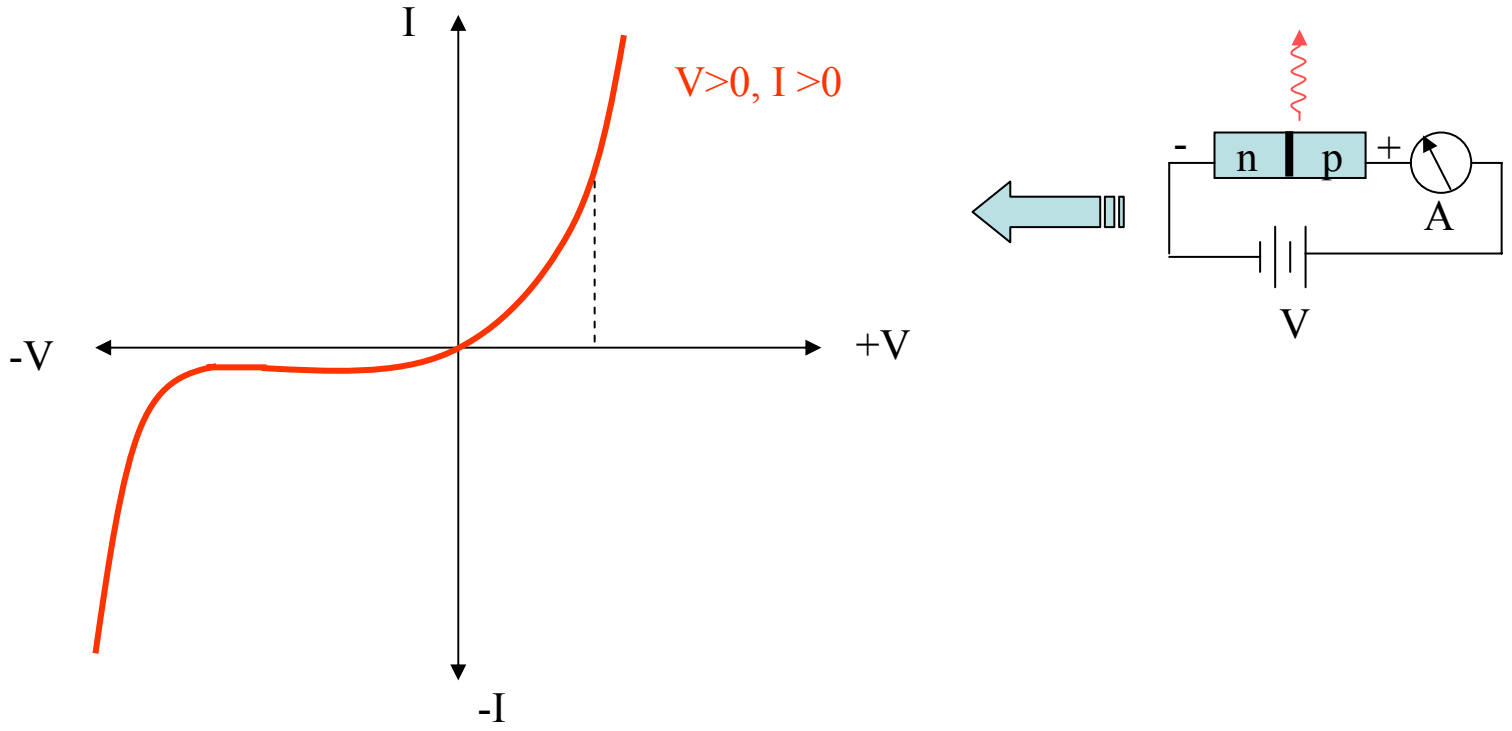
Tüketim bölgesinde elektron-deşik çiftinin oluşturulması esasına dayalı ışık algılayıcılarına *Tüketim Bölgesi Işık Algılayıcıları* (Depletion Layer Photodiode)



