

# الفصل الأول: أنصاف النواقل الجوهريّة و غير الجوهريّة

**1- نصف ناقل جوهري:** هو نصف ناقل غير مطعم يحتوي على تركيز قليل من الشوائب (ذرات غريبة) مقارنة مع الذرات الأصلية أو الجوهريّة. كأمثلة على انصاف النواقل: السيليسيوم (Si) و الجرمانيوم (Ge) ببنية بلورية مثل شبكة الماس أي مكعب ممرکز الأوجه بقاعدة في الوضعتين (0 0 0) و (1/4 1/4 1/4) ، و أرسنيك الغاليوم GaAs ببنية الزنك بلاند أين القاعدة مكونة من ذرتي الأرسنيك و الغاليوم.

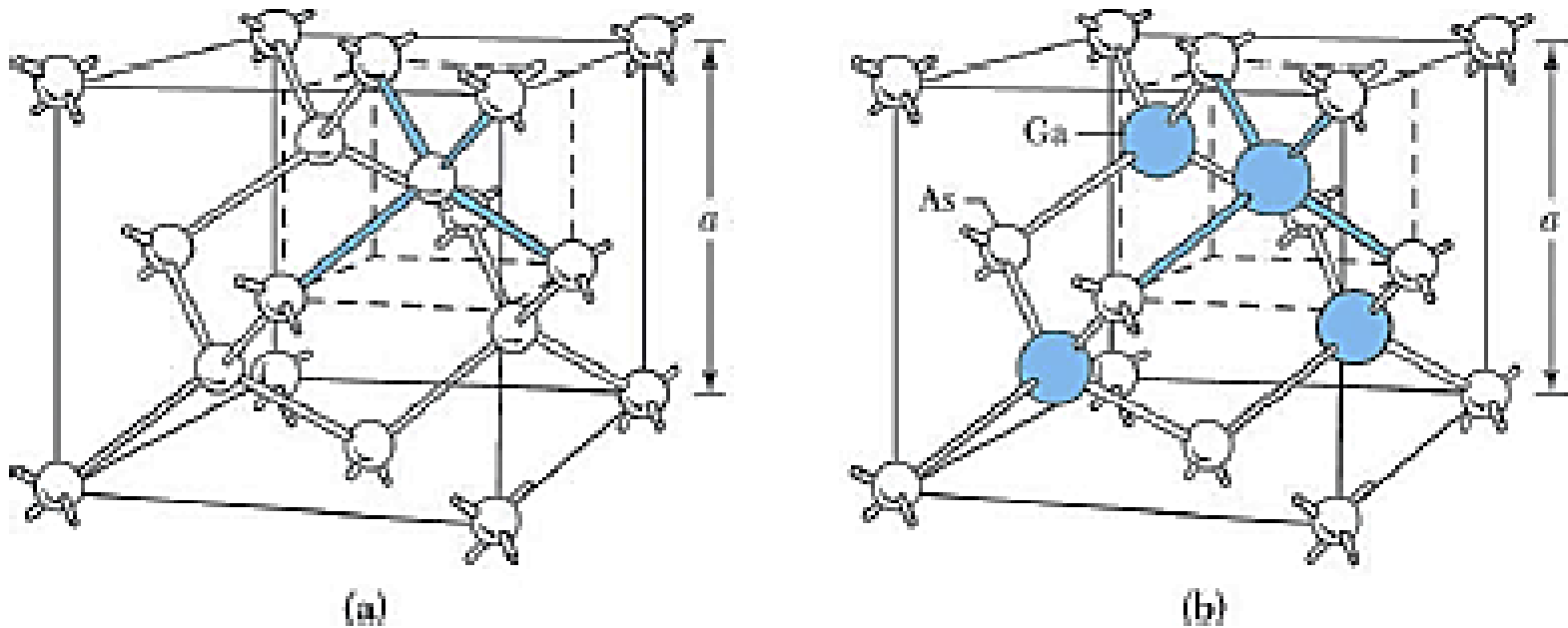


Fig. 4 (a) Diamond lattice. (b) Zincblende lattice.

الروابط بين الذرات في السيليسيوم و الجرمانيوم هي روابط تساهمية أين تساهم كل ذرة بالكترونات التكافؤ لتحقيق أربع روابط مع الجوار الأقرب

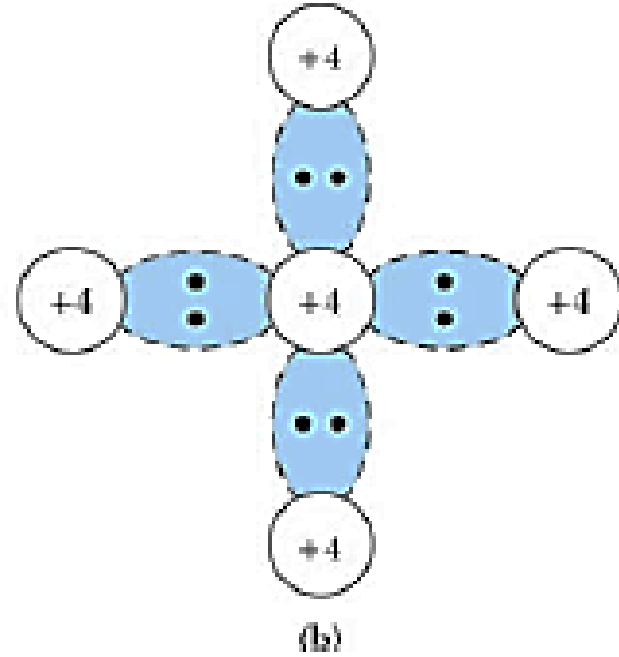
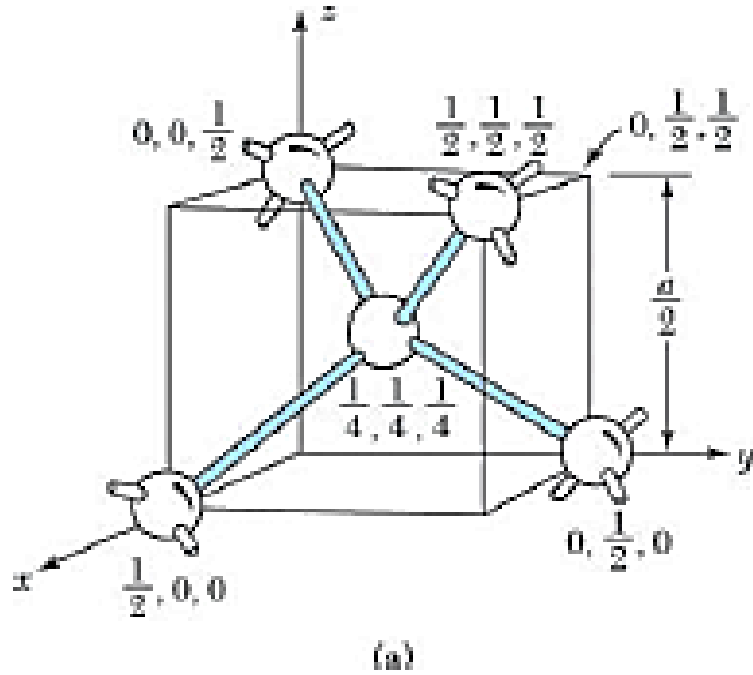


