



# YARIİLETKENLER

ASAL  
(SAF/INTRINSIC)  
YARIİLETKENLER

KATKILI  
(EXTRINSIC)  
YARIİLETKENLER

IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B
1 H	2 He																
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											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

III-V bileşiği: AB  $\longrightarrow$  InSb, GaAs

3 değerlikli 5 değerlikli

II-VI bileşiği: AB  $\longrightarrow$  ZnS, CdS

2 değerlikli 6 değerlikli

IV-IV bileşiği: SiC

## • 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

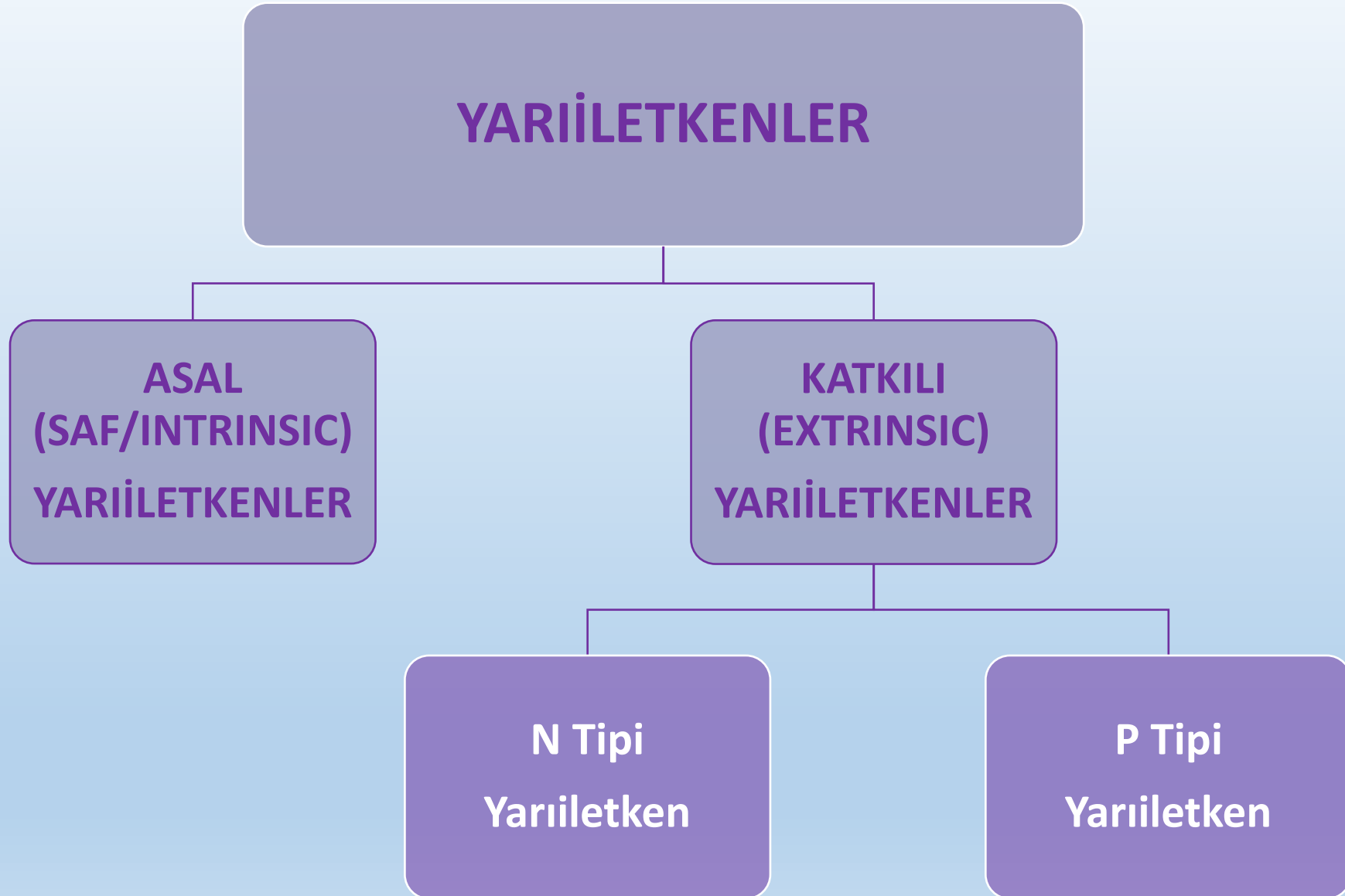
İkili (Ternary)  $\Rightarrow$  HgTe, CdTe  
Üçlü (Quaternary)  $\Rightarrow$   $Cd_xHg_{(1-x)}Te$

I	II	III	IV	V	VI	VII
		B	C	N	O	F
		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

Tek atomlu

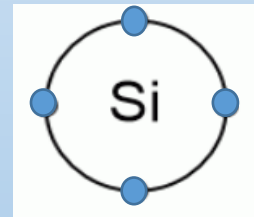
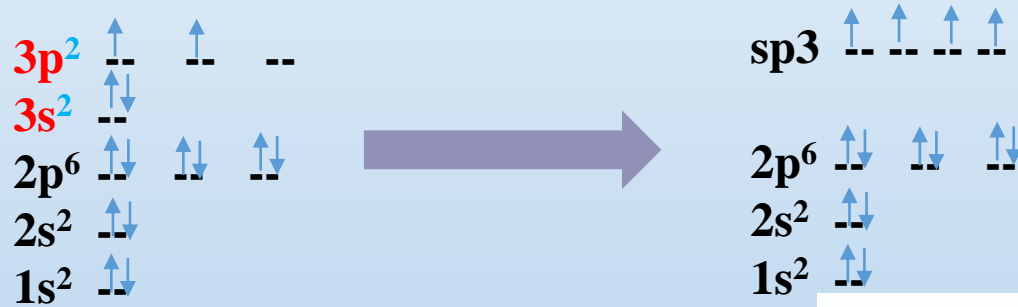
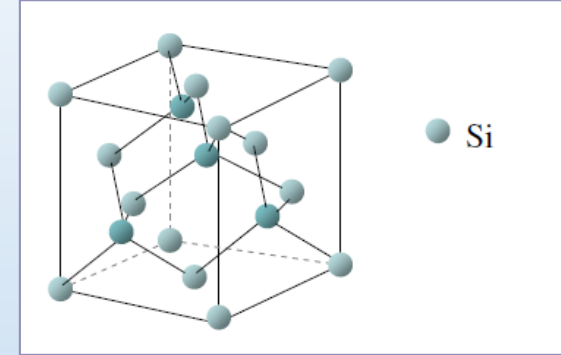
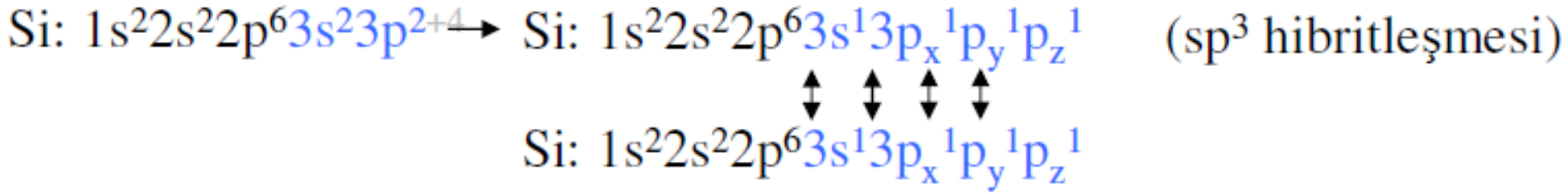
III-V Bileşik  
Yarıiletkenler  
GaAs, GaAlAs, InP

