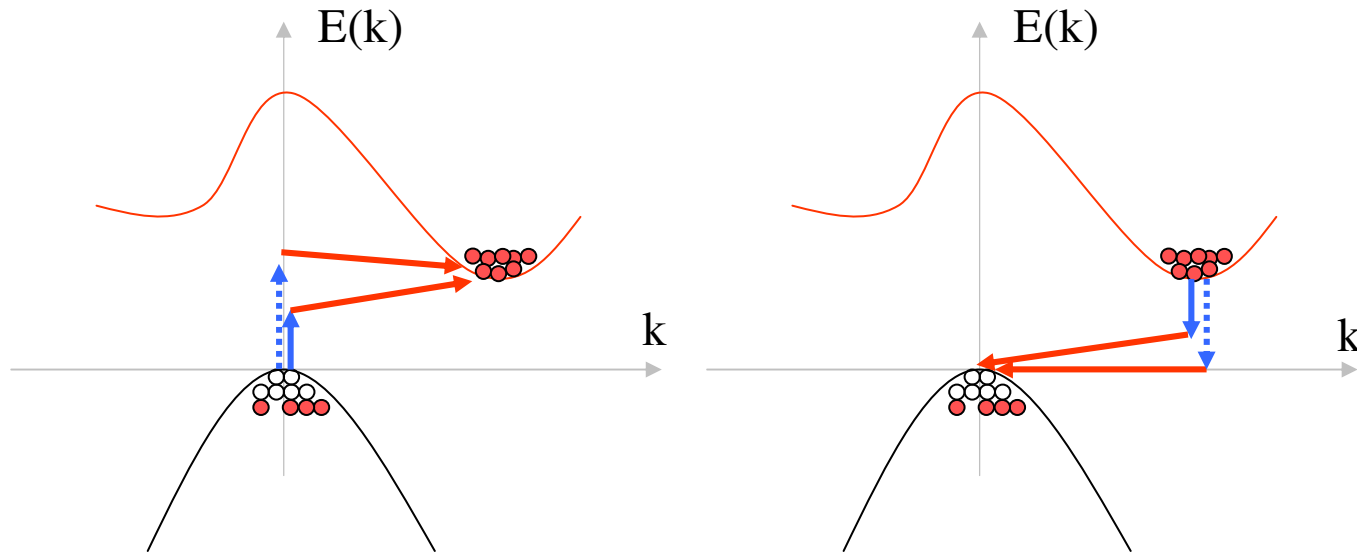


# 13. Ders

## Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri



Bu bölümü bitirdiğinizde,

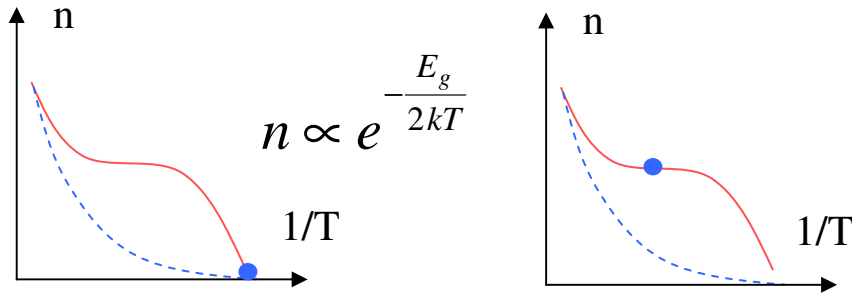
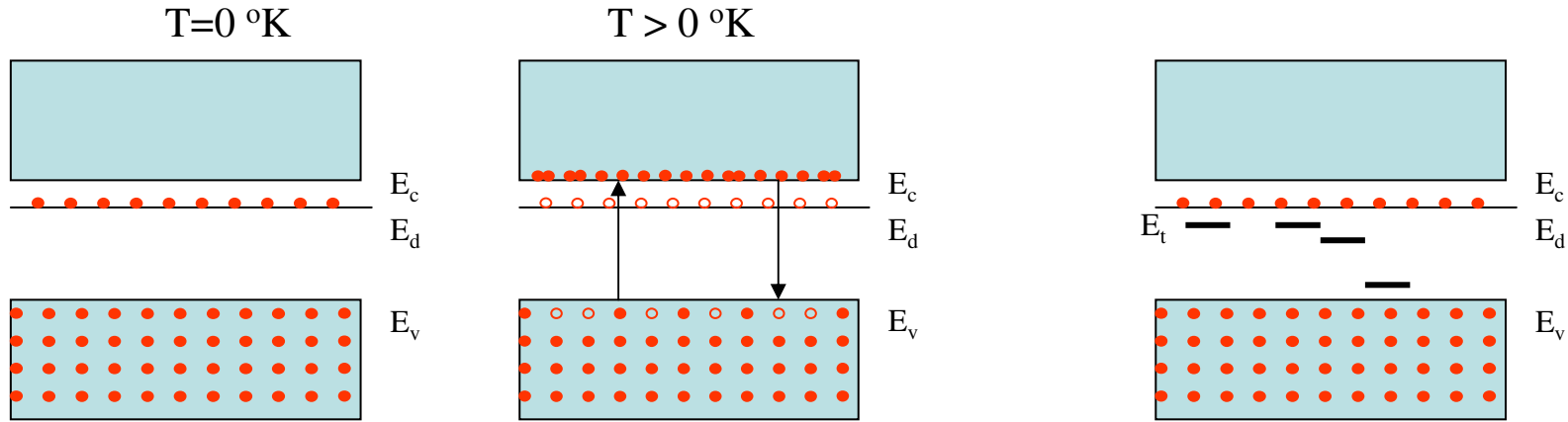
- Optik soğurma,
- Optik geçişler,
- Lüminesans,
- Fotoiletkenlik,
- Eksiton,
- Kuantum Stark etkisi

konularında bilgi sahibi olacaksınız.

# Onüçüncü Ders: İçerik

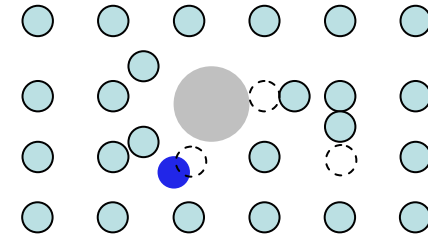
- Optik Soğurma
- Optik Geçişler
- Lüminesans
- Fotoiletkenlik
- Eksiton
- Kuantum Stark Etkisi

# Taşıyıcı Yoğunluğu



$T > 0\text{ K}$  sıcaklıklarında iletim bandında serbest taşıyıcılar bulunmaktadır. Serbest taşıyıcıların yoğunluğunu sıcaklık ve yasak bant aralığı belirler.

