

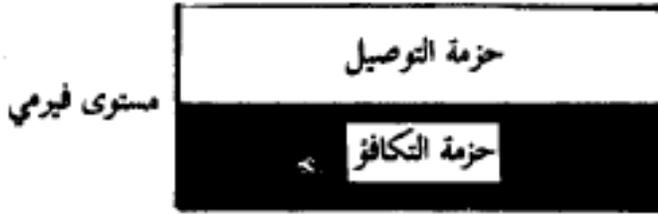
الموصلات والعوازل واشباه الموصلات

Conductors Insulators and Semiconductors

الموصلات

تتوزع الالكترونات في الحزم وكما هو معروف ، حسب قاعدة الاستبعاد لبولي وعند درجة حرارة الصفر المطلق لا تستطيع الالكترونات التحرك خلال البلورة ذلك لانها جميعا مرتبطة بشدة الى ذراتها وبالتالي فإنها تملأ حزمة التكافؤ من اوطأ مستوى طاقة فيها

الى اعلى مستوى طاقة فيها والذي يدعى بمستوى فيرمي Fermi level او بعبارة اخرى ان حزمة التوصيل عند درجة حرارة الصفر المطلق ، تكون فارغة وهذا يعني أنه لا توجد طاقة كافية عند اي الكترون لكي ينتقل في مدار حزمة التوصيل .



حزم الطاقة في الموصل

من جهة أخرى عند ارتفاع درجة الحرارة فوق الصفر المطلق فان الطاقة الحرارية التي سوف يكتسبها الالكترونات ستمكن بعضاً من هذه الالكترونات من الافلات من ذراتها والانتقال الى حزمة التوصيل حيث تستطيع هناك التحرك في مدارات ذات انصاف اقطار اكبر من السابق ويكون ارتباط هذه الالكترونات بالذرات ضعيفاً جداً عندما تكون في مدارات حزمة التوصيل وبالتالي تستطيع التنقل من ذرة الى أخرى بسهولة مكونة ما يسمى بغاز الالكترون electron gas . عند تسليط فرق جهد عبر الموصل فان مجالاً كهربائياً سوف يتولد داخل الموصل يعمل على تعجيل الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل بسبب من القوة التي يتعرض لها والتي تساوي

$$F = - eE$$

في فضاء حريبعجل الالكترن وتزيد سرعته (طاقته) باستمرار وفي المادة البلورية يعاق تقدم الالكترن بالتصادم المستمر مع الذرات المهتزة حول مواقعها في البلورة وسريعا ماتبلغ سرعة الالكترن قيمة متوسطة ثابتة . وهذه السرعة v_d تدعى سرعة الانسياب drift velocity وهي ترتبط خطيا مع شدة المجال الكهربائي بواسطة حركية الالكترن في المادة المعطاة ونرمز للحركية بالرمز μ ($m\mu$) بحيث ان

$$v_d = - \mu_e E$$

حيث μ_e هي حركية الكترن وهي موجبة بالتعريف وتقاس بوحدات المتر المربع لكل فولت - ثانية والقيم النموذجية هي 0.0012 للالمنيوم و 0.0032 للنحاس و 0.0056 للفضة .

حيث μ_e هي حركية الكترن وهي موجبة بالتعريف وتقاس بوحدات المتر المربع لكل فولت - ثانية والقيم النموذجية هي 0.0012 للالمنيوم و 0.0032 للنحاس و 0.0056 للفضة .

ومن الجديد بالذكر انه عند جهد ثابت ورفع درجة حرارة الموصل فان عدد الاصطدامات بين الالكترن والذرات المهتزة حول مواقعها في البلورة ، سوف تزداد ومن ثم تقل سرعة الانسياب وبالتالي تزداد مقاومة الموصل ويقال عندئذ ان الموصل يمتلك معامل مقاومة موجبا أي تزداد مقاومته مع ازدياد درجة الحرارة .

