LECTURE NO.1

حزم الطاقة والتوزيع الالكتروني في المواد

مقدمة:

حزم الطاقة والتوزيع الالكتروني في المواد هو مفهوم يتعلق بتوزيع الطاقة بين الالكترونات في ذرات المواد. وكيفية توزيع الالكترونات حول نواة الذرة وكيفية تنظيمها في مستويات الطاقة المختلفة.حيث ان الالكترونات في المدار الخارجي هي التي تحدد الصفات الكيمائية والفيزيائية للمادة وطبيعة الاواصر التي تربط الذرات فيما بينها وتسمى الالكترونات الموجوده في المدار الخارجي بالكترونات التكافؤ وذلك لان هذة الالكترونات هي التي تدخل في التفاعلات الكيميائية وتحدد نوع الاواصر. اما الالكترونات في المدار الداخلي لاتدخل في التفاعلات الكيمائية ولاتحديد الاواصر.

التركيب البلوري للمواد

توجد المادة في الطبيعة على هيئة غاز او سائل او صلب. ففي الحالة الغازية تتحد الذرات على شكل جزيئات وتتحرك هذه الجزيئات بحرية تامة ضمن الحيز الذي تشغلة . وتعتمد الطاقة الحركية للجزيئات اعتمادا على درجة حرارة الغاز. كما ان زيادة الضغط على الغاز يساعد على ترابط الجزيئات فيما بينها ويؤدي الى تكثف الغاز وبذلك يتحول الى الحالة السائلة. فان تسييل الغاز يتم بالتبريد والضغط.

اما في الحالة السائلة حيث ياخذ السائل شكل الاناء الذي يحتوي به لان الذرات تكون متقاربة وتكون حركنها في ذلك الحيزفقط. وان تجريد السائل من الطاقة بصورة مستمرة يفقد جزيئاته قابلية التنقل والحركة وترتبط جزيئاته فيما بينها بقوى كبيرة وتصبح للمادة بنية متواصلة من الذرات التي تفقدها الحركة الانتقالية فتقتصر على الاهتزاز الموضعي تتحول المادة الى الحالة الصلبة..

وفي الحالة الصلبة تكون الذرات مترابطة مع الذرات المجاورة بقوى جذب كبيرة ويقال ان ذرات المادة كونت اواصر فيما بينها . والمسافة بين الذرات قليلة جدا بالمقارنة مع الحالة الغازية حيث نجد ان المتر المكعب من الغازي يحوي 3×10^{25} ذرة بينما يحوي المتر المكعب من المادة الصلبة حوالي 3×10^{28} ذرة.

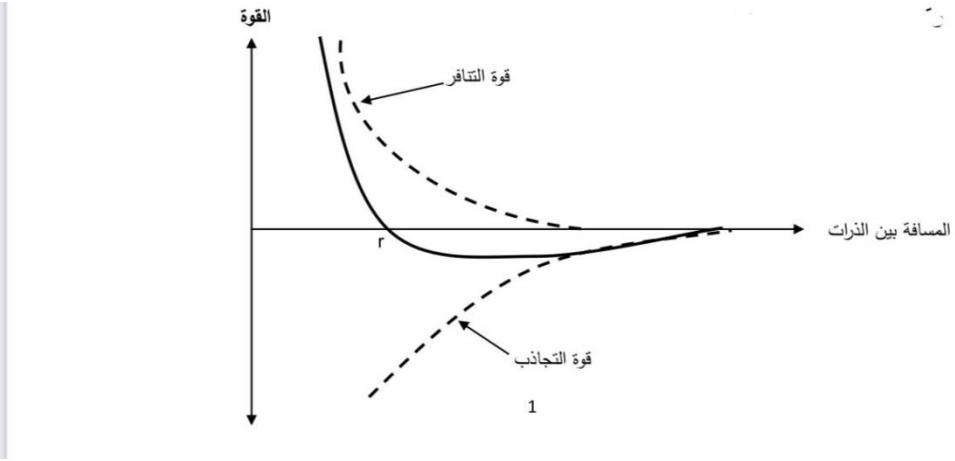
الاواصر وانواعها

تعتمد القوى التي توثر على تماسك الذرات(ذات الطبيعة الكتروستاتيكية) اساسا على تكوين الذرة وكيفية توزيع الالكترونات على مدارات الذرة .

