$$J_p = qn_i\mu_h E - qD_h\frac{dp}{dx} \qquad (1-24)$$

اما التيار الكلي المار في شبه الموصل فيكون عبارة عن مجموع تيار الإلكترونات وتيار الفجوات ويعبر عنه بالصيغة:

$$J = J_n + J_p = qEn_i(\mu_e + \mu_h) + q\left(D_n\frac{dn}{dx} - D_h\frac{dp}{dx}\right) \qquad (1-25)$$

مثال: أوجد توصيلية شريحة من مادة السليكون في درجة حرارة الغرفة (300K)، علما بان حركية الإلكترونات والفجوات في تلك الظروف كانت $(\mu_e = 0.15\, m^2/V.S)$، $(\mu_h = 0.05\, m^2/V.S)$ وان تركيز حاملات الشحنة $(n_i = 1.5 \times 10^{16} m^{-3})$.

الحل:

$$\sigma = qn_i(\mu_e + \mu_h)$$
$$\sigma = 1.6 \times 10^{-19} \times (1.5 \times 10^{16}) \times (0.15 + 0.05)$$
$$\sigma = 4.8 \times 10^{-4}(\Omega.m)^{-1}$$

٩.١ 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.

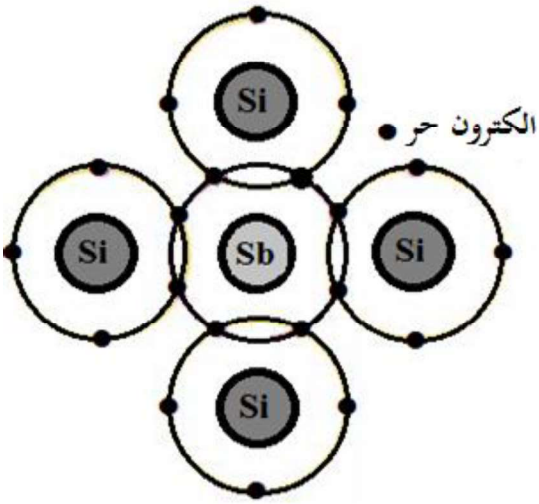
ان إضافة ذرات شائبة إلى أشباه الموصلات النقية بنسب قليلة تعمل على زيادة الموصلية لهذه المواد فمثلاً اذا أضيفت الشوائب بنسبة ذرة واحدة من الشوائب إلى مئة مليون (10^8) ذرة جرمانيوم فان ذلك يكفي لزيادة الموصلية بمقدار من ١٠ إلى ١٥ مرة. كذلك فان إضافة الذرات الشائبة إلى أشباه الموصلات النقية تعطينا إمكانية 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).

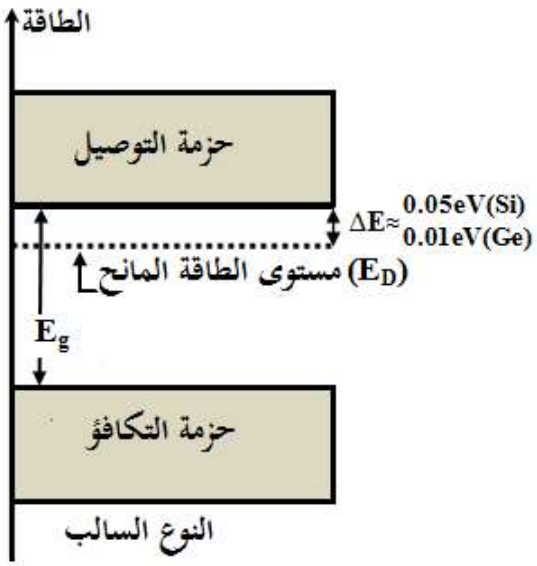
على سبيل المثال في حالة إضافة ذرة شائبة خماسية التكافؤ مثل ذرة الانتيمون إلى بلورة السليكون فانها سوف تزيح ذرة شبه موصل نقية وتحل محلها ضمن التركيب البلوري الجديد، وعندها فان أربعة الكترونات تكافؤية من ذرة الانتيمون تساهم بأربعة أواصر تساهمية مع ذرات السليكون المجاورة ويبقى الإلكترون الخامس لذرة الانتيمون معلقاً بالذرة الأم (الانتيمون) دون ان يدخل ضمن الأواصر التي تربط الذرات وكما هو موضح بالشكل (١-٢٥):



