

MÜHENDİSLER İÇİN YARIİLETKEN FİZİĞİ

FIZ1951

Ders Adı	Kodu	Yerel Kredi	AKTS	Ders (saat/hafta)	Uygulama (saat/hafta)	Laboratuvar (saat/hafta)
Mühendisler için Yarıiletken Fiziği	FIZ1951	3	5	3	0	0

Ara Sınavlar	2	60
Final	1	40
TOPLAM		100

Saf ve Katkılı Yarıiletkenler

Denge Durumunda Yarıiletkenlerde Taşıyıcı Konsantrasyonu
Enerji ve Durum Yoğunluğu

KAYNAKLAR

- Modern Fizik; J.R.Taylor, C.Zafaritos Çev. Prof. Dr. B. Karaoğlu.
- Fen ve Mühendislik için Fizik R.A.Serway Çev: K.Çolakoğlu, Palme Yayıncılık.
- Katıların Fiziği Richard Turton; Çeviren: Yahya Kemal Yoğurtçu Aktif Yayınevi; Erzurum, 2005.
- Yarıiletken Fiziği1 Prof. Dr. Tayyar Caferov YTÜ Yayınları.
- Katıhal Fiziğine Giriş, Prof. Dr. Mustafa Dikici
- Katıhal Fiziğine Giriş, Prof. Dr. Tahsin Nuri Durlu, AÜ, 1996
- Katıhal Fiziği, J.R. HOOK & H.E. Hall, çeviri: F. Köksal, M. Altunbaş, M. Dinçer, E. Başaran, Literatür Yayınları, 1998
- Katıhal Fiziği Temelleri: Ercüment Akat, Papatya Yayıncılık, 2010.
- Yarıiletken Fiziği, Donalt Neamen Ceviri Mustafa Sağlam,
- Optoelektronik - TÜBA Açık Ders, H.Sarı,
- Elementary Solid State Physics: Principles and Applications, M. Ali OMAR, 1974
- Physics of Semiconductor Devices, S. M. Sze and Kwok K. Ng, 2007 Wiley and Sons.

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
Üçlü

\Rightarrow GaAs, AlAs, InAs, InP
 \Rightarrow $Ga_xAl_{(1-x)}As$, $In_xAl_{(1-x)}As$

II-VI

İkili
Üçlü

\Rightarrow HgTe, CdTe
 \Rightarrow $Cd_xHg_{(1-x)}Te$

		III	IV	V	VI	VII
		B	C	N	O	F
		Al	Si	P	S	Cl
I	II					
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

YARIİLETKENLER

```
graph TD; A[YARIİLETKENLER] --> B[ASAL<br/>(SAF/INTRINSIC)<br/>YARIİLETKENLER]; A --> C[KATKILI<br/>(EXTRINSIC)<br/>YARIİLETKENLER]; C --> D["n-tipi<br/>Yariiletken"]; C --> E["p-tipi<br/>Yariiletken"];
```

ASAL
(SAF/INTRINSIC)
YARIİLETKENLER

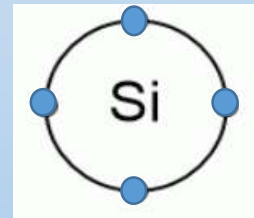
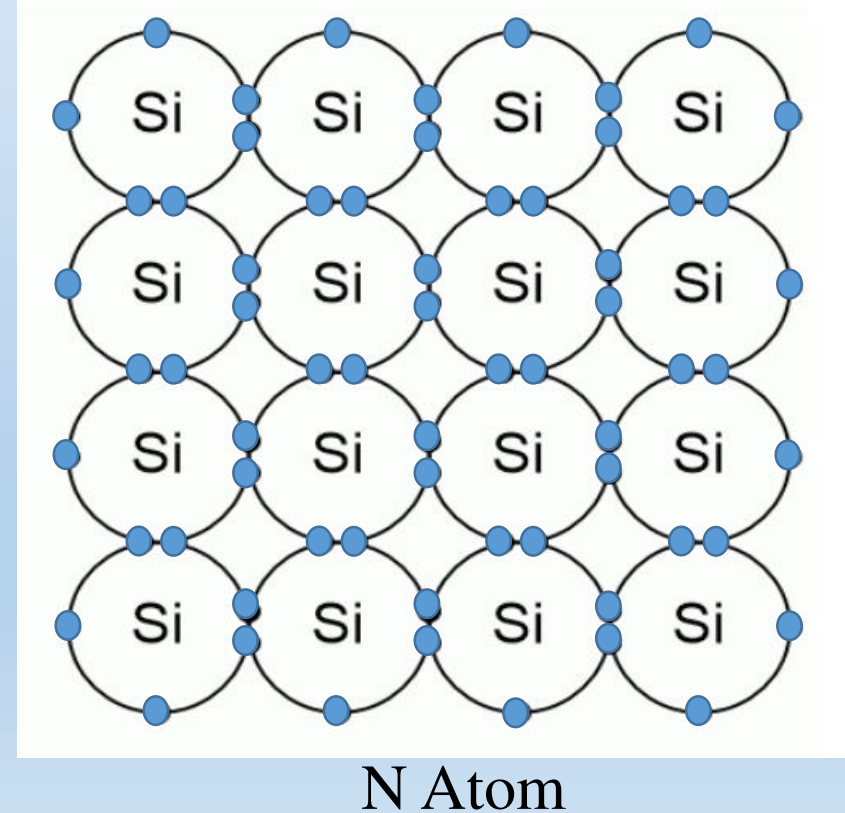
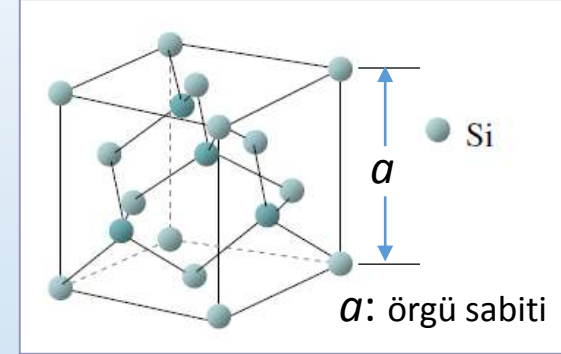
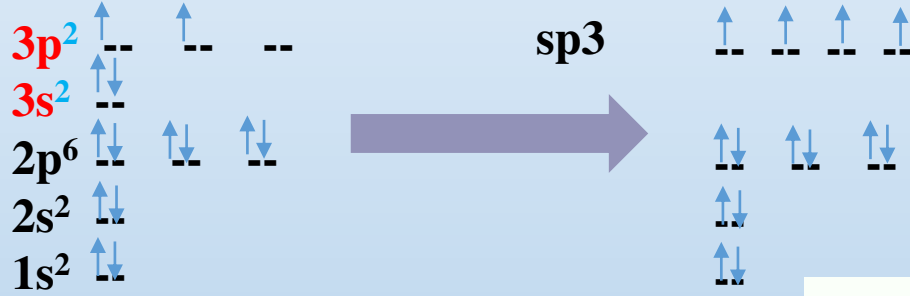
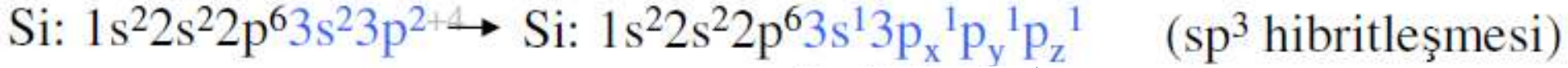
KATKILI
(EXTRINSIC)
YARIİLETKENLER

