أشباه الموصلات Semiconductors

المفردات

الفصل الاول

التأصر، الهياكل البلورية، وعلوم المواد (Bonding, Crystal Structures, and Materials Science)

1. التأصر التساهمي والمعدني والأيوني
2. علم البلورات
3. العيوب والأسطح
4. المواد الصلبة غير المتبلورة (عشوائية التبلور)

الفصل الثاني

نظرية المواد الصلبة (Theory of Solids)

1. الإلكترونات في المواد الصلبة
2. كثافة المستويات الإلكترونية
3. الفونونات
4. التوصيل الكهربائي
5. تأثير هول
6. الإلكترونات والفجوات
7. أشباه الموصلات
8. الخواص البصرية والكهربائية لأشباه الموصلات

الفصل الثالث

نظرية أشباه الموصلات: أجهزة (نبائط) أشباه الموصلات (Theory of Semiconductors and Semiconductor Devices)

1. التطعيم في أشباه الموصلات
2. الخواص الكهروضوئية لأشباه الموصلات
3. مفرق p-n
4. المخطط الطاقي

المصادر

1. نبائط أشباه الموصلات، فيزياء و تقنية، تاليف أس. أم. زي، ترجمة د. فهد غالب حياتي و د. حسين علي أحمد، دار الحكمة للطباعة و النشر- الموصل، 1990
2. فيزياء الحالة الصلبة، الجزء الاول، تأليف د. مؤيد جبرائيل يوسف، مطبعة بيت الحكمة
3. مقدمة في فيزياء أشباه الموصلات، تأليف .د. يسري مصطفى و د. الحسيني الطاهر، 2017
4. Basic Semiconductor Physics, 3rd edition, Chihiro Hamaguchi, Springer International Publishing, Switzerland, 2017.
5. Fundamentals of Semiconductors, physics and materials properties, 4th edition, Peter Y. Yu and Manuel Cardona, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
6. The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Nanophysics and Applications, 3rd edition, Marius Grundmann, Springer International Publishing Switzerland, 2016.

الفصل الاول

التآصر، الهياكل البلورية، وعلوم المواد

Bonding, Crystal Structures, and Materials Science

مقدمة

يمكن تصنيف المواد الصلبة بناءا على خواصها الكهربائية و البصرية و الحرارية الى

1. المعادن Metals

الكهربائية: تعتتبر المعادن موصلة (conductor) جيدة للكهرباء في درجة حرارة الغرف، و يستمر المعدن في التوصيل بشكل جيد حتى مع انخفاض درجة الحرارة.

البصرية: يمتص الضوء في المدى المرئي ويزداد الامتصاص مع زيادة الطول الموجي (λ).

الحرارية: تعتبر موصلة في جميع درجات الحرارة.

امثلة: الفضة و النحاس و الالمنيوم و البلاتين.

2. أشباه الموصلات Semiconductors

الكهربائية: رديئة التوصيل الكهربائي بدرجة الحرارة الغرفة، ولكن يمكن التحكم في التوصيل و زيادتها باضافة نسب قليلة من الشوائب (dopants). تنخفض توصيلية اشباه الموصلات مع انخفاض درجات الحرارة. لا توصل في درجات الحرارة المنخفضة اي تعتبر عازل كهربائي.

البصرية: تمتص أشباه الموصلات الضوء المرئ (Visible) باطوال موجية محددة، و تمتص الأشعة تحت الحمراء القريبة (near-IR)، كما و تمتص أشباه الموصلات الضوء بشكل ضعيف الاطوال موجية الاطول من الأشعة تحت الحمراء القريبة (λ > near-IR).

الحرارية: ضعيفة التوصيل في درجات حرارة الغرفة وغير موصلة في درجات الحرارة المنخفضة.

