جامعة تكريت
كلية العلوم
قسم الفيزياء

أ.د.نجاة احمد دحام

Semiconductors

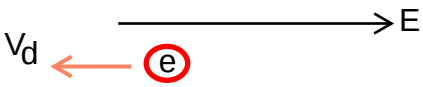
(1-2) المقدمة Introduction

تصنف المواد في الطبيعة حسب توصيليتها الكهربائية (Electrical Conductivity) عند درجة حرارة الغرفة الى مواد موصلة (Conductor) تمتلك توصيلية كهربائية عالية بحدود (10^{3}-10^{8}(Ω.cm) $^{-1}$)، ومواد عازلة (Insulators) ذات توصيلية واطئة جداً بحدود (10^{-18}-10^{-8}(Ω.cm)$^{-1}$)، ومواد شبه موصلة (Semiconductor) توصيلتها بحدود (10^{-8}-10^{3}(Ω.cm)$^{-1}$)، اي ان توصيلتها تقع بين المواد الموصلة والعازلة.

(2-2) الموصلات Conductors

يقصد بالموصلات الكهربائية تلك المواد التي تتميز بمقاوميتها الواطئة جدا" للتيار الكهربائي وتأتي المعادن في مقدمة هذه المواد ومنها الفضة والنحاس والذهب والألمنيوم.ففي درجات الحرارة الاعتيادية تتميز الموصلات عن بقية المواد في أنها تحتوي على عدد كبير من الالكترونات الحرة التي تتحرك ضمن المادة وفي اتجاهات مختلفة. فعند تسليط مجال كهربائي خارجي بين طرفي المادة فان الالكترونات المادة تنساق تحت تأثير المجال الكهربائي مولدة تيارا" كهربائيا". وان سرعة الانسياق هي معدل السرعة وهذا المعدل يتناسب مع شدة المجال الكهربائي وتعطى بالعلاقة الآتية:

$$V_d = -\mu E \quad \text{..... (2.1)}$$



حيث ان μ: تحركيه الإلكترون.

إن الإشارة السالبة في المعادلة أعلاه تدل على إن اتجاه حركة الإلكترون عكس اتجاه المجال الكهربائي.

(3-2) توصيلية المعادن Metal Conductivity

يمثل الشكل (1-2) جسيما" معدنيا" طوله (L) cm ومساحة مقطعة العرضي cm^2 (A) وقد ربط طرفاه إلى قطبي بطارية فرق جهدها Volt (V) مما سبب مرور تيار كهربائي في المعدن قدرة Amp (I). استنادا" إلى قانون اوم فان العلاقة بين التيار وفرق الجهد هي:

$$V = IR \quad \text{..... (2.2)}$$

حيث ان R: مقاومة المعدن وتعرف بالعلاقة الآتية:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{..... (2.3)}$$

حيث ان ρ: المقاومية الكهربائية للمعدن ووحدتها اوم–متر.

بتعويض المعادلة (2.3) في (2.2) نحصل على:

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho}\frac{V}{L} \quad \text{.........} \quad (2.4)$$

ولما كان الطرف الأيسر من المعادلة يساوي كثافة التيار الكهربائي(J) المار عبر المقطع العرضي للمعدن وكان $\frac{V}{L}$ في الطرف الأيمن يساوي شدة المجال الكهربائي(E). وكان $\frac{1}{\rho}$ يساوي التوصيلة الكهربائية(ρ) لذلك يمكن كتابة المعادلة بالشكل الاتي:

$$J = \sigma E \quad \text{.........} \quad (2.5)$$

نفرض إن المعدن يحتوي على n من الالكترونات الحرة في كل وحدة الحجم ولما كانت شحنة الإلكترون هي(e-) فان مجموع الشحنات الحرة داخل المعدن هي:

$$q = -neAL \quad \text{.........} \quad (2.6)$$

وإذا معدل سرعة انسياق الالكترونات في المعدن يساوي V_d فان الزمن المستغرق لمرور الشحنة q عبر المقطع العرضي هو ($\frac{L}{V_d}$) وبهذا يكون التيار بالشكل الأتي:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q}{L}V_d \quad \text{.........} \quad (2.7)$$

