

5

٥ شبه الموصل الذاتي Intrinsic Semiconductor

عندما تكون مادة شبه الموصل نقية جداً لا تحتوي على شوائب تتحمل
 شبه الموصل الذاتي (أو الأصيل أو النقي) Intrinsic Semiconductor
 وتسمى توصيليتها بالتوصيلية الذاتية (Intrinsic conductivity) σ_i
 لتمييزها عن التوصيلية بوجود الشوائب.

التوصيلية σ في المعادن تعطى بالعلاقة المعروفة $\sigma = e n \mu$
 حيث n غلبة تركيز الإلكترونات التوصيل و μ حركية هذه الإلكترونات.
 أشباه الموصلات تتميز بخاصية لا مثلها في المعادن (في الأحوال الاعتيادية)
 وهو ما يعرف بوجود الثقوب (holes) التي تتصرف وكأنها تحمل شحنة كهربائية
 معرصة وتساهم في نقل التيار الكهربائي، وعليه فإن التوصيلية σ (تأري):

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e n \mu_n + e p \mu_p$$

حيث n تركيز وحركية الإلكترونات على السيل و

p تركيز وحركية الثقوب (holes) على السيل.

في شبه الموصل النقي (الذاتي أو الأصيل) فإن: $n = p = n_i$

حيث n_i سيم بالتركيز الذاتي لحالات الشحنة

n_i : intrinsic carrier density

$$\therefore \sigma_i = e n_i \mu_n + e n_i \mu_p = e n_i (\mu_n + \mu_p)$$

كذلك على مادة شبه موصلة ذاتية ندرس السيليكون (Si^{14}):

السيليكون النقي عند درجة حرارة الغرفة ($T=300K$) يتصرف كشبه موصل ذاتي متراوان لم يتم قطعيه بأية شائبة خارجية، الترتيب الإلكتروني

للسيليكون هو $Si: [1s^2 2s^2 2p^6] 3s^2 3p^2$ الإلكترونات

الذاتية $3s^2 3p^2$ المعروفة باسم الإلكترونات التكافؤ هي المسؤولة عن تكوين

الروابط والتفاعل، فعند تكوين مادة صلبة كل ذرة ترتبط بأربع ذرات

بجاورة لها بأربع روابط تساهمية covalent bonds تتناظرة في الفراغ

كل إلكترون من الإلكترونات التكافؤ تساهم في تكوين رابطة مع ذرة مجاورة.

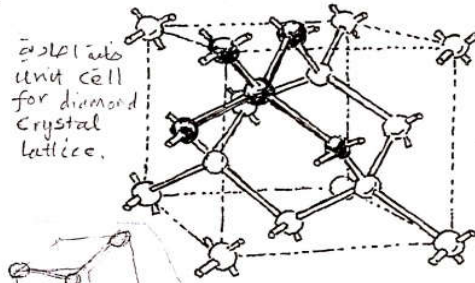
الإلكترونات الماهمة في تكوين الرابطة تتوضع localized فيما بين الذرات

وتكون مقيدة bound في هذا الموقع. عند درجة حرارة الصفر المطلق ($0K$)

لديها إلكترونات هرة قادرة على الحركة داخل المادة الصلبة وعليه

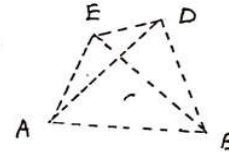
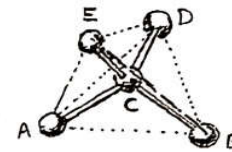
(6)

وحدة اعادة
unit cell
for diamond
crystal
lattice.



