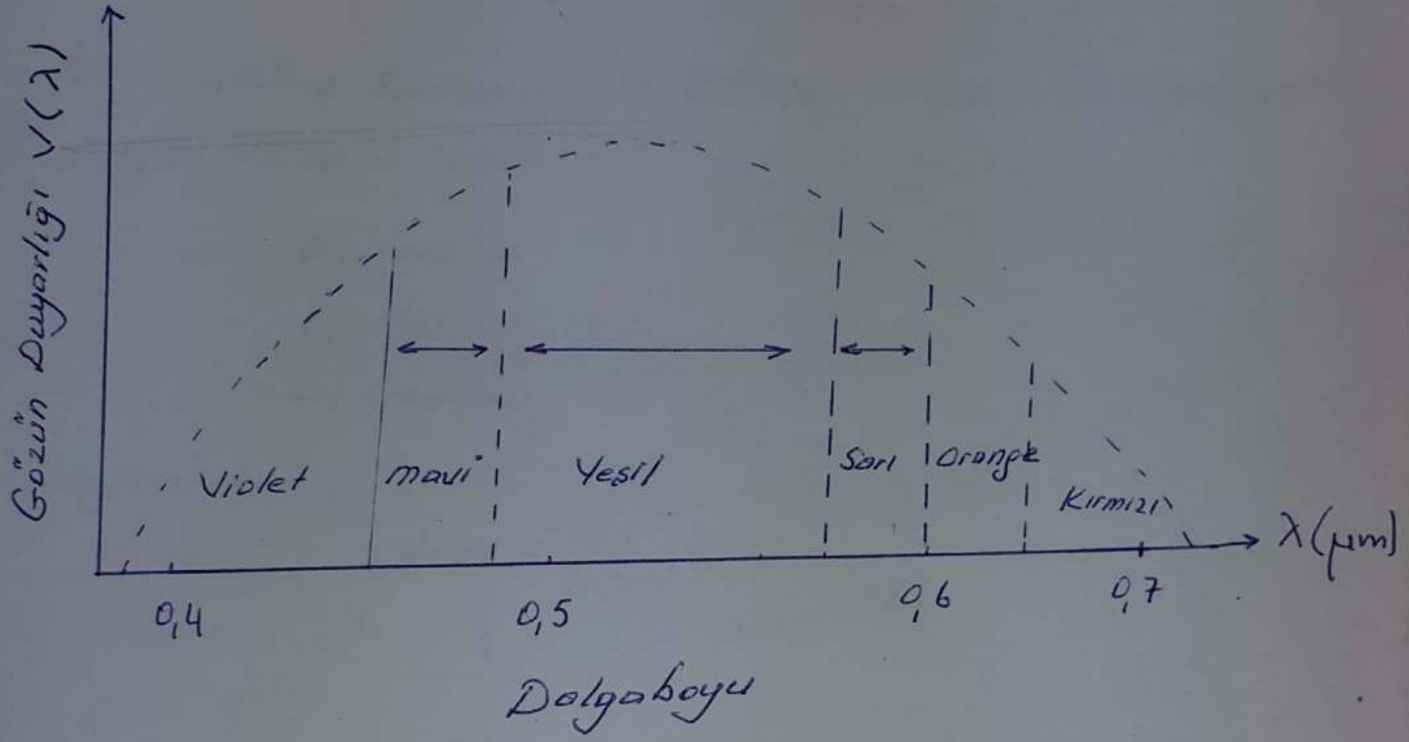


# Yarıiletken Fiziği ~ OPTİK ~

6. Hafta

1



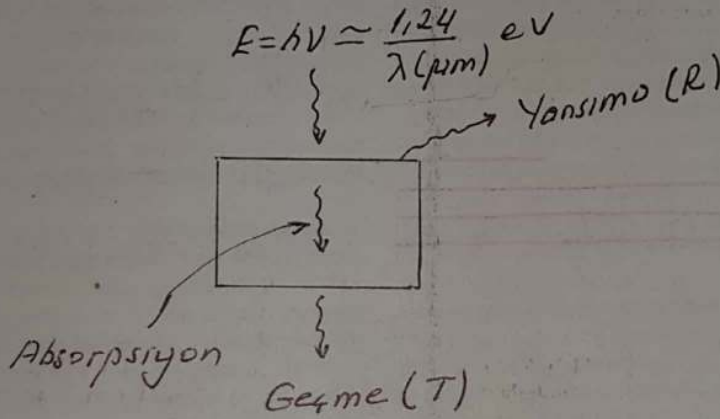
Bekir, 2° lik bakış açısında insan gözünün duyarlılığının görünür ışığın dalgaboyuna bağlı değişimini göstermektedir.

## - Foton-Yarıiletken Etkileşmesi

Bir yarıiletken üzerine enerjisi  $h\nu$  olan bir ışık (Elektromanyetik dalga) düştüğü zaman ;

- a.) Yansım
- b.) Absorpsiyon
- c.) Geçme

olayları olur.



