كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : الكترونيات١

المحاضرة : الثانية/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

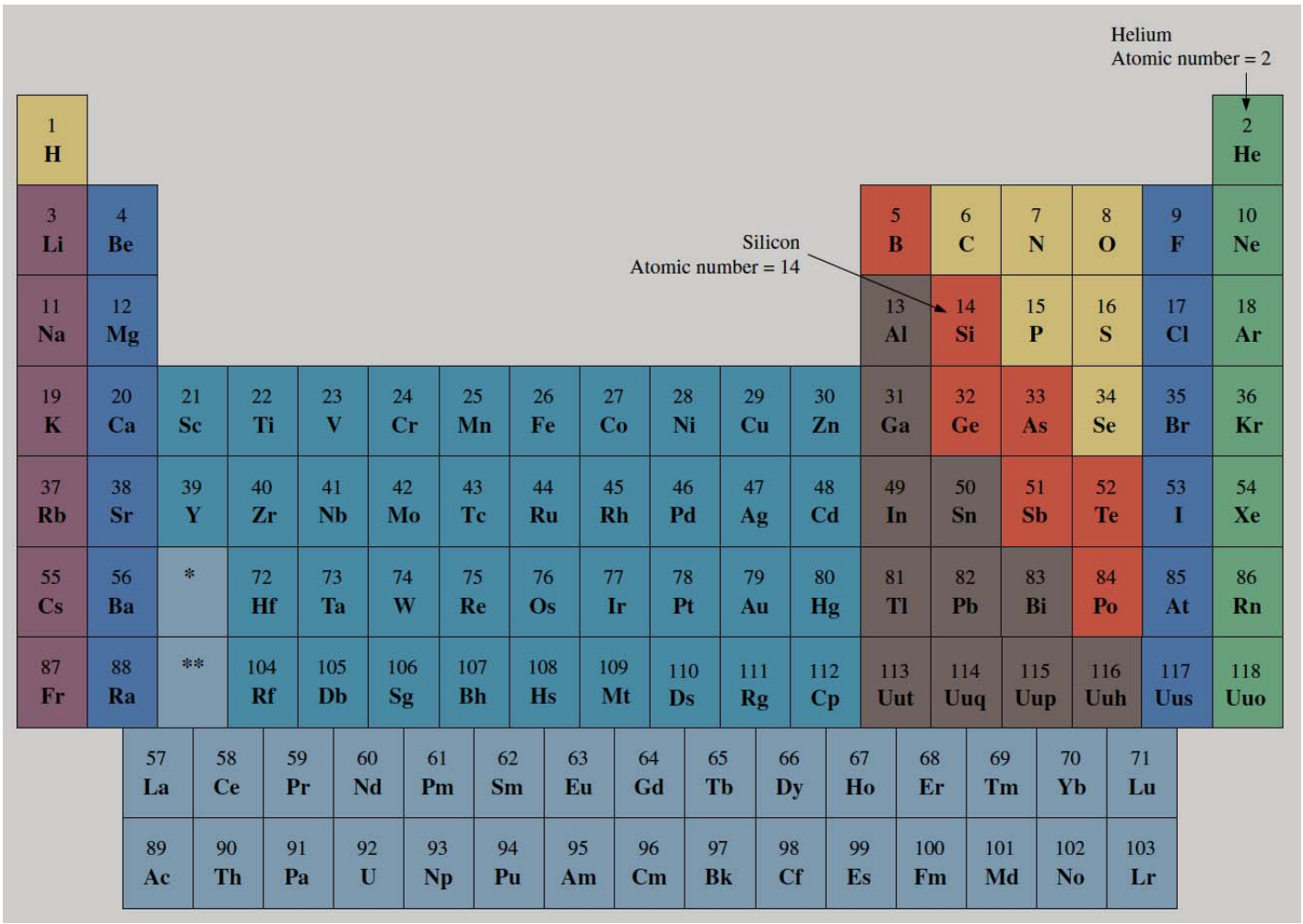
2025

11

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

إلكترونيات 1

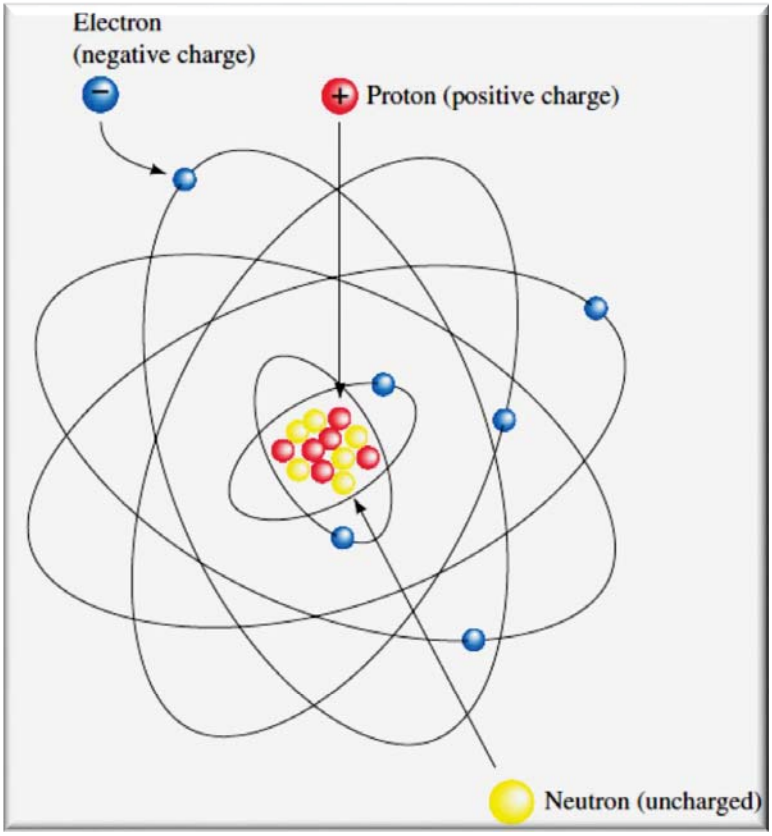
المحاضرة الثانية

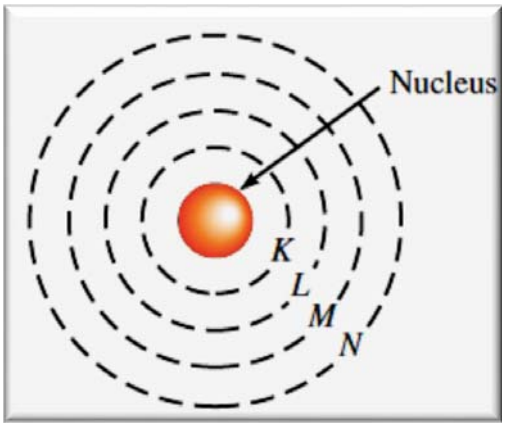


Atomic Theory Review

- تُعدّ الذرة البنية الأساسية للمادة، تتألف من النواة (مكونة من بروتونات ونترونات) و من الالكترونات التي تتحرك وفقاً لمدرات 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 الكترونيين، بينما المدار الثاني على ثمانية الكترونيات المدار الثالث على 18 الكترون، وهكذا.
- عدد الالكترونات في أي مدار يتبع لنوع العنصر وفقاً لتوضعه في جدول التصنيف الدوري.
- النحاس مكون من 29 الكترون، موزعة على النحو الآتي:
  - المدار الأول K يحوي 2 الكترون
  - المدار الثاني L يحوي 8 الكترونات
  - المدار الثالث M يحوي 18 الكترونات
  - المدار الرابع N يحوي الكترون وحيد (بالرغم من أن هذا المدار يمكن أن يحوي 32 الكترون).
- يُسمى المدار الأخير بمدار التكافؤ **valence shell** وتُسمى الالكترونات في المدار الأخير بإلكترونات التكافؤ valence electrons

