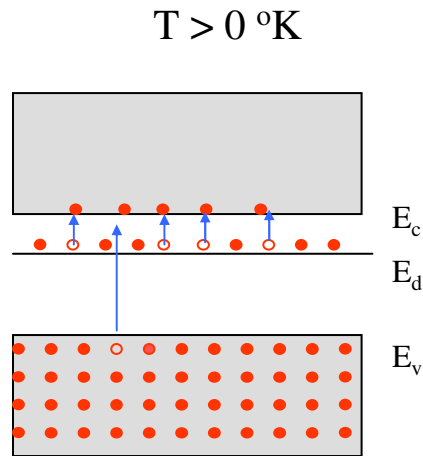


# 12. Ders

## Yarıiletkenlerin Elektronik Özellikleri



Bu bölümü bitirdiğinizde,

- Yalıtkan, yarıiletken, iletken,
- Doğrudan (direk) ve dolaylı (indirek) bant aralığı,
- Etkin kütle, devingenlik,
- Katkılama,

konularında bilgi sahibi olacaksınız.

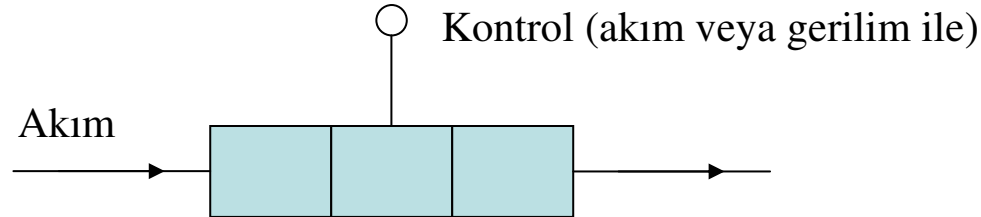
# Onikinci Ders: İçerik

- Yarıiletken, İletken, Yalıtkan
- Enerji Bantları
- Katkılama
- Yarıiletken İstatistiği

# Motivasyon: Niye Yarıiletkenlik?

- Aynı malzemeden hem iletken hem de yalıtkan özellik gösteren malzeme elde etmek mümkün (iletkenler her zaman tümüyle iletken, yalıtkanlarda her zaman tümüyle yalıtkanlardır).
- Aynı malzemeye farklı katkı atomları ekleyerek istenirse yük iletimi elektronlarla veya deşiklerle (hole) iletmek mümkündür (iletkenlerde sadece elektronlarla yapılmaktadır).
- Yapısal elektrik alan oluşturulabilir.
- Bunun bir sonucu olarak:

Diyot (iki uçlu) ve transistör (üç uçlu) gibi kontrol işlevli devre elemanları yapmak mümkündür.

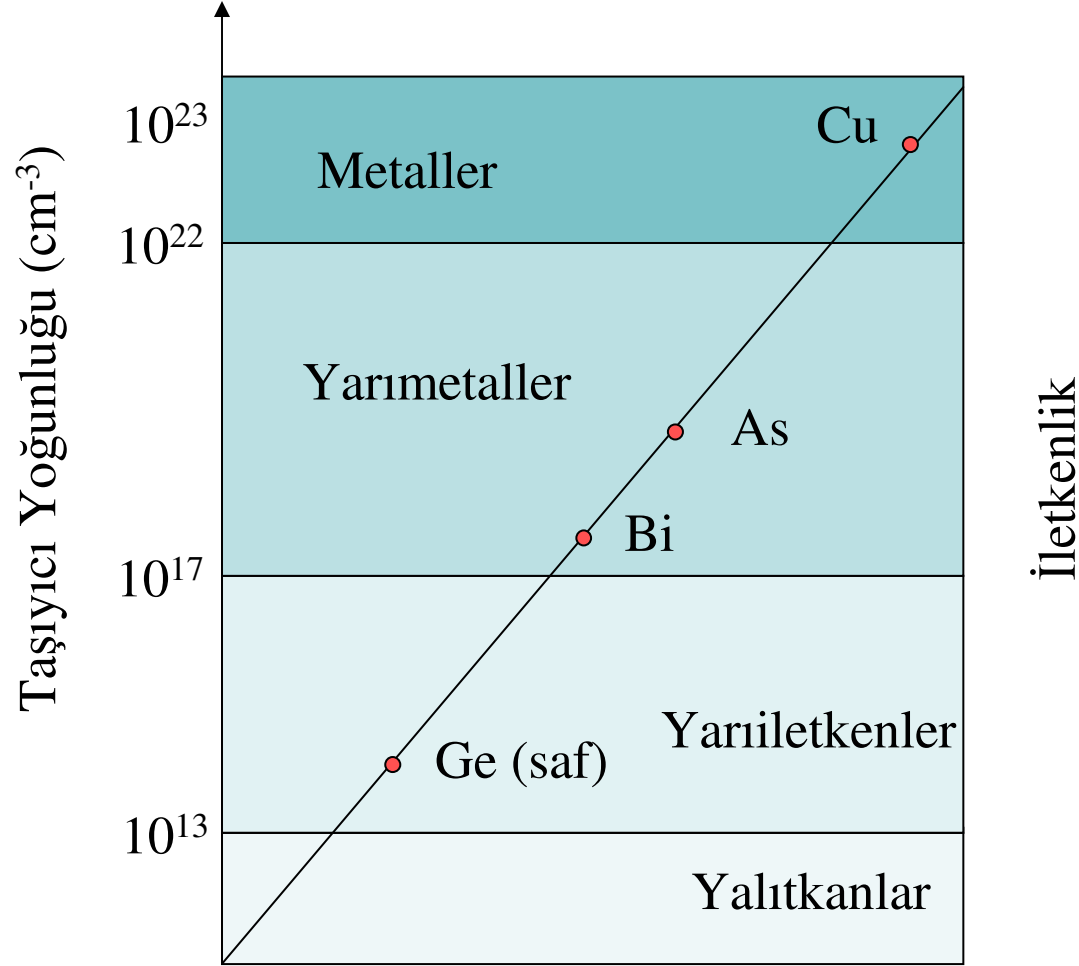


Üç uçlu devre elemanları mantık elemanlarının (VE, VEYA mantık kapıları gibi) yapımını olanaklı kılar.

Ayrıca, yarıiletkenlerde devingenlik çok daha büyüktür. Bu hızlı elektronik devre elemanlarının üretiminde büyük üstünlük sağlar.