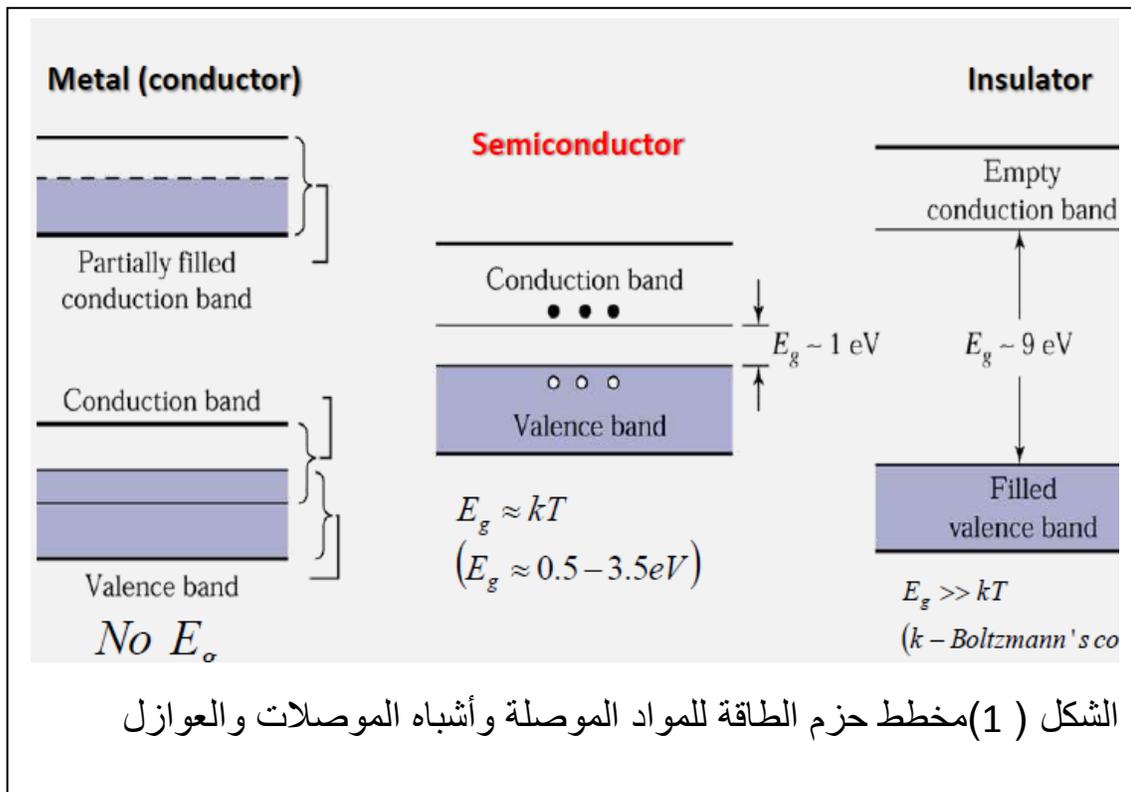
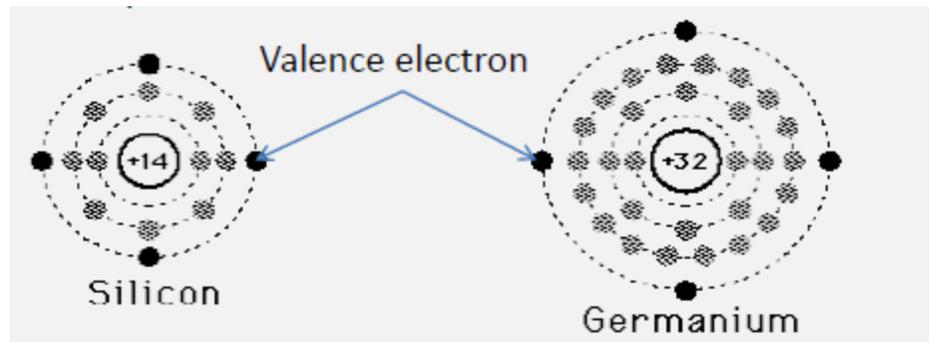
العازلات

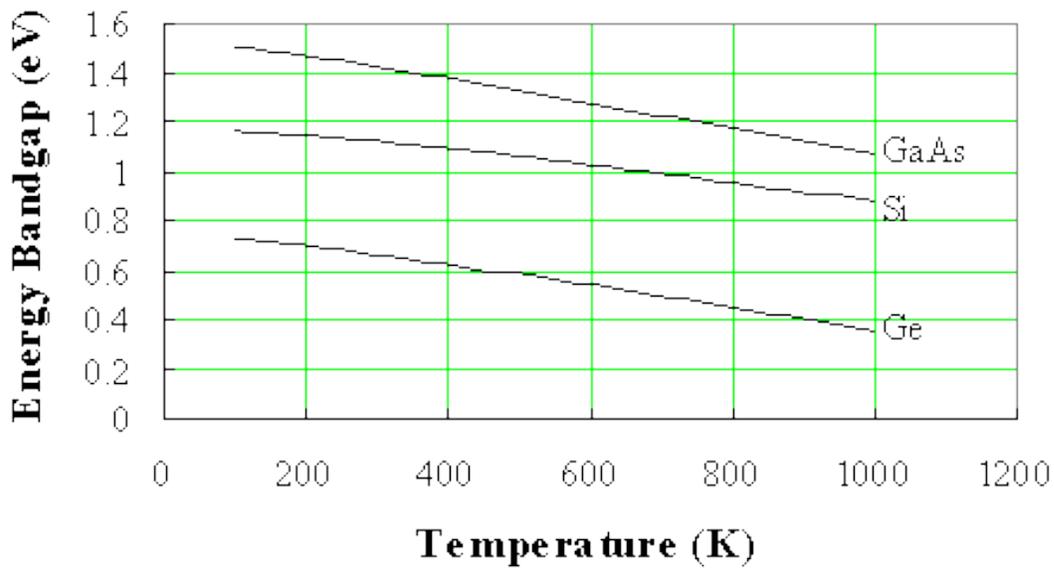
في العازلات نجد أن الفرق في الطاقة بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل كبير نسبياً . فمثلاً في حالة الماس . نجد أن هذا الفرق (أي عرض الحزمة المحظور) يساوي حوالي 6.2 eV . ولكي ينتقل إلكترون من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل يجب منحه قيمة من الطاقة تساوي 6.2 eV أو أكثر . فإذا استخدمنا مجالاً كهربياً لمنح الإلكترون في الماس هذه الطاقة فإننا نحتاج إلى مجال شدته حوالي 6.2×10^8 فولت/سم (إذا اعتبرنا أن نصف قطر الذرة في حدود 10^{-8} سم) . ولذلك فإنه لا يمكن منح الإلكترون هذه الطاقة وبذلك نجد أن الماس من العازلات الجيدة .