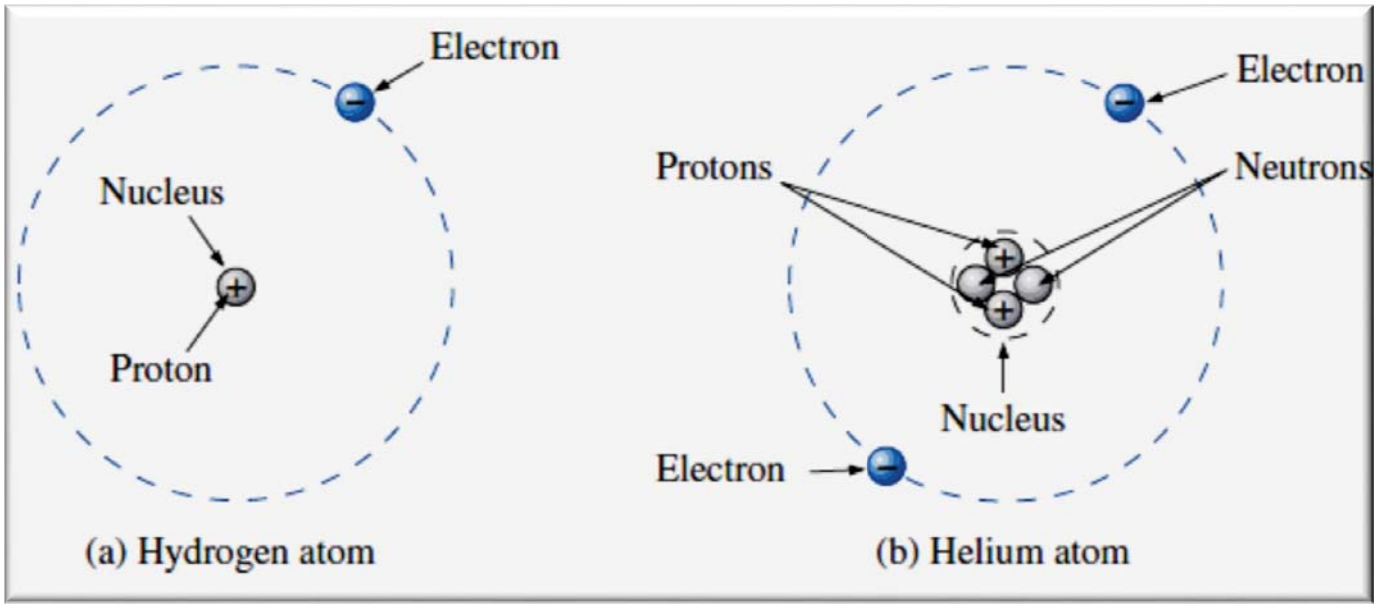
Bohr model of the atom



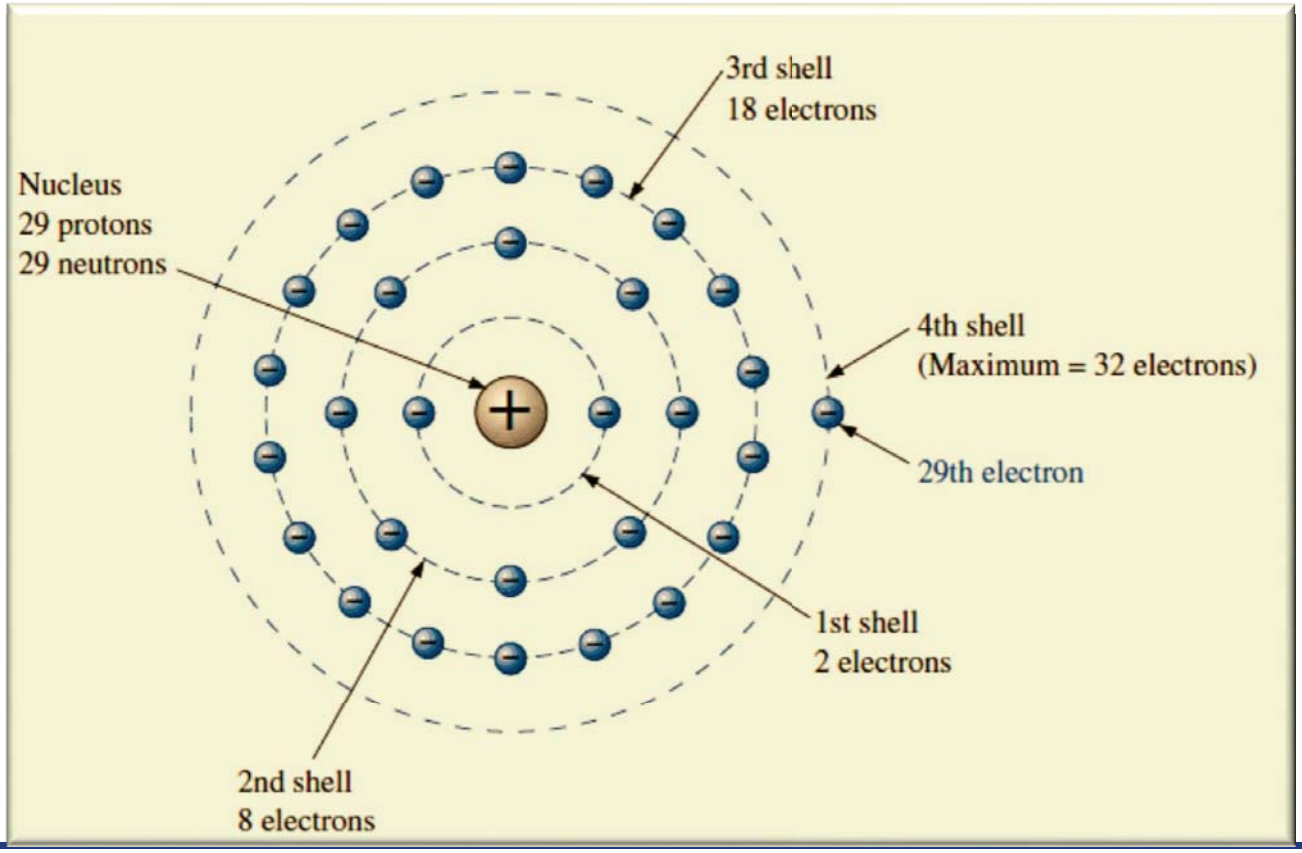


Simplified representation of the atom. Electrons travel in roughly spherical orbits called "**shells**"

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 والنيترونات، وتدور حولها الالكترونات.
- 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 التعين Uncertainly 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:

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

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

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

The Quantum Model

- بالنسبة لمبدأعدم التعين 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 شروديغنر معادلة تفاضلية خطية من الدرجة الثانية لدراسة سلوك الإلكترون، وتُعطى على النحو الآتي:

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

حيث: ψ(x) يُسمى تابع الموجة
U(x) الطاقة الكامنة للجسيم
E(x) الطاقة الكلية
ħ ثابت بلانك =h/2π

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

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

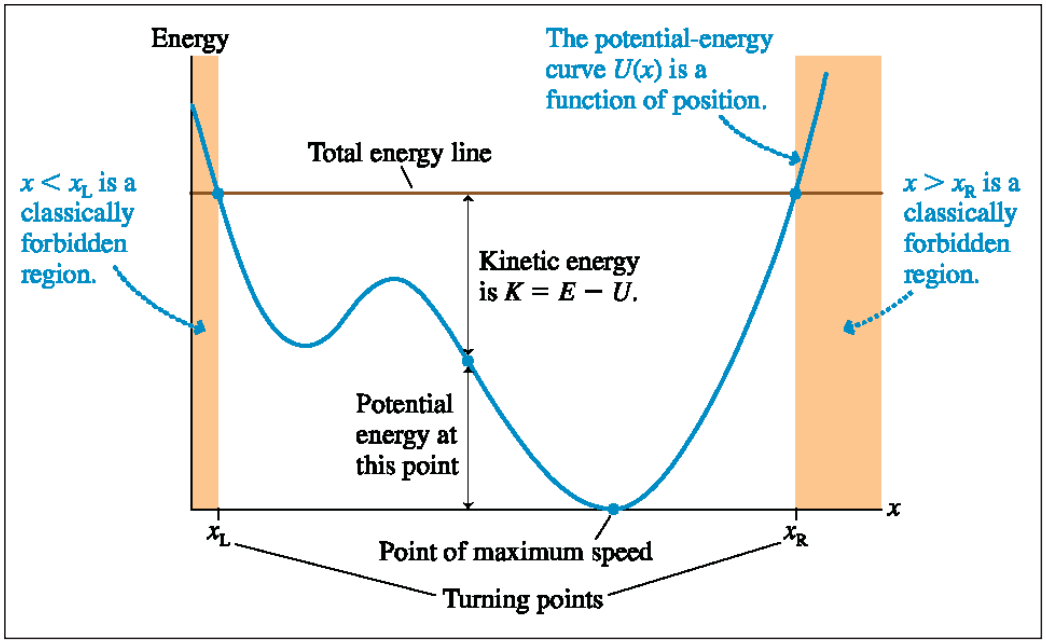
ينقسم كل مستوى طاقة أساسي إلى عدة مستويات طاقة جزئية كالآتي:
ويُسمى العدد الكمومي المداري

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

Quantum-Mechanical Models

The exact description of a microscopic atom or a solid is extremely complicated. Our only hope for using quantum mechanics effectively is to make a number of simplifying assumptions—that is, to make a **quantum-mechanical model** of the situation.