***n*-tipi**
Yariiletken

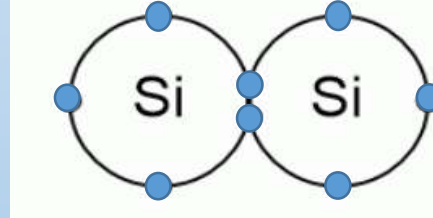
***p*-tipi**
Yariiletken

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

SİLİKON



1 Atom

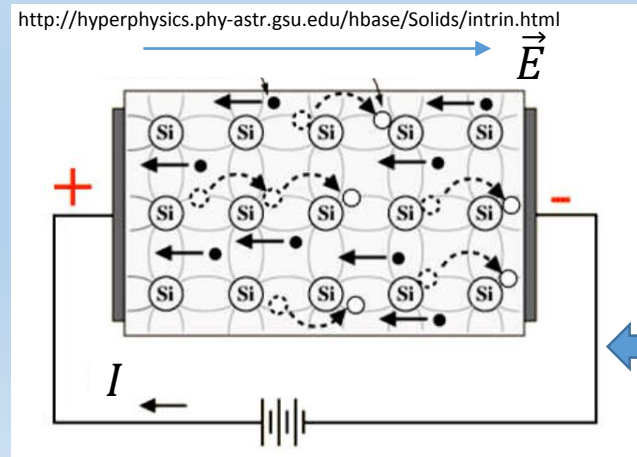


2 Atom

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

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

kovalent bağlar kırılır ve iletim bandına elektron geçer ve iletim oluşur



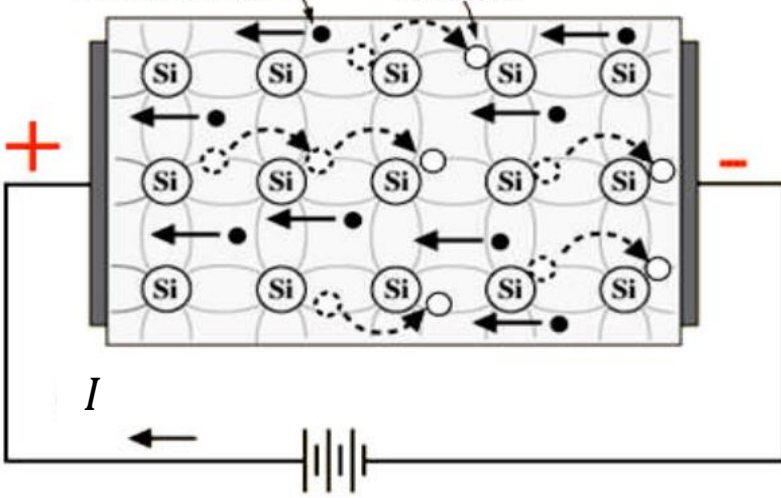
SİLİKON

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

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

\vec{E}

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/intrin.html>



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

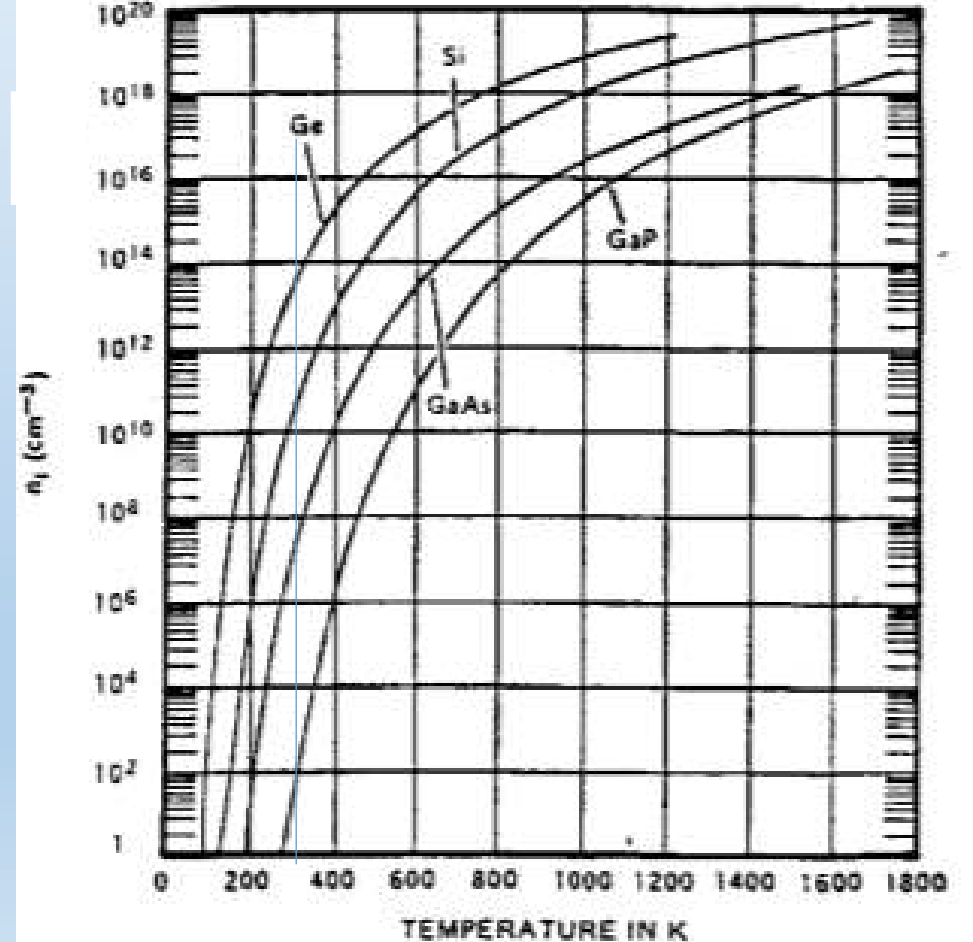
Valans bandından iletim bandına bir elektron çıkarabilmek için verilen ısısal enerji ile aslında atomlar arası bir bağ kırılmış demektir. Ve başlangıçta lokalize olan elektron artık serbest hale gelmiştir.

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

Silikon için $C = 7.3 \times 10^{15} cm^{-3} K^{-3/2}$

$$E_g = 1.12 eV$$

$$p_i = n_i \cong 10^{16} (m^{-3}) @ 300K$$



ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

ELEKTRON VE BOŞLUKLAR:

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

* İletim 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 veya hol** adını alır.

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

* **+e yüklü boşlukların mobilitesi (μ_p) ile elektronun (μ_n) mobilitesi farklıdır.**

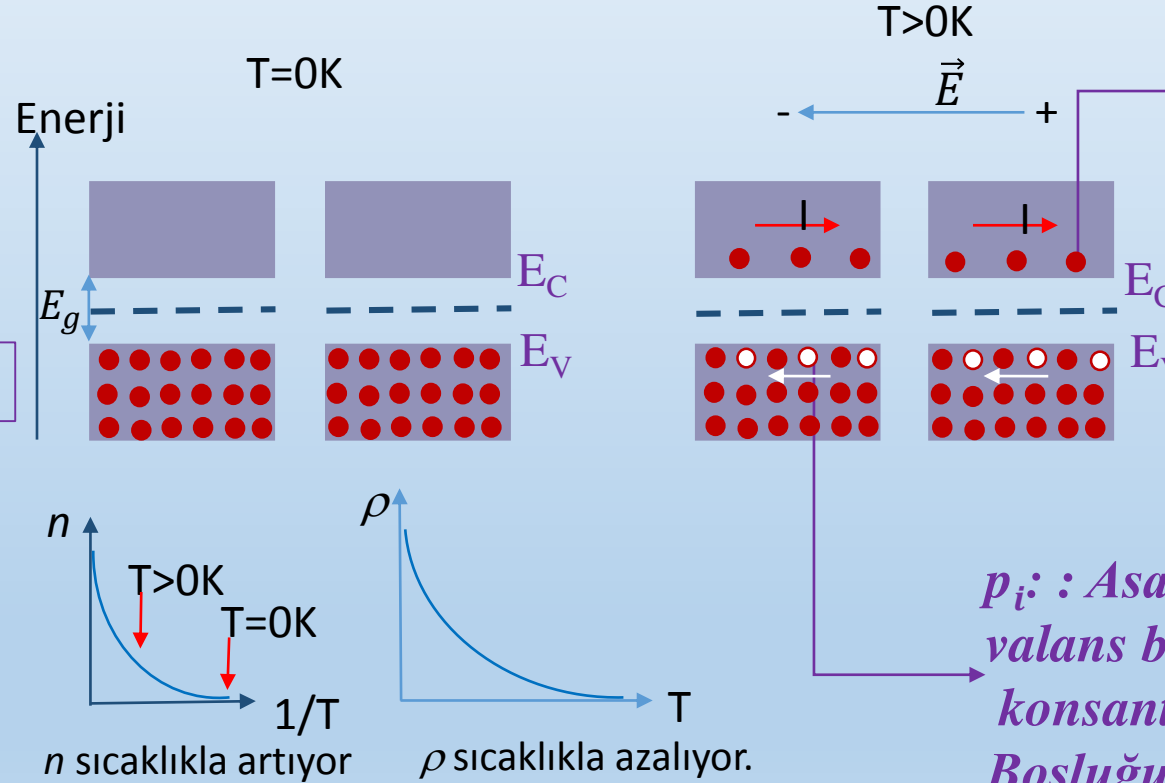
$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}, 1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\begin{aligned} k_B T &= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 300\text{K} \\ &= 414 \times 10^{-23} \text{ J} \\ &= 25,875 \times 10^{-3} \text{ eV} \\ &= 0.026 \text{ eV} \\ &\cong 26 \text{ meV} \end{aligned}$$

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 dir.

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

$$n = CT^{3/2} e^{-E_g/2kT}$$

Elektrik alanda elektronun hareket yönü
Elektrik alanda boşluğun hareket yönü

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

Asal bir yarıiletkende elektriksel iletkenlik 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;

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

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

μ_n : elektronun mobilitesi

μ_p : boşluğun mobilitesi

n : iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonu

p : valans bandındaki boşluk konsantrasyonu

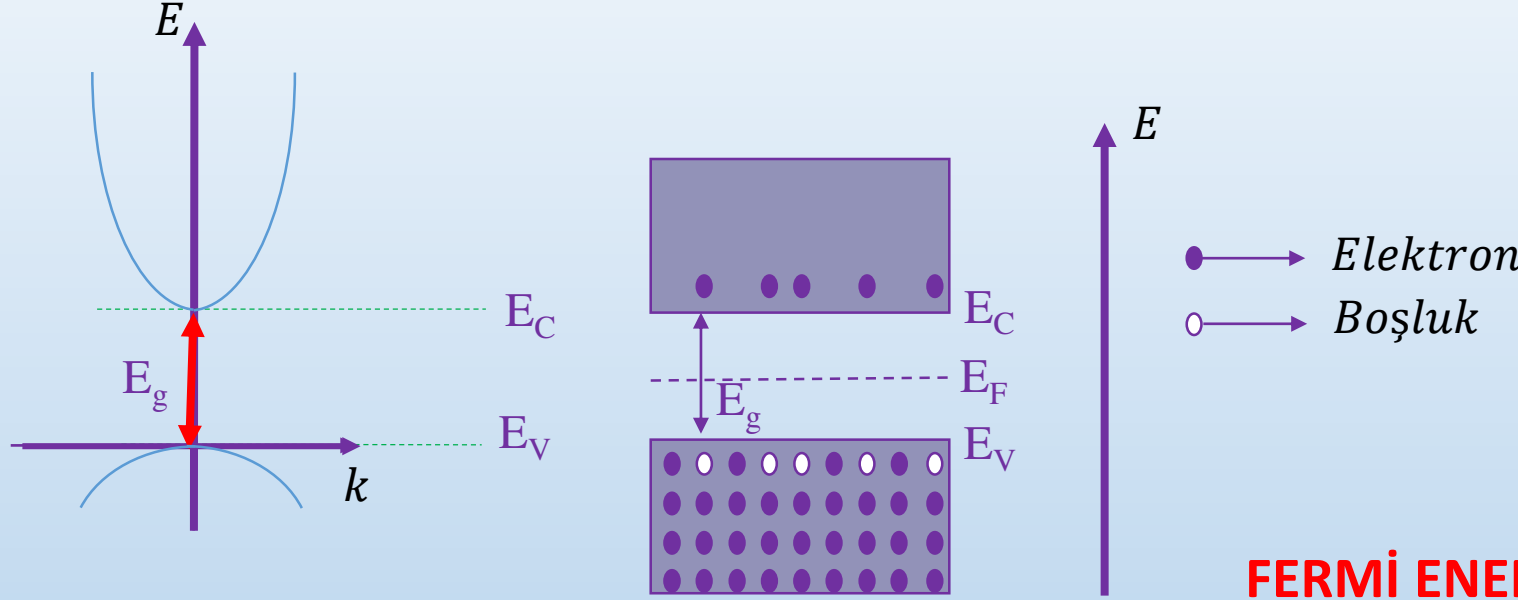
ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

