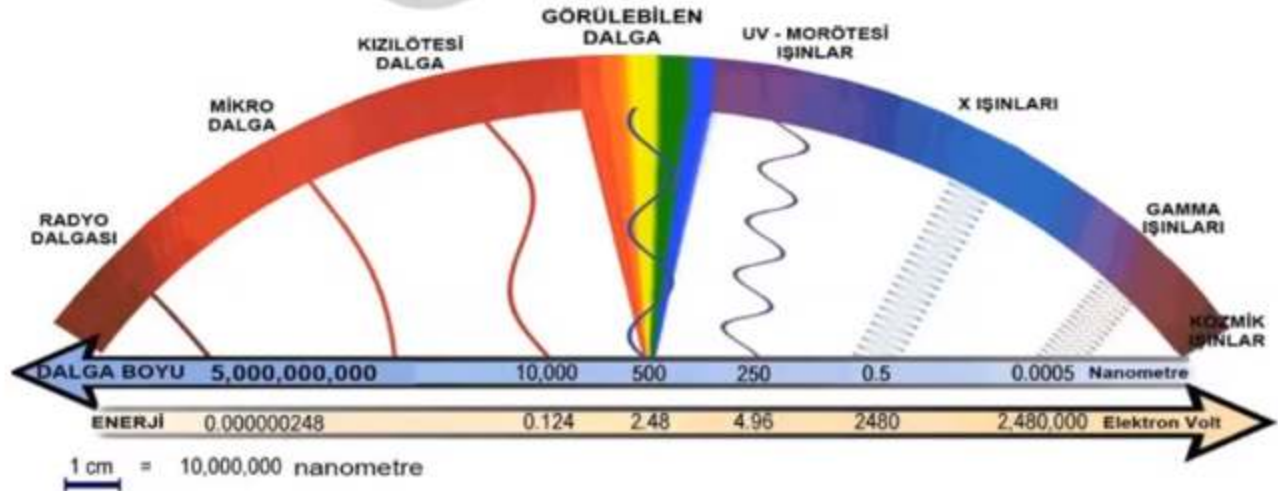
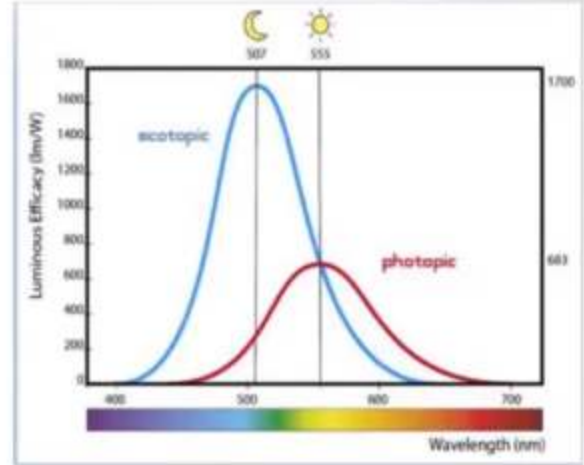


# Yarıletkenlerde Optik Özellikler

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

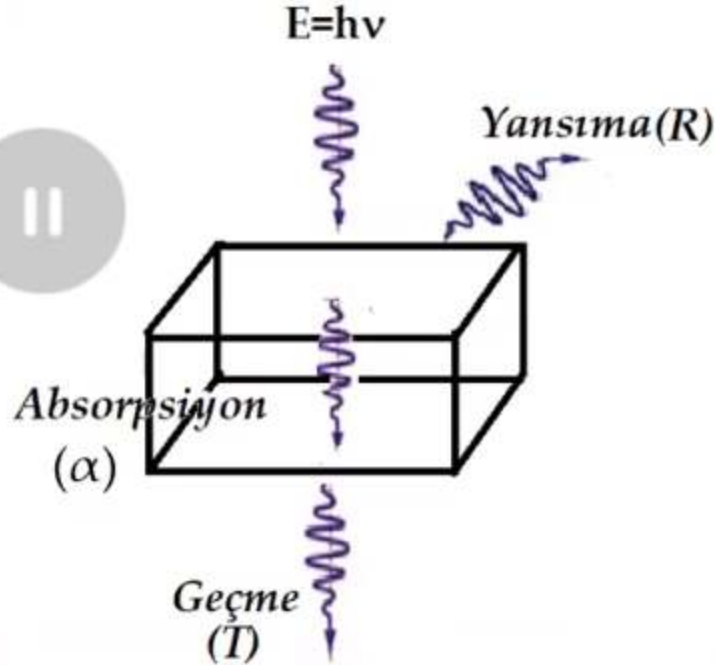
Ama Elektromanyetik Spektrum Çok daha geniş bir aralıktır.