We will use energy Diagrams extensively to portray quantum-mechanical models.



energy diagram

The Quantum Model

- تأخذ المدارات الأساسية عدد من الالكترونات وفقا لكل مدار، فمثلا 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 لمبد باولي للاستبعاد.

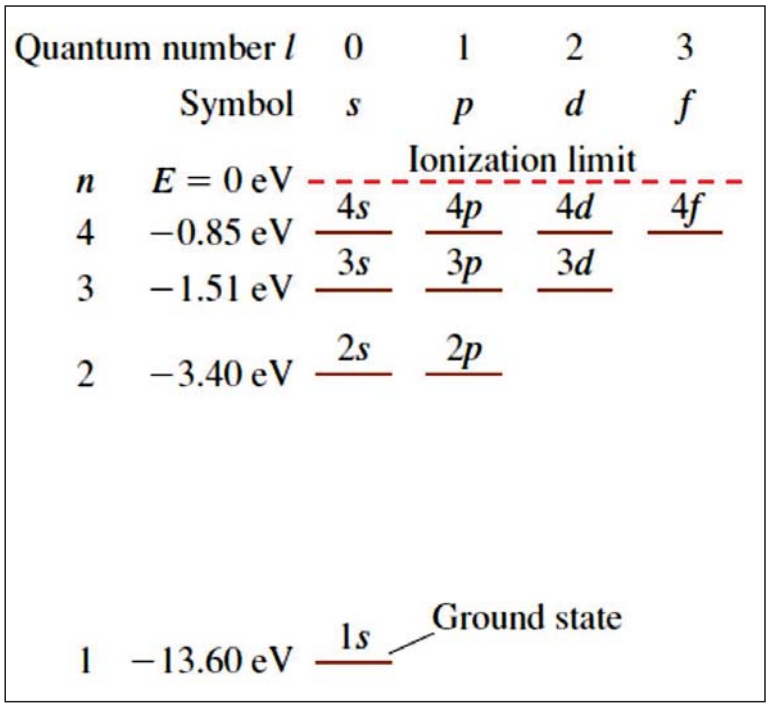
Electron configuration table for nitrogen.

$1s^2$	2 electrons in shell 1, orbital *s*
$2s^2\ 2p^3$	5 electrons in shell 2: 2 in orbital *s*, 3 in orbital *p*

silicon (Si) atom using an electron configuration table

$1s^2$	2 electrons in shell 1, orbital *s*
$2s^2\ 2p^6$	8 electrons in shell 2: 2 in orbital *s*, 6 in orbital *p*
$3s^2\ 3p^2$	4 electrons in shell 3: 2 in orbital *s*, 2 in orbital *p*

Energy-level diagram for the hydrogen atom

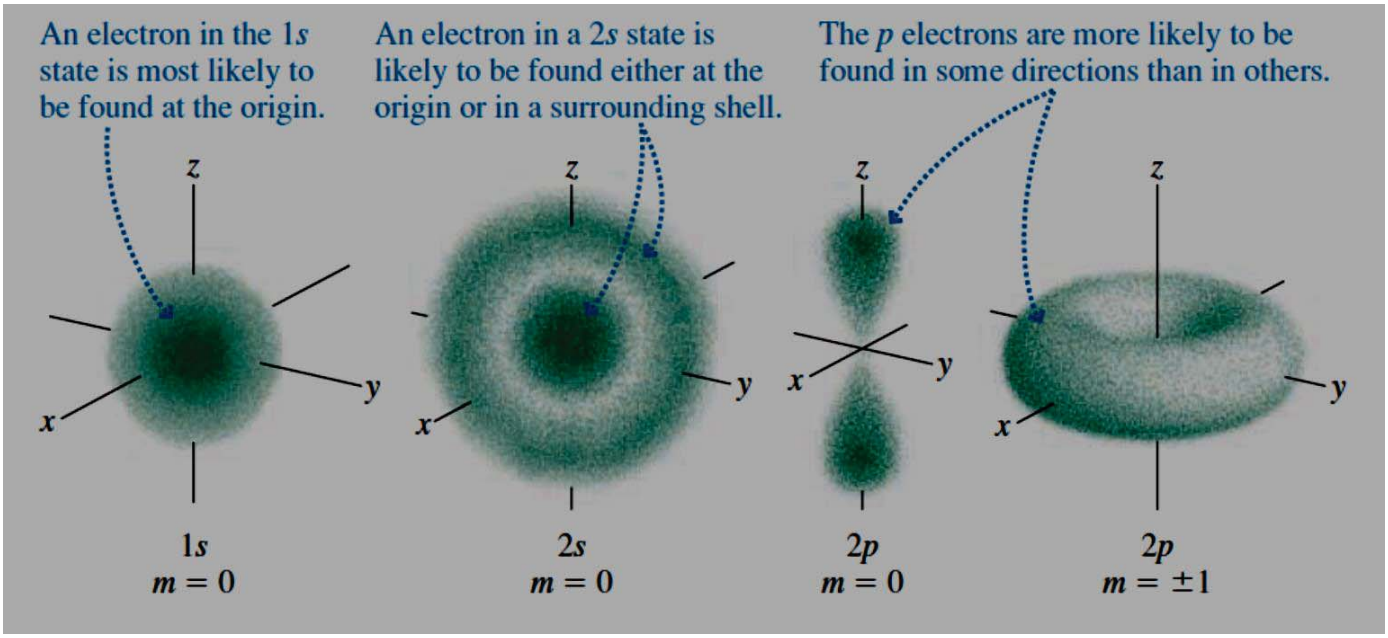


السوية ذات الطاقة الأقل هي السوية الأرضية لذرة الهيدروجين، والطاقة E1 هي طاقة التأيين وهي أقل طاقة لازمة لتشكيل أيون الهيدروجين بنزع الإلكترون من سوية الطاقة الأرضية.

وجميع السويات حيث n>1 هي سويات طاقتها أعلى من السوية الأرضية وهي سويات مستثارة .

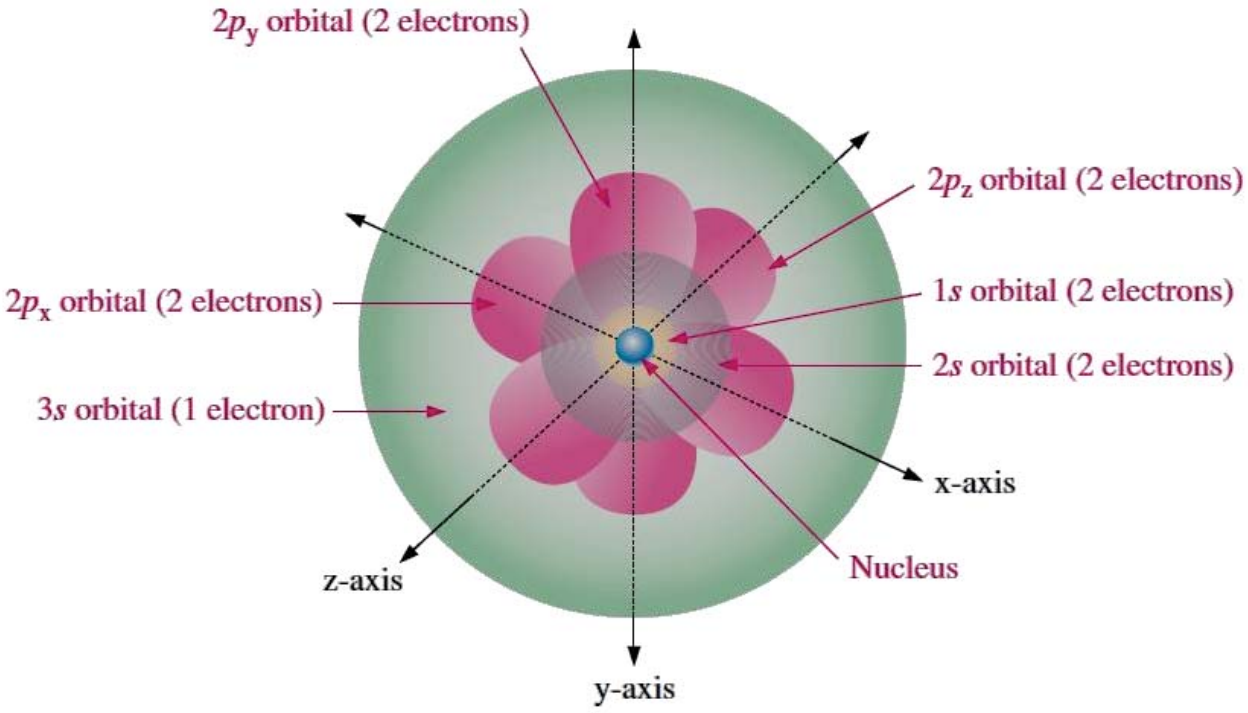
The Hydrogen Atom: Probabilities

The probability densities of the electron in the 1s, 2s, and 2p states of hydrogen.



