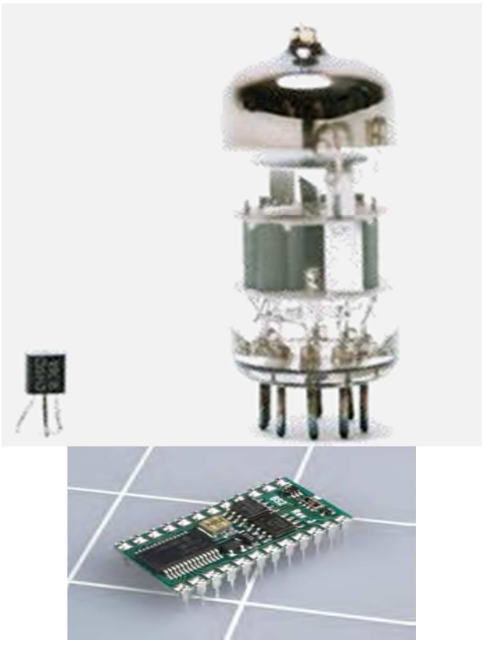
١.١ مقدمة:

الإلكترونيات هو العلم والتكنولوجيا الذي يعنى بدراسة انبعاث وحركة حاملات الشحنة الكهربائية في الفراغ أو في الأوساط الغازية أو أشباه الموصلات. وتكمن أهمية الأجهزة الإلكترونية في قدرتها على القيام بالعديد من الوظائف أهمها: التقويم الموجي، التشكيل الموجي، تكبير الإشارة، توليد الإشارة، السيطرة، تحويل الطاقة الضوئية إلى كهربائية وبالعكس.



شكل ١-١: أنواع مختلفة من النبائط الإلكترونية

ان المكوّنات (النبائط) الإلكترونية يمكن تصنيفها حسب طبيعة الوسط التي تعمل ضمنها إلى:

١- نبائط الأنابيب المفرغة ومن امثلتها أنبوبة الأشعة المهبطية (CRO) والصمامات المفرغة بأنواعها.

٢- نبائط الحالة الغازية ومن امثلتها الصمامات المملوءة بالغاز (Gas-Filled Tubes).

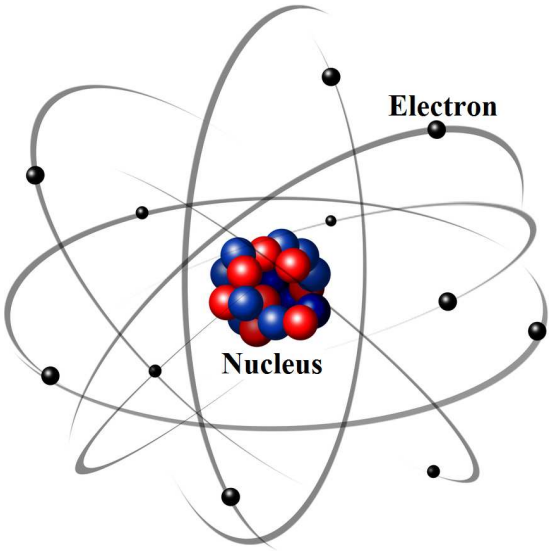
٣- نبائط الحالة الصلبة ويطلق عليها أيضا نبائط أشباه الموصلات ومن امثلتها الثنائي البلوري، الترانزستور، الثايرستور، الدوائر المتكاملة، وغيرها.

في الشكل (١-١) صور لمجموعة من النبائط الإلكترونية، والتي تضم الصمام المفرغ، ترانزستور ودائرة متكاملة.

ان اختراع الصمامات الإلكترونية المفرغة كان بمثابة فاتحة عصر الإلكترونيات وتطوره السريع وذلك منذ بدايات القرن التاسع عشر. إلا ان استعمال الصمامات المفرغة شهد تناقصاً مضطرداً مع اختراع الترانزستور عام 1947 وما تلاه من تطور كبير في الكترونيات أشباه الموصلات، إذ لم تعد الصمامات المفرغة تستعمل هذه الأيام إلا في نطاق ضيق جداً. وهذا عائد لتميز نبائط أشباه الموصلات بانها: اصغر حجماً، اكثر متانة، أقل تكلفه، عدم حاجتها إلى التسخين، وقلة استهلاكها للطاقة. ولذلك فسوف تقتصر دراستنا على الكترونيات أشباه الموصلات.

ان نبائط أشباه الموصلات مثل الثنائي البلوري، الترانزستور والدوائر المتكاملة مصنوعة من مواد شبه موصلة ولفهم عملها لابد من دراسة التركيب الذري للمواد بصورة عامة وتركيب المواد الصلبة البلورية بشكل خاص.

٢.١ التركيب الذري Atomic Structure:



شكل١-٢: مخطط للتركيب الذري

ان جميع المواد مكونة من ذرات، وكل ذرة مكون من نواة تتركز فيها كتلة الذرة وتضم بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة الشحنة (باستثناء ذرة الهيدروجين إذ تحتوي نواتها على بروتون واحد فقط)، وتدور حول النواة جسيمات متناهية في الصغر تسمى الإلكترونات وذات شحنة سالبة تساوي عددياً شحنة البروتون ($1.602X10^{-19}C$) وبمدارات محددة (دائرية أو قطع ناقص). وكما هو موضح بالشكل (١-٢).

في الحالة الاعتيادية يكون عدد الإلكترونات مساوياً لعدد البروتونات وبالتالي تكون الذرة متعادلة كهربائياً.

ان الإلكترونات التي تكون في مدارات ابعد عن النواة تمتلك طاقة اكبر وهي بنفس الوقت الأقل ارتباطاً مع الذرة بالمقارنة مع الإلكترونات في المدارات الأقرب، وهذا بسبب كون قوة التجاذب بين النواة الموجبة والإلكترون تتناقص كلما زادت المسافة بين الإلكترون والنواة.

تسمى الإلكترونات الأعلى طاقة والمتواجدة في الغلاف الخارجي الأبعد للنواة والتي تكون الأقل ارتباطاً بالنواة بإلكترونات التكافؤ (Valence electron) والغلاف الخارجي الأبعد يسمى غلاف التكافؤ (Valence shell). ان الكترونات التكافؤ هي التي تسهم في التفاعلات الكيميائية والروابط بين الذرات ضمن المادة وكذلك هي التي تحدد الخواص الكهربائية للمادة.

ان اقصى عدد من الإلكترونات (N_e) يمكن ان تتواجد في غلاف معين لذرة ما تعطى بالمعادلة:

$$N_e = 2n^2 \qquad (1-1)$$

حيث n هو تسلسل الغلاف.

وفيما يلي امثله لاقصى عدد من الإلكترونات يمكن ان تتواجد لأول أربعة أغلفة:

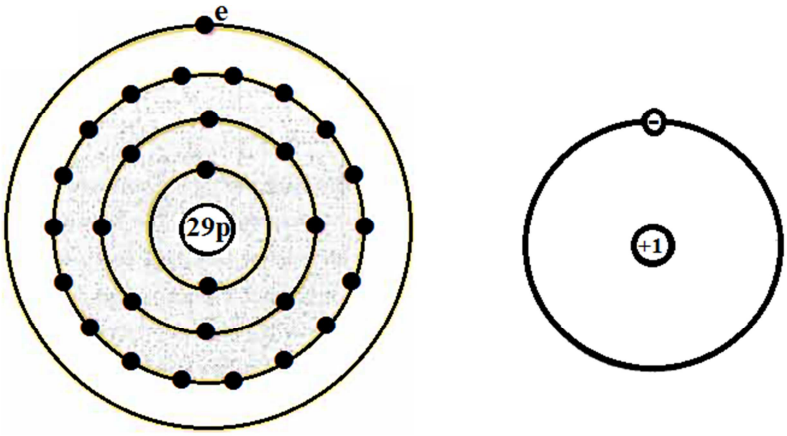
For n=1, $N_e = 2$

n=2, $N_e = 8$

n=3, $N_e = 18$

n=4, $N_e = 32$

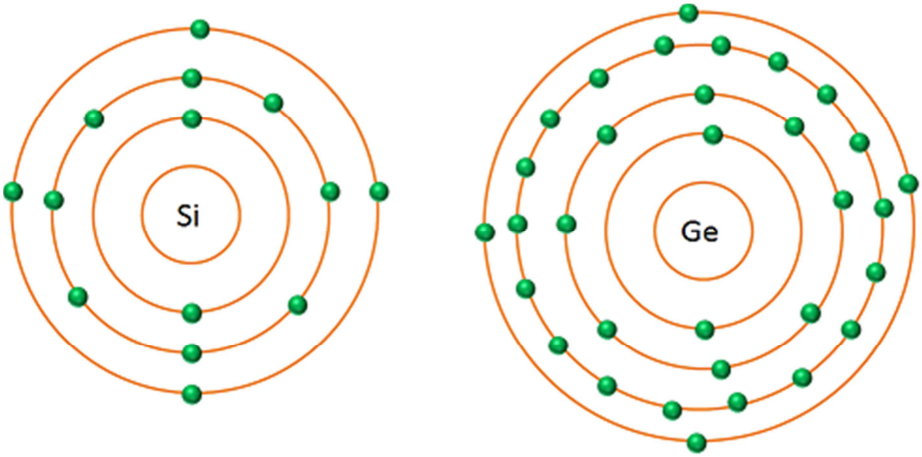
لتوضيح أهمية غلاف التكافؤ يعرف قلب (core) ذرة ما بانه النواة وكل الأغلفة الداخلية المحيطة بها، فعلى سبيل المثال تحتوي ذرة النحاس Cu على 29 الكترون بالشكل (١-٣).



شكل ١-٣: ذرة النحاس ومخطط القلب لها

يلاحظ من الشكل ان لقلب ذرة النحاس شحنة صافية مقدارها (+e) وذلك لانها تحتوي على 29 بروتون و 28 الكترون في الأغلفة الداخلية الثلاث، وحيث ان الكترون التكافؤ في مدار بعيد نسبياً عن قلب الذرة التي تحمل شحنة بروتون واحد (+e) لذلك يكون ارتباط الكترون التكافؤ في حالة ذرة النحاس ضعيف جداً وبالتالي فان أي قوة خارجية يمكنها بسهولة ان تحرر الكترون التكافؤ من ذرة النحاس وعند تسليط أي جهد كهربائي بسيط يتحرك الإلكترون من ذرة نحاس إلى أخرى ولهذا السبب يعتبر النحاس موصل جيد للكهرباء.

