

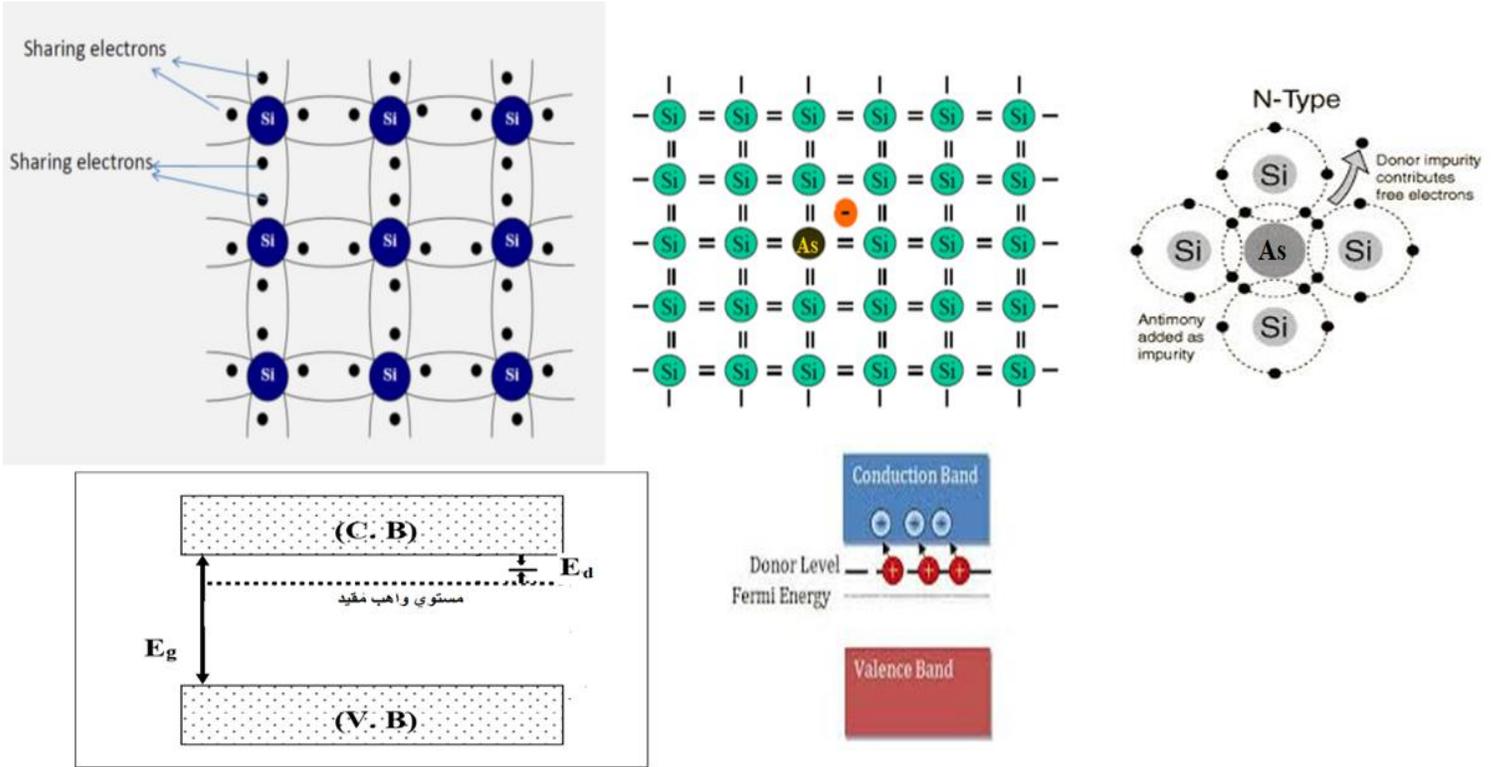
(7-2) اشباه الموصلات المطعمة

لقد وضحنا سابقا (عند حدوث توازن ثرموداينميكي) ان عدد الالكترونات في نطاق التوصيل يكون مساوياً لعدد الفجوات في نطاق التكافؤ لشبه موصل تام النقاوة ذي تركيب بلوري مثالي. فضلا عما تقدم. تزداد توصيلية مادة شبه موصلة عند ارتفاع درجة حرارتها وذلك لتولد عدد أكبر من أزواج الكترون - فجوة بينما تقل تلك التوصيلية عند انخفاض درجة الحرارة حيث يقل عدد حاملات الشحنة بسبب التحام الكترون وفجوة وتعادلها. ان هذه الخاصية الأساسية لشبه موصل ذاتي وغيرها من الخصائص الكهربائية تتأثر بشدة عند اضافة (ادخال) بعض الشوائب اليها أو إحداث بعض العيوب فيها. ان مثل هذه الشوائب أو العيوب قد تؤدي الى زيادة توصيلية شبه موصل والى ظهور نوع واحد من حاملات الشحنة وتضاؤل أو اختفاء النوع الآخر. ان مثل هذه التقنيات تكون مرغوباً فيها لمعظم الاستخدامات العملية. تدعى عملية الاضافة المتعمدة لشوائب الى شبه موصل نقي بالتشويب أو التطعيم (doping). ولتمثيل على ذلك. ان تطعيم السليكون النقي بمادة البورون بنسبة صغيرة جداً (اضافة ذرة بورون واحدة الى مئة الف ذرة سليكون) يؤدي الى زيادة توصيلية السليكون النقي الف مرة تقريباً عند درجة حرارة الغرفة. ولمركب كيميائي شبه موصل يعد وجود نقص في أحد مكوناته الأساسية مثل شائبة وتدعى أشباه الموصلات النقية التي تمتلك مثل هذا العجز في تركيبها أشباه موصلات ناقصة (deficient semiconductors).

(1-7-2) الشوائب الواهبة

افترض عينة من عنصر السليكون (ذات تكافؤ رباعي) النقي وقد طعمت بوساطة ذرة شائبة من المجموعة الخامسة (ذات تكافؤ خماسي) مثل الانتيومون (Sb) أو الزرنيخ (AS) أو الفسفور (P). تشير ظواهر كثيرة (مثل دراسة ثابت الشبكة وتعيين تركيز ناقلات الشحنة) الى أن الشوائب ذات التكافؤ الخماسي تدخل الشبكة وتحتل مواضع ذرات المادة المضيفة بدلا من احتلالها المواضع تتخلل (بين) تلك الذرات ولتمثيل على ذلك. عند تطعيم السليكون بالزرنيخ تحتل ذرة الزرنيخ بوصفها ذرة شائبة محل احدى الذرات الطبيعية للسليكون . ان هذا يعني أن أربعة الكترونات من أصل خمسة الكترونات يضمها المدار الخارجي لذرة الزرنيخ سوف ترتبط (أو تنقيد) بأربع ذرات من السليكون لتشكيل أربع أوامر تساهمية ويبقى الكترون خامس لا يستطيع أن يدخل أو يشترك في أية أصرة لان جميع الأوامر تكون مشبعة ولذلك يبقى مرتبطاً ارتباطاً ضعيفاً بذرة الزرنيخ عند درجة حرارة الصفر

الكلفيني (لان نواة ذرة الزرنيخ تضم شحنة موجبة واحدة أكثر مما تضمه نواة أية ذرة سليكون) . وعند ارتفاع درجة حرارة عينة السليكون المطعمة بالزرنيخ قد يكتسب هذا الالكترون (الخامس) طاقة كافية تؤهله لتترك ذرة الزرنيخ والارتحال خلال العينة مثل الكترون توصيل. أما ذرة الزرنيخ (الذرة الشائبة) فتصبح ايوناً موجباً As^+ ، بسبب فقدانها لاحد الكترونها ولذا تحاول أسر الالكترون الذي هجرها. ان النتيجة النهائية هي بقاء العينة بكاملها متعادلة كهربائياً فضلاً عن إسهام ذرة الزرنيخ بالكترون توصيل (من دون خلق فجوة) ولذلك تدعى ذرة الزرنيخ (ومثيلاتها في المجموعة الخامسة) الذرة المانحة أو الواهبة (donor) كما في الشكل (2-4) . تسمى اشباه الموصلات التي تحتوي على ذرات شائبة مانحة لإلكترون بمواد شبه موصلة من النوع أي (n - type) حيث يمثل الحرف n الشحنة السالبة للإلكترون .