Elektronik ve optik devre elemanları için istenmeyen kristal kusurları



Yasak bant aralığında kusurlardan kaynaklanan enerji seviyeleri elektronlar için tuzak oluşturur. Bu enerji tuzakları hem taşıyıcı sayısını azaltırlar hem de banttan banta elektron geçiş sürelerinin artmasına neden olduklarından istenmeyen durumlardır. Ancak bazı durumlarda (optik uygulamalarda) bu tuzaklar faydalı olabilir. 4

# Optik Soğurma-1

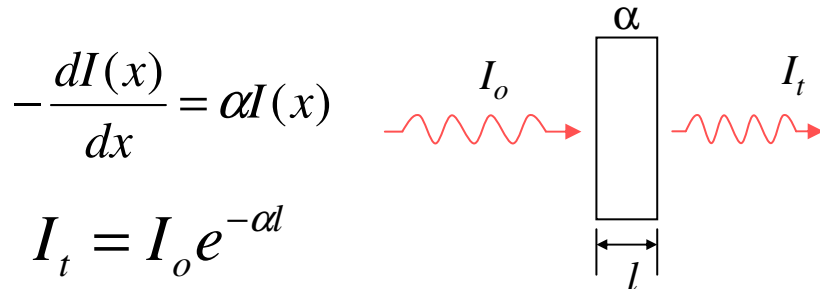
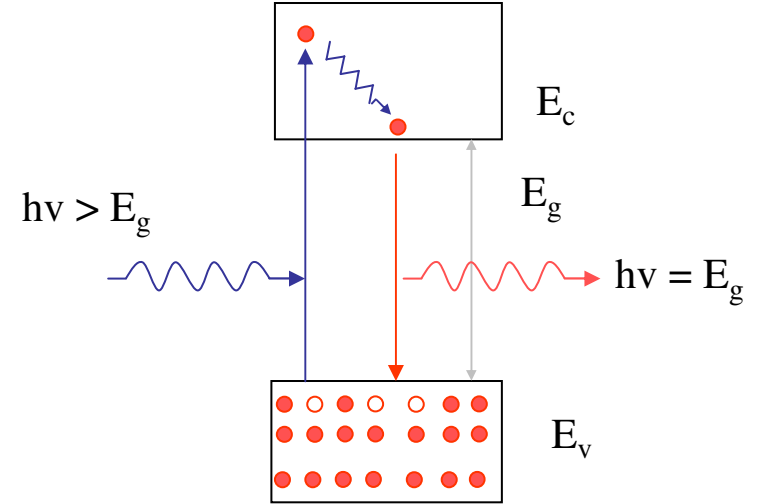
Isıl dengede iletim ve değerlik bandındaki taşıyıcı yoğunluğu sıcaklığın ve yasak bant enerjisinin fonksiyonudur.

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

Dış bir etki ile (örneğin ışık) uyarılma yapıldığında iletim ve değerlik bandında **fazlalık** taşıyıcılar (elektron ve deşik) oluşur. **Fazlalık taşıyıcılar** ısıl 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 ışıma yapar.

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

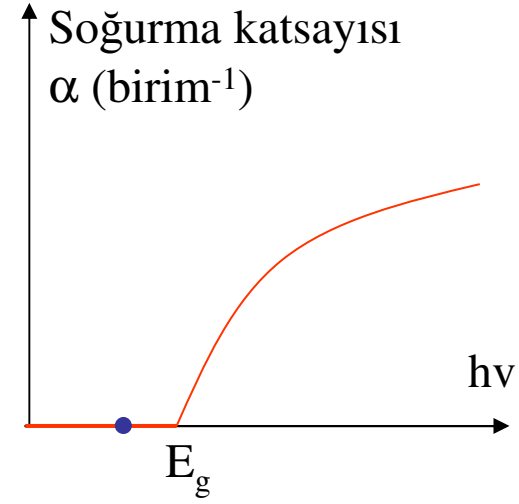
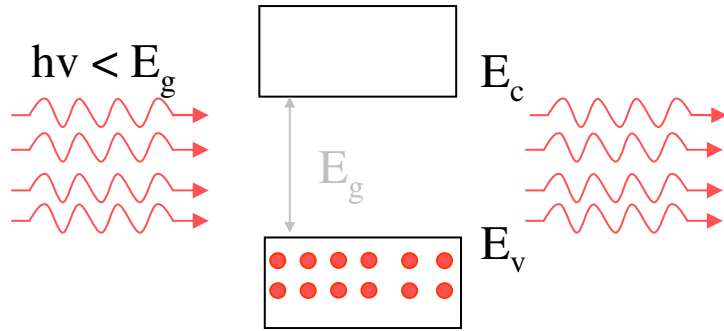


$I_o$ =gelen ışığın şiddeti  
 $I_t$ =geçen ışığın şiddeti  
 $\alpha$ =soğurma katsayısı

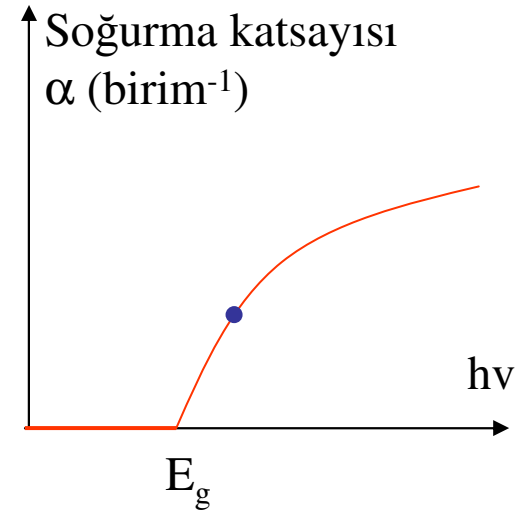
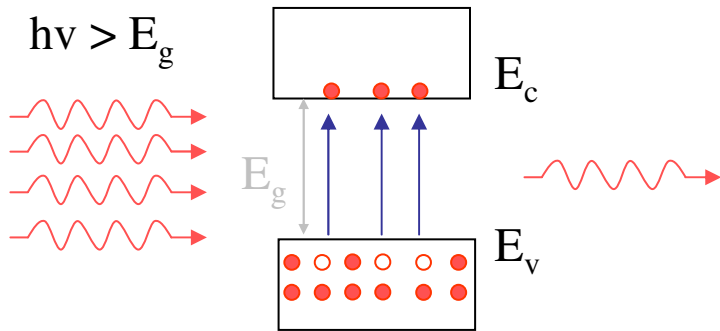
# Optik Soğurma-2

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

Enerjisi bant aralığının altında olan fotonlar soğrulmadan malzemedan geçerler.