كل ذرة (الذرة الجوهري في الم)
ترتبط بأربع ذرات (الذرات في المركز)

- ب -

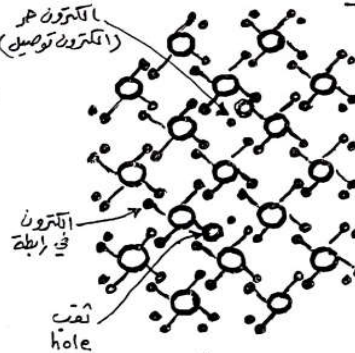


- پ -

شكل : (م) الرابطة الرباعية tetrahedral bonding في السليكون
هنا ترتبط كل ذرة (مثل C) بأربع أقرب ذرات بأربع روابط تساهمية متناظرة في
المكان. الشكل ABDE هي تمثيل له أربعة أوجه كل وجه (مثل ABD) شكل
متساوي الأضلاع. أو الشكل (هـ) حيث الذرة الموجودة في المركز ترتبط بأربع روابط تساهمية
متناظرة في الفراغ مع أربع ذرات في الزوايا المثلثية.
(د) : خلية واحدة من شبكية الماس diamond lattice وبين ذرة
داخل الخلية ترتبط بأربع روابط بأربع ذرات مجاورة لها.

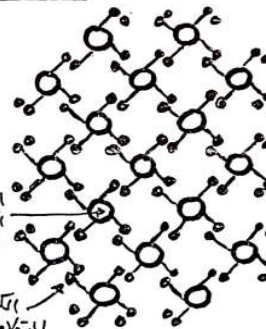
في بعدين 2D

الالكترون حر
(الالكترون توصيل)



$T = 300K$
 $p \approx n \approx 10^{17}$

النواة مع
الالكترونات
اللب



الالكترونات
المتكافئة مقيدة
بين ذرتين ترتبط
الذرتين ببعض في
رابطة تساهمية

$T = 0K$
 $p = n = 0$

7

يتصرف المكون (و كذلك كل مادة شبه موصل أخرى) عند درجة التوصيل المطلقة وكأنه مادة عازلة dielectric ولكن عندما ترتفع درجة الحرارة (مثلاً عند $T=300K$) فإن الذرات وبفعل الطاقة الحرارية لها تقوم بحركة اهتزازية حول مواضع استقرارها وتنتج الحركة الاهتزازية للذرات (كم الطاقة في الحركة الاهتزازية للذرات تسمى بالفونون phonon) فإن بعض الإلكترونات تكتسب قدرًا من الطاقة (أو من الفونونات) تكون كافية للتحرر من الرابطة التي تعيد حركتها. الإلكترونات عندما تكون مقيدة في الرابطة تسمى بالإلكترونات المتكافئة ولكن عندما تتحرر الرابطة تسمى بالإلكترونات التوصيلية conduction electron لأنها تصبح قادرة على نقل التيار الكهربائي عند ما يتم تسليط مجال كهربائي ضارحي على المادة الصلبة. في دراسة خصائص شبه الموصلات أظهرت بأن المواقع الشاغرة في الروابط (وتعرف بالثقوب hole أو الفجوة) والناتجة من تحرر الإلكترونات من الرابطة هي أيضاً تساهم في نقل التيار الكهربائي وتتحرك هذه الثقوب (المواقع الشاغرة - أو الفجوات holes) باتجاه المجال الكهربائي ولا يحملها تحمل شحنة كهربائية موجبة. ومن الواضح أن عدد الثقوب في وحدة الحجم (تركيز الثقوب p) في مادة شبه موصلة ذاتية عند درجة حرارة T يساوي عدد الإلكترونات المتحررة في وحدة الحجم (تركيز الإلكترونات n):

