

الفصل الثالث عشر
Chapter Thirteen

أشباه الموصلات
Semiconductors

obeikandi.com

مسألة (13.1) Problem

تم تطعيم قطعة من الجيرمانيوم (Ge) في درجة حرارة الغرفة بشوائب موجبة $Donors$ بنسبة $(1:10^8)$.
أوجد مقاومة الجيرمانيوم (ρ) إذا علمت أن تحركية الثقوب ($\mu_p = 1800 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$)
وتحركية الإلكترونات ($\mu_n = 3800 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$).

الحل Solution

إن العلاقة الرياضية بين كل من المقاومة (ρ) والإيصالية (σ) هي :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

إلا أن الإيصالية :

$$\sigma = (n \mu_n + p \mu_p) e$$

إننا نحتاج لمعرفة قيمتي كل من n و p ، وهذا ما يحتاج إلى معرفة كل من الكثافة والوزن الذري للجيرمانيوم، وبالرجوع إلى الجداول نجد أن :

$$\text{كثافة الجيرمانيوم} = 5.32 \text{ gm} / \text{cm}^3$$

$$\text{الوزن الذري} = 72.6$$

من المعروف أن :

$$\frac{n}{N_A} = \frac{d}{A}$$

وهكذا :

$$\begin{aligned} n_{Ge} &= 6.02 \times 10^{23} \frac{\text{atoms}}{\text{mole}} \times \frac{1 \text{ mole}}{72.6 \text{ gram}} \times 5.32 \frac{\text{gram}}{\text{cm}^3} \\ &= 4.41 \times 10^{22} \end{aligned}$$

وهكذا :

$$N_D = \frac{1}{10^8} \times 4.41 \times 10^{22} = 4.41 \times 10^{14} \text{ atom} / \text{cm}^3$$

$$n \cong N_D$$

ولكن للجيرمانيوم :

$$n_i = 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^3$$

$$p = \frac{(2.5 \times 10^{13})^2}{4.41 \times 10^{14}} = 1.42 \times 10^{12} \left(\frac{\text{mole}}{\text{cm}^3} \right)$$

وبما أن $n \gg p$ نجد أن :

$$\sigma \cong n\mu_n e$$

$$= 4.41 \times 10^{14} \times 3800 \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$= 0.268 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 3.72 \Omega \cdot \text{cm}$$

مسألة (13.2) Problem

ناقل معدني يحتوي السنتمتر المكعب الواحد منه (10^{23}) إلكترونات حراً *Free Electrons*، وتبلغ مقاومته *Resistivity* ($5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$) أوجد مقدار تحركية الإلكتروناته الحرة *Electron Mobility*.

الحل Solution

عدد الإلكترونات الحرة في السنتمتر المكعب الواحد : ($n = 10^{23} \text{ cm}^{-3}$)

مقاومية الناقل المعدني : ($\rho = 5.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$)

المطلوب إيجاد تحركية الإلكترونات الحرة : $\mu_n = ?$

من المعادلة العامة للإيصالية (σ) نجد أن :

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_p) e$$

وبما أن الناقل معدني فإن ناقلات التيار هنا هي عبارة عن الإلكترونات، أي أن :

$$n \gg p$$

$$\sigma = n\mu_n e$$

$$\mu_n = \frac{\sigma}{n e}$$

والعلاقة العامة بين المقاومة والإيصالية بشكل عام هي :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{5.0 \times 10^{-5} \Omega.cm}$$

$$= 2.0 \times 10^4 (\Omega.cm)^{-1}$$

$$\mu_n = \frac{2.0 \times 10^4 (\Omega.cm)^{-1}}{(1.0 \times 10^{23} cm^{-3})(1.6 \times 10^{-19} C)}$$

$$= 1.25 cm^2 / V.s$$

مسألة (13.3) Problem

شريحة من السليكون الموجب *P- Type Silicon Wafer* ، مقاومته *Resistivity* تساوي $(100 \Omega.m)$ ، وتبلغ تحركية الإلكترونات فيها $(0.12 m^2 V^{-1} sec^{-1})$ وهي تساوي ثلاثة أضعاف تحركية الثقوب ، أوجد منسوب التطعيم *Acceptor Level* لشريحة السليكون.