# İletken, Yarıiletken, Yalıtkan

İletken, yarıiletken ve yalıtkanların serbest taşıyıcı yoğunluğu

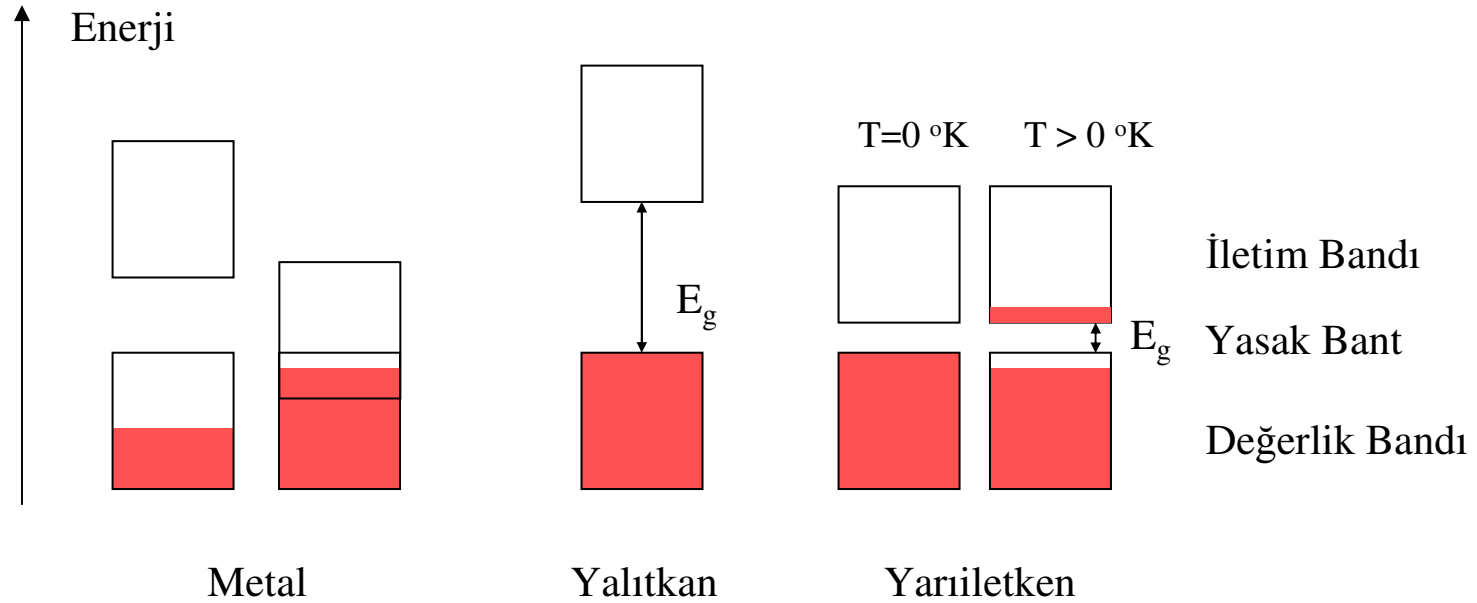


Özdirenç ( $\rho$ ):  $\rho_{\text{metal}} = 10^{-10} \Omega\text{-cm}$   
 $\rho_{\text{yarıiletken}} = 10^{-2} - 10^9 \Omega\text{-cm}$   
 $\rho_{\text{yalıtkan}} = 10^{22} \Omega\text{-cm}$

Yalıtkan ile iletken arasındaki özdirenç farkı  $10^{32}$  mertebesinde!

# İletken, Yarıiletken, Yalıtkan: Bant Yapıları

Maddelerin elektriksel özellikleri bu maddelerin elektronik bant yapısı ile yakından ilgilidir.



Enerji bantları tamamen dolu veya tamamen boş ise kristal yalıtkan gibi davranır çünkü elektrik alan uygulandığında bant içinde boş yerler olmadığı için elektronlar hareket edemezler (yük taşıyamazlar)!

$$E_g \text{ yalıtkan} \gg E_g \text{ yarıiletken}$$

$$E_g \text{ (Ge)}=0,6 \text{ eV (yarıiletken)}$$

$$E_g \text{ (Si)}=1,12 \text{ eV (yarıiletken)}$$

$$E_g \text{ (C)}=5,4 \text{ eV (yalıtkan)}$$

$$E_g \text{ (GaAs)}=1,43 \text{ eV (yarıiletken)}$$

# Yarıiletken Elementler

IA												VIII B					
1 H												2 He					
IIA												III B	IV B	V B	VI B	VII B	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	III A	IV A	V A	VIA	VII A	VIII A	VIII A	VIII A	IB	II B	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac**	104 Unq	105 Unp	106 Uns												

Yarıiletken özellik gösteren elementler

# Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması

- Tek Atomlu Yarıiletkenler

silikon (Si), germanyum (Ge), karbon (C)!

- Bileşik Yarıiletkenler

### III-V

İkili (Ternary)  $\Rightarrow$  GaAs, AlAs, InAs, InP

Üçlü (Quaternary)  $\Rightarrow$   $Ga_xAl_{(1-x)}As$ ,  $In_xAl_{(1-x)}As$

### II-VI

İkili (Ternary)  $\Rightarrow$  HgTe, CdTe

Üçlü (Quaternary)  $\Rightarrow$   $Cd_xHg_{(1-x)}Te$

		III	IV	V	VI	VII
		B	C	N	O	F
I	II	Al	Si	P	S	Cl
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At

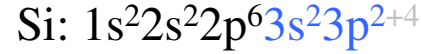


II-VI Bileşik Yarıiletkenler  
ZnS, CdS

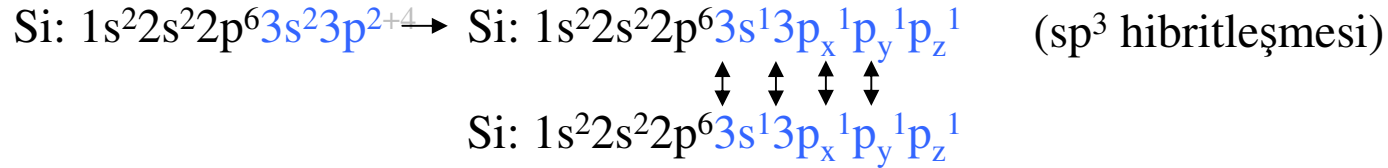


# Yarıiletkenler: Bağ yapıları

Yarıiletkenler son yörüngesi yarım dolu olan elementlerdir: C, Si, Ge (Bileşik yarı iletkenler de benzer özellik gösterirler) Örneğin silisyumu ele alalım:

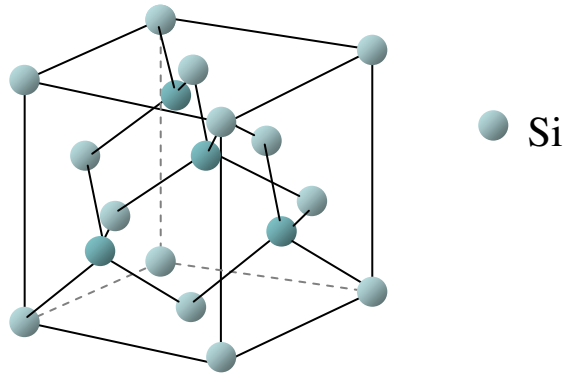


Si atomları bağ yapacağı zaman s ve p yörüngesindeki elektronlar hibritleşerek ( $sp^3$  hibritleşmesi) dört bağ yaparak aralarında  $120^\circ$  olacak şekilde bağ oluşturur.

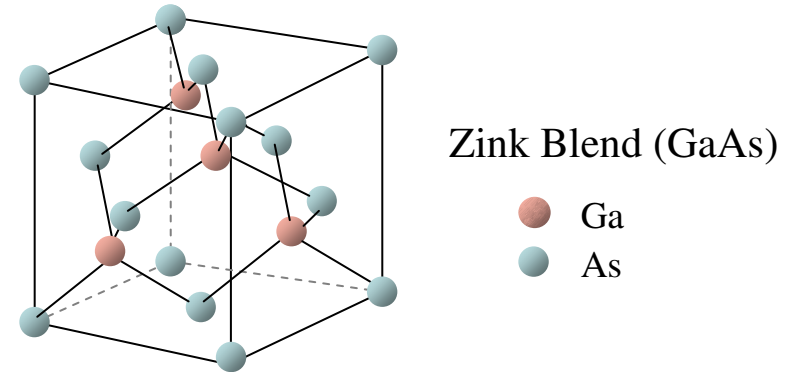


Bu hibritleşmenin sonucu olarak kovalent bağ oluşarak (elektron paylaşımı) elmas yapı olarak bilinen kristal yapı oluşur.