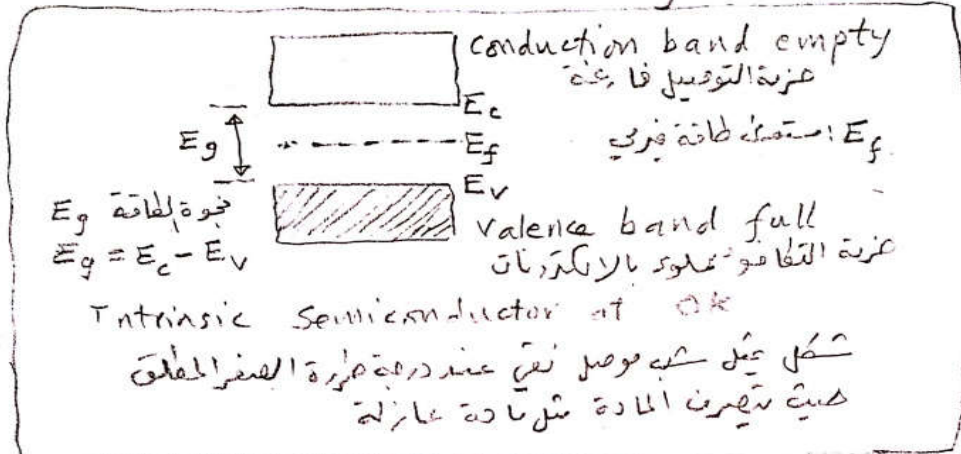
$$p = n = n_i$$

حيث n_i يسمى بالتركيز الذاتي لحاملات الشحنة

intrinsic carrier density - أي أن الثقوب والإلكترونات تتولد كنظام أو أزواج pairs (كل ثقب ناتج من تحرر إلكترون) وتعرف العملية بالتولد الحراري لأزواج الإلكترون - ثقب

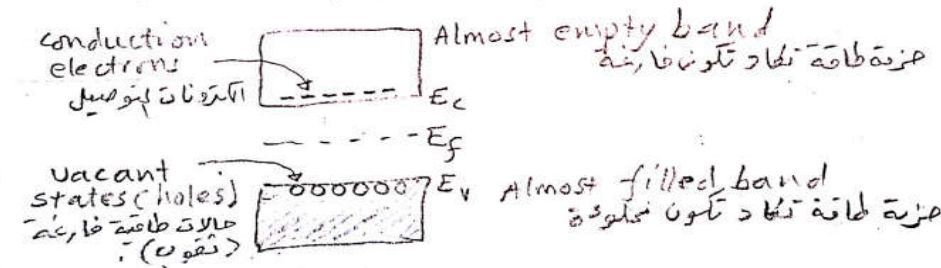
thermal generation of electron-hole pairs.
من وجهة نظر حزم الطاقة Energy bands - الإلكترونات المتحررة (الإلكترونات التوصيلية) تكون في حزمة طاقة تسمى بحزمة التوصيل conduction band والإلكترونات الموجودة في الرابطة وكذلك الثقوب تكون في حزمة طاقة أخرى تسمى بحزمة التكافؤ Valence band وتأتي لينتقل الإلكترون من قمة حزمة التكافؤ (يتحرر من الرابطة) إلى قمة حزمة

التوصيل ينبغي ان يتزود بطاقة مساوية في المقدار الى فجوة الطاقة E_g .



كل شيء شبه موصل نقي عند درجة حرارة الصفر المطلق حيث تتصرف المادة مثل مادة عازلة

عند درجة حرارة الغرفة ($T=300K$) فان بعض الإلكترونات تكتسب طاقة لكي تتسبح في عزبة التوصيل وتترك وراءها في عزبة التكامل فتكونا (فجوات Holes) بقدر عدد الإلكترونات.



كل شيء شبه موصل نقي عند درجة حرارة الغرفة ($T=300K$) حيث تتصرف المادة كشبه موصل بالنظر لوجود عدد من (الإلكترونات الحرة) في عزبة التوصيل وعدد من (الفقوات الحرة) في عزبة التكامل.

