فيزياء اشباه الموصلات

Semiconductor Physics

تحظى المواد شبه الموصلة في الوقت الراهن باهمية بالغة وذلك لاستخدامها في تصنيع معظم الاجهزة الالكترونية الحديثة. ان اي دراسة شاملة ومعمقة لهذه المواد لغرض فهم سلوكها الكهربائي يجب ان تبدأ بالتركيب الذري للمواد وذلك لغرض الوقوف على اهم النماذج الذرية.

النماذج الذرية (Atomic Models)

لقد ادى اكتشاف الالكترون من قبل ثومسن J.J. Thomson عام 1897 الى فهم اكبر من ذي قبل للتركيب الذري وذلك من خلال الاستنتاجات الاتية:-

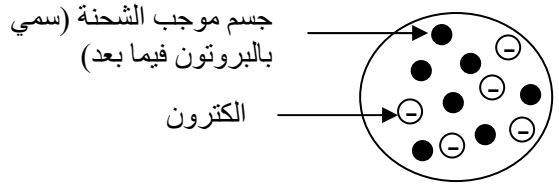
1) ان جميع ذرات المواد تحتوي على هذه الالكترونات وحيث ان الالكترونات تمتلك شحنات سالبة وان الذرات ككل متعادلة كهربائيا لذا فان كل ذرة يجب ان تحتوي على عدد كاف من الشحنات الموجبة لتعادل الشحنات السالبة للالكترونات.
2) ان كتلة الالكترون صغيرة بحيث يمكن اهمالها بالنسبة لكتلة اخف ذرة مما يدل على ان معظم كتلة الذرة ناتجة عن كتل الجسيمات التي تحتويها النواة.

وعلى هذا الاساس فقد اقترحت عدد من النماذج الذرية التي تصف وضع الشحنات السالبة والموجبة داخل الذرة وكان من ابرزها:-

1- نموذج ثومسن للذرة:

ينص على ان الذرات هي اجسام كروية منتظمة نصف قطرها حوالي (10^{-10} m) تحمل شحنات موجبة مرصعة بالالكترونات ذات الشحنات السالبة والذرة متعادلة كهربائيا وكتلة الالكترون صغيرة جدا بحيث يمكن اهمالها بالنسبة لكتلة اخف ذرة.

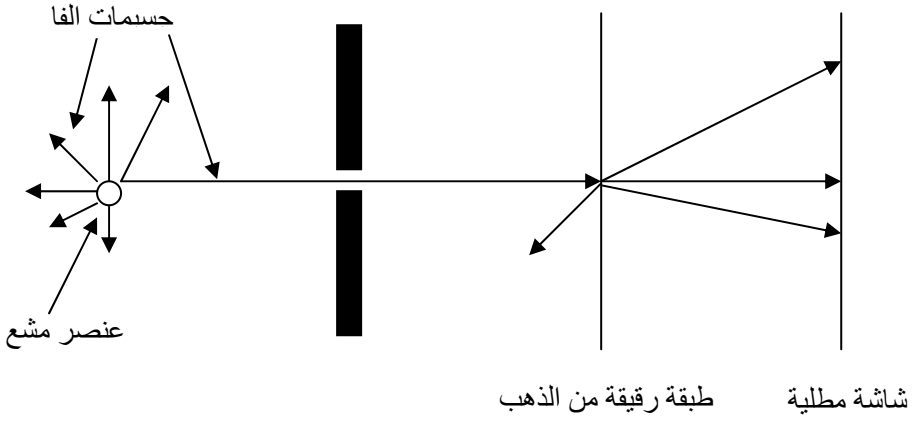
لقد اثبتت التجارب خطأ فرضية ثومسن للذرة وذلك لانه لايوجد ما يمنع اتحاد الشحنات السالبة والموجبة لكي تصبح الذرة متعادلة الشحنة.



نموذج ثومسن للذرة

2- نموذج راذرفورد للذرة:

لم تستطع فرضية ثومسن للذرة ان توضح السبب في بقاء الالكترونات ذات الشحنة السالبة بعيدة عن البروتونات ذات الشحنة الموجبة. ان دراسة تجريبية لنموذج ثومسن لم تتم الا بعد مرور ثلاثة عشر عام حيث قام كل من كايكر ومارسدين Geiger and Marsden عام 1911 بناءا على توجيه من العالم ارنيست راذرفورد Rutherford بتجربة استخدمت فيها جسيمات الفا (Alpha particles) المنبعثة من العناصر المشعة لقصف ذرات الذهب. وجسيمات الفا هي ذرات الهليوم (He) التي فقدت الكترونين فاصبحت مشحونة بشحنة موجبة (+2e). لقد سلطت حزمة من جسيمات الفا المعجلة على طبقة رقيقة من الذهب ووضعت شاشة مطلية بمادة كبريتات الزنك في الجهة الثانية من طبقة الذهب تبعث ومضة ضوئية كلما سقطت عليها جسيمة الفا.

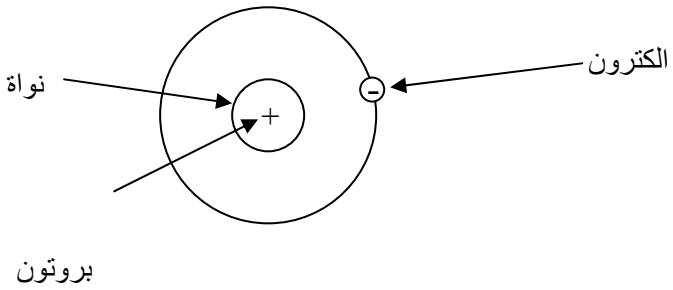


تجربة راذرفورد

ان المتوقع حسب نموذج ثومسن هو ان جسيمات الفا سوف تمر بدون انحراف في مسارها وهذا ناتج عن كون الشحنة الموجبة والسالبة في ذرة ثومسن منتشرة بصورة متجانسة في جميع حيز الذرة ولذلك ينتج مجال كهربائي ضعيف لا يستطيع ان يحدث تغيير في زخم جسيمات الفا وبالتالي فانها لا تنحرف عن مسارها. ولكن النتيجة التي حصل عليها راذرفورد هي ان مسار معظم جسيمات الفا قد استمر بدون انحراف، لكن عددا من هذه الجسيمات قد عانت انحراف كبير جدا عن اتجاه مسارها الاصلي بحيث ان قسما منها قد ارتدت بالاتجاه المعاكس لاتجاه مسارها الاصلي، ولما كانت جسيمات الفا المستخدمة في هذه التجربة سريعة جدا وان هذه الجسيمات ذات شحنة موجبة وثقيلة نسبيا (اثقل بحوالي 7000 مرة من كتلة الالكترون) فلا بد ان توجد في الذرة قوة كبيرة جدا تؤثر على قسم من جسيمات الفا لتسبب لها هذه الانحرافات الكبيرة في مسارها. ولتوضيح ذلك اقترح راذرفورد ان الذرة تتكون من نواة صغيرة الحجم وموجبة الشحنة وكتلتها تساوي كتلة الذرة تقريبا وتقع في مركزها، في حين تكون الالكترونات مستقرة على مسافات بعيدة نسبيا عن النواة وبكلمة اخرى يكون اكثر حجم الذرة فارغا تقريبا وبذلك نستطيع

ومع هذا فعندما تقترب جسيمة الفا من نواة ذرة الذهب فانها تصبح تحت تأثير قوة التنافر الكهروستاتيكية والتي تسبب انحرافا كبيرا لجسيمة الفا عن مسارها الاصلي وكلما اقتربت جسيمات الفا من نواة الذهب اكثر ازداد انحرافها، اما الالكترونات الخفيفة والمنتشرة على مسافات محددة من النواة فلا تؤثر تقريبا على مسار جسيمات الفا السريعة والثقيلة نسبيا.