ان افضل الموصلات مثل الفضة ، النحاس والذهب تمتلك الكترون تكافؤ واحد ، بينما افضل العوازل تمتلك ثمان الكترونات تكافؤ (إذ ان غلاف التكافؤ يتشبع بثمان الكترونات) اما أشباه الموصلات فلها خواص كهربائية تقع بين الموصلات والعوازل ، أي ان افضل أشباه الموصلات تمتلك اربع الكترونات تكافؤ ومن امثلتها السليكون Si والجرمانيوم Ge وكما هو موضح بالشكل (١-٤).

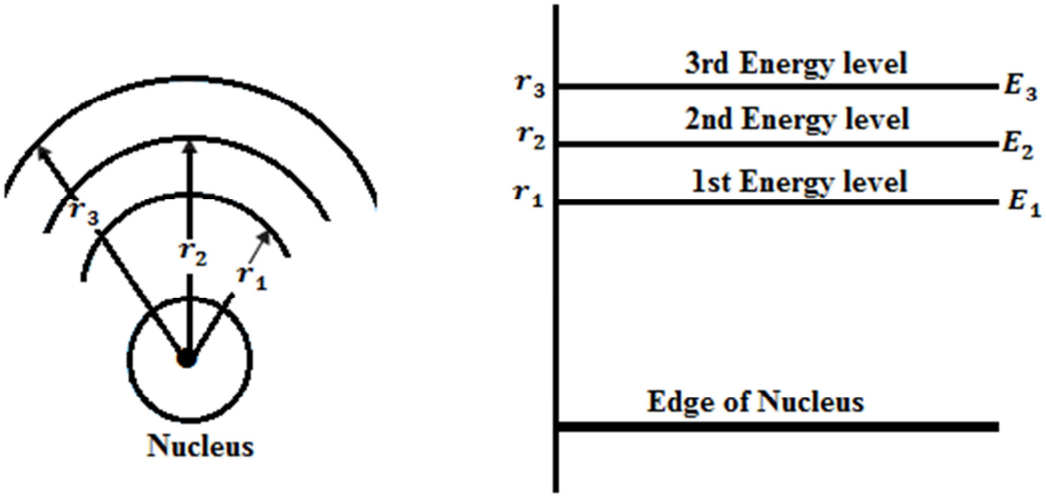


شكل ١-٤: مخطط لذرة السليكون وذرة الجرمانيوم

في الشكل (١-٤) نلاحظ الكترونات التكافؤ لذرة الجرمانيوم تقع في الغلاف الرابع بينما الكترونات التكافؤ الأربعة للسليكون تقع في الغلاف الثالث الأقرب للنواة. وهذا يعني ان الكترونات التكافؤ للجرمانيوم اعلى طاقة من مثيلاتها في ذرة السليكون وبالتالي فان الكترونات التكافؤ للجرمانيوم سوف تحتاج إلى طاقة اقل للإفلات من مجال جذب نواتها. وهذا يجعل الجرمانيوم اقل استقراراً في درجات الحرارة العالية، وذلك هو سبب أساسي لجعل السليكون المادة شبه الموصلة الأكثر استعمالاً في الوقت الراهن. علماً ان هناك سبباً آخر وهو وفرة السليكون بكثرة في الطبيعة إذ يُعد العنصر الثاني بعد الأوكسجين وفرة في الطبيعة ، إلا ان صعوبة استخلاص عنصر السليكون من مركباته ومن ثم تنقيته كانت وراء انتشار استعمال الجرمانيوم في بدايات عصر الكترونيات أشباه الموصلات وبعد التغلب على تلك المشكلات التقنية اصبح السليكون العنصر الأكثر استعمالاً في تصنيع نبائط أشباه الموصلات.

١.٣ نظرية حزم الطاقة في المواد الصلبة: Energy Bands Theory in Solids

في حالة ذرة مفردة معزولة فان مدار الإلكترون يتأثر فقط بالشحنات الموجودة في الذرة المعزولة، وفي هذه الحالة تكون مستويات الطاقة محددة لكل مدار مسموح للإلكترون وكما موضح بالشكل (١-٥).



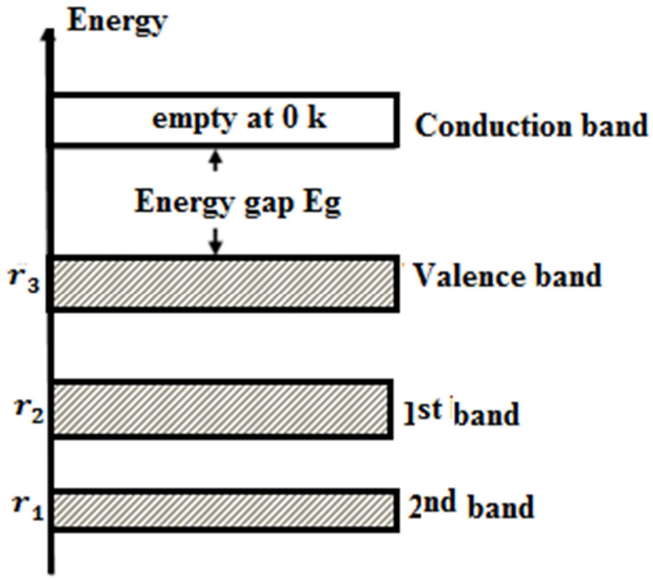
شكل ١-٥: مخطط مستويات الطاقة لذرة منفردة معزولة

ان ما ذكر بخصوص الذرة المعزولة لا ينطبق في حالة الذرات المكونة للمادة الصلبة. ان معظم المواد الصلبة تكون بلورية التركيب (Crystalline Structure) حيث تصطف مكوناتها الذرية بصورة منتظمة ومتكررة في نسق ثلاثي الأبعاد تسمى البلورة (Crystal).

على سبيل المثال عندما تتحد ذرات السليكون لتكوين بلورة السليكون فان مدار الكترون في ذرة معينة سوف يتأثر بالنوى والإلكترونات الموجودة في كافة الذرات الأخرى التي تحتويها البلورة بالإضافة للشحنات الموجودة في ذرته. وبما ان كل الكترون له موقع مختلف داخل البلورة لذا لا يوجد الكترونان يتأثران

بالشحنات الموجودة بنفس التأثر. ولهذا السبب يختلف مدار كل الكترون عن مدارات الإلكترونات الأخرى وبالتالي فان مستويات الطاقة لكل الكترون ستكون مختلفة.

وبما ان هناك مليارات من الكترونات المدار الأول فان مستويات الطاقة المتباينة قليلاً تشكل تجمعاً أو حزمة (band) الطاقة الأول. كذلك وجود مليارات من الكترونات المدار الثاني يشكل حزمة الطاقة الثاني بسبب الاختلاف البسيط في مستوى طاقة المدار الثاني وتشكل كافة الكترونات المدار الثالث حزمة الطاقة الثالثة وهكذا. الشكل (١-٦) يوضح مخطط لحزم الطاقة لبلورة السليكون عند درجة حرارة الصفر المطلق (-273 ^{o}C).



شكل ١-٦: مخطط حزم الطاقة لبلورة السليكون عند درجة الصفر المطلق

يلاحظ من الشكل كذلك انه بمستوى اعلى من حزمة التكافؤ توجد حزمة التوصيل (Conduction band) التي تمثل المجموعة الأعلى طاقة وذات انصاف الأقطار التي تحقق طبيعة الإلكترون كجسيم وكموجة. ان المدارات في حزمة التوصيل كبيرة بالقدر الذي يجعل جذب النواة للإلكترون ضعيفاً جداً وبعبارة أخرى لو رفع الكترون إلى داخل حزمة التوصيل لاستطاع التحرك بحرية من ذرة إلى أخرى ولهذا السبب تسمى الإلكترونات الموجودة في حزمة التوصيل بالإلكترونات الحرة (*free electrons*).

عند درجة حرارة الصفر المطلق تكون حزمة التوصيل فارغة وهذا يعني انه لا توجد طاقة كافية عند أي الكترون لكي ينتقل إلى مدار حزمة التوصيل. وتسمى المنطقة التي تفصل بين حزمتي التكافؤ والتوصيل بفجوة الطاقة (Energy gap) وتسمى أيضا فجوة الطاقة الممنوعة (Forbidden Energy gap) وذلك لعدم احتوائها على حالات طاقة مسموحة بها.

١.٤ مستوى فيرمي (Fermi level)

ان احتمالية $f_{(E)}$ أي الكترون للتواجد في مستوى معين من الطاقة (E) في حالة الاتزان الحراري في درجة حرارة معينة (T) تعطى بدلالة دالة فيرمي–ديراك:

$$f_{(E)} = \frac{1}{1+e^{(E-E_f)/kT}} \qquad (1-2)$$

حيث E_f هي طاقة فيرمي وقيمتها تعتمد على طبيعة المادة ودرجة الحرارة.

k ثابت بولتزمان ($k=1.38x10^{-23}$ J/K)

T درجة الحرارة بالكلفن

من دالة فيرمي–ديراك نلاحظ انه في حالة الصفر المطلق فانه:

$$If\ \ T = 0k$$
$$f_{(E)} = \begin{cases} 0 & for\ \ E \rangle E_f \\ 1 & for\ \ E \langle E_f \end{cases}$$

من النتيجة الأخيرة نجد انه في حالة درجة حرارة الصفر المطلق فأن مستويات الطاقة الأعلى من طاقة فيرمي تكون فارغة تماماً ($f_{(E)}=0$) بينما مستويات الطاقة الأقل من طاقة فيرمي تكون مملؤة تماماً ($f_{(E)}=1$) ومن ذلك يمكننا ان نعرف **طاقة فيرمي** (Fermi energy) بانها اعلى قيمة للطاقة يمكن ان يمتلكها الكترون في درجة حرارة الصفر المطلق.