$$\therefore J = \frac{q}{AL}.V_d \quad \text{.........} \quad (2.8)$$

وبتعويض المعادلة (2.8) في المعادلة (2.5) ونعوض المعادلة (2.6) فيها نحصل على:

$$\frac{-neAL}{AL}.V_d = \sigma E \quad \text{.........} \quad (2.9)$$

$$-neV_d = \sigma E \quad \text{.........} \quad (2.10)$$

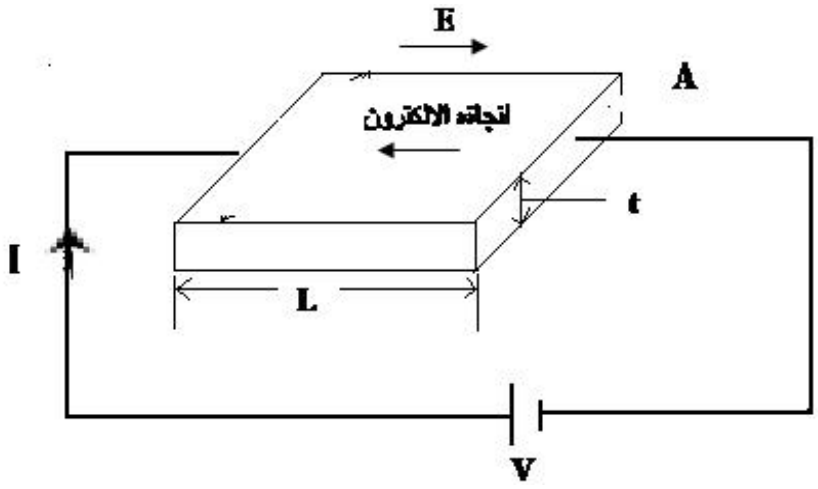
وبالتعويض في المعادلة (2.1) نحصل على:

$$\sigma = ne\mu \quad \text{.........} \quad (2.11)$$

نستنتج من المعادلة (2.11) ان التوصيلية تعتمد على عاملين هما:

1**ـكثافة الالكترونات الحرة في المادة.**

2ـ قابلية الالكترونات على التنقل داخل المادة تحت تأثير المجال الكهربائي.



الشكل (2-1) معدن يمر فيه تيار كهربائي.

(4-2) العوازل Insulators

إن تصنيف المواد الصلبة يعتمد أساسا" على الحركية (Mobility) التي تمتلكها الالكترونات في تلك المواد. فالمعادن تمتلك تحركيه عالية بينما تمتلك العوازل تحركيه واطئة أو شبة معدومة. فإذا كانت حزمة التكافؤ مملوءة بالإلكترونات وحزمة التوصيل فارغة يقال على البلورة أنها عازلة. اهم صفة في العوازل هي ان مقاوميتها الكهربائية تكون عالية(10^{14}-10^{22}(Ω.cm)) في حين تكون مقاومية المواد الموصلة واطئة جدا" بالمقارنة مع العوازل حيث تكون قيمتها (10^{-6} (Ω.cm)).

ألان وبعد ان أخذنا فكرة مبسطة عن الموصلات والعوازل فأنه من الطبيعي إن توجد بعض المواد الصلبة ذات تحركيه متوسطة تقع بين الموصلات والعوازل وتدعى أشباه الموصلات.

(5-2) أشباه الموصلات Semiconductors

وهي مواد تكون قابليتها على التوصيل للكهربائية في درجات حرارية أعلى من الصفر المطلق وعازلة عند درجات الحرارية الواطئة جداً ويقع توصيلها صمن المدى (10^{-8}-$10^{3}$$ohm^{-1}cm^{-1}$) ويتأثر توصيلها الكهربائي بعدد من العوامل مثل الحرارة والضوء والمجال المغناطيسي ويؤثر فيها وجود كميات ضئيلة من الذرات الشائبة وتأثر شبه الموصل بجميع هذه العوامل جعلت من شبه الموصل ذات أهمية بالغة في التطبيقات الالكترونية.