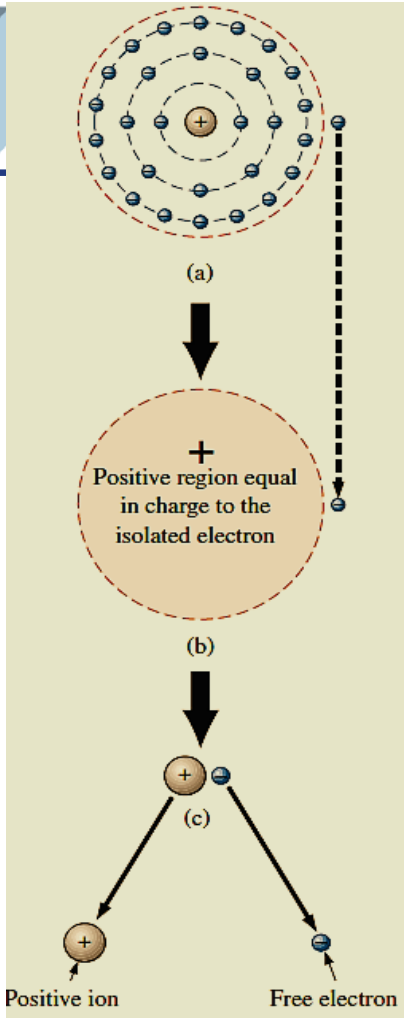
مثال

Three-dimensional quantum model of the sodium atom, showing the orbitals and number of electrons in **each orbital.**



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 بالإلكترونات الحرة free electrons.
- 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 حيداً 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 للإلكترون تصبح شاردة سالبة negative ion.



Conductors

- الناقل: يكون المعدن ناقلاً كهربائياً جيداً، إذا كان يملك عدد كبير من الالكترونات 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.

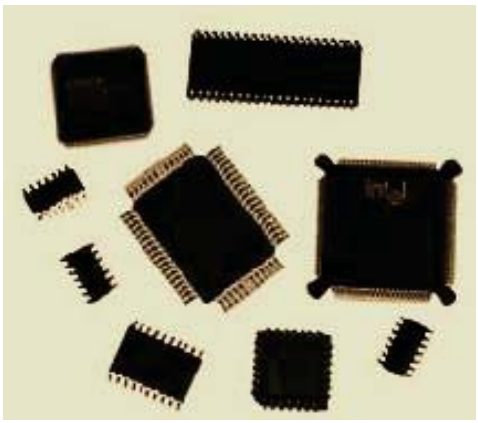
في حال تطبيق جهد كهربائي كبير على العازل، يجبر الالكترونات على التحرر من روابطها، مما يؤدي انهيار break down العازل وتحويله إلى ناقل كهربائي.

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 السيليكون والجرمانيوم Silicon and Germanium.
- تشكل هذه العناصر الأساس في تصنيع الثنائيات والترانزستورات والدارات المتكاملة.



	IIIA	IVA	VA	VIA
	5 10.811 B Boron	6 12.01115 C Carbon	7 14.0067 N Nitrogen	8 15.9994 O Oxygen
IIB	13 26.9815 Al Aluminum	14 28.086 Si Silicon	15 30.9738 P Phosphorus	16 32.064 S Sulfur
30 65.37 Zn Zinc	31 69.72 Ga Gallium	32 72.59 Ge Germanium	33 74.922 As Arsenic	34 78.96 Se Selenium
48 112.40 Cd Cadmium	49 114.82 In Indium	50 118.69 Sn Tin	51 121.75 Sb Antimony	52 127.60 Te Tellurium
80 200.59 Hg Mercury	81 204.37 Tl Thallium	82 207.19 Pb Lead	83 208.980 Bi Bismuth	84 (210) Po Polonium

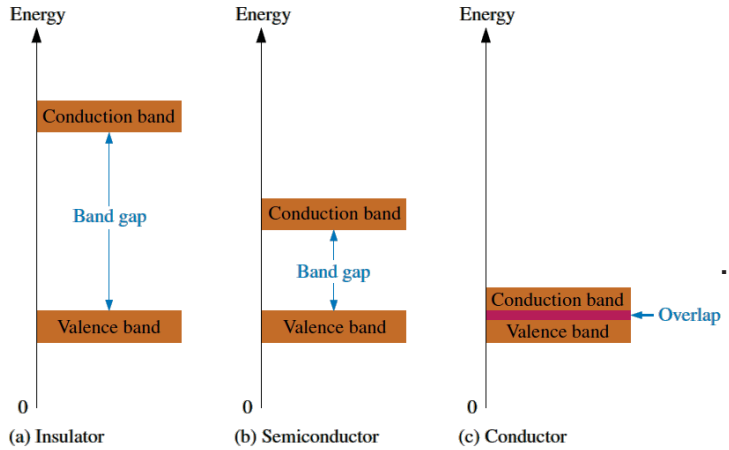
المقاومة النوعية ρ

تتميز العوازل عن النواقل وعن أنصاف النواقل من خلال المقاومة النوعية ρ وفقاً للجدول الآتي:

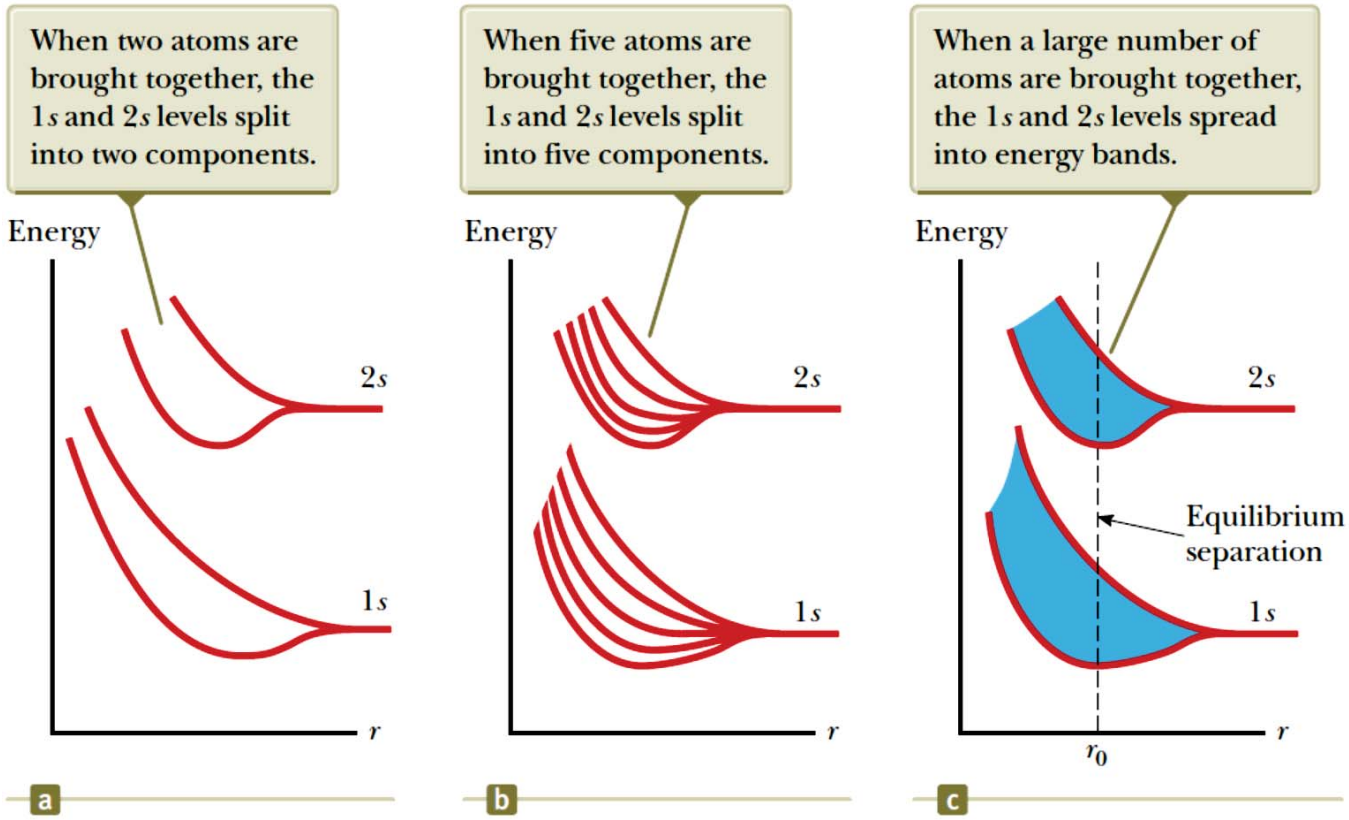
MATERIALS	RESISTIVITY (Ω · cm)
Insulators	$10^5 < \rho$
Semiconductors	$10^{-3} < \rho < 10^5$
Conductors	$\rho < 10^{-3}$

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 إلكتروناً حراً، 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 بواحدة الكترون-فولط eV.
- هذا الإلكترون الحر لا ينتمي 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.