كما يمكننا ان نلاحظ من دالة فيرمي–ديراك انه في حالة درجة الحرارة الأكبر من الصفر المطلق وكانت ($E=E_f$) فان

$$If\ \ E = E_f\ \ and\ \ T \neq 0k$$
$$f_{(E_f)} = \frac{1}{2}$$

من النتيجة السابقة يمكن ان نعرف **مستوى فيرمي** (Fermi level) بانه مستوى الطاقة الذي تكون احتمالية اشغاله من الكترون مساوية لـ 50%

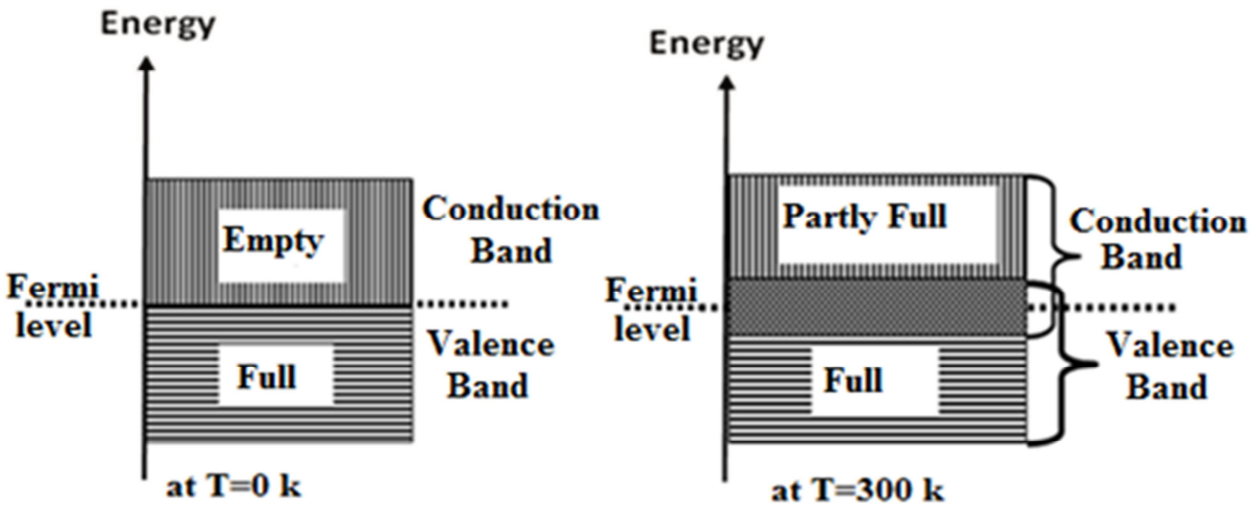
١.٥ تصنيف المواد حسب نظرية الحزم:

بالاعتماد على نظرية حزم الطاقة يمكن تصنيف المواد الصلبة حسب توصيليتها الكهربائية إلى:

١- مواد موصلة (Conductors):

الشكل (١-٧) يوضح مخططاً نموذجياً لحزم الطاقة في المواد الموصلة. يلاحظ ان مستويات الطاقة قد رسمت بشكل مستمر في حزمة التكافؤ بحيث ظهرت هذه الحزمة متداخلة مع حزمة التوصيل وبالتالي لم يعد هناك وجود لفجوة الطاقة. ان اختفاء فجوة الطاقة في البلورات الموصلة يعني ان أي الكترون تكافؤي سوف يكون حراً في التجوال خلال البلورة وكذلك التحرك استجابة للمجال الكهربائي عند وجوده فيه وهذا هو السبب المباشر في عده موصلاً.

تتوزع الإلكترونات في الحزم حسب قاعدة الاستثناء لباولي وعند درجة حرارة الصفر المطلق لا تستطيع الإلكترونات التحرك خلال البلورة وذلك لانها جميعاً مرتبطة بشدة إلى ذراتها وبالتالي تملأ حزمة التكافؤ من أوطأ مستوى طاقة فيها إلى اعلى مستوى طاقة فيها والذي يسمى مستوى فيرمي (Fermi Level). اي ان حزمة التوصيل في المواد الموصلة تكون فارغة عند درجة حرارة الصفر المطلق إذ لا توجد طاقة كافية عند اي الكترون لكي ينتقل في مدار حزمة التوصيل. عند ارتفاع درجة الحرارة فوق الصفر المطلق فأن الطاقة الحرارية التي سوف تكتسبها الإلكترونات ستمكن بعضاً منها من الإفلات من ذراتها والانتقال إلى حزمة التوصيل فيحدث تداخل بين حزمتي التكافؤ والتوصيل ، وعند تسليط فرق جهد عبر الموصل فان مجالاً كهربائياً يتولد داخل الموصل يعمل على تعجيل الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل وتوليد تيار كهربائي. الشكل التالي يوضح مخطط لحزم الطاقة للمواد الموصلة في درجة حرارة الصفر المطلق وكذلك في درجة حرارة الغرفة (300K) حيث يحدث التداخل بين حزمتي التكافؤ والتوصيل.

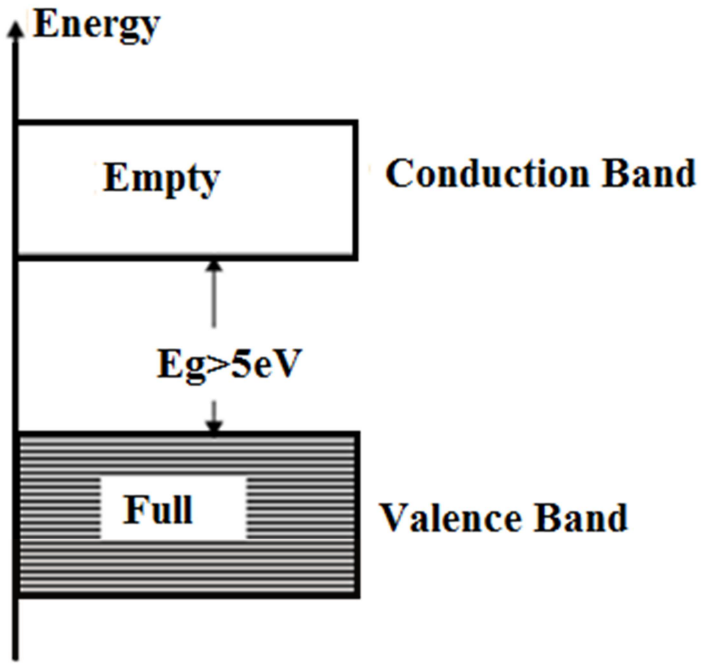


شكل ١-٧: مخطط حزم الطاقة للمواد الموصلة

بشكل عام تزداد مقاومة المواد الموصلة بزيادة درجة الحرارة وذلك لان ارتفاع درجة الحرارة يزيد من معدل التصادمات التي تحدث بين الإلكترون المتحرك والذرات المهتزة حول مواضع اتزانها في البلورة.

٢- مواد عازلة (Insulators):

الشكل (١-٨) يوضح مخططاً نموذجياً لحزم الطاقة في المواد العازلة ، حيث يلاحظ ان حزمة التكافؤ تكون مفصولة عن حزمة التوصيل بفجوة طاقة كبيرة نسبيا (5 eV أو اكثر)، في درجات الحرارة الاعتيادية لا تمتلك الإلكترونات في حزمة التكافؤ الطاقة التي تمكنها من الانتقال إلى حزمة التوصيل وبالتالي فانه يمكن القول ان بلورة المادة العازلة تتميز بامتلاكها فجوة طاقة كبيرة نسبياً وتكون حزمة التكافؤ فيها مملؤة بالإلكترونات بينما تكون حزمة التوصيل فارغة.



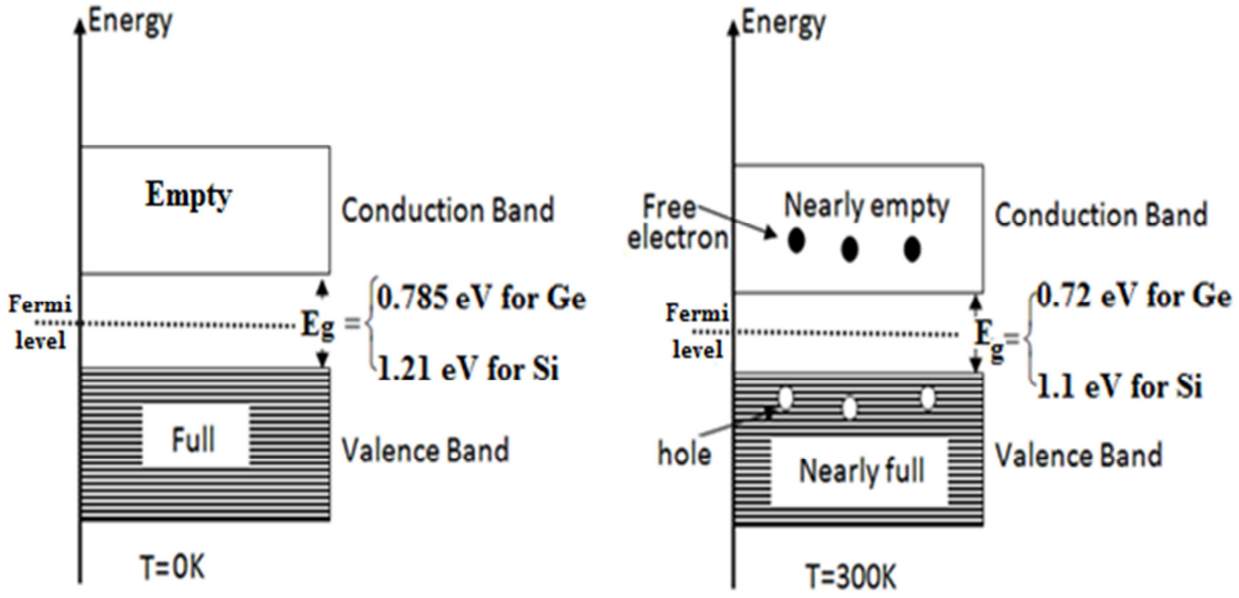
شكل ١-٨: مخطط حزم الطاقة للمواد العازلة

يتضح مما سبق عدم وجود شحنات حرة في المواد العازلة حيث تكون الكتروناتها مقيدة في أماكنها بقوى ذرية وجزيئية كبيرة جداً، وعند تسليط فرق جهد على هذه المواد فان المجال الكهربائي المتولد سوف يعمل فقط على ازاحة هذه الإلكترونات قليلاً عن مواضع اتزانها الأصلية. في حالات خاصة وعند تسليط فرق جهد كهربائي عالي جداً بحيث تكتسب الكترونات التكافؤ طاقة اكبر من فجوة الطاقة فيحدث انتقال للإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل فيسري تيار كهربائي في العازل وفي هذه الحالة يقال ان مقاومة العازل انهارت بتأثير المجال الكهربائي العالي.

