

MÜHENDİSLER İÇİN YARIİLETKEN FİZİĞİ

FIZ1951

Ders Adı	Kodu	Yerel Kredi	AKTS	Ders (saat/hafta)	Uygulama (saat/hafta)	Laboratuvar (saat/hafta)
Mühendisler için Yarıiletken Fiziği	FIZ1951	3	5	3	0	0

Ara Sınavlar	2	60
Final	1	40
TOPLAM		100

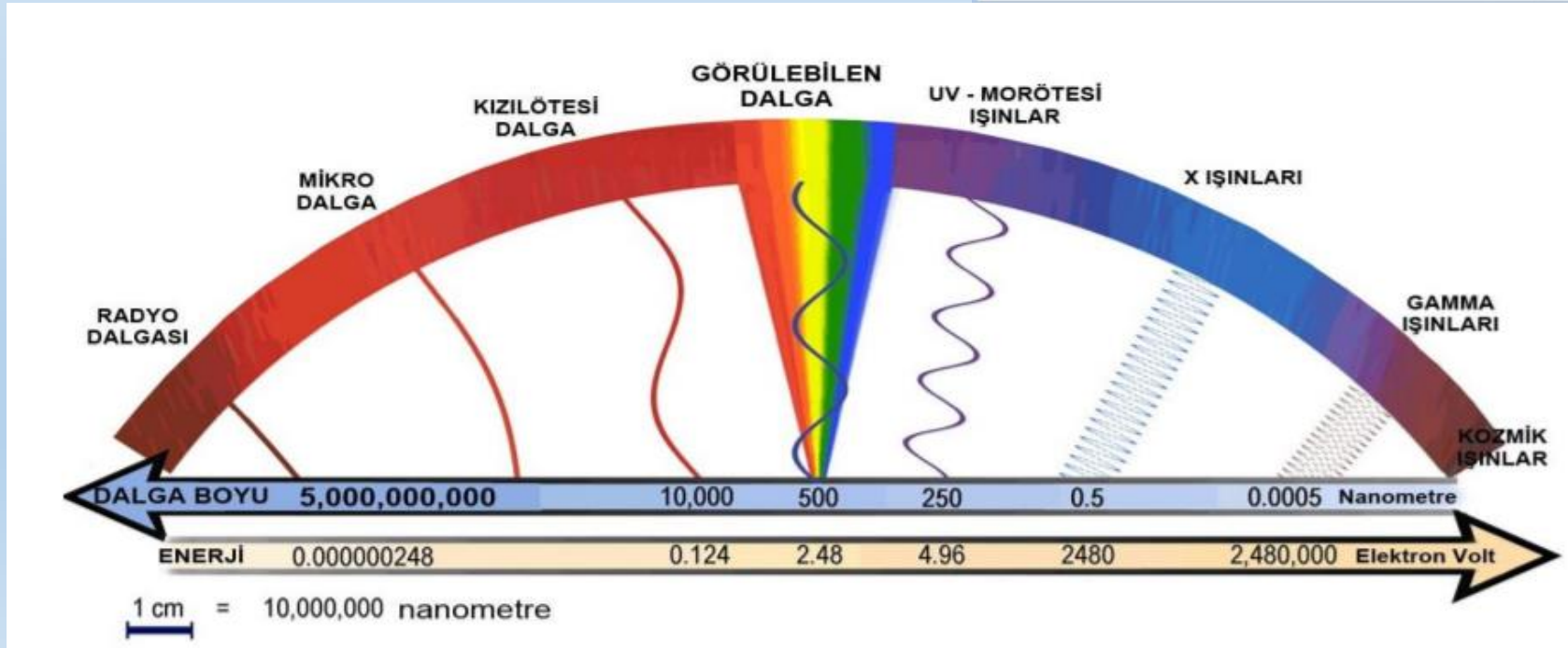
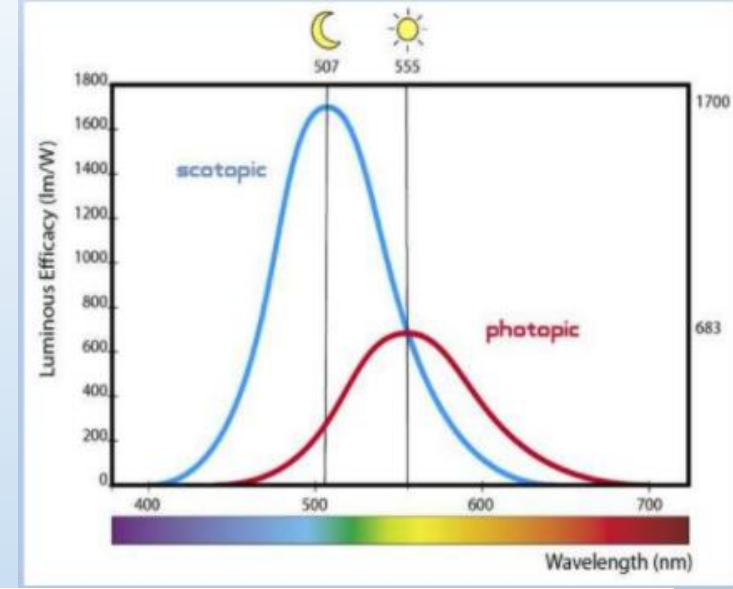
Dersi Veren Öğretim Üyesi
Doç.Dr. Süreyya AYDIN YÜKSEL
Grup.....3.....

İletişim e-mail: fiz1951.2021.say@gmail.com

Yarıletkenlerde Optik Özellikler

İnsan gözü 400-700 nm dalga boyu aralığını görebilir. Gece ve gündüz bu aralıklar değişim gösterir.

Ama Elektromanyetik Spektrum Çok daha geniş bir aralıktır.



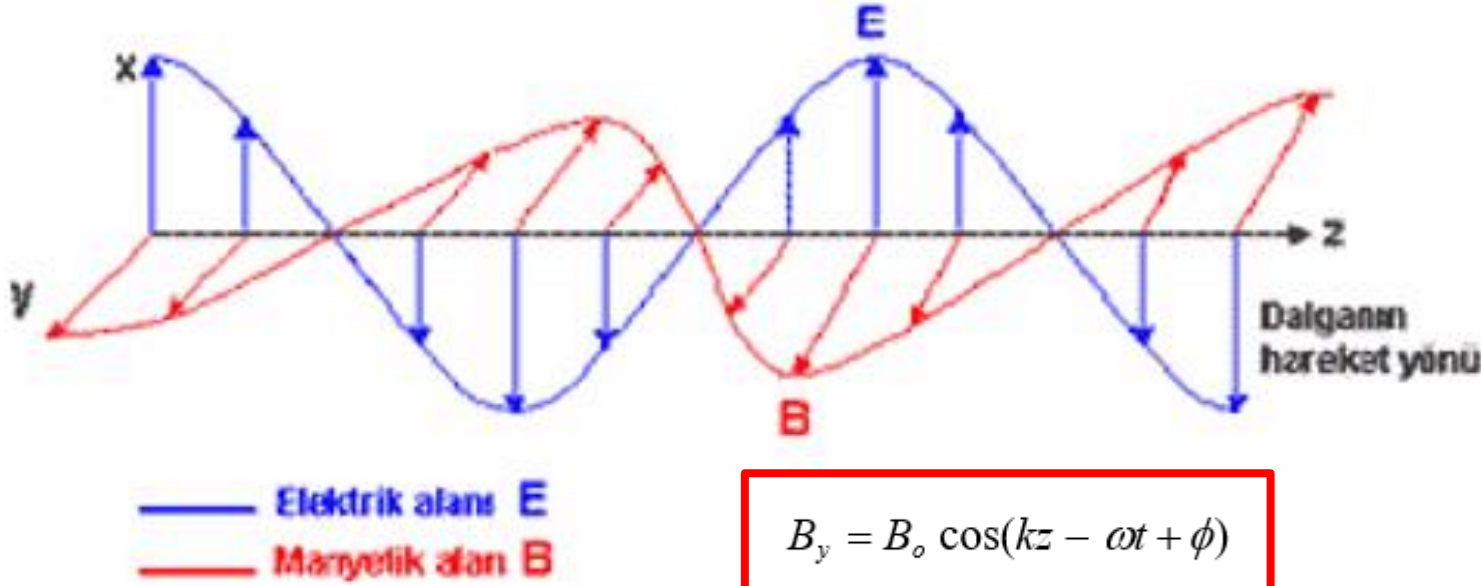
Işığın Doğası

Elektromanyetik Dalgalar

z ekseninde ilerleyen harmonik bir düzlem dalga:

E_o elektrik alan genliği, k dalga sayısı, açısal frekans, ϕ faz açısıdır

$$E_x = E_o \cos(kz - \omega t + \phi)$$



$$B_y = B_o \cos(kz - \omega t + \phi)$$

z eksenini boyunca ilerleyen enine elektrik ve manyetik alanın görünüşü

* Bir maksimum olduğunda diğeri de maksimum; biri sıfır olduğunda diğeri de sıfırdır.

* Bu alanlar Şekil 1'de görüldüğü gibi birlikte salınım yaparlar. Bu dalgalar birbirlerine ve dalganın yayılma doğrultusuna (z eksenini) dik olan ve titreşen elektrik ve manyetik alanlardan oluşmaktadır.

* Bu nedenle elektromanyetik dalgalar enine dalgalardır.

Işığın Doğası

Bir dalganın dalga boyu

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

frekansı

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

olduğundan yayılma hızı

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{k}$$

Elektromanyetik Dalgalar

Bir eksen boyunca ilerleyen enine bir dalganın hızı

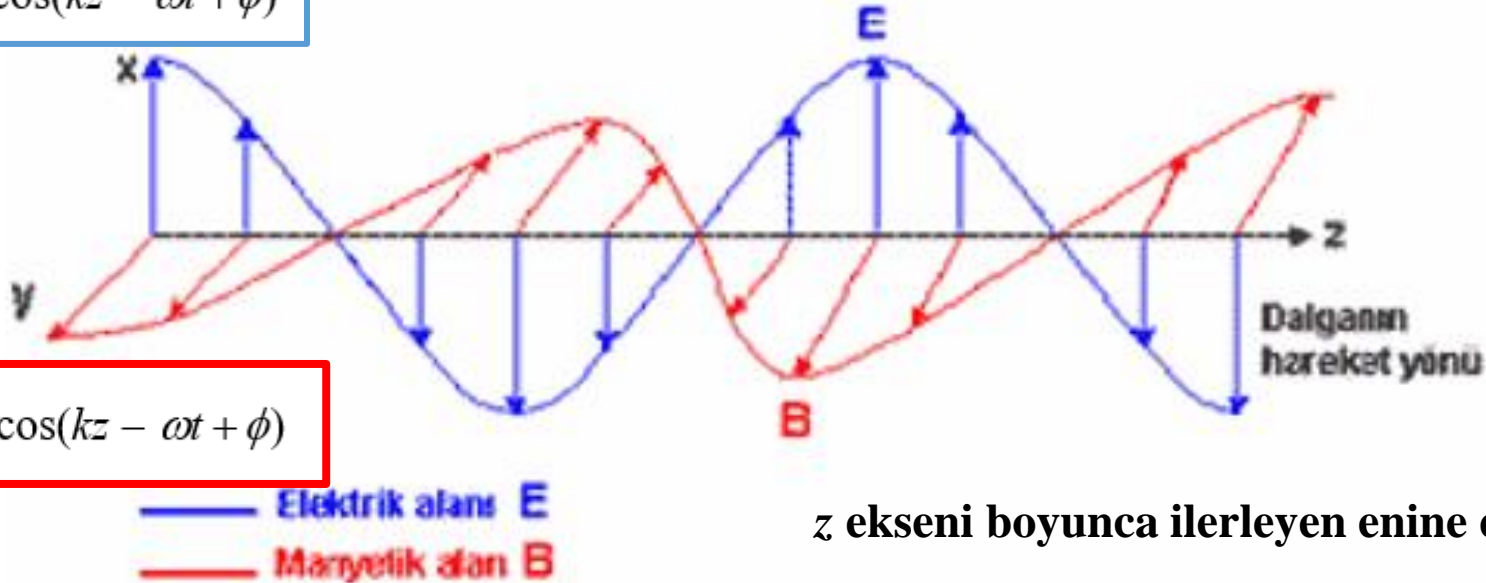
$$v^2 = \frac{1}{\mu_o \epsilon_o}$$

$\epsilon_o = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m boşluğun dielektrik geçirgenliği;