# Foton Yarıiletken Etkileşmesi

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

- 1- Yansıma
- 2- Absorpsiyon
- 3- Geçme



## Kırılma İndisi

Bir yarıiletkenin optik özellikleri komplex kırılma indisi ile karakterize edilir.

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$$

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

$$n^{*2} = n_r^2 - k^2 - i2n_rk = \varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$$

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

$\varepsilon \Rightarrow$  dielektrik fonksiyonu

$k \Rightarrow$  kırılma indisinin sanal kısmında ( $k$ ) zayıflatma katsayısıdır.

Absorpsiyon katsayısı ise  $\alpha$  dır.

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

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

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

## Yansımaya Katsayısı (R)

Yarıiletken üzerine düşen ışık için yansımaya ve geçme olayları, kırılma indisi cinsinden ifade edilir.

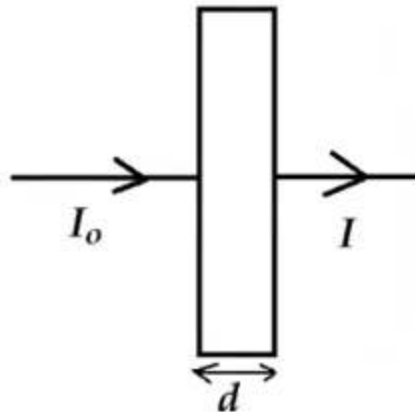
$$R = \frac{(n_r - 1)^2 + k^2}{(n_r + 1)^2 + k^2}$$

## Geçirme Katsayısı (T)

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

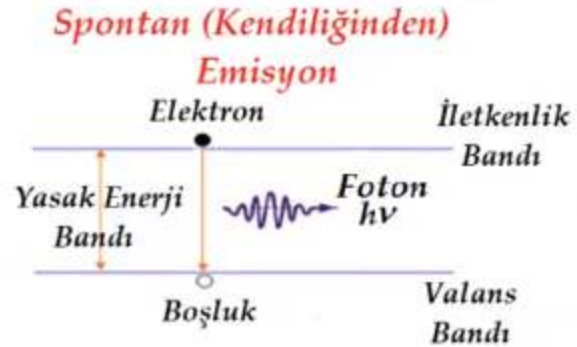
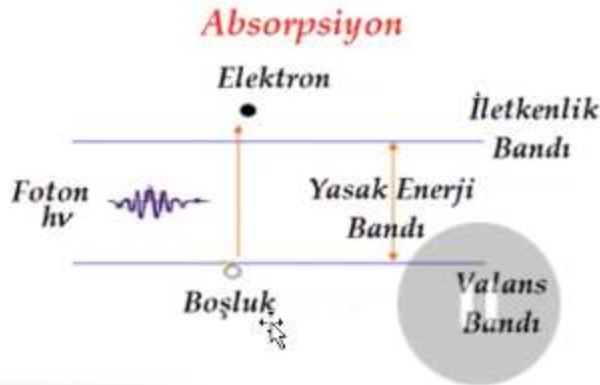
Gelen ışığın enerjisi, yarıiletkenin yasak band aralığına eşit ya da büyük ise absorplanır.