ان تأثير ارتفاع درجة الحرارة على مقاومة المواد العازلة طفيف جداً ، إذ ان زيادة درجة الحرارة تقلل بصورة طفيفة جداً من مقاومة المادة العازلة إلا ان قيمة المقاومة لا تزال عالية جداً.

٣- مواد شبه موصلة (Semiconductors):

لا يختلف مخطط الطاقة لأشباه الموصلات عن نظيره في العوازل إلا في سعة فجوة الطاقة حيث تكون قيمتها في أشباه الموصلات في حدود واحد الكترون فولت (1eV). وتتميز المواد شبه الموصلة بكونها عازلة تماماً عند درجة حرارة الصفر المطلق حيث تكون حزمة التوصيل فارغة (أي لا توجد طاقة كافية عند أي الكترون لكي ينتقل إلى حزمة التوصيل) وفجوة الطاقة تكون (0.785eV) للجرمانيوم و (1.21eV) للسليكون عند الصفر المطلق. وعند ارتفاع درجة الحرارة تنتقل بعض الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل وكذلك تقل فجوة الطاقة بزيادة درجة الحرارة فمثلاً عند درجة حرارة الغرفة تكون فجوة الطاقة (0.72eV) للجرمانيوم و (1.1eV) للسليكون. وبزيادة درجة الحرارة يزداد عدد الإلكترونات المنتقلة إلى حزمة التوصيل وبالتالي تزداد التوصيلية اي ان مقاومة شبه الموصل تقل بارتفاع درجة الحرارة (ويقال عندها ان للمواد شبه الموصلة معامل حراري سالب *negative temperature coefficient*) وعند درجات الحرارة العالية جداً تصبح المادة شبه الموصلة ذات توصيلية عالية اي تصبح مادة موصلة في درجات الحرارة العالية جداً. وفي درجة حرارة الغرفة لا تكون المادة شبه الموصلة عازلاً جيداً كما لا تكون موصلاً جيداً ولهذا تدعى شبه موصل. الشكل التالي يوضح مخطط حزم الطاقة للمواد شبه الموصلة في درجة حرارة الصفر المطلق وفي درجة حرارة الغرفة.



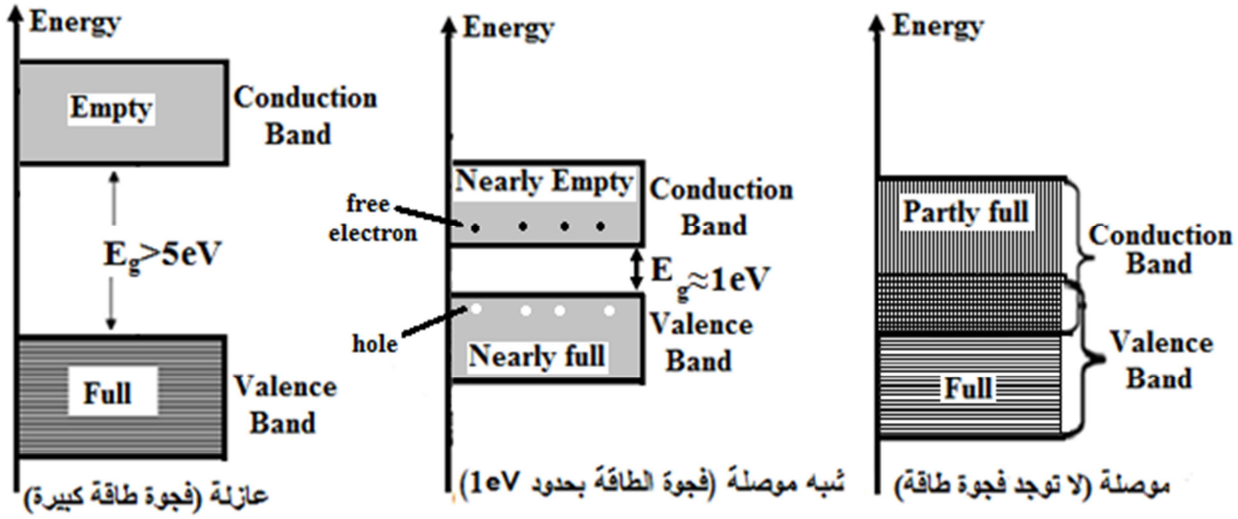
شكل ١-٩: مخطط حزم الطاقة للمواد شبه الموصلة

ان قيمة فجوة الطاقة لمادة معينة تعتمد على طبيعة المادة وكذلك على درجة الحرارة حيث تقل فجوة الطاقة بزيادة درجة الحرارة (T). وحسب العلاقة التجريبية لكل من السليكون والجرمانيوم:

For Si, $E_g = 1.21 - 3.6\times10^{-4}\times T$ (eV), where T in K

For Ge, $E_g = 0.785 - 2.23\times10^{-4}\times T$ (eV), where T in K

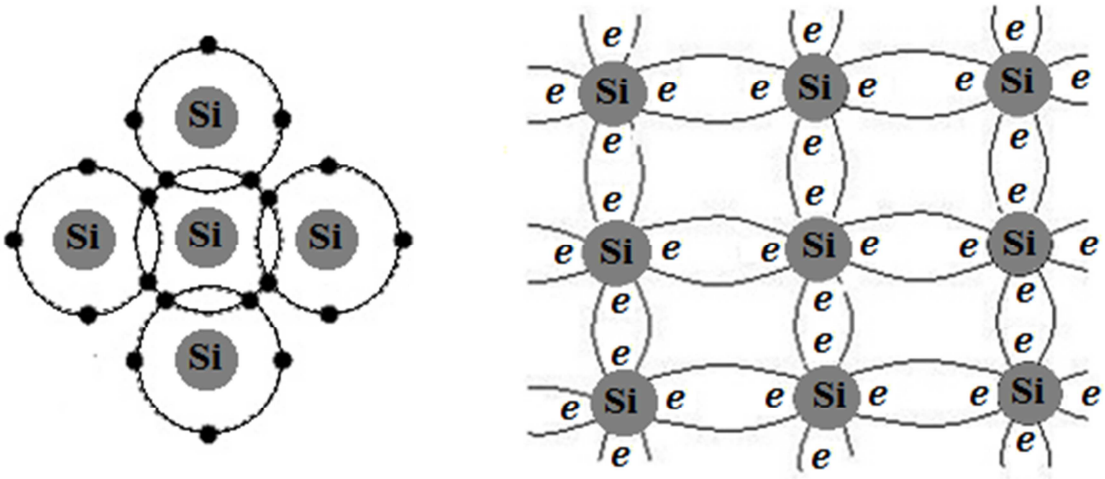
و لتسهيل المقارنة الشكل (١-١٠) يوضح حزم الطاقة للمواد العازلة، شبه الموصلة و الموصلة في درجة حرارة الغرفة.



شكل ١-١٠: مقارنة بين مخططات حزم الطاقة للمواد: العازلة، شبه الموصلة و الموصلة

١.٦ أشباه الموصلات النقية (Intrinsic Semiconductors):

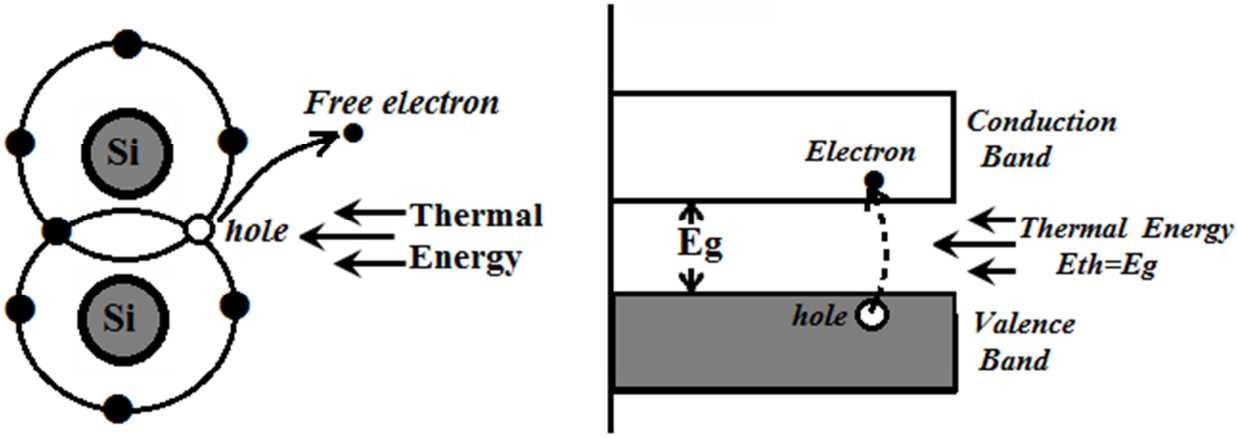
المواد شبه الموصلة النقية (Intrinsic semiconductor material) هي مواد شبه موصلة منقاه بعناية للتقليل من الشوائب والعيوب البلورية لأقصى حد ممكن ، ومن امثلتها السليكون النقي والجرمانيوم النقي. ان أشباه الموصلات هي مواد رباعية التكافؤ حيث يحتوي غلاف التكافؤ على أربعة الكترونات. عندما ترتبط ذرات شبه الموصل النقي لتشكل البلورة فانها ترتبط فيما بينها بأواصر تساهمية (Covalent Bonds). على سبيل المثال تمتلك ذرة السليكون أربعة الكترونات تكافؤية في غلافها التكافؤي، ولتشكيل بلورة السليكون تتحد ذرات السليكون بطريقة بحيث تحتوي في مداراتها التكافؤية ثمانية الكترونات (لماذا) ولكي يتم ذلك فان كل ذرة سيلكون تضع نفسها بين أربعة ذرات سليكون أخرى. ان كل جار يساهم بإلكترون مع الذرة المركزية وبذلك تكون الذرة المركزية قد التقطت أربعة الكترونات جامعة ثمانية الكترونات في مدارها التكافؤي. و تمثل كل آصرة بزوج من خطين حيث يمثل كل خط الكترون مساهم كما هو موضح بالشكل (١-١١).



شكل ١–١١: تمثيل الأواصر التساهمية لبلورة السليكون

في درجة حرارة الصفر المطلق تكون جميع الإلكترونات مقيدة بأواصر تساهمية ولا توجد أي الكترونات حرة وبالتالي تكون مادة شبه الموصل النقي عازل تام في درجة حرارة الصفر المطلق ($-273^{o}C$).