$\mu_o = 1.257 \times 10^{-6}$ H/m boşluğun manyetik geçirgenliği

z ekseninde ilerleyen harmonik bir düzlem dalga:

$$E_x = E_o \cos(kz - \omega t + \phi)$$



$$B_y = B_o \cos(kz - \omega t + \phi)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \epsilon_o}}$$

$$c \sim (3 \times 10^8 \text{ m/s})$$

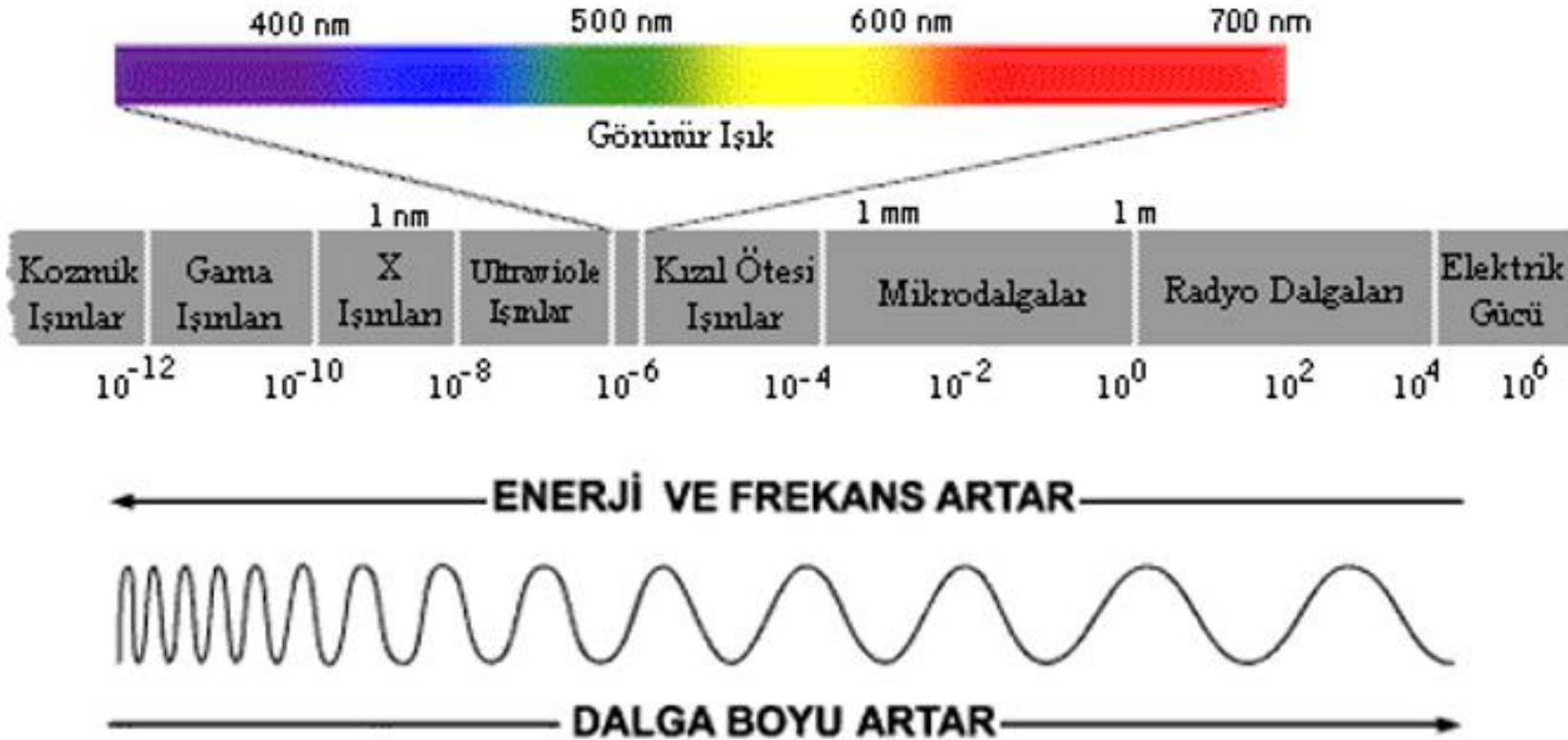
$$\frac{E_o}{B_o} = \frac{E}{B} = c$$

z ekseni boyunca ilerleyen enine elektrik ve manyetik alanın görünüşü

Işığın Doğası

Elektromanyetik Dalgalar

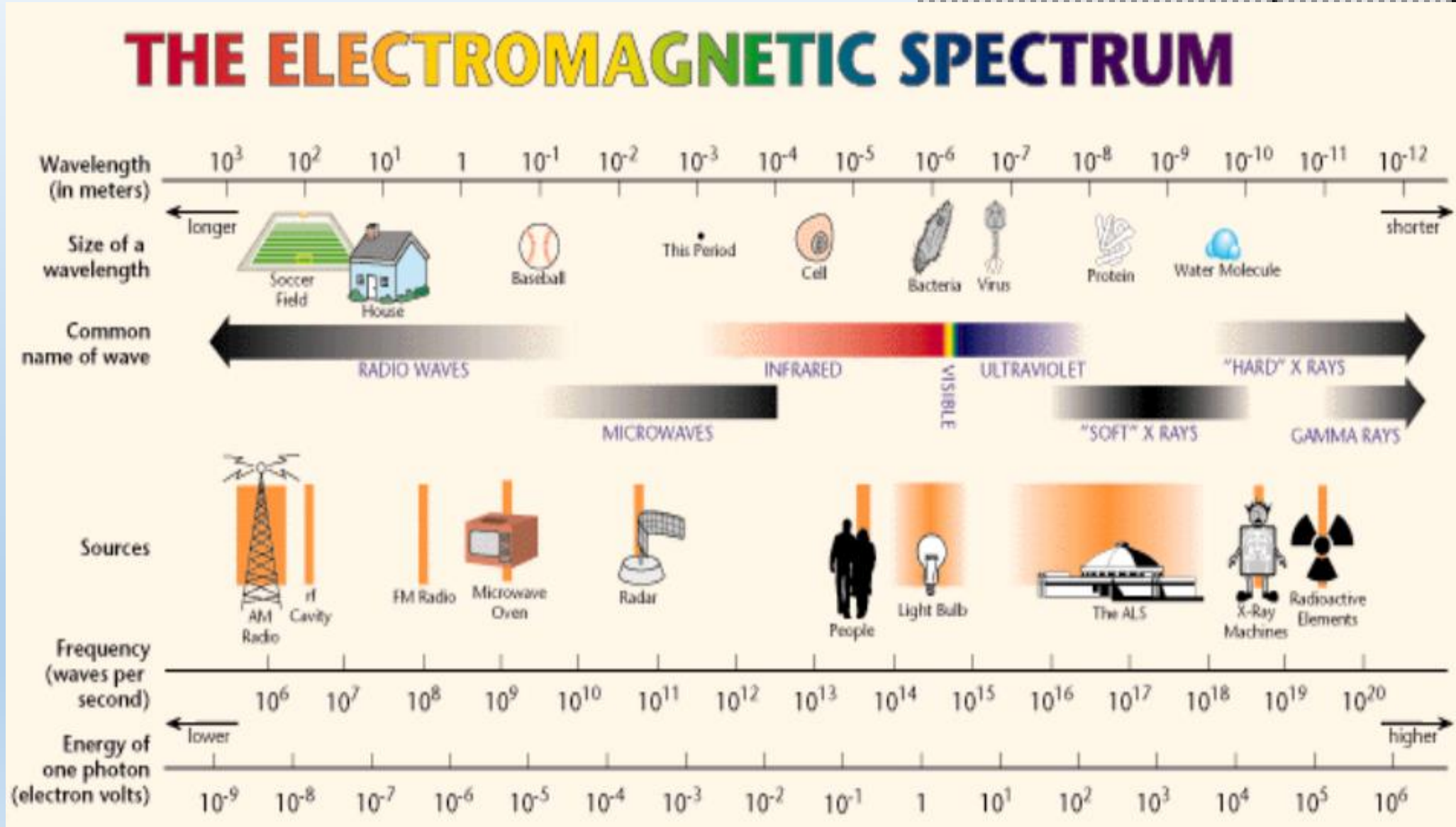
Elektromanyetik Spektrum



Elektromanyetik dalgaların dalga denklemi, her tür frekans için çözüm verir. Bütün frekansları içeren topluluğa **elektromanyetik spektrum** denir. Elektromanyetik spektrum içerisinde yer alan dalgalar frekans veya dalgaboyu değerlerine bağlı olarak tanımlanırlar.

Işığın Doğası

Elektromanyetik Dalgalar Elektromanyetik Spektrum



Işığın Doğası

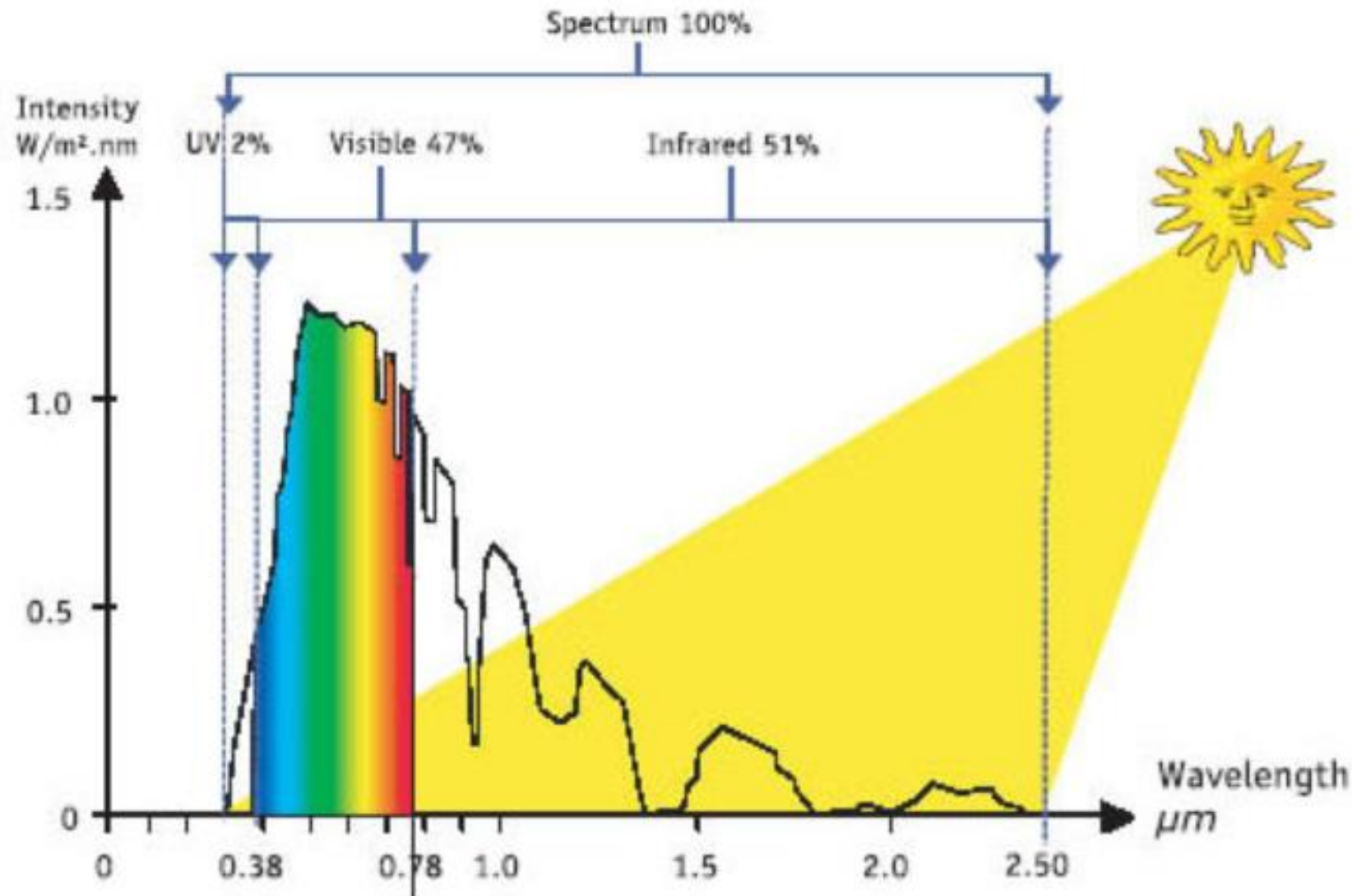
Elektromanyetik Dalgalar Elektromanyetik Spektrum

Region	Sub-region	Frequency (Hz)	Wavelength	Energy (eV)
Radio wave		$< 10^9$	$> 0.3\text{m}$	$< 7 \cdot 10^{-7}$
Microwave		$10^9 - 0.003 \cdot 10^{14}$	$0.3\text{m} - 1\text{mm}$	$7 \cdot 10^{-7} - 0.0012$
Infrared	<i>Far infrared</i>	$0.003 \cdot 10^{14} - 0.2 \cdot 10^{14}$	$1\text{mm} - 20\mu\text{m}$	$0.0012 - 0.08$
	<i>Long-wave infrared</i>	$0.20 \cdot 10^{14} - 0.37 \cdot 10^{14}$	$20\mu\text{m} - 5\mu\text{m}$	$0.08 - 0.15$
	<i>Mid-wave infrared</i>	$0.37 \cdot 10^{14} - 10^{14}$	$5\mu\text{m} - 3\mu\text{m}$	$0.15 - 0.41$
	<i>Shortwave infrared</i>	$10^{14} - 2.14 \cdot 10^{14}$	$3\mu\text{m} - 1.1\mu\text{m}$	$0.41 - 0.88$
	<i>Near infrared</i>	$2.14 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{14}$	$1.1\mu\text{m} - 0.78\mu\text{m}$	$0.88 - 1.6$
Visible	<i>Red</i>	$3.8 \cdot 10^{14} - 4.8 \cdot 10^{14}$	$789\text{nm} - 625\text{nm}$	$1.6 - 1.9$
	<i>Orange</i>	$4.8 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{14}$	$625\text{nm} - 600\text{nm}$	$1.9 - 2.1$
	<i>Yellow</i>	$5 \cdot 10^{14} - 5.2 \cdot 10^{14}$	$600\text{nm} - 577\text{nm}$	$2.1 - 2.2$
	<i>Green</i>	$5.2 \cdot 10^{14} - 6.1 \cdot 10^{14}$	$577\text{nm} - 491\text{nm}$	$2.2 - 2.4$
	<i>Blue</i>	$6.1 \cdot 10^{14} - 6.59 \cdot 10^{14}$	$491\text{nm} - 455\text{nm}$	$2.4 - 2.8$
	<i>Violet</i>	$6.59 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$	$455\text{nm} - 390\text{nm}$	$2.8 - 3.1$
Ultra Violet		$8 \cdot 10^{14} - 2.4 \cdot 10^{16}$	$390\text{nm} - 8.82\text{nm}$	$3.1 - 20$
X ray		$2.4 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{19}$	$8.82\text{nm} - 6\text{pm}$	$20 - 3 \cdot 10^4$
Gamma ray		$> 5 \cdot 10^{19}$	$< 6\text{pm}$	$> 3 \cdot 10^4$