© 2008 HSarı

Işık Yayan Optoelektronik Elemanlar

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



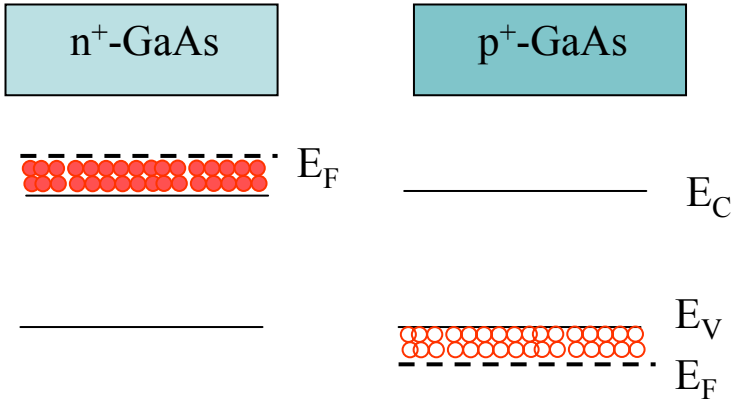
Bu amaç için direk bant aralığına sahip ve aşırı katkılanmış n ve p tipi eklemler kullanılmalıdır

© 2008 HSarı

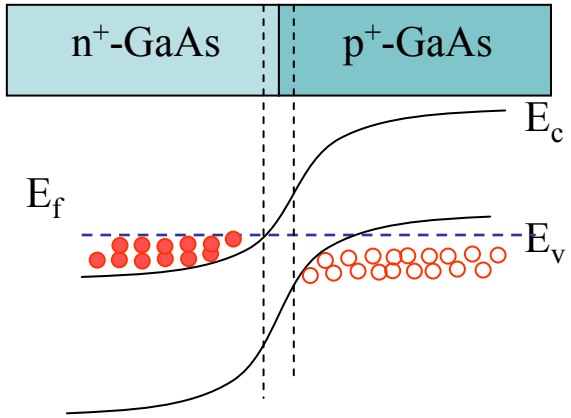
Işık Yayan Diyotlar (LED)

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

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

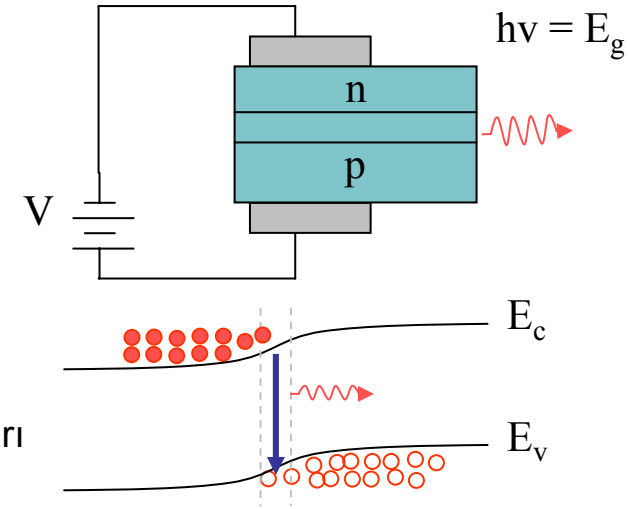


(b) Sıfır gerilim altında p-n eklemi

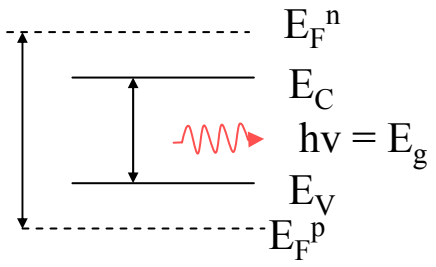


$$W = \left[\frac{2\varepsilon V_o}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2}$$

(c) İleri besleme durumu



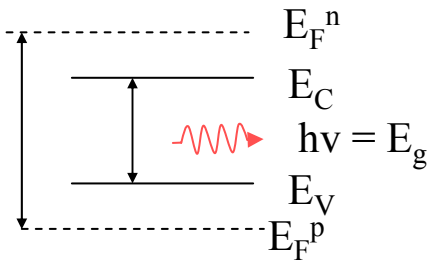
(d) Oluşacak olan ışığın frekans aralığı



