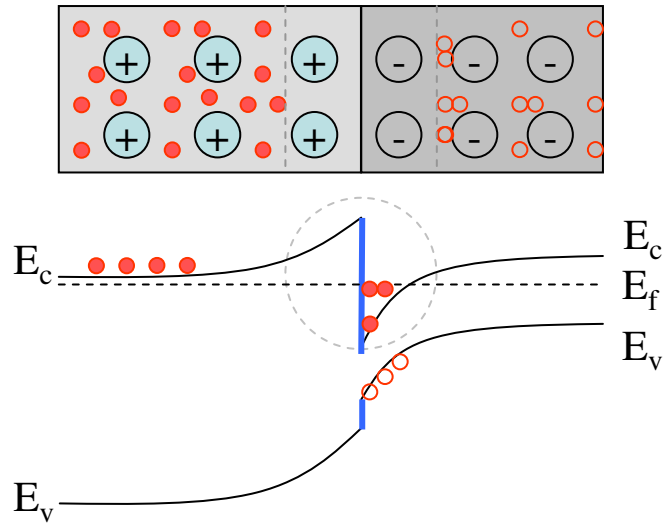


14. Ders

Yarıiletkenler Yapılar



Bu bölümü bitirdiğinizde,

- P-n eklemlerinin yapısı,
- P-n eklemlerin V-I eğrileri,
- Homo ve heteroyapıları,
- Kuantum yapılar,
- Optoelektronik malzemeler ve üretim teknikleri

konularında bilgi sahibi olacaksınız.

Ondördüncü Ders: İçerik

- Yarıiletken Eklemler
 - Homo Eklemler
 - Hetero Eklemler
- p-n Eklemlerin I-V Grafikleri
- Kuantum Yapılar
- Optoelektronik Malzemeler
- Optoelektronik Üretim Teknolojisi

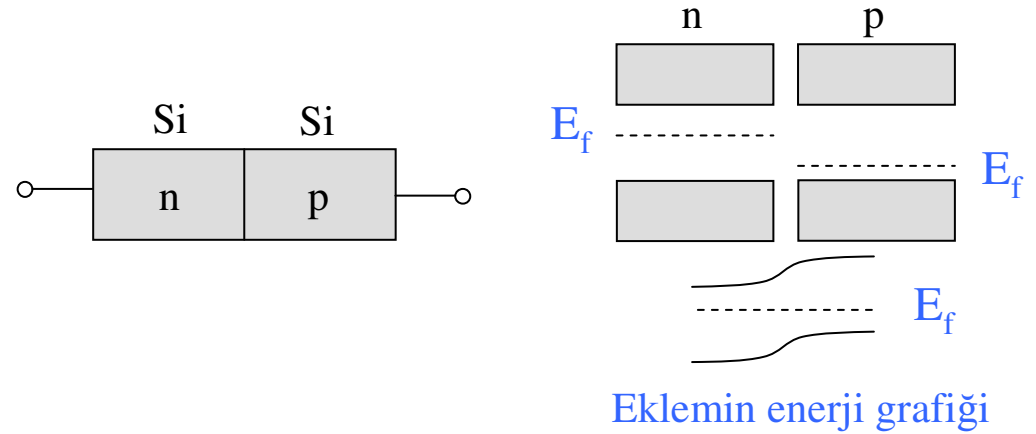
Yarıiletken Eklemler

- Yarıiletkenlerden yararlanma bunları farklı tipte katkılayarak (n- veya p-tipte) bir araya 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)

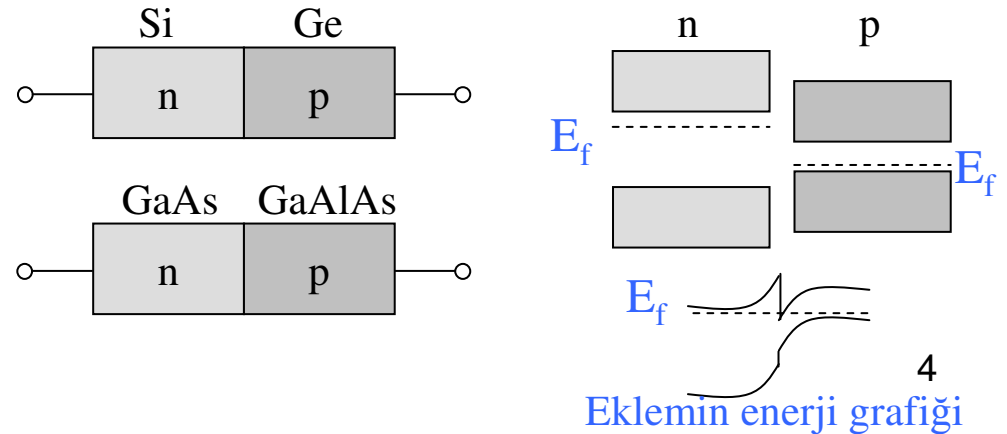
Bu tür eklemlerin üretimi kolay ve maliyeti ucuzdur, fakat çok verimli devre elemanları üretilemez.



ii) Farklı Tür Eklemler (Heterojunction):

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

Bu tür eklemlerin üretimi zor ve maliyetlidir, ancak çok verimli ve hızlı elektronik ve optoelektronik devre elemanları yapmak mümkündür.



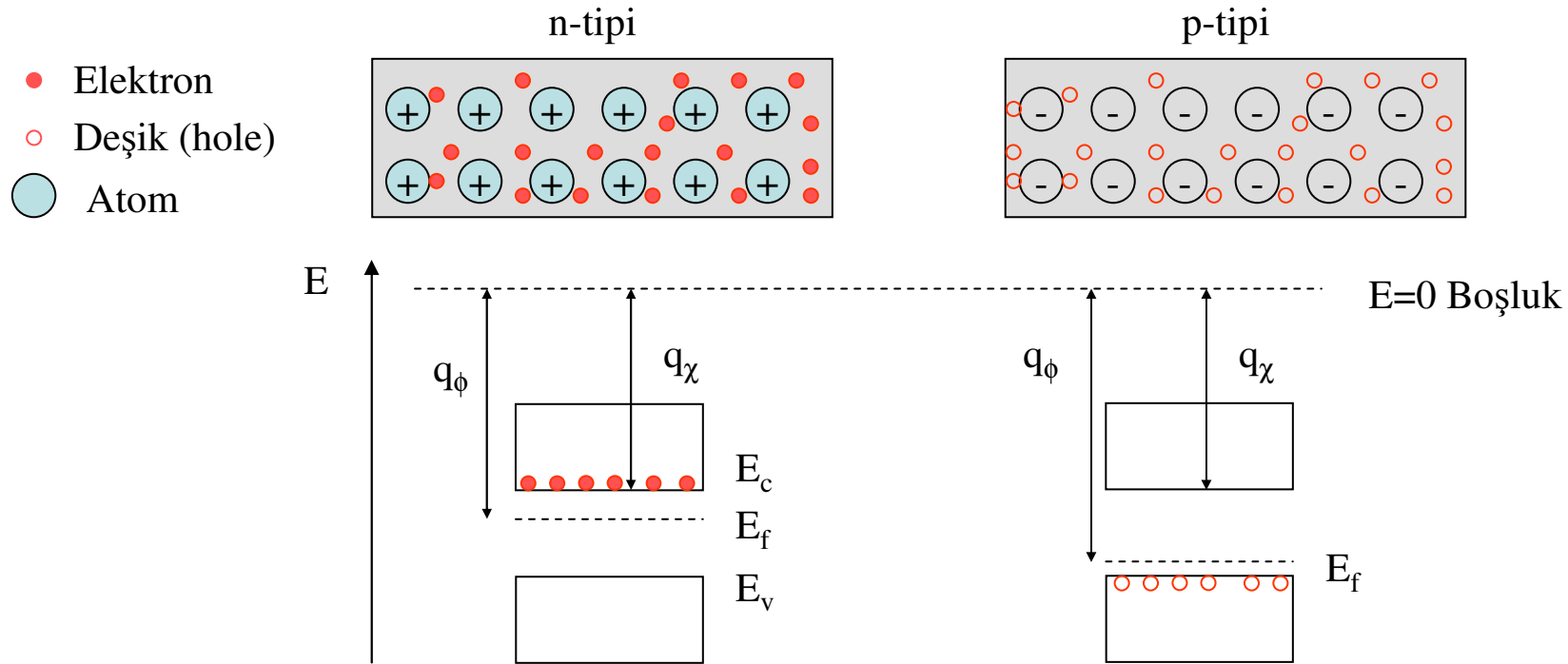
Aynı Türden Eklemler (Homojunction)

i) Aynı Tür Eklemler (Homojunction):

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

Malzemeler aynı olduğu için n- ve p- tarafının yasak bant aralığı aynıdır. n tarafta, iletim bandında serbest hareket eden elektronlar, p tarafta da değerlik bandında serbest hareket eden elektronlar (deşikler) bulunur. Her iki tarafta da net yük yoğunluğu sıfırdır.

n- ve p- tipi yarıiletkenin birleştirmeden önce



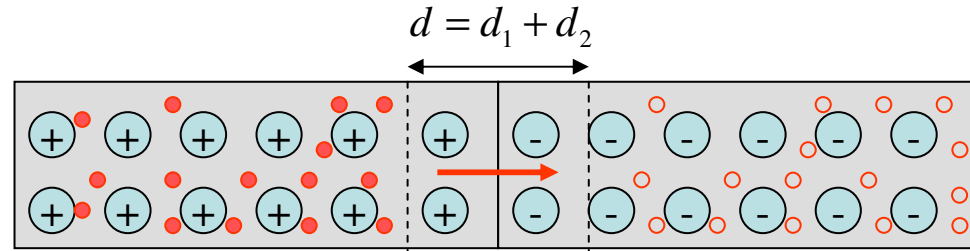
q_ϕ (iş fonksiyonu): Bir elektronu Fermi seviyesinden (E_f) boşluğa ($E=0$) götürmek için gereken enerji

q_χ (elektron affinity): Bir elektronu iletim bandından (E_c) boşluğa ($E=0$) götürmek için gereken enerji

Aynı Türden Eklemler-2

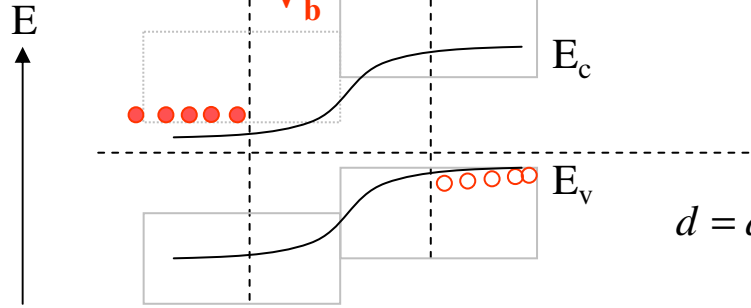
Birleştirmeden sonra

- Elektron
- Deşik (hole)
- Atom



V_b : Yapısal (Built-in) potansiyel
 d : Tüketim (depletion) bölgesi

$$d_1 = \left[\frac{2\epsilon V_o}{q} \left(\frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} \right) \right]^{1/2}$$
$$d_2 = \left[\frac{2\epsilon V_o}{q} \left(\frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} \right) \right]^{1/2}$$



$$d = d_1 + d_2 = \left[\frac{2\epsilon V_o}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2}$$

p-n yarıiletkenler birleştirildikten hemen sonra (eklemi oluşunca), p ve n tarafındaki yük yoğunlukları farklı olduğundan (E_f seviyesi farklı) yük dağılımı denge durumuna ulaşmaya kadar (Fermi seviyesi eşitleninceye kadar) n tarafındaki elektronlar p tarafına geçerek buradaki deşiklerle birleşir. n (p) tarafından ayrılan elektronlar (deşikler) arkalarında pozitif (negatif) hareketsiz iyonlar bırakır. Hareketli yüklerden arınan bu bölgede (*tüketim bölgesi*) oluşan *yapısal elektrik alan* daha fazla elektronların n (p) tarafından p (n) tarafına geçmesini engeller ve denge durumu oluşur.

p-n eklemlerini, neredeyse bütün elektronik ve optoelektronik uygulamalarda kullanışlı kılan eklem bölgesinde oluşan bu yapısal elektrik alandır ve devre elemanlarının çalışmasını anlamada büyük önem taşır.

Eklemlerin I-V Eğrileri

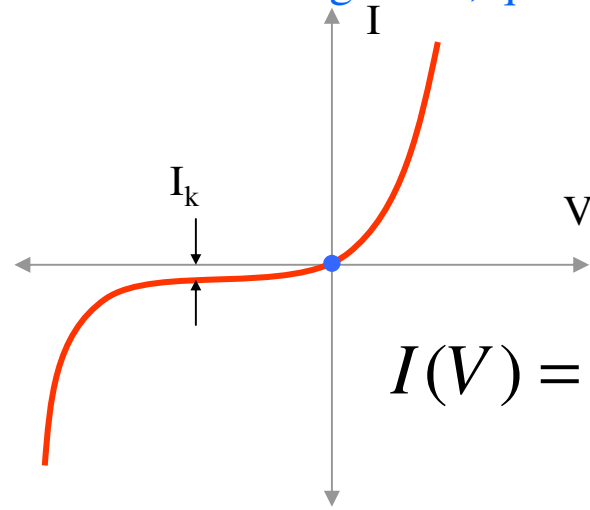
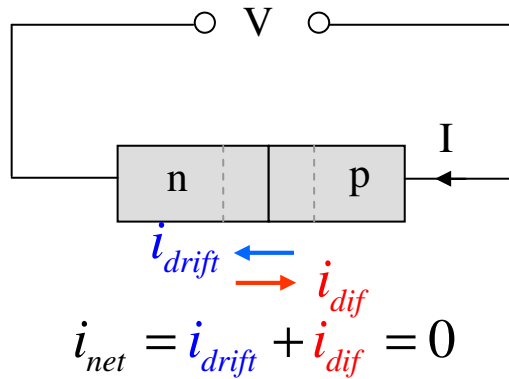
Denge durumuna ulaşıldıktan sonra yapısal elektrik alan daha fazla elektronların (deşiklerin) n(p) tarafından p(n) tarafına geçmesini engeller. Dış uyarının olmadığı (karanlıkta ve uçlar arasında bir gerilim olmadığı zaman $V=0$) denge durumunda bir p-n eklemi üzerinden geçen net akım sıfırdır; kuantum mekaniksel olarak potansiyel engelini geçerek karşıya geçen yüklerin oluşturduğu akım (I_{dif}), tüketim bölgesinde oluşan elektron vedeşik çiftlerinin oluşturduğu akım (I_{drift}) ile dengelenir.

Bir p-n ekleminin uçlarına uygulanan gerilim ile yapısal elektrik alanın (ve tüketim bölgesinin genişliği) büyüklüğü değiştirilerek eklem üzerinden geçen akım değiştirilebilir.

I-V ifadesi:

$$I(V) = I_k (e^{qV/kT} - 1) \quad I_k = \text{Karanlık akım}$$

şeklinde verilir. Bu ifadede V, p-n eklemi arasındaki gerilim, q elektron yükü, k Boltzmann sabiti, T ise sıcaklıktır.

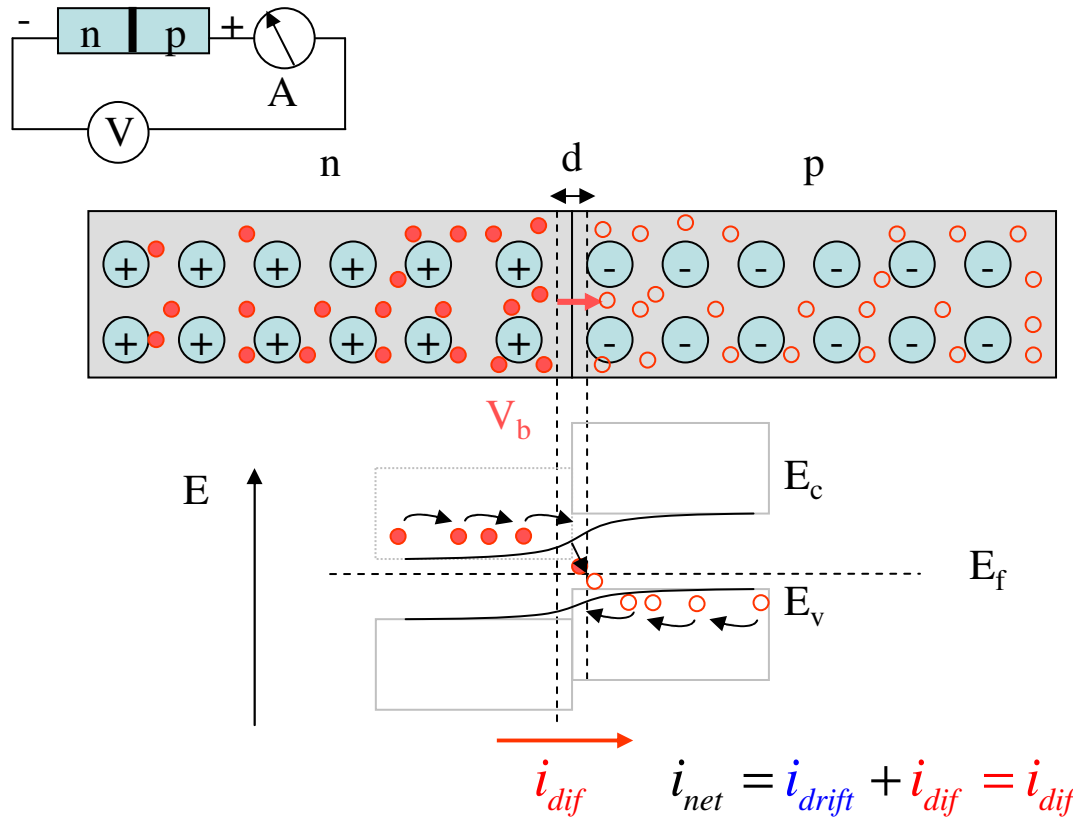


$$I(V) = I_k (e^{qV/kT} - 1)$$

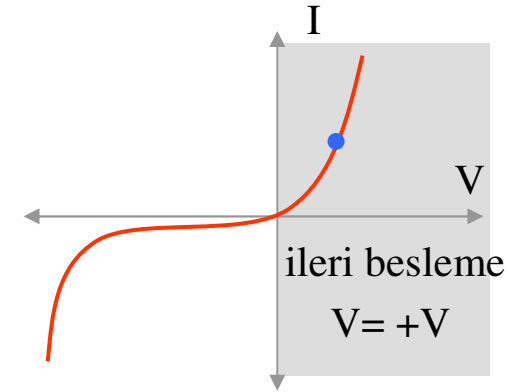
p-n ekleminin uçları arasına uygulanan pozitif gerilim ile (*ileri besleme*) eklem üzerinden geçen akım üstel olarak artar. Negatif gerilim altında (*ters besleme*) ise akım önce gerilimden bağımsız küçük bir değer alır (*karanlık akım*), daha büyük gerilimlerde ise üstel olarak artar.