- Gelen ışığın şiddeti ( $I_0$ ), yarıiletken içinde aldığı yola ( $l$ ) bağlı olarak azalır.
- $I_l = I_0 \exp(-\alpha l)$
- $I_0 \Rightarrow$  Gelen ışık şiddeti
- $I \Rightarrow$  Geçen ışık şiddeti
- $l \Rightarrow$  Yarıiletkenin kalınlığı
- $\alpha \Rightarrow$  Absorpsiyon katsayısı

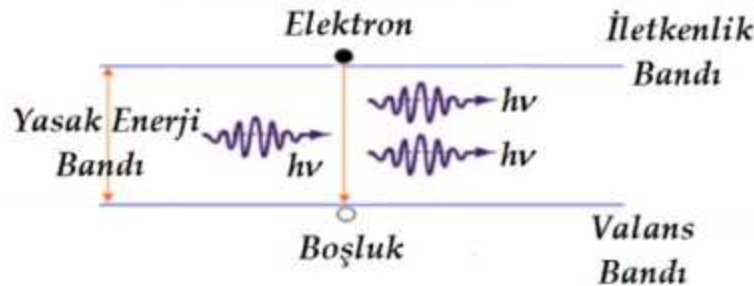


# Yarıiletkenlerde Elektron-Foton etkileşmesi

- Bu etkileşimde 3 temel proses vardır.



## Uyarılmış Emisyon





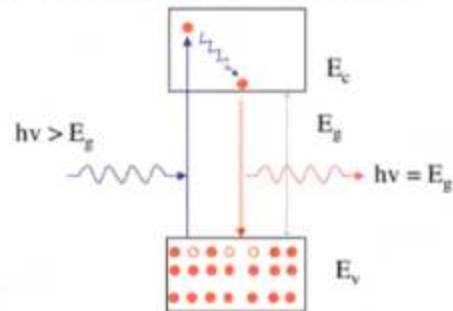
# Optik Soğurma (Absorpsiyon)

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

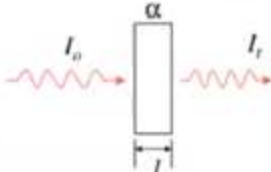
$$n \propto e^{-E_g/2kT}$$

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

Eğer yarıiletken 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 ısıya yapar.



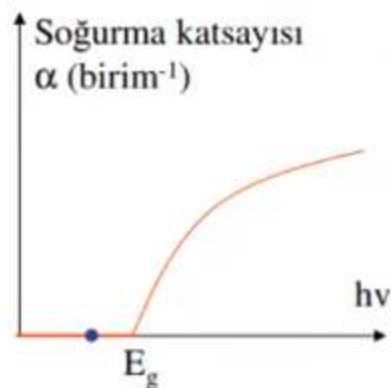
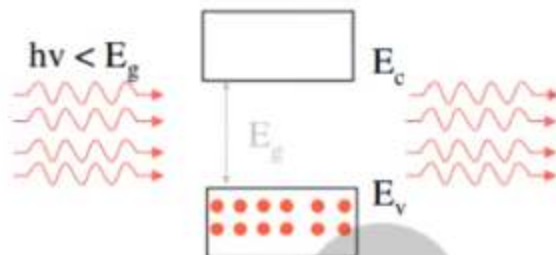
Işığın yarıiletken içinde ne kadar soğrulacağı malzemenin soğurma katsayısı ( $\alpha$ ) ve kalınlığına ( $l$ ) bağlıdır.

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


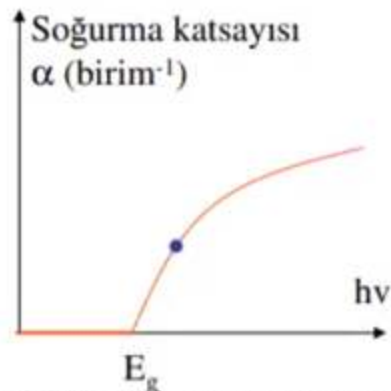
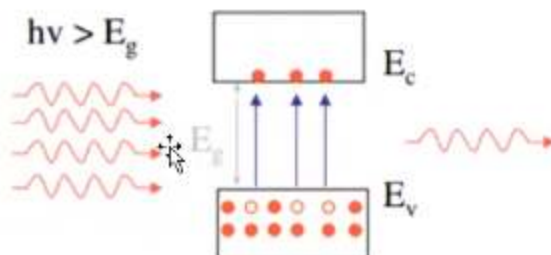
$I_o$  = gelen ışığın şiddeti  
 $I_t$  = geçen ışığın şiddeti  
 $\alpha$  = soğurma katsayısı

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

Enerjisi bant aralığının altında olan fotonlar soğurulmadan malzemeden geçerler.