Bir yarıiletkenin optik özellikleri kompleks kırma indisi ile karakterize edilir.

$$n^* = n_r - ik = \sqrt{\epsilon} \rightarrow \text{Dielektrik fonksiyonu}$$

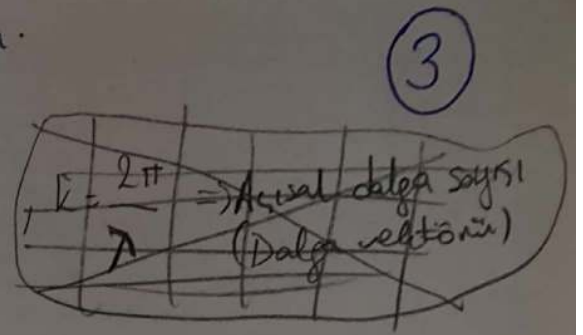
Kırma indisinin reel kısmı ( $n_r$ ) ışığın yarıiletken içinde yayılma hızını belirler. Yani;

$$n_r = \frac{c}{v}$$

(k)

Kırma indisinin sanal kısmı ise zayıflama katsayısı olarak bilinir ve ışığın absorplanmasını belirler.

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \Rightarrow \text{gerçek Absorpsiyon katsayısı}$$



(3)

Absorpsiyon katsayısı  $\alpha$ , ışığın dalga boyunun kuvvetli bir fonksiyonudur.  $\alpha$ ,

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{\gamma}$$

olarak tanımlanır. Burada  $\gamma$  bir sabit olup

$$\gamma = \frac{1}{2} \text{ direkt band aralıklı yarıiletkenler için}$$

$$\gamma = \frac{3}{2} \text{ indirekt " " " " " "}$$

Yarıiletken üzerine düşen ışık için Yansım ve Geçme olaylarında yarıiletkenin kırma indisi cinsinden ifade edilebilir.

Bir Yarıiletken için Yansım Katsayısı ( $R$ ),

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

ve Geçirme katsayısı ( $T$ );

$$T \equiv (1 - R^2) \exp(-\alpha L)$$

ile verilir. Burada  $L$  yarıiletken malzemenin kalınlığıdır.

Bir daha çok; ışığın absorplanan kısmı ile ilgileniriz.

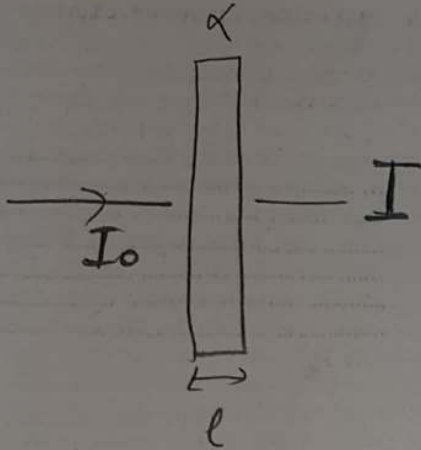
Eğer yarıiletkenin band aralığına eşit yada daha büyük olan bir ışık yarıiletken üzerine düştüğü zaman; ~~Elektron~~ ışık absorplanır ve Elektron-boşluk çifti oluşur (Bunlara exciton denir) ve ışığın şiddeti uzaklıkla azalır.

(4)

Gelen ışığın şiddeti ( $I_0$ ) yarıiletken içinde olduğu yola ( $l$ ) bağlı olarak