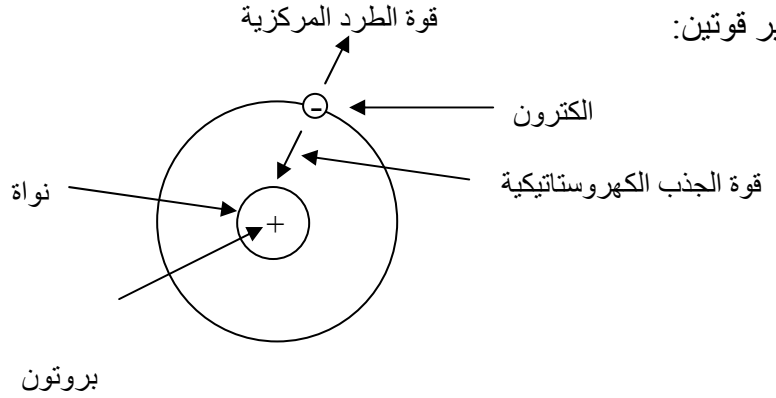
ولكي يوضح راذرفورد تركيب الذرة افترض نموذجا جديدا للذرة اسماه بالنموذج الكوكبي (Planetary model) للذرة والذي ينص على ان الذرة تتكون من نواة صغيرة ذات شحنة موجبة تقع في مركز الذرة وان الالكترونات تدور حولها في مدارات ثابتة مثل دوران الكواكب حول الشمس كذلك فان الشحنة الموجبة للنواة تساوي مجموع الشحنات السالبة للالكترونات وبذلك تكون الذرة متعادلة الشحنة.



نموذج راذرفورد للذرة

<u>حساب طاقة الالكترون حسب نموذج راذرفورد:</u>

لقد افترض راذرفورد ان الالكترون يدور في مدار دائري حول النواة وان الالكترون يقع تحت تأثير قوتين:



1) قوة التجاذب الكهروستاتيكية (Fe): وهي ناتجة عن الجذب المتولد بين النواة الموجبة الشحنة والالكترون السالب الشحنة وتحاول هذه القوة سحب الالكترون باتجاه النواة.

يمكن حساب هذه القوة في ذرة الهيدروجين التي هي ابسط انواع الذرات والتي تتكون من الكترون واحد يدور حول النواة المكونة من بروتون واحد، وذلك باستخدام قانون كولوم Coulomb's Law فتنتج العلاقة التالية:

$$F_e = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o r^2}$$

حيث:

e: شحنة الاكترون (electron charge)= $1.602*10^{-19}$ c (كولوم).

ε_o: سماحية الفراغ (space permittivity)= $8.85*10^{-12}$ F/m (فاراد/متر).

r: نصف قطر مدار الالكترون (radius) (متر).

2) قوة الطرد المركزية (Fc): وهي نتيجة حركة الالكترون المدارية، وتحاول هذه القوة طرد الالكترون بعيدا عن النواة، ويمكن حسابها باستخدام قانون نيوتن في الحركة وكما يأتي:

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

m: كتلة الالكترون (electron mass) = $9.109*10^{-31}$ Kg (كيلوغرام).

v: انطلاق الالكترون (velocity) (m/sec.).

لكي يستقر الالكترون في مداره فان القوتين يجب ان تتساويا بالمقدار وتتعاكسا بالاتجاه وهكذا فان:

Fe = Fc

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_o rm}} \longrightarrow$$

كلما ابتعد الالكترون عن النواة (اي ازداد نصف قطر مداره) قلت سرعته.

ان الطاقة الحركية (E_k) للالكترون هي:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

وبتعويض قيمة v ينتج:

$$E_k = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_o r}$$

E_k: Kinetic Energy: الطاقة الحركية للالكترون (بالجول).

فضلا عن هذا فان الالكترون يمتلك طاقة كامنة (E_p) وذلك لوقوعه على مسافة r من النواة:

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

E_p: Potential Energy: الطاقة الكامنة للالكترون (بالجول).

وحيث ان الطاقة الكلية لاي جسم تساوي طاقته الحركية زائدا طاقته الكامنة لذا فان الطاقة الكلية للالكترون تساوي:

$$E_T = E_k + E_p$$

$$E_T = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_o r}$$

E_T: Total Energy: الطاقة الكلية للالكترون (بالجول).

ان الطاقة الكلية للالكترون المرتبط بالذرة هي كمية سالبة وهذه النتيجة ضرورية لكي يبقى الالكترون مرتبطا بالذرة فلو كانت الطاقة الكلية اكبر من الصفر لامتلك الالكترون طاقة كافية تمكنه من الانفصال عن مجال تأثير النواة.

ان الصورة المقترحة للذرة من قبل راذرفورد كافية لتوضيح استقرارية الذرة ولكنها تخلف بعض الفرضيات الالساسية للنظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية والتي تشير الى ان الشحنة المعجلة تبعث طاقة على شكل موجات كهرومغناطيسية والالكترون الذي يدور في مدار دائري يكون شحنة معجلة وعليه فانه يجب ان يشع طاقة بصورة مستمرة مما يؤدي الى فقدان طاقته باستمرار وسقوطه حلزونيا على النواة وعلى هذا الاساس فان الحسابات تبين ان الالكترون يجب ان ينطبق على النواة خلال اجزاء قليلة جدا من الثانية وهذا لا يتم حتما. كما ان الهبوط المستمر في الطاقة يجب ان ينتج عنه طيف مستمر(نتيجة للنقصان في نصف قطر الدوران وزيادة في اهتزاز الالكترون مما ينتج عنهما زيادة في تردد الاشعاع المنبعث) وهذا يناقض الملاحظات التجريبية في طيف الهيدروجين والذي يبين خطوط مميزة جيدا.

ملاحظة:-

تستعمل غالبا لقياس طاقة الالكترون وحدات طاقة تدعى (الكترون فولت) ev (electron volt) وتعرف وحدة ev على انها الطاقة التي يملكها الالكترون عندما يسقط في فرق جهد مقداره واحد فولت وهكذا فان:

$$1\ ev = 1.602*10^{-19}\ Joule$$

3- نموذج بور للذرة:

على الرغم من ان توقعات النظرية الكهرومغناطيسية تتفق مع الكثير من النتائج العملية الا انها مع ذلك لاتتفق مع وجود الذرة في حالة الاستقرار. ان السبب وراء فشل قوانين الفيزياء الكلاسيكية في تفسير التركيب الذري هو ان هذه القوانين تتعامل مع الاشياء على انها اما موجات او جسيمات من دون اي ازدواجية وبالتالي فان الوصول الى حقيقة التركيب الذري يفرض علينا ان نأخذ بنظر الاعتبار هذه الازدواجية الجسيمية والموجية وهذا ما فعله بور Bohr حيثوضع نموذجه للتركيب الذري الذي يجمع بين الفيزياء الكلاسيكية والفيزياء الحديثة.

