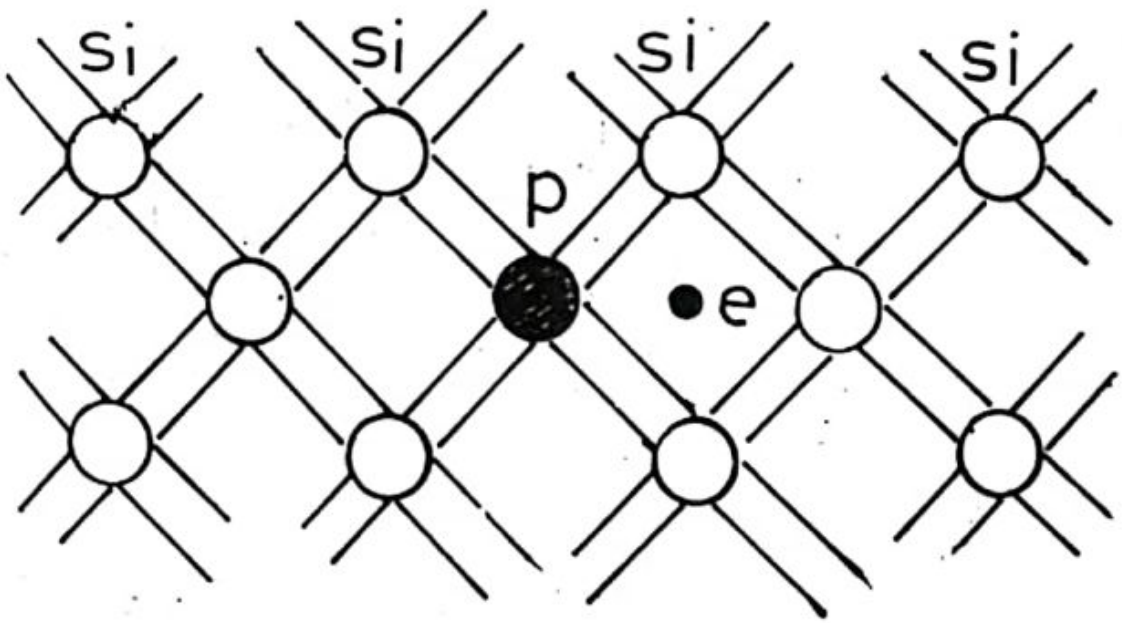
Donors ويطلق على اشباه الموصلات التي تحتوي على ذرات العناصر المانحة بالنوع السالب n−type. أما اذا كان التطعيم من عناصر المجموعة الثالثة فتسمى بالعناصر القابلة acceptors. بينما يطلق على اشباه الموصلات التي تحتوي على ذرات العناصر القابلة بالنوع الموجب p−type.

10.4.1 اشباه الموصلات نوع سالب n−Type Semiconductor

اذا اضيفت كميات معلومة من عناصر المجموعة الخامسة من الجدول الدوري كالفسفور أو الزرنيخ أو الانتيمون الى اشباه الموصلات النقية كالسليكون مثلاً فأن الذرات الشائبة التي لها خمسة الكترونات تكافؤ تدخل ضمن تركيب السليكون وتكون اواصر تساهمية مع الذرات الاربعة المحيطة بكل منها ويبقى الكترون واحد معلقاً بالذرة الام ، دون أن تدخل ضمن الاواصر التي تربط الذرات وكما هو مبين في الشكل (10.6). إن فصل هذا الالكترون عن الذرة لايحتاج الى طاقة كبيرة حيث أن هذه الطاقة أقل بكثير من الطاقة اللازمة لنقل الالكترون من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل في حالة اشباه الموصلات النقية. ويمكن حساب طاقة التآصر وطاقة التأين لذرة مانحة بأستخدام نظرية بور Bohr Theory لذرة الهيدروجين ولكن بعد تحويرها بما يخدم الحالة المطلوبة. تبين المعادلة التالية علاقة طاقة بور لذرة الهيدروجين قبل التحوير.