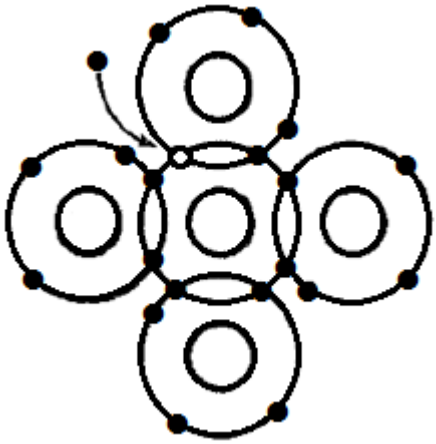
عند ارتفاع درجة الحرارة عن الصفر المطلق فأن بلورة شبه الموصل النقي تبدأ بالاهتزاز الميكانيكي ومتى ما كانت الطاقة الحرارية المكتسبة تساوي أو اكبر من فجوة الطاقة فأن الآصرة التساهمية تنكسر وينتج عن ذلك توليد الكترون حر Free electron وفجوة Hole (مكان الكترون فارغ) وتسمى هذه العملية عملية توليد زوج الكترون–فجوة (electron–hole pair) ، ان أي الكترون يكتسب طاقة خارجية وينتقل من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل يترك فجوة في حزمة التكافؤ، وكما هو موضح بالشكل (١–١٢).



شكل ١–١٢: تمثيل لعملية تولد زوج الكترون–فجوة

ان الفجوة تتصرف كشحنة موجبة (positive charge) حيث ان فقدان الإلكترون من ذرة ما يولد ايون موجب، والفجوة المتولدة سوف تعمل على جذب واقتناص اي الكترون قريب منها. ان احتواء المادة

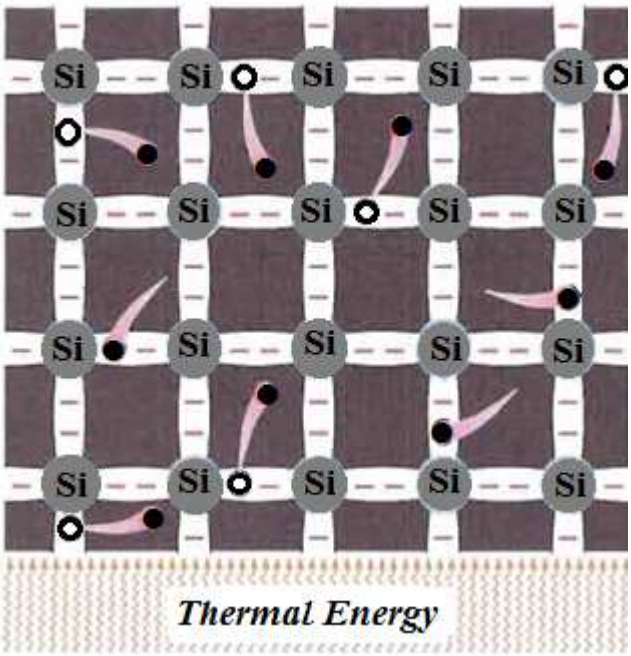
شبه الموصلة على الفجوات يُعد اختلاف حاسم بين المواد الموصلة وشبه الموصلة. ان امتلاك المواد شبه الموصلة للفجوات تجعلها قادرة على القيام بالعديد من الوظائف التي لا تتمكن من تأديتها المواد الموصلة.



شكل ١-١٣: مخطط لعملية إعادة الالتحام

ان الطاقة الحرارية المكتسبة من قبل مادة شبه الموصل النقي ستولد عدد متساوي من الإلكترونات الحرة والفجوات. الإلكترونات الحرة المتولدة ستتحرك بصورة عشوائية داخل البلورة ونتيجة لذلك فان بعضاً من تلك الإلكترونات الحرة سوف تقترب من الفجوات وتصبح تحت تأثير جذبها الكهربائي وتلتحم معها وتدعى هذه العملية بإعادة الالتحام (Recombination) ونتيجة لذلك يختفي الإلكترون الحر والفجوة ويعاد تشكيل آصرة تساهمية كما موضح بالشكل (١-١٣).

ان إعادة الالتحام تحصل في شبه الموصل لذلك فكل فجوة تملأ أخيراً بإلكترون حر إلا في حالة وجود ضخ مستمر لطاقة حرارية حيث تنتج باستمرار أزواج (الكترون–فجوة) جديدة. ان متوسط الزمن بين ولادة واختفاء زوج (الكترون–فجوة) يدعى زمن البقاء (Lifetime) وهو يتراوح عادة بين بضعة نانو ثانية (*nsec*) إلى عدة ملي ثانية(*msec*) و يعتمد ذلك على مدى كمال التركيب البلوري وعلى عوامل أخرى.

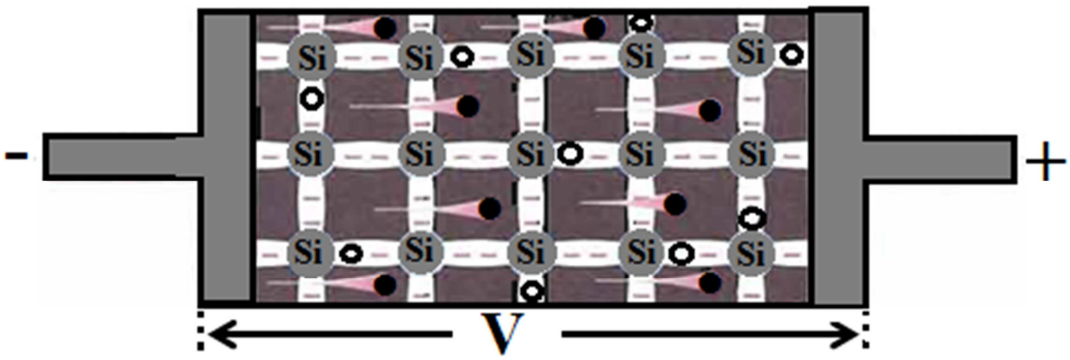


شكل ١-١٤: مخطط لعملية توليد مستمرة لأزواج الكترون–فجوة

الشكل (١-١٤) يوضح عملية توليد مستمرة لأزواج (الكترون–فجوة) في بلورة السليكون نتيجة لتسليط طاقة حرارية بصورة مستمرة، بينما بعضاً من الإلكترونات الحرة المتولدة يُعاد التحامها من الفجوات.

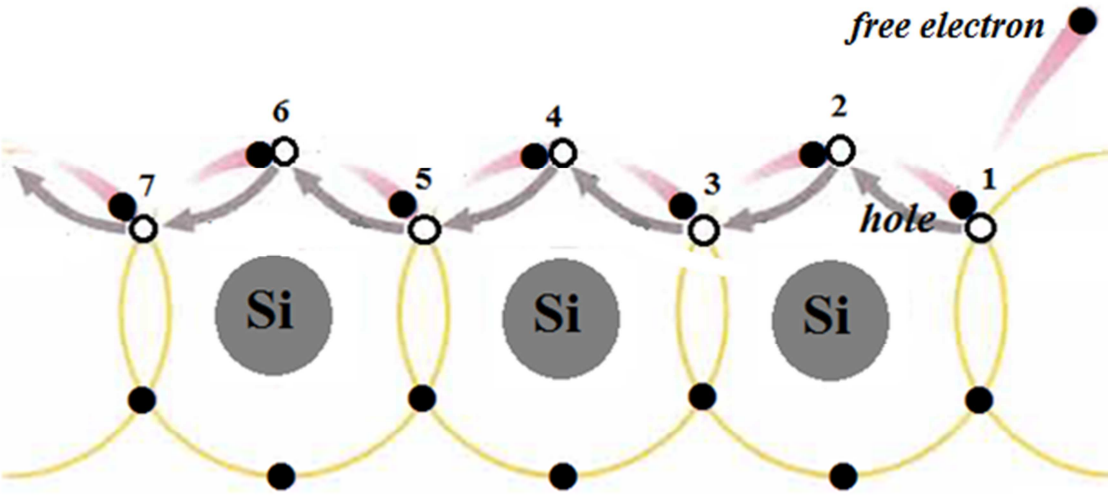
عند تسليط فرق جهد على طرفي شبه موصل نقي، يتولد نوعان من التيار داخلها، الأول هو من الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل المتولدة حرارياً والتي تتجه باتجاه معاكس لاتجاه المجال الكهربائي

المسلط (باتجاه القطب الموجب للبطارية)، ويسمى التيار الناتج بتيار الإلكترون (*electron current*)، كما موضح بالشكل (١-١٥).



شكل ١-١٥: مخطط لتيار الإلكترون داخل مادة شبه الموصل

النوع الثاني من التيار يحدث في حزمة التكافؤ، حيث توجد الفجوات المتولدة حرارياً، وكذلك فان الكترونات التكافؤ لاتزال مرتبطة بذراتها ولا تستطيع التحرك بحرية كما هو الحال لإلكترونات التوصيل، ولكن بإمكان الكترونات التكافؤ ان تتحرك لتسقط في أقرب فجوة وينتج عن ذلك تغير بسيط في مستوى طاقتها، وهي بذات الوقت تترك في المكان الذي تحركت منه فجوة جديدة والتي بدورها تجذب الكترون تكافؤ آخر فيظهر وكأن الفجوة تختفي من مكان لتظهر في مكان آخر وباتجاه المجال الكهربائي المسلط (باتجاه القطب السالب)، ونتيجة لذلك ينشأ تيار يسمى تيار الفجوة (*hole current*). الشكل (١-١٦) يوضح حركة الكترون تكافؤ لليمين لمليء فجوة لليترك فجوة في مكانه والتي تملئ بإلكترون تكافؤي من ذرة مجاورة فيظهر وكأن الفجوة تحركت لليسار.



شكل ١-١٦: مخطط لتيار الفجوة داخل مادة شبه الموصل

ان التيار الكلي المار في شبه الموصل النقي نتيجة لتسليط فرق جهد يساوي مجموع تيار الإلكترونات الحرة وتيار الفجوات اي ان:

$$I = I_{electron} + I_{hole} \qquad (1-3)$$

في حالة شبه الموصل النقي يكون عدد الإلكترونات الحرة الناتجة من توليد زوج الكترون فجوة مساوياً لعدد الفجوات دائماً ويكون مستوى فيرمي قريباً جداً من منتصف فجوة الطاقة عند درجة الحرارة المعنية.

