

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

Dersi Veren Öğretim Üyesi
Doç.Dr. Süreyya AYDIN YÜKSEL
Grup.....3.....

İletişim e-mail: fiz1951.2021.say@gmail.com

Hafta	Konular	DERS İÇERİĞİ
1	Ders içeriği tanıtımı, Yarıiletken Fiziği-1 (Elektriksel, optik, manyetik) Yarıiletkenlerin Uygulamaları	
2	Elektriksel Özellikler Maddelerin elektriksel özelliklerine göre sınıflandırılması. (Özdirenç ve sıcaklıkla değişimi, Bant yapıları)	
3	Yarıiletken tipleri (Saf, n-tipi, p-tipi)	
4	Denge durumunda yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonu Enerji ve durum yoğunluğu	
5	Dağılım fonksiyonu Akım Yoğunluğu, Taşıyıcı Sürüklenmesi ve Difüzyon akımı, Jenerasyon ve Rekombinasyon	
6	Optik Özellikler Elektromanyetik dalga-yarıiletken etkileşimi Fotoiletkenlik, Foto ışıma ve elektrolüminesans	
7	Manyetik Özellikler Elektronun spin ve yörünge hareketi Mıknatıslanma çeşitleri (ferromanyetizma, paramanyetizma, diamanyetizma)	
8	Ara Sınav 1	
9	Yarıiletkenlerin Uygulamaları p-n eklemler, diyotlar (Schottky)	
10	Transistörler (eklem transistörler ve alan etkili transistörler)	
11	LED, OLED	
12	LASER	
13	Ara Sınav 2	
14	Güneş pilleri	
15	Final	

- 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](#)

ELEKTRİKSEL DİRENÇ/İLETKENLİK TANIMI

Elektrik iletimi

- Bir malzeme içinde kaç tane hareketli elektron (taşıyıcı yoğunluğu)?
- Ne kadar kolay hareket ediyorlar (hareketlilik)?

$$V = IR$$

$$J = \frac{I}{A}$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

$$J = \sigma E$$

V – Uygulanan voltaj (Volt, (V))

I – akım (Ampere, (A))

R – elektriksel Direnç (Ohm, (Ω))

J – Akım yoğunluğu (Ampere/m², (A/m²))

A – Kesit alanı (metre kare, (m²))

ℓ – Uzunluk (metre, (m))

ρ – Öz direnç (Ohm metre, ($\Omega \cdot m$))

E – Elektrik alan (V/m)

σ – İletkenlik (1/ Ohm metre, ($\Omega \cdot m$)⁻¹)

μ – mobilité (m²/V.s)

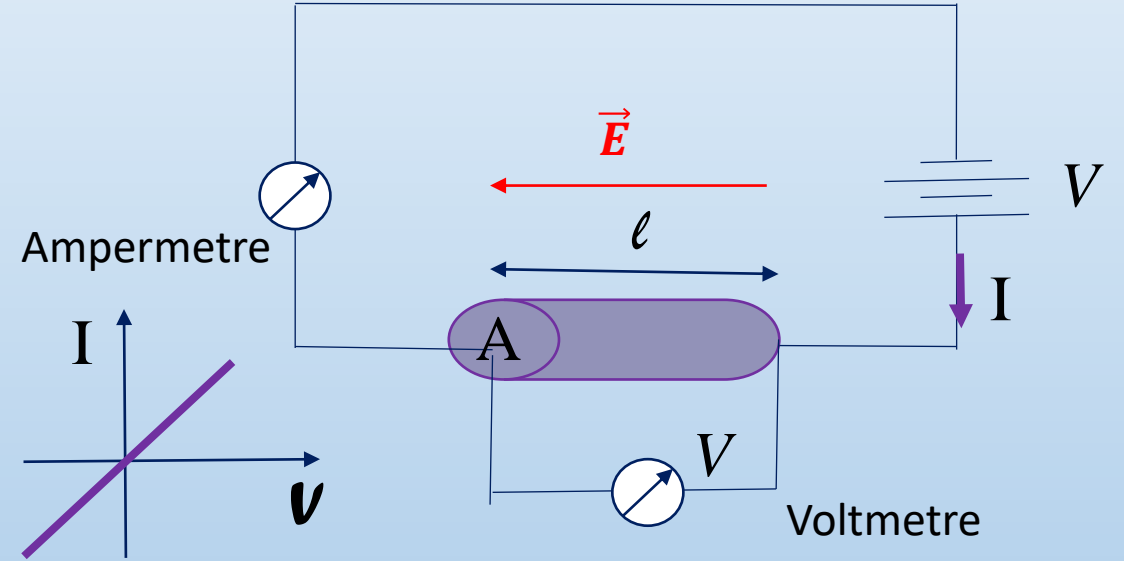
n – Serbest yük Taşıyıcısı sayısı

e – elektronun yükü (1.6x10⁻¹⁹ Coulomb)

$$\rho = \frac{1}{ne\mu}$$

$$\sigma = ne\mu$$

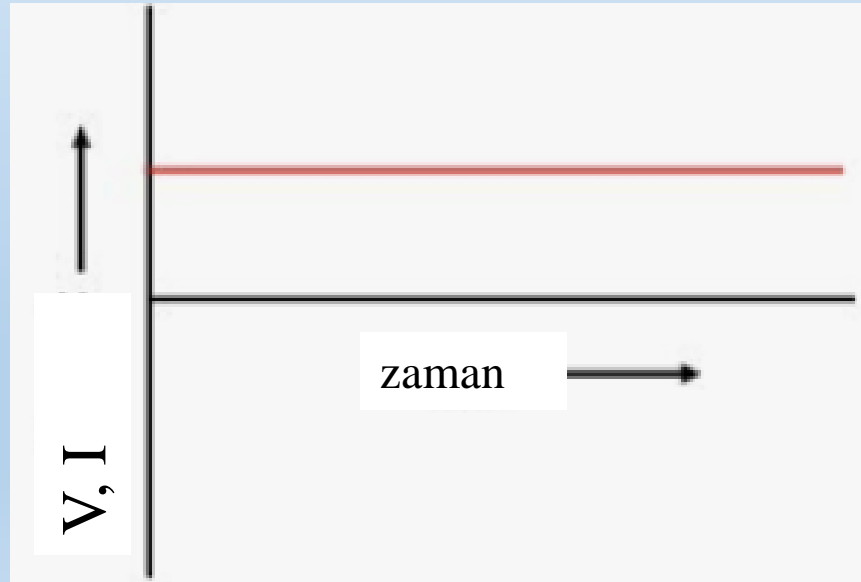
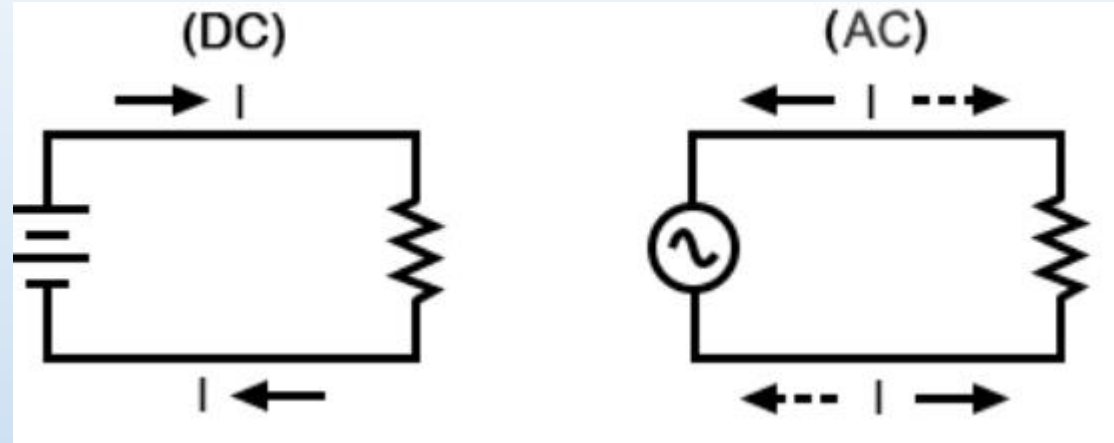
- Bir malzemenin elektriksel iletkenliği, içinden yük taşıyıcı akışı kolaylığı/zorluğu ile alakalıdır.
- Elektronlardan, iyonlardan, yüklü delikler ve bunların kombinasyonları yük taşıyıcısı olabilir.
- Ohm yasası bu yük akışının teorik olarak betimlenmesini sağlar.



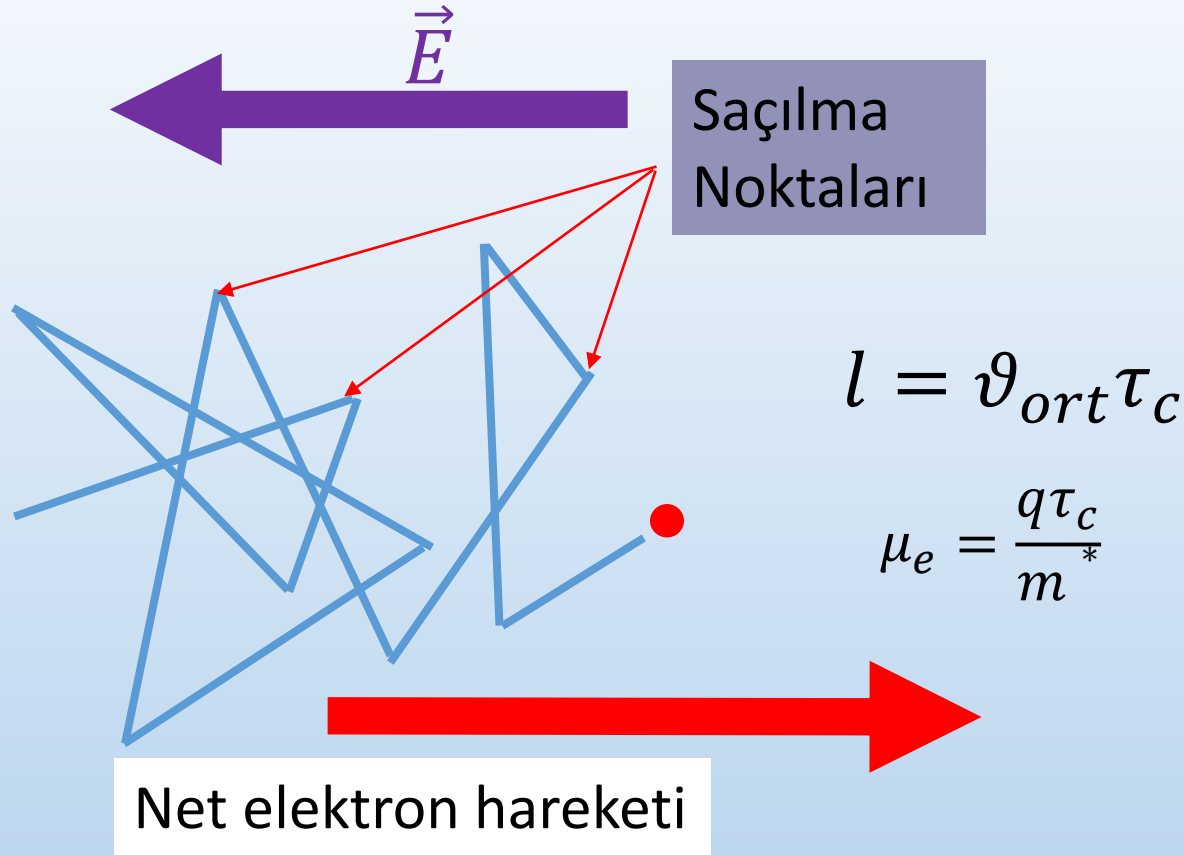
Malzemenin elektrik direnci, maddeye özgü bir özellik DEĞİLDİR yani nesne geometrisine bağlıdır. Öz direnç, maddeye özgü bir özelliktir geometriden bağımsızdır, tersi iletkenlik olarak adlandırılır.

ELEKTRİKSEL DİRENÇ/İLETKENLİK TANIMI

Alternatif ve doğru güç kaynağı/Akım/gerilim Nedir?



ELEKTRİKSEL DİRENÇ/İLETKENLİK TANIMI



$$\vec{v}_d = \mu_e \vec{E}$$

Elektronun Mobilitesi

Elektronun Sürüklenme (Drift) hızı

- Elektrona etki eden kuvvet

$$\vec{F} = -e\vec{E}$$

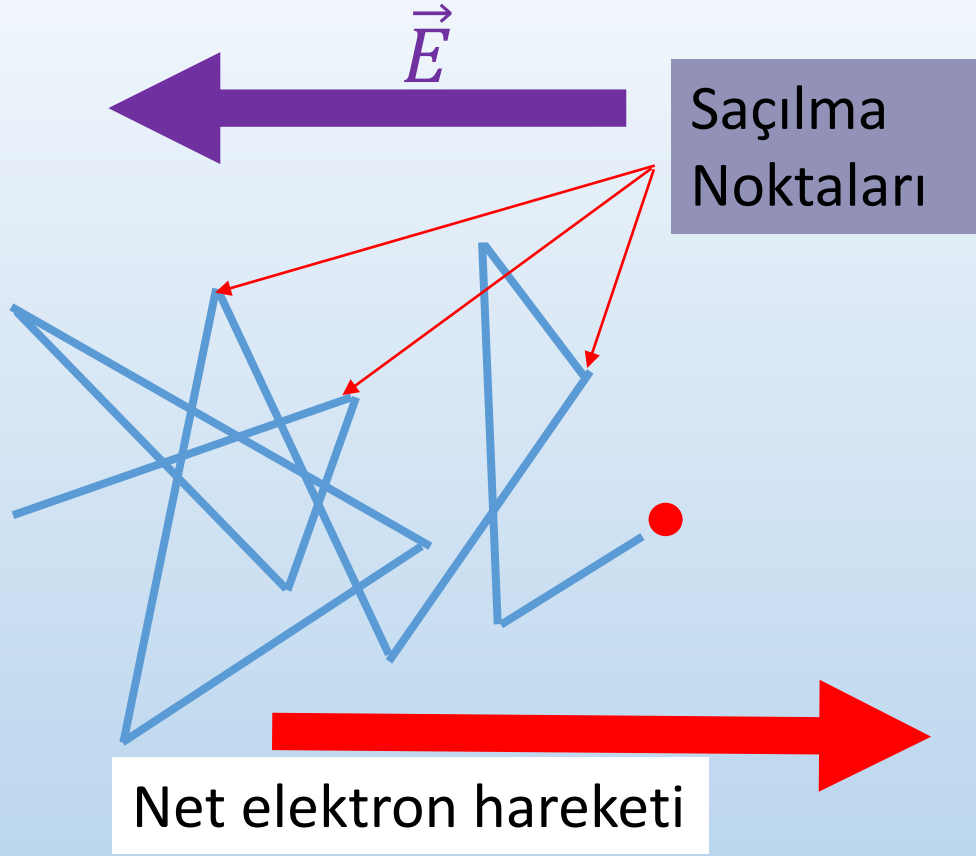
Burada e , elektron yükü

Bu kuvvet, sabit bir ivme üretir, böylece engellerin yokluğunda elektron bir elektrik alanında sürekli olarak hızlanır.