Asal YARIİLETKEN

$$n_i = p_i$$

Kütle etkisi Yasası

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



E : Enerji

E_C : İletim bandının dibi

E_V : Valans bandının tavanı

E_g : Yasak Band Aralığı

E_F : Fermi Seviyesi

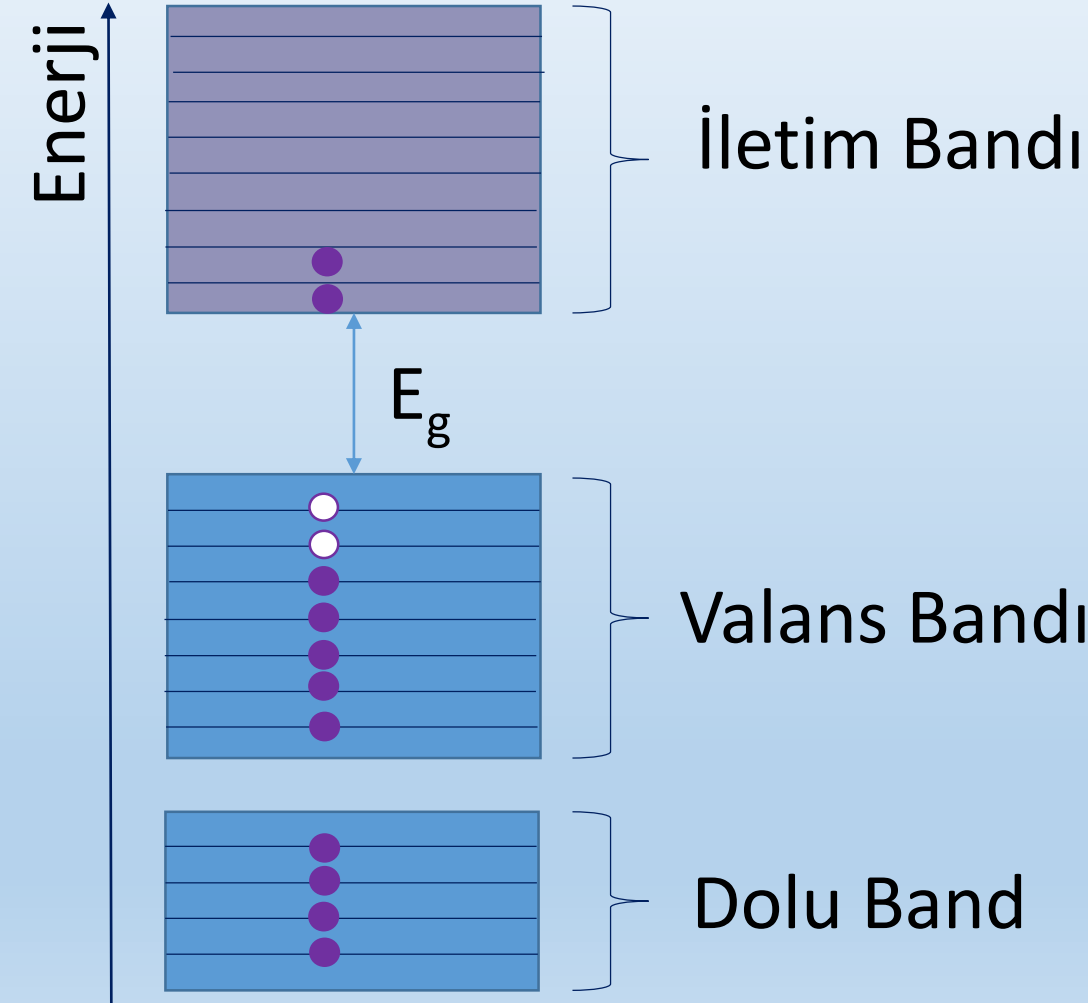
n_i : Saf yarıiletkende serbest elektron konsantrasyonu
(serbest elektron sayısı/ m^3)

p_i : Saf yarıiletkende serbest hol (boşluk) konsantrasyonu
(serbest hol sayısı/ m^3)

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 Enerjisidir (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 kuantize enerji seviyelerinin dağılımını, durum yoğunluğu fonksiyonu $N(E)$ (veya $g(E)$) verir.

* Durum yoğunluğu enerjiye bağlı bir fonk., belirli 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;

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

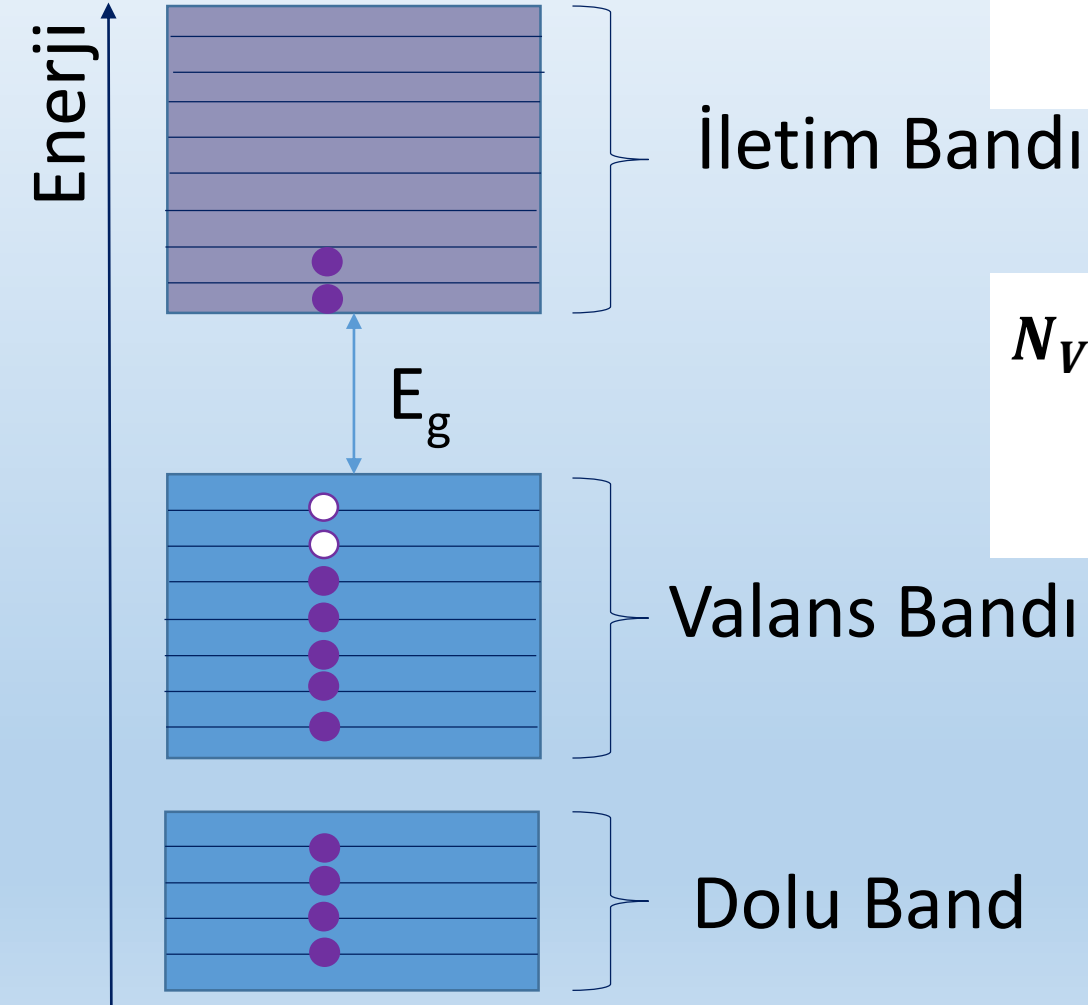
ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

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

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

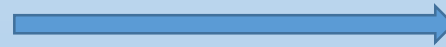


ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$N(E) \Rightarrow$ *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

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



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,

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

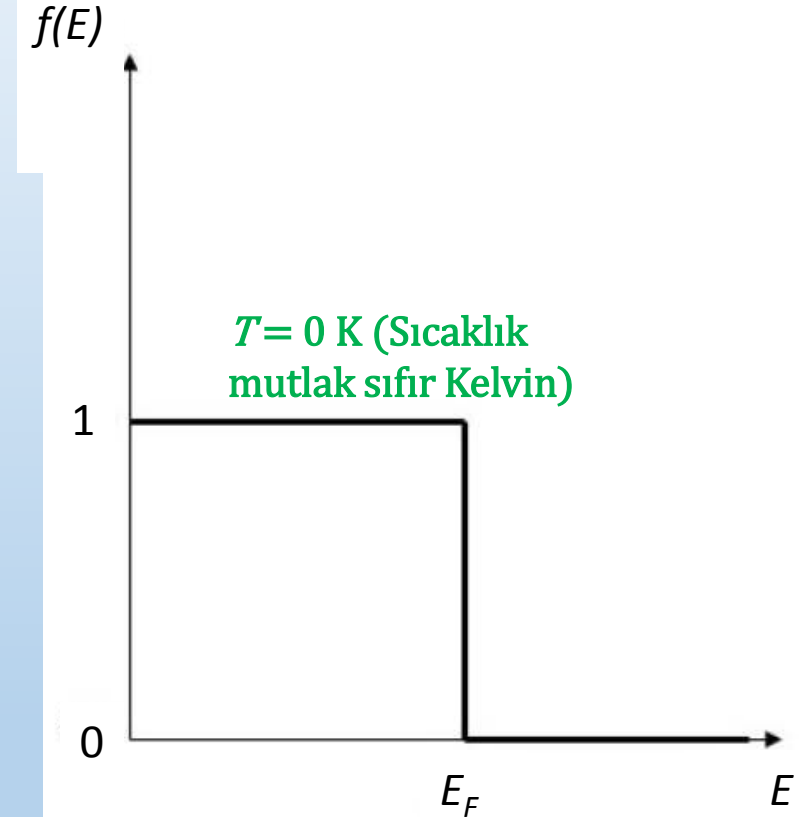
k_B : Boltzman Sabiti; $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T: Sıcaklık

