

1.2.2. The photo-electric effect

The photoelectric effect is by now the "classic" experiment, which demonstrates the quantized nature of light: when applying monochromatic light to a metal in vacuum one finds that electrons are released from the metal. This experiment confirms the notion that electrons are confined to the metal, but can escape when provided sufficient energy, for instance in the form of light. However, the surprising fact is that when illuminating with long wavelengths (typically larger than 400 nm) no electrons are emitted from the metal even if the light intensity is increased. On the other hand, one easily observes electron emission at ultra-violet wavelengths for which the number of electrons emitted does vary with the light intensity. A more detailed analysis reveals that the maximum kinetic energy of the emitted electrons varies linearly with the inverse of the wavelength, for wavelengths shorter than the maximum wavelength.

The experiment is illustrated with Figure 1.2.1:

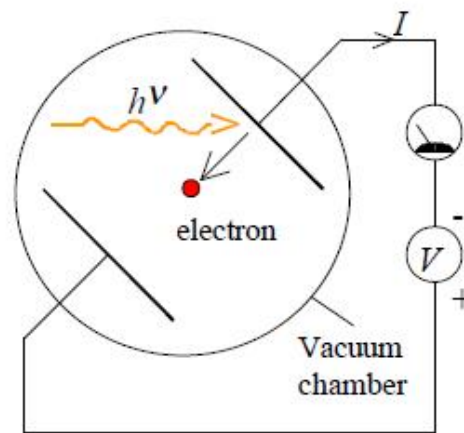


Figure 1.2.1 Experimental set-up to measure the photoelectric effect.

The experimental apparatus consists of two metal electrodes within a vacuum chamber. Light is incident on one of two electrodes to which an external voltage is applied. The external voltage is adjusted so that the current due to the photo-emitted electrons becomes zero. This voltage corresponds to the maximum kinetic energy, $K.E.$, of the electrons in units of electron volt. That

voltage is measured for different wavelengths and is plotted as a function of the inverse of the wavelength as shown in Figure 1.2.2. The resulting graph is a straight line.

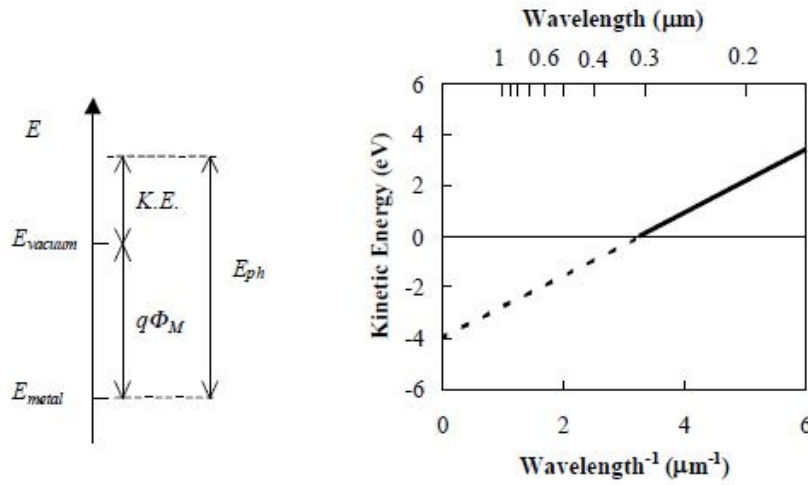


Figure 1.2.2 Maximum kinetic energy, $K.E.$, of electrons emitted from a metal upon illumination with photon energy, E_{ph} . The energy is plotted versus the inverse of the wavelength of the light.

Albert Einstein explained this experiment by postulating that the energy of light is quantized. He assumed that light consists of individual particles called *photons*, so that the kinetic energy of the electrons, $K.E. = p^2/2m$ equals the energy of the photons, E_{ph} , minus the energy, $q\Phi_M$, required to extract the electrons from the metal. The workfunction, Φ_M , therefore quantifies the potential, which the electrons have to overcome to leave the metal. The slope of the curve was measured to be 1.24 eV/micron, which yielded the following relation for the photon energy, E_{ph} :

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2.1)$$

where h is Planck's constant, ν is the frequency of the light, c is the speed of light in vacuum and λ is the wavelength of the light.

While other light-related phenomena such as the interference of two coherent light beams demonstrate the wave characteristics of light, it is the photoelectric effect, which demonstrates the particle-like behavior of light. These experiments lead to the particle-wave duality concept, namely that particles observed in an appropriate environment behave as waves, while waves can also behave as particles. This concept applies to all waves and particles. For instance, coherent electron beams also yield interference patterns similar to those of light beams.

It is the wave-like behavior of particles, which led to the de Broglie wavelength: since particles

have wave-like properties, there is an associated wavelength, which is called the de Broglie wavelength and is given by:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1.2.2)$$

where λ is the wavelength, h is Planck's constant and p is the particle momentum. This expression enables a correct calculation of the ground energy of an electron in a hydrogen atom using the Bohr model described in Section 1.2.4. One can also show that the same expression applies to photons by combining equation (1.2.1) with $E_{ph} = p c$.

Example 1.1 A metal has a workfunction of 4.3 V. What is the minimum photon energy in Joule required to emit an electron from this metal through the photo-electric effect? What are the corresponding photon frequency in Terahertz and the photon wavelength in micrometer? What is the photon momentum? What is the velocity of a free electron with the same momentum?

Solution The minimum photon energy, E_{ph} , equals the workfunction, Φ_M , in units of electron volt or 4.3 eV. This also equals

$$E_{ph} = q\Phi_M = 1.6 \times 10^{-19} \times 4.3 = 6.89 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

The corresponding photon frequency is:

$$\nu = \frac{E_{ph}}{h} = \frac{6.89 \times 10^{-19}}{6.626 \times 10^{-34}} = 1040 \text{ THz}$$

The corresponding wavelength equals:

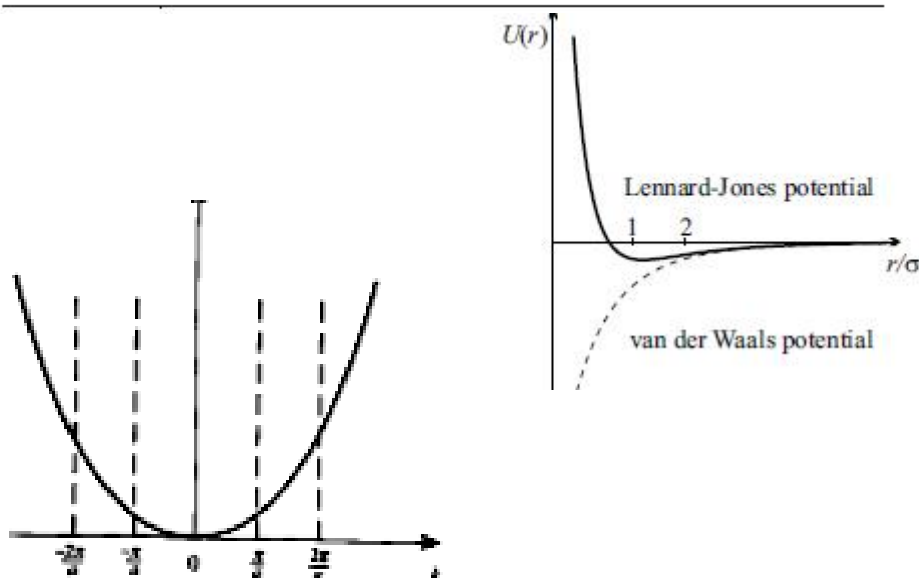
$$\lambda = \frac{hc}{E_{ph}} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{6.89 \times 10^{-19}} = \frac{1.24 \mu\text{m}}{E_{ph} \text{ (eV)}} = 0.288 \mu\text{m}$$

The photon momentum, p , is:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{0.288 \times 10^{-6}} = 2.297 \times 10^{-27} \frac{\text{kg m}}{\text{s}}$$

And the velocity, v , of a free electron with the same momentum equals

$$v = \frac{p}{m_0} = \frac{2.297 \times 10^{-27}}{9.11 \times 10^{-31}} = 2522 \text{ m/s}$$



Example 1.3 An electron is confined to a 1 micron thin layer of silicon. Assuming that the semiconductor can be adequately described by a one-dimensional quantum well with infinite walls, calculate the lowest possible energy within the material in units of electron volt. If the energy is interpreted as the kinetic energy of the electron, what is the corresponding electron velocity? (The effective mass of electrons in silicon is $0.26 m_0$, where $m_0 = 9.11 \times 10^{-31}$ kg is the free electron rest mass listed in Appendix 2).

Solution The lowest energy in the quantum well equals:

$$E_1 = \frac{h^2}{2m^*} \left(\frac{1}{2L_x} \right)^2 = \frac{(6.626 \times 10^{-34})^2}{2 \times 0.26 \times 9.11 \times 10^{-31}} \left(\frac{1}{2 \times 10^{-6}} \right)^2$$

$$= 2.32 \times 10^{-25} \text{ Joules} = 1.45 \text{ } \mu\text{eV}$$

The velocity of an electron with this energy equals:

$$v = \sqrt{\frac{2E_1}{m^*}} = \sqrt{\frac{2 \times 2.32 \times 10^{-25}}{0.26 \times 9.11 \times 10^{-31}}} = 1.399 \text{ km/s}$$

Semi-conductor	Effective masses (units of free electron mass)		Mobility (300 K) (cm ² /Vs)		Relative static dielectric constant
	Electron*	Hole**	Electron	Hole	
Si	$m_l = 0.92$ $m_t = 0.19$	$m_{lh} = 0.15$ $m_{hh} = 0.54$	1450	505	11.9
Ge	$m_l = 1.57$ $m_t = 0.082$	$m_{lh} = 0.04$ $m_{hh} = 0.28$	3900	1800	16.2
InSb	0.0136	$m_{lh} = 0.0158$ $m_{hh} = 0.34$	77 000	850	16.8
GaAs	0.063	$m_{lh} = 0.076$ $m_{hh} = 0.50$	9200	320	12.4
CdSe	0.13	0.45	800	—	10
GaN	0.22	0.96	440	130	10.4

* m_l is longitudinal, m_t is transverse.

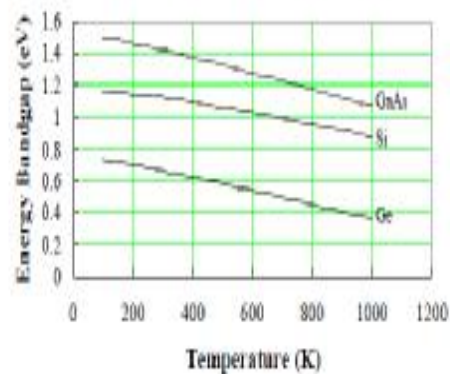
** m_{lh} is light hole, m_{hh} is heavy hole.

Example 1.5 Calculate the energy relative to the Fermi energy for which the Fermi function equals 5%. Write the answer in units of kT .

Solution The problems states that:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} = 0.05$$

$$E - E_F = \ln(19)kT \approx 3kT$$



Example 2.2 Calculate the energy bandgap of germanium, silicon and gallium arsenide at 300, 400, 500 and 600 K.

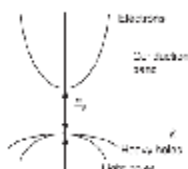
Solution The bandgap of silicon at 300 K equals:

$$E_g(300 \text{ K}) = E_g(0 \text{ K}) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

$$= 1.166 - \frac{0.473 \times 10^{-3} \times (300)^2}{300 + 636} = 1.12 \text{ eV}$$

Similarly one finds the energy bandgap for germanium and gallium arsenide, as well as at different temperatures, yielding:

	Germanium	Silicon	Gallium Arsenide
$T = 300 \text{ K}$	0.66 eV	1.12 eV	1.42 eV
$T = 400 \text{ K}$	0.62 eV	1.09 eV	1.38 eV
$T = 500 \text{ K}$	0.58 eV	1.06 eV	1.33 eV
$T = 600 \text{ K}$	0.54 eV	1.03 eV	1.28 eV



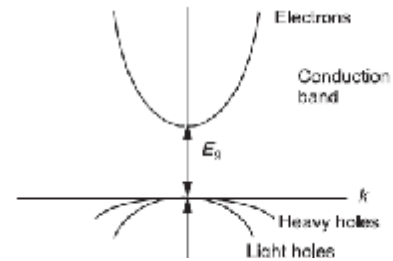
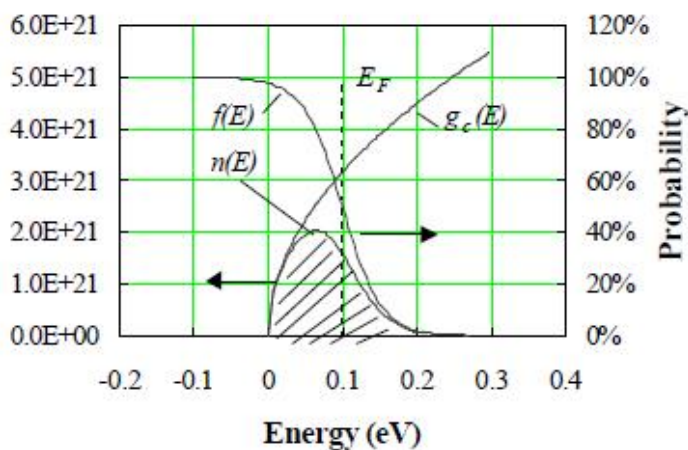
Example 2.3 Calculate the number of states per unit energy in a 100 by 100 by 10 nm piece of silicon ($m^* = 1.08 m_0$) 100 meV above the conduction band edge. Write the result in units of eV^{-1} .

Solution The density of states equals:

$$\begin{aligned}
 g(E) &= \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} m^{3/2} \sqrt{E - E_c} \\
 &= \frac{8\pi\sqrt{2} (1.08 \times 9.1 \times 10^{-31})^{3/2}}{(6.626 \times 10^{-34})^3} \sqrt{0.1 \times 1.6 \times 10^{-19}} \\
 &= 1.51 \times 10^{46} \text{ m}^{-3} \text{ J}^{-1}
 \end{aligned}$$

So that the total number of states per unit energy equals:

$$g(E)V = 1.51 \times 10^{46} \times 10^{-22} \text{ J}^{-1} = 2.41 \times 10^3 \text{ eV}^{-1}$$



Example 2.4 Calculate the effective densities of states in the conduction and

valence bands.

valence bands of germanium, silicon and gallium arsenide at 300 K.

Solution The effective density of states in the conduction band of germanium equals:

$$\begin{aligned}
 N_c &= 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \\
 &= 2 \left(\frac{2\pi \cdot 0.55 \times 9.11 \times 10^{-31} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}{(6.626 \times 10^{-34})^2} \right)^{3/2} \\
 &= 1.02 \times 10^{25} \text{ m}^{-3} = 1.02 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}
 \end{aligned}$$

where the effective mass for density of states was used (see appendix 3 or section 2.3.6). Similarly one finds the effective density of states in the conduction band for other semiconductors and the effective density of states in the valence band:

	Germanium	Silicon	Gallium Arsenide
$N_c (\text{cm}^{-3})$	1.02×10^{19}	2.81×10^{19}	4.35×10^{17}
$N_v (\text{cm}^{-3})$	5.64×10^{18}	1.83×10^{19}	7.57×10^{18}

Note that the effective density of states is temperature dependent and can be obtain from:

$$N_c(T) = N_c(300 \text{ K}) \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2}$$

where $N_c(300 \text{ K})$ is the effective density of states at 300 K.

الفصل الاول : القوى والواصر

في الوقت الحاضر نحن نعيش حالة من التطور العلمي المتسارع وتقدم كبير في التطبيقات التقنية، واصبح النتاج التقني جزء مهما من مفردات حياتنا اليومية. ولعل الفهم المتزايد لسلوك المواد كان واحد من الاسباب وراء هكذا تسارع في التطور ومن ضمن هذه المواد المواد الصلبة Solid State. أساسا نحن نقصد بالمواد الصلبة تلكم المواد التي تمتلك ترتيبا دوريا للجسيمات المكونة لها، ونستثني من هذا التعريف الزجاج، الخشب والورق مع انها مواد صلبة لعدم امتلاكها هكذا ترتيب دوري، والباقي من المواد الصلبة فهذه يمكن تصنيفها بعدة طرق

أولا: تبعا لمقاومتها الكهربائية

١_ مواد موصلة .

٢_ مواد شبة موصلة

٣_ مواد عازلة

٤_ مواد فائقة التوصيل

ثانيا : تبعا لخاصيتها المغناطيسية

أ_ مواد دايا مغناطيسية (المغناطيسية المعاكسة)

ب_ مواد بارامغناطيسية

ج- مواد فيرومغناطيسية.

ثالثا: تبعا لطبيعة الاواصر الرابطة لمكونات المادة الصلبة

١_ البلورات الايونية

٢_ البلورات التساهمية

٣- البلورات الجزيئية

٤_ البلورات المعدنية

رابعاً: تبعا لطبيعة الشبكة البلورية

أ- البلورات ذات الشبكة البرافزية

ب_ البلورات ذات الشبكة غير البرافزية

خلال الفصول القادمة ستمر علينا جملة من المفاهيم الفيزيائية والمصطلحات نجد من الضروري التعرف عليها. في البدء هنالك الذرة (a mot) ونقصد بها أصغر مكون من مكونات المادة الصلبة الذي يكسب المادة صفاتها الكيميائية والفيزيائية. تكون الذرة متعادلة كهربائيا وأذا خسرت الذرة اليكترون (بصرف طاقة عليها) تصبح أيون موجب والعكس تصبح أيون سالب إذا اكتسبت اليكترون (كنتيجة لتحرر الطاقة). إذا اتحدت ذرتين أو أكثر تتكون لدينا الجزيئة ولتحديد هوية وشكل ترتيب الذرات في المواد الصلبة يصار الى إجراء قياسات حيود الاشعة السينية .

المواد وتبعا لطور تواجدتها في الطبيعة يمكن تقسيمها الى ثلاثة أنواع هي المواد الصلبة ، السائلة والغازية والسبب وراء هذا التباين يرجع للتعارض (التنافس) مابين الطاقة الداخلية والقوى مابين الجزيئات

لتجمع عدد كبير من الجزيئات. الطور مصطلح يوضح عليه عند تغير الضغط المسلط ودرجة حرارة المادة الصلبة أو الضغط مع الحجم.

تتواجد كل المواد بالحالة الغازية عند درجات الحرارة العالية، وهي تتكثف لتتحول للطور السائل عند خفض درجة حرارتها، كذلك هي تتحول للطور الصلب (بخلاف الهليوم) إذا خفضنا درجة الحرارة أكثر. عملية التكثيف تشير إلى ضرورة وجود قوى جذب بين الجسيمات الأساسية لكي تجعلها متلاصقة مع أن هذه القوة تتحول لقوة تنافر إذا ما أصبحت المسافة الفاصلة بين الجسيمات صغيرة (بضعة أنغسترومات) وبعبارة أخرى سوف تتجمع كل المواد عندما نتحدث عن المسافة الفاصلة في الحالة الصلبة فإننا نقصد بها مسافة تعادل بضعة مرات قطر الذرة أو الجزيئة.

عملية يدرس التغير في الطور بدلالة الضغط مع درجة الحرارة أو بدراسة التغير في الضغط مع الحجم. في منحنى الضغط مع درجة الحرارة (الشكل ١) تمثل (T_c) درجة الحرارة الحرجة التي يكون

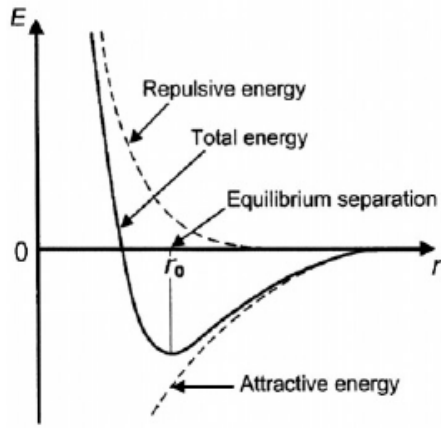
فيها الطور الغازي هو الطور السائد لكل الدرجات الحرارية الأعلى وبغض النظر عن قيمة الضغط، أما (T_t) فهي ما يصف على درجة الحرارة الثلاثية والتي يمكن أن توجد فيها الأطوار الثلاثة. لدرجات الحرارة الأوطى من (T_c) يمكن تولد الطور الصلب أو السائل بتسليط الضغط. لدرجات الحرارة $T_c > T_t$ تختلف الأطوار تبعاً لدرجة الحرارة. لدرجات الحرارة الأقل من درجة الحرارة الحرجة يمكن تولد الطور السائل أو الصلب بتسليط الضغط الملائم. لدرجة الحرارة الأقل من الدرجة الأعلى من الثلاثية يحصل تحول من البخار إلى السائل وبتسليط الضغط يتحول إلى الصلب. وعند تساوي درجة الحرارة مع درجة الحرارة الحرجة يتولد الطور الصلب والطور السائل.

كذلك يمكن دراسة الأطوار الثلاثة عن طريق منحنى الضغط مع الحجم (الشكل ٢). في الشكل أكثر من منحنى تبعاً لدرجة الحرارة، وبشكل عام لدرجات الحرارة الأكبر من الدرجة يغلب الطور الغازي. ودرجات الحرارة الأقل من الدرجة يبدأ الطور الذي يتواجد فيه البخار، السائل والصلب. من الشكل يظهر جلياً أنه في الطور الصلب ولأجل أحداث تغير بسيط في الحجم يتطلب تسليط ضغط عالي. وهذا يستدعي أنه للمسافات الصغيرة الفاصلة بين الجزيئات أن تكون القوة مابين الجزيئات قوة تنافر وهي تزداد بسرعة مع تناقص المسافة. كذلك تقاوم المواد الصلبة التمدد لقيم محددة والتي بعدها يحصل التفكك والانهييار، على أن تكون طبيعة القوة مابين الجسيمات للمسافات الفاصلة الأكبر قوة تجاذب تزداد مع زيادة المسافة الفاصلة وبعده تبدأ بالتناقص لتصل إلى الصفر مع الزيادات الكبيرة.