Gerçek bir katıda, elektronlar kusurlarla çarpışmalar ve atomik termal titreşimler nedeniyle saçılır. Saçılmalar elektron hareketinin net sürüklenme hızını belirler.

$$\rho = \rho_{\text{ısı}} + \rho_{\text{katkı}} + \rho_{\text{defekt}}$$

ELEKTRİKSEL DİRENÇ/İLETKENLİK TANIMI



Malzeme (@300 K)	Mobilite $\mu (m^2/V.s)$	Yük taşıyıcı yoğunluğu $n(m^{-3})$	İletkenlik $\sigma(\Omega.m)^{-1}$
Aluminyum (Al) -Metal	0.0053	2.60×10^{28}	3.80×10^7
Gümüş (Ag)- Metal	0.0057	5.90×10^{28}	6.25×10^7
Altın (Au)- Metal			4.30×10^7
Silisyum (Si)- Yarıiletken	0.15	1.50×10^{10}	4.00×10^{-4}
GaAs- Yarıiletken	0.85	1.80×10^6	2.50×10^{-7}
Kuartz			$.. \times 10^{-13}$
Sülfür			$.. \times 10^{-14}$

$$\begin{aligned}n_{metal} &\gg n_{Yarıiletken} \\ \mu_{metal} &< \mu_{Yarıiletken} \\ \sigma_{metal} &> \sigma_{Yarıiletken}\end{aligned}$$

$$\sigma = ne\mu$$

$$\vec{v}_d = \mu_e \vec{E}$$

Elektronun Sürüklenme (Drift) hızı

Elektronun Mobilitesi

ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER MADDELERİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI

Elektriksel Özelliklerine Göre Madde Sınıflandırılması

İLETKENLER (METALLER)

Özdirenç: 10^{-6} - 10^{-4} Ohm.cm

Değerlik elektronları bir "elektron gazı" oluşturur ve belirli bir iyonla bağlı değildir.

YARIİLETKENLER

Özdirenç: 10^{-4} - 10^{10} Ohm.cm

Çoğunlukla kovalent bağlanma ve zayıf bağlar

YALITKANLAR

Özdirenç: $\geq 10^{10}$ Ohm.cm

Değerlik elektronları sıkıca bağlanır (veya bireysel atomlarla paylaşılır - en güçlü iyonik (kısmen kovalent) bağlanma.

- Hem iletken hem yalıtkan yapmak mümkün!!!
- Katkılama, sıcaklık,... ile yük taşıyıcı sayısı ve çeşidi değişebilir!!!
- Katkılama ile yapı içerisinde yapısal E oluşturulabilir!!!

BOHR ATOM MODELİ

• Neden Hidrojen sadece belirli dalga boylarında ışıma yapıyor ve bu enerjileri alınca soğuruyor????????

• Danimarkalı Fizikçi Niels BOHR (1885-1963)

• 1913-Bohr Teorisi=Planck'ın orijinal kuantum teorisi+ Einstein Işığın foton kuramı+ Rutherford atom modeli birleşimidir.

• Hidrojen atomuna uygulanması:

• TEMEL FİKİRLER:

• 1- Proton ve nötronlardan ibaret çekirdek merkezde bulunur. Elektron proton etrafında Coulomb çekim kuvvetinin etkisi altında dairesel yörüngede hareket eder.

• 2- Elektronlar çekirdeğin çevresinde belirli enerjili yörüngelerde hareket ederler.

Yalnızca belirli yörüngeler karardır. Bu yörüngeler elektronun ışıma yapmadığı yörüngelerdir. Enerji sabit olduğu için klasik yaklaşım ile hesaplanabilir.

• 3-Elektron iki karaklı durum arasında geçiş yaptığında ışıma yayınlanır veya soğurur.

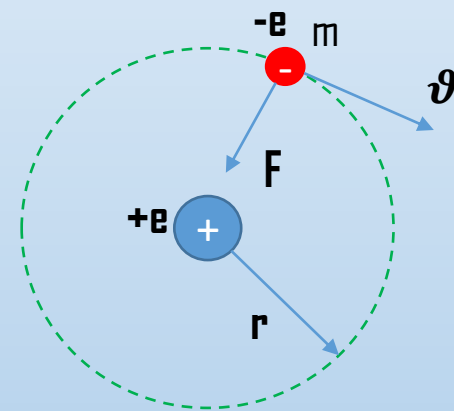
Klasik yaklaşımla hesaplanamaz!!!!!!!!!!!!!!

*** Geçişte yayınlanan veya soğurulan fotonun frekansı elektronun yörüngesel hareketinin frekansından bağımsızdır.

Yayılan/soğurulan ışımanın frekansı atomun enerjisindeki değişime bağılıdır.

$$E_i - E_s = hf \quad \text{Planck - Einstein Formülü}$$

E_i : ilk durum enerjisi, E_s : son durum enerjisi $E_i > E_s$ ışıma yayınlanır



BOHR ATOM MODELİ

- 3-Elektron iki karaklı durum arasında geçiş yaptığında ışınım yayınlanır veya soğurulur.

Klasik yaklaşımla hesaplanamaz!!!!!!!!!!!!!!

*** Geçişte yayınlanan veya soğurulan fotonun frekansı elektronun yörüngesel hareketinin frekansından bağımsızdır.

Yayılan/soğurulan ışınımın frekansı atomun enerjisindeki değişime bağlıdır.

$$E_i - E_s = hf \quad \text{Planck - Einstein Formülü}$$

E_i : ilk durum enerjisi, E_s : son durum enerjisi $E_i > E_s$ ışınım yayınlanır.

Klasik yaklaşım:

$$F = m \frac{v^2}{r}$$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e \cdot e}{r^2}$$

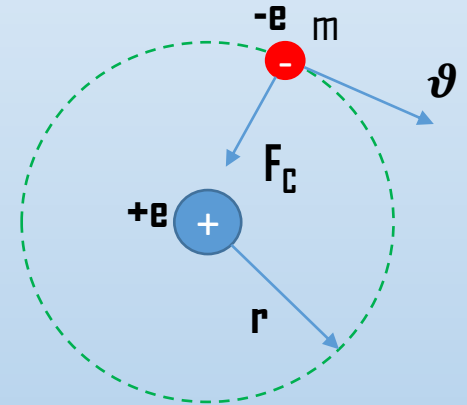
$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$E_p = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$E = - \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

- Enerji seviyeleri r yarıçapına bağlıdır ama hangi yarıçap temel enerji seviyesi olduğunu belirleyemez!!!!



BOHR ATOM MODELİ

- 4- Elektron yörüngesinin izin verilen büyüklüğü, elektronun yörüngesel açısal momentumuna dayanan ek bir kuantum koşulu ile belirlenir. İzinli yörüngelerde, elektronun çekirdek etrafındaki yörüngesel açısal momentumu

Kuantum yaklaşım:

$$L = m\vartheta r$$

$$m\vartheta r = n \frac{h}{2\pi} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$m\vartheta r = n\hbar$$

Açısal momentum kuantalaşması hipotezi

$$\vartheta = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m r}}$$

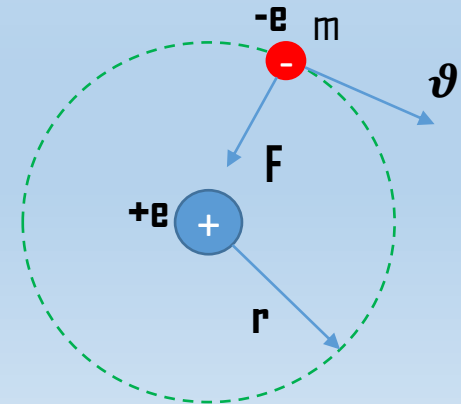
$$L = \sqrt{\frac{m e^2 r}{4\pi\epsilon_0}}$$

$$\left(n \frac{h}{2\pi}\right)^2 = \frac{m e^2 r}{4\pi\epsilon_0}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \Rightarrow r_n = n^2 \frac{\hbar^2}{m k e^2}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$



BOHR ATOM MODELİ

- $n=1$ olan yörünge temel en küçük yarıçaplı yörüngedir. Bohr yarıçapı a_o

$$a_o = \frac{\hbar^2}{mke^2} \Rightarrow a_o = 0.529\text{\AA} \Rightarrow a_o = 0.0529 \text{ nm}$$

Toplam enerji

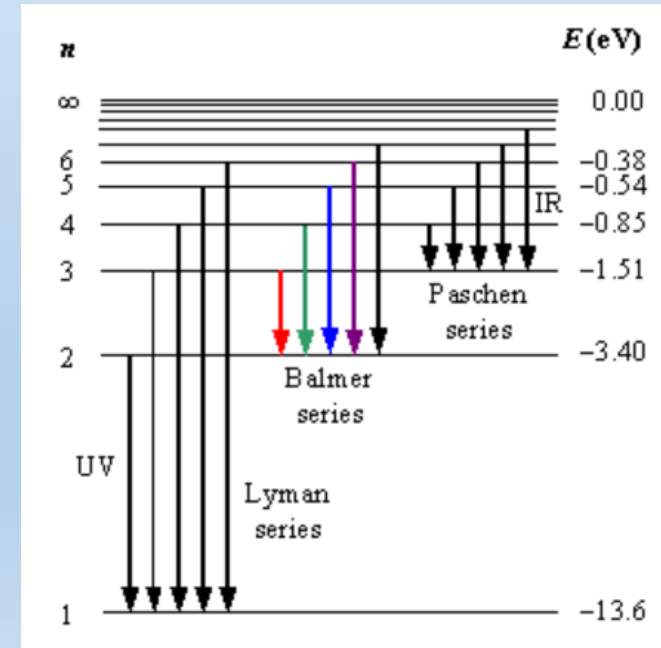
$$E_n = -\frac{ke^2}{2a_o} \left(\frac{1}{n^2} \right) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- Burada kararlı ışıma yapmayan duruma **TABAN DURUMU** denir.
- $n=1$ $E_1 = -13.6 \text{ eV}$
- İlk uyarılmış durum $n=2$ $E_2 = -3.4 \text{ eV}$
- Atomu iyonlaştırmak taban durumundaki elektronu protonun etkisinden

Tamamen kurtarmak için gerekli minimum enerji

Ayrıca

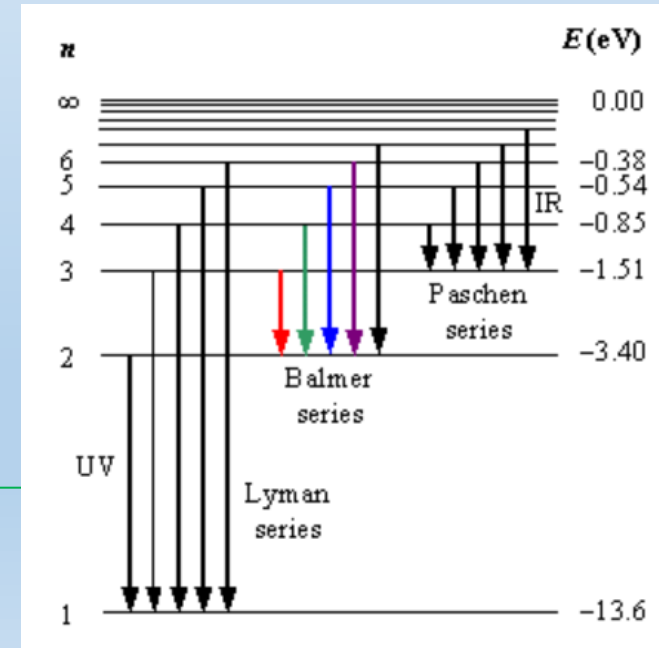


BOHR ATOM MODELİ

- Ayrıca;
- $hf = \frac{hc}{\lambda} = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{j^2} \right)$ ifade edilebilir
- $R_H = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}$
- $\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{j^2} - \frac{1}{k^2} \right)$
- Bir elektronu dışında diğer elektronlarını kaybetmiş Li^{++} , He^+ ve Be^{+++}
- +Ze yüklü sabit çekirdek etrafında dönene elektron

$$r_n = n^2 \frac{a_0}{Z}$$

$$E_n = -\frac{ke^2}{2a_0} \left(\frac{Z^2}{n^2} \right)$$



BOHR ATOM MODELİ

- SORU; Hidrojen atomunda elektron $n=2$ durumundan taban durumuna ($n=1$) geçiş yapıyor. Yayılan fotonun dalga boyu ve frekansını bulunuz.

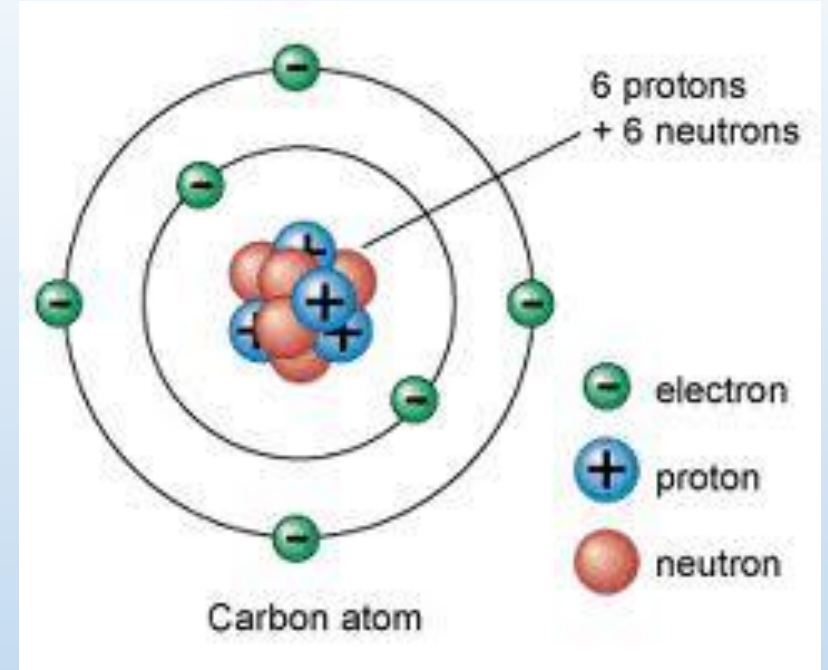
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_s^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right)$$
$$\lambda = \frac{4}{3R_H} \Rightarrow \frac{4}{3 \times (1,097 \times 10^7)}$$
$$\lambda = 1.215 \times 10^{-7} \text{ m} = 121.5 \text{ nm}$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$
$$f = \frac{3 \times 10^8}{1.215 \times 10^{-7}} \Rightarrow f = 2.47 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

Katılarda basitleştirilmiş bağlanma modelleri

- İyonik**
- Kovalent**
- Metallik**
- Van der Waals**
- Hidrojen**

KATILARDA BAĞLAR



Bir atomun yapısı şu bileşenlerden oluşur

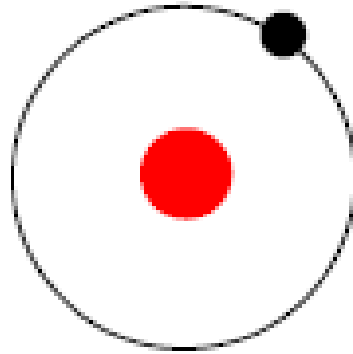
- Protonlar "+" yüklü $kütlesi=1.67 \cdot 10^{-27} \text{kg}$
- Nötronlar yüksüz $kütlesi=1.67 \cdot 10^{-27} \text{kg}$
- Elektronlar "-" yüklü $kütlesi=9.11 \cdot 10^{-31} \text{kg}$

Atom numarası(Z):Protonların sayısı

Atom ağırlığı(A):Proton ve nötronların kütlelerinin toplamı.