Enerjisi bant aralığının üstünde olan fotonlar ise soğrulur.



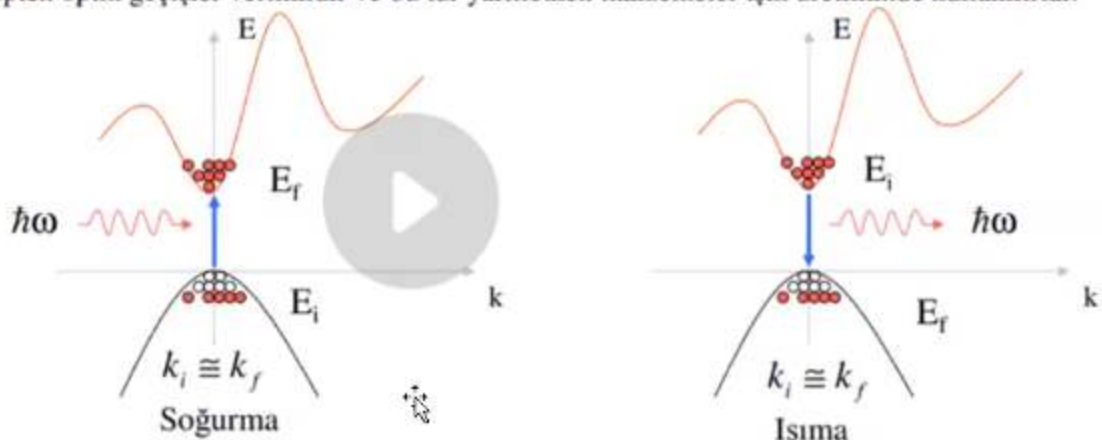


## Optik Geçişler-Doğrudan (Direct) Geçişler

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

$\omega$  = foton frekansı

$k$  = elektronun dalga vektörü

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

$$\Rightarrow k_i \approx k_f$$

[https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod\\_resource/content/2/](https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod_resource/content/2/)

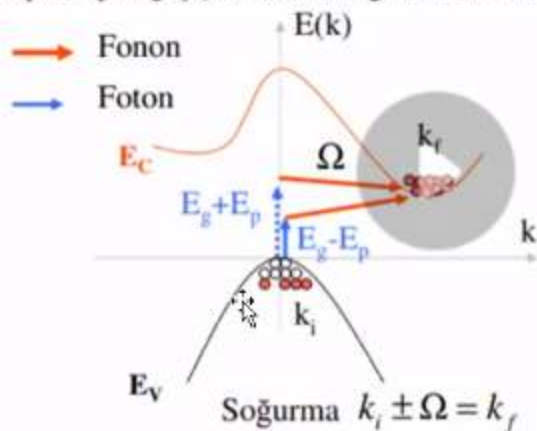
Bolum-13.pdf

# 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

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

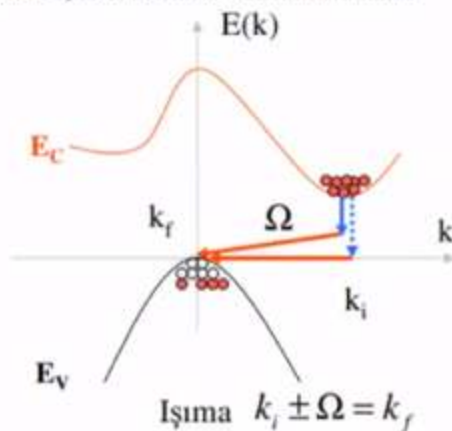
şeklinde verilir. Optik geçişlerde enerji ve momentum aynı anda korunmalıdır. Dolaylı bant aralığından dolayı iletim ve değerlik bandına geçiş yapan elektronlar geçiş sonrası farklı  $k$  değerine sahip olduklarından momentumun korunması için üçüncü parçacığa (fonon) ihtiyaç duyulur. Bu sebepten optik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