$$I(l) = I_0 \exp(-\alpha l)$$

ifadesine göre zayıflar

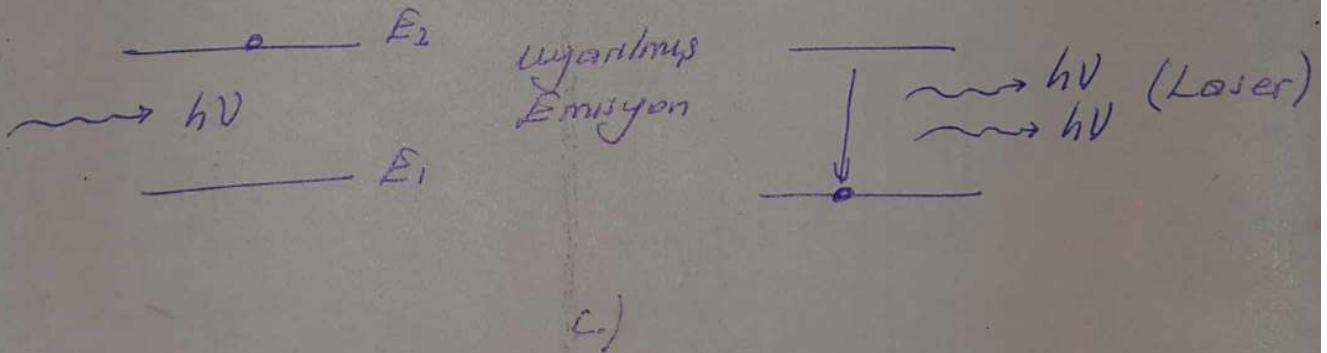
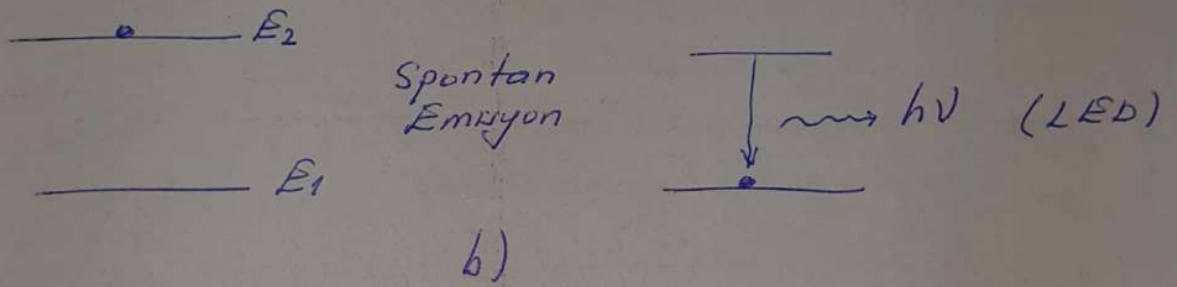
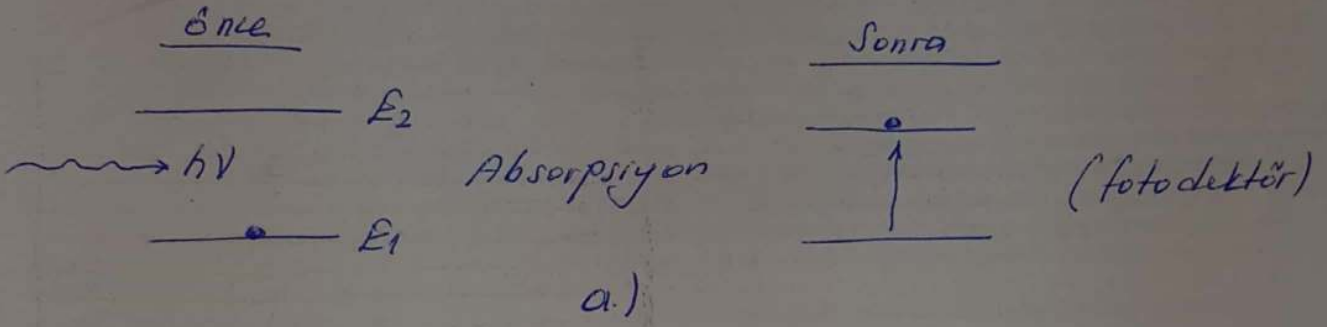


$I_0$  = Gelen ışık şiddeti

$I$  = Geçen ışık şiddeti



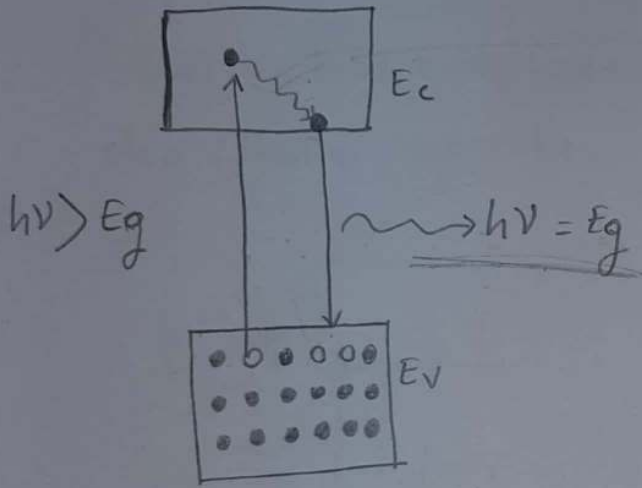
Katıdaki bir elektron ile fotonun etkileşmesi durumunda temel olarak 3 optik proses vardır. Bunlar;



Isıl dengede iletim ve valans bandındaki taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklıkla ve yarık bant enerjisinin bir fonksiyonu olarak tanımlanır.

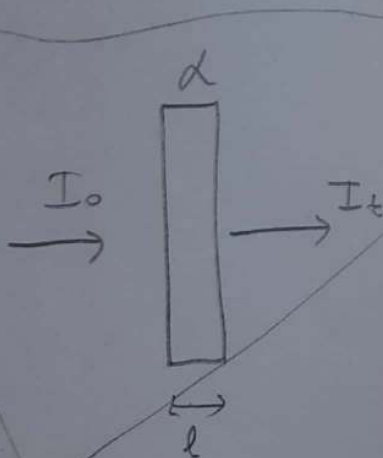
$$n \propto e^{-E_g/2kT}$$

Dış bir etki ile (örneğin ısıtık) uyarılma yapıldığında iletim ve valans bantta fazla taşıyıcılar ( $e^-$ -boşluk çifti) oluşur. Bu fazla taşıyıcılar ısıl dengede olmadıkları için, dış etki ortadan kalkınca tekrar birleşerek denge durumuna gelmek isterler.



Eğer yarıiletken üzerine düşen ısıtım enerjisi, bant enerjisinden daha büyükse uyarılan  $e^-$  lar, iletim bandında yüksek bir enerji seviyesine çıkar. Enerjisinin bir kısmını kristale aktararak iletim bandının dibine iner. ve  $E_g$  enerjisine eşit bir ısıya yaparak valans bantta geri döner.