-Electromagnetic Spectrum wavelength/frequency/energy range

Işığın Doğası

Elektromanyetik Dalgalar Elektromanyetik Spektrum



Elektromanyetik Dalgaların Saydam Bir Ortamda İlerlemesi ve Kırılma İndisi

v

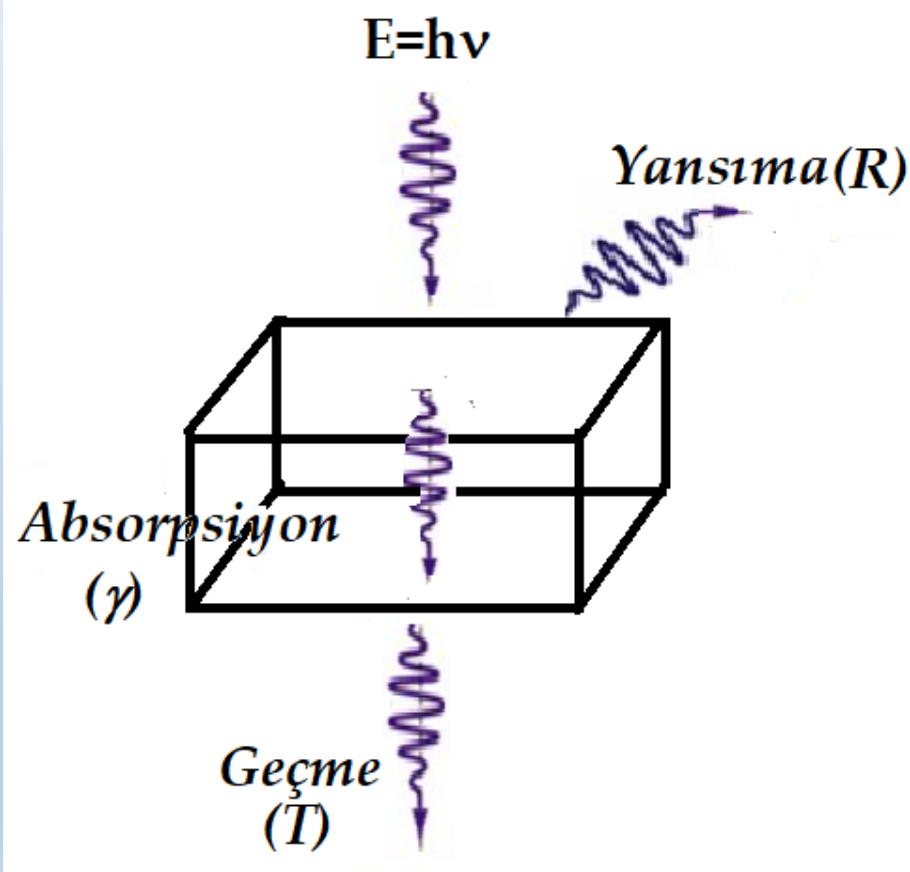
v

hız

Foton Yarıiletken Etkileşmesi

- Bir yarıiletken üzerine $h\nu$ enerjili bir ışık (elektromanyetik dalga) düştüğünde, 3 ayrı tür etkileşme olabilir.

- 1- Yansıma (Refraction)
- 2- Absorpsiyon
- 3- Geçme (Transmittance)



h : Planck sabiti (J.s)
 ν : EMD frekansı (1/s)

Kırma İndisi Genel Yaklaşım

Boşlukta İlerleyen Dalga İçin Genel Denklemleri Oluşturduk Özellikle Hızı Konusunda Elektromanyetik Dalgalar Madde İçinde De İlerleyebilmektedir.

Saydam (Geçirgen) Ortamlarda Elektromanyetik Dalga'nın Yayılma Hızı, Boşluktaki Hızından(c) n Çarpanı Kadar Azalır:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Boşlukta EMD yayılma hızı

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m boşluğun dielektrik geçirgenliği;

$\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$ H/m boşluğun manyetik geçirgenliği

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{c}{n}$$

n ortamın kırılma indisi

μ ortamın manyetik geçirgenliği

ϵ ortamın dielektriksel geçirgenliği

v hız

YARIİLETKENLERDE Kırma İndisi

Bir yarıiletkenin optik özellikleri kompleks kırma indisi ile karakterize edilir.

$$n^* = n_r - ik = \sqrt{\epsilon} , \quad n_r = \frac{c}{v}$$

$n_r \Rightarrow$ kırma indisinin reel kısmı (ışığın yayılma hızını belirler)

$\epsilon \Rightarrow$ dielektrik fonksiyonu

$k \Rightarrow$ kırma indisinin sanal kısmındaki (k) zayıflatma katsatısıdır

Yansımaya Katsayısı (R)

Yarıiletken üzerine düşen ışık için yansımaya ve geçme olayları, kırma indisi cinsinden yararlanılarak açıklanır.

$$R = \frac{(n_r - 1)^2 + k^2}{(n_r + 1)^2 + k^2}$$

Geçirme Katsayısı (T)

$$T = (1 - R^2) \exp(-\alpha d)$$

Gelen ışığın enerjisi, yarıiletkenin yasak band aralığına eşit ya da büyük ise absorplanır. Eg den küçükse geçer.

$$\alpha: \text{soğurma katsayısı} \left(\frac{1}{cm} \right)$$

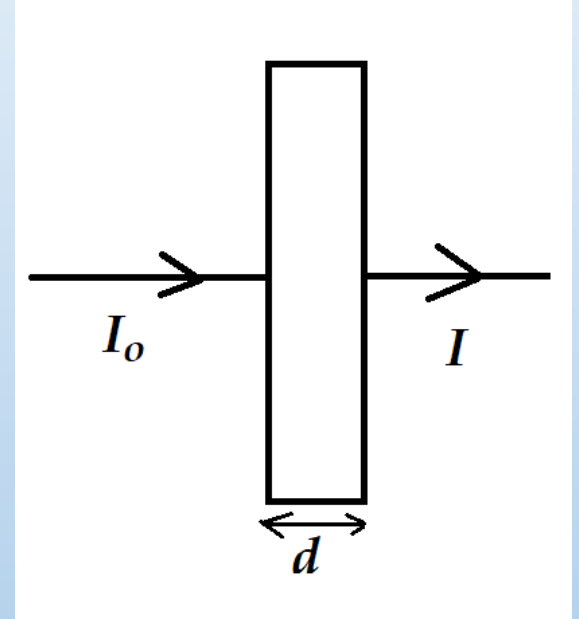
D: Malzemenin kalınlığı

Işığın Soğurulması

Işık belirli dalga boyuna sahip elektromanyetik ışımadır ve bir enerjiye sahiptir. Bir atoma orbitalleri arasındaki enerji farkına denk dalga boyundaki bir ışık gönderilirse temel haldeki elektron(lar) bir üst enerji seviyesine çıkarlar ve o ışığı soğururlar. Bu olaya **ışık soğurulması** denir. Işığın maddesel bir ortamdan geçerken soğurulması, atom ve moleküllerin enerji düzeylerinin uyarılması yoluyla olmaktadır.

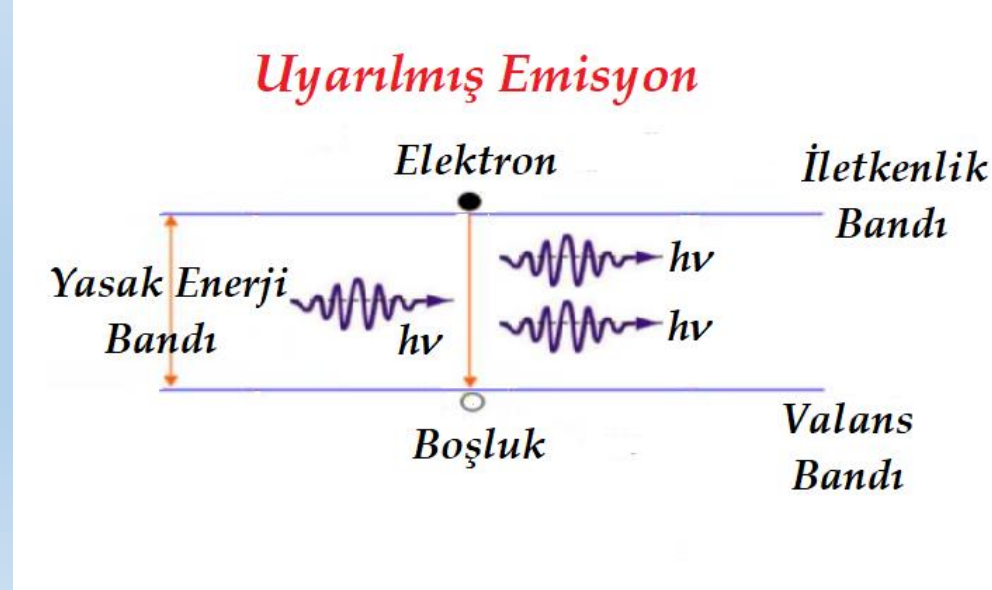
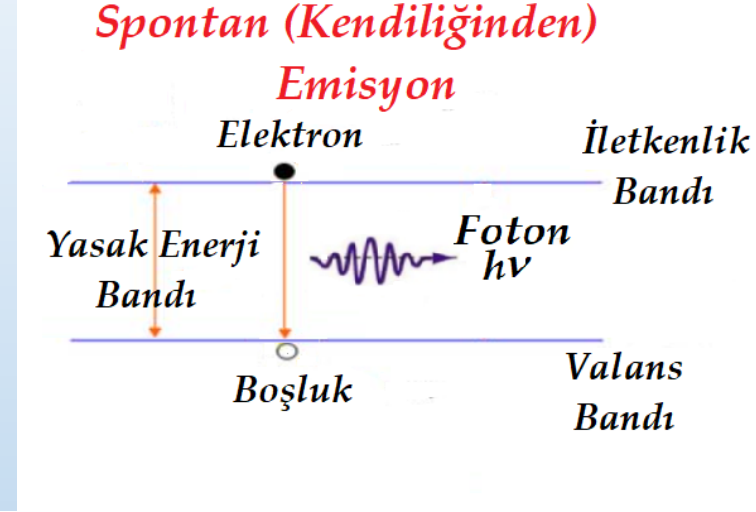
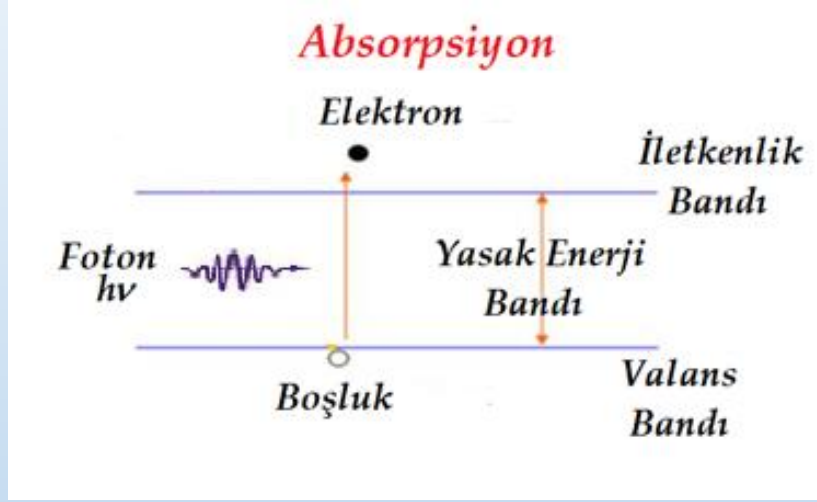
d kalınlığında bir levhanın üzerine düşen ışığın şiddeti I_0 ile geçen ışığın şiddeti I arasında

- $I = I_0 \exp(-\alpha d)$
- $\frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha d)$
- $I_0 \Rightarrow$ Gelen ışık şiddeti
- $I \Rightarrow$ Geçen ışık şiddeti
- $d \Rightarrow$ Yarıiletkenin kalınlığı
- $\alpha \Rightarrow$ Işığın soğurulma veya absorpsiyon katsayısı
- I/I_0 oranı maddenin ışığı geçirme oranı;
- $(1 - I/I_0)$ oranı ise maddenin ışığı soğurma oranını vermektedir.



Yarıiletkenlerde Elektron-Foton etkileşmesi

- Bu etkileşimde 3 temel proses vardır.



Optik Soğurma (Absorpsiyon)

Absorpsiyon katsayısı ise α dır.