الحل Solution

مقاومية السليكون الموجب : $(\rho = 100.0 \Omega.m)$
 تحركية الإلكترونات : $(\mu_n = 0.12 m^2 / V.s)$
 وهذه تساوي ثلاثة أضعاف تحركية الثقوب : $(\mu_p = 0.04 m^2 / V.s)$
 المطلوب تحديد منسوب التطعيم.

لتحديد منسوب التطعيم نحتاج إلى معرفة كل من عدد ذرات السليكون في السنتمتر المكعب الواحد وكذلك عدد حاملات التيار الموجبة (الفجوات).

إن عدد ذرات السليكون في السنتمتر المكعب الواحد هو عبارة عن :

$$n = \frac{N_A d}{M}$$

حيث (d) هي الكثافة الحجمية للسليكون، (N_A) عدد أفوكادرو و (M) هي الكتلة المولية للسليكون.

$$n = \frac{(6.02 \times 10^{23} \text{ atom / mol})(2.33 \text{ g / cm}^3)}{(28.1 \text{ g / mol})}$$

$$= 4.992 \times 10^{22} \text{ Atoms / cm}^3$$

$$= 5.0 \times 10^{28} \text{ Atoms / m}^3$$

أما عدد الفجوات :

$$p = \frac{\sigma}{\mu_p e}, \quad \sigma = \frac{I}{\rho} = \frac{I}{100.0 \Omega.m} = 0.01(\Omega.m)^{-1}$$

$$p = \frac{0.01 (\Omega.m)^{-1}}{(0.04 \text{ m}^2 / \text{V.s}) 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 1.56 \times 10^{18} \text{ Atoms / m}^3$$

$$\frac{5.0 \times 10^{28} \text{ Atom / m}^3}{1.56 \times 10^{18} \text{ Atoms / m}^3} = 3.2 \times 10^{10}$$

إذن منسوب التطعيم هو :

أي أنّ كل (3.2×10^{10}) سيليكون فيها ذرة واحدة شائبة : $(3.2 \times 10^{10} : 1)$.

مسألة (13.4) Problem

نريد تحفيز الإلكترونات في مادة السيليكون عند درجة حرارة الغرفة (20°C) ، وذلك باستخدام موجة ضوئية.

أوجد أقصى طول لهذه الموجة يمكن استخدامه لهذا الغرض.

الحل Solution

درجة حرارة الغرفة : (20°)

المادة التي نريد تحفيزها هي السيليكون.

المطلوب : طول الموجة المستخدمة لهذا الغرض.

نحن نعلم أنّ الإلكترون يمكن تحفيزه إذا امتلك طاقة تمكنه من اجتياز الفجوة أو التغلب على طاقة الفجوة (E_G)، وعلاقة ذلك بالطول الموجي هي كما تعلم :

$$\lambda = \frac{1.24}{E_G}$$

حيث تقاس (E_G) بوحدات الإلكترون فولت (eV) وتقاس (λ) بالميكرون. كما نعلم بأن طاقة الفجوة في السليكون تساوي :

$$E_G = 1.1 eV$$

$$\lambda = \frac{1.24}{1.1 eV} = 1.127 \mu m.$$

مسألة (13.5) Problem

إذا كانت احتمالية وجود الكترون يحمل مقدارا من الطاقة قدره ($0.3 eV$) فوق منسوب طاقة فيرمي *Fermi Energy Level* هي (1%) أوجد درجة الحرارة المناسبة لذلك.

