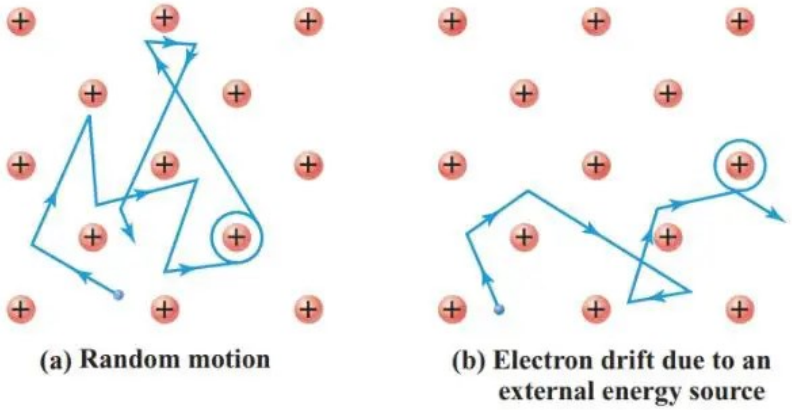
تحركية حاملات الشحنة Charge carrier mobility

تسبب الطاقة الحرارية اهتزاز ذرات البلورات حول مواضع اتزانها. كما و تؤدي ذرات الشوائب داخل البلورات الى تشوهات موضعية في الحركة الموضعية لذرات البلورة الاصلية. تُعامل التشوهات على أنها كمات محددة من الطاقة تسمى بالفونونات. يلاقي الإلكترون المار بأيون الذرة الشائبة أو ذرة غير مستقرة قوى اضافية. ونتيجة لذلك، يحدث تبادل في الطاقة بين الالكترون و الشبيكة البلورية، أي يحدث تفاعل وتبادل في الطاقة بين الفونون و الالكترون، و التي قد تؤدي إلى تغيير في اتجاه الإلكترون. تسمى هذه العملية بالاستطارة. يعتمد انحراف الالكترون على سرعته واتجاهه. يكون الانحراف كبير، أي بزوايا استطارة كبيرة، إذا مر الإلكترون قريبا من أحد ذرات الشبيكة البلورية. تزداد ترددات التصادمات بزيادة درجة الحرارة وذلك بسبب زيادة عدد الذرات الغير متزنة أي بزيادة عدد الفونونات. في حالة عدم تسليط مجال كهربائي، تكون الإلكترونات في حالة اتزان حراري. حيث تتحرك الالكتروات حركة عشوائية في غياب المجال الكهربائي المسلط لاحظ الشكل ادناه. لذلك، إذا تم أخذ متوسط الحركة خلال الزمن سوف تكون محصلة حركة حاملات الشحنة تساوي صفر اي ليس لها اتجاه محدد. مقدار متوسط طاقة الإلكترون هي $3k_BT/2$ و متوسط السرعة الحرارية Thermal velocity يرمز لها بـ v_{th} و تعطى بالعلاقة التالية

$$v_{th} = \sqrt{\frac{3k_BT}{\mathrm{m}_n^*}} \qquad (1)$$

و عند درجة حرارة الغرفة، فإن السرعة الحرارية تساوي $10^7 cm/s$. لاحظ ان تبادل الطاقة يكون بالاتجاهين. حيث ان m_n^* هي الكتلة الفعالة للالكترونات، و k_B هو ثابت بولتزمان و T درجة الحرارة المطلقة.