شكل (١-٢٥) 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

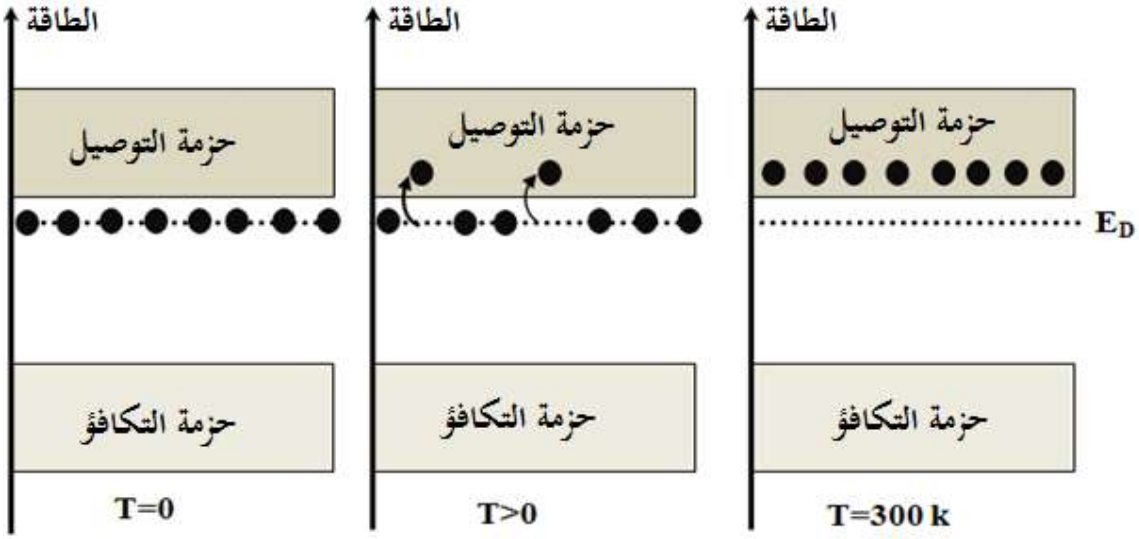
جديد (E_D) يدعى مستوى الطاقة المانح (Donor energy level) ضمن فجوة الطاقة للبلورة وبالقرب من حزمة التوصيل وهو يمثل مستوى الطاقة للذرات الشائبة كما هو موضح لمخطط حزم الطاقة لمادة شبه موصل من النوع N. الشكل (١-٢٦) يمثل مخطط حزم الطاقة لشبه موصل من النوع N ويظهر فيه تأثير الشائبة المانحة المضافة على حزم الطاقة حيث ينشئ مستوى طاقة مانح ضمن فجوة الطاقة وأسفل حزمة التوصيل مباشرة.



شكل (١-٢٦) مخطط لحزم الطاقة بعد إضافة شائبة خماسية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

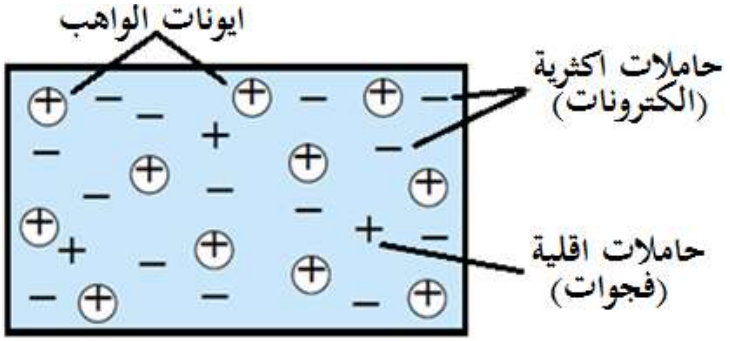
في درجة حرارة الغرفة تكون الطاقة الحرارة المكتسبة كافية لانتقال الإلكترون الخامس من مستوى الطاقة المانح إلى مستوى التوصيل، أي انه في درجة حرارة الغرفة فان لكل ذرة شائبة مضافة سيكون هناك الكترون حر في حزمة التوصيل. وبالنتيجة يمكننا التحكم في عدد الإلكترونات الحرة (وبالتالي توصيلة مادة شبه الموصل النقي) 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 (١-٢٧).