KATILARDA BAĞLAR

Hidrojen (H) Atomu



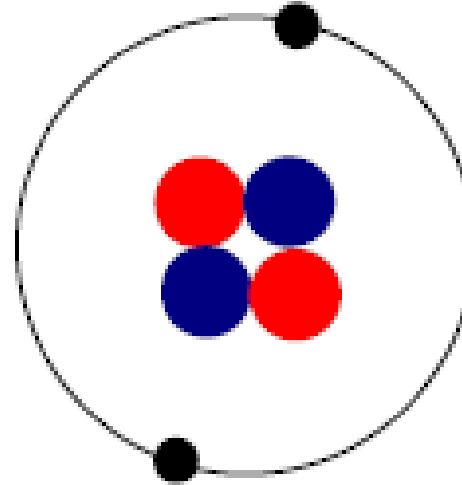
1 proton: $Z=1$

Atom ağırlığı

$$A = 6.02 \cdot 10^{23} \cdot 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$A = 1 \text{ gr/mol}$$

Helyum (He) atomu



2 proton: $Z=2$

Atom ağırlığı

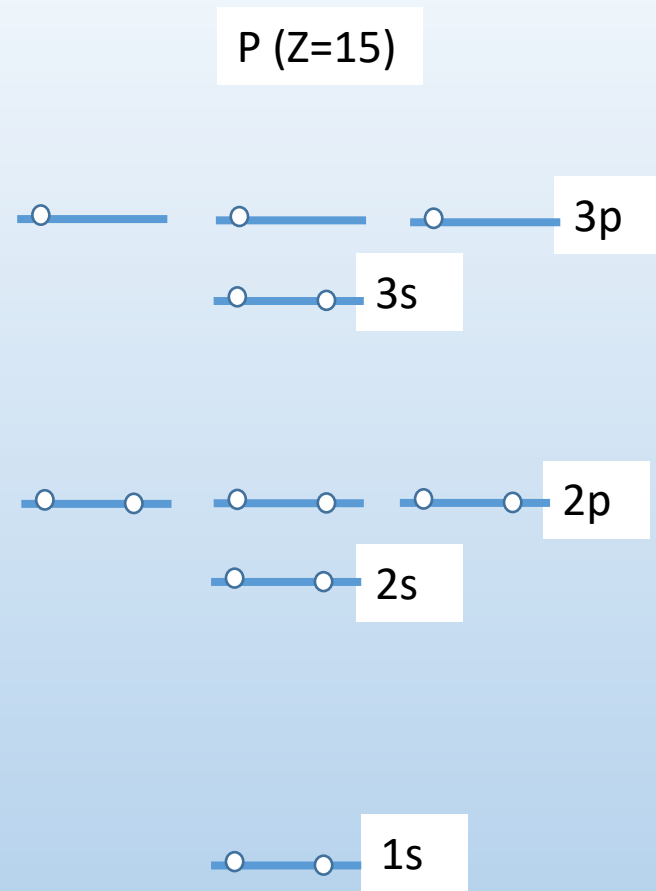
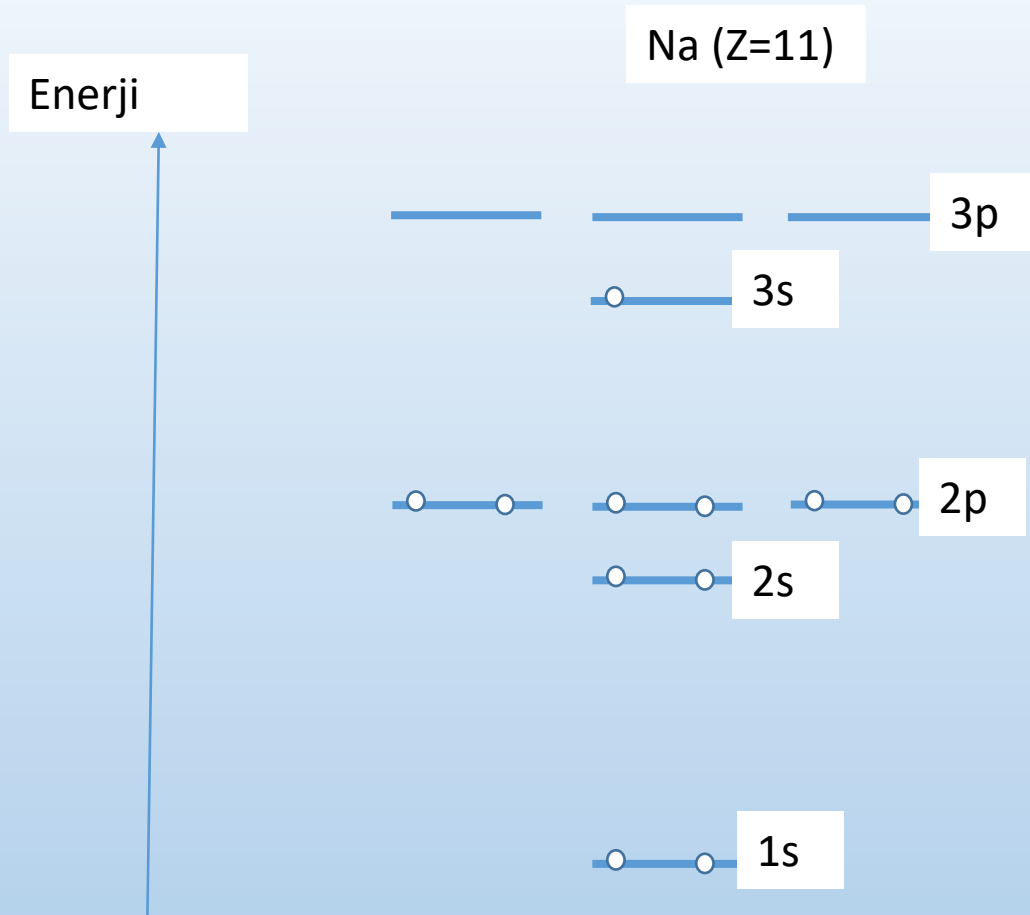
$$A = 4 \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}$$

$$A = 4 \text{ gr/mol}$$

KATILARDA BAĞLAR

Kuantum Numarası	Ana Orbital İsmi	Alt Orbitaller	Alt Orbital Sayısı	<u>Elektron Sayısı</u>	
				Alt Orbital	Ana Orbital
1	K	s	1	2	2
2	L	s p	1 3	2 6	8
3	M	s p d	1 3 5	2 6 10	18
4	N	s p d f	1 3 5 7	2 6 10 14	32

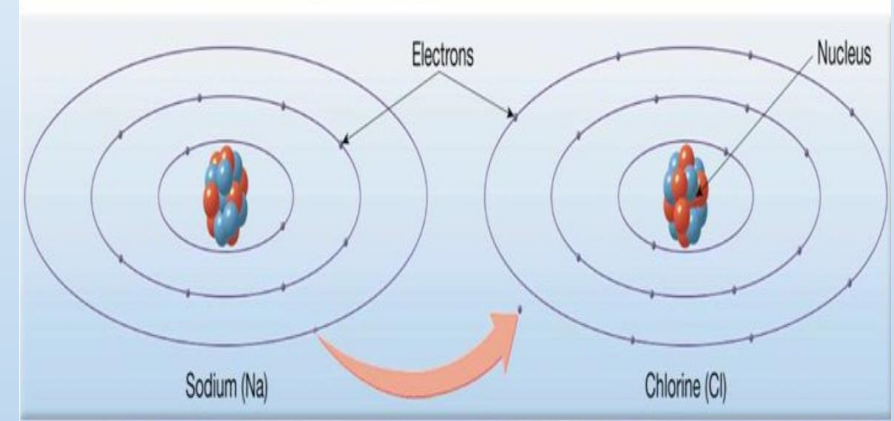
KATILARDA BAĞLAR



İYONİK BAĞ

- İyonik bağ, iki atomun bir veya daha fazla dış elektronun bir atomdan diğerine aktarılacağı şekilde birleşmesiyle oluşur.
- İyonik bağlar temel olarak zıt yüklü iyonlar arasındaki Coulomb etkileşmesinden kaynaklanır.
- Bir elektron $E = 0$ 'dan bir negatif enerji durumuna geçiş yaptığında, enerji açığa çıkar.
- Bu enerjinin miktarı, atomun elektron afinitesi olarak adlandırılır.
- Ayrışma enerjisi, moleküler bağları kırmak ve nötr atom üretmek için gerekli olan enerji miktarıdır.
- Molekülün enerjisi, iki nötr atom sisteminin enerjisinden daha düşüktür.

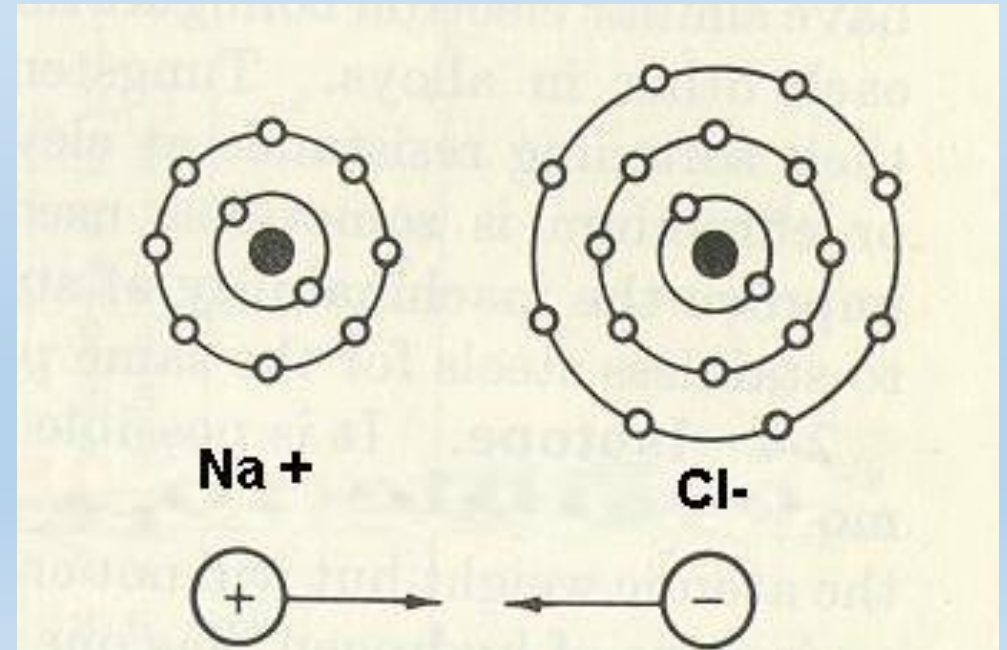
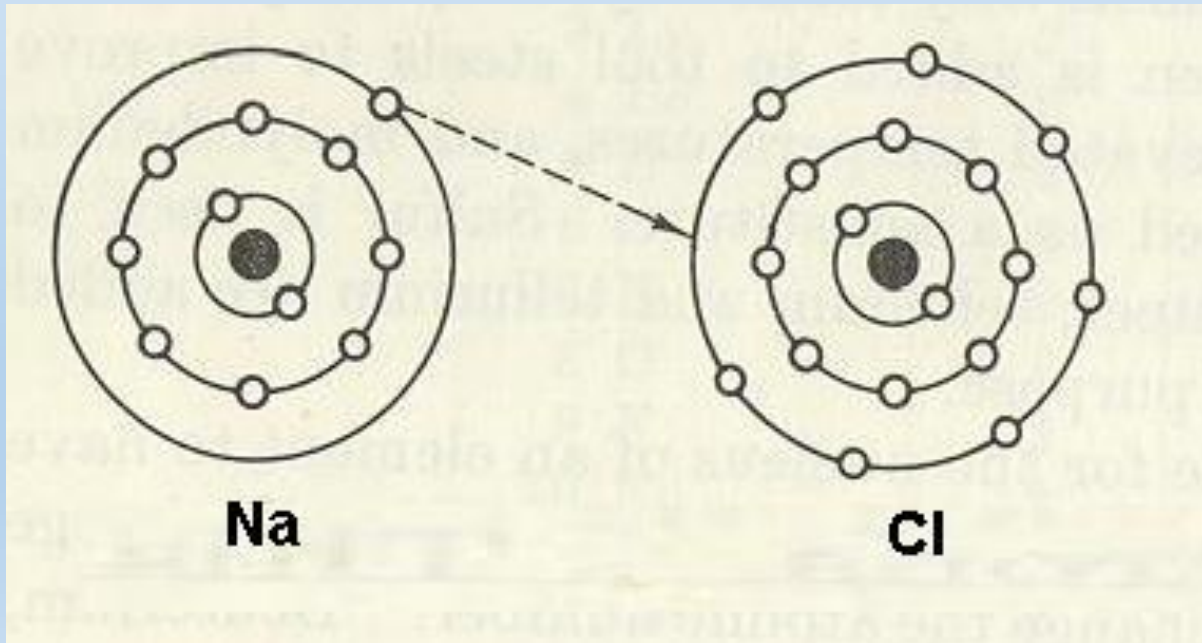
KATILARDA BAĞLAR



İYONİK BAĞ

KATILARDA BAĞLAR

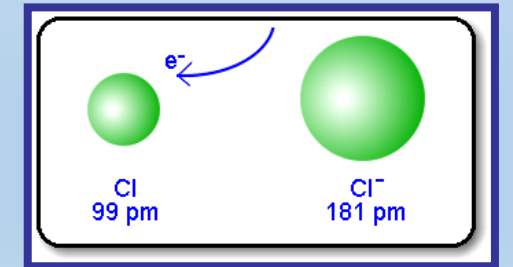
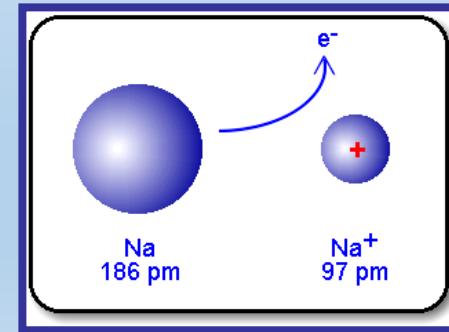
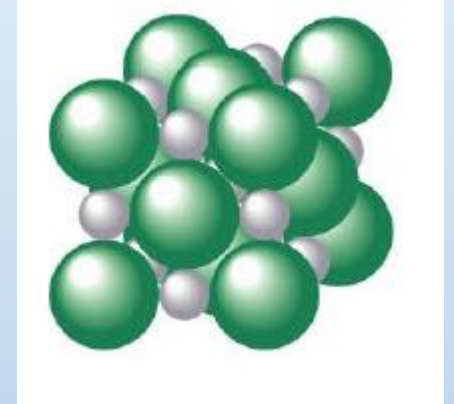
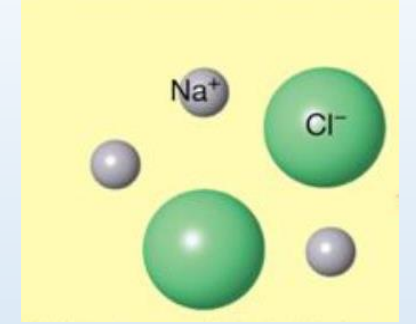
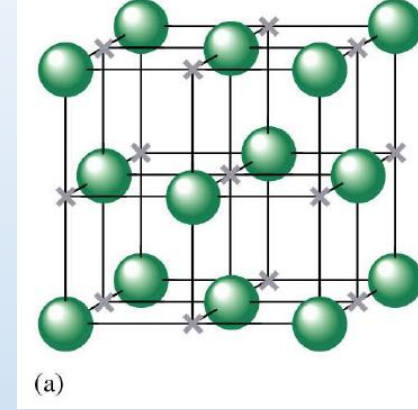
- Sodyum, Na: $Z=11$: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
 - ◆ Pozitif bir iyon üretmek için bir elektronu kaybeder
- Klor, Cl: $Z=17$: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
 - ◆ Negatif bir iyon üretmek için bir elektron kazanır.



