LECTURE NO.2

اشباه الموصلات (Semicoductors)

مقدمة عن اشباه الموصلات

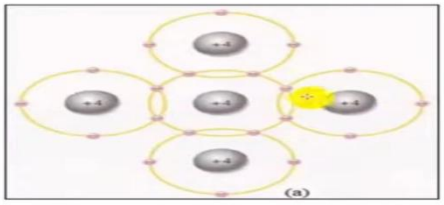
تنقسم المواد من حيث التوصيل الكهربائي الى (موصلة , عازلة , شبة موصلة) اعتمادا على الالكترونات في المدار الاخير (الكترونات التكافؤ) فاذا كانت هذه الالكترونات حرة وتستطيع الانتقال من ذرتها الاصلية الى ذرة اخرى فان المادة تكون موصلة جيده للكهرباء واذا ارتباط الالكترونات مع النواة ومن صعب ان تترك مكانها 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 .

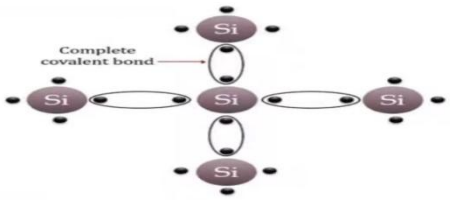
حيث ان مقاومة الكهربائية لاشباه الموصلات في درجة حرارة الغرفة تتراوح مابين (10^{-2} الى 10^{9})اوم سنتمتر وللبلورة النقية وعند درجة الحرارة الصفر مطلقة تكون عازلة

الجرمانيوم والسيلكون

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 لهاρ

$$\rho = 1/\sigma$$

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

$$n=p=n_i$$

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

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

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

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

$$n_i^2 = n.p$$

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

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

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

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

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

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 تركيز 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

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

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

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

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

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

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 حيث تحاط ذرة واحدة من الشوائب بمليون ذرة من السيلكون اوجرمانيوميجدث هذا دون حدوث تغير في التركيب البلوري الاساسي 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)

  $n_n \gg p_n$

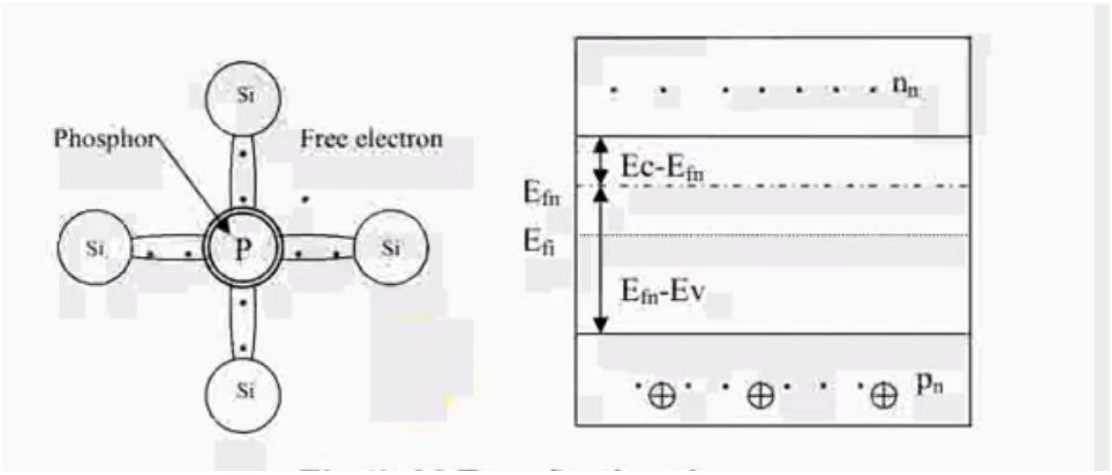
  يرمز لهذه الشوائب برمز N_D

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

الكثافة الذرية= 10^{22}x4.4 atom/cm^3 لجرمانيوم
10^{22}x5.0= 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