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

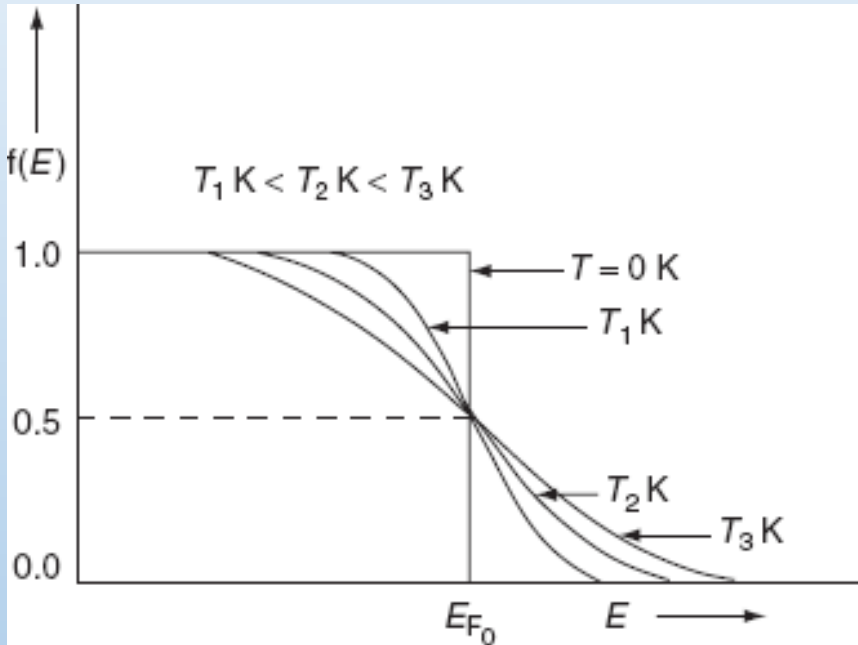
$$T = 0 \text{ K ve } E > E_F \text{ ise } f(E) = \frac{1}{1 + e^{(+\infty)}} = 0$$

$$T = 0 \text{ K ve } E < E_F \text{ ise } f(E) = \frac{1}{1 + e^{(-\infty)}} = 1$$



ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

SONLU SICAKLIKLARDA ELEKTRON DAĞILIMI;
 $T > 0 \text{ K}$



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

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

ii) $E - E_F \gg k_B T \Rightarrow f(E, T) = e^{-\frac{E - E_F}{k_B T}}$, paydadaki 1 ihmal edilir.

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

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

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

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;

$$N(E) = g(E)$$

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

Mutlak sıfırda valans bandında bulunan elektron yoğunluğu;

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

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:

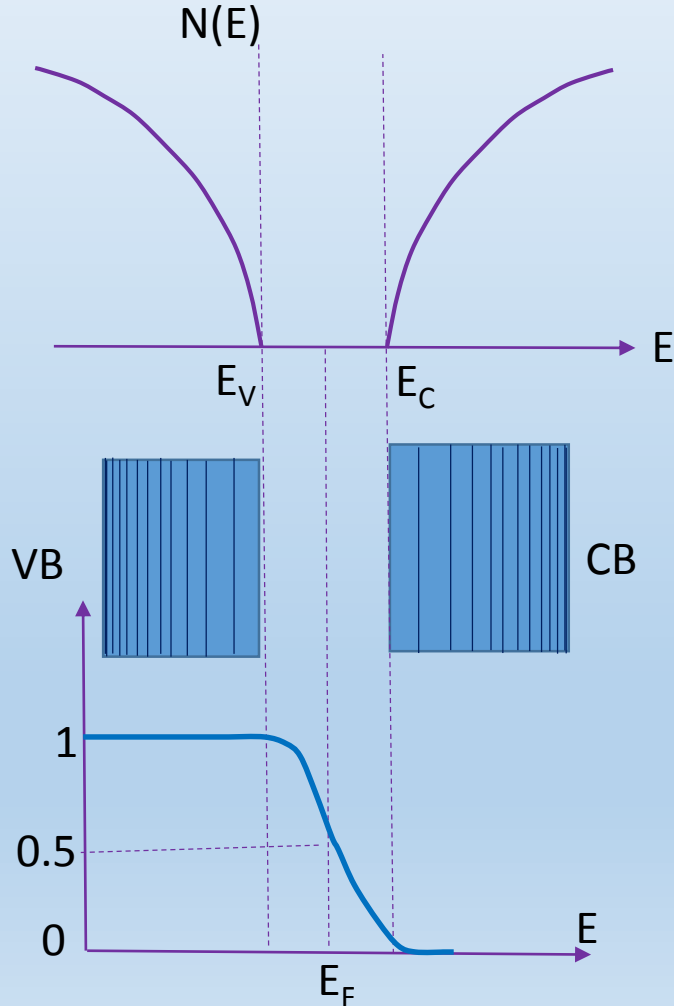
Yariiletken içindeki serbest yük taşıyıcı yoğunluğunu belirleyeceğiz.

Sonlu sıcaklıkta elektronun serbest bulunduğu seviyeler iletim bandı içindedir.

($E_C - E_F$) ?

Yariiletkenlerin 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

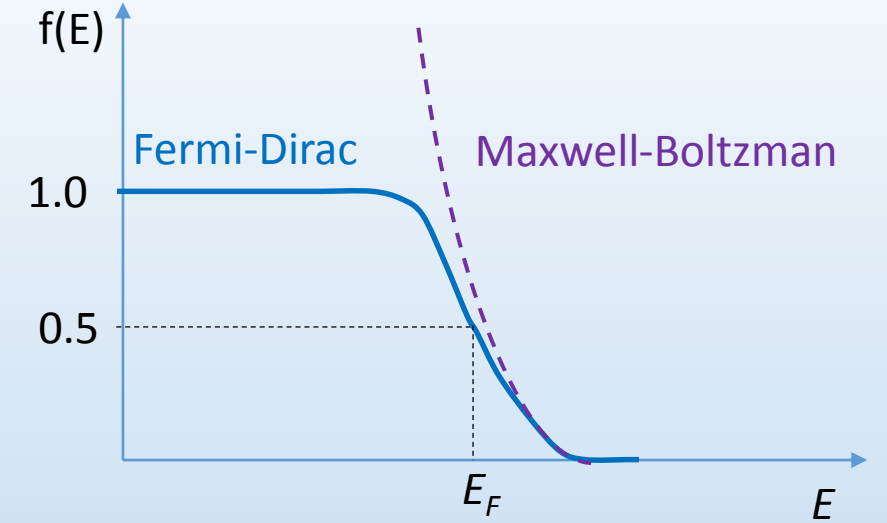
ASAL YARIİLETKENLERDE SERBEST YÜK TAŞIYICILARI:

iletim bandında elektron dağılımı;

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

Bu Maxwell-Boltzmann Dağılımı;

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



Maxwell-Boltzman dağılımını fermiyonlar için kullanıyoruz, çünkü iletim bandında çok sayıda enerji seviyesi var bunların çok küçük bir kısmı elektronlarca işgal edilebilir.

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

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

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

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

$$n_i = \int_{E_C}^{\infty} \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} e^{-(E-E_F)/k_B T} dE \text{ ise, } n_i = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right)$$

ASAL YARIİLETKENDE SERBEST ELEKTRON YOĞUNLUĞU

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

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

İLETKENLİK BANDINDAKİ ETKİN
SEVİYE YOĞUNLUĞU

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

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

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

VALANS BANDINDA
ETKİN SEVİYE YOĞUNLUĞU

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

ASAL YARIİLETKENDE BOŞLUK YOĞUNLUĞU

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

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$$n_i = p_i = \sqrt{n_i p_i} \quad \text{Yük Nötralitesi}$$

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

$$n_i^2 = n_i p_i = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T} - \frac{E_F - E_v}{k_B T}\right), \quad E_F \text{'ler gider}$$

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

$$E_g = E_c - E_v$$

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

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

$$n_i = N_c \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) \quad \text{ASAL YARIİLETKENDE SERBEST ELEKTRON YOĞUNLUĞU}$$

$$p_i = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) \quad \text{ASAL YARIİLETKENDE SERBEST BOŞLUK YOĞUNLUĞU}$$

$$E_g = E_C - E_V$$

$$n_i = p_i$$

Etkin durum yoğunluğu ve etkin kütle değerleri

	$N_c \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$N_v \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	m_n^*/m_0	m_p^*/m_0
Silicon	2.8×10^{19}	1.04×10^{19}	1.08	0.56
Gallium arsenide	4.7×10^{17}	7.0×10^{18}	0.067	0.48
Germanium	1.04×10^{19}	6.0×10^{18}	0.55	0.37

300 K de n_i değerleri

Silicon	$n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Gallium arsenide	$n_i = 1.8 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$
Germanium	$n_i = 2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

Fermi enerji (E_F) seviyesinin yeri

$$n_i = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) = p_i = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) \text{ ise } \frac{N_V}{N_C} = \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right), \text{ buradan}$$

$$\frac{N_V}{N_C} = \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T} + \frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) \text{ olur. Her iki tarafın } \ln' \text{ i alınırsa}$$

$$\ln \frac{N_V}{N_C} = -\frac{E_C - E_F}{k_B T} + \frac{E_F - E_V}{k_B T}$$

$$\ln \frac{N_V}{N_C} = -(E_C + E_V)/k_B T + 2E_F/k_B T$$

$$2E_F = (E_C + E_V) + k_B T \ln \frac{N_V}{N_C}$$

$$E_F = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{1}{2} k_B T \ln \frac{N_V}{N_C} \text{ veya } E_F = E_V + \frac{1}{2} E_g + \frac{1}{2} k_B T \ln \frac{N_V}{N_C}, \quad T = 0K \text{ için, } E_F = \frac{1}{2}(E_C + E_V) \text{ veya } E_F = E_V + \frac{1}{2} E_g \text{ olur.}$$