امثلة: عناصر مثل السلسكون و الجرمانيوم، مركبات مثل $Cu(In,Ga)_3Se_5$ or (CIGS), CdTe, GaAs, GaP, CdS

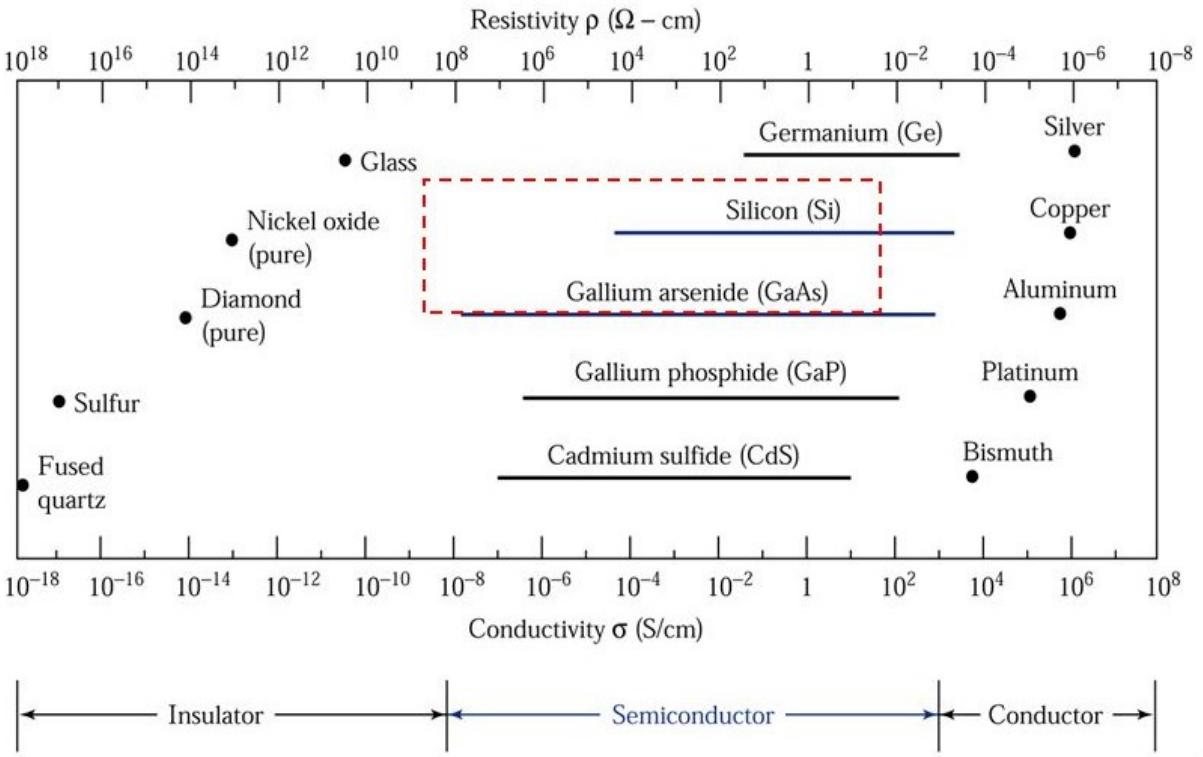
3. العوازل Dielectrics

الكهربائية: غير موصلة للكهربائية او عازلة (insulator) في درجة حرارة الغرفة. و بالأخذ بعين الاعتبار بانه لا يوجد عازل مثالي، حيث يمكن تنشيط التوصيل عند ارتفاع درجة الحرارة بشكل كافٍ، على افتراض أن المادة تبقى مستقرة عند درجة الحرارة العالية.

البصرية: لا تمتص الضوء المرئي أو تمتصه بشكل ضعيف جدا، و قد تمتص الاشعة فوق البنفسجية (ultraviolet, UV) باطوال موجية معينة.

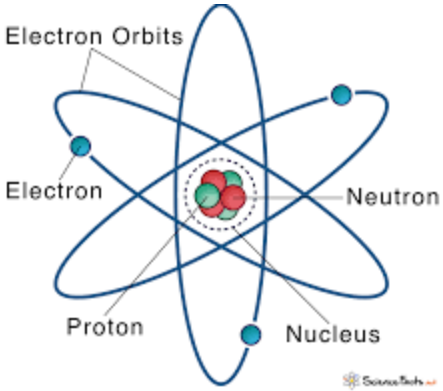
الحرارية: غير موصلة في درجات حرارة الغرفة.

امثلة: الورق و الزجاج و الميكا و البلاستك و الكوارتز.