قام بور عام 1913 بوضع فرضيتين اساسيتين هما:

الفرضية الاولى: ان الالكترون يدور حول النواة بصورة مستمرة ومن دون ان يشع طاقة اذا كان مداره يحوي عدد كامل من اطوال موجة ديبرولي للالكترون.

ان هذه الفرضية تجمع بين الصفات الجسيمية والموجية للالكترون وذلك لان الطول الموجي للالكترون يتم حسابه بدلالة السرعة الكلاسيكية للالكترون او بعباره اخرى ان:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

λ: طول موجة دبرولي (مترر).

h: ثابت بلانك (Planck's Constant) ويساوي $6.625*10^{-34}$ (جول.ثانية).

p: زخم الالكترون.

m: كتلة الالكترون.

v: انطلاق الالكترون.

وعند التعويض عن v:

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_o rm}}$$

نحصل على:

$$\lambda = \frac{h}{e}\sqrt{\frac{4\pi\varepsilon_o r}{m}}$$

وحيث ان مدار الالكترون هو محيط دائري نصف قطره (r_n) ويساوي ($2\pi r$) لذا فان شرط الحصول على مدار مستقر هو: $n\lambda = 2\pi r_n$

n=1,2,3,….,

حيث يدعى n بالعدد الكمي quantum number للمدار و r_n نصف قطر المدار الذي يحتوي على n من الاطوال الموجية. وعند التعويض عن λ نحصل على:

$$\frac{nh}{e}\sqrt{\frac{4\pi\varepsilon_o r_n}{m}} = 2\pi r_n$$

وعليه فان انصاف اقطار المدارات المستقرة للالكترون تكون:

$$r_n = \frac{n^2 h^2 \varepsilon_o}{\pi m e^2}$$

وعند التعويض عن n=1 نحصل على اصغر مدار (r_1) في الذرة وفي ذرة الهيدروجين على سبيل المثال يكون مساويا ل:

$$r_1 = 0.53*10^{-10}\ m$$

من العلاقة:

$$r_n = \frac{n^2 h^2 \varepsilon_o}{\pi m e^2} = a_o n^2$$

$$a_o = \frac{h^2 \varepsilon_o}{e^2 m \pi}$$

يطلق على a_o (التي تساوي $0.53*10^{-10}$ m) نصف قطر بور (Bohr radius) او وحدة نصف القطر الذرية (atomic unit radius) وهو يمثل نصف قطر مدار الالكترون في الحالة الدركية (n=1) لذرة الهيدروجين.

المدار الثاني المتاح للالكترون له نصف قطر مقداره:

$$r_2 = 2.12*10^{-10}\ m$$

ان جميع انصاف الاقطار بين r_1 و r_2 محظورة وبغض النظر عن سرعته فان اي الكترون لا يستطيع ان يبقى في مدار مستقر اذا كانت قيمة نصف القطر تتراوح بين r_1 و r_2 والسبب ان اي الكترون يصلح فقط لمدار يكون محيطه مساويا لطول موجة ذلك الالكترون او مضاعفاته (nλ).

عند التعويض عن:

$$r_n = \frac{n^2 h^2 \varepsilon_o}{\pi m e^2}$$

في معادلة الطاقة الكلية:

$$E_T = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_o r}$$

نحصل على:

$$E_{Tn} = \frac{-me^4}{8\varepsilon_o{}^2 n^2 h^2}$$

تشير المعادلة السابقة الى ان مدارات الالكترون المختلفة تتضمن طاقات مختلفة وطاقة الالكترون تتحدد بنصف قطر المدار (r_n) او بعبرة اخرى بالعدد الكمي الاساسي (n). هذه الطاقات تمثل مستويات الطاقة (energy levels) للذرة.

ان ادنى مستوى طاقة E_1 (عند n=1) يدعى بالمستوى الارضي ground state للذرة (يسمى كذلك الحالة الدركية او الحالة الطبيعية) في حين تدعى المستويات العليا E_2وE_3 وE_4،..... بالمستويات المتهيجة (excited states).

بزيادة العدد الكمي n تقترب الطاقة تدريجيا من الصفر وعند (n=∞) تكون (E=zero) وبذلك لا يكون الالكترون مرتبطا بالنواة.

ان وجود مستويات الطاقة المنفصلة للذرة يفسر منشأ الاطياف الذرية. اما كيفية حدوث هذه الاطياف فتوضحه الفرضية الثانية لبور.

ان الالكترون الوحيد في ذرة الهيدروجين يشغل ادنى مستوى للطاقة (n=1) وهو اقرب المدارات الى النواة. من معادلة (E_{Tn}) يمكن حساب طاقة هذا المستوي وتساوي (-13.6 ev) وهذه الطاقة هي الطاقة اللازمة لفصل الالكترون عن نواة ذرة الهيدروجين ويطلق عليها جهد التأين (ionization potential). اما مستوي الطاقة الثاني (n=2) في ذرة الهيدروجين فيبعد بمقدار (10.2 ev) من الحالة الدركية، ولرفع الالكترون الى هذا المستوي يتطلب توفير الطاقة اللازمة من مصدر خارجي. ومما يجدر ذكره ان الالكترون لا يمكن ان يقع في موضع بين المستويين لوجود فجوة بينهما يطلق عليها فجوة الطاقة المحظورة لا تسمح لاستقرار الالكترون فيها.

الفرضية الثانية: يمكن للالكترون تحت الظروف المناسبة ان ينتقل من مدار الى اخر، ولما كانت لهذه المدارات قيم مختلفة من الطاقة لذا فان انتقال الالكترون يتطلب اما امتصاصا للطاقة (اذا انتقا الالكترون من مستوى طاقة واطئ الى مستوى طاقة عالي) او اشعاعا للطاقة (اذا انتقل الالكترون من مستوى طاقة عالي الى مستوى طاقة واطئ) وذلك لتحقيق قانون حفظ الطاقة. طبقا للفرضية الاولى فان طاقة المستويات في الذرة تكون ذات قيم محددة او مكممة (quantized) وعليه فان امتصاص او انبعاث الطاقة سيكون مكمما هو الاخر وبالتالي فان التغير في طاقة الذرة سيكون مساويا لكم كامل مقداره (hf) اي ان:

$$E_i - E_f = hf$$

E_i: مستوى الطاقة الذي يبدأ منه الانتقال.

E_f: مستوى الطاقة الذي ينتهي اليه الانتقال.

h: ثابت بلانك.

f: تردد الاشعاع المنبعث او الممتص من قبل الذرة (هرتز).

اذا كان $E_i - E_f = +$ انبعاث طاقة.

اذا كان $E_i - E_f = -$ امتصاص طاقة.

بموجب الفرضية الثانية لبور فان الطاقة تشع فقط عندما ينتقل الالكترون من مدار خارجي الى مدار اوطأ وتتحرر طاقة مساوية للفرق بين طاقتي المستويين مرة واحدة بشكل فوتون وليس بطريقة تدريجية ويكون تردد الفوتون المنبعث مساويا ل:

$$f = \frac{E_i - E_f}{h}$$

السلاسل الطيفية:

كما ذكرنا ان انتقال الالكترون من مستوى طاقة عالي الى مستوى طاقة واطئ ينتج عنه انبعاث فوتون بتردد معين وهذا هو منشأ الضوء المنبعث من دا خل الذرة والمكون للطيف الخطي لها وان تردد هذا الفوتون المنبعث يكون ضمن ترددات الضوء او ضمن ترددات المنطقة غير المرئية.