بدأ الاهتمام بدراسة المواد شبه الموصلة في أوائل القرن التاسع عشر ويعد السبب الرئيسي لهذا الاهتمام هو وجود هذه المواد بشكل كبير جداً في الطبيعة، السليكون مثلاً مادة شبه موصلة وهو المادة الأكثر توفراً في العالم بعد الأوكسجين، اذ تكون مركبات السليكا (الرمل) 25% من مكونات القشرة الأرضية.

ويمكن توضيح مميزات أشباه الموصلات بالنقاط التالية.

1- تمتلك مقاومة ذات معامل حراري سالب (Negative thermal coefficient).اي تقل المقاومة بارتفاع درجة الحرارة

2-تمتلك مقاومة نوعية تصل إلى(10^{-3}-10^{9}ohm.cm).

3- يكون اعتماد التوصيلية الكهربائية على درجة الحرارة معاكس للمعادن.ان توصيلية اشباه الموصلات قد تتناقص بانحدار سريع مع درجة الحرارة فعند درجات حرارة واطئة جدا تقترب من الصفر الكلفيني تصبح معظم بلورات المواد شبة الموصلة النقية والتامة عازلة

4- تمتلك نوعين من الشحنات وهي الالكترونات (Electrons) والفجوات (Holes) ولا تسلك في مقاومتها سلوكاً اومياً.

5- حساسة للضوء من خلال الظاهرة الكهروضوئية او التغير في مقاومتها.

6- يظهر شبه الموصل ذو النقاوة العالية جداً توصيلية ذاتية ولا يظهر ذلك عند درجات الحرارة الواطئة.

7- تلعب الشوائب دوراً كبيراً في تقليل مقاومتها الكهربائية.وكذلك قد تغير الشوائب التوصيلية السالبة لشبه الموصل الى توصيلية موجبة والعكس .

8 - تتأثر توصيلتها بالمجال المغناطيسي.

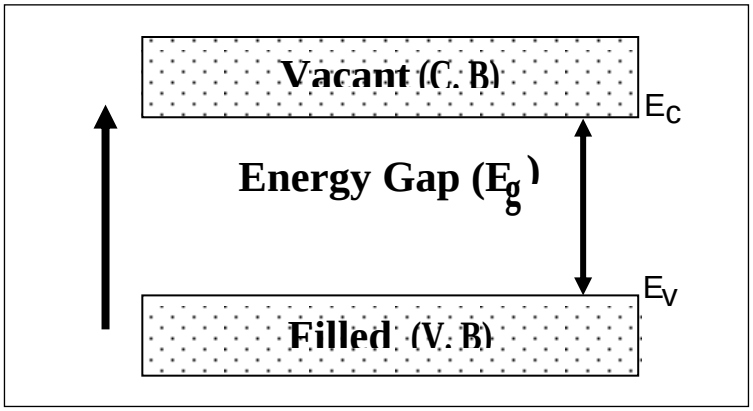
9- تمتلك اشباه الموصلات توصيلية كهربائية موجبة(p) فضلا عن توصيلية كهربائية سالبة(n) . وتكون توصيلية شبه موصل موجبة أذا كان التيار ناشئا عن حركة شحنات موجبة وتكون سالبة اذا كان التيار الكهربائي ناشئا عن حركة شحنات سالبة ويمكن تحديد اشارة حاملات التيار (اشارة التوصيلية)بوساطة تأثير هول.

وبهذا فان حقل فيزياء أشباه الموصلات قد دخل مجالات التطبيق والاستخدامات الحديثة.

