

الدارات الالكترونية المحاضرة الثالثة

أ.د. فادي غصنه

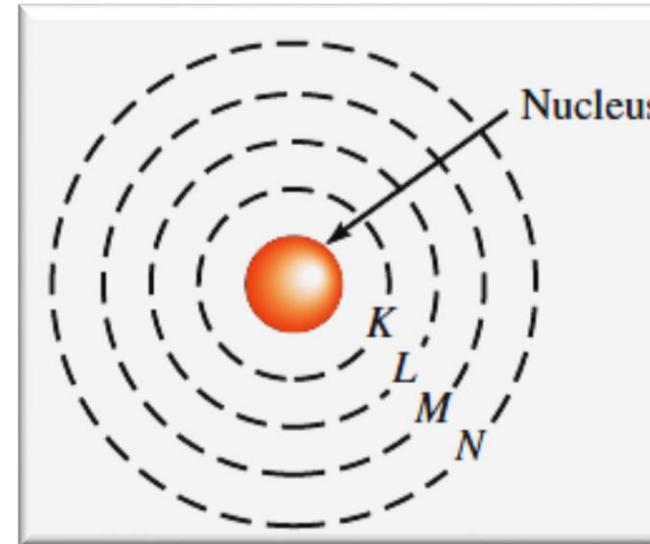
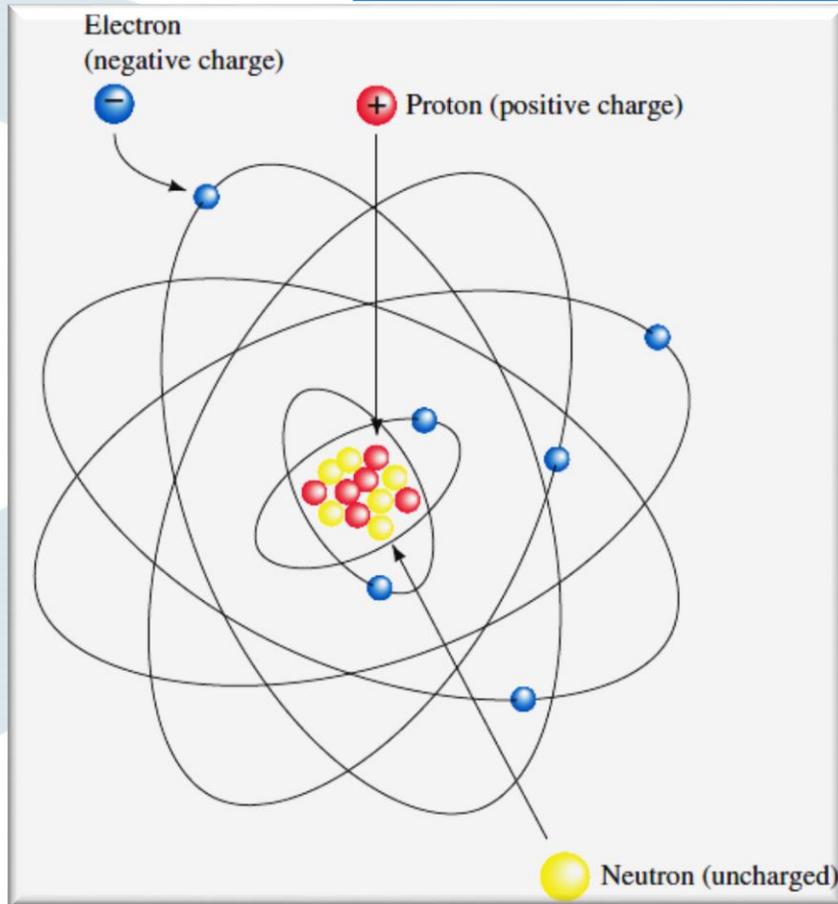


Atomic Theory Review

- تُعدّ الذرة البنية الأساسية للمادة، تتألف من النواة (مكونة من بروتونات ونيوترونات) ومن الالكترونات التي تتحرك وفقاً لمدارات معينة.
- شحنة الالكترون عبارة عن شحنة سالبة (-)، بينما شحنة البروتونات هي شحنة موجبة (شحنة النواة موجبة).
- يتساوى عدد الالكترونات في أي ذرة مع عدد البروتونات، لذلك فإن شحنة الذرة متعادلة كهربائياً.
- عدد الالكترونات في كل مدار يساوي $2n^2$ ، حيث n يمثل رقم المدار.
- يحتوي المدار الأول على الالكترونين، بينما المدار الثاني على ثمانية الالكترونيات المدار الثالث على ١٨ الالكترون، وهكذا.
- عدد الالكترونات في أي مدار يتبع لنوع العنصر وفقاً لتوضعه في جدول التصنيف الدوري.
- النحاس مكون من ٢٩ الالكترون، موزعة على النحو الآتي:
 - المدار الأول K يحوي ٢ الالكترون
 - المدار الثاني L يحوي ٨ الالكترونات
 - المدار الثالث M يحوي ١٨ الالكترونات
 - المدار الرابع N يحوي الالكترون وحيد (بالرغم من أن هذا المدار يمكن أن يحوي ٣٢ الالكترون).
- يُسمى المدار الأخير بمدار التكافؤ **valence shell** وتُسمى الالكترونات في المدار الأخير بالالكترونات التكافؤ **valence electrons**