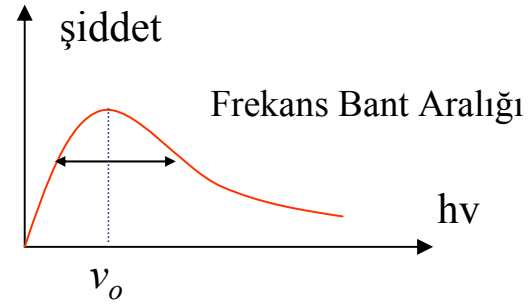
$$E_C - E_V < hv < E_F^n - E_F^p$$

© 2008 HSarı

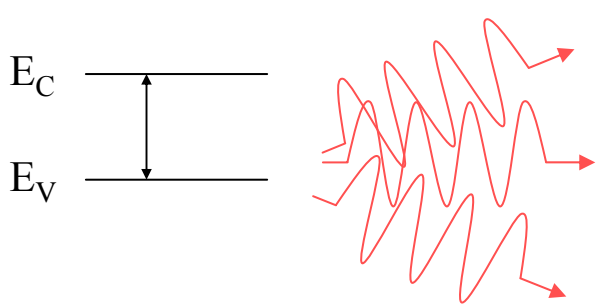
LED Işığın Özelliği

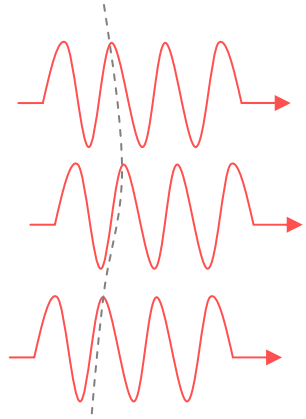


$E_C - E_V < hv < E_F^n - E_F^p$



Eşik değerin altındaki durum
(Koherent olmayan ışıma)





Işık:

- Koherent değildir
- Tek renkli (monokromatik) değildir
- Yönlü değildir

© 2008 HSarı

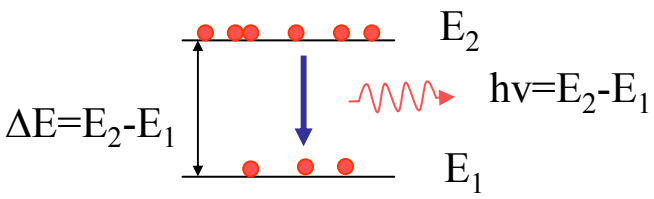
Lazerler-Genel Kavramlar

LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

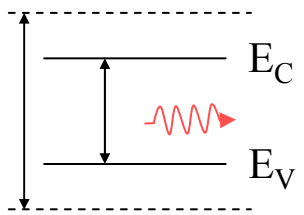
Lazerlerin özelliği

- Koherentlik
- Tek renklilik
- Yönlülük

Lazerlerin çalışma prensibini anlamak için enerjileri E_2 ve E_1 olan iki enerji seviyesini göz önüne alalım Üst seviyedeki uyarılmış fazlalık elektronlar düşük enerji seviyesine düşer. Bu geçiş esnasında iki enerji farkı kadar enerjiye sahip fotonlar salınır. Üst seviyedeki elektronların bu düşüşü rastgele olup buna kendiliğinden geçiş (spontaneous emission) denir. Kendiliğinden geçiş süresi τ_k

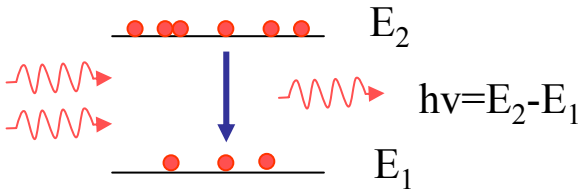


Kendiliğinden geçiş



$E_C - E_V < hv < E_F^n - E_F^p$

Bunun yanında üst seviyedeki elektronlar uygun şartlarda kendiliğinden alt seviyeye inmektense bir uyarıcının varlığında da alt seviyeye geçebilirler. Bu durumda kendiliğinden geçişi karakterize eden yarılanma süresi τ_k zamanını beklemek zorunda değildir ve uyarılmanın etkisi ile çok daha kısa sürede τ_u alt seviyeye geçebilirler. Bu şekilde olan geçişlere uyarılmış geçiş (stimulated emission) denir



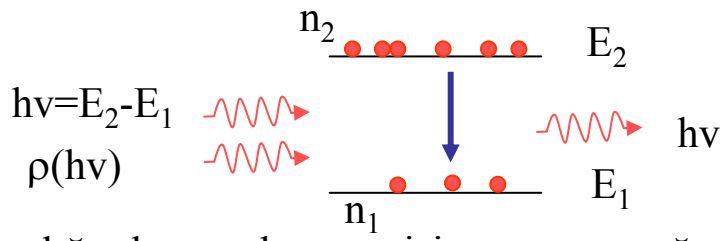
Uyarılmış geçiş

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

© 2008 HSarı

Lazerler-Genel Kavramlar

Enerjisi, bant aralığına sahip ($hv=E_2-E_1$) fotonlar uyarıcı olarak kullanıldığında