İYONİK BAĞ

- Elektronun elektropozitif iyondan elektronegatif iyonla aktarılması
- Coulomb etkileşimleri önemli bir rol oynar
- İyonlar arasındaki elektro-negatiflik farkı iyonik bağlanma gücüne karar verir.
- İyonik kristallerde bağlanma enerjisine esas katkı elektrostatik olur ve Modelung enerjisi adını alır.
- Pozitif iyonlar, bir veya daha fazla dış kabuk elektronunun kaybı nedeniyle nötr atomdan daima daha küçüktür.
- Negatif iyonlar, elektron kazandıkları için nötr atomdan daima daha büyüktürler.

KATILARDA BAĞLAR



İYONİK BAĞ

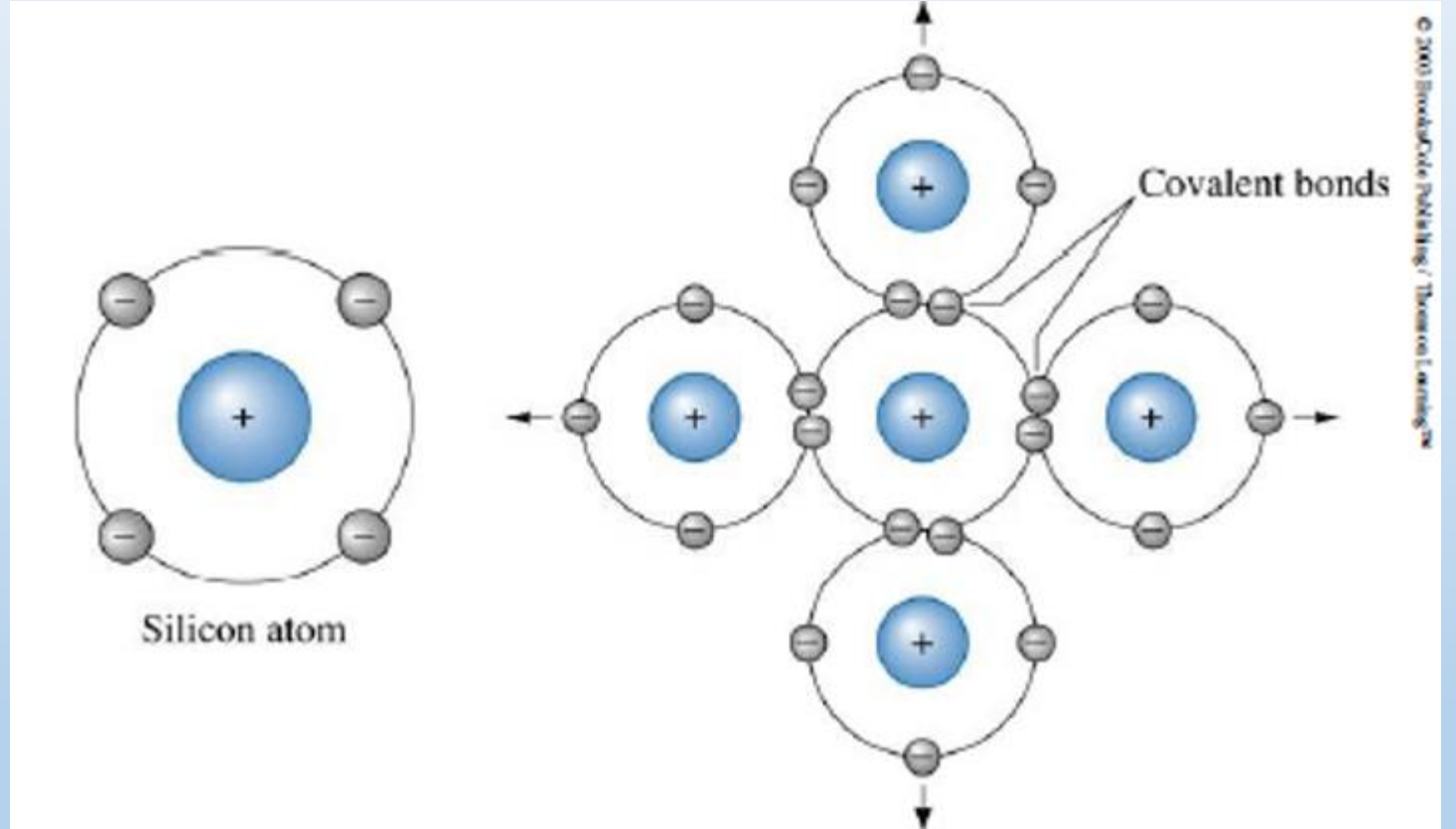
KATILARDA BAĞLAR

- Nispeten kararlı, sert kristaller oluştururlar.
- Zayıf elektrik ve ısı iletkenleridir
- Serbest elektron içermezler.
- Her elektron iyonlardan birine sıkıca bağlanır
- Yüksek erime noktalarına sahipler
- Işık geçirgen, ancak kızılötesi bölgede güçlü soğurucudurlar.
- Elektronların oluşturduğu kabuklar, görünebilir ışığın, bir sonraki izin verilen kabuğa elektronları ilerletmek için yeterli enerjiye sahip olmadığı çok sıkı bir şekilde bağlıdır.
- Kızılötesi güçlü bir şekilde emilir, çünkü iyonların titreşimleri düşük enerjili kızılötesi bölgede doğal rezonans frekanslarına sahiptir.

KATILARDA BAĞLAR

KOVALENT BAĞ- (A METAL-A METAL ARASINDA)

- İki elementin elektron afinitesi (Elektron alma eğilimi) birbirine yakınsa, iyonik bağ yerine kovalent bağ kurarlar.
- İki veya daha fazla atom arasında elektronların paylaşıldığı bağ türüdür



KATILARDA BAĞLAR

KOVALENT BAĞ- (A METAL-A METAL ARASINDA)

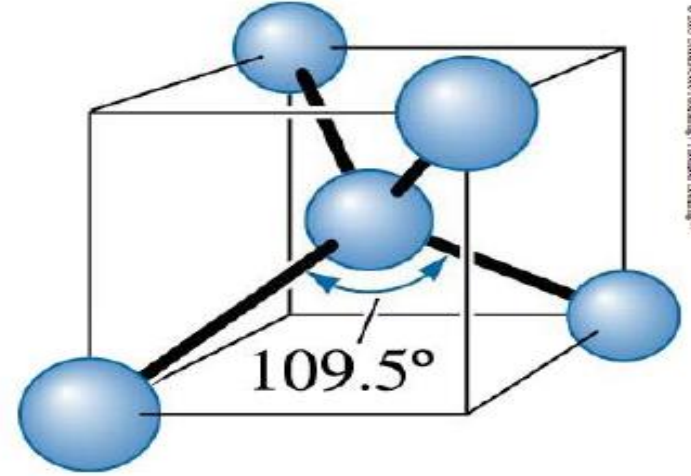
- Güçlü bağlardır
- Yöne bağımlı bağlardır
- Silisyumda tetrahedral yapı oluşur açı yaklaşık $109,5^\circ$ dir.
- Elektriği çok iyi iletmezler

- **Polar olmayan Kovalent Bağ:**

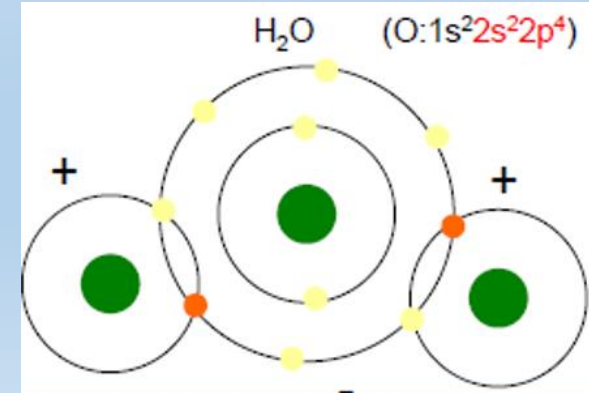
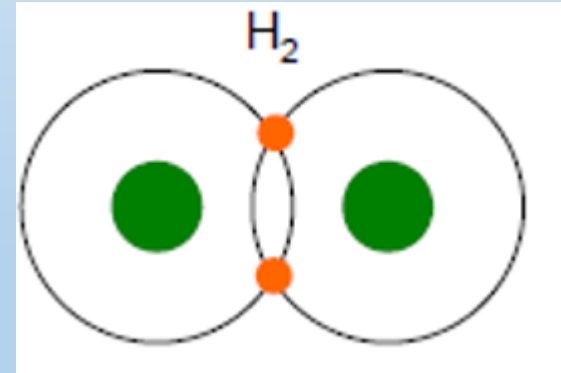
H_2 oluşumunda her iki Hidrojen atomu afinitesi de aynı olduğu için paylaşılan elektronlar üzerine uygulanan çekim kuvvetleri eşit olur ve polarizasyon gözlenmez.

- **Polar Kovalent Bağ:**

H_2O molekülü oluşumunda H atomları valans elektronlarına, O atomu tarafından uygulanan çekim kuvveti H atomları tarafından uygulananlardan daha şiddetli olduğundan paylaşılan elektronlar O atomuna daha yakın olur. Polarizasyon oluşur.



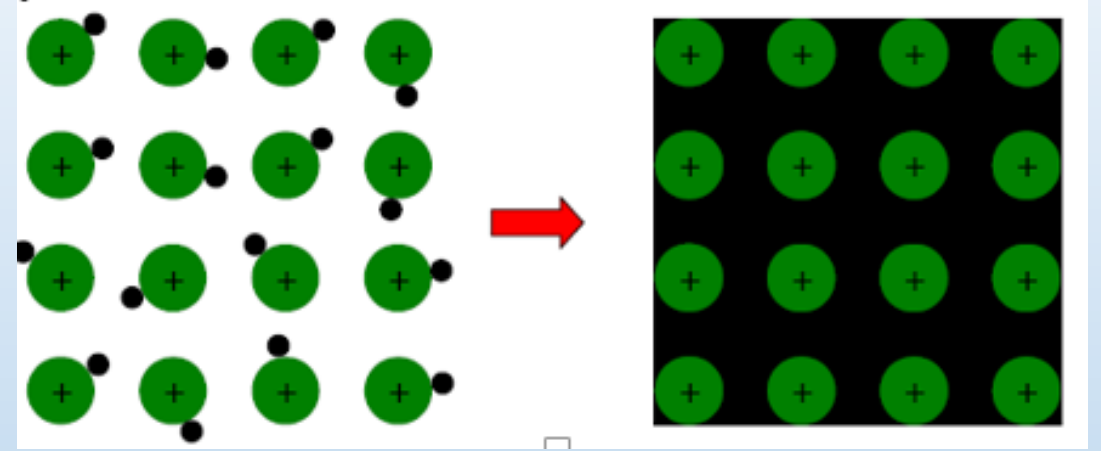
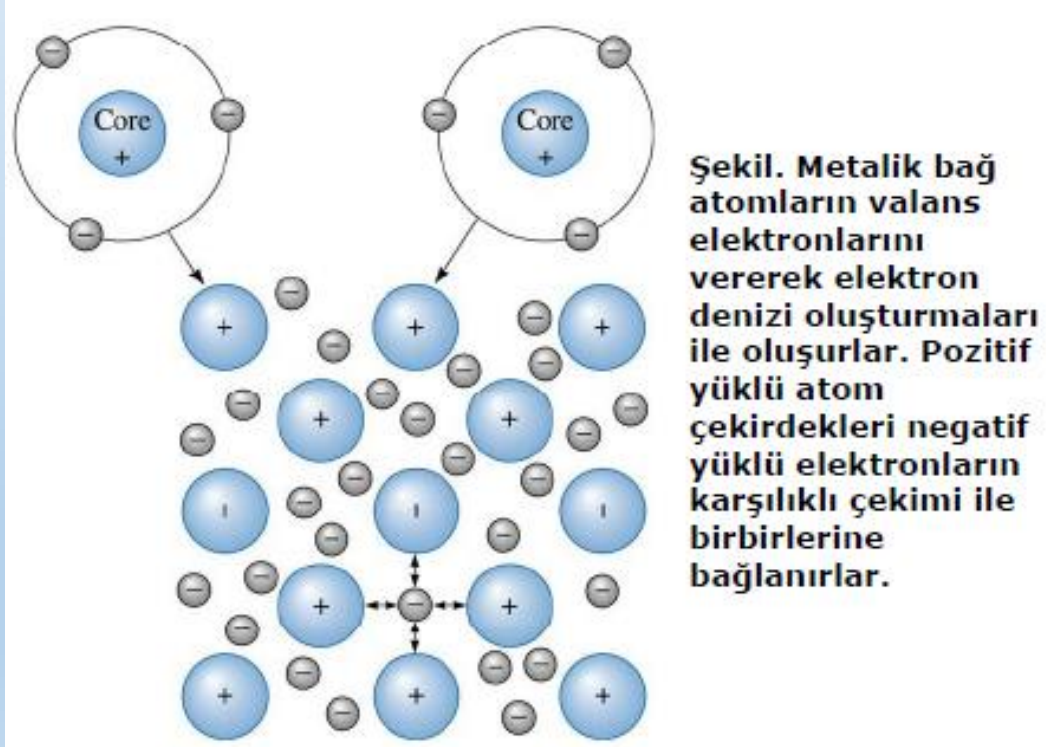
Şekil. Kovalent bağlar yöne bağımlı bağlardır. Silisyumda, tetrahedral yapı 109.5° açı ile oluşur.