Enerjisi bant aralığının üstünde olan fotonlar ise soğrulur.

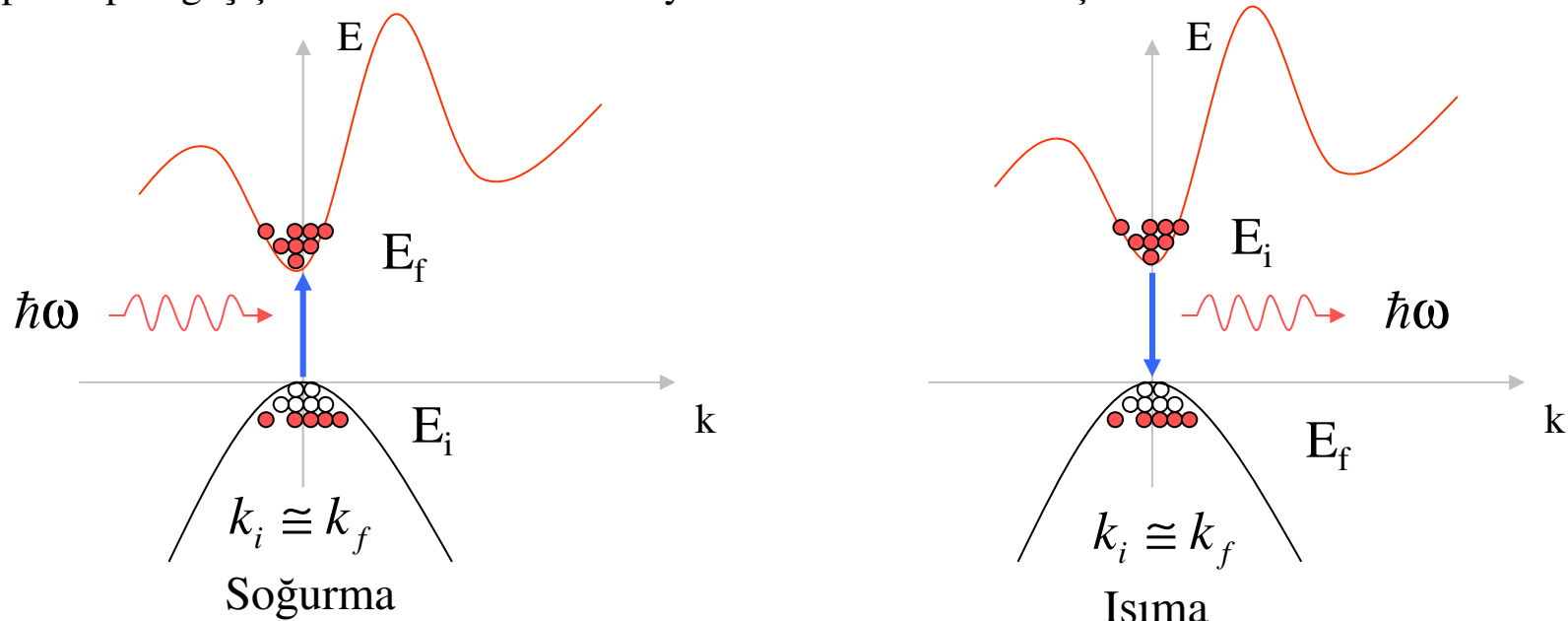


# Optik Geçişler-Doğrudan (Direct) Geçişler

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  $q \approx 0$  7

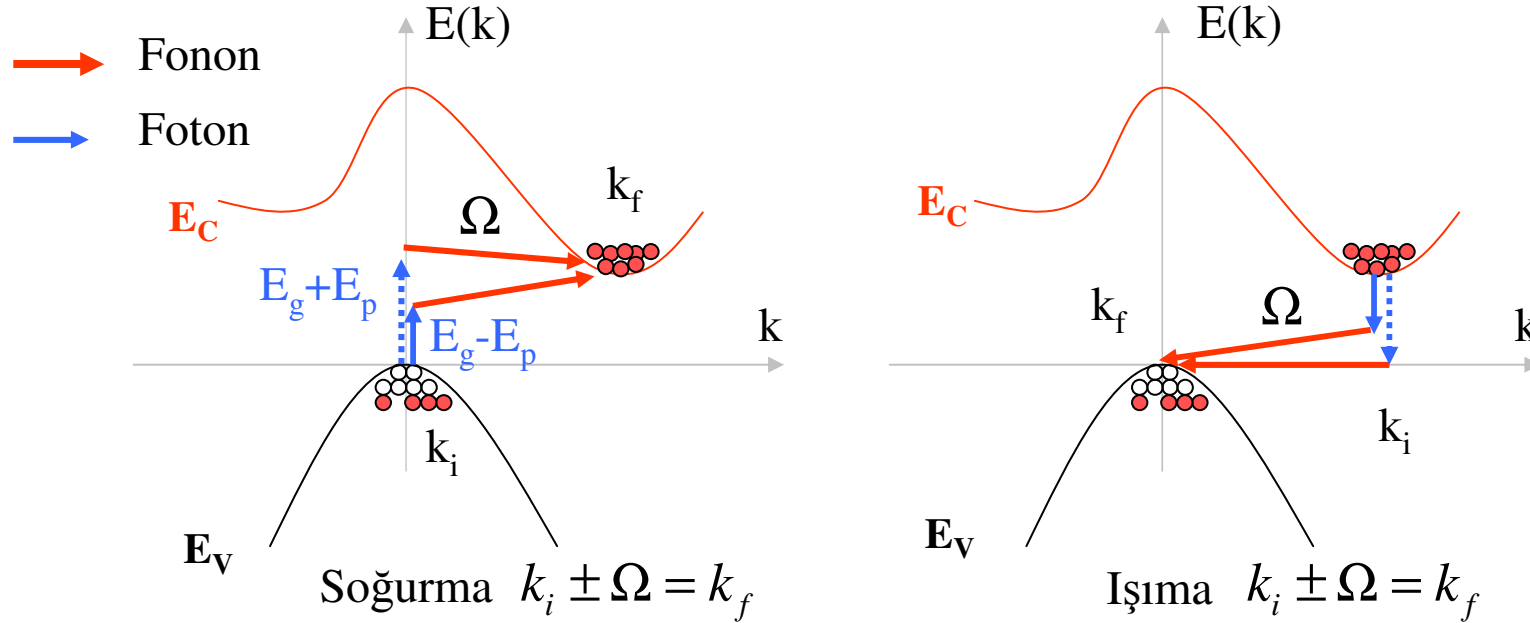
$$\Rightarrow k_i \approx k_f$$

# 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

$\omega$  = foton frekansı

$k$  = elektronun dalga vektörü 8

$\Omega$  = fonon dalga vektörü



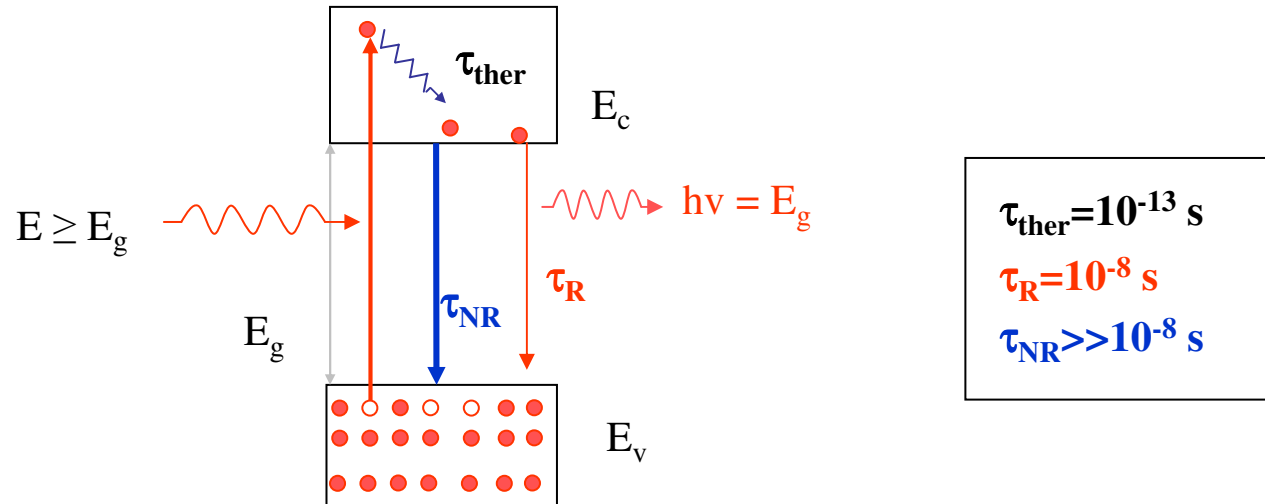
# Lüminesans-1

Yarıiletkenlerde oluşturulan *elektron-deşik* fazlalık çiftleri oluşturulduktan hemen sonra ısıl 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,  $\tau_{\text{R}}=10^{-8}$  s) veya foton salmadan başka şekilde ( $\tau_{\text{NR}} \gg \tau_{\text{R}}$ ) 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.

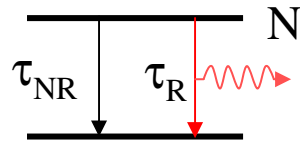
