

# 45 شبه الموصل نوع - P P-type Semiconductor

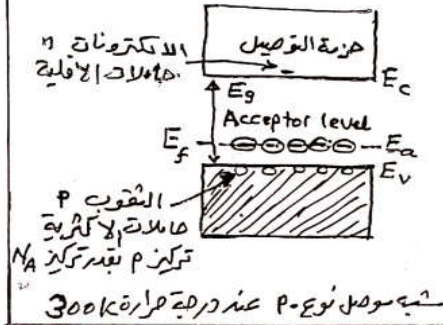
## 1- carrier concentration تركيز الحاملات في P-type

From mass-action-law:

$$pn = n_i^2 \quad \text{--- (1)}$$

From charge neutrality

$$(+)\text{charge} = (-)\text{charge}$$



$$\text{number of positive charges (holes)} = \text{No. of electrons} + \text{No. of ionized acceptors}$$

$$p = n + N_A^- = n + N_A \quad \text{--- (2)}$$

في (2) اعتبرنا ان جميع الذرات الانشطة  $N_A$  قد استقبلت إلكترونات

بحل (1) و (2) اينما نحصل على تعابير لـ  $n$  و  $p$ :

$$p = p_p = \frac{1}{2}N_A + \frac{1}{2}N_A \sqrt{1 + 4(n_i/N_A)^2} \approx N_A + \frac{n_i^2}{N_A} \approx N_A \quad \text{--- (3)} \quad n_i \ll N_A$$

$$n = n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_A} \quad \text{--- (4)}$$

The subscript  $p$  refers to the p-type semiconductor.

$$p_p \approx N_A \quad \text{و} \quad n_p = n_i^2/N_A \quad \text{for } n_i \ll N_A$$

## 2- The Fermi level in p-type semiconductor مستوى فيرمي في شبه الموصل نوع P

$$p = N_V \exp\left[-\frac{E_F - E_V}{kT}\right] \quad \text{تركيز الثقوب في P موصل بالدرجة:}$$

ومعادلة هذه لـ  $N_A$  (حيث معادلة 3 أعلاه) هي:

$$N_V \exp\left[-\frac{E_F - E_V}{kT}\right] = N_A$$

$$E_F = E_V + kT \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) \quad \text{--- (5)} \quad \text{ومعادلة الترتيب الموصل لـ } E_F$$

## 3- Conductivity of p-type: التوصيلية في نوع - P

عادة في نوع - P تركيز الثقوب  $p$  أكبر بكثير من  $n$  وتركيز الالكترونات  $n$  أصغر بكثير من  $p$ .  
 عليه تعرف الثقوب باسم حاملات الاغلبية Majority والالكترونات بحاملات الاقلية minority

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_p = en\mu_n + ep\mu_p \approx ep\mu_p = e N_A \mu_p$$

(31)

If both **donors** and **acceptors** are present,

46

في اثناء صناعة الروائح المتكاملة (IC) أو الترانزستورات أو الثنائيات (الدايود)  
يتم تطعيم شبه الموصل بنوع من الشوائب لنقل نوع- $n$  ثم يتم تطعيم جزء منه  
بنوع- $p$  وقد يتم تطعيم جزء ثالث منه بنوع- $n$  مرة أخرى بتركيز مختلف  
عليه تنشأ مناطق شبه الموصل حيث تتواجد فيها كلا نوعي الشوائب  
آن واحد. وفي هذه الفقرة ندرس مثل هذه الحالة.

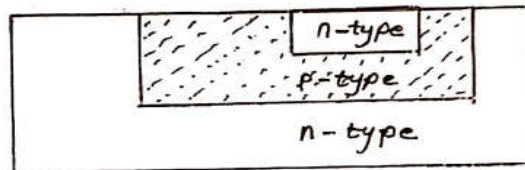
From mass-action-law:

$$pn = n_i^2 \quad \text{--- (1)}$$

and from charge  
neutrality:

$$p + N_D = n + N_A \quad \text{--- (2)}$$

وحل ① و ② انياً يحصل  
على تعابير لكل من  $n$  و  $p$   
ويمكن تقريب هذه التعابير



مناطق شبه الموصل قد تحتوي على شوائب  
من كلا النوعين  $n$  و  $p$  في نفس الوقت

لنحسب الحالات الخاصة التالية:

$$n \approx (N_D - N_A)$$

$$p \approx n_i^2 / (N_D - N_A)$$

① في حالة  $N_D > N_A$  و

$$n_i \ll (N_D - N_A)$$

الحالة الغالبة نوع- $n$

$$p \approx (N_A - N_D)$$

$$n \approx n_i^2 / (N_A - N_D)$$

② في حالة  $N_D < N_A$  و

$$n_i \ll (N_A - N_D)$$

الحالة الغالبة نوع- $p$

والحصول على  $E_f$ :

$$n = N_C \exp \left[ -\frac{E_C - E_f}{kT} \right]$$

$$p = N_V \exp \left[ -\frac{E_f - E_V}{kT} \right]$$

$$E_f = \frac{1}{2}(E_V + E_C) - \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{N_C}{N_V} \right) + \frac{kT}{2} \ln \frac{n}{p}$$