I-V Eğrileri-1: İleri Besleme

İleri beslemede (n taraf negatif, p taraf pozitif dış gerilim uygulandığında) p-n eklem uçları arasına uygulanan gerilimden kaynaklanan elektrik alan, yapısal alan ile zıt yönde olduğu için eklem bölgesindeki elektrik alan azalır (tüketim bölgesi daralır). Bu durumda yüklerin potansiyel engelini yenerek karşı tarafa geçmeleri üstel olarak artar ve devrede dolanan akım üstel olarak artar (i_{dif}).

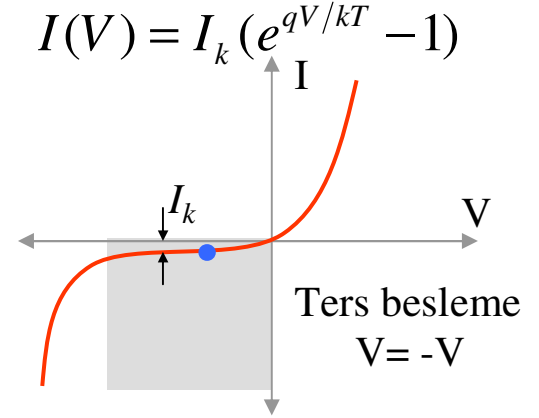
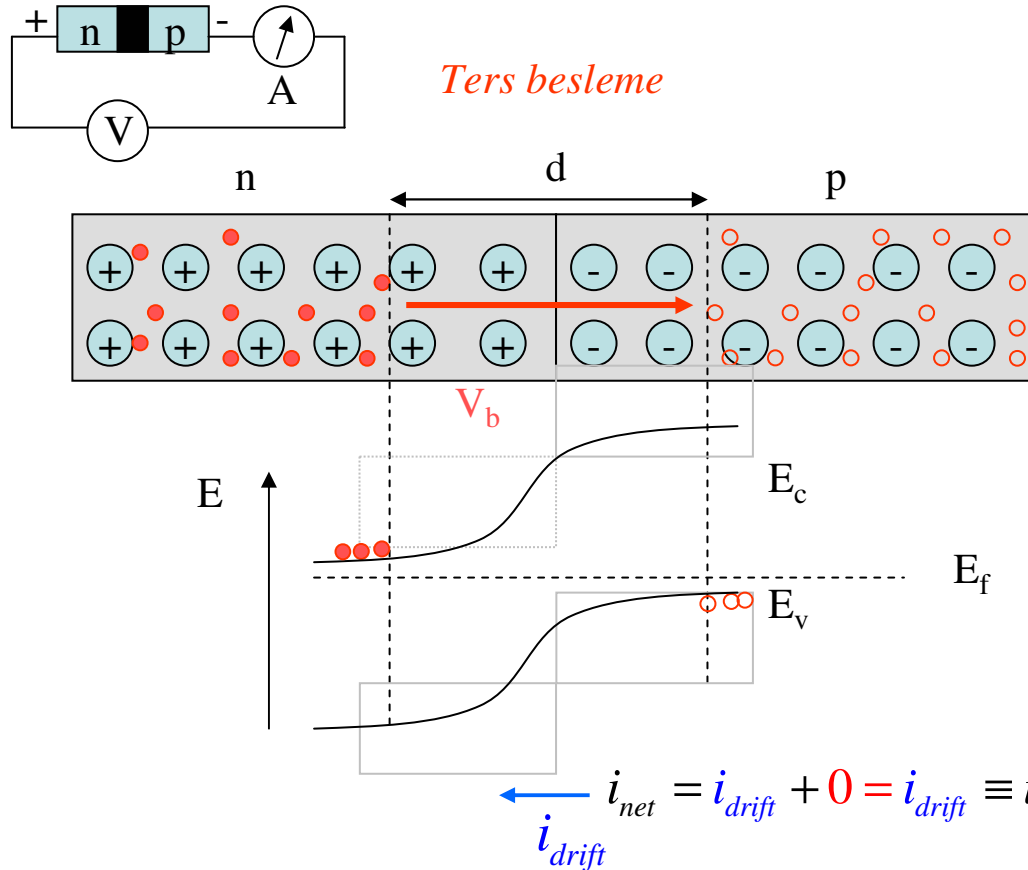


$$I(V) = I_k (e^{qV/kT} - 1)$$



I-V Eğrileri-2: Ters Besleme

Ters beslemede (n tarafına pozitif, p tarafına negatif dış gerilim uygulandığında) p-n eklem uçları arasına uygulanan gerilimden kaynaklanan elektrik alan, yapısal alan ile aynı yönde olduğu için eklem bölgesindeki elektrik alan daha da büyür (tüketim bölgesi (d) genişler). Bu durumda yüklerin karşı tarafa geçmeleri daha da zorlaşır ($i_{dif}=0$). Ancak tüketim bölgesinde oluşan elektron ve deşik çiftlerinden kaynaklanan (i_{drift}) yapısal alandan dolayı yeniden birleşmeden n ve p tarafına geçerek karanlık akımı (I_k) oluşturur.



I_k =karanlık akım

$$I_k = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right)$$

A=eklem kesit alanı

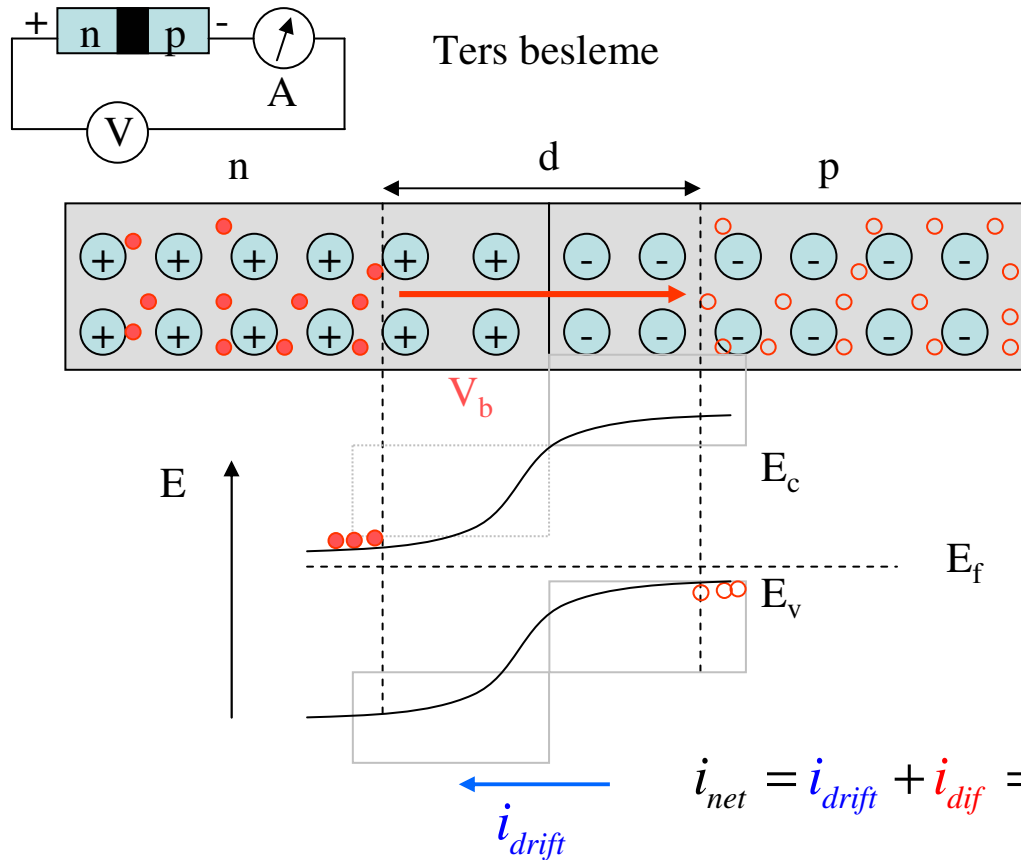
D_n, D_p =n(p) difüzyon katsayısı

L_n, L_p =n(p) difüzyon uzunluğu

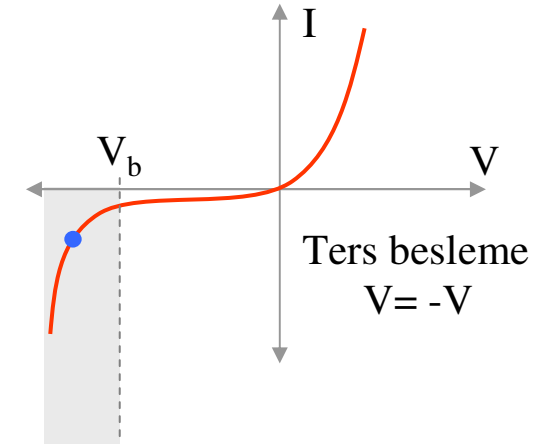
p_n, n_p =p(n) yoğunluğu

I-V Eğrileri-3: Zener Bölgesi

Bir p-n eklem uçları arasına uygulanan ters gerilim kırılma gerilimi olarak bilinen (V_b) gerilimin üstüne çıktığında eklem üzerinden geçen akımda üstel bir artış gözlenir. Bu artış n-tarafın iletim bandının p-tarafındaki değerlik bandının altına inmesinden kaynaklanmaktadır.

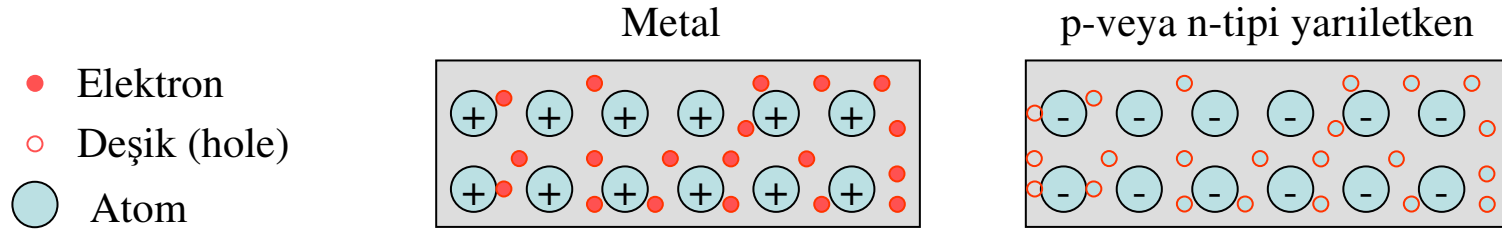


$$I(V) = I_k (e^{qV/kT} - 1) \rightarrow I_k e^{qV/kT}$$

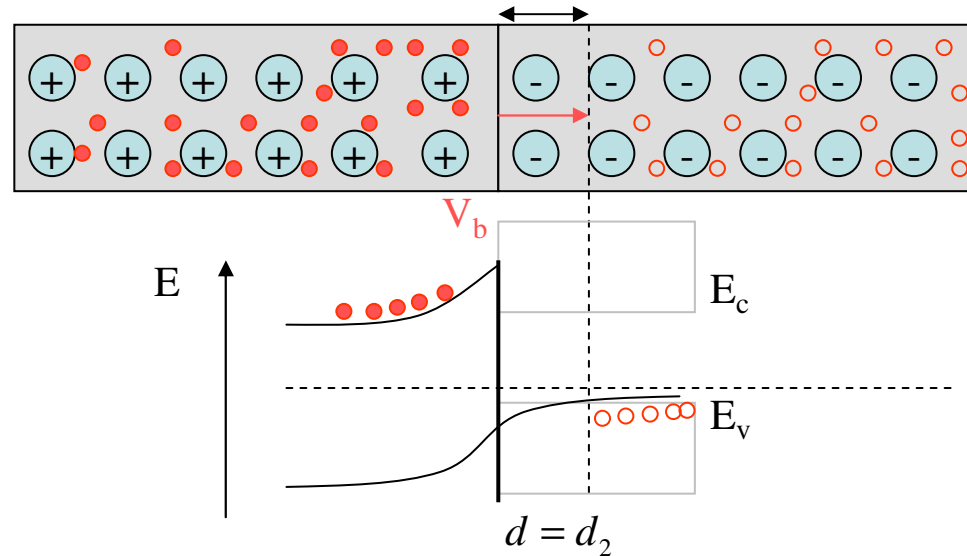


Metal-Yarıiletken Eklemler

p-n eklemlerinin birçok kullanışlı özelliği sadece metal-yarıiletken eklem yapılarak da oluşturulabilir. Metal, aşırı katkılanmış n tipi malzeme olarak düşünülebilir.

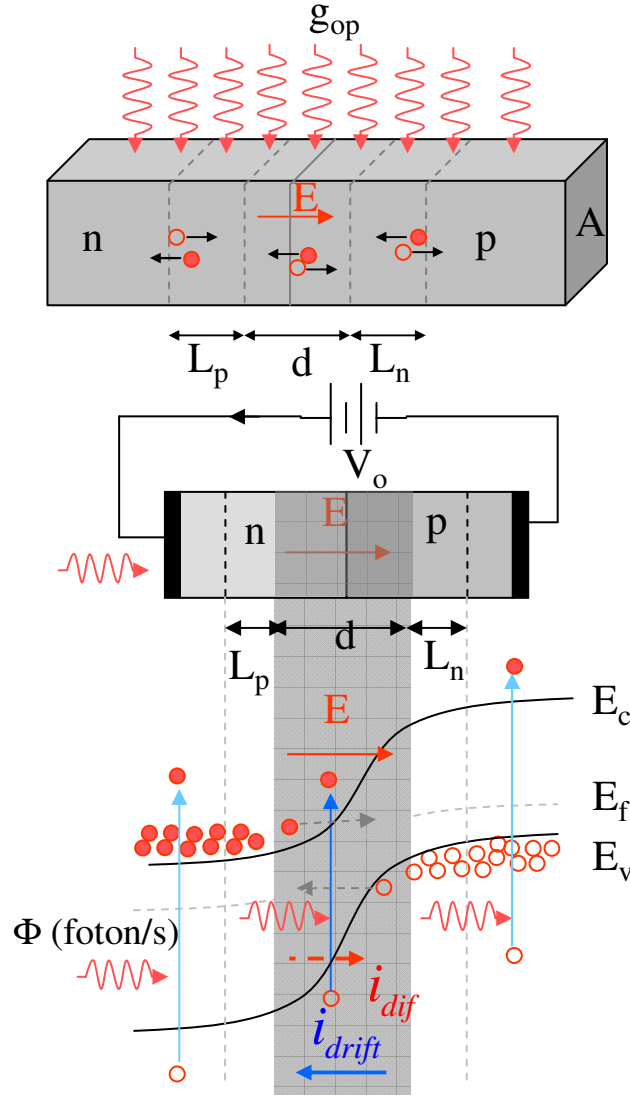


metal-yarıiletken ekleme tüketim bölgesinin tümü yarıiletken tarafında bulunur.