الشكل (2-4) بلورة السليكون مضاف اليها شائبة خماسية التكافؤ(زرنيخ)

لحساب طاقة التأين (ionization energy) أو طاقة الترابط (binding energy) لذرة واهبة، عندما يؤسر الكترون الهبة (donor electron) بواسطة الذرة الواهبة المتأينة، يتحرك هذا الالكترن في مجال كولوم الكهروستاتيكي للأيون الشائبة، ولما كانت طاقة الربط للأيون الشائب صغيرة كان مدار الالكترن المقيد كبيراً مقارنة بالفصح البيئية للذرات كما موضح في الشكل (2-4). وعلى الرغم من ذلك. يكون ربط الكترون الهبة بالأيون الشائب محصوراً بشدة في الفضاء الحقيقي مقارنة بحجم العينة ولذلك ، يمكن الاقتناع في مسائل كثيرة بأنه عندما يكون مدار الكترون الهبة كبيراً مقارنة بالفصح البيئية للذرات يختزل التجاذب الكهروستاتيكي (كولوم) بين الايون الشائب والكترون الهبة بواسطة ثابت العزل النسبي الاستاتيكي لشبة الموصل (static relative dielectric constant) ، اي بواسطة الحجب الناشيء عن وجود عينة شبه الموصل (استقطاب الكتروني للوسط) التي تقوم مقام وسط يقيم فيه كل من الكترون الهبة والايون الشائب . وعلى هذا الإساس يعطى جهد كولوم للأيون الشائب بالصيغة الآتية :

$$V(r) = \frac{e^2 m}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r} \dots\dots\dots (2.39)$$

حيث ان m الكتلة الحرة للإلكترون ، ϵ_r ثابت العزل النسبي ، ϵ_0 سماحية الفراغ وتعطى طاقة التاين لذرة الهيدروجين بالعلاقة:

$$E = \frac{e^2 m}{2 (4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} \dots\dots\dots (2.40)$$

وان طاقة تأين الذرة الواهبة E_d في شبه موصل يعطى بالعلاقة :

$$E_d = \left(\frac{1}{\epsilon_r^2}\right) \left(\frac{m_e}{m}\right) \frac{e^4 m}{2 (4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} \dots\dots\dots (2.41)$$

m_e الكتلة الفعالة لالكترن الهبة.

من المعادلة (2.41) نلاحظ ان طاقة الذرة الواهبة تتأثر كثيرا مع ثابت العزل للبلورة المضيفة اذ تعتمد E_d على مربع ϵ_r بينما تتأثر بالقوة الأولى للكتلة الفعالة لالكترن الهبة m_e .

والتمثيل على ذلك . افترض بلورة سليكون مطعمة بالزرنيخ حيث ثابت العزل النسبي الاستاتيكي للسليكون ($\epsilon_r \approx 12$) و ($\frac{m_e}{m} \approx 0.2$) فإن طاقة الترابط لايون الزرنيخ أصغر من تلك الطاقة للهيدروجين بعامل مقداره (0.0014) تقريباً . أي أن طاقة أيون الزرنيخ تكون حوالي 0.02 eV وهي قيمة مقارنة لما وجد عمليا . أن هذا أن مستوى الذرة الواهية يقع ضمن فسحة الطاقة المحرمة بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل ولكنه يقع تحت حافة نطاق التوصيل بمقدار صغير جداً. وإذا علمنا أن الطاقة الحرارية عند درجة حرارة الغرفة ($k_B T$) تساوي 0.025 eV فإن اقتراب مستوى الذرة الواهية من نطاق التوصيل يفسر لنا سبب تأين جميع الذرات الواهية عند درجة حرارة الغرفة تقريباً وتهيج الكترونات نحو نطاق التوصيل .

ان نصف قطر پور لذرة هيدروجين في حالة الأساس هو $\frac{(4\pi\epsilon_0\hbar)^2}{me^2}$. وبموجب هذا يعطى نصف قطر پور للذرة الواهية a_d بالعلاقة:

$$a_d = \frac{4\pi\epsilon_r\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2} \dots \dots \dots (2.42)$$

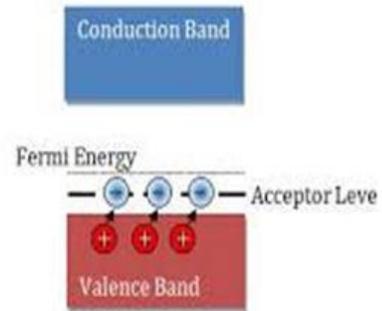
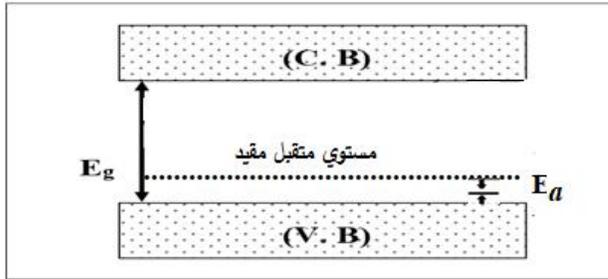
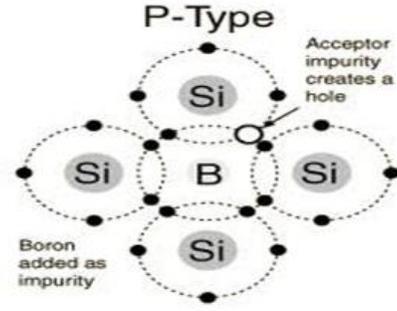
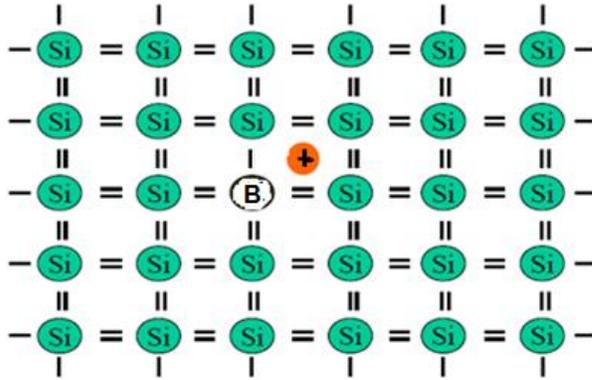
أن افتراضنا جميع الذرات الواهية تقريباً متأينة يعني ان تركيز الكترونات الهبة يكون مساوياً لعدد تلك الذرات الواهية تقريباً. بصورة عامة، تكون القيمة الاعتيادية لتركيز الكترونات الهبة حوالي $10^{15} \frac{e}{cm^3}$ وفي بعض الاحيان يمكن الحصول على تراكيز أعلى بكثير من ذلك (حوالي $10^{18} \frac{e}{cm^3}$ أو أكثر) عند الاسراف في تطعيم أشباه الموصلات . وعلى هذا الأساس تكون التوصيلية الكهربائية لأشباه موصلات مطعمة من النوع n أكبر من تلك التوصيلية لأشباه موصلات نقية.

(1-7-2) الشوائب المتقبلة

إن إدخال شوائب خماسية التكافؤ في أشباه موصلات نقية رباعية التكافؤ (مثل السليكون والجرمانيوم) يؤدي الى خلق ناقلات إضافية للشحنة هي الهبة . ويؤدي ذلك الى زيادة توصيليتها ويحولها الى أشباه موصلات من النوع - n . أما اذا ادخلت في شبه موصل نقي رباعي التكافؤ شوائب ثلاثية التكافؤ (مثل البورون (B) والكالسيوم (Ga) والالومنيوم (Al) والاندسيوم (In) ، أي المجموعة الثالثة

من عناصر الجدول الدوري) فسينتج عن ذلك نوع جديد من المواد شبه الموصلة تستحدث فيه فجوات بدلاً من الكترونات .

افتراض ان بلورة السليكون قد طعمت بذرة شائبة مثل ذرة البورون. ان ذرة البورون سوف تسكن عند موضع محتل سابقاً بوساطة ذرة سليكون. ولما كانت ذرة البورون محتوية على ثلاث الكترونات فقط في مدارها الخارجي اشتركت جميع هذه الالكترونات الثلاثة في الأواصر التساهمية الرباعية التي تنشأ بينها وبين أربع ذرات سليكون وتبقى أصرة تساهمية واحدة تحوي الكتروناً واحداً وتحتاج الى الكترون آخر لاستكمال التركيب البلوري الاعتيادي للسليكون. ان نشوء هذا العجز الشغور - ومقداره الكترون واحد قد يملا بوساطة الكترون متحرك من أصرة Si - Si مجاورة مسبباً خلوا موجياً أو فجوة موجبة عند تلك الأصرة. أي فجوة موجبة تطفو في نطاق التكافؤ للسليكون وفي الوقت نفسه تجعل ذرة البورون ايونا سالب الشحنة كما في الشكل (2-5). وعادة يكون مقدار الطاقة اللازمة لنقل الكترون من احدى أواصر Si - Si ووضعها في احدى أواصر Si - B صغيراً جداً.