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

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

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

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

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

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

ملاحظات حول حل المسائل

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

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

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

2. اذا لم يعطي m_n^* , m_p^* فنفرض قيمتها متساويه

$$m_n^* = m_p^* = m$$

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

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

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

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

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

$$\frac{\mathrm{n_n}}{\mathrm{p_n}} = \frac{N_C}{N_v}\exp\left(-\left(\frac{Ec - E_{fn} - E_{fn+\,\mathrm{Ev}}}{\mathrm{KT}}\right)\right)$$

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

وذلك لان $\mathrm{n_n}$ تتناسب تناسب عكسي مع $(Ec - E_{fn})$ونفس الحالة بالنسبة $\mathrm{p_n}$ تتناسب تناسب عكسي مع $(E_{fn} - \mathrm{Ev})$ 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

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

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

$(E_{fn} - \mathrm{Ev})$ تمثل مسافة بين مستوى فيرمي وحزمة التكافؤ

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

$$\frac{\mathrm{n_n}}{\mathrm{p_n}} = \frac{N_C}{N_v}\exp\left(-\left(\frac{Ec - E_{fn} - E_{fn} + \mathrm{E_V}}{\mathrm{KT}}\right)\right)$$

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

$N_v = N_C$

$$\mathrm{p_n} = \frac{\mathrm{n_i^2}}{\mathrm{n_n}}$$

$n_n^2 = n_i^2 \exp\left(\frac{2E_{fn}-(E_C+E_V)}{KT}\right)$ (Root square for each side)

$n_n = n_i \exp\left(\frac{E_{fn}-(E_C+E_V)/2}{KT}\right)$

$n_n = n_i \exp\left(\frac{E_{fn}-E_{fi}}{KT}\right)$

$E_{fn} - E_{fi} = KT ln\left(\frac{n_n}{n_i}\right)$

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

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)

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

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

$= 2.5 \times 10^{19}$ state /cm^3

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

$n_i = 2.5 \times 10^{25} \exp\left[\frac{(-0.715)}{2 \times 8.62 \times 10^{-5} \times 300}\right] = 2.477 \times 10^{19}$ 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

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

$=8.62 \times 10^{-5} \times 300 \times ln(2.5\times10^{19} / 10^{16}) = 0.202$ ev

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

$=8.62 \times 10^{-5} \times 300 \times ln(2.5\times10^{19} / 6.135\times 10^{10})$

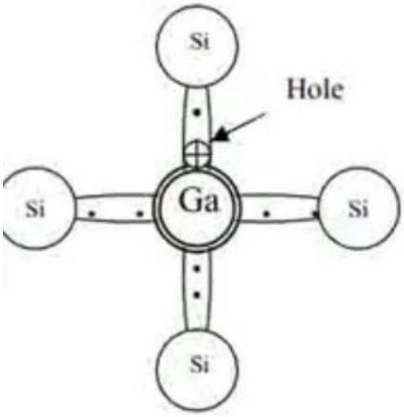
$= 0.513$ ev

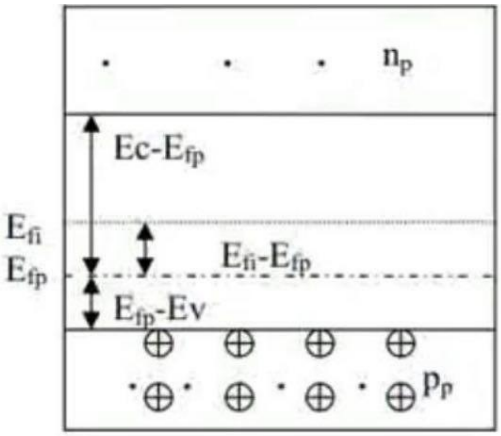
$$E_{fn} - E_{fi} = KTln\left(\frac{ni + ND}{n_i}\right)$$

$$= 8.62 \times 10^{-5} \times 300 \times ln\left(\frac{2.477\times 10^{13}+10^{16}}{2.477\times 10^{13}}\right)$$

$=0.1555$ 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 $E_{fp} < E_{fi}$

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

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

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

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

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

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

$m_n^* = m_p^* = m$

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

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

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

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

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

$n_p \times p_p = n_i^2$

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

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

$(E_{fp} - Ev) = \left[2\times8.62\times10^{-5}\times300\ln[\frac{2.5*10^{19}}{10^{13}}]\right]$

$=0.38\ ev$

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

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

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