$$I^{direk}(\hbar\omega) \propto (\hbar\omega - E_g)^{1/2} e^{-(\hbar\omega - E_g)/kT}$$

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

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

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

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

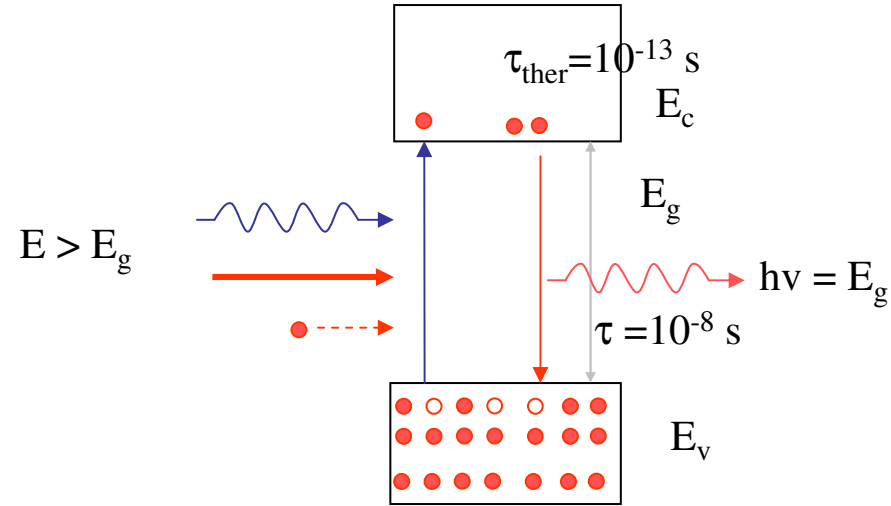


$$\left( \frac{dN}{dt} \right)_{total} = -\frac{N}{\tau_R} - \frac{N}{\tau_{NR}} = -N \left( \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{NR}} \right)$$

**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 ışımalar üç sınıfa ayrılır:

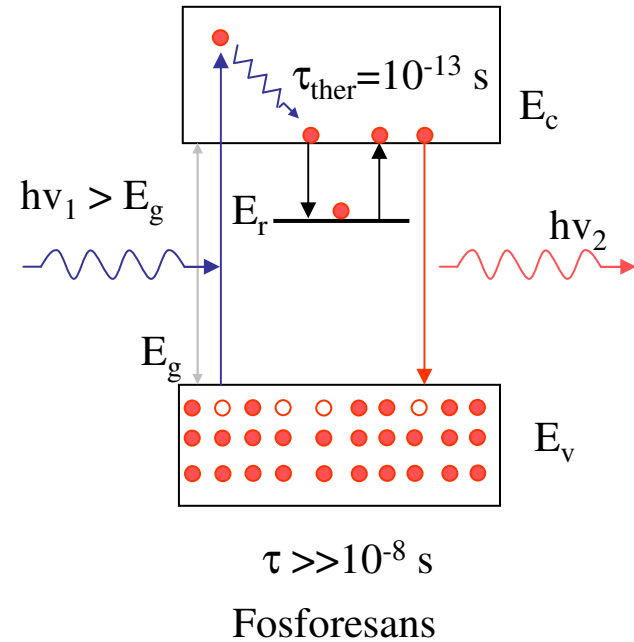
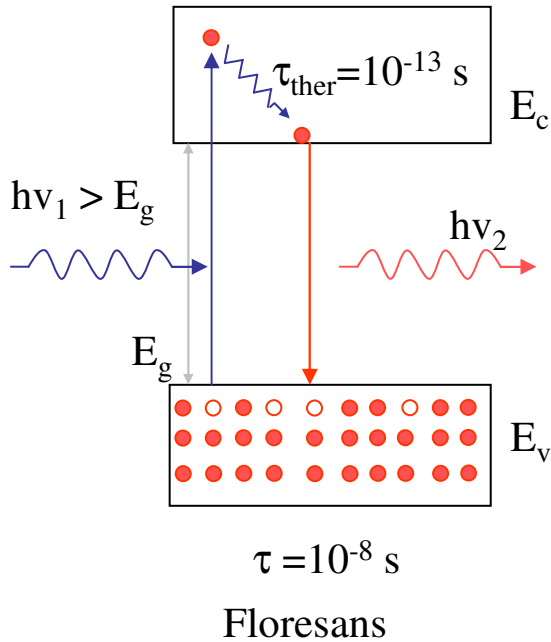
- i) **Fotolüminesans** (Photoluminescence): Uyarılma fotonlarla
- ii) **Katodlüminesans** (Cathodoluminescence): Uyarılma yüksek enerjili elektronlarla
- iii) **Elektrolüminesans** (Electroluminescence): Uyarılma akım yolu ile