II-VI Bileşik Yarıiletkenler  
ZnS, CdS

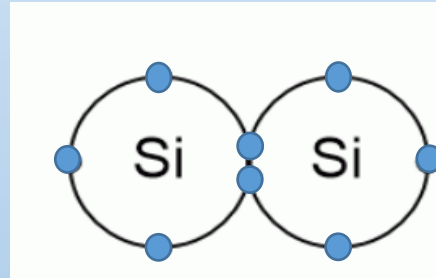


# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

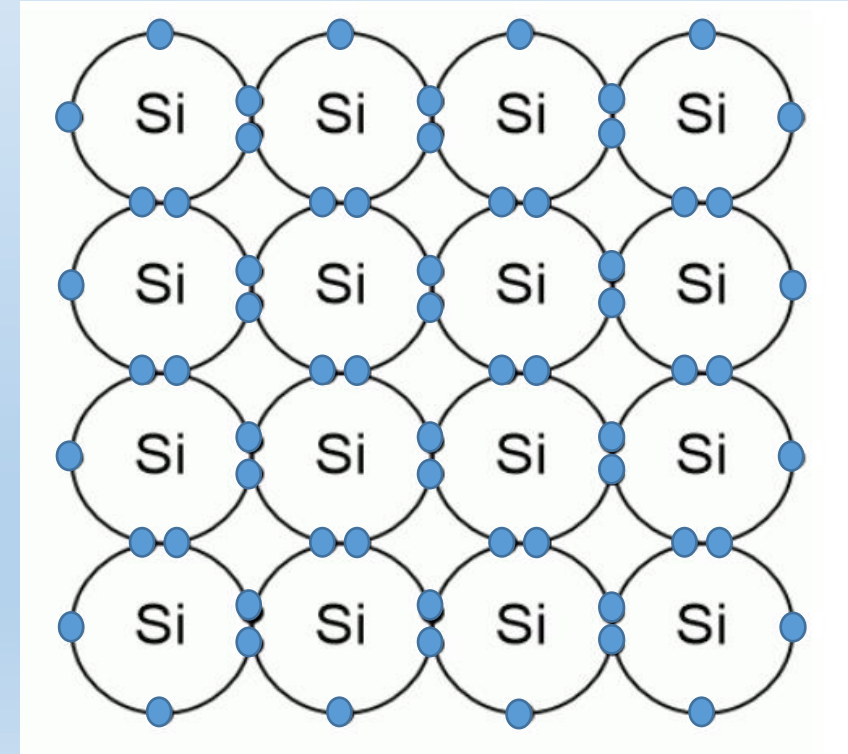
## SİLİSYUM



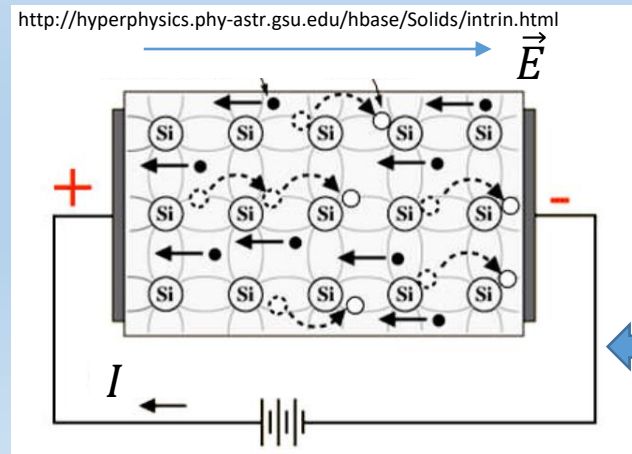
1 Atom



2 Atom



n Atom

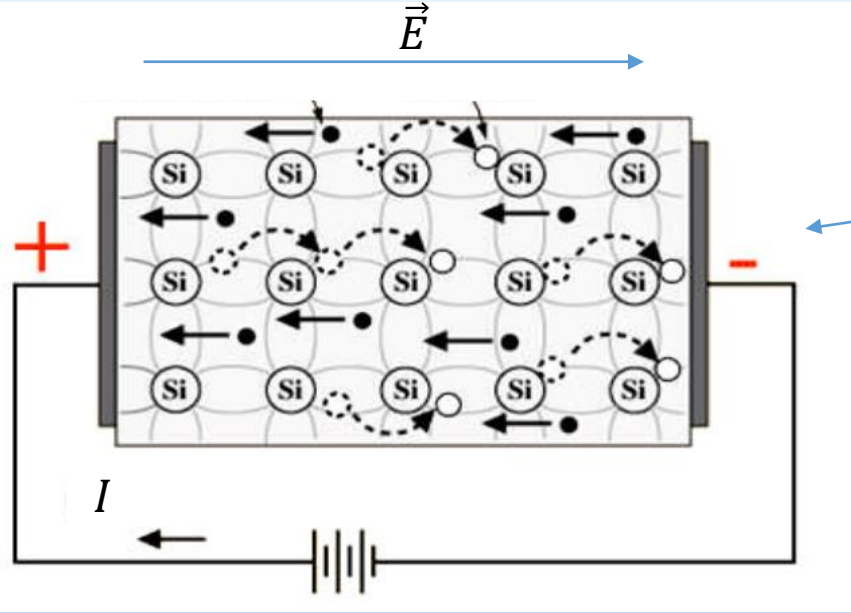


$T = 0K$  ve  $I = 0$

$T > 0K$  ve  $I \neq 0$

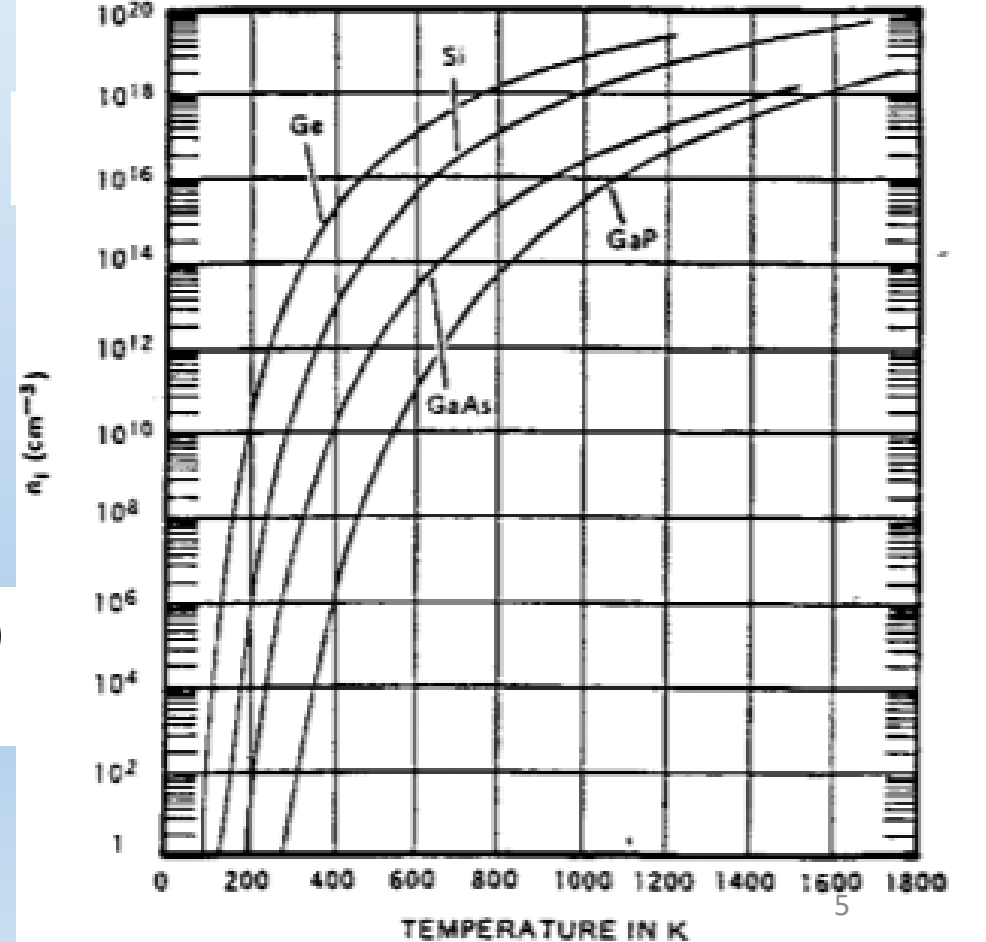
kovalent bağlar kırılır ve iletim bandına elektron geçer ve iletim oluşur

$T = 0K$  ve  $I = 0$  İletim bandında elektron yok



$T > 0K$  ve  $I \neq 0$

Valans bandından iletim bandına bir elektron çıkarabilmek için verilen ısısal enerji ile aslında atomlar arası bir bağ kırılmış demektir. Ve başlangıçta lokalize olan elektron artık serbest hale gelmiştir.



Boltzman Sabiti:  $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K

T: Sıcaklık

$n_i$ : Asal yarıiletken iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonu

$E_g$ : Yasak Band Genişliği

$$n_i = CT^{3/2} e^{-E_g/2kT} \text{ (m}^{-3}\text{)}$$

$$p_i = n_i$$

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

## ELEKTRON VE BOŞLUKLAR:

Başlangıçta tamamen dolu valans bandında bulunan elektronlar ısı uyarılarla iletim bandına geçmişlerdir.

\* iletim bandındaki birim hacimdeki elektron sayısı=Valans bandından ısı uyarımıyla ayrılan elektron sayısı

\* Elektrik alan varlığında valans bandında kalan boşluklar yarıiletkende serbest yük taşıyıcılarına ikincil bir katkı sağlar. Bu hareketli yük taşıyıcıları **boşluk, deşik veya hol** adını alır.

\* Valans bandındaki **boşluk +e yüklüdür** ve elektronun olmama durumu olarak da tanımlanır.

\* **+e** yüklü boşlukların mobilitesi ( $\mu_p$ ) ile elektronun ( $\mu_n$ ) mobilitesi farklıdır.