Fig. 7 (a) A tetrahedron bond. (b) Schematic two-dimensional representation of a tetrahedron bond.

منشأ الحاملات الحرة في نصف ناقل جوهري مثل السيليسيوم يعود إلى انكسار عدد من الروابط التساهمية بفعل الحرارة ، يوضح الشكل رابطة منكسرة في الوضع A ما ينتج إلكترون نقل (إلكترون حر) و ثقب تكافؤ ، في الوضع B الرابطة المنكسرة تنتج كذلك إلكترون نقل و ثقب تكافؤ ، الإلكترون المتحرر منها يمكنه أن يشغل مكان الثقب في الوضع A و هكذا تنتقل الإلكترونات الحرة عكس اتجاه حركة الثقوب

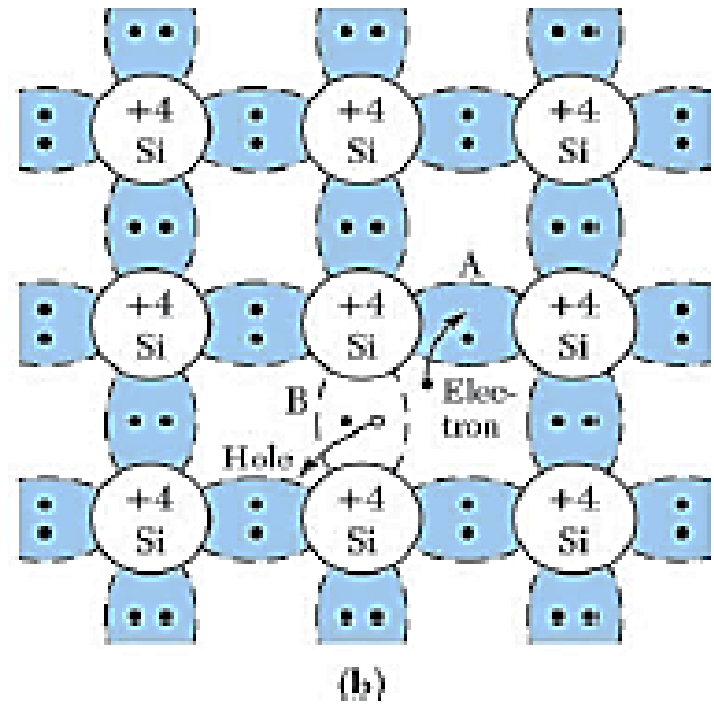
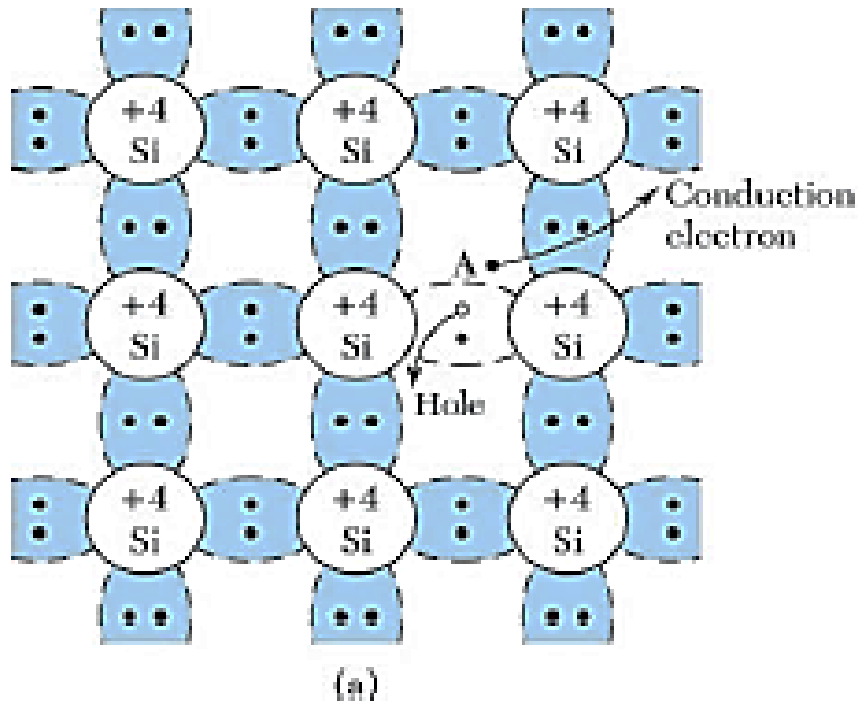


Fig. 8 The basic bond representation of intrinsic silicon. (a) A broken bond at position A, resulting in a conduction electron and a hole. (b) A broken bond at position B.

إنتاج الثنائيات إلكترون - ثقب بالتأين الحراري (انكسار الروابط التساهمية يوافق في مخطط الطاقة ظهور ثقب حر في عصابة التكافؤ وإلكترونات حرّة في عصابة النقل .