القوى ما بين الجزيئات

تعتمد الطبيعة الفعلية للقوة ما بين الجسيمات المكونة للمادة على التركيب الاليكتروني للجسيمات المتفاعلة ، بكلام آخر على كونها ذرات ، أيونات أو جزيئات ينشأ التفاعل الايوني عندما ينتقل الاليكترون من واحد من المكونات الى النوع الثاني ، لهذا تتكون المواد من أيونات موجبة وأخرى سالبة مولدة قوة مركزية وغير مشبعة (بمعنى ان أيون موجب يمكن ان يجذب عدة أيونات سالبة حوله و لا تتأثر القوة المسلطة من الايون الموجب على كل أيون سالب بوجود الايونات الأخرى). في التفاعل التساهمي تتشارك الاليكترونات بين ذرتين لمدى محدد مولدة تفاعل مشبع. أما تفاعل فاندير فالس فهو تفاعل اليكتروستاتيكي ضعيف يحصل حتى في الذرات والجزيئات التي لا تظهر أي زخم قطبي ويمكن ان يظهر من الزخم القطبي المتفاوت المساهم للموقع الانى لاليكترونات الذرة. وفي العديد من المواد يتغلب واحد من هذه

التفاعلات.



تمثل قوة التنافر بقيمة موجبة وقوة التجاذب بقيمة سالبة الشكل (٣-١) وهذا ناشئ من قانون الثرموداينمك الخاص بالشغل لزيادة الحجم النهائي مع التنافر ونقصانه مع التجاذب. في الشكل تمثل (r₀) الفاصل المتوازن وعندها تكون محصلة القوتين صفر. وللمسافات الفاصلة الأكبر تتغلب قوة التجاذب بينما تتغلب قوة التنافر للمسافات الأصغر.

الشكل (٣-١) التغير في طاقتي التنافر والتجاذب والطاقة الكامنة مع المسافة الفاصلة

٢-١ _ القوى ما بين الذرات

غالبا ما يتم التعامل مع التفاعل ما بين الجزيئات باستخدام الطاقة الكامنة بدلا من القوة. تعرف الطاقة الكامنة لزوج من الجزيئات بأنها الشغل المنجز من قوة خارجية لتغيير مواقعها النسبية لتركيب مثالي لموقع محدد. يقصد بالتركيب المثالي التركيب الذي تكون المسافة الفاصلة بين المكونات ما لانهاية وفي هذه الحالة يلغى التفاعل فيها. إذا كانت (F_e) القوة المسلطة لكي تبقى المسافة بين الجزيئات (X) لهذا اذا ابتعدت احدى الجزيئات لمسافة (dx) عندها يحسب الشغل من

$$dw = + F_e * dx = - F * dx$$

$$w = \int_{\infty}^r F_e * dx = - \int_{\infty}^r F * dx$$

مقدار الشغل سوف يكون مساويا للطاقة الكامنة (U) لزوج من الجزيئات عندما تكون المسافة الفاصلة لهذا (r)

$$U = -F \cdot dx$$

كذلك يمكن حساب الطاقة الكامنة بدلالة المسافة الفاصلة كما في لعلاقة

$$U(r) = - (A / r^m) + (B / r^n)$$

حيث n, m, A, B ثوابت موجبة. لقيم (r) الصغيرة يجب ان تكون (n) اكبر من (m) ، وفي هذه الحالة يتغلب الحد الموجب وعندما تكبر قيمة تهبط قيمة الحد الموجب بشكل أسرع من الحد السالب. في حالة تساوي المسافة الفاصلة مساوية للفاصل المتزن ($r = r_0$) يكون التغير في الطاقة الكامنة صفر وعلية

$$du / dr = 0 \text{ at } r = r_0$$

وفي هذه الحالة

$$du / dr = (mA / r^{m+1}) - (nB / r^{n+1})$$

$$(mA / r_0^{m+1}) - (nB / r_0^{n+1}) = 0$$

$$B = - (A / r^m) + (mA r_0^{n-m} / n r_0^n)$$

لهذا يمكن كتابة العلاقة الرياضية التي تعطي الطاقة الكامنة بالشكل الاتي

$$U(r) = - (A / r^m) + (mA r_0^{n-m} / n r^n)$$

أما الطاقة الرابطة (gnidnib ygrene) لزوج من الجزيئات (U_0)

$$U_0 = - (A / r_0^m) \{ 1 - (m / n) \}$$

الشكل (٤) يوضح التغير في الطاقة الكامنة مع المسافة الفاصلة.

تلعب طاقة الربط دورا في تحديد درجة الانصهار ، درجة التبخر

ومعامل التمدد الطولي . وتختلف تبعا لطبيعة الاصرة كما في

الجدول (١) . في العلاقات السابقة يمثل الحد الموجب الجزء

الخاص بالتنافر ، بينما يمثل الجزء السالب الجزء الخاص

بالتجاذب الحد الذي يمثل التنافر لا يتغير كثيرا مع (n)

وبشكل عام تكون $n = 9-12$

وعلى العكس يتأثر الحد الذي يمثل التجاذب بشدة بطبيعة

التفاعل. في التفاعل الايوني تكون قيمة A عالية بينما في

تفاعل فان در فالس تكون قيمة صغيرة وقيمة $m = 6$. وفي

التفاعل التساهمي قيمة A كبيرة جدا. في حالة وجود عدد من

الجزيئات فان كل جزيئة تخضع لتأثير الجزيئات القريبة والبعيدة

ولان التفاعل مابين الجزيئات هو تفاعل مدى قصير عليه فأن الجزيئات الاقرب سيكون تفاعلها هو المتغلب. وفي حالة اكثر من جزيئين تكون الطاقة الكلية لتجمع الجزيئات المجموع لطاقات كل زوج من الجزيئات. الجدول (١) يوضح طاقة الربط لمجموعة من

الجدول (١) طاقة الربط وطبيعة الاصرة لعدة مواد

المادة	الاركون	الماس	كربيد السليكون	كلوريد الصوديوم
الحديد				
نوع الاصرة	جزئية	تساهمية		أيونية
معنوية				
طاقة الربط (kj / g)	٧.٥	٧٥٠	١١٨٠	٧٥٠
٣٩٦				

ولكي نفصل زوج من الجزيئات (بحيث تصبح المسافة الفاصلة ما لانهاية) نحتاج الى طاقة تعادل (oU).في حالة تجمع عدد

من لجزيئات بالطور الصلب، عندها سوف تتراص (gnikcap) الجزيئات ويكون لكل جزيئة عدد محدد من الجزيئات المجاورة على مسافة (r_o) ونطلق على هذه الجزيئات تسمية الجزيئات الأقرب وعددها مساو لعدد المحاور (q)، يلعب عدد المحاور دورا في حساب الطاقة الربط (U). لو كان لدينا مول واحد من الجزيئات المتجمعة ونأخذ في الحسبان فقط الجزيئات الأقرب وان طاقة الربط لمزدوج واحد (U_o) وان عدد المزدوجات في المول (N_A) عندها تحسب طاقة الربط (U_m) من العلاقة

$$U_m = 0.5 * N_A * U_o * q$$

النصف الذي ظهر في العلاقة سببه وجود جزئتين في التفاعل الواحد، وعمليا تساوي (mU) الانثاليبي المولارية للتسامي

مثال

مادة صلبة بدرجة حرارة واطئة تتكون من سلسلة من الذرات المتناظرة والمنفصلة عن بعضها البعض بنفس المسافة. وان طاقة التفاعل مابين الذرات المتجاورة تعطى بالعلاقة التالية

$$U(r) = - (A / r^6) + (B / r^{12})$$

١ - أحسب مسافة الاتزان (r_o)

٢- الطاقة اللازمة لكسر الأصرة في السلسلة.

كون المادة بدرجة حرارة واطئة هذا يعني ان الطاقة الحركية مهمة

ولان r = r_o

$$du / dr = (6A / r^7) - (12 B / r^{13}) = 0$$

$$\downarrow$$

$$r_o = (2B / A)^{1/6}$$

$$\downarrow$$

$$r_o = 1.12 (B / A)^{1/6}$$

$$\downarrow$$

$$U_o = (- A / r_o^6) + (B / r_o^{12}) = (- A / 2B) + (A^2 B / 4 B^2) = (- A^2 / 2B) + (A^2 / 4B)$$

$$\downarrow$$

$$U_o = (A^2 / 2B) (0.5 - 1) = - A^2 / 4B = - A / 2r_o^6$$

الأواصر

تترابط الذرات " الايونات " أو الجزيئات المكونة للمواد الصلبة نتيجة تأثير أكثر من أصرة، ولكن عمليا نحن نشير إلى الأصرة التي تمتلك التأثير الأكبر . والأواصر الأكثر تأثيرا هي :

١- الأواصر الأيونية

هي ابسط أنواع الأواصر تنشأ عن التجاذب بين الشحن السالبة والوجبة التي تتولد نتيجة فقدان أو اكتساب الذرة لإلكترون

لكي يصبح المدار الخارجي أكثر امتلاءا وبالتالي يكون الترتيب الاليكتروني الأكثر استقرارا. تتأثر الأصرة بالنسبة بين قطري الايون السالب والموجب. من الامثلة على هكذا نوع هي ذرة الصوديوم التي تمتلك اليكترون واحد في المدار () وهي بهذا تكون مؤهلة لفقدان الاليكترون لتصبح أيون موجب () ونفس الشيء بالنسبة لذرة الكالسيوم التي تمتلك اليكترونين في () هذه الذرة مؤهلة لفقدان الاليكترونين لتصبح أيون موجب (). في المقابل هنالك مواد تصبح أكثر استقرارا عندما تكتسب الاليكترونات مثل ذرة الكلور التي تمتلك سبعة اليكترونات وتصبح أكثر استقرارا اذا اكتسبت اليكترون ثامن وتتحول الى () وعندما تتحد مع ايون الصوديوم لتكوين جزيئة الملح يحاط ايون الصوديوم بايونات الكلور والعكس صحيح بحيث تصبح قوة التجاذب للشحن المختلفة اكبر من قوة التنافر. تكون الاواصر الايونية قوية كفاية لهذا تمتلك البلورات الايونية درجة انصهار عالية وتمتلك صلادة عالية.

٢- الاواصر التساهمية :

يمكن للذرات التحول للترتيب الأكثر استقرارا بطريقة أخرى لاتضطرب معها إلى اكتساب أو فقدان الاليكترونات ، وهذه الطريقة تعتمد على المشاركة مع ذرات أخرى وهذا هو جوهر الأصرة التساهمية، فمثلا يمكن لذرتين من

الكلور ان تتشارك بالاليكترونيين الخارجين بأصرة تساهمية لتكوين (). الأصرة التساهمية ليست حصرا على الذرات المتشابهة فمثلا يمكن ان ترتبط ذرتي الهيدروجين مع ذرتي الكلور لتكوين كلوريد الهيدروجين



ومن الأمثلة على التآصر التساهمي بلورات الماس ، السليكون والجرمانيوم . والذرات المتآصرة تساهميا تمتلك درجة انصهار عالية وصلادة عالية.

٣-١ لاصرة المعدنية

بخلاف الاصرتين التساهمية والايونية لا يكن الاشارة الى خصائص الاصرة المعدنية من طبيعة الجزيئة المعزولة . قد تفقد الذرة الاواصر هو نتيجة تفاعل كهروستاتيكي بين صف من الايونات الموجبة والاليكترونات الحرة . الاليكترونات الحرة هي السبب وراء امتلاك الفلزات توصيلة كهربائية وحرارية عالية مع امكانية للطرق.

٤-١ اصرة فاندير فالس-van-der waas bound

أصرة فاندير فالس أصرة ثنائية القطب تؤدي الى الترابط في بلورات الغازات النبيلة (عند درجات الحرارة الواطئة). عندما تتقارب ذرتين متعادلتين من بعضهما لمسافة () يبرز تفاعل ثنائي القطب-ثنائي القطب التجاذبي () وهو ما يطلق عليه تفاعل فاندير فالس وينشأ عن التراكب الميكانيكي- الكمي للانطقة () تتنافر قوي () وبسبب التفاعلين تعطى ادنى طاقة ترابط بالعلاقة التالية

$$U = - (A / R^6) + (B / R^{12})$$

التركيب البلوري

عند تحول المادة من الطور الغازي الى الطور الصلب تتقارب الذرات المكونة للمادة وتلتصق مع بعضها بواحدة من الاواصر التي سبق ذكرها. أثناء التحول تترتب الذرات باشكل مختلفة، واصغر جزء بتكرارية تتولد المادة الصلبة هو الخلية الاحادية (tniu llec) . ولوصف الخلية الاحادية نستخدم ثلاثة محاور بالاضافة للزوايا مابين هذه المحاور . اذا تكررت الخلية الاحادية على مدى طويل بالابعد الثلاثة نقول عن المادة الصلبة انها احادية البلورة (elgnis latsyrc). أما اذا تغير شكل الخلية الاحادية بعد مسافة عندها نقول ان المادة انها متعددة البلورات (enillatsyrcylop). ونقول عن المادة الصلبة عشوائية (suohproma) اذا افقدت أي من الترتيبين.

لو اننا استبدلنا الذرات المكونة للمادة الصلبة بنقاط عندها سنحصل على هيئة "شكل" نطلق عليه الشبيكة (ecittal) اما الذرات المكونة هذه نطلق عليها الاساس (esiaB)، لهذا فان التركيب البلوري هو مجموع الاساس و الشبيكة . من خلال دراسة حيود الاشعة السينية تمكن برافز واخرون من تحديد سبعة انظمة اساسية وبتدويرها نحصل على اربعة عشر شكل مختلف من اشكال الشبيكة. تختلف الخلايا الاحادية فيما بينها بطول المحاور وقيمة الزوايا بينها.

في الشكل () الزاوية (α) هي التي تقابل المحور السيني
 اما المحور (y) تقابلة الزاوية (β) والمحور (Z) تقابلة الزاوية
 (γ). الطول على المحور السيني (a) وعلى المحور الصادي
 (b) وعلى المحور الثالث (c). الجدول (٢-١) يبين الانظمة
 السبعة والاشكال المصاحبة

الجدول (٢-١) معلمات الانظمة السبعة الاساسية

النظام	اطوال المحاور والزوايا	اشكال الشبكة
المكعب	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	بسيط ، متمركز الجسم ، متمركز الوجهة
الرابعي	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	بسيط ، متمركز الوجهة
السداسي	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	بسيط ، متمركز الجسم ، متمركز الوجهة
أحادي الميل	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$	بسيط ، متمركز القاعدة
ثلاثي الميل	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma$	بسيط
متعامد المحاور	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	بسيط ، متمركز الجسم ، متمركز الوجهة ، متمركز القاعدة
الثلاثي	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	بسيط

معاملات ميلر Miller indices

تكن أهمية معرفة طبيعة الشبكة البلورية في كونها العامل الأكثر تأثيرا في الخصائص الكهربائية والبصرية للمواد الصلبة. تمتلك المواد الصلبة ثلاثة أبعاد وكما رأينا من الصعب تغيير شكلها الا برفع درجة حرارتها وتغيير الضغط المسلط. وغالبا ما تعرف الماد الصلبة عن طريق المستويات البلورية التي تتخذها أثناء عملية الانماء البلوري (X,Y,Z). ولتحديد موقع أي مستوي نحتاج معرفة ثلاثة نقاط اذا ما اوصلنا بينها نحصل على المستوي. ولتعريف كل نقطة في الفضاء نحتاج قيم تقاطعها مع المحاور الثلاثة مثلا نقطه تمتلك الاحداثيات (١,٠,٠) هذا يعني ان موقع النقطة على المحور السيني حصرا اما النقطة (٠,٢,٠) فهي تقع على المحور الصادي، والنقطة (٠,٠,٤) على المحور الاخير. مستوي النقاط الثلاثة السابقة يتكون من النقاط (١,٢,٤). وعادتا نستخدم معاملات ميلر لتعريف المستويات البلورية والتي تحسب من قيم النقاط السابقة بالطريقة التالية:

١ - نحسب مقلوب كل نقطة وتصبح (١, ٠.٥, ٠.٢٥)

٢ - نجد القاسم المشترك بينها وفي هذه الحالة يكون ٤ ونضرب به المقلوب ونحصل على (٤, ٢, ١)

التي تمثل معاملات

معاملات ميلر الشكل () يوضح بعض المستويات التي نجدها في المواد الصلبة.

الخصائص البصرية للمواد الصلبة

أبتدأ نحن نقصد بالخصائص البصرية (optical properties) استجابة المواد عند تعرضها للأشعة الكهرومغناطيسية وبالتحديد الضوء المرئي. تعرف الأشعة الكهرو-مغناطيسية على أنها امواج مكونة من مكون كهربائي وآخر مغناطيسي وتحت هذا التصنيف تندرج الحرارة، الضوء، امواج الرادار والراديو والأشعة السينية التي تتميز بمدى من الأطوال الموجية وتبعا لطريقة توليدها. وبشكل عام ينحصر مدى واسع من الأطوال الموجية ضمن الأشعة الكهرومغناطيسية يبدء من أشعة كاما (γ -radiation) التي تمتلك طول موجي (10^{-12} m) وينتهي بالامواج الراديوية ذات الطول الموجي (10^5 m) الشكل (). في غالبية التطبيقات نحن نهتم بالضوء المرئي الذي يمتد من (0.4μ) وحتى (0.7μ) وأعتادا على الطول الموجي تختلف الألوان التي يظهر بها الضوء ، الطول الموجي (0.4μ) هو اللون البنفسجي بينما يصاحب الطول الموجي (0.5μ) اللون الأخضر واللون الأحمر يصاحب الطول الموجي (0.65μ) وإذا مزجنا الألوان جميعها نحصل على اللون الأبيض.

تمتاز الامواج الكهرومغناطيسية بإمكانية أنتشارها خلال الفراغ والاوساط الاخرى وبسرعة تصل الى (3×10^8 m/s) في الفراغ وباقل من هذه في الاوساط الاخرى. سرعة الضوء (c) في الفراغ من الثوابت العلمية وذلك لاعتمادها على خاصيتين للفراغ هما السماحية الكهربائية (ϵ_0) (electrical permittivity) والنفاذية المغناطيسية (μ_0) (magnetic permeability) وتعطى بالعلاقة التالية

$$c = (\epsilon_0 * \mu_0)^{0.5}$$

بالاضافة لذلك تكون سرعة الضوء دالة لكل من الطول الموجي وتردد الشعاع ($c = \lambda * v$). بعض الاحيان من الملائم التعامل مع الأشعة الكهرومغناطيسية من منظور الميكانيك الموجي الذي يتعامل معها على انها مجاميع من الطاقة يطلق عليه الفوتون (photon) التي تمتلك مقادير محددة من الطاقة تعطى ب ($E = h * v = h * c / \lambda$) وبغض النظر عن طبيعة المادة الصلبة هنالك عمليات تحصل عند سطوح المواد والاخرى ضمن المواد نفسها

العمليات عند السطح

إذا سقط الضوء على المادة الصلبة واعتمادا على طبيعة السطح يمكن ان يحصل

- 1- الاستطارة (scattering) ويقصد بها ارتداد الامواج الكهرومغناطيسية باتجاه الجانب القادمة منه وبكل الاتجاهات مشكلة نصف كرة. هكذا ارتداد يحصل مع السطوح الخشنة (نقول عن السطح خشنا اذا كانت الارتفاعات (التموجات) السطحية اكبر من عشر الطول الموجي للضوء الساقط ($\lambda / 10$)). وتتباين شدة الضوء المستطار تبعا للزاوية التي يرتد بها.
- 2- الانعكاس (reflection) وهي حالة خاصة من الاستطارة تصاحب السطوح الصقيلة وبها يرجع الضوء الى الجهة التي جاء منها وبزاوية مساوية لزاوية السقوط ونشير لمقدار الانعكاسية (R) وهي تمثل النسبة بين شدة الضوء المنعكس والساقط (الشدة مصطلح فيزيائي يصف مقدار القدرة بوحدة المساحة). أختلاف انعكاسية السطوح مرده لاختلاف قيم معامل الانكسار (index of refraction) لهذه السطوح، وبدلالة يمكن كتابة العلاقة الرياضية التي تصف الانعكاسية لسطحين بمعامل انكسار (n_1, n_2)

$$R = | (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2) |^2$$

يرجع التغير في قيم معامل الانكسار الى أختلاف مقادير السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية لهذه المواد وهذا يعني تغير في سرعة الضوء خلال تلك المواد ($V = c / \mu * \epsilon$)، وعليه يصف معامل الانكسار النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ الى سرعة في المادة ، ولنفس المادة تختلف قيم الانكسار باختلاف الطول الموجي الساقط ، وبسبب معامل الانكسار يميل الضوء عن مساره اذا اختلفت قيم معامل الانكسار بين وسطين، وتختلف قيم الميلان تبعا للطول الموجي للضوء الساقط. هكذا خاصية مكنت الفيزيائيين من تحليل الضوء الأبيض لمكوناته باستخدام الموشور . الاوساط المخلخلة مثل الغازات والهواء تساوي قيمة معامل الانكسار واحد وفي الاوساط غير المخلخلة (التي يحصل فيها امتصاص للضوء) نستخدم معامل انكسار معقد (n^*) يتكون من جزئين الاول حقيقي (n_r) والثاني خيالي (n_i) والعلاقة التي تربطهما بمعامل الانكسار المعقد

$$n^* = n_i + i n_r$$

في المواد الموصلة وبسبب امتلاكها لاعداد من الاليكترونات الحرة يتم امتصاص الفوتون بالحاملات الحرة التي تتهيج لمستويات طاقة اعلى وتبقى ضمن الحزمة .هذه العملية تفسر بنظرية درود الذي يفترض زمن أسترخاء (τ) يرتبط بثابت قوة الاحتكاك (m^* / τ) التي يعاني منها الاليكترون والتي تتناسب مع السرعة ، ويمكن وصفة بتردد زاوي (w_0) .