Intrinsic Semiconductor at $T=300K$

9

في مادة شبه موصلة نقية --- (1) $p = n = n_i$
 $\therefore pn = (n_i)(n_i) = n_i^2$
 $\boxed{pn = n_i^2}$ --- (2)

معادلة (2) يعرف باسم قانون فعل الكتلة Mass-action-law وهي صحيحة حتى في حالة أشباه الموصلات غير النقية (المشوبة).
 حيث n_i يعطى بالعلاقة التالية:

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi k_B T}{h^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} \exp(-E_g/2k_B T) \quad \text{--- (3)}$$

حيث m_e^* و m_h^* يمثل الكتلة الفعالة للإلكترونات في قعر منطقة التوصيل و الثقوب في قمة منطقة التكافؤ.
 والجداول التي يعطى قيم E_g و n_i لأشباه الموصلات الشائعة:

| Parameters at 300K | Ge | Si | GaAs |
|--|----------------------|----------------------|--------|
| E_g (eV) | 0.68 | 1.1 | 1.43 |
| n_i (cm ⁻³) | 2.5×10^{13} | 1.5×10^{10} | 10^7 |
| μ_n [cm ² /V.s] intrinsic | 3900 | 1350 | 8800 |
| μ_p [cm ² /V.s] intrinsic | 1900 | 480 | 250 |

ستكون طاقة فيرمي E_{fi} في شبه الموصل النقي يساوي بالضرورة E_{fi} و يعطى بالعلاقة التالية:

$$E_{fi} = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} k_B T \ln(m_h^*/m_e^*) \quad \text{--- (4)}$$

إذا تساوت الكتلة الفعالة $m_h^* = m_e^*$ فإن $E_{fi} = \frac{1}{2} E_g$ أو E_{fi} تقع في منتصف فجوة الطاقة E_g وكان في العادة $m_h^* \neq m_e^*$ عليه فإن E_{fi} لا يقع في منتصف فجوة الطاقة بالضبط.

248

10



$f(E) N_E$: Number (Density) of electrons.

↓ Intrinsic Semiconductor at finite T ↓
e.g. $T = 300\text{ K}$



Density of holes $[1 - f(E)] N_E$

Example 1:

Use values of μ_n, μ_p, n_i from the table, calculate the intrinsic conductivity σ_i at 300K for Ge and Si.

Solution:

$$\sigma_i = e n_i (\mu_n + \mu_p)$$

For Ge : $\sigma_i = (1.6 \times 10^{-19})(2.5 \times 10^{13})(3900 + 1900)$
 $\sigma_i = 2.32 \times 10^{-2} \text{ C. } \frac{1}{\text{cm}^3} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V.s}} = 2.32 \times 10^{-2} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$

For Si : $\sigma_i = (1.6 \times 10^{-19})(1.5 \times 10^{10})(1350 + 480)$
 $= 4.39 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

Example 2:

Use results of Example 1, calculate the resistance of a piece of Ge and Si, where the cross section is 1 mm^2 and for a length of 2 cm .

Solution: $R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A}$

For Ge : $R = \frac{2 \text{ cm}}{2.32 \times 10^{-2} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot (1 \text{ mm}^2 \times \frac{1}{100})} \approx 8.6 \times 10^3 \Omega$
 $R = 8.6 \text{ K}\Omega \text{ [kilo-ohm]}$

For Si : $R = \frac{2}{4.39 \times 10^{-6} \cdot \frac{1 \times 1}{100}} \approx 4.55 \times 10^7 \Omega$
 $= 45.5 \text{ M}\Omega \text{ [mega-ohm]}$

Example 3:

Assume that $m_h^* = 0.52 m_0, m_e^* = 0.43 m_0, E_g = 1.1 \text{ eV}$ for Si and assume them approximately constant, calculate the value of n_i at 100 K and 300 K.

Solution: $n_i = 2 \left(\frac{2\pi k_B T}{h^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} \exp(-E_g / 2k_B T)$

$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$

at 100 K ;

$$n_i = 2 \left[\frac{2 \times 3.14 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 100}{(6.625 \times 10^{-34})^2} \right]^{3/2} \left[0.43 \times 0.52 \times (9.1 \times 10^{-31})^2 \right]^{3/4} \exp \left(\frac{-E_g}{2k_B T} \right)$$