Diamond (elmas) C, Si, Ge



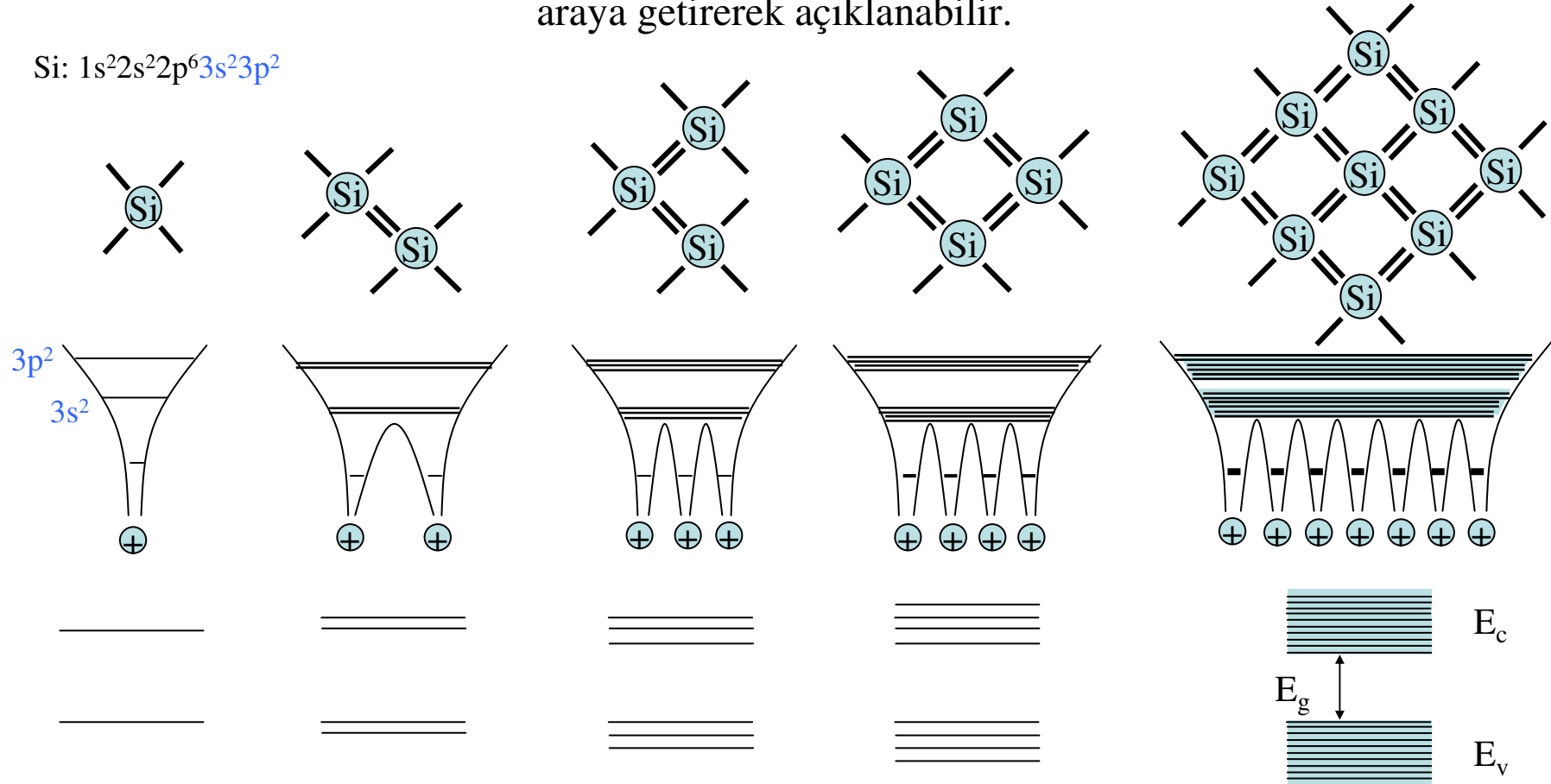
Grup III ve V atomları da benzer bağ yaparak Zink Blend kristal yapıyı oluştururlar.



# Yarıiletkenlerde Enerji Bantlarının Oluşumu

Yarıiletkenlerde bant yapısının oluşumunu silikon atomlarının kristali oluşturmak için bir araya getirerek açıklanabilir.

Si:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$



Ayrı Si atomunun 3s ve 2p yörüngeleri yarım doludur.

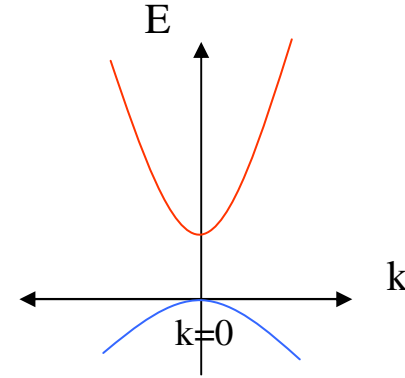
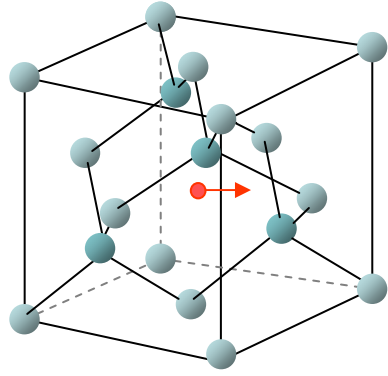
Bir Si atomunun yanına başka bir Si geldiğinde 3s ve 3p yörünge enerjileri ikiye bölünür ve diğer, alt alt yörüngeler (2s ve 2p) tersine bu yörüngeler her iki atoma aittir.

Si atomlarının sayısı artınca 3s ve 3p yörünge enerjileri atom sayısı kadar bölünmeye uğrar ve bu yörünge enerjileri bütün atomlara aittir. Bir araya gelen atom sayısı arttıkça (kristal) s ve p yörüngeleri Avagadro sayısı kadar yarılmaya uğrar ve artık kesikli enerjilerden oluşan sürekli bir enerji aralığı (bant) oluşur. s ve p yörüngelerini yarılması ile oluşan enerji bantları arasında kalan bölge ise yasak enerji aralığıdır.

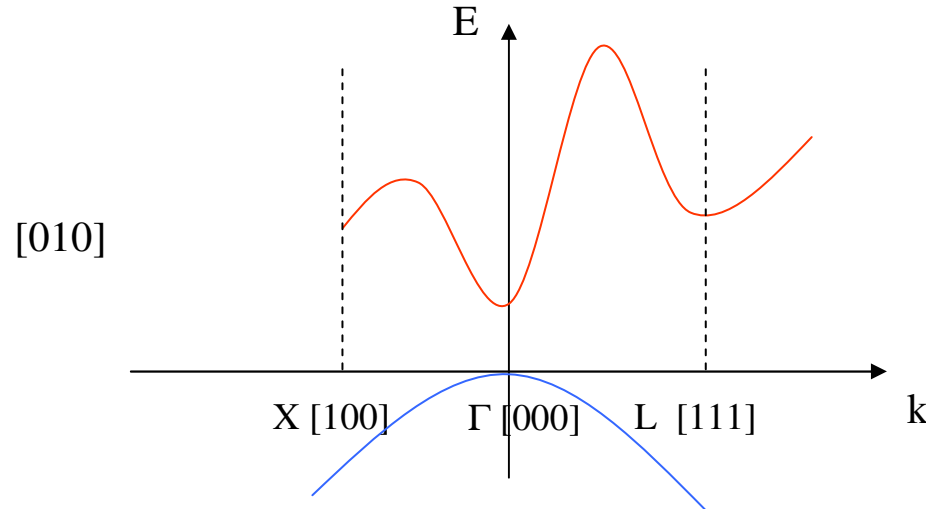
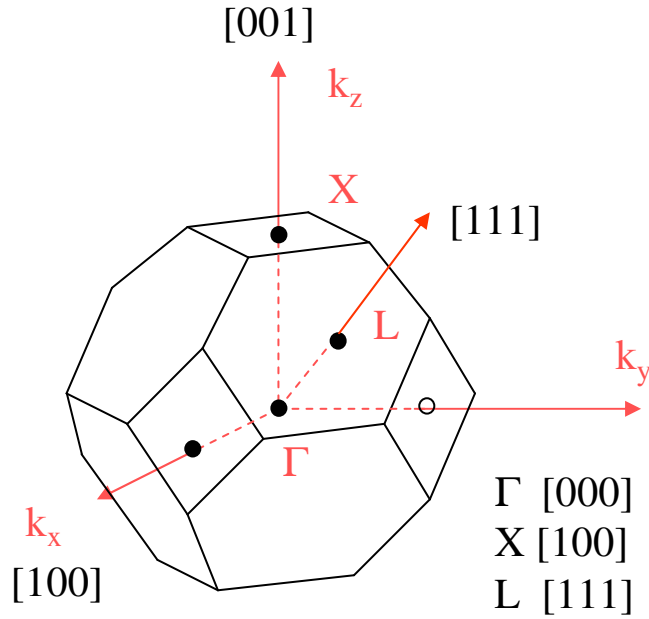
$E_c$ : İletim Bandı  
 $E_v$ : Değerlik Bandı  
 $E_g$ : Yasak Bant

# Yarıiletkenler: E-k Grafikleri

Yarıiletkenlerin elektronik ve optik özelliklerini sergileyebilmek için kristal içindeki taşıyıcıların dalga vektörüne ( $k$ ) karşı enerjiyi ( $E$ ) grafiğe geçirmek oldukça faydalıdır.