KATILARDA BAĞLAR

METALİK BAĞ- (METAL- METAL ARASINDA)

- Düşük sayıda valans elektronuna sahip elementler arasında oluşur
- Elektron paylaşımı içeren yönden bağımsız bir bağ çeşididir.



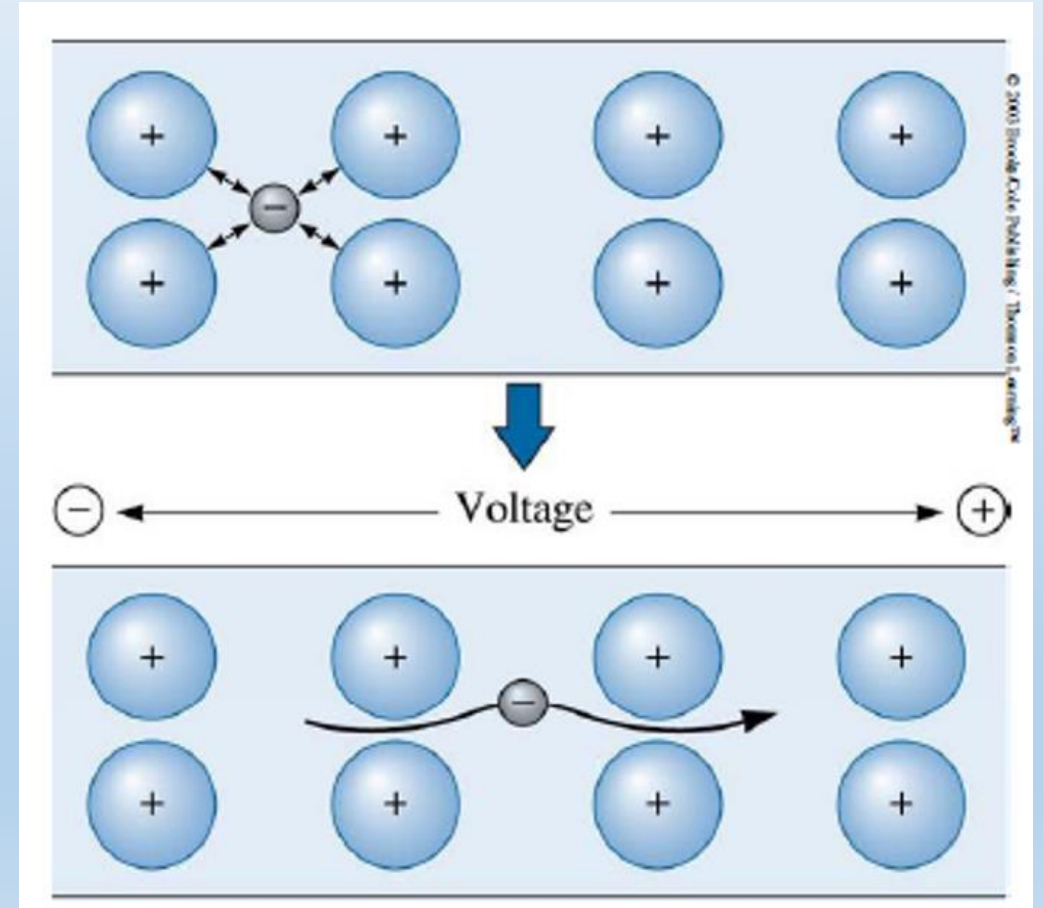
METALİK BAĞ- (METAL- METAL ARASINDA)

- Metale bir dış gerilim kaynağından gerilim uygulandığında elektron denizindeki elektronlar kolayca hareket ederler.

Serbest elektronların sayısı ne kadar artarsa bağın kuvveti de o derece artar.

- Sodyum: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ $T_{\text{erg}} = 371^\circ\text{K}$, $T_{\text{kay}} = 1156^\circ\text{K}$
- Magnezyum: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ $T_{\text{erg}} = 922^\circ\text{K}$ $T_{\text{kay}} = 1363^\circ\text{K}$

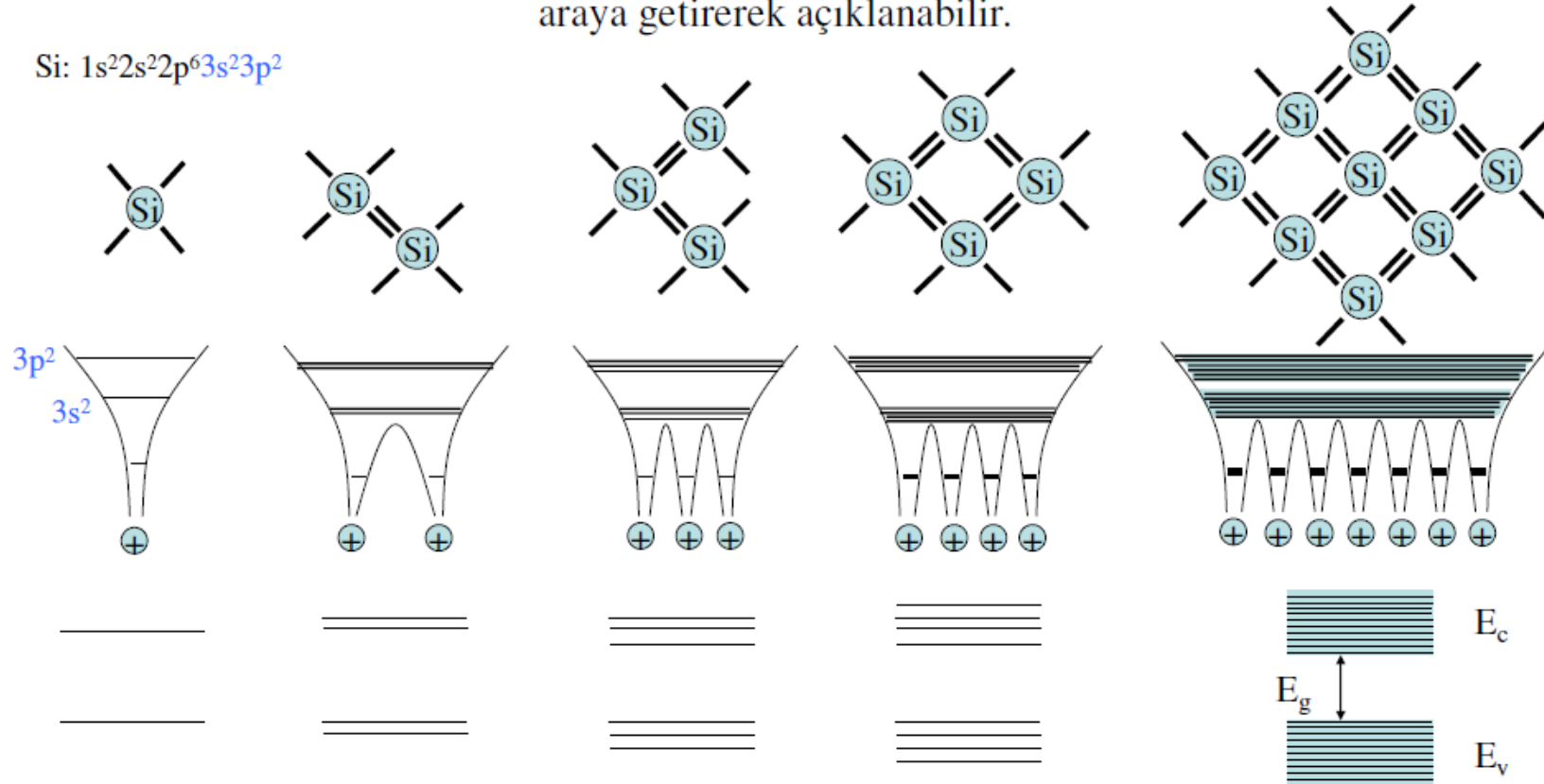
- Güçlü bağlardır
- Yöne bağımlı değildir. Atomları bir arada tutan elektronlar belirli bir yöne sabitlenmemişlerdir.
- Elektriği çok iyi iletirler.



BAND YAPISI ve YASAK BAND ARALIĞI KAVRAMI

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

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



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

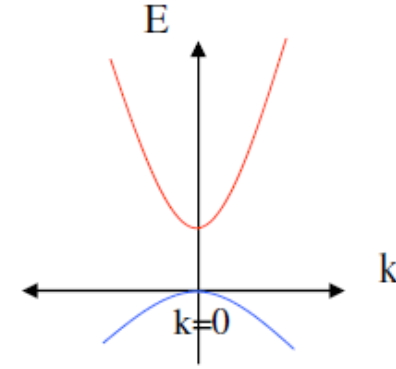
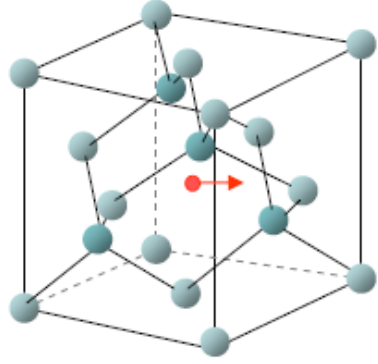
Bir Si atomunun yanına başka bir Si geldiğinde 3s ve 3p yörünge enerjileri ikiye bölünür ve diğer, alt alt yörüngeler (2s ve 2p) tersine bu yörüngeler her iki atoma aittir.

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 Avogadro 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.

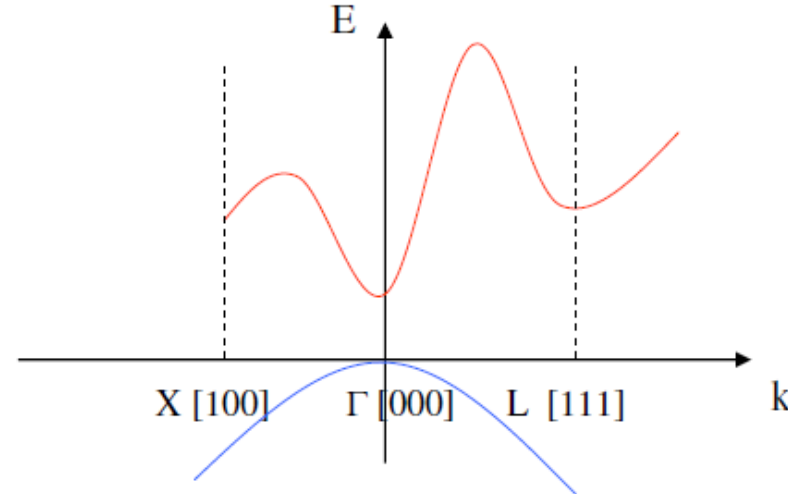
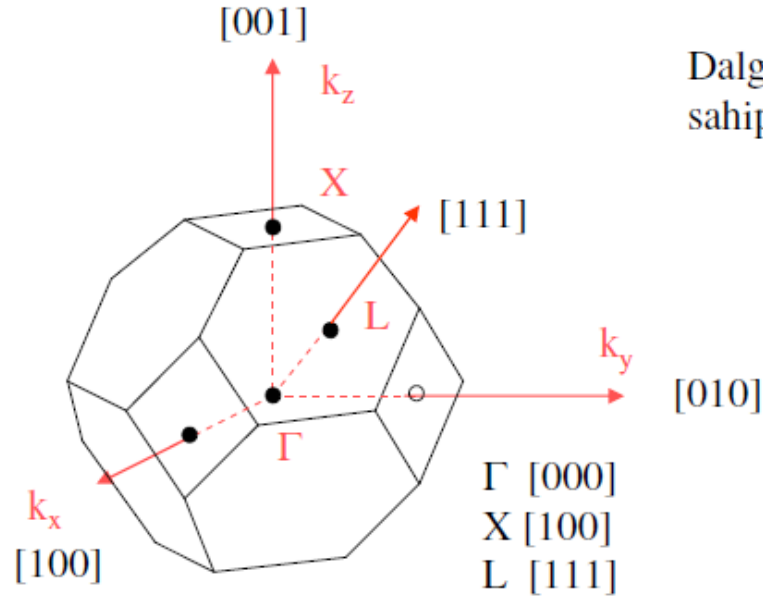
E_c : İletim Bandı
 E_v : Değerlik Bandı
 E_g : Yasak Bant

BAND YAPISI ve YASAK BAND ARALIĞI KAVRAMI

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



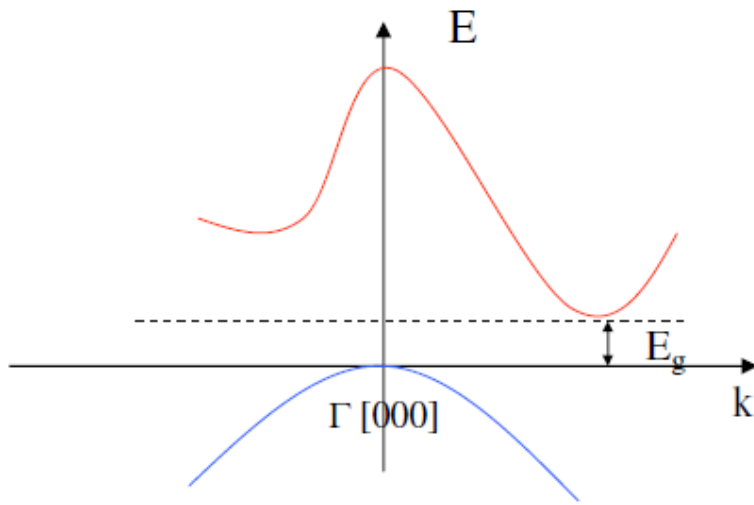
Dalga vektörü k , kristal içinde farklı doğrultularda farklı değerlere sahip olacağından farklı yönler için E-k grafikleri beraber çizilir.