المدى النموذجي للمقاومية والتوصيلية في الموصلات للعوازل وأشباه الموصلات.*

البنية الذرية Atomic Structure



من المعروف أن جميع المواد تتكون من ذرات (atoms) مكونة من نواة (nucleus) تحوي نوعين من الأجسام, أحدهما موجب الشحنة ويطلق عليها بروتونات (p) والثاني متعادل الشحنة يطلق عليها نيوترونات (n)، ويدور حول النواة، وفي مدارات ثابته، الكترونات سالبة الشحنة .(e^-) وتعتمد مقدرة مادة معينة على إيصال التيار الكهربائي على مقدار ارتباط إلكترونات المدار الخارجي، والتي تسمى الكترونات التكافؤ (valence elections) ، مع نواة الذرة.

و حسب نموذج بور الذري (atomic shell model of the Bohr atom)، تهيمن كتلة النواة على كتلة الذرة التي يها والتي يمكن اعتبارها مصدر الشحنة (q) و الكتلة (m)

شحنة النواة $q = +Ze$

كتلة النواة $m = Zm_p + Nm_n$

m_n كتلة النيترون

m_p كتلة البروتون

Z العدد الذري (atomic number) او عدد البروتونات

N العدد النيترونات

شحنة الالكترون e و التي تساوي 1.6×10^{-19} كولوم.

علما ان عدد الكتلة الذرية (atomic mass number) أو عدد النوكليون A nucleon number يعبر عنه بالعلاقة $A = Z + N$. يتحكم العدد الذري Z في السلوك الكيميائي للذرة و التي تولد سحابة كثيفة الالكترونات السالبة الشحنة تتمحور حول النواة.

لتبسيط وصف البنية الالكترونية، سنأخذ بعين الاعتبار ذرة الهيدروجين التي تحتوي على الكترون واحد. اما بالنسبة للذرة المتعددة الالكترونات، فيوصف توزيع كثافة الشحنة بواسطة دالة موجة ذرية (atomic wavefunction) وهي دالة معقدة ذات أجزاء حقيقية و تخيلية و التي يمكن حلها بواسطة معادلات

شرودنكر Schrödinger equation. و لتسهيل وصف و حل الدالة الذرية، يمكننا اعتبار ان كل إلكترون يدور في مداره الخاص. وبالنظر لوجود إلكترون واحد في هذا المدار، فيُفترض أن السحابة الالكترونية المتكونة من $Z-1$ من إلكترونات ستحجب شحنة النواة تمامًا بحيث تكون الشحنة النووية الظاهرة هي +e كما في ذرة الهيدروجين. تبعاً لمبدأ استبعاد باولي (Pauli exclusion principle)، فإن لكل إلكترون في الذرة متعددة الإلكترونات مجموعة من الأرقام الكمية (quantum numbers) التي تصف حركة الإلكترون في حالته الأرضية (ground state) و المثارة (excited state) و التي تميزه عن باقي الإلكترونات هذه الأعداد الكمية هي

1. **عدد الكم الرئيسي principal quantum number** و يرمز له ب **n**، و هو عدد صحيح $n = 1, 2, 3, 4, \ldots$ ، و التي يمكن التعبير عنها برمز القشرة shell $K, L, M, N, \ldots$.
2. **عدد الكم المداري orbital angular momentum quantum number** و يرمز له ب ℓ، و هو ايضا عدد صحيح، حيث ان $l = 0, 1, 2, 3, \ldots l \ (l < n)$ و التي يمكن التعبير عنها برمز القشرة الثانوية sub-shell $s, p, d, f, g, h, i \ldots$. يرتبط هذا العدد الكمي بـ "شكل" الدالة الموجية أي بمعنى شكل المدار.
3. **عدد الكم المغناطيسي magnetic quantum number** و يرمز له ب m_ℓ، و هو ايضا عدد صحيح قيمته بين $+l, \ldots 0 \ldots, -l$ و الذي يساوي

$$m_l = -l, -(l-1), \ldots (l-1), +l$$

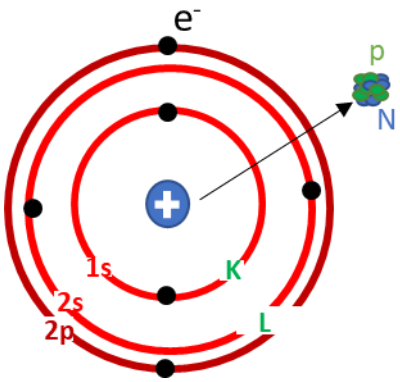
4. **عدد الكم البرمي spin quantum number** و يرمز له ب m_s وقيمته تساوي $\pm 1/2$