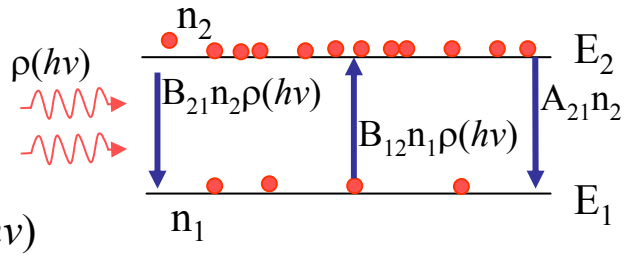
$\rho(hv)$=Foton enerji yoğunluğu

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

$B_{21}n_2\,\rho(hv)$=Uyarılmış geçiş oranı

$B_{12}n_1\rho(hv)$=Soğurma oranı

$A_{21}n_2$=Kendiliğinden geçiş oranı



Denge durumunda

$$B_{12}n_1\rho(hv)=A_{21}n_2+B_{21}n_2\rho(hv)$$

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

Isıl dengede durumunda uyarılmış geçiş kendiliğinden geçiş oranı yanında ihmal edilebilir

Foton alanı durumunda $\Rightarrow$

$$\frac{\text{Uyarılmış geçiş oranı}}{\text{Kendiliğinden geçiş oranı}}=\frac{B_{21}n_2\rho(hv)}{A_{21}n_2}=\frac{B_{21}}{A_{21}}\rho(hv) \quad .....1$$

Uyarılmış geçişi soğurmadan fazla yapmak için $n_2 > n_1$

$$\frac{\text{Uyarılmış geçiş oranı}}{\text{Soğurma oranı}}=\frac{B_{21}n_2\rho(hv)}{B_{12}n_1\rho(hv)}=\frac{B_{21}n_2}{B_{12}n_1} \quad .....2$$

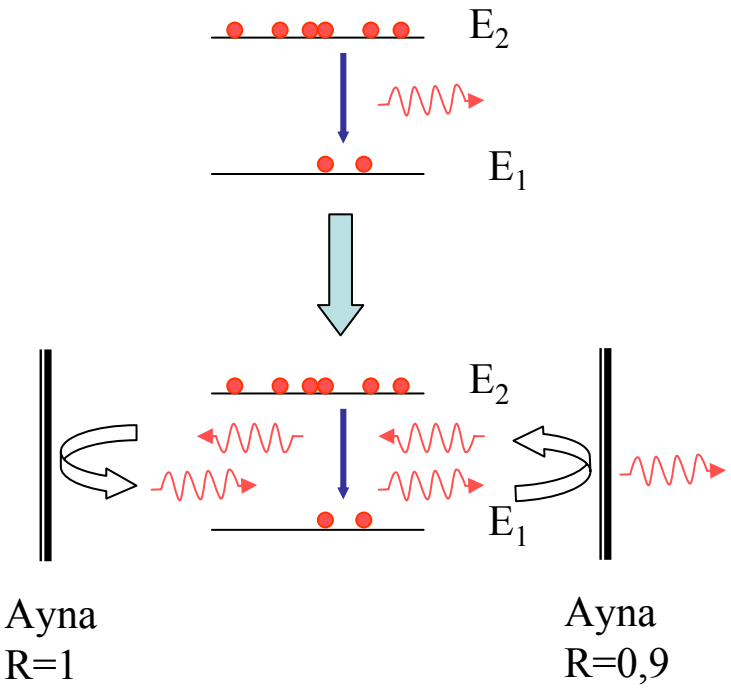
© 2008 HSarı

Optik Rezonans Oyuğu (Optical Resonant Cavity)

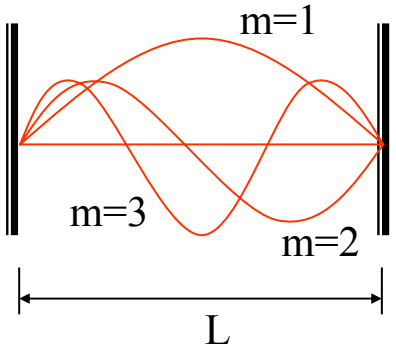
$$\frac{\text{Uyarılmış geçiş oranı}}{\text{Kendiliğinden geçiş oranı}} = \frac{B_{21} n_2 \rho(h\nu)}{A_{21} n_2} = \frac{B_{21}}{A_{21}} \rho(h\nu)$$

Uyarılmış geçişleri kendiliğinden geçişlerden daha fazla yapmanın yolu yüksek bir foton alanı $\rho(h\nu)$ yaratmaktır.