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

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

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



$q$  = foton dalga vektörü

$\omega$  = foton frekansı

$k$  = elektronun dalga vektörü

$\Omega$  = fonon dalga vektörü

[https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod\\_resource/content/2/](https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod_resource/content/2/)

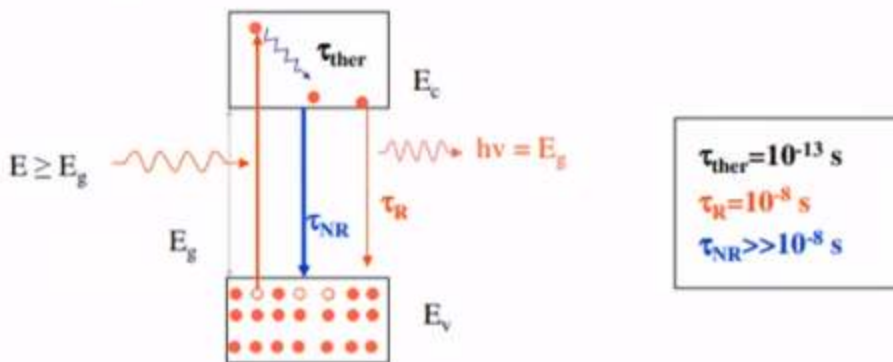
# Lüminesans-1

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,  $\tau_{ther}=10^{-13}$  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:

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

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

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

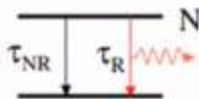
$$I^{\text{direk}}(\hbar\omega) \propto (\hbar\omega - E_g)^{1/2} e^{-(\hbar\omega - E_g)/kT}$$

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

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

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

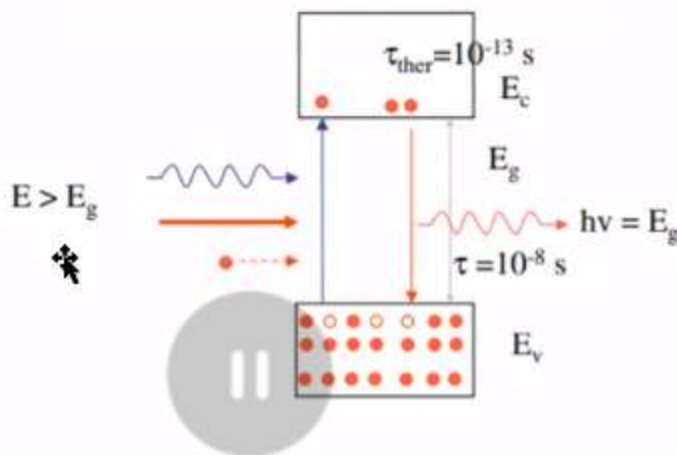
$$\tau_{NR} \gg 10^{-8} \text{ s}$$



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

**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

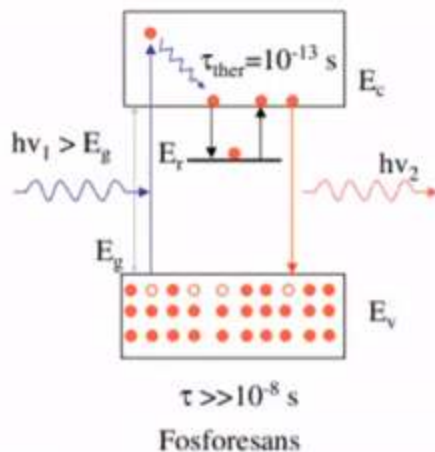
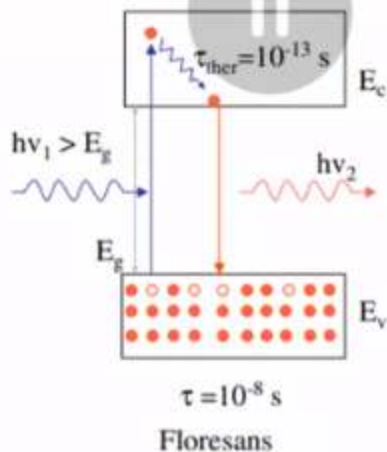


# Fotolüminesans

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).