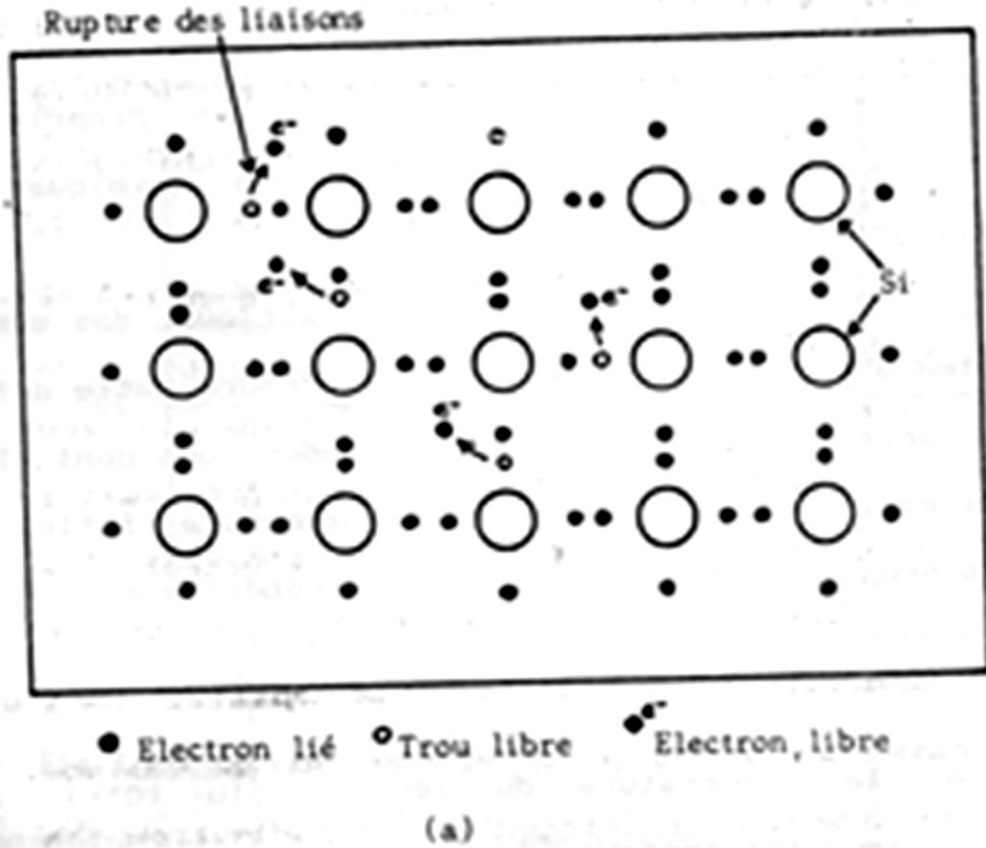
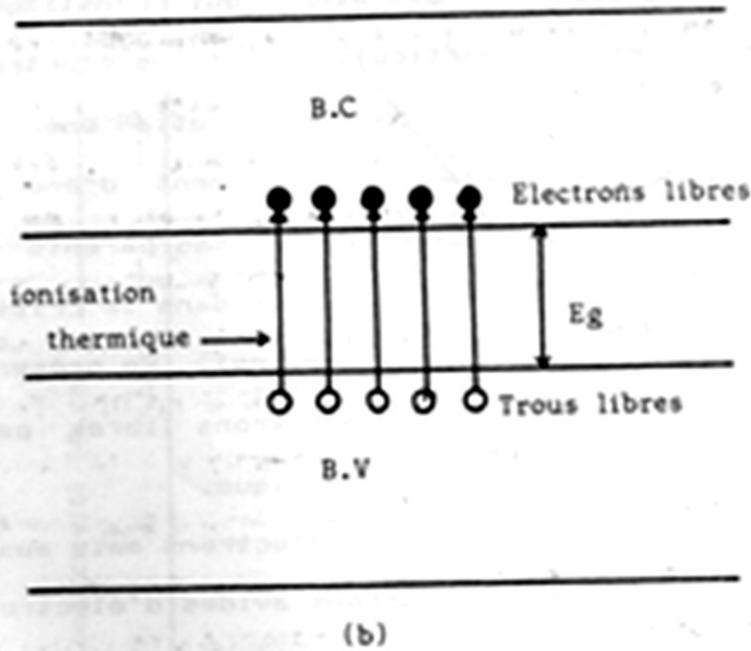


Fig.3.2 Production de paires électrons-trous par ionisation  
 a) Rupture des liaisons covalentes dans un semi  
 b) Equivalent énergétique.

ما يميز نصف الناقل في مخطط الطاقة الفاصل الطاقي ذو عرض من  $\sim 1\text{eV}$  (الحالة b) ما يجعل التآين الحراري معتبر في درجة الحرارة المتوسطة و بالتالي تولد حاملات الشحنة الحرة ، مقابل ذلك الفاصل الطاقي عريض جدا في العوازل (c)، أو لا يوجد في النواقل (b) بسبب تداخل عصابات النقل و التكافؤ