\* ısıtım, yarıiletken içinde ne kadar soğurulacağı malzemenin soğurma katsayısına ( $\alpha$ ) ve kalınlığına bağlıdır.



$$I_t = I_0 e^{-\alpha l}$$

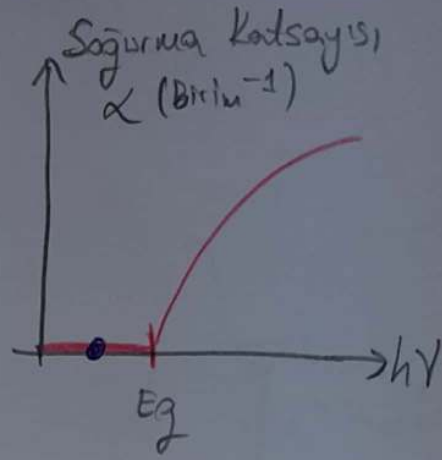
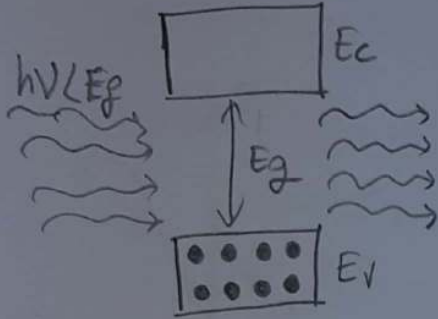
$I_0$  = Gelen ısıtım şiddeti

$I_t$  = Geçen ısıtım şiddeti

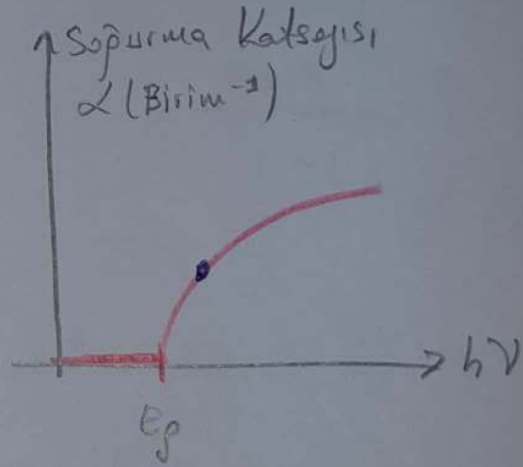
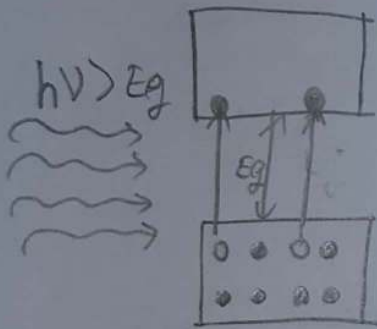
$\alpha$  = soğurma (yutma) katsayısı (absorbsiyon)

Söğurma katsayısı  $\propto$  frekans böğlölür.  $\propto (h\nu)$  (7)

\* Enerjisi bant aralığının altında olan fotonlar söğürölmeden malzemeden gezerler.



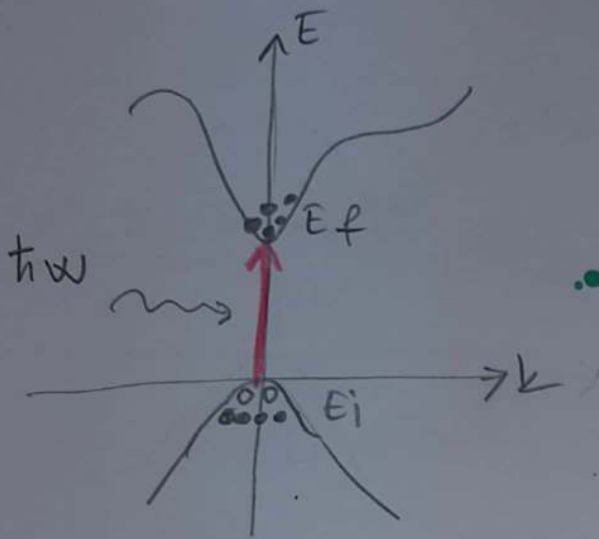
\* Enerjisi bant aralığından böğölük olan fotonlar söğürölür.



(8)

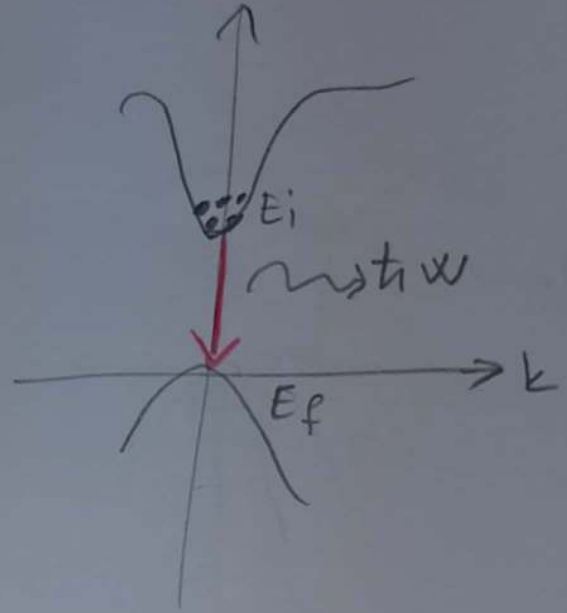
# Direk Optik Geçişler

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



Sapırma

$$k_i \approx k_f$$



Isırma

$$k_i \approx k_f$$

Enerji korunumu:  $E_i + h\nu = E_f$

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

Fotonik bölgede foton momentumu çok küçük olduğundan  $q \approx 0$  kabul edilebilir.