عدد الكم Quantum Number	الرمز	يدل على	يحدد	القيمة
الرئيسي Principal	n	الحجم size	المستوي الطاقي الرئيسي main energy level	$1,2,\ldots$
الزخم الزاوي Angular Momentum	ℓ	الشكل shape	المستوي الطاقي الثانوي sub-level	$0, 1, \ldots, n-1$
المغناطيسي Magnetic	$m\ell$	الاتجاه orientation	المدار في المتستوي الثانوي orbitals in the subshell	$-l, \ldots 0 \ldots, +l$
البرمي Spin	m_s	اتجاه البرم spin direction	حالة البرم spin state	$+1/2, -1/2$

هنالك $2(2l+1)$ إلكترون في الغلاف الثانوي (sub-shell) الواحد، والتي يمكن تعريفها بالأعداد الكمية n و ℓ و التي تقابلها الأزواج المميزة المسموح بها من الأعداد الكمية (m_s ، m_ℓ)

n	القشرة الرئيسية	القشرة الثانوية ℓ = 0 s	1 p	2 d	3 f	العدد الكلي للالكترونات
1	**K**	2	$_2$**He**			2
2	**L**	2	6 $_{10}$**Ne**			8
3	**M**	2	6 $_{18}$**Ar**	10		18
4	**N**	2	6 $_{36}$**Kr**	10	14	32
5	**O**	2	6 $_{54}$**Xe**	10	14	32
6	**P**	2	6 $_{86}$**Rn**	10	14	32

معرفة تركيب القشرة مهم لانه اذا ممتلئ كليا فان الالكترونات سوف لن تشارك في التأصر الكيميائي.



الترتيب الالكتروني لذرة الكاربون $(C)(Z=8)$ هو $1s2\ 2s2\ 2p2$

لذا فان المستوي الارضي للكاربون يكتب بالشكل التالي $2s2\ 2p2$

ملاحظة: في هذ التعبير يمثل الرقم القشرة الرئيسية و الحرف القشرة الثانوية.

الجزيئات و التآصر Molecules and Bonding

التآصر bonding هو حالة ارتباط ذرتين أو أكثر باصرة معينة لتكوين مركب (compounds) أو جزئية (molecules). لنفرض انا جلبنا ذرة من اللانهاية بجانب ذرة اخرى. فإذا وصلت هذه الذرة إلى الحالة المستقرة (equilibrium state) بالقرب من الذرة الثانية بعد تحرير طاقة، فيمكننا القول بأنه قد تكونت "آصرة مستقرة" بين هاتين الذرتين بحيث تكون الطاقة الكامنة لهذه المنظومة الجديدة و المتكونة بعد ارتباط الذرتين أقل من طاقة الذرتين كلا على حدة. تعرف طاقة التآصر بأنها الطاقة اللازمة لكسر الآصرة بين ذرتين لاعادتها الى الحالة الحرة. لاحظ أن اقتراب الذرة الأولى من الذرة الثانية سيعاني من قوى تجاذب attractive وتنافر repulsive ذات طبيعة كهربائية ساكنة (electrostatic) .

