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.

توجد المادة في الطبيعة على هيئة غاز او سائل او صلب.

1. 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.

2. 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..

3. 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.

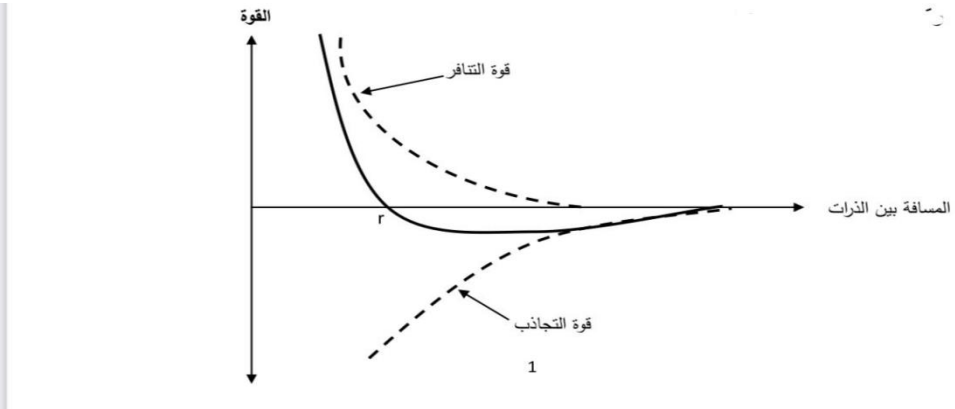
الاواصر وانواعها

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

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

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

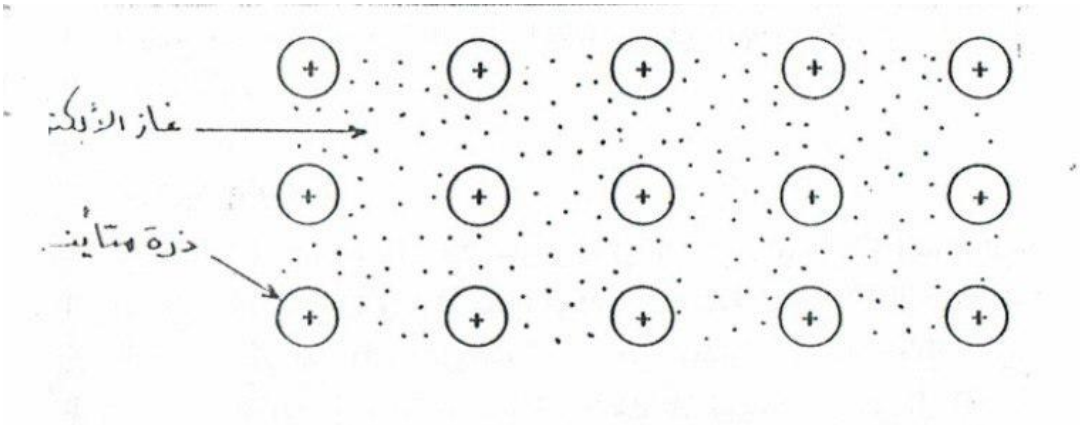
E_T: الطاقة الكلية E_a: طاقة التجاذب E_R: طاقة التنافر δ : طاقة لانتقال الالكترون تكون صغيرة جدا d : المسافة بين الذرات M,C: ثوابت

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

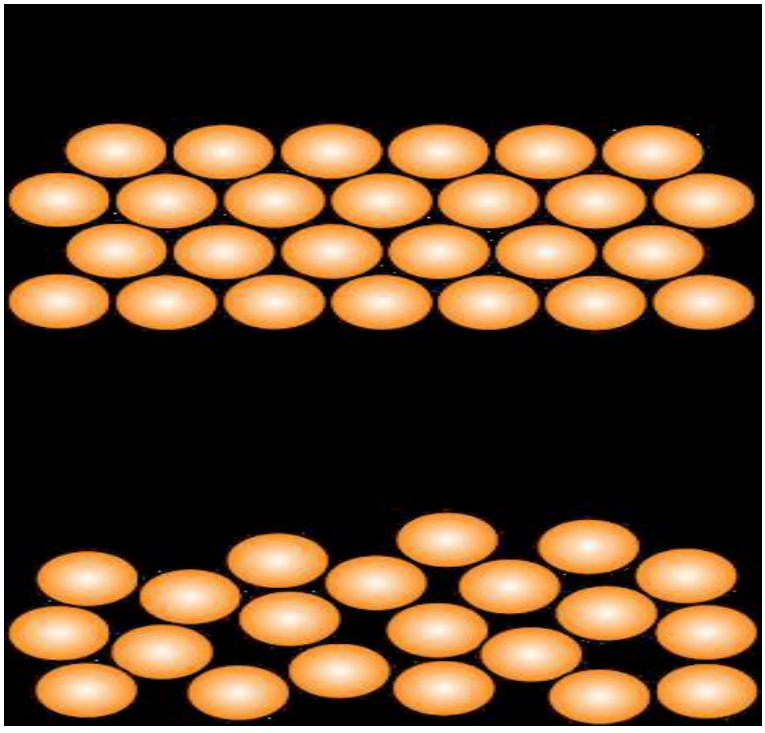
4. الاصرة المزدوجة

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

1.المواد البلورية : وهي مواد التي يكون ترتيب ذراتها او ايوناتها او جزيئات بشكل منتظم ودوري مثل ملح الطعام والكبريت والفلزات مثل النحاس وتمتاز المواد الصلبة البلورية بأن درجة تجمدها ثابتة لأنها تمتاز بالإنتظام والترتيب في شكلها البلوري .

2. الموا د العشوائية : تكون جزيئاتها او ذراتها لاتمتلك ترتيبا معينا في تركيبها.
مثل الزجاج و الزيت و الماء



الشكل يوضح المواد البلورية و المواد العشوائيه

وان وحدة بناء البلورة هي وحدة الخليه : وهي اصغر جزء في البلورة يحمل صفاتها ويمكن بتكرارها توليد البلورة .

التراكيب الأساسية للبلورة

1. نصف قطر الذرة r هو المسافة بين مركز الذرة والغلاف الخارجي

2. المسافة بين مركزي اقرب ذرتين متجاورتين هو 2r

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).