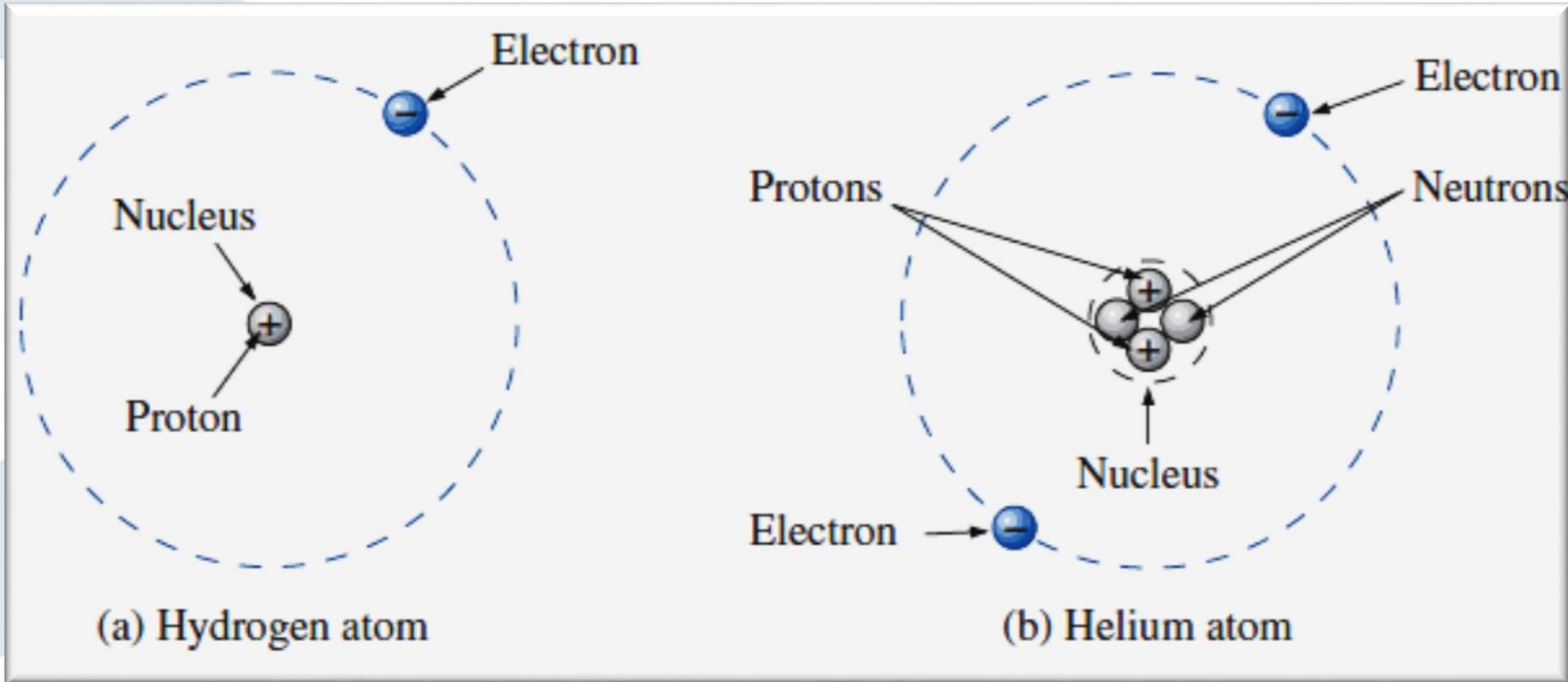
Bohr model of the atom



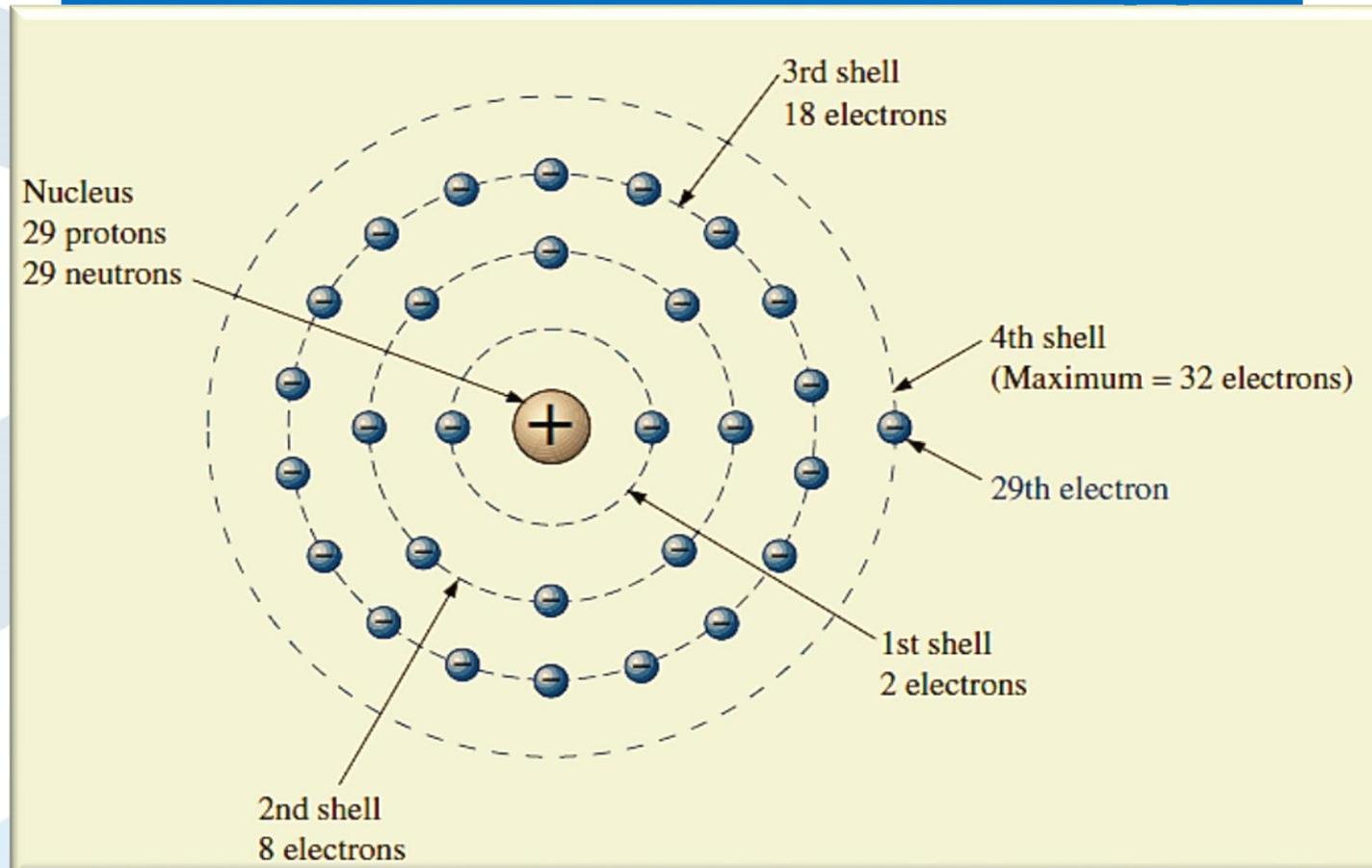
Simplified representation of the atom. Electrons travel in roughly spherical orbits called “shells”



Hydrogen and helium atoms



The atomic structure of copper



The Quantum Model

- نموذج بور للذرة نموذج بسيط وسهل الفهم، لكنه في الوقت نفسه ليس النموذج الشامل.
- النموذج الكمي، هو النموذج الحالي للذرة، ويُعدّ أكثر دقة من نموذج بور. وهو عبارة عن نموذج إحصائي statistical model، وصعب الفهم والتمثيل.
- يشبه النموذج الكمي نموذج بور للذرة من حيث النواة التي تضم البروتونات والنيوترونات، وتدور حولها الإلكترونات.
- ويختلف النموذج الكمي عن نموذج بور، حيث أن الإلكترون لا يمكن تحديد مساره على أي مدار بدقة كما هو الحال بالنسبة للجزيئات.
- توجد نظريتان مهمتان للنموذج الكمي: نظرية الطبيعة المزدوجة للإلكترون wave-particle duality (طبيعة جسيمية (مادية) وطبيعة موجية)، ومبدأ عدم التعيين Uncertainty principle.
- بالنسبة للطبيعة المزدوجة، فإن الإلكترون بشكل مشابه للضوء (فوتون) يسلك سلوك الموجة وسلوك الجسيم. فالسرعة التي يتحرك بها الإلكترون على المدار تتعلق بطول الموجة وفق علاقة دي برولي:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (\text{de Broglie wavelength of a particle})$$

H هو ثابت بلانك
P عزم الإلكترون
M كتلة الإلكترون
V سرعة الإلكترون

التي تتداخل مع أمواج الإلكترونات المجاورة بعملية تضخيم أو تلاشي للأمواج.