الحل Solution

عدد الكترونات الجيرمانيوم عند درجة الحرارة : $20^\circ C$

عدد الكترونات الجيرمانيوم عند درجة الحرارة : $40^\circ C$

من خلال دراستنا لموضوع التوصيل الكهربائي في الأجسام الصلبة، وجدنا بأن كثافة الالكترونات في السنتمتر الواحد لمادة الجيرمانيوم - شبه الموصلة - نعبر عنها رياضياً بالمعادلة :

$$n_i^2 = 3.1 \times 10^{23} T^3 e^{-910/T}$$

حيث (T) هي درجة الحرارة مقاسة بالكلفن، إذا عند درجة الحرارة $20^\circ C$:

$$T = 20^\circ C + 273 = 293 K$$

$$n_i^2 = 3.1 \times 10^{23} (293)^3 (e^{-910/293})$$

$$= 3.49 \times 10^{29} (\text{electron/cm}^3)^2$$

$$n_i = 5.9 \times 10^{14} \text{ electron/cm}^3$$

أما عند درجة الحرارة $40^\circ C$:

$$T = 40 + 273 = 313 K$$

$$n_i^2 = 3.1 \times 10^{23} (313)^3 e^{-910/313}$$

$$= 5.192 \times 10^{29} (\text{electron/cm}^3)^2$$

$$n_i = 7.2 \times 10^{14} \text{ electron/cm}^3$$

ملاحظة : لمزيد من التفاصيل يمكنك عزيزي الطالب الرجوع إلى كتاب " الفيزياء النظرية الأساسية " لمؤلفه الدكتور مروان بن أحمد الفهّاد.

مسألة (13.6) Problem

تتأثر الكترونات التوصيل في مادة الجيرمانيوم *Germanium* بدرجات الحرارة، أوجد عددها عند درجتي الحرارة $(20^\circ C)$ و $(40^\circ C)$ ثم قارن بينهما .

الحل Solution

الطاقة المطلوبة هي : $(E = E_F + 0.3 eV)$

الاحتمالية هي : $(P(E) = 1\%)$

درجة الحرارة المطلوبة : $(T = ?)$

نحن نعلم أنّ المعادلة الرياضية التي تعبّر عن هذه المتغيرات هي :

$$P(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$$

نعوض الآن عن الطاقة المطلوبة بالمقدار $(E_F + 0.3)$

$$0.01 = \frac{1}{e^{(E_F + 0.3 - E_F)kT} + 1}$$
$$= \frac{1}{e^{0.3/kT} + 1}$$

$$(0.01)(e^{0.3/kT}) + (0.01)(1) = 1$$

$$(0.01)(e^{0.3/kT}) + 0.01 = 1$$

$$\ln 0.01 + \ln e^{0.3/kT} = 0$$

نأخذ (\ln) للطرفين :

$$-4.6 + \frac{0.3 \text{ eV}}{kT} = 0$$

$$\frac{0.3}{kT} = 4.6$$

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$0.3 \text{ eV} = (4.6)(8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})T$$

$$= (39.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K})T$$

$$T = \frac{0.3 \text{ eV}}{39.6 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{eV}}{\text{K}} \right)} = 757.6 \text{ K}$$

مسألة (13.7) Problem

قطعة نقية من مادة الجيرمانيوم طولها (1.0 cm) وعرضها (2.0 mm) وسماكتها (1.0 mm) وتبلغ مقاومتها الطولية عند درجة الحرارة (20°C) ، (2160Ω) .

أوجد عدد الإلكترونات الموجودة في حزمة التوصيل لهذه القطعة.