في هذا التركيب يوجد ثمان ذرات في اركان المكعب

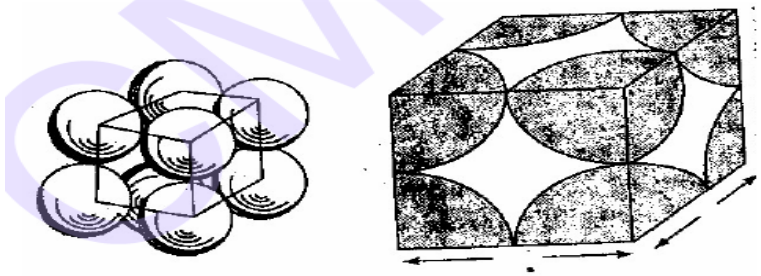


Fig. Simple Cubic Structure

b.المكعب ذو الذرة الوسطية Body Centered Cubic(BCC)

في هذا التركيب يوجد ذرة في وسط المكعب وثمان ذرات في اركان المكعب حيث ان ذرة المركز تمس جميع ذرات الموجوده في الاركان

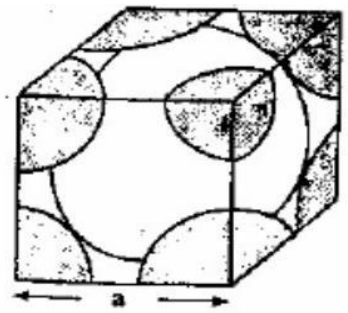


Fig. Body Centered Cubic

c. المكعب ذو الذرة التي تتوسط الوجوه (FCC)▪ Free centered cube في هذا التركيب يوجد الى ثمان ذرات في اركان المكعب بالاضافة يوجد ذرة واحده في مركز كل وجه من اوجه المكعب الستة