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}, \quad \alpha = A(h\nu - E_g)^\gamma$$

$\gamma = \frac{1}{2}$ **direk bant aralıklı**
yariiletkenlerde kullanılır

$\gamma = \frac{3}{2}$ **indirek bant aralıklı**
yariiletkenlerde kullanılır

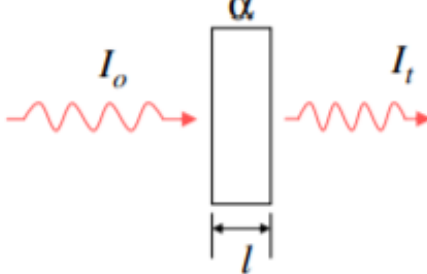
Isıl dengede iletim ve değerlik bandındaki taşıyıcı yoğunluğu sıcaklığın ve yasak bant enerjisinin fonksiyonudur.

$$n \propto e^{-E_g/2kT}$$

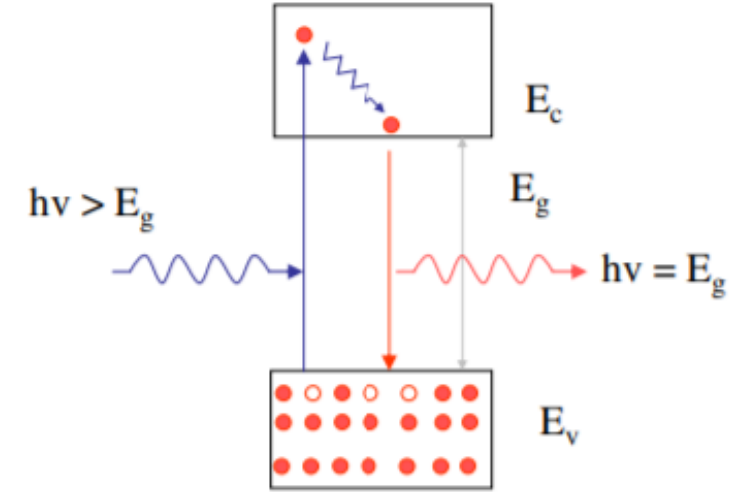
Dış bir etki ile (örneğin ışık) uyarılma yapıldığında iletim ve değerlik bandında **fazlalık** taşıyıcılar (elektron ve deşik) oluşur. **Fazlalık taşıyıcılar** ısııl dengede olmadıkları için, dış etkinin kalkması ile tekrardan birleşerek denge durumundaki değerlerine gelmeye çalışırlar.

Eğer yariiletken üzerine düşen ışığın enerjisi bant enerjisinden daha büyük ise uyarılan elektronlar iletim bandında yüksek bir enerji seviyesine çıkarıldıktan sonra enerjilerini kristale verir ve ardından iletim bandından değerlik bandına geçerek ışıma yapar.

Işığın yariiletken içinde ne kadar soğrulacağı malzemenin soğurma katsayısı (α) ve kalınlığına (l) bağlıdır.

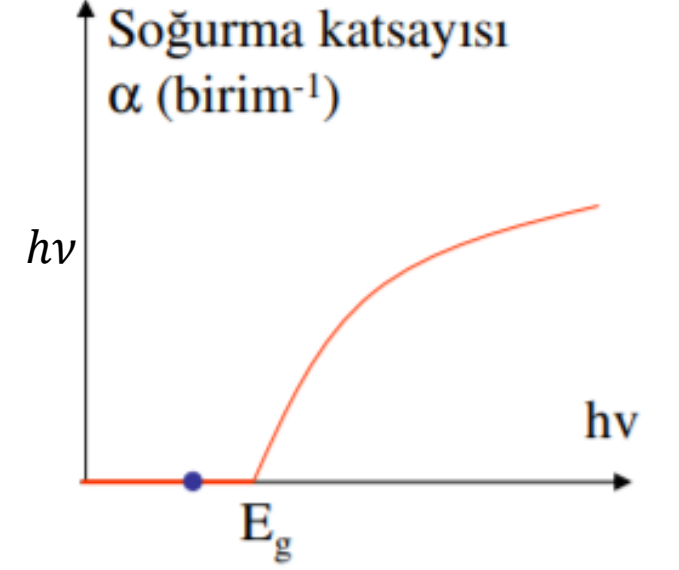
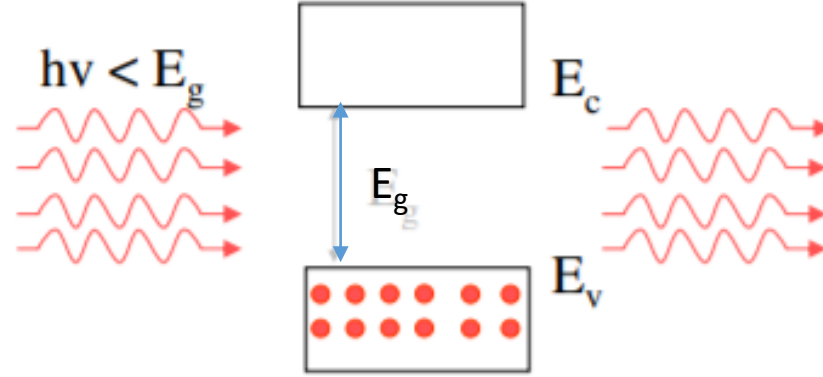
$$-\frac{dI(x)}{dx} = \alpha I(x)$$
$$I_t = I_o e^{-\alpha l}$$


I_o =gelen ışığın şiddeti
 I_t =geçen ışığın şiddeti
 α =soğurma katsayısı

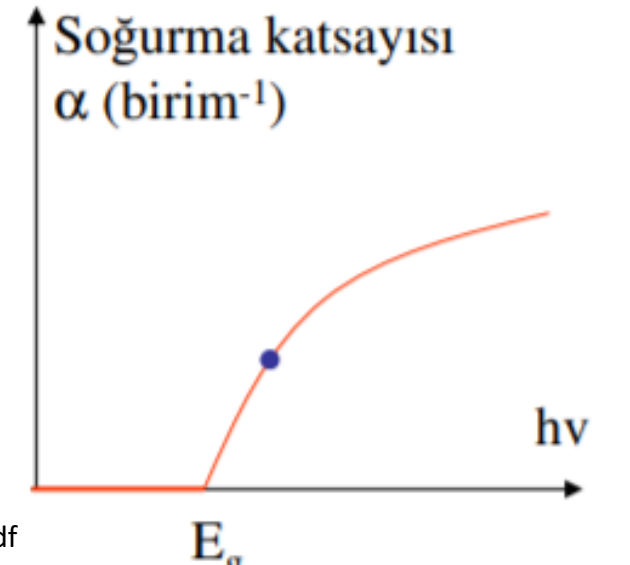
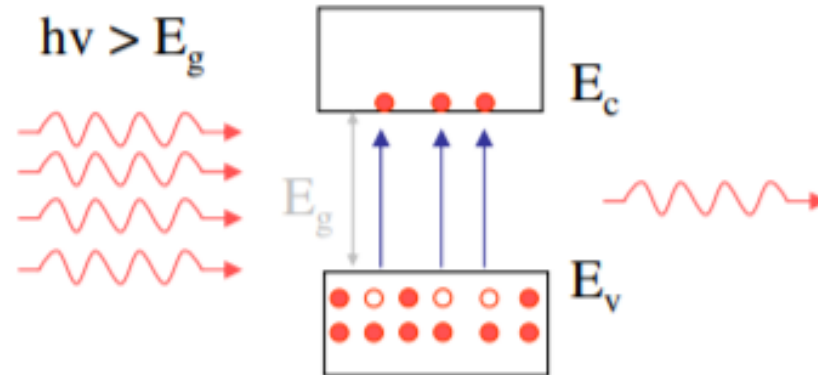


Soğurma katsayısı α frekansa bağlıdır $\alpha(h\nu)$

Enerjisi bant aralığının altında olan fotonlar soğrulmadan malzemedan geçerler.



Enerjisi bant aralığının üstünde olan fotonlar ise soğrulur.



$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$

h : Planck sabiti

c : EMD boşluktaki hızı $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$

λ : EMD Dalga boyu (m)

Yasak bant genişliği 1.1 eV olan Silisyuma minimum hangi dalga boylu EMD göndermeliyim ki soğurma gerçekleşsin

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_{min}}$$

$$\lambda_{min} = \frac{6.63 \times 10^{-34} (J.s) \times 3 \times 10^8 (\frac{m}{s})}{1.1 eV \times 1.6 \times 10^{-19} J/eV} = 11.30 \times 10^{-7} m$$

$$\lambda_{min} = 1130 \times 10^{-9} m$$

$$\lambda_{min} = 1130 nm$$

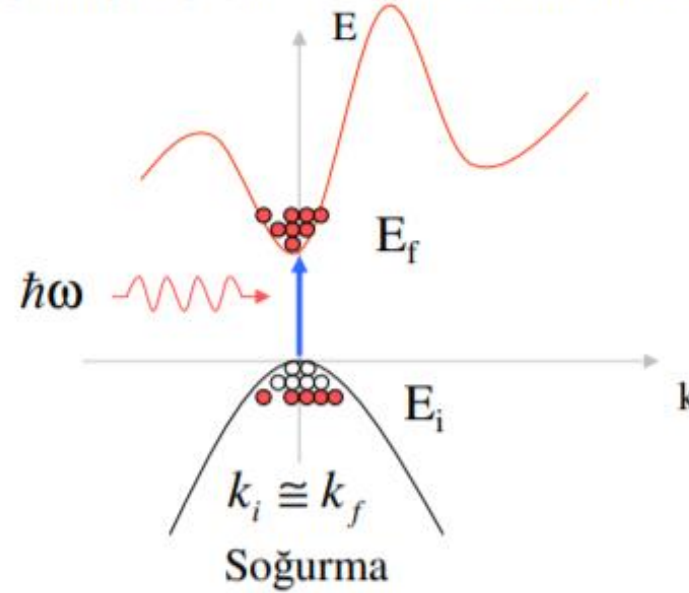
Joule eV dönüşümü	
1eV	$1.6 \times 10^{-19} J$
1.1 eV	x

Optik Geçişler-Doğrudan (Direct) Geçişler

İletim bandının minimumu ile değerlik bandının maksimumu aynı k dalga vektörü değerinde ise böyle malzemeler doğrudan geçişli malzemelerdir (örneğin GaAs, InP). Bu malzemelerde soğurma katsayısı:

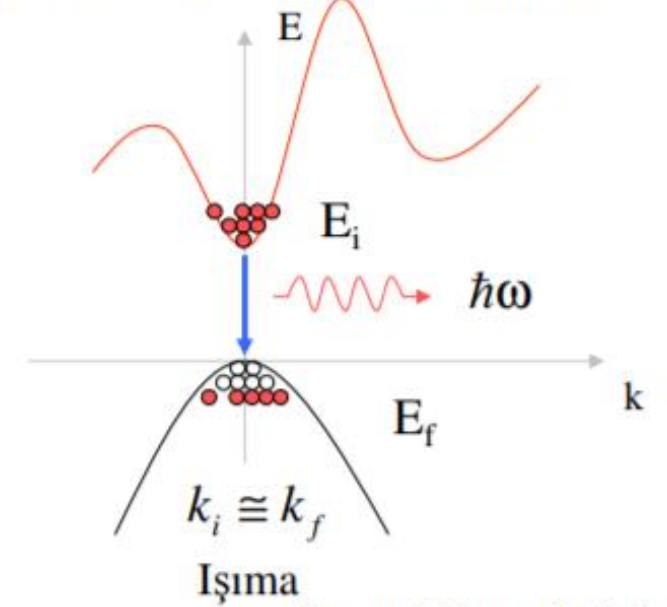
$$\alpha(h\nu) = A'(h\nu - E_g)^{1/2}$$

şeklinde verilir. Optik geçişlerde enerji ve momentum aynı anda korunmalıdır. Doğrudan bant aralığından dolayı iletim ve değerlik bandına geçiş yapan elektronlar aynı k değerine sahip olduklarından momentumun korunması için üçüncü parçacıklara (fonon) ihtiyaç duyulmaz. Bu sebepten optik geçişler verimlidir ve bu tür yarıiletken malzemeler ışık üretiminde kullanılırlar.



Enerjinin korunumu $E_i + \hbar\omega = E_f$

Momentum korunumu $\hbar k_i + \hbar q = \hbar k_f$



q = foton dalga vektörü

ω = foton frekansı

k = elektronun dalga vektörü

Fotonik bölgede fotonun momentumu çok küçük olduğundan ihmal edilebilir $q \approx 0$

$$\Rightarrow k_i \cong k_f$$

Absorpsiyon katsayısı ise α dır.