$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}, 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

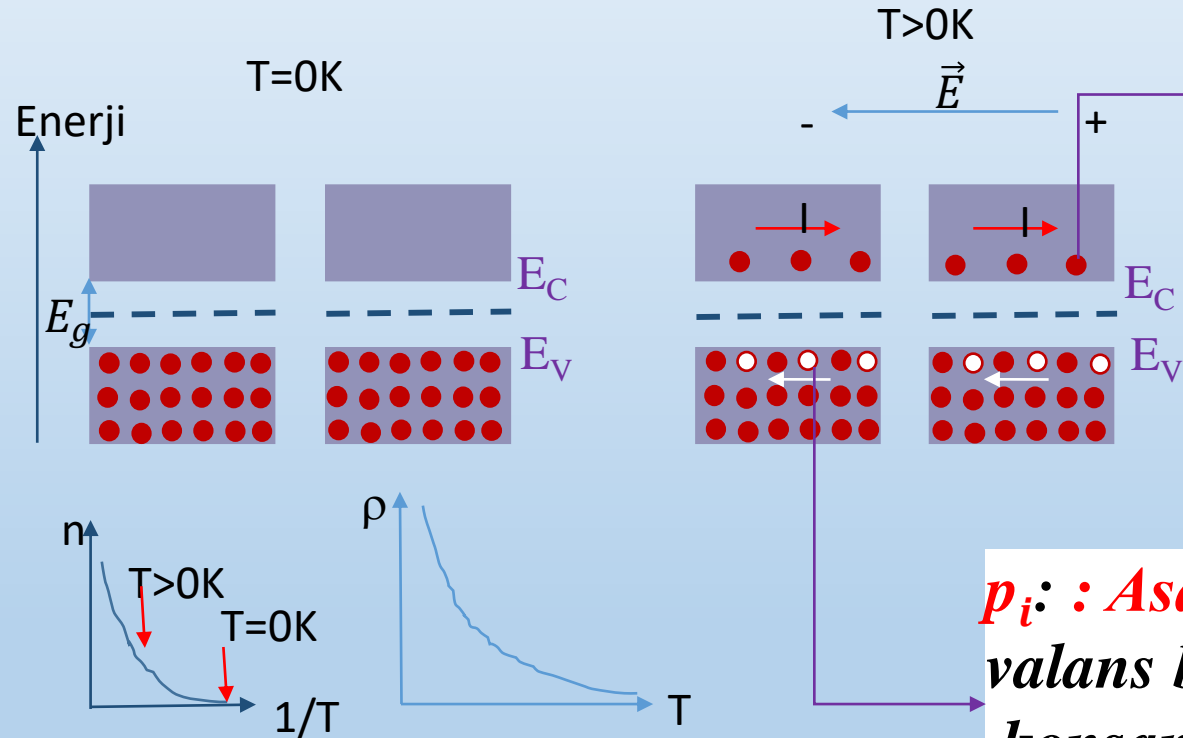
$$\begin{aligned} k_B T &= 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 300 \text{ K} \\ &= 414 \times 10^{-23} \text{ J} \\ &= 25,875 \times 10^{-3} \text{ eV} \\ &= 0.026 \text{ eV} = 26 \text{ meV} \end{aligned}$$

$$C = \frac{2^{5/2} (m\pi k)^{3/2}}{h^3}$$

## Asal YARIİLETKEN



$$n_i = p_i$$

**$n_i$ :** Asal yarıiletkende iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonu ( $1/m^3$ )  
**Elektronun yükü -e**



**BİPOLAR İLETKENLİK**  
hem elektronlar  
hem boşluklar  
yük taşıyıcısı

**$p_i$ :** Asal yarıiletkende valans bandındaki boşluk konsantrasyonu ( $1/m^3$ )  
**Boşluğun yükü e**

 Elektrik alanda elektronun hareket yönü  
 Elektrik alanda boşluğun hareket yönü <sup>6</sup>

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

Asal bir yarıiletkende elektriksel iletkenliğin hem elektron hem de boşluk denilen iki tip yük taşıyıcısı ile sağlanmaktadır.

Bu duruma **BİPOLAR İLETKENLİK** denir.

$$\sigma_n = ne\mu_n$$

$$\sigma_p = pe\mu_p$$

Toplam iletkenlik;