(a) Random motion

(b) Electron drift due to an external energy source

الشكل يوضح حركة الإلكترون في بلورة مادة صلبة في حالة الاتزان وعدم الاتزان الحراري

Dr. Rasha Abbas Awni
College of Education for Pure Sciences
Dep. of Physics, Tikrit University
Semiconductors 2023 - 2024

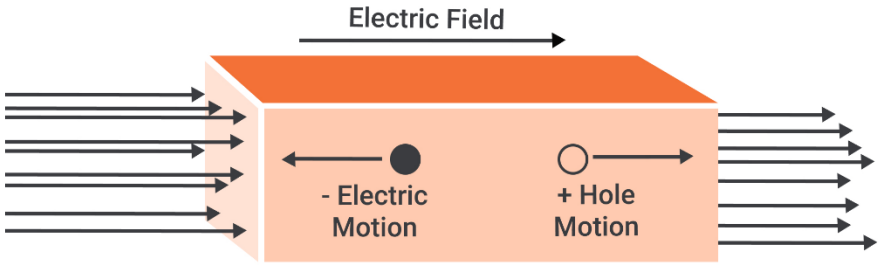
أما عند تسليط مجال كهربائي $\bar{E}$ ، يكتسب الإلكترون (او الفجوة) طاقة تؤدي إلى تعجيله a . يؤدي تعجيل الإلكترونات (او الفجوات) إلى تغيير في سرعتها. تتسارع الإلكترونات في الاتجاه المعاكس لاتجاه المجال الكهربائي، بينما تتسارع الفجوات بنفس اتجاه المجال الكهربائي. مما يؤدي إلى زيادة التصادمات حسب المعادلات الآتية:

$$-a = \frac{d^2x}{dt^2} = q\frac{\bar{E}}{\mathrm{m}_n^*} \qquad (2)$$

$$q\frac{\bar{E}\,\tau}{\mathrm{m}_n^*} = (v - v_{th})_p \qquad (3)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = q\frac{\bar{E}}{\mathrm{m}_p^*} \qquad (4)$$

$$q\frac{\bar{E}\,\tau}{\mathrm{m}_p^*} = (v - v_{th})_p \qquad (5)$$



حركة الالكترونات و الفجوات لشبه موصل تحت تأثير مجال كهربائي

حيث تمثل v_{th} السرعة الحرارية. بفرض أن جميع الإلكترونات تتحرك بنفس السرعة، فإن متوسط مركبة السرعة المضافة بسبب المجال الكهربائي تسمى بسرعة الانجراف drift velocity و يرمز لها بالرمز v_d و تعطى بالعلاقة التالية

$$v_d = \frac{v - v_{th}}{2} \qquad (6)$$

$$v_d = -q\frac{\bar{E}\,\tau}{2\mathrm{m}_n^*} \qquad (7)$$

حيث ان τ هو متوسط الزمن بين التصادمات و عادتا ما يسمى بمعدل الزمن الحر mean free time.
ترتبط سرعة الانجراف مع المجال الكهربائي بثابت يسمى بـ التحركية mobility و التي يمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية

$$v_d = -\mu_n \bar{E} \qquad (8)$$

ومن العلاقة 6 نستنتج أن تحركية الالكترونات يساوي

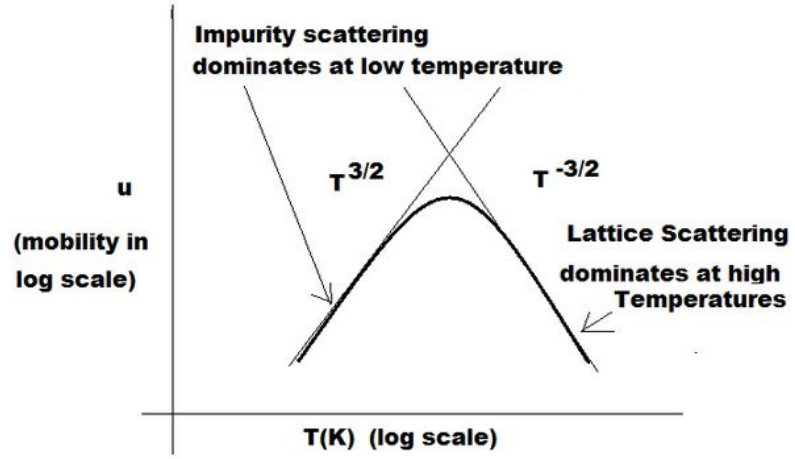
$$\mu_n = \frac{q\,\tau}{2\mathrm{m}_n^*} \qquad (9)$$