الشكل (16.6) مادة شبه موصلة من نوع سالب

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

$$E_n = -\frac{m e^4}{8h^2\epsilon_0^2}\cdot\frac{1}{n^2} \qquad ...(10.45)$$

إن التحوير في معادلة (10.45) يكمن في ثابت العزل للوسط ، وكذلك في الكتلة الفعالة لالكترون m_e^* يتحرك ضمن الجهد الدوري للبلورة. إن الالكترون الزائد سوف يتحرك في مجال الكهروستاتيكي m_e^* لايون الشائب بدلاً من e^2/ϵ_0 حيث أن ϵ تمثل ثابت العزل للوسط ويساوي $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ وعلى ضوء ذلك يمكن اعادة كتابة المعادلة (10.45) للحصول على طاقة ترابط الذرة المانحة (E_d) بالعلاقة التالية :

$$E_d = -\frac{m_e^* e^4}{8h^2\epsilon_0^2\epsilon_r^2}\cdot\frac{1}{n^2} \qquad ...(10.46)$$

تبين المعادلة (10.46) أن طاقة الذرة المانحة تتأثر بصورة كبيرة من قبل ثابت العزل للبلورة المضيفة اذ لانلاحظ ان الطاقة E تتناسب مع ϵ_r^2 بينما تتغير مع القوة الاس الاول للكتلة الفعالة لالكترون الذرة المانحة. يبين الجدول (10.1) طاقة منسوب الذرات الشائبة في

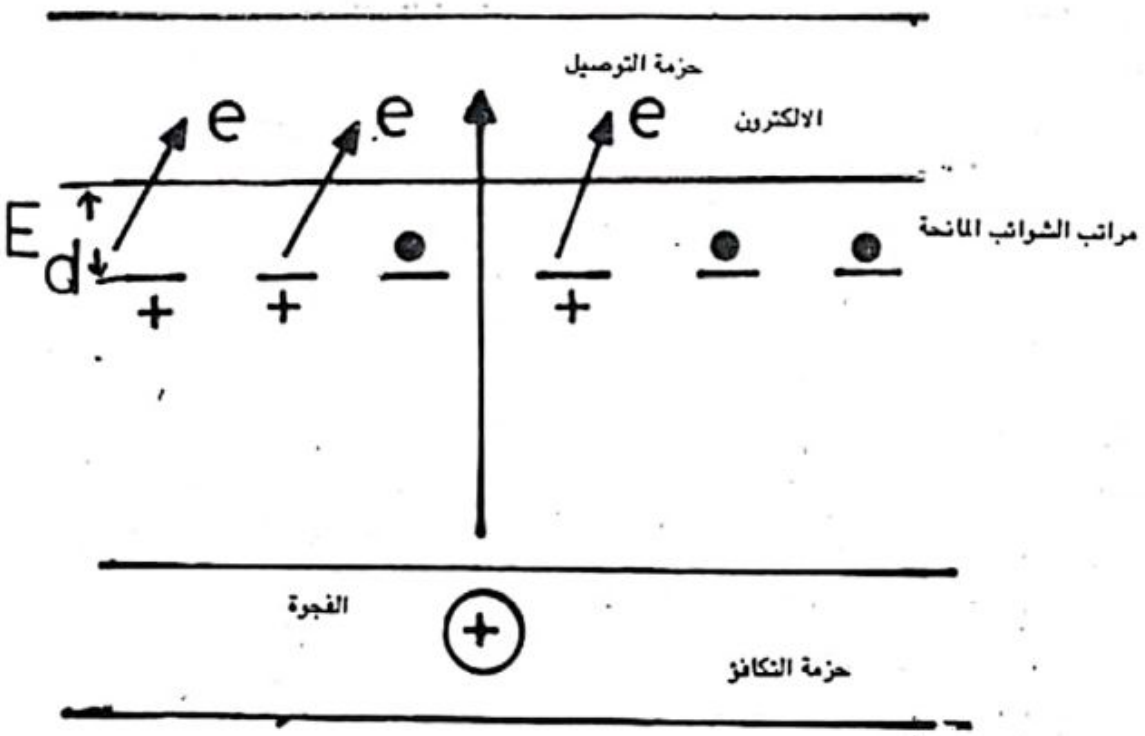
الجدول (10.1) منسوب الذرات الشائبة في السليكون والجيرمانيوم.