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p$$

$$\sigma = e(p\mu_p + n\mu_n) \text{ Bipolar iletkenlik genel ifadesi}$$

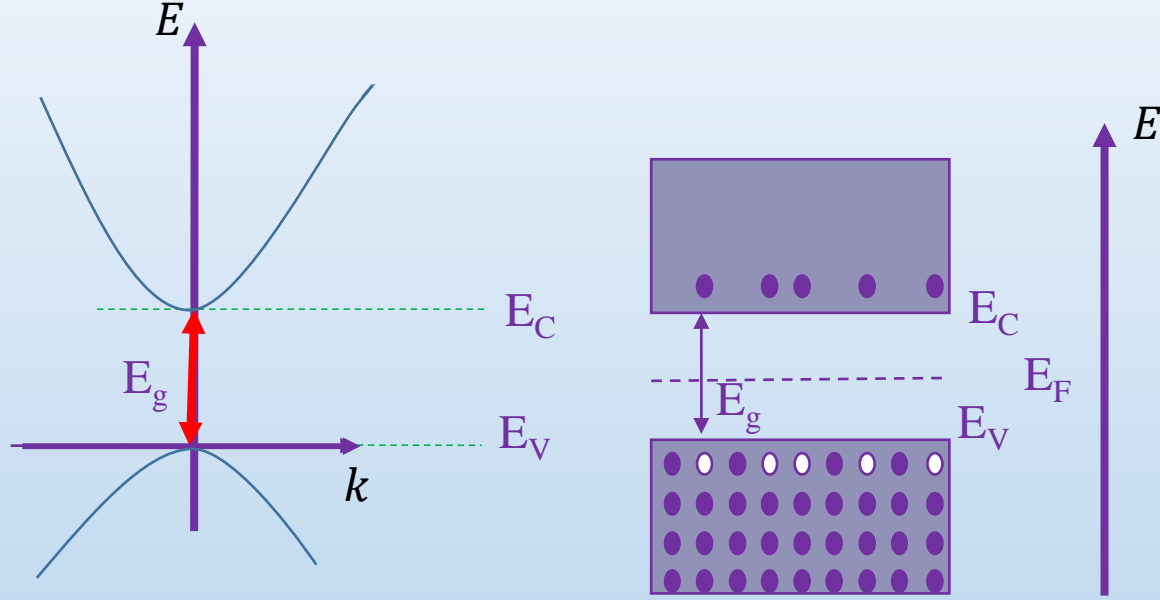
$\mu_n$ : elektronun mobilitesi

$\mu_p$ : boşluğun mobilitesi

$n$ : iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonu

$p$ : valans bandındaki boşluk konsantrasyonu

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER



$E$ : Enerji

$E_C$ : İletim bandının dibi

$E_V$ : Valans bandının tavanı

$E_g$ : Yasak Band Aralığı

$E_F$ : Fermi Seviyesi

● → Elektron  
○ → Boşluk

**Asal YARIİLETKEN**

$$n_i = p_i$$

Kütle etkisi Yasası

**YÜK NÖTRALİTESİ**

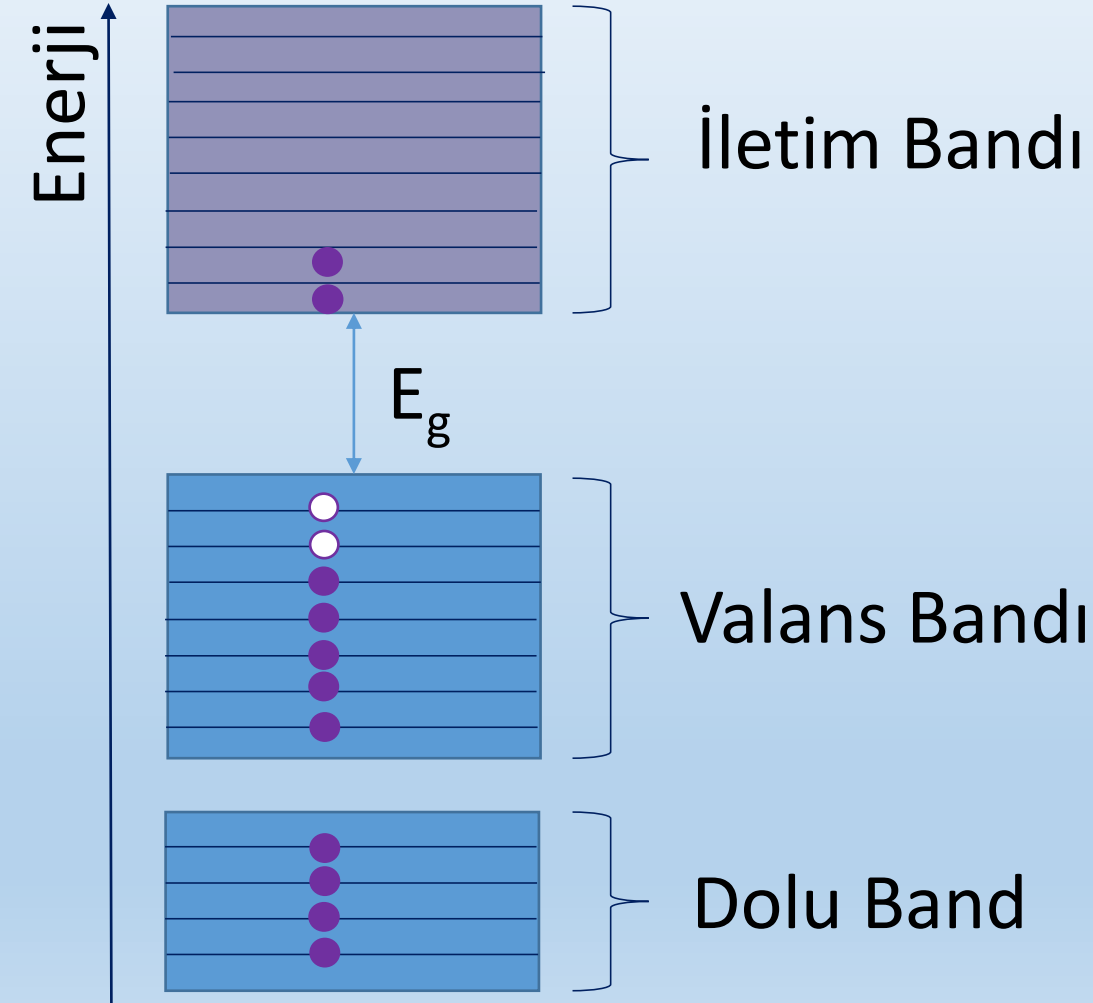
$$n_i \cdot p_i = n_i^2 = p_i^2$$

## FERMİ ENERJİSİ

- Bir kristal elektronu mevcut en düşük enerjili seviyeyi işgal eder. (Min en. olma)
- Kristalin sürekli dengede olması kendi kendine enerji durumunu değiştirememesi potansiyel enerjisinin min. Olmasını gerektirir (d'Alembert prensibi)
- Elektronlar mevcut seviyelere Pauli ilkesine göre dağılır.
- Son elektron olabilecek en yüksek enerji seviyesine oturur. Bu enerji **Fermi Enerjisi**dir ( $E_F$ ).



# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER



- 1- YI deki iletkenlik ve valans bantlarındaki izinli enerji seviyelerinin sayısı **(Durum yoğunluğu fonksiyonu ve  $N(E)$  durum yoğunluğu)**
- 2- Bu iki banttaki seviyelere dağılacak toplam elektron sayısı **(Valans bandındaki izinli durumların toplam sayısına eşittir.)**
- 3-Bu elektronların enerji seviyelerine nasıl dağılacağı **(Fermi Dirac dağılım Fonk  $f(E)$ )**

Bir enerji bandı içinde izinli enerji seviyelerinin dağılımını durum yoğunluğu fonksiyonu  $N(E)$  verir.

- \* Durum yoğunluğu enerjiye bağlı bir fonk. Bellirli bir  $E$  enerjisi civarında, sonsuz küçük bir enerji aralığında ( $dE$ ) izinli durum sayısını verir.
- \* Şekildeki  $dE$  aralığındaki toplam enerji seviyesi:

$$dN=N(E)dE$$

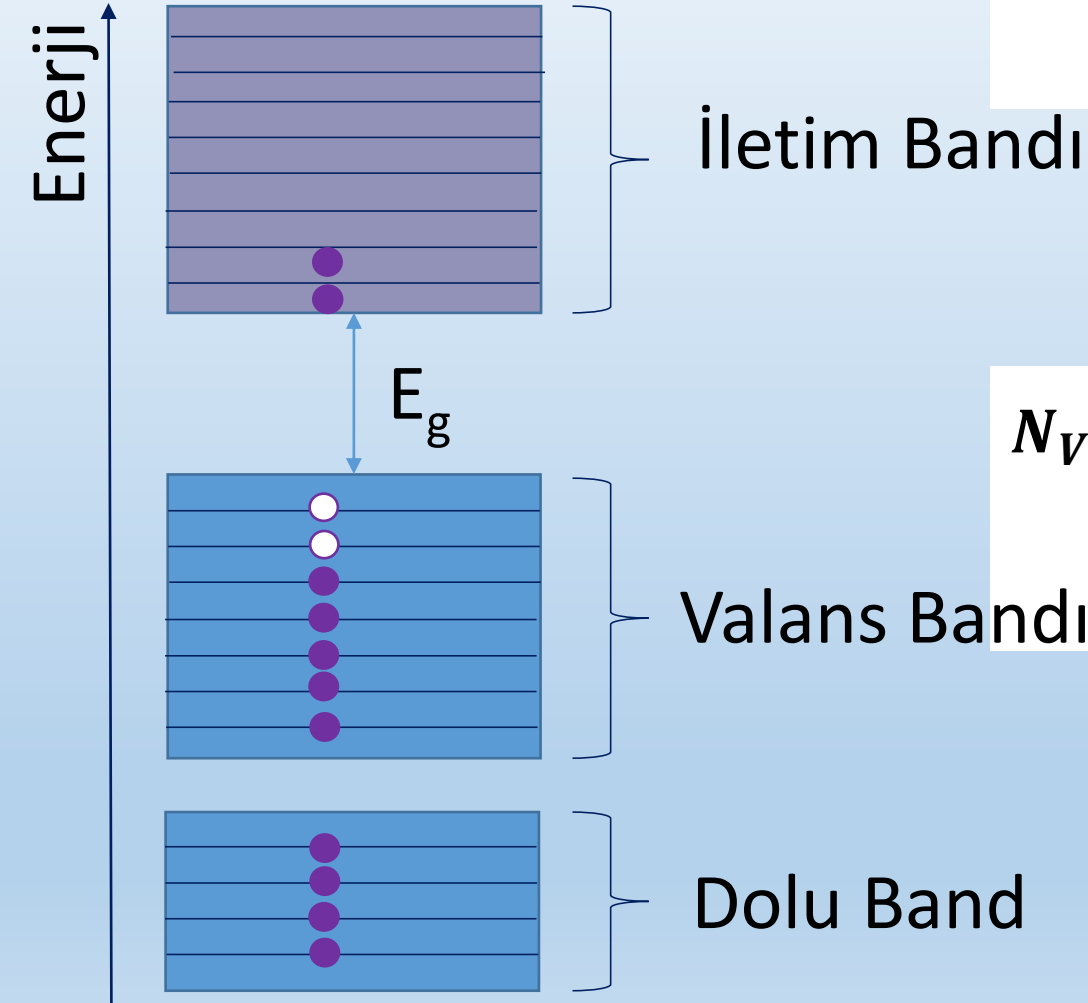
$E_1$  ve  $E_2$  enerji aralığında bulunan  $N$  tane izinli enerji durumu;

$$N=\int_{E_1}^{E_2} N(E)dE$$

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$$N_{CB}(E) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (E - E_C)^{1/2}$$

iletkenlik bandı için  
birim hacimde  
durum yoğunluğu



$$N_{VB}(E) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_h^*)^{3/2} (E_V - E)^{1/2}$$

Valans bandı için  
birim hacimde  
durum yoğunluğu

$m_h^*$ : boşluğun etkin kütlesi  
 $m_e^*$ : elektronun etkin kütlesi

$\hbar$ : Planck Sabiti

$E_C$ : İletim bandının dibi

$E_V$ : Valans bandının tavanı

$E_g$ : Yasak Band Aralığı

$E_F$ : Fermi Seviyesi

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$N(E) \Rightarrow$  *Durum Yoğunluğu Fonksiyonu:*  
*Elektronların*  
*izinli durumları ile ilgili*

*Kuantum istatistiği kullanarak elektronların*  
*bu izinli durumlara nasıl dağıldığına bakalım*

Kuantum mekaniğine  
göre parçacıklar açısal  
momentuma  
sahiptirler



SPİN

$0, \frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, , \dots$



TAM SPİN  
BOZON



YARI SPİN  
FERMİYON

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

Termodinamikte  
denge durumunda  
sistem dağılım  
fonksiyonu ile  
tanımlanır



**Dağılım fonksiyonu**  
herhangi bir enerji  
durumunun işgal  
olasılığını belirler.



**Bu** olasılığı belirlemek  
için sistemin serbest  
enerjisi minimum  
olmalıdır.

Fermiyon olan elektronların izinli  
durumlara dağılım fonksiyonu  
**Fermi-Dirac Dağılım Fonksiyonu** ile  
tanımlıdır.

**Fermi-Dirac Dağılım Fonksiyonu,  $f(E)$**

Belirli bir sıcaklıkta YI Valans ve iletim  
bandlarındaki elektronların denge durumu  
dağılımını enerjinin fonksiyonu olarak tanımlar.

**Belirli bir E enerjisi için  $f(E)$ :**  
İzinli E enerjili seviyenin belirli bir  
sıcaklıkta bir elektron tarafından  
işgal edilme olasılığıdır.

**$f(E)$ : 1 ile 0 arasında değerler alır.**

**$f(E)=1$**

İzinli E enerjili seviyesi bir elektron  
tarafından işgal edilmiş,

**$f(E)=0$**  İzinli E enerjili seviyesi bir elektron  
tarafından işgal edilmemiş

İşgal olma olasılığı  $f(E)$  ise edilmeme  
olasılığı  $1-f(E)$  olmalıdır.