Işık Altında p-n Eklemi

p-n eklemi $h\nu > E_g$ enerjili düzgün bir ışıkla aydınlatılırsa (g_{op}) tüketim bölgesinde elektron ve deşik çiftleri oluşur. Bu durumda p-n ekleminin I-V grafiği:



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

g_{op} = optik güç (e-d çifti/cm³-s)

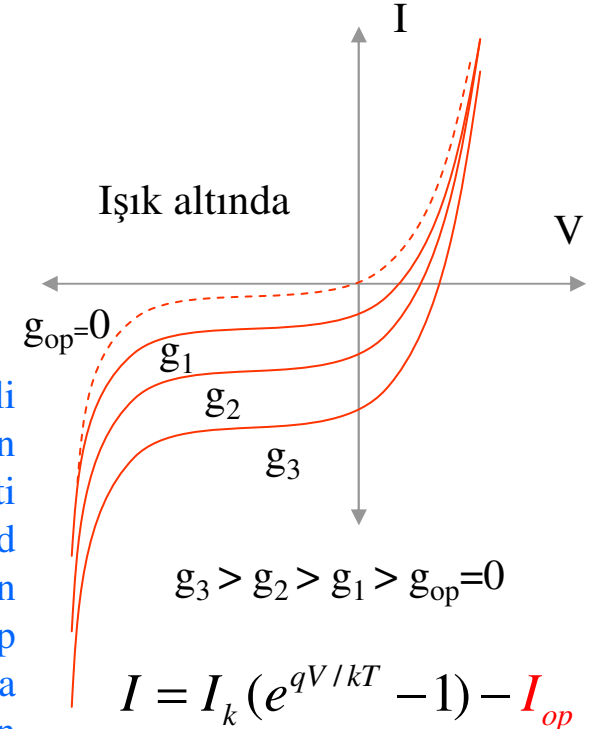
E = yapısal elektrik alan

L_p = deşik difüzyon uzunluğu

L_n = elektron difüzyon uzunluğu

p-n eklemi üzerine düşen $h\nu > E_g$ enerjili fotonlar tüketim bölgesinde ve ayrıca n ve p bölgelerinde elektron-deşik çifti oluşturur. Tüketim bölgesinde oluşan e-d çiftleri yapısal alandan dolayı yeniden birleşmeye fırsat bulamadan n ve p tarafına geçerler ve akıma katkıda bulunurlar. n ve p tarafında, difüzyon uzunluğu içinde oluşan e ve d'nin de yeniden birleşmeden tüketim bölgesine kadar giderek akıma katkıda bulunma şansları vardır. Ancak difüzyon mesafesinin dışında yaratılan e-d çifti tüketim bölgesine gidene kadar d-e ile birleşerek kaybolur ve akıma katkıda bulunamaz. Dolayısı ile sadece tüketim bölgesine ve difüzyon uzunluğu içinde yaratılan fotonlar algılanır.

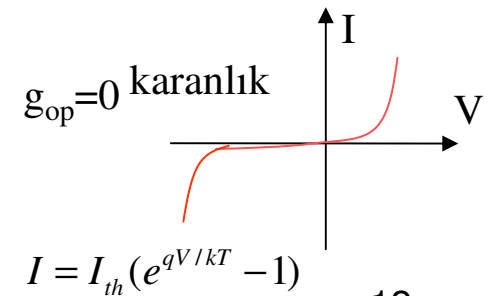
$$i_{net} = i_{drift}(\phi) + i_{dif} \quad i_k \ll i_{op}(\phi)$$



$$g_3 > g_2 > g_1 > g_{op}=0$$

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

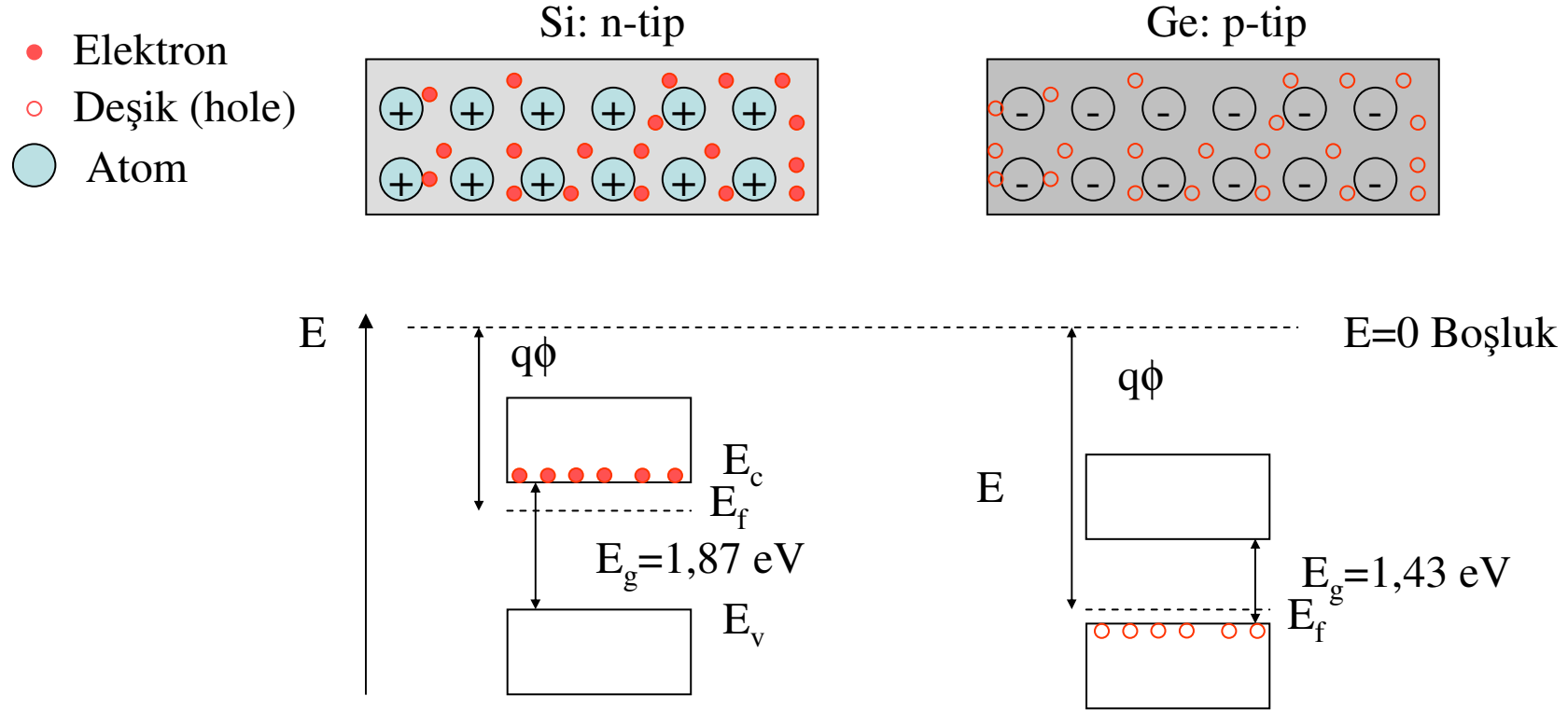
$$I_{op} = qAg_{op}(d + L_n + L_p)$$



Farklı Türden Eklemler-Hetero Yapılar

ii) Farklı Tür Eklemler (Heterojunction):

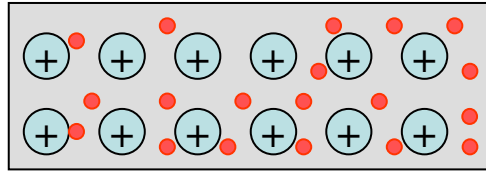
Farklı yarıiletkenlerden yapılmış n-tipi ve p-tipi katkılanmış yarıiletken malzemeyi düşünelim
Malzemeler *farklı* olduğu için bant aralıkları da *farklı* olacaktır.



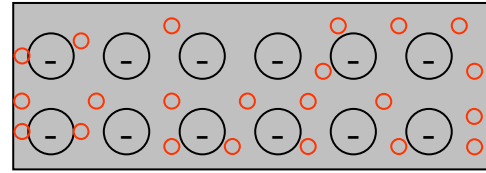
Hetero Yapılar-1

- Elektron
- Deşik (hole)
- Atom

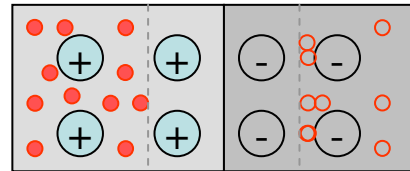
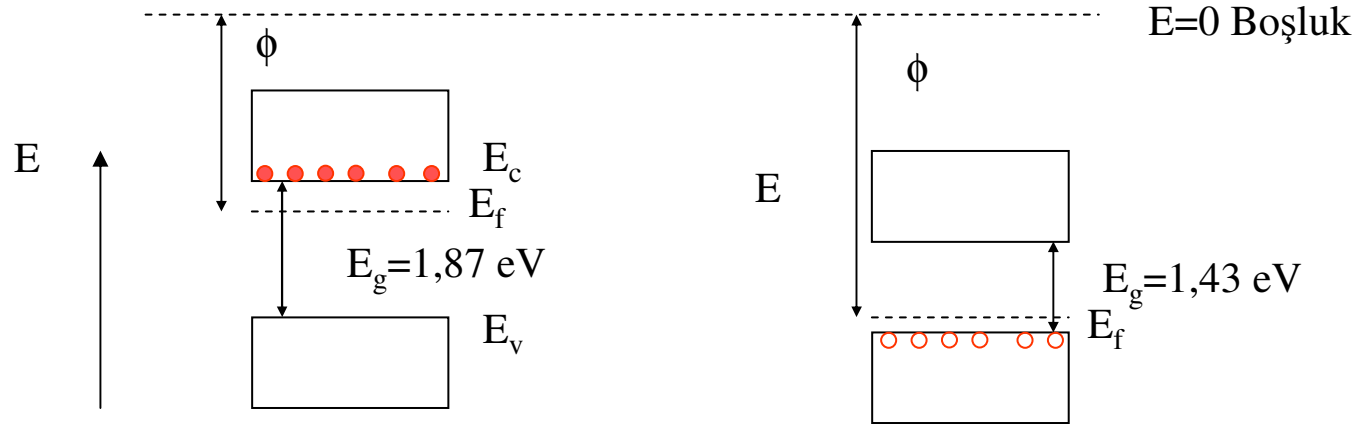
GaAlAs: n-tip



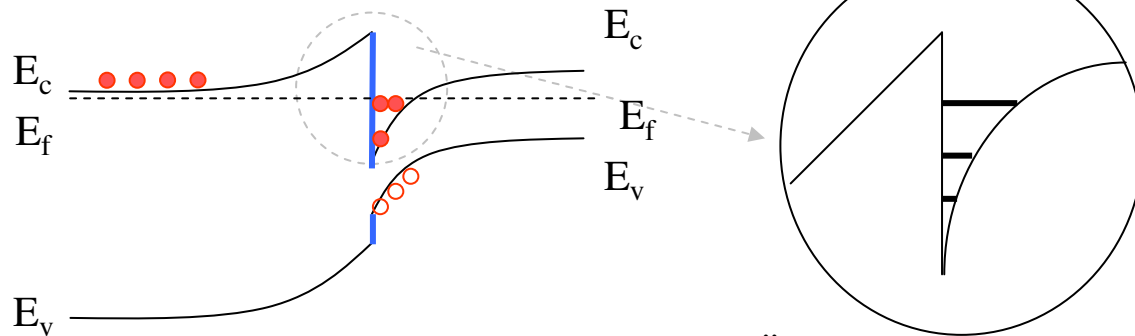
GaAs: p-tip



birleştirmeden önce



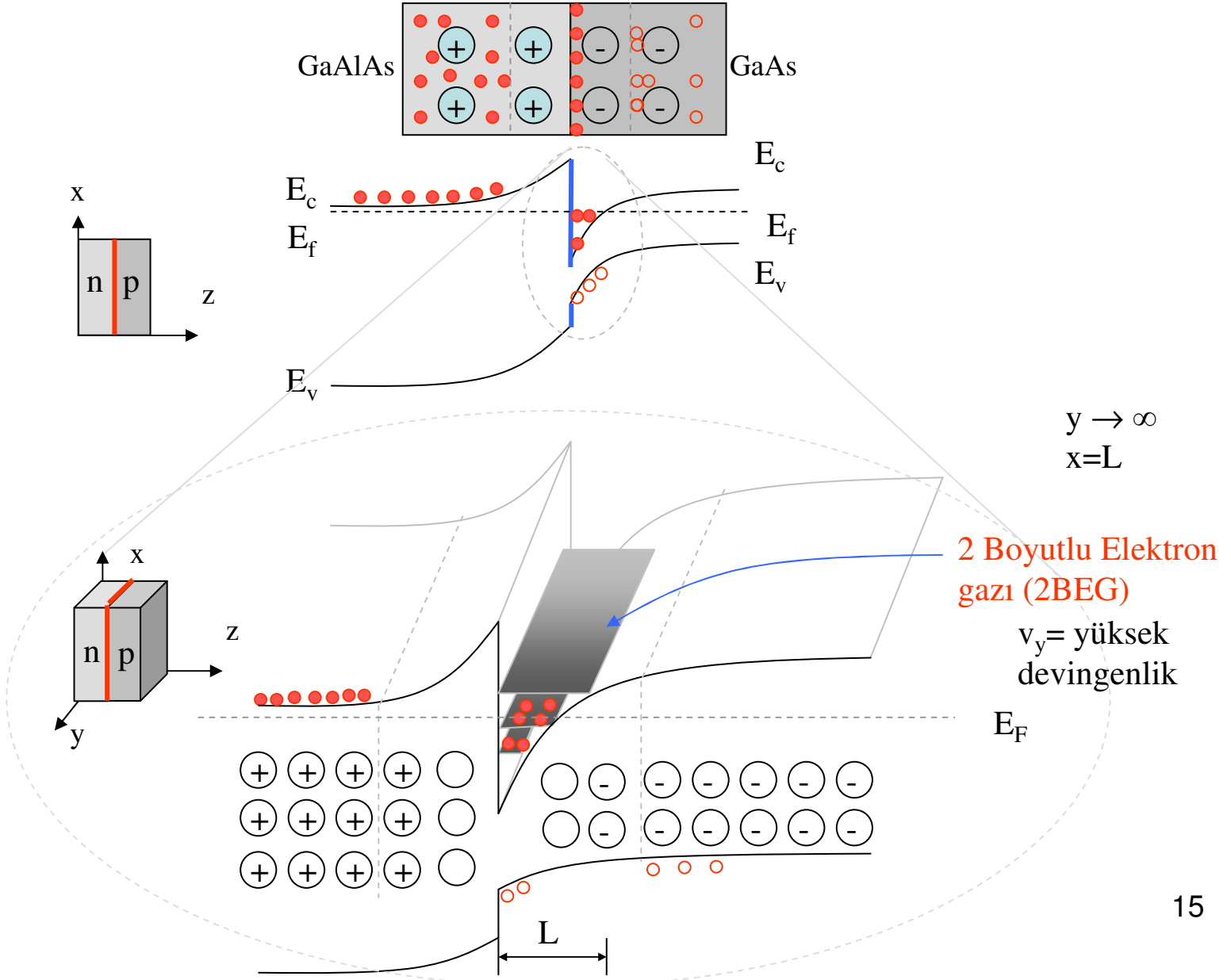
birleştirmeden sonra



Üçgen Kuantum Kuyusu

Hetero Yapılar-2

Farklı yasak bant aralığına sahip malzemelerin oluşturduğu arayüzde, bant (iletim ve değerlik bandı) kesiklilik göstereceğinden kuantum etkilerin görülebileceği kuantum kuyuları oluşur.



Hetero Yapılar-Uygulama Alanları

Farklı türden yarıiletkenler ile yapılan eklemler sayesinde kuantum etkilerin görülebileceği düşük boyutlara inmek mümkün. Verimli ve hızlı devre elemanlarının yapılabildiği heteroyapılar elektronikte ve optoelektronikte oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Elektronikte:

Hızlı transistörlerin yapımında

- **M**odulation **D**oped **F**ield **E**ffect **T**ransistor(MODFET veya HEMT)
- **H**eterojunction **B**ipolar **T**ransistör (HBT)

Optoelektronikte:

- Kuantum kuyulu lazerlerde
- Verimli güneş pillerinde
- Işığın modülasyonunda
- Dalga kılavuzlarında
- DBR ayna yapımında

Düşük Boyutlu Sistemlerin Üstünlükleri

Kuantum kuyusunun genişliği elektronların de Broglie dalgaboyu mertebesinde olduğu için kuantum etkileri görülür. Kuantum etkiler sayesinde verim, bant genişliğinde iyileşme olur.

- Taşıyıcıları (elektron ve deşik) uzayın belli noktasında hapsedmek taşıyıcıların dalga fonksiyonlarının örtüşmesini artırır. Bu örtüşme, e-d çiftlerinin verimli bir şekilde birleşmesini başka bir ifade ile yayınlanan ışığın kuantum verimliliğinin artmasını sağlar.
- Durum yoğunluğunun kesikli olması taşıyıcıların bant içinde ısıl enerjilerinin genişlemesini engellediğinden bant genişliği azalır, tek renkliliğe daha çok yaklaşılr.
- Kuantum kuyusunun genişliği ayarlanarak (katkı atom konsantrasyonu) enerji seviyeleri, dolayısı ile yayınlanacak ışığın frekansı ayarlanabilir.
- Farklı malzemeler kullanıldığı için (farklı kırılma indisleri) fotonlar uzayın belli bir bölgesinde hapsedilir, optik verim artar.