عندما تكون المسافات بين الذرتين بعيدة ستسيطر قوى التجاذب F_A بين الذرتين على محصلة القوى F_N المؤثرة على الذرتين. بينما تسيطر قوى التنافر F_R على محصلة هذه القوى عندما تكون المسافات (r) صغيرة. اي ان محصلة القوى تساوي: $F_N(r) = F_A(r) + F_R(r)$

محصلة القوة و قوى التجاذب و التنافر هم دوال للمسافة بين الذرتين r. ترتبط القوة بالجهد الكهربائي E و المسافة بين الذرتين بالعلاقة التالية: $F_N = \frac{dE(r)}{dr}$

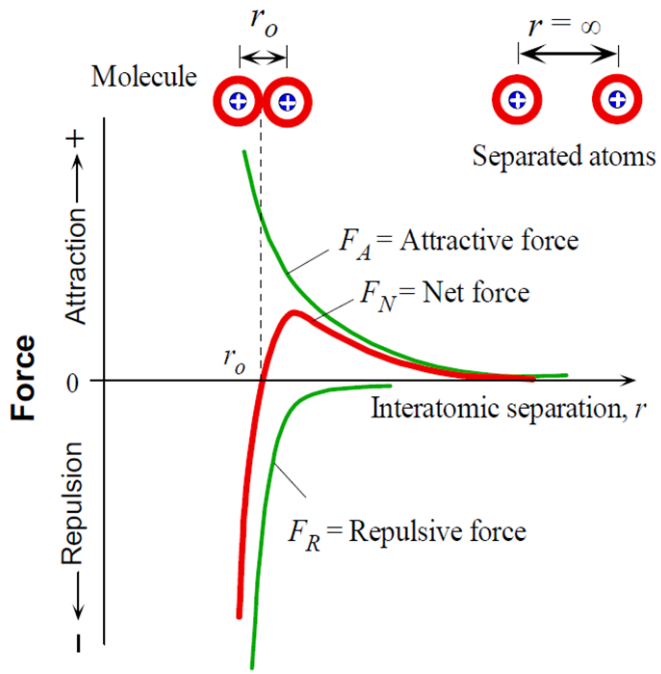
لجهد كهربائي معين و عندما تكون محصلة القوى تساوي صفر $F_N = 0$ اي عندما $F_A = F_R$ ، فان المنظومة تكون في حالة استقرار و يمكن ايجاد المسافة بين الذرتين في هذه الحالة من العلاقات الاتية:

المشتقة الاولى للجهد بالنسبة للمسافة $\frac{dE(r=r_0)}{dr} = 0$

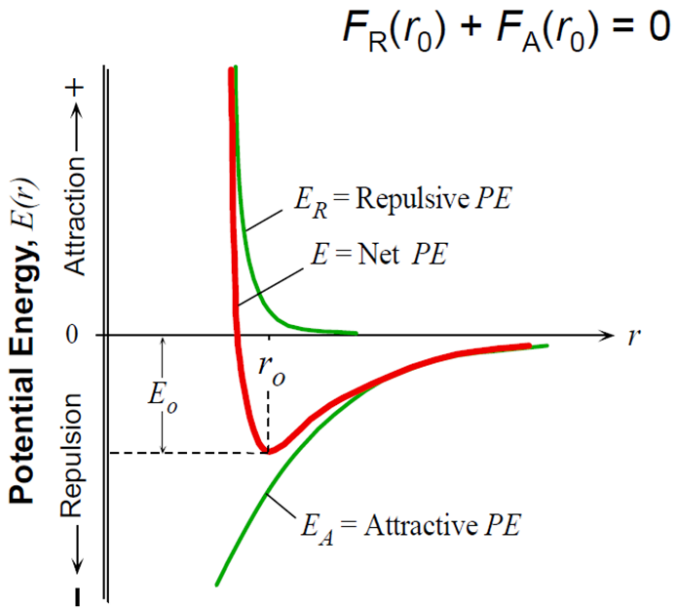
و المشتقة الثانية للجهد بالنسبة للمسافة $\frac{d^2E(r=r_0)}{dr^2} = 0$

ملاحضات:

- تظهر شحنة سالبة في حالة التنافر
- التغيير في الجهد يمثل الشغل المنجز $dE = F_N . dr$
- يكون الشغل المنجز موجب عند زيادة المسافة بشرط ان تكون $r > r_0$ و تكون $F_N > 0$
- و يكون الشغل المنجز سالب عند زيادة المسافة بشرط ان تكون $r < r_0$ و ان تكون $F_N < 0$



قوى التجاذب و التنافر و المحصلة كدالة للمسافة



الجهد الكهربائي في حالة التجاذب والتنافر والجهد الكلي كدالة للمسافة