العنصر	نوع الشائبة	نوع حامل الشحنة الأغلبية	طاقة تحرير حامل الشحنة (eV)	
			جيرمانيوم	سليكون
بورون	قابل	p	0.0104	0.045
المنيوم	قابل	p	0.012	0.057
كاليوم	قابل	p	0.0108	0.065
أنديوم	قابل	p	0.0112	0.16
الفسفور	مانح	n	0.0120	0.044
الزرنيخ	مانح	n	0.0127	0.049
أنتيمون	مانح	n	0.0096	0.039

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

السليكون والجيرمانيوم. ويتضح من الجدول أن وجود الذرات الشائبة يزيد عن عدد الالكترونات المحرة في حزمة التوصيل دون الحاجة الا الى كمية قليلة من الطاقة وهذا يؤثر كثيراً في معامل التوصيل الكهربائي للمادة حتى لو كانت نسبة الشوائب قليلة جداً.

إن ظهور الالكترونات الفائضة في حزمة التوصيل نتيجة وجود الشوائب لايقابله ظهور الفجوات في حزمة التكافؤ. فهذه الالكترونات لاتنتقل من حزمة التكافؤ كما يحدث ذلك في المادة النقية بل أنها تنتقل من حالات واقعة تحت حافة حزمة التوصيل وعلى عمق قليل جداً يمثل الطاقة اللازمة لتحرير الالكترون من الذرة الشائبة E_d وكما هو موضح في الشكل (10.7) وتمثل كثافة الحالات الواقعة تحت حافة حزمة التوصيل كثافة الذرات الشائبة. أما كثافة الفجوات فتحددها الالكترونات التي تترك حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل، ولما كانت هذه أقل من الالكترونات الناجمة عن الشوائب فأن التيار الذي يمكن أن يسري في مثل هذه المادة تحمله الالكترونات بالدرجة الاساس ويكون معامل التوصيل الكهربائي على هذا النحو:



الشكل (10.7) تركيب الحزمة في شبه موصل نوع سالب

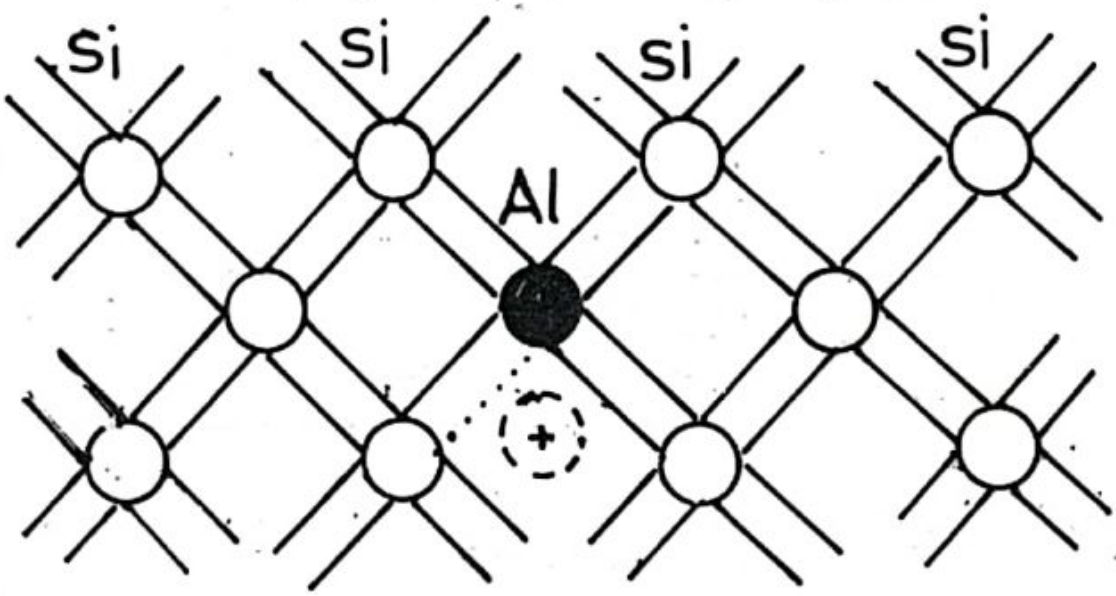
الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

$$\sigma = ne\,\mu_e \qquad \ldots(10\text{-}47)$$

وتسمى الالكترونات بحاملات الشحنة الغالبية Majority carriers أما الفجوات فتسمى بالحاملات الاقلية Minority carriers ويكون تأثيرها على التوصيل الكهربائي مهملاً.