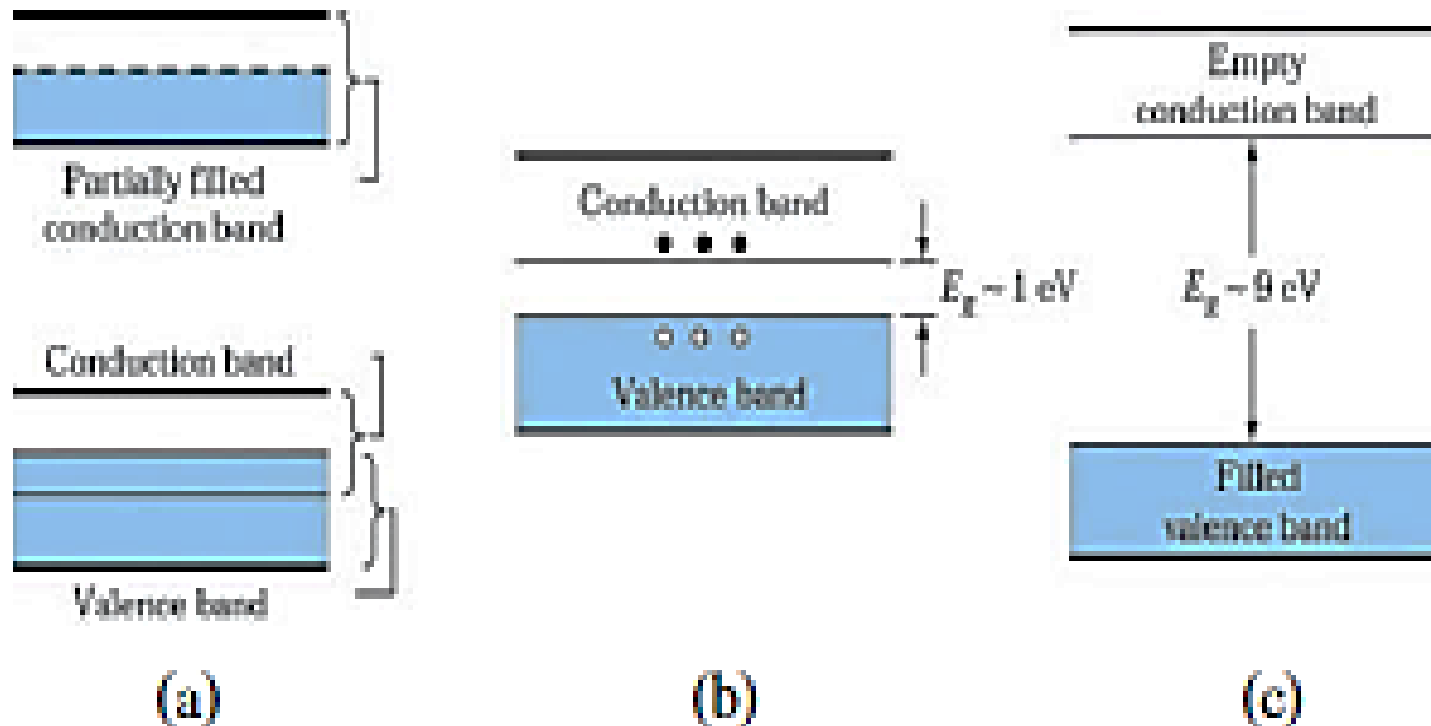


Fig. 15 Schematic energy band representations of (a) a conductor with two possibilities (either the partially filled conduction band shown at the upper portion or the overlapping bands shown at the lower portion), (b) a semiconductor, and (c) an insulator.

حاملات الشحنة وبنية العصابات ل (a) السيليسيوم ذو فاصل طاقى غير مباشر  
 و ل (b) ارسنيك الغاليوم ذو فاصل طاقى مباشر