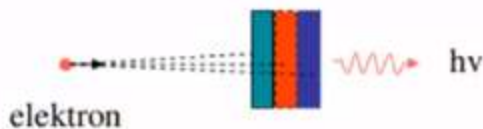
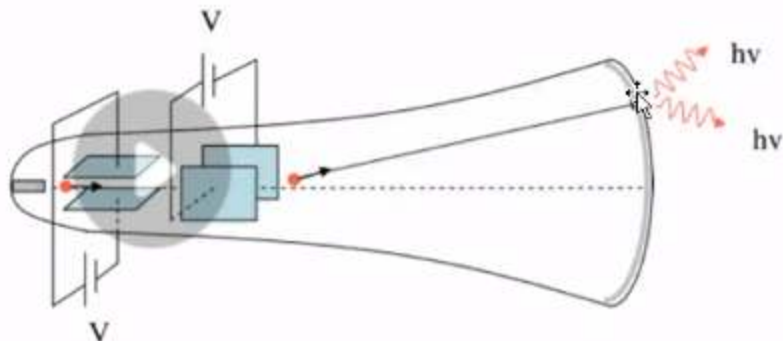
Bazı yarıiletken malzemelerde bulunan tuzaklar bu süreyi uzatabilir. Bu duruma **fosforesans** etki denir.





# Katotlüminesans

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

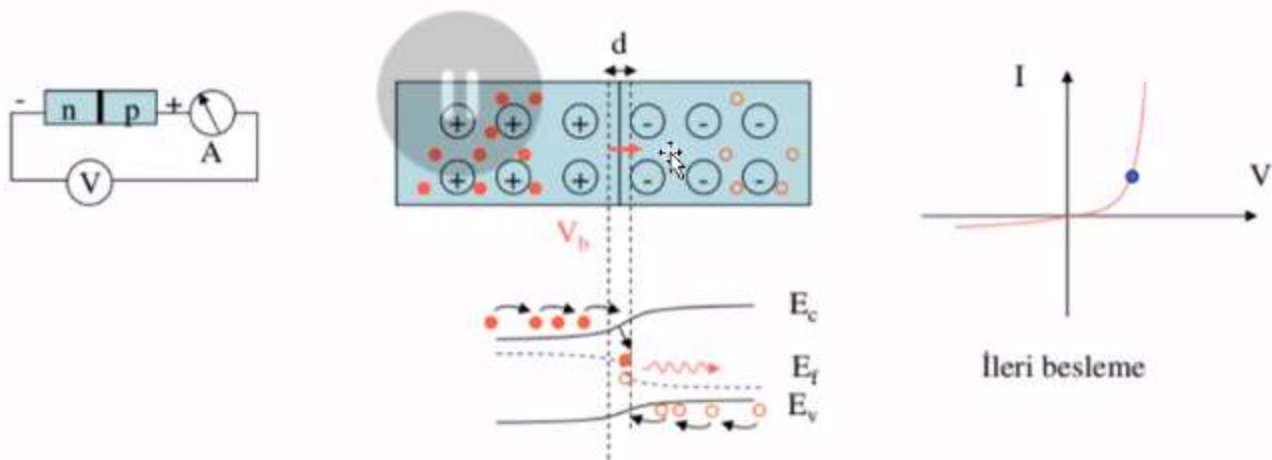


Renkli CRT ekranlar

[https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod\\_resource/content/2/Bolum-13.pdf](https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod_resource/content/2/Bolum-13.pdf)