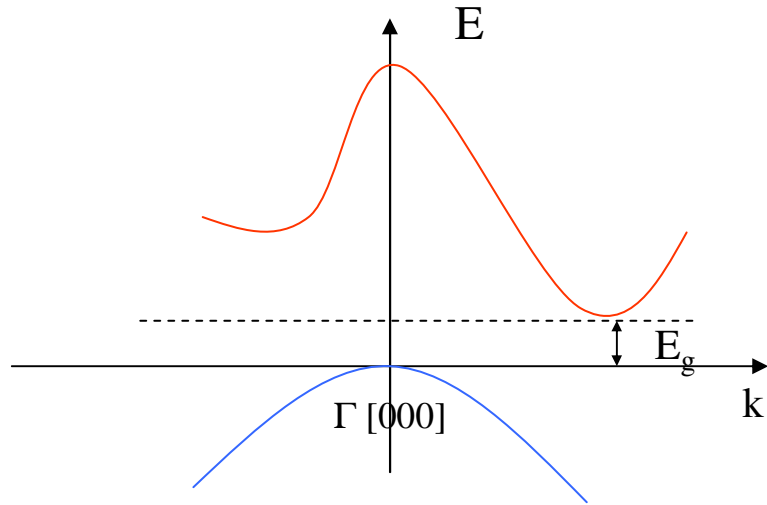
Dalga vektörü  $k$ , kristal içinde farklı doğrultularda farklı değerlere sahip olacağından farklı yönler için E-k grafikleri beraber çizilir.



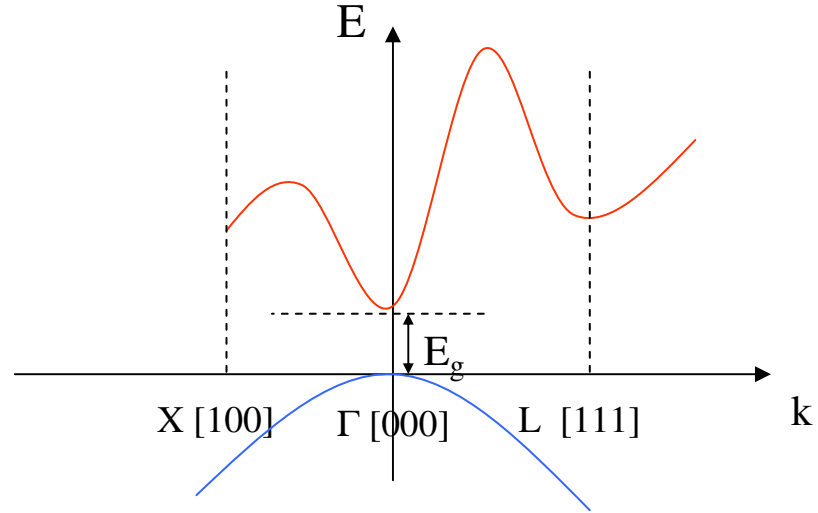
# Bant Aralığı

Yarıiletkenlerdeki taşıyıcıların enerji E-k grafiği bize önemli bilgiler verir. Enerji bantlarının şekline göre yarıiletkenleri iki sınıfa ayırabiliriz.

- Eğer iletim bandı ile değerlik bandı arasındaki enerji en düşük değere  $k=0$ 'da sahip ise bu yarıiletkenlere doğrudan bant aralıklı (direct bandgap) yarıiletkenler denir (örnek: GaAs).
- Eğer iletim bandı en düşük enerjiye  $k \neq 0$ 'da sahip ise bu yarıiletkenlere dolaylı bant aralıklı (indirect bandgap) yarıiletkenler denir (örnek: Si, Ge).



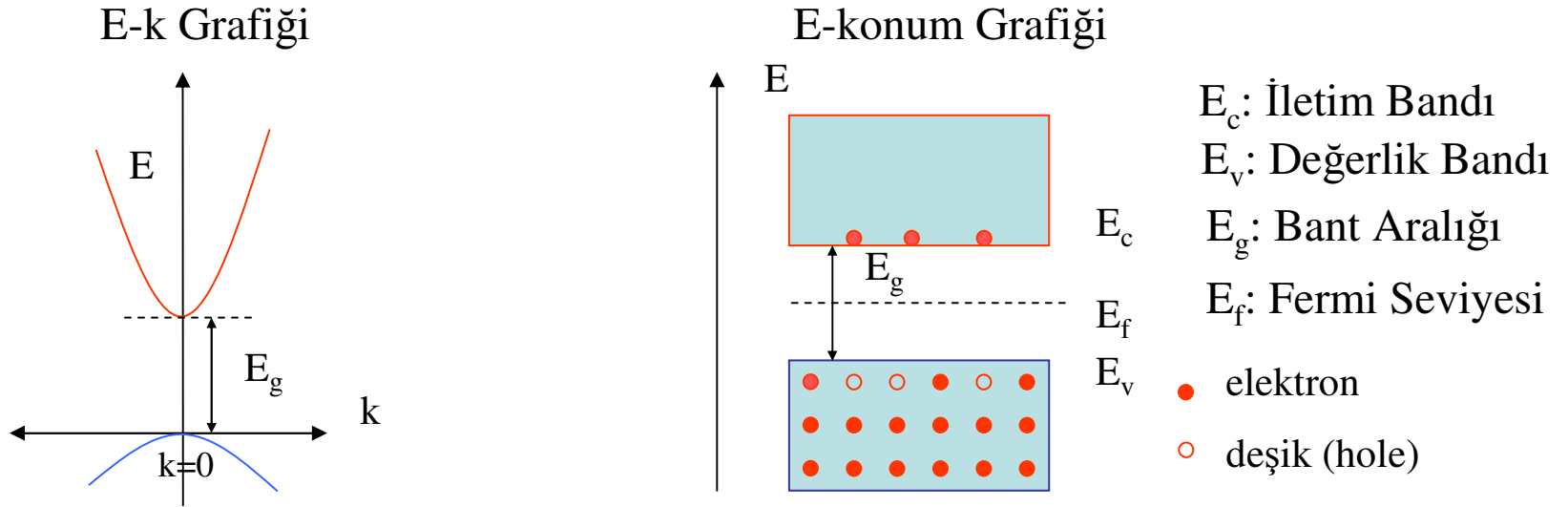
Dolaylı Bant aralığı



Doğrudan Bant aralığı

***Bir yarıiletkenin direk veya indirek bant aralığına sahip olması optik özelliklerini belirler ve u optoelektronik uygulamalar için kullanılıp kullanılmayacağı için en büyük kriterlerden biridir.***

# Yarıiletkenler-Bazı Tanımlar



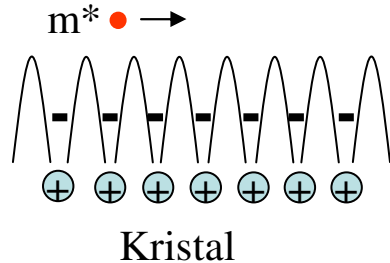
**Deşik (hole):** Değerlik bandında elektronun yokluğuna denir. Yükçe elektrona eşit, değeri pozitiftir.

## Etkin kütle ( $m^*$ ):

Kristaldeki elektronlar (ve deşikler) tümüyle serbest değildir. Elektronlar (deşikler) kristal içinde zayıf da olsa periyodik olan örgü potansiyeli ile etkileşmektedirler. Bu sebepten elektronların (deşiklerin) “dalga-parçacık” hareketinin boş uzaydakinden farklı olması beklenir. Periyodik örgü potansiyelini dikkate alarak elektronun (deşiğin) hareketini tanımlamak istersek elektronun (deşiğin) boş uzaydaki kütlesi ( $m_0$ ) yerine kristal etkisini içeren etkin kütesinden ( $m^*$ ) bahsetmemiz gerekir.