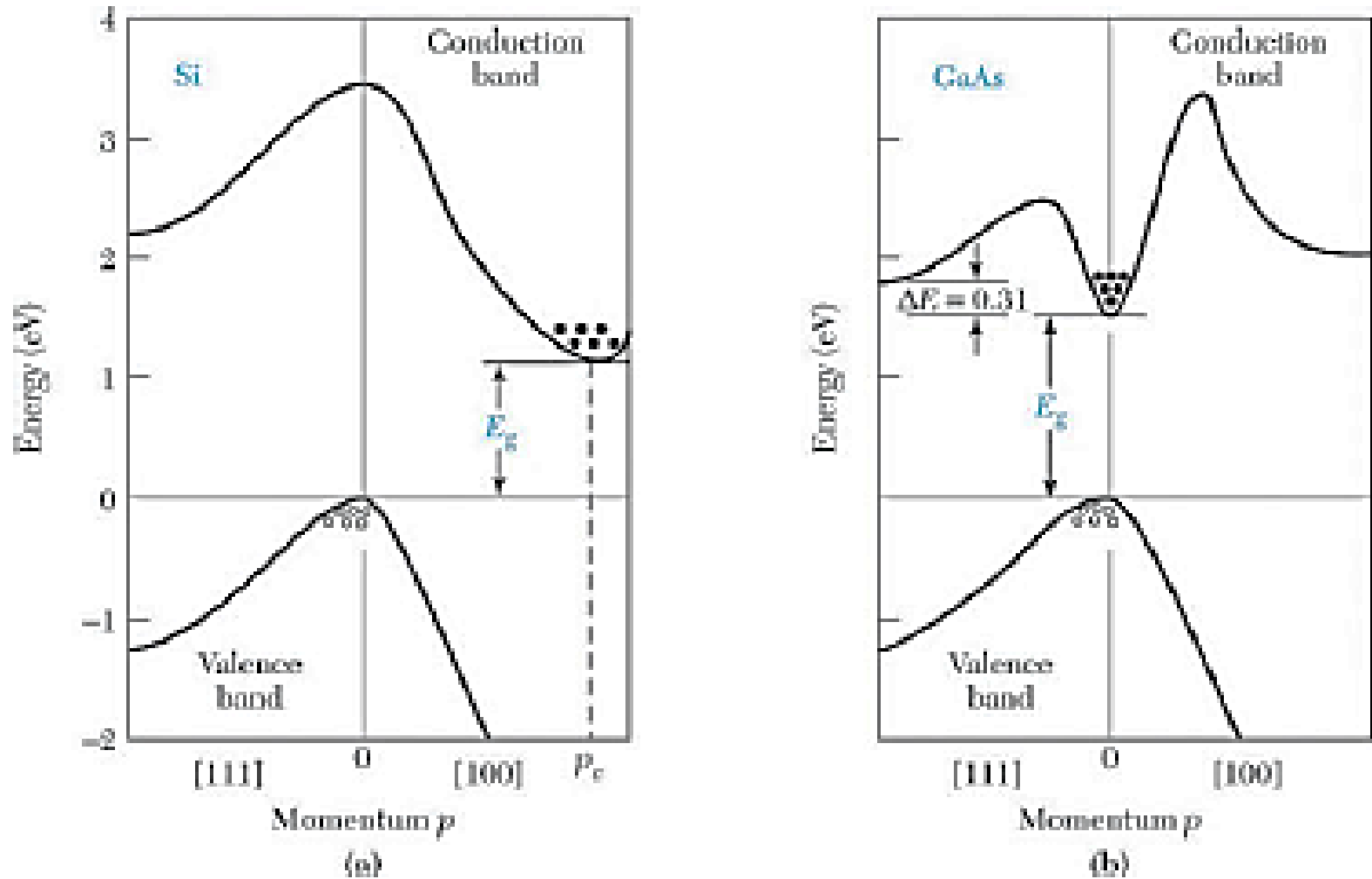
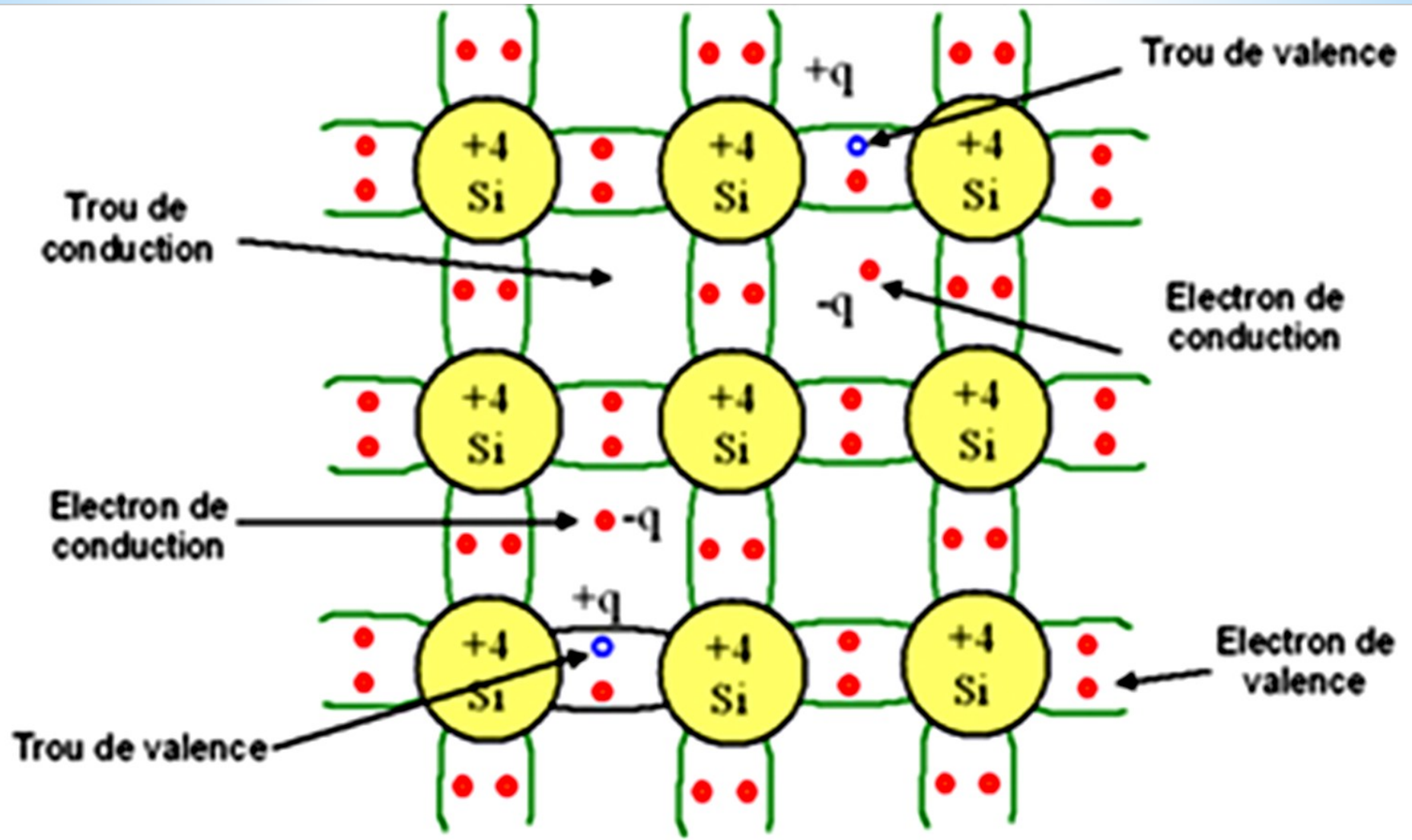


Fig. 14 Energy band structures of (a) Si and (b) GaAs. Circles (o) indicate holes in the valence bands and dots (\*) indicate electrons in the conduction bands.

في نصف ناقل جوهري يتولد بفعل الحرارة تركيز متساوي من الالكترونات  
 و الثقوب  $n = p = n_i$



التركيز الجوهري  $n_i$  متأثر بدرجة الحرارة و بعرض الفاصل الطاقى  $E_g$

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(\frac{E_V - E_C}{2 \cdot k_B T}\right) \text{ و } E_g = E_C - E_V \text{ حيث}$$

مع شرط الاتزان الترموديناميكي :  $n \cdot p = n_i^2$

و

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_C}{k_B T}\right) \quad p = N_v \exp\left(\frac{E_V - E_F}{k_B T}\right)$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2} \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_t^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2}$$

تركيز الالكترونات الحرة ( $\text{cm}^{-3}$ ) (في عصابة النقل) و الثقوب الحرة (في عصابة التكافؤ) حسب انطلاقا من العبارات العامة :

$$n = \int_{E_C}^{+\infty} N_C(E) \cdot f(E) dE ; \quad p = \int_{-\infty}^{E_V} N_V(E) \cdot (1 - f(E)) dE$$



حيث  $f(E)$  دالة فارمي - ديراك

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)}$$

في نصف ناقل غير منحط تقرب دالة فارمي - ديراك الى دالة ماكسويل - بولتزمان :