شكل (١–٢٧) 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 (١–٢٨).



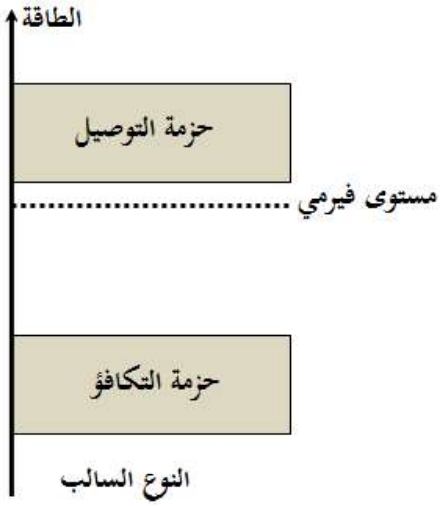
شكل (١–٢٨) مخطط لحاملات الشحنة الأكثرية والأقلية لشبه موصل من النوع السالب

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.

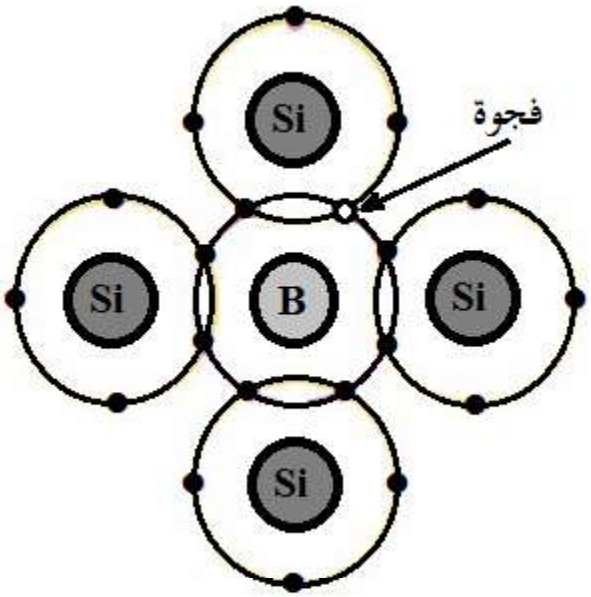
ان مستوى فيرمي في حالة شبه الموصل من النوع N سوف ينزاح مقترباً من حزمة التوصيل وكلما زادت نسبة التشويب اقترب مستوى فيرمي من حزمة التوصيل اكثر كما هو موضح بالشكل (١-٢٩).