لو افترضنا ان الضوء الساقط يمتلك تردد زاوي (w) هنالك ثلاثة حالات اعتمادا على قيمة التردد الزاوي

$$w \ll 1 \rightarrow R \approx 1 - 2 \{ 2w\epsilon_0 / \delta_0 \}^{0.5} \quad \text{الحالة الاولى}$$

$$\delta_0 = [N \cdot q^2 \cdot \tau / m^*]$$

$$1 / \tau \ll w \ll w_p \rightarrow R = 1 - 2 / w_p \cdot \tau \quad \text{الحالة الثانية}$$

$$w_p \tau \gg 1 \text{ لان } \text{حيث تمثل } (w_p) \text{ تردد البلازما التردد الذي تبدا الانعكاسية الاستقرار عند القيم العالية وذلك لان } w_p \tau \gg 1$$

$$w_p = \{ \delta_0 \cdot w_0 / \epsilon_0 \}^{0.5}$$

الحالة الثالثة وهي حالة منطقة الاشعة فوق البنفسجية وفيها $w_p \ll w$ وتمتاز بانعكاسية قليلة تعطى ب

$$R \approx (1/16) \cdot (w_p / w) \cdot \{1 / (w\tau)^2\}$$

في الشكل () تظهر الحالات الثلاث.

في التعريف السابق للانعكاسية اعتمدنا شدتي الضوء المنعكس والساقط وفي الشدة نحن ندخل تأثير كلا المجالين الكهربائي والمغناطيسي ، اذا أهملنا تأثير المجال المغناطيسي وأبقينا على المجال الكهربائي فقط عندها تمثل النسبة بين المجالين الكهربائيين مانصطلح عليه بمعامل الانعكاس (r) (index of reflection) ومربع هذا المعامل تساوي انعكاسية السطح. لقياس الانعكاسية عمليا نستخدم سطح عاكس مثالي يمتلك انعكاسية عالية جدا مثل الالمنيوم الذي انعكاسيته (98%) لكل المدى المرئي ونسقط الضوء بزاوية اقل من (١٠) درجة للتخلص من تأثير الاستقطابية ونسجل القدرة من خلال مقياس القدرة الذي نضعة في مسار الضوء المنعكس لكل الاطوال الموجية ، وبعدها نستبدل السطح المثالي بالعينة المراد قياس انعكاسيتها ونسجل القدرة المنعكسة لنفس المدى من الاطوال الموجية.

في المواد شبة الموصلة يمكن ان نتواجه مع الحالات الثلاثة السابقة ولكن الفرق يكمن في مدى الترددات الزاوية التي تبدي فيها اشابة الموصلات الانعكاسية الاعلى وهذا بسبب تركيز حاملات الشحن الاقل في المواد شبة الموصلة ويكون اقل من ذلك في المواد العازلة التي تبدي نفاذية اكبر في المدى المرئي

العمليات ضمن المواد
نقصد بعمليات ضمن المواد بشكل كبير عمليات الامتصاص التي يعاني منها الضوء اثناء انتقاله خلال المواد والتي تتطلب تفاعل الاشعة الكهرومغناطيسية مع الذرات، الايونات والاليكترونات . تندرج كل هذه العمليات ضمن ما اصطلح عليه بالامتصاصية (A) (absorption) والتي تمثل النسبة بين شدتي الضوء النافذ والضوء الساقط بعد ان نطرح منها شدة الضوء المنعكس. وللتميز بين المواد المختلفة نعتمد معامل الامتصاص (α) الذي يمثل التناقص بشدة الضوء النافذ بوحدة السمك للمادة او هو مقلوب السمك الذي تهبط معه شدة الضوء الى ($1/e$) من شدته الساقطة. والعلاقة التي تربط معامل الامتصاص بامتصاصية المادة ذات السمك (d) هي

$$\alpha = (1 - R)^2 * (1/d) * \ln A$$

ومن اهم هذه التفاعلات

الاستقطابية الاليكترونية (electronic polarization)

تحصل عملية الاستقطاب والتي نقصد بها الزحزحة في الغيمة الاليكترونية نسبتا للنواة كنتيجة لتفاعل المجال الكهربائي للموجة الساقطة (الذي يتذبذب بسرعة) مع الغيمة الاليكترونية المحيطة بالنواة ضمن مساره بكل تغير في اتجاه حركة المجال الكهربائي . وكنتيجة لهذه الاستقطابية يحصل أ-امتصاص لبعض من طاقة الاشعة

ب-تغير بسرعة الامواج الكهرومغناطيسية التي تظهر على شكل انكسار(refraction).

الانتقالات الطاقية للاليكترونات

يتطلب امتصاص او انبعاث الاشعة الكهرومغناطيسية انتقال الاليكترون من حالة طاقة لآخرى. حيث ينتقل الاليكترون الى حالة طاقة متهيجة(excited state) عند امتصاص الضوء ، ولايلبث هذا الاليكترون ان يرجع الى حالة الطاقة الاولى "الارضية"(ground state) وتصاحب العودة بانبعث مقدار من الاشعة الكهرومغناطيسية بطاقة مساوية لفرق الطاقة بين الحالتين . في المواد الموصلة يمتص الضوء المنتشر خلال المادة بالاليكترونات الحرة والذي يتسبب بصعودها لمستويات طاقة اعلى ضمن الحزمة. في المواد الموصلة يجري امتصاص الضوء الساقط من قبل اليكترونات حزمة التكافؤ اذا كانت طاقة الضوء الساقط اكبر من فجوة الطاقة وهذا مانسمية بعمليات الامتصاص الاساسية(fundamental absorption) وهي تصح لكلا النوعين من المواد شبة الموصلة ذات الفجوة المباشرة وغير المباشرة وتمتاز بمعامل امتصاص كبير مقارنة بعملية الامتصاص الثانية التي تتضمن امتصاص الضوء بواسطة الذرات الشائبة التي تحصل اذا كانت طاقة الضوء الساقط اقل من فجوة الطاقة ولكنها اكبر من طاقة تأين الذرات الشائبة الموجودة في المادة . والعملية الثالثة هي الامتصاص بواسطة حاملات الشحن الحرة الموجودة في اشباه الموصلات ينتج عنها تغير في التحركية لهذه الحاملات. وهناك نوعين من عمليات الامتصاص اقل تأثيرا وهما الامتصاص بالاكسايونون(exciton) (الاكسايونون مزدوج اليكترون-فجوة ينتقل كجسيم واحد) والامتصاص باهتزازات الشبكة(lattice vibration). وادناه العلاقات الرياضية التي تصف معامل الامتصاص للعمليات السابقة لاشباه الموصلات ذات الفجوة المباشرة للانتقالات المباشرة المسموحة (α_d) وغير المسموحة (α'_d)

$$\alpha_d = B(h\nu - E_g)^{1/2} \quad \text{When } h\nu > E_g$$

$$\alpha_d = 0 \quad \text{When } h\nu < E_g$$

$$B = \frac{\pi \cdot q^2 (2m_r)^{2/3}}{n \cdot c \cdot h^3 \cdot m_0 \cdot f}$$

حيث تمثل f قوة التذبذب وتكون قيمته مقاربة للواحد m_r الكتلة المختزلة (reduced mass) وتعطى بالعلاقة التالية:

$$m_r = \frac{m_e^* \cdot m_h^*}{m_e^* + m_h^*}$$

$$\alpha'_d = C(h\nu - E_g)^{3/2} \quad \text{When } h\nu > E_g$$

$$\alpha'_d = 0 \quad \text{When } h\nu \leq E_g$$

$$C = 3/2 \cdot B (2m_r / m) \cdot f' / h\nu \cdot f$$

ومن خلال علاقة معامل الامتصاص يمكن حساب فجوة الطاقة للمادة شبه الموصلة برسم مربع معامل الامتصاص مع طاقة الفوتون نحصل على منحنى بجزء مستقيم يمثل امتداده وتقاطعه مع محور الطاقة مقدار فجوة الطاقة. ولتحديد أي من العمليات المتغلبة ، الانتقالات المباشرة المسموحة أم الممنوعة يصار إلى رسم معامل الامتصاص مع طاقة الفوتون أو الطول الموجي فإن الانتقالات المباشرة المسموح بها تمتاز بصعود في حافة الانحدار (steep edge rising) حتى ظهور الكوع (rcnee) . ونظريا" إذا كانت طاقة الفوتون مساوية لفجوة الطاقة فإن قيمة معامل الامتصاص تكون صفر. ولكن من النتائج العملية ظهر أن معامل الامتصاص يمتلك قيمة حتى بالنسبة للفوتون ذو الطاقة الأقل من فجوة الطاقة . وتعزى هذه الظاهرة الى عدة أسباب في مقدمتها تأثيرات الشوائب ، حيث أن زيادة تركيز الشوائب الضحلة يتسبب بظهور حزم طاقة داخل فجوة الطاقة والتي يمكن أن تتقاطع مع حافة حزمة التكافؤ أو حزمة التوصيل.

وفي المواد ذات الفجوة غير المباشرة وبسبب عدم حفظ الزخم ندخل امتصاص او انبعاث الفونون ويعطى معامل الامتصاص غير المباشر (α_i) بدلالة معامل الامتصاص الذي يصاحب بانبعاث فوتون (α_e) ومعامل الامتصاص الذي يصاحب بامتصاص فوتون (α_a)

$$\alpha_i = \alpha_e + \alpha_a$$

حيث

$$\begin{aligned} \alpha_e &= 0 & h\nu < E_g + E_p \\ \alpha_a &= 0 & h\nu < E_g - E_p \\ \alpha_i &= 0 & h\nu \leq E_g - E_p \end{aligned}$$

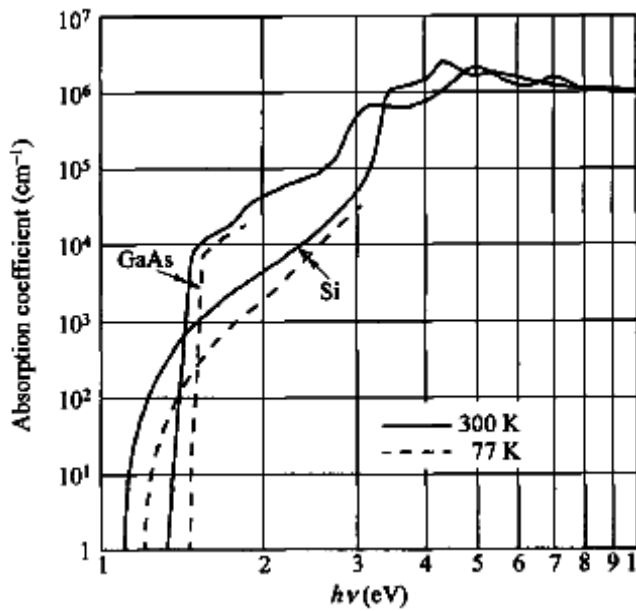
$$\alpha_i = \frac{A'}{E_g^2} \left\{ \frac{(h\nu - E_g + E_p)^2}{\exp(E_g/KT) - 1} \right\} \quad E_g - E_p < h\nu \leq E_g + E_p$$

في عمليات الامتصاص عن طريق الذرات الشائبة حيث ينتقل الإلكترون من حزمة التكافؤ إلى الذرة القابلة أو ينتقل الإلكترون من الذرة المانحة إلى حزمة التوصيل . ويتحدد معامل الامتصاص لهذه العملية بـ "كلا" من تركيز الشوائب غير المتأينة حراريا" (N_t) والمقطع العرضي لامتصاص الشوائب (δ) كما في المعادلة التالية:

$$\alpha_{imp} = \alpha N_t \cdot \delta$$

$$N_t = N - N_t''$$

حيث N التركيز الكلي للشوائب ، " N_t تركيز الشوائب المتأينة حراريا" .



الامتصاص بحاملات الشحن الحرة يحصل في منطقة طيف الأشعة تحت الحمراء المتوسطة والبعيدة ويتم الامتصاص كنتيجة لتفاعل المجال الكهربائي للأشعة الساقطة مع الإلكترونات أو الفجوات مما ينتج عنه تعجيل لحاملات الشحن. ويعتمد معامل الامتصاص هذا على عدد الإلكترونات والفجوات وعلى التحركية لحاملات الشحن والطول الموجي ويعطى معامل الامتصاص بالعلاقة التالية:

$$\alpha_{f.c} = \frac{\lambda^2 \cdot q^3}{4\pi^2 \cdot c^3 \cdot n^* \cdot \epsilon_s} \left\{ \frac{n}{m_n^{*2} \cdot \mu_n} + \frac{p}{m_p^{*2} \cdot \mu_p} \right\}$$

في المعادلة السابقة تم الاستعاضة عن N^* بـ n^* وذلك لان المواد شبه الموصلة تعتبر شفافة في منطقة طيف الأشعة تحت الحمراء.

لقياس الامتصاصي نضع مقياس القدرة على احد جوانب موحد اللون وفي الجانب الآخر مصدر ضوئي ومن ثم تسجل القدرة (I_0) بدلالة الطول الموجي وبعد هذه الخطوة نضع العينة أمام مصدر القدرة ويعاد قياس الشدة لنفس الأطوال الموجية. تحسب النفاذية T من العلاقة

$$T = I/I_0$$

ومن خلال معرفة قيمة T يمكن حساب معامل الامتصاص

$$\alpha = 1/d (1 - R)^2 \ln 1/T$$

الفصل الثالث: أشباه الموصلات: نموذج الحزم الطاقية

أشباه الموصلات النوع الثاني من المواد الصلبة والتي يعزى لها كل الفضل في التطور العلمي والتقني الذي نعرفه اليوم. وهي تشكل القاسم المشترك للكثير من التطبيقات، ففي الاتصالات البصرية مثلا منها تصنع ليزرات اشباه الموصلات التي تعمل على تحويل الإشارة الكهربائية الى إشارة ضوئية في المرسل ومنها أيضا تصنع المستقبل الذي يحول الإشارة البصرية الى كهربائية. الخلايا الشمسية تصنع من المواد شبه الموصلة حصرا لكونها المادة الوحيدة التي تمتلك الخاصية الكهرو-ضوئية. وكذلك الامر مع الوسائل الاليكترونية.

تختلف أشباه الموصلات عن امواد الموصلة بمجموعة من مميزات أهمها :

١ - تقل مقاومتها الكهربائية بزيادة درجة حرارتها بعكس المواد الموصلة التي تزداد مقاومتها الكهربائية مع درجة حرارتها.

٢ - تقل مقاومتها الكهربائية اذا امتصت بعض الاطوال الموجية الضوئية بعكس المواد الموصلة التي لاتتأثر يسقوط الضوء عليها

٣ - أذخال الشوائب (الذرة الشائبة ذرة غريبة ندخلها ضمن التركيب البلوري للمادة) في المواد شبه الموصلة ينتج عنه اما زيادة او نقصان المقاومة الكهربائية بعكس المواد الموصلة التي تزداد مقاومتها الكهربائية بوجود الشوائب.

٤ - يسري التيار الكهربائي في المواد الموصلة نتيجة لحركة الاليكترونات فقط بعكس المواد شبه الموصلة التي يسري التيار الكهربائي فيها كنتيجة لحركة الاليكترونات والفجوات أو كلاهما.

فشل نموذج الاليكترون الحر في تفسير نقاط التباين السابقة ولهذا بات من الضروري إيجاد نموذج فيزيائي جديد بدلا من نموذج الاليكترون الحر وكانت النتيجة ان تمكن العالمان شرودنكر ودي بروكل من تطوير الميكانيك الموجي الذي يختلف عن الميكانيك الكلاسيكي ومن خلال الحلول لمعادلة شرودنكر تمكن العالمان من وضع تصور عن تركيب المواد الصلبة الذي يعتمد فكرة تكون المواد الصلبة من حزم طاقية (حزمة الطاقة هي مجموعة مستويات طاقية متقاربة من بعضها البعض) ممتلئة بالاليكترونات تفصل بينها فواصل طاقية وأخر حزمة ممتلئة نسميها حزمة التكافؤ (Valance band) وأخر حزمة خالية أو ممتلئة جزئيا نسميها حزمة التوصيل (Conduction band) والمسافة الطاقية الفاصلة نسميها فجوة الطاقة (Energy gap) وسمي بنموذج الحزم الطاقية (Energy bands). في هذا النموذج يتوجب ان يتواجد الاليكترون في حزمة التوصيل لكي يساهم في عملية التوصيل الكهربائي. اذا ترك الاليكترون مكانه في حزمة التكافؤ ينتج عن ذلك ظهور شحنة موجبة نطلق عليها تسمية الفجوة (hole) هي الاخرى تساهم في نقل التيار الكهربائي.

نموذج الحزم الطاقية

كانت الصورة التقليدية للذرات وكأنها مكونة من النواة الموجبة وتدور الاليكترونات حولها في مدارات محددة ولكن هكذا دوران لا بد وان يترتب عليه ان تشع الذرات امواج كهرومغناطيسية مستمرة وهذا لم يثبت صحتة من الدراسات الطيفية التي اظهرت انبعاث مقادير من الطاقة المحددة وليست اطياف مستمرة ، بالاضافة لذلك استمرار دوران لاليكترونات لا بد لها في النهاية من ان تفقد طاقتها وتثبت الى النواة وهذا ما لم يحصل. الصورة التقليدية تغيرت من خلال طروحات العالم نيلز بور الذي طرح جملة فرضيات في العام ١٩١٣ تمثلت في :

- ١ - تتواجد الاليكترونات في مدارات محددة حول النواة ولايمكن تواجدها بين هذه المدارات تمتلك انصاف اقطار تعطى بدلالة كمية ثابتة (a_0) اطلق عليها نصف قطر بور (0.53 \AA) وتحسب طاقة المدار بدلالة ثابت رايدبيرك (R_H) الذي يساوي $2.15 \times 10^{-18} \text{ J}$.
- ٢ - تمتلك الاليكترونات في هذه المدارات زخم ثابت هو مضاعفات الكمية ($h v$).
- ٣ - يمكن للاليكترونات الانتقال بين المدارات صعودا اذا اكتسبت الطاقة الكافية او نزولا اذا فقدت جزء من طاقتها .

لو افترضنا ان مادة ما تواجدت بحالتها الغازية فهذا يعني ان ذراتها سوف تكون متباعدة وعلية تخضع اليكترونات الذرة الواحدة لتأثير نواتها فقط وليس للذرات الاخرى أي تأثير عليها.فرضا جعلنا هذه الذرات تتقارب بتحويلها من الحالة الغازية للحالة الصلبة في هذه الحالة تتأثر اليكترونات الذرات بالذرات المجاورة ينتج عن هذا التأثير خسارة بعض الاليكترونات مقدار من طاقتها و اكتساب البعض الاخر مقدار من الطاقة تبعا لاتجاة حركة الاليكترونات نسبتا لاتجاة مجال الذرة المجاورة، مما يعني ان الاليكترونات لن تتواجد في مداراتها السابقة بل يفترض تواجدها في مدارات بين المدارات الاصلية وهذا ما يتناقض مع طروحات بور . وتجنبنا لهذا التعارض طرحت فكرة انشطار المدارات (splitting) الى مستويات طاقة بسبب التقارب وان المدار الابعد عن النواة يعاني من انشطارات اكثر من القريب للنواة.معنى ان المدار الواحد سوف يتحول الى مجموعة مستويات طاقة يمكن للاليكترون التواجد فيها. علية يمكن اعتبار المواد الصلبة متكونة من حزم طاقة (حزمة الطاقة هي مجموعة مستويات طاقة متقاربة من بعضها البعض) ممتلئة بالاليكترونات تفصل بينها فواصل طاقة وأخر حزمة ممتلئة نسميها حزمة التكافؤ (Valance band) وأخر حزمة خالية أو ممتلئة جزئيا نسميها حزمة التوصيل (Conduction band) والمسافة الطاقية الفاصلة نسميها فجوة الطاقة (Energy gap)

أستخدم نموذج الحزم الطاقية لتفسير ماعجز عن تفسير نموذج الاليكترون الحر والتي ذكرناها بداية الفصل. فسرت التوصيلية الكهربائية العالية في المواد الموصلة على اساس تداخل الحزم الطاقية وانعدام فجوة الطاقة أي ان الاليكترون بمقدوره التواجد في حزمة التوصيل وبالتالي المساهمة في التيار الكهربائي حتى مع تسليط مجال كهربائي قليل في الوقت الذي تحدد قيمة فجوة الطاقة اعداد الاليكترونات المساهمة بقيمة التيار الكهربائي في المواد شبة الموصلة ولان فجوة الطاقة كبيرة في المواد العازلة لهذا تبدي مقاومة كهربائية عالية. زيادة المقاومة الكهربائية في المواد الموصلة ونقصانها في اشباه الموصلات مع ارتفاع درجة الحرارة فسرت على اساس ان ارتفاع درجة الحرارة في المواد الموصلة ينتج عنه زيادة في اهتزازات الشبكة البلورية والذي ينعكس سلبا على استطارة الاليكترونات مما يزيد المقاومة الكهربائية وعلى العكس في المواد شبة الموصلة التي ينتج عن ارتفاع درجة حرارتها زيادة باعداد الاليكترونات التي تكتسب طاقة وتنتقل لحزمة التوصيل أي نقصان في المقاومة الكهربائية.فسر نقصان المقاومة الكهربائية في المواد شبة الموصلة الذي يصاحب امتصاصها للضوء بطاقة اكبر من فجوة الطاقة على ان اليكترونات حزمة التكافؤ سوف تمتص طاقة الضوء الساقط وتنتقل الى حزمة التوصيل و سميت هذه الظاهرة لاحقا بالظاهرة الكهرو - ضوئية. وجود الشوائب في المواد الموصلة ينتج عنه عيوب تركييبية تزيد من أستطارة الاليكترونات، في المواد شبة الموصلة قد تسهم الشوائب بزيادة التوصيلية الكهربائية اذا نتج عنها توصيلية كهربائية مطابقة للتوصيلية الكهربائية الاساسية وقد تسهم في نقصان التوصيلية الكهربائية اذا استخدمت الشوائب لاطفاء الشوائب الموجودة في المادة شبة الموصلة أصلا .