عند إقتراب ذرتان نحو بعضهما فإنهما يقعان تحت تأثير قوتين :

- قوة جذب Attractive forceبين إلكترونات الذرة الأولى ونواة الذرة الثانية.
- قوة تنافر Repulsive force بين نواتي الذرتين

وجد عمليا أن قوتي التجاذب والتنافرعندما تتعادلان على مسافة معينة عندها تتداخل إلكترونات التكافؤ للذرتين وتنشأ اصرة مستقرة بينهما. كما موضح في الشكل ادناه



الشكل(1) يوضح تاثير القوتان على الذرتين عند اقترابهما نحو بعض.

وتختلف الاواصر المتكونة بين الذرات باختلاف التركيب الالكتروني لكل ذرة ويمكن تقسيم الاواصر الى انواع هي

1. الاصرة الايونية

تصبح الذرة الفاقدة لالكترون ايون موجب والتي تكتسب الالكترون ايون سالب فتتجاذب الايونات بسبب اختلاف الشحنة ويكون بينهما اصرة ايونية.

تكون المادة الناتجة صعبة الصهر بالحرارة لان طاقة تكوين الاصرة عالية نسبيا (بحدود 10eV) وكذلك مقاومتها الكهربائية عالية لعدم وجود الكترونات طليقة سهلة الحركة.

ويمكن حساب طاقة الاصرة الايونية بالمعادلة الاتية

$$E_T = E_a + E_R + \delta$$

$$E_T = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_\circ d} + \frac{Ce^2}{d.M} + \delta$$

E_T: الطاقة الكلية

E_a: طاقة التجاذب

E_R: طاقة التنافر

δ : طاقة لانتقال الالكترون تكون صغيرة جدا

d: المسافة بين الذرات

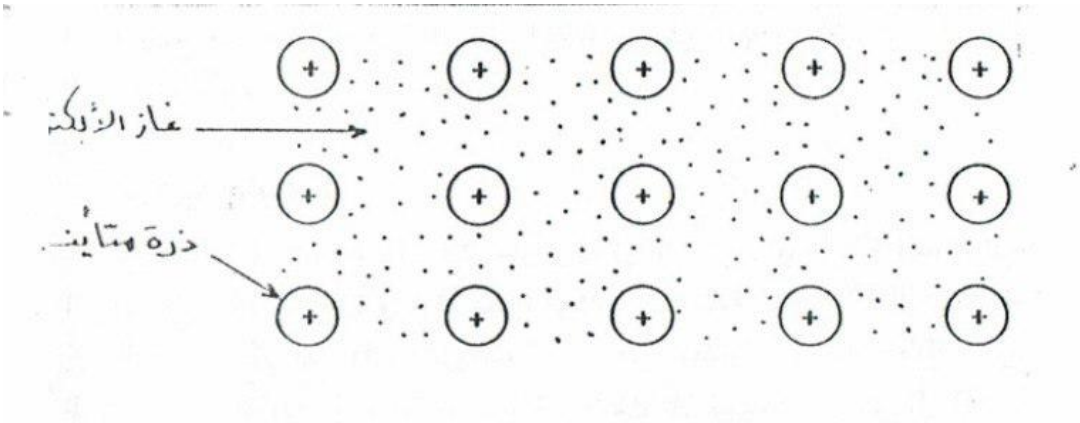
M,C: ثوابت

2. الاصرة التساهمية

في هذه الحالة تشترك الالكترونات في المدار الخارجي للذرات المتجاورة والمكونة للاصرة في مليء مداراتها.فعلى سبيل المثال السيليكون لديه اربعة الكترونات خارجية تساهم مع اربعة ذرات مجاورة لتملأ مدارها وطاقتها بحدود 1eV.

3. الاصرة الفلزية

تحدث الاصرة الفلزية بين عنصرين من الفلزات حيث يحدث بين الذرات المتاينة المغمورة في غاز من الالكترونات الطليقة حيث تتماسك الايونات بقوة التجاذب بينها وبين الالكترونات .يؤدي هذا الى تشكيل روابط كيمائية جديدة بين الذرات في المعادن مما يؤدي الى تشكيل مركب فلزي جديد وتكون مواد موصلة جيدة كهربائيا



الشكل (2) ذرات فلزية متاينة في غاز من الالكترونات الطليقة

4. الاصرة المزدوجة

كما هو في جزيئة الهيدروجين تتكون من ارتباط ذرتين الهيدروجين حيث تتناوب الاصرة لتصبح تساهمية تارة وايونية تارة اخرة ولكن في الاغلب تساهمية وذلك لاحتمال وجود الكترون بين ذرتين.