10.4.2 اشباه الموصلات نوع موجب p – type semiconductor

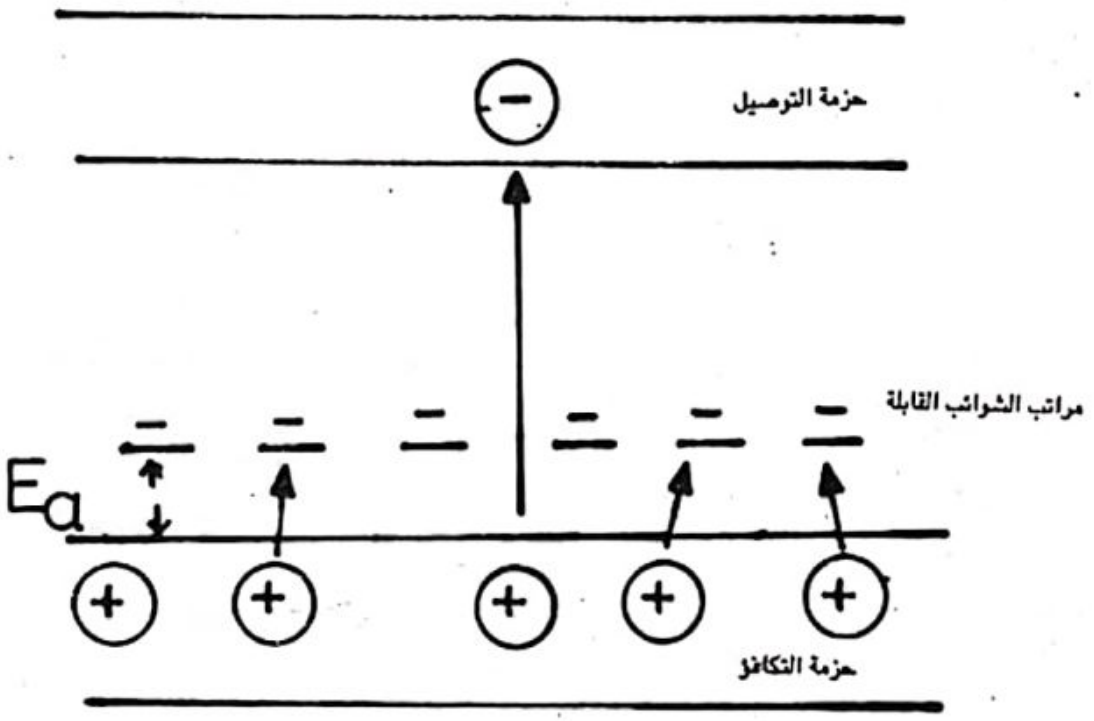
اذا اضيفت كميات معلومة من عناصر المجموعة الثالثة من الجدول الدوري كالبورون او الالمنيوم او الكالسيوم او الانديوم الى اشباه الموصلات النقية كالسليكون مثلاً فسوف ينتج عنها ذلك نوع جديد من اشباه الموصلات تستحدث فيها فجوات بدلاً من الالكترونات. إن ذرات الشوائب سوف تحتل مواقع ذرات السليكون وتكون مع الذرات الاربعة المحيطة بكل واحدة منها اواصر تساهمية. ولما كانت ذرات الشوائب تحتوي على ثلاثة الكترونات فقط في غلافها الخارجي فعليه سوف تبقى آصرة تساهمية واحدة تحوي الكتروناً واحداً وتحتاج الى الكترون آخر لاستكمال البنية البلورية الاعتيادية لشبه الموصل. ان الذرة الشائبة في الحالة هذه يمكن ان تكتسب بسهولة الكتروناً من الاواصر المجاورة فعندئذٍ تكتمل اواصرها الا ان هذا يترك فجوة موجبة عند تلك الآصرة، أي فجوة موجبة تطفو من حزمة التكافؤ لمادة شبه الموصل وفي الوقت نفسه تجعل ذرة الشائبة ايوناً سالب الشحنة كما هو مبين في الشكل (8 ـ 10) وينجم كذلك من وجود هذه الذرات الشائبة



الشكل (10.8) مادة شبه موصلة نوع موجب

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ايضاً ظهور حالات تعلو حافة حزمة التكافؤ بمقدار الطاقة E_a وكما هو مبين في الشكل (10.9).