اشباه الموصلات

لا يختلف مخطط الطاقة لاشباه الموصلات - انظر الشكل (1) عن نظيره في العوازل الا في سعة فجوة الطاقة حيث تكون قيمتها في اشباه الموصلات في حدود 1.1 eV او اقل . وتتميز هذه المواد بكونها عازلة insulator عند درجة حرارة الصفر المطلق (حيث تكون حزمة التوصيل فارغة اي لا توجد طاقة كافية عند أي الكترولون لكي ينتقل الى حزمة التوصيل) وموصلة conductors عند الدرجات الحرارية العالية . من جهة أخرى عند درجة حرارة الغرفة ($27^\circ\text{C} = 300^\circ\text{K}$) يكتسب عدد من الالكترونات الطاقة الكافية لكي ينتقل الى حزمة التوصيل الا ان التيار الناتج يكون صغيراً بحيث لا يمكن الاستفادة منه في معظم التطبيقات وعند هذه الدرجة لا تكون المادة شبه الموصلة عازلاً جيداً كما لا تكون موصلاً جيداً ولهذا تدعى شبه موصل semiconductor

وأهم المواد المعروفة كأشباه موصلات هي الجرمانيوم وتركيبه الذري هو $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^6 3d^{10} 4S^2 4P^2$ وهو رباعي التكافؤ وعرض فجوة الطاقة بين حزمة التكافؤ حزمة التوصيل 1.21 eV . كذلك السليكون Si وتركيبه الذري هو $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^2$ وعرض الحزمة المحظورة 1.21 eV . ويجب الذكر أن عرض الحزمة المحظورة يعتمد على درجة الحرارة والقيم التي أوردناها للحزمة المحظورة هي عند 0 مطلق. وعند زيادة درجة الحرارة نجد أن بعض إلكترونات التكافؤ تكتسب طاقة حرارية أكبر من عرض المنطقة المحظورة. وبذلك ينتقل الإلكترون من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل، ويتوفر في المادة عدد من الإلكترونات الحرة التي يمكن أن تتحرك وتؤدي إلى سريان تيار كهربائي حتى لو كان الجهد المؤثر صغير جدا.





الشكل (2) يبين اعتماد فجوة الطاقة على درجة الحرارة للسليكون والجرمانيوم وارسنيد الكاليوم

Temperature dependence of the energy band gap of germanium (Ge), silicon (Si) and gallium arsenide (GaAs).

Calculate the energy band gap of germanium, silicon and gallium arsenide at 300, 400, 500 and 600 K.

The band gap of silicon at 300 K equals:

$$E_g(300 \text{ K}) = E_g(0 \text{ K}) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} = 1.166 - \frac{0.473 \times 10^{-3} \times (300)^2}{300 + 636} = 1.12 \text{ eV}$$

Similarly one finds the energy band gap for germanium and gallium arsenide, as well as at different temperatures, yielding:

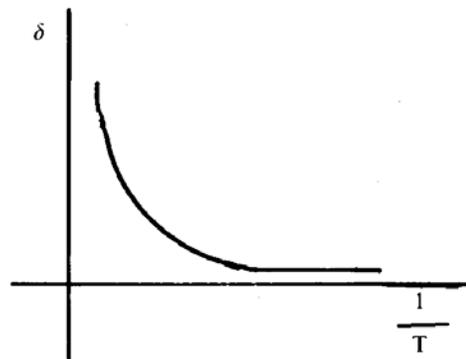
	Germanium	Silicon	Gallium Arsenide
$T = 300 \text{ K}$	0.66 eV	1.12 eV	1.42 eV
$T = 400 \text{ K}$	0.62 eV	1.09 eV	1.38 eV
$T = 500 \text{ K}$	0.58 eV	1.06 eV	1.33 eV
$T = 600 \text{ K}$	0.54 eV	1.03 eV	1.28 eV

قيم الثوابت الخاصة لمعادلة فجوة الطاقة المحظورة :