The Quantum Model

• بالنسبة لمبدأ عدم التعيين Uncertainly principle، أو مبدأ هازينبرج، التي تنص على أنه لا يمكن تحديد موضع وسرعة الإلكترون (أو العزم) في الوقت نفسه.

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

• من خلال مبدأ هازينبرج ينشأ مفهوم السحابة أو الغمامة الإلكترونية، التي تحدد وجود الإلكترون بقيمة احتمالية (احتمال وجود الإلكترون في موضع معين)

• طور العالم شرودينغر معادلة تفاضلية خطية من الدرجة الثانية لدراسة سلوك الإلكترون، وتُعطى على النحو الآتي:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x) \quad \text{(one-dimensional Schrödinger equation)}$$

حيث: $\psi(x)$ يُسمى تابع الموجة
 $U(x)$ الطاقة الكامنة للجسيم
 $E(x)$ الطاقة الكلية
 \hbar ثابت بلانك $= h/2\pi$

ℓ	Subshell Symbol
0	s
1	p
2	d
3	f
4	g
5	h

ينقسم كل مستوى طاقة أساسي إلى عدة مستويات طاقة جزئية كالاتي: ويُسمى العدد الكمومي المداري

n	Shell Symbol
1	K
2	L
3	M
4	N
5	O
6	P

تأخذ مستويات الطاقة (أو الصدفة shell) في الذرة الرموز الآتية، ويُسمى العدد الكمومي الأساسي.



The Quantum Model

- تأخذ المدارات الأساسية عدد من الالكترونات وفقاً لكل مدار، فمثلاً المدار K يأخذ 2 إلكترون، والمدار L يأخذ 8 إلكترونات، وهكذا.
- تأخذ المدارات الجزئية ... s, p, عدد من الالكترونات حسب كل مدار، فمثلاً المدار (أو مستوي الطاقة) s يأخذ 2 إلكترون، أما p فيأخذ 6 إلكترونات، وهكذا
- يتم ملأ الإلكترونات وفقاً لمبدأ باولي للاستبعاد.

Electron configuration table for nitrogen.

$1s^2$	2 electrons in shell 1, orbital <i>s</i>
$2s^2 \quad 2p^3$	5 electrons in shell 2: 2 in orbital <i>s</i> , 3 in orbital <i>p</i>

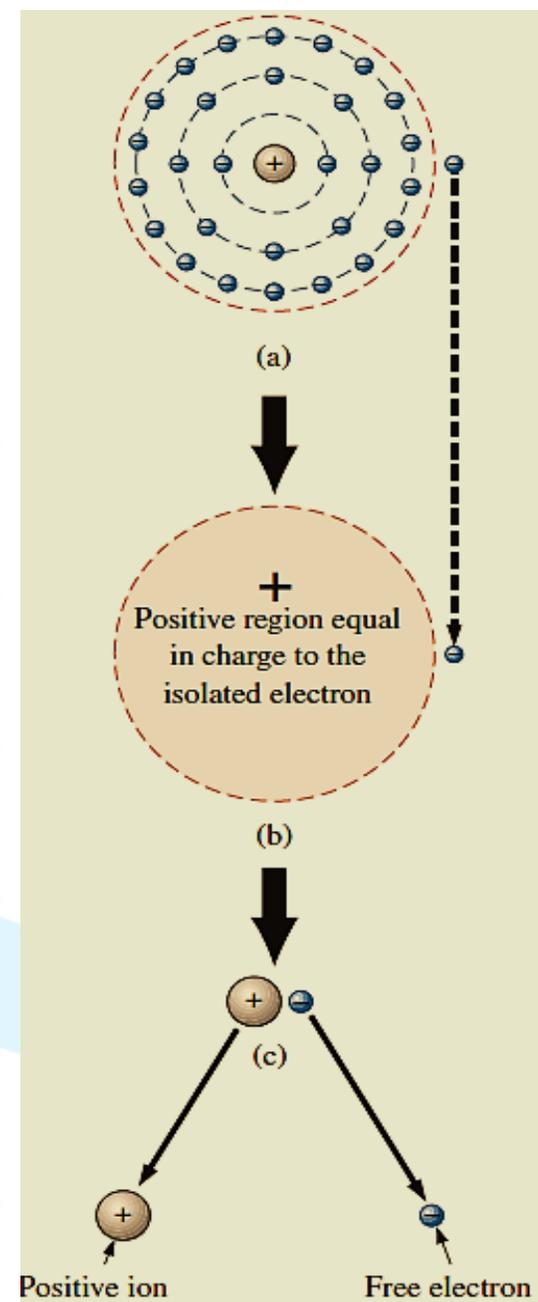
silicon (Si) atom using an electron configuration table

$1s^2$	2 electrons in shell 1, orbital <i>s</i>
$2s^2 \quad 2p^6$	8 electrons in shell 2: 2 in orbital <i>s</i> , 6 in orbital <i>p</i>
$3s^2 \quad 3p^2$	4 electrons in shell 3: 2 in orbital <i>s</i> , 2 in orbital <i>p</i>



Free Electron

- ارتباط الالكترونات التي تتحرك على المدار الأخير يكون ضعيفاً مع الالكترونات الأخرى، لذلك فإن أي ارتفاع في درجة الحرارة أو تطبيق جهد كهربائي صغير سوف يحرر هذه الالكترونات من مدارها.
- بعض المعادن مثل النحاس (ناقل كهربائي) تتحرر هذه الالكترونات في درجة حرارة الغرفة 25°C ، تُسمى هذه الالكترونات بالـ free electrons الحرة.
- تتحرك هذه الالكترونات بشكل عشوائي من ذرة إلى أخرى (المدار الأخير)، وتبقى المادة متعادلة كهربائياً.
- يوجد على سبيل المثال حوالي 10^{23} الكترون حر في cm^3 واحد في درجة حرارة الغرفة. يجعل هذا العدد من النحاس معدناً ناقلاً جيداً للكهرباء.
- خسارة أو ربح الكترون يجعل من الذرة ذات شحنة موجبة أو سالبة، وتسمى الذرة في هذه بالشاردة Ion.
- في حال خسارة الكترون تكون الذرة عبارة عن شاردة موجبة positive ion،
- أما في حال ربح الذرة للـ إلكترون تصبح شاردة سالبة negative ion.