الانظمة البلورية

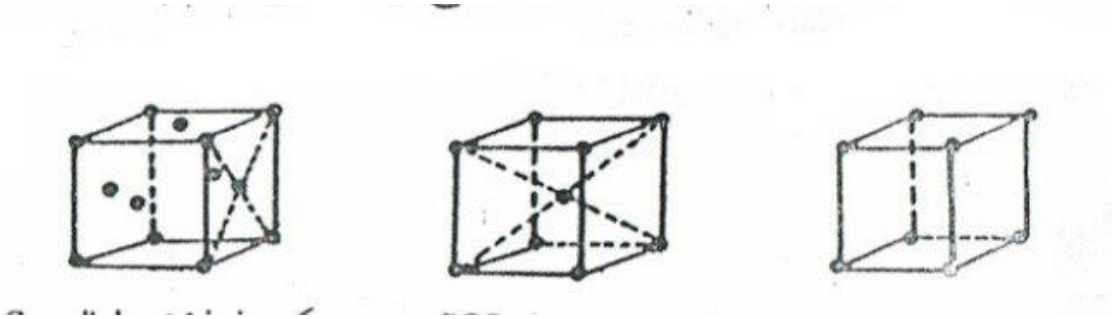
ان المواد التي تنتظم ذراتها بشكل منتظم متناسق في اماكن هندسية تسمى المواد البلورية اما المواد التي لا تنتظم ذراتها قي اماكن هندسية تسمى مواد عشوائية مثل الزجاج و الزيت و الماء .ففي المواد البلورية فعند اجتماع الذرات يمكن تمثيلها بمواقع محددة وبشكل منتظم فتعرف تلك النقاط بالمشبك البلوري (Lattice points) ولكل مجموعة من الذرات وحدة بناء اساسية لبناء البلورة وتسمى الخلية الوحدية (unit cell): وهي اصغر وحدة يمكن الحصول عليها تظهر ارتباطها كل ذرة مع الذرات المجاورة وتكون لها اشكال مختلفة نسبة الى انظمة البلورية ولها ثلاث ابعادوتختلف تلك الابعاد والزوايا حسب النظام البلوري واشكالها كلاتي :

1.نظام المكعب ويكون بثلاثة اشكال

a. المكعب البسيط Simple Cube(SC)

b. المكعب ذو الذرة الوسطية(Body Centered Cubic(BCD

c. المكعب ذو الذرة التي تتوسط الوجوه (Free centered cube(FCC



(c) (b) (a)

الشكل(3) انواع نظام المكعب

2.نظام رباعي الاقطار والزوايا Tetragonal

4.نظام متعامد الاوجةOrthorhombic

5.نظام سداسيالاقطار والزوايا Hexagonal

6. نظام احادي الميل Monoclinic

7. النظام المعيني Rhombohedral

معادلات ملر Miller indices

هي طريقة رياضية وصفية لتوجه المستوى البلوري او مجموعة المستويات البلورية تعتمد هذه الطريقة على ثلاثة ارقام يرمز لها h,k,l التي تسمى بمعاملات ملروتتلخص طريقة تمثيل معادلات ملر بما ياتي

1. نحدد قيم المحاور الثلاثة x,y,z

2. ناخذ مقلوب قيم تلك المحاور

3. نجد قيم جديدة ونضعها داخل قوسين صغيرين من دون وضع اشارة الفارزة بين قيم المعاملات وكالاتي ( ) ليمثل المستوى المرسوم .

ملاحظة : اذا كانت قيمة احدى المحاور سالبة فننقل مركز المكعب الى اتجاة القيمة السالبة.