تقاس التحركية بوحدة $cm^2/V.s$

يمكن كتابة التحركية بعلاقة تقريبية تمثل المحصلة المكافئة للتحركيات الناتجة من تأثيرات اهتزاز ذرات الشبيكة (الفونونات) ومن الشوائب و حسب العلاقة التالية

$$\frac{1}{\mu_n} = \frac{1}{\mu_{Lattice}} + \frac{1}{\mu_{Impurities}} \qquad (10)$$

وكمان مبين وجود الشوائب المتأينة يضيف حد إضافي إلى علاقة تحركات حاملات الشحنة. تعتمد التحركية على درجة الحرارة. وكمان مبين في الشكل أدناه أن التحركية تزداد بزيادة درجة الحرارة، ثم تبدأ من بالانخفاض بزيادة درجة الحرارة أكثر وأكثر وذلك بسبب زيادة الاستطارة بسبب الفونونات.



التحركية كدالة لدرجة الحرارة لبلورة السليكون

التوصيلية و المقاومية Conductivity and resistivity

عند تطبيق فرق جهد كهربائي عبر المواد شبه الموصلة ، سوف نرى تدفق التيارات المختلفة للإلكترونات والفجوات (حوامل الشحنة)من خلالها، ويعتمد تدفق التيار على خاصية محددة ، تسمى التوصيل كهربائي. يكتب كثافة التيار current density الإلكترونات J_n والفجوات J_p لمادة شبه موصلة بالعلاقة التالية

$$J_n = -qnv_d \quad (11)$$

$$J_p = qpv_d \quad (12)$$

حيث ان *n* و *p* هما تركيز الالكترونات والفجوات التي يمكنها المشاركة في عملية التوصيل على التوالي. و من المعادلة 8 نحصل على

$$J_n = -qn\mu_n\bar{E} \quad (13)$$

$$J_p = -qp\mu_p\bar{E} \quad (14)$$

و من قانون اوم $J_n = \sigma_n\bar{E}$، $J_p = \sigma_p\bar{E}$ لذا تعطى التوصيلية بالعلاقة التالية

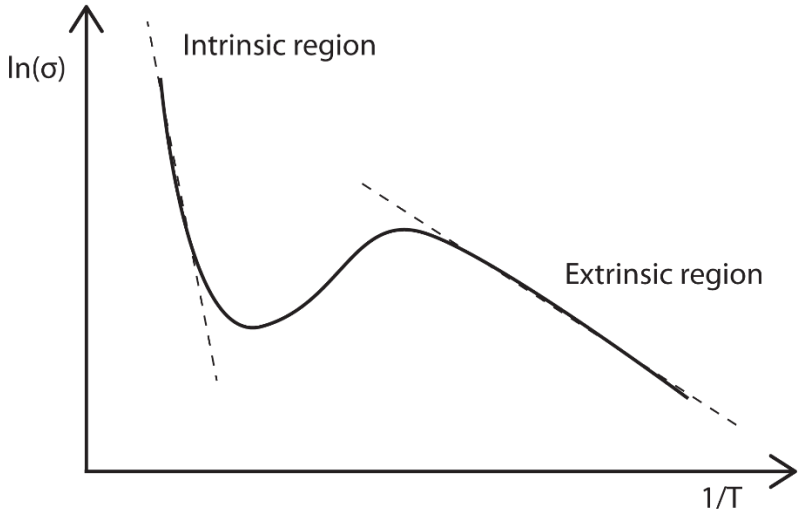
$$\sigma_n = qn\mu_n \quad (15)$$

$$\sigma_p = qp\mu_p \quad (16)$$

يرمز للتوصيلية بالرمز σ و تقاس بوحدة $\Omega^{-1}cm^{-1}$. والتوصيلية هي معكوس المقاومية resistivity و غالبا ما يرمز لها بالرمز ρ و تقاس بوحدة $\Omega.cm$ و تعطى بالعلاقة

$$\sigma_{n,p} = \frac{1}{\rho_{n,p}} \quad (17)$$

تعتمد التوصية كذلك على درجة الحرارة وكما موضح في الشكل أدناه.