Conductors

- الناقل: يكون المعدن ناقلاً كهربائياً جيداً، إذا كان يملك عدد كبير من الإلكترونات الحرة.
- عادة المعادن التي تملك الكترون وحيد في المدار الأخير (كالنحاس) تصنف على أنها معادن ناقلة جيداً للكهرباء.
- يُعد النحاس Copper من أشهر المعادن التي تمتلك ناقلية كهربائية جيدة، بالإضافة لرخص ثمنه، وقابلية تصنيعه كأسلاك كهربائية.
- الألمنيوم Aluminum يأتي في المرتبة الثانية لكنه أقل ناقلية من النحاس، حوالي 60% من ناقلية النحاس.
- الذهب Gold والفضة Silver من المعادن التي تملك ناقلية كهربائية، لكنها غالية الثمن، لذلك ينحصر استخدامها في تطبيقات خاصة.

Metal	Relative Conductivity (%)
Silver	105
Copper	100 ←
Gold	70.5
Aluminum	61
Tungsten	31.2
Nickel	22.1
Iron	14

*Relative conductivity of
various materials*



Insulators

العوازل: العناصر التي تمتلك عدد قليل من الالكترونات الحرة، والروابط بين الالكترونات تكون قوية، مثل الزجاج Glass و البورسلان Porcelain و البلاستيك Plastic و المطاط Rubber و الهواء air. تستخدم لعزل الأسلاك الكهربائية تفادياً للصدمات الكهربائية electric shock. في حال تطبيق جهد كهربائي كبير على العازل، يجبر الالكترونات على التحرر من روابطها، مما يؤدي انهيار break down العازل وتحويله إلى ناقل كهربائي.

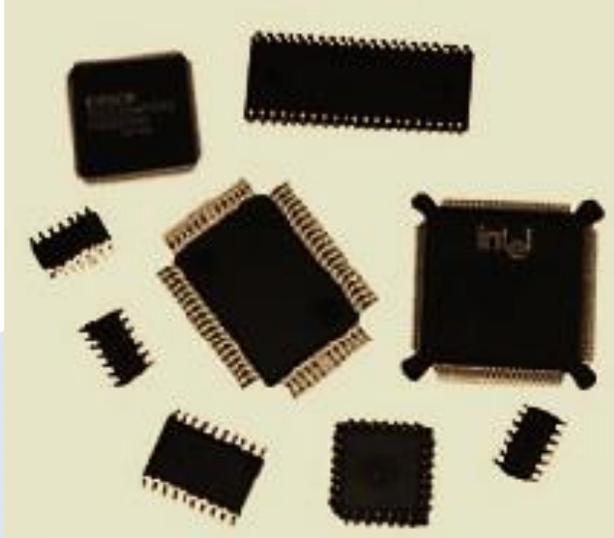
Material	Average Breakdown Strength (kV/cm)
Air	30
Porcelain	70
Oils	140
Bakelite®	150
Rubber	270
Paper (paraffin-coated)	500
Teflon®	600
Glass	900
Mica	2000

Breakdown strength of some common insulators



Semiconductors

- تُسمى العناصر التي تملك خاصية الناقل وخاصية العازل بأنصاف النواقل.
- عند درجة حرارة معينة أو جهد كهربائي تتحول هذه العناصر من عازل إلى ناقل كهربائي.
- تقع هذه العناصر في العمود الرابع من جدول تصنيف الدوري، وتملك أربع الكترونات في مدارها الأخير (تكافؤ العنصر يساوي 4)
- من أشهر هذه العناصر السيلكون والجرمانيوم Silicon and Germanium.
- تشكل هذه العناصر الأساس في تصنيع الثنائيات والترانزستورات والدوائر المتكاملة.



	IIIA	IVA	VA	VIA
5	10.811 B Boron	12.01115 C Carbon	14.0067 N Nitrogen	15.9994 O Oxygen
13	26.9815 Al Aluminum	28.086 Si Silicon	30.9738 P Phosphorus	32.064 S Sulfur
30	65.37 Zn Zinc	69.72 Ga Gallium	72.59 Ge Germanium	78.96 As Arsenic
48	112.40 Cd Cadmium	114.82 In Indium	118.69 Sn Tin	121.75 Sb Antimony
80	200.59 Hg Mercury	204.37 Tl Thallium	207.19 Pb Lead	208.980 Bi Bismuth
				84 (210) Po Polonium



Band Gap

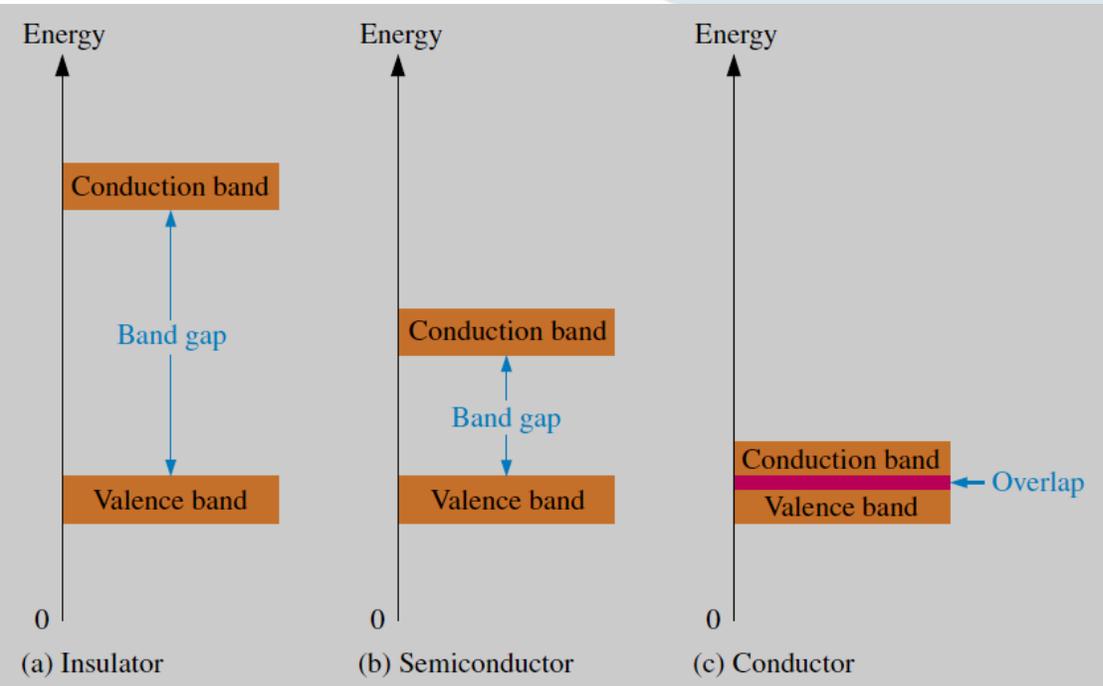
• وجدنا أن الإلكترون ضمن مدار التكافؤ valence أو حزمة التكافؤ، يرتبط بالذرة وفقاً لطاقة ارتباط معينة.