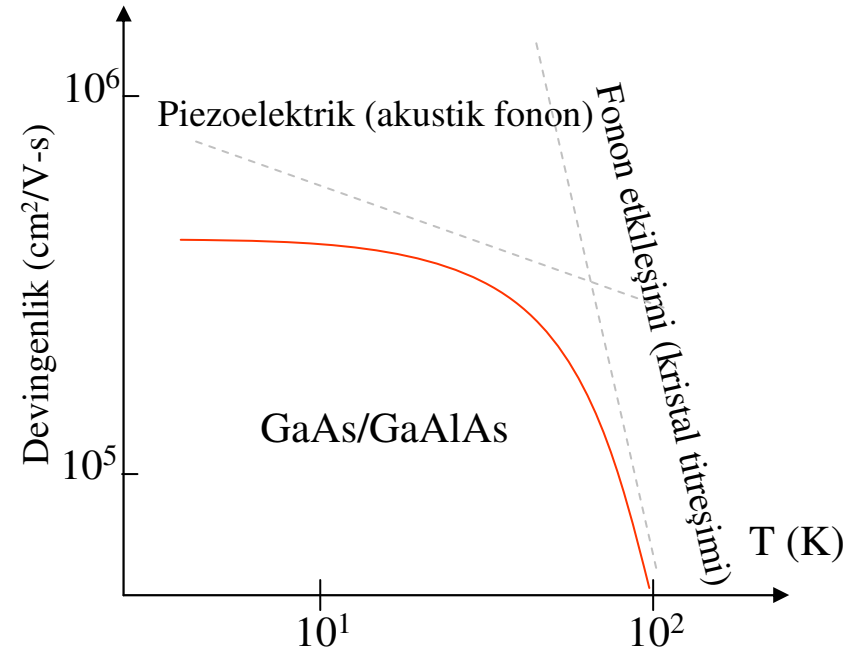
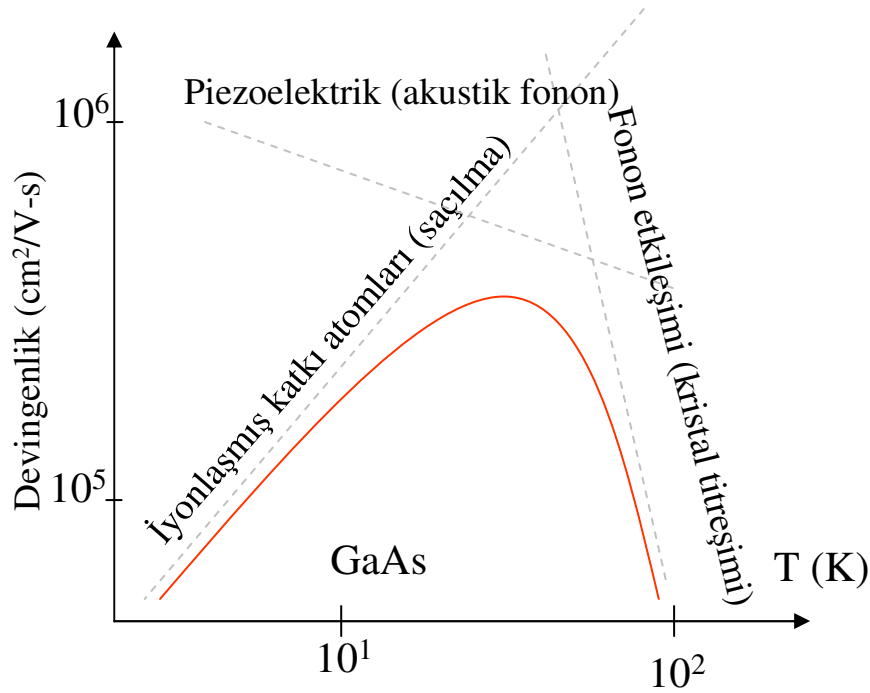
Yukarıdaki durumların sonucu olarak, ışık üretiminde kullanılan düşük boyutlu sistemler eşik akımın düşmesine ve yüksek kuantum verimliliğine yol açar. Ayrıca bu yapıların:

- Kuantum kuyu içersindeki elektron yoğunluğu dış elektrik alan ile değiştirilebilir (*yük modülasyonu*)
- Elektronlar, (+) yüklü iyonlardan ayrılarak devingenliklerinin daha büyük olduğu bölgede hareket ederler (*hızlı elektronik*)

özelliklerinden dolayı hızlı elektronik uygulamalarında kullanılır.

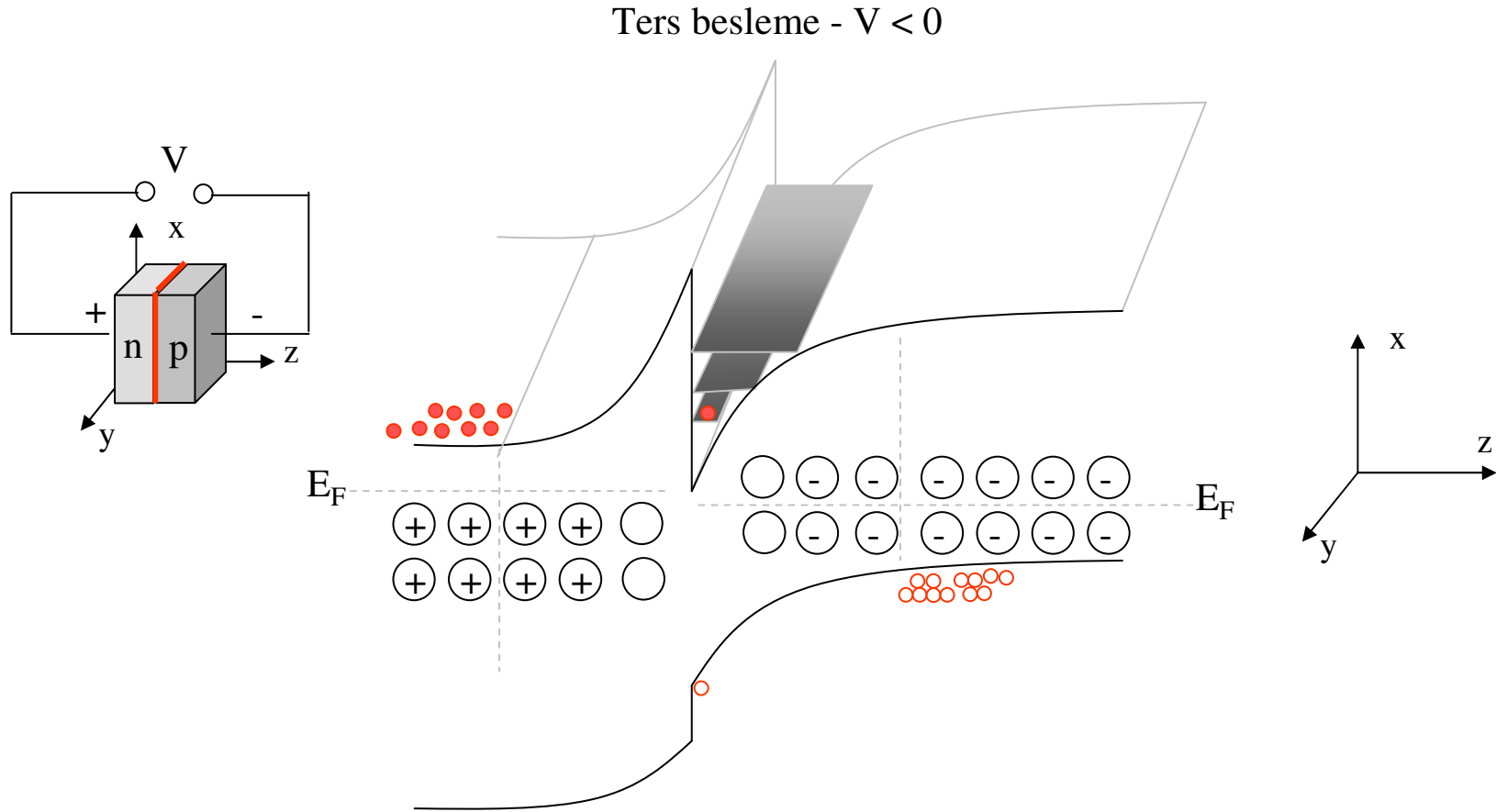
Yüksek Devingenlik

Geniş yasak bantlı malzemedeki elektronların, iyonlardan ayrılarak kuantum kuyusunda birikmesi (2 Boyutlu Elektron Gazı-2BEG) iyon etkileşmesini azaltacağından bu bölgede düşük sıcaklıklarda yüksek elektron devingenliğinin oluşmasına neden olur.



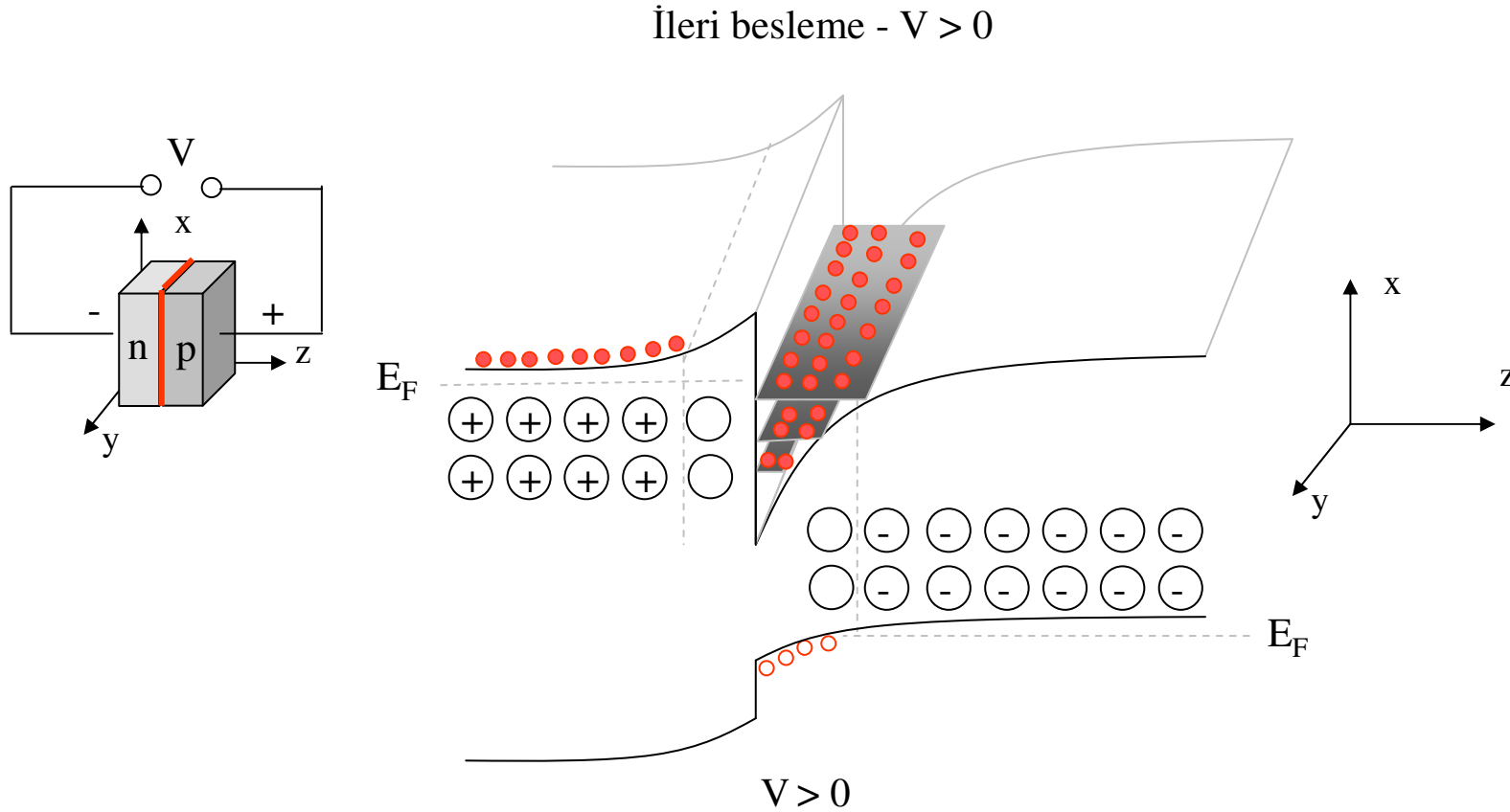
Yük Modülasyonu-Ters Besleme

p-n eklemine uygulanan negatif gerilim ile (ters besleme) arayüzdeki kuantum enerji seviyelerini dolduran elektronların kesikli enerji seviyelerini boşaltması sağlanabilir.



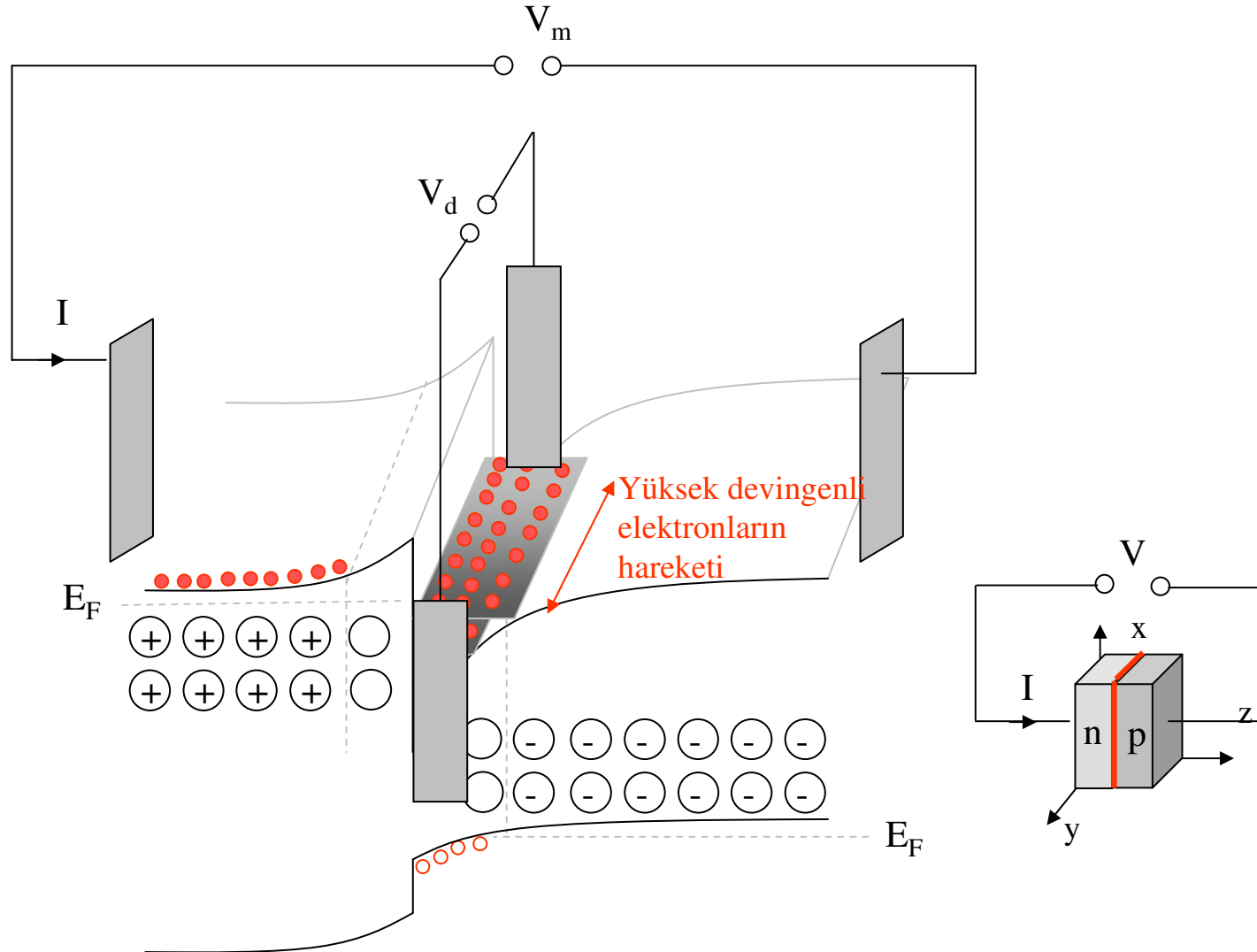
Yük Modülasyonu-İleri Besleme

p-n eklemine uygulanan pozitif gerilim ile (ileri besleme) n tarafındaki elektronların potansiyel engeli aşarak arayüzde oluşan kuantum kuyusundaki kesikli enerji seviyelerini doldurması sağlanabilir.