(6-2) أنواع أشباه الموصلات:

(1-6-2) أشباه الموصلات الذاتية (النقية) Intrinsic Semiconductors

من خلال نموذج حزمة الطاقة (Energy Band Model) فأن حزمة التكافؤ (Valence Band) في أشباه الموصلات والتي تكون عادة مشغولة كلياً بالإلكترونات تنفصل عن حزمة التوصيل (Conduction Band) الفارغة كلياً من الالكترونات عند درجة الصفر المطلق (0K)، بوساطة فجوة صغيرة نسبياً تدعى بفجوة الطاقة (Energy Gap) وهي عبارة عن فرق الطاقة بين أوطأ او ادني (Bottom) نقطة في حزمة التوصيل (C.B) وأعلى (Top) نقطة في حزمة التكافؤ (V.B) كما في الشكل (2-2)، لذلك فانه يصعب على الإلكترون الانتقال من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل دون تجاوز هذه الفجوة (E_g)، ولهذا تعد المواد شبه الموصلة عازلة عند درجة الصفر المطلق. لكن زيادة درجة الحرارة عن الصفر المطلق تجعل عدداً من الالكترونات تكتسب طاقة حرارية (Thermal Energy) تمكنها من الانتقال من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل تاركة خلفها ما يسمى بالفجوات (Holes) في حزمة التكافؤ وهنا يتكون نوعين من حاملات الشحنة.



الشكل (2-2) رسم تخطيطي لحزم الطاقة في أشباه الموصلات النقية عند درجة الصفر المطلق.

(2-6-1-1) تركيز الالكترونات والفجوات في أشباه الموصلات الذاتية

Concentration of electrons and holes in Semiconductors

في أشباه الموصلات النقية فان معدل توليد زوج الإلكترون− فجوة (Electron-Hole) متساوي عادة إي إن ما يصل إلى حزمة التوصيل من الالكترونات يساوي عدد الفجوات المتولدة في حزمة التكافؤ وان كثافة الالكترونات في حزمة التوصيل التي يرمز لها (n) تساوي كثافة الفجوات في حزمة التكافؤ التي يرمز لها (p)، هذه الكثافة تدعى بالكثافة النقية (Intrinsic Density) يرمز لها (n_i):

$$(n_i)^2 = n.p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \;(2.12)$$

في شبه الموصل النقي يمكن حساب تغير تركيز (أو كثافة) الالكترونات في حزمة التوصيل مع درجة الحرارة وفق العلاقة الآتية:

$$n_c = 2\left[\frac{2\pi\ m_e^* k_B T}{h^2}\right]^{3/2} \exp\frac{(E_f - E_c)}{k_\beta T} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \;(2.13)$$

اذ ان:E_c: طاقة مستوى التوصيل.ويمكن اعتبار الجزء الأول من المعادلة ثابت يعبر عنة N_c: الكثافة الفعالة (Effective Density) لمستويات الطاقة في حزمة التوصيل وهي تعتمد على الكتلة الفعالة للحامل في حزمة التوصيل وعلى درجة الحرارة لذلك يمكن كتابة المعادلة(2.13) بالشكل الاتي :

$$n_e = N_c \exp\frac{(E_f - E_c)}{k_\beta T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \;(2.14)$$

حيث ان: −

$$N_c = 2\left[\frac{2\pi\ m_e^* k_B T}{h^2}\right]^{3/2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \;(2.15)$$

اذ ان:h: ثابت بلانك.

m_e*: الكتلة الفعالة للإلكترون.

ويمكن حساب تغير تركيز الفجوات مع درجة الحرارة بحسب العلاقة الآتية:

$$p = 2\left[\frac{2\pi\ m_h^* k_B T}{h^2}\right]^{3/2} \exp\frac{(E_v - E_f)}{k_\beta T} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \;(2.16)$$

اذ ان:E_v : طاقة مستوى التكافؤ.

يمكن اعتبار الجزء الذي يسبق الكمية الآسية ثابتا" ويمثلN_v: الكثافة الفعالة لمستويات الطاقة في حزمة التكافؤ لذا يمكن كتابة المعادلة (2.16) بالشكل الاتي: −

$$p = N_v \exp \frac{(E_v - E_f)}{k_\beta T} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (2.17)$$

حيث ان

$$N_v = 2\left[\frac{2\pi\ m_h^* k_B T}{h^2}\right]^{3/2} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (2.18)$$

اذ ان:

m_h^*: الكتلة الفعالة للفجوات.