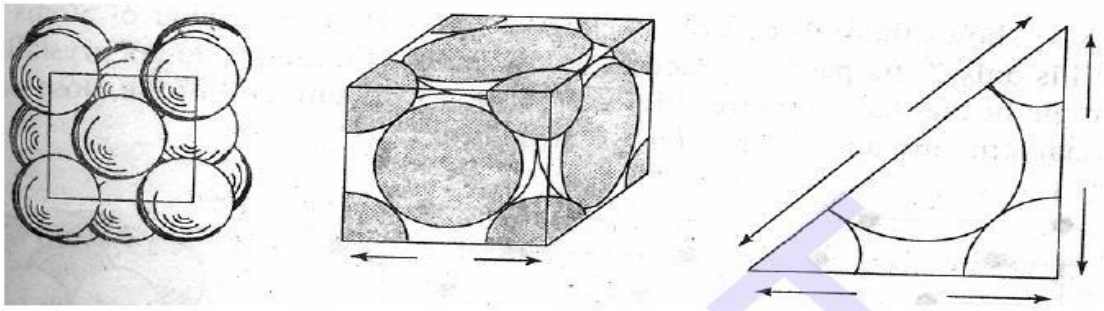


Fig. Face Centered Cubic Structure

2.نظام رباعي الاقطار والزوايا Tetragonal

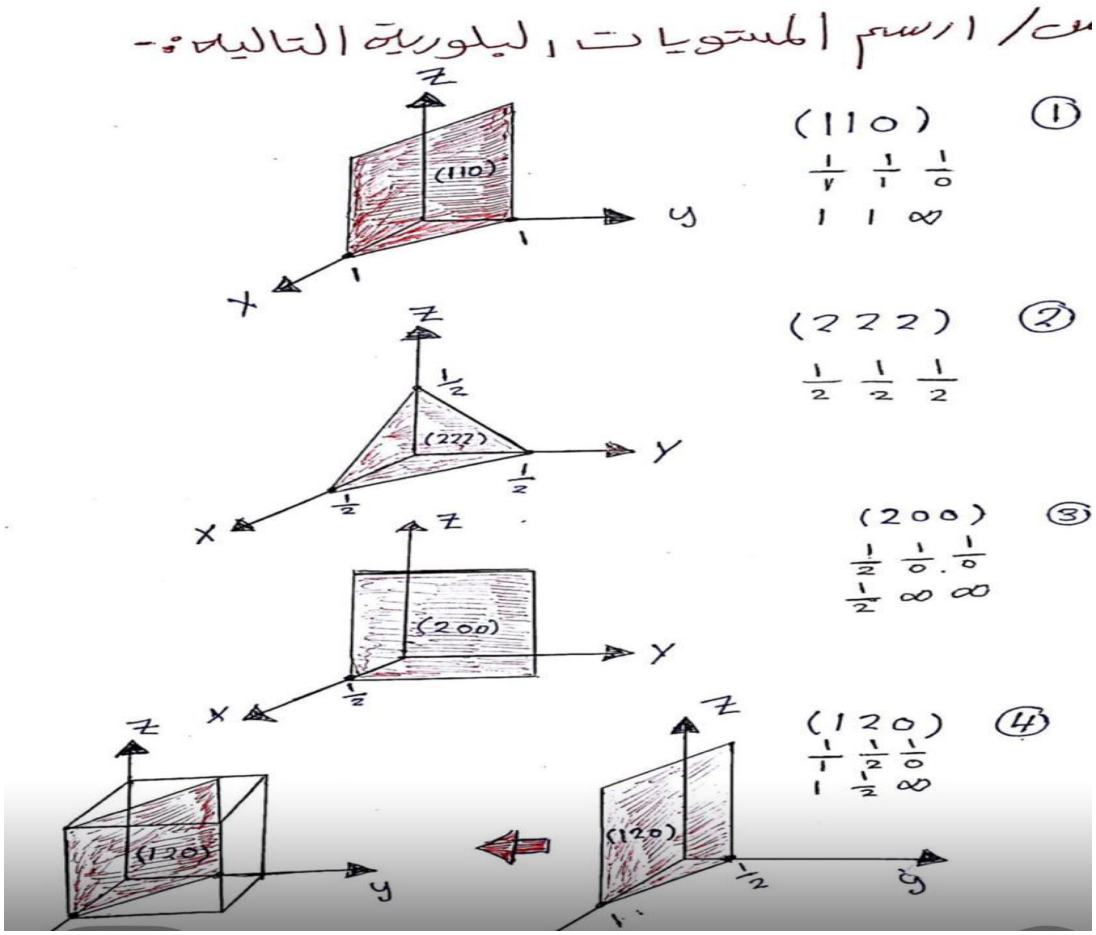
4.نظام متعامد الاوجةOrthorhombic

5.نظام سداسيالاقطار والزوايا Hexagonal

6. نظام احادي الميل Monoclinic

7. النظام المعيني Rhombohedral

رسم المستويات البلورية



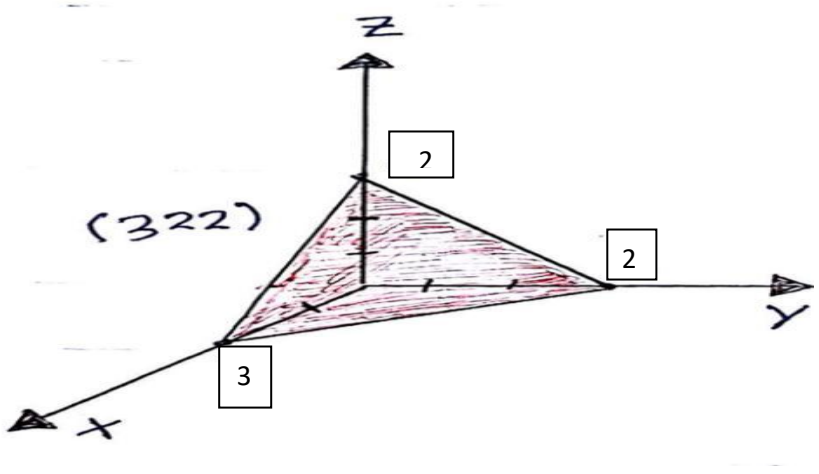
معادلات ميلر Miller indices

يمكن وصف المستويات البلورية بواسطة مجموعة من الادلة العددية وضعها العالم الانجيلزي ميلر يمكن تعريف الادلة ميلر تعتمد بانها مجموعة مكونة من ثلاثة ارقام تصف مكان واتجاه المستوى في البلورة هذه الطريقة على ثلاثة ارقام يرمز لها h,k,l طريقة تمثيل معادلات ملر بما ياتي

مثال جد معاملات ملر للمستوى البلوري (2,3,3)

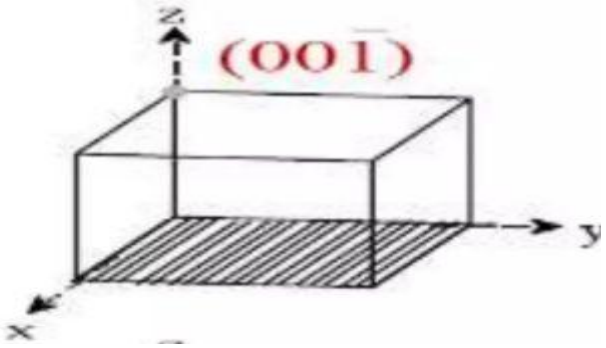
الحل: x=2 ,y=3,z=3

	z	y	x
التقاطع	3	3	2
المقلوب	1/3	1/3	1/2
المضاعف المشترك	6		
معامل ميلر	(6*1/ 3) =2	(6*1/ 3) =2	(6*1/2) =3
المستوي	(2 2 3)		

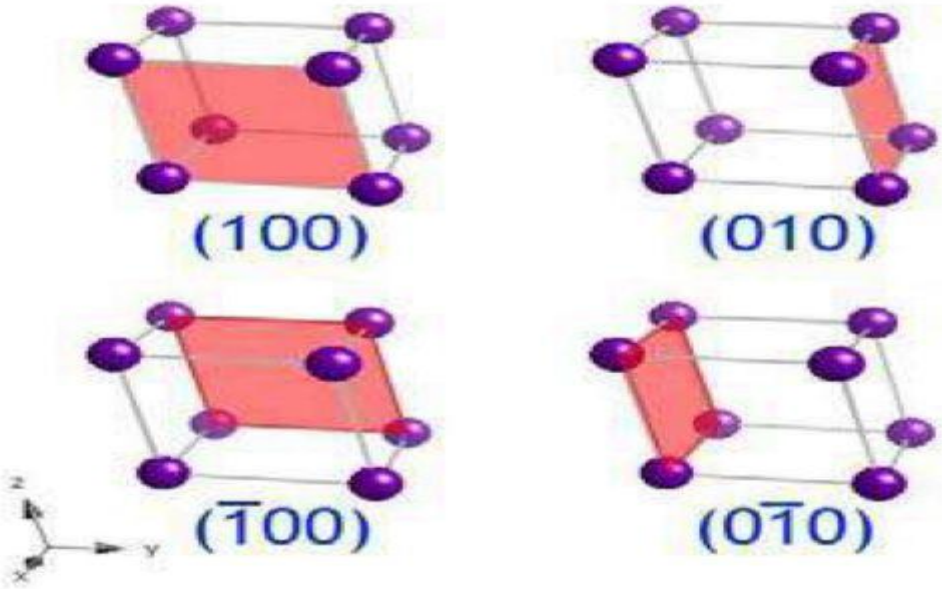


مثال جد معاملات ملر للمستوى البلوري($\bar{1}$ 0 0)

	z	y	x
التقاطع	$\bar{1}$	0	0
المقلوب	$\bar{1}$	∞	∞
معامل ميلر	$\bar{1}$	0	0



ملاحظة اذا كان قيمة احدى المحاور بالسالب فننقل مركز المكعب الى اتجاه القيمة السالبه كما في الشكل الموضح



حزم الطاقة

ان من اهم الخصائص الاساسية للجسم الصلب هي حزم الطاقة التي تشكلت بعد اتساع مستويات الطاقة المنفردة .

ان الصفات الكهربية للمواد الصلبة تتحدد بتركيب حزم طاقتها ومدى انشغالها بالالكترونات

حزمة التوصيل : هي اعلى حزمة للطاقة في الذرة وهي المسؤولة عن توصيل او عدم توصيل للتيار الكهربائي.

حزمة التكافؤ : وهي حزمة تقع تحت حزمة التوصيل

فجوة الطاقة : وهي فراغ (الفاصل) بين حزمتي التوصيل والتكافؤ

ان كل حزمة تكون تابعة لاحد المدارات حول النواة .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 .