شكل (١-٢٩) مخطط مستوى فيرمي لشبه موصل من النوع السالب

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

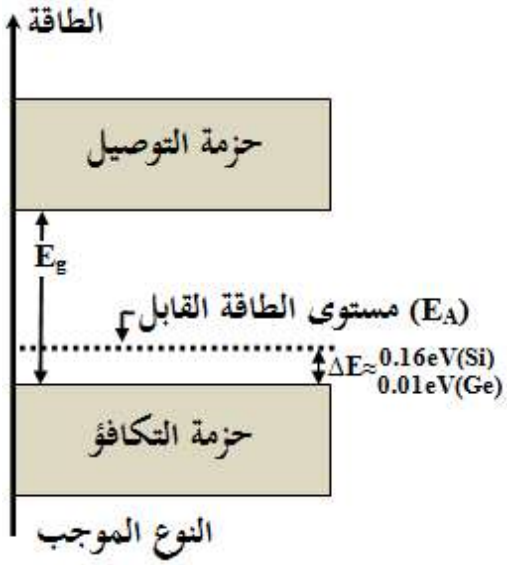
لزيادة عدد الفجوات في بلورة شبه الموصل يتم إضافة شوائب ثلاثية التكافؤ (غلافها الخارجي يحتوي على ثلاث الكترونات تكافؤ) مثل الكاليوم Ga (Gallium) والاندويم In (Indium) والبورون B (Boron). عند إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ مثل البورون إلى بلورة السليكون النقي فانها سوف تزيح ذرة سليكون وتحل محلها، ان كل ذرة 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 (١-٣٠).



شكل (١-٣٠) مخطط لعملية إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

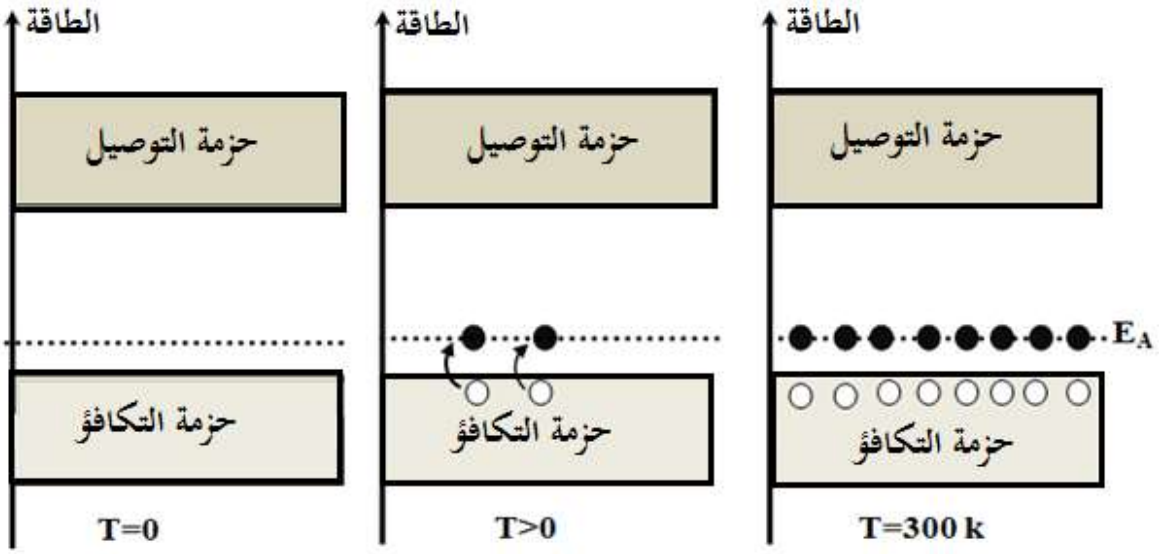
ان الفجوة الناشئة من التشويب ستكون محاطة بالإلكترونات العائدة لذرات شبه الموصل النقي (السليكون)، وتلك الإلكترونات تحتاج إلى طاقة قليلة جداً لكي تدخل في تلك الفجوة وعند انتقال الكترون معين لمليء تلك الفجوة فانه يترك في محله (ذرة السليكون) فجوة جديدة ولذلك تدعى الذرات الشائبة ثلاثية التكافؤ بالذرات المتقبلة (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 (١-٣١) 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 (١–٣١) مخطط لحزم الطاقة بعد إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ لبلورة شبه الموصل النقي