ومن المعروف ان تركيز الالكترونات يكون مساوياً لتركيز الفجوات في شبه الموصل الذاتي إي انه:

$$n = p = n_i \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (2.19)$$

وبمساواة المعادلتين (2.13) و(2.16):

$$2\left[\frac{2\pi\ m_e^*\ k_B T}{h^2}\right]^{3/2} \exp \frac{(E_f - E_c)}{k_\beta T} = 2\left[\frac{2\pi\ m_h^* k_B T}{h^2}\right]^{3/2} \exp \frac{(E_v - E_f)}{k_\beta T} \dots\ (2.20)$$

وبعد إجراء التبسيط نحصل على تحديد مستوى فيرمي في أشباه الموصلات حسب المعادلة:

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} k_B T\ Ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\ (2.21)$$

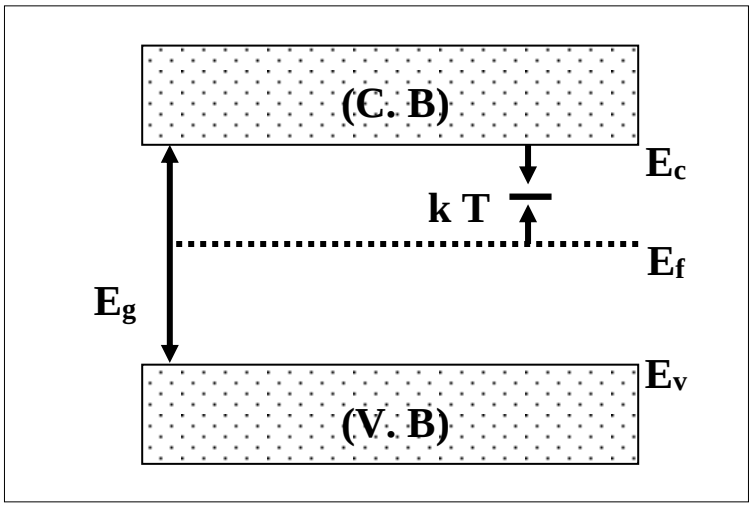
ويمكن ان نستنتج من المعادلة (2.21) ما يأتي:

أولا": إذا ما تساوت m_h^* و m_e^* فأن $Ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)$ يساوي صفر ونحصل على:

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (2.22)$$

يظهر من المعادلة (2.22) ان مستوى فيرمي يكون في وسط فجوة الطاقة التي تفصل بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل. ونلاحظ أيضا من المعادلة (2.22) ان مستوى فيرمي يقع في منتصف فجوة الطاقة عند درجة حرارة الصفر

المطلق، وفي كل الأحوال فان ارتفاع درجة الحرارة أو اختلاف (m_e^*) و(m_h^*) لن يؤثر على موقع مستوى فيرمي إلا بدرجة قليلة جداً، والشكل (3.2) يبين مستوى فيرمي لشبه موصل ذاتي.



الشكل (2-3) مستوى فيرمي لشبه موصل نقي.

ثانيا": إذا كانت $m_e^* \neq m_h^*$ فهذا يعني ان طاقة فيرمي هي دالة لدرجة الحرارة وعلى العموم تكون $m_h^* \rangle m_e^*$ وبهذا فان مستوى فيرمي يرتفع عن موقعة قليلا" بارتفاع درجة الحرارة (يقع عند منتصف فجوة الطاقة).

وعند الاتزان بين تركيز الالكترونات والفجوات (من دون احتوائها على مستوى فيرميE_f وذلك بضرب المعادلتين (2.13) و(2.16) مع بعضهما ونحصل على:

$$n\ p = 4\left[\frac{2\pi\ k_B T}{h^2}\right]^3 (m_e^*\ \ m_h^*\ )^{3/2} \exp\frac{(E_v - E_c)}{k_\beta T} \quad \text{..... (2.23)}$$

بتعويض المعادلة (2.19) في المعادلة (2.23) واستخدام المعادلة (2.12) نحصل على:

$$n^2 = 4\left[\frac{2\pi\ k_B T}{h^2}\right]^3 (m_e^*\ \ m_h^*\ )^{3/2} \exp\frac{(E_v - E_c)}{k_\beta T} \quad \text{..... (2.24)}$$

$$\therefore n = 2\left[\frac{2\pi\ k_B T}{h^2}\right]^{3/2} (m_e^*\ \ m_h^*\ )^{3/4} \exp[\ -\frac{E_g}{2k_\beta T}\ ] \quad \text{..... (2.25)}$$

حيث ان E_g تمثل فجوة الطاقة وتساوي $E_g = E_c - E_v$.