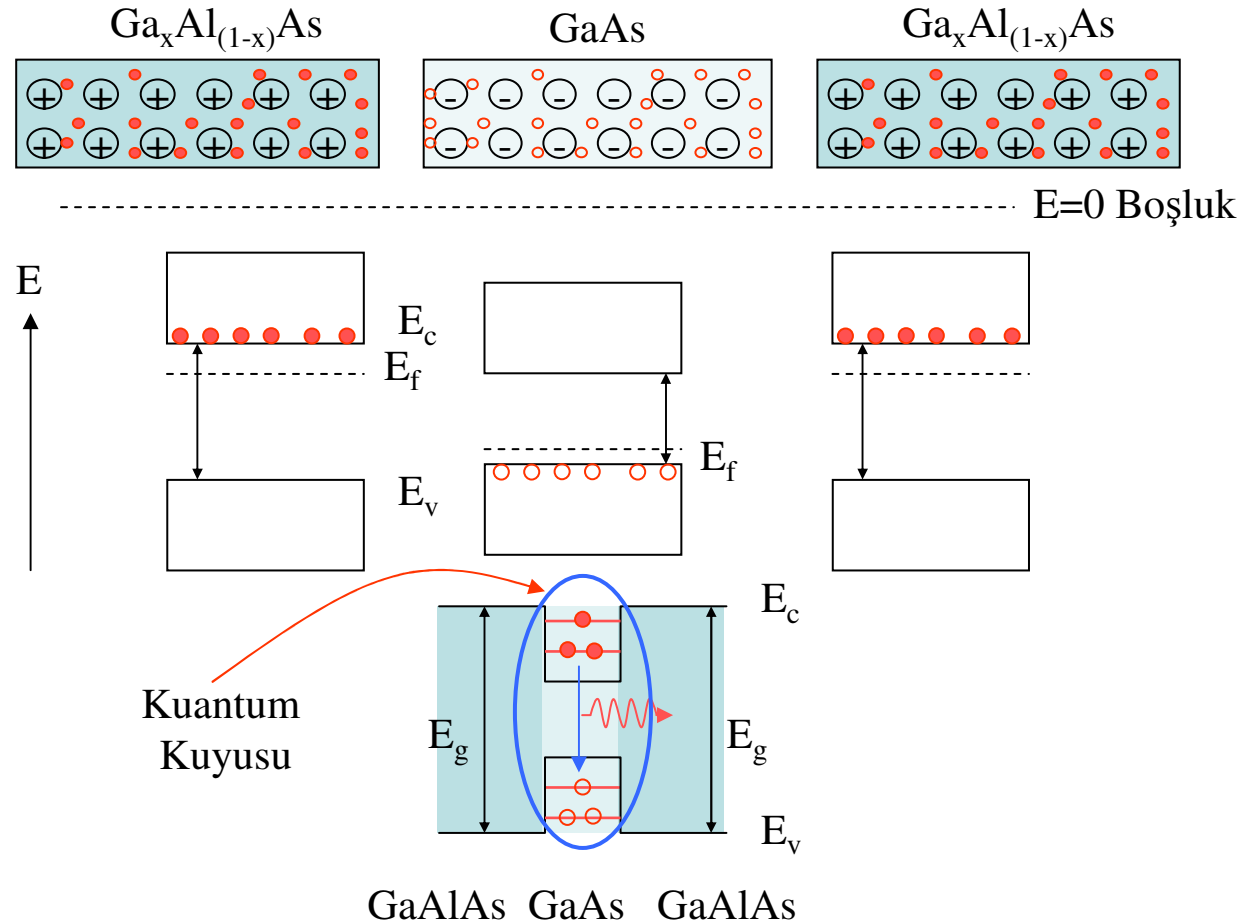
Yük Modülasyonu-Hızlı Elektronik

Yük modülasyonunun bir uygulaması hızlı transistörlerdir. Farklı malzemeden yapılmış bir p-n yapıya z doğrultusunda uygulanan gerilim ile arayüzdeki (2BEG) taşıyıcıların yoğunluğu değiştirilebilir. Eğer bu yapıda y doğrultusunda kontaklar yapılırsa 2BEG içindeki devingenlikleri çok yüksek elektronlar ile iletim sağlanır.

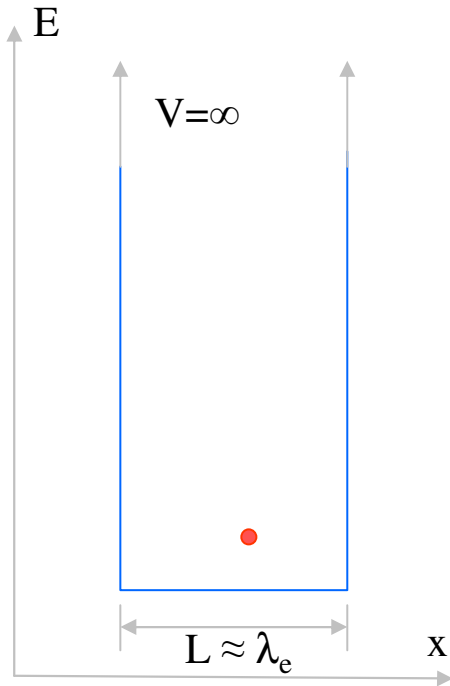


Kuantum Kuyusu-1

- GaAs yarıiletkenine Al ekleyerek GaAlAs yarıiletkeni oluşturulabilir.
- GaAlAs'nin yasak bant aralığı (E_g) içindeki Al atomlarının yüzdesine bağlı olarak GaAs'nin bant aralığı olan $E_g=1,42$ eV ile AlAs'nin bant aralığı olan $E_g=2,2$ eV arasındaki değerleri alabilir.



Kuantum Kuyusu-2



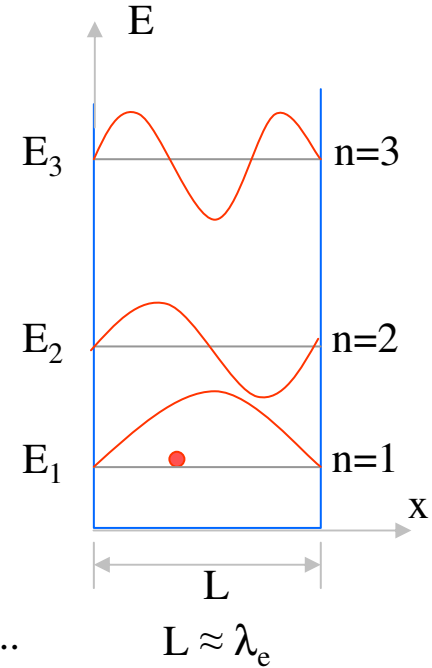
Elektron için Schrödinger Denklemi

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m_e}{\hbar^2} [E - V(x)]\psi(x) = 0$$

$$\psi(x) = 0 \quad (V = \infty) \quad 0 < x < L$$

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi(x) = 0 \quad (V = 0) \quad 0 < x < L$$

$$k = \frac{\sqrt{2m_e E}}{\hbar}$$

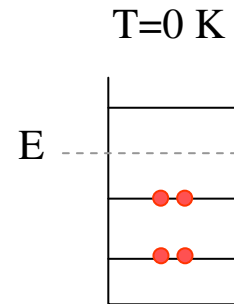
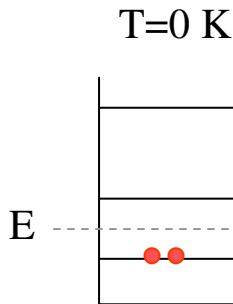


Dalga fonksiyonu

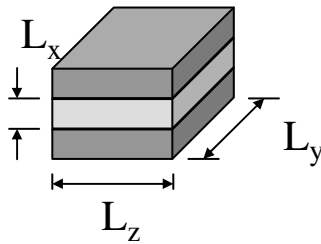
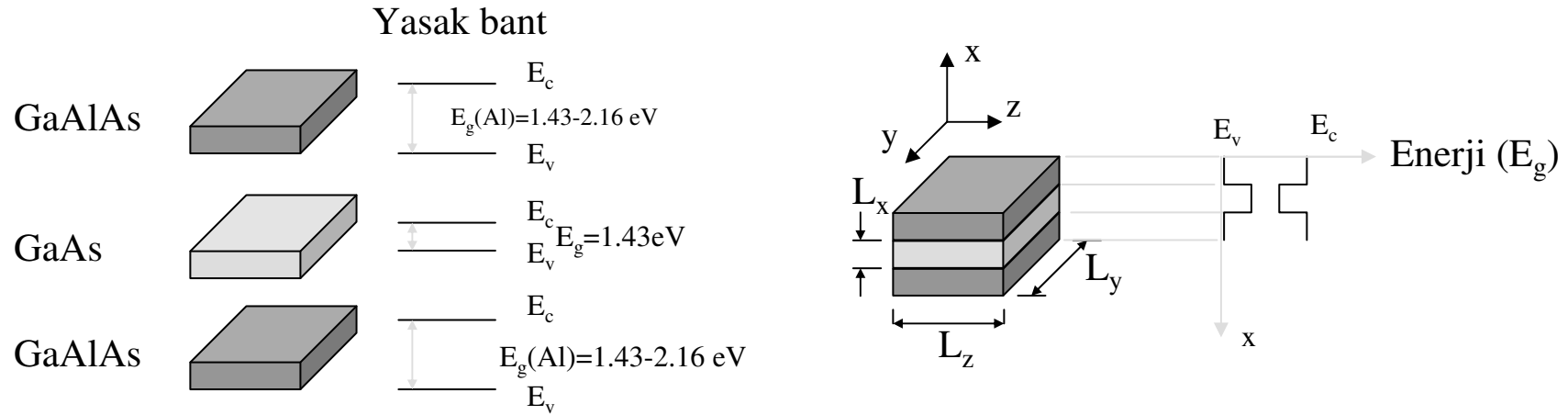
$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad n=1, 2, 3, \dots$$

Enerji

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e L^2} n^2 \quad n=1, 2, 3, \dots$$



Düşük Boyutlu Sistemler

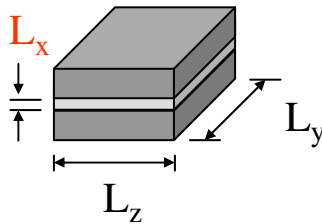


3 Boyutlu yapı (3B)
Yığınsal (bulk) yapılar

$$L_x \gg \lambda_e$$

$$L_y \gg \lambda_e$$

$$L_z \gg \lambda_e$$

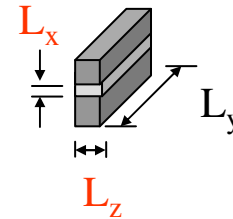


2 Boyutlu yapı (2B)
(kuantum kuyuları)

$$L_x \approx \lambda_e$$

$$L_y \gg \lambda_e$$

$$L_z \gg \lambda_e$$

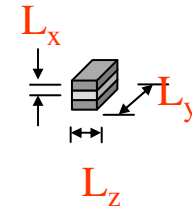


1 Boyutlu yapı (1B)
(kuantum teller)

$$L_x \approx \lambda_e$$

$$L_y \gg \lambda_e$$

$$L_z \approx \lambda_e$$



0 Boyutlu yapı (0B)
(kuantum noktalar)

$$L_x \approx \lambda_e$$

$$L_y \approx \lambda_e$$

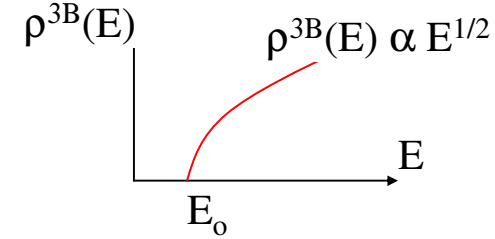
$$L_z \approx \lambda_e$$

Durum Yoğunluğu

Düşük boyutlara inince durum yoğunluğu farklılık gösterir:

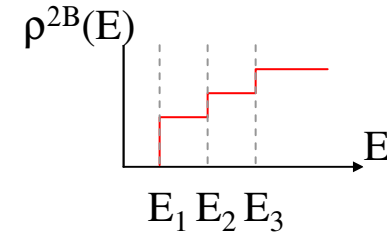
Üç boyutta (3D) durum yoğunluğu (Yığınsal)

$$D^{3B}(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_0)^{1/2}$$



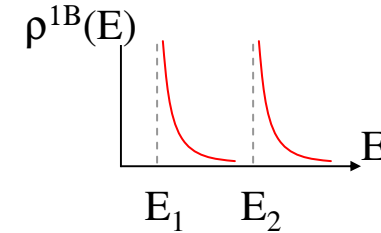
İki boyutta (2D) durum yoğunluğu (Kuantum Kuyusu)

$$D^{2B}(E) = \frac{m^*}{\pi\hbar^2} \sum_n \sigma(E - E_n)$$



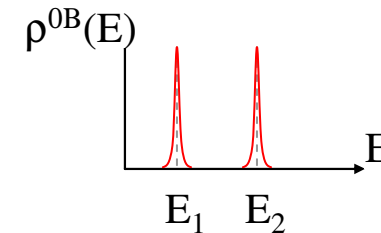
Bir boyutta (1D) durum yoğunluğu (Kuantum Teli)

$$D^{1B}(E) = \frac{1}{\pi\hbar} \sum_n \left(\frac{m^*}{2\sigma(E - E_n)} \right)^{1/2}$$

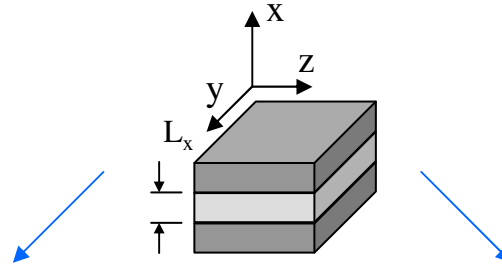


Sıfır boyutta (0D) durum yoğunluğu (Kuantum Noktası)

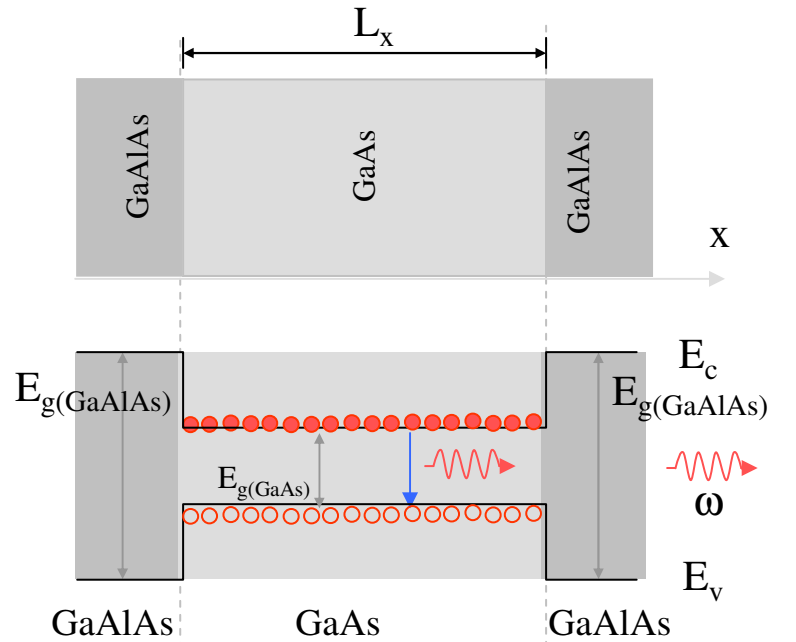
$$D^{0B}(E) = \sum_n 2\delta(E - E_n)$$



Yığınsal (Bulk)-Kuantumluluğa Karşı



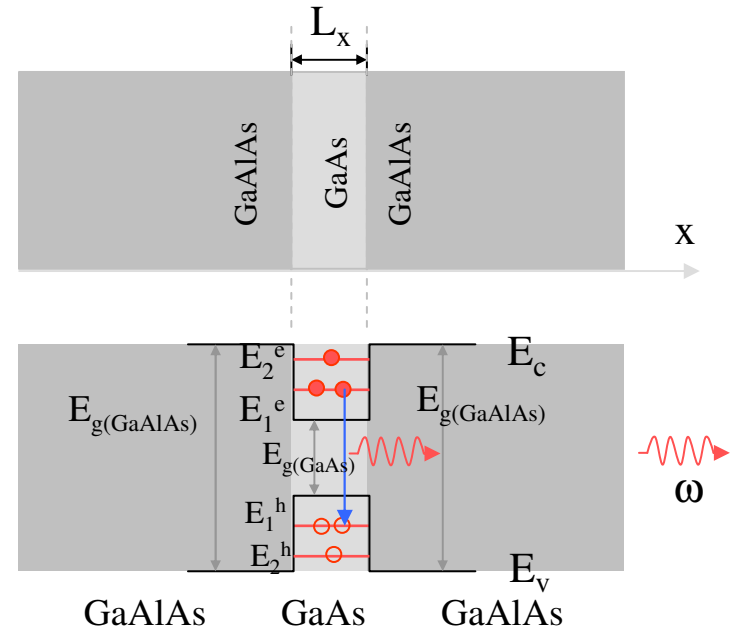
Yığınsal (bulk) Yapı $L_x \gg \lambda_e$



Enerji $E^e = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} = E_c$ $E^h = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} = E_v$

Frekans $\omega = \frac{(E_c - E_v)}{\hbar} = \frac{E_g}{\hbar}$

Kuantum Kuyusu $L_x \approx \lambda_e$

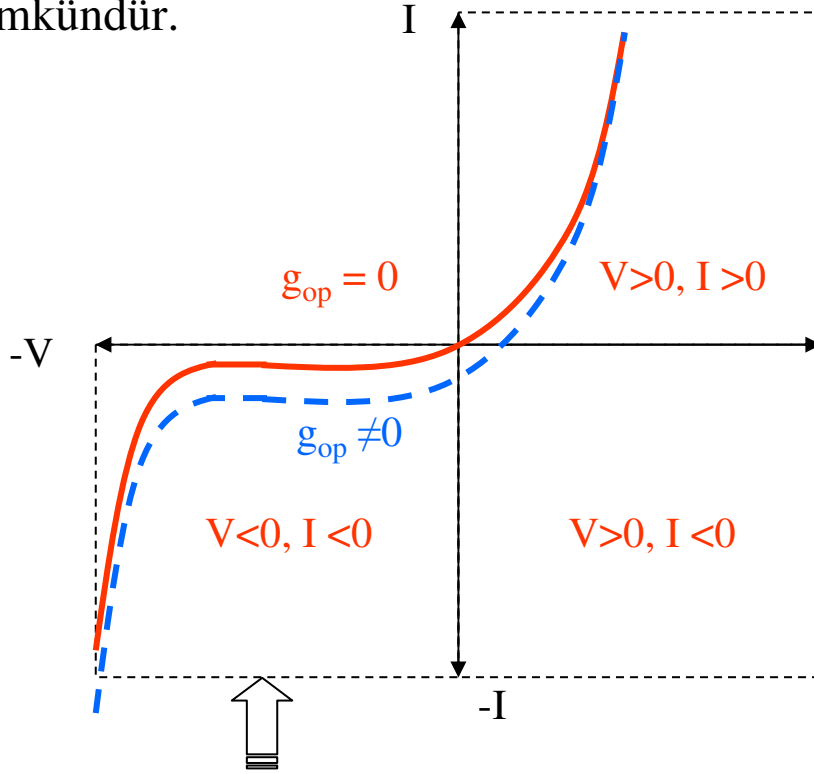


$E_n^e = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} \left(\frac{n\pi}{L_x} \right)^2$ $E_n^h = \frac{\hbar^2}{2m_h^*} \left(\frac{n\pi}{L_x} \right)^2$ $n=1, 2, 3..$

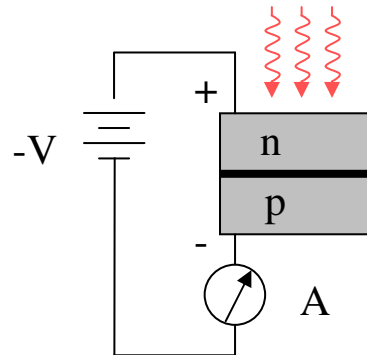
Frekans $\omega = \frac{(E_g + E_n^e + E_n^h)}{\hbar}$ 26

Yarıiletken Eklemlerin Optoelektronik Uygulamaları-1

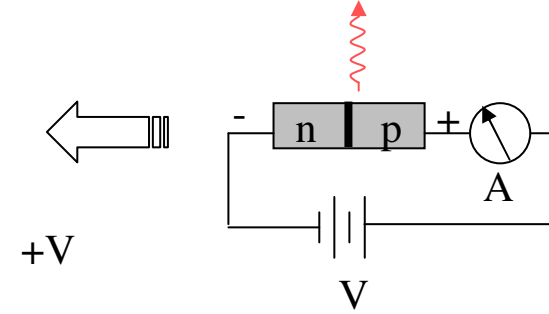
Yarıiletkenlerin optoelektronikte kullanılması farklı katkılanma ve eklemler yapılarak mümkündür.