الشكل (10.9) تركيب الحزمة في شبه موصل نوع موجب

ان مقدار الطاقة E_a اللازمة لنقل الكترون من احد اواصر مادة اشباه الموصلات ووضعه في احد الاواصر الناشئة بين ذرة الشائبة ومادة الشبه الموصل وجدت صغيرة جداً وكما هو مبين في الجدول (1 – 10) يمكن حساب طاقة الترابط E_a للفجوة عند الايون السالب بنفس الطريقة المستخدمة لحساب طاقة الترابط لذرة مانحة (انظر البند 10.4.1).

ان كثافة الفجوات في اشباه الموصلات نوع موجب تكون اكبر بكثير من كثافة الالكترونات الحرة فمثلما وجدنا في حالة شبه الموصل نوع سالب فان تطعيم شبه الموصل بذرات قليلة نسبياً ولو كانت بحدود ذرة واحدة لكل 10^{10} ذرة تجعل من الفجوات الحاملات الغالبية Majority ويسمى شبه الموصل من هذا النوع الموجب وتكون معامل التوصيلية الكهربائية.

$$\sigma = Pe\ \mu_p \qquad \ldots(10\text{-}48).$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

10.5 تركيز الالكترونات والفجوات في اشباه الموصلات المطعمة

Concentration of electrons and holes in dopped semiconductor.

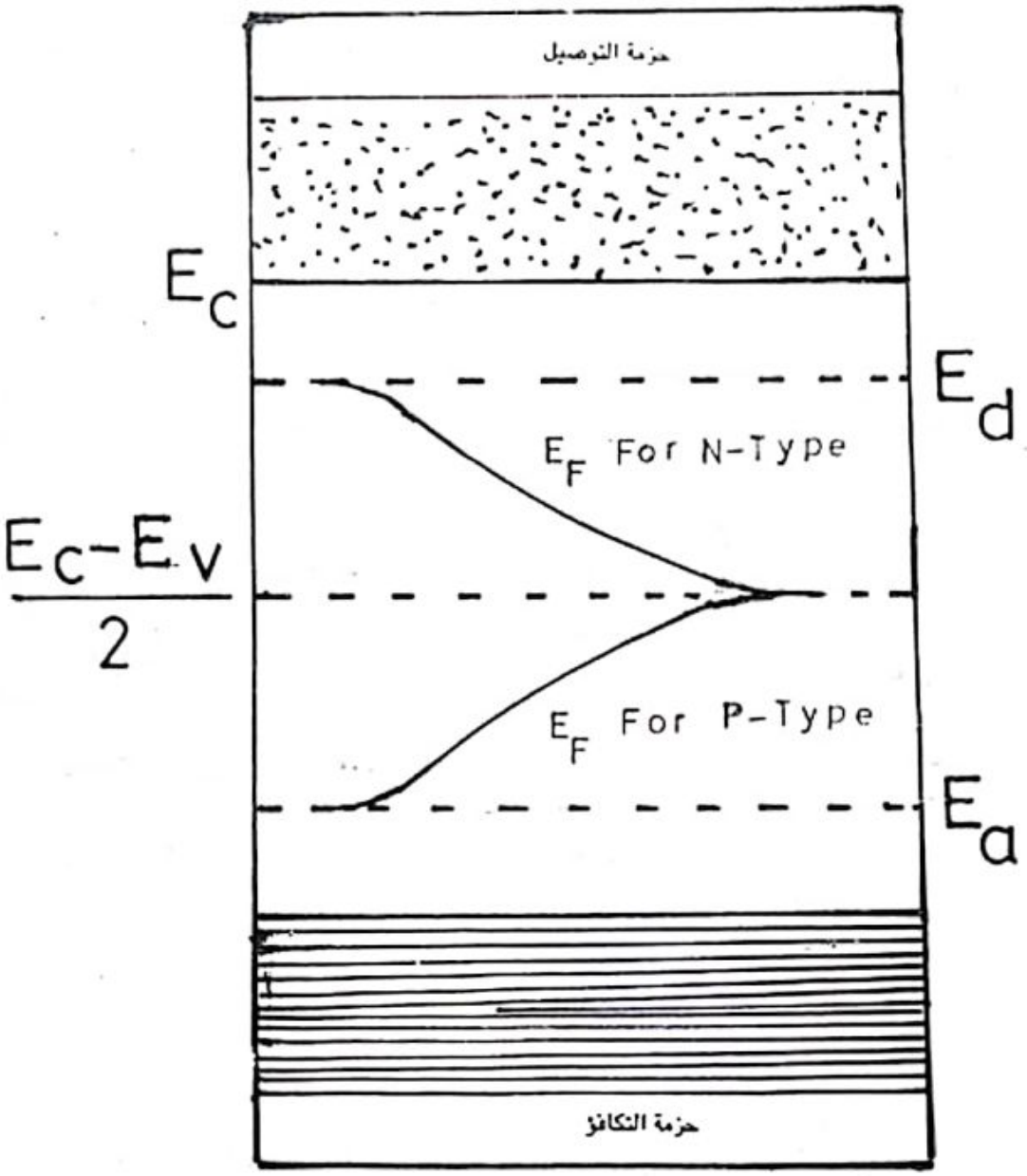
لقد رأينا في البندين السابقين ان تطعيم اشباه الموصلات الذاتية بكمية مناسبة من الشوائب ينشأ عنها عدد كبيراً من حاملات الشحنة التي تسبب تغيراً في التركيز الذاتي من حاملات الشحنة في اشباه الموصلات عند درجة حرارة معينة.