لقد وجد بان هناك اطوالا موجية في الاطياف الذرية تقع في مجاميع محددة تسمى السلاسل الطيفية وكل طول موجي في اي سلسلة يمكن ان يحدد بصيغة رقمية.

يستعمل غالبا مقلوب الاطوال الموجية ($1/\lambda$) لكتابة معادلة هذه السلاسل حيث:

$$E_i - E_f = hf$$

نعوض عن E_i و E_f ب:

$$E_{Tn} = \frac{-me^4}{8\varepsilon_o{}^2 n^2 h^2}$$

ونعوض عن f:

$$f = \frac{C}{\lambda}$$

حيث: f: تردد الفوتون المنبعث بالهرتز.

C: سرعة الضوء ($2.9979*10^8$ m/s).

λ: الطول الموجي.

فنحصل على:

$$\frac{-me^4}{8\varepsilon_o{}^2 n_i{}^2 h^2} + \frac{-me^4}{8\varepsilon_o{}^2 n_f{}^2 h^2} = h \times \frac{C}{\lambda}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8h^3 C\varepsilon_o{}^2}\left(\frac{1}{n_f{}^2} - \frac{1}{n_i{}^2}\right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_f{}^2} - \frac{1}{n_i{}^2}\right)$$

حيث:

$1/\lambda$: العدد الموجي (wave number) وحداته m^{-1} او cm^{-1}.

R: ثابت ريدبيرك (Rydberg constant) ويساوي $1.0974*10^7$ m^{-1}.

n_f: رقم المدار الذي ينتهي اليه الانتقال.

n_i: : رقم المدار الذي يبدأ منه الانتقال.

ان انتقالات الالكترون في ذرة الهيدروجين ينتج عنها السلاسل الطيفية الاتية:

1) سلسلة لايمان (Lyman Series) الواقعة في المنطقة فوق البنفسجية وتنتج عندما يكون:

n_f=1 n_i= 2, 3, 4, …,∞

2) سلسلة بالمر (Balmer Series) الواقعة في المنطقة المرئية وتنتج عندما يكون:

n_f=2 n_i= 3, 4,5, …,∞

3) سلسلة باشن (Paschen Series) الواقعة في المنطقة تحت الحمراء وتنتج عندما يكون:

n_f=3 n_i= 4,5,6, …,∞

4) سلسلة براكيت (Brackett Series) الواقعة في تحت الحمراء البعيدة وتنتج عندما يكون:

$n_f=4 \quad n_i=5,6,7, \ldots,\infty$

5) سلسلة بفوند (Pfund Series) في غاية تحت الحمراء وتنتج عندما يكون:

$n_f=5 \quad n_i=6,7,8, \ldots,\infty$

4- نموذج الميكانيك الموجي (The Wave-Mechanic Model):

على الرغم من ان نظرية بور كانت متفقة بصورة جيدة مع الذرات احادية الالكترونات كالهيدروجين وكذلك الايونات الهيدروجينية الا انه وجد ان هذه النظرية لا يمكن تطبيقها على طيف الذرات المعقدة التي تتألف من الكترونين او اكثر كذلك وجد ان بعض خطوط الطيف تتحلل الى خطوط متعددة ومتقاربة تعرف بالتركيب الدقيق (fine structure). ان هذا التركيب الدقيق لا يمكن تفسيره بواسطة نظرية بور التي افترضت وجود مدار واحد فقط لكل عدد كمي (n) بينما يشير التركيب الدقيق الى وجود عدة مدارات مختلفة الطاقة قليلا لكل عدد كمي (n). من جهة اخرى فان نظرية بور غير قادرة على تفسير لماذا تكون بعض خطوط الطيف ذات شدة اكثر من خطوط الطيف الاخرى اي لماذا تكون بعض انتقالات بين مستويات الطاقة اكثر احتمالا من انتقالات اخرى والاهم من ذلك ان هذه النظرية لاتستطيع تفسير التفاعلات الذرية التي هي اساس الصفات الفيزياوية والكيمياوية للمادة.

لقد تمكن العالم شرودنكر Schrodinger من وضع نظرية اكثر شمولا خلال الفترة 1925-1926 تحت عنوان الميكانيك الموجي.

لقد استطاع هذا العالم من صياغة معادلة تفاضلية موجية لوصف سلوك الالكترون عند وقوعه تحت تأثير جذب النواة. وعند حل هذه المعادلة لالكترون ذرة الهيدروجين يظهر العدد الكمي (n) بصورة تلقائية كأحد نتائج حل معادلة شرودنكر.

من جهة اخرى ونتيجة للدراسة المعمقة لنتائج حلول معادلة شرودنكر فقد وجد ان الالكترونات التي تمتلك نفس العدد الكمي الرئيس (n) تتجمع حول النواة في قشرة ذرية (atomic shell). وعادة ما يرمز للقشرات الذرية المختلفة بحروف لاتينية كبيرة تتمثل بما يأتي:

	n=1,	2,	3,	4,	5,	…
القشرات الذرية	K	L	M	N	O	

اكبر عدد من الالكترونات التي يمكن ان تحتويها قشرة رئيسة هو $2n^2$.

ان هذه القشرة تكون ذات مستويات طاقة مختلفة مما ادخل مفهوما جديدا وهو وجود القشرة الثانوية subshell بسبب امتلاك الالكترون لعدد كمي اخر هو العدد الكمي المداري (l) الذي ياخذ القيم صفر الى (n-1). يرمز للقشرات الثانوية:

	l=0,	1,	2,	3,	…
القشرات الثانوية	s	p	d	f	

اكبر عدد من الالكترونات التي يمكن ان تحتويها قشرة ثانوية هو 2(2l+1).

كذلك يرتبط العدد الكمي المداري (l) مع الزخم الزاوي للالكترون ويحدد قيمته. وحيث ان الزخم الزاوي هو كلزخم الخطي كمية متجهة لذا فانه يمتلك مقدارا وتجاها. ان الكترونا يدور حول النواة يكون حلقة صغيرة من تيار يكون بدوره مجالا مغناطيسيا يشبه مجال ثنائي قطب مغناطيسي. وبالتالي فان الكترونا ذريا ذا زخم زاوي سوف يتفاعل مع مجال مغناطيسي خارجي عندما يوضع فيه ويحدد العدد الكمي المغناطيسي (m_l) مركبة الزخم الزاوي للالكترون باتجاه المجال. وتكون القيم المسموحة ل (m_l) التابعة لقيم معينة ل l ممتدة بين l+ و l– مرة بالقيمة صفر.

على الرغم من ان الاعداد الكمية الثلاثة المارة الذكر قد ظهرت بصورة تلقائية عند حل معادلة شرودنكر لذرة الهيدروجين وما نتج عنها من ادخال مفاهيم جديدة ساعدت كثيرا على فهم افضل للبناء الذري الا ان النظرية الكمية تبقى قاصرة عن اعطائنا جميع صفات الذرة من دون ادخال عدد كمي رابع (m_s) الذي يشير الى وجود زخم زاوي ذاتي (بسبب البرم الالكتروني electron spin) للالكترون وقد وجد ان (m_s) ياخذ القيمتين اما (+1/2) او (-1/2) ليشير الى ان اتجاه البرم اما باتجاه مواز للمجال المغناطيسي او بعكس اتجاه هذا المجال.