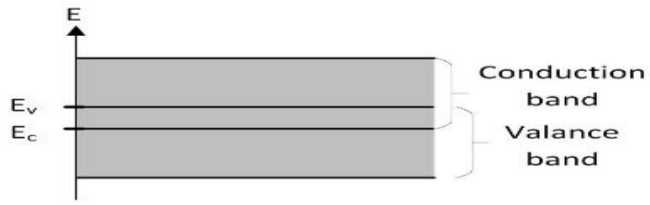
يعتمد شكل الحزم المتكونة على :

1. عدد الالكترونات في المدار الخارجي
2. المسافة الفاصلة بين الذرات في المركب البلوري.

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 للمعدن مليئة جزئيا بالالكترونات حيث ان الحزمة الواحدة لها اعدادا كبيرة من اللالكترونات والمراتب الشاغرة .



حزم الطاقة في المواد العازلة والمواد الشبة موصلة

ان حزم الطاقة في المواد العازلة تتميز بكون حزمة العليا (حزمة التوصيل)E_c خالية من الالكترونات عندما تكون درجات الحرارة واطئة واما الحزم السفلى (حزمة التكافؤ)E_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

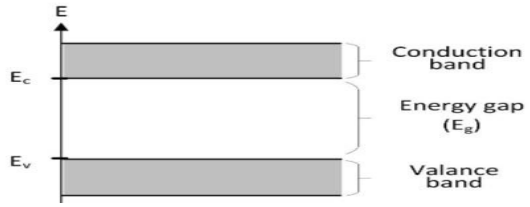
$$E_g = E_c - E_v$$

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_g بين الحزمتين وتسمى بطاقة الفجوة (Energy gap) وتقاس بوحدة الكترون فولت (ev)

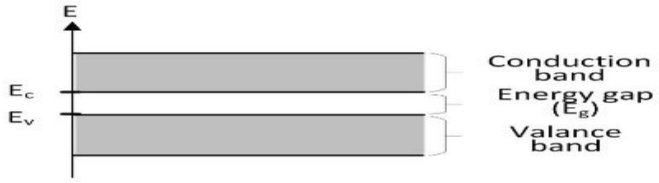
فتتراوح E_g في المادة العازلة بين 3 الى 10 الكترون فولت فنلاحظ عدد الالكترونات الصاعدة الى الاعلى يكون قليلا عند الدرجات الحرارة الاعتيادية او اذا رفعت درجة الحرارة يودي الى انصهار المادة قبل ان تصبح موصليتها عالية .

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



الشكل يوضح حزم الطاقة في المواد العازلة

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.



الشكل يوضح حزم الطاقة في المواد الشبه موصلة

مستوى فيرمي (Fermi level) ان احتمالية $F(E)$ اي الكترون للتواجد في مستوى معين من الطاقة (E) في حالة الاتزان الحراري في درجة الحرارة المطلقة T تعطى بدلالة دالة فيرمي ديراك .

ويمكن التعبير عنها رياضيا بالمعادلة الاتية

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

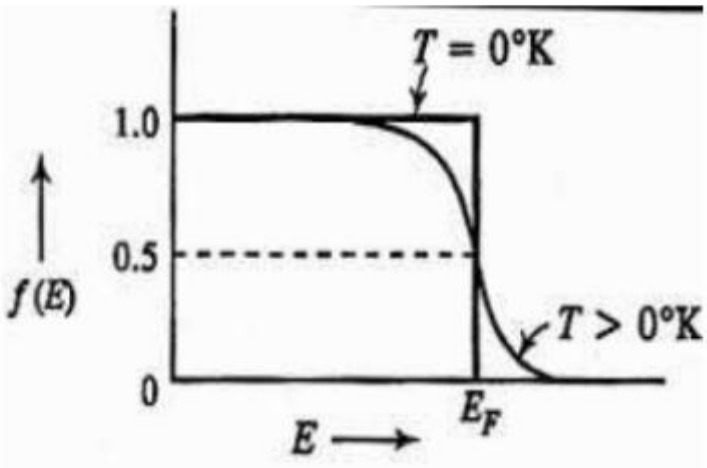
$F(E)$:.هي دالة فيرمي تعتمد على طبيعة المادة ودرجة الحرارة

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

T : درجة الحرارة المطلقة

K : ثابت بولتزمان ($K = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K)

ويبين الشكل التالي المنحني الذي يصف هذه الدالة



عندما تكون T=0K

1. ($E > E_F$) , $\exp\left(\frac{E-E_F}{K_T}\right) = \infty$

$$F(E) = \frac{1}{1+\infty} = \frac{1}{\infty} = 0$$

مستوى الطاقة الاعلى من طاقة فيرمي تكون فارغة تماما

2. ($E<E_F$), $\exp\left(\frac{E-E_F}{K_T}\right) = 0$

$$F(E) = \frac{1}{1+0} = \frac{1}{1} = 1$$

مستوى الطاقة الاقل من طاقة فيرمي تكونمملؤة تماما

3. T>0K ($E=E_F$), $\exp\left(\frac{0}{K_T}\right) = 1$

$$F(E) = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}$$

ان مستوى فيرمي مساوي لمستوى الطاقة تكون احتمالية اشغالة بالكترون مساوي %50

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 $E-E_F$ من منسوب فيرمي هي:

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

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

.

$$E - E_F = 0.1eV$$

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

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

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

مثال 2

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

الحل

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

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

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

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

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

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

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} الى 10^{9})اوم سنتمتر وللبلورة النقية وعند درجة الحرارة الصفر مطلقة تكون عازلة

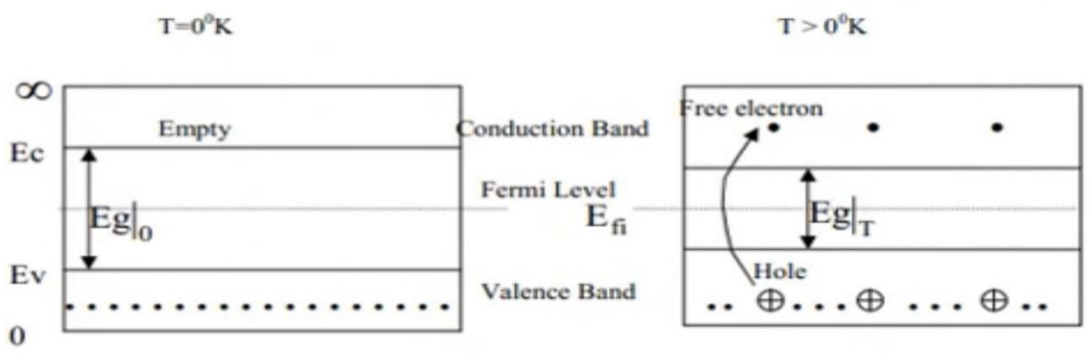
الجرمانيوم والسيلكون: من اكثر اشباه الموصلات انتشارا ويعد السليكون اكثر استخدما من الجرمانيوم لانه ارخص وموجود بكثرة وتظهر خصائصة افضل في درجة حرارة الغرفة