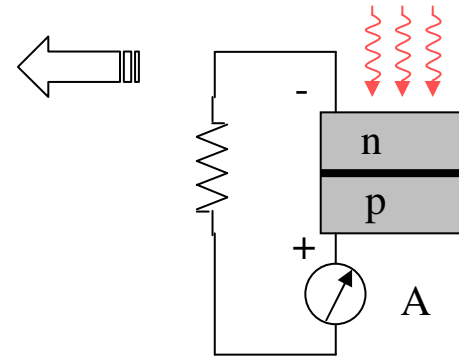
III. Bölge ($V < 0, I > 0$): Dedektörler
Akım gerilimden bağımsız, optik şiddet ile orantılı



I. Bölge ($V > 0, I > 0$): LED ve Lazerler



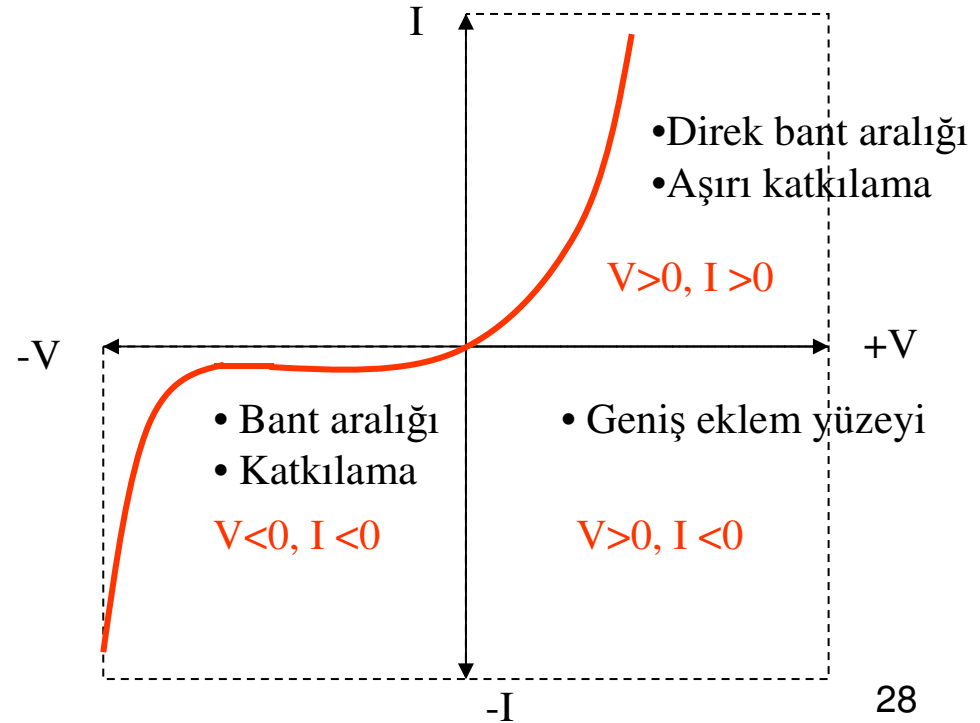
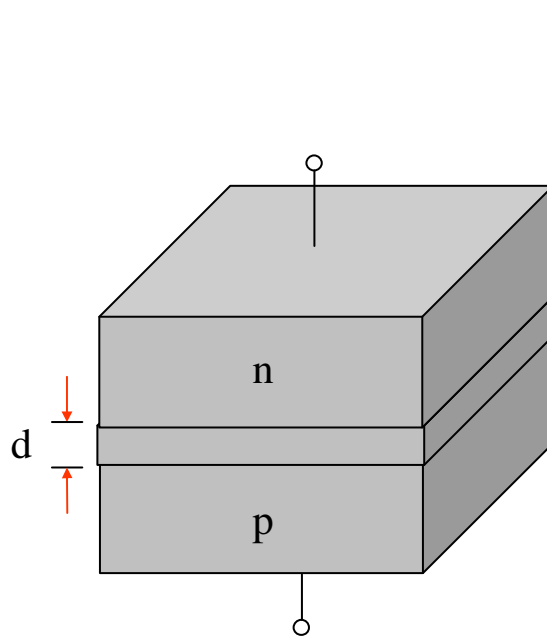
IV. Bölge ($V > 0, I < 0$): Güneş Pilleri



Yarıiletken Eklemlerin Optoelektronik Uygulamaları-2

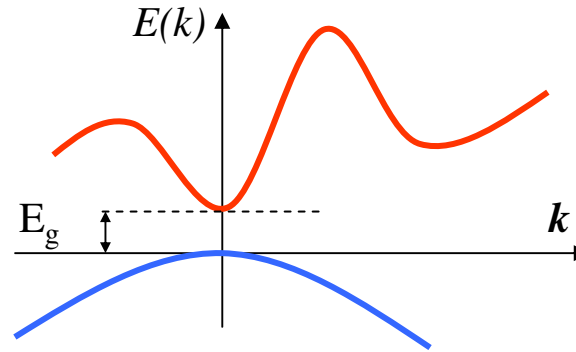
Yarıiletkenlerin optoelektronikte kullanılması farklı katkılanma ve eklemler yapılarak mümkündür.

- Eklemlerde kullanılan malzemenin bant yapısı doğrudan-dolaylı (ışık algılayıcı-ışık yayıcı)
- Malzemenin yasak bant aralığı (yayılan veya algılanan ışığın frekansı)
- Katkılama oranı (tüketim bölgesinin genişliği-d)
- Boyut kuantalanması (verimli optoelektronik devre elemanları)



Optoelektronik Malzemeler-1

- Optoelektronik teknolojisinde kullanılacak malzemeler, elektronik teknolojisine özgü kriterleri sağlamalarını yanısıra bazı optik kriterleri de sağlamaları gerekir. Işık üretiminde kullanılacak bir devre elemanının yapımında kullanılacak bu kriterden biri malzemenin dolaylı bant aralığına sahip olmasıdır.

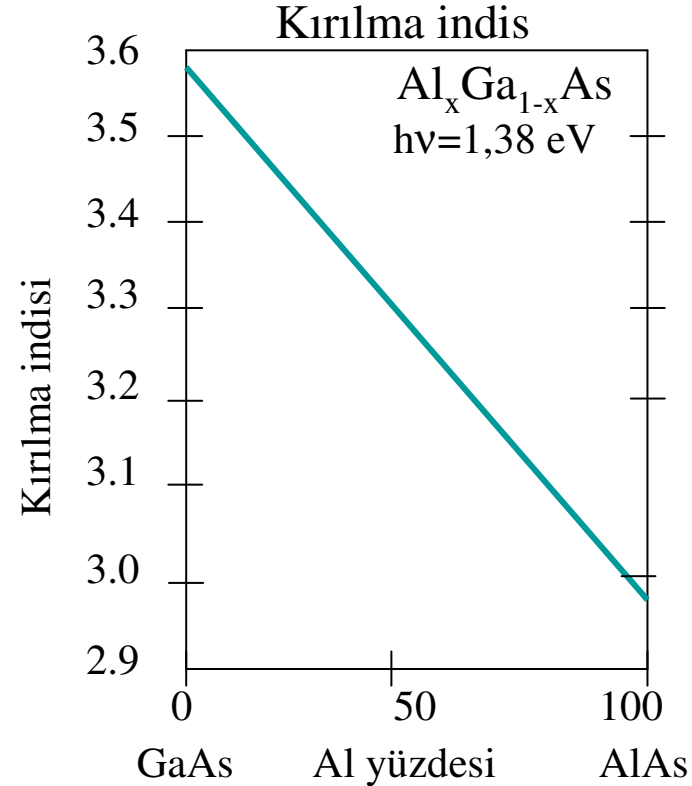
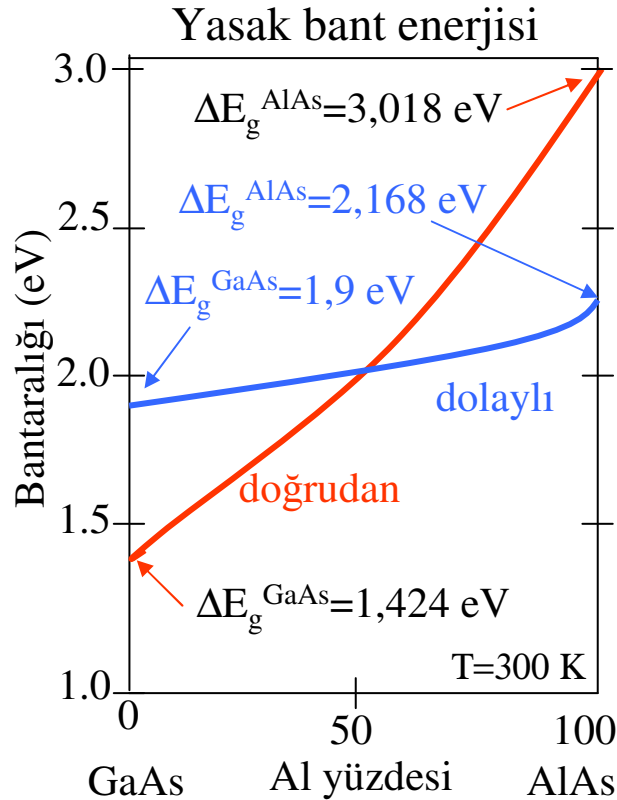


Doğrudan bant aralıklı malzeme

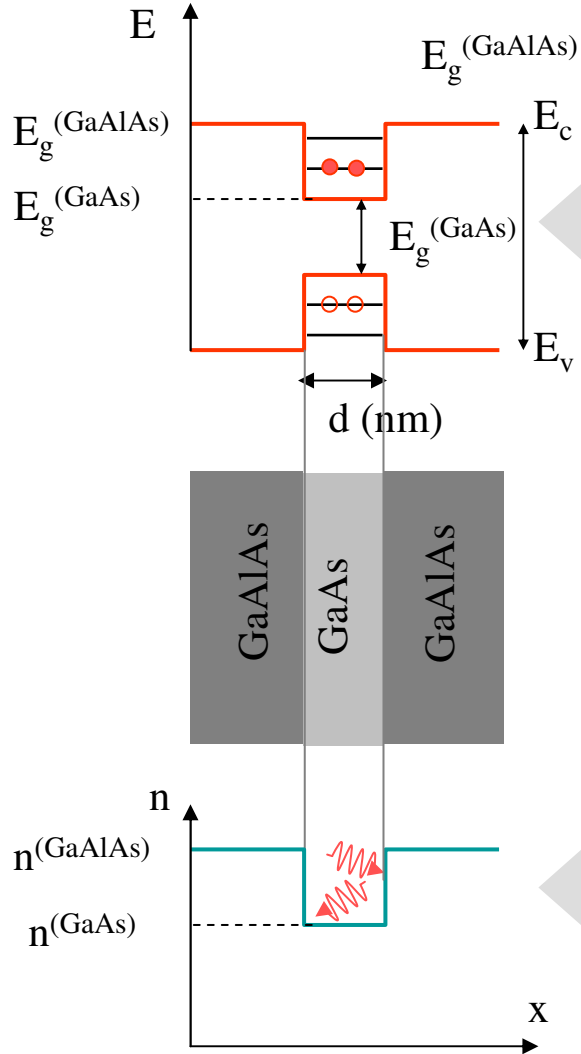
- Dolaylı bant aralıklı malzemelerde iletim bandındaki elektronlar değerlik bandına doğrudan geçiş yapabildikleri için (fononlara ihtiyaç duymadan) geçiş ve dolayısı ile foton üretimi çok verimli olur.
- Bileşik yarıiletkenler doğrudan bant aralığına sahip oldukları için optoelektronik teknolojisinde çok yaygın olarak kullanılır (GaAs, GaAlAs).
- Verimli ışık aygıtlarının yapılabilmesi için kristal kusurlarının en az olması gerekir.
- Bant aralığının, istenilen dalgaboyunda ışık elde edecek (algılayacak) şekilde ayarlanabilmesi arzulanır.

Optoelektronik Malzemeler-1

- Bileşik yarıiletkenlerin sahip olduğu doğrudan bant yapısının yanısıra bileşikteki atomların konsantrasyonu değiştirilerek bant aralığı (E_g) da istenilen şekilde değiştirilebilir. Bu sayede doğada olmayan istenilen bant aralığına sahip yarıiletken malzemeler elde edilebilir ve düşük boyutlu kuantum yapılar üretilebilir.
- Bileşik yarıiletkenlerde kırılma indisi de konsantrasyona bağlı olarak değişir (Selmineer Denklemi). Bu sayede çok verimli optoelektronik devre elemanları üretilebilir.

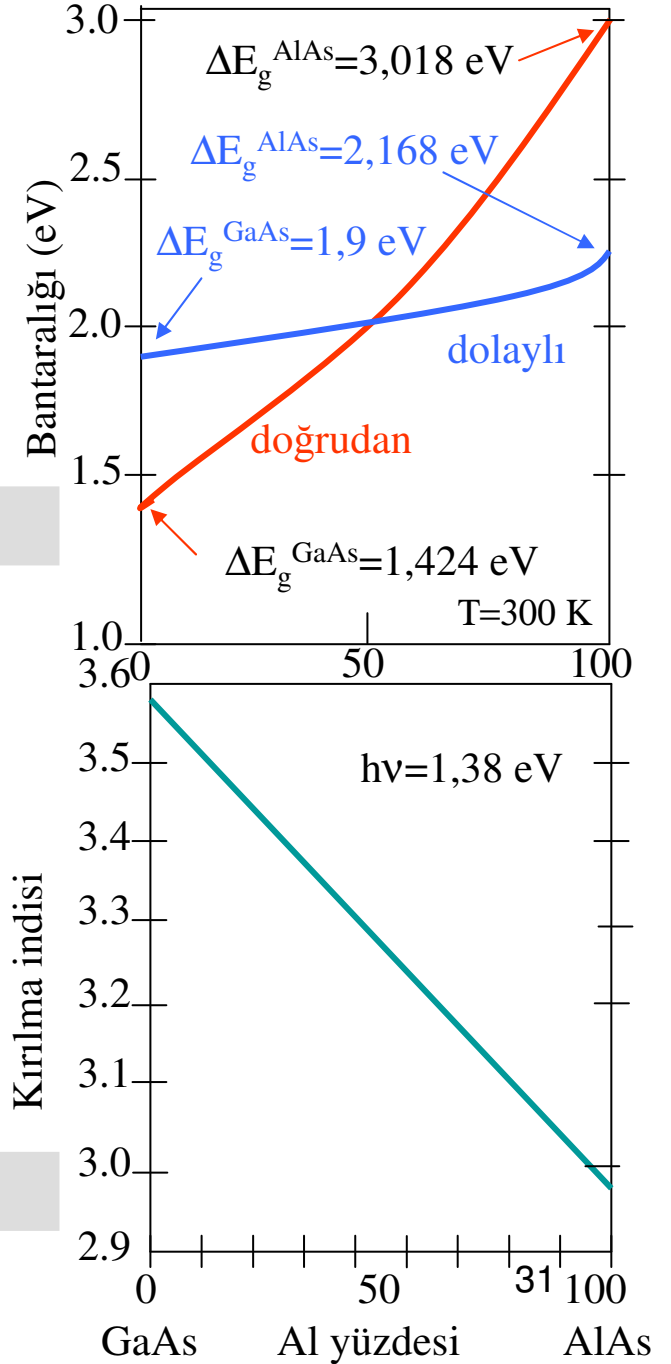


Farklı yasak bant aralığına sahip yarıiletken malzemeler kullanılarak oluşturulan düşük boyutlu kuantum yapılarda verim, hem elektronların (bant aralığının farklı oluşundan) hem de fotonlar (farklı kırılma indisinden) kuantum kuyusu hapsedildiklerinden dolayı artar.