وبالتسوية والمعادلة الترتيب:

$$E_f = E_{fi} + \frac{kT}{2} \ln \frac{n}{p}$$

$$\text{where } E_{fi} = \frac{1}{2}(E_V + E_C) - \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{N_C}{N_V} \right)$$

(36)

Example

47

شريحة السيليكون طُمِحت بالففور  $10^{16}$  ذرة لكل سم<sup>3</sup> وبالبورون  $2 \times 10^{16} \frac{\text{atom}}{\text{cm}^3}$   
 (أ) احس تركيز الإلكترونات والثقوب  $E_g$  والمقاومة عند درجة حرارة الغرفة

(ب) كرر فرع (أ) حالة قطعة أخرى طُمِحت بالففور  $10^{16} \text{cm}^{-3}$  والبورون  $8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$   
 اعتبر أن  $n_i(300\text{K}) = 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$  بميزات  $\mu_n = 1300$  و  $\mu_p = 500$  بوحدة  $\frac{\text{cm}^2}{\text{V.s}}$   
 $m_h^* = 2m_e^*$  و  $E_g = 1.01 \text{ eV}$

الحل

(أ) نرى أن تركيز البورون (شوائب نوع p) أكبر من تركيز الففور (شوائب نوع n) عليه تكون القطعة نوع p:

$$p \approx N_A - N_D = 2 \times 10^{16} - 10^{16} = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ holes}$$

$$n = n_i^2 / p = (1.5 \times 10^{10})^2 / 10^{16} = 2.25 \times 10^4 \text{ cm}^{-3} \text{ electrons}$$

$$E_{fi} = \frac{1}{2} E_g + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_A}{N_D} = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_h^*}{m_e^*}$$

$$= \frac{1}{2} (1.01) + \left(\frac{3}{4}\right) (0.026) \ln(2) = 0.654 \text{ eV}$$

$$E_f = E_{fi} + \frac{kT}{2} \ln \frac{n}{p} = 0.654 + (0.026) \ln \frac{2.25 \times 10^4}{10^{16}}$$

$$= 0.654 - 0.348 = 0.305 \text{ eV}$$

$$\sigma = e p \mu_p = 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16} \times 500 = 0.8 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$

$$\rho = 1/\sigma = 1/0.8 = 1.25 \Omega \cdot \text{cm}$$

(ب) نلاحظ أن تركيز الففور (شوائب نوع n) أكبر من تركيز البورون (شوائب نوع p) عليه تكون القطعة نوع n:

$$n \approx N_D - N_A = 10^{16} - 8 \times 10^{15} = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ electrons}$$

$$p = n_i^2 / n = (1.5 \times 10^{10})^2 / 2 \times 10^{15} = 1.125 \times 10^5 \text{ cm}^{-3} \text{ holes}$$

$$E_{fi} = \frac{1}{2} E_g + \frac{3kT}{4} \ln \frac{m_h^*}{m_e^*} = 0.654 \text{ eV}$$

$$E_f = E_{fi} + \frac{kT}{2} \ln \frac{n}{p} = 0.654 + \frac{0.026}{2} \ln \frac{2 \times 10^{15}}{1.125 \times 10^5}$$

$$= 0.654 + 0.3068 = 0.961 \text{ eV}$$

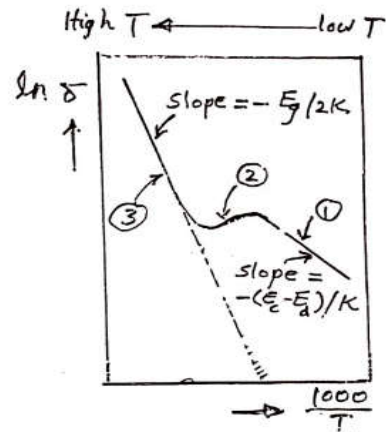
$$\sigma = e n \mu_n = 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{15} \times 1300 = 0.416 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$