الشكل (2-5) بلورة السليكون مضاف اليها شائبة ثلاثية التكافؤ (البورون)

عند درجة حرارة الصفر الكلفيني، تنقيد الفجوة الموجبة بالشائبة الثلاثية التكافؤ (B⁻) في السليكون او الجرمانيوم تماماً مثل تقييد الكترون سالب بشائبة خماسية التكافؤ في السيلكون والجرمانيوم. وعند درجات

حرارة أعلى من الصفر الكلفيني تتحرر الفجوة نحو نطاق التكافؤ وبتعبير آخر، عند درجات حرارة واطئة جداً يمكن اعتبار مستوى الشائبة مثل مستوى الكترون شاغر (empty electron level) تماماً فوق نطاق التكافؤ) ضمن فسحة الطاقة الممنوعة بين نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ) مؤهلاً لتقبل الكترون. وعند ارتفاع درجة الحرارة تنهيج الكترونات من نطاق التكافؤ لكي تحتل مثل هذه المستويات تاركة وراءها فجوات موجبة في نطاق التكافؤ التي تكون اعتيادياً مملوءة عند درجة حرارة الغرفة. وتدعى مثل هذه المستويات مستويات متقبلة (acceptor levels) وتدعى كل شائبة ثلاثية التكافؤ مثل البورون في السليكون أو الجرمانيوم (وما يشابههما في التركيب البلوري) شائبة متقبلة (acceptor impurity) لأنها عندما تتأين تتقبل الكترونات من نطاق تكافؤ السليكون (على سبيل المثال) لإكمال احدى اواصرها الرباعية التساهمية مع احدى الذرات المجاورة لها. وتسمى أشباه الموصلات النقية التي تطعم بذرات شائبة متقبلة بمواد شبه موصلة من النوع P (P- type) حيث يمثل الحرف P الشحنة الموجبة .

قد ترحل الفجوة الموجبة في نطاق التكافؤ بحرية خلال البلورة وتكون بذلك مثل جسيمات متوافرة ومهيأة للإسهام في التوصيل الكهربائي ولذلك يعني ادخال عدد كبير من شوائب ثلاثية التكافؤ في السليكون والجرمانيوم خلق تركيز لا يستهان به من الفجوات الموجبة.

بموجب المخطط الاعتيادي لطاقة الانطقة عندما نؤين ذرة متقبلة يعني اننا نحرق فجوة وهذا يتطلب الأمر أن نبذل طاقة لهذا السبب يرتفع الكترون فوق الحافة العليا لنطاق التكافؤ عندما يكتسب طاقة بينما تغوص الفجوة في نطاق التكافؤ عند اكتسابها طاقة. يمكن حساب طاقة الترابط للفجوة عند الايون الشائب المتقبل بوساطة الاسلوب المستخدم نفسه لحساب طاقة الترابط الالكترن الهبة في مسألة الايون الشائب المانح (نموذج پور بعد التحويل) ولكن التفكك عند قمة نطاق التكافؤ يعقد مسألة الكتلة الفعالة، ومهما يكن الأمر فان هذه الطاقة تكون صغيرة جداً ذات رتبة حوالي 0.01eV الجدول ادناه يبين قيم طاقات التأين التجريبية للايونات الشائبة الواهبة والمتقبلة في السليكون والجرمانيوم .

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

تقع مستويات الطاقة لكل من الواهبات E_d والمتقبلات E_a ضمن فسحة الطاقة الممنوعة للبلورة كما موضح في الشكلين (4-2) و (5-2) . ان هذا يتناقض هو ونظرية الانطقة التي تؤكد ان مدى الطاقة لهذه الفسحة ممنوع ولا يمكن أن تتخلله حالات الكترونية، وفي الواقع لا يوجد تناقض في هذه المسألة لان نظرية الأنطقة تصح للبلورات مثالية التركيب خالية من العيوب (ومن ضمنها الشوائب). بينما تنسب مستويات الواهبات والمتقبلات الى حالات كمية ناشئة عن شوائب أو الى عيوب في البلورة. من ناحية أخرى. ان الحالات الكمية الناشئة عن شوائب تمثل حالات مقيدة ومتمركزة أي تكون موقعيه أو موضعية (localized) على الضد من الكترونات بلوخ التي لا تكون محصورة في موقع أو موضع (delocalized). وعلى هذا الأساس، لا تكون حالات الشائبة (impurity states) موصلة للكهربائية.

وزيادة في الايضاح نقول: -

أولاً: في مسألة الواهبات - مثل ذرة As في بلورة السليكون - يمكن اعتبار الايون الموجب As^+ (الذي ينشأ عندما يذهب الكترون تكافؤ من As بالقرب من نطاق التوصيل للسليكون) مثل فجوة موجبة مقيدة. ولما كان As^+ لا يتحرك كانت هذه الفجوة ثابتة غير متقلة (immobile hole). ولهذا السبب، قد يكون مناسباً في بعض الاحيان استخدام هذا التفسير لكي يتوافق هو وفكرة خلق زوج الكترون - فجوة.

ثانياً: في مسألة المتقبلات - مثل ذرة B في بلورة السليكون - يمكن اعتبار المتقبل المتأين السالب B^- مثل الكترون مقيد غير متقل (immobile electron) زائداً فجوة حرة متقلة.

وكما هو الحال للواهبات. تتأين جميع المتقبلات في الغالب عند درجة حرارة الغرفة. فعند درجة حرارة الغرفة (حيث الطاقة الحرارية $k_B T$ تكون حوالي 0.025eV) يؤدي التأين الحراري للواهبات والمتقبلات دوراً مهماً في التوصيل الكهربائي للسليكون والجرمانيوم ولكن بصيغ متفاوتة ، ولتوضيح ذلك ، اذا كان عدد الذرات الواهبة في السليكون أكبر من عدد الذرات المتقبلة فيه فإن التأين الحراري للواهبات سوف يحرر الكترونات نحو نطاق التوصيل عندئذ تنظم توصيلية العينة بواسطة الشحنات السالبة (الالكترونات) ويطلق عليها شبه موصل من النوع - n، اما إذا كانت المتقبلات هي السائدة في العينة، فان التأين الحراري سوف يحرر فجوات في نطاق التكافؤ وعندئذ تنظم توصيلية العينة بواسطة الشحنات الموجبة (الفجوات) ويطلق عليها شبه موصل من النوع - p . ومهما يكن الأمر، يمكن اختبار نوع العينة أي n أم p بصورة تقريبية بواسطة اشارة ثابت هول أو إشارة الجهد الكهربائي الحراري (Thermoelectric Potential).

يضم عنصر الجرمانيوم 4.43×10^{22} ذرة لكل سنتيمتر مكعب. ولما كان أقل تركيز للشوائب أمكن الحصول عليه حتى الآن يبلغ مرتبة تقدر بـ 10^{12} ذرة شائبة في كل سنتيمتر مكعب) ذرة شائبة لكل 10^{11} من ذرات الجرمانيوم) أمكن الحصول على جرمانيوم بوصفه شبه موصل ذاتي عند درجة حرارة الغرفة. اما السليكون فلا يمكن اعتباره شبه موصل ذاتي عند درجة حرارة الغرفة والبديهي القول: ان الشوائب التي لا تتدخل في التركيب البلوري تعويضياً. لا تؤثر في تركيز حاملات الشحنة ولذلك قد توجد شوائب متنوعة وبنسب عالية في شبه موصل من دون ان تترك أثراً في القياسات الكهربائية.

(2-7-3) التأين الحراري للواهبات والمتقبلات

وضحنا سابقاً كيف ان تطعيم أشباه موصلات نقية بنسب معقولة من الشوائب (حوالي 10^{15} ذرة شائبة في كل سنتيمتر مكعب من شبه موصل نقي) يخلق فيها عدداً إضافياً كبيراً من حاملات الشحنة التي تسبب تغييراً في التركيز الذاتي لحاملات الشحنة في أشباه الموصلات النقية عند درجة حرارة الغرفة. وفي الحقيقة، ان إسهام الشوائب في خلق حاملات الشحنة يكون (في كثير من المسائل) أكثر من اسهام التهيح الحراري المتبادل بين نطاقي التكافؤ والتوصيل. وعند حصول ذلك، يقال ان العينة في المنطقة العرضية أو الدخيلة (extrinsic region) تمييزاً عن المنطقة الذاتية (intrinsic region) التي تحدد أساساً بواسطة الانتقالات المحرصة حرارياً بين نطاقي التكافؤ والتوصيل.