ويصل كل من عنصري الجرمانيوم والسيلكون الى حالة الاستقرار بعد تكوين اواصر تساهمية ويكونا (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 بالفجوات (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



الشكل يوضح تاثير درجة الحرارة على الشبه الموصل

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

اما المقاومه النوعيه(resistivity) فيرمز لها ρ ووحداتها (اوم . متر)(Ω.m)

$$\rho = 1/\sigma$$

ملاحظة تزداد التوصلية وتقل المقاومة عند زيادة درجة الحرارة

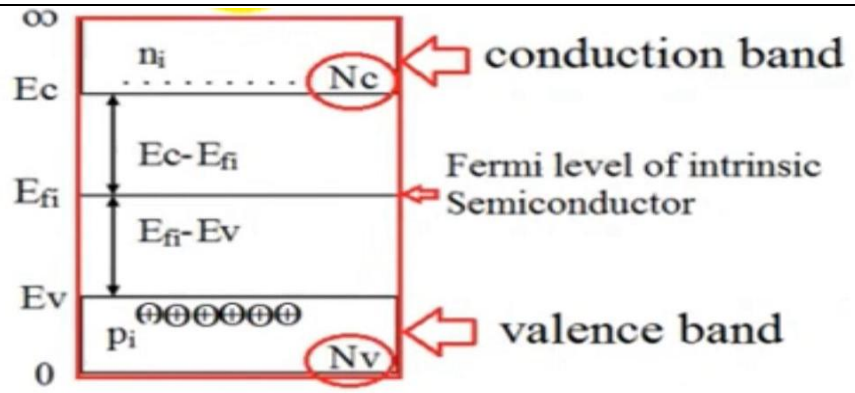
لاشباة الموصلات النقية

اشباة الموصلات النقية وهي خالية من الشوائب مثل السيلكون والجرمانيوم حيث عند ارتفاع درجة الحرارة تنتقل الالكترونات من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل وتترك مكانها مايساويها من الفجوات في حزمة التكافؤ فان عدد الالكترونات

(negative charge) في حزمة التوصيل يساوي عدد الفجوات(positive charge) في حزمة التكافؤ فيكون لدينا نوعين من حاملات الشحن هي الالكترونات والفجوات

ni : تمثل تركيز الالكترونات لشبه الموصل النقي وحدتها($electron/m^3$)

Pi: تمثل تركيز الفجوات لشبه الموصل النقي وحدتها ($hole/m^3$)



الشكل يوضح مخطط الطاقة لاشباه الموصلات النقية

$$ni=N_c \exp[-\left(\frac{(Ec- Ef)}{KT}\right)]$$

(Ec– Efi):تمثل المسافة بين حزمة التوصيل ومستوى فيرمي وحدتها (ev)

k:ثابت بولتزمان = 10^{-5} * 8.62 ev /k

N_c :تمثل الكثافة الفعالة في حزمة التوصيل ويمكن حسابها وفق العلاقة الاتية

$$Nc = 4.82 * 10^{21}(\frac{m_n^*}{m})^{\frac{3}{2}} T^{\frac{1}{2}} \quad state/m^3$$

$$if \quad m_p^* = m_n^* = m$$

$$Nc = 4.82 * 10^{21}\ T^{\frac{1}{2}} \quad state/m^3$$

$$N_c = \frac{4\sqrt{2}}{h^3}\ (2\pi\ m^*_{n\ KT})^{\frac{3}{2}}$$

$$Pi = N_v \exp[-(\frac{(Ef - Ev)}{KT})\ ]$$

$(Efi - Ev)$:تمثل المسافة بين حزمة التكافؤ ومستوى فيرمي وحدتها (ev)

N_v : تمثل الكثافة الفعالة في حزمة التكافؤ ويمكن حسابها وفق العلاقة الاتية

$$Nv = 4.82 * 10^{21}(\frac{m^*_p}{m})^{\frac{3}{2}}\ T^{\frac{1}{2}} \quad state/m^3$$

$$if \quad m^*_p = m^*_p = m$$

$$Nv = 4.82 * 10^{21}\ T^{\frac{1}{2}} \quad state/m^3$$

$$N_v = \frac{4\sqrt{2}}{h^3}\ (2\pi\ m^*_{p\ KT})^{\frac{3}{2}}$$

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

$$ni = pi = \sqrt{NcNv}\ \exp[-\frac{(Eg)}{2KT}]$$

$$Eg = 0.785 - 2.32\times10^{-4}\ T(ev) \qquad \text{for Ge}$$

$$Eg = 1.21 - 3.6\times10^{-4}\ T(ev) \qquad \text{for Si}$$

ملاحظة عندما يكون مكان مستوى فيرمي لاشباة الموصلات النقية على مخطط شريط الطاقة في منتصف لطاقة الفجوة يمكن حسابة بالعلاقة الاتية

$$Efi = \frac{Ec + Ev}{2} \qquad \text{if } Nc = Nv,\ m^*_p = m^*_n$$

مثال احسب عددالفجوات 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 والفجوات اذا رفعنا درجة الحرارة

الجواب تزداد عدد الالكترونات والفجوات

مثال اوجد تركيز الالكترون في حزمة التوصيل لسيليكون نقي اذا علمت درجة الحرارة (300k) $N_C(300k)=2.8*10^{29}cm^{-3}$ مستوى فيرمي هو 0.25ev تحت حزمة التوصيل اي $(Ec - Ef) =0.25ev$)