اذا اضيفت الى شبه موصل نقي N_D من الذرات المانحة و N_A من الذرات القابلة فان نوع شبه الموصل يتحدد حسب تركيز هذه الذرات. فاذا كان $N_D >> N_A$ يكون شبه الموصل من نوع سالب. واما اذا كان $N_A >> N_D$ يكون شبه الموصل من نوع موجبٌ. لقد جرت العادة اضافة كلا النوعين من الذرات لغرض السيطرة على تركيز الالكترونات والفجوات، فاذا وجد مثلاً ان تركيز الالكترونات في المادة تفوق الحاجة بسبب ارتفاع تركيز الذرات المانحة فيمكن التعويض عن هذه الزيادة باضافة ذرات قابلة تقوم بمعادلة الفائض من الذرات المانحة. يعتمد تركيز الالكترونات والفجوات في المواد المطعمة بصورة اساسية على درجة الحرارة وعلى موقع مستوى فيرمي E_f. فعند درجة حرارة الصفر المطلق تكون حزمة التوصيل في هذه المادة المطعمة كما هي الحال في المواد الذاتية، مملوءة تماماً بينما تكون حزمة التكافؤ فارغة تماماً. بالاضافة الى هذا نجد ان مخطط مستويات الطاقة المبين في الشكل (10.10) الاشباه الموصلات المطعمة يحتوي خلافاً لما هو عليه في المواد الذاتية على مستويات الطاقة التي تمثل الحالات الكمية لالكترونات الذرات المانحة والقابلة. يلاحظ في الشكل (10.10) ان مواقع هذه المستويات تكون قريبة من الحزمتين (التوصيل والتكافؤ). ان السبب في ذلك يرجع الى صغر مقدار الطاقة اللازمة لتحرير الالكترونات من الذرات المانحة، ونقلها الى حزمة التوصيل بالمقارنة مع مقدار طاقة الفجوة.

أما عند درجة الحرارة العالية، فان الالكترونات تتأثر حرارياً من مستويات الذرات المانحة الى حزمة التوصيل وكذلك من حزمة التكافؤ الى مستويات الذرات القابلة ان الالكترونات التي غادرت تواً المستويات المانحة سوف تترك وراءها ذراتٌ مانحة موجبة الشحنة اما الالكترونات التي تغادر حزمة التكافؤ فانها سوف تجعل الذرات القابلة ايونات سالبة الشحنة وتترك وراءهافجوات في حزمة التكافؤ. أما عند ارتفاع درجة الحرارة اكثر من ذلك فان الالكترونات سوف تغادر حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل مباشرة.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner



الشكل (10.10) مخطط حزم الطاقة لشبه موصل مطعم

نفرض ان شبه الموصل يحوي على n من الالكترونات و P من الفجوات. وان تركيز الشوائب المانحة التي فقدت الكتروناً واصبحت موجبة هو N_D^+ وأن تركيز الشوائب القابلة التي تكتسب الكتروناً واصبحت سالبة هو N_A^- فانه طبقاً لتعادل الشحنات عند اي درجة حرارة T نجد ان :

$$n + N_A^- = P + N_D^+ \qquad ...(10.49)$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ولما كانت احتمالية الاشغال لاية حالة تعطى بواسطة دالة توزيع فيرمي – :
يمكن كتابة تركيز الشوائب المانحة التي فقدت الكتروناً بالصيغة الرياضية التالية

$$N_d^+ = N_d f(E_d) \qquad ...(10\text{-}50)$$

وبتعويض معادلة (10.12) في المعادلة (10.50) نحصل على :

$$N_d^+ = \frac{N_d}{\left[\exp\left(\frac{E_d - E_f}{k_B T}\right) + 1\right]} \qquad ...(10\text{-}51)$$

وكذلك يمكن كتابة تركيز الشوائب القابلة التي تكتسب الكتروناً بالصيغة الرياضية التالية :

$$N_a^- = N_a [\, 1 - f(E_a) \,] \qquad ...(10\text{-}52)$$

ويمكن تبسيط المعادلة (10.52)

$$N_a^- = \frac{N_a}{\left[\exp\left(\frac{E_f - E_a}{k_B T}\right) + 1\right]} \qquad ...(10\text{-}53)$$

اما بالنسبة الى حساب تركيز الالكترونات (n) في حزمة التوصيل فانه يتم بنفس الطريقة التي تم بها حساب تركيز الالكترونات في اشباه الموصلات الذاتية وكما هو وارد في المعادلة (10.32). وكذلك الحال بالنسبة الى حساب تركيز الفجوات (P) في حزمة التكافؤ فانه يتم بنفس الطريقة التي تم حساب تركيز الفجوات في اشباه الموصلات الذاتية وكما هو وارد في المعادلة (10.37).

يمكن إيجاد تركيز n و P من المعادلة (10.49) لجميع أشباه الموصلات وكذلك يمكن من خلال تحديد منسوب فيرمي فيها. إلا أن هذا يتطلب استخدام الحاسوب وطرقاً رياضية عديدة لذا نرى ان يقتصر الحل على الحالات الخاصة التي تعبر عن الغلية التي من اجلها يتم تطعيم شبه الموصل بالشوائب وهي :

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

1- ان يؤخذ نوع واحد من الشوائب مثلاً مانحة ، فيكون شبه الموصل من نوع – n وتكون الذرات القابلة معادلة تماماً .

2- ان تكون جميع الذرات الشائبة قد اعطت الكترونها الى حزمة التوصيل عند درجات الحرارة العالية جداً وقد تكون اعداداً كبيرة من الالكترونات العائدة لذرات شبه الموصل قد انتقلت من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل بحيث اصبحت تطغي على الكترونات الشوائب وعندئذٍ يقل تأثير الشوائب ويبدو شبه الموصل وكأنه نقي ويحدث هذا ايضاً اذا كان تركيز الشوائب واطئاً . ان هذه الحالة لاتهمنا حيث يكون تأثير الشوائب مهملاً .

3- ان تبدأ الكترونات التوصيل بالعودة الى حزمة التكافؤ عند انخفاض درجة الحرارة الى مستوي معين وتبقى الالكترونات الممنوحة من قبل الشوائب هي المسيطرة وعددها يساوي عدد ذرات الشوائب حيث تكون هذه الذرات جميعاً قد اعطت الكترونها لحزمة التوصيل كما تبقى كثافة الألكترون ثابتة حتى تبدأ الكترونات الشوائب بالرجوع الى ذراتها ففي الحالة هذه يمكن تطبيق المعادلة (10.32) والتعويض عن n بعدد ذرات الشوائب N_D يكون

$$N_D = n = N_c \exp - \left(\frac{E_g - E_f}{k_B T} \right) \qquad ...(10.54)$$

ومنها نجد ان :

$$E_f = E_g - k_B T \ln \frac{N_c}{N_D} \qquad ...(10.55)$$

اي ان مستوى فيرمي يهبط بارتفاع درجة الحرارة ويستمر الهبوط حتى يصل الى وسط فجوة الطاقة التي تمثل حالة شبه الموصل الذاتي .