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

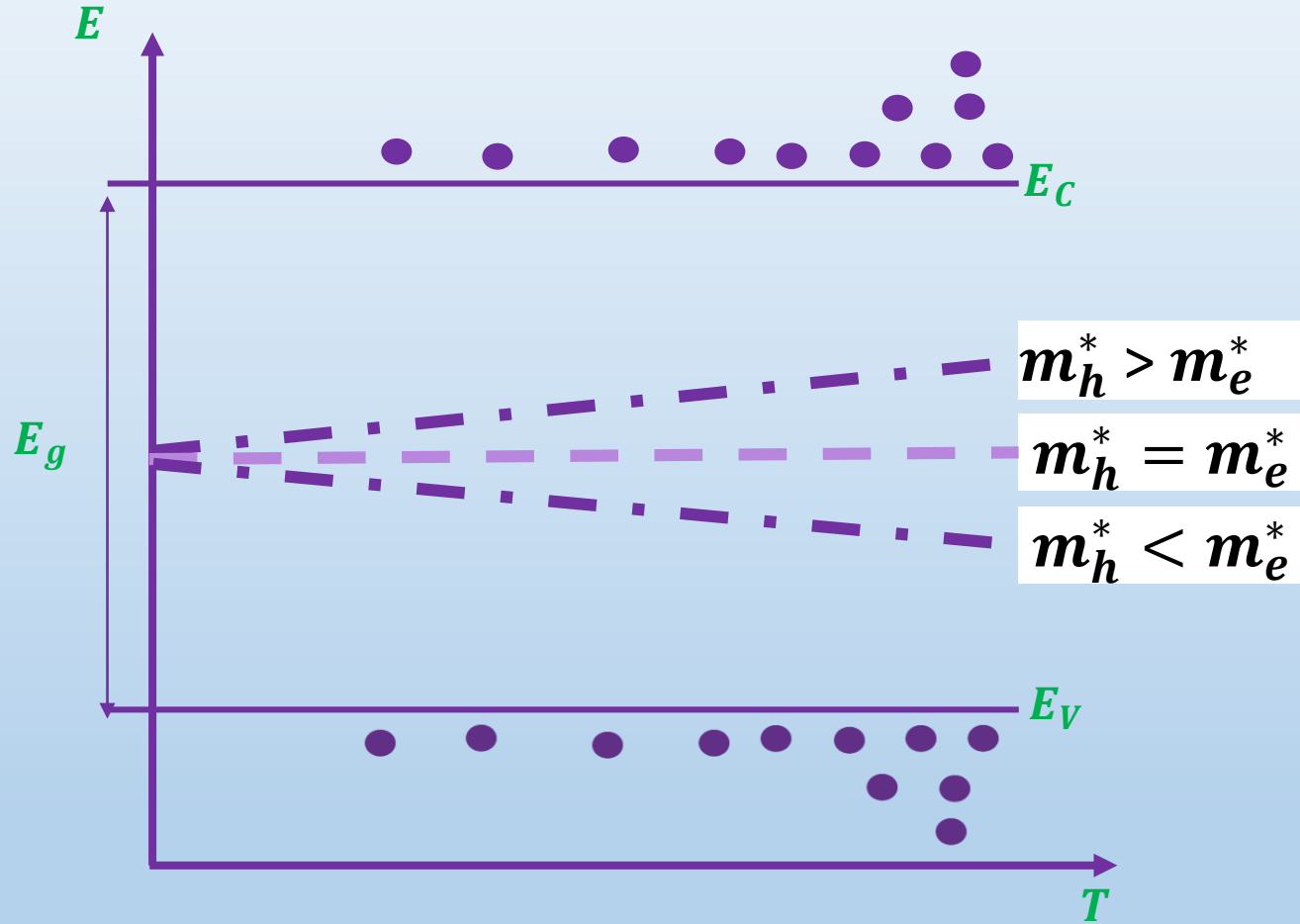
$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

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

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

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

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



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

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

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

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

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

ASAL YARIİLETKENLERDE TAŞIYICI YOĞUNLUĞUNUN SICAKLIĞA BAĞLILIĞI;

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

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

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

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

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

A, Malzemeye özgü bir sbt

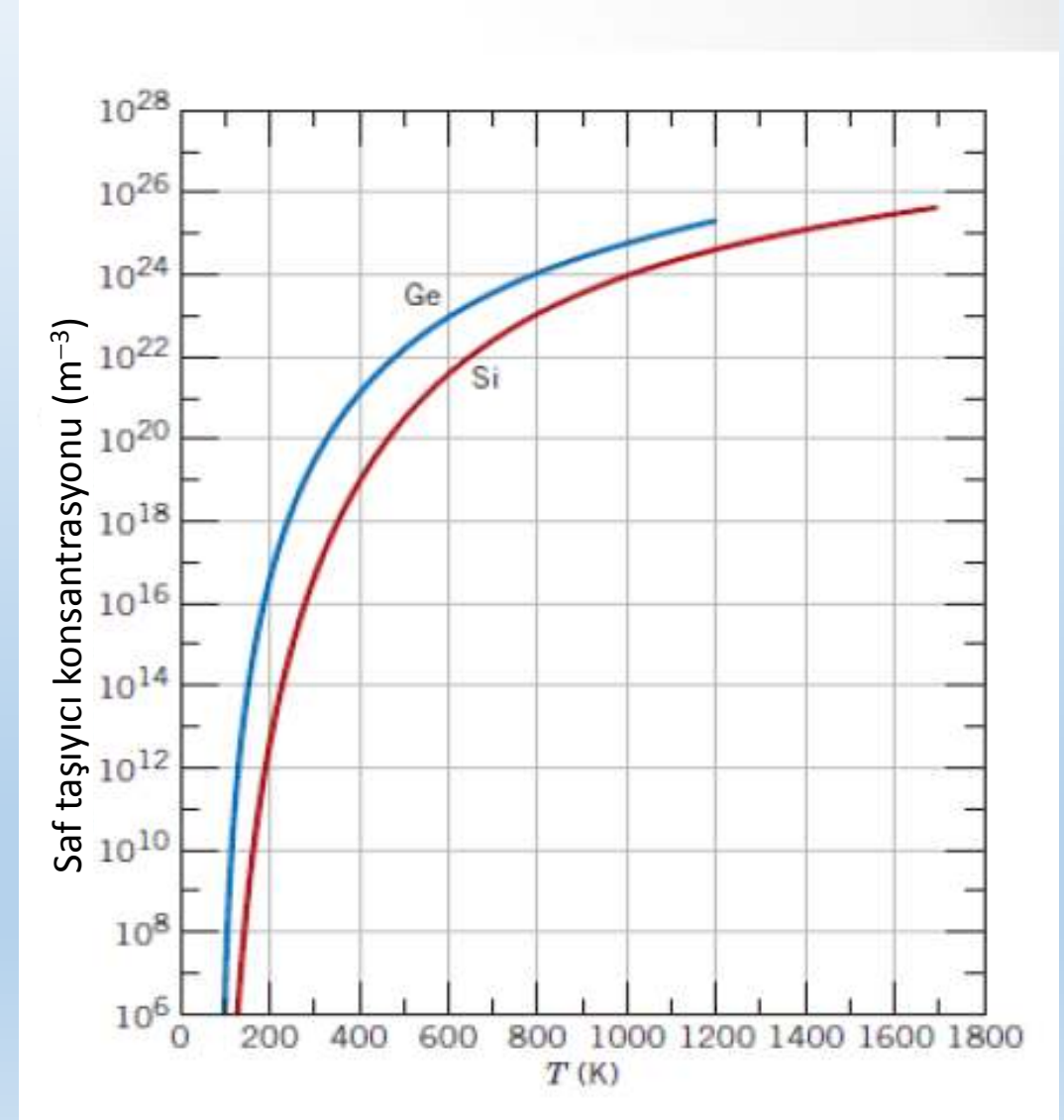
$$n_i = p_i = 2 \left(\frac{2\pi k_B \sqrt{m_e^* m_h^*}}{h^2} \right) T^{\left(\frac{3}{2}\right)} \exp \left(-\frac{E_g}{2k_B T} \right) \quad n_i = p_i = A T^{\left(\frac{3}{2}\right)} \exp \left(-\frac{E_g}{2k_B T} \right)$$

ASAL/SAF/INTRINSIC (KATKISIZ) YARIİLETKENLER

ASAL YARIİLETKENLERDE TAŞIYICI YOĞUNLUĞUNUN SICAKLIĞA BAĞLILIĞI;

$$n_i=p_i = AT^{\left(\frac{3}{2}\right)} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

A: Malzemeye bağlı bir sabit (C ve B ile de gösteriliyor)



KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER

Oda sıcaklığında Si'nin saf taşıyıcı konsantrasyonu 10^{16} m^{-3} 'tür ve bu değer malzemenin bant aralığı ile orantılıdır.

Bu değer $3 \times 10^{-4} (\Omega \text{ m})^{-1}$ iletkenlik demektir. Bu değer cihaz yapımı için uygun bir değer değildir.

İletkenliği artırmak için yarıiletken değiştirilebilir mesela Germanyum (Ge) gibi daha düşük bant aralığına sahip malzeme kullanılabilir.

Ancak malzeme değiştirilemezse, taşıyıcı konsantrasyonunu arttırmanın bir yolu da sıcaklığı arttırmak gibi gözüküyor, fakat bu uygun bir yöntem değildir, çünkü sıcaklık değiştiğinde iletkenlik de değişeceğinden cihazın çalışma kararlılığı bozulacaktır.

İletkenliği artırmanın en yaygın yolu, **katkılamadır**; uygun safsızlık atomlarının bir asal yarı iletkene eklenmesiyle kontrol edilebilir olarak taşıyıcı konsantrasyonunu artırmaktır. Buna katkılı yarıiletken denir.