Solution الحل

طول المقاومة : $(L = 1 \times 10^{-2} m)$

عرض المقاومة : $(w = 2 \times 10^{-3} m)$

أما مقدارها : $(R = 2160 \Omega)$

$$A = 0.2 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm} = 0.02 \text{ cm}^2$$

إذا بداية لابد من تحديد المعادلة الرياضية التي يمكننا استخدامها لتحديد عدد الإلكترونات لمادة الجيرمانيوم - شبه الموصلة - في حزمة التوصيل. والمعادلة هي :

$$\sigma = (\mu_n + \mu_p) e n$$

$$\mu_n = 3800 \text{ cm}^2 / V.s$$

$$\mu_p = 1800 \text{ cm}^2 / V.s$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

الموصلية :

$$\rho = R \frac{A}{L}$$

$$\rho = (2160 \Omega) \frac{(2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2)}{(1 \text{ cm})}$$

$$= 43.2 \Omega.cm$$

$$\sigma = \frac{1}{43.2 \Omega.cm} = 0.023 (\Omega.cm)^{-1}$$

$$n = \frac{\sigma}{(\mu_n + \mu_p) e} = \frac{0.023 (\Omega.cm)^{-1}}{(3800 + 1800) \text{ cm}^2 / V.s (1.6 \times 10^{-19} C)}$$

$$= 2.584 \times 10^{13} \text{ electron/cm}^3$$

مسألة (13.8) Problem

تبلغ كثافة معدن التتكتستين (18.89 cm^{-3}) Density، إذا كان عدد الإلكترونات الحرة في كل ذرة من ذراته هو اثنان فقط. أوجد مقدار طاقة منسوب فيرمي للتتكتستين.

الحل Solution

الكثافة الحجمية لمعدن التتكتستين : $(d = 18.89 \text{ g/cm}^3)$

عدد الإلكترونات الحرة للذرة الواحدة : 2.0

نحن نعلم بأن عدد الإلكترونات لوحدته الحجم يمكننا إيجادها من المعادلة العامة :

$$\frac{n}{N_A} = \frac{d}{M}$$

حيث (M) هي الكتلة المولية للتتكتستين وتساوي : (183.85 g/mol)

$$n = \frac{N_A d}{M} = \frac{(6.02 \times 10^{23} \text{ electron/mol})(18.89 \text{ g/cm}^3)}{(183.85 \text{ g/mol})}$$

$$= 6.185 \times 10^{22} \text{ electron/cm}^3$$

$$2n = 2(6.185 \times 10^{22}) = 1.237 \times 10^{23} \text{ electron/cm}^3$$

كما نعلم بأن المعادلة العامة لطاقة منسوب (مستوى) فيرمي يمكننا دائماً التعبير عنها رياضياً بالمعادلة :

$$E_F = \frac{0.121 h^2 n^{2/3}}{m}$$

حيث إن :

$(h = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s})$: هو ثابت بلانك ويساوي

$(m = 9.1 \times 10^{-28} \text{ g})$: هي كتلة الإلكترون وتساوي مقاسة بالغرام :

$$E_F = \frac{0.121(4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s})^2 (1.237 \times 10^{23} / \text{cm}^2)^{2/3}}{(9.1 \times 10^{-28} \text{ g})}$$

$$= 3.97 \times 10^{12} \text{ eV}$$

وكما نلاحظ أن منسوب فيرمي يمتلك طاقة عالية جداً في معدن التنكستين .

مسألة (13.9) Problem

ثنائي مصنوع من مادة الجيرمانيوم *Germanium Diode*، تبلغ مقاومته *Resistivity* عندما يكون منحازاً انحيازاً أمامياً ($2.0 \Omega \cdot \text{cm}$) وفي حالة الانحياز العكسي ($1.0 \Omega \cdot \text{cm}$).

أوجد مقدار الجهد الحاجز *Potential Barrier*.

الحل Solution

إن الصيغة الرياضية التي يمكننا اعتمادها لإيجاد مقدار الجهد الحاجز في الثنائي البلوري هي :

$$V_o = V_T \ln \frac{N_p}{N_n}$$

حيث : (N_p) تساوي عدد الفجوات في البلورة الموجبة.
 عند التوازن الحراري.

(N_n) تساوي عدد الإلكترونات في البلورة السالبة
 عند التوازن الحراري أيضاً.