$$k_i \approx k_f$$

$q$ : foton dalga vektörü

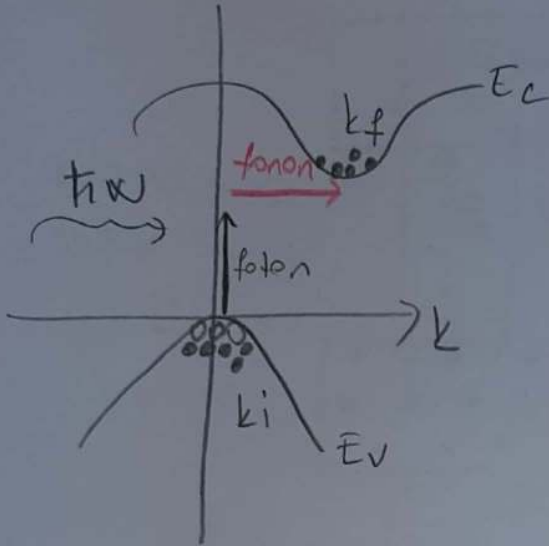
$\omega$ : foton frekansı

$k$ :  $e^-$  dalga vektörü



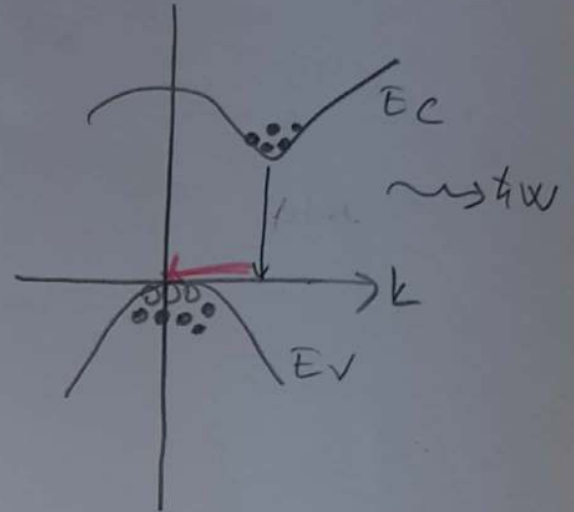
# İndirek Optik Geçişler:

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



Sopurma

$$k_i \pm \Omega = k_f$$



Isıma

$$k_i \pm \Omega = k_f$$

Enerji 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 dalgı vektörü

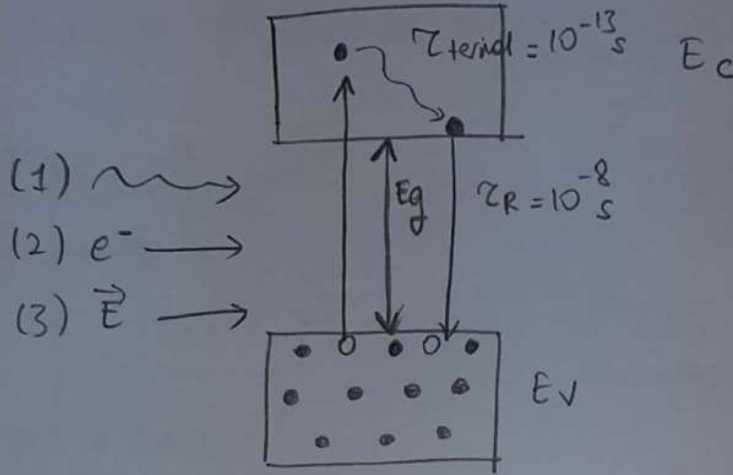
$\omega$ : foton frekansı

$k$ : e<sup>-</sup>nun dalgı vektörü

$\Omega$ : fonon dalgı vektörü

## Lüminesans

Yarıiletkende oluşturan  $e^-$ -boşluk çiftleri meydana geldikten sonra ısıtılabilirli durumlarına dönmeye çalışırlar. Eski durumlarına dönerken kaybettikleri enerjiyi ışıma olarak yayarlar. Buna genel olarak Lüminesans denir.