اعتماد التوصيلية على درجة الحرارة

انتشار و انجراف حاملات الشحنة Charge carrier diffusion and drift

يمكن التعبير عن كثافة التيار في شبه موصل متجانس من العلاقة الآتية

$$J = \sigma\bar{E} = q(n\mu_n + p\mu_p)\bar{E} \qquad (18)$$

حيث تمثل σ التوصيلية و تمثل μ_n تحركية الإلكترون و μ_p تحركية الفجوات. اختلاف إشارات شحنة إلكترونات التوصيل والفجوات تعني أن الإلكترونات والفجوات التي تتحرك باتجاهين متعاكسين و تعطي تيارات بنفس الاتجاه. في كثير من المواد شبه موصلة المطعمة يمكن إهمال تيار الإنجراف الناتج عن حاملات الشحنة الأقلية لأنها قليلة جدا.

كما ذكرنا سابقا ان امتلاك حاملات الشحنة ذات التركيز الغير متعادل لطاقة حرارية كافية تسبب في انتقالها من مناطق التركيز العالي إلى مناطق التركيز الواطى ويستمر هذا انتقال لحين الوصول إلى حالة الاتزان الحراري والذي يكون معدل انتشار الفجوات باتجاه معين مساويا لمعدل انتشار الألكترونات بالاتجاه المعاكس. أي أن هناك تيارين، تيار للإلكترونات و اخر للفجوات. يتناسب هذا التيار مع انحدار (أو تدرج) gradient حاملات الشحنة أي $\frac{dn}{dx}$ و $\frac{dp}{dx}$ ، تمثل dx المسافة التي يتغير فيها تركيز الالكترونات والفجوات، $\frac{dn}{dx}$

انحدار الالكترونات، و $\frac{dp}{dx}$ انحدار الفجوات. اي يمكن تعريف التيار الكهربائي الناتج عن انحدار الالكترونات والفجوات بالعلاقتين الآتيتين على التوالي

$$J_n = +qD_n \frac{dn}{dx} \quad (19)$$

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (20)$$

و كما ذكرنا سابقا (موضوع تحركية الإلكترونات) إن تسليط مجال كهربائي سيؤدي الى انجراف الالكترونات والفجوات بسرعة معينة (سرعة الانجراف v_d) مولدةً تيارين للانجراف وهما تيار انجراف الالكترونات و تيار انجراف الفجوات كما بينا بالمعدلات 19 و 20 . وبالتالي فإن التيار الكلي في شبه الموصل يعطى بالعلاقة الآتية

$$J = J_{n\,(drift)} + J_{n\,(diffusion)} + J_{p\,(drift)} + J_{p\,(diffusion)} \quad (21)$$

$$J = qn\mu_n \bar{E} + qD_n \frac{dn}{dx} + qp\mu_p \bar{E} - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (22)$$

$$J = q[n\mu_n \bar{E} + p\mu_p]\bar{E} + q[D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx}] \quad (23)$$

نلاحظ أن هذا التيار يختلف عن معادلة كثافة التيار في مادة موصلة و التي يكون عنها تيار الانتشار يساوي صفر و لها حاملات شحنة من نوع واحد. يشمل المجال الكهربائي في شبه الموصل المجالين: الخارجي المسلط والمجال الكهربائي الداخلي الناتج عن توزيع حوامل الشحنة بسبب انحدار كثافة الشوائب.