إن الصيغة الرياضية لمعادلة الموصلية (σ) هي :

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)e$$

وفي البلورة من النوع الموجب فإن : $p = N_p$ ، كما أن : $\sigma = p\mu_p e$

وفي البلورة من النوع السالبة فإن : $n = N_n$ ، كما أن : $\sigma = n\mu_n e$

$$\rho = \frac{l}{\sigma} \quad \text{ومن المعروف لدينا أن:}$$

$$N_p = \frac{l}{eN_A \mu_p} = \frac{l}{(1.6 \times 10^{-19} C)(1800 \text{ cm}^2 V.s)(2.0 \Omega \text{ cm})}$$

$$= 1.736 \times 10^{15} / \text{cm}^3$$

$$N_n = \frac{l}{eN_n \mu_n} = \frac{l}{(1.6 \times 10^{-19} C)(3800 \text{ cm}^2 / V.s)(1.0 \Omega \text{ cm})}$$

$$= 1.645 \times 10^{15} / \text{cm}^3$$

$$n_i = 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3 \quad \text{وللجيرمانيوم فإن } (n_i) \text{ هي:}$$

$$V_o = V_T \ln \frac{N_p N_n}{n_i^2}$$

$$= 0.0259 \ln \frac{(1.736 \times 10^{15} / \text{cm}^2)(1.645 \times 10^{15} / \text{cm}^3)}{(2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3)^2}$$

$$= 0.0259 \ln 4569.2$$

$$= 0.218 \text{ eV}$$

مسألة (13.10) Problem

يبلغ تيار التشبع العكسي في ثنائي بلوري ($8.0 \mu A$)، أوجد مقدار التيار الأمامي لقيم فرق الجهد الآتية: ($0.1V$)، ($0.3V$)، ($0.4V$).

الحل Solution

$$I_o = 8.0 \times 10^{-6} A \quad \text{تيار التشبع العكسي}$$

$$I = I_o = (0.4V, 0.3V, 0.1V) \quad \text{مقدار التيار الأمامي لفرق الجهد}$$

والعلاقة بين درجة الحرارة و (V_T) كما نعلمها تساوي :

$$V_T = \frac{T}{11600}$$

على أن تكون (T) درجة الحرارة مقاسة بالكلفن وحدة قياس درجة الحرارة في (SI) النظام الدولي للقياس.

$$T = 100^\circ C + 273 = 373 K$$

$$V_T = \frac{373}{11600} = 0.0322 V$$

ومعلوم لدينا أنّ ($\eta = I$) في حالة الجيرمانيوم.

$$I = (25.0 \times 10^{-6} A) e^{(0.18V/0.0322V)}$$

$$= 6.7 \times 10^{-3} A = 6.7 mA$$

$$R = \frac{\eta V_T}{I} = \frac{(I)(0.322 V)}{(6.7 \times 10^{-3} A)} = 4.8 \Omega$$

عندما يكون الثنائي منحازاً انحيازاً عكسياً :

$$I = -I_o = -25 \times 10^{-6} A$$

$$R = \frac{\eta V_T}{I}$$

أما المقاومة :

$$= \frac{(1.0)(0.0322 V)}{(-25.0 \times 10^{-6} A)} = -128.8 \Omega$$

هذا يعني أنّ الإشارة السالبة في المقاومة ترافق الانحياز العكسي الثنائي البلوري .

نحن نعلم أن العلاقة الرياضية التي تربط بين التيار الأمامي (I) والتيار التشبع العكسي (I_0) هي :

$$I = I_0 e^{39V}$$

$$I_1 = (8.0 \times 10^{-6} A)(e^{39(0.4)}) \quad -1$$

$$= 47.65 A$$

$$I_2 = (8.0 \times 10^{-6} A)(e^{39(0.3)}) \quad -2$$

$$= 0.96 A$$

$$I_3 = (8.0 \times 10^{-6} A)(e^{39(0.1)}) \quad -3$$

$$= 3.9 \times 10^{-4} A$$

مسألة (13.11) Problem

ثنائي بلوري مصنوع من مادة الجيرمانيوم، يبلغ مقدار تيار تشبعه العكسي ($25 \mu A$)، تم وصله بفرق جهد مقداره ($0.18 V$).