مبدأ الاستبعاد لباولي Paulis's Exclusion Principle:

في سنة 1925 وضع باولي مبدأ يعرف الان بمبدأ الاستبعاد لباولي يستخدم لتخصيص الاعداد الكمية الى الالكترونات في الذرة وينص هذا المبدأ على ان: لا يمكن ان يوجد الكترونان في الذرة بنفس الحالة الكمية او بعبارة اخرى لا يمكن لاكثر من الكترون واحد في ذرة ان ياخذ نفس الحالة الكمية وعليه فان قيم الاعداد الكمية الاربعة يجب ان تختلف من الكترون الى اخر.

Example: Find the electron velocity in the Hydrogen atom if its total energy equals (-13.6 ev):

Sol:

To convert from (ev) to (Joule):

$$E_T = -13.6 \times 1.602 \times 10^{-19} = -2.178 \times 10^{-18}\, J$$

$$E_T = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_o r}$$

$$r = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_o E_T}$$

$$r = \frac{-(1.602 \times 10^{-19})^2}{8 \times \pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times -2.178 \times 10^{-18}}$$

$$r = 5.3 \times 10^{-11}\, m$$

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_o rm}} = \frac{1.602 \times 10^{-19}}{\sqrt{4 \times \pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times 5.3 \times 10^{-11} \times 9.109 \times 10^{-31}}}$$

$$v = 2.18 \times 10^6 \frac{m}{\text{sec.}}$$

Example: The Hydrogen atom electron moves from the second energy level (n=2) to the first energy level (n=1). Calculate the released energy and the wavelength caused by this movement.

Sol:

$$E_{Tn} = \frac{-me^4}{8\varepsilon_o^{\,2} n^2 h^2}$$

The electron energy in the second level (at n=2):

$$E_{T2} = \frac{-9.109 \times 10^{-31} \times (1.602 \times 10^{-19})^4}{8 \times (8.85 \times 10^{-12})^2 \times (2)^2 \times (6.625 \times 10^{-34})^2} = -5.44 \times 10^{-19}\, J$$

$$E_{T1} = \frac{-9.109 \times 10^{-31} \times (1.602 \times 10^{-19})^4}{8 \times (8.85 \times 10^{-12})^2 \times (1)^2 \times (6.625 \times 10^{-34})^2} = -21.78 \times 10^{-19}\, J$$

The released energy:

$$E_{T2} - E_{T1} = -5.44 \times 10^{-19} + 21.78 \times 10^{-19} = 16.34 \times 10^{-19}\, J$$

The photon frequency:

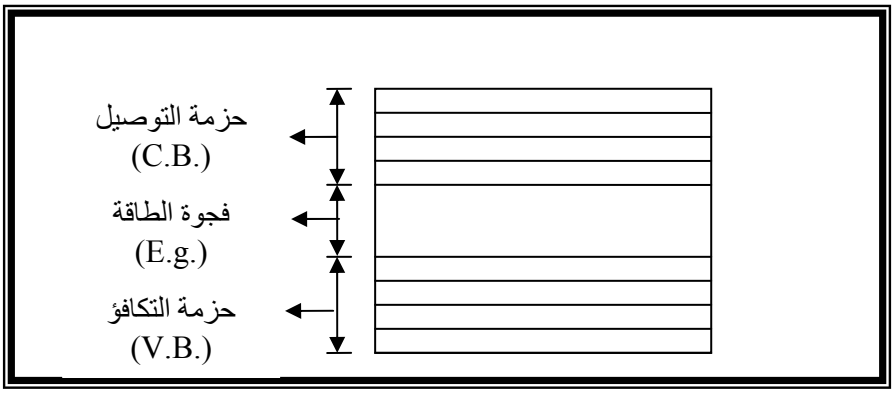
$$f = \frac{E_{T2} - E_{T1}}{h} = 2.47 \times 10^{15}\, Hz$$

The wavelength:

$$\lambda = \frac{C}{f} = 1.2 \times 10^{-7} m$$

حزم الطاقة في المواد الصلبة: Energy Bands in Solid

ان الكترونات الذرة المنفردة تدور حول النواة في مدارات معينة وان لكل مدار مستويا ثابتا محددا من الطاقة ويتكون كل مستوى من عدة مستويات ثانوية. اما في المواد الصلبة التي تتكون من عدد كبير من الذرات المتقاربة فانه عندما تتحد هذه الذرات لتكوين البلورة فان اي الكترون لايتاثر بالشحنات الموجودة في ذرته فحسب بل يتاثر بالنوى والالكترونات الموجودة في الذرات الاخرى كافة التي تحويها البلورة. وعلى هذا الاساس فان مستويات طاقة الالكترونات الخارجية للذرات يتغير نتيجة التعامل بين الذرات وبدلا من ان تكون هناك مستويات محددة من الطاقة لكل ذرة منفردة نجد ان البلورة تمتلك حزمة من عدد ضخم من مستويات الطاقة قريبة جدا بعضها من بعض.

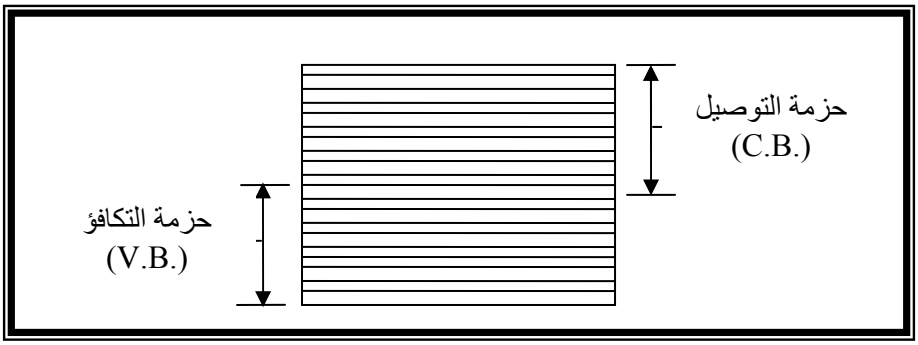


حزم الطاقة

وتظهر هذه الحزمة من المستويات كانها مستمرة وتسمى بحزمة التكافؤ Valence Band وتكون الالكترونات ضمن هذه الحزمة مقيدة بالذرة ولاتشترك بالتوصيل الكهربائي. وعندما تحصل الكترونات التكافؤ على طاقة كافية بالقدر الذي يجعلها تتحرر من الارتباط بالذرة فانها تقفز الى الحزمة التالية وهي حزمة التوصيل Conduction Band فالالكترونات الموجودة فيها تشارك في عملية التوصيل الكهربائي ويوجد بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل منطقة محظورة لايمكن للالكترون ان يتواجد فيها تسمى فجوة الطاقة Energy Band. وتصنف المواد الكهربائية بالاعتماد على مقدار فجوة الطاقة الى ثلاثة انواع: الموصلات والعوازل واشباه الموصلات.