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}, \quad \alpha = A(h\nu - E_g)^\gamma$$

$\gamma = \frac{1}{2}$ **direk bant aralıklı**
yarıiletkenlerde kullanılır

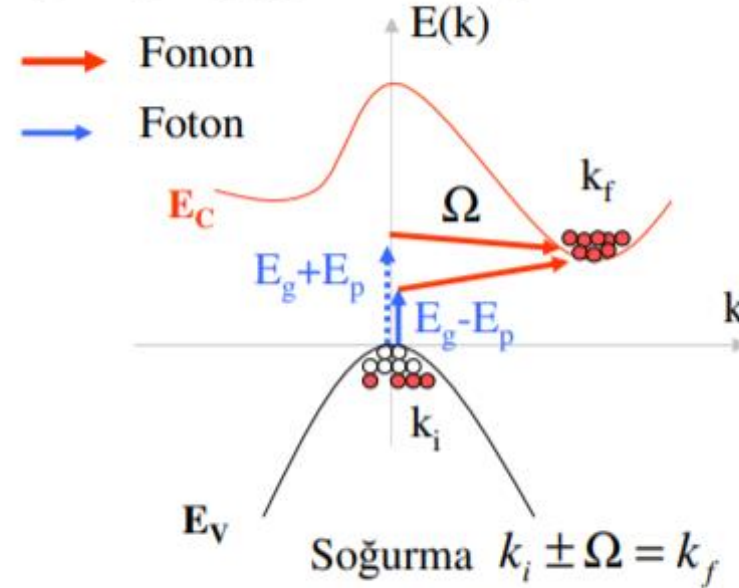
$\gamma = \frac{3}{2}$ **indirek bant aralıklı**
yarıiletkenlerde kullanılır

Optik Geçişler-Dolaylı (indirect) Geçişler

İletim bandının minimumu ile değerlik bandının maksimumu farklı k dalga vektörü değerinde ise böyle malzemeler dolaylı (indirekt) geçişli malzemelerdir (örneğin Si, Ge). Bu malzemelerde soğurma katsayısı

$$\alpha(h\nu) = A^* (h\nu - E_g \pm \hbar\Omega)^2$$

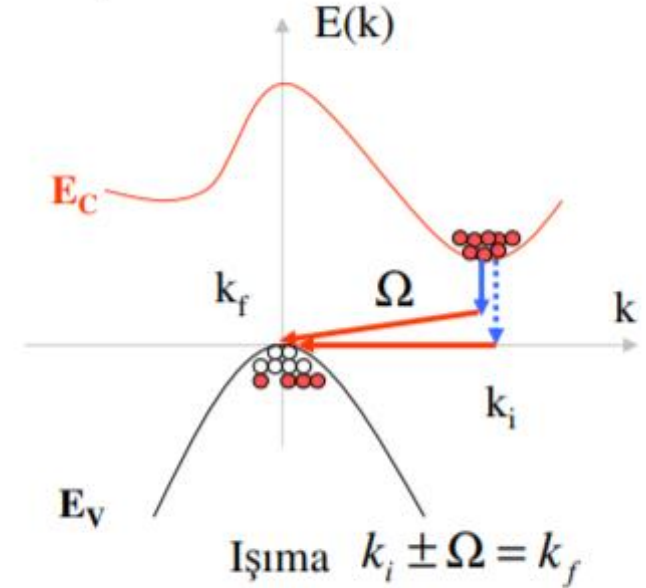
şeklinde verilir. Optik geçişlerde enerji ve momentum aynı anda korunmalıdır. Dolaylı bant aralığından dolayı iletim ve değerlik bandına geçiş yapan elektronlar geçiş sonrası farklı k değerine sahip olduklarından momentumun korunması için üçüncü parçacığa (fonon) ihtiyaç duyulur. Bu sebepten optik geçişler verimli değildir ve bu malzemeler ışık üretiminde kullanılmazlar.



Enerjinin korunumu $E_i + \hbar\omega = E_f$

Momentum korunumu $\hbar k_i + \hbar q \pm \hbar\Omega = \hbar k_f$

$q \approx 0$ $k_i \pm \Omega = k_f$



q = foton dalga vektörü

ω = foton frekansı

k = elektronun dalga vektörü

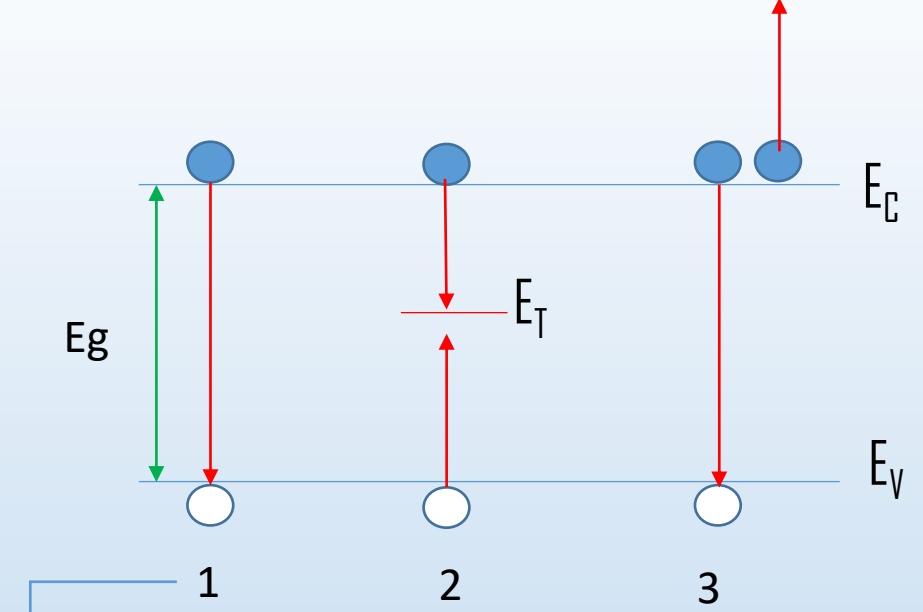
Ω = fonon dalga vektörü

TAŞIYICI REKOMBİNASYONU VE ÜRETİMİ

- Elektronların ve deliklerin rekombinasyonu, her iki taşıyıcının da birbirini yok ettiği bir süreçtir: elektronlar - bir veya birkaç adımda - bir delikle ilişkili boş durumu işgal eder. Her iki taşıyıcı da sonunda süreçte kaybolur.
 - Elektronun başlangıç ve son durumu arasındaki enerji farkı işlem sırasında açığa çıkar.
 - Bu, rekombinasyon işlemlerinin olası bir sınıflandırmasına yol açar.
- 1- Işınımsal rekombinasyon durumunda, bu enerji bir foton şeklinde yayılır.
 - 2- Radyatif olmayan rekombinasyon durumunda, bir veya daha fazla fonona aktarılır
 - 3- Auger rekombinasyonu durumunda kinetik enerji formunda başka bir elektrona verilir

TAŞIYICI REKOMBİNASYONU VE ÜRETİMİ

- 1- Banttan banda rekombinasyon, bir elektron iletim bandı durumundan delikle ilişkili boş değerlik bandı durumuna geçtiğinde meydana gelir. Bu banttan banda geçiş tipik olarak aynı zamanda doğrudan bant aralığı yarı iletkenlerinde bir ışınım geçiştir.
- 2- Tuzak destekli rekombinasyon, bir elektron bir "tuzağa", bir yabancı atomun veya yapısal bir kusurun varlığından kaynaklanan bant aralığı içindeki bir enerji seviyesine düştüğünde meydana gelir. Tuzak dolduktan sonra başka bir elektron kabul edemez. Tuzağı işgal eden elektron, ikinci bir adımda boş bir değerlik bandı durumuna geçer ve böylece rekombinasyon sürecini tamamlar. Bu süreç, bir elektronun iletim bandından valans bandına iki aşamalı bir geçişi veya tuzakta birbiriyle buluşan elektron ve deliğin yok edilmesi olarak düşünülebilir. Bu süreci Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonu olarak adlandıracaktır.
- 3- Auger rekombinasyonu, bir elektron ve bir deliğin banttan banda geçişte yeniden birleştiği, ancak şimdi ortaya çıkan enerjinin başka bir elektron veya deliğe verildiği bir süreçtir.



$$E = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{\lambda}$$

$$E_g(2.5eV) = \frac{6.62 \times 10^{-34} (J.s) \times 3 \times 10^8 (\frac{m}{s})}{\lambda (m)}$$

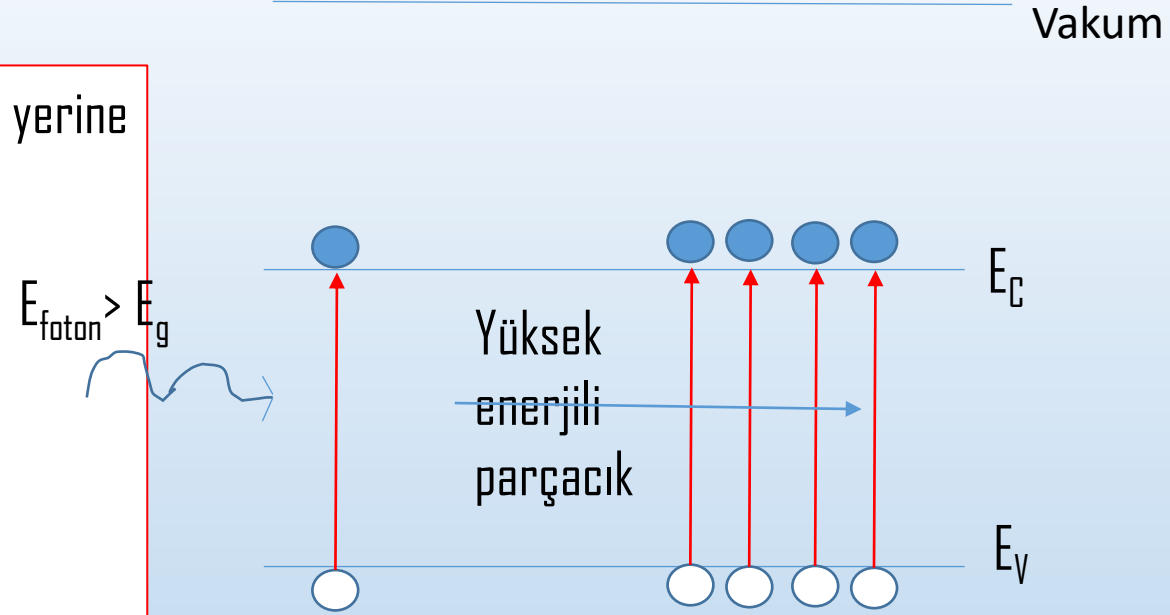
$$E_g(2.5 \times 1.6 \times 10^{-19} J) = \frac{6.62 \times 10^{-34} (J.s) \times 3 \times 10^8 (\frac{m}{s})}{\lambda (m)}$$

$$\lambda (m) = \frac{6.62 \times 10^{-34} (J.s) \times 3 \times 10^8 (\frac{m}{s})}{2.5 \times 1.6 \times 10^{-19} J}$$

$$\lambda (m) = 4.965 \times 10^{-7} m = 496.5 \times 10^{-9} m \sim \mathbf{500nm}$$

TAŞIYICI REKOMBİNASYONU VE ÜRETİMİ

- Bu rekombinasyon mekanizmalarının her biri, rekombinasyon yerine taşıyıcı oluşumuna yol açacak şekilde tersine çevrilebilir.
- Foton
- Yüksek enerjili parçacık
- Darbe iyonizasyonu



TAŞIYICI REKOMBİNASYONU VE ÜRETİMİ

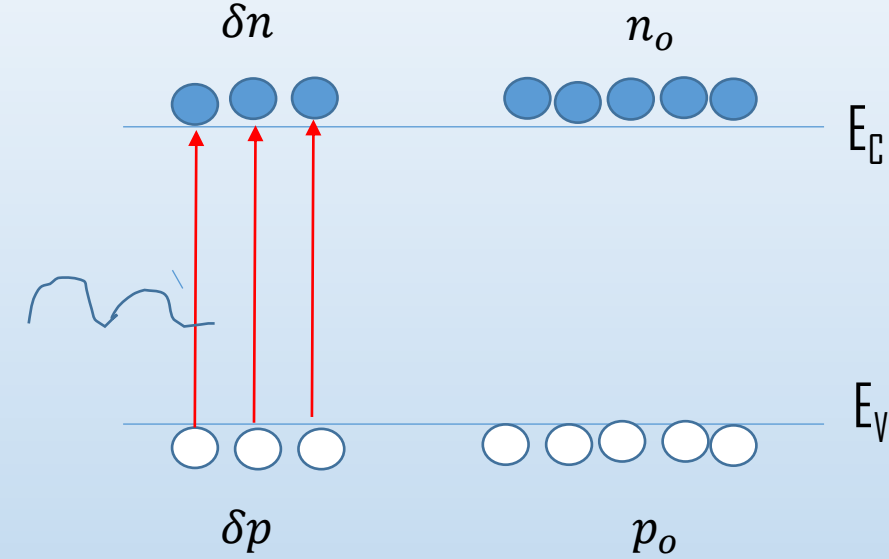
- Serbest yük Üretim: Serbest elektron ve boşluk oluşturulması
- Rekombinasyon: Serbest elektron ve boşluk yok edilmesi
- Daha önce termal dengede iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı yoğunluklarını belirledik. Termal dengede bu durum zamandan bağımsızdır.
- Bu nedenle üretim ve rekombinasyon hızları eşittir
- Rekombinasyon sonucu bir foton yayılır.
- G_{no} ve G_{po} sırasıyla elektron ve boşlukların birim hacimde birim zamanda **termal üretim hızları**
- $G_{no} = G_{po}$ çünkü çiftler halinde üretilirler
- R_{no} ve R_{po} sırasıyla elektron ve boşlukların birim hacimde birim zamanda **rekombinasyon hızları**
- $R_{no} = R_{po}$ çünkü çiftler halinde yok olurlar

$$G_{no} = G_{po} = R_{no} = R_{po}$$



FAZLA TAŞIYICI REKOMBİNASYONU VE ÜRETİMİ

- Yarıiletkenlerde dış etkiler ile yaratılan yani termal dengede olmayan elektronlar ve boşluklar fazladan elektronlar ve fazladan boşluklar olarak adlandırılır.
- $G'_n = G'_p$
- Fazla taşıyıcı oluşumu nedeniyle iletim ve valans bandındaki taşıyıcı yoğunlukları termal denge durumundakine göre artmış olur.
- $n(x, t) = n_o + \delta n(t)$
- $p(x, t) = p_o + \delta p(t)$
- **Homojen katkılı yarıiletkende x,t ye bağlı değişimler**
- Dış etki ile fazladan taşıyıcılar oluştuğunda termal denge yok olur.
- $np \neq n_o p_o = n^2$



- **Bantdan banda rek. Gözönüne alındığında doğal süreç** bir elektron veya boşluk bulma olasılığı zamana göre sabittir. elektronların rek. Hızı boşluk ve elektron yoğunluğuna bağlıdır.

FAZLA TAŞIYICI REKOMBİNASYONU VE ÜRETİMİ

- Termal denge durumunda olduğu gibi IB daki bir elektron valans bandına inerek bir boşluk ile birleşebilir. dengede olmayan elektronlar ve boşluklar fazladan elektronlar ve fazladan boşluklar çiftler halinde rekombine olurlar hızları eşittir.