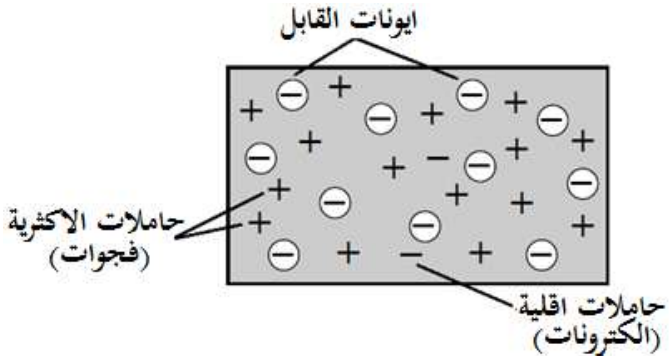
ان وجود المستوى القابل يسهل من عملية انتقال الإلكترونات من حزمة التكافؤ اليه وان انتقال الإلكترون يؤدي إلى تخلف فجوة في حزمة التكافؤ من دون ان يرافق ذلك انتقال الكترون إلى حزمة التوصيل كما موضح بالشكل (١–٣٢)، وبالتالي فان إضافة أي شائبة ثلاثية التكافؤ ستولد فجوة إضافية في حزمة التكافؤ وهذه الفجوات تساعد على سريان التيار (تيار الفجوات). وبالتالي يمكننا السيطرة على عدد الفجوات في حزمة التكافؤ من خلال التحكم بنسبة التشويب بالذرات القابلة.



شكل (١–٣٢) 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

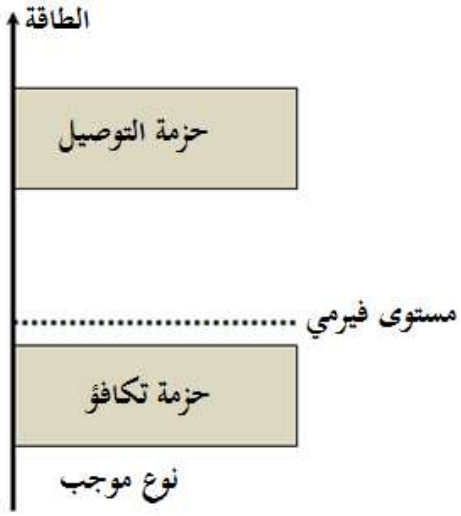
الناتجة من عمليات توليد زوج (الكترون–فجوة). أي انه في حالة شبه الموصل من النوع p تكون الفجوات هي حاملات الشحنة الأكثرية بينما تكون الإلكترونات هي حاملات الشحنة الأقلية كما هو موضح في الشكل (١–٣٣) ويكون اغلب التيار ناتج عن الفجوات ولذلك تسمى مادة شبه الموصل المشوبة بذرات قابلة بشبه موصل من النوع الموجب.



شكل (١–٣٣) 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 أيون 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 (١–٣٤).



شكل (١–٣٤) مخطط مستوى فيرمي لشبه موصل من النوع الموجب

ان إضافة الشوائب (خماسية أو ثلاثية التكافؤ) إلى مادة شبه الموصل النقي تؤدي إلى وجود حاملات شحنة أكثرية وأخرى اقلية، وبالاضافة إلى ذلك فان إضافة الشوائب تؤدي إلى انخفاض نسبة حاملات الشحنة الأقلية الناتجة من عمليات توليد الكترون–فجوة ، وهذا بدوره يؤدي إلى زيادة نسبة حاملات الشحنة الأكثرية (الناتجة من التشويب وعملية توليد ازدواج الكترون–فجوة الحرارية)، ولإيضاح ذلك نفرض ان عدد حاملات الشحنة المتولدة حرارياً في مادة شبه الموصل النقي قبل التشويب هي n_i و p_i ولنفرض ان معدل انتاج ازواج الكترون فجوة في شبه الموصل النقي هي (g) ، في حالة الاتزان الحراري يكون عدد حاملات الشحنة متساوية لكل من الإلكترونات الحرة والفجوات المتولدة أي ان:

$$n_i = p_i \qquad (1-20)$$

ان معدل حدوث عمليات إعادة الالتحام يتناسب خطيا مع عدد الإلكترونات الحرة والفجوات المتواجدة وفي حالة شبه الموصل النقي وعند الاتزان الحراري يكون معدل عمليات إعادة الالتحام تكون مساوية لمعدل عمليات توليد أزواج الكترون–فجوة ، عندها يمكن التعبير عن معدل عمليات إعادة الالتحام بالصيغة:

$$\mathrm{g} = Rn_ip_i \qquad (1-21)$$

حيث R ثابت يسمى معامل إعادة الالتحام.