أستخدام الميكانيك الموجي

في الميكانيك الموجي يتعامل مع الشحنة المنتقلة ضمن المواد الصلبة بشكل مناظر للتعامل مع الضوء ، الضوء يمتلك الخاصية الموجية التي تستخدم لتفسير ظواهر مثل الانعكاس والتداخل والخاصية الجسيمية التي تنظر للضوء الساقط وكأنه مكون من كم من الطاقة (الفوتونات). علىية يصاحب الجسيم المشحون المتحرك بموجة تنتقل بانتقاله وعن طريق سعة الموجة المصاحبة يمكن تأكيد وجود أو عدم وجود الاليكترون. لو امتلك الجسيم طاقة (E) وزخم (P) وينتقل بسرعة ($V_g = dE / dp$) سوف يصاحب بموجة ذات تردد ($v = E / h$) وطول موجي ($\lambda = h / p$) وبسرعة ($V = \lambda * v$). الموجة المصاحبة يمكن تمثيلها بدالة (ϕ) تعطي التغير الفضائي والزمني تأخذ الشكل التالي

$$\phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z) \exp - j\omega t$$

يمثل الجزء الاول التغير الفضائي والجزء الثاني يمثل التغير الزمني، ومربع الجزء الاول يمثل سعة هذه الموجة. ولاننا نهم بالموجات المستقرة لهذا لن ندخل الجزء الثاني في الحسابات. في هذه الحالة لو أخذنا احداثي واحد تأخذ دالة شروندكر الشكل التالي (علما ان النتيجة هي نفسها مع الاحداثيات الاخرى)

$$d^2\phi(x)/dx^2 + 2m/\hbar^2 \{ E(x) - V(x) \} \phi(x) = 0$$

في العلاقة السابقة $\phi(x)$ كمية تحدد احتمالية وجود الموجة

$$|\Phi(x)|^2 = dp/dx$$

اما $V(X)$ يمثل الجهد الدوري البلوري وهو مقدار فيزيائي يشتمل على تأثير اصطدام الاليكترونات مع الذرات وتصادم الاليكترونات مع بعضها البعض

$$V(x) = V_i(x) + V_e(x)$$

الجهد الناشئ عن التصادم مع الذرات مقدار دوري " جهد تكراري " بعكس التصادم مع الاليكترونات والذي ليس بالضرورة ان يكون دوري وهو مقدار صغير يمكن أهمله. لحل معادلة شروندكر هنالك حالتين الاولى نلغي فيها تأثير الجهد البلوري الداخلي وهذا مايمثل حالة الاليكترون الحر. الثانية أن نأخذ الجهد البلوري بنظر الاعتبار.

الحالة الاولى

بغياص الجهد الداخلي ($V(x) = 0$) تصبح معادلة شروندكر بالشكل التالي

$$d^2 \phi(x) / dx^2 + (2m / \hbar^2) E(x) \phi(x) = 0$$

والحل لهذه المعادلة هو

$$\phi(x) = \text{cont.} \exp(jkx)$$

$$K^2 = (2mE) / \hbar^2$$

يمثل (k) متجهة الموجة (wave vector) وهو كمية فيزيائية تمثل الفضاء الذي تتحرك فيه الموجة وترتبط قيمة

بكل من الطول الموجي ($k = 2\pi / \lambda$) وبمقدار الزخم

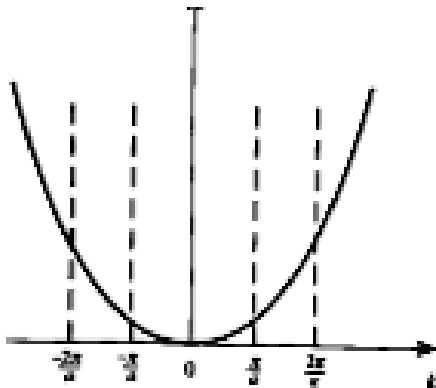
الذي يمتلكه الجسيم المشحون المتحرك ($p = \hbar * k$)

قيم متجه الموجة هي مضاعفات المسافة بين الذرات

($k = n\pi / a$) بمعنى انه تكراري. لو رسمنا العلاقة

بين k^2 و E نحصل على قطع ناقص (parabola)

مما يعني ان الاليكترون سوف يتواجد في كل الفضاء الذي



يمثلة متجهة الموجة ماعدا $k = 0$.

الحالة الثانية

ندخل تأثير الجهد الداخلي وتصبح معادلة شرودنكر بالشكل التالي

$$\frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \{ E(x) - V(x) \} \phi(x) = 0$$

الحل في هذه الحالة يأخذ الشكل التالي

$$\phi(x) = U_k(x) \exp(jkx)$$

في العلاقة الاخيرة تمثل الكمية $(U_k(x))$ دالة بلوخ وهي كمية تكرارية . كذلك تكون الطاقة تكرارية وتأخذ الشكل

التالي

$$E(k + n\pi/a) = E(k)$$

هذا يعني ان قيمة الطاقة تكون صفر عندما تكون قيمة k صفر وذلك لان $(E = k^2 \cdot \hbar^2 / 2m)$ كذلك تكون

قيمة الطاقة صفر عند قيم لمتجهة الموجة المساوية ل $\pi/a, 2\pi/a, 3\pi/a$ وهكذا . وماين هذه القيم للطاقة قيم

غير الصفر .علية في فضاء البلورة هنالك مناطق

تمتلك فيها الطاقة قيم وهنالك مناطق تكون الطاقة

فيها صفر أي لايمكن ان يتواجد فيها الاليكترون

تمثل الفواصل الطاقية (فجوات طاقية) وتلك التي

يتواجد فيها الاليكترون تمثل حزم الطاقة واخر

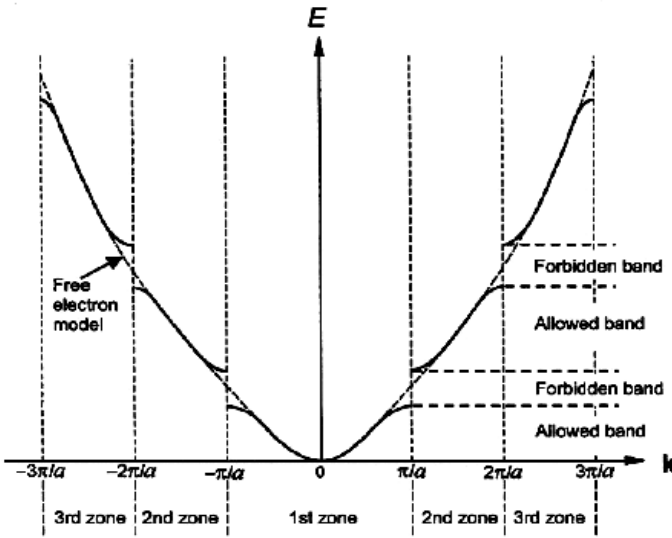
حزمة ممتلئة هي حزمة التكافؤ واخر حزمة خالية

او ممتلئة جزئيا هي حزمة التوصيل وما بينهما

فجوة الطاقة .بسبب الجهد الدوري تنحني نهاية

السطح الى الاسفل بينما تنحني بداية السطح

الى الاعلى كما في الشكل (4-2)



الشكل (4-2) يوضح الحزم الطاقية المسموحة وغير المسموحة في المواد الصلبة

الطرح السابق الذي وضح شكل التركيب الطاقى للمواد شبة الموصلية هو وصف لشكل الحل لمعادلة شرودنكر ،

وحقيقة تركيب المواد شبة الموصلية يختلف عن هذا وفيه تتكون المواد شبة الموصلية من ذرات تترتب تبعا لواحد من

التركيب البلورية التي وردت ف الجدول () . بمعنى ان حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ وفجوة الطاقة واقعا لاوجود

لها والصورة التي صورت حل معادلة شرودنكر كانت مؤهلة جدا للاجابة وتفسير نقاط التباين التي اوردناة بداية

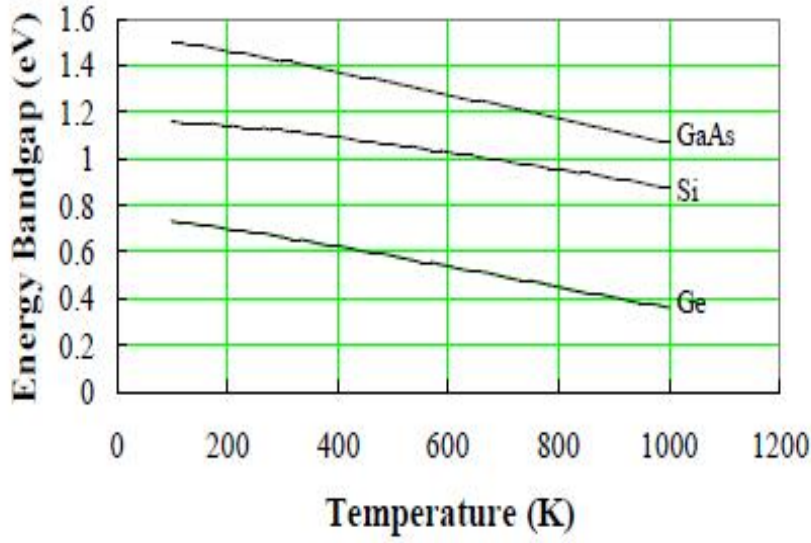
الفصل.

أعتمدت نتائج نموذج الحزم الطاقية لرسم صورة للتركيب البلوري للمواد الموصلية والذي تميز بانعدام فجوة الطاقة

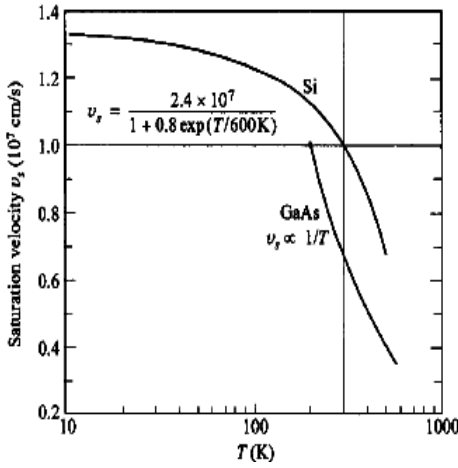
بمعنى ان الحزمة الممتلئة تتصل مع الحزمة الخالية . في المواد شبة الموصلية تقل قيمة فجوة الطاقة مع درجة الحرارة كما في

الشكل () وهذا متأتى من تغير ثوابت الشبكة وغالبا ما نستخدم العلاقة التالية لوصف التغير

$$E_g(T) = E_g(0) - (A T^2 / B +$$



كذلك يستسبب زيادة تركيز الاليكترونات في حزمة التوصيل وتركيز الفجوات في حزمة التكافؤ بنقصان في قيمة فجوة الطاقة وذلك لتطور (enhancement) تفاعل حاملات - حاملات . وتنسب زيادة الاشابة تشوة الشبكة البلورية وهو مانسمية ذنب الحزمة (band tailing)



ولان الاليكترونات في الفلزات حرة وبحالة حركة دائمة والطاقة التي تمتلكها هي طاقة حركية ($E = 0.5 m V_f^2$). اذا تصورنا ان السرعة بالاحداثيات الثلاثة (V_x, V_y, V_z) تشكل فضاء للسرعة هذا الفضاء يكون ممتلئ بالنقاط مشكل بذلك كرة نصف قطرها (V_f) نسبية سرعة فيرمي لهذا تعطى طاقة فيرمي بدلالة $E_f = 0.5 m^* V_f^2$ واذا اعتبرنا ($E_f = 5eV$) عندها يمكن ان تبلغ سرعة فيرمي 10^6 م / ثا وهي سرعة عالية. خارج الكرة يكون الفضاء خاليا بدرجة الصفر لانعدام وجو اليكترونات بطاقة مساوية لطاقة فيرمي ، ونطلق على سطح الكرة تسمية سطح فيرمي

والذي عنده تحدد الطاقة بتركيز الاليكترونات في المادة وتعطى ب ($E_f = \hbar / 2m (3 \Pi^2 N)^{2/3}$)

Effective mass الكتلة الفعلية

ان إحدى أهم النتائج التي خرج بها نموذج الحزم الطاقةية هي ان حاملات الشحنة في المواد سوف تنتقل وكأنها تمتلك كتلة غير كتله السكون التي أفترضها نموذج الاليكترون الحر نسميها الكتلة الفعلية (m^*). يمكن الوصول الى هذا الاستنتاج :

$$Vg = dE / dP$$

$$E = h * v \text{ -----}, dE = h * dv$$

$$P = h * k \text{ -----} \quad dP / dt = h (dk / dt) = F$$

$$Vg = dE / h dk$$

$$dVg / dt = (1 / h) (d^2E / dk * dt) = (1 / h) (d^2E / dk^2) (dk / dt)$$

$$dV / dt = a = F / m = (F / h^2) * (d^2E / dk^2)$$

$$(1 / m^*) = (h^2)^{-1} * d^2E / dk^2$$

الكتلة الفعلية هذه يمكن ان تكون أكبر او أصغر او تساوي كتلة السكون اعتمادا على اتجاه القوة الداخلية (التي تنسأ من المجال الكهربائي الداخلي) والخارجية التي تنشأ عن المجال الكهربائي الخارجي ، بكلام آخر يمكن ان شكل العلاقة التي تربط كلا الكتلتين تأخذ الشكل التالي

$$m^* = (F_{ext} / F_{ext} + F_{in}) * m_0$$

من العلاقة الرياضية التي تعطي كتلة السكون يظهر جليا ان كتلة السكون تتأثر كثيرا ب (d^2E / dk^2) بمعنى انها تتأثر بمقدار التكرور الذي يصاحب حزمة التكافؤ لهذا نجد بعض المواد شبه الموصلة تمتلك كتلتي سكون للفجوات كتلة ثقيله (heavy hole hh) وكتلة خفيفة (light hole Lh). الجدول () يوضح قيم الكتلة الفعلية لبعض المواد شبه الموصلة.

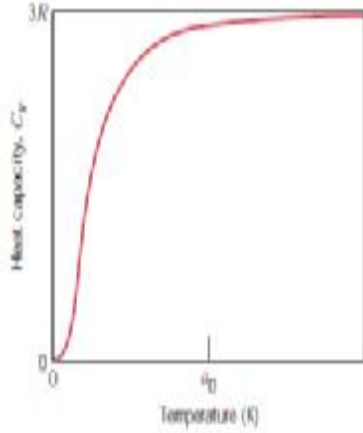
الفصل الثالث : الخصائص الحرارية للمواد الموصلة

عادتا يقصد بالخصائص الحرارية استجابة المواد الصلبة للتغير الحراي في المادة ، وذلك لقدرة المواد الصلبة على امتصاص الطاقة على شكل حرارة والتي تصاحب بارتفاع درجة الحرارة وزياد ابعادها. يمكن ان تنتقل الحرارة للمناطق الابرد في العينة اذا حصل تدرج في درجة الحرارة وبالنهيأة يمكن ان تنصهر المادة. وللتعرف على الخصائص الحرارية يستخدم بعض المفاهيم الفيزيائية مثل السعة الحرارية، التمدد الطولي والتوصيلية الحرارية التي تكون حرجة جدا لبعض التطبيقات ، هذا بالاضافة للدور الذي تلعبه الخصائص الحرارية في الخصائص الكهربائية نتيجة عمليات الاستطارة التي تحصل في الاليكترونات الحرة.

اذا ارتفعت درجة حرارة المادة نتيجة لتسخينها فهذا يعني ان المادة الصلبة قد امتصت الطاقة ، ولتوضيح قدرة المادة على امتصاص الحرارة من المحيط نستخدم السعة الحرارية (Heat capacity C) والتي تمثل كمية الطاقة المطلوبة لرفع درجة الحرارة درجة واحدة ، رياضيا تمثل السعة الحرارية

$$C = dQ / dT$$

وغالبا ماتحدد السعة الحرارية بالمول من المادة وهذه مانسميها بالحرارة النوعية (Specific heat c) وهي تمثل السعة احرامية لوحدة الكتلة امتصاص الطاقة مع ثبوت الحجم ونشير لها ب (c_v) او بثبوت الضغط ونشير لها ب (c_p) وتكون قيمة (c_p) اكبر من (c_v) بدرجة حرارة الغرفة او الدرجات الاوطى ويكون الفرق طفيفا لغالبية المواد الصلبة. الشكل (3-1) بين التغير في السعة الحرارية تحت حجم ثابت.



الشكل (3-1) التغير بالحرارة النوعية بدلالة درجة الحرارة

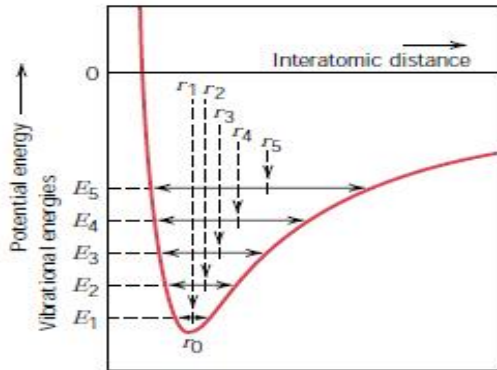
بدرجة الصفر المطلق تكون قيمة (c_v) صفر ولكنها تزداد بسرعة مع ارتفاع درجة الحرارة لقيم من درجات الحرارة لتستقر القيمة ولا تتغير ودرجة الحرارة التي تستقر عندها قيمة (c_v) تسمى بدرجة حرارة ديبي (Debye) ونشير لها ب (θ_D) وللدرجات الحرارية الاقل تتناسب (c_v) مع درجات الحرارة ويمثل هذا التناسب ب $c_v = A T^3$ حيث A ثابت التناسب . تعطى القيمة التقريبية لقيمة (c_v) بدلالة ثابت الغازات العام (3 R). الاستقرار يعنى انه مع زيادة الطاقة الكلية للمادة الا ان الطاقة المطلوبة للاحداث تغير مقدارة درجة واحدة ثابتة.

التمدد الحراري ظاهرة تصاحب غالبية المواد الصلبة عند ارتفاع درجة الحرارة ، وبحسب التغير في الطول والحجم من العلاقات التالية

$$\Delta l = l_0 * \alpha_l * \Delta T$$

$$\Delta V = V_0 * \alpha_v * \Delta T$$

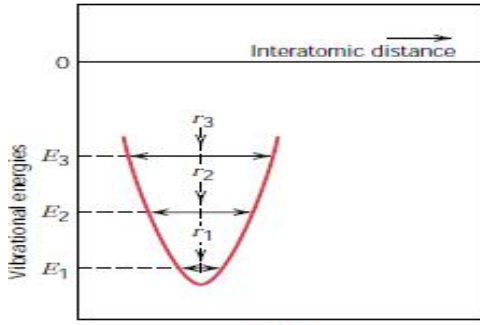
في العلاقات السابقة تمثل l_0 الطول الابتدائي وكذلك تمثل V_0 الحجم الابتدائي اما α_l و α_v يمثلان معاملي التمدد الطولي والحجمي على التوالي. في المواد غير المتجانسه (an isotropic) تعتمد قيمة معامل التمدد الحجمي على الاتجاه



الشكل (١-٣) التغير في المسافة الفاصلة مع درجة الحرارة

البلوري وفي المواد المتجانسه ($\alpha_v = 3 \alpha_l$).

ينعكس التمدد الحراري بزيادة في متوسط المسافة بين الذرات وبالرجوع الى منحنى الطاقة الكامنة مع المسافة بين الذرات كما في الشكل (١-٣) نجد ان الفاصل المتزن (r_0) يطابق الطاقة الادنى. وبالتسخين لدرجات حرارية T_1, T_2, T_3 الخ يترتب عليها زيادة في طاقة الاهتزاز من E_1 الى E_2 حيث يطابق متوسط سعة اهتزاز الذرة العرض E المقابل لة لكل درجة حرارة الذي يمثل متوسط المسافة الفاصلة التي تزداد من r_0 الى r_1 الى r_3 وهكذا. لهذا التمدد الحراري هو حقيقة بسبب عدم التناظر لمنحنيات الطاقة وليس بسبب زيادة سعة اهتزاز الذرات . ولو كان منحنى الطاقة الكامنة متناظر كما في الشكل (٣ - ٢) لن يكون هناك



تغير صافي في المسافة الفاصلة وبالتالي لن يحصل تمدد حراري. وبشكل عام كلما ازدادت طاقة الربط للذرات يكون منحنى الطاقة ا أعمق واقل عرضا وبالتالي تكون قيم α_l قليلة .

الشكل (٣-٢) التغير في الطاقه الاهتزازيه مع المسافه

الفاصله

التوصيلية الحرارية هي الخاصية التي تصف قدرة المادة على لانتقال الحرارة من منطقة بدرجة حرارة اعلى لمنطقة بدرجة اوطى . رياضيا تعطى بالعلاقة

$$Q = -k_{th} * dT/dx$$

حيث Q تمثل الفيض الحراري (كمية الحرارة المنتقلة بوحدة المساحة العمودية على اتجاه الانتقال ووحدة الزمن) تعطى بوحدات واط /م² اما التوصيلية الحرارية k_{th} فوحداتها هي واط / م. الاشارة السالبة تعني ان انتقال الحراة بعكس اتجاه التدرج الحراري (العلاقة السابقة تصح لحالة الانتقال المستقر أي لا يحصل تغير في الانتقال مع الزمن). هنالك طريقتن لانتقال الحرارة في المواد الصلبة الاولى من خلال اهتزازات الشبيكة والثانية من خلال الاليكترونات ، لهذا تعطى تمثل التوصيلية الحرارية الكلية بالمجموع الجبري للاثنتان بمعنى ان ($k_{th} = k_l + k_e$) وغالبا ما يتغلب احدهما. الاليكترونات تساهم في الانتقال الحراري من خلال التفاعل مع الفونونات وبعض العيوب وبهذا تعمل على نقل الطاقة الحركية للذرات وتزداد مساهمة الاليكترونات كلما زاد تركيزها.