# Fotoluminesans

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

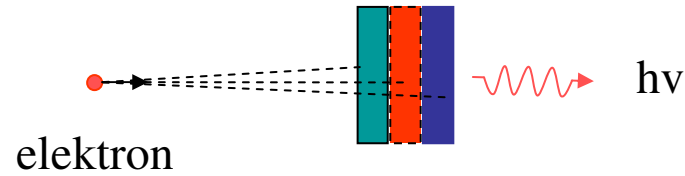
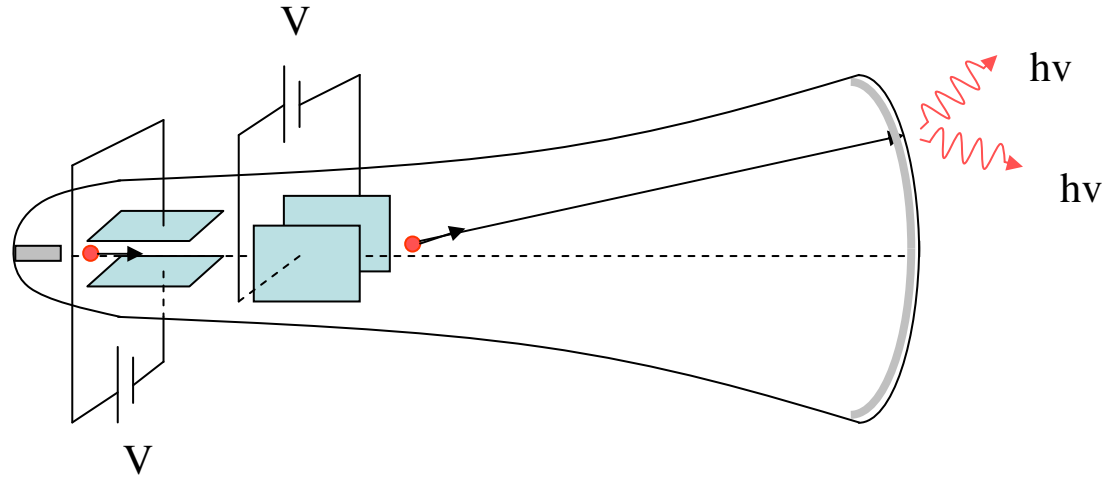
Elektron ve deşikler uyarıldıktan hemen sonra bant aralığında bulunan herhangi bir tuzak seviyesine yakalanmadan doğrudan olarak (direk) birleşmesi ile oluşan yayılmaya **floresans** denir. Bu olaydaki zaman sabiti oldukça küçüktür ( $10^{-8}$  s).

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



# Katotlüminesans

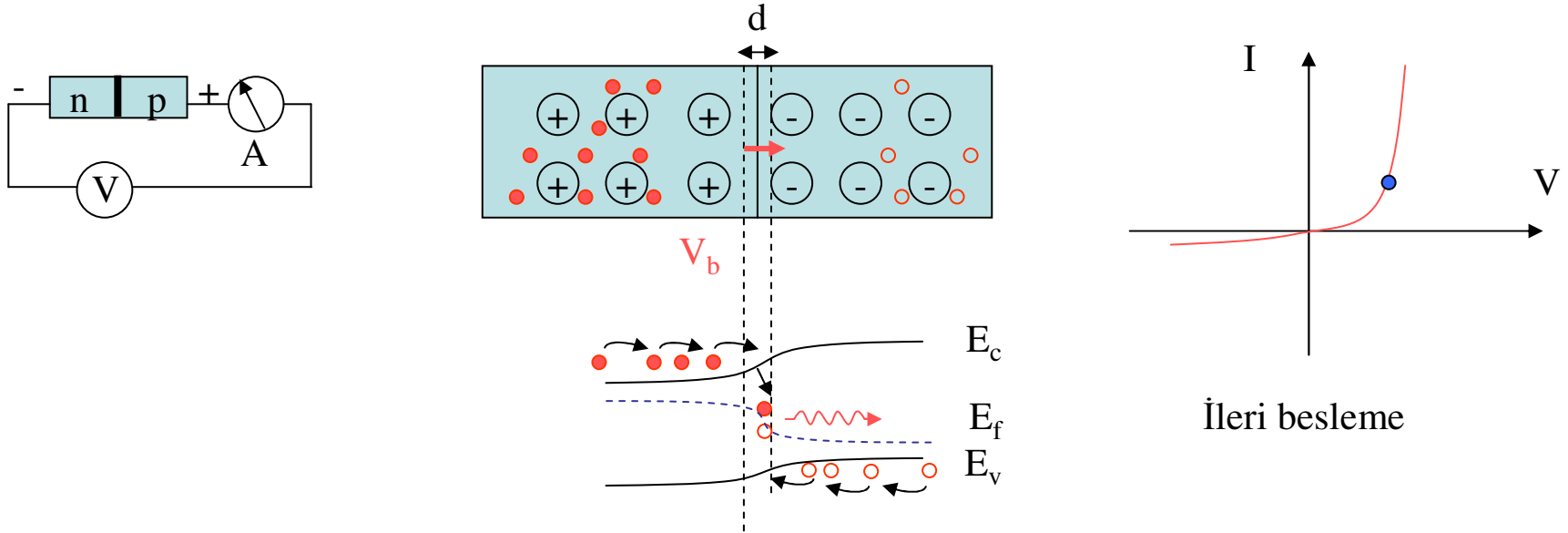
Fazlalık elektron ve deşik çiftleri ışık yerine yüklü enerjili parçacıklar tarafından da oluşturulabilir. Örnek olarak katot-ışını tüpü (Cathode-Ray Tube) verilebilir.