الجواب

$n=N_c \exp[-(^{Ec} - ^{Ef})/ KT]=$

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

مثال اوجد تركيز الفجوات في حزمة التكافؤ عند درجة الحرارة T=400K ,

$(^{Efi} - ^{Ev})=0.27\ ev, N_v(300k)=1.04*10^{19}\ cm^{-3}$

الجواب

$P=N_v \exp[-(^{Efi} - ^{Ev})/^{KT}]$

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

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

$P=N_v \exp[-(^{Efi} - ^{Ev})/^{KT}]$

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

ملاحظه في حالة عدم اعطاء الكتل الفعاله نفرض ان قيمها متساوية

$$\boxed{m_p^* = m_n^* = m}$$

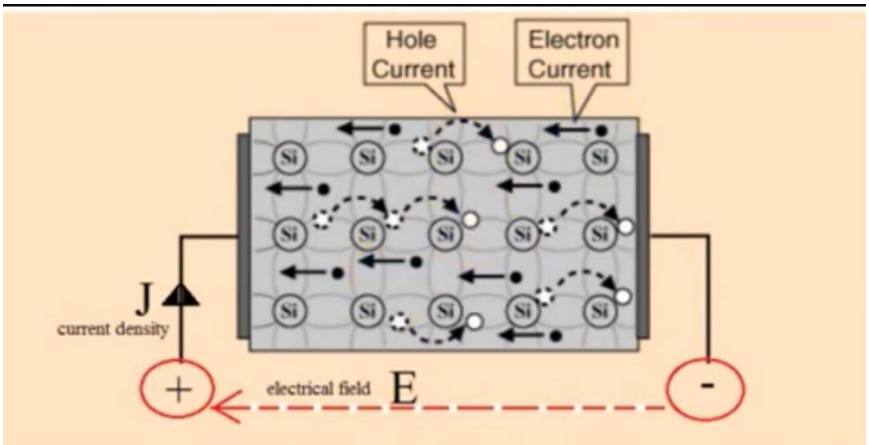
نستخدم القانون الاتي لحساب تركيز الفجوات او تركيز الالكترونات للاشباه الموصلة النقية

$$ni = pi = \sqrt{NcNv}\ \exp[-\frac{(Eg)}{2KT}]$$

ماذا يحدث عند تسليط مجال كهربائي على اشباه الموصلات النقيه؟

الجواب : ان الفجوات والالكترونات ستتحرك باتجاهين مختلفين لان شحناتهما متعاكسه الالكترونات تتحرك من السالب الى الموجب اما الفجوات ستتحرك من الموجب الى السالب فيتولد لدينا نوعان من التيار (تيار الالكترونات وتيار الفجوات)

كما موضح في الشكل



سرعة الانجراف للالكترون يرمز له ($vd(electron)$)

$$vd(electron) = \mu_n E$$

سرعة الانجراف للفجوات يرمز له ($vd(hole)$)

$$vd(hole) = \mu_p \mathrm{E}$$

μ_n : معامل انتقال الالكترون

μ_p : معامل انتقال الفجوات , E المجال الكهربائي

وكلا (μ_n & μ_p)تتغير مع تغير درجة الحراره ويمكن حسابها حسب العلاقة الرياضيه

$$\mu_n = D_n \times \frac{11600}{T}$$

$$\mu_P = D_P \times \frac{11600}{T}$$

D_P : ثابت الانتشار للفجوات , D_n: ثابت الانتشار للالكترون وتعطى بالسؤال والعلاقة الرياضيه اعلاه توضح العلاقة بين معامل الانتقال ومعامل الانتشار

كثافة التيار يمكن حسابه Jيرمز

$$J_{electron} = ne\mu_n E$$

$$J_{hole} = p(-e)\mu_p E$$

n كمية الالكترونات , e شحنة الالكترون , p كمية الفجوات , $(-e)$ شحنة الفجوات وتكون معاكسة لشحنة الالكترون

كثافة التيار الكلي يساوي

يمكن حساب التوصلية لاشباه الموصلات

اشباه الموصلات النقية تكون

ni=pi

ويمكن حساب المقاومية لاشباه الموصلات

اشباه الموصلات المشابة Doping semiconductors

يمكن تنشيط المواد الشبه موصلة النقية من خلال تعرضها درجة حرارة مرتفعة حيث يودي ذلك الى اضعاف الترابط التساهمي بين الذرات مما يجعل الالكترونات (حوامل الشحنة السالبة) تنتقل من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل متجاوزه حزمة الفجوة مخلفة بعدها الفجوات التي تكون مساوية لها في المقدار(حوامل الشحنة الموجبة) كيف يمكن جعل عدد الالكترونات اكبر من عدد الفجوات او بالعكس

يتم ذلك بتنشيط المواد الشبة الموصلة باضافة شوائب (doping materials بنسب معينة حيث يضاف ذرة واحدة من الشوائب الى 10^6 ذرة من المادة المضيفة من السيلكون اوجرمانيوم يسمى هذا اشباة الموصلات الخارجية Extrinsic semiconductors

التشويب المواد الشبة الموصلة :هي اضافة كمية ضئيلة من الشوائب (impurity) الى اشباة الموصلات لزيادة تركيز حاملات الشحنة (الكترونات اوالفجوات)

ولدينا نوعين من الشوائب

- تضاف الشوائب الثلاثية التكافؤ تسمى (accepter) الى اشباه الموصلات النقية ينتج لنا اشباه الموصلات من نوع P type الغرض من هذة العملية زيادة عدد الفجوات (حوامل الشحنة الموجبة)

$p_p \gg n_p$

يرمز لهذه الشوائب برمز N_A

- تضاف الشوائب الخماسية التكافؤ تسمى (donor) الى اشباه الموصلات النقية

ينتج لنا اشباه الموصلات من نوع N type الغرض من هذة العملية زيادة عدد الالكترونات (حوامل الشحنة السالبة)