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.



$$m = \frac{2Ln}{\lambda_o}$$



© 2008 HSarı

Pompalama

Lazerin gerçekleşmesi için gerekli olan 2. şart, yani $n_2 > n_1$ şartı, alt seviyedeki elektronları üst seviyeye uyararak gerçekleştirilir. Bu işleme dağılım terslenmesi (population inversion) denir.
Uyarılmış geçişi soğurmadan fazla yapmak için $n_2 > n_1$

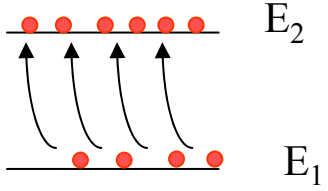
Uyarılmış geçişi soğurmadan fazla yapmak için $n_2 > n_1$

$$\frac{\text{Uyarılmış geçiş oranı}}{\text{Soğurma oranı}} = \frac{B_{21}n_2\rho(h\nu)}{B_{12}n_1\rho(h\nu)} = \frac{B_{21}n_2}{B_{12}n_1}$$

$n_2 > n_1$ koşulu pompalanma işlemi ile yapılır. Lazerlerde bu optik veya elektrik akımı ile yapılır.

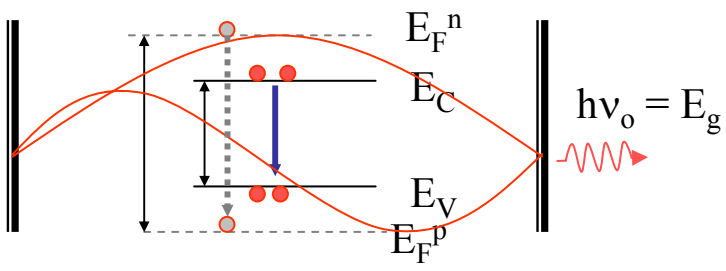
Yarıiletken lazerlerde pompalama işlemi aşırı katkılanma sayesinde eklem üzerinden akım geçirerek sağlanır

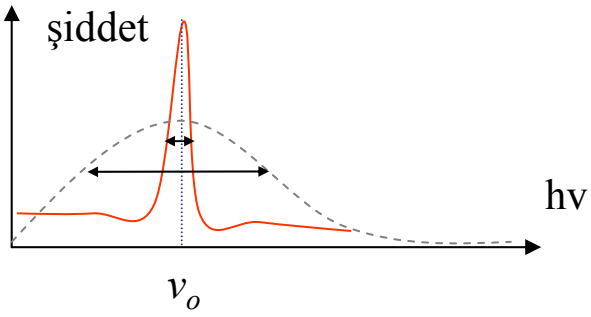
Akımın belli bir değerinde (eşik akım ($I_{eşik}$) (threshold) $n_2 > n_1$ şartı sağlandığında lazer özelliği gösteren ışık elde edilmiş olur

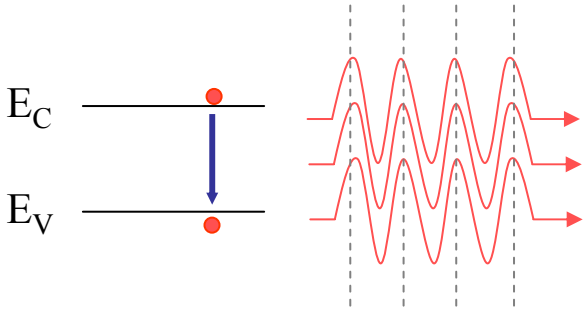


© 2008 HSarı

Lazer Işığının Özelliği







Işık:

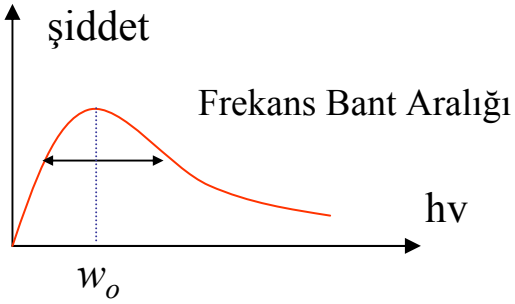
- Koherent
- Tek renkli (monokromatik)
- Yönlü