Renkli CRT ekranlar

# Elektrolüminesans

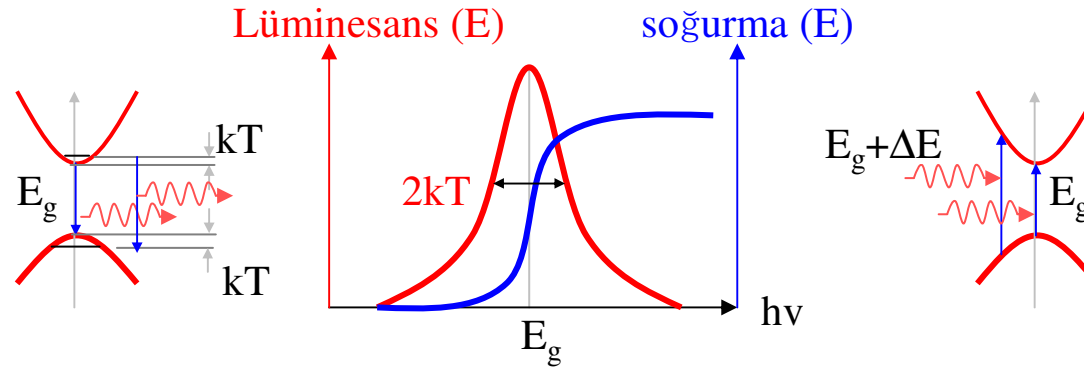
Elektrik yüklerinin enjeksiyonu ile oluşturulan ışımalara denir. Örneğin LED ve yarıiletken lazerlerde elektrik akımı tüketim (depletion) bölgelerine elektron ve deşiklerin enjekte edilerek bu taşıyıcıların tekrardan birleşerek foton salmalarını sağlar.



# Uygulamalar

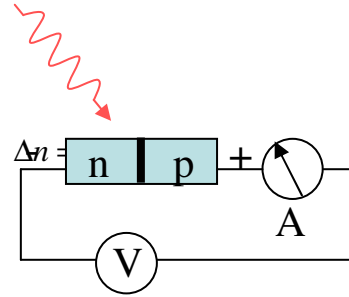
Soğurma ve foton yayma ters işlem olarak gözükse de pratikte farklılıklar gösterir.

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.



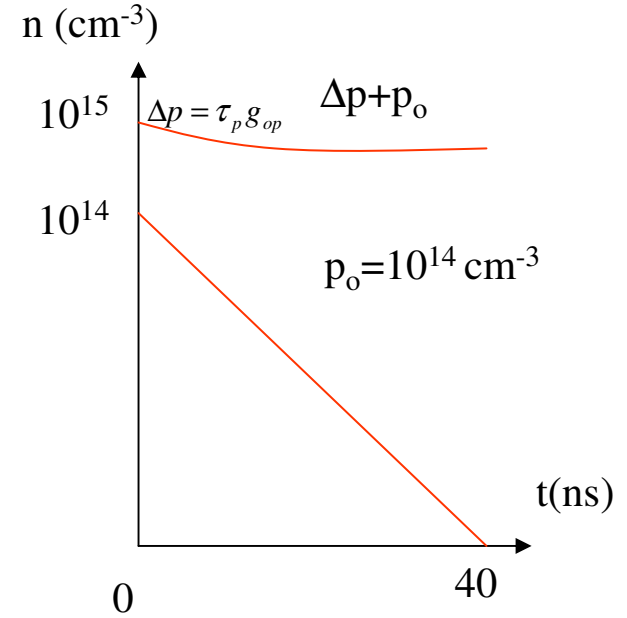
# Fotoiletkenlik

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



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

$\tau_n$  = yeniden birleşme yarıömrü



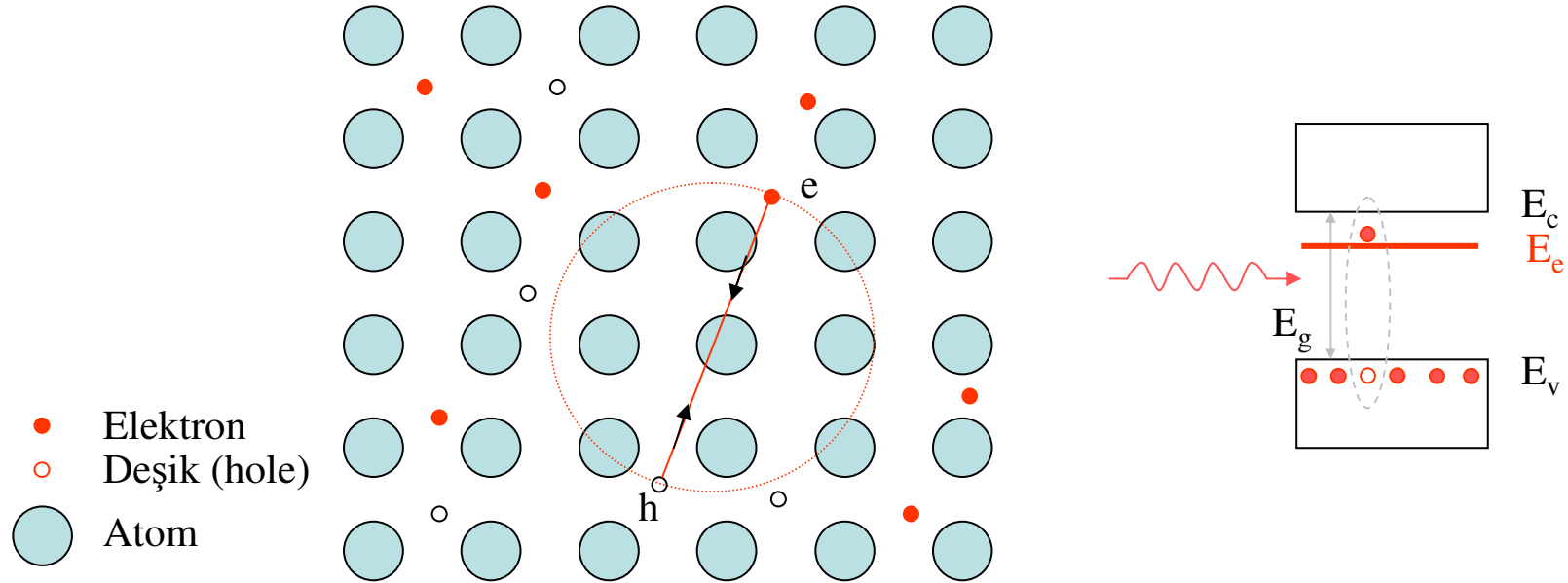
İletkenlik  $\sigma(t) = q [n(t)\mu_n + p(t)\mu_p]$