• في حال حصول إلكترون التكافؤ على طاقة إضافية، فإنه يغادر حزمة التكافؤ ويصبح إلكترونًا حرًا، ويوجد في منطقة تُعرف بحزمة التوصيل conduction band.

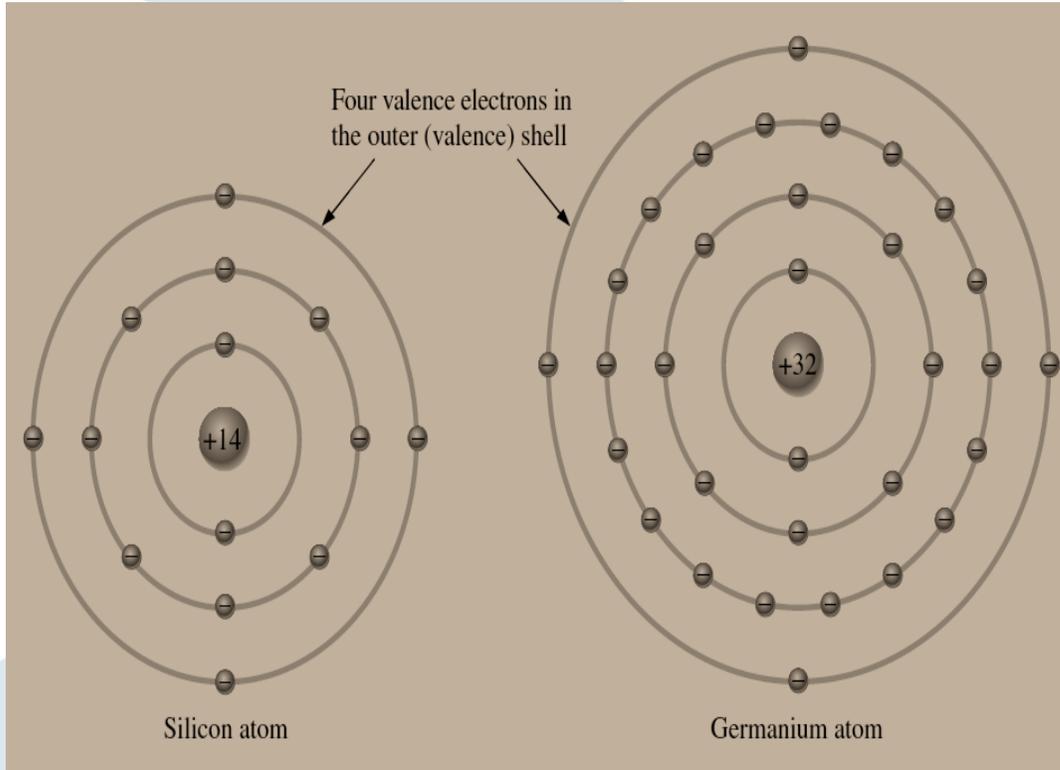
• يُسمى الفرق بين طاقة حزمة التكافؤ وبين حزمة التوصيل بفجوة الطاقة energy gap أو فجوة الحزمة band gap. وهي الكمية من الطاقة التي يكتسبها الإلكترون لينتقل من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل. وتقدر عادة طاقة الفجوة E_g بوحدة الكيلو إلكترون-فولط eV.

• هذا الإلكترون الحر لا ينتهي إلى أي ذرة، ويمكن التحرك ضمن المادة بشكل حر.

• تختلف قيمة طاقة الفجوة من مادة إلى أخرى حسب طبيعة المادة، ما يهم هو قيمة طاقة الفجوة بالنسبة لأنصاف النواقل.