$n_n \gg p_n$

يرمز لهذه الشوائب برمز N_D

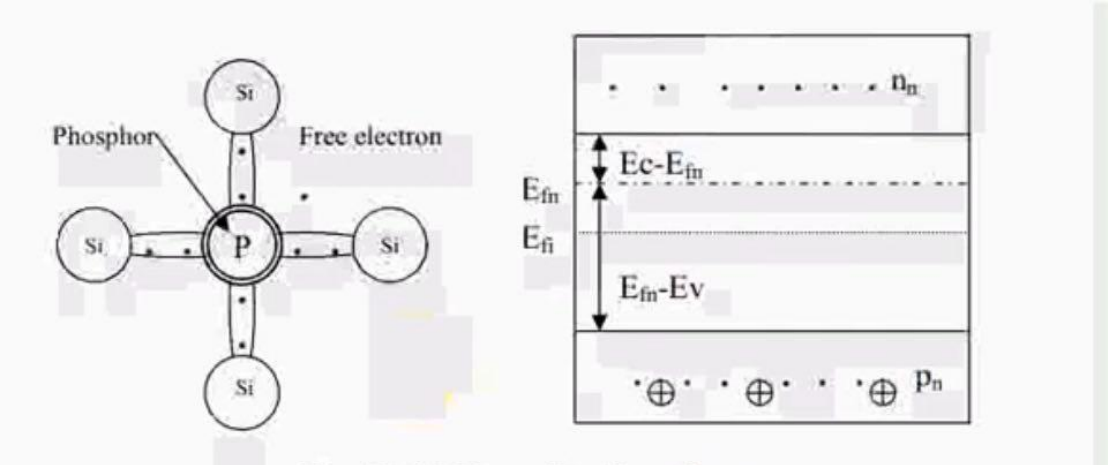
نسبة التشويب : هي النسبة بين تركيز الشوائب (N_A او N_D) الى الكثافة الذرية لاشباة الموصلات

الكثافة الذرية= 4.4×10^{22} atom/cm^3 لجرمانيوم

5.0×10^{22} atom/cm^3 =للسيلكون

مستوى فيرمي	عدد الفجوات	عددالالكترونات	
E_{fi}	pi	ni	النقي intrinsic
E_{fn}	p_n	n_n	المشابه N-TYPE
E_{fp}	p_p	n_p	المشابهP-TYPE

1.اشباه الموصلات N-TYPE



ومن مواصفات هذا النوع من اشباه الموصلات

كلما اضفنا شوائب مستوى فيرمي يرتفع اكثر وكذلك حاملات الشحنة الاغلبية (majority carrier) هي الالكترونات وحاملات الشحنة الاقلية(Minority carrier) هي الفجوات

$n_n=n_i+N_D \approx N_D$ ($N_D \gg n_i$)

n_n هي تركيز الالكترونات في اشباه الموصلات N-TYPE

N_D هي تركيز ايونات المانحة

$$n_n \times p_n = n_i^2$$

$$n_n = \mathrm{Nc}\exp[-\frac{(Ec-E_{fn})}{KT}] \approx \mathrm{N_D}$$

$$p_n = \mathrm{N_v}\exp\left[-\frac{(E_{fn}-\mathrm{Ev})}{\mathrm{KT}}\right]$$

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

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

$$\mathrm{n_i}=\sqrt{\mathrm{NcNv}}\exp\left[\frac{(-\mathrm{E_g})}{2\mathrm{KT}}\right]$$

ملاحظات حول حل المسائل

1. اذا اعطى درجة الحرارة(TK) فنحسب طاقة الفجوة(Energy gap) حيث تكون قيمتها كالتالي

$\mathrm{Eg}=1.21 - 3.6\times10^{-4}\,\mathrm{T(ev)}$ for Si

$\mathrm{Eg}= 0.785 -2.32\times10^{-4}\,\mathrm{T(ev)}$ for Ge

2. اذا لم يعطي $\mathrm{m_n^*}$, $\mathrm{m_p^*}$ فنفرض قيمتها متساويه

$\mathrm{m_n^*} = \mathrm{m_p^*} = \mathrm{m}$

$\mathrm{Nc} = \mathrm{N_v} = 4.82\times10^{21}\,(T)^{\frac{3}{2}}$

$\mathrm{n_i} = \mathrm{p_i} = \sqrt{\mathrm{NcNv}}\exp\left[\frac{(-\mathrm{E_g})}{2\mathrm{KT}}\right]$

3.ايجاد موقع مستوى فيرمي للاشباه الموصلات من نوع N TYPE يجب حساب $(Ec-E_{fn})$ وكذلك حساب$(E_{fn}-\mathrm{Ev})$

$$(Ec-E_{fn}) = KTln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$$

$$(E_{fn} - \text{Ev}) = KTln\left(\frac{N_v}{P_n}\right)$$

$n_n >> p_n \rightarrow (Ec - E_{fn}) < (E_{fn} - \text{Ev})$

حيث ان موقع مستوى فيرمي للاشباه الموصلات من نوع N TYPE

يقع بالقرب من حزمة التوصيل وكلما زادت الشوائب المانحة (donor impurity) يجعل E_{fn} اقرب الى حزمة التوصيل اي ($E_{fn} >$ Efi)

$$N_D \uparrow \rightarrow (Ec - E_{fn}) \downarrow and\ (E_{fn} - \text{Efi}) \uparrow$$

$(Ec - E_{fn})$ تمثل مسافة بين مستوى فيرمي من نوع N TYPE وحزمة التوصيل

$(E_{fn} - \text{Ev})$ تمثل مسافة بين مستوى فيرمي من نوع N TYPE وحزمة التكافؤ

$(E_{fn} - \text{Efi})$ تمثل مسافة بين مستوى فيرمي للاشباه الموصلات من نوع N TYPE و مستوى فيرمي للاشباه الموصلات النقيه

$$E_{fn} - E_{fi} = KTln\left(\frac{ni + ND}{n_i}\right)$$

ملاحظه في حال كانت ND= 0 يعني $E_{fn} - E_{fi} = 0$

مثال اوجد كمية الالكترونات والفجوات للجرمانيوم عند درجة الحرارة (300k)عند اضافة 10^{16} atom/cm^3 من مادة الفسفور (خماسية التكافؤ)

الحل:

$Eg = 0.785 - 2.32 * 10^{-4} T$

$= 0.785 - 2.32 * 10^{-4} (300) = 0.715$ (ev)

$Nc = N_v = 4.82 \times 10^{21} (T)^{\frac{3}{2}}$

$= 4.82 \times 10^{21} (300)^{\frac{3}{2}} = 2.5 \times 10^{25}$ m^{-3}

$= 2.5\times10^{19}\ cm^{-3}$

$n_i = p_i = \sqrt{NcNv}\ \exp\left[\frac{(-E_g)}{2KT}\right]$

$n_i = 2.5\times10^{25}\ \exp\left[\frac{(-0.715)}{2\times8.62\times10^{-5}\times300}\right] = 2.477\times 10^{19}$ electron $/m^3$