منذ البدء كانت هناك قناعة في ان علاقة ما تربط بين الخصائص الكهربائية والحرارية للمواد والتي تمثلت في قانون وايدمان- فرانز (Wiedemann-franz) الذي اعطى النسبة بين التوصيلية الحرارية (k_{th}) والتوصيلية الكهربائية (δ) في العام 1823 بالشكل التالي

$$k_{th} / \delta = C_{wf} * T$$

حيث C_{wf} ثابت قيمته ($2.13 * 10^{-8}$). لقد حاول العالم درود ان يحسب نظريا قيمة الثابت في المواد الموصلة وخرج بعلاقة مناظرة لعلاقة وايدمان- فرانز

$$k_{th} / \delta = 1.5 * (k_B / q)^2 * T$$

ومن الحسابات النظرية ظهر ان قيمة الثابت هي ($1.22 * 10^{-8} W\Omega / K^2$). ومن هاتين العلاقتين يمكن القول ان المواد التي تمتلك توصيلية كهربائية عالية تمتلك توصيلية حرارية عالية كما في الجدول (٣-١)

المادة	$\delta * 10^7 (\Omega m)^{-1}$	$k_{th} (W\Omega / K)$	$C_{wf} * 10^{-8} (W\Omega / K^2)$
الفضة	6.15	423	2.45
الالمنيوم	3.55	210	2.02
الرصاص	0.45	34	2.56

ولان الاليكترونات هي المسؤولة عن نقل الطاقة الحرارية في المواد الموصلة بينما في المواد العازلة تساهم الفونون بالاضافة للاليكترونات هي المسؤولة عن التوصيل الحراري، لهذا لابد من دراسة السعة الحرارية للاليكترونات (C_e) وتبعاً لنظرية الاليكترون الحر تحسب السعة الحرارية للاليكترونات بدلالة ثابت بولتزمان وعدد أفكادرو

$$C_e = 1.5 * R = N_{AV} * k_B \approx 3 \text{ cal / mol.K}$$

وإذا ادخلنا تأثير الفونون تصبح السعة الحرارية الكلية

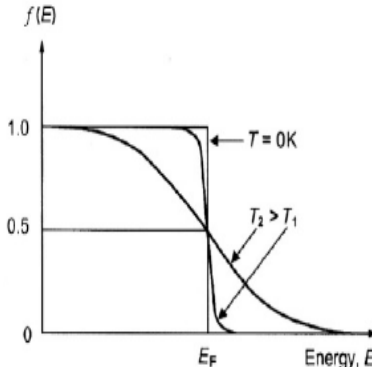
$$C = C_e + C_{ph} = 1.5R + 3R = 4.5R = 9 \text{ cal / mol.K}$$

في المواد الموصلة تكون الاليكترونات هي المسؤلة عن نقل الطاقة الحرارية في الوقت الذي تلعب الفونونات دورا أكبر في المواد شبة الموصلة والعازلة ، وتتحدد كمية الطاقة الحرارية المنتقلة بالسعة الحرارية للاليكترونات (Ce) التي تمثل التغير في طاقة الاليكترون بدلالة التغير بدرجة الحرارة. وتبعاً لنموذج اليكترون الحر تحسب السعة الحرارية للاليكترونات بدلالة ثابت بولتزمان (K_B) وعدد أفكادرو وإذا أدخلنا تأثير الفونونات عندها تصبح السعة الحرارية الكلية

$$C = C_e + C_{ph}$$

$$C = 1.5R + 3R = 4.5R \approx 9 \text{ cal/mol.K}$$

من التجارب العملية ظهر ان السعة الحرارية للفلات هي (3R) وان السعة الحرارية للاليكترونات أقل من القيم النظرية بحدود (10^{-2}). يمكن تفسير هذا التفاوت في القيم اذا ما اعتبرنا ان الاليكترونات تحتل مستويات طاقة محددة. وتبعاً لقاعدة باولي في الاستثناء (التي تنص على ان المستوي الطاقى يتقبل اليكترونين لهما قتل متعاكس) لهذا فإن أوطئ مستوي طاقى سوف يحتوي على اليكترونين وهكذا حتى تتوزع الاليكترونات كلها بواقع اليكترونين لكل مستوي . نطلق على طاقة أعلى مستوي تسمية طاقة فيرمي وفي المواد



الموصلة تساوي (5eV). ولتوزيع الاليكترونات في المستويات الطاقية نستخدم أحصاء فيرمي الذي يمتاز بدالة فيرمي $f(E)$ التي تعطي احتمالية امتلاء أي مستوي بدلالة الطاقة التي يمتلكها ذلك المستوي وبدلالة طاقة مستوي فيرمي (E_F). يعتبر المستوي فارغ اذا كانت قيمة الدالة صفر وممتلئ اذا كانت القيمة واحد ، بمعنى $F(E) = 1$ اذا كانت $E < E_F$ وتكون $F(E) = 0$ اذا كانت $E > E_F$.

الشكل (٣-١) يوضح التغير في احتمالية امتلاء أي مستوي بدلالة طاقة ذلك المستوي وعند درجتى حرارة.

الشكل (3-1) يوضح التغير في احتمالية امتلاء أي مستوي بدلالة طاقة ذلك المستوي وعند درجتى حرارة.

الشكل الرياضي لدالة فيرمي هو

$$F(E) = 1 / (1 + \exp \{ (E - E_F) / k_B T \})$$

ومن العلاقة السابقة يمكن تعريف مستوي فيرمي بأنة المستوي الطاقى الذي يمتلك احتمالية امتلاء مقدارها نصف. تستخدم طاقة فيرمي (E_F) لحساب عدد الاليكترونات التي يمكن أن تتهيج عند درجة حرارة (T) وهذا لان عدد الاليكترونات المتهيجة يساوي النسبة بين الطاقة الحرارية للاليكترونات عند تلك الدرجة الحرارية و طاقة فيرمي وإذا أدخلنا عدد أفكادرو عندها يساوي عدد الاليكترونات المتهيجة في المول الواحد { $(3/2 k_B T / E_F) N_{AV}$ }. تحسب الطاقة الحرارية للمول الواحد بدلالة العلاقة التالية

$$E_{th} = [(3/2 k_B T / E_F) N_{AV} * 3/2 k_B T]$$

وباجراء التفاضل لطاقة المول مع درجة الحرارة نحصل على السعة الحرارية للاليكترون

$$C_e = 3R * k_B T / E_F$$

وبالمقارنة مع النتائج النظرية لنموذج درود تعطى السعة الحرارية بدلالة ($k_B T / E_F$). عند درجة حرارة ٣٠٠ كلفن وإذا اعتبرنا ($E_F = 5 \text{ eV}$) يكون مقدار النقصان بحدود (1/200) وهي نتيجة مقاربة جدا للقيم التجريبية . من العلاقة السابقة يظهر ان (C_e) هي دالة خطية لدرجة الحرارة وهذا مالا يتفق مع النتائج التجريبية التي تنص على أن (C_e) تكون ثابتة في درجات الحرارة العالية وتتاسب مع (T^3) في درجات الحرارة الواطنة. لهذا ولأجل الحصول على صيغة أقرب

للوابع تحسب الحرارة النوعية من العلاقة التالية

$$C_e = (\pi^2 / 2) * R * k_B T / E_F$$

Fermi Surfaces سطوح فيرمي

في المواد الموصلة تكون الاليكترونات حرة وبحالة حركة دائمة وتمتلك طاقة حركية ($E=0.5 \text{ mv}^2$) وإذا تصورنا السرعة بالاحداثيات الثلاثة (V_x, V_y, V_z) تشكل فضاء للسرعة ، وهذا الفضاء سوف يكون ممتلئاً بالنقاط مشكلاً بذلك كرة نصف قطرها نسبية سرعة فيرمي (V_f) لهذا يمكن كتابة علاقة الطاقة بالشكل التالي ($E_f = 0.5 m (V_f)^2$) وإذا اعتبرنا ($E_f = 5 \text{ eV}$) تصل عندها قيمة السرعة (V_f) لحدود (10^6 م/ثا) وهي سرعة عالية. بدرجة حرارة الصفر المطلق يكون الفضاء خارج الكرة خالي وذلك لعدم وجود اليكترونات تمتلك طاقة مساوية لطاقة فيرمي ونسبي سطح الكرة سطح فيرمي . وعادتنا ماتساهم الاليكترونات القريبة جدا من مستوي فيرمي في التيار الكهربائي وفي عمليات التوصيل الحراري. تتحدد طاقة فيرمي بتركيز الاليكترونات (n) في المادة وتعطى بالعلاقة التالية:

$$E_f = (h^2 / 2m) (3 \Pi^2 * n)$$

في المواد الموصلة تتأتى التوصيلية الحرارية من التوصيلية الحرارية الاليكترونية (K_{the}) والتوصيلية الحرارية للفونونات ($K_{th ph}$) ، لهذا تعطى التوصيلية الحرارية الكلية بالعلاقة :

$$K_{th} = K_{the} + K_{th ph}$$

في المواد الموصلة التوصيلية الحرارية الاليكترونية هي المتغلبة وهذه تعطى بالعلاقة :

$$K_{the} = 1/3 (C_e * V_f * I_f)$$

في العلاقة السابقة تمثل (I_f) متوسط المسار الحر لاليكترون يمتلك طاقة مساوية لطاقة فيرمي. وبالتعويض عن (C_e) نحصل على :

$$K_{the} = 1/3 (\Pi^2 * N_{AV} * k_b^2 T / 2 E_f) (V_f * I_f)$$

$$K_{the} = \Pi^2 * N_{AV} * k_b^2 T * V_f * I_f / 6 m V_f^2$$

ولان النسبة (I_f / V_f) مثل متوسط الزمن الحر (τ) عليه

$$K_{the} = \Pi^2 * N_{AV} * k_b^2 T * \tau / 3m$$

وبقسمة التوصيلية الحرارية للاليكترونات على التوصيلية الكهربائية لمول واحد ($\sigma = N_{AV} * \tau * q^2$) نحصل على

$$K_{the} / \sigma T = 1/3 (\Pi k_b / q)^2 = L$$

حيث (L) هو عدد لورنز والجدول (٣-٢) يوضح قيم عدد لورنز لبعض الفلزات

التوصيلية الحرارية في المواد شبه الموصلة

تعتبر التوصيلية الحرارية عملية تحويل للطاقة . ولفهم التوصيلية الحرارية لنفترض إن قطعة من مادة شبه موصلة معزولة عن محيطها ، ولسبب ما حصل تفاوت في درجة الحرارة قدره (ΔT) مابين طرفيها ، عند ذاك يحصل سريان لفيض من الطاقة (ΔE) باتجاه معاكس لاتجاه التدرج الحراري ومقدار هذا الفيض يتناسب ومقدار الفرق في درجات الحرارة ويمثل ثابت التناسب التوصيلية الحرارية (K_{th}) كما في العادلة :-

$$\Delta E = K_{th} * \Delta T$$

ومن الناحية العددية تساوي التوصيلية الحرارية كمية الطاقة المارة بوحدة الزمن خلال وحدة المساحة لعينة تختلف درجة الحرارة بين طرفيها درجة كلفن واحدة ، وتعطى التوصيلية الحرارية بوحدة واط /سم² . كلفن . وفي المواد الموصلة

تكون التوصيلية الحرارية بسبب حاملات الشحن (الالكترونات) بينما تكون في المواد شبه الموصلة متأينة من حاملات الشحن (الالكترونات والفجوات) والتي تشير إليها بتوصيلية حاملات الشحن (K_n, K_p) ومن التوصيلية الحرارية الشبيكية (K_l) أو ما يطلق عليها بعض الأحيان بالتوصيلية الحرارية للفوتونات (Lattice or phonon heat conductivity) وتعطى التوصيلية الحرارية بالعلاقة التالية :-

$$K_{tph} = 1/3 C V_s I_{ph}$$

حيث تمثل C الحرارة النوعية للشبيكة (lattice specific heat) والتي تمثل كمية الحرارة التي يمتصها أو يبعثها وحدة الحجم للمادة عندما تتغير درجة حرارتها درجة كلفن واحدة عليه فهي تمثل مقياس لكثافة الفوتونات. V_s هي سرعة الصوت وهي السرعة التي تنتشر فيها الفونونات $I_{ph} = (5 \times 10^5 \text{ cm/sec})$ فهو يمثل معدل المسار الحر للفوتون وتختلف قيمته لنفس المادة تبعاً لدرجة حرارتها، تكون قيمته في درجة حرارة الانصهار هي $I_{ph} = 5^{-10} \text{ A}$ أما في درجات الحرارة الواطئة فإن $I_{ph} = 0.1 \text{ cm}$. والشكل (٤-١) يوضح تغير التوصيلية الحرارية لبعض المواد شبه الموصلة بتغير درجة الحرارة.

في المواد شبه الموصلة تعطى التوصيلية الحرارية الكلية بدلالة التوصيلية الحرارية للشوائب K_i والتوصيلية الحرارية للإلكترون والفجوات K_n, K_p ، والتوصيلية الحرارية للفوتون K_{ph} والشكل النهائي للعلاقة الرياضية

$$K_{th} = K_n + K_p + K_{ph}$$

في العلاقة السابقة يكون الحد الأول أكبر من الحدين الآخرين ولا تعتمد قيمته على تركيز الشوائب بعكس الحد الثاني الذي تزداد قيمته بزيادة تركيز الشوائب أما الحد الثالث فيكون مؤثراً للمواد شبه الموصلة التي تمتلك فجوة طاقة أكبر بكثير من K_{BT} .

ترتبط التوصيلية الحرارية للشبيكة (حيث تهتز ذرات ايونات الشبيكة حول مواقع اتزانها وفي اهتزازاتها تتبادل الطاقة فيما بينها وتنتقل الطاقة من الذرة التي تهتز بسعة أكبر إلى الذرة التي تهتز بسعة أوطئ) مع كلاً من درجة حرارة الانصهار T_m والوزن الجزيئي للمادة شبه الموصلة W_A ، ويأخذ التناسب الشكل التالي :-

$$K_l \propto T_m^{3/2} W_A^{-1/2}$$

وتعطى التوصيلية الحرارية لحاملات الشحن الأغلبية (K_n, K_p) بدلالة الكتلة الفعلية وتركيز حاملات الشحن بالعلاقة التالية :-

$$K_n = 0.18 (m_n^* / m_0)^{3/2} \cdot (T/300)^{3/2} \cdot n \cdot \exp (E_f - E_c / K_B T)$$

$$K_p = 0.18 (m_p^* / m_0)^{3/2} \cdot (T/300)^{3/2} \cdot P \cdot \exp (E_v - E_F / K_B T)$$

ولنفس المادة شبه الموصلة تكون التوصيلية الحرارية للطور البلوري أكبر مما للطور العشوائي والجدول () يبين التوصيلية الحرارية لبعض المواد شبه الموصلة. وبسبب التوصيلية الحرارية العالية لبعض المواد تكون المقاومة الحرارية (Thermal resistance) قليلة وذلك لأن الأخيرة تتناسب عكسياً مع التوصيلية الحرارية. وتعطى المقاومة الحرارية لمادة شبه موصلة بمساحة مقطع A وبمسافة فاصلة بين الأوجه X بالعلاقة التالية :-

$$R_{th} = (A_n / K_{th}) \cdot (X/A)$$

حيث A_n ثابت بدون وحدات يحسب عملياً. وفي السليكون تكون قيمة الثابت 0.24.

ارتفاع درجة الحرارة بسبب امتصاص الأشعة

في كثير من العمليات الصناعية التي تستخدم لتصنيع الأجهزة من أشباه الموصلات أو حتى لمعالجة بعض العيوب يصار إلى تشعيع العينات بكميات من الأشعة التي تتحول إلى حرارة. مسبباً رفع درجة الحرارة السطح المشع ينتج عنه تدرج حراري ضمن العينة. ولمادة شبه موصلة كبيرة الحجم يمكن تمثيل انتقال الحرارة بسبب الفرق في درجات الحرارة بالمعادلة التالية :-

$$T^2/X^2 = (1/D_{th}) \cdot (T/t)$$

حيث تمثل D_{th} معامل الانتشارية الحرارية والذي يرتبط بـ ρ_{Sc} من التوصيلية الحرارية وكثافة المادة شبه الموصلية كما في المعادلة التالية :-

$$D_{th} = K_t / \rho_{Sc}$$

ولان التوصيلية الحرارية والحرارة النوعية تعتمد كلاهما على درجة الحرارة عليه فأن حل معادلة انتقال الحرارة يتطلب استخدام الكمبيوتر.

التمدد الحراري

إذا أبدت ذرات البلورات اهتزازات شبكية وإذا كانت الأصرة بين ذرتين متناظرة، عليه فأن معدل القوى بين الذرتين ستكون صفر . ولكن الابتعاد عن الأواصر المتناظرة يتسبب بحصول قوى تنافر ينتج عنها تمدد في الشبيكة . وعند ارتفاع درجة الحرارة ما بين الصفر ودرجة الانصهار فأن كل البلورات (باستثناء القليل) تبدي تغير قدره 7% في المسافات الذرية . ويرتبط التمدد الحراري في البلورات بدرجة حرارة الانصهار ، وبشكل فأن معامل التمدد الحراري (α_{th}) يتناسب عكسياً ودرجة حرارة الانصهار ويعطى بالعلاقة :-

$$\alpha_{th} = 1/V_s \cdot 1/T$$

$$= 0.35 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

ولمادة مثل الجرمانيوم التي تمتلك معامل تمدد طولي مقداره ($0.55 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) . ويعتمد معامل التمدد الطولي وبشكل كبير على التركيب البلوري . وتمتلك المواد شبه الموصلية تمدد حجمي ويعطى بالمعادلة :-

$$\alpha_v = (1/V_o) \cdot (\Delta V / \Delta T)$$

اهتزازات الشبيكة

الشبيكة البلورية تركيب غير مستقر ، وفي اية درجة حرارة محددة هنالك اهتزاز حراري حتى في الصفر المطلق، وتبعا للميكانيك الكمي يمكن وصف اهتزازات الشبيكة بدلالة انماط طبيعية تصف الاهتزازات الجماعية للذرات تمثل بكم طاقي نطلق عليه الفونون (nonohp) التي تسهم في تحديد قيمة الحرارة النوعية وفي تأثيرها بالخصائص الكهربائية من خلال استطارتها للاليكترونات مسببة بذلك مقاومة كهربائية. وبشكل مناظر للاليكترونات والفوتونات تمتلك الفونون ترددات متميزة (تختلف قيم الترددات التي تهتز بها الشبيكة البلورية تبعا لمكونات

المادة الصلبة . والحالتين لاكثر شيوعا هما

اولا : وجود نوع واحد من الذرات بكتلة (M) وتتواجد في اماكن محددة مضاعفات ثابت الشبيكة (a) ، في هذه الحالة تعطى الترددات بالعلاقة التالية

$$W^2 = \pm (4 \beta / M)^{0.5} \sin (ka / 2)$$

حيث (β) ثابت القوة ، (k) متجة الموجة . لهذا اقصى قيمة تردد (w_m) هي $(4 \beta / M)^{0.5}$ تطابق قيم $k_m = \pm \pi / a$ ولقيم k الواطنة تصبح ($\sin (ka/2) \approx ka/2$) وتعطى قيمة التردد ب ($w \approx (4 \beta / M)^{0.5} ka$). الشكل () يوضح التغير في التردد الزاوي بدلالة قيم متجهة الموجة ، في الشكل تظهر قيم متجهة الموجة ($k = \pm \Pi / a$) التي تحدد منطقة بريلون وفيها تكون المجة مستقرة (standing) ولايمكن ان تنتشر الموجة خارج هذه المنطقة . ويمتلك التردد الزاوي قيمة واحدة ضمن هذه المنطقة .

ثانيا: وجود نوعين من الذرات الاولى بكتلة m والثانية بكتلة أكبر M تتفصل عن بعضها البعض. تتواجد الكتلة M عند النقاط الفردية في الشبكة $2n-1, 2n+1$ وتتواجد الكتلة m عند النقاط الزوجية للشبيك $2n, 2n+2$ في هذه الحالة العلاقة التي تحكم قيم الترددات هي

$$w^2 = \beta(1/m + 1/M) \pm \beta \{ (1/m + 1/M)^2 - (4 \sin^2 ka / mM) \}$$

في هذه الحالة يمتلك التردد الزاوي قيمتان يعكس الحالة الاولى . في الحد الثاني من الطرف الايمن لو استخدمنا الاشارة السالبة نحصل على نمط ترددات نطلق عليها الترددات السمعية (Acoustic mode) ، ولو عوضنا بالاشارة الموجبة نحصل على نمط الترددات البصرية (Optical mode) ويظهر ذلك في الشكل () .

لقيم k القليلة حل العلاقة السابق هو الجذرين

$$w^2 = 2\beta (1/m + 1/M)$$

$$w^2 = (2\beta / m + M) k^2 a$$

وعند ما تكون $k = \pm \pi / 2a$ تعطى الترددات ب

$$W^2 = 2\beta / m \quad \text{Optical mode}$$

$$W^2 = 2\beta / M \quad \text{Acoustic mode}$$

في نمط الترددات السمعية يشابة المنحني منحني احادية الذرة والموجة التي تصاحب هذا النمط هي موجة مستعرضة تتكون من تتابع حركة كل من الكتلتين كما في الشكل () .

النمط الضوئي لترددات الشبكة سمي كذلك لامكانية حصوله

بضوء بتردد ملائم في المادة الصلبة والتي تكون على الاقل

جزئيا ايونية . في هذا النمط تهتز الكتلتين بفارق في الطور

مثل هذه الحركة يمكن ان تحدث من خلال متجهة كهربائي

مستعرض بتسليط مجال كهرومغناطيسي ملائم وبتحقق شرط

اختلاف طبيعة الشحنة الكهربائية على كل منهما .