$m_0$  ● →

Boş uzay



Elektronların etkin kütlesi

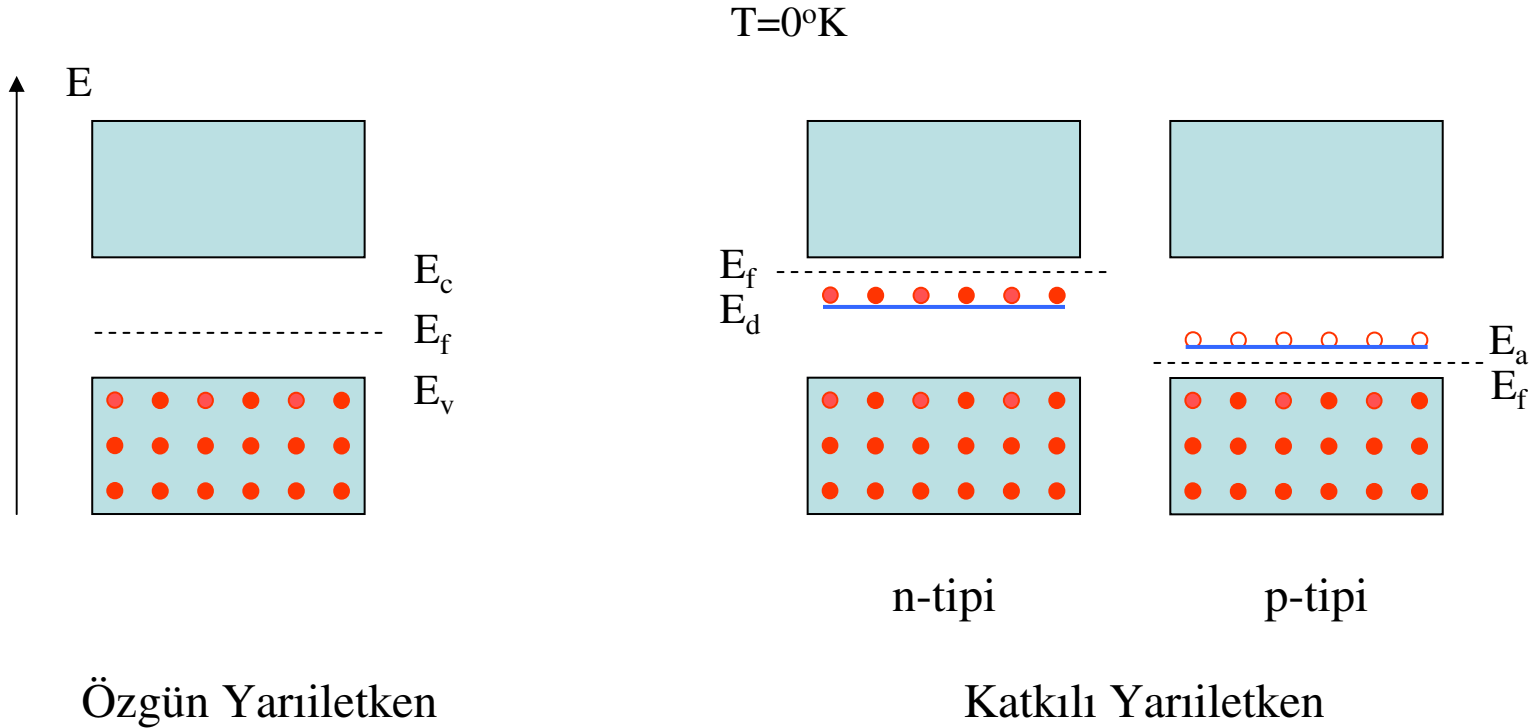
$$m_e^* = \frac{\hbar^2}{\left( \frac{\partial^2 E_c}{\partial k^2} \right)}$$

Deşiklerin etkin kütlesi

$$m_h^* = \frac{\hbar^2}{\left( \frac{\partial^2 E_v}{\partial k^2} \right)}$$

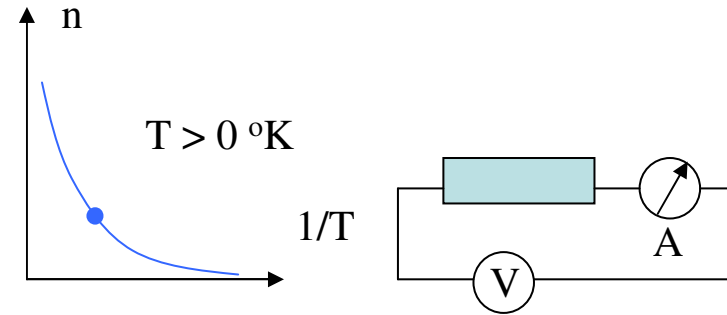
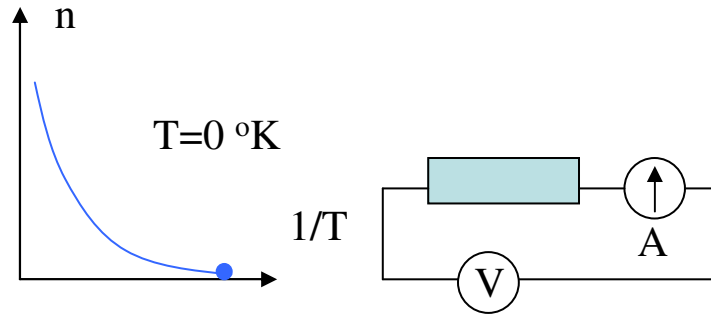
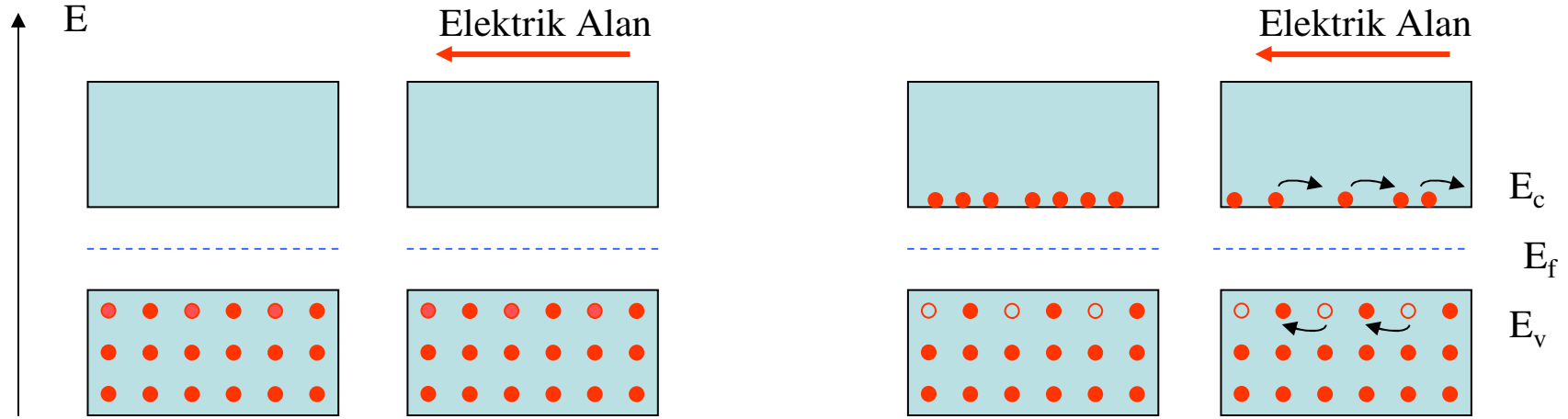
# Yarıiletkenler

Yarıiletkenleri içinde buldukları atomlara göre **Özgün (intrinsic)** veya **Katkılı (extrinsic)** olarak iki kategoride incelemek mümkündür.



Yarıiletkenlerin pratik amaçlarla kullanılabilmesi ancak katkılanmaları ile mümkündür.

# Özgün (intrinsic) Yarıiletkenler



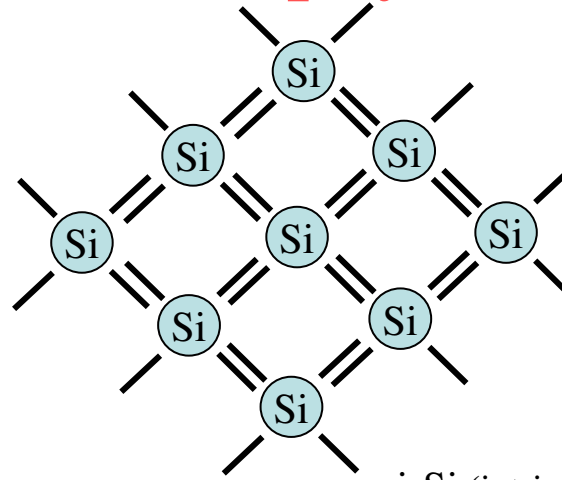
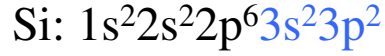
Taşıyıcı yoğunluğu elektron sayıcı(n)=deşik sayısı (p)

- elektron
- deşik (hole)