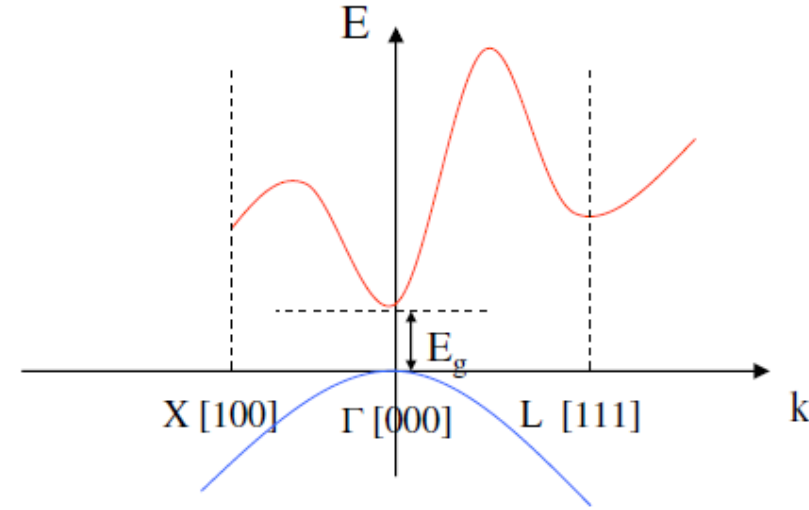
BAND YAPISI ve YASAK BAND ARALIĞI KAVRAMI

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

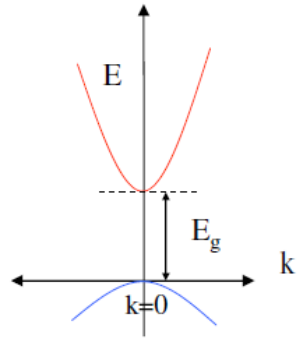


Doğrudan Bant aralığı

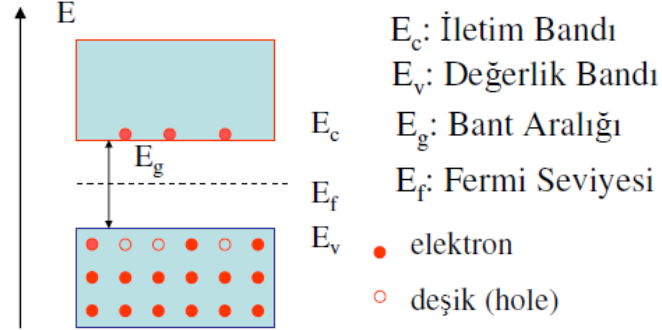
Bir yarıiletkenin direk veya indirek band aralığına sahip olması optik özelliklerini belirler ve u optoelektronik uygulamalar için kullanılıp kullanılmayacağı için en büyük kriterlerden biridir.

BAND YAPISI ve YASAK BAND ARALIĞI KAVRAMI

E-k Grafiği



E-konum Grafiği

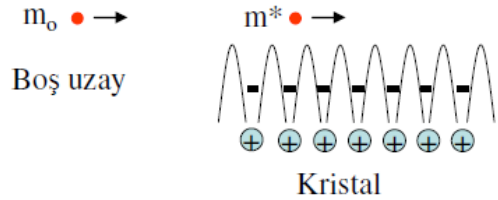


E_c : İletim Bandı
 E_v : Değerlik Bandı
 E_g : Bant Aralığı
 E_f : Fermi Seviyesi
● elektron
○ deşik (hole)

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

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.



Elektronların etkin kütlesi

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

Deşiklerin etkin kütlesi

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

•[Optoelektronik - TÜBA Açık Ders, H.Sarı](#)

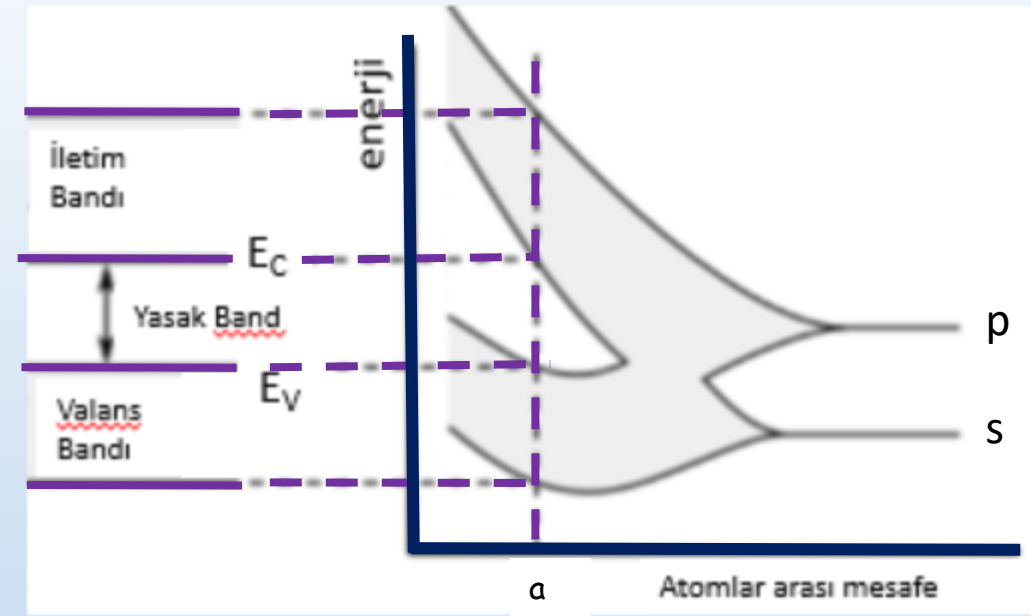
Atomlar bir katı oluşturmak için bir araya geldiklerinde, değerlik elektronları Coulomb kuvvetleri nedeniyle birbirleriyle ve çekirdeklerle etkileşime girer. Ayrıca iki özel kuantum mekaniksel etki meydana gelir.

1- Heisenberg'in belirsizlik ilkesine göre, elektronları küçük bir hacme sınırlamak enerjilerini yükseltir,

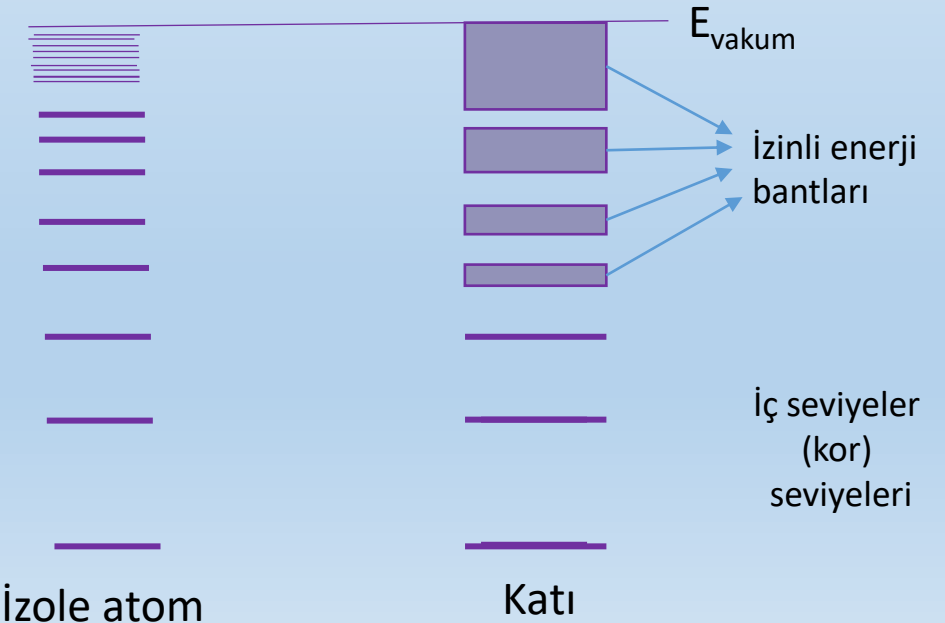
2- Pauli dışlama ilkesi nedeniyle ikinci etki, aynı enerjiye sahip olabilen elektronların sayısını sınırlar.

Bu etkilerin bir sonucu olarak, atomların değerlik elektronları bir katı oluşturduklarında geniş elektron enerji bantları oluştururlar.

Bantlar, elektronların bulunamayacağı boşluklarla ayrılırlar.



enerji

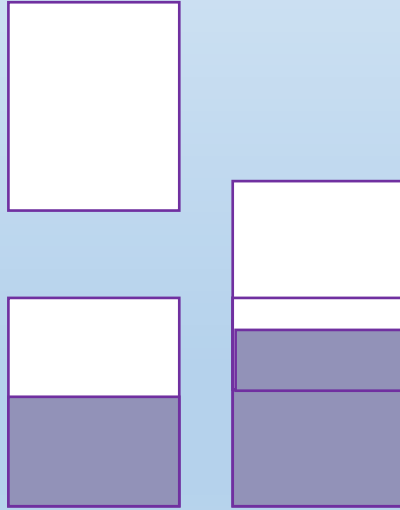


BAND YAPISI

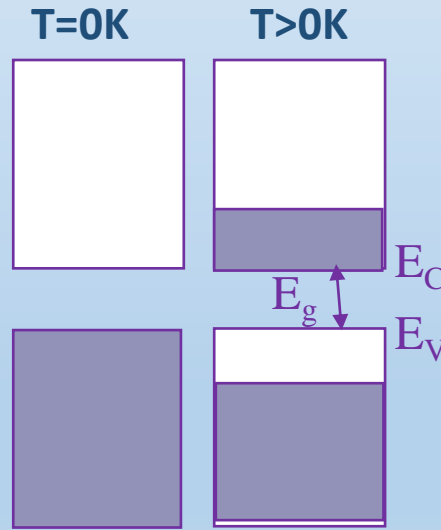
- Mutlak sıfırda elektronlarla dolu en üstteki band **valans bandıdır**.
- Yasak band aralığıyla valans bandından ayrılmış olan band ise **iletkenlik bandıdır**.
- Metallerde en yüksek enerjili band ya kısmen doludur veya valans ile iletim bandı üstüste binmiştir.
- Yarıiletken ve yalıtkanlarda elektronlar valans bandındadır ve iki band arasında yasak band aralığı (E_g) vardır.
- Yalıtkanlarda E_g yarı iletkenlere göre daha büyüktür.

T=300K	Germanyu m	Silisyum	Gallium Arsenide
E_g (eV)	0.66	1.12	1.42

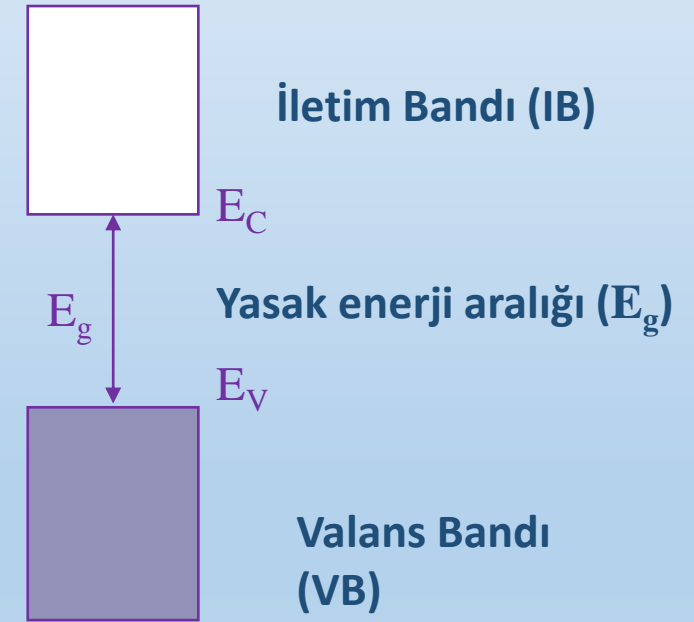
Elektronun
Enerjisi



İletkenler
(METALLER)