1- الموصلات Conductors:

تكون حزمة التكافؤ متداخلة مع حزمة التوصيل وبالتالي لاتوجد فجوة طاقة. ان اختفاء فجوة الطاقة في البلورات الموصلة يعني ان اي الكترون تكافؤي سوف يكون حرا في التجوال خلال



مخطط حزم الطاقة في الموصلات

عند درجة حرارة الصفر المطلق لا تستطيع الالكترونات التحرك خلال البلورة وذلك لانها جميعا مرتبطة بشدة الى ذراتها وبالتالي فانها تملأ حزمة التكافؤ من اوطأ مستوى طاقة فيها الى اعلى مستوى طاقة او بعبارة اخرى ان حزمة التوصيل عند درجة حرارة الصفر المطلق تكون فارغة وهذا يعني انه لاتوجد طاقة كافية عند اي الكترون لكي ينتقل الى حزمة التوصيل.

عند ارتفاع درجة الحرارة فوق الصفر المطلق فان الطاقة الحرارية التي سوف يكتسبها الالكترون ستمكنه من الافلات من ذرته والانتقال الى حزمة التوصيل ويكون في حزمة التوصيل متحركا حركة عشوائية بكل الاتجاهات بسرعة تسمى السرعة الحرارية (thermal velocity).

عند تسليط فرق جهد عبر الموصل فان مجالا كهربائيا سوف يتولد داخل الموصل يعمل على تعجيل الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل بسبب القوة التي تتعرض لها والتي تساوي:

$$F = qE$$

ولكن تعجيل الالكترونات في المادة البلورية سوف يعاق نتيجة التصادم المستمر مع الذرات المهتزة حول مواقعها في البلورة وسريعا ما تبلغ سرعة الالكترون قيمة متوسطة ثابتة تدعى سرعة الانسياق (drift velocity v_d) التي ترتبط خطيا مع شدة المجال الكهربائي بواسطة الحركية (التحريكية) (mobility) في المادة المعطاة ويرمز للتحريكية بالرمز (μ) ووحداتها (m^2/v.sec.):

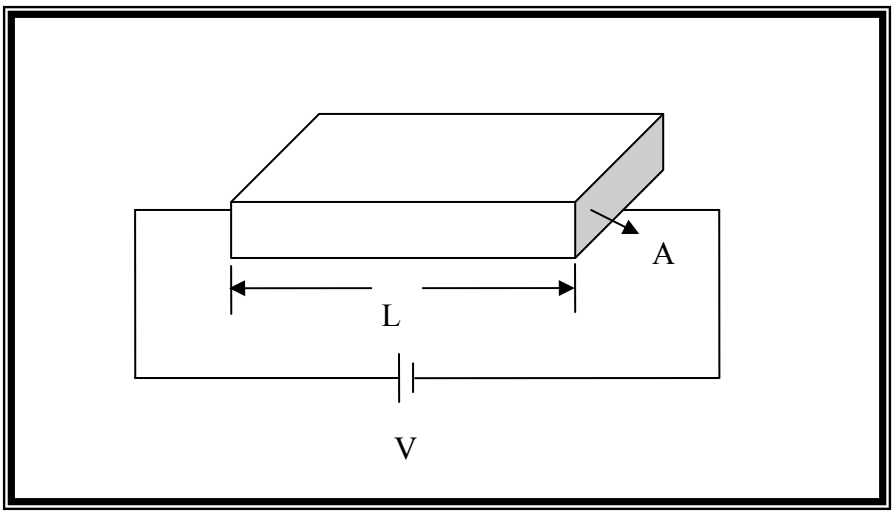
$$v_d = \mu E$$

والقيم النموذجية للتحريكية هي 0.0012 للالمنيوم و 0.0032 للنحاس و 0.0056 للفضة.

ومن الجدير بالذكر انه عند جهد ثابت ورفع درجة حرارة الموصل فان عدد الاصطدامات بين الالكترون والذرات المهتزة حول مواقعها في البلورة سوف يزداد ومن ثم تقل سرعة الانسياق وبالتالي تزداد مقاومة الموصل اي تزداد مقاومته مع ازدياد درجة الحرارة.

ايصالية المعادن Conductivity:

اذا ربط طرفا جسم معدني طوله (L) ومساحة مقطعه العرضي (A) الى قطبي بطارية فرق جهدها (V) مما سبب مرور تيار كهربائي في المعدن مقداره (I) فانه حسب قانون اوم:



$$V = IR$$

حيث ان (R) هي مقاومة المعدن وتعرف:

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

ρ هي المقاومة النوعية للمعدن (المقاومية resistivity) ووحداتها (اوم.متر) (Ω .m). من المعادلتين اعلاه ينتج:

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho}\frac{V}{L}$$

وبما ان:

$$J = \frac{I}{A} \text{ و } E = \frac{V}{L} \text{ و } \sigma = \frac{1}{\rho}$$

حيث ان:

J: كثافة التيار المار عبر المقطع العرضي للمعدن.

J: Current density وحداته (A/m^2).

E: شدة المجال الكهربائي.

σ: الايصالية او التوصيلية (conductivity) وحداتها $(\Omega .m)^{-1}$.

ينتج من المعادلات اعلاه:

$$J = \sigma E$$
$$\because \sigma = ne\mu$$
$$\therefore J = ne\mu E$$

حيث ان (e) هي شحنة الالكترون، و(n) هي عدد الالكترونات في وحدة الحجم (الكترون/متر^3).

نستنتج ان الايصالية (σ) تعتمد على عاملين هما كثافة الالكترونات الطليقة في المادة (n) وقابلية هذه الالكترونات في التنقل داخل المادة (μ) تحت تاثير المجال الكهربائي.

ملاحظة: سرعة الانجراف (v_d) تساوي

$$v_d = \mu E$$

$$J = ne\mu E \quad \text{و}$$

$$\therefore J = nev_d$$

Example: A metal object with length (10 m), cross-sectional area (0.5 mm^2), and resistance of (0.34 Ω). A potential difference source of (5 v) connected on its sides. If the density (concentration) of free electrons equals ($8.5*10^{28}$ electron/m^3), determine:

1) The object conductivity.
2) The electron mobility.
3) The current density through the object.

Sol.)

$$1)\ \sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA}$$

$$\sigma = \frac{10}{0.34 \times 0.5 \times 10^{-6}}$$

$$\therefore \sigma = 5.9 \times 10^{7}\ (\Omega .m)^{-1}$$

$$\mu = \frac{\sigma}{ne} = \frac{5.9 \times 10^{7}}{8.5 \times 10^{28} \times 1.602 \times 10^{-10}}$$