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

## FERMİ-DİRAC DAĞILIM FONKSİYONU,

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/k_B T}}$$

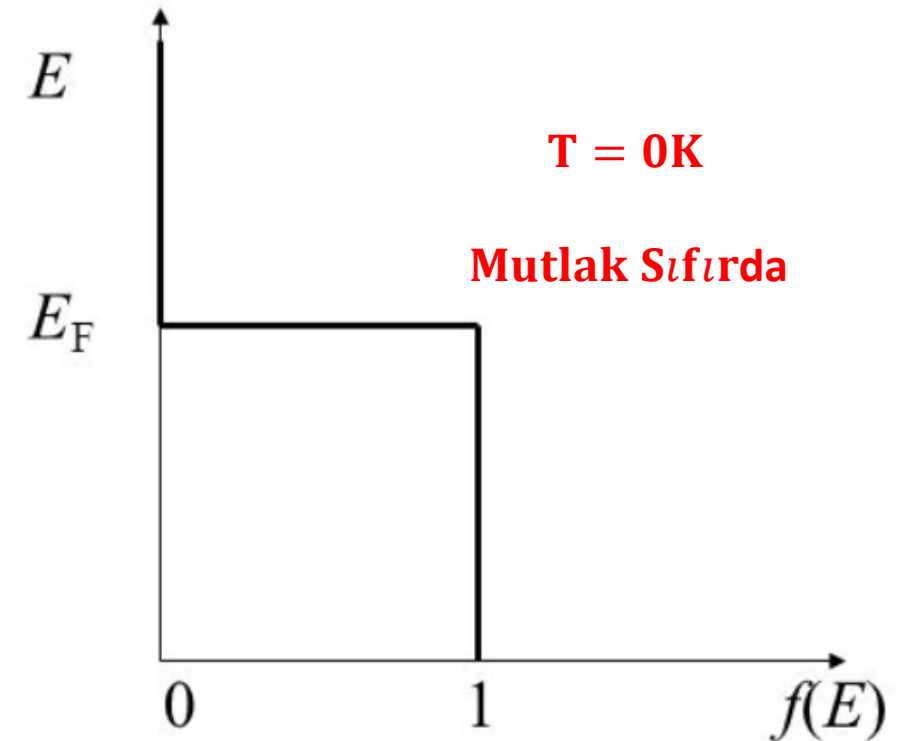
$k_B$ : Boltzman Sabiti;  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

$T$ : Sıcaklık

$T = 0 \text{ K}$  için;  $E_F = \mu$ : Kimyasal potansiyel

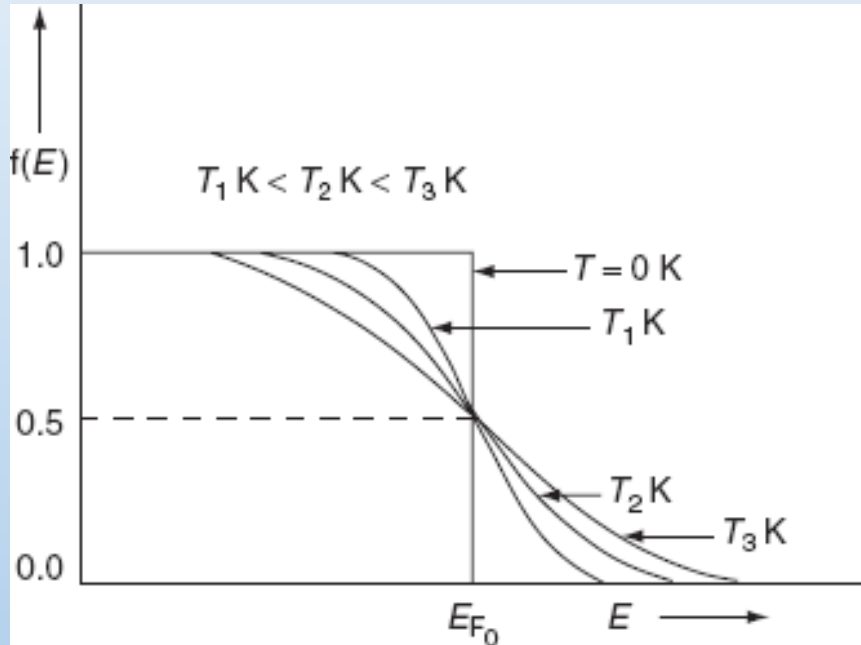
$$E > E_F: \quad f(E > E_F) = \frac{1}{1 + e^{\infty}} = 0$$

$$E < E_F: \quad f(E < E_F) = \frac{1}{1 + e^{-\infty}} = 1$$



# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

## SONLU SICAKLIKLARDA ELEKTRON DAĞILIMI;



$$f(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{k_B T}}}$$

i)  $E = E_F \Rightarrow f(E, T) = \frac{1}{2}$

ii)  $E - E_F \gg k_B T \Rightarrow f(E, T) = e^{-\frac{E - E_F}{k_B T}}$

$$= e^{\frac{E_F}{k_B T}} e^{-\frac{E}{k_B T}}$$

$$= A e^{-\frac{E}{k_B T}} \text{ Boltzman Dağılımı}$$

iii)  $E - E_F \ll k_B T \Rightarrow f(E, T) = 1$

iv) *elektronlarla dolu olma olasılığı*  
 $\Rightarrow f_n(E, T)$

*Boş olma olasılığı*

$$\Rightarrow f_p(E, T) = 1 - f_n(E, T) \Rightarrow f_p(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_F - E}{k_B T}}}$$

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

Valans Ve iletim bandındaki taşıyıcı yoğunlukları;

Bir YI birim hacminde, E1 ve E2 enerjili durumlar arasına dağılmış elektronların toplam sayısı:

$$n(E_1, E_2) = \int_{E_1}^{E_2} N(E) f(E) dE$$

Mutlak sıfırda iletkenlik bandında bulunan elektron yoğunluğu;

$$n_{CB} = \int_{E_C}^{\infty} N_{CB}(E) f(E) dE = 0$$

Mutlak sıfırda valans bandında bulunan elektron yoğunluğu;

$$n_{VB} = \int_{-\infty}^{E_V} N_{VB}(E) f(E) dE = n_{VB} = \int_{-\infty}^{E_V} N_{VB}(E) dE$$

Mutlak sıfırda valans bandında bulunan serbest boşluk yoğunluğu;

$$p_{VB} = \int_{-\infty}^{E_V} N_{VB}(E) [1 - f(E)] dE = 0$$

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

## ASAL YARIİLETKENDE $E_F$ DEĞERİ

ASAL YARIİLETKENLERDE SERBEST YÜK TAŞIYICILARI:

YI içindeki serbest yük taşıyıcı yoğunluğunu belirleyeceğiz.

Sonlu sıcaklıkta elektronun serbest bulunduğu seviyeler iletim bandı içindedir.

$(E_C - E_F)?????$

Yarıiletkenlerin  $E_g$  yasak band genişliği  $\sim 1\text{eV}$

Oda sıcaklığında  $k_B T = 26\text{meV}$

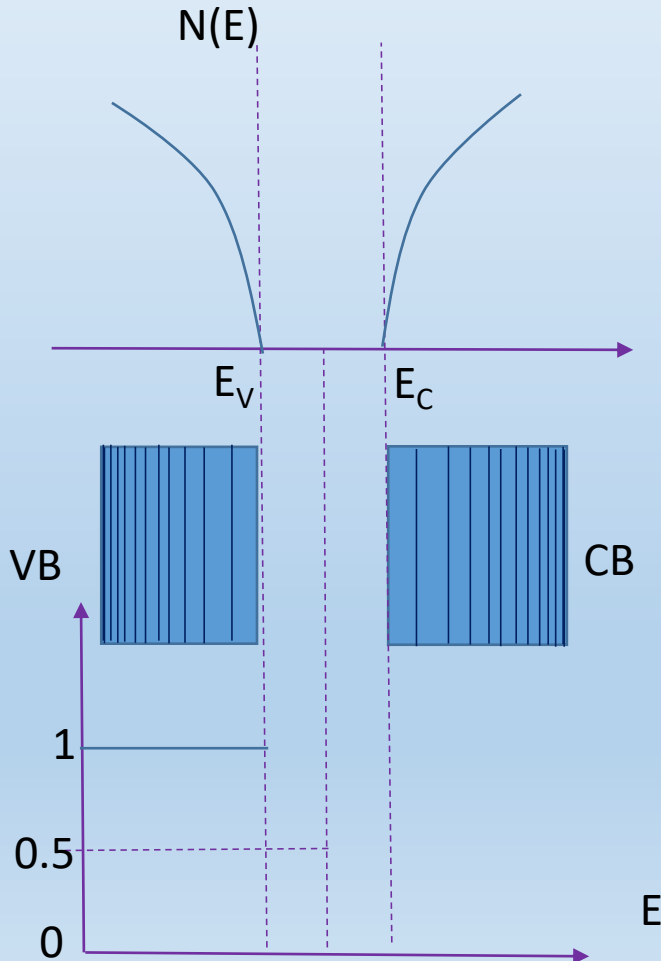
$$E - E_F \gg k_B T$$

Bu şart sağlandığında FERMİ DİRAC

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/k_B T}}$$

$$f(E) = e^{-(E - E_F)/k_B T}$$

Maxwell – Boltzmann Dağılımına Dönüşür.





# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

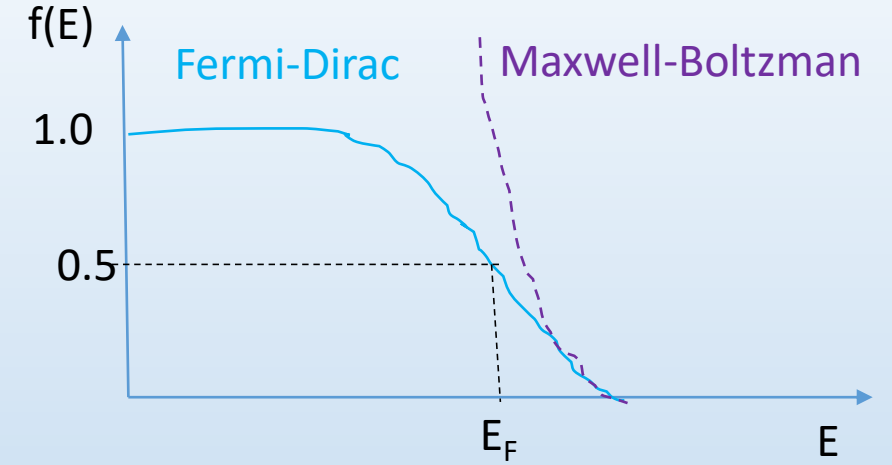
## ASAL YARIİLETKENLERDE SERBEST YÜK TAŞIYICILARI:

*İletim bandında elektron dağılımı;*

$$f(E) = e^{-(E-E_F)/k_B T}$$

Maxwell – Boltzmann Dağılımına göre;

- Klasik parçacıklar için geçerlidir.
- Pauli Dışarlama ilkesi geçersizdir
- Bütün parçacıklar ayırdedilebilir ve aynı izinli durumu işgal edebilir.
- Parçacıklar en düşük enerjili seviyesinde yer alır.
- Enerji arttıkça seviyelerin işgal olasılığı hızla azalır.
- Belli bir enerji aralığındaki durumların sayısı sonsuzdur.



***Fermiyonlar için kullanıyoruz çünkü iletim bandında çok sayıda enerji seviyesi var bunların çok küçük bir kısmı elektronlarca işgal edilebilir.***

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$$n_{CB} = \int_{E_C}^{\infty} N_{CB}(E) f(E) dE$$

$$f(E) = e^{-(E-E_F)/k_B T}$$

$$N_{CB}(E) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$$

$$n_i = \int_{E_C}^{\infty} \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} e^{-(E-E_F)/k_B T} dE$$

$$n_i = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left( -\frac{E_C - E_F}{k_B T} \right)$$

$$N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

İLETKENLİK BANDINDAKİ  
ETKİN SEVİYE  
YOĞUNLUĞU

$m_e^*$ : elektronun  
etkin kütlesi  
 $h$ : Planck Sabiti

$$n_i = N_C \exp \left( -\frac{E_C - E_F}{k_B T} \right)$$

ASAL YARIİLETKENDE

SERBEST ELEKTRON YOĞUNLUĞU

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$$p_{VB} = \int^{E_v} N_{VB}(E) f(E) dE$$

$$p_i = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) \quad \text{ASAL YARIİLETKENDE}$$

**VB BOŞLUK YOĞUNLUĞU**

$$N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad \text{VALANSBANDINDAKİ ETKİN SEVİYE YOĞUNLUĞU}$$

$m_h^*$ : boşluğun  
etkin kütlesi  
 $h$ : Planck Sabiti

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$$n_i = p_i = \sqrt{n_i p_i}$$

*YÜK NÖTRALİTESİ*

$$n_i^2 = n_i p_i = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right)$$

$$E_g = E_c - E_v$$

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$$n_i = N_c \exp \left( -\frac{E_c - E_F}{k_B T} \right)$$

*ASAL YARIİLETKENDE*

*SERBEST ELEKTRON YOĞUNLUĞU*

$$p_i = N_v \exp \left( -\frac{E_F - E_v}{k_B T} \right)$$

*ASAL YARIİLETKENDE*

*SERBEST BOŞLUK YOĞUNLUĞU*

$$E_g = E_c - E_v$$

$$n_i = p_i$$

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$$n_i = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right) = p_i = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right)$$

$$E_F = E_v + \frac{1}{2} E_g + \frac{k_B T}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$$

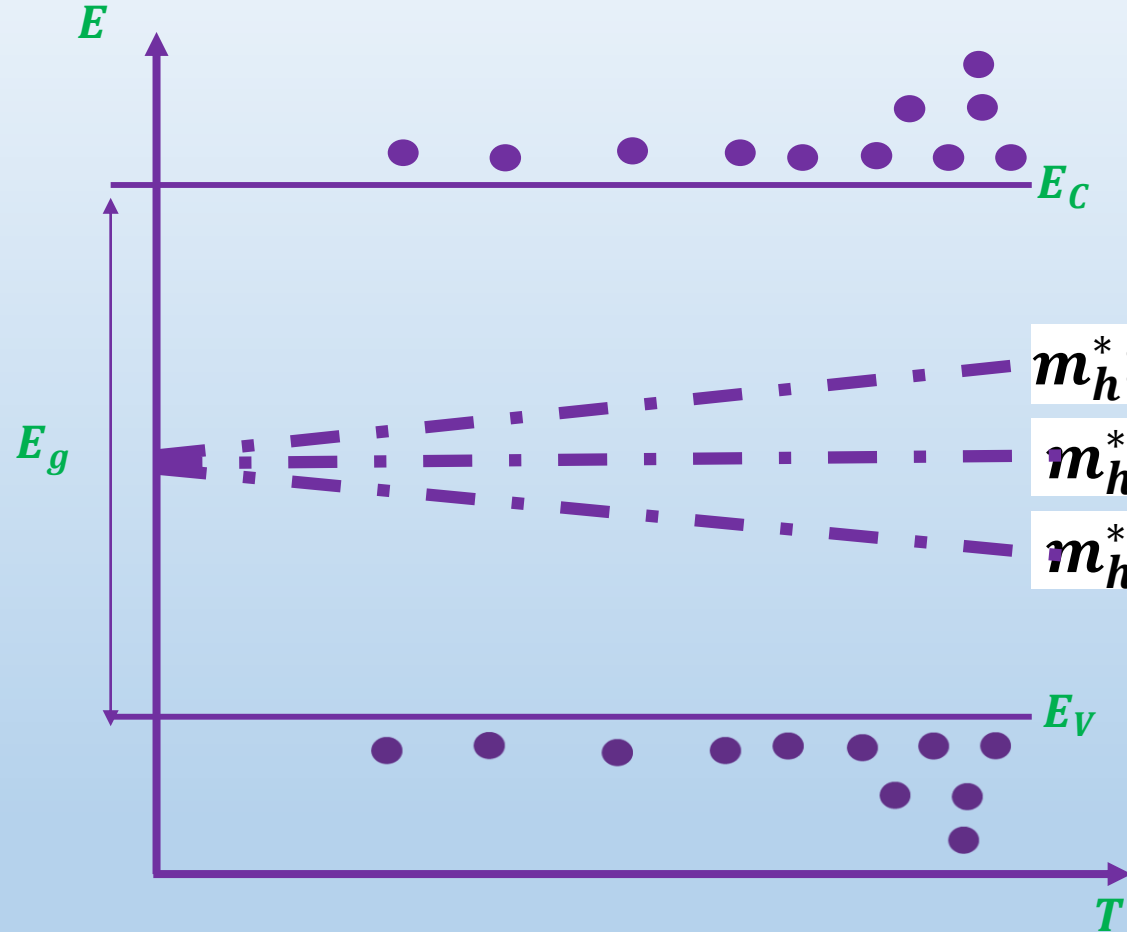
$$T = 0K$$

$$E_F = E_v + \frac{1}{2} E_g$$

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$$E_F = E_V + \frac{1}{2}E_g + \frac{k_B T}{2} \ln \frac{N_V}{N_C}$$

$$E_F = E_V + \frac{1}{2}E_g + 3 \frac{k_B T}{4} \ln \frac{m_h^*}{m_e^*}$$



$$\frac{m_h^*}{m_e^*} > 1$$

$$\frac{m_h^*}{m_e^*} < 1$$

$$N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

## ASAL YARIİLETKENLERDE TAŞIYICI YOĞUNLUĞUNUN SICAKLIĞA BAĞLILIĞI;

$$N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad n_i = \sqrt{2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} 2 \left( \frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \exp \left( -\frac{E_g}{2k_B T} \right)}$$

$$N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad n_i = \sqrt{2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} 2 \left( \frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \exp \left( -\frac{E_g}{2k_B T} \right)}$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp \left( -\frac{E_g}{2k_B T} \right)$$