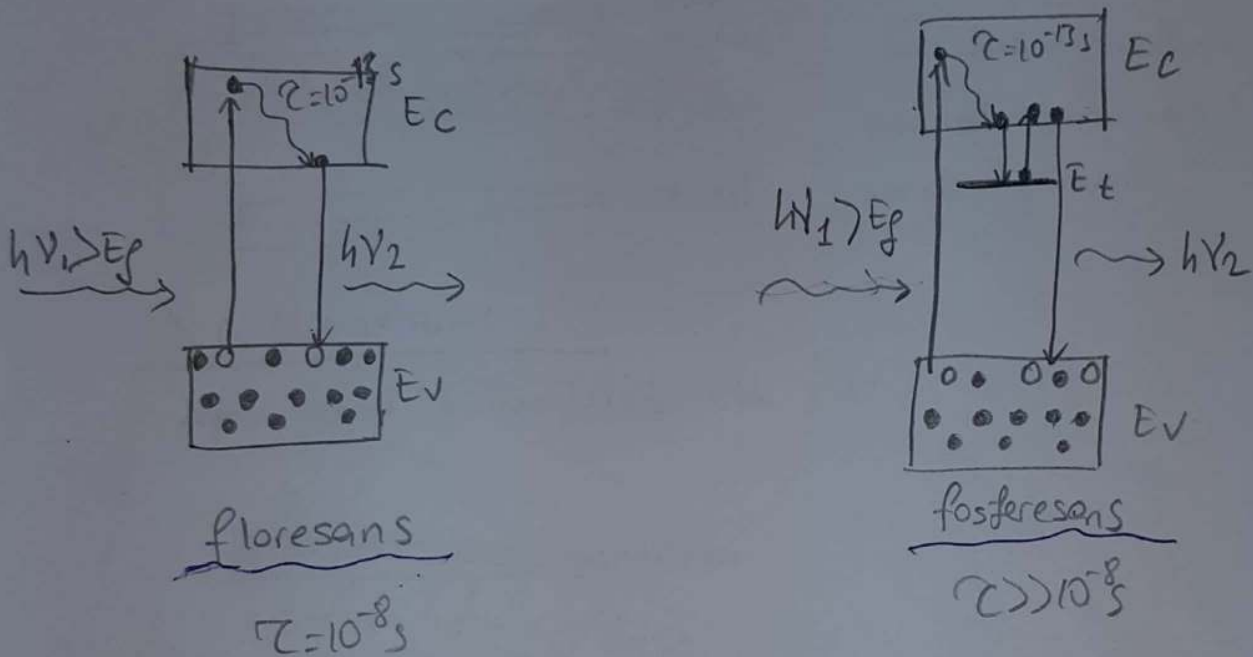
### Lüminesans ışıması çeşitleri:

- 1) Fotolüminesans: Uyarılma fotonlarla yapılır.
- 2) Katotlüminesans: Uyarılma yüksek enerjili  $e^-$  larla yapılır. (veya katot ışıması ile)
- 3) Elektrolüminesans: Uyarılma akım yolu ile yapılır.

## Fotoluminesans:

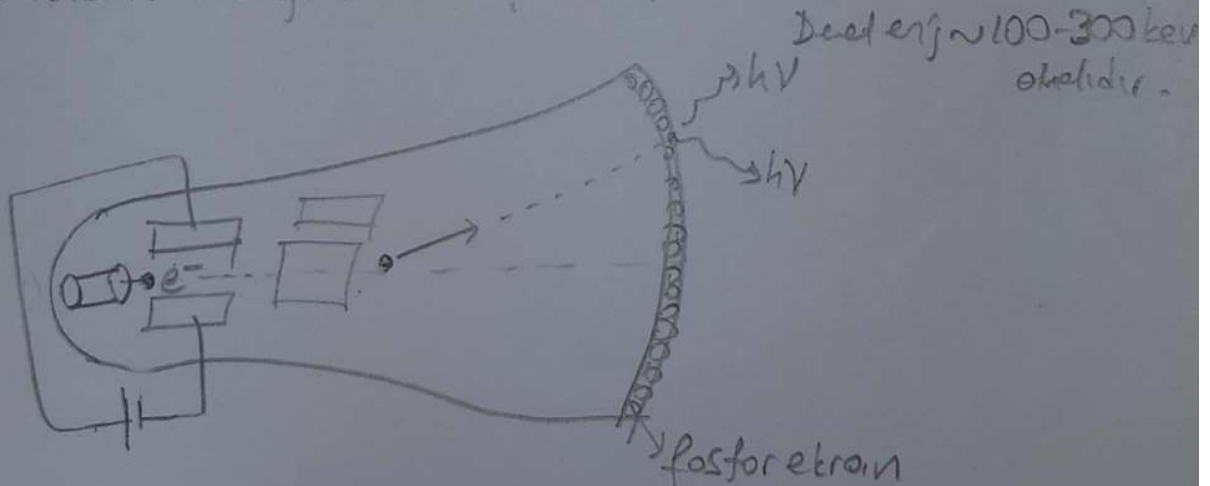
Elektron ve boşluklar uyarıldıktan sonra herhangi bir tutak seviyesine yakalanmadan direkt olarak birleşirler ise floresans oluşur. ( $\tau = 10^{-8} s$ ).

Bazı yarıiletkenlerde bulunan tutaklar bu süreyi uzatabilir. Bu durumda fosforesans oluşur. ( $\tau \gg 10^{-8} s$ ).



## Katodluminesans:

$e^-$  - boşluk çifti ışık yerine yüksek enerjili parçacıklar tarafından oluşturulabilir. Örneğin katot-ışın tüpü kullanılabilir.