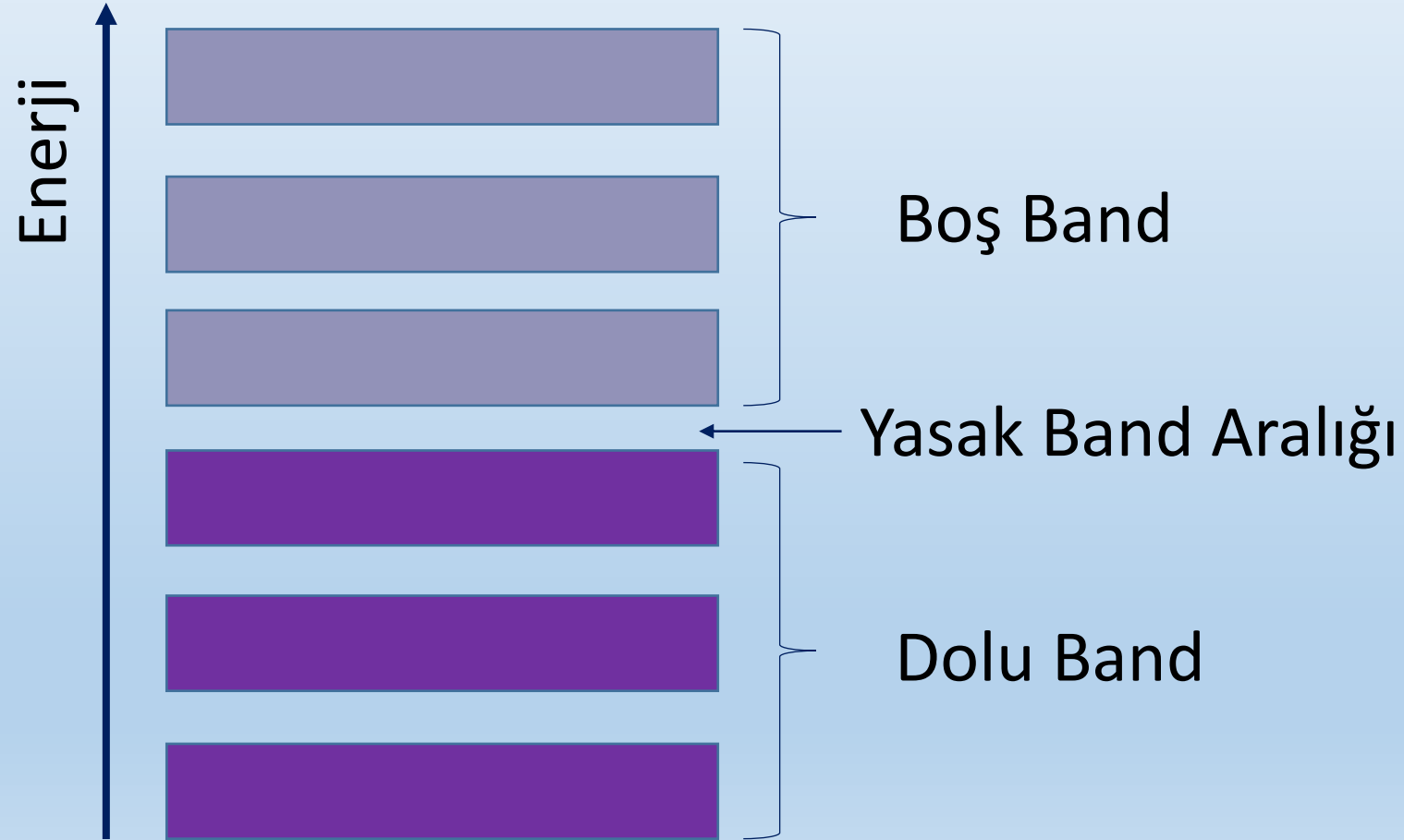


Yarıiletkenler
 $0.1 \text{ eV} < E_g < 4 \text{ eV}$



Yalıtkanlar
 $E_g > 4 \text{ eV}$

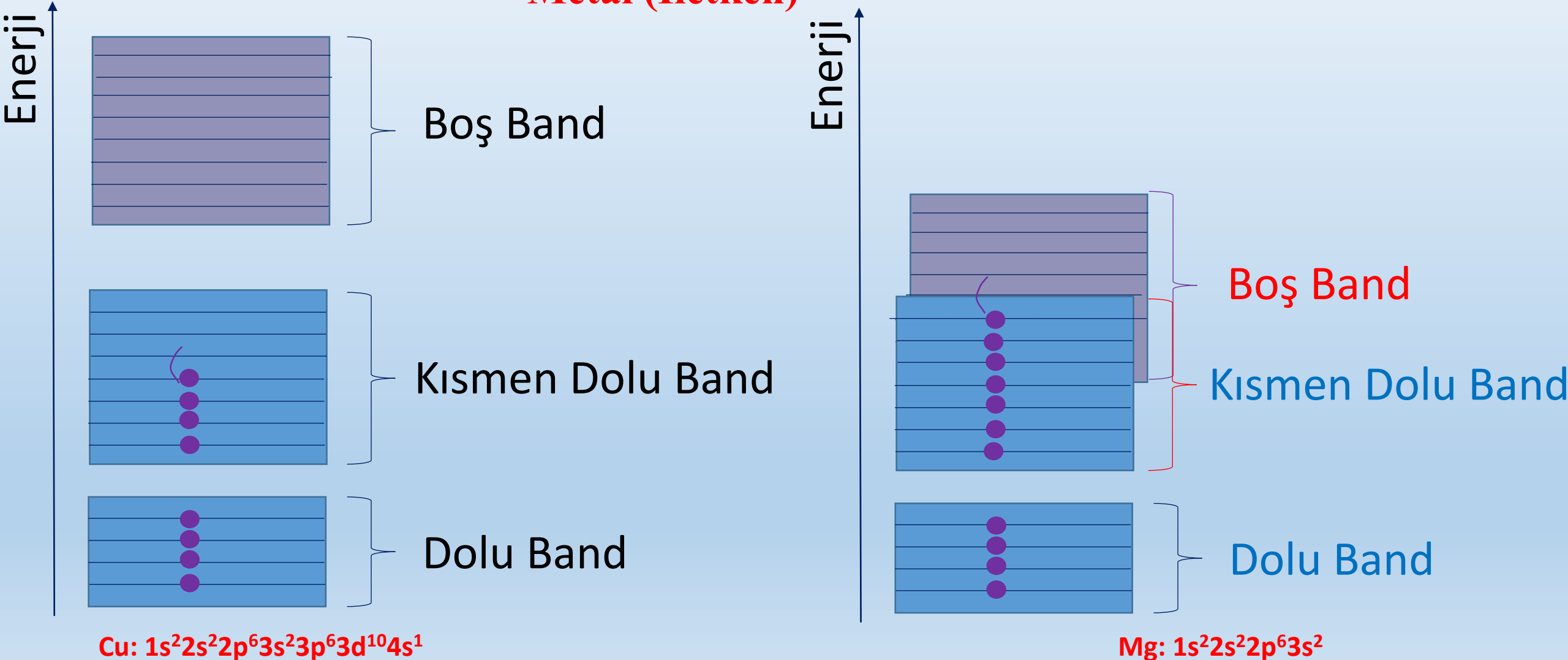
- Mutlak sıfırda elektronlarla dolu en üstteki band **valans bandıdır**.
- Yasak band aralığıyla valans bandından ayrılmış olan band ise **iletkenlik bandıdır**.
- Metallerde en yüksek enerjili band ya kısmen doludur veya valans ile iletim bandı üstüste binmiştir.
- Yarıiletken ve yalıtkanlarda elektronlar valans bandındadır ve iki band arasında yasak band aralığı (E_g) vardır.



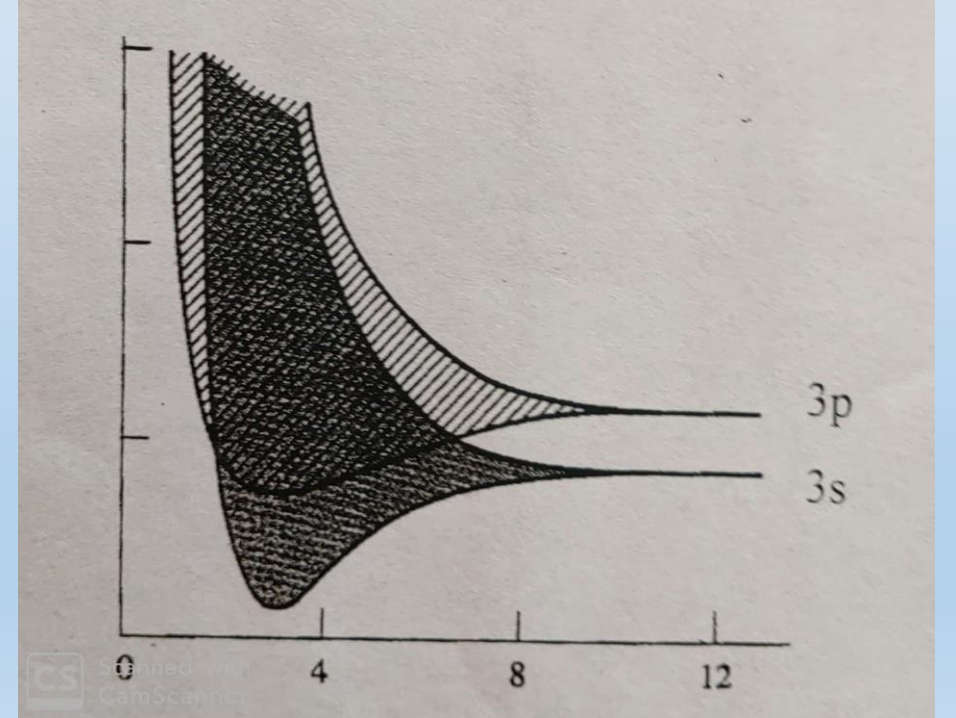
BAND DİYAGRAMLARI

- Metallerde (iletkenlerde), işgal edilen en yüksek bant kısmen dolu veya bantlar üst üste biniyor.
- İletim, elektronların başlayan iletim bandı seviyesine geçmeleriyle gerçekleşir. İletken durumlar, Bir elektrik alanı tarafından sağlanan enerji, birçok elektronu iletim bandına geçirmek için yeterlidir.

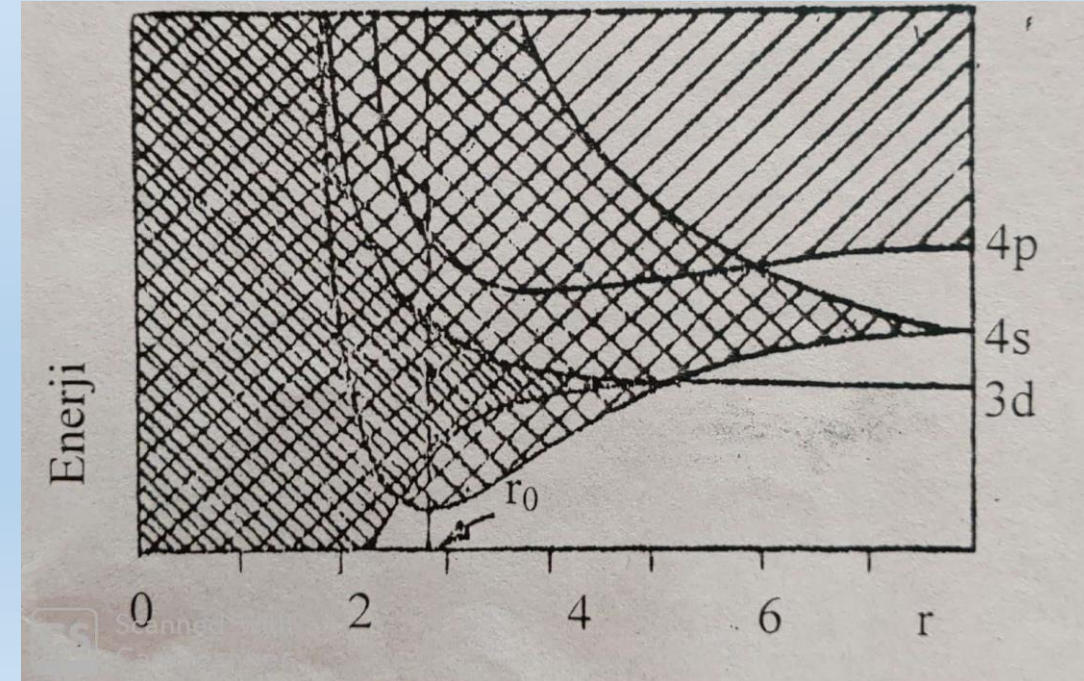
Metal (İletken)



- *Sodyumun 3s ve 3p seviyelerinin atomlar arası mesafeye bağılı değişimi*
- *3s seviyesi yarı dolu olması kristalin iletken olmasına yeterlidir.*
- *Ayrıca 3p seviyesi 3s ile kısmen üst üste gelmesi nedeniyle ortak genişlemiş bantdaki boş seviye sayısı artmış olur.*
- **Tüm metallerde bu durum mevcut.**

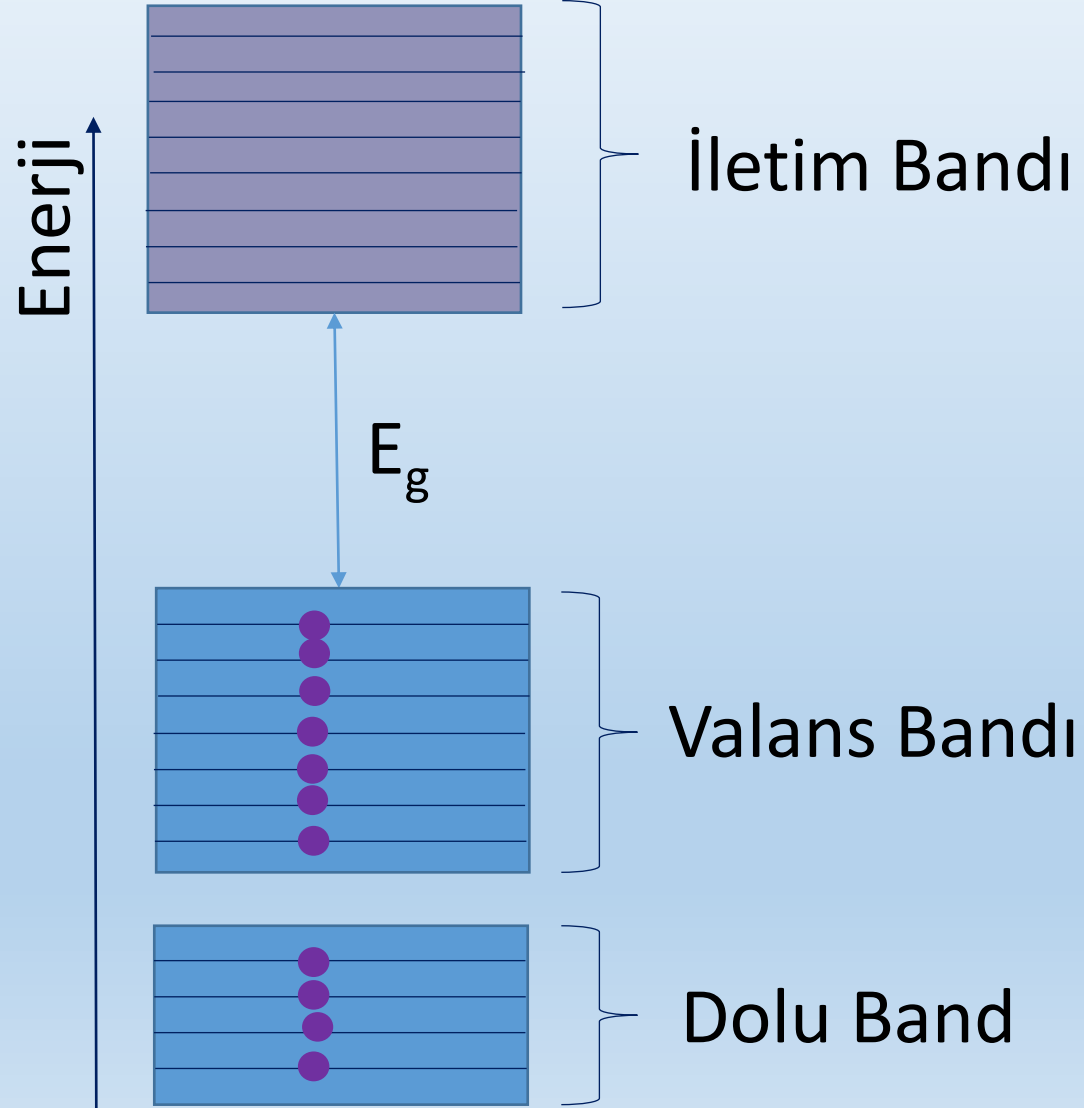


- *Bakırın enerji band diyagramı*
- *Tam dolu 3d, yarı dolu 4s ve tam boş 4p üst üste binmiş durumdadır.*
- *Aynı durum gümüş $4d^{10}5s$ ve Altın $5d^{10}6s$ için de böyledir.*
- *2 değerlikli metallerde valans bandı tam dolu bunların iletkenlikleri boş band ile üst üste gelmelerine bağlıdır.*



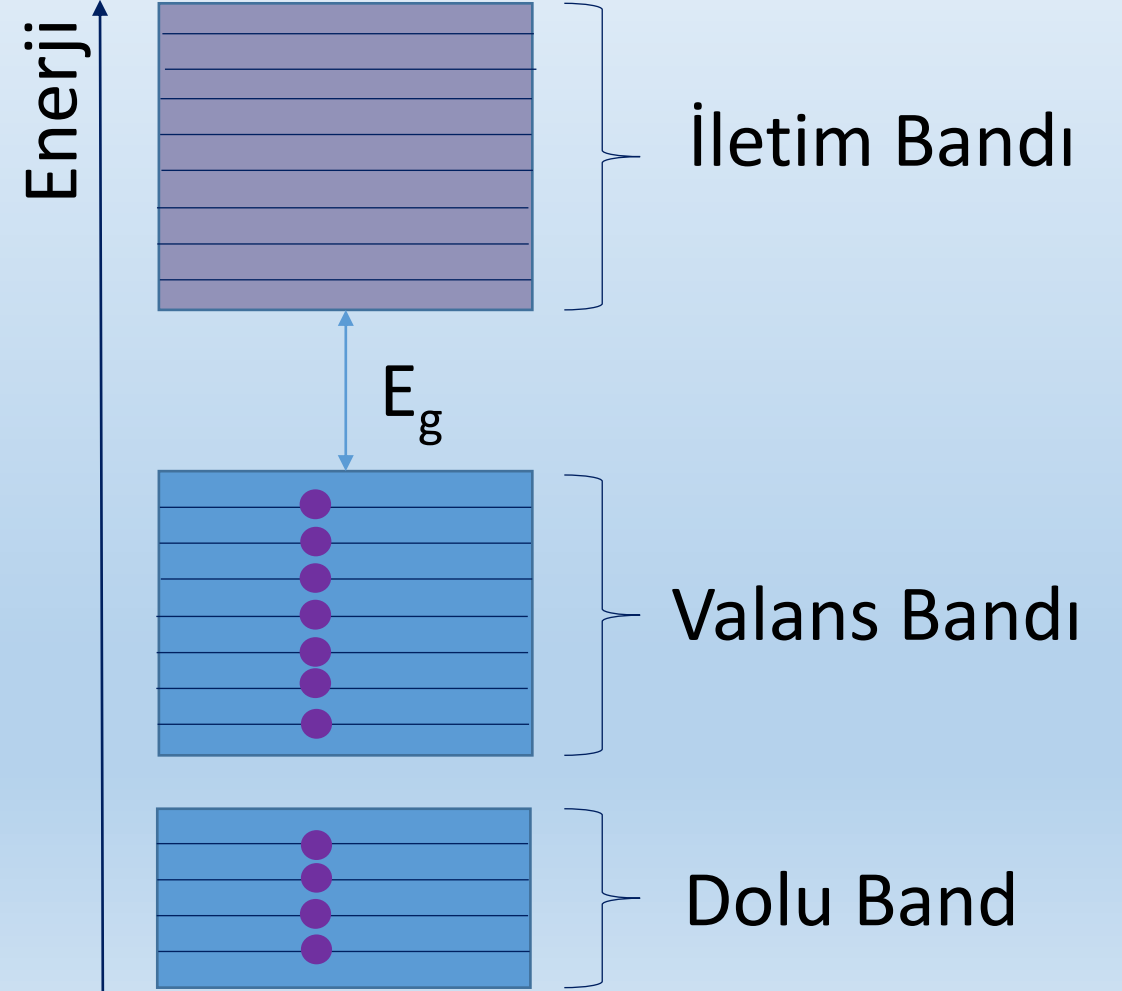
BAND DİYAGRAMLARI

Yalıtkan



- Yarı iletkenlerde ve yalıtkan, valans bandı dolu, daha fazla elektron eklenemez (Pauli prensibi).
- Elektrik iletimi, elektronların enerji kazanabilmelerini gerektirir. Serbest olmak için elektronların yasak bant aralığını geçmeleri gerekir bu durum uyarma elektrik alan, ısı veya ışıkla sağlanabilir.