Dengedeki herhangi bir yarıiletkende, kütle etkisi yasası karşılanmalıdır,

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 ($1/\text{m}^3$)*

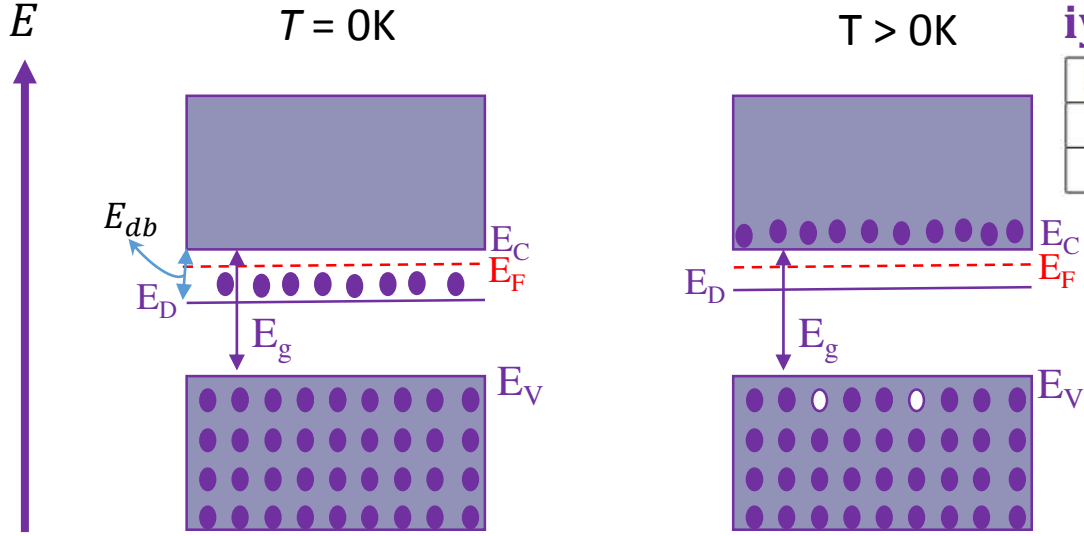
n_i : *Asal yarıiletkende iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonu ($1/\text{m}^3$)*

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

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

n-tipi Yarıiletkenler

KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER



iyonizasyon enerji (meV)

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

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

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

5. Elektron sadece As atomuna bağlı ve küçük bir enerji ile serbest hale geçer yani E_D enerjisi seviyesi E_C ye yakın olmalı.

Çok küçük ısı enerjisi (oda ısısı yeterli olabilir) ile As iyonlaşır ve kristale ekstra serbest elektron verir.

● → Elektron
○ → Boşluk

$$n = n_i + N_D$$

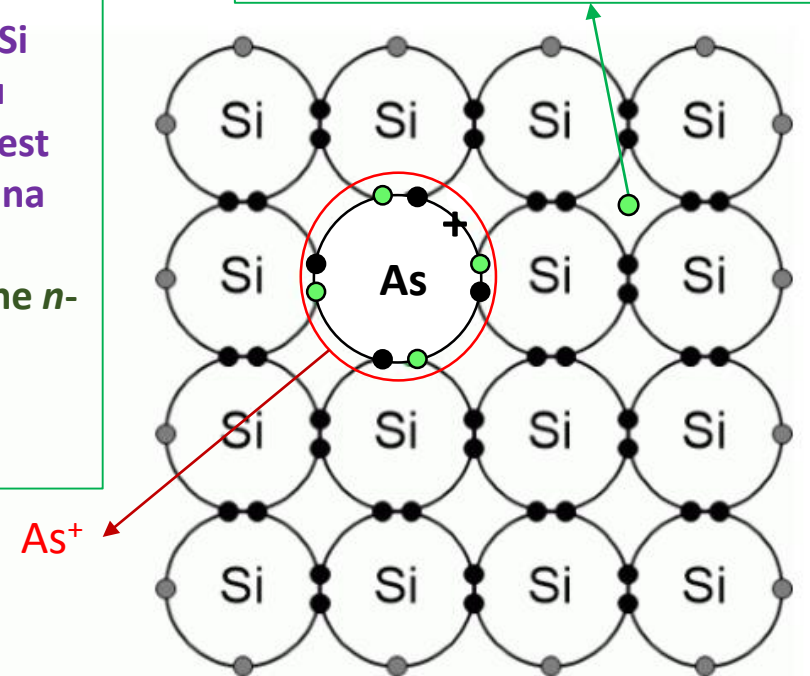
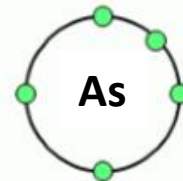
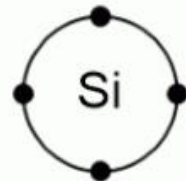
N_D : *n* tipi katkılı yarıiletkende Donör atom konsantrasyonu ($1/m^3$)

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

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

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

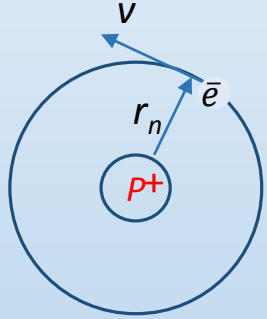
- 5. Grup elementleri
P, Sb ve As gibi beş valans elektronlu safsızlıklar Si kristaline katkılanırsa (yani bir silisyum atomunu öteleyip yerine geçme) kristale fazladan bir serbest elektron verirler. Bu yüzden bu safsızlık atomlarına donör (VERİCİ) atomları denir.
- Bu safsızlıklarla katkılanarak üretilmiş yarıiletken *n*-tipi yarıiletken denir.
- Çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardır.
- Azınlık yük taşıyıcıları boşluklardır.



İyonlaşma Enerjileri

Donör elektronun donör safsızlık iyonundan yaklaşık uzaklığını ve ayrıca donör elektronun iletkenlik bandına yükselmesi için gerekli enerjiyi yaklaşık olarak hesaplayabiliriz. Bu enerji iyonlaşma enerjisi olarak atfedilir. Bu hesaplamalar için Bohr atom modelini kullanacağız. Çünkü kuantum mekaniğinden belirlenen, hidrojen atomunda elektronun çekirdekten en muhtemel uzaklığı Bohr yarıçapı ile aynıdır. Kuantum mekaniğinden belirlenen hidrojen atomundaki enerji seviyeleri de Bohr teorisi ile elde edilenle aynıdır.

Donör safsızlık atomu durumunda, donör elektronunu, yarıiletken malzeme içerisinde gömülü, donör iyonunun etrafında yörüngeleniyor olarak görselleştirebiliriz. Donör elektronu için hesaplamalarda, hidrojen atomunda kullanılan serbest uzay (vakum) elektrik geçirgenliği (ϵ_0) yerine yarıiletken malzemenin elektrik geçirgenliği (ϵ) kullanılır. $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, burada ϵ_r bağıl dielektrik sabitidir, yani malzemenin elektrik geçirgenliğinin vakumun (boşluk) geçirgenliğine oranıdır. $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.



Hidrojen atomu

$$F_M = F_E, \text{ dolayısıyla } \frac{m_0 v^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}$$

Açısal momentum kuantizedir, $L = m_0 v r_n = n\hbar$, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

Kuantize eşitliğinden v çekilip yukarıdaki eşitlikte yerine konursa, $r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 n^2 \hbar^2}{m_0 e^2}$

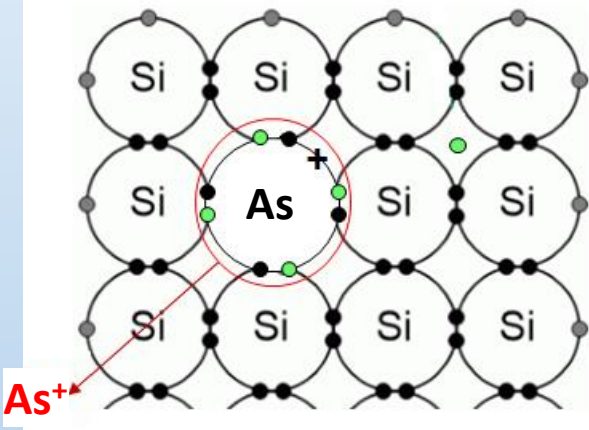
Bu denklemde $n = 1$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ J.s}$, $m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ değerleri yerine konursa, $r_1 = 0.53 \text{ Å} = a_0$, Bohr yarıçapı bulunmuş olur.

$m_0 v^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}$ yazılırsa, toplam enerji, yani elektronun hidrojen atomuna bağlanma enerjisi,

$$E = K + V = \frac{1}{2} m_0 v^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

Burada yukarıda bulunan r_n yerine yazılırsa, $E_H = -\frac{m_0 e^2}{32\pi^2 \epsilon_0^2 n^2 \hbar^2}$ bulunur ve yukardaki değerler yerine konursa

$n = 1$ için $E_H = -2.17 \times 10^{-18} \text{ J} \equiv -13.6 \text{ eV}$ bulunur, elektronun hidrojen atomuna bağlanma enerjisi.



Silikon kristaline katkılanmış
Donör Arsenik atomu

İyonlaşma Enerjileri

Bu denklemi yarıiletken içerisinde iyonize donör atomuna uyarlırsak, elektronun serbest kütlesi yerine etkin kütle, ϵ_0 yerine de yarıiletkenin elektrik geçirgenliğini (ϵ) alacağız. Kristal katı içerisinde donör iyonlaşma enerjisi ve iyonik yarıçapı sırasıyla aşağıdaki gibi olur.

$$E_{db} = -\frac{m^* e^2}{32\pi^2 \epsilon^2 n^2 \hbar^2} \text{ donör elektronun iyonuna bağlanma enerjisi (iyonlaşma enerjisi)}$$

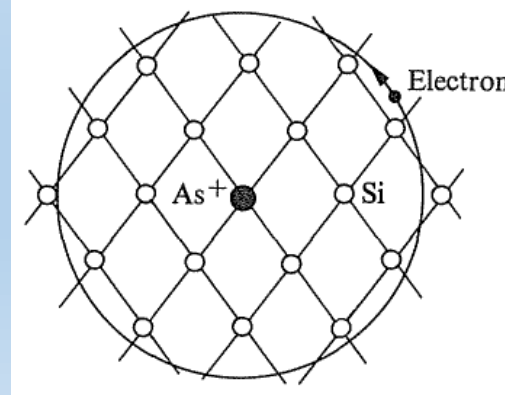
$$r_d = \frac{4\pi\epsilon n^2 \hbar^2}{m^* e^2} \text{ donör elektronunun iyonlaşma yarıçapı, } n = 1 \text{ için Hidrojen atomunkilerle bunları oranlırsak,}$$

$$\frac{E_{db}}{E_H} = \frac{-\frac{m^* e^2}{32\pi^2 \epsilon^2 n^2 \hbar^2}}{-\frac{m_0 e^2}{32\pi^2 \epsilon_0^2 n^2 \hbar^2}} = \left(\frac{m^*}{m_0}\right) \left(\frac{\epsilon_0^2}{\epsilon^2}\right) = \left(\frac{m^*}{m_0}\right) \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r \epsilon_0}\right)^2 = \left(\frac{m^*}{m_0}\right) \left(\frac{1}{\epsilon_r^2}\right)$$

$$n = 1 \text{ için } E_H = -13.6 \text{ eV yazılırsa } E_{db} = -13.6 \left(\frac{m^*}{m_0}\right) \left(\frac{1}{\epsilon_r^2}\right) \text{ eV, } r_d = a_0 \epsilon_r \left(\frac{m_0}{m^*}\right) \text{ dir.}$$