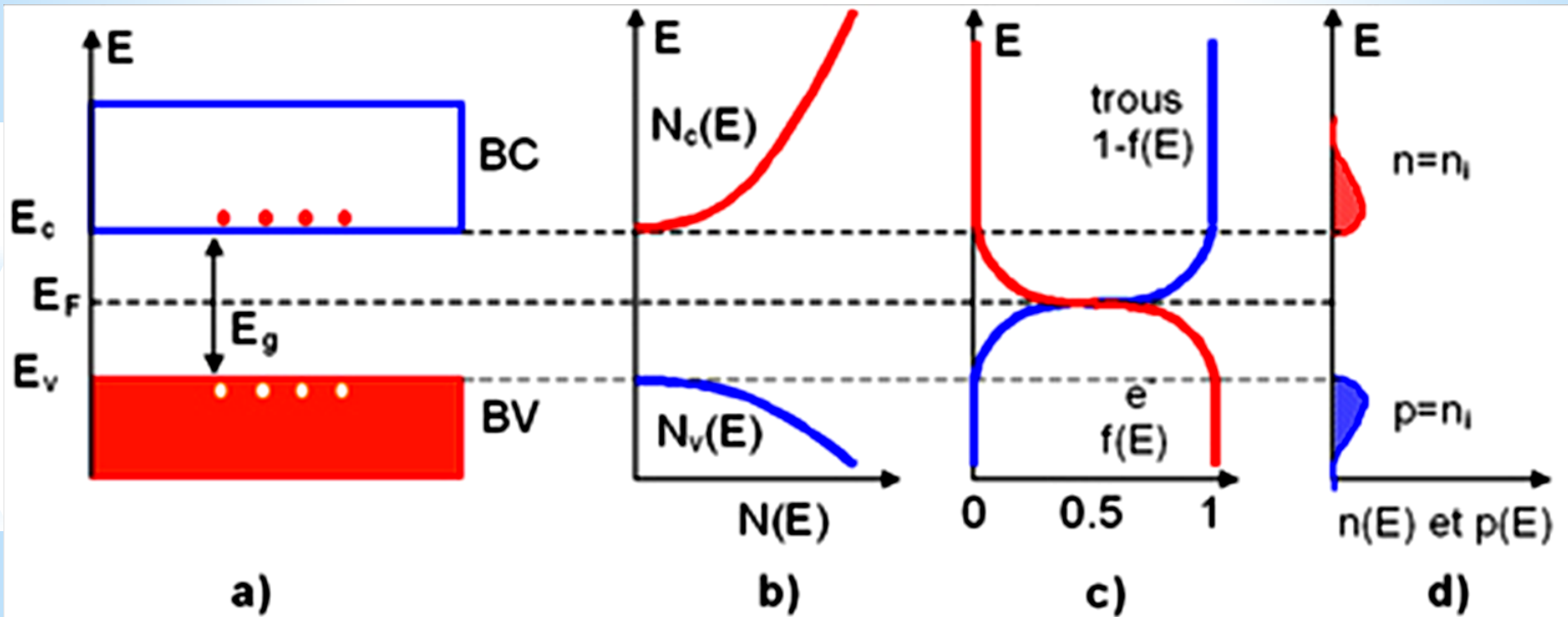
$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{k_B T}\right)} \cong \exp\left(\frac{E_f - E}{k_B T}\right) \text{ و } 1 - f(E) \cong \exp\left(\frac{E - E_f}{k_B T}\right)$$

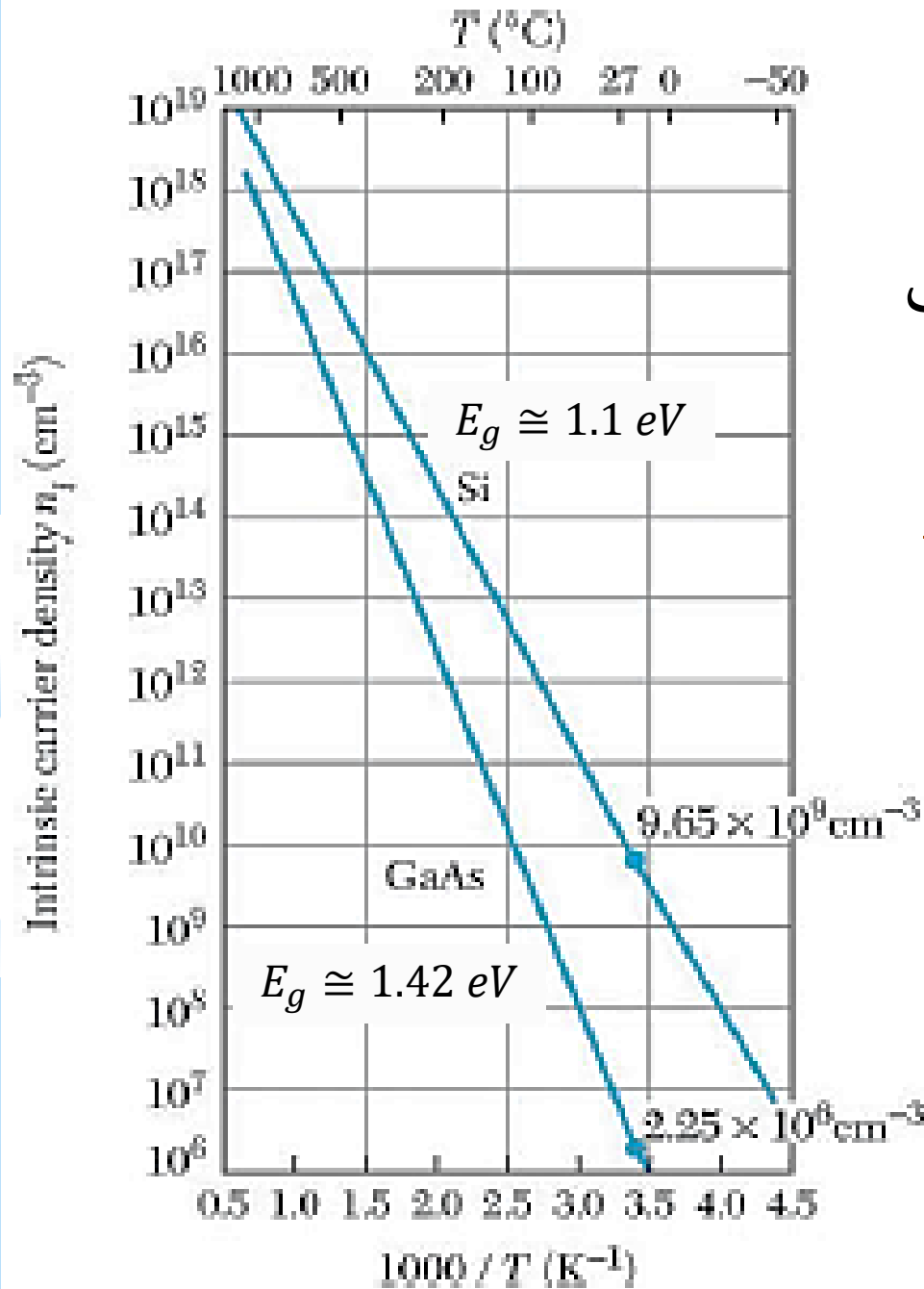
بالتالي وضعية مستوى فارمي  $E_{Fi}$  في نصف ناقل جوهري تستنتج بالمساواة بين عبارتي  $n$  و  $p$  ( $n = p = n_i$ ) ،