مثال1 ارسم المستويات الاتية في بلورة مكعبة الشكل

1. (1 0 0)

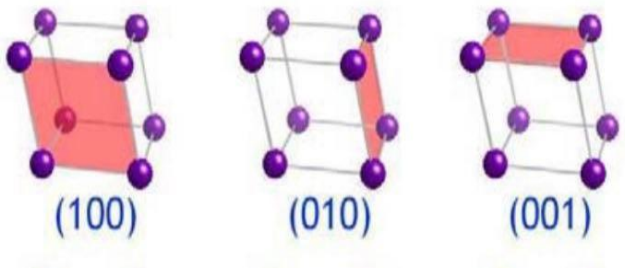
الجواب: معاملات ملر لهذى المستوى هو(∞ ∞ 1)

2.(0 1 0)

الجواب: معاملات ملر لهذى المستوى هو(∞ 1 ∞)

3.(0 0 1)

الجواب: معاملات ملر لهذى المستوى هو(1 ∞ ∞)



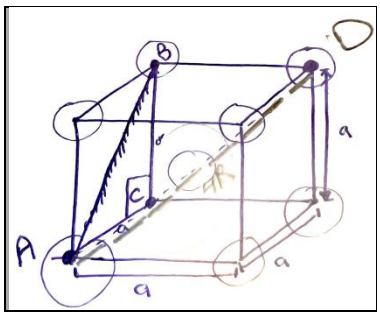
مثال :2 ارسم السطح الذي يقطع الاحداثيات عند النقاط (2,1,3) وكذلك الذي يقطع الاحداثيات (4,2,6)

الحل:

معامل ملر $\frac{1}{4},\frac{1}{2},\frac{1}{6}$ ولكن معامل ملر يجب ان يكون رقم صحيح اذا نأخذ المضاعف المشترك الذي يساوي 12 اذا ملر (3,6,2).

اما بالنسبه للسطح (2,1,3) يوازي السطح السابق وله نفس معاملات ملر

مثال 3 : اوجد مساحة السطح 101 لذرة نوع BCC



ABC

$AB^2 = AC^2 + CB^2$

$AB^2 = a^2 + a^2$

$AB^2 = 2a^2$

$AB = \sqrt{2}\, a$

ABD

$AD^2 = AB^2 + BD^2$

$AD^2 = 2a^2 + a^2$

$AD^2 = 3a^2$

$16r^2 = 3a^2$

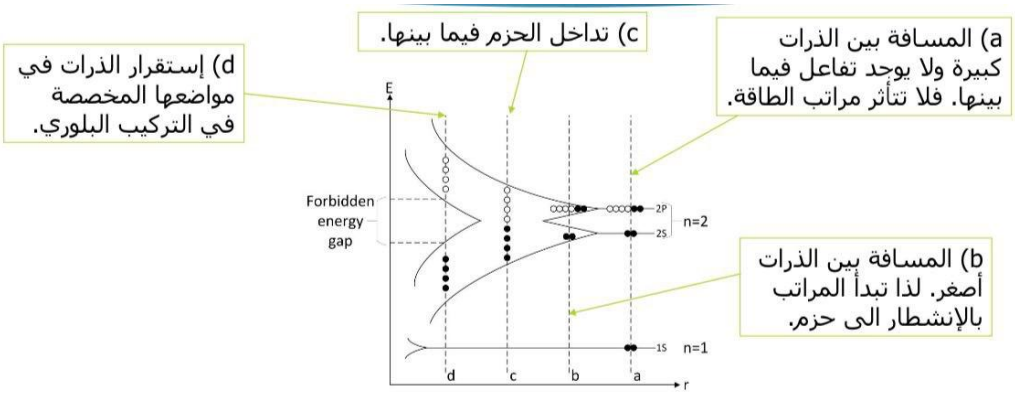
$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$$

انشطار مرتبة الطاقة

ان كل مرتبة طاقة في ذرة ما لها رقم معين وتتسع لالكترون واحد فقط وكذلك بالنسبة لذرة اخرى لها نفس المرتبة الطاقة ونفس الرقم وتحوي الكترون واحد ايضا

وكلما كانت الذرتين بعيدتين عن بعضهما فان كل مرتبتين متماثلين تحتفظان بنفس الرقم .وعند اقتراب الذرتين من بعضهما وعند تكوين اصرة كيمائية فان مرتبة الطاقة المشتركة سوف تنشطر الى مرتبتين بفارق ضئيل في الطاقة.ويحدث هذا الانشطار حيث لايمكن للمرتبة ان تحوي على الالكترونين.

فعلى سبيل المثال التقاء ذرات الكاربون



حزم الطاقة

1.ان حزم الطاقة مفصولة بفجوات خالية من المراتب .

2.تتواجد الالكترونات ضمن حزم الطاقة وتكون الفجوات خالية .

3.ان كل حزمة تكون تابعة لاحد المدارات حول النواة .