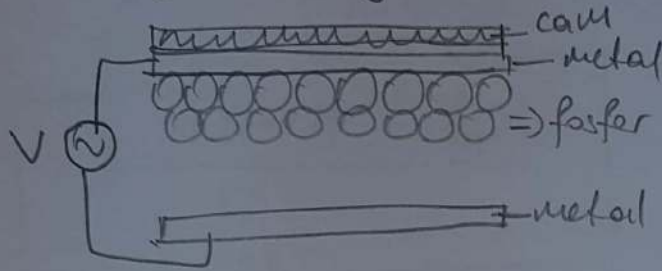
## Elektrolüminesans:

Elektrik gerilimi etkisi ile uyarılma sağlanarak ışık saçılması  
gösterir. İki çeşit olabilir  $\rightarrow$  A.C.  
 $\rightarrow$  D.C.

### A.C. Lüminesans:

Alternatif akım uygulanarak elde edilir.

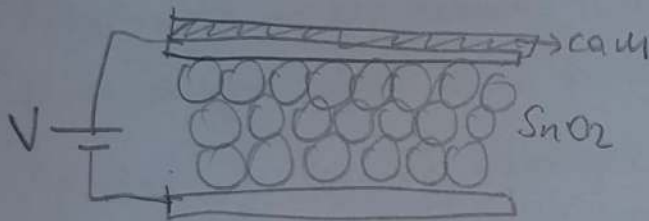
Örneğin; A.C. uygulanan bu sisteme ışık saçılması elde edilir.



Sacılma titrellene veya  
normal mekanizma ile  
meydana gelebilir.

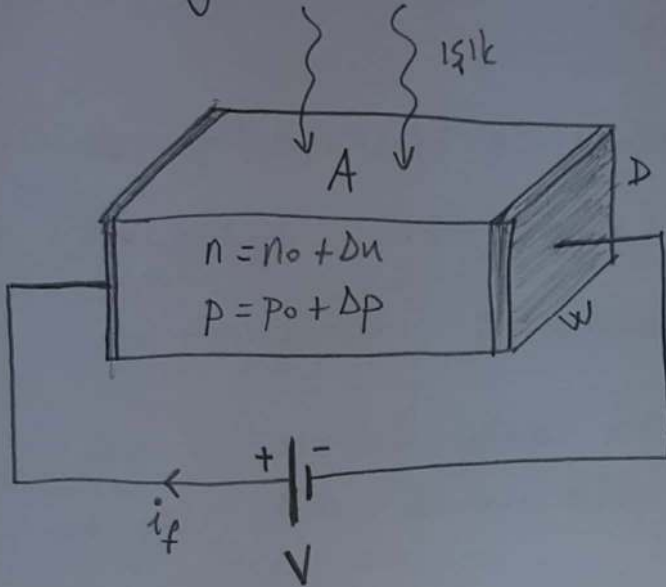
### D.C. Lüminesans:

Düzenli akım kullanılarak elde edilir.





Fotoiletkenlik, foton soğurulduğunda üretilen serbest taşıyıcıların sayısındaki artıstan sonuçlanan elektrik iletkenliğindeki değişime (artma veya azalma) olarak tanımlanır.



Fotodetektörler tipik olarak metal - fotoiletken - metal yapıya sahiptir. İki elektrot arasına, uygun soğurma katsayısına sahip bir yarıiletken yerleştirilir. Fotonlar  $e^-$  - boşluk çiftleri tarafından soğurulur.

Yarıiletkenin, iletkenliği artar. Şekildeki gibi ifotoakımı oluşur.

Fotoiletkenin ani bir basamak ışıyı ile aydınlatıldığını varsayalım. Birim saniyede, birim alana düşen foton miktarı  $r_f$  olsun.

$$r_f = \frac{L_0}{h\nu} \quad , \quad L_0: \text{ışık yoğunluğu}, h\nu: \text{foton enerjisi}.$$

Soğurulan ışık yoğunluğu,  $L_{ab}$  (birim saniyede, birim alan başına);

$$L_{ab} = T \cdot L_0 [1 - \exp(-\alpha D)]$$

$T$ : hava-yarıiletken yüzey geçirgenliği.

$\alpha$ : soğurma katsayısı

$D$ : kalınlık

Fotoüretim işleni %100 verimli değildir. Her saçurulan foton, serbest  $e^-$ -boşluk çifti üretmez.  $V$ : hacim  $\frac{W}{L}$ : şekilli uzunluklar.

$$I_{\text{foton}} = \frac{e\eta\lambda Z(M_e + M_p)T \cdot L_0 [1 - \exp(-\alpha D)]}{hc} \left(\frac{W}{L}\right) V$$

Herhangi bir andaki  $e^-$  konsantrasyonu  $n$  (fotoüretimde), karandilıklaki (termal dengede)  $e^-$  "  $n_0$  ise;

$\Delta n = n - n_0$  dir. Fotoüretim için  $\Delta n \approx \Delta p$  dir.