Energy Band Structures In Solids



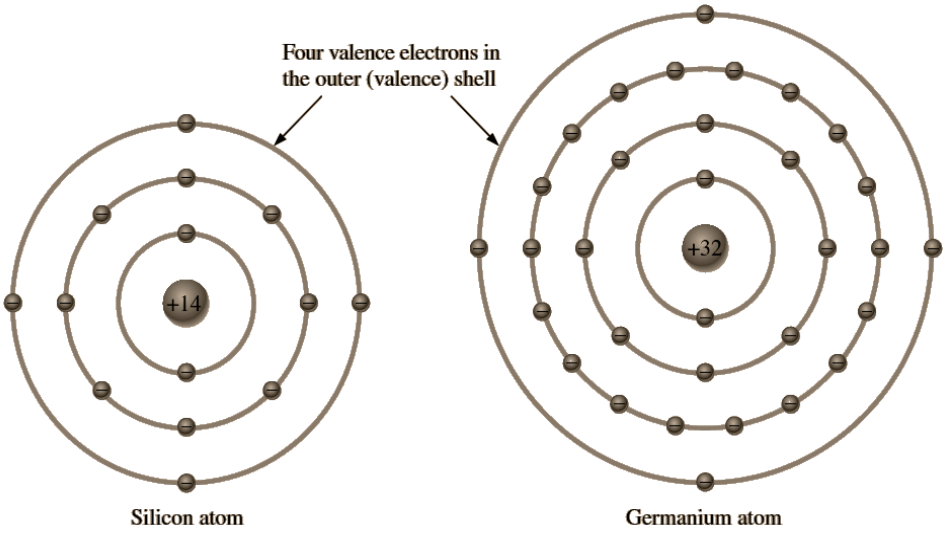
Energy-Gap Values for Some Semiconductors

Crystal	E_g (eV) 0 K	300 K
Si	1.17	1.14
Ge	0.74	0.67
InP	1.42	1.34
GaP	2.32	2.26
GaAs	1.52	1.42
CdS	2.58	2.42
CdTe	1.61	1.56
ZnO	3.44	3.2
ZnS	3.91	3.6

Silicon and Germanium

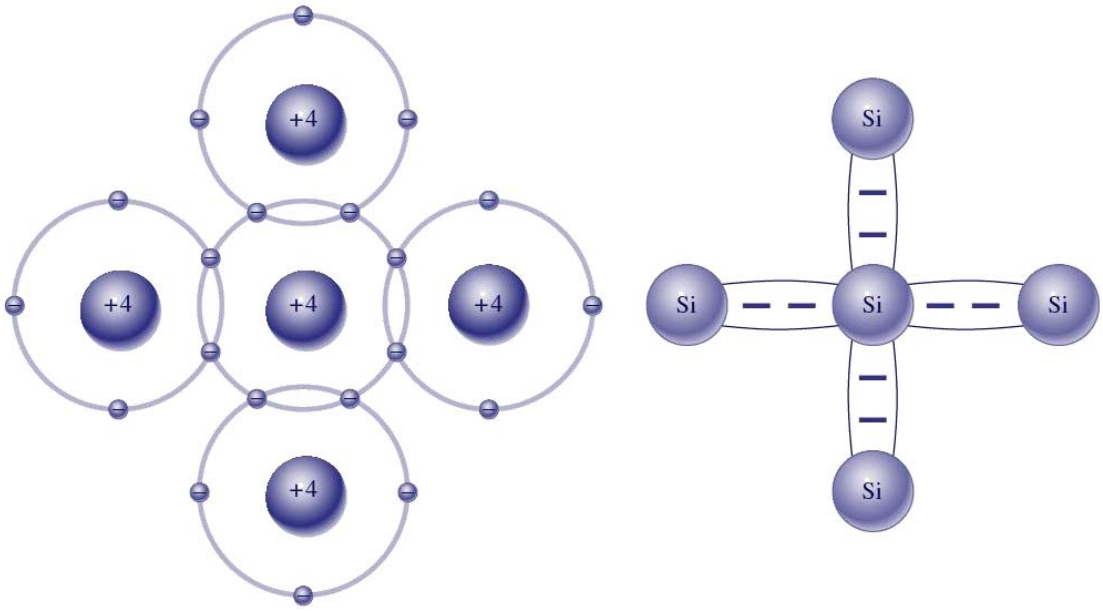
يستخدم السيلكون في الديودات والترانزستورات والدارات المتكاملة وأجهزة أنصاف النواقل، ويمتلك السيلكون والجرمانيوم أربع إلكترونات تكافؤ في المدار الأخير.

يملك السيلكون والجرمانيوم على مداره الأخير أربع الكترونات/ من الملاحظ أن الكترونات التكافؤ للجرمانيوم تتوضع على المدار الرابع، بينما هي في السيلكون على المدار الثالث. هذا يعني أن الكترونات التكافؤ للجرمانيوم تملك طاقة أكثر من الكترونات التكافؤ للسيلكون، بالتالي تحتاج لطاقة أقل من السيلكون لتنتقل الالكترونات 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 استخداما في قائمة أنصاف النواقل.



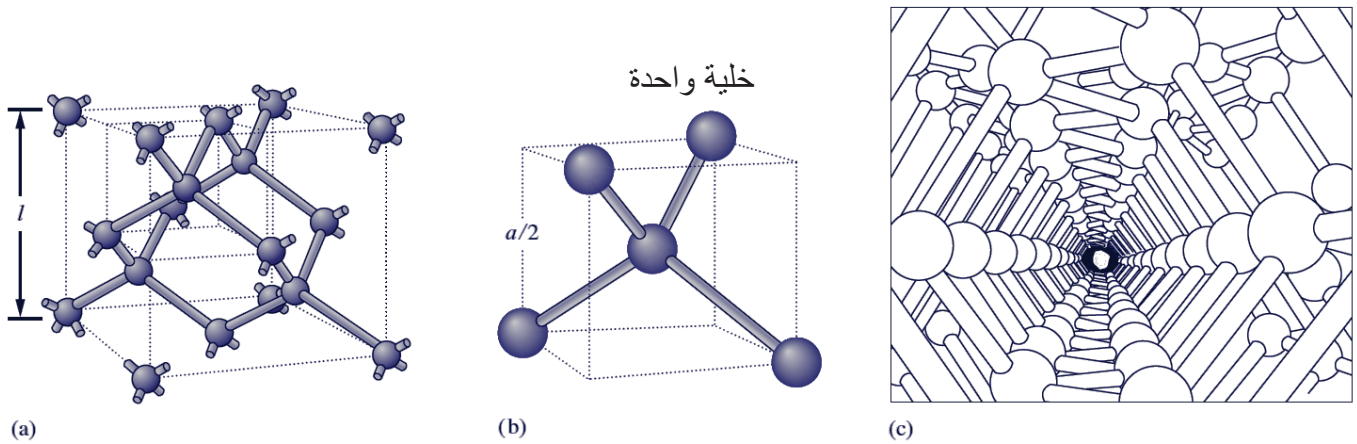
Covalent Bond Model

- 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 للسيليكون 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).