تبين المعادلة (2.24) ان تركيز الحاملات الذاتية يزداد بشدة أسيا" لذلك فأن تركيز الحاملات سوف يزداد بازدياد درجة الحرارة ويقل بثبوت درجة الحرارة وزيادة فجوة الطاقة على اعتبار ان مستوى فيرمي لم يتغير بتغير درجة الحرارة.

(2-1-6-2) توصيلية شبة موصل ذاتي Conductivity of The Intrinsic Semiconductor

من اجل حساب معامل التوصيل الكهربائي يجب علينا معرفة كثافة التيار الالكتروني (J_e) وكثافة تيار الفجوات (J_h)، فاذا كان عدد الالكترونات الحرة لوحدة الحجم هي(n) وان معدل سرعة انجراف الالكترونات(v_e) فيمكن التعبير عن كثافة تيار الالكترونات في حزمه التوصيل تساوي:

$$J_e = nev_e \quad \text{..... (2.26)}$$

وبنفس الطريقة يمكن التعبير عن كثافة تيار الفجوات بالشكل الاتي:

$$J_h = pev_h \quad \text{..... (2.27)}$$

حيث ان p عدد الفجوات في حزمة التكافؤ v_h معدل سرعة انجراف الفجوات.

بما ان معدل سرعة انجراف الالكترونات والفجوات يرتبط مع شدة المجال الكهربائي المسلط بمعادلة التحركية mobility حسب المعادلات الآتية:

$$v_e = \mu_e E \quad \text{..... (2.28)}$$

$$v_h = \mu_h E \quad \text{..... (2.29)}$$

بتعويض المعادلات (2.28) و(2.29) في (2.26) و(2.27) نحصل على:

$$J_e = ne\ \mu_e E \quad \text{..... (2.30)}$$

$$J_h = pe\mu_h E \quad \text{..... (2.31)}$$

بما ان كثافة التيار الكلي(J) تساوي المجموع الكلي لكثافة التيار الناتج من الالكترونات والفجوات وعلية تكون:

$$J = J_e + J_h = (ne\mu_e + pe\mu_h)E \quad \text{..... (2.32)}$$

ومن علاقة قانون اوم لكثافة التيار الكهربائي:

$$J = \sigma E \quad \text{..... (2.33)}$$

عند المقارنة مع المعادلة (2.32) نحصل على معامل التوصيل الكهربائي:

$$\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h \quad \text{..... (2.34)}$$

تمثل المعادلة (2.34) معامل التوصيل الكهربائي لشبة موصل. إذا كان شبة موصل ذاتي(نقي) نجد ان عدد الالكترونات الحرة يكون مساوي لعدد الفجوات، أي ان:

$$n = p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.35)$$

بتعويض المعادلة (2.35) في معادلة (2.34) نحصل على توصيلة شبة موصل ذاتي حسب العلاقة الآتية:

$$\sigma = ne(\mu_e + \mu_h) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.36)$$

(3-1-6-2) تحركيه شبة موصل ذاتي Mobility of The Intrinsic Semiconductor

ألتحركيـه هـي مقياس لسرعة حركـة الإلكترون او الفجوة فـي مجـال كهربـائي. وتزداد ألتحركيـه كلمـا زاد متوسط عمر الإلكترون τ_eوصغرت كتلته m_e وتعطى بالعلاقة الآتية:

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.37)$$

وان كل من متوسط عمر الإلكترون وتحركيته يتناقصان مع ارتفاع درجة الحرارة، بينما لا تعتمد الكتلة الفعالة على درجة الحرارة. وان تحركيه الفجوات تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.38)$$

ان تحركيه الفجوات أصغر من تحركيه الالكترونات لان كتلة الفجوات اكبر من كتلة الالكترونات وهي كمية موجبة.