4. ان تركيب حزم الطاقة تختلف من مادة الى اخرى وان هذا الاختلاف هو مصدر الفروقات قي الخواص الفيزيائية بين المواد وعلى اساسة يتم تصنيف المواد الى موصلة وعازلة وشبه موصلة .

يعتمد شكل الحزم المتكونة على :

1. موقع المراتب الاولية في الذرة المنفردة

2. عدد الالكترونات في المدار الخارجي

3. المسافة الفاصلة بين الذرات في المركب البلوري.

وبشكل عام فان الكترونات المدار الخارجي تتوزع على حزمتين من المراتب تفصلها فجوة خالية من المراتب .

حزم الطاقة في المواد الموصلة

ان التوصيل الكهربائي في المواد الصلبة يحتاج الى وجود الكترونات مع وجود مراتب شاغرة فبدون الالكترونات لن يكون هناك توصيل وبدون مراتب شاغرة التي يمكن للالكترونات ان تنتقل اليها لن يتحقق التوصيل ايضا.

حيث نلاحظ ان بعض المعادن لها ايصالية عالية يعود ذلك الى ان الحزمة العليا في البناء الحزامي للمعدن مليئة جزئيا بالالكترونات حيث ان الحزمة الواحدة لها اعدادا كبيرة من اللالكترونات والمراتب الشاغرة ويعود الى احد الامرين :

1. يكون المستوى الاصلي قي الذرة المنفردة مليء جزيئا ويبقى كذلك حتى عندما ينشطر الى حزمة .

2. تنشأ حزمة من حزمتين متداخلتين احداهما مليئة والاخرة شاغرة كما في الشكل التالي يمثل حزمة الطاقة للمعدن

حزم الطاقة في المواد العازلة والمواد الشبة موصلة

ان حزم الطاقة في المواد العازلة تتميز بكون حزمة العليا E_c خالية من الالكترونات عندما تكون درجات الحرارة واطئة واما الحزم السفلىE_v فهي مليئة بالالكترونات ولكن لايوجد فيها اي مرتبة شاغرة والالكترونات المتواجدة في هذة الحزمة هي الكترونات المدار الخارجي لهذا سميت بحزمة التكافؤ ولايمكن للالكترونات ان تنتقل في حزمة التكافؤ لانها خالية من المراتب الشاغرة

فلايظهر توصيل كهربائي في الحزمة العليا لانها خالية او تكاد ان تكون خالية من الالكترونات .

وعند رفع درجة حرارة المادة يمكن للالكترونات التكافؤ ان تنتقل الى الحزمة العليا فتساهم بتوصيل الكهربائي ويعتمد عدد الالكترونات المنتقلة الى الاعلى على الفجوة الفاصلة بين الحزمتين E_g

$$E_g = E_c - E_v$$

حيث كلما كانت E_g واسعة قلت الالكترونات المنتقلة بالاضافة ان عدد الالكترونات يعتمد على درجة الحرارة المادة .

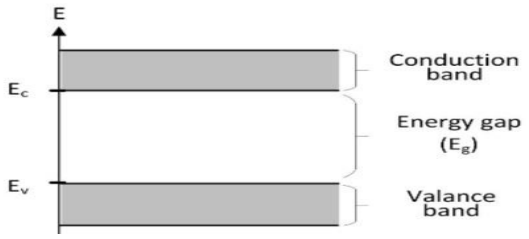
وان الاختلاف بين المواد العازلة والشبة موصلة هو في سعة الفجوة E_gبين الحزمتين وتسمى بطاقة الفجوة (Energy gap) وتقاس بوحدة الكترون فولت (ev)

فتتراوح E_g في المادة العازلة بين 3 الى 10 الكترون فولت فنلاحظ عدد الالكترونات الصاعدة الى الاعلى يكون قليلا عند الدرجات الحرارة الاعتيادية او اذا رفعت درجة الحرارة يودي الى انصهار المادة قبل ان تصبح موصليتها عالية .

موصلية المواد العازلة تقل عن 10^{-12} s/m.

اما E_g في المادة الشبة موصلة 2 الكترون فولت وبذلك تكون الفجوة ضيقة تسمح بانتقال الالكترونات من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل عند الدرجات الحرارة الاعتيادية وتكون موصليتها واطئة عند درجات الحرارة الواطئة وترتفع كلما ارتفعت درجة الحرارة واما عند الصفر مطلق فان جميع الالكترونات تهبط الى حزمة التكافؤ.