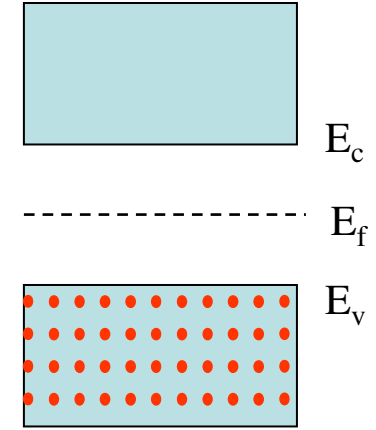
$$n=p=n_i$$

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

# Katkılama: n-tipi yarıiletkenler

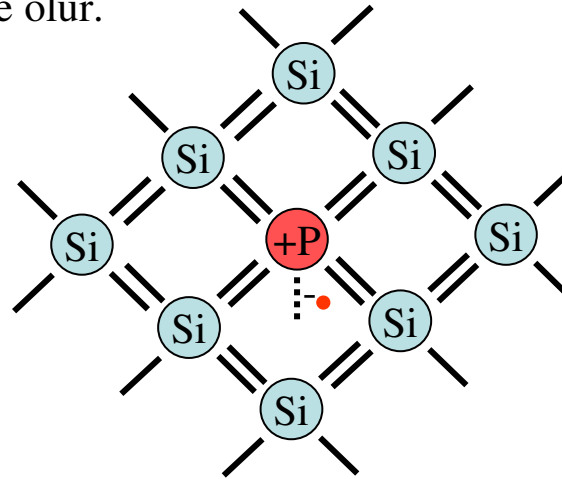
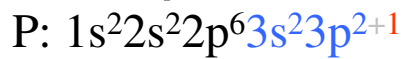
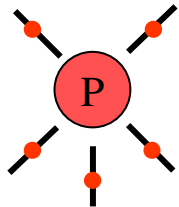


i-Si (intrinsic-özgün) Si



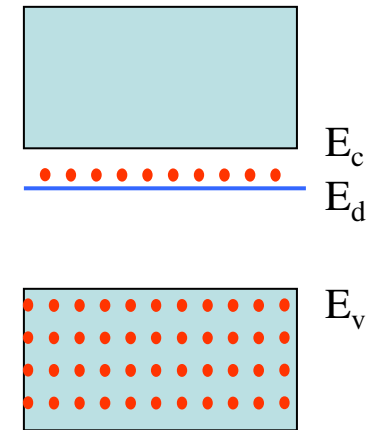
Grup V atomların, örneğin fosfat (P), kristali oluşturan 4 değerlik elektronuna sahip Si atomları ile kovalent bağ yaparak fazlalık 1 elektronunu kristale verir. Kristale elektron verdiği için bu türden atomlara verici (donör) atomlar denir. Her verici atom kristale 1 fazlalık elektron kattığı için kristalde (-) yüklü taşıyıcı yoğunluğu artmış olur. Bu tür katkılanmış yarıiletkenlere n-tipi katkılı yarıiletken denir ve bu yarıiletkenlerde iletim elektronlar ile olur.

Grup V Atomları



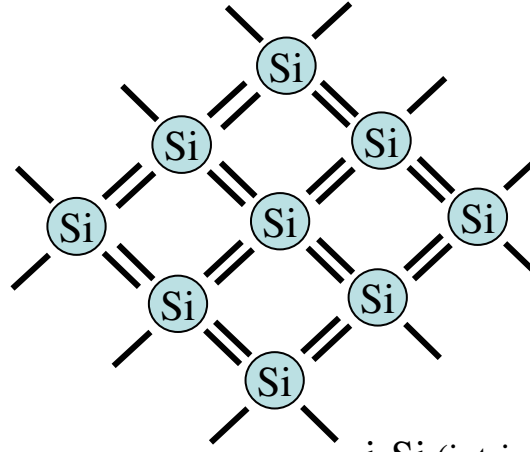
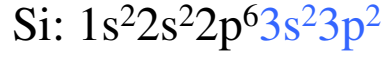
n-Si

$E_d$ : verici (donör) enerji seviyesi 16

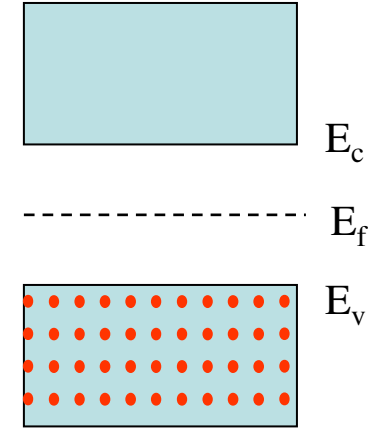




# Katkılama: p-tipi yarıiletkenler

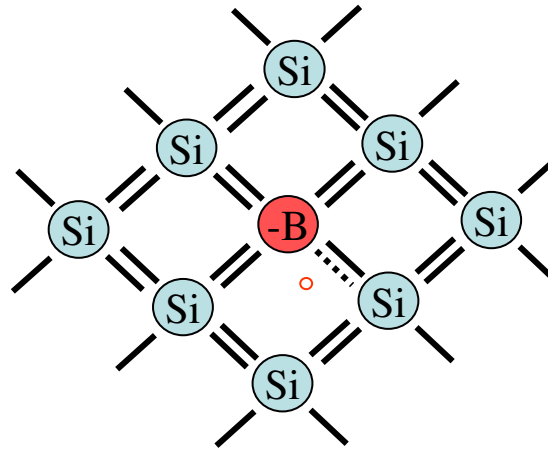
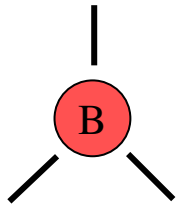


i-Si (intrinsic-özgün) Si

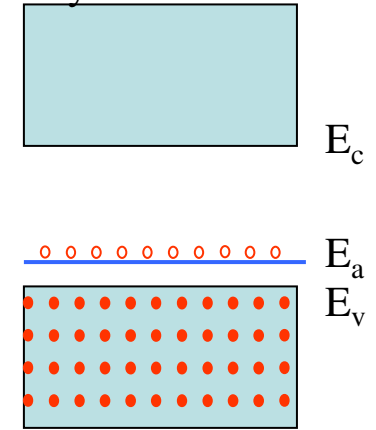


Grup III atomların, örneğin bor (B), kristali oluşturan 4 değerlik elektronuna sahip Si atomları ile kovalent bağ yapmak için kristalden 1 elektron alır. Kristalden elektron aldığı için bu türden atomlara alıcı (acceptor) atomlar denir. Her alıcı atom kristalden 1 elektron aldığı için kristalde (+) yüklü boşlukların yoğunluğu artmış olur. Bu tür katkılanmış yarıiletkenlere p-tipi katkılı yarıiletken denir ve bu yarıiletkenlerde iletim boşlukları ile olur.

Grup III Atomları

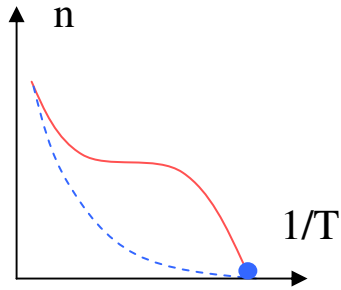
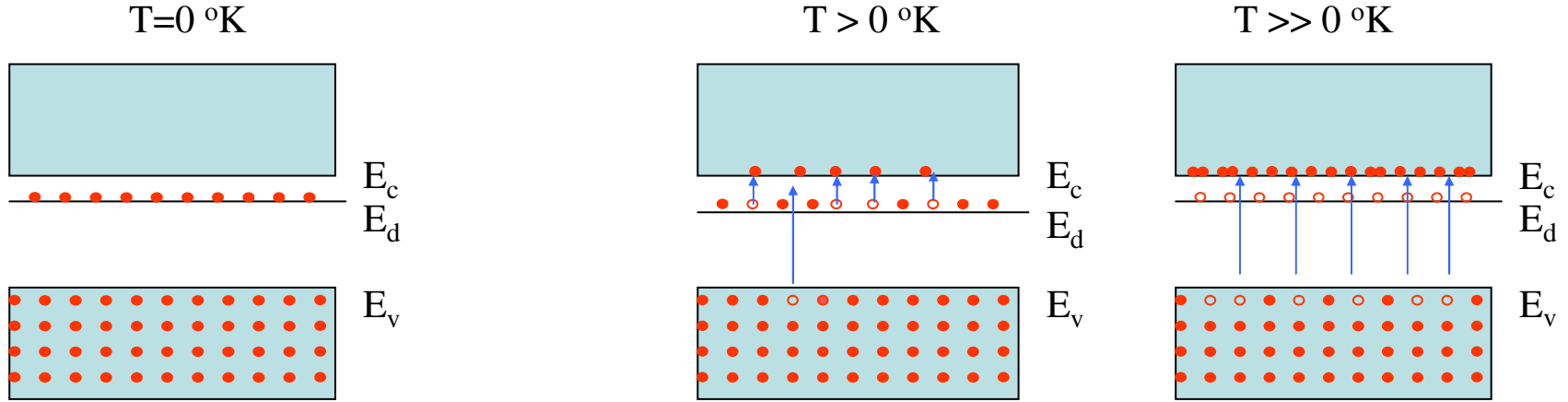