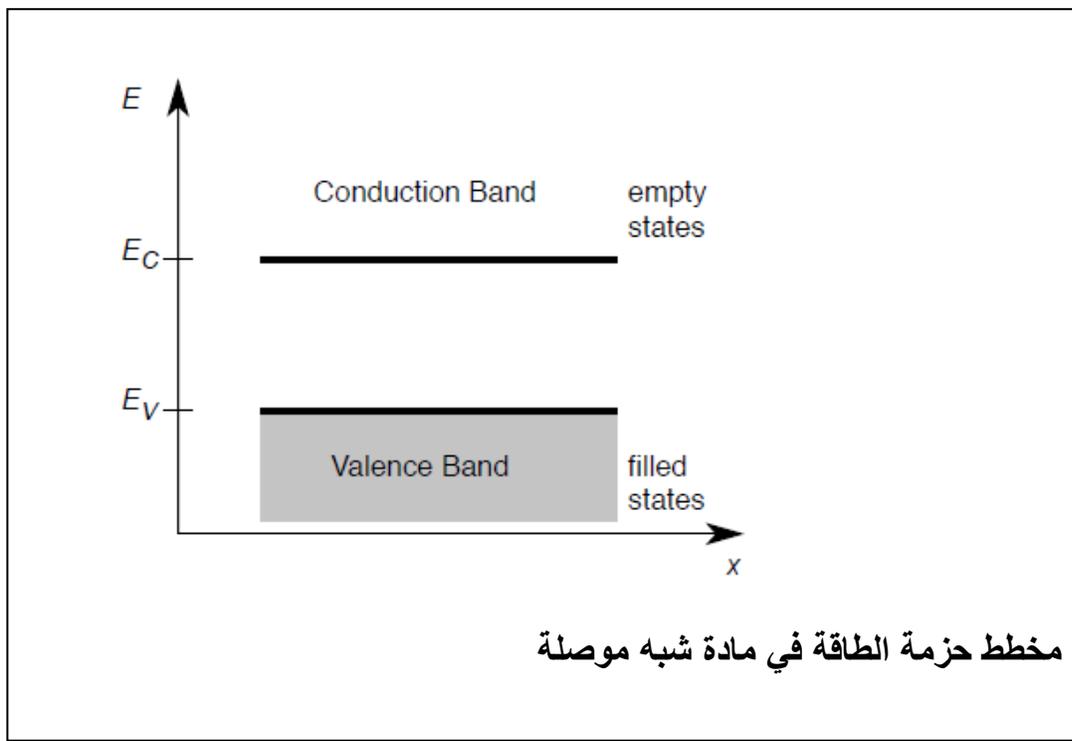
	Germanium	Silicon	GaAs
$E_g(0)$ (eV)	0.7437	1.166	1.519
α (meV/K)	0.477	0.473	0.541
β (K)	235	636	204

اشباه الموصلات النقية Intrinsic Semiconductor

رأينا فيما مضى أن حزمة التكافؤ في الموصلات تتداخل مع حزمة التوصيل وعليه فإن عدد الإلكترونات الحرة يكون محدوداً في حزمة التوصيل وان رفع درجة الحرارة لن يؤدي الا الى زيادة اهتزاز الذرات في مواقعها مما يعمل على زيادة مقاومة الموصل بسبب من زيادة عدد الاصطدامات التي تعملها الإلكترونات مع هذه الذرات اما في اشباه الموصلات فان زيادة درجة الحرارة سوف يؤدي الى زيادة طاقة الإلكترونات التكافؤية ومن ثم فان عدد الإلكترونات التي تصل الى حزمة التوصيل سوف يزداد مع ارتفاع درجة الحرارة وبالتالي فان التوصيلية σ لهذه المواد سوف تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة - انظر الشكل مما يعني امتلاكها لمعامل مقاومة سالب .



تغير التوصيلية مع درجة الحرارة



على أية حال فان كثافة الالكترونات في حزمة التوصيل يمكن حسابها بواسطة دالة

Fermi-Dirac statistic function تخضع لاحصاء فيرمي - ديراك

وتسمى بدالة التوزيع للطاقة energy distribution fuocion التي تعبر

عن الاحتمالية $f(E)$ لاي الكترون لاحتلال مستوى من الطاقة (E) عند درجة

حرارة T وتعطى بواسطة دالة فيرمي

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp_p \left(\frac{E - E_f}{KT} \right)} \quad \dots (17)$$

في هذه المعادلة اذا كان $E_f = E$ فان $f(E) = \frac{1}{2}$ ومن ثم فان تعريف منسوب

فيرمي للطاقة بانه المنسوب الذي تكون احتمالية اشغاله من قبل الكترون مساوية لـ 50%

ما بالنسبة لمستويات الطاقة التي تزيد عن E_f بحيث تقترب نتيجة الفرق $(E - E_f)$

من اللانهاية عندئذ يقترب احتمال اشغال ذلك المستوى من الطاقة من الصفر وبمعنى

اخر ان مستويات الطاقة العالية جدا تكون خالية من الالكترونات بينما يصل الاحتمال

الى 100% في مستويات الطاقة الواطئة جداً .