يمكن تمييز نوعين من المناطق الدخيلة الأشباه الموصلات المطعمة، وتحدث المنطقة الأولى عند تطعيم شبه موصل بذرات شائبة واهبة وتحدث المنطقة الثانية عند تطعيم شبه موصل بذرات شائبة متقبلة.

يمكن حساب التركيز المترن (n) لالكترونات التوصيل الناشئة عن واهبات متأينة عند درجة حرارة مثل T باسلوب مماثل للحسابات التقليدية في الميكانيك الاحصائي للتأين الحراري لذرات الهيدروجين. ولهذا الغرض، دعنا نفترض خلو عينة شبه موصلة من ذرات متقبلة أو ان تركيز الذرات الواهبة في العينة يزيد كثيراً عن تركيز الذرات المتقبلة. أي ان $N_d \gg N_a$ وفضلاً عن ذلك، يجب أن تكون الواهبات المتأينات بنسبة كافية لكبت أو إخماد تركيز الفجوات الى قيمة أقل بكثير من قيمته الذاتية. ان هذا يعني، ان اضافة واهبات يؤدي إلى زيادة (n) بنسبة ما يقلل (p) بالنسبة نفسها (وليس بالمقدار نفسه) ولذلك يزداد مجموع حاملات الشحنة (n + p) تبعاً لذلك تزداد التوصيلية الكهربائية للعينة اذا كانت تحركيتهما متساوية ($\mu_e = \mu_h$). أن المهم هذا ان يكون حاصل الضرب (np) كمية ثابتة عند درجة حرارة ما وهو ما يدعى بقانون الفعل الكتلي أو قانون فعل الكتلة (law of mass action). ان ثبوت (np) عند درجة حرارة ما يعني عدم اعتمادها على مستوى فيرمي (μ) أو على مقدار الشوائب وأنواعها . لاحظ هنا ان المعادلات (2-13) و (2-16) و (2-23) تصح لشبه موصل سواء أكان نقياً أم كان مطعماً بينما تصح المعادلة (2-25) لشبه موصل ذاتي فقط.

افترض ان N_d^0, N_d^+, N_d تمثل تراكيز الواهبات والواهبات المتأينات والواهبات غير المتأينات (المتعادلة كهربائياً) على التوالي. وافترض أيضاً اننا افترض ان ... تمثل تراكيز الواهبات والواهبات المتأينات والواهبات غير المتأينات (المتعادلة كهربائياً) على التعاقب وافترض أيضاً اننا نقيس الطاقة من الحافة العليا لنطاق التكافؤ (طاقة هذه الحافة تشير الى الصفر) وعندئذ يكون مستوى الذرة الواهبة المقيدة (المتأينة) عند طاقة ($E_c - E_d$) . ولما كانت احتمالية الاشغال لأية حالة تعطى بواسطة دالة توزيع فيرمي - ديراك.

لذلك كان :

$$\left(\begin{array}{l} N_d^0 = N_d f(E_c - E_d - E_f) \\ N_d^0 = N_d [1 + \exp \beta (E_c - E_d - E_f)]^{-1} \end{array} \right) \dots\dots\dots(2-43)$$

أي ان:

$$N_d^+ = N_d - N_d^0$$

$$N_d^+ = N_d \{1 + \exp[-\beta(E_c - E_d - E_f)]\}^{-1} \dots\dots\dots(2-44)$$

$$\beta = \frac{1}{k_B T} \text{ حيث}$$

ان تركيز الكترولونات التوصيل لشبه موصل مطعم بالدرجة الاساس بوساطة ذرات واهبة يساوي تركيز الواهبات المتأينات N_d^+ لان كل الكترولون توصيل ينشأ عن تأين ذرة واهبة بمقتضى الاخمد للإلكترونات والفجوات الذاتية. ولما كان على n ان يحقق المعادلة (2-14) كانت المعادلة (2-44) مكافئة المعادلة (2-13). أي ان:

$$n = N_c \exp\left[\frac{(E_f - E_c)}{k_B T}\right] = N_d^+ \dots\dots\dots(2 - 45)$$

$$N_c \exp\left[\frac{(E_f - E_c)}{k_B T}\right] = N_d \{1 + \exp[-\beta(E_c - E_d - E_f)]\}^{-1}$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2} \text{ حيث ان}$$

وعند درجات حرارة واطئة ($k_B T \ll N_d$) يمكن اختزال المعادلة (2-45) بالصيغة الآتية:

$$\left(\begin{array}{l} N_c \exp\left[\frac{(E_f - E_c)}{k_B T}\right] \cong N_d \left[\exp\left[\frac{(E_c - E_f)}{k_B T}\right] \left[\exp\left[\frac{-E_d}{k_B T}\right] \right] \right] \\ \therefore \exp\left[\frac{2(E_f - E_c)}{k_B T}\right] \cong \frac{N_d}{N_c} \exp\left[\frac{-E_d}{k_B T}\right] \end{array} \right) \dots\dots\dots(2-46)$$

وباستخدام المعادلة (2-46) لحذف مستوى فيرمي في المعادلة (2-45) نحصل على:

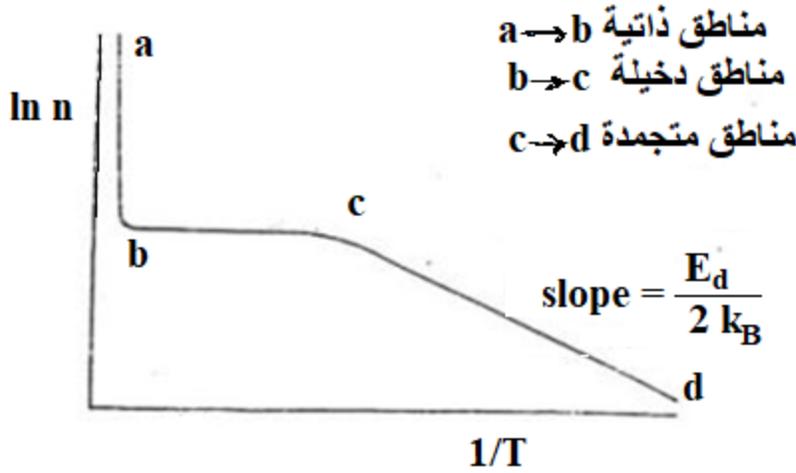
$$n = (N_c N_d)^{1/2} \exp\left[\frac{-E_d}{2 k_B T}\right] \dots\dots\dots(2 - 47)$$

ووفقاً للشروط التقريبية التي تم بموجبها الحصول على المعادلة (2-47) يتغير تركيز الالكترولونات مثل الجذر التربيعي لتركيز الواهبات.

ومن ناحية أخرى، يمكن الحصول على خطوط مستقيمة ذات ميل $\frac{E_d}{2k_B}$ و عندما يرسم $\ln(n)$ في مقابل $(1/T)$ وقد استخدم هذا الاسلوب للحصول على قيم E_d لشوائب واهبة في الجرمانيوم والسليكون.

يمكن الحصول على معادلات تركيز الفجوات لأشباه موصلات تكون فيها الشوائب المتقبلة هي السائدة [$(N_d = 0)$] او ان $(N_d \gg N_a)$ باسلوب مثل ذلك لتركيز الكترولونات التوصيل في أشباه موصلات تكون فيها $N_d \gg N_a$. وعندما تكون تراكيز كل من الواهبات والمتقبلات متقاربة تصبح المسألة أكثر تعقيداً.