ففي الشكل ادناة يظهر حزم الطاقة في المواد العازلة والشبة موصلة



حزم الطاقة في المواد العازلة

حزم الطاقة في المواد الشبةموصلة

توزيع الالكترونات على مراتب الطاقة دالة فيرمي ديراك

لاحظنا ان مراتب الطاقة التي تتوزع في حزم وتبدأ عند ادنى مرتبة في ادنى حزمة صعودا الى حزم التكافؤ ثم الى حزمة التوصيل وتحتل الكترونات المادة هذة المراتب فتبدأ في المراتب الدنيا ثم الاعلى فالاعلى حتى اخر الكترون في المادة وكل مرتبة تاخذ الكترون واحد .

ان اعلى سلم في الطاقة تتوزع فية الكترونات المدار الخارجي في الذرة المنفردة بين حزمتي التكافؤ والتوصيل وان مايهمنا هو معرفة عدد الالكترونات عند الحافة السفلى لحزمة التوصيل وعدد المراتب الشاغرة عند الحافة العليا لحزمة التكافؤ.

تصف دالة فيرمي ديراك (Fermi Dirac Function) احتمالية ملء مرتبة طاقة معينة من قبل الالكترون تعتمد على درجة الحرارة المطلقة T وموقع المرتبة في سلم الطاقة .

ويمكن التعبير عنها رياضيا بالمعادلة الاتية

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{K_T}\right)}$$

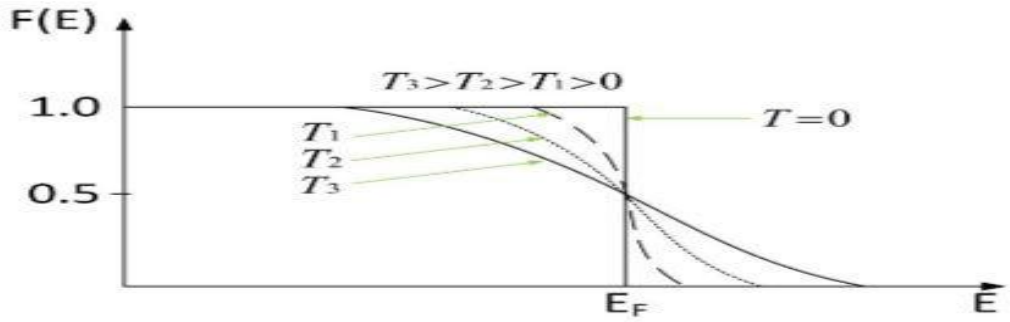
$F(E)$: احتمال وجود الكترون في المرتبة ذات الطاقة E.

E_F : يمثل المستوى يؤخذ كمرجع في تحديد موقع المراتب ويسمى بمستوى فيرمي

T : درجة الحرارة المطلقة

K : ثابت بولتزمان

ويبين الشكل التالي المنحني الذي يصف هذه الدالة



احتمالية وجود الكترون في مستوى طاقة اعلى من(E_F)عند الصفر المطلق هي صفر. اما عند اي درجة حرارة اي اكبر من الصفر هي 0.5

بذلك فان الالكترونات تقع تحت E_F وجميع المراتب فوق E_F تكون خالية وكلما ارتفعت درجة الحرارة تزدهد احتمالية اشغال المرلتب فوق E_F وان المراتب التي تكون بعيدة عن E_F تكون احتمالية اشغالها بالالكترون اقل .

ويمكن تقريب دالة للمراتب التي تعلوE_F

$$F(E)\approx \exp\left[-\frac{E-E_F}{K_T}\right]$$

ويمكن تقريب دالة للمراتب التي تحتE_F

$$F(E)\approx 1-\exp\left[1-exp\left[\frac{E-E_F}{K_T}\right]\right]$$

وان قيمة($E-E_F$) تكون سالبة في هذة الحالة

$(1-F(E))$ تمثل احتمالية خلو المرتبة من الالكترون وبينما $F(E)$ تمثل احتمالية اشغال المرتبة من الالكترون.