$$\rho = 1/\sigma = 1/0.416 = 2.4 \Omega \cdot \text{cm}$$

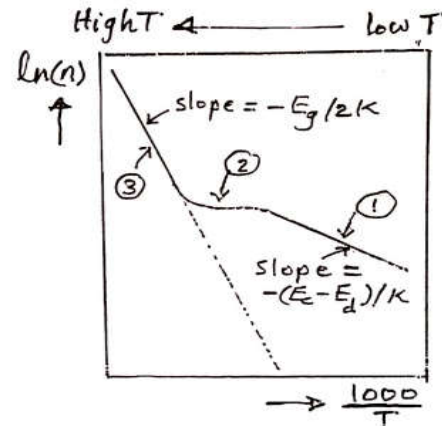


## ١٨ اعتماد تركيز الحاملات و التوصيلية على درجة الحرارة في شبه موصل خارجي (شائبي) .

عند رفع درجة حرارة شبه موصل شائبي (مطعم) من درجات حرارة منخفضة جداً تحصل في البداية تأين للشوائب (ان كانت من نوع - n وان كانت الشوائب من نوع - p فتقتضي الالكترونات من حزمة التكافؤ) ، وبالا - استمرار رفع درجة الحرارة يصل الى حالة من الاشباج حيث تكون كل الذرات الشائبة قد تأينت وعند الاستمرار في رفع درجة الحرارة أكثر تبدأ الا لكترونات بالا تتفكك من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل وتتكون ازاها في الالكترون - ثقبه بفعل الطاقة الحرارية تماماً كما في مادة شبه موصلة ذاتية (نقية) . عليه هناك ثلاث مناطق مختلفة كما بين في الشكل التالي :



تغير التوصيلية مع  $\frac{1}{T}$  في شبه موصل نوع - n .



تغير تركيز الحاملات مع  $\frac{1}{T}$  في شبه موصل نوع - n .

- 1 - منطقة تتود فيها الحاملات الناتجة من الشوائب (impurity carriers dominate)
- 2 - منطقة الاشباع (saturation) أو النفاذ (exhaustion) حيث يتم تأين جميع الشوائب
- 3 - منطقة تتود فيها الحاملات الذاتية (intrinsic carriers)

اما بالنسبة للتوصيلية فاضاء هناك ثلاث مناطق لان التوصيلية تعتمد بشكل مباشر على تركيز الحاملات :

$$\sigma = e n \mu_n$$

- وهي نفس المناطق المذكورة اعلاه بالنسبة لتركيز الاملاح:
- 1 - منطقة تتواجد فيها حاملات ناقلية من الشوائب  $\delta = \delta_0 e^{-(E_c - E_d)/KT}$  عليه غيل المخزن المرسوم بين (لوغاريتم  $\delta$ ) و  $(\frac{1}{T})$  ياروي طاقة التنشيط او طاقة التأين  $(E_c - E_d)/K$  بقوة  $K$ .
  - 2 - منطقة الامتصاص او النفاذ حيث تنفذ تأين الشوائب أو ان لكل الشوائب تصبح متأينة  $\delta = e N_D \mu_n$  في هذه المنطقة لاعتقاد  $\delta$  على  $(\frac{1}{T})$  شكلها كيفية تغير الحركية  $(\mu_n)$  مع درجة الحرارة.
  - 3 - منطقة تتواجد فيها الاملاح الذاتية (intrinsic)  $\delta = \delta_0 e^{-\frac{E_g}{2KT}}$  وعليه غيل المخزن (لوغاريتم  $\delta$ ) مع  $(\frac{1}{T})$  يساوي  $(E_g/2K)$  واعتبر على منحنى الطاقة  $E_g$ .
- ان تقارنت شكل  $(\frac{1}{T} - v_s - 1)$  مع شكل  $(\frac{1}{T} - v_s - \delta)$  تبين انهما متطابقان وهذا الاختلاف ناتج عن اعتقاد حركية الاملاح (على) على درجة الحرارة  $T$  وحرارة تقل الحركية بزيادة درجة الحرارة  $T$ .

مثال: (المرحلة 244 - التمارين) : ثابت عينية من جاليوم ارسايد (GaAs) يكون نصف موزون  $As$  (يعتبر خامس التكافؤ) والى مستوى يجب بحيث تعطى تقارباً  $0.05 \mu m$ . وكان يجب وجود شوائب قابلة  $acceptor$  - اذ اذ فذة عن موصلة تحت كفاءة القياسية المحسنة  $0.06 \mu m$  - وبقيت العينة موزون -  $n$  - ما هو تركيز الاملاح والافزات (الافزات) الموجودة ؟

اعتبر  $\mu_n = 0.85 \frac{m^2}{V.s}$  وافرض ان جميع الذرات النقية قد تأينت.

For the target value  $\rho = 0.05 \mu m$

الحل:  $\rho = \frac{1}{en\mu_n} \Rightarrow n = \frac{1}{e\rho\mu_n} = \frac{1}{1.6 \times 10^{19} \times 0.05 \times 0.85}$

$\therefore n \approx 1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , i.e. we need  $N_D = n = 1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  donors

From the actual measured value of  $\rho = 0.06 \mu m$  and assuming that there are some acceptors  $N_A$  then for an n-type semiconductor:  $n = N_D - N_A$ .

$\Rightarrow \rho = \frac{1}{en\mu_n} = \frac{1}{e(N_D - N_A)\mu_n} \Rightarrow N_D - N_A = \frac{1}{e\rho\mu_n}$

$\therefore N_A = N_D - \frac{1}{e\rho\mu_n} = 1.4 \times 10^{20} - \frac{1}{1.6 \times 10^{19} (0.06) (0.85)} = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$