# 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.



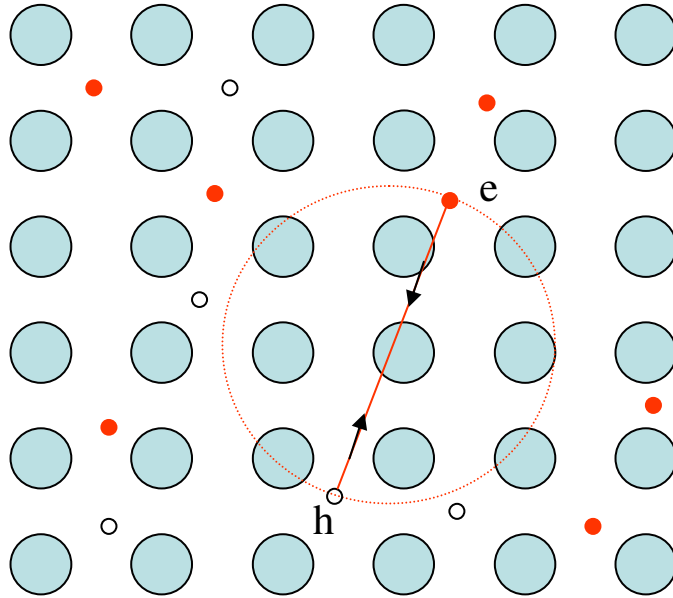
Eksiton, kristal içinde dolaşıp enerji iletebilir; ancak yüksüz olduğu için yük iletmez.

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

# Eksiton-2

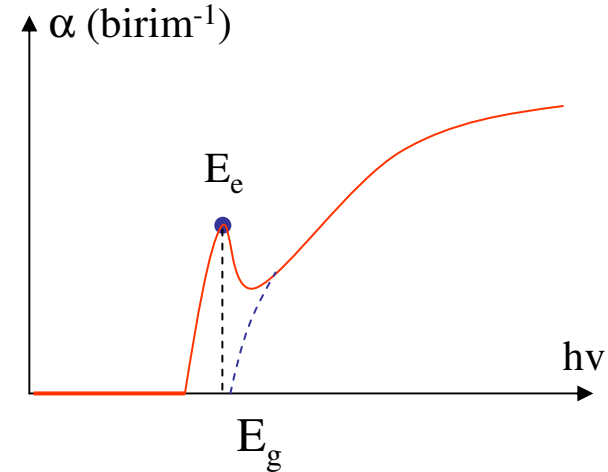
Eksiton enerji seviyeleri çok küçük olduğu için (meV mertebesinde) oda sıcaklığında ( $kT=26$  meV) deneysel olarak gözlenemez (fonon yoğunluğu sıcaklıkla arttığı için ( $E_{\text{fonon}}$  (GaAs) $\approx 36$  meV) fononlar eksitonları hemen iyonlaştırırlar).

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

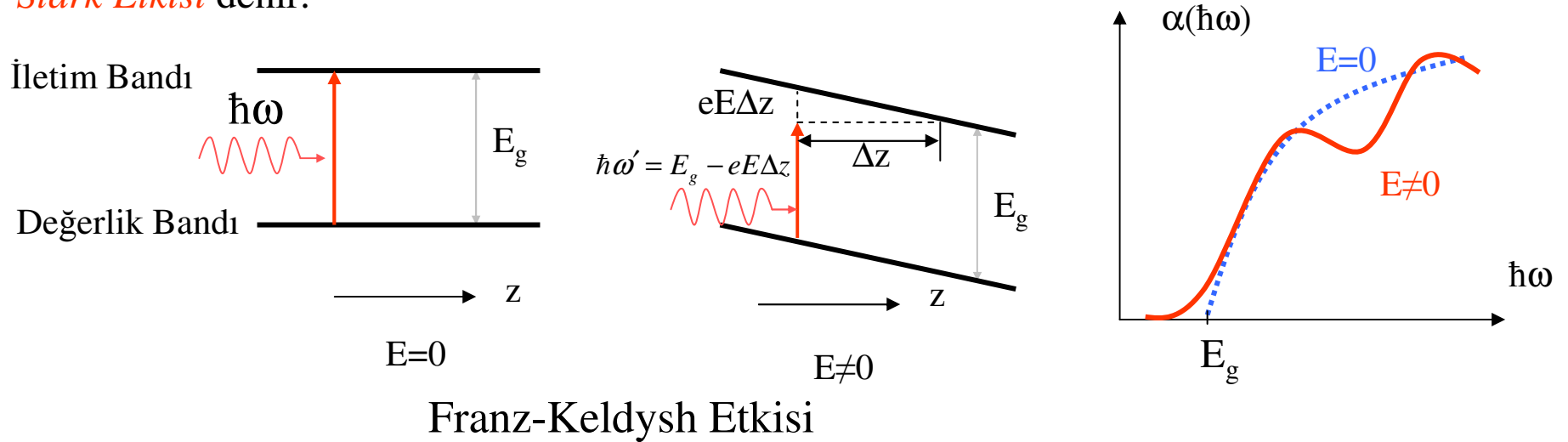
*Mott-Wannier*: Zayıf bağlı eksitonlar

# Franz-Keldysh ve Stark Etkisi

Dış elektrik alan, yarıiletken malzemenin bant yapısında değişime (eğilmeye) neden olacağı için soğurma eğrisinin de dış elektrik alan ile farklılık göstermesi beklenir.

Bir yarıiletkente iletim ve değerlik bantları arasındaki geçişin dış elektrik alandan dolayı değişmesine *Franz-Keldysh Etkisi* denir. Franz Keldysh, elektron ve deşik arasında oluşan Coulomb etkışmesini (eksiton) dikkate almadan soğurma spektrumunda oluşan değişimi hesaplar.

Eksiton etkilerini de dikkate alarak dış elektrik alanın bantlar arası optik geçişe etkisine ise *Stark Etkisi* denir.