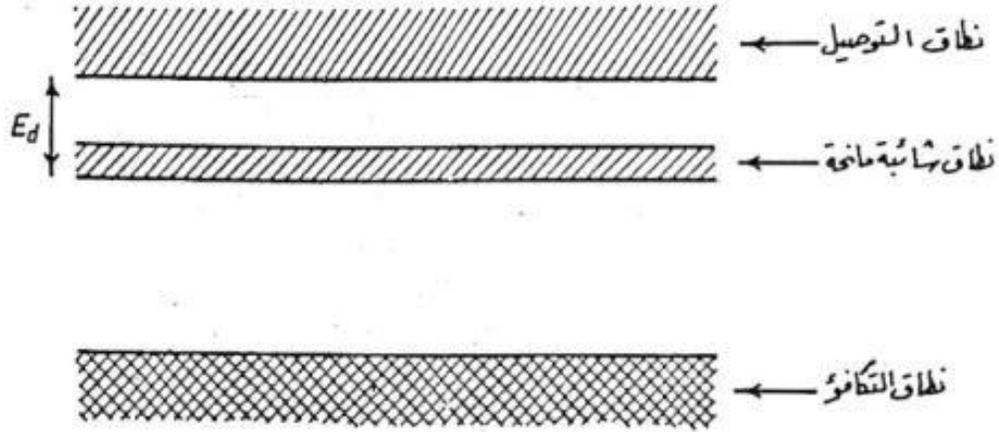
لقد استندت مناقشتنا لتأين الواهبات أو المتقبلات على افتراض ان درجة حرارة العينة تكون مرتفعة في قيمة كافية بحيث تجعل جميع الواهبات أو المتقبلات متأينة وهذا ما يصح من دون شك عند درجة حرارة الغرفة. تشير المعادلة (2-47) الى انه كلما انخفضت درجة الحرارة على نحو غير محدد وجب ان تختفي جميع الحاملات الحرة (سواءً كانت الواهبات هي السائدة أم المتقبلات) ولكن ما سبب هذا الاختفاء؟ ان استمرار انخفاض درجة حرارة العينة تدريجياً يؤدي الى بلوغها نقطة تكون عنده الطاقة الحربية صغيرة جدا لا تكفي لأثارة الكترولون وفي مثل هذه الحالة يهبط تركيز الالكترولونات في نطاق التوصيل وتبقى الالكترولونات في مستوى الأيون الواهب وبذلك تتناقص التوصيلية الكهربائية للعينة بشكل مثير ويقال عن العينة بانها متجمدة (freeze - out) بسبب تجمد الكترولونات التوصيل عند مستوى الايون الواهب. اما درجة الحرارة التي يحدث عندها انجماد الكترولونات التوصيل فيمكن تقديرها بواسطة العلاقة $(E_d \approx k_B T)$ التي تكون حوالي 100 K الشكل (2-6) يوضح كيفية تغير تركيز الحاملات مع درجة الحرارة (T) لشبه موصل من نوع n - حيث تظهر المناطق الذاتية والدخيلة والمتجمدة



الشكل (2-6) تغير تركيز الحاملات لشبه موصل من نوع n مع درجة الحرارة (T)

(2-7-3) التوصيل الكهربائي لأشباه موصلات مطعمة عند درجات حرارة واطئة جداً

بموجب النظريات والفرضيات البسيطة المستخدمة لحساب تركيز الحاملات الحرة، يبدو أول وهلة تساؤل التوصيلية الكهربائية لشبه موصل مطعم عند درجات حرارة واطئة جداً اختفاء الحاملات وتجمدها ان هذا يمكن أن يتحقق اذا كانت $(k_B T)$ أصغر من طاقة تأين الشائبة (E_d) أو (E_a) أي أن درجة حرارة العينة T أصغر من 100 K. $(k_B T < 0.01eV)$ فعند درجة حرارة (10K) حرة لغرض التوصيل. وفي الواقع ، عندما يكون تركيز الذرات الواهبة كبيراً (حوالي 100 ذرة لكل سنتيمتر مكعب من شبه موصل) تتراكم الدالات الموجية للإلكترونات وتشكل ما يعرف بنطاق شائبة (impurity band) أي نطاق ضيق من مستويات شبه مستمرة ضمن فسحة الطاقة الممنوعة بين نطاقي التكافؤ والتوصيل كما في الشكل (2-7).



الشكل (7-2) نشوء نطاق شائبة مانحة بسبب وجود تركيز عال للواهبات

فاذا كان لدينا الكترولون لكل ذرة واهبة فان نطاق الشائبة سيكون نصف مملوء ويحدث التوصيل كما يحدث في معدن. ولكن بسبب ضيق او محدودية هذا النطاق تكون التحركية واطئة ولكنها كافية لاطهار توصيلية يمكن تحسسها وقياسها. ومهما يكن الأمر وجد أنه يمكن حدوث توصيل التراكيز أصغر من 10^{19} واهبة أو متقبلة لكل سنتيمتر مكعب قد تصل إلى 10^{15} الى 10^{16} واهبة أو متقبلة لكل سنتيمتر مكعب وبذلك تعجز نظرية توصيل نطاق الشائبة عند تفسير القيمة الملاحظة للتوصيلية الكهربائية.

لقد وجد أن التوصيلية الكهربائية عند درجات حرارة واطئة جدا تكون عظيمة عند وجود واهبات ومتقبلات في شبه موصل بأعداد ضخمة وعندئذ يقال أن شبه الموصل قد عوض (Compensated) ان نسبة التعويض (Compensation ratio) لشبه موصل من النوع الموجب - p عندما تكون $(N_a > N_d)$ تساوي $\frac{N_a}{N_d}$ افترض أن نسبة المعادلة $\frac{N_a}{N_d}$ لشبه موصل من النوع الموجب لا تساوي صفراً فعند درجات حرارة واطئة جداً مثل $E_d \gg k_B T$ تكون جميع مستويات الشوائب الواهبة شاغرة بسبب سقوط الكترولونات على عدد مساو من المتقبلات N التي تبديد (أو تعادل) الفجوات على تلك المتقبلات (حيث تشغل الكترولونات الساقطة تلك الفجوات) . وهكذا نحصل على N_d من المتقبلات المتأينة و $(N_a - N_d)$ من المتقبلات غير المتأينة، أن المتقبلات المتأينة تنتشر خلال العينة وفي الوقت نفسه قد تستطيع الفجوات من المتقبلات غير المتأينة أن تثب من موضع شاغر إلى آخر بواسطة ما يسمى بعملية حفر الانفاق (tunnelling process) .

وقد يكون مفيداً أن نوضح هنا أن الشوائب الشاغرة لا تعتبر جسيمات متعادلة الشحنة، فالواهبات تكون ذات شحنة موجبة والمتقبلات تكون ذات شحنة سالبة ولذلك قد تتجاذب أو تتنافر هي والحاملات الباقية، بصورة عامة، يمكن التعبير عن التوصيلية الكهربائية الكلية، بالصيغة الآتية:

$$\sigma = A_1 \exp \frac{-\varepsilon_1}{k_B T} + A_2 \exp \frac{-\varepsilon_2}{k_B T} + A_3 \exp \frac{-\varepsilon_3}{k_B T} \dots \dots \dots (2 - 48)$$

ينشأ الحد الأول من المعادلة (2-48) عن التآين الحراري للشوائب ولا يكون ذا فاعلية عند درجات حرارة واطئة جداً. وينشأ الحد الثاني عن توصيل نطاق شائبة ولا يكون فعالاً ما لم يكون عدد الواهبات أو المتقبلات N_d أكبر من 10^{16} ذرة لكل سنتيمتر مكعب تقريباً. أما الحد الثالث فينشأ عن توصيل الوثب بوساطة عملية حفر الانفاق ويعد هذا الحد ذا أهمية عظمى في هذه المسألة، لقد وجد أن (A_3) لتيار مستمر - (d.c) تعتمد كثيراً على تركيز الحاملات الأكثرية بينما تعتمد ε_3 على نسبة التعويض $\frac{N_d}{N_a}$ لشبه موصل من النوع السالب و $\frac{N_d}{N_a}$ الشبه موصل من النوع الموجب إذ تصبح قيمة ε_3 كبيرة عند اقتراب قيمة نسبة التعويض من الصفر.