الفصل الرابع أشباه الموصلات : الخصائص الكهربائية

نحن ندين بالتطور الذي نعيشه اليوم بالكثير للتطور الذي صاحب فهمنا للمواد شبه الموصلة التي أصبحت القاسم المشترك لكل الأجهزة الإلكترونية ، ولم يقتصر على الإلكترونيات بل تجاوزت إلى الضوئيات حيث تستخدم المواد شبه الموصلة في صناعة الكواشف الضوئية والصمامات الباعثة للضوء وصمامات الليزر والخلايا الشمسية. يمكن تعريف المواد شبه الموصلة على أنها مواد تمتلك مقاومة كهربائية تقع ما بين المقاومة الكهربائية للمواد الموصلة والمواد العازلة. وهذا التفاوت في قيم المقاومة الكهربائية يرجع إلى الاختلاف الكبير في قيم فجوة الطاقة للمواد شبه الموصلة. وللتمييز ما بين المواد شبه الموصلة هنالك أكثر توجه :

١ – اعتمادا على شكل فجوة الطاقة وهنا لدينا

أ – المواد شبه الموصلة ذات الفجوة المباشرة (direct band gap) كما هو حال زرنيخ الكاليوم (GaAs).

ب - المواد شبه الموصلة ذات الفجوة غير المباشرة (Indirect band gap) كما هو حال السليكون (Si).

يرجع الفرق بين النوعين إلى قيم متجهة الموجة لاوطئ مستوي طاقي في حزمة التوصيل وأعلى مستوي طاقي في حزمة التكافؤ. في المواد ذات الفجوة المباشرة يمتلك كلا المستويين نفس قيمة متجهة الموجة ويترتب على هذا أن قيمة الزخم محفوظة وذلك لأن $P = h * k$ وعليه يكون بمقدور الإلكترون الانتقال ما بين المستويين إذا امتلكت طاقة مساوية لفجوة الطاقة (هذا الطرح يصح إذا كانت الطاقة المكتسبة حرارية وفي حالة كون الطاقة الممتصة من الضوء الساقط يتوجب أن تكون الطاقة أكبر من فجوة الطاقة). في المواد ذات الفجوة غير المباشرة ولكون كل المستويين الطاقيين يمتلكان قيم مختلفة لمتجهة الموجة يتطلب الانتقال امتصاص أو انبعاث كم من الطاقة الحرارية (الفونون phonon) . هذا الاختلاف يترتب عليه أختلاف في الخصائص البصرية.

٢ – اعتمادا على وجود أو عدم وجود الشوائب وهنا ايضا لدينا

أ- مواد نقية أو ذاتية (Intrinsic or Pure)

ب- مواد مشابهة أو غير ذاتية (Extrinsic or Doped)

الفرق بين النوعين يكمن في خلو المواد الذاتية من الذرات الشائبة (Impurities) (الذرة الشائبة ذرة غريبة عن التركيب البلوري للمادة شبه الموصلة ندخلها ضمن المواد شبه الموصلة بهدف تغيير الخصائص الكهربائية بزيادة تركيز الإلكترونات أو الفجوات بعملية الاشابة أو انقاص التركيز بعملية الاطفاء (compensation) وهنا يساهم تركيز الإلكترونات والفجوات في تحديد مقدار التوصيلية الكهربائية . أما في المواد المشابة ، وجود الشوائب أما أن يزيد من تركيز الإلكترونات لتصبح حاملات الشحنة الاغلبية (majority charge carriers) أو أن تعمل الشوائب على زيادة تركيز الفجوات لتكون الإلكترونات حاملات الشحنة الاقلية (minority charge carriers)

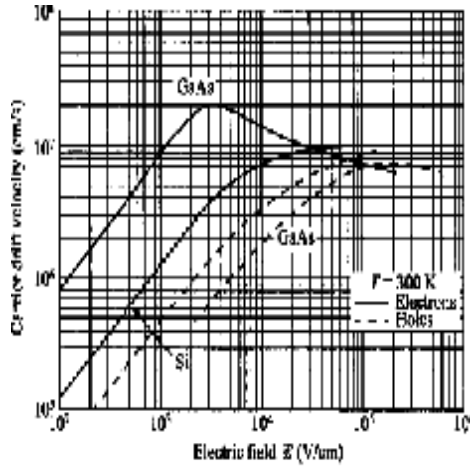
٣ – اعتمادا على عدد العناصر الفلزية المكونة للمادة شبه الموصلة وهنا لدينا

أ- مواد شبه موصلة أحادية العنصر مثل السليكون والجرمانيوم

ب- مواد شبه موصلة مركبة (Compound) من أكثر من فلز مثل زرنيخ الكاليوم (GaAsAl)

لفهم عمل الأجهزة المصنعة من المواد شبه الموصلة لابد من فهم الخصائص الكهربائية والخصائص البصرية وذلك لأن غالبية الأجهزة تعتمد في عملها على واحدة أو كلاهما . وإن أسهل طريقة لفهم الخصائص الكهربائية هي

بدراسة التوصيلية الكهربائية . في المواد شبه الموصلة تتم عملية التوصيل الكهربائي الاليكترونات او الفجوات او كلاهما اعتمادا على طبيعة المادة شبه الموصلة بعكس المواد الموصلة التي يقتصر التوصيل الكهربائي فيها على الاليكترونات حصرا . وهناك فرق اخر يتمثل في طريقة انتقال حاملات الشحن ففي الوقت الذي تنتقل فيه الفجوات والاليكترونات في المواد شبه الموصلة بالانجراف (drift) او الانتشار (diffusion) تنتقل الاليكترونات في المواد الموصلة بعملية الانجراف فقط .



الشكل (١-٢) التغير في السرعة الانجرافية

بدلالة المجال الكهربائي في السليكون وزرنيخ الكاليوم

في الحركة الانجرافية سيمتلك حامل الشحنة سرعة انجرافية (V_d) التي تتناسب مع شدة المجال الكهربائي المسلط وثابت التناسب التحريكية (U) والعلاقة هي $V_d = U * E$ العلاقة السابقة تصح لمدى من المجال الكهربائي نطلق عليه المجال الكهربائي الحرج (E_c) (critical electric field) الشكل (١-٢) يوضح الاستقرارية في السرعة الانجرافية اذا تجاوزت شدة المجال الكهربائي لقيم المجال الحرج. الطاقة التي تكتسبها الحاملات تذهب الى الشبكة نتيجة تصادمات الحاملات معها . لقيم المجال الكهربائي الاقل من الحرج

يخضع التيار الذي يسري في المادة لقانون اوم، و لقيم

المجال الكهربائي الاكبر من المجال الحرج تمتلك الحاملات طاقات عالية نطلق عليها تسمية الحاملات الساخنة (hot carriers) وفي هذه الحالة يتعد السلوك عن قانون اوم وتستقر قيم التيار مع الزيادة في شدة المجال الكهربائي بسبب التناقص في قيم التحريكية وبزيادة شدة المجال لقيم أعلى تكون طاقة الحاملات كبيرة لدرجة يكون بقدرها تأين ذرات المادة شبه الموصلة أو الذرات الشائبة بعمليات التأين الصدمي (impact ionization) يظهر تأثيرها بزيادة تركيز حاملات الشحن وبالتالي التيار.

في الحركة الانتشارية التي تحصل في حالة وجود اختلاف في تركيز الحاملات بين نقطتين في المادة شبه الموصلة وهذا الاختلاف يحصل اذا سخنا نقطة على السطح او اذا جرى اضاءة النقطة مقارنة ببقية السطح وفي هذه الحالة يكون التركيز اعلى في تلك النقطة لهذا تحاول البلورة استعادة التوازن الابتدائي وذلك عن طريق انتشار الحاملات من تلك النقطة باتجاه المنطقة الاقل تركيزا وبمعدل انتشار (diffusion rate) (عدد الاليكترونات المنتقلة بوحدة الحجم ووحدة الزمن) يتناسب مع مقدار التدرج في التركيز وثابت التناسب هو معامل الانتشار (diff. coefficient)

$$dn / dt = - D (dn / dx) \quad (4-1)$$

تعتمد قيم معامل الانتشار على درجة الحرارة وقيمة التحريكية لهذا هي تختلف بين الاليكترونات والفجوات وتعطى

$$D_e = (k_B T / q) * u_e \quad D_h = (k_B T / q) * u_h$$

التوصيلية الكهربائية في المواد الذاتية

عرفنا سابقا ان التوصيلية الكهربائية هي ثابت التناسب بين كثافة التيار وشدة المجال الكهربائي المسلط . في المواد النقية تساهم الاليكترونات والفجوات في التوصيل الكهربائي على تعطى التوصيلية الكهربائية الذاتية بالعلاقة التالية

$$\sigma_i = n * q * u_e + p * q * u_h \quad (4-2)$$

في المواد النقية يتساوى تركيز الاليكترونات والفجوات وكل منهما يساوي تركيز حاملات الشحن الذاتية (n_i) عليه

$$n_i = n = p \quad (4-3)$$

لهذا يمكن كتابة علاقة التوصيلية الكهربائية بالشكل التالي

$$\sigma_i = n * q * (u_e + u_h) = p * q * (u_e + u_h) = n_i * q * (u_e + u_h) \quad (4-4)$$

في المواد شبة الموصلة (ذاتية أو مشابة) ترتبط تراكيز الاليكترونات والفجوات وتركيز الحاملات الذاتية بقانون

حفظ الكتلة (law of mass action) الذي يأخذ الشكل التالي

$$n_i^2 = n * p \quad (4-5)$$

من العلاقات السابقة يظهر جليا ان قيمة التوصيلية الكهربائية تعتمد بشكل كبير على تركيز الاليكترونات والفجوات لذا من الضروري حساب تراكيز الاليكترونات في حزمة التوصيل والفجوات في حزمة التكافؤ والذي يتحدد بكثافة حالات

الطاقة $g(E)$ في كل حزمة وأحتمالية الامتلاء $f(E)$ لكل حالة طاقة. تعتمد كثافة حالات الطاقة على شكل الطاقة وتركيب الحزمة. في نموذج الاليكترون الحر وصلنا لعلاقة تربط الطاقة بمتجه الموجة

$$n = \int_{E_c}^{\infty} g(E) * f(E) dE \quad (4-6)$$

شكل الطاقة يمكن تحديد ن العلاقة التي تربط الطاقة مع متجه الموجة

$$E = (\hbar^2 / 2m) * k^2 \quad (4-7)$$

العلاقة السابقة تصح كثيرا لقيم متجه الموجة الصغيرة والقريبة من المركز حيث يكون شكل الطاقة كروي يحيط

بالمركز وبالتالي فان شكل حالات الطاقة عبارة عن كرة حجمها يساوي $(4 \int k^2 dk)$ حيث يمثل k نصف قطر الكرة

اما dk فهو يمثل سمك القشرة . ولان عدد الحالات بوحدة الحجم تساوي $(2\pi)^{-3}$ عليه فان كثافة حالات الطاقة تعطى بالعلاقة

$$g(x) = (2\pi)^{-3} \hbar k^2 * 4\pi * dk \quad (4-8)$$

وبالتعويض عن k^2 و dk بدلالة الطاقة ومشتقتها نحصل على

$$g(E) = (2\pi)^{-2} * (2m / \hbar^2)^{3/2} * E^{1/2} \quad (4-9)$$

أحتمالية الامتلاء او كما يشار اليها ايضا كدالة فيرمي (f_E) دالة تعطي احتمالية امتلاء لاي مستوي طاقي في فجوة

الطاقة بدلالة طاقة مستوي فيرمي (Fermi level). في المواد شبة الموصلة الذاتية يحتل مستوي فيرمي موقع في

منتصف فجوة الطاقة ونشير اليه ب (E_{Fi}) ويعرف على انه المستوي الذي تكون احتمالية امتلاء نصف والعلاقة التي

تعطي دالة فيرمي هي

$$f(E) = 1 / (1 + \exp (E - E_{Fi} / k_B T))$$

من العلاقة الاخيرة لو ان أي مستوي يمتلك طاقة (E) مساوية لطاقة مستوي فيرمي الذاتي عندها تكون احتمالية

امتلاء نصف.

بالتعويض في العلاقة (4-6) نحصل على العلاقة النهائية التي تعطي تركيز الاليكترونات في حزمة التوصيل (n)

$$n = N_c \cdot \exp - (E_c - E_{Fi}) / k_B T \quad (4-10)$$

حيث N_c تمثل الكثافة الفعلية لحالات الطاقة في حزمة التوصيل والتي تساوي $\{ (2 / h^3) (2\pi m_e^* k_B T) \}^{3/2}$

وبشكل مناضر يمكن الوصول لعلاقة تعطي تركيز الفجوات في حزمة التكافؤ (p)

$$P = N_v \cdot \exp - (E_{Fi} - E_v) / k_B T \quad (4-11)$$

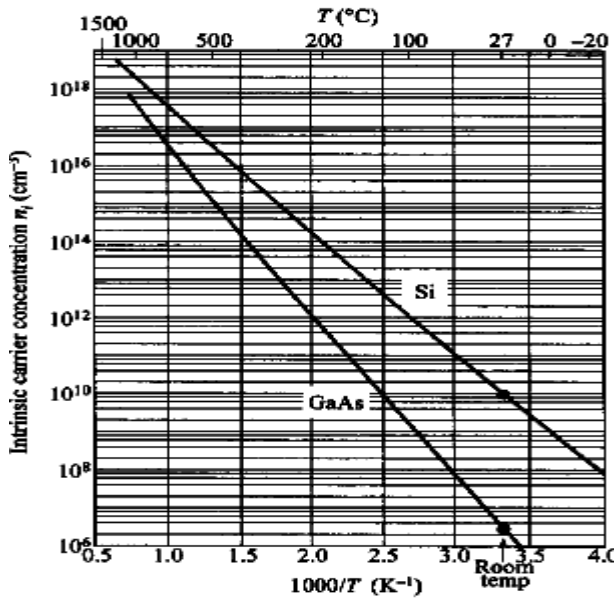
حيث N_v تمثل الكثافة الفعلية لحالات الطاقة في حزمة التكافؤ والتي تساوي $\{ (2 / h^3) (2\pi m_h^* k_B T) \}^{3/2}$

تعتمد قيم N_c و N_v على درجة الحرارة وتختلف باختلاف المواد شبة الموصلة كما مبين في الجدول (). وبالتعويض عن قيم

n و p في العلاقة (4-5) نحصل على العلاقة التي تعطي تركيز حاملات الشحن الذاتية بدلالة فجوة الطاقة

$$n_i^2 = n \cdot p \rightarrow n_i^2 = N_c \cdot \exp - (E_c - E_{Fi}) / k_B T \cdot N_v \cdot \exp - (E_{Fi} - E_v) / k_B T$$

$$n_i = \{ N_c \cdot N_v \}^{1/2} \exp - (E_g / 2 k_B T) \quad (4-12)$$



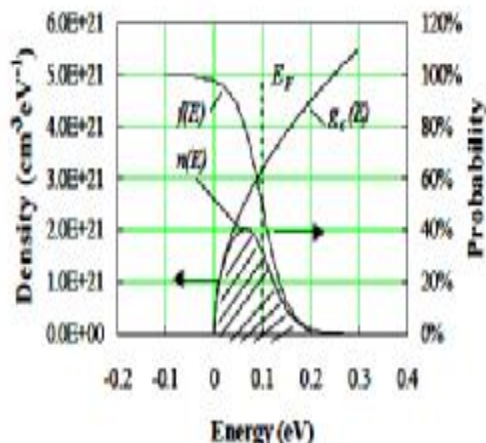
باستقراء العلاقة السابقة نستنتج التالي

- ١ - تزداد قيمة n_i بزيادة درجة الحرارة وبالتالي تزداد التوصيلية الكهربائية وهذا ماوصلنا اليه سابقا في نموذج الحزم الطاقية الشكل (٢-٢) .
- ٢ - بزيادة قيم فجوة الطاقة تقل قيمة n_i وهذا يعني نقصان التوصيلية الكهربائية ومثل هذا ما وصلنا اليه سابقا وكما يظهر في الشكل ،انفس درجة الحرارة يمتلك السليكون ذو فجوة الطاقة 1.2eV تركيزا اعلى من حاملات الشحن الذاتية مقارنة بزرنيخ الكاليوم 1.55eV .

بالرجوع للعلاقة (4-4) وبرسم لو غارتيم التوصيلية الكهربائية مع مقلوب درجة الحرارة نحصل على خط مستقيم ميله يقابل فجوة الطاقة. ولتحديد موقع مستوى فيرمي الذاتي (E_{Fi}) نجري المساواة بين تركيزي الاليكترونات والفجوات

$$N = p \rightarrow N_c \cdot \exp - (E_c - E_{Fi}) / k_B T = N_v \cdot \exp - (E_{Fi} - E_v) / k_B T$$

$$E_{Fi} = (E_g / 2) + 3 / 4 k_B T (\ln m_h^* / m_e^*) \quad (4-13)$$



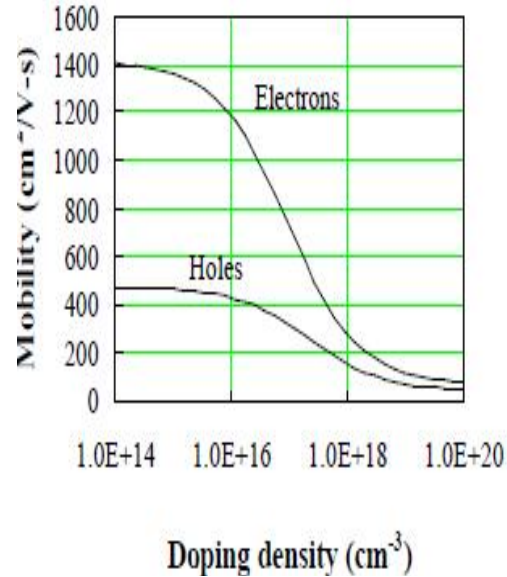
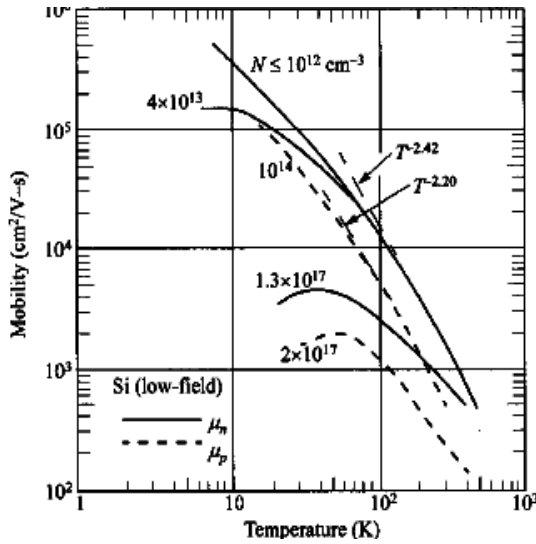
في غالبية المواد شبة الموصلة تكون قيمة الحد الثاني في الطرف الايسر كمية قليلة جدا يمكن اهمالها (في السليكون بدرجة حرارة الغرفة $= 10^{-1}$) لذا ينظر الى مستوى فيرمي الذاتي وكأنه يحتل منتصف فجوة الطاقة. في الشكل (2-3) يظهر تغير كل من كثافة الحالات ،دالة فيرمي ،تركيز الاليكترونات واحتمالية الامتلاء بدلالة الطاقة

التحركية mobility

من العلاقة التي تعطي التوصيلية الكهربائية ظهر ان التحركية هي العنصر الثاني الذي يحدد قيمتها ، وسبق لنا وان عرفنا التحركية هي ثابت التناسب بين السرعة الانجرافية وشدة المجال الكهربائي المسلط أو أنها السرعة المكتسبة بوجود المجال الكهربائي لهذا فان قيمتها تتحدد بمقدار الزمن الحر (او زمن الاسترخاء) (relaxation time) الذي يمثل الزمن ما بين تصادمين والعلاقة التي تعطي التحركية هي

$$u = q * \tau / m^*$$

عملية تتأثر قيمة الزمن الحر بعدة عوامل هي التفاعل مع الشبكة ، التفاعل مع مع الشوائب المتأينة ، التفاعل مع العيوب البلورية والتفاعل مع الحاملات الأخرى .عملية تؤثر العيوب البلورية والشوائب المتأينة كثيرا عند درجات الحرارة الواطئة، وعند درجات الحرارة العالية يتغلب تأثير التفاعل مع الشبكة لهذا يختلف شكل التناسب مع درجة الحرارة في الحالتين : في درجات الحرارة الواطئة $\mu \propto T^{-3/2}$ وفي درجات الحرارة العالية $\mu \propto T^{-3/2}$. وبرسم التغير في التحركية مع درجة الحرارة يمر المنحنى عند قيمة لدرجة الحرارة بأعلى قيمة للتحركية ويقل اذا ابتعدنا عن تلكم الدرجة الحرارية وكما يظهر من الشكل (2-4) .



الشكل (2-4) التغير بتحركية الاليكترونات والفجوات في السليكون بدلالة درجة الحرارة وتركيز الاشابة

التوصيلية الكهربائية في المواد المشابة

في المواد المشابة واعتمادا على طبيعة الذرة الشائبة يمكن ان يحصل وفرة في تركيز الاليكترونات على حساب تركيز الفجوات او العكس أي زيادة في تركيز الفجوات على حساب الاليكترونات. نقول عن الحالة الاولى ان المادة من النوع السالب (n-type) والحالة الثانية هي حالة المواد الموجبة (p-type). في المواد شبة الموصلة مثل السليكون او الجرمانيوم والتي تمتلك ذراتها اربعة اليكترونات فان ادخال ذرة شائبة لها خمسة اليكترونات سنحصل على الحالة الاولى وفيها تتحد الاليكترونات الاربعة من الذرة المضيفة مع اربعة اليكترونات من الذرة الشائبة ويبقى الاليكترون الخامس حر في الحركة ونقل التيار الكهربائي مما يعني زيادة في تركيز الاليكترونات ، لهذا ننظر للذرة الشائبة وكأنها احتلت موقع قريب من حزمة التوصيل ونشير الى طاقة تأينها بـ (E_d) ولتركيز الاشابة بـ (N_d) . نطلق على الذرات الشائبة التي ينتج عنها زيادة في تركيز الاليكترونات ذرات مانحة (donor atoms). الحالة الثانية أي المادة الموجبة هذه نحصل عليها بأدخال ذرة شائبة تمتلك ذرتها ثلاثة اليكترونات وفي هذه الحالة تتحد اليكترونات الذرة الشائبة مع ثلاثة اليكترونات من الذرة المضيفة ويبقى اليكترون واحد من اليكترونات الذرة المضيفة غير مرتبط ويكون بمقدوره الارتباط مع اليكترون من ذرة مجاورة مولد محلة فراغ يمتلئ باليكترون اخر بذات الطريقة من ذرة مجاورة وهكذا وكان الفراغ هو الذي تحرك وانتقل . الفراغ واقعا هو شحنة موجبة وبانتقالها يظهر تيار كهربائي . ينظر للذرة الشائبة وكأنها احتلت موقعاً قريباً من حزمة التكافؤ ونشير لطاقة تأينها بـ (E_A)

ولتركيزها ب (N_A). نطلق على الذرات الشائبة التي ينتج عنها زيادة في تركيز الفجوات بالذرات المانحة (acceptors atoms). ولكي تكون الذرات ائشائبة فعالة كهربائيا أي تسهم في تغيير الخصائص الكهربائية هنالك جملة شروط يتوجب تحققها وهي

- ١- ان تكون استبدالية (substational) لتحل محل ذرة مضيفة في التركيب البلوري ولا تكون من النوع البيني (interstitial).
- ٢- ان تمتلك طاقة تأين (ionization energy) واطنة حيث يزداد التأثير مع نقصان طاقة التأين.
- ٣- ان لايتجاوز تركيزها حدود الاذابة الصلبة (solid solution) وهو أقصى تركيز يمكن ادخاله في التركيب البلوري واية زيادة عنه تسبب ظهور عيوب تركيبية (crystal defects).