في درجات الحرارة الاعتيادية تكون مواد أشباه الموصلات في حالتها النقية مواد رديئة التوصيل وذلك لمحدودية عدد الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل والفجوات في حزمة التكافؤ الناتجة من عمليات توليد أزواج (الكترون–فجوة) وبالتالي يكون التيار الناتج عنها لا يصلح لكثير من التطبيقات العملية. علماً انه من الممكن زيادة توصيلية المادة شبه الموصلة من خلال زيادة درجة الحرارة، غير ان ذلك غير مرغوب به وذلك لصعوبة السيطرة على الخواص الكهربائية لأشباه الموصلات من خلال تسخينها.

لزيادة عدد حاملات الشحنة (الإلكترونات الحرة أو الفجوات) في مادة شبه الموصل النقي مثل السليكون أو الجرمانيوم يتم إضافة شوائب من مواد معينة وهذا ما سنتناوله في الفقرة التالية.

١.٧ التطعيم (التشويب) Doping

هو إضافة ذرات من الشوائب (ليست رباعية التكافؤ) إلى بلورة شبه الموصل النقي من اجل زيادة عدد الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل أو لأجل زيادة عدد الفجوات في حزمة التكافؤ. عندما تطعم بلورة شبه الموصل النقي تسمى شبه موصل مطعم أو شبه موصل غير نقي (extrinsic semiconductor). تسمى الذرات الشائبة المضافة بالذرات المشوبة (Impurity atoms) لتمييزها عن ذرات شبه الموصل (السليكون أو الجرمانيوم) السائدة في التركيب البلوري.

ان إضافة ذرات شائبة إلى أشباه الموصلات النقية بنسب قليلة تعمل على زيادة الموصلية لهذه المواد فمثلاً اذا أضيفت الشوائب بنسبة ذرة واحدة من الشوائب إلى مئة مليون (10^8) ذرة جرمانيوم فان ذلك يكفي لزيادة الموصلية بمقدار من ١٠ إلى ١٥ مرة. كذلك فان إضافة الذرات الشائبة إلى أشباه الموصلات النقية تعطينا إمكانية التحكم في كثافة الإلكترونات الحرة الموجودة في شبه الموصل أو كثافة الفجوات فيه وبصورة مستقلة . تضاف الشوائب عادة بنسبة ذرة شائبة واحدة لكل 10^8 ذرة شبه موصل نقية وتقل النسبة عن ذلك أو تزيد حسب الخصائص المطلوبة للنبيطة المنتجة.

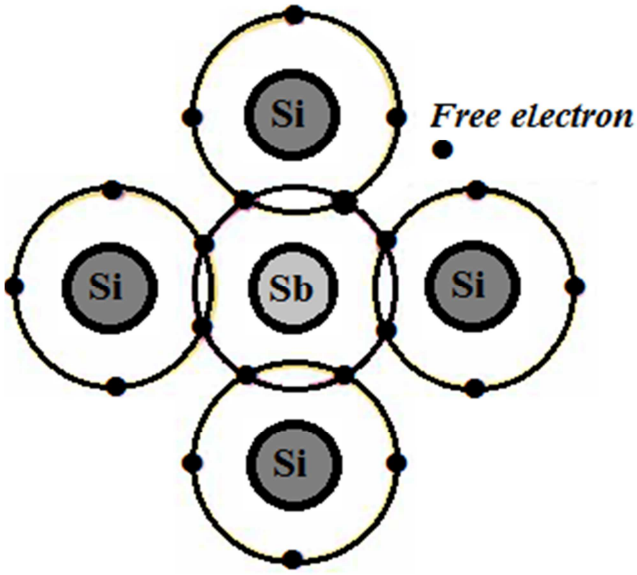
يوجد نوعان من الشوائب، الأول يعمل على زيادة الموصلية بزيادة عدد الإلكترونات في حزمة التوصيل وتكون من عناصر المجموعة الخامسة من الجدول الدوري (خماسية التكافؤ)، والنوع الثاني تعمل

على زيادة عدد الفجوات في حزمة التكافؤ وتكون ضمن عناصر المجموعة الثالثة (ثلاثية التكافؤ) ولهذا السبب فان شبه الموصل المشوب يصنف إلى نوعين رئيسيين وذلك حسب نوع الشوائب المضافة اليه.

أ- شبه موصل من النوع N (N-Type Semiconductor):

لزيادة عدد الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل في مادة شبه الموصل النقي تتم إضافة شوائب (ذرات) خماسية التكافؤ (غلافها التكافؤي يحتوي على خمسة الكترونات) مثل الزرنيخ As (Arsenic) ، الفسفور P (Phosphorus)، البزموث Bi (Bismuth) و الانتيمون Sb (Antimony).

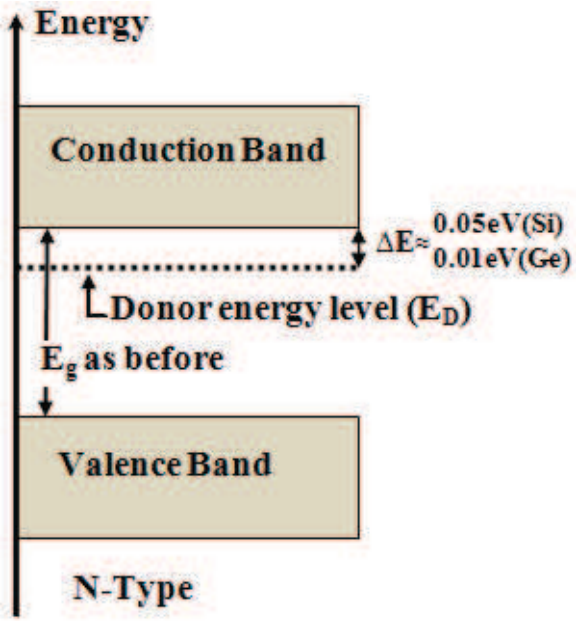
على سبيل المثال في حالة إضافة ذرة شائبة خماسية التكافؤ مثل ذرة الانتيمون إلى بلورة السليكون فانها سوف تزيح ذرة شبه موصل نقية وتحل محلها ضمن التركيب البلوري الجديد، وعندها فان أربعة الكترونات تكافؤية من ذرة الانتيمون تساهم بأربعة أواصر تساهمية مع ذرات السليكون المجاورة ويبقى الإلكترون الخامس لذرة الانتيمون معلقاً بالذرة الأم (الانتيمون) دون ان يدخل ضمن الأواصر التي تربط الذرات وكما هو موضح بالشكل (١-١٧):



شكل ١-١٧: مخطط لعملية إضافة شائبة خماسية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

ان ذلك الإلكترون الخامس يكون شبه طليق حيث تكفي طاقة صغيرة بحدود (0.05 eV) للسليكون و (0.01 eV) للجرمانيوم لينتقل إلى حزمة التوصيل (حيث يعتمد مقدار الطاقة المطلوبة على طبيعة شبه الموصل النقي والشائبة المضافة)، وبتعبير آخر فان إضافة شوائب خماسية التكافؤ يضيف مستوى طاقة جديد (E_D) يدعى مستوى الطاقة المانح (Donor energy level) ضمن فجوة الطاقة للبلورة وبالقرب من

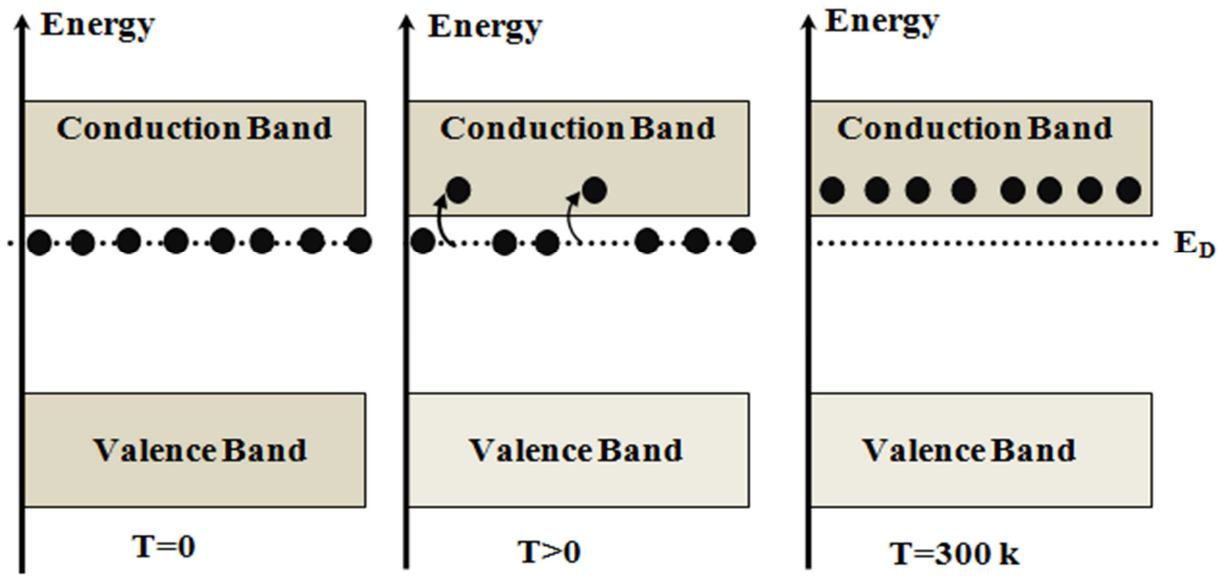
حزمة التوصيل وهو يمثل مستوى الطاقة للذرات الشائبة كما هو موضح لمخطط حزم الطاقة لمادة شبه موصل من النوع N. الشكل (١-١٨) يمثل مخطط حزم الطاقة لشبه موصل من النوع N ويظهر فيه تأثير الشائبة المانحة المضافة على حزم الطاقة حيث ينشئ مستوى طاقة مانح ضمن فجوة الطاقة وأسفل حزمة التوصيل مباشرة.