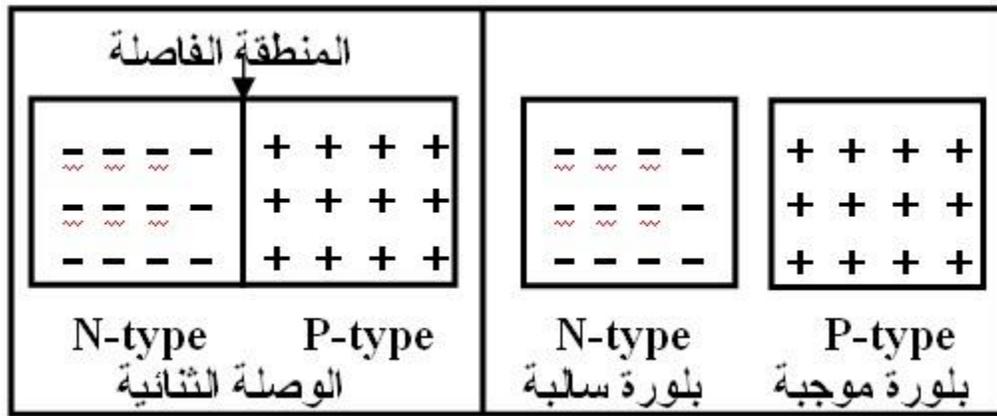
(7-2) ملتي p-n

في شبه موصل نقي كالسليكون والجرمانيوم ونتيجة للتآين الحراري تعد الالكترونات الحرة ناقلات أو حاملات شحنة سائدة أي أنها الأكثرية (majority) رغم تساويها في العدد هي والفجوات ، ان تفسير ذلك يعزى الى وجود الالكترونات الحرة في نطاق التوصيل شبه الفارغ تقريباً ولبعدها عن نوى الذرات أي أن فاعليتها الحركية تكون أكبر من تلك للفجوات الموجودة عادة في نطاق التكافؤ .

وفي هذا البند: عندما نذكر الجرمانيوم نقصد به أي شبه موصل مشابه له (ذي تكافؤ رباعي) ، يدعى الجرمانيوم الخالي من أية ذرات شائبة جرمانيوماً ذاتياً أو فطرياً (intrinsic) أو جرمانيوماً من نوع i- (i-type germanium) وباختصار (i-Ge) ويمتلك عادة مقاومة عالية تقريباً. وعندما يحتوي الجرمانيوم على ذرات شائبة واهبة يدعى جرمانيوماً إلكترونياً أو جرمانيوماً سالباً (n - type) ويرمز له (n-Ge) بينما يعرف الجرمانيوم الذي يحتوي على ذرات شائبة متقبلة مثل جرمانيوم فجوة أو جرمانيوم موجب (p-type) ويرمز له (P-G). في (n- Ge) توجد ذرات شائبة واهبة متأينة موجبة

وتركيز مساو لها من الالكترونات الحرة ولذلك يكون أكثر حاملات الشحنة هو الالكترونات ويكون الأقل هو الفجوات ، أما في (P-Ge) فتوجه ذرات شائبة متقبلة متأينة سالبة وتركيز مساو لها من الفجوات الحرة ولذلك يكون أكثر حاملات الشحنة هو الفجوات ويكون أقلها هو الالكترونات.

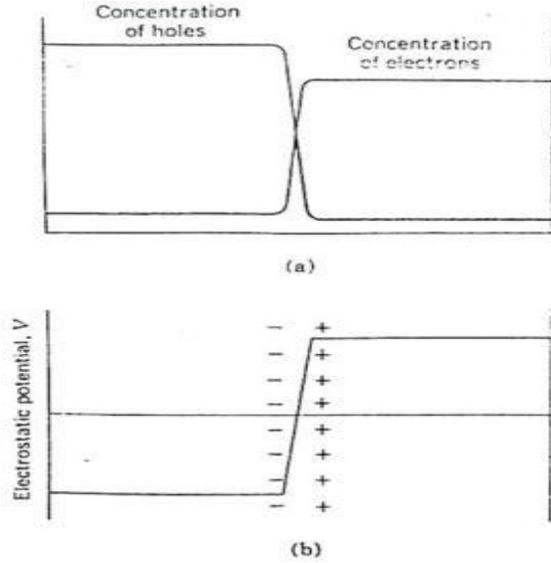
وتوجد عدة طرائق ممكنة لإنتاج بلورة جرمانيوم (او بلورة سليكون) تضم في وقت واحد المنطقتين السالبة (n) والموجبة (p) تفصلهما حدود داخلية بينيه ذات عرض رقيق جداً لا يتجاوز 10^{-6} متر. وللتمثيل على ذلك، عند تقريب عينتين من (p- Ge) ، (n-Ge) حيث تكون تراكيز حاملات الشحنة في كل منهما ثابتة . وجعلهما يتلامسان (يلتصقان) بأحكام ويكونان بلورة واحدة كما في الشكل (8-2) . يبدأ تركيز حاملات الشحنة بالاختلاف على وجهي السطح الفاصل بين العينتين، ان تفسير هذا التباين في التركيز هو كالآتي:



الشكل (8-2) توزيع حاملات الشحنة المتحركة في المنطقة الموجبة والسالبة عند غياب مجال كهربائي خارجي وحصول الاتزان.

في لحظة تلامس (p- Ge) مع (n- Ge) وتكوين بلورة واحدة تكون حاملات الشحنة في اتزان حراري مع الذرات الشائبة المتقبلة والواهبة ولذلك يتوافق الضرب (pn) تراكيز الفجوات والالكترونات خلال البلورة وقانون فعل الكتلة كذلك، ان شدة المجال الكهربائي في أي موضع من هذه البلورة يساوي صفراً لان شحنات الحاملات الحرة تكون متعادلة هي وشحنات ذرات الشوائب المتأينة (وللتمثيل على ذلك، التعادل الكهربائي بين الالكترونات الحرة والذرات الشائبة الواهبة المتأينة الموجبة في المنطقة الموجبة (p) وبعد هذه اللحظة، وعلى الرغم من غياب مجال كهربائي خارجي. ينعدم هذا الاتزان حيث تبدأ الالكترونات الحرة المتركة في (n - Ge) بالانتشار نحو (p-Ge) وملئ البلورة بانتظام تاركة

وراءها الايونات الواهبة موجبة الشحنة. وترغب الفجوات الحرة المتركرة في (p- Ge) بالانتشار نحو (n - Ge) تاركة وراءها الايونات المتقبلة السالبة الشحنة . ان سبب حدوث هذا الانتشار هو وجود انحدار تركيز عالٍ ابتدائي بين المنطقتين الموجبة والسالبة (بين الفجوات والالكترونات الحرة) عبر السطح الفاصل بينهما. ان مثل هذا الانحدار يقود إلى انتشار فيضين (تيارين) في الاتجاهات التي تؤدي لتقليل هذا الانحدار في التركيز (الالكترونات تتجه نحو المنطقة الموجبة والفجوات نحو المنطقة السالبة). ان التيارات المنتشرة سوف لا تستمر من دون ضوابط تحددها لان انتشار الالكترونات الى المنطقة الموجبة يؤدي الى اكتساب هذه المنطقة شحنة سالبة اضافية ويتعزز ذلك بوساطة الفجوات التي تترك المنطقة الموجبة متوجهة الى المنطقة السالبة، وهكذا نجد أن التأثير الصافي لانتشار التيارات هو أن المنطقة الموجبة تصبح سالبة الشحنة بالنسبة إلى المنطقة السالبة من هذا يعني أن عمليات الانتشار المتبادلة هذه سوف تقلق، في بادي، الأمر التعادل الكهربائي عند السطح البيني (interface) الفاصل بين (n - Ge) و (p - G) او تولد شحنة حيزية (space charge) ، أي ظهور طبقة كهربائية مزدوجة بالقرب من السطح الفاصل ومجال كهربائي موجه من منطقة السالبة الى المنطقة موجبة (p) كما في الشكل (9-2) .