© 2008 HSarı

Yarıiletken Lazerler

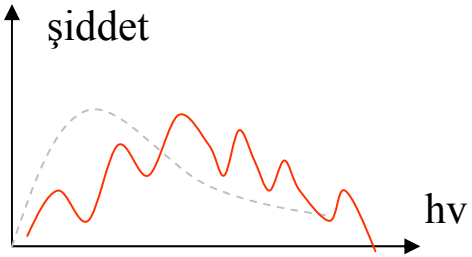
Aşırı katkılanmış yarıiletken eklemin ileri besleme durumunda elektronlarla deşikler aynı bölgede birleşmeye hazır duruma gelirler

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



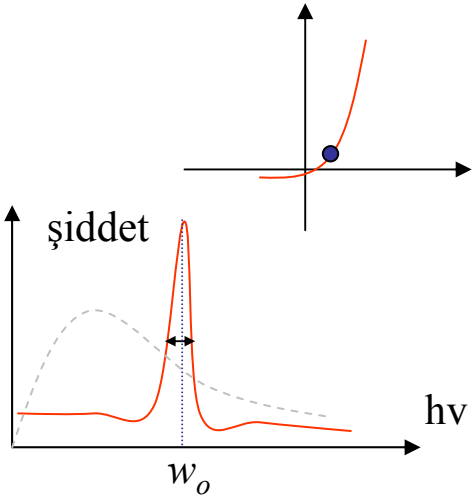
Eşik değerin altındaki durum (Koherent olmayan ışıma)

(a)



Eşik değerin hemen altındaki durum

(b)



Eşik değerin üstünde lazer ışınımı

(c)

(a) LED ışımasına 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

© 2008 HSarı

Optik Dalga Klavuzları (Optical Waveguides)

• Dalga klavuzlarının fonksiyonu ışığı özelliğini bozmadan ve en az kayıpla bir noktadan başka bir noktaya iletmek

• Bu asıl fonksiyonlarının yanı sıra optik modülatör veya optik anahtar olarak da kullanılabilir

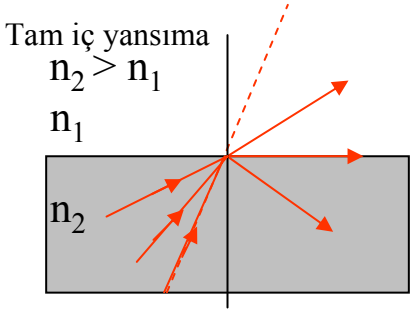
• Işık iletimi amacı ile kullanıldığında ya aynı yonga (çip) üzerindeki yada birbirlerinden kilometrelerce uzaklıkta bulunan optoelektronik devre elemanları arasında ışığın iletimini sağlar

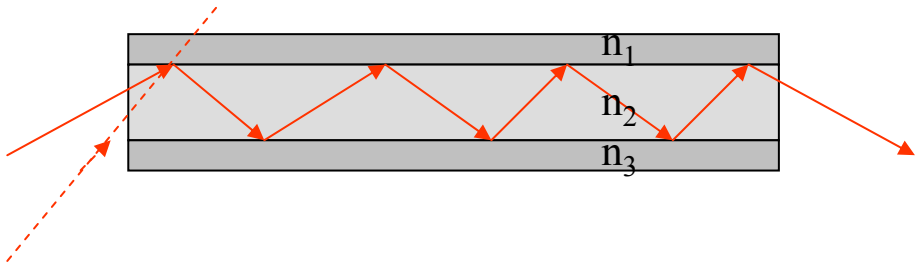
• İletken tellerdeki elektrik akımının tersine dalga klavuzlarında ışık farklı kiplerde (mod) ilerler

• Uzun mesafeler arasında (km) ışığı taşımada kullanılan en yaygın dalga klavuzları optik fiberlerdir

• Yarıiletken dalga klavuzları daha çok elektronik yongalar üzerindeki (< cm) iletişimi sağlamada ve elektro-optik modülatörlerde kullanılır

Dalga klavuzları kırma indisi büyük olan bir katmanın kırma indisi daha küçük bir katmanla kaplanarak oluşturulur