شكل ١-١٨: مخطط لحزم الطاقة بعد إضافة شائبة خماسية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

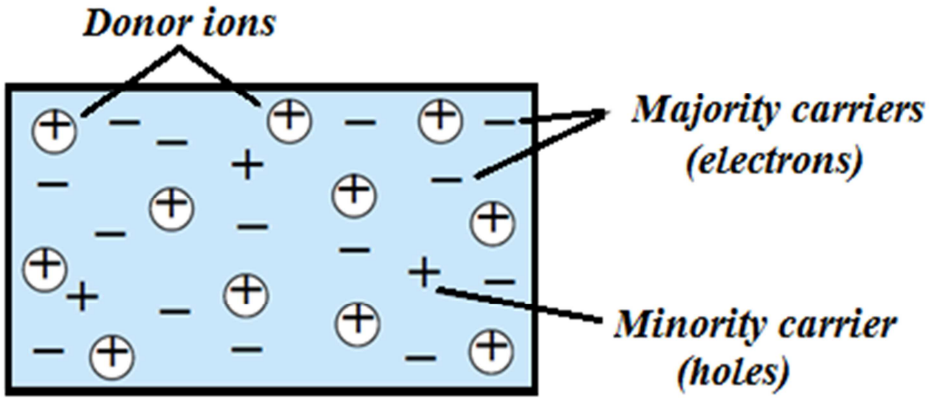
في درجة حرارة الغرفة تكون الطاقة الحرارة المكتسبة كافية لانتقال الإلكترون الخامس من مستوى الطاقة المانح إلى مستوى التوصيل، اي انه في درجة حرارة الغرفة فان لكل ذرة شائبة مضافة سيكون هناك الكترون حر في حزمة التوصيل. وبالنتيجة يمكننا التحكم في عدد الإلكترونات الحرة (وبالتالي توصيلة مادة شبه الموصل النقي) من خلال التحكم بنسبة (كمية) ذرات الشائبة المضافة. ولذلك تسمى الذرات الشائبة المضافة في هذه الحالة بالذرات الواهبة (Donors).

ان ظهور الإلكترونات الفائضة في حزمة التوصيل نتيجة لإضافة شوائب خماسية التكافؤ لا يرافقها ظهور الفجوات في حزمة التكافؤ، وذلك لان تلك الإلكترونات لا تنتقل من حزمة التكافؤ كما يحدث ذلك في مادة شبه الموصل النقي (توليد زوج الكترون-فجوة) بل انها تنتقل من مستويات طاقة واقعة اسفل حافة حزمة التوصيل (المستوى الواهب) كما موضح بالشكل (١-١٩).



شكل ١–١٩: مخطط لحزم الطاقة لشبه موصل من النوع السالب

ينبغي الإشارة هنا انه في درجات الحرارة الأعلى من الصفر المطلق تستمر الطاقة الحرارية المكتسبة في توليد أزواج (الكترون–فجوة) ولكن ضمن درجات الحرارة الاعتيادية يكون عدد الإلكترونات الحرة المضافة من جراء عملية التشويب اكبر بكثير من عدد الفجوات الناتجة من عمليات توليد (الكترون–فجوة) ولذلك تسمى الإلكترونات الحرة في شبه الموصل من النوع N بحاملات الشحنة الأكثرية (majority carrier) وتسمى الفجوات بحاملات الشحنة الأقلية (minority carriers) ويكون غالبية التيار المتولد نتيجة لحركة الإلكترونات الحرة ولهذا السبب تسمى مادة شبه الموصل المشوبة بذرات خماسية التكافؤ بشبه موصل من النوع السالب كما هو موضح بالشكل (١–٢٠).

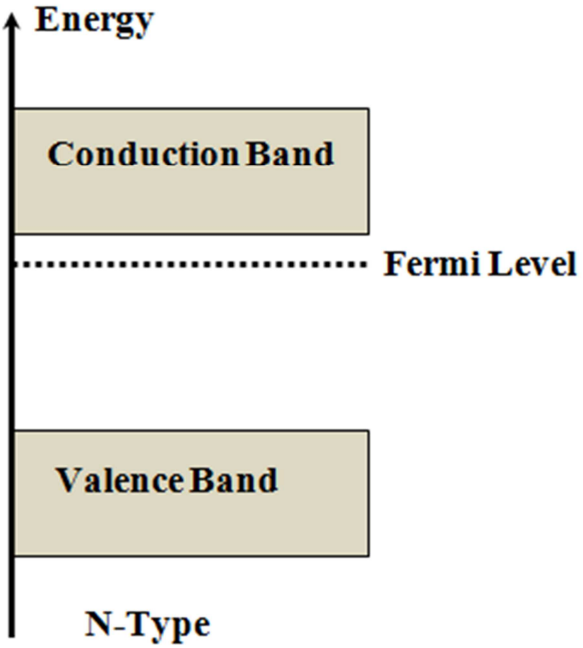


شكل ١–٢٠: مخطط لحاملات الشحنة الأكثرية والأقلية لشبه موصل من النوع السالب

ان مادة شبه الموصل من النوع N اجمالاً تعتبر متعادلة كهربائياً (كما هو الحال في شبه الموصل النقي) بصرف النظر عن مقدار التشويب وذلك لان الشائبة الخماسية متعادلة كهربائياً بالأساس وكذلك ذرات شبه الموصل النقي وبالتالي فان التركيب الذي يضم الاثنين معاً لابد ان يكون متعادلاً كذلك، والإلكترون الخامس المضاف يكون ضعيف الارتباط بذرته وفي حالة ابتعاده عن ذرته ويصبح الالكتروناً حراً يساهم في عملية التوصيل بينما ذرتها الأم تصبح ايوناً موجباً ولا تساهم في عملية التوصيل لانها مرتبطة بشدة ضمن التركيب البلوري.

على سبيل المثال ، عند درجة حرارة الغرفة فان مادة السليكون النقية تمتلك الكترون حر واحد لكل (10^{12}) ذرة سليكون (في حالة الجرمانيوم الكترون واحد لكل 10^9 ذرة) وفي حالة إضافة شوائب بنسبة شائبة لكل (10^7)، فان تركيز حاملات الشحنة (الإلكترونات) سوف يزيد بنسبة 100000 مرة.

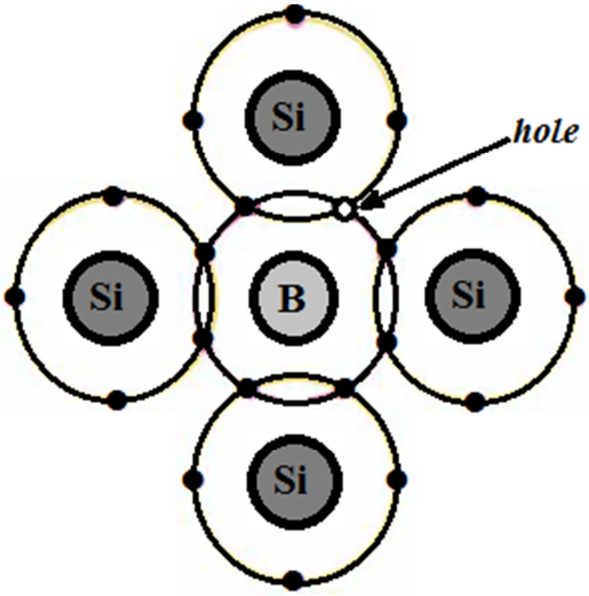
ان مستوى فيرمي في حالة شبه الموصل من النوع N سوف ينزاح مقترباً من حزمة التوصيل وكلما زادت نسبة التشويب اقترب مستوى فيرمي من حزمة التوصيل اكثر كما هو موضح بالشكل التالي:



شكل ١-٢١: مخطط مستوى فيرمي لشبه موصل من النوع السالب

ب-شبه موصل من النوع P (P-Type Semiconductor):

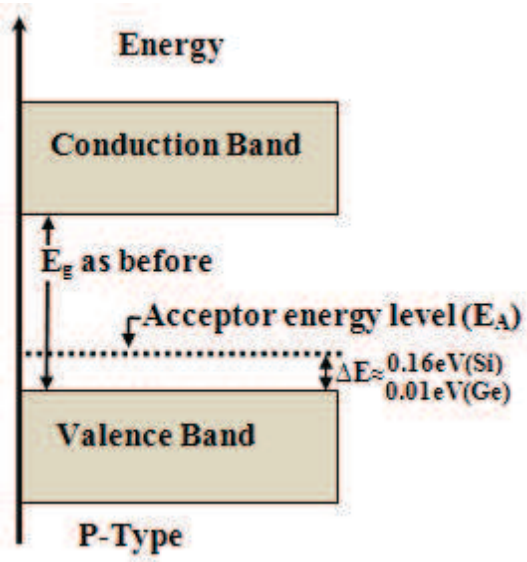
لزيادة عدد الفجوات في بلورة شبه الموصل يتم إضافة شوائب ثلاثية التكافؤ (غلافها الخارجي يحتوي على ثلاث الكترونات تكافؤ) مثل الكاليوم Ga (Gallium) والانديوم In (Indium) والبورون B (Boron). عند إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ مثل البورون إلى بلورة السليكون النقي فانها سوف تزيح ذرة سليكون وتحل محلها، ان كل ذرة شائبة (بورون) ستكون محاطة بأربعة جيران (ذرات سليكون) ، وبما ان كل ذرة ثلاثية التكافؤ قد جلبت معها ثلاثة الكترونات في مدارها التكافؤي، لذلك ستنتقل سبعة الكترونات فقط في مدارها التكافؤي (أربعة من ذرات الجوار وثلاثة منها) وبعبارة أخرى تظهر فجوة في كل ذرة شائبة ثلاثية التكافؤ كما هو موضح بالشكل (١-٢٢).