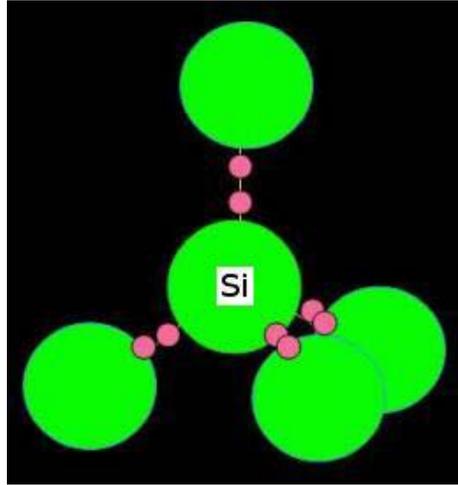
تتميز أشباه الموصلات النقية بما يلي :

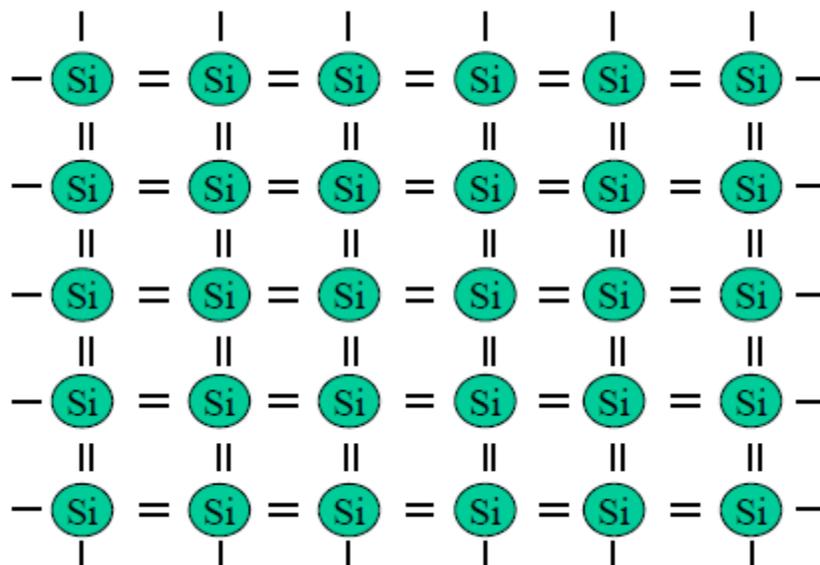
- 1 - تكون عازله تماماً عند درجة صفر كالفن لشدة ارتباط الإلكترونات بذراتها.
- 2- عند رفع درجة حرارتها تصبح الطاقة الحرارية كافية لكسر بعض الروابط بين الذرات فتتحرك بعض الإلكترونات تاركة مكانها فجوة وبذلك تصبح البلورة موصلة للكهرباء عن طريق الفجوات التي تتحرك عكس الإلكترونات.

التوصيلية الكهربائية الذاتية لأشباه الموصلات النقية

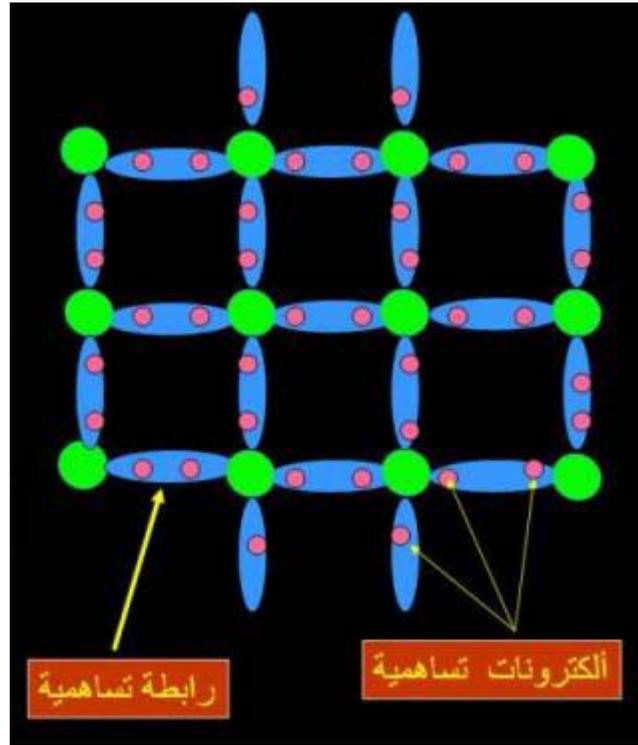
وتكمن أهمية الفجوة في أنه يمكن اعتبارها ناقلة للتيار الكهربائي مثل الإلكترون ، ولإيضاح ذلك فإننا نتخيل ما يحدث وهو أن إلكترونات في ذرة مجاورة يمكن أن يتحرك ليملا تلك الفجوة خلفا وراءه فجوة أخرى ليتحرك إلكترون في ذرة مجاورة أخرى أيضاً لملأ تلك الفجوة ، وهكذا يمكننا أن نعتبر نظرياً أن الفجوة تتحرك بعكس اتجاه حركة الإلكترون ، وعلى ذلك يمكن اعتبار الفجوة تمثل شحنة موجبة مقدارها يساوي مقدار شحنة الإلكترون وتتحرك في اتجاه معاكس لحركة الإلكترون

عند الصفر المطلق 0°K ، تكون الإلكترونات في اوطا مستوى من الطاقة وعليه تكون الاواصر التساهمية ممتلئة وعندما يؤثر مجال كهربائي خارجي صغير فان الإلكترونات لن تتحرك ولذلك فان السليكون (شبه الموصل) يعتبر عازلاً.