Silicon and Germanium

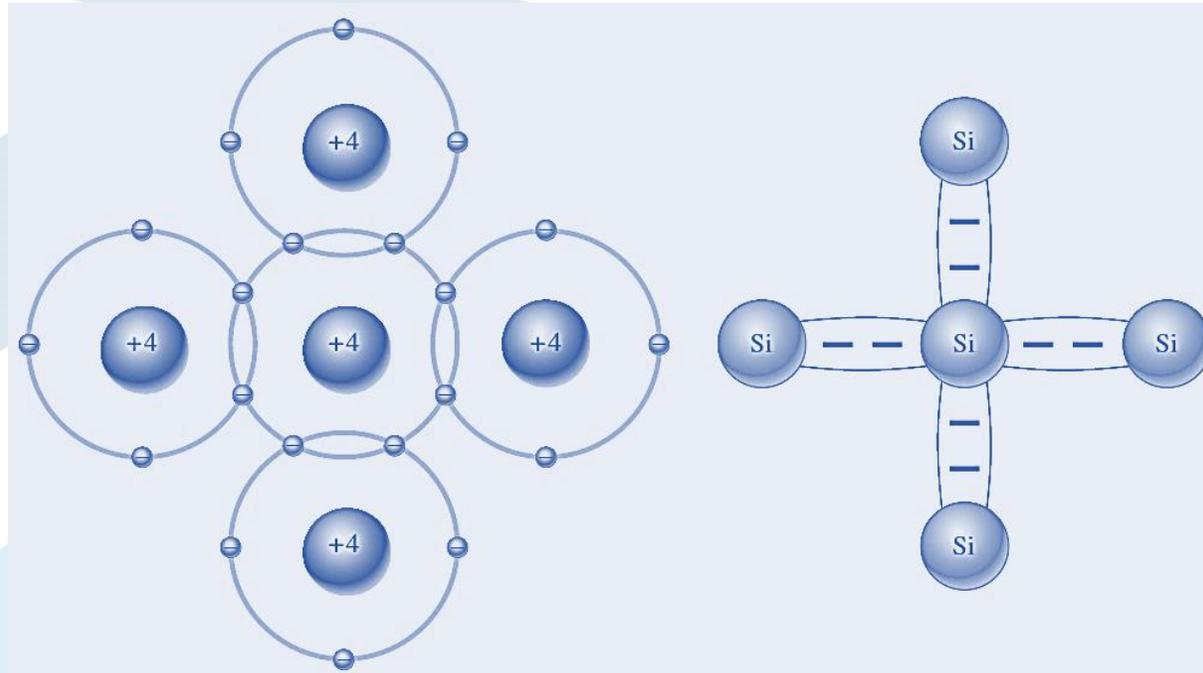


يملك السيلكون والجرمانيوم على مداره الأخير أربع إلكترونات / من الملاحظ أن إلكترونات التكافؤ للجرمانيوم تتوضع على المدار الرابع، بينما هي في السيلكون على المدار الثالث. هذا يعني أن إلكترونات التكافؤ للجرمانيوم تملك طاقة أكثر من إلكترونات التكافؤ للسيلكون، بالتالي تحتاج لطاقة أقل من السيلكون لتنتقل إلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل (انظر جدول قيمة طاقة الفجوة). هذا يجعل من الجرمانيوم عنصر غير مستقر عند درجات الحرارة العالية، التي تؤدي لتيارات عكسية. هذا يوضح لماذا السيلكون أكثر استخداماً في قائمة أنصاف النواقل.



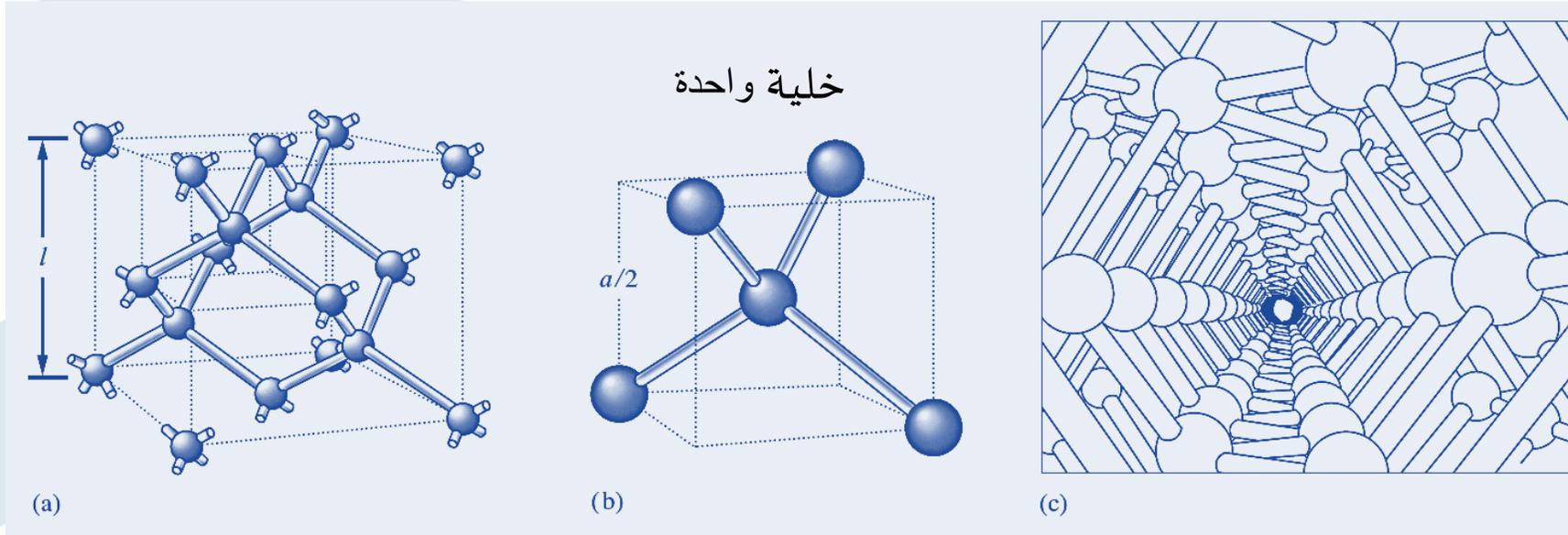
Covalent Bond Model

- يرتبط كل إلكترون في المدار الأخير في ذرة ما مع إلكترون في المدار الأخير لذرة مجاورة ضمن البنية البلورية، برابطة تُسمى الرابطة التشاركية Covalent bond. بالنسبة للسيلكون أو الجرمانيوم فإن الالكترنات الأربع في ذرة ترتبط مع أربع الكترونات لذرة مجاورة، وبالتالي تصبح المادة في حالة مستقرة كيميائياً (المدار الأخير مكون من 8 الكترونات).



Covalent Bonds

نقول عن البنية البلورية أنها بنية بلورية نقية *intrinsic crystal*، في حال خلوها من مواد شائبة *impurities*.



البنية البلورية للسيلكون حيث $l = 0.543 \text{ nm}$



Covalent Bond Model

تساوي كثافة الإلكترونات الحرة إلى كثافة الحوامل النقية (n_i electron/ cm^3)، وتحدد من خلال خصائص المادة ودرجة الحرارة وتُعطى بالعلاقة الآتية:

$$n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right) \text{ cm}^{-6}$$

where E_G = semiconductor bandgap energy in eV (electron volts)

k = Boltzmann's constant, 8.62×10^{-5} eV/K

T = absolute temperature, K

B = material-dependent parameter, $1.08 \times 10^{31} \text{ K}^{-3} \cdot \text{cm}^{-6}$ for Si

تُعرف طاقة الفجوة بأنها القيمة الصغرى من الطاقة لتحطيم الرابطة التشاركية في البنية البلورية للنصف الناقل.

بشكل مشابه يمكن تعريف كثافة الثقوب الحرة (الفجوة vacancy الذي يتركه الإلكترون عند مغادرته لحزمة التكافؤ وله الشحنة الموجبة +q) بالرمز p وله القيمة نفسها بالنسبة لمادة النصف الناقل النقية.

$$pn = n_i^2$$

من أجل المادة النقية لدينا $n = n_i = p$ (حالة التوازن الحراري thermal equilibrium) وبالتالي



Drift Currents And Mobility In Semiconductors

يتحدد التيار في المادة من خلال المقاومة الكهربائية ρ والناقلية σ عند تطبيق حقل كهربائي. تتحرك أو تنجرف drift حوامل الشحن استجابة للحقل الكهربائي المطبق. الناتج من تطبيق الحقل الكهربائي هو تيار الجرف Drift current. تُعطى علاقة كثافة تيار الجرف j بالعلاقة الآتية:

$$j = Qv \quad (\text{C/cm}^3)(\text{cm/s}) = \text{A/cm}^2$$

where j = current density², the charge in coulombs moving through an area of unit cross section
 Q = charge density², the charge in a unit volume
 v = velocity of charge in an electric field