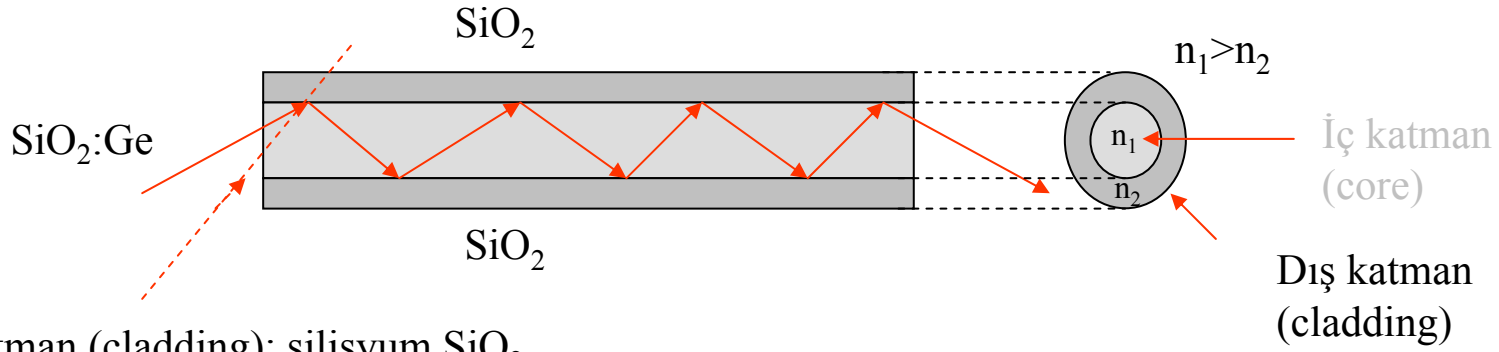




© 2008 HSarı

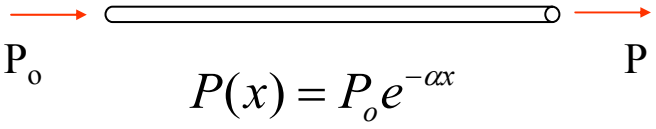
Optik Fiberler

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



Dış katman (cladding): silisyum SiO_2
İç bölge (core): germanyum katkılanmış silisyum (SiO_2:Ge)

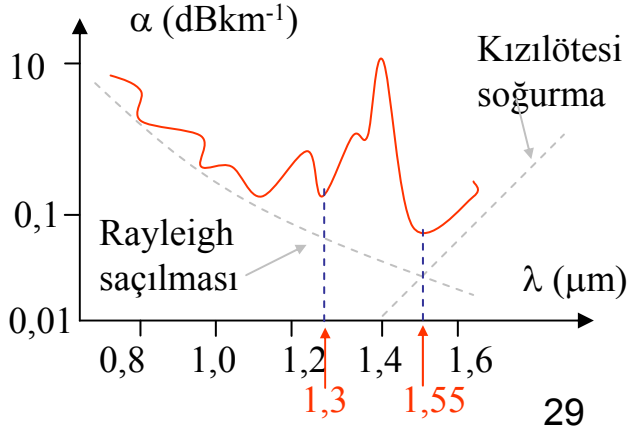
Işığın şiddetindeki azalma (soğrulması) bütün dalgaboyları için aynı değildir
Bu sebepten dalga klavuzunun hangi dalgaboyu için kullanılacağı önemlidir



$$P(x) = P_o e^{-\alpha x}$$

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

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



© 2008 HSarı

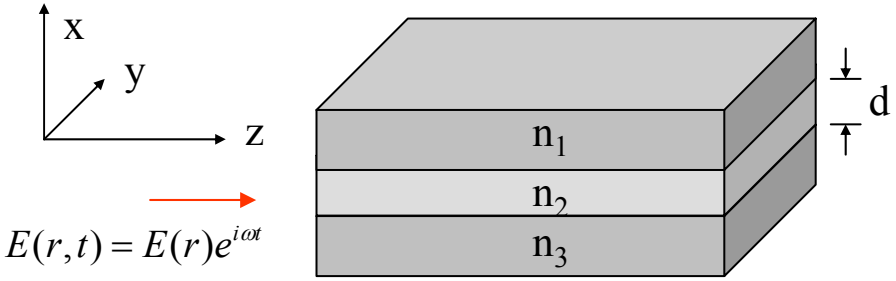
Yarıiletken Dalga Klavuzları-1

- Büyük kırma indisli yarıiletken bir malzeme (n_2) kırma indisi daha küçük yarıiletken malzemeler tarafından sandviçlenirse kırma indisi büyük olan katman ışığı uzun mesafeler boyunca dağıtmadan iletebilir