ان إضافة الشوائب لا يؤثر على معدلات توليد أزواج أو إعادة الالتحام، فاذا كان n و p هو عدد الإلكترونات الحرة والفجوات لوحدة الحجوم على الترتيب بعد التشويب، عندها يمكن التعبير عن معدل عملية إعادة الالتحام بعد عملية التشويب بالصيغة:

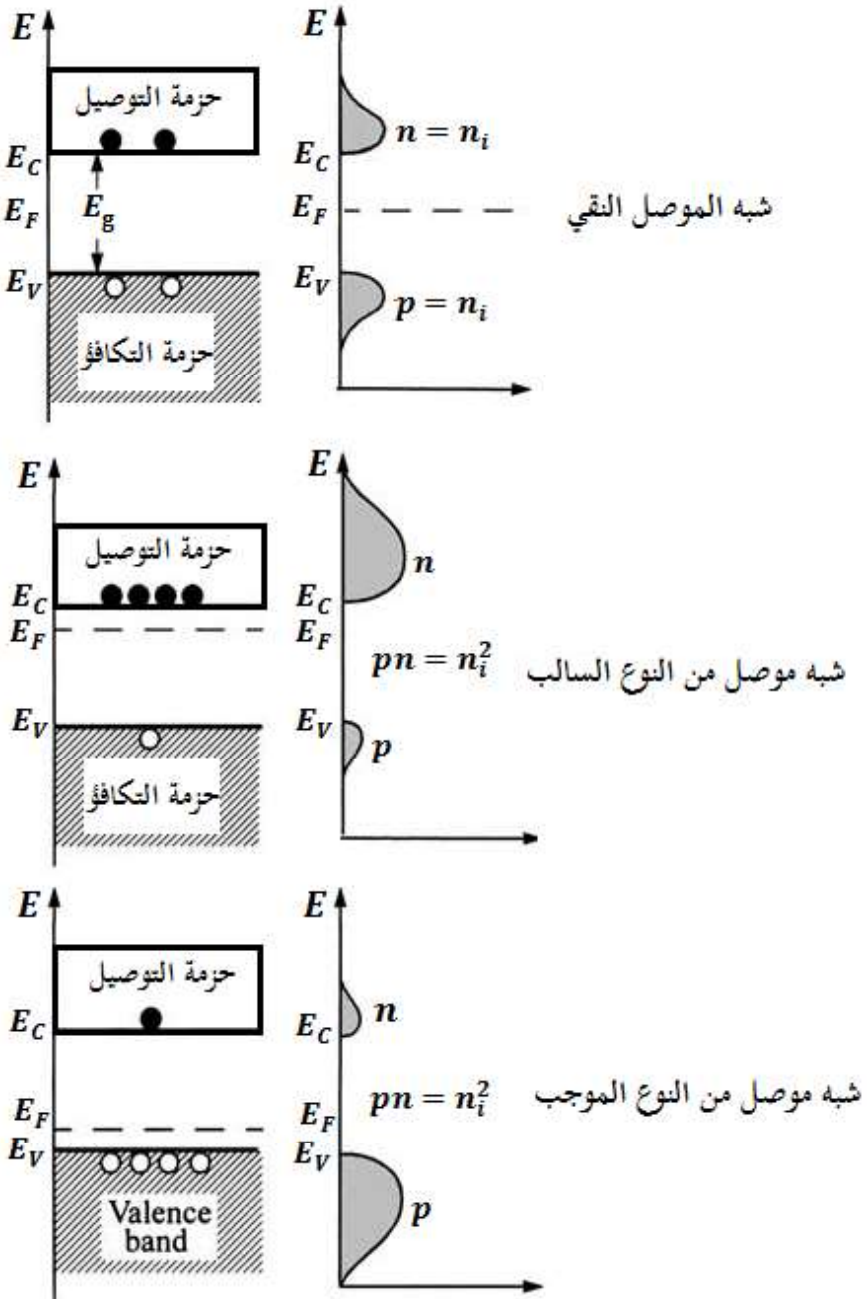
$$\mathrm{g} = Rnp \qquad (1-22)$$

من العلاقات (1–20) و (1–21) و (1–22) تمكننا استنتاج العلاقة التالية:

$$np = n_ip_i = n_i^2 = p_i^2 \qquad (1-23)$$

من العلاقة الأخيرة نلاحظ ان عملية التشويب تضيف من جهة حاملات شحنة أكثرية وهي بنفس الوقت تقلل من حاملات الشحنة الأقلية الناتجة من عمليات تكون الأزواج.

الشكل (١–٣٥) يقدم مقارنة بين مخطط حزم الطاقة وتركيز حاملات الشحنة في كل من شبه الموصل النقي وشبه الموصل من النوع السالب وشبه الموصل من النوع الموجب عند الاتزان الحراري.



شكل (١–٣٥) مخطط حزم الطاقة وتركيز حاملات الشحنة لشبه الموصل النقي والسالب والموجب

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 بأداء عملها بالصورة الصحيحة وبالتالي يجب تجنيب النبائط المصنوعة من أشباه الموصلات المشوبة من الحرارة العالية.

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.

ت- قارن مستويات الطاقة لذرة معزولة ومستويات الطاقة لبلورة السليكون.

س٣: اثبت رياضياً ان طاقة فيرمي هي اعلى طاقة يمكن ان يمتلكها الكترون في درجة حرارة الصفر المطلق.

س٤: اذا علمت قيمة دالة الشغل لمادة الباريوم هي (2.5eV) ، فهل بالإمكان استعمال تلك المادة لعمل كاثود لخلية كهروضوئية تعمل بالضوء البنفسجي الذي يبلغ طول موجته (4300 Å)؟ ولماذا.

س٥: أوجد دالة الشغل لمادة مسخن يعمل عند درجة حرارة (2000) ويبعث تيار كثافته $(0.11Amp/cm^2)$، علماً بان $(A = 60.2 \times 10^4\ Amp.K^2/m^2)$.

س٦: ملف تسخين من التنكستن يعمل عند درجة حرارة (2400°C)، فاذا خفضت درجة الحرارة بمقدار (100°C) أوجد نسبة الانخفاض في الانبعاث الإلكتروني علماً $(\Phi = 4.517eV)$.

س٧: مسخن من التنكستن على شكل ملف اسطواني طوله $(4.5cm)$ وقطره $(0.02cm)$ ويعمل عند درجة حرارة $(2400K)$، اوجد التيار الحراري المنبعث علماً بان: $(A = 60.2 \times 10^4\ Amp.K^2/m^2)$ و $(\Phi = 4.517eV)$.

س٨: أوجد قيمة فجوة الطاقة لكل من السليكون والجرمانيوم عند درجة الحرارة (35°C).

س٩: أوجد توصيلية شريحة من مادة الجرمانيوم في درجة حرارة الغرفة (300K)، علماً بان حركية الإلكترونات والفجوات هي $(\mu_e = 0.36\,m^2/V.S)$، $(\mu_h = 0.17\,m^2/V.S)$ وان تركيز حاملات الشحنة $(n_i = 1.5 \times 10^{16} m^{-3})$.

س١٠: اذا علمت ان المقاومة النوعية (مقلوب التوصيلية) للجرمانيوم النقي عند $(27\ ^oC)$ هي $(0.47\Omega.m)$ وكانت حركية الإلكترونات الحرة $(\mu_e = 0.36\,m^2/V.S)$ وحركية الفجوات $(\mu_h = 0.17\,m^2/V.S)$ أوجد كثافة حاملات الشحنة.