سبق وان ذكرنا ان فجوة الطاقة تخلو من المستويات الطاقية وهذا يبدو وكأنه تعارض مع فكرة الاشابة والحقيقة ان فجوة الطاقة خلية من المستويات الطاقية في البلورات المثالية (ideal crystal) وبسبب وجود العيوب في المواد شبة الموصلة لاتعود البلورات مثالية.

طرق الاشابة

هنالك عدة طرق لاشابة المواد شبة الموصلة أكثر شيوعا في الاستخدام هي

- ١- الاشابة الحرارية وذلك بترسيب طبقة رقيقة من المادة الشائبة على سطح المادة شبة الموصلة ويصار بعدها لتسخين المادة شبة الموصلة لدرجات حرارية تسمح بانصهار السطح مما يؤدي لانتشار الشوائب لعمق يتحدد بدرجة حرارة التسخين وزمنة. من عيوب هذه الطريق ان المادة شبة الموصلة ككل ستعرض للتسخين مما ينتج عنه تغيير في خصائصها الكهربائية.
- ٢- الزرع الايوني (ionic implantation) في هذه الطريقة تعجل ايونات الذرة الشائبة بتسليط مجال كهربائي يكسب الايونات تعجيلا وطاقة كافية تجعلها قادرة على اختراق المادة شبة الموصلة ولعمق يتحدد بالمادة شبة الموصلة ، طبيعة الذرة الشائبة وشدة المجال الكهربائي المسلط . تصاحب هذه الطبقة بظهور عيوب تركيبية بسبب الاصطدام الامر الذي يتطلب اجراء المعالجات الحرارية .
- ٣- الاشابة المحتثة باستخدام الليزر (laser induced doping) وهنا نستخدم الطاقة الممتصة من الليزر لصهر الطبقة السطحية للمادة شبة الموصلة التي تكون مطلية بطبقة من الشائبة او ان تكون مغمورة في محلول الذرة الشائبة .

في المواد السالبة يكون تركيز الاليكترونات هو الاكبر ونطلق عليها تسمية حاملات الشحن الاغلبية (majority) ونشير لتركيزها ب (n_n) اما الفجوات فهي مانشير اليها بالحاملات الاقلية (minority) ونشير لتركيزها ب (p_n). وفي المواد الموجبة تمثل الفجوات حاملات الشحنة الاغلبية ونشير لتركيزها ب (p_p) والاليكترونات بالحاملات الاقلية ونشير لتركيزها ب (n_p). يحسب تركيز النوعين من الحاملات الاغلبية والاقلية بالعلاقات التالية

$$n_n = (N_C * N_d)^{0.5} \exp - (E_d / 2k_B T)$$

$$p_p = (N_V * E_A)^{0.5} \exp - (E_A / 2 k_B T)$$

$$n_p = n_i^2 / p_p , \quad p_n = n_i^2 / n_n$$

أعتادا على الكثافة الفعلية لحالات الطاقة في حزمتي التوصيل أوالتكافؤ ودرجة حرارة المادة شبة الموصلة هنالك حالتين . الاولى حالة التأين الكلي للشوائب (complete ionization) وفيها يكون تركيز الحاملات الاغلبية مساو لتركيز الذرات الشائبة ($n_n = N_d$) والحالة الثانية هي حالة التأين الجزئي (partial ionization) وفيها ($n_n < N_d$). يحصل التأين الكلي اذا تحقق الشرط التالي

$$N_d \ll 0.5 N_C * \exp - (E_d / k_B T)$$

$$N_A \ll 0.5 N_V * \exp - (E_A / k_B T)$$

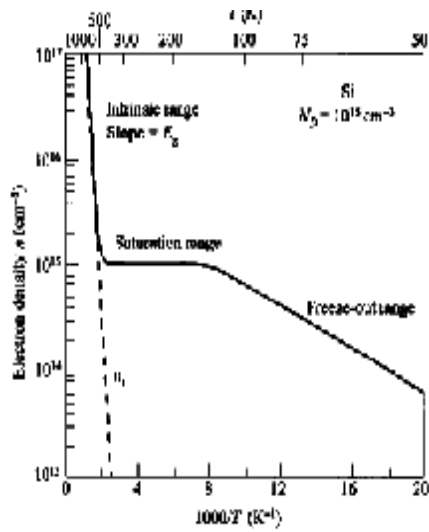
ولان تركيز الحاملات الاغلبية اكبر بكثير من تركيز الحاملات الاقلية لهذا في حسابات التوصيلية الكهربائية نقتصر على تركيز الحاملات الاغلبية كما في العلاقة

$$\delta n = n_n * q * \mu_n$$

$$\delta p = p_p * q * \mu_p$$

الشكل (5-2) يوضح التغير في كل من التركيز و التوصيلية الكهربائية بدلالة درجة الحرارة. في كل من المنحنيين تظهر ثلاثة مناطق متميزة الاولى منطقة درجات الحرارة الواطئة وفيها يزداد كل من التركيز و التوصيلية الكهربائية مع ارتفاع درجة الحرارة اما المنطقة الثانية تبدء بعد التأين الكلي للشوائب فيها يستقر التركيز مع زيادة درجة

الحرارة لان الطاقة الحرارية المكتسبة غير كافية لرفع الاليكترون من حزمة التكافؤ لحزمة التوصيل ولنفس المدى تتناقص التوصيلية الكهربائية والسبب هنا تناقص التحركية في هذا المدى بسبب الاستطارة بالشوائب المتأينة كما مر علينا سابقا. المنطقة الثالثة هي منطقة الدرجات الحرارة العالية فيها يزداد كل من التركيز و التوصيلية وترجع هذه الزيادة لزيادة تركيز حاملات المتهيجة من حزمة التكافؤ لحزمة التوصيل لزيادة الطاقة الحرارية المكتسبة. من ميل المنطقة الاولى يمكن حساب طاقة تأين الاشوائب ومن ميل المنطقة الثالثة تحسب فجوة الطاقة.



الشكل (5-2) التغير في تركيز الاليكترونات بدلالة التغير بدرجة الحرارة وكذلك التغير في التوصيلية الكهربائية

في المواد شبة الموصلة المشابة وبسبب وجود الشوائب المتأينة يتحرك مستوي فيرمي باتجاه حزمة التوصيل في المواد السالبة و باتجاه حزمة التكافؤ في المواد الموجبة ونشير للموقعين الجديدين ب (E_{Fn}) و (E_{Fp}) واللذان يتحدد موقعيهما بدلالة درجة الحرارة وتركيز الشوائب كما في العلاقاتين

$$E_C - E_{fn} = k_B T \ln (N_C / N_d) , \quad E_{Fp} - E_V = k_B T \ln (N_V / N_A)$$

العلاقات السابقة تصح اذا كان مستوي الذرة الشائبة الاقرب الى حافة الحزمة ، اما اذا كان العكس أي ان الذرة الشائبة تحتل موقع عميق أي هي الاقرب لمنتصف فجوة الطاقة عندها تضاف نصف طاقة التأين للعلاقات السابقة. يتغير موقع مستوي فيرمي بتغير درجة الحرارة عند درجات الحرارة الواطئة جدا (قرب الصفر المطلق) يتواجد مستوي فيرمي بين مستوي الذرة الشائبة وحافة الحزمة ، وبزيادة درجة الحرارة يتحرك مستوي فيرمي باتجاه منتصف فجوة الطاقة.

مثال: أحسب التوصيلية الكهربائية للسليكون النقي بدرجة الحرارة الغرفة (300K) علما ان $\mu_e = 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ $\mu_h = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
 $m_h^* = 0.6 m_0$, $m_e^* = 1.06 m_0$

$$\begin{aligned} \delta_i &= n_i * q * (\mu_e + \mu_h) \\ n_i &= (N_C + N_V) \exp - (E_g / 2k_B T) \\ N_C &= (2 / h^3) (2 \pi k_B T m_e^*)^{3/2} \\ 1 / h^3 &= 9 \times 10^{99} \text{ ,} \\ (2 \pi k_B T) &= (2 * 3.14 * 300 * 1.38 * 10^{-23})^{3/2} = 4.2 * 10^{-30} \text{ j} \\ (m_e^*)^{3/2} &= 1.4 * 10^{-46} \\ N_C &= 3.5 * 10^{25} \text{ m}^{-3} = 3.5 * 10^{19} \text{ cm}^{-3} \\ N_V &= 1.5 * 10^{19} \text{ cm}^{-3} \\ n_i &= (N_C * N_V)^{0.5} * \exp (-E_g / 2k_B T) = (3.5 * 1.5 * 10^{38})^{0.5} \exp (-1.12 / 0.052) \\ n_i &= 1.01 * 10^{10} \text{ cm}^{-3} \\ \sigma_i &= n_i * q * (\mu_e + \mu_h) = 10^{10} * 1.6 * 10^{-19} * 2000 = 1.6 * 10^{-6} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \end{aligned}$$

أحسب التوصيلية الكهربائية لمادة زرنيخ الكاليوم المانح اذا علمت ان

$$\begin{aligned} N_d &= 10^{16} \text{ cm}^{-3}, \mu_e = 8800 \text{ cm}^2 / \text{V s} \\ 10^{18} \text{ cm}^{-3} &= n_n = N_d \text{ في هذه الحالة وبسبب عدم ذكر طاقة التآين عليه نعتبر ان الحالة هي تآين كلي بمعنى } \\ \sigma_i &= N_d * q * \mu_e = 10^{16} * 1.6 * 10^{-19} * 8800 \\ \sigma_i &= 14 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \end{aligned}$$

قطعه من الجرمانيوم القابل بطول ١.٢ سم وعرض ١ ملم وسمك ٠.٥ ملم مقاومتها الكهربائية ٢٤٠ اوم أحسب تركيز الشوائب علما ان تحركية الاليكترونات ١٩٠٠ سم٢ / ف ثا ؟

$$\sigma_p = \rho * \mu_h * q$$

$$\rho = \sigma_p / \mu_h * q$$

$$\sigma_h = 1 / \rho$$

$$R = \rho * (L / A) \dots \dots \rho = R * A / L \dots \dots \sigma = p * \mu_h * q = L / (R * A)$$

$$\begin{aligned} P_p &= L / (\mu_h * q * R * A) = 1.2 / (1900 * 1.6 * 10^{-19} * 240 * 5 * 10^{-2} * 0.1) \\ P_p &= 3.3 * 10^{15} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

سليكون جرى أشابته بشوائب مانحه بتركيز أشابه 10^{17} سم-٣. اذا كانت طاقة التآين للذره الشائبه ٠.١ أ.ف
 أحسب التوصيلية الكهربائية بدرجة حرارة الغرفة علما ان $\mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $N_C = 2.8 * 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

في حالة المواد المشابه يكون تركيز حاملات الشحن (في هذه الحالة الاليكترونات) مساويا لتركيز الشوائب

$$\begin{aligned} N_d &< 0.5 N_C \exp - (E_d / k_B T) \\ 0.5 * 2.8 * 10^{19} * \exp - (0.1 / 0.026) &= 2.8 * 10^{21} \text{ cm}^{-3} \\ n_n &= N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\ \sigma_n &= n_n * q * \mu_n = 10^{17} * 1.6 * 10^{-19} * 1500 = 24 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \end{aligned}$$

أذا علمت ان فجوة الطاقه للسليكون النقي بدرجة حرارة الغرفة 1.12 eV أحسب مقدار التوصيلية الكهربائية لهذه المادة علما ان

$$\mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \mu_h = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}, N_C = 2.8 * 10^{19}, N_V = 1.04 * 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$2.4 * 10^{-5} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$

عينه من ماده نقيه طولها (10) سم وابعاد الوجه (3 * 3) ملم² صنع على الوجهين اتصالات أوميه بقطر (٢) ملم ووسط عليها فرق جهد (١٠ ف) أحسب قيمة التيار المار إذا كانت التوصيليه الكهربائيه (٢.٤ * ١٠^{-١٠}) (اوم سم)^{-١}

$$I = 7.5 * 10^{-7} \text{ A}$$

ماده شبه موصله بتركيز أشباه مانحه (١٠^{١٧}) سم-٣. ماذا تقترح لكي يحتل مستوي فيرمي مستوي على بعد (٠.٢٣) أ.ف من حافة حزمة التوصيل إذا علمت ان $N_c = 10^{19} \text{ cm}^3$

$$N_a = 9.866 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

ماده شبه موصله بفجوة طاقه (١ أ.ف) وبتتركيز أشباه (١٠^{١٦}) سم-٣. أحسب النسبه بين التوصيليه الكهربائيه بسبب الشوائب الى التوصيليه الكهربائيه النقيه إذا علمت ان

$$N_c = 5 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_v = 10^{18} \text{ cm}^{-3}, E_d = 0.2 \text{ eV}, \mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \mu_h = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\sigma_n / \sigma_i = 1.4 * 10^6$$

ماده شبه موصله مانحه بتركيز اشباه (١٠^{١٧}) سم-٣ جرى أشابتها بشوائب مغايره وبتتركيز أشباه (١٠^{١٧} * ٥) سم-٣. أحسب التوصيليه الكهربائيه للعينه إذا علمت أن

$$N_v = 10^{19} \text{ cm}^{-3}, N_c = 2 * 10^{19} \text{ cm}^{-3}, E_A = 0.25 \text{ eV}, E_d = 0.1 \text{ eV}, \mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \mu_h = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\sigma_p = 1.07 (\Omega \text{ cm})^{-1}$$

ماده شبه موصله بتوصيليه كهربائيه (٣) $(\Omega \text{ cm})^{-1}$ يراد تحويلها الى التوصيليه المغايره وبتوصيليه قدرها $٧ (\text{cm} \Omega)^{-1}$ باستخدام شوائب مغايره بطاقة تأين (٠.١) أ.ف أحسب تركيز الشوائب المانحه الواجب استخدامها إذا علمت ان الشوائب القابله متأينه كليتا وان

$$N_v = 10^{19} \text{ cm}^{-3}, N_c = 2 * 10^{19} \text{ cm}^{-3}, \mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \mu_h = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$N_d = 3.96 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

الفصل الثاني الخصائص الكهربائية للمواد الموصلة

تكمُن أهمية المواد الصلبة في إمكانية استخدامها في العديد من التطبيقات التي تحددها خصائص المادة الصلبة، ولعل أهم خاصيتين تلعبان الدور الأهم في تحديد مناطق الاستخدام هما الخصائص الكهربائية والخصائص البصرية. نقصد بالخصائص الكهربائية سلوك المادة الصلبة تجاه سريان التيار الكهربائي خلالها. تمتاز المواد الصلبة الشائعة الاستخدام بوجود تباين كبير في خصائصها الكهربائية، وبسبب التباين في المقاومة الكهربائية (ρ) والتي تمثل المقاومة الكهربائية لوحدة الطول ووحدة مساحة المقطع وهي أيضاً ثابت التناسب بين المقاومة الكهربائية وطول ومساحة المقطع للمادة الصلبة التي نبحثها في الجدول التالي أزدادت أهمية دراسة هذه الخصائص .

المادة	Cu	Pb	Se	Si pure	Si doped	glass
ρ (Ω cm)	1.6×10^{-6}	2.1×10^{-5}	1	10	$10^{-2} - 10^{-4}$	10^{14}

منذ البدء ظهرت العديد من النماذج الفيزيائية التي حاولت تفسير الخصائص الكهربائية حاولت إيجاد تفسير لهذا التفاوت. تباينت طرق التداول بين هذه النماذج، اعتمد نموذج الإلكترون الحر على أساس وجود وفرة من الإلكترونات الحرة والتي يقصد بها الإلكترونات التي ترتبط بذراتها بقوة ضعيفة يمكن كسرها وتجاوزها في المواد، بعكس نموذج الحزم الطاقية الذي تبنى أفكار الميكانيك الموجي. مدى نجاح أي من النماذج يعتمد على قدرة النموذج في الإجابة على جملة من الاسئلة وتفسير ظواهر أهمها

١- لماذا تزداد المقاومة الكهربائية للمواد الموصلة بزيادة درجة حرارتها في الوقت الذي تقل فيه المقاومة الكهربائية للمواد شبه الموصلة بزيادة درجة حرارتها.

٢- لماذا تزداد التوصيلية الكهربائية للمواد شبه الموصلة عند أمتصاصها لبعض الأطوال الموجية من الضوء الساقط ولا نشاهد هذه الظاهرة في المواد الموصلة .

٣- لم تعمل الشوائب (ذرات غريبة ندخلها ضمن التركيب البلوري لمادة ثنائية) على زيادة المقاومة الكهربائية للمواد الموصلة في الوقت الذي يمكن ان تقلل أو تزيد المقاومة الكهربائية للمواد شبه الموصلة.

وقبل الدخول في صلب الموضوع هنالك أساسيات لابد من التذكير بها هي

أ- ليس كل الإلكترونات في الذرات تساهم في نقل التيار الكهربائي، والجزء الذي يسهم منها هو الإلكترونات المدارات الخارجية والتي نطلق عليها تسمية الإلكترونات التساهمية أو الإلكترونات التوصيل.

ب- في المواد الموصلة يسري التيار الكهربائي نتيجة لانتقال الإلكترونات، في المواد شبه الموصلة يسري التيار الكهربائي نتيجة لانتقال الإلكترونات والقجوات أو أحدهما.

ج- في المواد الموصلة يتحدد تركيز الإلكترونات التي تسهم في التيار الكهربائي (n) (عدد الإلكترونات بوحدة الحجم) بكثافة المادة (ρ)، وزنها الذري (AW) وعدد الإلكترونات التكافؤ (Z) الذي يختلف باختلاف المواد وعدد أفكادرو (N_{Av}) ويعطى بالعلاقة :

$$n = N_{Av} * Z * (\rho / AW) \quad 1-2$$

الجدول (٢-٢) يبين تركيز الإلكترونات لبعض المواد الفلزية

الفلز	Li	Cu	Au	Be	Fe	Zn	Al	In	Sb
Z	1	1	1	2	2	2	3	3	5
Aw									
ρ_d									
$n * (10^{22} \text{ cm}^{-3})$	4.7	8.47	5.9	24.7	17	13.2	18.1	11.5	16.5

تنتقل حاملات الشحن في المواد الصلبة في كلا النموذجين بحركة انجرافية (drift motion) عند تسليط مجال كهربائي خارجي وينتج عنه تيار الانجراف (drift current) او بحركة انتشارية (diffusion motion) بين نقطتين في المادة الصلبة نتيجة الفرق في تركيز حاملات الشحن بين النقطتين، ينتج عنها تيار الانتشار diffusion current. ينتج عن التغير في تركيز الاليكترونات تغير في واحدة من الخصائص الكهربائية المهمة وهي المقاومة الكهربائية (ρ) التي تمثل المقاومة الكهربائية لمادة مساحة المقطع لها (1) سم² وطولها (1) سم وهي من الكميات الفيزيائية المهمة التي نستخدم للتمييز بين المواد ، وبدالاتها يمكن حساب المقاومة الكهربائية (R) لاية مادة بطول (L) ومساحة مقطع (A) ومن خلال العلاقة التالية

$$R = \rho * (L/A) \quad 2-2$$

نموذج الاليكترون الحر

يعتبر العالم درود الاول من درس التوصيل الكهربائي والحراري في المواد الموصلة في العام (١٩٠٠) بعد اكتشاف وجود الاليكترونات من قبل ثومسن. تصور درود الفلزات مجموعة من الايونات المغمورة في بحر من الاليكترونات وان تسليط مجال كهربائي خارجي سوف يجعل الاليكترونات باتجاه القطب الموجب واذا مرت بالقرب من الايونات سوف تحيد عن مسارها وهكذا تنشأ المقاومة الكهربائية ، ويغيب المجال الكهربائي تتحرك الاليكترونات بشكل عشوائي ولهذا لن يظهر التيار الكهربائي. يمكن تلخيص الفرضيات التي بنى عليها درود تصوراته بالاتي :

- أ- التصادمات مع الايونات أنية وتغير بشكل مفاجئ سرعة الاليكترونات.
- ب- بين التصادمات تسير الاليكترونات بخط مستقيم ولا تتأثر بوجود الايونات الموجبة.
- ج- عند التصادم تفقد الاليكترونات كل الطاقة التي اكتسبتها من المجال الكهربائي .
- د- متوسط المسافة التي يقطعها الاليكترون قبل التصادم " متوسط المسار الحر " هي مقاربة للمسافة بين الايونات.