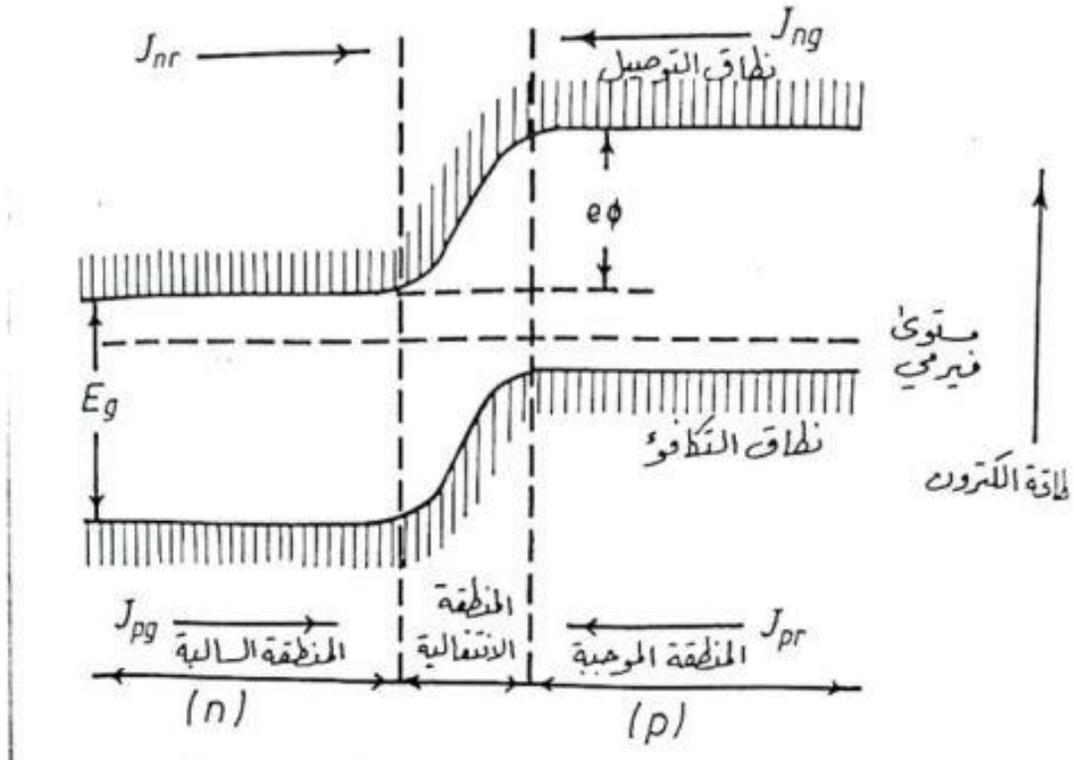
الشكل (9-2) (a) تغير تراكيز الالكترونات والفجوات عبر ملتقى (p-n) عند غياب مجال كهربائي خارجي حيث تكون الحاملات في اتزان حراري هي والذرات الواهبة والمتقبلة. (b) الجهد الكهروستاتيكي الناشئ عن الذرات المتقبلة (-) والذرات الواهبة (+) قرب الملتقى.

ان نشوء هذا المجال يعني ضمني نشوء فرق جهد عن المتقبلات السالبة والواهبات الموجبة يدعى جهد التماس (contact potential) تتراوح قيمته عادة بين (0.1) و (1) فولت (للجرمانيوم 0.3 فولت وللسيلكون 0.7 فولت) . في المراحل الأولية العملية التصاق (p - G) و (n-Ge) تكون شدة المجال الكهربائي الناشئ ضعيفة ومع استمرار عمليات الانتشار ينمو هذا المجال، أن نمو المجال الكهربائي يؤدي الى تعاضم عملية اعاقا الانتشار وكبحه وبذلك يحافظ هذا المجال (أو فرق الجهد) على الفصل بين نوعي حاملات الشحنة.

في بلورة واحدة يدعى السطح البيني بين (n-Ge),(p-Ge) والمنطقة المجاورة له الحاوية للشحنة الحيزية وصلة أو ملتقى p-n (p-n junction) وعند غياب مجال كهربائي خارجي يمتلك ملتقى p-n مقاومة اضافية بسبب كون الالكترونات المنتشرة من (n-Ge) الى (p-Ge) تتحد ثانية (من جديد) بالفجوات في (p-Ge) ، وتتحد ثانية الفجوات المنتشرة في (n-Ge) والآتية من (p-Ge) بالإلكترونات، وهكذا تكون تراكيز الالكترونات والفجوات في ملتقى p-n متساوية تقريباً وواطئة جداً [حيث تكون تلك التراكيز مساوية تقريباً لتلك التراكيز في (i-Ge)، أي أن تأثير انحدار التركيز بين المنطقتين الموجبة والسالبة يلغى تماماً فرق الجهد الكهروستاتيكي ويكون الجريان الصافي لكل من الالكترونات والفجوات (حاملات الشحنة) مساوياً صفرأ. لاحظ هنا اننا نفترض ان سمك الحد الداخلي الفاصل بين المنطقتين الموجبة والسالبة في البلورة الواحدة (عرض ملتقى p - n) يكون صغيراً جداً مقارنة بطول مسار الانتشار، أي مدى المسافة التي تنتشر خلالها حاملات الشحنة وخلال زمن يعادل متوسط عمر حاملات الشحنة (للمثيل على ذلك، متوسط عمر الفجوات في الجرمانيوم عند درجة حرارة الغرفة حوالي 10^{-3} ثانية يقابله مسافة انتشار طولها 2×10^{-3} متر). ومهما يكن الأمر، وحتى في حالة الاتزان الحراري وغياب مجال كهربائي خارجي، يوجد جريان صغير للإلكترونات من المنطقة السالبة الى المنطقة الموجبة في ملتقى (p-n) حيث تنهي تلك الالكترونات حيويتها أو تأثيرها بوساطة اتحادها ثانية بفجوات، ويتعادل هذا التيار الالكتروني والتيار الكتروني آخر يتولد حرارياً في المنطقة الموجبة ويدفع نحو المنطقة السالبة ، وزيادة في الايضاح دعنا نناقش الافكار الخاصة بملتقى (p-n) من وجهة نظر أنطقه الطاقة .

الشكل (10-2) يبين مواقع أنطقة التوصيل والتكافؤ قرب ملتقى (p-n) ان أول ما يجب ملاحظته في الشكل ارتفاع الطاقات في المنطقة الموجبة من البلورة مقارنة بالمنطقة السالبة منها. ويعزى ذلك الى ان انتقال الشحنة يكسب المنطقة الموجبة شحنة صافية سالبة. فاذا افترضنا أن جهد التماس يساوي (ϕ) فان فرق طاقة الجهد بين المنطقتين يساوي ($e\phi$) أي أن طاقة الالكترونون في المنطقة الموجبة تكون أعلى من طاقته في المنطقة السالبة بمقدار ($e\phi$) لان الالكترونون يحمل شحنة سالبة $[-e]$.

وبتعبير آخر يتغير موقع حافة نطاق التوصيل والتكافؤ بالنسبة الى مستوى فيرمي في المنطقة الانتقالية للملتقى. ان موقع حافة النطاق يكون ثابتاً عندما يكون داخل المنطقة الموجبة أو السالبة تماماً.



الشكل (10-2) ملتقى (p-n) في حالة الاتزان الحراري من وجهة نظر أنطقة الطاقة عند غياب مجال كهربائي خارجي .

ان نشوء جهد التماس (ϕ) يعني نشوء مجال كهربائي شدته ($\frac{d\phi}{dx}$) عند الملتقى الذي يعوق (يقاوم) استمرار انتشار الالكترونات والفجوات من منطقة الى أخرى. وبموجب هذا لا تستطيع جميع

الالكترونات في نطاق التوصيل ضمن المنطقة السالبة الانتشار الى المنطقة الموجبة باستثناء تلك الالكترونات التي تمتلك طاقة حركية أكبر من حاجز الجهد (ϕ)، ولكن استمرار انتقال الشحنة يعني استمرار زيادة جهد التماس ولهذا السبب يستمر فيض الانتشار بالتناقص حتى يتم التعادل بوساطة فيض الكتروني يجري من المنطقة الموجبة الى المنطقة السالبة الذي يدعى فيض التوليد أو التكوين (generation flux)، أي تيار الكتروني J_{ng} للإلكترونات تتولد حرارياً في المنطقة الموجبة وتدفع قسراً بوساطة جهد التماس نحو المنطقة السالبة - والآن كيف تنشأ هذه الالكترونات ؟

تخلق باستمرار الالكترونات وفجوات في المنطقة الموجبة نتيجة توليد حراري ولكن معدل هذا التوليد يعتمد على درجة الحرارة والبيديهي أن يحدث في وقت التوليد الحراري نفسه اعادة اتحاد (recombination) بين الالكترونات وفجوات متولدة حرارياً. ولكن عند أية درجة حرارة. يوجد عدد محدد من الالكترونات وعدد محدد من الفجوات غير المتحددة بعضها ببعض، حيث يعتمد التركيز النسبي لهذه الالكترونات والفجوات على تركيز الشوائب ولما كان بعض الالكترونات هذه المنطقة (المنطقة الموجبة) تتجول في داخل منطقة الملتقى نفسه جرف بوساطة المجال الكهربائي لقوى ضمن منطقة الملتقى ودفع حالاً نحو المنطقة السالبة. أي ينشأ فيض الكتروني يجري من المنطقة الموجبة نحو المنطقة السالبة. وهكذا نجد فيما يخص الالكترونات وحدها نوعان من الفيض يجريان عبر الملتقى:

الأول: يمثل تيارا الكتروني يجري من المنطقة السالبة الى المنطقة الموجبة بسبب التركيز الكبير للالكترونات في المنطقة السالبة ويعرف هذا التيار مثل فيض إعادة اتحاد الالكترونات (recombination flux) ويرمز له J_{nr} بل ان سبب هذه التسمية يعود الى حقيقة ان الالكترونات التي تجري من المنطقة التالية نحو المنطقة الموجبة تتحد في آخر الأمر مع الفجوات الموجودة في المنطقة الموجبة.