*C*

*Malzemeye özgü bir sbt*

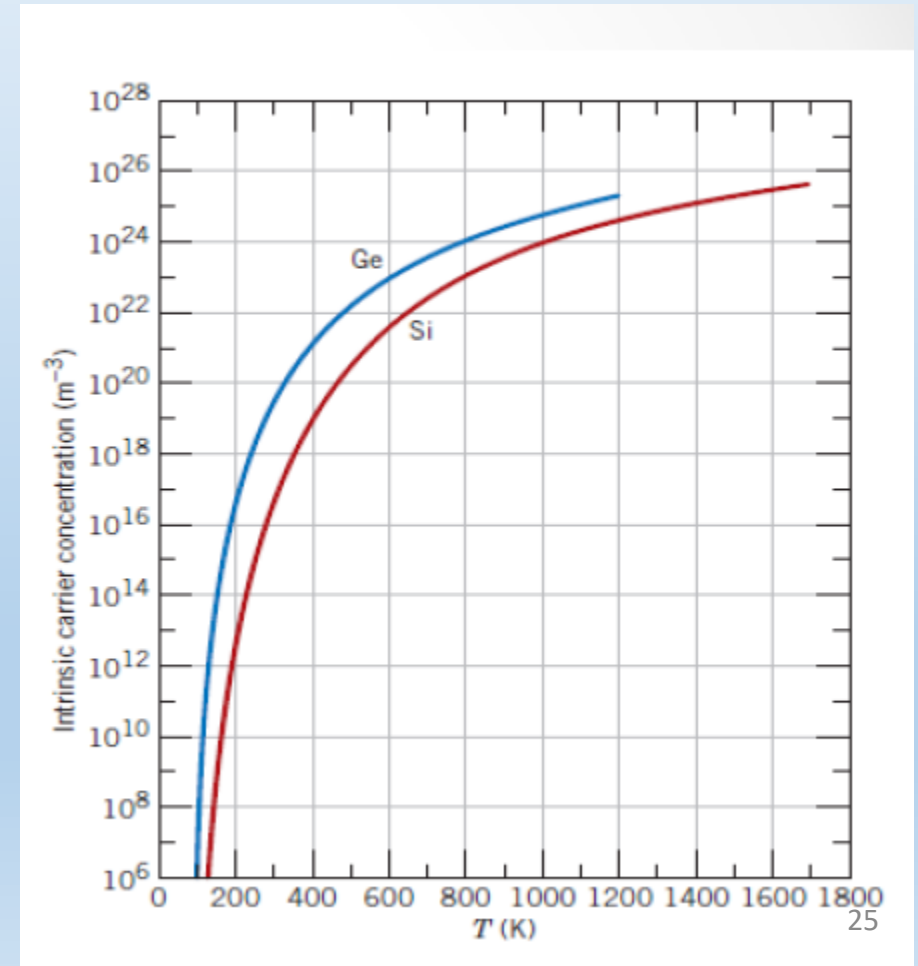
$$n_i = p_i = \left( 2 \left( \frac{2\pi k_B \sqrt{m_e^* m_h^*}}{h^2} \right) T^{\left(\frac{3}{2}\right)} \right) \exp \left( -\frac{E_g}{2k_B T} \right)$$



# ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

## ASAL YARIİLETKENLERDE TAŞIYICI YOĞUNLUĞUNUN SICAKLIĞA BAĞLILIĞI;

$$n_i=p_i = CT^{\left(\frac{3}{2}\right)} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_BT}\right)$$



# KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER

Oda sıcaklığında iç Si'nin taşıyıcı konsantrasyonu  $10^{16} \text{ m}^{-3}$ 'tür ve malzemenin bant aralığı ile ilişkilidir.

Bu durum  $3 \times 10^{-4} (\Omega \text{ m})^{-1}$  iletkenlik demektir. İletkenliği artırmak için yarıiletken değiştirilebilir mesela Germanyum (Ge) gibi daha düşük bant aralığı malzemesi kullanılabilir.

Ancak malzeme değiştirilemezse, taşıyıcı konsantrasyonunu artırmanın bir yolu sıcaklığı artırmaktır.

Diğer yol ise; katkılama, seçili safsızlıkların bir asal yarı iletkene eklenmesiyle seçici olarak taşıyıcı konsantrasyonunu artırmanın bir yöntemidir.

Buna katkılı yarıiletken denir.

Dengedeki herhangi bir yarıiletkende, kütle etkisi yasası karşılanmalıdır, yani.

## *Asal YARIİLETKEN*

$$n_i = p_i$$

Kütle etkisi Yasası

$$n_i \cdot p_i = n_i^2 = p_i^2$$

## *Katkılı YARIİLETKEN*

$$n \neq p$$

Kütle etkisi Yasası

$$n \cdot p = n_i^2$$

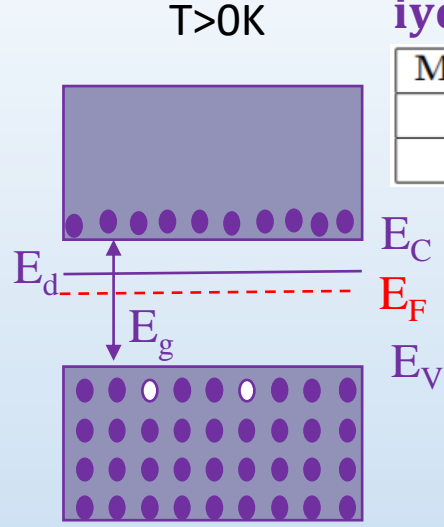
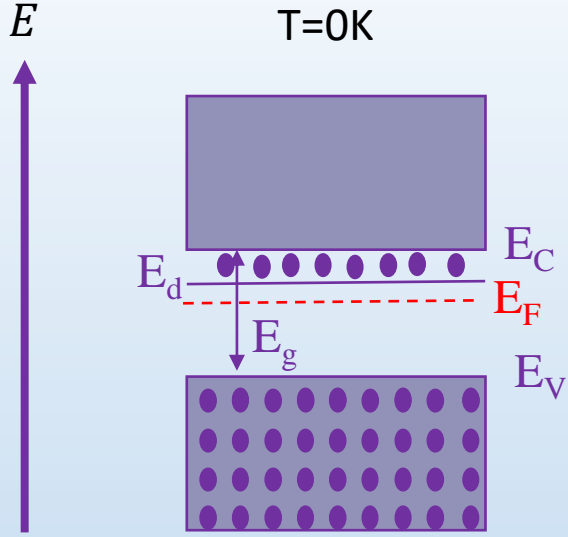
*$p_i$  : Asal yarıiletkende valans bandındaki boşluk konsantrasyonu ( $1/\text{m}^3$ )*

*$n_i$  : Asal yarıiletkende iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonu ( $1/\text{m}^3$ )*

*$p$  : Katkılı yarıiletkende valans bandındaki boşluk konsantrasyonu ( $1/\text{m}^3$ )*

*$n$  : Katkılı yarıiletkende iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonu ( $1/\text{m}^3$ )*

# KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER



iyonizasyon enerjisi (meV)

Material	P	As	Sb
Si	45	54	39
Ge	12	12.7	9.6

## N-TİPİ YARIİLETKENLER

$$E_{Hidrojen} = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -13.6 \text{ eV}$$

$$E_d = E_C - 13.6 \frac{m_e^*}{m_o} \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon} \right)^2 \text{ eV}$$

$E_b$

5. Elektron sadece P atomuna bağlı  
Küçük bir enerji ile serbest hale geçer yani enerji seviyesi  $E_c$  ye yakın olmalı!!!

● → Elektron  
○ → Boşluk

$$n = n_i + N_D$$

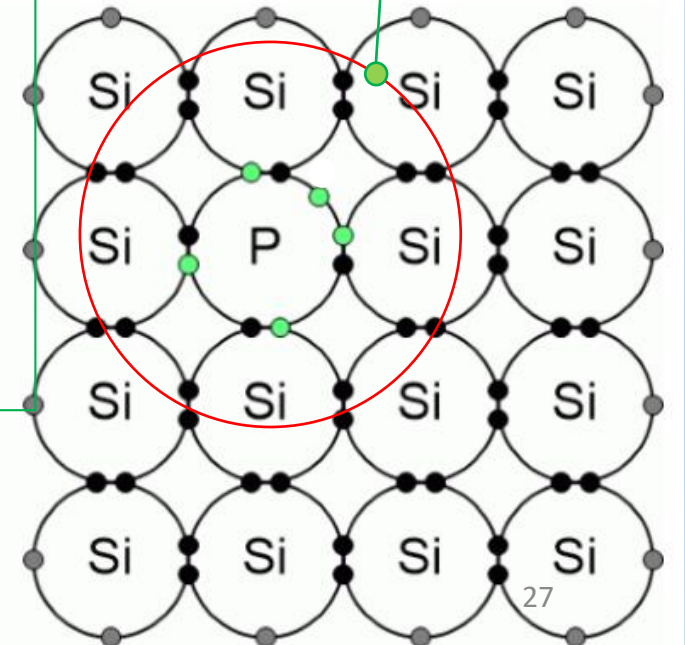
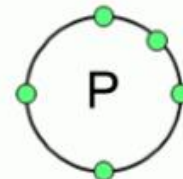
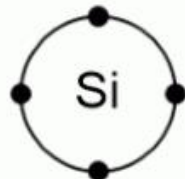
$N_D$ : :  $n$  tipi katkıli yarıiletkende Donör atom konsantrasyonu ( $1/m^3$ )