Silikon içinde donör için iletkenlik etkin kütle oranını $\frac{m^*}{m_0} = 0.26$ alırsak,

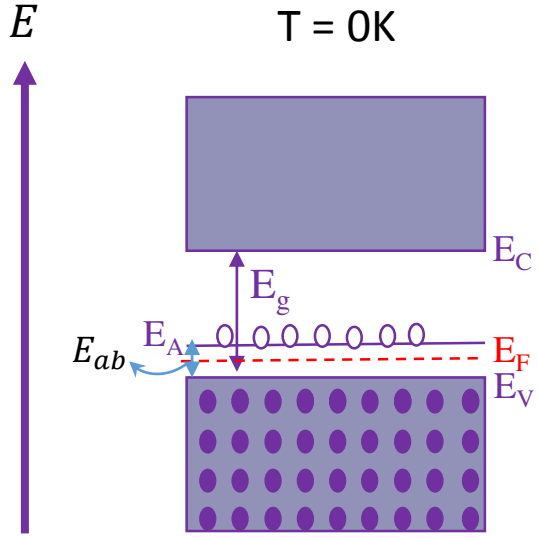
silikon için $\epsilon_r = 11.7$ dir. Bu durumda $r_d = 45a_0 = 23 \text{ Å}$ olur. Bu da silikonun örgü sabitinin ($a_{\text{Si}} = 5.43 \text{ Å}$, $a_{\text{Ge}} = 5.66 \text{ Å}$) dört katına karşılık gelir. Silikonun birim hücresinde etkin olarak sekiz atom vardır, dolayısıyla yörüngelenen donör elektronun yarıçapı çok sayıda silikon atomunu kapsar. Aynı değerler içinde $E_{db} = -25.8 \text{ meV}$ bulunur. 300 K de $k_B T = 26 \text{ meV}$. Bu değer silikonun bant gap enerjisinden çok daha küçüktür. Bu enerji donör elektronunun iletkenlik bandına yükselmesi için gerekli olan yaklaşık iyonlaşma enerjisidir. Donör elektronu donör atomuna sıkı bağlı değildir. Benzer şekilde akseptör iyonlaşma enerjisi de bulunur.



	İyonlaşma enerjisi (eV)	
	Si ($\epsilon_r = 11$)	Ge ($\epsilon_r = 16$)
Donörler		
Fosfor (P)	0.044	0.012
Arsenik (As)	0.049	0.0127
Antimon (Sb)	0.039	0.096
Akseptörler		
Bor (B)	0.045	0.0104
Alüminyum (Al)	0.06	0.0102
Galyum (Ga)	0.065	0.011
İndiyum (In)	0.16	0.011

	İyonlaşma enerjisi (eV)
	GaAs ($\epsilon_r = 12.9$)
Donörler	
Selenyum	0.0059
Telliryum	0.0058
Silikon	0.0058
Germanyum	0.0061
Akseptörler	
Berilyum	0.028
Çinko	0.0307
Kadmiyum	0.0347
Silikon	0.0345
Gemanyum	0.0404

p-tipi Yarıiletkenler



● → Elektron
○ → Boşluk

$$p = p_i + N_A$$

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

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

$$n = \frac{n_i^2}{N_A} \ll N_A \quad \sigma \approx N_A e \mu_p$$

KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER

iyonizasyon enerji (meV)

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

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

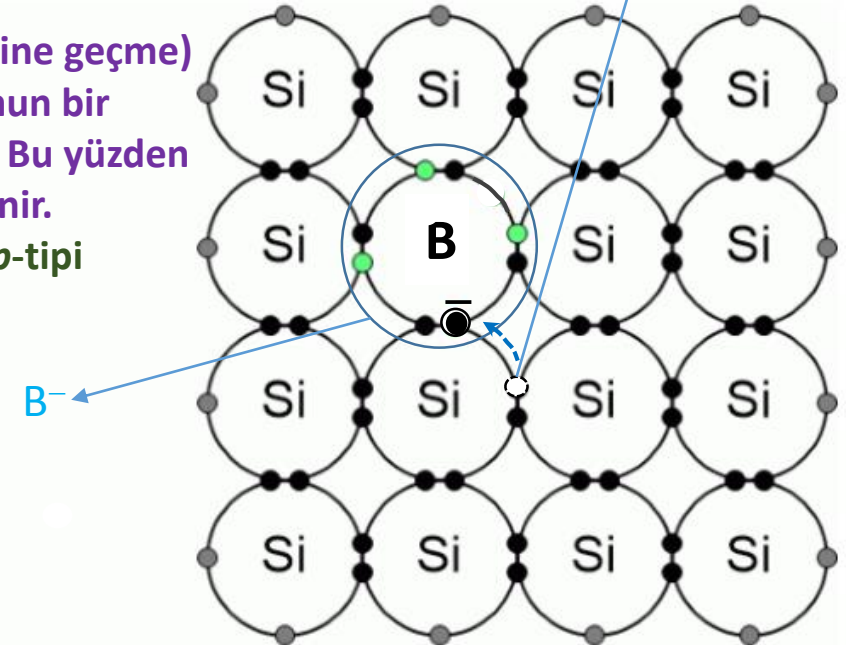
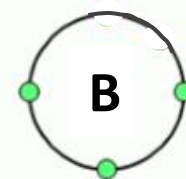
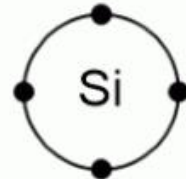
$$E_A = E_V + 13.6 \frac{m_e^*}{m_o} \left(\frac{\epsilon_o}{\epsilon} \right)^2 \text{ eV}$$

E_{ab}

B atomunun yerleştiği yerde, bağın birinde bir elektron yeri eksik kalır. Bu eksiklik küçük bir enerji ile valance band elektronu ile doldurulur, böylece valans banttan gelen elektronun yeri boş kalır. E_A enerji seviyesi E_V ye yakın olmalı.

Kristale kazandırılan hol

- 3. Grup elementleri B, Ga ve Al gibi üç değerlikli safsızlıklar Si kristaline katkılanırsa (yani bir silisyum atomunu öteleyip yerine geçme) kristale fazladan bir hol kazandırır (komşu silikonun bir elektronunu kendi bağını tamamlamak için alarak). Bu yüzden bu safsızlık atomlarına akseptör (ALICI) atomları denir.
- Bu safsızlıklarla katkılanarak üretilmiş yarıiletkene p-tipi yarıiletken 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

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

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

Kompense Yariiletkenler

- Aynı bölgede hem donör hemde akseptör safsızlık atomları içeren yariiletken malzemelere denir.
- n -tipi malzemeye akseptör atomları katkılayarak veya p -tipi malzemeye donör atomları katkılayarak elde edilirler.
- Elektronik cihazlarda eklem oluşturulması gerektiğinde kullanılır.
- Bir pn eklem oluşturmak için, n katkılı bir numune seçilir ve daha sonra p -tipi katkı maddesi ile katkılanır 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.

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

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

$N_A = N_D$ ise tamamen kompanse yariiletken olur ve intrinsic malzeme karakteri gösterir.

KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER

TAŞIYICILARIN DENGELENMESİ (COMPENSATION)

Yarıiletken malzemeyi n tipinden p tipine dönüştürmek için hollerin sayısını elektronların sayısından daha fazla yapacak şekilde katkılama yapılır, benzer şekilde p -tipini n -tipi yapmak için de serbest elektronların sayısını daha fazla yapacak şekilde katkılanır. Böylece bir malzemede katkılamayla tip değişimi yapılabileceği gibi, aynı malzemede istenen oranda taşıyıcı konsantrasyonuna sahip farklı tipte bölgeler oluşturulabilir. Bu durumda yarıiletken hem n -tipine ait donör atomları hem de p -tipine ait akseptör atomları içerir. Bu durum için yük nötralitesi: $n + N_A^- = p + N_D^+$, yani, kristal yapıya safsızlık atomları katkılандığında, toplam negatif yük (elektronlar ve iyonize akseptörler) toplam pozitif yüke (holler ve iyonize donörler) eşit olmalıdır.

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

Yeterince yüksek sıcaklıklarda tüm katkı atomları iyonlaşabilir, dolayısıyla iyonize safsızlık atomlarının sayısı katkılanan safsızlık atomlarının tamamına eşit olur

bu durumda

$$n + N_A = p + N_D$$

$$N_D > N_A \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n}, \text{ dolayısıyla } n = \frac{n_i^2}{n} + N_D - N_A \text{ olur.}$$

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

$$n = \frac{(N_D - N_A)}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

$N_D = N_A$ ise $n = n_i$ olur, yani katkılı malzeme, saf (intrinsic) malzeme davranışı gösterir. Benzer bir formül p içinde bulunabilir.

Termal dengede yarıiletken elektriksel olarak nötrdür. Elektronlar değişik enerji durumları arasında dağılırlar, negatif ve pozitif yükler oluştururlar, fakat net yük yoğunluğu sıfırdır. Bu yük nötrlük şartı, termal dengede, safsızlık katkılama konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak elektron ve hol konsantrasyonunu belirlemek için kullanılır.

KATKILI (EXTRINSIC) YARIİLETKENLER

TAŞIYICILARIN KOMPANSESİ

$N_A = N_D$ ise tam dengelenme (kompanse),

Malzeme, saf (intrinsic) karakter gösterir.

$N_A \neq N_D$ ise ya p -tipi ya da n -tipi olur.

$N_D > N_A \Rightarrow n$ - tipi , $N_D^e = N_D - N_A$, $N_D^e \Rightarrow$ etkin donör kons.