p-Si

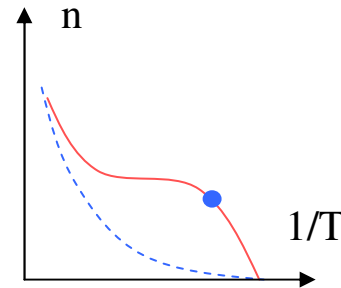


$E_a$ : alıcı (acceptor) enerji seviyesi

# Taşıyıcı Yoğunluğu



$T=0^\circ\text{K}$ 'de elektronlar değerlik bandında, katkı atomları da iyonlaşacak ısı enerjisiye sahip olmadıkları için iletim bandında serbest taşıyıcı yoktur.



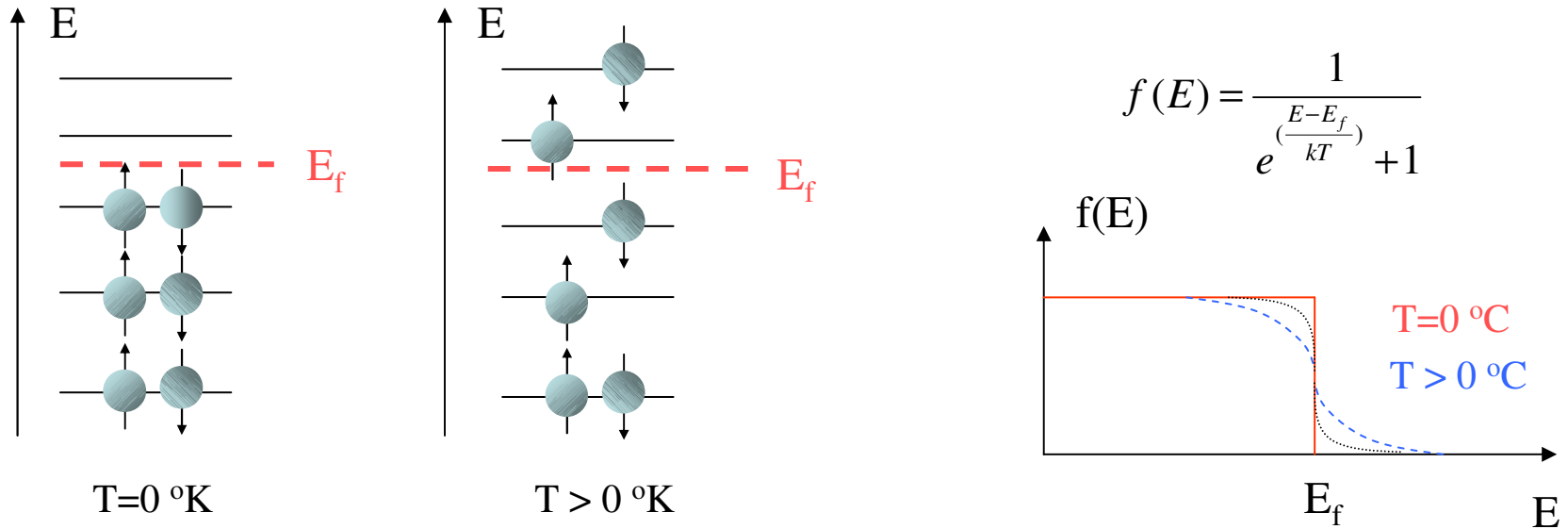
$T>0^\circ\text{K}$ 'de katkı atomları (donör) iyonlaşarak fazlalık elektronlarını iletim bandına verirler. Değerlik bandında hala deşik yoktur. Sıcaklık daha da artırıldığında değerlik bandından iletim bandına geçen elektronlar olur ve değerlik bandında da deşikler oluşur.

# Yarıiletken İstatistiği-Fermi Seviyesi

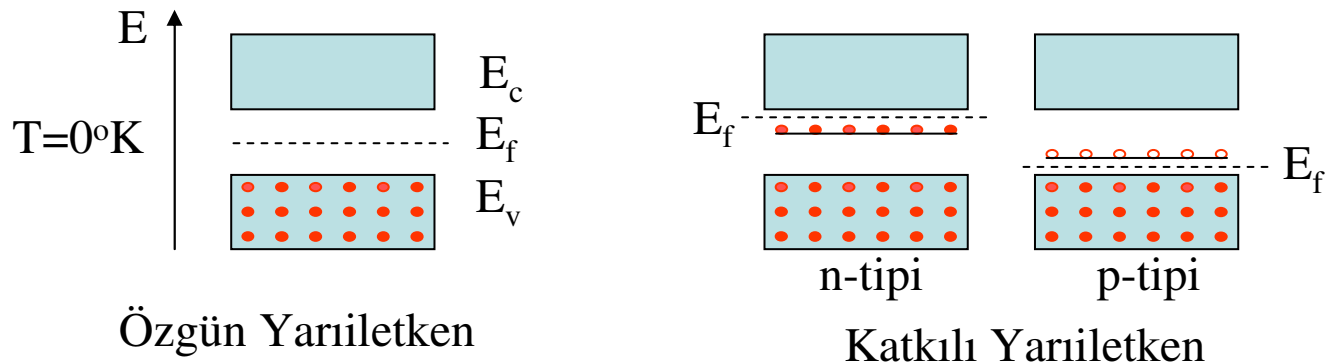
*Bir bantta (iletken veya değerlik) kaç tane elektron bulunur?* Bunu bulmak için önce elektronların bant içindeki enerji seviyeleri arasındaki dağılımını (Fermi-Dirac istatistiği ile) daha sonra her bant için durum yoğunluğunu (enerji başına enerji durumları) hesaplamamız gerekecektir.

## Fermi-Dirac İstatistiği

Spini  $\frac{1}{2}$  olan parçacıklar Fermi-Dirac istatistiğine uyar. Elektron ve deşğin her ikisinin de spini  $\frac{1}{2}$  dir.



*Fermi Seviyesi ( $E_f$ ):  $T=0 \text{ }^\circ\text{K}$  de dolu olan yörüngelerin en üst seviyesidir*



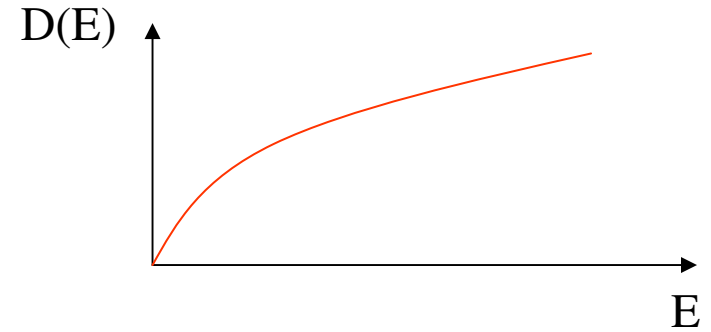
# Yarıiletken İstatistiği

*Enerji Bantlarında kaç tane elektron (veya deşik) vardır?*

Her bir bantta kaç tane enerji seviyesinin olduğunu (Enerji Durum Yoğunluğu) ve bu enerji seviyelerinin ne kadarının elektronlarla doldurulduğunu hesaplamamız gerekir.