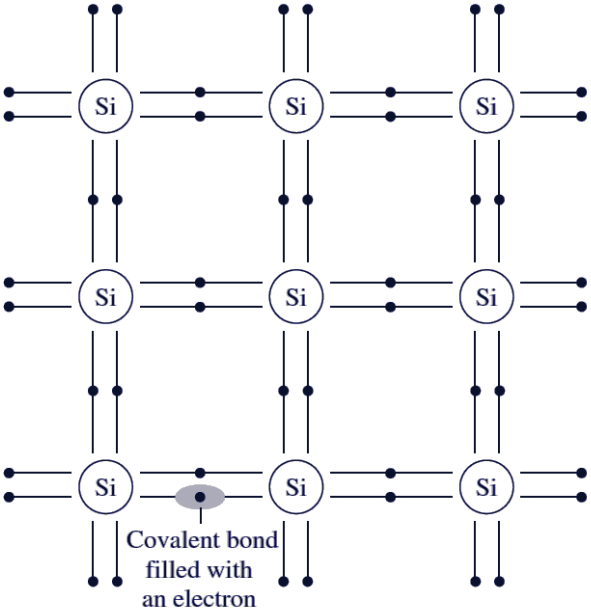
Covalent Bonds

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

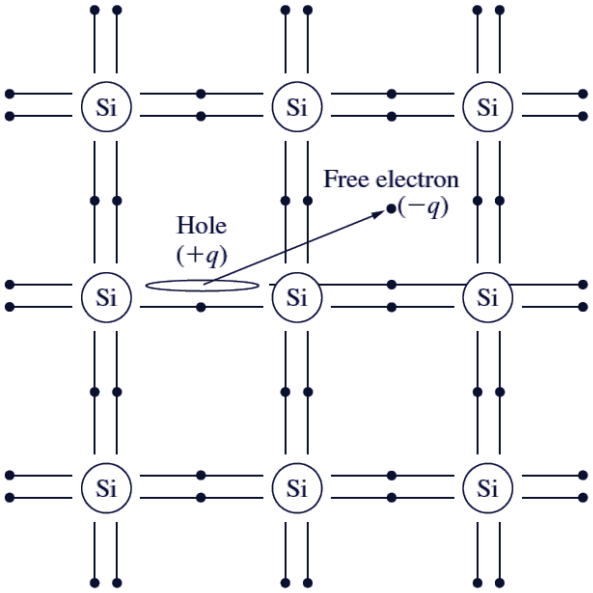


البنية البلورية للسيليكون حيث l = 0.543 nm

Covalent Bonds



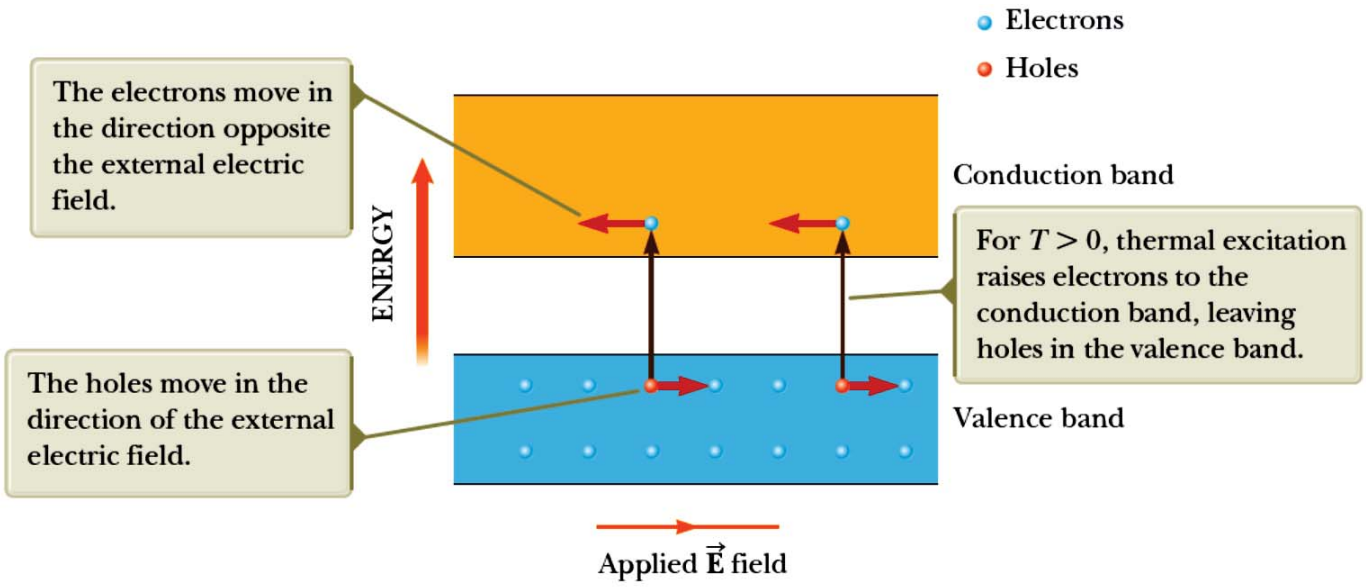
Two-dimensional silicon lattice with shared covalent bonds. At temperatures approaching absolute zero, 0 K, all bonds are filled, and the outer shells of the silicon atoms are completely full.



An electron–hole pair is generated whenever a covalent bond is broken

Semiconductivity

Movement of charges (holes and electrons) in an intrinsic semiconductor



Energy-Gap Values for Some Semiconductors

Band Gap Energies, Electron and Hole Mobilities, and Intrinsic Electrical Conductivities at Room Temperature for Semiconducting Materials

Material	*Band Gap (eV)*	*Electrical Conductivity* $[(\Omega \cdot m)^{-1}]$	*Electron Mobility* $(m^2/V \cdot s)$	*Hole Mobility* $(m^2/V \cdot s)$
		Elemental		
Si	1.11	4×10^{-4}	0.14	0.05
Ge	0.67	2.2	0.38	0.18
		III–V Compounds		
GaP	2.25	—	0.03	0.015
GaAs	1.42	10^{-6}	0.85	0.04
InSb	0.17	2×10^4	7.7	0.07
		II–VI Compounds		
CdS	2.40	—	0.03	—
ZnTe	2.26	—	0.03	0.01

gallium arsenide (GaAs)
cadmium sulfide (CdS)

indium antimonide (InSb);
zinc telluride (ZnTe)

Covalent Bond Model

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

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

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

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

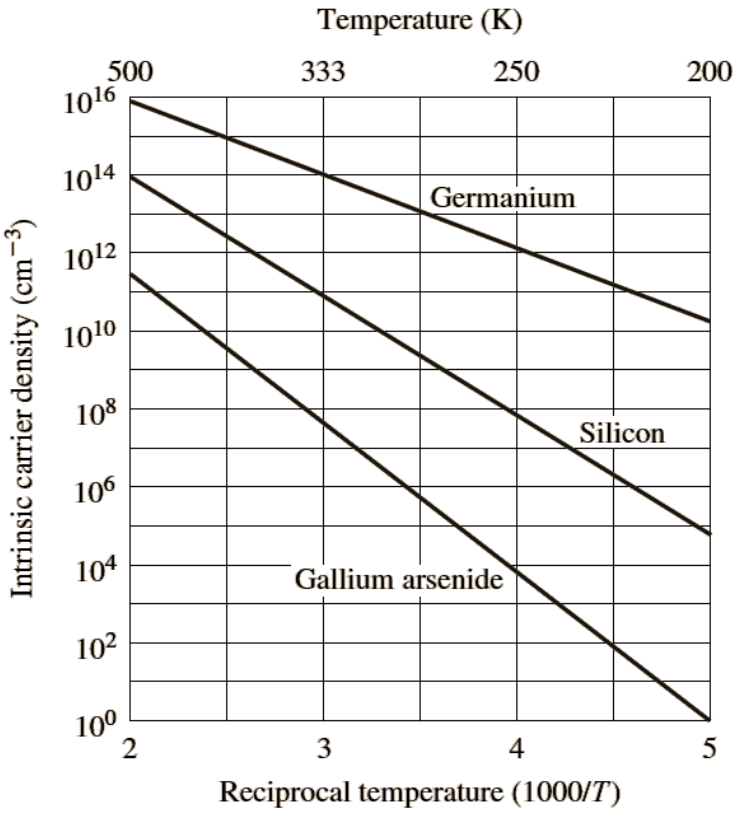
T = absolute temperature, K

B = material-dependent parameter, 1.08×10^{31} K$^{-3} \cdot$ 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.
من أجل المادة النقية لدينا n = ni = p (حالة التوازن الحراري **thermal equilibrium**) وبالتالي

$$pn = n_i^2$$

Covalent Bond Model



Intrinsic carrier density versus temperature

	B ($K^{-3} \cdot cm^{-6}$)	E_G (eV)
Si	1.08×10^{31}	1.12
Ge	2.31×10^{30}	0.66
GaAs	1.27×10^{29}	1.42