شكل ١-٢٢: مخطط لعملية إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

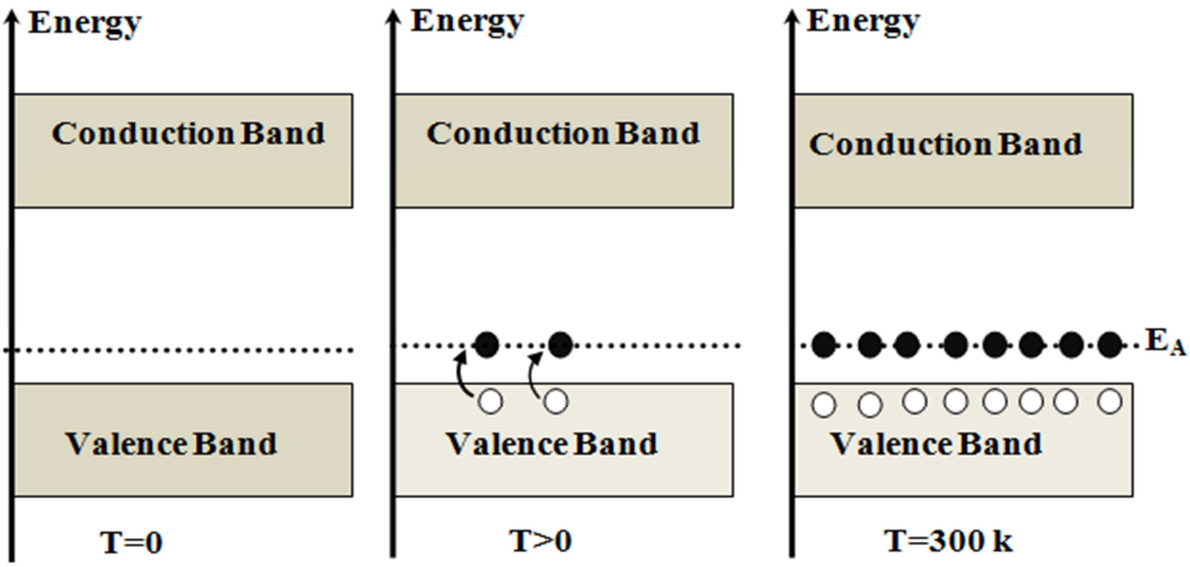
ان الفجوة الناشئة من التشويب ستكون محاطة بالإلكترونات العائدة لذرات شبه الموصل النقي (السليكون)، وتلك الإلكترونات تحتاج إلى طاقة قليلة جداً لكي تدخل في تلك الفجوة وعند انتقال الكترون معين لمليء تلك الفجوة فانه يترك في محله (ذرة السليكون) فجوة جديدة ولذلك تدعى الذرات الشائبة ثلاثية التكافؤ بالذرات المتقبلة (acceptors) لتقبلها الإلكترونات من ذرات البلورة الأصلية (بلورة شبه الموصل النقي). وكما هو الحال في الشوائب المانحة فان الشوائب القابلة تكون مستوى طاقة جديد (E_A) ضمن فجوة الطاقة وعلى مسافة قريبة جداً من حزمة التكافؤ يطلق عليها مستوى الطاقة القابل (Acceptor energy level) وتبلغ قيمته حوالي (0.01eV) بالنسبة للجرمانيوم و (0.16eV) بالنسبة للسليكون.

الشكل (١-٢٣) يمثل مخطط حزم الطاقة لشبه موصل من النوع P ويظهر فيه تأثير الشائبة القابلة المضافة على حزم الطاقة حيث ينشئ مستوى طاقة قابل ضمن فجوة الطاقة واعلى حزمة التكافؤ مباشرة.



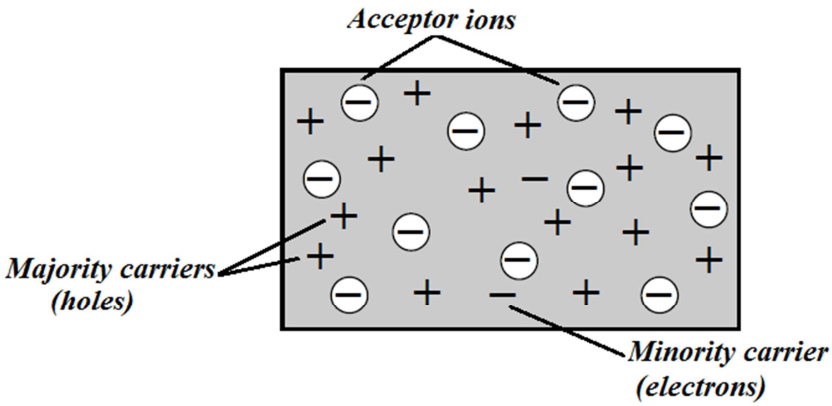
شكل ١-٢٣: مخطط لحزم الطاقة بعد إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

ان وجود المستوى القابل يسهل من عملية انتقال الإلكترونات من حزمة التكافؤ اليه وان انتقال الإلكترون يؤدي إلى تخلف فجوة في حزمة التكافؤ من دون ان يرافق ذلك انتقال الكترون إلى حزمة التوصيل كما موضح بالشكل (١-٢٤)، وبالتالي فان إضافة أي شائبة ثلاثية التكافؤ ستولد فجوة إضافية في حزمة التكافؤ وهذه الفجوات تساعد على سريان التيار (تيار الفجوات). وبالتالي يمكننا السيطرة على عدد الفجوات في حزمة التكافؤ من خلال التحكم بنسبة التشويب بالذرات القابلة.



شكل ١-٢٤: مخطط لحزم الطاقة لشبه موصل من النوع الموجب

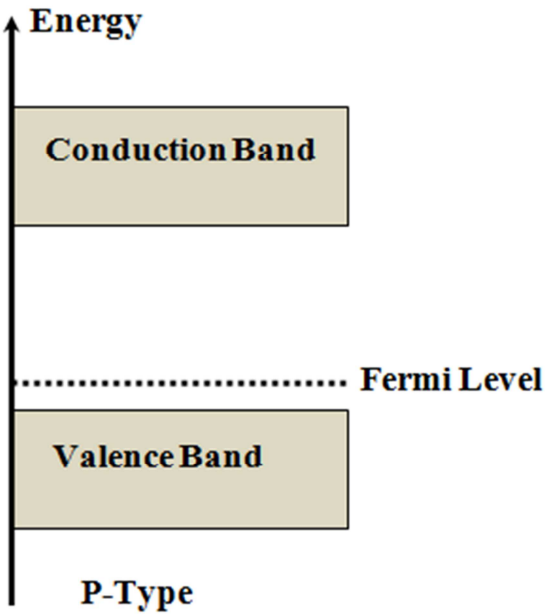
في درجة الحرارة الاعتيادية تحتوي المادة شبه الموصلة من النوع P على عدد كبير من الفجوات الناتجة من عملية التشويب بالذرات القابلة، وبنفس الوقت تحتوي على عدد بسيط من الإلكترونات الحرة الناتجة من عمليات توليد زوج (الكترون–فجوة). أي انه في حالة شبه الموصل من النوع p تكون الفجوات هي حاملات الشحنة الأكثرية بينما تكون الإلكترونات هي حاملات الشحنة الأقلية كما هو موضح في الشكل (١–٢٥) ويكون اغلب التيار ناتج عن الفجوات ولذلك تسمى مادة شبه الموصل المشوبة بذرات قابلة بشبه موصل من النوع الموجب.



شكل ١–٢٦: مخطط لحاملات الشحنة الأكثرية والأقلية لشبه موصل من النوع السالب

ان بلورة شبه الموصل الموجب تكون أيضا متعادلة كهربائياً. وعند اقتناص الذرة القابلة لاحد الكترونات التكافؤ المحيطة بها تتحول إلى ايون سالب ولا تساهم في عملية التوصيل وينشئ في مكان الكترون التكافؤ المُقتنص فجوة جديدة والتي بدورها تحاول اقتناص الكترون تكافؤي آخر وهكذا ينشئ تيار الفجوات.

ان مستوى فيرمي في شبه الموصل من النوع P ينزاح مقترباً من حزمة التكافؤ وكلما زادت نسبة التشويب يزداد اقتراب مستوى فيرمي من مستوى حزمة التكافؤ كما هو موضح بالشكل (١–٢٧).



شكل ١–٢٧: مخطط مستوى فيرمي لشبه موصل من النوع الموجب

ان شبه الموصل المشوب له مقاومة تدعى المقاومة الإجمالية (bulk resistance) ويكون لشبه الموصل المطعم تطعيماً خفيفاً مقاومة إجمالية عالية. اما اذا زاد نسبة التطعيم فان المقاومة الإجمالية تقل. اي ان المقاومة الإجمالية تتناسب عكسياً مع نسبة التطعيم.

عندما ترتفع درجة حرارة شبه الموصل الشائب (الموجب أو السالب) كثيراً عن درجة حرارة الغرفة فان الإلكترونات والفجوات المتولدة من عمليات توليد زوج (الكترون–فجوة) ستكون هي المهيمنة على الإلكترونات والفجوات الناتجة من عملية التطعيم (التشويب) وتصبح للمادة شبه الموصل المشوبة نفس الخصائص لمادة شبه الموصل النقي مما يجعل مادة شبه الموصل المشوبة (الموجبة أو السالبة) تفقد خصائصها المميزة لها فلا تستطيع ان تقوم باداء عملها بالصورة الصحيحة وبالتالي يجب تجنيب النبائط المصنوعة من أشباه الموصلات المشوبة من الحرارة العالية.

ان موضع مستوى فيرمي يعتمد على عاملين: الأول هو مقدار التشويب حيث يبتعد عن منتصف فجوة الطاقة بزيادة التشويب (باتجاه حزمة التوصيل في حالة التطعيم بشوائب خماسية التكافؤ أو حزمة التكافؤ في حالة التطعيم بشوائب ثلاثية التكافؤ)، والثاني هو درجة الحرارة إذ انه يقترب من المنتصف كلما ارتفعت درجة الحرارة.

أسئلة الفصل الأول

س١: عرف كل من:

شبه الموصل النقي، شبه الموصل المشوب، شبه موصل من النوع الموجب، شبه موصل من النوع السالب، إعادة الالتحام، زمن البقاء، التطعيم، الكترونات التكافؤ، طاقة فيرمي.

س٢: قارن بين كل من:

أ- المواد الموصلة، المواد العازلة، المواد شبه الموصلة.

ب- شبه الموصل من النوع الموجب وشبه الموصل من النوع السالب.

جـ - مستويات الطاقة لذرة معزولة ومستويات الطاقة لبلورة السليكون.

د - مستوى الطاقة المانح، مستوى الطاقة القابل.

س٣: عرف مستوى فيرمي، ثم حدد موضعه (مع الرسم) في كل من: شبه الموصل النقي، شبه الموصل السالب، شبه الموصل الموجب.

س٤: اثبت رياضياً ان طاقة فيرمي هي اعلى طاقة يمكن ان يمتلكها الكترون في درجة حرارة الصفر المطلق.

س٥: علل ما يأتي:

أ- تفادي تسليط درجات حرارة عالية على نبائط أشباه الموصلات.

ب- يعتبر شبه الموصل النقي عازل تام في درجة حرارة الصفر المطلق.

جـ - كل الإلكترونات الموجودة في المدار الأول في البلورة لها مستويات طاقة مختلفة عن بعضها قليلاً.

د - تفضيل السليكون على الجرمانيوم في صناعة نبائط أشباه الموصلات.