مثال1

ما احتمالية اشغال مرتبة تقع على بعد 0.1eV فوق منسوب فيرمي عند درجة حرارة 27^0C وما نسبة الخطا باستخدام المعادلة التقريبية بدلا من المعادلة الفعلية؟

الحل

احتمالية اشغال مرتبة على بعد $E\text{-}E_F$ من منسوب فيرمي هي:

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp(\frac{E - E_F}{kT})}$$

$$T = 273 + 27 = 300\ ^0K$$

$$E - E_F = 0.1eV$$

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{0.1}{300 \times \frac{1}{11600}}\right)} = 0.0204$$

$$F(E) \cong \left[\exp - \left(\frac{0.1}{300 \times \frac{1}{11600}}\right)\right] = 0.0209$$

الفرق بين القيمتين 0.0005 وتمثل 2.5% من قيمة F(E)

مثال 2

اذا كانت احتمالية اشغال مرتبة بالكترون عند 120^0C تساوي 2×10^{-6} فاين موقع هذه المرتبة بالنسبة الى منسوب فيرمي؟

الحل

ان صغر قيمة الاحتمالية اقل من 1% مؤشر الى كون $E\text{-}E_F >> KT$

$$F(E) \cong \left[\exp - \left(\frac{E - E_F}{kT}\right)\right]$$

$$T = 273 + 120 = 393\ ^0K$$

$$F(E) = 2 \times 10^{-6}$$

$$2 \times 10^{-6} = exp\left[-\frac{E-E_F}{393 \times \frac{1}{11600}}\right]$$

$$E\text{-}E_F = 0.444\ eV$$

LECTURE NO.2

اشباه الموصلات (Semicoductors)

مقدمة عن اشباه الموصلات

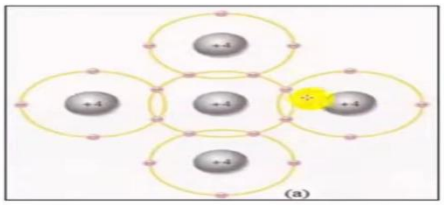
تنقسم المواد من حيث التوصيل الكهربائي الى (موصلة , عازلة , شبة موصلة) اعتمادا على الالكترونات في المدار الاخير (الكترونات التكافؤ) فاذا كانت هذه الالكترونات حرة وتستطيع الانتقال من ذرتها الاصلية الى ذرة اخرى فان المادة تكون موصلة جيده للكهرباء واذا ارتباط الالكترونات مع النواة ومن صعب ان تترك مكانها فتكون المادة عازلة للكهرباء .وهناك مواد لايمكن تصنيفها مع الموصلات (لانها رديئة التوصيل)ولا مع العوازل لانه يمكن تنشيطها وتصبح موصلة تحت ظروف معينة مثل ارتفاع درجة الحرارة او اضافة بعض الشوائب مثل هذة المواد تسمى اشباه الموصلات مثل عنصري السيليكون وجرمانيوم .

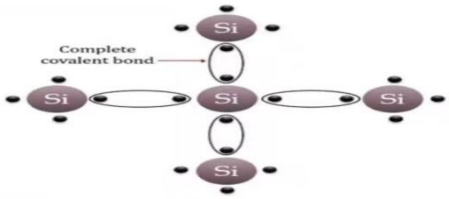
حيث ان مقاومة الكهربائية لاشباه الموصلات في درجة حرارة الغرفة تتراوح مابين (10^{-2} 10الى 10^{9})اوم سنتمتر وللبلورة النقية وعند درجة الحرارة الصفر مطلقة تكون عازلة

الجرمانيوم والسيلكون

تستخدم غالبا في صناعة الترانزستور حيث العدد الذري لذرة Ge هو 32 اي تحتوي اربع الكترونات التكافو في مدارها الرابع اما العدد الذري لذرة Si هو 14 اي تحتوي اربع الكترونات التكافو في مدارها الثالث ويودي الى ارتباط ذرة Ge مع اربع ذرات مجاورة لتكون الرابطة التساهمية فيما بينها ويشترك كل الكترون من الكترونات التكافؤ لذرة مع الكترونات التكافؤ لذرة المجاورة فيمتلئ مدارها الخارجي

ويصبح اكثر استقرارا ونفس الحالة لذرة Si كما هو موضح بالشكل الاتي





وعند وصول عنصري الجرمانيوم والسيلكون الى حالة الاستقرار تصبح (عازلين جيدين للكهرباء) عند درجة الحرارة الصفر المطلق ولكن عند ارتفاع درجة الحرارة اي منهما فانه يودي ذلك الى اهتزازالذرات وهذا الاهتزاز يودي الى كسر الاصرة الرابطة بين الذرات ليصبح الالكترون حرا فتتحول المادة الى مادة موصلة وعندما يتحرك الالكترون وهو سالب الشحنة من مكانة سيترك مكانة فراغا يسمى هذا الفراغ بالثقب (Hole) وتكون شحنة موجبة وان الكترون والفجوة لهما اهمية في نقل التيار الكهربي ويسمى كليهما بحاملات الشحنة(charge carriers)