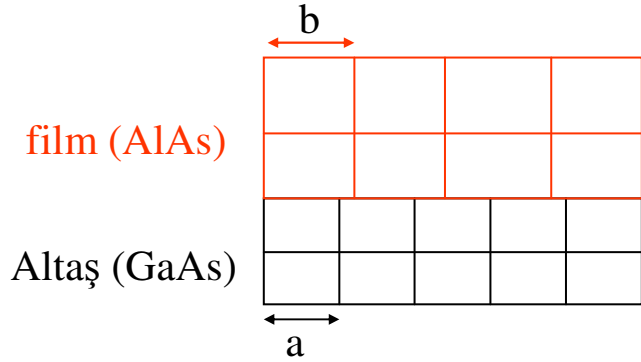
GaAlAs'nın yasak bant enerjisi artan Al yüzdesi ile arttığı için kuantum kuyusu oluşturulabilir. Kuantum kuyusu (GaAs) elektronlar ve deşikleri kuyuda tuttuğundan e-d birleşmesi çok verimli olur.

GaAlAs'nın kırılma indisi artan Al yüzdesi ile azaldığı için oluşturulan kuantum kuyusu (GaAs) kırılma indisi kuantum engelinin (GaAlAs) kırılma indisinden daha büyük olduğu için (tam iç yansıma) fotonlar kuantum kuyusu hapsedildiğinden foton alanı artar ve lazer olayı için gereken foton alanı oluşturulur.



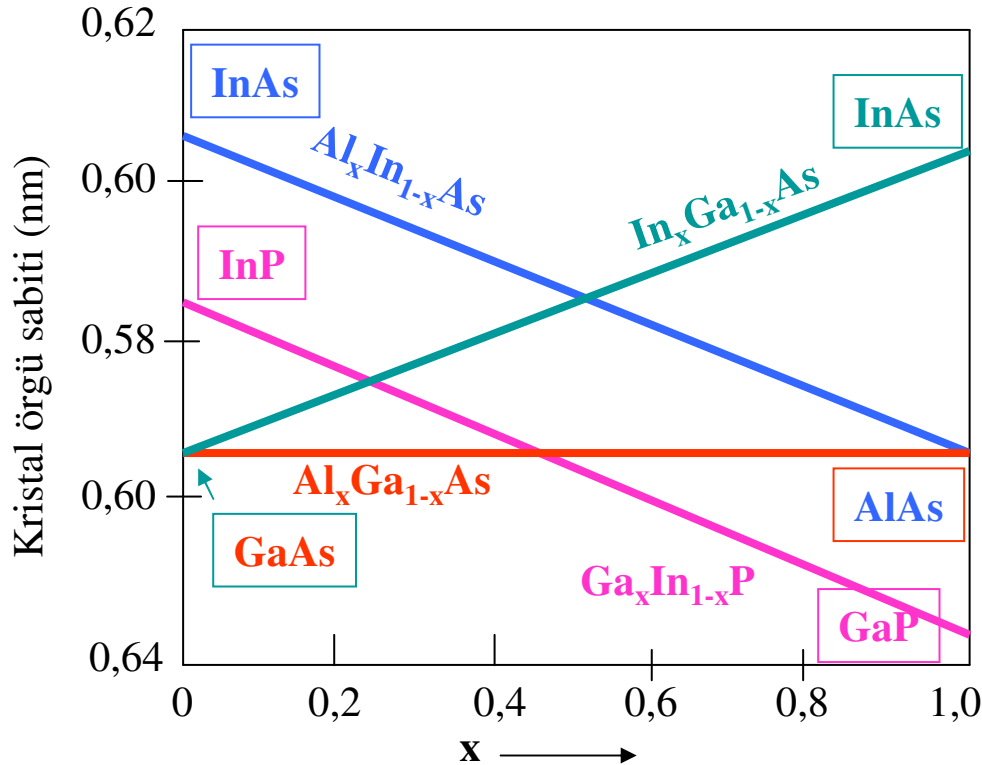
Optoelektronik Malzemeler-3

Farklı türden bileşik yarıiletkenleri büyütmek için uygun bir alttaşın bulunması gerekmektedir.

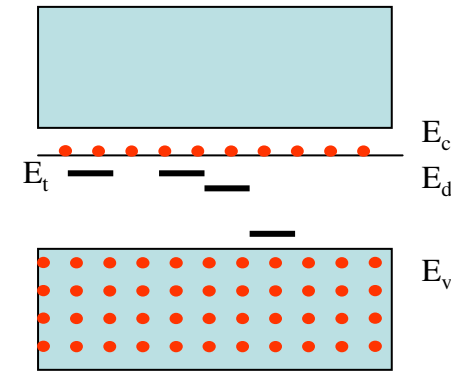


Altaşın ve üzerinde büyütülecek filmin kristal örgü sabitleri arasındaki fark çok küçük olmalıdır.

$$\left| \frac{b-a}{a} \right| < \%1$$

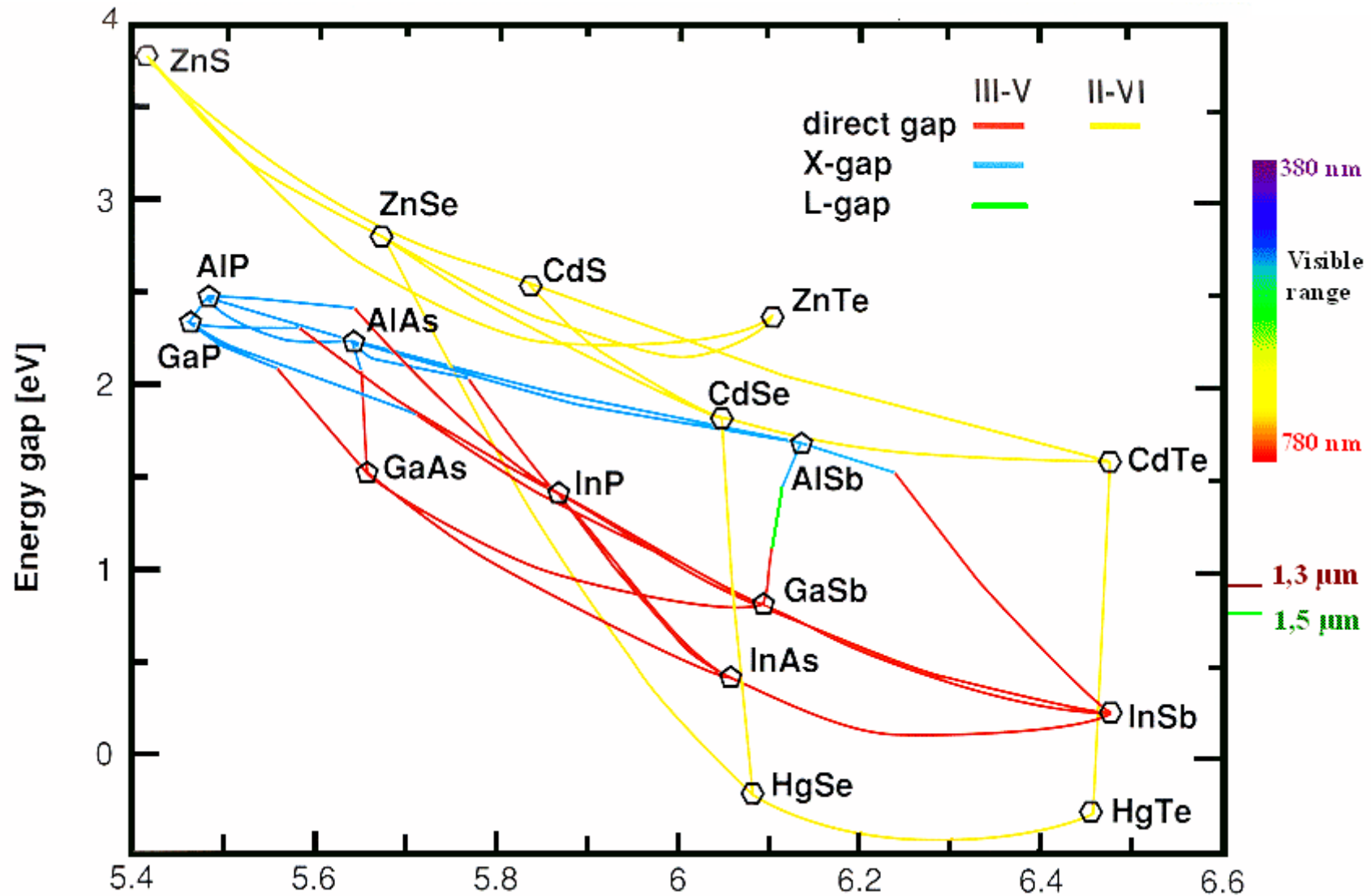


Örgü sabitleri arasındaki fark ne kadar büyük olursa alttaş üzerinde büyütülecek filmin kalınlığı da o kadar çok azalır.



Optoelektronik Malzemeler-4

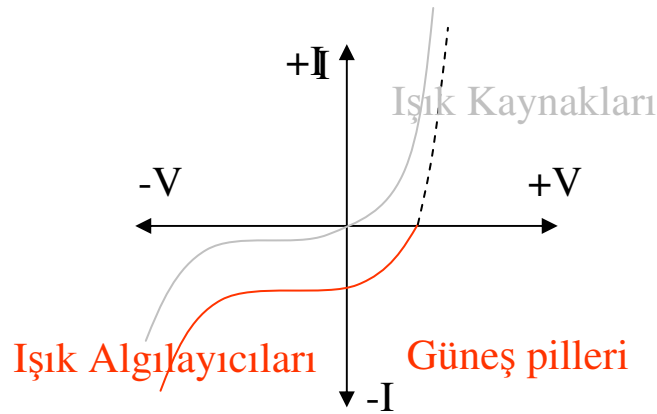
Bileşik yarıiletkenlerde örgü sabiti ve yasak bant enerjisi



Optoelektronik Malzemeler-5

Yarıiletken malzemeler (tek atomlu ve bileşik yarıiletkenler) yasak bant özelliklerine göre optoelektronik teknolojisinde farklı devre elemanlarının yapımında kullanılır.

- **Tek Atomlu Yarıiletkenler**
silikon (Si), germanyum (Ge)



Dolaylı Bant yapısı (Si)

- **Bileşik Yarıiletkenler**

III-V

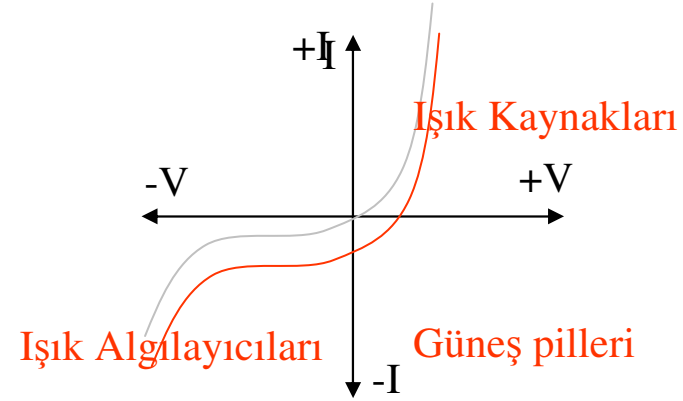
İkili (Ternary) => GaAs, AlAs, InAs, InP

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

II-VI

İkili (Ternary) => HgTe, CdTe

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



Doğrudan (direk) Bant yapısı (GaAs)

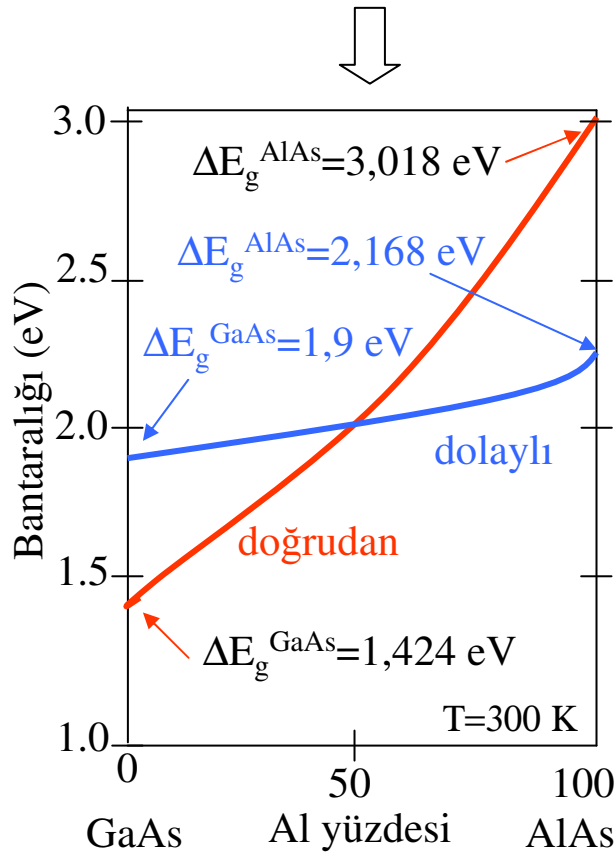
Optoelektronik Malzemeler-GaAlAs

Bant enerjisi

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ için bant aralığı (293 °K)

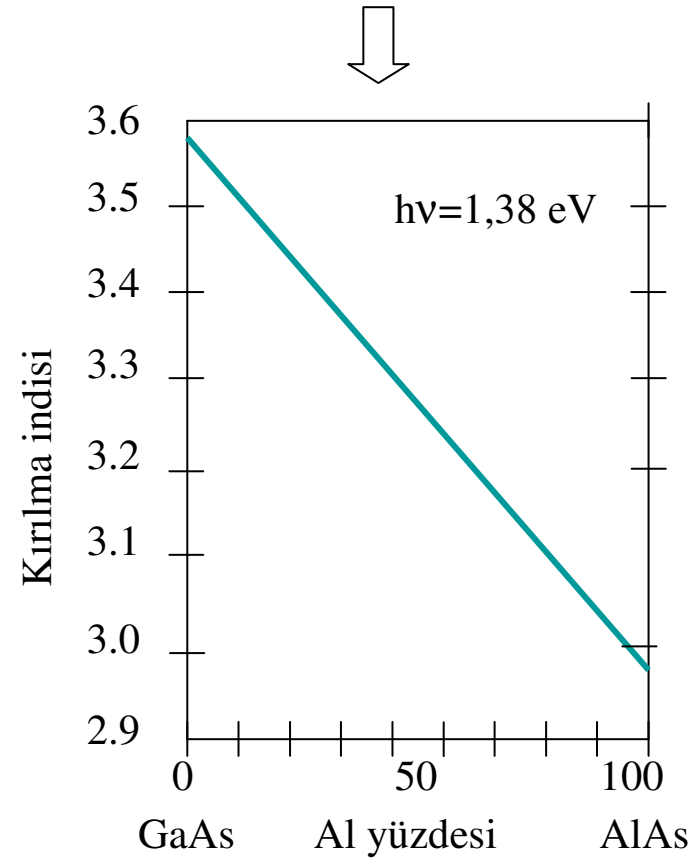
$$E_g(x) = E_g(\text{GaAs}) + (1.429\text{eV})x - (0.14\text{eV})x^2$$

$x > 0.44$, için AlGaAs indirek bant aralığına sahiptir.



Kırılma indisi

$$n^2(x) = A(x) + \frac{B}{\lambda_o^2 - C(x)} - D(x)\lambda_o^2$$

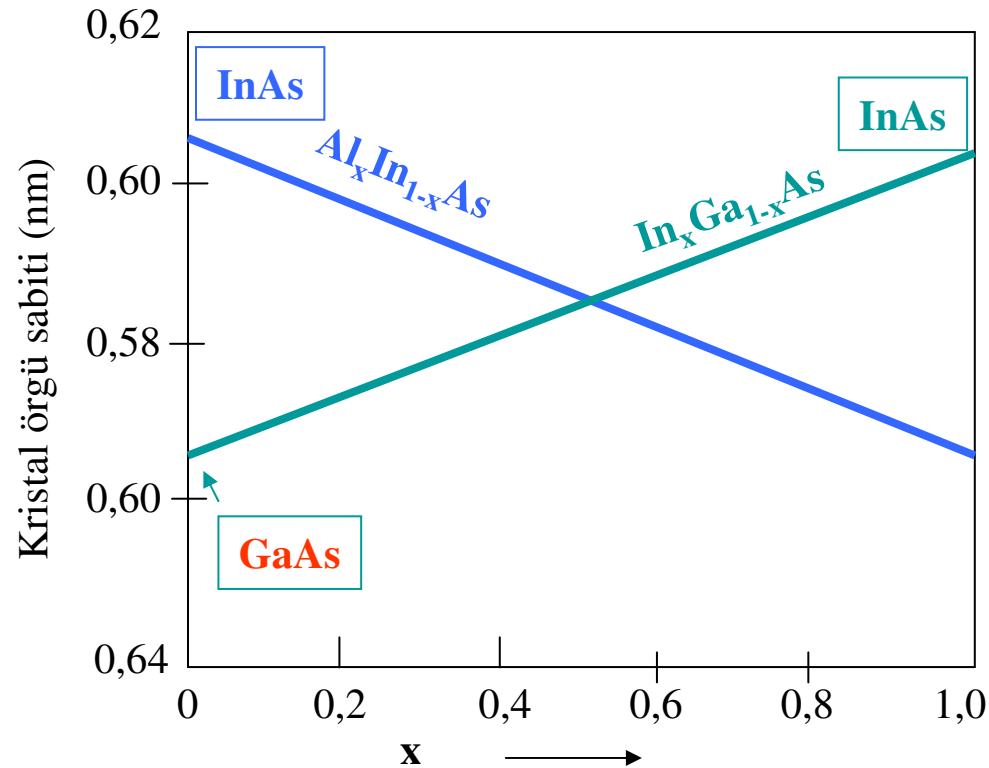


Optoelektronik Malzemeler-InGaAs

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ için bant aralığı (300°K)

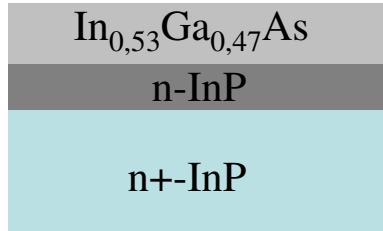
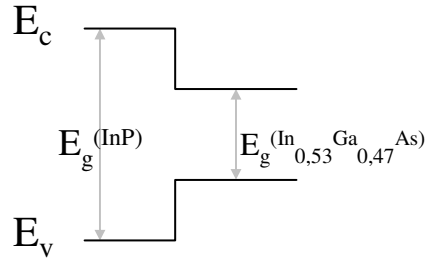
$$E_g(x) = 1.425\text{eV} - (1.501\text{eV})x + (0.436\text{eV})x^2$$

Bütün x değerleri için InGaAs direk bant aralığına sahiptir.