Ayrıca sistende sürekli bir biçimde  $e^-$ -boşluk çifti oluşumu ve yok oluşu devam eder.

$$\left\{ \text{Fazlalık } e^- \text{ konsantrasyonu} \right\} = \left\{ \text{Fazlalık } e^- \text{ yenisiden oluşumu oranı} \right\} - \left\{ \text{Fazlalık } e^- \text{ yenisiden birleşim oranı} \right\}$$

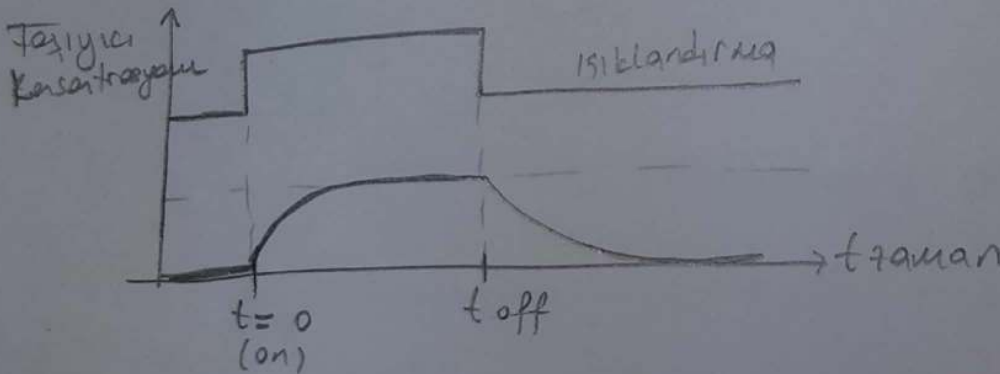
\* Bir yarıiletkenin iletkenliği  $\sigma = ne\mu_e + pe\mu_p$  idi.

iletimdeki değişim ise fotoiletkenliktir.

$$\Delta \sigma = \sigma_{\text{foton}} = \Delta ne\mu_e + \Delta pe\mu_p \text{ yada } \Delta n \approx \Delta p \text{ olduğundan;}$$

$$\sigma_{\text{foton}} = \Delta ne(\mu_e + \mu_p) \text{ olarak ifade edilebilir.}$$

\* Basamak şeklinde aydınlatmada; taşıyıcı konsantrasyonu şekilli gibi değişir.



Not:  
 • Fotoiletken kazanç  
 • Sığırma sınırlı fotoiletkenlik  
 • Difüzyon sınırlı " " " " " "  
 gibi başlıklar eklenmeli mi?

## - Fotoiletkenlik

Yarıiletken aydınlatılmadan önceki iletkenliği

$$\sigma_0 = e(n_0\mu_e + p_0\mu_p)$$

ile verilir. Yarıiletken aydınlatıldığında Serbest taşıyıcı Sayıları  $\Delta n$  ve  $\Delta p$  kadar artarsa (absorpsiyon sonucu) iletkenlik;

$$\sigma = \sigma_0 + e(\mu_e \Delta n + \Delta p \mu_p)$$

$$\Delta n \approx \Delta p$$

$$\sigma = \sigma_0 + e \Delta n (\mu_e + \mu_p)$$

Şimdi;  $\Delta n$  yi hesaplamamız lazım;

Taşıyıcı konsantrasyonunun zamanla değişimi

$$\frac{dn}{dt} = g - \frac{n - n_0}{\tau}$$

ile verilir.

$g$  : Absorpsiyon sonucu elektron oluşma hızı

$\frac{n - n_0}{\tau}$  : Elektron rekombinasyon hızı

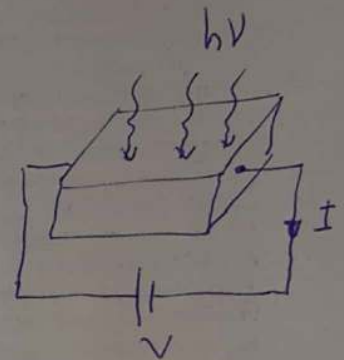
Denge durumunda;

$$\frac{dn}{dt} = 0 \text{ olur ve}$$

$$\Delta n = n - n_0 = g\tau$$

$\tau$  : Rekombinasyon ~~ve~~ Zamanı

Elektron generation hızı ( $g$ ), Gelen ışığın şiddeti ve absorpsiyon katsayısına bağlı olacaktır.



Birim zamanda yüzeye düşen foton sayısı  $N(\nu)$  ise; ve absorplanan her foton bir elektron-boşluk çifti oluştursa; birim zamanda birim hacimde oluşan elektron-boşluk çifti

$$g = \frac{\alpha e N(\nu)}{\nu}$$

Gelen foton sayısı ışığın şiddeti ile orantılıdır;

$$N(\nu) = \frac{I(\nu) A}{h\nu}$$

$$g = \frac{\alpha}{\nu} e \frac{I(\nu) A}{h\nu}$$

$$= \frac{\alpha I(\nu)}{h\nu}$$

$$\Delta n = g\tau = \frac{\alpha I(\nu)}{h\nu} \tau$$

$$\sigma = \sigma_0 + e \frac{\alpha I(\nu)}{h\nu} \tau (\mu_e + \mu_p)$$

olacaktır.