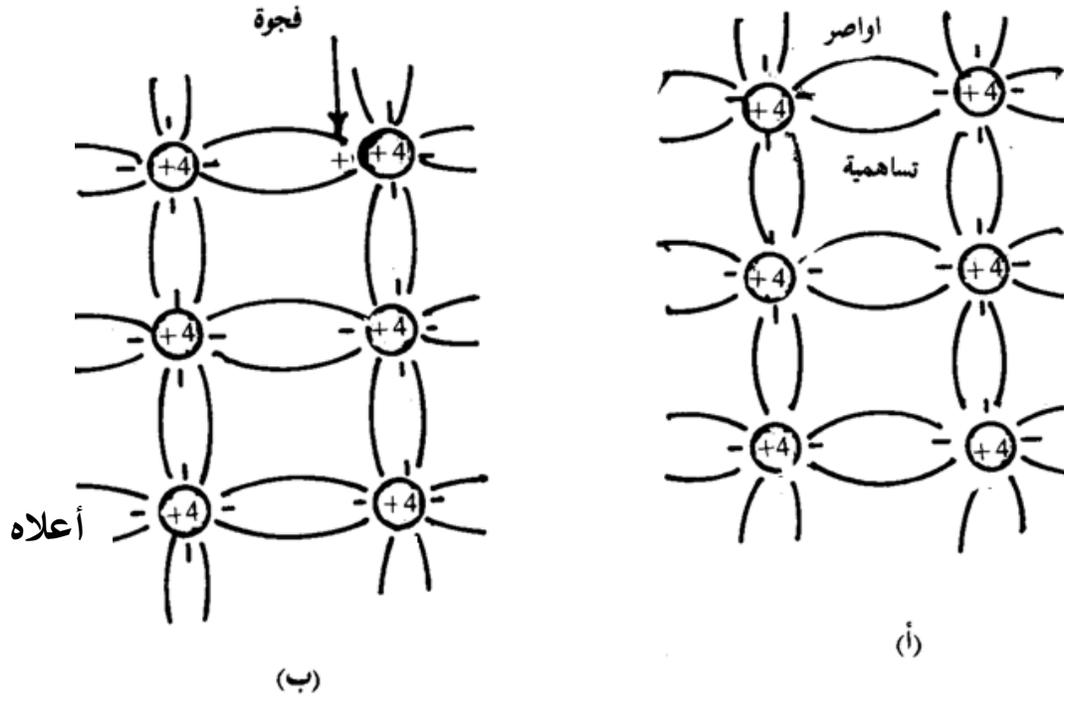


ومن أشهر المواد شبه الموصلة (عناصر المجموعة الرابعة) في الجدول الدوري (الجرمانيوم 32 Ge) و (السيلكون 14 Si)، حيث أن كل منهما رباعي التكافؤ، فتتحد كل ذرة من ذرات الجرمانيوم مع أربع ذرات جرمانيوم مجاورة بروابط تساهمية بحيث تصبح أي ذرة محاطة بثمانية إلكترونات كما بالشكل التالي لتكوين بلورة جرمانيوم نقيه، (وبالمثل ذرات السيلكون).



تمتلك عناصر المجموعة الرابعة group IV من الجدول الدوري ، أربعة
 إلكترونات تكافؤية وتدعى البلورات التي تكون من ضمنها مواد البلورات التساهمية
 وتنشأ قوى التماسك في البلورات التساهمية من وجود الإلكترونات مشتركة بين الذرات
 المتجاورة فكل ذرة مشتركة باصرة تساهمية مع جاريتها تساهم بالإلكترون واحد في الاصرة
 ويكون الالكترونان مشتركين بين الذرتين بدلا من ان يكون كل منهما ملكية خاصة
 لآحد الذرتين كما في حالة الاواصر الايونية ويبين الشكل أدناه تركيب آحد هذه البلورات
 في درجة الصفر المطلق وقد رسمت ذراتها في بعدين وبصورة رمزية حسب نموذج بور

الآن اذا ما تم تسليط جهد كهربائي على هذه البلورة او تعرضت لآشعاع بطاقة
 كافية او تم اكسابها طاقة حرارية فان الطاقة المكتسبة هذه سوف تعمل على كسر الروابط
 التساهمية ونقل الالكترون الى حزمة التوصيل ليشارك في عملية التوصيل الكهربائي .
 ان الطاقة اللازمة والكافية لفك الروابط التساهمية يجب ان تكون مساوية لفجوة الطاقة