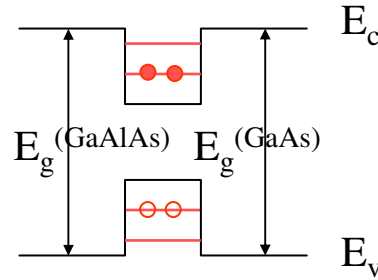
Optoelektronik Yapılar

Bileşik yarıiletken yapılar MBE, MOCVD gibi tekniklerle üretilir.



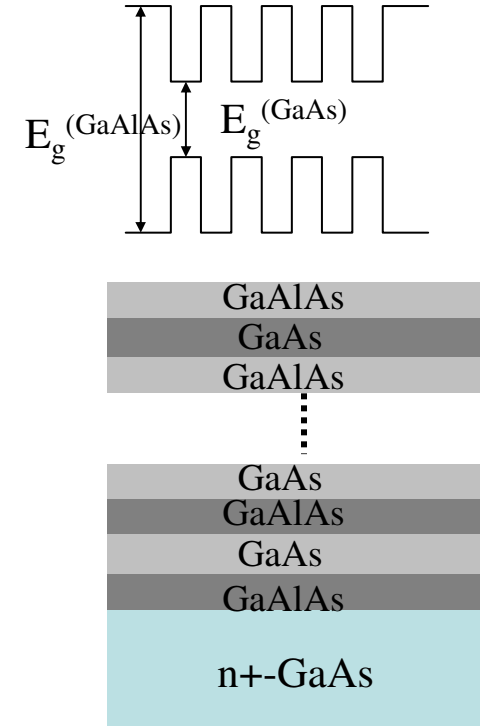
Basit Heteroyapılar

Farklı bant aralıklı malzemeler (örneğin InP and InGaAs) bir araya getirilerek kuantum yapılar elde edilir.



Kuantum Kuyuları

Düşük bant aralığına sahip (örneğin GaAs), yüksek bant aralığına sahip başka bir malzeme ile (örneğin GaAlAs) sandviç yapıda büyütüldüğü takdirde düşük bant aralığına sahip malzemenin iletim bandı elektronlar için, değerlik bandı ise deşikler için kuantum kuyusu oluşturur.



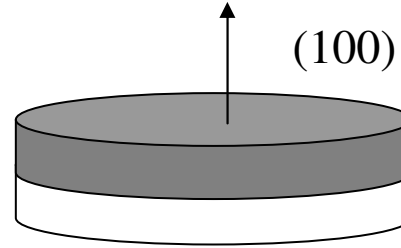
Çoklu Kuantum Kuyuları

Çoklu kuantum kuyular üst üste büyütülebilir. Kuantum kuyuları arasındaki mesafe yakın olduğu durumda (süper örgü) kuantum kuyuları etkileşerek taşıyıcılar kuyular arasında tünelleme ile geçebilmektedir.

Optoelektronik Malzeme Üretim Teknikleri

Optoelektronik malzemeler (heteroyapılar) çoğunlukla epitaksi kristal büyütme teknikleri ile üretilirler

Epitaksi, kelime anlamı ile alttaşın kristal yapı ve doğrultusunu koruyarak yapılan büyütme işlemine denir

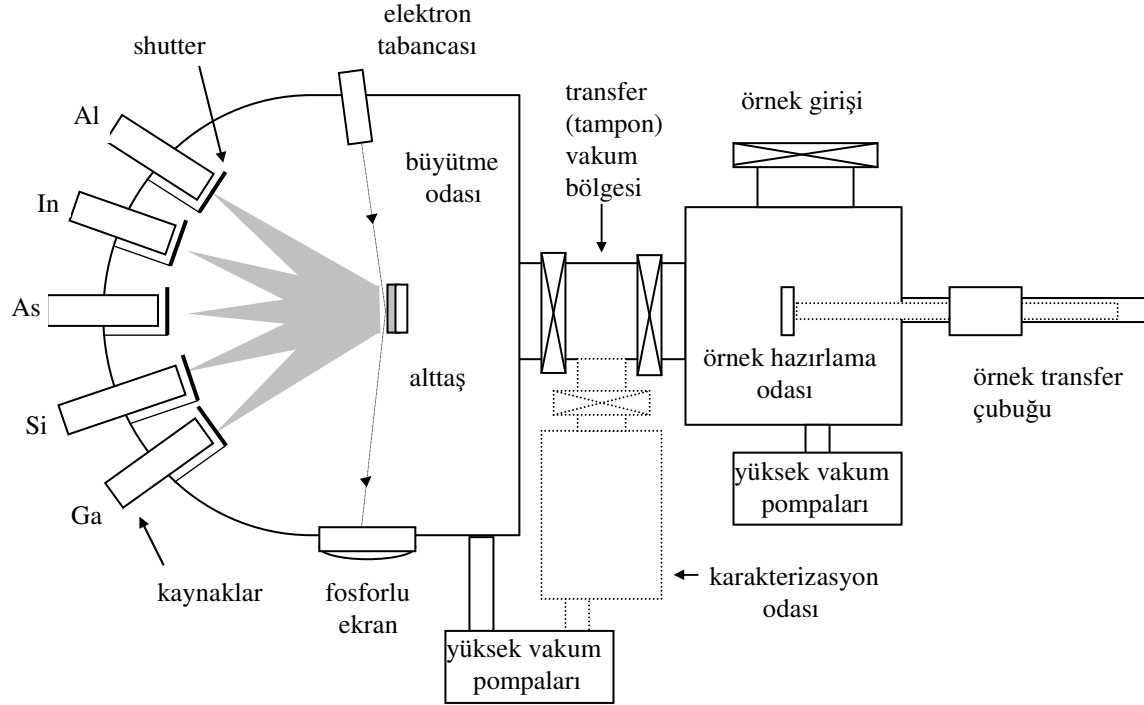


Yaygın optoelektronik malzeme üretim teknikleri:

- Sıvı Fazı Epitaksi (Liquid Phase Epitaxy, LPE)
- Buhar Fazı Epitaksi (Vapor Phase Epitaxy, VPE)
- Organik Metal Kimyasal Faz Epitaksi (Metalorganic Chemical Vapor Deposition, MOVPE)
- Organik Metal Kimyasal Buhar Epitaksi (Metalorganic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)
- **Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE)**

Molekül Demeti Yöntemi (MBE)

- Çok yüksek vakum ($< 10^{-10}$ mbar) altında gerçekleştirilen epitaksiyel büyüme yöntemidir
- Genellikle III-V bileşik yarıiletken yapılar (GaAlAs, InAlAs vs) büyütülmektedir.



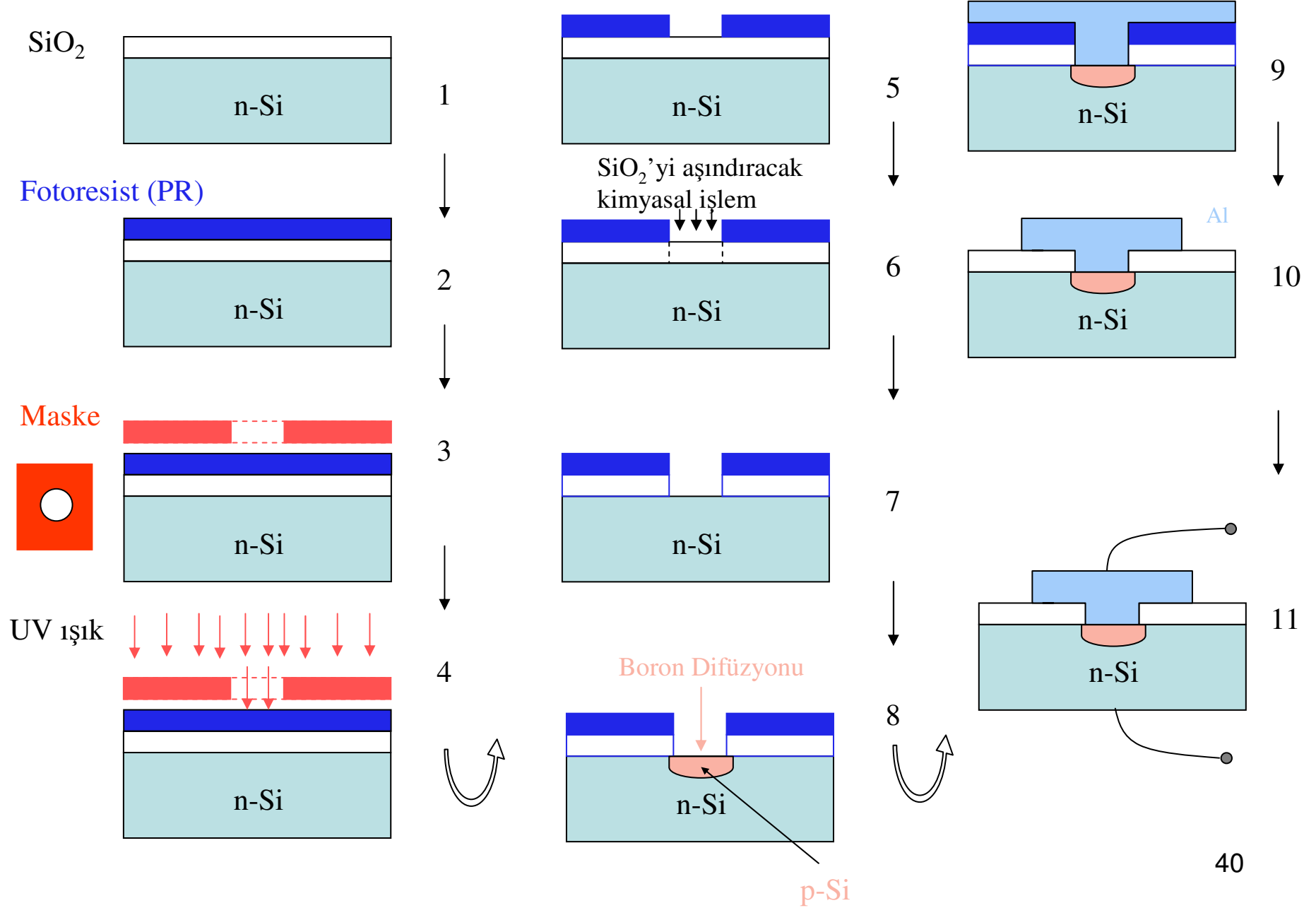
Üstünlükleri:

- Atomik mertebede kalınlık kontrolü,
- Saflık derecesi çok iyi olan malzemeler üretilebilir,
- Büyütme sırasında çok iyi katkılanma kontrolü sağlanabilir,
- Lazer, dedektör ve modülatör gibi heteroyapılar için ideal.

Olumsuzlukları:

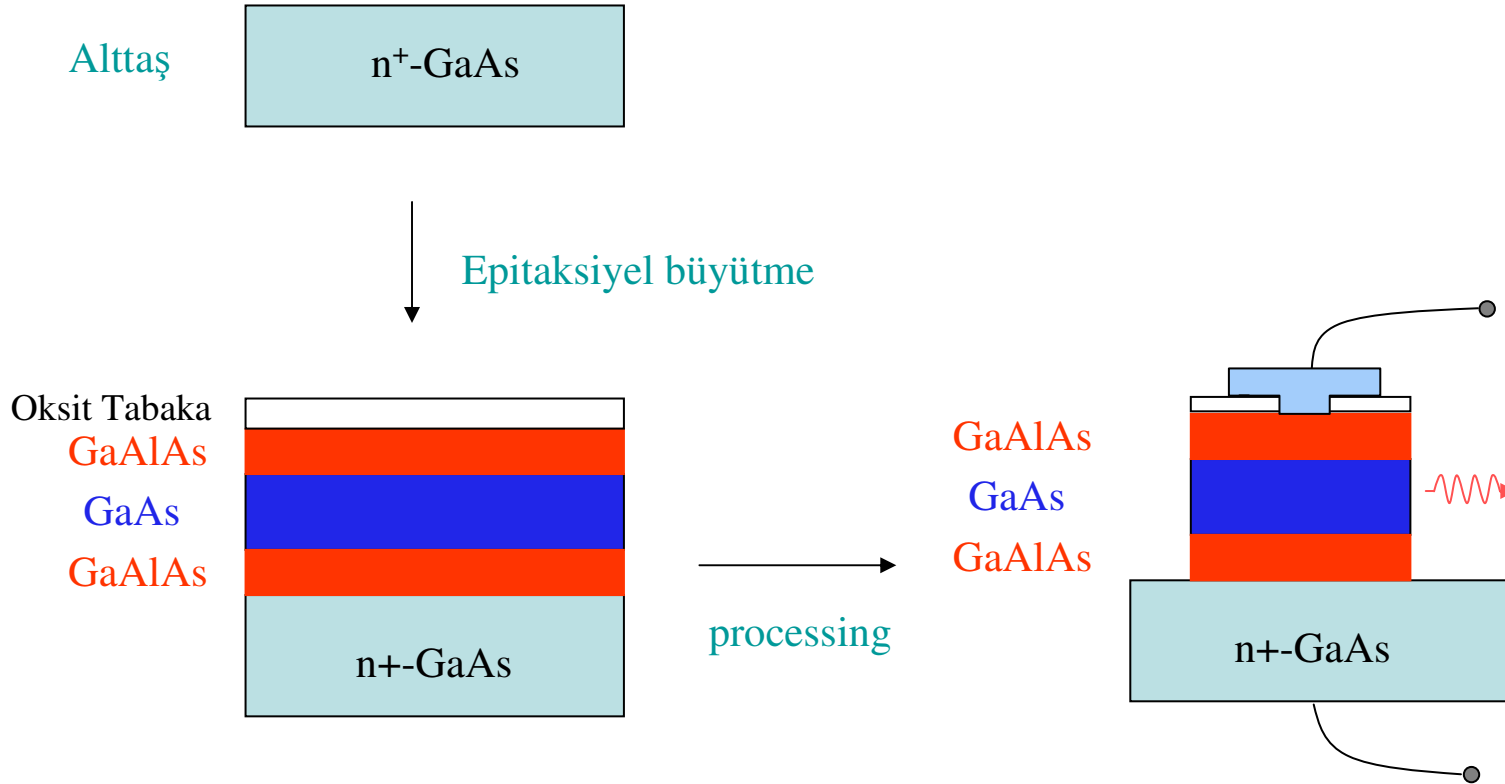
- Kristal büyüme hızı yavaş $< 1 \mu\text{m/sa}$
- Seri üretime uygun değil,
- Oldukça pahalı (Million Buck Epitaxy),

Yarıiletken Teknolojisi-Diyot Fabrikasyonu



Yarıiletken Teknolojisi-Lazer Fabrikasyonu

Optoelektronik devre elemanları daha çok birleşik yarıiletkenlerden (heteroyapılar) yapıldığı için MBE, MOCVD gibi pahalı teknikler kullanılır, bu üretim teknikleri daha karmaşık ve yüksek maliyetlidir. Aşağıda basit bir yarıiletken lazerin yapım aşamaları gösterilmektedir:



Özet

Yarıiletkenlerin kullanışlığı farklı şekilde katkılandırılıp yapılar oluşturmaları ile sağlanır. Aynı yarıiletken farklı taşıyıcılarla katkılanarak p-n yapılar (homo) oluşturulabileceği gibi farklı malzemeler de farklı türden katkılanarak elektronik ve optoelektronik yapılar (hetero) oluşturulabilir.

Farklı yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan ve kuantum etkilerin olduğu yapılar göz çok verimli ve hızlı elektronik ve optoelektronik devrelerin yapımında kullanılır.

Yarıiletken yapıların I-V grafiğinin bilinmesi uygulama açısından önemlidir. Elektronik/optoelektronik devre elemanlarının çalışma ilkesi yarıiletken yapılardan elektron geçiş mekanizmasına dayanmaktadır.

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.