- $R'_n = R'_p$

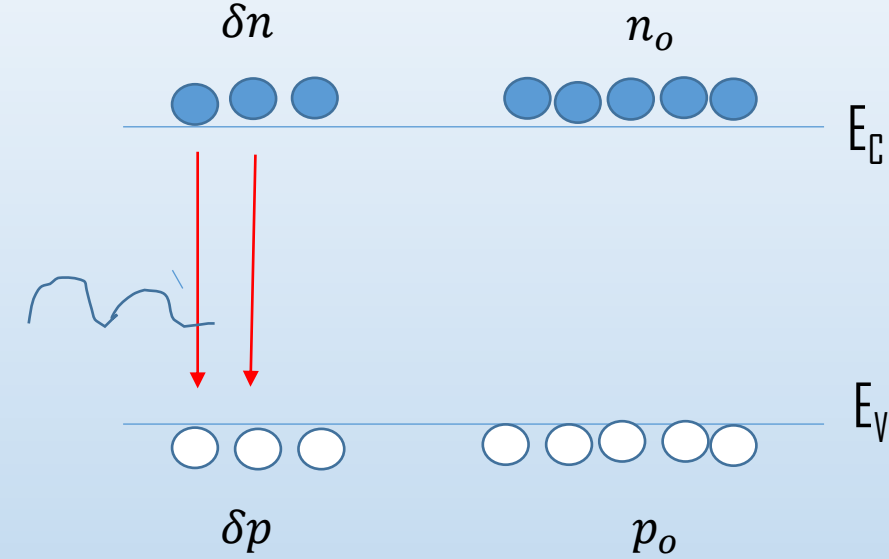
- Elektron yoğunluğundaki değişimin net hızı

- $$\frac{dn(t)}{dt} = \underbrace{\alpha_r [n_i^2]}_{\text{Termal dengedeki üretim hızı}} - \underbrace{n(t)p(t)}_{\text{Zamana bağlı taş.yoğunlukları}}$$

Termal dengedeki üretim hızı

rekomb.oranı katsayısı

- $\delta n(t) = \delta p(t)$
- $$\frac{d\delta n(t)}{dt} = \alpha_r [n_o p_o - (n_o + \delta n(t))(p_o + \delta p(t))]$$
- $$= -\alpha_r \delta n(t) [(n_o + p_o) + \delta n(t)]$$



FAZLA TAŞIYICI REKOMBİNASYONU VE ÜRETİMİ

- Düşük seviyeden enjeksiyon (FAZLA TAŞIYICI YOĞUNLU TERMAL Dengedeki taşıyıcı yoğunluğundan çok az) limitinde n tipi yarıiletkende $n_o \gg p_o$ ve p tipi yarıiletkende $p_o \gg n_o$
- Yüksek seviyeden enjeksiyon (FAZLA TAŞIYICI YOĞUNLU TERMAL Dengedeki taşıyıcı yoğunluğundan büyük veya kıyaslanabilir)
- DÜŞÜK SEVİYE p Tipi YARIİLETKENDE
- $\delta n(t) = \delta p(t) \ll p_o$

- $$\frac{d\delta n(t)}{dt} = -\alpha_r p_o \delta n(t)$$

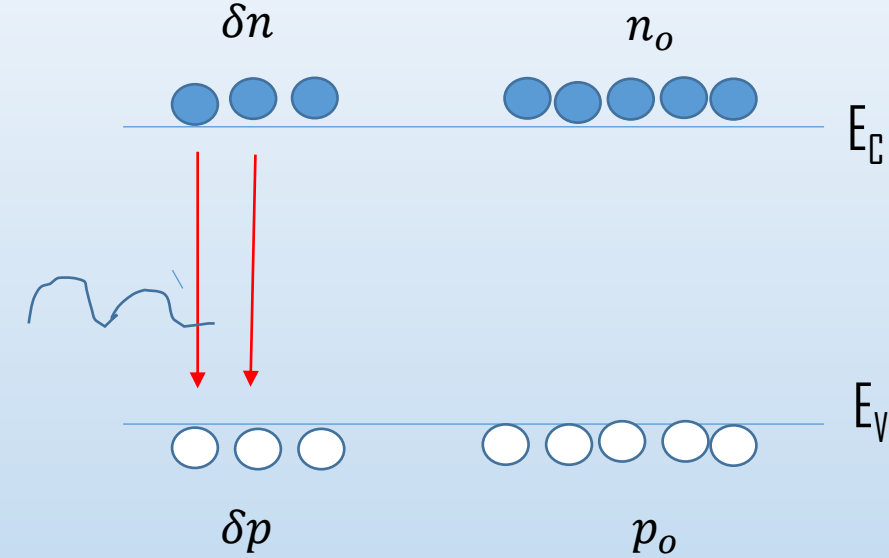
- Fazla taşıyıcı yoğunluğunun zamana göre değişimi

- $$\delta n(t) = \delta n(0) e^{-\alpha_r p_o t}$$

- $$= \delta n(0) e^{-t/\tau_{no}}$$

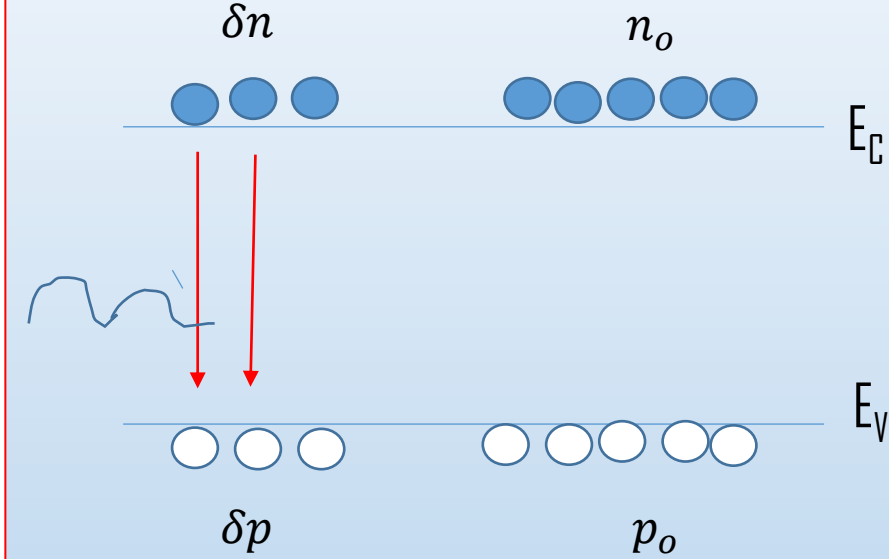
- Enjek. Başladığı andaki elektron sayısı
- Düşük sev. Enj. İçin

$$\tau_{no} = 1/\alpha_r p_o$$



FAZLA TAŞIYICI REKOMBİNASYONU VE ÜRETİMİ

- DÜŞÜK SEVİYE p Tİİ YARIİLETKENDE
- $\delta n(t) = \delta p(t) \ll p_o$
- $\frac{d\delta n(t)}{dt} = -\alpha_r p_o \delta n(t)$
- Fazla taşıyıcı yoğunluğunun zamana göre değişimi
- $\delta n(t) = \delta n(0) e^{-\alpha_r p_o t}$
- $= \delta n(0) e^{-t/\tau_{no}}$
 - Fazla azın. Taşıyıcı ömrü
- Enjek. Başladığı andaki elektron sayısı
 - Düşük sev. Enj. için zaman sabiti
- τ_{no} 0 her ne kadar termal denge durumunu işaret etse de düşük enjeksiyon limitinde çoğunluk taşıyıcı sayısı çok değişmeyeceğinden enjekte edilen fazla taşıyıcıların bir çoğunluk taşıyıcı ile rekombine olma olasılığı değişmez. Bu nedenle taşıyıcı ömrü termal denge ile aynı alınabilir.



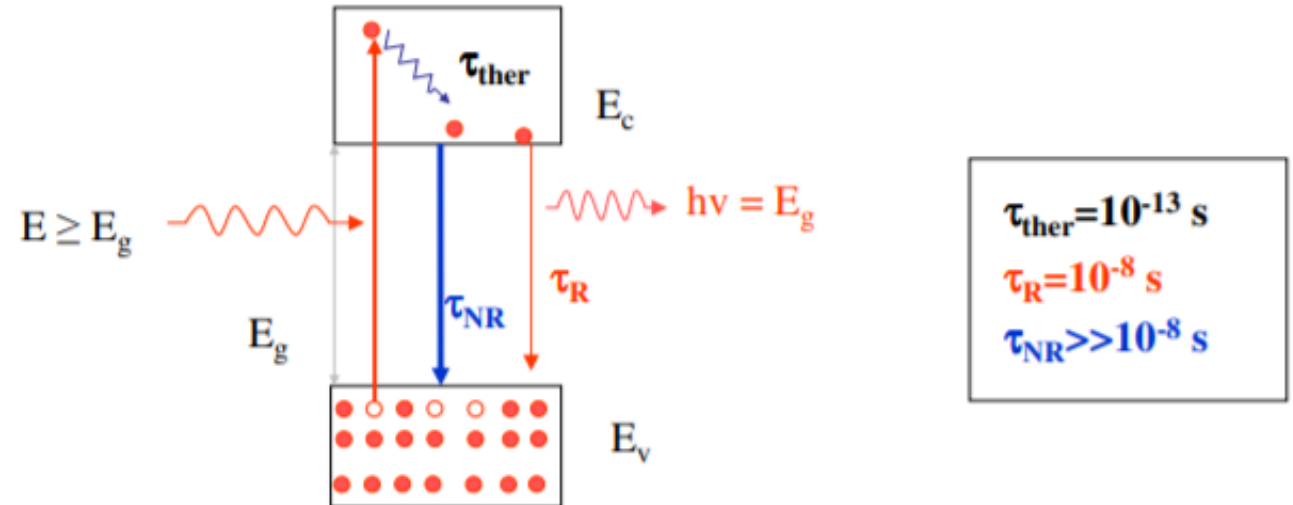
Lüminesans-1

Yarıiletkenlerde oluşturulan **elektron-deşik** fazlalık çiftleri oluşturulduktan hemen sonra ısı dengedeki durumlarına dönmeye çalışırlar. Eski durumuna dönerken kaybettikleri enerjiyi ışıma olarak yayarlar. Bu ışıma özelliğine en genel olarak **lüminesans** denir.

Gelen fotonun enerjisi yasak bandın üstünde ise elektron iletim bandında yüksek enerjili duruma çıkarılır.

Elektron, tekrar değerlik bandına dönmeden fazlalık enerjisini çok kısa bir zaman diliminde fononlara aktararak (thermalization, $\tau_{\text{ther}}=10^{-13}$ s) iletim bandının ucuna gelir.

Elektron buradan ya foton salarak (lüminesans, $\tau_R=10^{-8}$ s) veya foton salmadan başka şekilde ($\tau_{NR} \gg \tau_R$) enerjisini örgüye aktarır veya başka bir kristal kusuru (defect) tarafından yakalanır.



Lüminesans-2

Lüminesans ışığının şiddeti:

$$I^{direk}(\hbar\omega) \propto |M|^2 \times g(\hbar\omega) \times (\text{doluluk oranı faktörü})$$

M geçiş matris elemanı, $g(\hbar\omega)$ durum yoğunluğu, *doluluk oranı faktör*, yukarı seviyelerin dolu, aşağı seviyelerin boş olma olasılığının hesaba katar.

$g(h\nu)$ malzemenin doğrudan veya dolaylı oluşuna bağlı olarak büyük farklar gösterir.