أوجد المقاومة الحركية للثنائي عند درجة الحرارة ($100^\circ C$) في الحالتين :

1- الثنائي منحاز انحيازاً أمامياً.

2- الثنائي منحاز انحيازاً عكسياً.

الحل Solution

تيار التشبع العكسي : ($I_0 = 25.0 \times 10^{-6} A$)

فرق الجهد بين طرفي الثنائي البلوري : ($V = 0.18 Volt$)

درجة الحرارة : ($T = 100^\circ C$)

أوجد المقاومة الحركية في الاتجاهين الأمامي والعكسي.

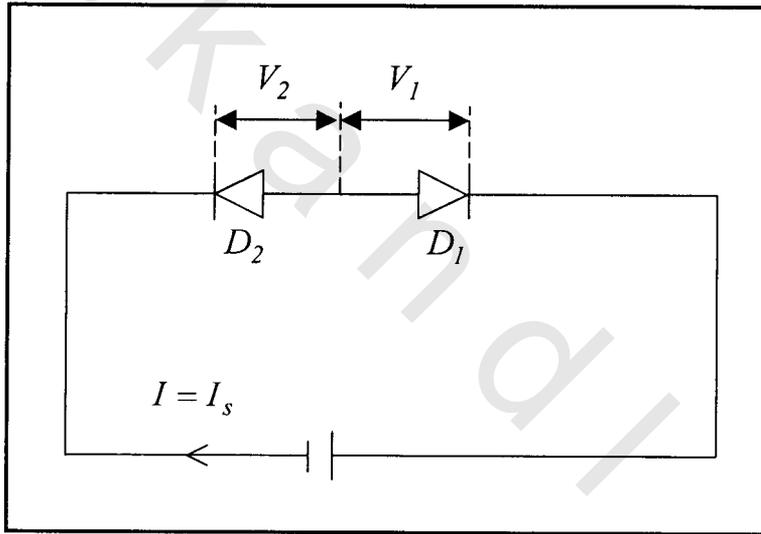
1- عندما يكون الثنائي منحازاً انحيازاً أمامياً : $I = I_0 e^{V/\eta V_T}$

مسألة (13.12) Problem

ثنائيان بلوريان تم وصل طرفيهما الموجبين ببعضهما، تم وصل الطرفين السالبين ببطارية تعطي فرقاً في الجهد مقداره $(5.0 V)$.

أوجد فرق الجهد خلال كلٍ من الثنائيين عند درجة الحرارة $(20^\circ C)$ ، علماً بأن تأثير زينر *Zener Effect* يظهر عند فرق الجهد أكبر من $(5.0 V)$.
ملاحظة: (عوض عن $\eta = 2$ وكذلك عن $V_T = 0.026 V$).

الحل Solution



شكل (13.1)، المسألة (13.12)

في الثنائي الأول (D_1) :

$$I_s = I_s \left(e^{\left(\frac{V_1}{\eta V_T} \right)} - 1 \right)$$

$$= I_s e^{\frac{V_1}{\eta V_T}} - I_s$$

$$2I_s = I_s e^{\frac{V_1}{\eta V_T}}$$

$$\ln 2 = \ln e^{\frac{V_1}{\eta V_T}} = \frac{V_1}{\eta V_T}$$

$$\therefore V_1 = (\ln 2)(\eta V_T)$$

من الواضح أنّ الثنائيين مصنوعان من السليكون ذلك أنّ $(\eta = 2)$:

$$\begin{aligned}\therefore V_1 &= (0.693)(2)(0.0259) \\ &= 0.036 \text{ Volt}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\therefore V_2 &= 5.0 - 0.036 \\ &= 4.963 \text{ Volt}\end{aligned}$$