$$N_D \gg n_i \rightarrow n = N_D$$

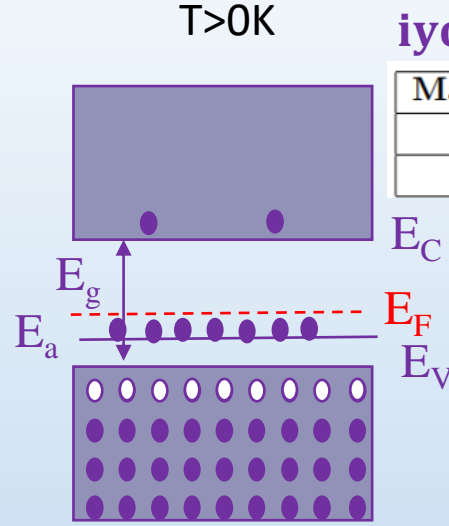
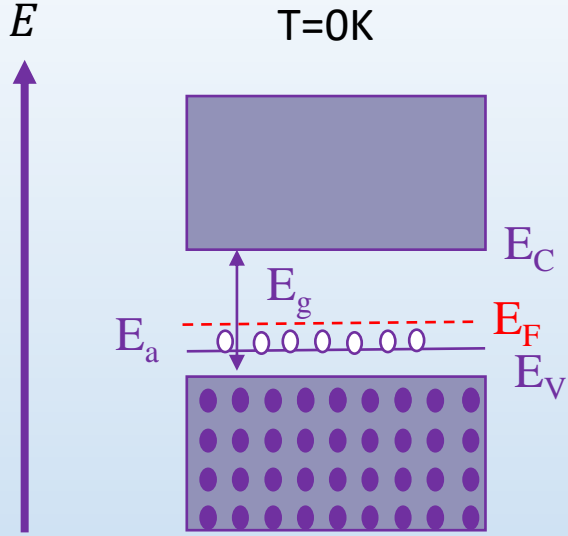
$$p = \frac{n_i^2}{N_D} \ll N_D$$

$$\sigma \approx N_D e \mu_n$$

- 5. Grup elementleri  
P, Sb ve As gibi beş değerlikli safsızlıklar Si kristaline aktarılabacak bir fazladan elektrona sahiptir. Bu safsızlık atomlarına donör (VERİCİ) atomları denir.
- Bu safsızlıklarla oluşturulmuş yarıiletken N-tipi yarıiletken denir.
- Çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardır.
- Azınlık yük taşıyıcıları boşluklardır



# KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER



iyonizasyon enerjisi (meV)

Material	B	Al	Ga	In
Si	45	57	65	157
Ge	10.4	10.2	10.8	11.2

$$E_{Hidrojen} = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -13.6 \text{ eV}$$

$$E_a = E_V + 13.6 \frac{m_e^*}{m_o} \left( \frac{\epsilon_o}{\epsilon} \right)^2 \text{ eV}$$

$E_b$

## P-TİPİ YARIİLETKENLER

Boşluk P atomuna bağlı

Küçük bir enerji ile valance band elektronları ile doldurulur yani enerji seviyesi  $E_V$  ye yakın olmalı!!!

● → Elektron  
○ → Boşluk

$$p = p_i + N_A$$

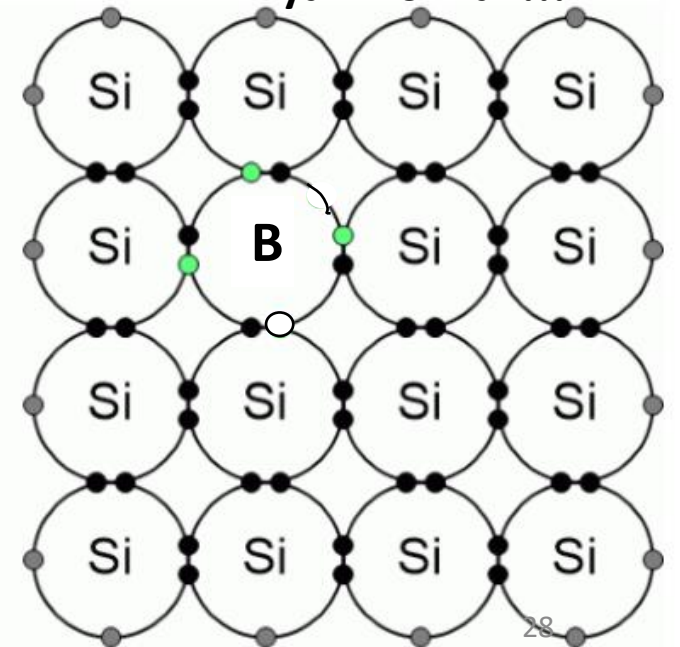
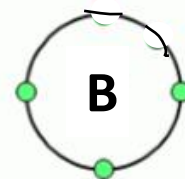
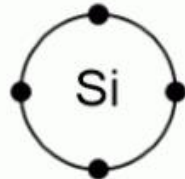
$N_A$ : : p tipi katkıli yarıiletkende Akseptör atom konsantrasyonu ( $1/m^3$ )

$$N_A \gg n_i \rightarrow p = N_A$$

$$n = \frac{n_i^2}{N_A} \ll N_A$$

$$\sigma \approx N_A e \mu_p$$

- 3. Grup elementleri B, Ga ve Al gibi üç değerlikli safsızlıklar Si kristaline bir boşluk sahiptir. Bu safsızlık atomlarına akseptör (ALICI) atomları denir.
- Bu safsızlıklarla oluşturulmuş yarıiletkene P-tipi yarıiletkene denir.
- Çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklardır.
- Azınlık yük taşıyıcıları elektronlardır



# KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER

## **KATKILI YARIİLETKENLERDE FERMİ SEVİYESİNİN YERİ**

### ***n* tipi YARIİLETKENLERDE FERMİ SEVİYESİNİN YERİ**

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right)$$

$$E_F = E_C + k_B T \ln\left(\frac{n}{N_C}\right)$$

### ***p* tipi YARIİLETKENLERDE FERMİ SEVİYESİNİN YERİ**

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)$$

$$E_F = E_V - k_B T \ln\left(\frac{p}{N_V}\right)$$

# KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER

## TAŞIYICILARIN KOMPANSASYONU

- Her iki tip katkı maddesini aynı malzemede kullanmak mümkündür.
- Bu tür katkılamakompanse edilmiş yarıiletken oluşturur.
- Elektronik cihazlarda bağlantıların oluşturulması gerektiğinde kullanılır.
- Bir pn bağlantısı oluşturmak için, n katkılı bir numune seçilir ve daha sonra p-tipi katkı maddesi ile takviye edilir veya bunun tersi de geçerlidir.
- Bir yarı iletkende hem donörler hem de alıcılar varsa, o zaman daha yüksek konsantrasyona sahip olan baskın olacak ve böylece nihai malzeme n veya p tipi olacaktır.

$$N_A \text{ ve } N_D \gg n_i \quad \text{ve} \quad N_D > N_A \Rightarrow n \text{ tipi}$$

$$N_A \text{ ve } N_D \gg n_i \quad \text{ve} \quad N_A > N_D \Rightarrow p \text{ tipi}$$

# KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER

## TAŞIYICILARIN KOMPANSASYONU

*Yarıiletken kendiliğinden n tipi veya p tipi ise onu p tipi veya n tipine dönüştürmek için içerdiği fazla elektron ve/veya boşluktan fazla boşluk/elektron olacak şekilde katkılayarak tipini değiştirebiliriz.*

*Bu durumda yarıiletken örneğin hem n-tipi yani donör atomları hem de p-tipi akseptör atomlarını içerir.*

*Bu durum için yük nötralitesi:*

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

*tüm katkı atomları iyonlaşmışsa*

$$n + N_A = p + N_D$$

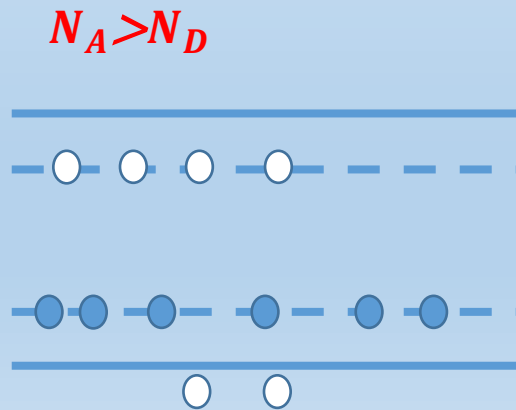
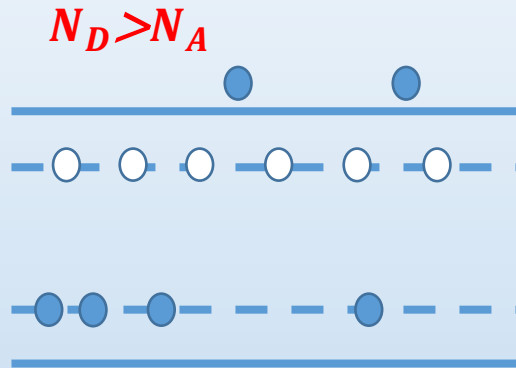
*Eğer*

$$N_D > N_A \Rightarrow n = \frac{n_i^2}{n} + N_D - N_A$$

$$n^2 - (N_D - N_A)n - n_i^2 = 0$$

# KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER

## TAŞIYICILARIN KOMPANSASYONU



Tam kompensasyon:

$$N_A = N_D$$

*Kısmen kompensasyon*

$$N_A \neq N_D$$

$N_D > N_A \Rightarrow n - \text{tipi}$

$N_D^e \Rightarrow \text{etkin donör kons.}$

$$N_D^e = N_D - N_A$$

$N_A > N_D \Rightarrow p - \text{tipi}$

$N_A^e \Rightarrow \text{etkin akseptör kons.}$

$$N_A^e = N_A - N_D$$