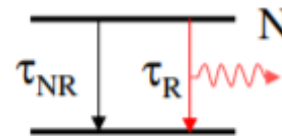
$$I^{direk}(\hbar\omega) \propto (\hbar\omega - E_g)^{1/2} e^{-(\hbar\omega - E_g)/kT}$$

$$g(h\nu) = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-(h\nu - E_g)/kT}$$

$$\tau_{\text{ther}} = 10^{-13} \text{ s}$$

$$\tau_R = 10^{-8} \text{ s}$$

$$\tau_{NR} \gg 10^{-8} \text{ s}$$

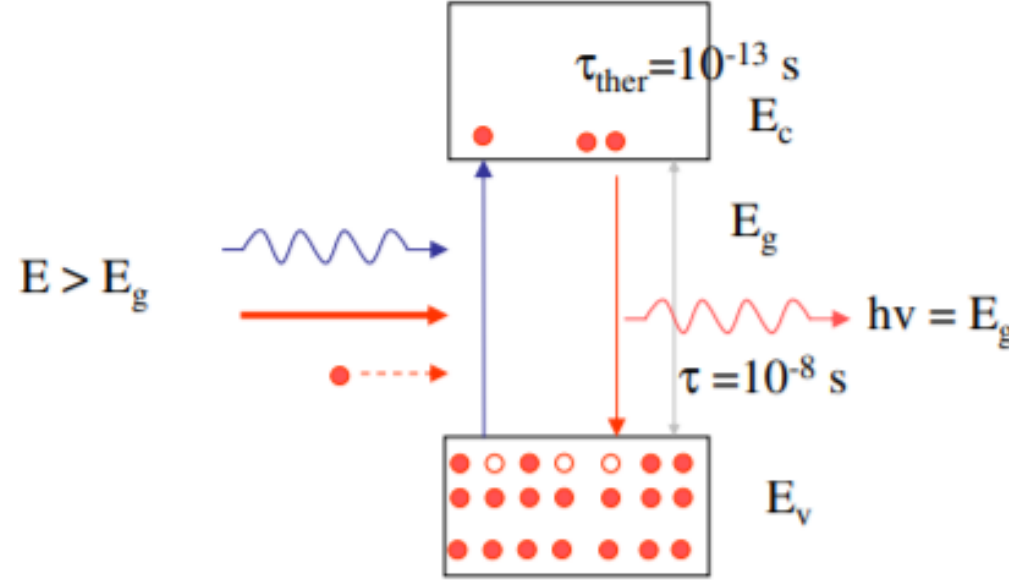


$$\left(\frac{dN}{dt} \right)_{total} = -\frac{N}{\tau_R} - \frac{N}{\tau_{NR}} = -N \left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{NR}} \right)$$

Lüminesans verimliliği

$$\eta_R = \frac{AN}{N \left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{NR}} \right)} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_R}{\tau_{NR}}}$$

Lüminesans-3



Elektron ve deşiklerin yaratılma mekanizmasının nasıl olduğuna bağlı olarak bu ışımlar üç sınıfa ayrılır:

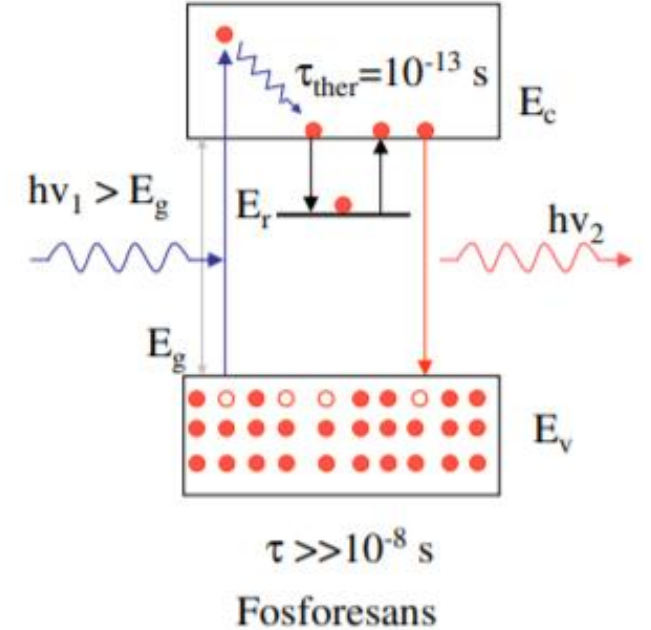
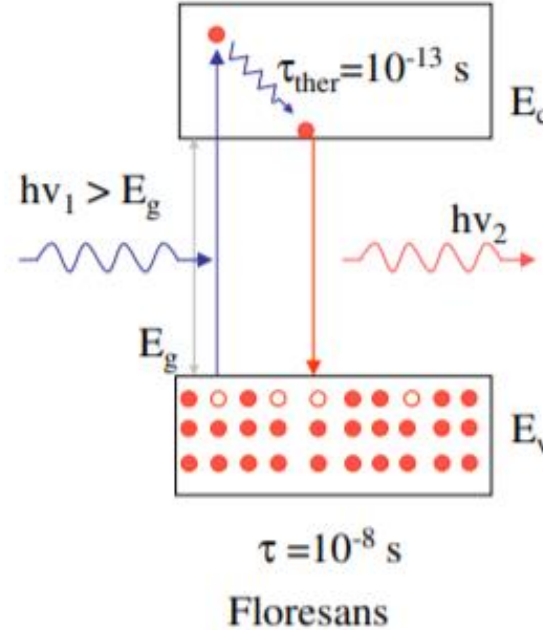
- i) **Fotolüminesans** (Photoluminescence): Uyarılma fotonlarla
- ii) **Katotlüminesans** (Cathodoluminescence): Uyarılma yüksek enerjili elektronlarla
- iii) **Elektrolüminesans** (Electroluminescence): Uyarılma akım yolu ile

Fotolüminesans

Yarıiletkenlerde fotonlarla oluşturulan fazlalık elektronlar oluşturulduktan hemen sonra ısı dengede olmadıkları için tekrardan deşiklerle birleşmeye çalışırlar.

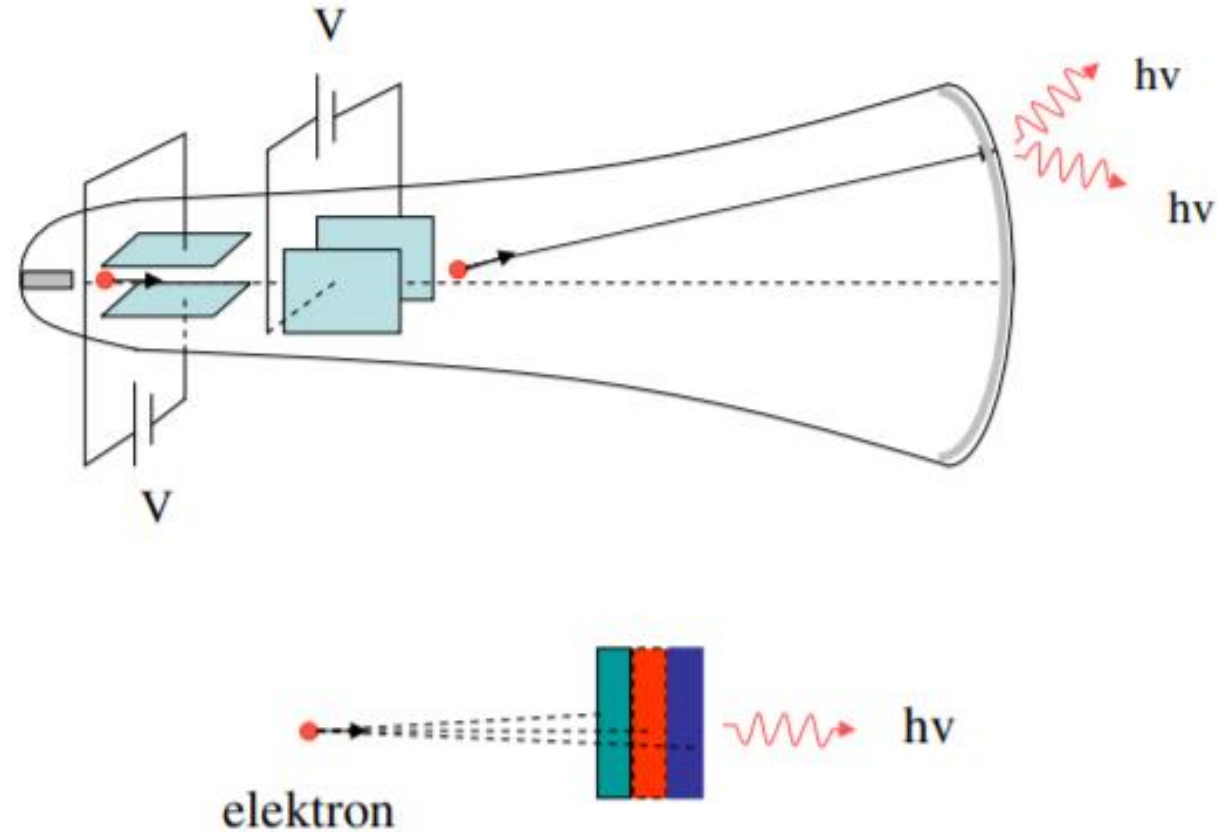
Elektron ve deşikler uyarıldıktan hemen sonra bant aralığında bulunan herhangi bir tuzak seviyesine yakalanmadan doğrudan olarak (direk) birleşmesi ile oluşan yayılmaya **floresans** denir. Bu olaydaki zaman sabiti oldukça küçüktür (10^{-8} s).

Bazı yarıiletken malzemelerde bulunan tuzaklar bu süreyi uzatabilir. Bu duruma **fosforesans** etki denir.



Katotlüminesans

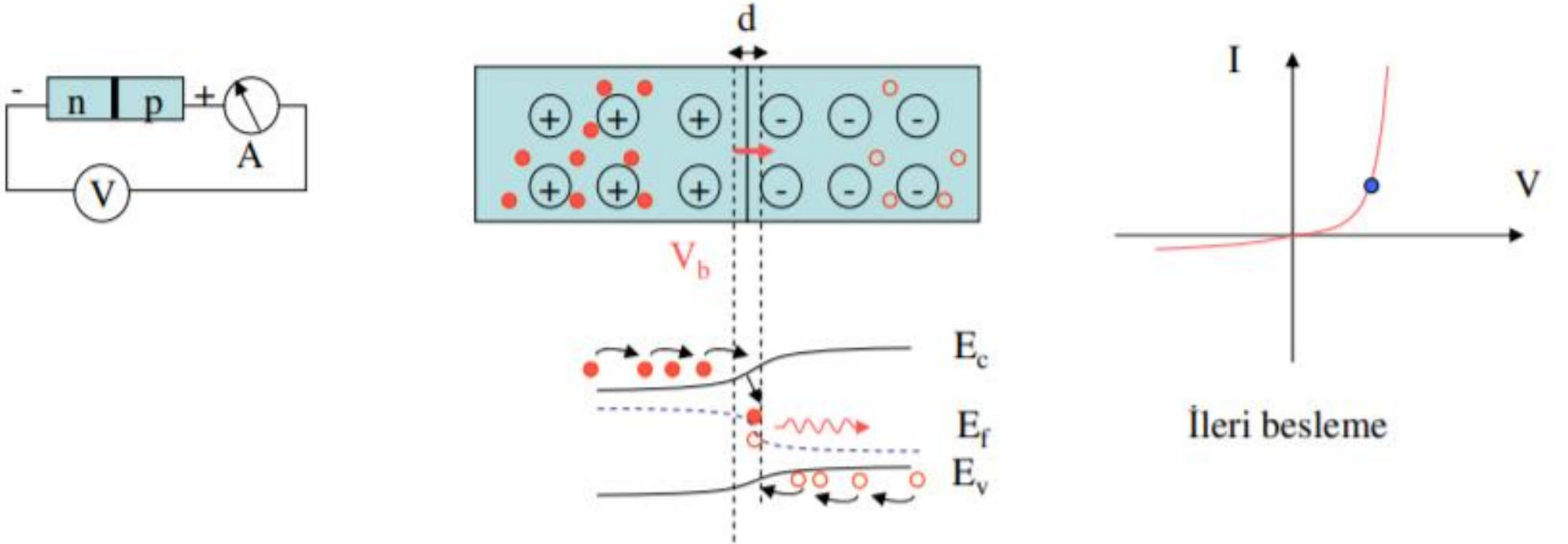
Fazlalık elektron ve deşik çiftleri ışık yerine yüklü enerjili parçacıklar tarafından da oluşturulabilir. Örnek olarak katot-ışını tüpü (Cathode-Ray Tube) verilebilir.



Renkli CRT ekranlar

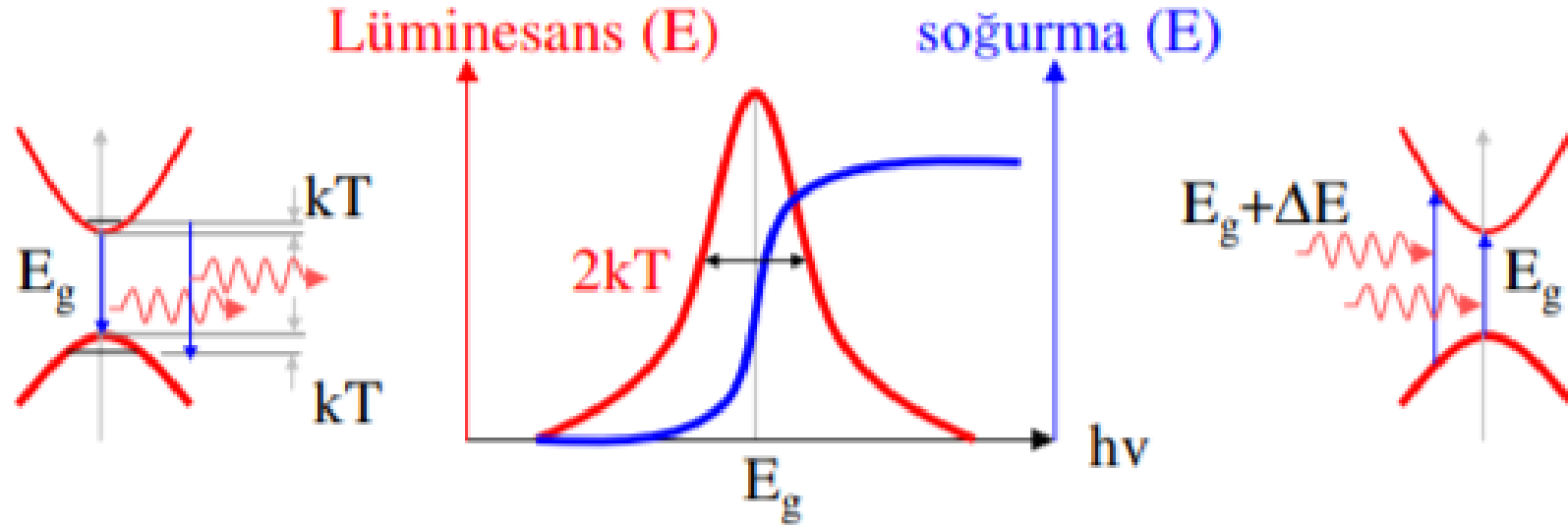
Elektrolüminesans

Elektrik yüklerinin enjeksiyonu ile oluşturulan ışımalara denir. Örneğin LED ve yarıiletken lazerlerde elektrik akımı tüketim (depletion) bölgelerine elektron ve deşiklerin enjekte edilerek bu taşıyıcıların tekrardan birleşerek foton salmalarını sağlar.