- Böyle bir yapı epitaksiyel büyütme yöntemleri ile kolaylıkla büyütülebilir

- Yarıiletken malzemeler kullanılarak yapılan bu dalga klavuzlarına *yarıiletken optik dalga klavuzları* denir

- Klavuz olarak kullanılan katmanın bant aralığının iletilecek ışığın enerjisinden daha büyük olması gerekir



$n_1=n_3$ simetrik dalga klavuzu
$n_1 \neq n_3$ simetrik olmayan dalga klavuzu

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

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

$$\nabla^2 E(r)+k^2 n^2(r)E(r)=0 \qquad k=\omega/c$$

z-eksenini boyunca ilerleyen düzlem dalga çözümleri

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

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

© 2008 HSarı

Yarıiletken Dalga Klavuzları-2

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

d << y

Işığı klavuzlanması için

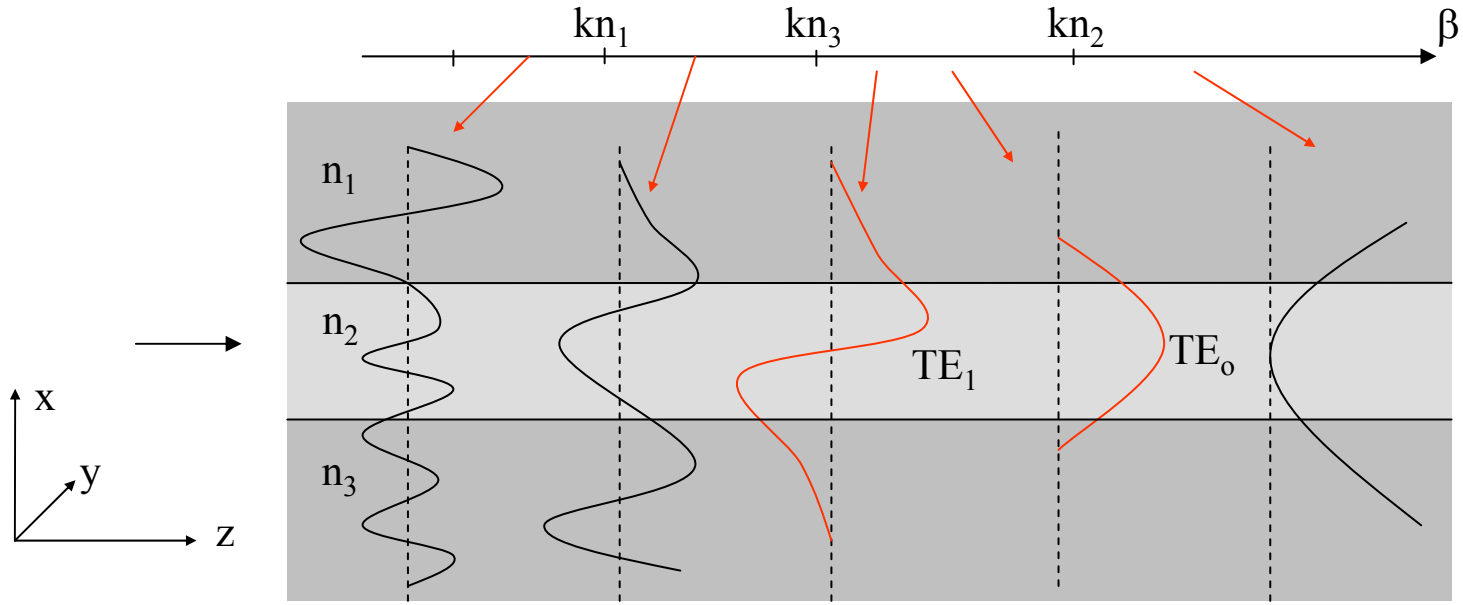
1. bölge $\frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial x^2}+\left[k^2 n_1^2-\beta^2\right]E(x,y)=0$ $\beta > kn_1$

2. bölge $\frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial x^2}+\left[k^2 n_2^2-\beta^2\right]E(x,y)=0$ $\beta < kn_2$

3. bölge $\frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial x^2}+\left[k^2 n_3^2-\beta^2\right]E(x,y)=0$ $\beta > kn_3$

($k^2n^2-\beta^2$) ifadesinin işaretine bağlı olarak çözümler peryodik veya üsteldir

Işığı oluşturan elektro manyetik dalganın uzaysal dağılımı



© 2008 HSarı