$N_A > N_D \Rightarrow p$ - tipi , $N_A^e = N_A - N_D$, $N_A^e \Rightarrow$ etkin akseptör kons.

$$N_D > N_A$$



$$N_A > N_D$$

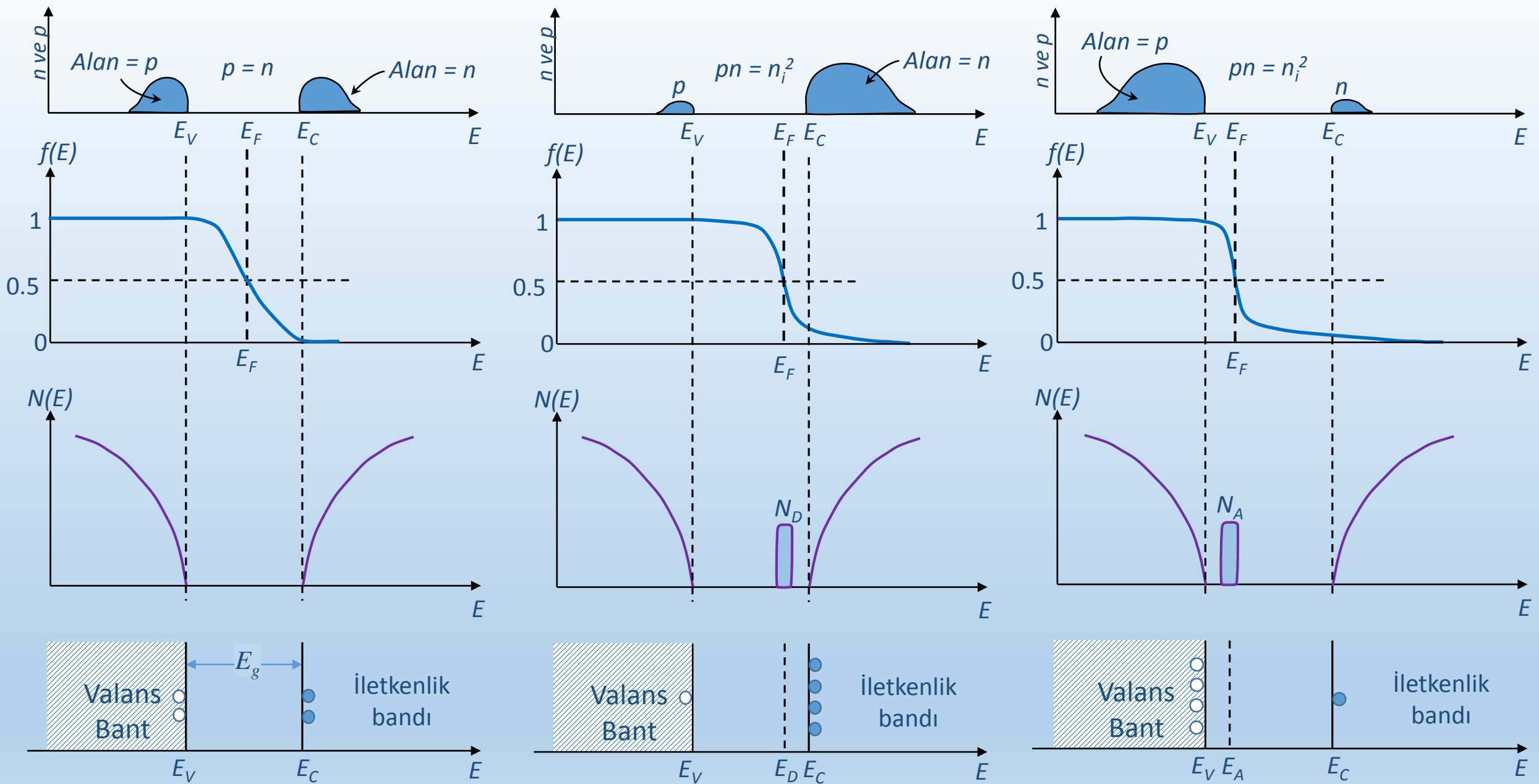


Safsızlık katkılıandığında, kütle aksiyon yasası $pn = n_i^2$ yine geçerlidir (dejenereliğe kadar). pn çarpımı katkılanan safsızlıklardan daima bağımsızdır. Yapiya donör safsızlıkları eklendiğinde n artarken, aynı oranda p azalacaktır.

Farklı konsantrasyonlu iki malzeme birbiriyle kontağa getirildiğinde yüksek konsantrasyonlu malzemedeki elektronlar, termal dengeye ulaşana kadar, düşük konsantrasyonlu malzemeye doğru hareket ederler. Enerjinin bir fonksiyonu olarak elektron dağılımı iki malzemede aynı olunca termal denge oluşur. Bu denge durumu her iki malzemede Fermi enerjisi aynı olduğunda oluşur.

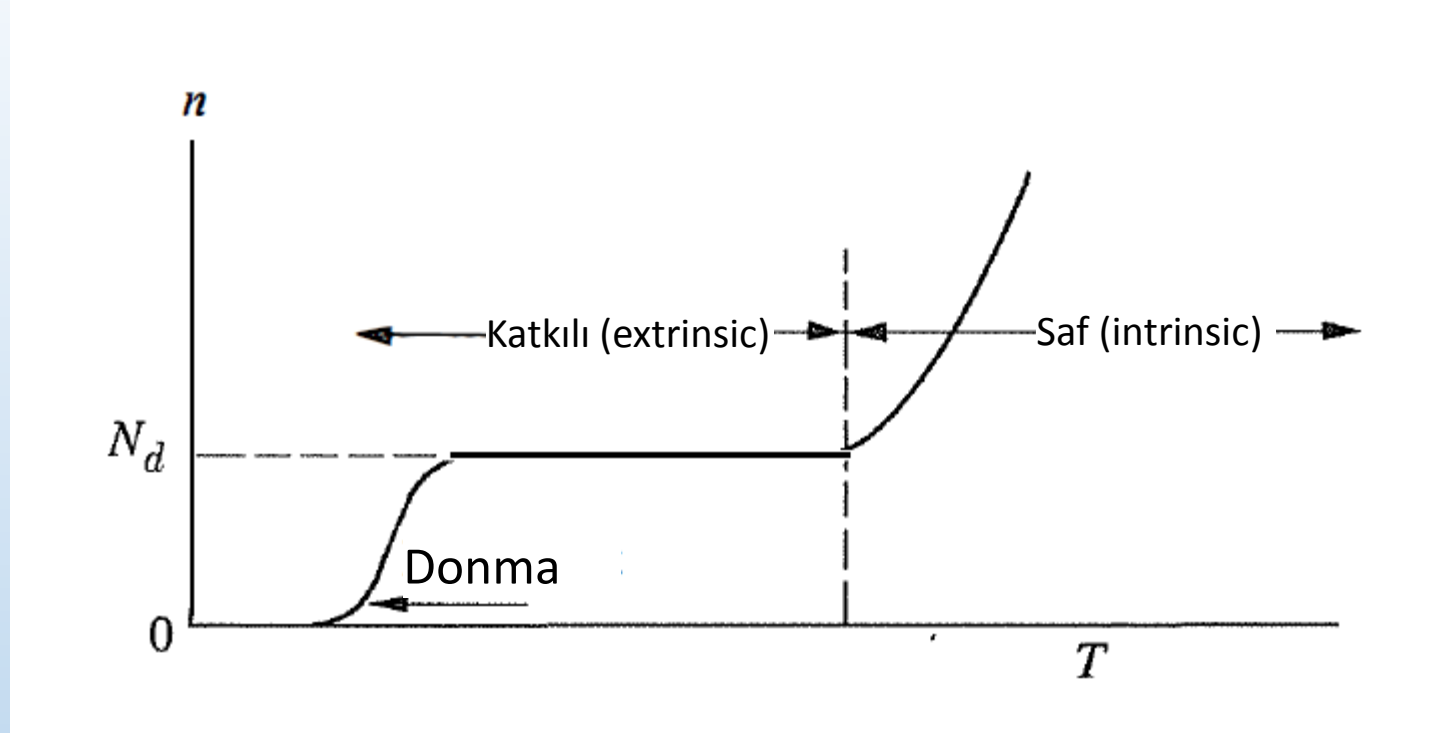
Saf silikon kristalinde 5×10^{22} atom/cm⁻³ vardır. 10^{15} ile 10^{18} atom/cm⁻³ aralığındaki tipik katkılama oranları yarıiletkenin gerçek atom sayısına (5×10^{22} atom/cm⁻³) göre küçüktür. Fosfor arsenik gibi donör safsızlık atomlarının varlığı bant gap (E_g) içine bir izinli E_D seviyesi ekler.

Dolayısıyla yarıiletkene bu oranlarda safsızlık katkılması yarıiletkenin bant gap (E_g) gibi kendine özgü belirli parametrelerini etkilemez. Eğer katkılama sayısı 10^{20} atom/cm⁻³ gibi çok büyük değerlere çıkarsa izinli E_D seviyesi yayılarak genişler, dolayısıyla iletkenlik bandı ile üst üste binen bir izinli banda dejenereleşir (katmerleşir). Netice olarak E_g yasak enerji aralığı küçülerek değişir ve yarıiletkenin özellikleri önemli ölçüde değişir. Bu yarıiletkene dejenere yarıiletken denir. Bir dejenere yarıiletken bir metalinkine benzer elektrik özellikleri gösterir.



Termal dengede şematik iletkenlik ve valans bandı, durum yoğunluğu, Fermi-Dirac dağılımı, taşıyıcı konsantrasyonu; (a) Saf (intrinsic) ($n=p=n_i$) için, (b) n -tipi için, (c) p -tipi yarıiletken için.

Bir n -tipi yarıiletkende sıcaklıkla elektron konsantrasyonu n 'nin değişimi



- Yüksek sıcaklıklarda $n \approx p \approx n_i > N_D$ olduğundan saf (intrinsic) taşıyıcılar baskındır.
- Orta sıcaklıklarda $n \approx N_D$ dir. Katkı taşıyıcıları baskındır. Bu bölgede (extrinsic) elektron yoğunluğu geniş bir sıcaklık aralığında hemen hemen sabit kalır. Örneğin $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 'e sahip silikon için elektron yoğunluğu 100 K ile 500 K aralığında hemen hemen sabit kalmaktadır.
- Çok düşük sıcaklıklarda safsızlıkların çoğu donar, dolayısıyla elektron yoğunluğuna katkıları oldukça azalır. Ayrıca sıcaklık azaldıkça saf taşıyıcı konsantrasyonu da azalmaktadır. Böylece çok düşük sıcaklıklarda iletkenlik de sıfıra gitmektedir.