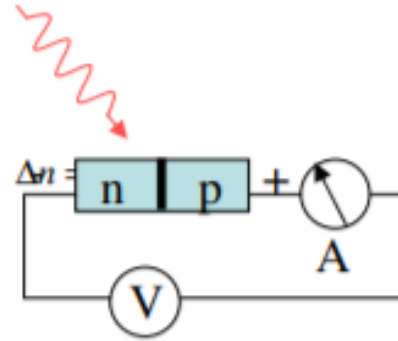
Soğurma ve foton yayma ters işlem olarak gözükse de pratikte farklılıklar gösterir.

Bunun için belli bir uygulama için seçilen malzeme önem taşır. Örneğin bir yarıiletken malzeme $h\nu > E_g$ nin üstündekileri soğurmasına rağmen aynı malzeme ışık yayıcı olarak kullanıldığında sadece yasak bant aralığında foton salar.



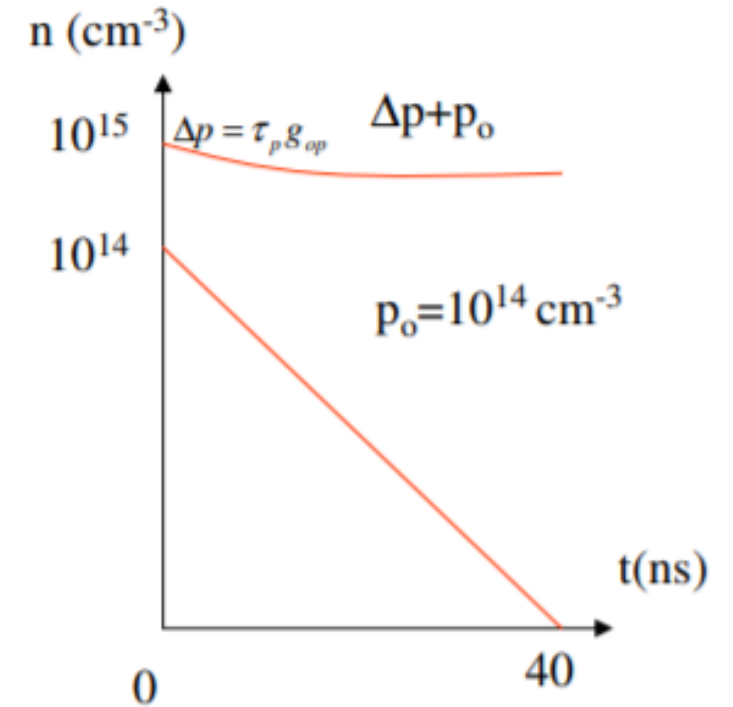
Fotoiletkenlik

İletkenliğin ışıkla değişimi esasına göre çalışan bir çok optoelektronik aygıt vardır (sokak lambaları, ışık dedektörleri vs).



$$\delta n(t) = \Delta n e^{-\alpha_r p_o t} = \Delta n e^{-t/\tau_n}$$

τ_n = yeniden birleşme yarıömrü



İletkenlik $\sigma(t) = q [n(t)\mu_n + p(t)\mu_p]$

FOTOİLETKENLİK

Bir yarıiletken Üzerine $h\nu > E_g$ olan bir foton gönderildiğinde yarıiletkenin iletkenliğinin artması durumu FOTOİLETKENLİK
Temel foton ile yarıiletken içerisinde fazladan elektron ve boşluk üretilmesi mevzuu

foton ile yarıiletken içerisinde oluşturulan fazladan elektronların yok olmasını/rekombine olmasını istemiyorsak yarıiletkene DC gerilim uygularız.
Böylece üretilen elektron ve boşluklar farklı yönde ilerleyerek akıma katkıda bulunurlar.

Fotoiletkenlik olayı: Süreklilik denklemlerinin uygulama alanı

Bir yarıiletken üzerine $h\nu > E_g$ olan bir foton gönderildiğinde yarıiletkenin homojen olarak aydınlatıldığını düşünelim:

Taşıyıcı yoğunluğunun zamana göre değişimini hesaplayalım:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{e} \nabla \cdot J_n$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p + \frac{1}{e} \nabla \cdot J_p$$

$$R_n = \frac{\delta n}{\tau_n} \quad R_p = \frac{\delta p}{\tau_p}$$

Homojen fazladan taşıyıcı üretimi oldg. İçin $G_n = G_p = G$

Toplam taşıyıcı yoğunluğu: $p = p_o + \delta p$ ve $n = n_o + \delta n$

FOTOİLETKENLİK

yarıiletkene sabit DC gerilim uygularız.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - \frac{\delta n}{\tau_n} = 0$$
$$\delta n = G\tau_n$$

Yük nötralitesi $\delta p = \delta n = G\tau_n$

termal denge iletkenlik tanımı $\sigma_o = e(n_o\mu_n + p_o\mu_p)$

Mobilitenin foton etkisiyle değişmediğini varsayarak;

Fazladan yük taşıyıcılarının iletkenlik katkısı

$$\delta\sigma = e(\delta n\mu_n + \delta p\mu_p)$$

$$\delta\sigma = eG\tau_n(\mu_n + \mu_p)$$

+x doğrultusunda l uzunluğunda yarıiletkene V pot. Fark uyguladığımızda akım yoğunluğu hesabı:

$$J = eE(n\mu_n + p\mu_p) = \delta\sigma E = \delta\sigma \frac{V}{l}$$

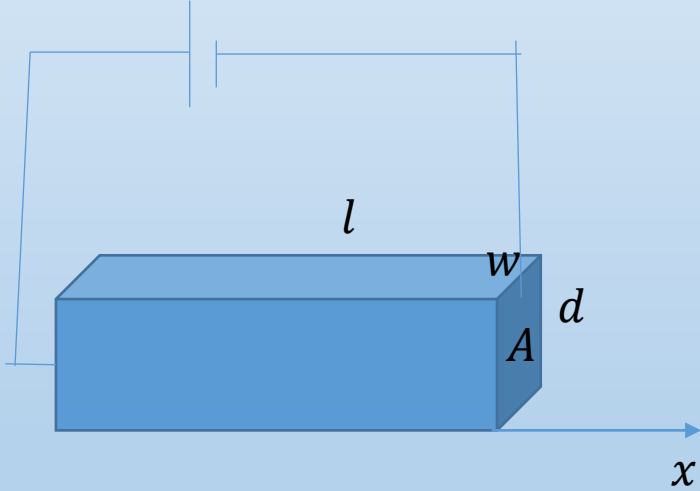
Fotoakım değeri

$$\Delta I = JA$$

$$= \delta\sigma \frac{A}{l} V$$

$$\Delta I = eG\tau_n(\mu_n + \mu_p) \frac{A}{l} V \quad A = wd$$

Yarıiletkenlerde $\mu_n > \mu_p$ old. μ_p ihmal edilirse $\Delta I = eG\tau_n(\mu_n) \frac{A}{l} V$ FOTO AKIM

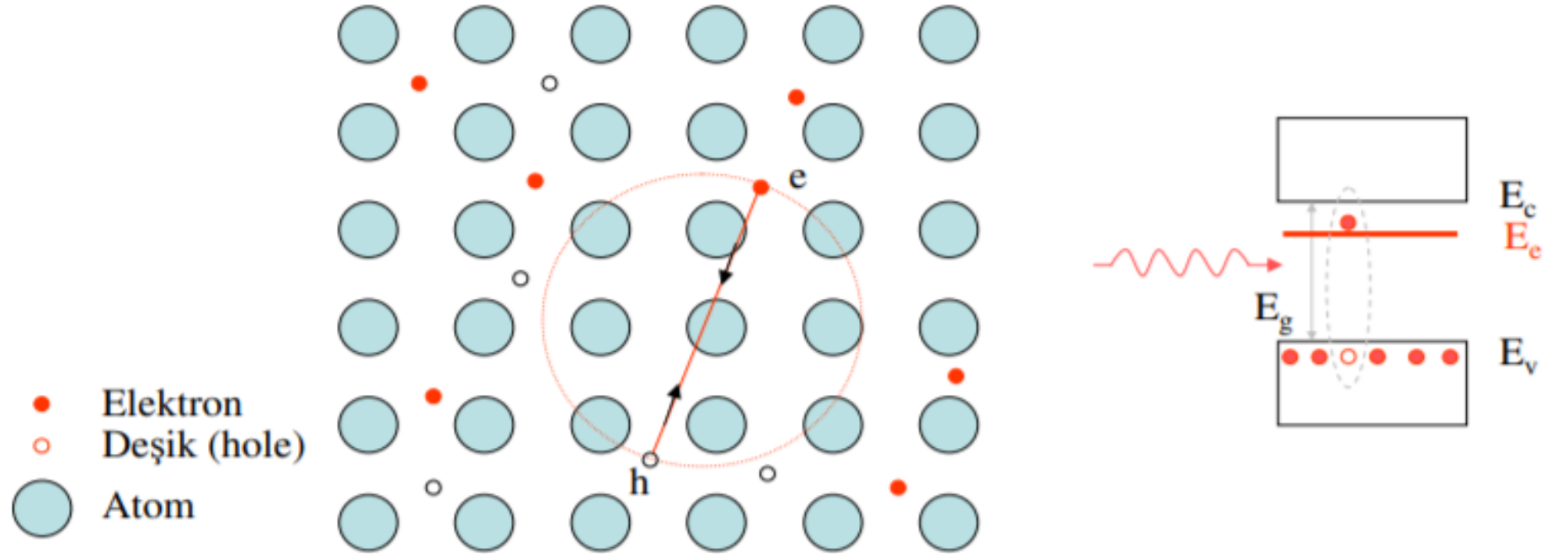


Eksiton-1

Yarıiletkenlerde uyarılma ile oluşturulan elektron-deşik çifti tümüyle birbirlerinden bağımsız değildir. Coulomb etkileşmesinden dolayı elektron ve deşik birbirine bağlıdır.

Bağlı elektron-deşik çiftine **eksiton** denir.

https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod_resource/content/2/Bolum-13.pdf



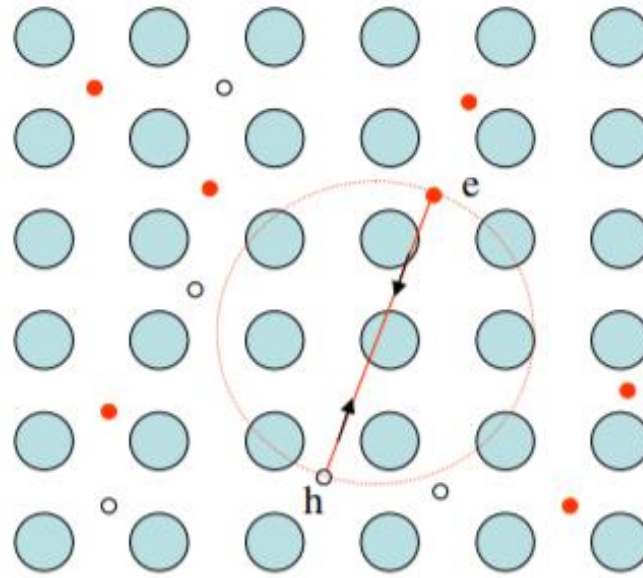
Eksiton, kristal içinde dolaşıp enerji iletebilir; ancak yüksüz olduğu için yük iletmez.

Eksitonların bağlanma enerjileri çok küçüktür: $E_e^{Si}=14,7 \text{ meV}$, $E_e^{GaAs}=4,2 \text{ meV}$

Eksiton-2

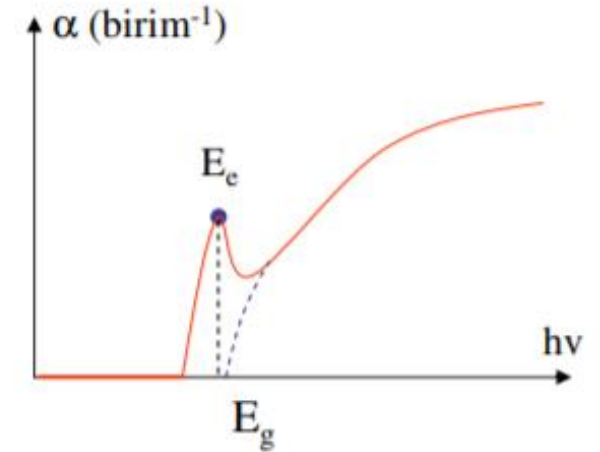
Eksiton enerji seviyeleri çok küçük olduğu için (meV mertebesinde) oda sıcaklığında ($kT=26$ meV) deneysel olarak gözlenemez (fonon yoğunluğu sıcaklıkla arttığı için (E_{fonon} (GaAs) ≈ 36 meV) fononlar eksitonları hemen iyonlaştırırlar).

Eksitonlar sıvı helyum gibi düşük sıcaklıklarda veya düşük boyutlu yapılarda gözlenebilir.



Eksitonlar için hidrojen atomu yaklaşımı:

$$E_e = 13,6 \frac{m_r^*}{m_e} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 eV \quad \frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}$$



Eksitonlar bağlanma enerjilerine göre sınıflandırılırlar:

Frankel Eksitonları: Güçlü bağlı eksitonlar

Mott-Wannier: Zayıf bağlı eksitonlar

<https://www.youtube.com/watch?v=Fogu4FwmYWg>

Kaynaklar

- Prof. Dr. Ahmet Altındal, Yarıiletken ders notları.
- <https://web.itu.edu.tr/~kaymak/images/pv.html>
- https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod_resource/content/2/Bolum-13.pdf