$$E_{Fi} = \left(\frac{E_C + E_V}{2}\right) + \left(\frac{k_B T}{2}\right) \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \cong \frac{E_C + E_V}{2}$$

من اجل درجة حرارة الاعتيادية لدينا  $k_B T \ll E_g$  أي  $E_{Fi}$  في جوار منتصف الفاصل الطاقى

تساوي تراكيز حاملات الشحنة في نصف ناقل جوهري ينتج عنه تموقع مستوى فارمي في جوار منتصف الفاصل الطاقى





التركيز الجوهرى متأثر بدرجة الحرارة  
و بالفاصل الطاقى تبعاً للمنحنى في  
الشكل بالنسبة لنصف ناقل Si و نصف  
ناقل GaAs

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(\frac{E_v - E_c}{2. k_B T}\right)$$

في غياب حقل كهربائي خارجي (غياب الاستقطاب) ، تتحرك الحاملات الحرة بطريقة عشوائية تحت تأثير الحرارة و التصادم مع ذرات البلور و التيار الكهربائي الكلي معدوم. عندما نستقطب قضيب نصف ناقل طوله  $L$  بجهد  $U$  تخضع حاملات الشحنة لحقل كهربائي  $E = U/L$  ،

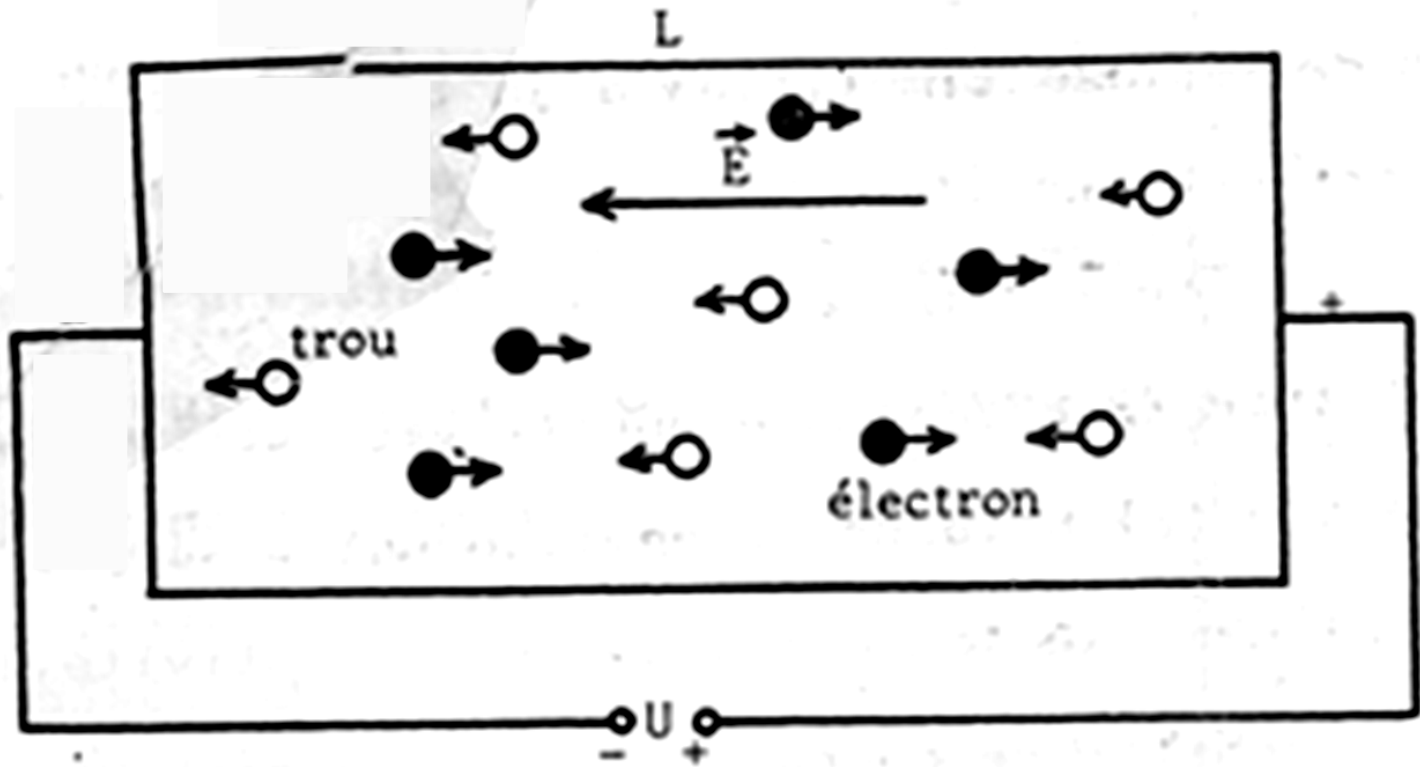


Fig.3.6 Entraînement des porteurs de charge libres sous l'effet d'un champ électrique externe.