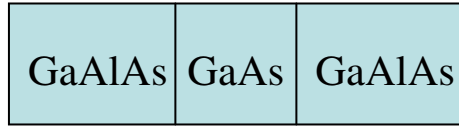
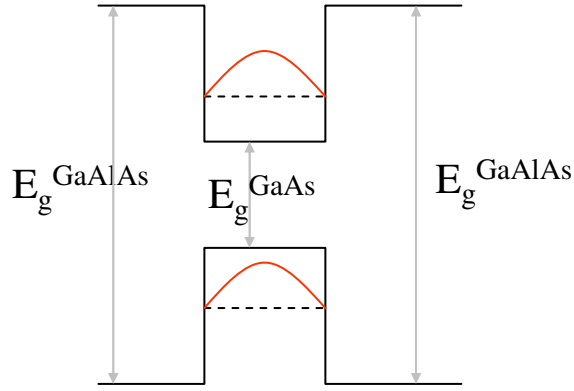


Franz-Keldysh etkisinden dolayı, enerjisi yasak bant aralığının altında  $\hbar\omega' = E_g - eE\Delta z$  olan fotonların soğrulduğu gözlenir.

Düşük boyutlu sistemlerde de Franz-Keldysh ve Stark etkisi gözlenir ve ilginç özelliklerin gözlenmesine neden olur.

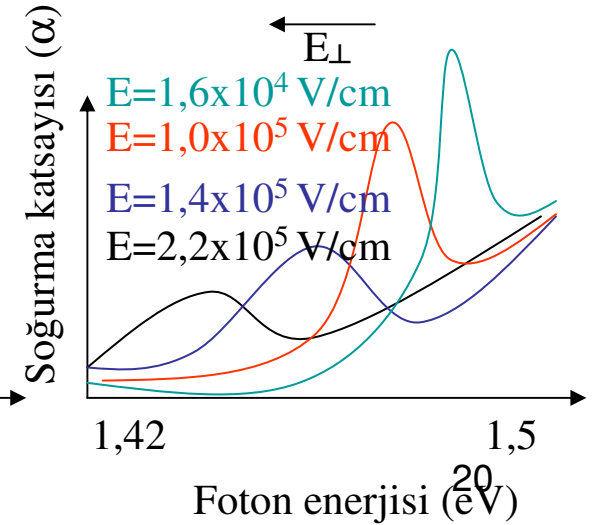
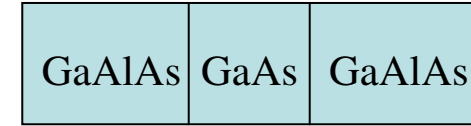
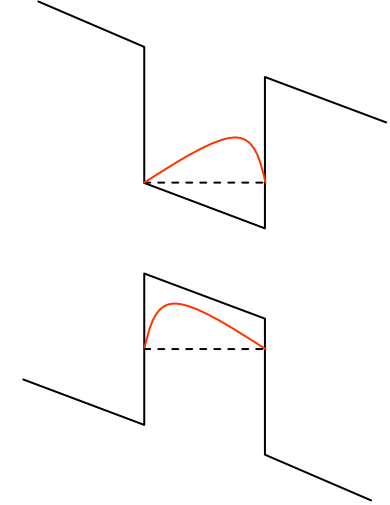
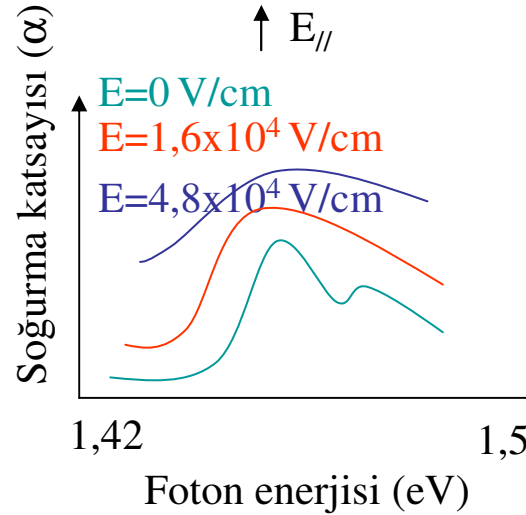
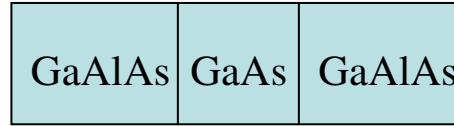
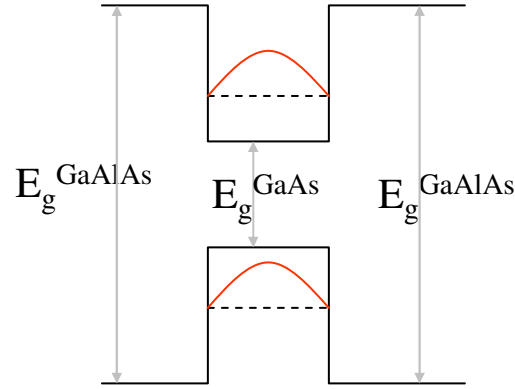
# Kuantum Stark Etkisi

Boyutları eksiton yörünge yarıçapı mertebesinde olan kuantum kuyusuna değişik doğrultularda elektrik alan uygulanırsa soğurma spektrumu ilginç özellikler gösterir.



$E=0$

Bir kuantum çukuruna paralel yönde uygulanan elektrik alan soğurma spektrumunu çok değiştirmez. Ancak kuantum çukuruna dik doğrultuda uygulanan alan soğurma spektrumunu uygulanan elektrik alanın şiddeti ile orantılı olarak düşük enerjilere kaydırır. Bu etki, ortamdaki geçen ışığın soğurulmasını dış elektrik alan ile kontrol etmemize olanak sağladığı için ışığın modülasyonunda kullanılabilir.



# Özet

Yarıiletken malzemelerin soğurma katsayısı frekansa bağlı olduğu kadar malzemenin doğrudan veya dolaylı bant yapısına sahip oluşuna da bağlıdır.

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

$$\alpha(h\nu) = A^* (h\nu - E_g \pm h\Omega)^2 \quad \text{Dolaylı}$$

Yarıiletkenlerin bant yapısının özelliği optik geçişlerin verimliliğini de belirler. Dolaylı enerji bant aralığına sahip malzemelerde iletim ve değerlik bandındaki elektron aynı dalga vektörüne sahip olacağından geçiş için fononlara ihtiyaç duyulmaz, dolayısı ile optik geçişler verimlidir. Dolaylı enerji bant aralıklı malzemelerde ise bu geçişler fononlara bağlı olduğu için geçişler verimli değildir ve bu malzemeler ışık üreten optoelektronik devre elemanlarının yapımında kullanılmaz.

Bağlı elektron-deşik çifti eksiton olarak bilinir ve yasak bant içinde soğurmalarına neden olur. Eksitonların enerjileri küçük olduğu için gözlenebilmesi için ya düşük sıcaklıklarda (az fonon yoğunluğu) veya kuantum yapılarda gözlenebilir.

## **UADMK - Açık Lisans Bilgisi**

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