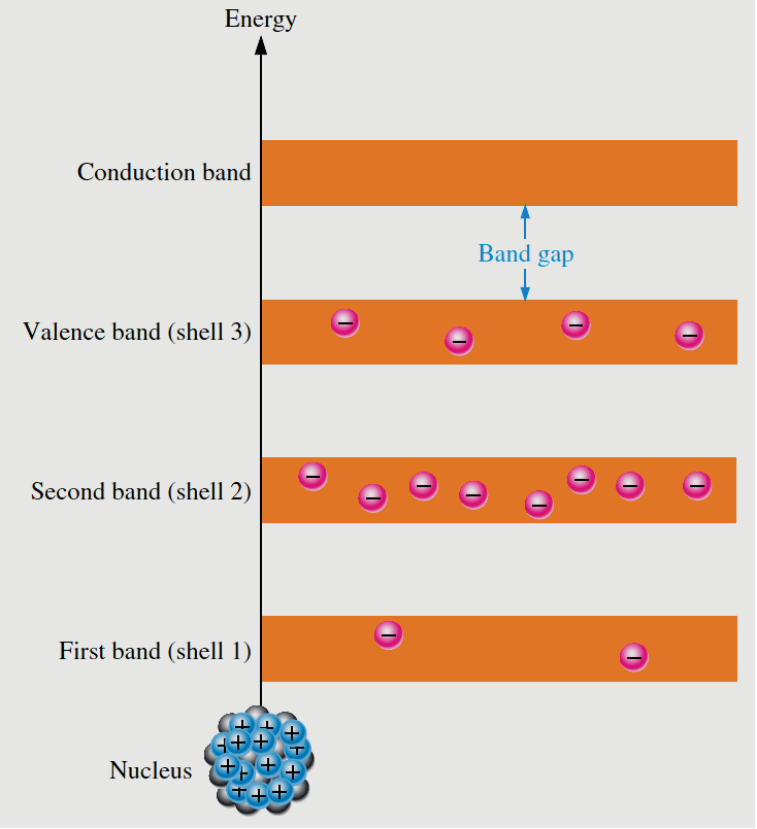
مثال

- أحسب قيمة n_i للسيلكون في درجة حرارة الغرفة (300K).

$$n_i^2 = 1.08 \times 10^{31}\ (\mathrm{K}^{-3} \cdot \mathrm{cm}^{-6})(300\ \mathrm{K})^3 \exp\left[\frac{-1.12\ \mathrm{eV}}{(8.62 \times 10^{-5}\ \mathrm{eV/K})(300\ \mathrm{K})}\right]$$

$$n_i^2 = 4.52 \times 10^{19}/\mathrm{cm}^6 \quad \text{or} \quad n_i = 6.73 \times 10^9/\mathrm{cm}^3$$

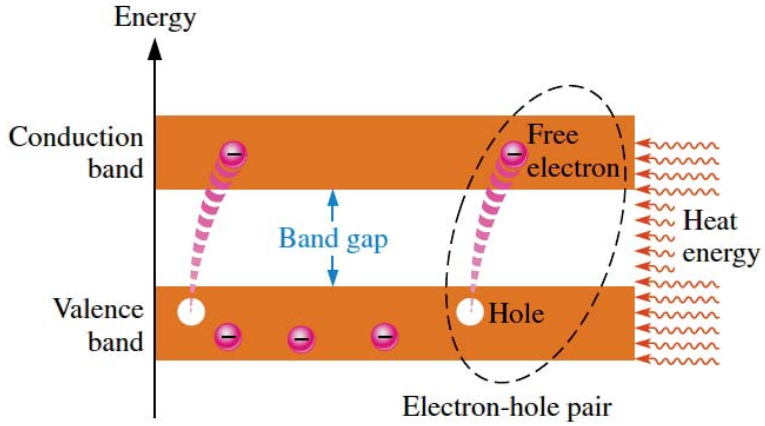
Covalent Bond Model



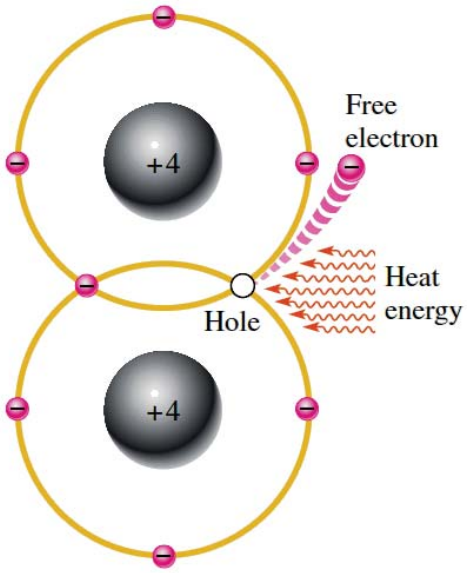
مخطط فجوة الطاقة لذرة سيلكون غير مستثارة في بلورة سيلكون نقية، لايوجد إلكترونات في نطاق التوصيل

Conduction Electrons and Holes

توليد أزواج إلكترون – ثقب في بلورة السيلكون، الإلكترون في نطاق التوصيل هو إلكترون حر.



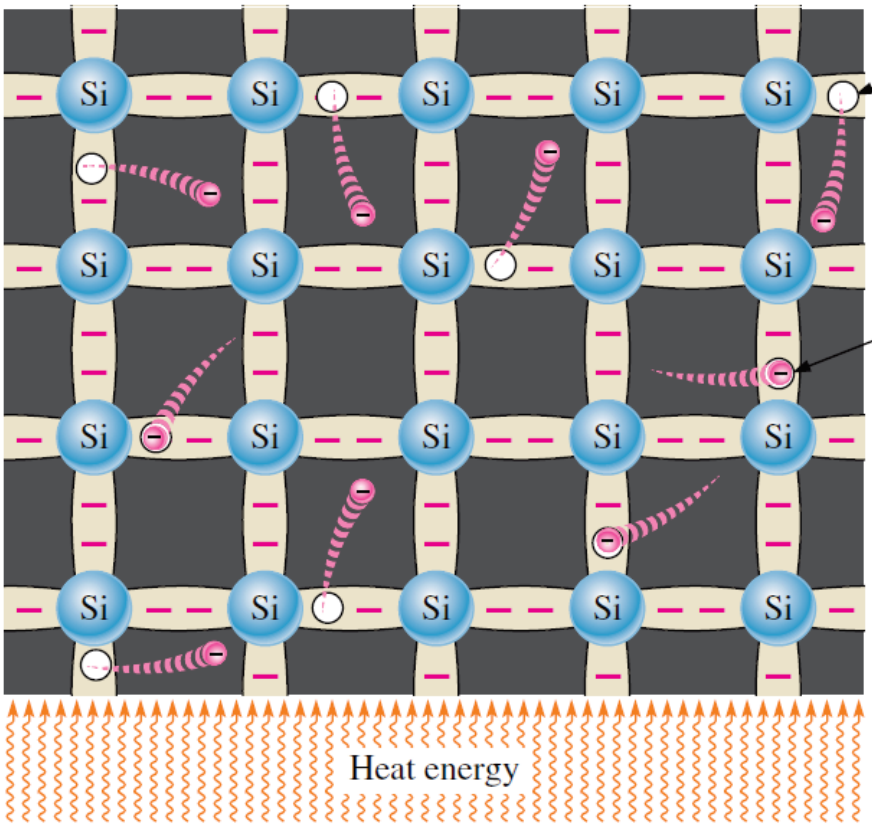
(a) Energy diagram



(b) Bonding diagram

من أجل كل إلكترون يغادر إلى منطقة التوصيل، يترك ثقب في منطقة التكافؤ **electron-hole pair**.
يحصل الاتحاد **recombination** بين الإلكترون والثقب، في حال فقدان الإلكترون للطاقة في منطقة التوصيل، ويتوجب عليه العودة إلى حزمة التكافؤ.