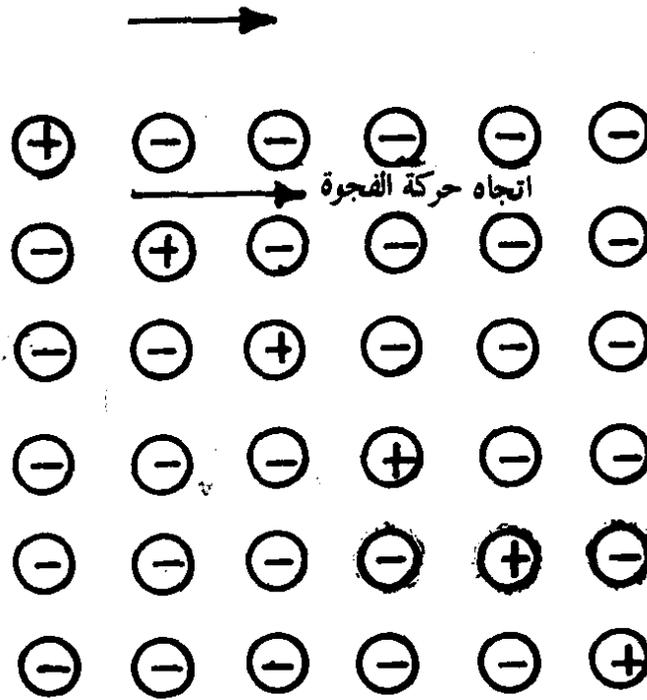
E_g او اكبر . تكون E_g مساوية لـ 0.72 اليكترون فولت بالنسبة لبلورة الجرمانيوم E_g و 1.1 اليكترون فولت بالنسبة لبلورة السيلكون (Si) . هذا ويعد هذان العنصران من اهم عناصر المجموعة الرابعة المستعملة في الصناعات الالكترونية ولعنصر السيلكون (14) الكترونا في تركيبه الذري تتوزع على الصورة 2 و 8 و 4 الكترونات بينما يمتلك عنصر الجرمانيوم (32) الكترونا تكون موزعة على الصورة 2 و 8 و 18 و 4 الكترونات

على اية حال ، ان انتقال الالكترون من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل سوف يخلف وراءه مكانا خاليا في الاصرة التساهمية - انظر الشكل أعلاه- او ما يدعى بالفجوة hole . الذرة الان اصبحت ايونا ion وتظهر الفجوة كشحنة موجبة ثابتة (+ e) مع كتلة فعالة m_h ولا تكون مساوية لكتلة الالكترون . هذا الفرق في الكتلتين يظهر على شكل حركة بطيئة لحاملات الشحنة الموجبة هذه استجابة للمجالات الكهربائية المسلطة مقارنة مع حركة الالكترونات تحت نفس الظروف .

تعرف الفجوة بانها مكان مستعد لاستقبال الكترون وبهذا فانها سرعان ماتملاً بالالكترون المجاور الذي يعمل بفعل وجود مجال كهربائي ، على كسر الاواصر التي تربطه بالذرة مولداً بذلك فجوة ثانية يتم ملأها ايضا بالكترون آخروهكذا تستمر العملية مؤدية

بذلك الى حركة الشحنات - انظر الشكل أدناه - ومولدة بذلك تياراً يدعى بتيسار الفجوات hole current

ان عملية توليد هذه الازواج من الالكترتون - فجوة electron-hole pairs سوف تستمر وعند التوازن الحراري thermal equilibrium يكون عدد الفجوات المتخلفة مساويا لعدد الالكترونات المنتقلة وتعد الطاقة الحرارية اكثر المصادر توليداً لهذه الازواج وتدعى عملية التوصيل الناتجة عن حركة حاملات الشحنة هذه (الفجوات والالكترونات) بعملية التوصيل الذاتي intrinsic conduction



حركة الفجوة في شبه الموصل

عند تسليط مجال كهربائي خارجي فان الطاقة المكتسبة من قبل هذه الحاملات سوف تضاف الى طاقتها الحرارية ، وبذلك تعمل على تعجيلها واكسابها سرعة تصل بعد فترة معينة ، كما ذكرنا ، الى قيمة ثابتة تدعى بسرعة الانسياق velocity drift بحيث ان

$$\begin{aligned} v_h &= \mu_h E \\ v_e &= \mu_e E \end{aligned} \quad 1$$

حيث تشير h الى الفجوات hole و e الى الالكترونات وتكون v_e معاكسة لاتجاه v_h واكبر منها الا ان التيار الناتج عنهما يكون في نفس الاتجاه .

معروف لدينا ان

$$\Delta I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad 2$$

كذلك هو معروف ان

$$\Delta Q = \rho \Delta V \quad 3$$

حيث تمثل ρ الكثافة الحجمية للشحنة و ΔV عنصراً حيمياً . عند التعويض عن ΔQ اعلاه في المعادلة نحصل على

$$\Delta I = \rho \Delta s \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad 4$$

اوان

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta s} = \rho v \quad \dots 5$$

حيث تمثل J كثافة التيار السطحية
بالنسبة لانصاف الموصلات لدينا

$$J_e = \rho_e v_e = ne v_e \quad \dots 6$$

وكذلك

$$J_h = \rho_h v_h = pe v_h \quad 7$$

حيث تمثل n و p كثافة الالكترونات والفجوات المتولدة وعلى التوالي

$$J = J_e + J_h = ne v_e + pe v_h \quad \dots 8$$

وعند التعويض عن قيمة v_e و v_h نحصل على :

$$J = + ne \mu_e E + pe \mu_h E \quad \dots 9$$

في انصاف الموصلات النقية تكون كثافة الالكترونات n في حزمة التوصيل مساوية
لكثافة الثقوب p التي خلفتها تلك الالكترونات في حزمة التكافؤ، اي ان $n_i = p = n$
حيث يشير الحرف (i) الى شبه الموصل النقي intrinsic . وعليه فأن