Drift Currents And Mobility In Semiconductors

نعلم من المغناطيسية أن الجسيمات المشحونة تتحرك استجابة لحقل كهربائي، تُسمى هذه الحركة بالجرف drift والتيار الناتج يُسمى تيار الجرف drift current. تنجرف الشحن الموجبة بسرعة جرف velocity (v cm/s) باتجاه الحقل الكهربائي، بينما الشحن السالبة تنجرف باتجاه معاكس لجهة الحقل الكهربائي المطبق. تتناسب سرعة الجرف طردا مع شدة الحقل الكهربائي E (V/cm)، بثابت، يُسمى هذا الثابت μ mobility، وفقا للعلاقة الآتية:

$$\mathbf{v}_n = -\mu_n \mathbf{E} \quad \text{and} \quad \mathbf{v}_p = \mu_p \mathbf{E}$$

where \mathbf{v}_n = velocity of electrons (cm/s)

\mathbf{v}_p = velocity of holes (cm/s)

μ_n = **electron mobility**, 1350 cm²/V · s in intrinsic Si

μ_p = **hole mobility**, 500 cm²/V · s in intrinsic Si

تزداد سرعة الجرف مع ازدياد شدة الحقل الكهربائي حتى تصل إلى قيمة تستقر عندها السرعة (أقل من سرعة الضوء) مهما زدنا في شدة الحقل الكهربائي، تُسمى هذه القيمة بقيمة الاسباع v_{sat} saturated drift velocity.



Resistivity Of Intrinsic Silicon

تُعطى كثافة تيار الجرف بالنسبة للإلكترونات والثقوب drift current densities كالآتي:

$$j_n^{\text{drift}} = Q_n v_n = (-qn)(-\mu_n E) = qn\mu_n E \quad \text{A/cm}^2$$

$$j_p^{\text{drift}} = Q_p v_p = (+qp)(+\mu_p E) = qp\mu_p E \quad \text{A/cm}^2$$

$$Q_n = (-qn) \text{ and } Q_p = (+qp) \quad (\text{C/cm}^3)$$

حيث:

$$j_T^{\text{drift}} = j_n + j_p = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E$$

تنتج كثافة التيار الكلي على النحو الآتي:

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$

نعرف الناقلية والمقاومة كالآتي:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\Omega \cdot \text{cm})$$

$$\rho = \frac{E}{j_T^{\text{drift}}}$$

and

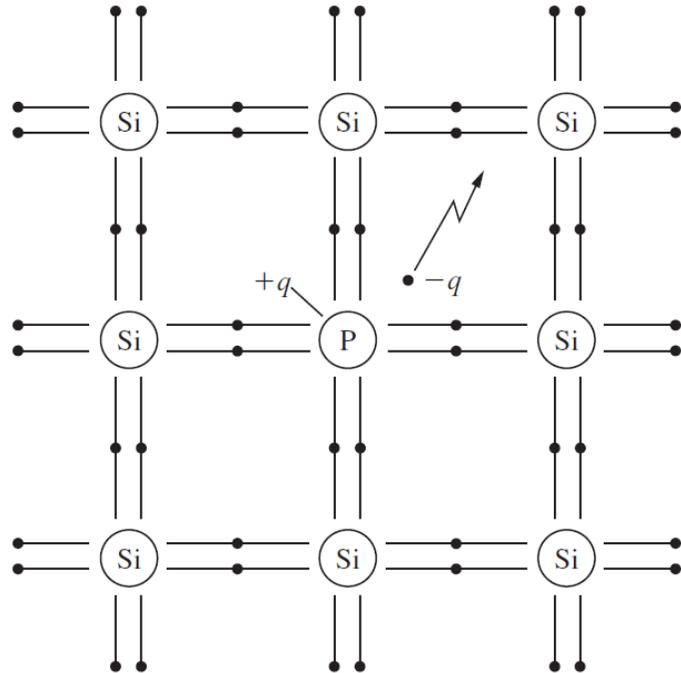
$$\frac{\text{V/cm}}{\text{A/cm}^2} = \Omega \cdot \text{cm}$$

بالتالي تنتج المقاومة كالآتي:



Impurities In Semiconductors

- تنشأ الفائدة الكبيرة لأنصاف النواقل، عندما يتم أشابتها مع عناصر أخرى، تسمى هذه العملية بعملية الإشابة impurity doping، أو اختصارا doping، ويُدعى النصف ناقل بنصف الناقل المشاب. تؤدي عملية الاشابة إلى تغير في قيمة المقاومة النوعية للنصف ناقل ρ .



An extra electron is available from a phosphorus donor atom



Electron and Hole Concentrations in Doped Semiconductors

- نتيجة لعملية الاشابة فان تركيز الالكترونات والثقوب سوف يتغير، إذا كانت الاشابة من نوع العاطية أي $n > p$ فإن النصف ناقل يُدعى نوع n-type. أما إذا كانت الاشابة من نوع الآخذة، فإن $p > n$ ، وتُدعى المادة النصف ناقلة نوع p-type.
- الحوامل التي تملك الأكثرية سنسميها بالحوامل الأكثرية majority carrier، والحوامل التي لها الأقلية سنسميها بالحوامل الأقلية.

$N_D = \text{donor impurity concentration}$ atoms/cm³

$N_A = \text{acceptor impurity concentration}$ atoms/cm³ سنعطي تركيز الالكترونات والثقوب الرموز الآتية:

- بالرغم من الاشابة يجب أن يبقة النصف ناقل حيادي الشحنة charge neutral، بمعنى أن مجموع العدد الكلي للشحن الموجبة مع العدد الكلي للشحن السالبة يساوي الصفر. تمثل الشحن العاطية مع الثقوب الشحنة الموجبة، والشحن الآخذة مع الالكترونات تمثل الشحنة السالبة.

$$q(N_D + p - N_A - n) = 0$$

- ويجب أن تبقى العلاقة صحيحة من أجل نصف الناقل المشاب في حالة التوازن الحراري

$$pn = n_i^2$$



n-TYPE MATERIAL ($N_D > N_A$)

لدينا المعادلتين الآتيتين:

$$pn = n_i^2$$

$$q(N_D + p - N_A - n) = 0$$

بالتعويض ينتج

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

$$n = \frac{(N_D - N_A) + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad \text{and} \quad p = \frac{n_i^2}{n}$$

In practical situations $(N_D - N_A) \gg 2n_i$, and n is given approximately by $n \cong (N_D - N_A)$.



p-TYPE MATERIAL ($N_A > N_D$)