$= 2.477\times 10^{13}$ electron $/cm^3$

$n_n = n_i + N_D \approx N_D = 10^{16}$ electron $/cm^3$

$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{(2.477\times 10^{13})^2}{10^{16}} = 6.135\times 10^{10}$ hole $/cm^3$

$$(Ec - E_{fn}) = KTln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$$

$= 8.62\times10^{-5}\times300\times ln(2.5\times10^{19}\ /\ 10^{16}) = 0.202$ ev

$$(E_{fn} - Ev) = KTln\left(\frac{N_v}{P_n}\right)$$

$= 8.62\times10^{-5}\times300\times ln(2.5\times10^{19}\ /\ 6.135\times10^{10})$

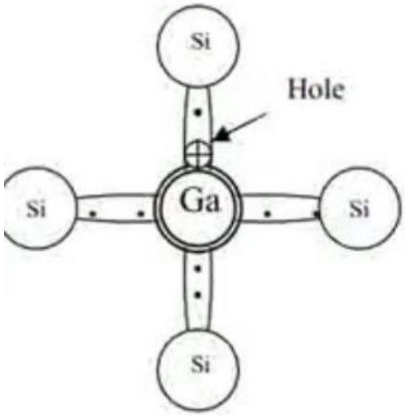
$= 0.513$ ev

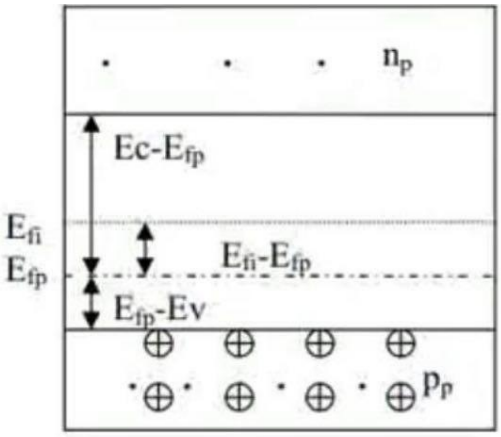
$$E_{fn} - E_{fi} = KTln\left(\frac{ni + ND}{n_i}\right)$$

$$= 8.62\times10^{-5}\times300\times ln\left(\frac{2.477\times10^{13}+10^{16}}{2.477\times10^{13}}\right)$$

$= 0.1555$ ev

2. اشباه الموصلات P-TYPE





$p_p = p_i + N_A \approx N_A$

$N_A >> p_i$

حاملات الشحنة الاغلبية (Majority carrier)هي الفجوات اما حاملات الشحنة الاقلية(Minority carrier) هي الالكترونات ويرمزلتركيز الفجوات في اشباه الموصلات من نوع **P-TYPE برمز** p_p في حين يرمز لتركيز ايونات القبول (accepter ions) برمز N_A ويرمزلتركيز الالكترونات في اشباه الموصلات من نوع **P-TYPE برمز** n_p

$$n_p \times p_p = n_i^2$$

$$n_p = N_C \exp\left(-\left(\frac{E_C - E_{fp}}{kT}\right)\right)$$

$$p_p = N_v \exp\left(-\left(\frac{E_{fp} - E_v}{kT}\right)\right) \approx N_A \qquad p_p = N_A$$

$p_p >> n_p \rightarrow (E_C - E_{fp}) >> (E_{fp} - E_v)$

يكون مستوى فيرمي في اشباه الموصلات من نوع **P**-TYPE يقع بالقرب من حزمة التكافؤ وكلما زادت الشوائب القبول accepter impurity يجعل مستوى فيرمي في اشباه الموصلات من نوع **P**-TYPE اقرب الى حزمة التكافؤ $E_{fp} < E_{fi}$

$$\boxed{(Ec - E_{fp}) = KTln\left(\frac{N_C}{n_p}\right)}$$

$$\boxed{(E_{fp} - \text{Ev}) = KTln\left(\frac{N_v}{N_A}\right)}$$

$$\boxed{(Ec - E_{fp}) + (E_{fp} - \text{Ev}) = E_g}$$

$$\boxed{(E_{fi} - E_{fp}) = KTln\left(\frac{n_i + N_A}{n_i}\right)}$$

مثال: اوجد تركيز الالكترونات والفجوات لعينة من السيلكون عند درجة حرارة (300K) عندما تشويب السليكون مع البورون (ثلاثي التكافؤ) بنسبة تشويب $\frac{1}{5*10^9}$

(اذا علمت بان الكثافة الذرية للسيلكون هي $5 \times 10^{22}\ \text{atom/cm}^3$)

الحل

$Eg=1.21 - 3.6\times10^{-4}\,T(ev)$

$Eg=1.21 - 3.6\times10^{-4}\,(300k)=1.1(ev)$

$m_n^* = m_p^* = m$

$N_v = N_C == 4.82\times10^{21}\,(T)^{\frac{3}{2}}$

$= 4.82\times10^{21}\,(300k)^{\frac{3}{2}} = 2.5\times10^{25}\ \text{state/m}^3$

$= 2.5\times10^{19}\ \text{state/cm}^3$

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

$= 2.5\times10^{25}\ \exp\left[\left[\frac{(-1.1)}{2\times8.62\times10^{-5}\times300}\right]\right] = 1.45*10^{16}\ \text{electron/m}^3$

$=1.45*10^{10}$ electron/cm^3

doping ratio = $\frac{N_A}{atomic\ density\ Si}$

$\frac{N_A}{5\times10^{22}}=\frac{1}{5*10^9}$ $\rightarrow N_A = 10^{13}$ atom/cm^3

$p_p = p_i + N_A \approx N_A = 10^{13}$ hole/cm^3

$n_p \times p_p = n_i^2$

$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{(1.45*10^{10})^2}{10^{13}} = 2.1*10^7$ electron/cm^3

$(E_{fp} - Ev) = KTln\left(\frac{N_v}{N_A}\right)$

$(E_{fp} - Ev) = \left[8.62\times10^{-5}\times300\ln[\frac{2.5*10^{19}}{10^{13}}]\right]$

$=0.38\ ev$

$(Ec - E_{fp}) + (E_{fp} - Ev) = E_g$

$(Ec - E_{fp}) = E_g - (E_{fp} - Ev) = 1.1\text{-}0.38 = 0.72\ ev$

$(E_{fi} - E_{fp}) = \frac{Eg}{2} - (E_{fp} - Ev) = \frac{1.1}{2}\text{-}0.38 = 0.17ev$