$$J = n_i (\mu_e + \mu_h) e E \quad \dots 10$$

العلاقة بين E و J يمكن ايضا تحديدها بوساطة التوصيلية σ من خلال

$$J = \sigma E$$

... 11

وعليه فان

$$\sigma = (\mu_e + \mu_h) n_i e$$

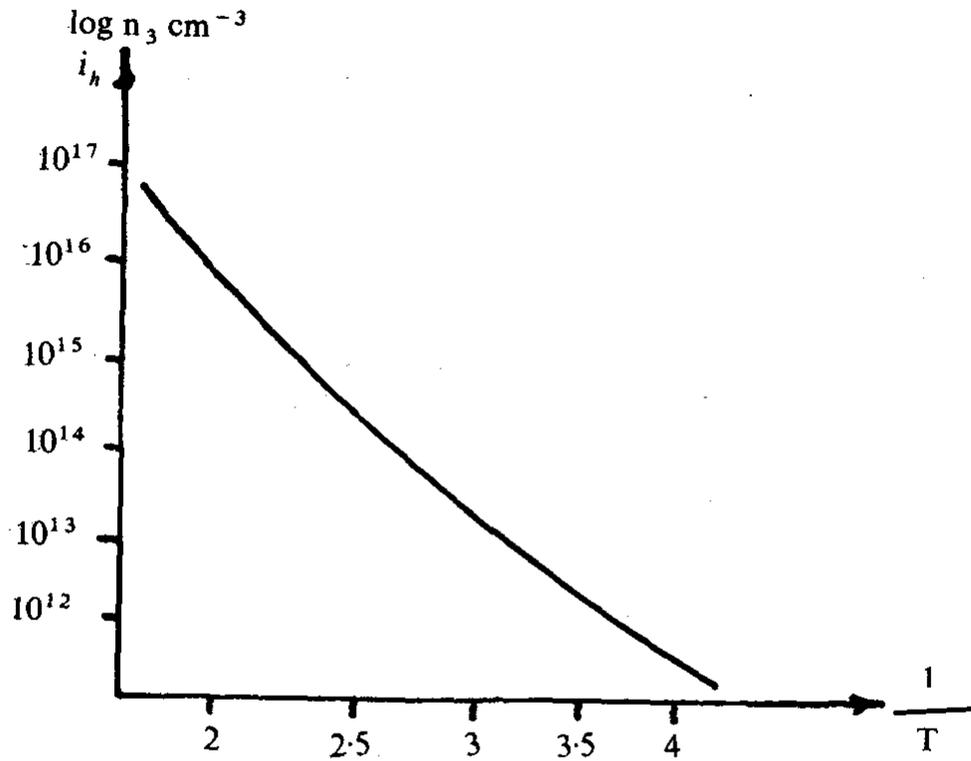
... 12

بالنسبة للجermanيوم النقي او الذاتي ، فان حركتي الالكترن والفجوة هما 0.36 و 0.17 بالترتيب بينما للسيلكون فالحركتين هما بالترتيب 0.12 و 0.025 . وهذه القيم معطاة بالمترا المربع لكل فولت - ثانية وتتراوح بين 10 الى 100 مرة أكبر من تلك للالمنيوم والنحاس والفضة والموصلات المعدنية الاخرى عند نفس الدرجة الحرارية $300^{\circ}k$. من جهة اخرى ، في المعادن هنالك في المتوسط الكترن حرمقابل كل ذرة وبما ان كثافة الذرات في المعادن هي 10^{28} بالمترا المكعب الواحد لذا فانه يوجد فسي المتوسط 10^{28} الكترن حرفي المتر المكعب الواحد . في اشباه الموصلات مثل الجومانيوم والسيلكون هناك الكترن حرمقابل 10^8 ذرة وعليه فاننا نتوقع ان تكون التوصيلية للسيلكون 10^8 مرة اقل من النحاس الا ان كون الحركية في السيلكون ، انظر اعلاه ، هي اكبر مائة مرة مما هي في النحاس لذا فاننا نتوقع ان التوصيلية في اشباه الموصلات تكون حوالي مليون مرة اقل من المعادن عند درجات الحرارة الاعتيادية وهذا ما هو حاصل فعلا

ومن الجدير بالذكر ان n_i تتغير مع درجة الحرارة بصورة اسية حيث ان

$$n_i^2 \propto T^3 e^{-E_g/KT}$$

وعليه فان n_i تزداد بشكل كبير وسريع مع الازدياد في درجة الحرارة وبين الشكل أدناه تغير n مع $\frac{1}{T}$



تغير كثافة الالكترونات الحرة في اشباه الموصلات مع درجة الحرارة

هذا وقد وجد ان التوصلية تزداد في الجرمانيوم بنسبة 6 بالمائة تقريبا كلما ازدادت درجة الحرارة درجة واحدة اما في السيلكون فتبلغ الزيادة 8 بالمائة تقريبا وعليه فان الحرارة الزائدة قد تعرقل عمل اشباه الموصلات في بعض الدوائر الالكترونية .