وعدد الالكترونات المتحرر في كل متر مكعب من المادة بالرمز n

وعدد الثقوب التي تتركها هذة الالكترونات في حزمة التكافؤ في كل متر مكعب من المادة بالرمز p

$n=p$

ان الموصلية, لمواد اشباة يرمز لها σ وتتراوح من (10^{-8} الى 10^{3})s/cm

اما المقاومية فيرمز لها ρ

$$\rho = 1/\sigma$$

لاشباة الموصلات النقية

اشباة الموصلات النقية وهي خالية من الشوائب مثل السيلكون والجرمانيوم حيث عند ارتفاع درجة الحرارة تنتقل الالكترونات الى حزمة التوصيل ويخلف عنها مايساويها

في حزمة التكافؤ فان تركيز الالكترونات (n) في حزمة التوصيل يساوي تركيز الثقوب(p) في حزمة التكافؤ وتتولد الالكترونات والثقوب على هيئة ازواج عبر نطاق الفجوة ويرمز لتركيز الحوامل (الالكترونات والثقوب) لاشباة الموصلات النقية بالرمز n_i

$$n=p=n_i$$

$$n=N_c \exp[-(E_c - E_i)/KT]$$

$$P=N_v \exp[-(E_i - E_v)/KT]$$

$$N_c = [\frac{2\pi m^*_{nKT}}{h^2}]^{3/2}$$

$$N_v=[\frac{2\pi m^*_{pKT}}{h^2}]^{3/2}$$

$$n_i = n.p$$

$$n_i^2 = Nc \exp\left[-\frac{(Ec - Ei)}{KT}\right]. N_v \exp\left[-\frac{(Ei - Ev)}{KT}\right]$$

$$n_i^2 = Nc\, N_v \exp\left[\frac{-Ec+Ev)}{KT}\right]$$

$$n_i=\sqrt{Nc\, Nv} \exp\left[\frac{-Ec+Ev)}{2KT}\right] \qquad E_g=E_c - E_V$$

$$n_i=\sqrt{NcNv} \exp[-(E_g)/2KT]$$

E_c بداية طاقة شريط التوصيل ,

E_i مستوى فيرمي لاشباة الموصلات النقية,

N_c الكثافة الفعالة في شريط التوصيل,

N_V الكثافة الفعالة في شريط التكافؤ ,

m_n^* الكتلة الفعالة للالكترون

m_p^* الكتلة الفعالة للثقب

E_g طاقة الفجوة

مثال احسب عددالثقوب لبلورة السيلكون النقية اذا علمت ان عدد الالكترونات تساوي $9*10^5$

الجواب يساوي عدد الالكترونات لانه نقي

مثال ماهيه التغيرات التي تحدث لعدد الالكترونات والثقوب اذا رفعنا درجة الحرارة

الجواب تزداد عدد الالكترونات والثقوب

مثال اوجد كثافة الالكترون في حزمة التوصيل اذا علمت درجة الحرارة (300k) $N_C(300k)2.8*10^{29}cm^{-3}$ هو E_i اسفل E_c 0.25ev

الجواب

$$n=N_c \exp[-(E_c - E_i)/ KT]$$

$$n=2.8*10^{29} .\exp[-0.25/0.0259]=1.8*10^{15}\ cm^{-3}$$

مثال اوجد كثافة الثقوب في حزمة التكافؤ عند درجة الحرارة T=400K ,

$E_i,N_v(300k)=1.04*10^{19}\ cm^{-3}$ هو 0.27ev اسفل E_v

الجواب

$$P=N_v e[-(E_i - E_v)/KT]$$

$$\frac{N_{V(400)}}{N_{V(300)}} = (\frac{400}{300})^{3/2}$$

$$N_{V(400)} = 1.04 * 10^{19} * (\frac{400}{300})^{\frac{3}{2}} = 1.6 * 10^{19}\ cm^{-3}$$

$$P=N_v e[-(E_i - E_v)/KT]$$

$$P=1.6 * 10^{19}.\exp(\frac{-0.27}{0.0345}) =6.43* 10^{15}\ cm^{-3}$$