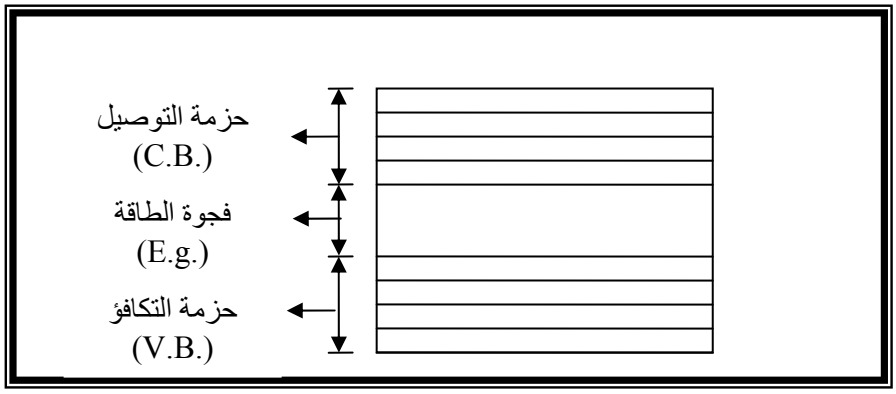
$$\therefore \mu = 4.33 \times 10^{-3} m^{2} / v.\sec .$$

$$3)\ E = \frac{V}{L} = \frac{5}{10} = 0.5 \frac{v}{m}$$

$$J = \sigma E = 5.9 \times 10^{7} \times 0.5 = 2.95 \times 10^{7} \frac{A}{m^{2}}$$

2- العوازل Insulators :

تكون حزمة التكافؤ مفصولة عن حزمة التوصيل بفجوة طاقية كبيرة تصل قيمتها الى حوالي (5ev) وبالتالي فأن الالكترونات في حزمة التكافؤ لا يمكنها الأنتقال الى حزمة التوصيل الا عند استلامها الطاقة الكافية التي تساوي فجوة الطاقة.

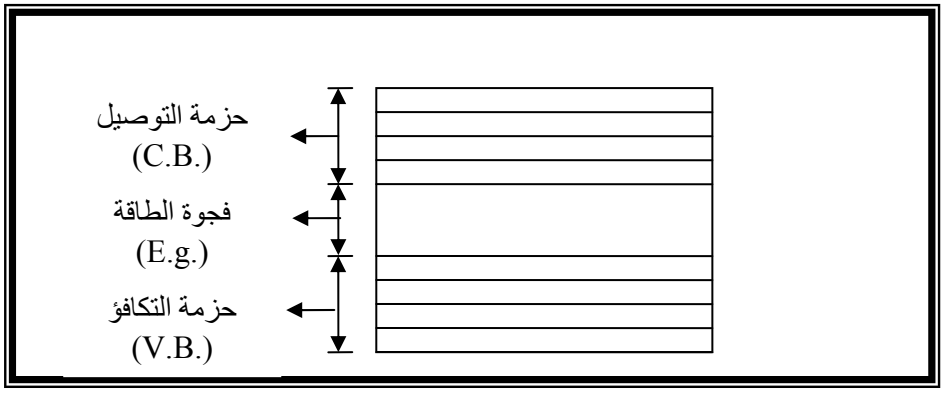


مخطط حزم الطاقة في العوازل

في درجات الحرارة العادية لا تمتلك الالكترونات في حزمة التكافؤ الطاقة التي تمكنها من الانتقال الى حزمة التوصيل وبالتالي فانه يمكن القول ان البلورة العازلة تتميز بامتلاكها فجوة طاقة كبيرة وتكون حزمة التكافؤ فيها مملوءة بالالكترونات بينما تكون حزمة التوصيل فارغة وهذا يفسر عدم وجود شحنات حرة في المواد العازلة بل شحنات مقيدة في اماكنها بقوى ذرية وجزيئية وعند تسليط فرق جهد على هذه المواد فأن المجال الكهربائي المتولد سوف يعمل فقط على ازاحة الالكترونات قليلاً عن مواضعها الاصلية .

3- اشباه الموصلات Semiconductors :

لا يختلف مخطط الطاقة لاشباه الموصلات عن نظيره في العوازل الا في سعة فجوة الطاقة حيث تكون قيمتها في اشباه الموصلات في حدود (1.1ev) او اقل.



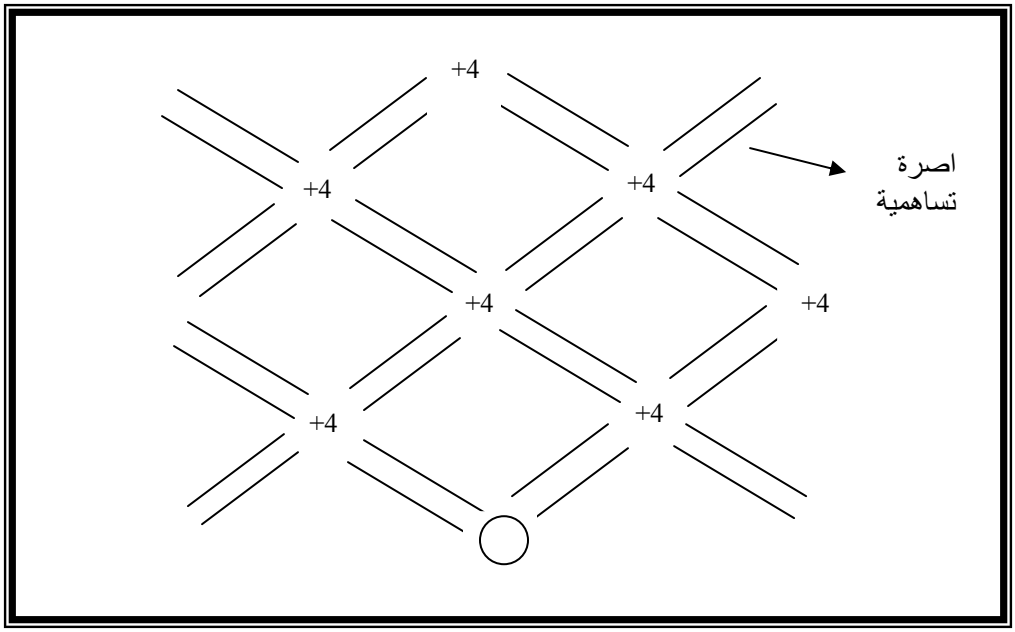
مخطط حزم الطاقة في اشباه الموصلات

وتتميز هذه المواد بكونها عازلة عند درجة حرارة الصفر المطلق (حيث تكون حزمة التوصيل فارغة اي لا توجد طاقة كافية عند اي الكترون لكي ينتقل الى حزمة التوصيل) وموصلة عند الدرجات الحرارية العالية .من جهة اخرى عند درجة حرارة الغرفة (27°C=300°K) يكتسب عدد من الالكترونات الطاقة الكافية لكي ينتقل الى حزمة التوصيل الا ان التيار الناتج يكون صغيراً بحيث لا يمكن الاستفادة منه في معظم التطبيقات وعند هذه الدرجة لا تكون المادة شبه الموصلة عازلاً جيداً كما لا تكون موصلاً جيداً ولهذا تدعى شبه موصل .

1-3 اشباه الموصلات النقية Intrinsic Semiconductors :

ان رفع درجة حرارة المادة شبه الموصلة يؤدي الى زيادة طاقة الالكترونات التكافؤية ومن ثم فان عدد الالكترونات التي تصل الى حزمة التوصيل سوف يزداد مع ارتفاع درجة الحرارة وبالتالي فأن التوصيلية (σ) لهذه المواد سوف تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة .

تمتلك عناصر المجموعة الرابعة (group IV) من الجدول الدوري ,اربعة الكترونات تكافؤية وتدعى البلورات التي تكونها (البلورات التساهمية) وتنشأ قوى التماسك في هذه البلورات من وجود الكترونات مشتركة بين الذرات المتجاورة فكل ذرة مشتركة بأصرة تساهمية مع جارتها وتساهم بالكترون واحد في الأصرة ويكون الالكترونات مشتركين بين الذرتين بدلاً من ان يكون كل منهما ملكية خاصة لاحد الذرتين ويبين الشكل ادناه تركيب احد هذه البلورات في درجة الصفر المطلق .