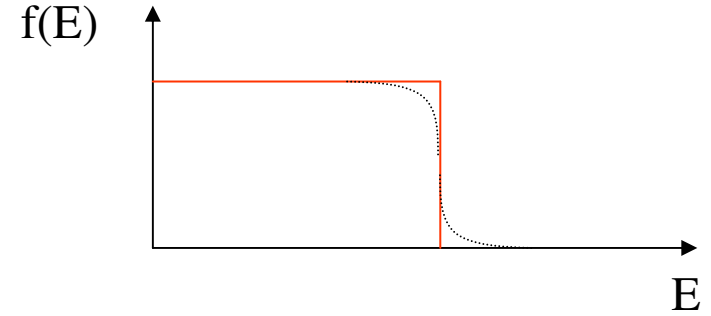
Durum yoğunluğu (bantlarda var olan kuantumlu enerji düzeylerinin yoğunluğu)

$$D(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^{3/2} E^{1/2}$$



Herhangi bir T sıcaklığında bantlardaki enerji seviyelerinin elektronlarla doldurulma olasılığı:

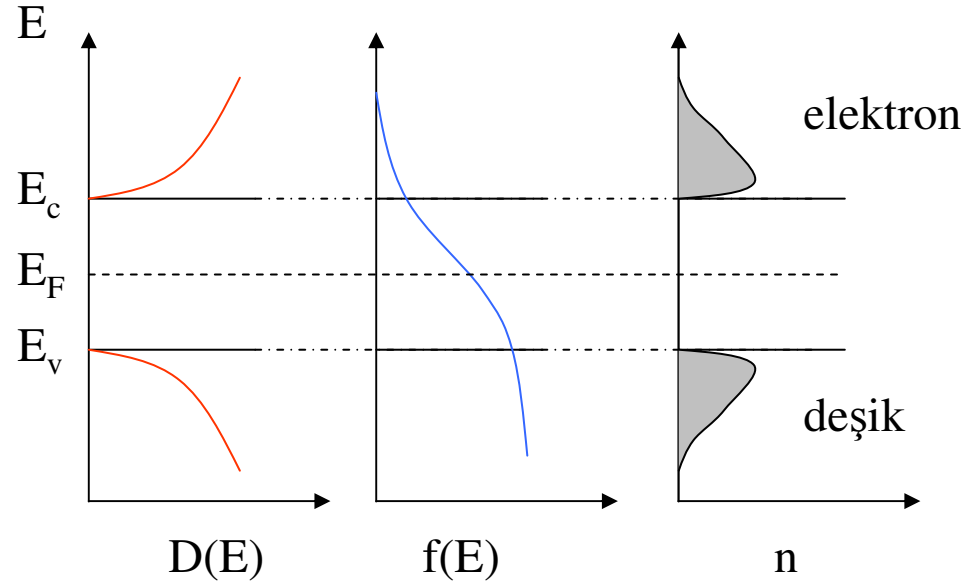
Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu  $f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_f}{kT}} + 1}$



Bantlardaki taşıyıcı yoğunluğu:  $n = \int D(E).f(E)dE$

# Taşıyıcı Yoğunlukları

$$\int (D(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^{3/2} E^{1/2}) \times (f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_f}{kT}} + 1}) dE \Rightarrow n = 2 \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-E_g/kT}$$



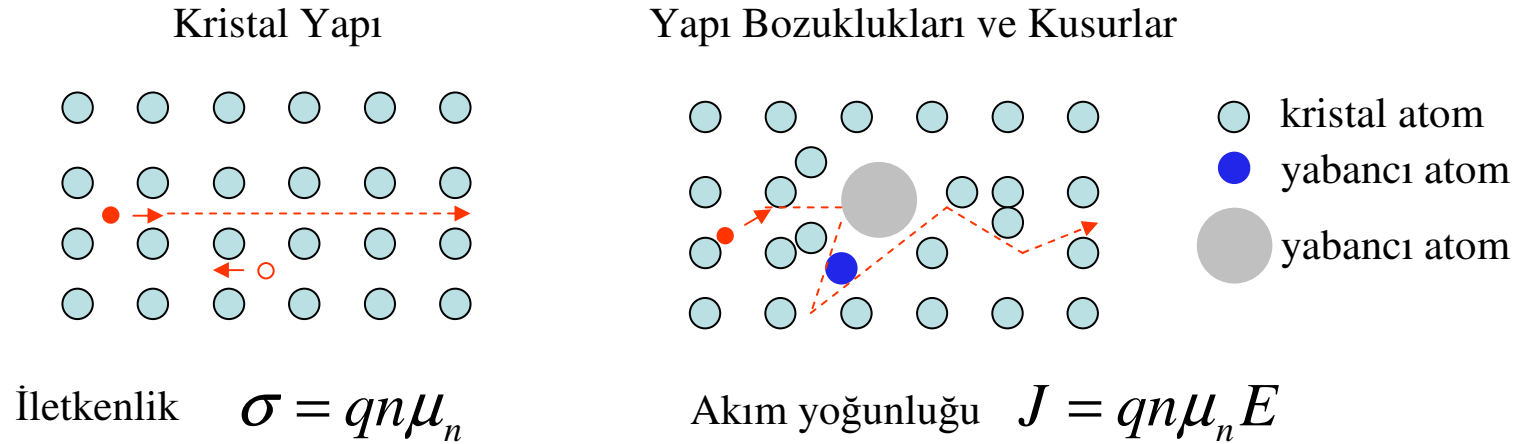
Benzer hesaplamalardeşikler içinde yapılabilir.

Deşikler için dağılım fonksiyonu  $[1-f(E)]$

Durum yoğunluğu  $D(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_h^*)^{3/2} E^{1/2}$

# Devingenlik (Mobilite)-1

- Yarıiletkenlerde taşıyıcı sayısı kadar taşıyıcıların devingenlikleri (mobilite) de önemlidir ve yarıiletkenin devre elemanı olarak kullanılıp-kullanılmayacağını belirler.
- Bu sebepten dolayı yarıiletken malzemenin kristal yapıda ve olabildiğince saf olmaları elektronların devingenliklerini artıracaktır.



- Yarıiletkenlerde iletkenliğe katkı hem elektronlardan hem de deşiklerden (metallerde sadece iletim bandındaki elektronlardan gelmektedir) geleceği için akım yoğunluğunu serbest taşıyıcı yoğunlukları ve devingenlik nicelikleri cinsinden

$$J = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

Kristal kusurlarının bir diğer olumsuzluğu ise bu kusurların elektronlar için tuzak merkezleri oluşturmaları, bunun sonucunda da serbest elektron sayısını azaltmalarındır.

*Optoelektronikte bu kristal kusurları ciddi sorunlar oluşturmaktadır. Bu kusurlar ışık yayan optoelektronik devre elemanının verimliliğini büyük ölçüde azaltır.*

## Devingenlik (Mobilite)-2

Yarıiletkenlerde taşıyıcı sayısı kadar taşıyıcıların devingenlikleri de bunların pratik devre elemanı olarak kullanılmasında önemlidir. Aşağıdaki tablo elektronik ve optoelektronik teknolojisinde yaygın olarak kullanılan bazı yarıiletkenlerin özgül taşıyıcı yoğunlukları ile birlikte devingenliklerini vermektedir.

Yarıiletken	$E_g$ (eV)	Özgül taşıyıcı yoğunluğu [ $\text{cm}^{-3}$ ]	Devingenlik [ $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ]	
			$\mu_e$	$\mu_h$
InAs	0.36	$1.6 \times 10^{14}$	22 600	200
Ge	0.67	$2.5 \times 10^{13}$	3 900	1 900
Si	1.11	$1.5 \times 10^{10}$	1 350	480
GaAs	1.43	$2.0 \times 10^6$	8 500	400

## Özet

Yarıiletkenlerin bir çok üstünlüğü ve pratik uygulama alanı vardır. Yarıiletkenlerin iletkenlikleri ayarlanarak aynı malzemedan istenirse iyi bir iletken, istenirse iyi bir yalıtkan yapılabilir. Ayrıca yarıiletkenlerde devingenlik çok yüksek olduğu için hızlı devre elemanlarının yapımında kullanılır.

Yarıiletkenlerin elektronik ve optoelektronikteki kullanımını bant yapısı belirler. İletim ve değerlik bandı minimum ve maksimumu elektronunu aynı dalga vektöründe ise doğrudan (direk), farklı ise dolaylı (indirek) bant aralıklı yarıiletken denir. Optoelektronik uygulamalarda ışık üretimi için direk bant aralıklı yarıiletken malzemeler kullanılır.

Metallerden farklı olarak yarıiletkenlerde elektrik iletimi, iletim veya değerlik bandından veya her ikisinden birden gerçekleşmesi sağlanabilir.

Yarıiletken yapıların elektronikte veya optoelektronikte kullanılabilmesi için kristal yapıda ve yüksek safsızlıkta üretilmesi gerekir.



## **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.