Conduction Electrons and Holes

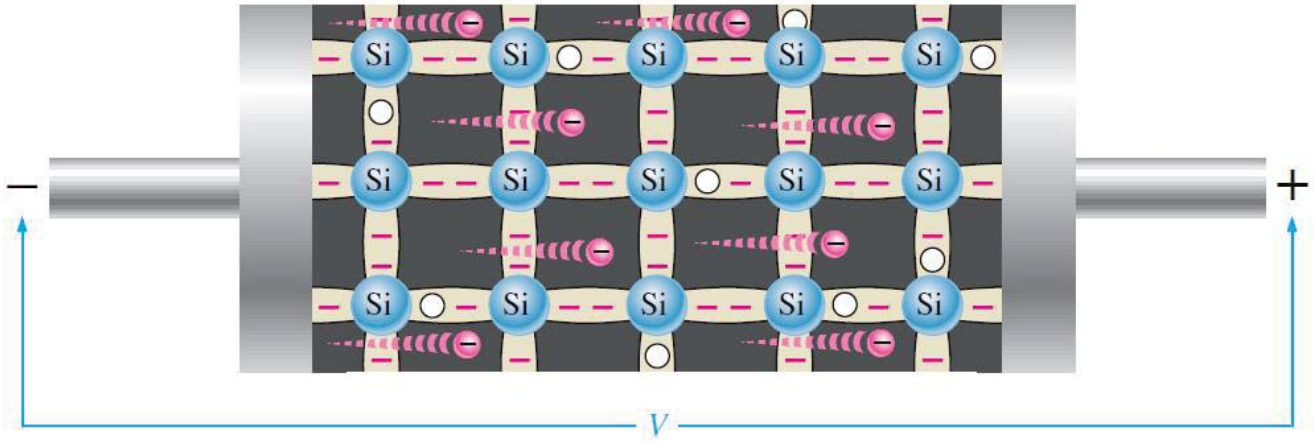


توليد زوج إلكترون - ثقب

إعادة تركيب الثقب والإلكترون

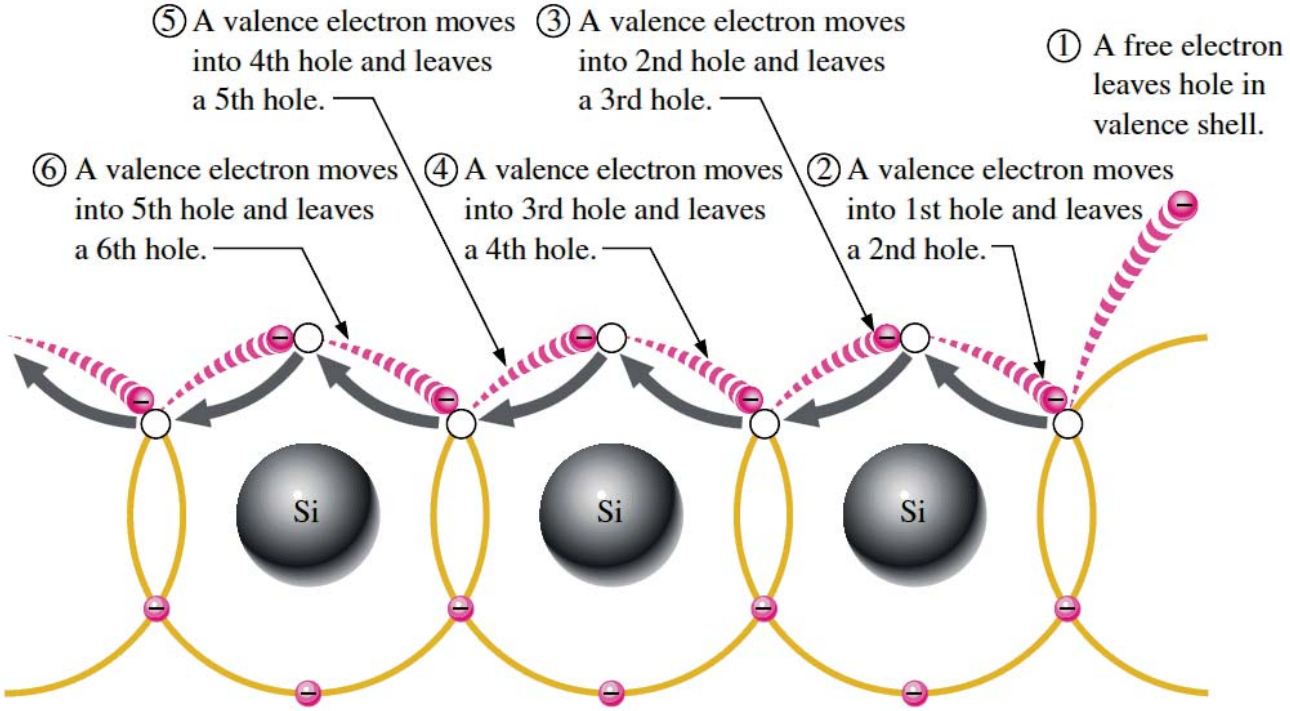
أزواج إلكترون – ثقب في بلورة السيلكون.
الإلكترونات الحرة تبدأ بالتولد بشكل مستمر مع ملئ بعض الثقوب بالإلكترونات

Electron Current



Electron current in intrinsic silicon is produced by the movement of thermally generated free electrons.

Hole Current



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:

$$j = Q\mathbf{v} \qquad (\mathrm{C/cm^3})(\mathrm{cm/s}) = \mathrm{A/cm^2}$$

where j = current density[2], the charge in coulombs moving through an area of unit cross section

Q = charge density[2], the charge in a unit volume

$\mathbf{v}$ = 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:

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

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

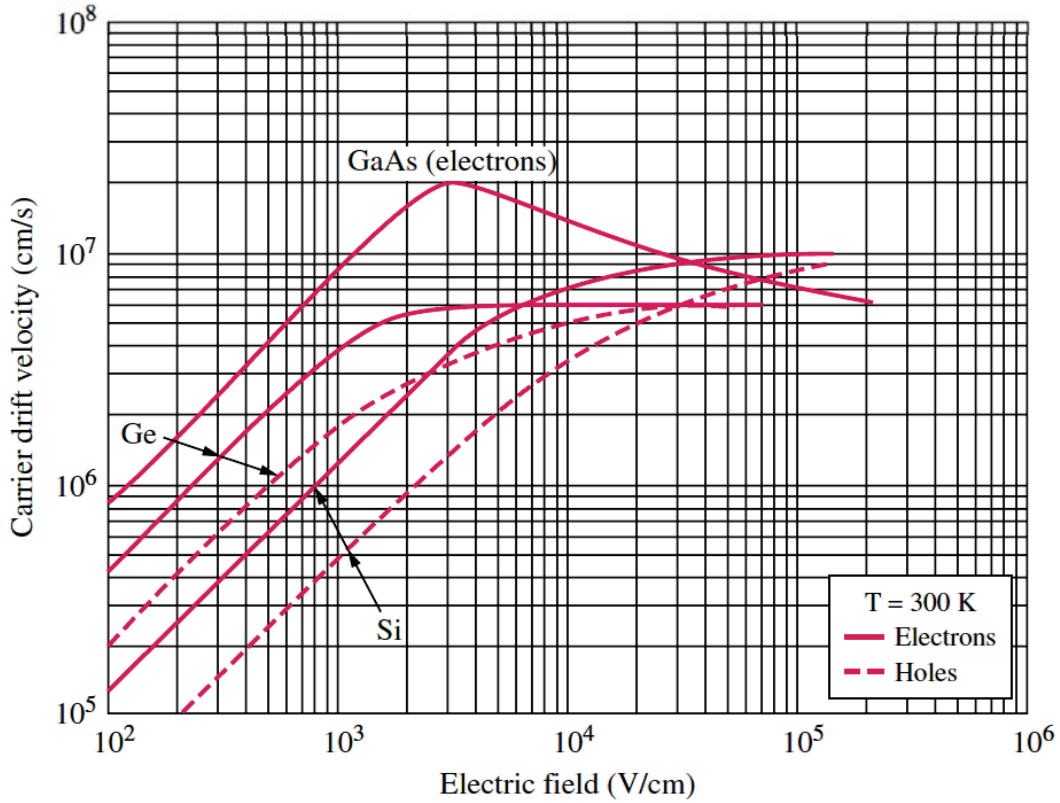
$\mathbf{v}_p$ = velocity of holes (cm/s)

μ_n = **electron mobility,** 1350 $cm^2/V \cdot s$ in intrinsic Si

μ_p = **hole mobility,** 500 $cm^2/V \cdot s$ 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 الاشباع **saturated drift velocity** v_{sat}.

Drift Currents And Mobility In Semiconductors



Resistivity Of Intrinsic Silicon

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

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

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

حيث: $Q_n = (-qn)$ and $Q_p = (+qp)$ (C/cm^3)

تنتج كثافة التيار الكلي على النحو الآتي: $j_T^{\text{drift}} = j_n + j_p = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E$

نعرف الناقلية والمقاومة كالآتي:

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

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

بالتالي تنتج المقاومة كالآتي:

$$\rho = \frac{E}{j_T^{\text{drift}}} \qquad \text{and} \qquad \frac{\text{V/cm}}{\text{A/cm}^2} = \Omega \cdot \text{cm}$$

مثال

- أحسب المقاومة للسيلكون النقي في درجة حرارة الغرفة، وقم بتصنيفه إلى عازل أو نصف ناقل أو ناقل، مع العلم أن: $n_i = 10^{10}/\text{cm}^3$

$$\sigma = (1.60 \times 10^{-19})[(10^{10})(1350) + (10^{10})(500)] \qquad (\text{C})(\text{cm}^{-3})(\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$$

$$= 2.96 \times 10^{-6}\ (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 3.38 \times 10^{5}\ \Omega \cdot \text{cm}$$

MATERIALS	RESISTIVITY (Ω · cm)
Insulators	$10^5 < \rho$
Semiconductors	$10^{-3} < \rho < 10^5$
Conductors	$\rho < 10^{-3}$

بالمقارنة مع الجدول يكون السيلكون النقي عازل في درجة حرارة الغرفة.

مكتبة A to Z