بلورة تساهمية

اذا ما تم تسليط جهد كهربائي على هذه البلورة او تعرضت لاشعاع بطاقة كافية او تم اكسابها طاقة حرارية فان الطاقة المكتسبة هذه سوف تعمل على كسر الروابط التساهمية ونقل الالكترون الى حزمة التوصيل ليشارك في عمليةالتوصيل الكهربائي .ان الطاقة اللازمة والكافية لفك الروابط التساهمية يجب ان تكون مساوية لفجوة الطاقة (E_g) او اكبر . تكون E_g مساوية ل (0.72 ev) بالنسبة لبلورة الجرمانيوم (Ge) و (1.1ev) بالنسبة لبلورة السيليكون (Si) . ويعد هذان العنصران من اهم عناصر المجموعة الرابعة المستعملة في الصناعات الالكترونية ولعنصر السيليكون (14) الكتروناً في تركيبه الذري بينما عنصر الجرمانيوم (32) الكتروناً.

ان انتقال الالكترون من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل سوف يخلف وراءه مكاناً خالياً في الأصرة التساهمية يدعى بالفجوة (hole) . الذرة الأن اصبحت ايوناً (ion) . وتظهر الفجوة كشحنة موجبة (e +) وبكتلة فعالة (m_h)لا تكون مساوية لكتلة الالكترون. هذا الفرق في الكتلتين يظهر على شكل حركة بطيئة لحاملات الشحنة الموجبة هذه استجابة للمجالات الكهربائية المسلطة مقارنة مع حركة الالكترونات تحت نفس الظروف.

تعرف الفجوة بانها مكان مستعد لاستقبال الكترون وبهذا فانها سرعان ما تملأ بالالكترون المجاور الذي يعمل (بفعل وجود مجال كهربائي) على كسر الاصرة التي تربطه بالذرة مولدا بذلك فجوة ثانية يتم ملأها ايضا بالكترون اخر وهكذا تستمر العملية مؤدية بذلك الى حركة الشحنات. ان حركة الثقوب (الفجوات) حركة عشوائية وفي اتجاهات مختلفة الا ان تسليط مجال كهربائي يدفع بهذه الثقوب الى الحركة بأتجاه المجال وبعكس اتجاه الالكترونات وبهذا ينتج

ان عملية توليد هذه الازواج من الالكترون-فجوة electron-hole pairs سوف تستمر وتعد الطاقة الحرارية اكثر المصادر توليدا لهذه الازواج وتدعى عملية التوصيل الناتجة عن حركة حاملات الشحنة هذه (الفجوات والالكترونات) بعملية التوصيل الذاتي intrinsic conduction. عند تسليط مجال كهربائي خارجي فان الطاقة المكتسبة من قبل هذه الحاملات سوف تضاف الى طاقتها الحرارية، وبذلك تعمل على تعجيلها واكسابها سرعة تصل بعد فترة معينة الى قيمة ثابتة تدعى بسرعة الانسياق بحيث ان:

$$v_h = \mu_h E$$
$$v_e = \mu_e E$$

حيث تشير (h) الى الفجوات (holes) و(e) الى الالكترونات.

بالنسبة لاشباه الموصلات لدينا:

$$J_e = nev_e$$

وكذلك

$$J_h = pev_h$$

حيث تمثل (n) كثافة الالكترونات المتولدة و(p) كثافة الفجوات المتولدة.

$$J_t = J_e + J_h = nev_e + pev_h$$

(J_t): كثافة التيار الكلية (total).

وعند التعويض عن قيمة v_e وv_h نحصل على:

$$J_t = ne\mu_e E + pe\mu_h E$$

في اشباه (انصاف) الموصلات النقية تكون كثافة الاكترونات (n) في حزمة التوصيل مساوية لكثافة الثقوب (p)التي خلفتها تلك الالكترونات في حزمة التكافؤ، اي ان:

$$n = p = n_i$$

حيث يشير الرمز (n_i) الى كثافة الالكترونات والثقوب وعليه فان:

$$J_t = n_i(\mu_e + \mu_h)eE$$

وبنفس الطريقة فان التوصيلية الكلية (σ_t) في شبه الموصل النقي:

$$\sigma_t = \sigma_e + \sigma_h$$
$$\therefore \sigma_t = (\mu_e + \mu_h)n_i e$$

بما ان

$$n = p = n_i$$

$$\therefore np = n_i^2$$

وتسمى هذه المعادلة قانون فعل الكتلة (mass action law).

وتعتمد (n_i) على درجة الحرارة كما يلي:

$$n_i^2 \propto T^3 \exp(\frac{-E_g}{KT})$$

حيث ان:

T: درجة الحرارة المطلقة بالكليفن

E_g: فجوة الطاقة بالجول

K: ثابت بولتزمان

$$K = 1.381 \times 10^{-23} (\frac{J}{^oK})$$

كما يمكن حساب (n_i) من المعادلة التالية:

$$n_i = (N_c N_v)^{\frac{1}{2}} \exp(-\frac{E_g}{2KT})$$

حيث تمثل N_c الكثافة الفعالة لمستويات الطاقة (او عدد الحالأت الطاقية المسموحة)في حزمة التوصيل وتمثل N_v الكثافة الفعالة لمستويات الطاقة في حزمة التكافؤ وتعطى كالتالي :

$$N_c = 2(\frac{2\pi m_e^* KT}{h^2})^{\frac{3}{2}}$$

$$Nv = 2(\frac{2\pi m_p^* KT}{h^2})^{\frac{3}{2}}$$

حيث تمثل (m_e^*) الكتلة الفعالة للالكترون و (m_p^*) الكتلة الفعالة للفجوة .

Example: Calculate the conductivity of an intrinsic silicon crystal if the number of released electrons at a certain temperature is one electron for each 10^{13} of valence electrons. The silicon density is ($2.33*10^3$ Kg/m^3), the silicon atomic weight is (28.086), the electron mobility is (0.135 m^2/v.sec.) and the hole mobility is (0.048 m^2/v.sec.).

Sol.)

Let the number of the silicon atoms in the cubic meter is N

$\therefore$ *The number of valence electrons* $= 4N$ (*there is four valence electrons for each atom*)

$$density = \frac{number\ of\ atoms \times atomic\ weight}{avogadro\ number}$$

$\therefore$ *The number of atoms in the cubic meter* (N) *equals* :

$$N = \frac{2.33\times10^{3}\times6.023\times10^{26}}{28.086} = 5\times10^{28}$$

The number of valence electrons in the cubic meter $= 4\times5\times10^{28} = 2\times10^{28}$

$\therefore$ *The number of free electrons in the cubic meter* $= \frac{2\times10^{28}}{10^{13}} = 2\times10^{16}$

$\because$ *The crystal is* intrinsic

$\therefore n = p = n_i = 2\times10^{16}$

$\sigma_t = n_i e(\mu_e + \mu_h)$

$\sigma_t = 2\times10^{16}\times1.6\times10^{-19}\times(0.135+0.048)$

$\sigma_t = 5.8\times10^{-4}(\Omega.m)^{-1}$