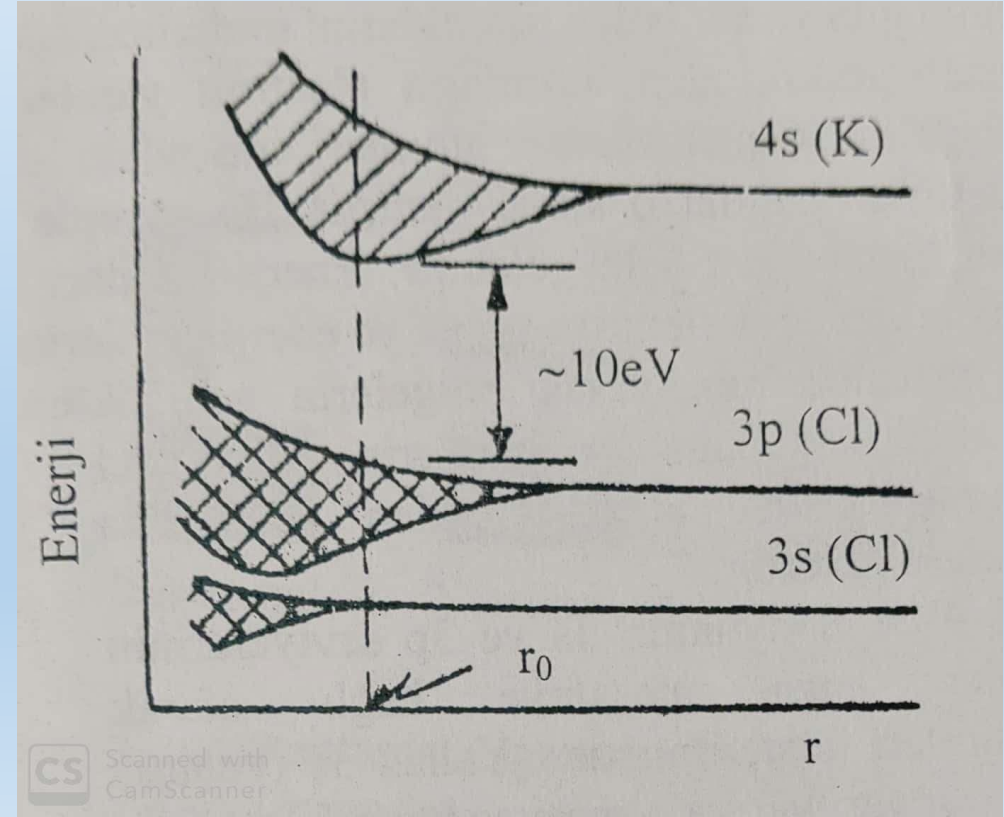
Yarıiletken



- *Yalıtkanlarda valans bandı tam doludur. Bu bandı takip eden ilk boş band ile aralarında geniş yasaklı bölge vardır.*
- *Şekilde KCl enerji bantları iyonlar arası mesafeye bağlı olarak verilmiştir.*
- *K un 4s elektronu Cl un $3p^5$ seviyesine geçer*
- *K 4s bandı dolu oldu*
- *Arada yaklaşık 10eV boşluk hiçbir 3p elektronu aşamaz*
- ** KCl yalıtkanadır.*

**Geniş yasak bölge oluşmasının sebebi
yüksek örgü simetri**

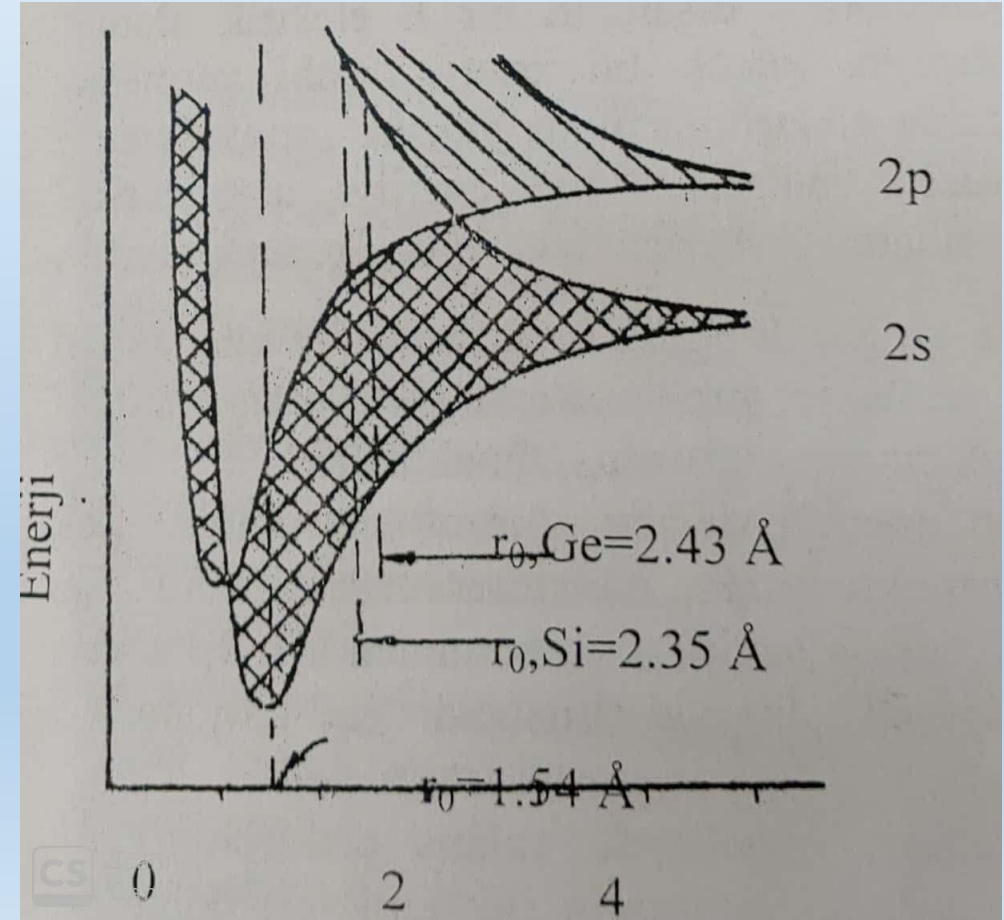
**Kuvvetli bağ gösteren kristallerde bandların
Yarılması ile de oluşabilir.**



- Elmas C : $2s^2, 2p^2$, s seviyesi dolu p seviyesi 2/3 oranında boş
- İyi iletken olmalı????????????????????????????????????
- Elmas kristal yapısındaki yüksek simetri ve kuvvetli kovalent bağ nedeniyle bir band yerine yarılmış birkaç band var
- P bandının alçak enerjili kısmında 2 e var
- Üst kısım p bandı tamamen boş
- r_0 da yaklaşık iki band arası 6-7eV yasak Bölge var.

Yüksek sıcaklıkta bile elmas yalıtkan
 Elmasın örgü sabiti: 1.54Ang-sıkı bağ
 Si- yasak bölge 1.1 eV
 Ge-yasak bölge 0.72 eV

- Yarıiletkenlerde sıcaklık ile ve dış alan uygulanması ile elektron boş bandlara geçebilir
- İletkenlik sağlanır
- Ayrıca ardında bıraktığı boşlukta iletkenliğe katkı sağlar



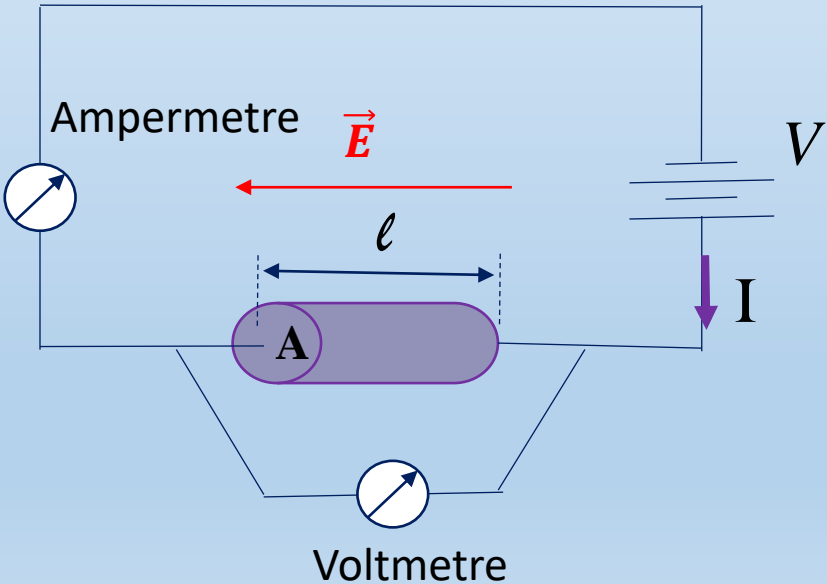
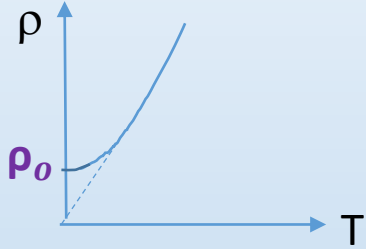
METAL VE YARIİLETKENLERDE İLETKENLİĞİN SICAKLIĞA BAĞLILIĞI

METALLER

$$\rho = \frac{1}{ne\mu}$$

$$\sigma = ne\mu$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha T)$$



$\rho \rightarrow$ Herhangi bir T sıcaklığında öz direnç

$\rho_0 \rightarrow$ 0K sıcaklığında öz direnç

$\alpha \rightarrow$ öz direnç sıcaklık katsayısı

$T \rightarrow$ Sıcaklık

$k \rightarrow$ Boltzman sabiti

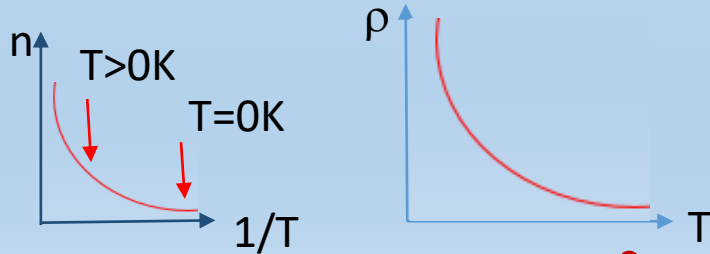
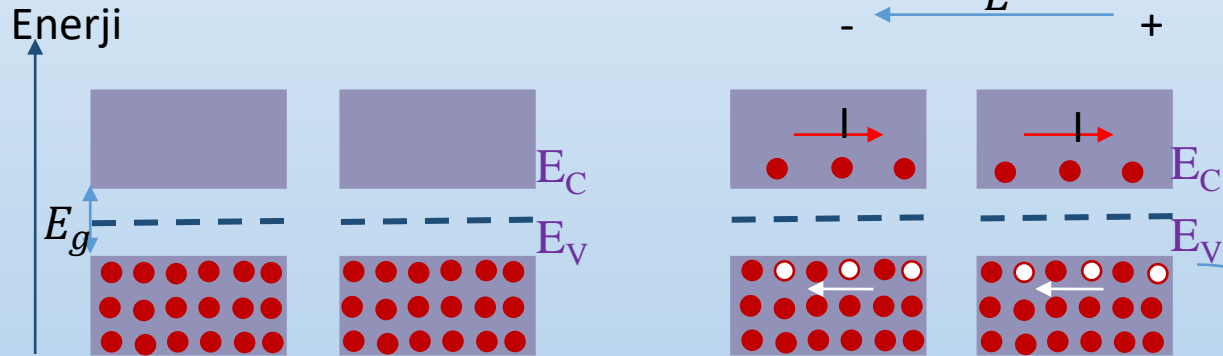
$E_g \rightarrow$ Yasak bant genişliği

$C \rightarrow$ malzemeye özgü sabit

$E_v \rightarrow$ Valans bandı tavan enerji seviyesi

$E_c \rightarrow$ İletim bandı taban enerji seviyesi

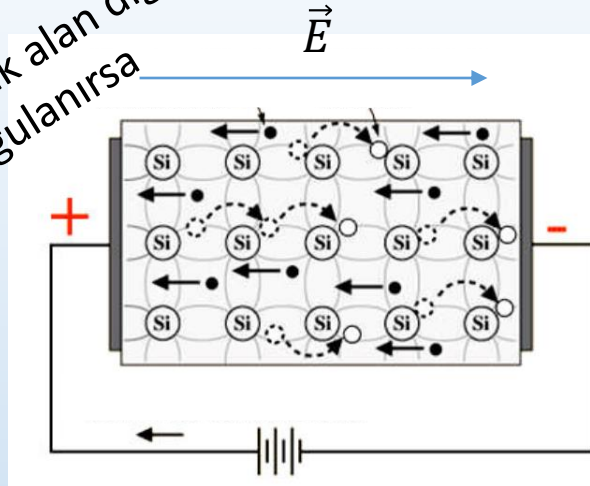
YARIİLETKENLER



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

Elektrik alanda elektronun hareket yönü
Elektrik alanda boşluğun hareket yönü

Veya elektrik alan diğer yönde uygulanırsa



BİPOLAR
İLETKENLİK hem
elektronlar hem
boşluklar yük
taşıyıcısı