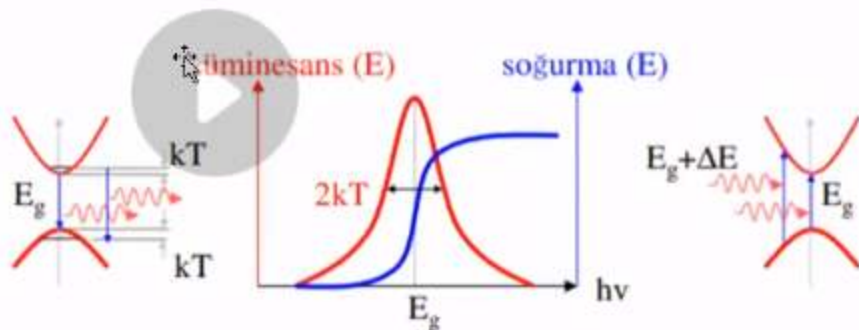
# Elektrolüminesans

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 gözüксе de pratikte farklılıklar gösterir.

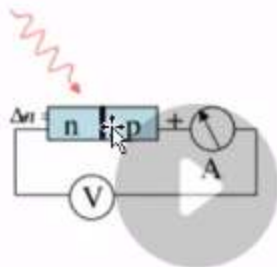
Bunun için belli bir uygulama için seçilen malzeme önem taşır. Örneğin bir yarıiletken malzeme  $h\nu > E_g$  nin üstündekileri soğurmasına rağmen aynı malzeme ışık yayıcı olarak kullanıldığında sadece yasak bant aralığında foton salar.



[https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod\\_resource/content/2/Bolum-13.pdf](https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod_resource/content/2/Bolum-13.pdf)

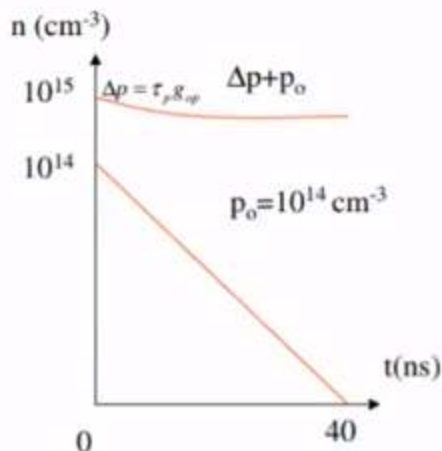
# Fotoiletkenlik

İletkenliğin ışıqla değişimi esasına gre alışan bir ok optoelektronik aygıt vardır (sokak lambaları, ışıqlı dedektrleri vs).



$$\delta n(t) = \Delta n e^{-\alpha_p p_0 t} = \Delta n e^{-t/\tau_n}$$

$\tau_n$ =yeniden birleřme yarımr

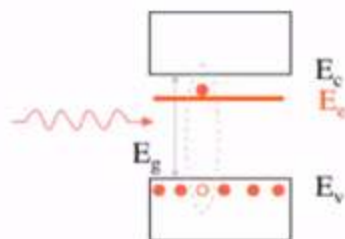
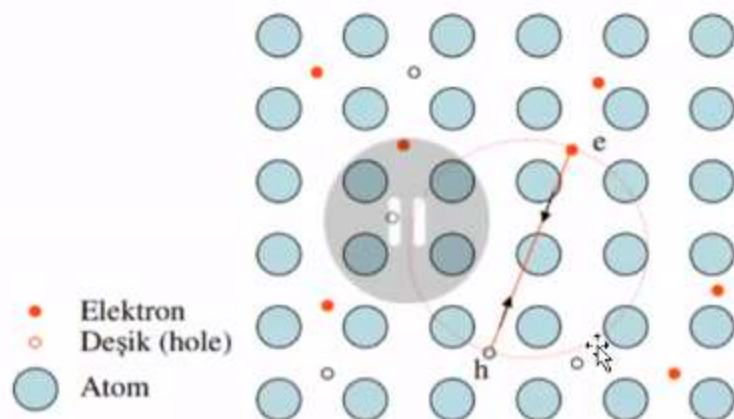


$$\text{İletkenlik } \sigma(t) = q[n(t)\mu_n + p(t)\mu_p]$$

# 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.



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

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

[https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod\\_resource/content/2/Bolum-13.pdf](https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod_resource/content/2/Bolum-13.pdf)