التيار الكهربائي المتولد ،  $I = I_n + I_p = q \cdot S (n \cdot v_n + p \cdot v_p)$  ،

حيث :  $v_n = \mu_n \cdot E$  ،  $v_p = \mu_p \cdot E$  سرعة جرحاملات الشحنة بالحقل تتحرك الالكترونات عكس اتجاه الحقل المطبق و تتحرك الثقوب مع اتجاهه ، هذا ما يعرف بألية جرحاملات بالحقل . إذا كان  $\ell$  المسار الحر الوسطي لحامل شحنة بين تصادمين متتاليين *libre parcours moyen* .

و  $t$  الزمن المتوسط بين تصادمين (زمن الاسترخاء) و  $v$  السرعة المتوسطة لجرحاملات ،  $v = \ell / t = \gamma \cdot t$  و  $\gamma = (e E / m^*)$  إذن :  $v = (e E / m^*) \cdot t$  الكمية  $t$  تعرف بحركية حامل الشحنة ، من اجل الالكترونات  $\mu_n = (e t / m_e^*)$  و من أجل الثقوب  $\mu_p = (e t / m_t^*)$  و منه

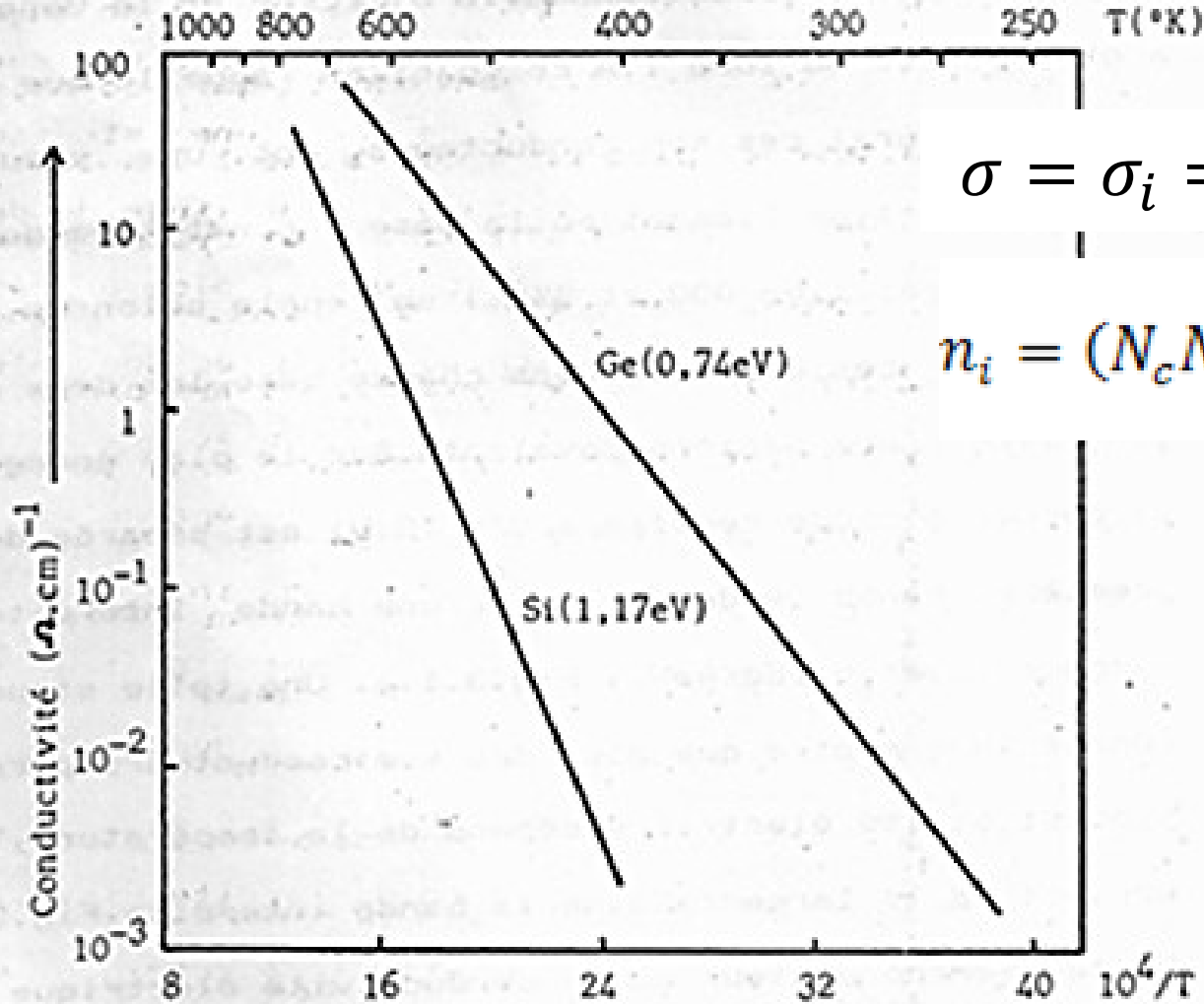
إذن  $v_n = \mu_n \cdot E$  ،  $v_p = \mu_p \cdot E$  ، من أجل نصف ناقل ذاتي  $I = I_n + I_p = q \cdot S (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) E$

$I = I_n + I_p = q \cdot S \cdot n_i (\mu_n + \mu_p) E$  و منه  $n = p = n_i$

كثافة التيار  $J = \frac{I}{S} = q \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot E = \sigma \cdot E$

هي الناقلية الكهربائية  $\sigma = \sigma_i = q \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p)$  **13**

الناقلية الكهربائية مرتبطة بكل من درجة الحرارة و الفاصل الطاقى من خلال التركيز الجوهرى  $n_i$  و بطبيعة نصف الناقل عبر  $\mu_n, \mu_p$ .  
نعرف المقاومة  $\rho = 1/\sigma$ .



$$\sigma = \sigma_i = q \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p)$$

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(\frac{E_v - E_c}{2 \cdot k_B T}\right)$$

Fig.3.1.b Variation de la conductivité électrique avec T et  $E_g$ .