أستخدم درود فرضياته لتفسير قانون أوم باستخدام التعجيل الذي يكتسبه الاليكترون من المجال الكهربائي (a) ومتوسط المسار الحر (x) ومتوسط الزمن الحر (τ) { الزمن بين التصادمات }

$$a = d^2x/dt^2, \quad a = F/m = -qE/m \quad 3-2$$

وبسبب المجال الكهربائي المسلط تتحرك الاليكترونات بسرعة أنجرافية (V_d) تحسب بدلالة التعجيل ومتوسط الزمن الحر

$$V_d = a * \tau = \{ (-qE)/m \} * \tau = \mu * E \quad 4-2$$

حيث (μ) حركية الاليكترونات التي تمثل السرعة المكتسبة بوحدة المجال الكهربائي وتعطى بدلالة

$$\mu = (q\tau) / m = V_d / E \quad 5-2$$

لو أفترضنا ان طول المادة الموصلة (L) ومساحة مقطعها (A) وتركيز الاليكترونات (n) ، وسلط عليها فرق جهد (V) كل الاليكترونات التي تتواجد على بعد (V_d) من احدى النهايات سوف تعبر بعد مرور ثانية واحدة ويسري تيار (I) يعطى بالعلاقة :

$$I = n * V_d * A * q \quad 6-2$$

في العلاقة السابقة تمثل الكميه $V_d * A$ حجم الاسطوانه التي كل اليكتروناتها تسهم في التيار

$$I/A = J = n * V_d * q$$

حيث تمثل J كثافة التيار (امبير / سم²)

$$J = E * n * q^2 * (\tau / m) = (n * q^2 * \tau / m) * E$$

$$J = n * q * \mu * E = \sigma * E \quad 7-2$$

في العلاقة الاخيرة تمثل μ, n, q كميات ثابتة ، لهذا يتناسب كثافة التيار مع شدة المجال الكهربائي المسلط وثابت التناسب (σ) التوصيلية الكهربائية وهي مقياس لسهولة انتقال التيار الكهربائي خلال المادة وتعطى بوحدة ($\Omega \text{ cm}$)⁻¹ وهي مقلوب المقاومة الكهربائية .

فشل نموذج الاليكترون الحر في اكثر من نقطة اهمها

- ١ - ان المسافة الحرة مابين التصادمات عمليا هي اضعاف التي توقعها النموذج .
- ٢ - أن بعض الفلزات التي تمتلك أعداد أكبر من الاليكترونات التساهمية تمتلك مقاومة كهربائية أكبر من تلكم الفلزات التي تمتلك أعداد أقل .
- ٣ - في بعض الفلزات ينتقل التيار الكهربائي بواسطة الشحن الموجبه بعكس ماأشترطه درود.
- ٤ - لم يستطع هذا النموذج تفسير التغير بقيمة التوصيليه الكهربائيه للمواد شبه الموصله عند امتصاصها للضوء الساقط.

وبسبب النقاط السابقة عمد الفيزيائون لايجاد نموذج آخر أصطلح عليه نموذج الحزم الطاقية (energy band) الذي أستند على نتائج الميكانيك الموجي والشكل النهائي لحل معادلة شرودنكر.

منشأ المقاومة الكهربائية

في مختلف المواد تنشأ المقاومة الكهربائية بسبب

- ١ - الاهتزازات الحرارية للذرات حول مواقع أترانها من دون ان تترك موقعها ونشير اليها (ρ_{ph})
 - ٢ - وجود الشوائب والعيوب النقطية التي تؤثر على دورية الشبكة ونشير اليها ب (ρ_o)
- عليه فان المقاومة الكهربائية الكلية هي مجموع الاثنان وتعطى بدلالة علاقة ماثنيوس

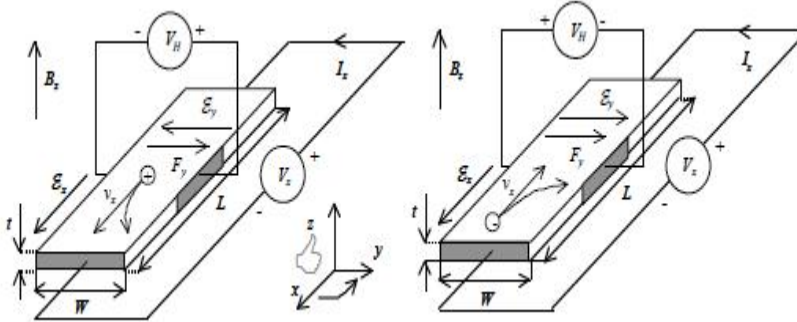
$$\rho = \rho_{ph} + \rho_o$$

8-2

المقاومة الناشئة بسبب الاهتزازات الحرارية (ρ_{ph}) تقل مع نقصان درجة الحرارة والعكس صحيح ونطلق عليها تسمية المقاومة المثالية ، اما المقاومة الناشئة عن الشوائب والعيوب فهذه نسميها المقاومة المتخلفة وهي لا تتغير مع درجة الحرارة . ولمعرفة مساهمة كل من المقاومتين يصار الى قياس المقاومة الكهربائية عند درجة حرارة الهليوم

تأثير هول

من التجارب المهمة في الفيزياء والتي تستخدم منذ العام ١٨٧٩ وبالأذات مع اشباه الموصلات لتحديد طبيعة وتركيز حاملات الشحن. تعتمد على استخدام مجالين متعامدين كهربائي واخر مغناطيسي كما في الشكل (١-٢) . نسلط مجال كهربائي بمقدار ثابت ونسجل مقدار التيار المار (I_x) ومن ثم نسلط مجال مغناطيسي مقداره (B) كاس نلاحظ تناقص في قيمة التيار (I_x) بسبب انحراف الحاملات عن مسارها وتجمعها عند أحد السطحين حسب قاعدة اليد اليمنى وينتج عنه ظهور فرق جهد كهربائي نسمية جهد هول (V_H) ويعود التيار للسريان ثانيًا. ان ظهور التيار ثانيًا يعني ان القوة المسلطة من مجال هول الكهربائي (F_H) تساوي وتعاكس القوة الناتجة من المجال المغناطيسي (F_B) والتي تعتمد على السرعة الانجرافية التي تتحرك بها الاليكترونات (v_x) . لو أفترضنا ان الماده على شكل مستطيل بسمك d وعرض w وطول l . التيار يدخل من السطح $d \cdot w$ والشحن تتجمع على السطحين اللذان يفصلهما المسافة d .



الشكل (١-٢) مكونات تجربة هول في حالتي اشباه الموصلات القابلة والمناحة

وفي هذه الحالة العلاقات التي تحكم القوتين والتيار المار هي

$$\begin{aligned} F_B &= q * v_x * B, \quad F_E = -q * E_H \\ q * v_x * B &= q * V_H / d \\ v_x &= V_H / (d * B) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_x &= I_x / A = I_x / (d * w) = \sigma * E \\ J_x &= n * q * \mu * E = n * q * v_x = n * q * (V_H / d * B) \\ V_H &= (1 / n * q) * (I_x * B) / w \end{aligned}$$

$$\text{OR } (V_H * w) / (B * I_x) = 1 / n * q = R_H \quad 9-2$$

حيث (R_H) معامل هول ويعطى بوحدات (m^3 / C). والذي يستخدم لحساب تحركية هول اذا عرفنا مقدار التوصيلية الكهربائية من العلاقة:

$$\mu_H = \sigma * R_H \quad 10-2$$

في كثير من الاحيان تعتبر تحركية هول مساوية لتحركية التوصيلية الكهربائي. في الجدول التالي قيم معامل هول ومقدار التحركية لبعض الفلزات

الفلز	معامل هول * $10^{-10} (m^3 / C)$	التحركية ($m^2 V^{-1} S^{-1}$)	التوصيلية الكهربائية * $10^7 (\Omega m)^{-1}$
Ag	-0.84	0.0056	6.4
Au	0.72	0.003	4.55
Na	- 2.5	0.0053	2.11
Cu	-0.55	0.0032	5.88
Cd	0.6	0.008	

أن وجود قيم موجبة لمعامل هول يعني ان الحاملات قد انحرفت بشكل معاكس للتقليدي وهذا يعني ان حاملات الشحن هي موجبة

مثال

الالمنيوم ثلاثي الاليكترونات يمتلك وزن ذري (27) وكثافة ($2.7 * 10^3$ كغم/م³) وان متوسط الزمن الحر للتصادمات (τ) * 10^{-14} ثانية. أحسب التيار الذي يسري خلال سلك من الالمنيوم بطول (10) م ومساحة المقطع (1 ملم²) اذا سلطنا فرق جهد (2) فولت ؟

$$I = V / R \text{ -----}, R = \rho * L / A = (1 / \sigma) * (L / A)$$

$$\sigma = (n * q^2 * \tau) / m$$

$$n = Z * (\rho / A) * N_{AV}$$

$$n = 3 * (2.7 * 10^3 / 2.7) * 6.02 * 10^{26} = 1.8 * 10^{28} m^{-3}$$

$$\sigma = \{ 1.8 * 10^{27} * (1.6 * 10^{-19})^2 * 4 * 10^{-14} \} / 9.1 * 10^{-31} = 2 * 10^7 (\Omega m)^{-1}$$

$$\rho = 10^{-7} / 2 = 5 * 10^{-8}$$

$$R = 5 * 10^{-8} * (10 / 10^{-6}) = 0.5 \Omega$$

$$I = 2 / 0.5 = 4 A$$

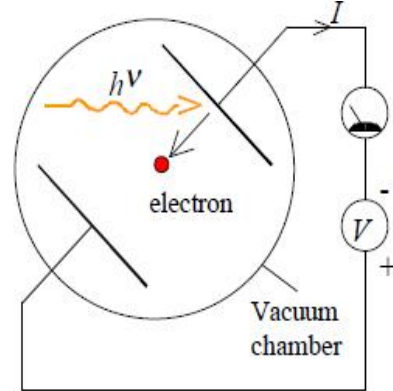
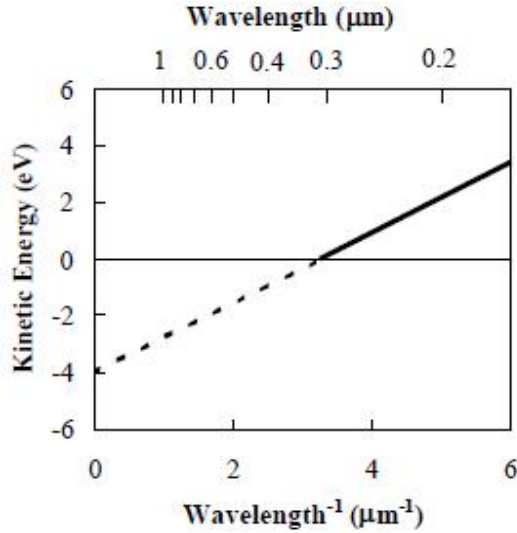
التأثير الكهرو- ضوئي

يعتبر التأثير الكهرو- ضوئي التجربة التقليدية التي توضح الطبيعة الكمية للضوء. عند تسليط ضوء احادي الطول الموجي على فلز في جو مفرغ ، نشاهد انطلاق الاليكترونات من سطح الفلز كما في الشكل (). هذه التجربة تؤكد ان الاليكترونات محصورة ضمن الفلز وبمقدورها الهرب من الفلز عند تزويدها بطاقة كافية كأن تكون من الضوء الساقط. من النتائج العملية ظهرت ان عند الاضاءة باطوال موجية اكبر من (400 نانومتر) يتوقف انطلاق الاليكترونات حتى مع زيادة شدة الضوء

الساقط . وعلى العكس عند الاضاءة باطوال موجية فوق بنفسجية نشاهد سهولة انبعاث الاليكترونات التي تتناسب اعدادها مع شدة الضوء الساقط كذلك تتناسب طاقة الاليكترون المنبعث خطيا و مقلوب الطول الموجي ولكل الاطوال الموجية الاقصر من اكبر طول موجي تنطلق معه الاليكترونات كما في الشكل (٢-٢) . تحسب الطاقة الحركية التي ينطلق بها الاليكترون من الفرق بين طاقة الفوتون الساقط ودالة الشغل للفلز (ϕ_m) التي تمثل الطاقة التي يحتاجها الاليكترون لكي يترك سطح الفلز والتي تتغير تبعا لطبيعة سطح الفلز.

$$K.E = h \nu - \phi_m$$

11-2



الشكل (٢-٢) يوضح انطلاق الاليكترون من سطح الفلز بعد تشيعة وتغير الطاقه الحركيه بدلالة الطول الموجي للضوء الساقط

مثال

فلز بدالة شغل قدره ٤.٣ أ.ف . أحسب أقل طاقه للفوتون التي بمقدورها جعل الاليكترون ينطلق من السطح بوحدات الجول وأحسب التردد والطول الموجي للفوتون الساقط وسرعة الاليكترون المنطلق؟

أقل طاقه لازمه هي الطاقه المساويه لدالة الشغل للفلز

$$E_{ph} = h \cdot \nu = q \cdot \phi = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 4.3 = 6.89 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\nu = E_{ph} / h = 6.89 \cdot 10^{-19} / 6.626 \cdot 10^{-34} = 1040 \text{ THz}$$

$$\lambda = h c / E_{ph} = 6.626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 6.89 \cdot 10^{-19}$$

$$\lambda = 0.288 \mu\text{m}$$

$$\nu = p / m_0$$

p يمثل الزخم الذي بينطلق به الاليكترون ويحسب من العلاقة التاليه

$$P = h / \lambda = 6.626 \cdot 10^{-34} / 0.288 \cdot 10^{-6} = 2.297 \cdot 10^{-27} \text{ kgm/s}$$

$$V = 2.297 \cdot 10^{-27} / 9.11 \cdot 10^{-31} = 2522 \text{ m/s}$$

مثال

طبقه من الفضة بسمك ٠.٥ ملم سلط عليها مجال مغناطيسي شدته ١.٢٥ تسلا تولد جهد هول قدره ٥٩ * ١٠^{-٦} فولت. إذا كان التيار المار ٢٨ ملي امبير أحسب قيمة معامل هول ؟

$$R_H = V_H \cdot d / B \cdot I \quad \dots\dots\dots B = 1.25 \cdot 10^4 \text{ G} \quad (1 \text{ T} = 10^4 \text{ G})$$

$$R_H = 59 * 10^{-6} * 5 * 10^{-4} / 1.25 * 10^4 * 28 * 10^{-3}$$

$$R_H = 0.84 * 10^{-10} \text{ Col/m}^3$$

السؤال ١

الوزن الذري للصوديوم (٢٣) وكثافته (٠.٩٧ * ١٠^٣ كغم / م^٣). أحسب تركيز الاليكترونات التساهمية؟ (٢.٦ * ١٠^{٢٢} سم^٣)

السؤال الاول

$$n = N_{AV} * (\rho_d / AW) * Z$$

$$n = 6.06 * 10^{26} * (0.97 * 10^3 / 27) * 1 = 2.6 * 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

السؤال ٢

الالمنيوم ثلاثي الاليكترونات يمتلك وزن ذري (٢٧) وكثافته (٢.٧ * ١٠^٣ كغم / م^٣) ومتوسط الزمن الحر بين التصادمات ٤ * ١٠^{-١٤} ثانية. أحسب التيار الذي يسري خلال سلك بطول (١٠) م ومساحة المقطع (١ ملم^٢) إذا سلطنا جهد (٢) فولت؟ (٤ A)

$$I = V / R \dots \dots \dots R = \rho * l / A = l / \sigma * A$$

$$\sigma = n * q^2 * \tau / m =$$

$$n = N_{AV} * (\rho_d / AW) * Z$$

$$n = 6.06 * 10^{26} * (2.7 * 10^3 / 27) * 3 = 1.8 * 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$$\sigma = 1.8 * 10^{28} * (1.6 * 10^{-19})^2 * 4 * 10^{-14} / 9.1 * 10^{-31}$$

$$\sigma = 2 * 10^7 (\Omega \text{ m})^{-1}$$

$$\rho = 10^{-7} / 2 = 5 * 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$R = 5 * 10^{-8} * 10 / 10^{-6} = 0.5 \Omega$$

$$I = 2 / 0.5 = 4 \text{ A}$$

السؤال ٣

أحسب الزمن مابين التصادمات والسرعه الانجرافيه في الصوديوم إذا كانت التوصيليه الكهربائيه (٢.١٧ * ١٠^٧) (اوم م)^{-١} وشدة المجال المسلط (١٠٠) فولت/ سم؟
(٠.٨ * ١٠^{-٢} و $\tau = 4 * 10^{-14}$ s)
(mS⁻¹)

$$\sigma = n * q^2 * \tau / m \dots \dots \dots \tau = \sigma * m / n * q^2$$

$$= 2.17 * 10^7 * 9.1 * 10^{-31} / 2.6 * 10^{28} * (1.6 * 10^{-19})^2$$

$$= 4 * 10^{-14} \text{ s}$$

$$V_d = (q * E / m) * \tau$$

$$V_d = (1.6 * 10^{-19} * 100 / 9.1 * 10^{-31}) * 4 * 10^{-14} = 8 * 10^{-8} \text{ m / s}$$

السؤال الرابع

ماده بمقاوميه كهربائيه $2 * 10^{-2} \Omega m$ ومعامل هول $5 * 10^{-4} m^3/co1$ اذا كان المجال الكهربائي المسلط 100 فولت/سم أحسب المعاملات التاليه τ ، n ، V_d ، σ ، μ

$$\sigma = 1 / \rho = 100 / 2 = 50 \text{ (} \Omega m \text{)}^{-1}$$

$$\sigma = n * q * \mu =$$

$$RH = 1 / n * q \dots n = (5 * 10^{-4} * 1.6 * 10^{-19})^{-1} = 1.25 * 10^{22} m^{-3}$$

$$\sigma = \mu / RH \dots \mu = \sigma * RH = 50 * 5 * 10^{-4} = 25 * 10^{-3} m^2/Vs$$

$$\sigma = (n * q^2 * \tau) / m = \tau = \sigma * m / n q^2 = \sigma * m * RH / q$$

$$\tau = 50 * 5 * 10^{-4} * 9.1 * 10^{-31} / (1.6 * 10^{-19}) = 13.5 * 10^{-14} s$$

$$V_d = \mu * E = 25 * 10^{-3} * 10^4 = 250 m/s$$

الفصل الرابع : المواد العازلة

المواد العازلة مواد تمتلك فجوة طاقة كبيرة لهذا هي تمتلك مقاومة كهربائية عالية . ومن أشهر المواد العازلة الصلبة المواد الخزفية " السيراميكية "، اللدائن "البوليمرات" والزجاج . ترتبط المواد العازلة بأواصر تساهمية أو اواصر أيونية. تمتاز المواد العازلة بحصول ظاهرة الاستقطاب الكهربائي عند تسليط مجال كهربائي عليها . في ظاهرة الاستقطاب تحصل أراحة للشحن المرتبطة لمسافات صغيرة وبهذا تولد مزدوجات كهربائية داخلية تعاكس باتجاهها اتجاه المجال الكهربائي الخارجي . ولقياس الاستقطابية نستخدم ثابت العزل (dielectric constant) (ϵ) والذي يعطى بالعلاقة التالية

$$\epsilon = C_d / C_0$$

4-1

حيث C_0 سعة المتسعة في الفراغ، C_d سعة المتسعة عند استخدام المادة.

في المواد العازلة تأخذ الاستقطابية عدة أشكال وقد تتزامن مع بعضها ، وهي التي تحدد قيمة () ومدى اعتمادها على درجة الحرارة وتردد المجال الكهربائي . وبشكل عام تتراوح قيم ثابت العزل للمواد ذات الاستخدام العام من ١٠-١٢ بينما تكون قيمة ثابت العزل للمواد المستخدمة في المتسعات بحدود ١٠٠٠٠٠ وفي الجدول (١) قيم ثابت العزل وجهد الانهيار والمقاومة الكهربائية لبعض المواد العازلة . الاستقطابية الأكثر تأثيرا هي

Electronic polarization
Ionic polarization
Spontaneous polarization
Diapole- relaxation

١ - الاستقطابية الالكترونية
٢ - الاستقطابية الايونية
٣ - الاستقطابية الانية
٤ - أسترخاء ثنائي القطب

تحصل الاستقطابية الالكترونية بسبب التشوة للمدارات الالكترونية للذرة حيث تراح الالكترونات لحضيا وتستكمل الاستقطابية بفترة زمنية (١٠^{-١٥} ثا) ولهذا السبب لاتعتمد الاستقطابية الالكترونية على التردد. أما الاستقطابية الايونية فهذه تظهر عندما تراح الايونات ولمسافة لاتتعدى المسافة بين الايونات ، حيث تراح الايونات السالبة باتجاه القطب الموجب والايونات الموجبة باتجاه القطب السالب والفترة الزمنية لتولد هذه الظاهرة بحدود (١٠-١٣) ثانية لهذا لاتعتمد قيم ثابت العزل على التردد.

في المواد القطبية (Polar material) تحصل الاستقطابية نتيجة أسترخاء ثنائي القطب حيث يتسبب دوران ثنائيات القطب بتغير في قيمة (ϵ) وفي المواد العازلة غير القطبية تكون قيمة (ϵ) أكبر قليلا من (٢) وفي المواد العازلة القطبية أكثر بكثير من هذا. ولكي تستدير ثنائيات القطب عند تسليط مجال كهربائي خارجي ورجوعها عند بعد انتهاء تأثير المجال الكهربائي لحالتها الابتدائية لابد من التغلب على بعض القوى الجزيئية و ، ويمتاز هذا النوع من الاستقطابية بظهوره وأخفاءه ببطى أكبر من الاستقطابية الالكترونية والايونية.

تتغير قيمة ثابت العزل مع درجة الحرارة ومعامل التغير بوحدة درجة الحرارة تتراوح قيمته (- ١٣٠٠ ← + ٣٠٠٠ *
١٠^{-٦} م^١ . في المواد التي تحصل فيها الاستقطابية الاليكترونية يزداد حجمها مع درجة الحرارة لهذا تقل كثافة
الشحن فيها. وفي المواد العازلة التي يحصل فيها استقطابية ايونية هذه تمتلك معامل درجة حرارة موجب لهذا نزداد
استقطابيتها مع درجة الحرارة.