For the case of $N_A > N_D$

بالطريقة نفسها نحصل على قيمة p:

$$p = \frac{(N_A - N_D) + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad \text{and} \quad n = \frac{n_i^2}{p}$$

$(N_A - N_D) \gg 2n_i$, and p is given approximately by $p \cong (N_A - N_D)$



مثال

Find the type and electron and hole concentrations in a silicon sample at room temperature if it is doped with a boron concentration of $10^{16}/\text{cm}^3$ and a phosphorus concentration of $2 \times 10^{15}/\text{cm}^3$.

$$n_i = 10^{10}/\text{cm}^3$$

$$N_A = 10^{16}/\text{cm}^3 \quad \text{and} \quad N_D = 2 \times 10^{15}/\text{cm}^3$$

Since $N_A > N_D$, the material is p -type, and we have $(N_A - N_D) = 8 \times 10^{15}/\text{cm}^3$.

$$p \cong (N_A - N_D) = 8.00 \times 10^{15} \text{ holes}/\text{cm}^3$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{10^{20}/\text{cm}^6}{8.00 \times 10^{15}/\text{cm}^3} = 1.25 \times 10^4 \text{ electrons}/\text{cm}^3$$

$$pn = 10^{20}/\text{cm}^6$$



THE PN JUNCTION

- عند تشكيل الوصلة pn، فإن المنطقة n تخسر الكترولونات من خلال الانتشار diffusion (فرق في التركيز) عبر الوصلة pn، هذا يردي إلى انشاء طبقة من الشحن الموجبة بالقرب من الوصلة.
- بشكل مشابه لانتشار الالكترولونات، فإن الثقوب تنتشر من المنطقة p عبر الوصلة، مشكلة طبقة الشحن السالبة بالقرب من الوصلة، تُسمى المنطقة الناشئة بالمنطقة المحرمة depletion region.
- تشكل هذه المنطقة بما يُعرف بالحاجز الكموني Barrier potential.
- تتوسع المنطقة المحرمة خلال الزمن، حتى تصل حالة التوازن، بحيث لا يوجد انتشار للإلكترولونات والثقوب. ويبقى عرض هذه المنطقة ثابتاً.
- نتيجة لوجود شحن متعاكسة على طرفي هذه المنطقة فإنه ينشأ حقل كهربائي، اتجاهه من الشحن الموجبة إلى الشحن السالبة. يُشكل الحقل الكهربائي حاجزاً أمام عبور الالكترولونات، مما يتطلب طاقة إضافية للإلكترولون لعبور المنطقة المحرمة.
- قيمة فرق الكمون بين طرفي المنطقة يساوي الجهد اللازم تطبيقه لعبور الإلكترولون المنطقة المحرمة. تختلف قيمة هذا الجهد من نصف ناقل إلى آخر، بالنسبة للسيلكون يساوي 0.7 V، وبالنسبة للجرمانيوم يساوي 0.3 V عند حرارة الغرفة.

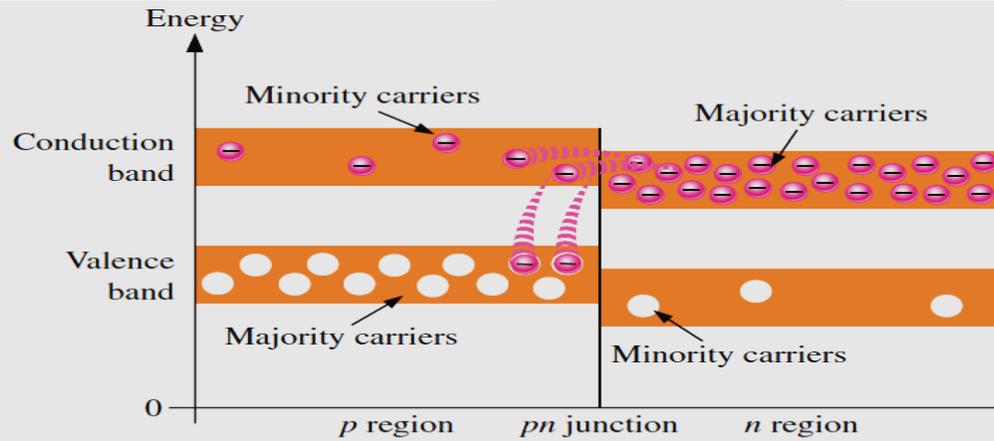


Energy Diagrams of the PN Junction and Depletion Region

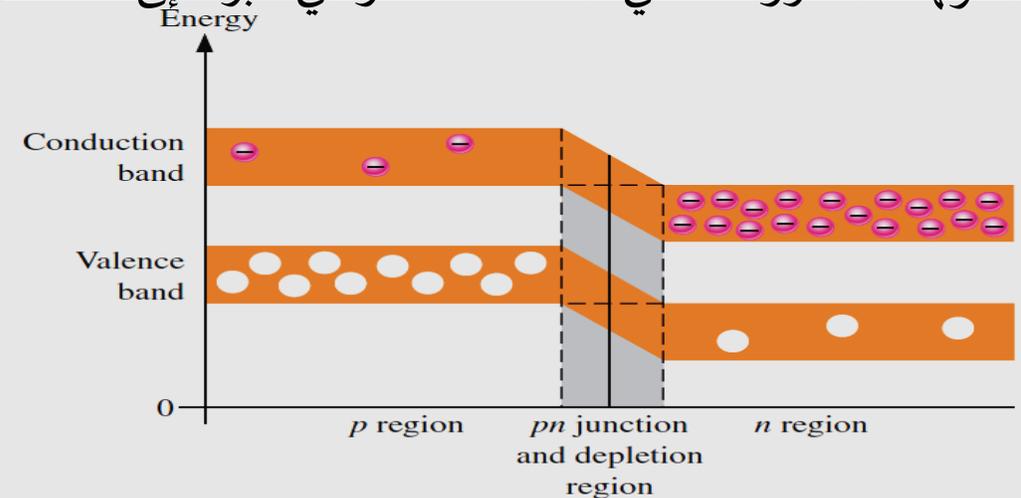
عادة تكون مستويات الطاقة (التكافؤ والتوصيل) بالنسبة للمنطقة n أقل من مستويات الطاقة للمنطقة p.

تنتشر الإلكترونات التي تحمل طاقة كافية من المنطقة n إلى المنطقة p، عند وصولها المنطقة p تفقد طاقتها، بالتالي تنتقل من حزمة التوصيل إلى حزمة التكافؤ.

مع استمرار الانتشار تتشكل المنطقة المحرمة، وينخفض مستوى الطاقة للمنطقة n (حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل) نتيجة لخسارتها للإلكترونات التي تملك الطاقة والتي عبرت إلى المنطقة.



(a) At the instant of junction formation



(b) At equilibrium