4- ان استمرار انخفاض درجة الحرارة يؤدي الى بدء رجوع الكترونات التوصيل الناجمة عن الشوائب الى حالاتها في المستوى E_D تحت حزمة التوصيل وذلك بعد ان تكون جميع الكترونات التكافؤ قد رجعت الى حزمة التكافؤ ففي درجات الحرارة الواطئة هذه قد تكون بعض الشوائب غير متأينة ويكون بعضها الآخر خالياً من الالكترون. فاذا كان تركيز الشوائب الخالية من الالكترونات هي N_D^+ وان مستوي فيرمي هو $E_f - E_d$ فوق مستوي مراتب الشوائب فبالامكان حساب N_D^+ باستخدام المعادلة (10.37) حيث يستعاض عن N_c بالشوائب N_D فعليه :

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

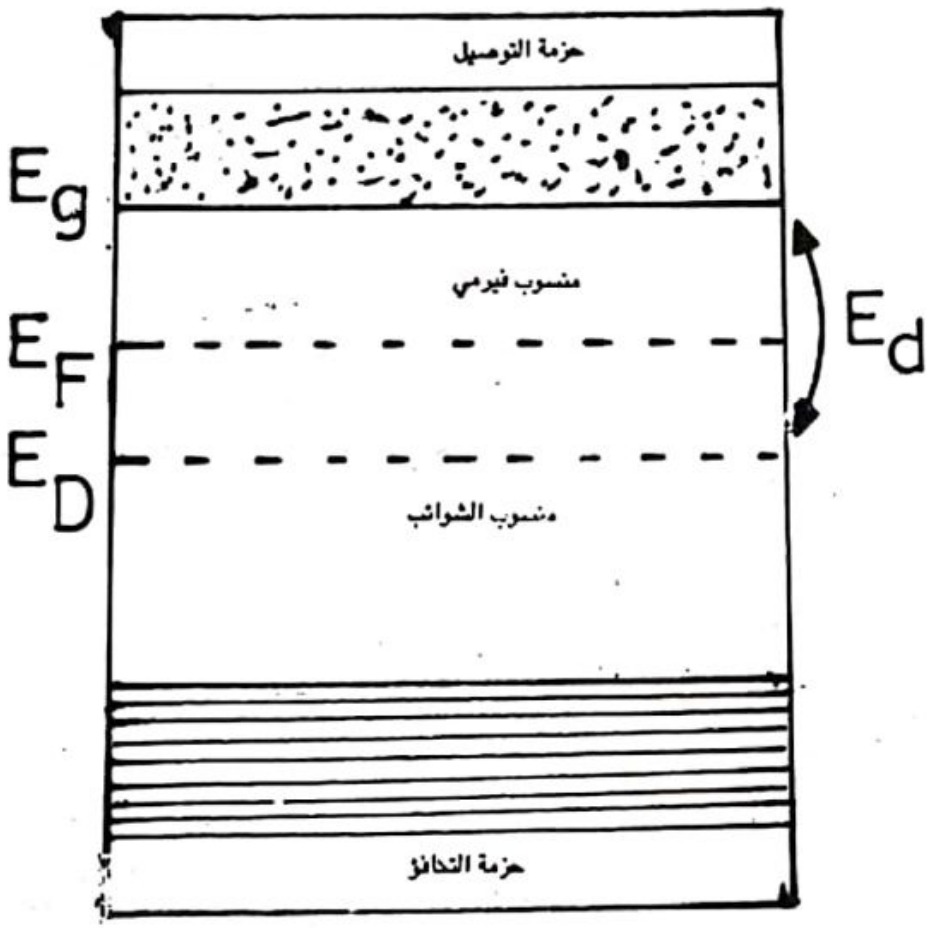
$$= N_D \exp - \left(\frac{E_f - E_D}{k_B T} \right) \quad \ldots(10.56)$$

ان عدد الشوائب المتأينة N^+_D لابد ان تساوي عدد الالكترونات في حزمة التوصيل وهذا بدوره يكون

$$n = N_C \exp - \left(\frac{E_g - E_f}{k_B T} \right) \quad \ldots(10.57)$$

وكما يبدو في الشكل (10.11) فان الطاقة $E_f - E_d$ تمثل الفرق بين مستوى فيرمي وحالات الشوائب. والطاقة $E_g - E_f$ تمثل الفرق بين مستوي فيرمي وحزمة التوصيل.

ولما كان $n = N_D^+$ اذن نستنتج من المعادلتين (10.56) و (10.57) ان.



الشكل (10.11) مستوى فيرمي في درجات الحرارة الواطئة