الثاني: يمثل تيارا الكتروني ايضا يجري من المنطقة الموجبة الى المنطقة السالبة بسبب التوليد الحراري للإلكترونات ثم اندفاعها اللاحق بوساطة المجال الكهربائي للملتقى ويعرف هذا التيار مثل فيض التوليد ويرمز له J_{ng} .

وبموجب ما تقدم في حالة الاتزان الحراري (الذي يدل ضمناً على غياب مجال كهربائي خارجي) يجب أن يكون J_{nr} مساوياً لـ J_{ng} بالمقدار ومعاكساً له بالاتجاه. أي أن:

$$J_{nr}(V = 0) + J_{ng}(V = 0) = 0 \dots \dots \dots (2 - 49)$$

ان عدم تحقق المعادلة (2-49) يعني تكس الالكترونات من دون تحديد الالكترونات من دون تحديد على جهة واحدة من حاجز الجهد.

ان ما ذكرناه عن الالكترونات في نطاق التوصيل ينطبق كذلك على الفجوات في نطاق التكافؤ حيث تجري هذه الفجوات عبر الملتقى بصيغتين هما

فيض اعادة اتحاد الفجوات ويجري من المنطقة الموجبة نحو المنطقة السالبة. وفيض توليد الفجوات حرارياً حرارياً ويجري في الاتجاه المعاكس.

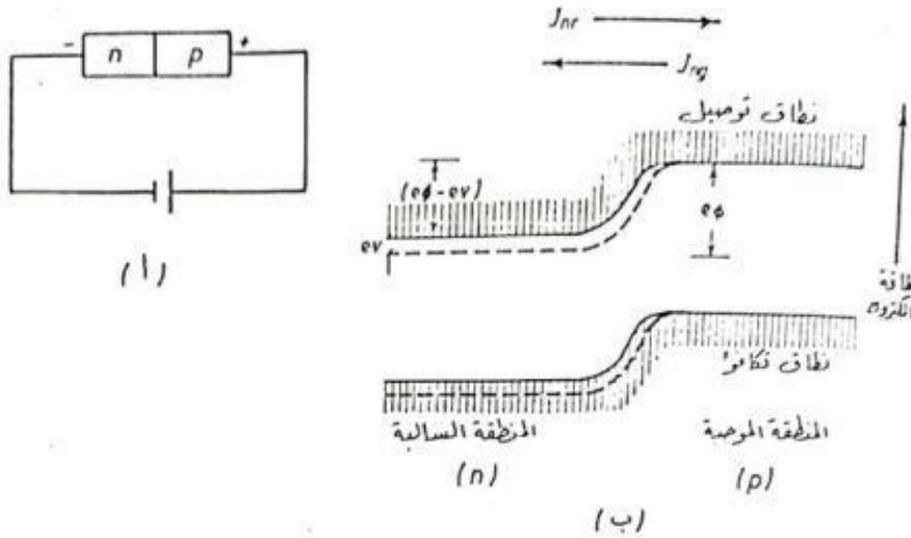
وفي حالة الاتزان الحراري يكون:

$$J_{pr}(V = 0) + J_{pg}(V = 0) = 0 \dots \dots \dots (2 - 50)$$

قد يكون مفيداً هذا أن تنبه على أن تعبير تيار الكتروني (فيض الكتروني) أو تيار فجوي (فيض فجوي) الذي يرمز له عادة بالرمز (J) لا يقصد به تيار كهربائي الذي يرمز له عادة بالرمز (I).

فالتيار الكهربائي المرافق لفيض الكتروني (J_n) يمثل بالرمز (I_n) ويعطى بالعلاقة ($I_n =$

$$-eJ_n) \text{ بينما يعبر عن التيار الكهربائي المرافق لفيض فجوي } (I_p) \text{ بالرمز } (I_p) \text{ ويعطى بالعلاقة } (I_p = +eJ_p)$$



الشكل (2-11) (أ) ربط كهربائي في اتجاه أمامي لملتقى p-n (ب) تأثير انحياز أمامي في مخطط أنطقة الطاقة لملتقى p-n. المستقيمات المنقطعة تشير إلى مواقع حافات نطاقي التكافؤ والتوصيل قبل تسليط فرق جهد خارجي .

عند تسليط فرق جهد خارجي V على ملتي $p-n$ في اتجاه أمامي (forward) أو ما يسمى انحيازاً أمامياً (forward bias) أي عندما تربط المنطقة الموجبة (p) بالقطب الموجب وتربط المنطقة السالبة (n) بالقطب السالب لمصدر الطاقة كما في الشكل (2-11) أ - تزداد طاقة المنطقة السالبة أي ترتفع كل من الحافة العليا لنطاق التكافؤ والحافة السفلى النطاق التوصيل بمقدار (eV) كما في الشكل (2-11) ب . وتزول حالة الاتزان السائدة قبل تسليط فرق الجهد الخارجي .

والآن ما هو تأثير هذه الزيادة في التيارات الالكترونية والتيارات الفجوية؟ لنبدأ أولاً بالتيارات الالكترونية. يتأثر فيض (أو تيار) إعادة الاتحاد الالكتروني ($J_{nr}(V=0)$) بمقدار محسوس عند ارتفاع طاقة المطلقة المالية حيث تزداد قيمته بسبب انخفاض علو حاجز طاقة الجهد بمقدار eV ويصبح علوه ($e\phi - eV$)، إن هذا يعني أن الملتقى يبدي مقاومة واطئة نسبياً ويسمح بمرور تيار الكتروني عالي الشدة، أي تتمكن أعداد كبيرة من الالكترونات بالجريان من المنطقة السالبة نحو المنطقة الموجبة . فإذا افترضنا أن هذه الالكترونات تخضع لاحصاء ماكسويل - بولتزمان فان يزداد في مسألة انحياز امامي بعامل مقداره $\exp \frac{eV}{k_B T}$ أي ان

$$J_{nr}(V_{forward}) = [J_{nr}(V=0)] \exp \frac{eV}{k_B T} \dots \dots \dots (2-51)$$

اما قيض التوليد. أي تيار الالكترونات المتولدة حرارياً (J_{ng}) فيبقى ثابتاً على الرغم من تسليط فرق جهد خارجي ان تفسير ذلك هو أن هذه الالكترونات تجري عادة نحو مستوى طاقة أدنى، أي من المنطقة الموجبة إلى المنطقة السالبة. وان تسليط فرق جهد V أقل من ϕ يعني استمرار وجود مجال كهربائي قوي في الملتقى كاف لجرف الالكترونات القادمة من المنطقة الموجبة نحو المنطقة السالبة أي أن:

$$J_{ng}(V_{forward}) = J_{ng}(V=0) \dots \dots \dots (2-52)$$

وهكذا نجد في مسألة انحياز أمامي، أنه يوجد جريان صاف للإلكترونات من المنطقة السالبة إلى المنطقة الموجبة. وبسبب الشحنة السالبة للإلكترونات ($-e$) يجري التيار الكهربائي الفعلي المرافق للإلكترونات من المنطقة الموجبة الى المنطقة السالبة ويكون ذا قيمة تحسب بدلالة المعادلات (2-49) و (2-51) و (2-52)، اي ان

$$I_n = e(J_{nr} - J_{ng})$$

$$I_n = eJ_{ng}(V = 0) \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] \dots \dots \dots (2 - 53)$$

ان ما ذكرناه سابقاً عن جريان الالكترونات عبر ملتي (p-n) ونشوء تيار الكتروني، في مسألة انحياز أمامي، ينطبق تماماً على جريان الفجوات عبر الملتي ونشوء تيار الفجوات. ففرق الجهد الخارجي المسلط على البلورة الذي يعمل على خفض على حاجز طاقة الجهد بمقدار (eV) بالنسبة للإلكترونات يعمل كذلك على خفض ذلك العلو بواسطة المقدار (eV) نفسه بالنسبة للفجوات. ان هذا يعني جريان أعداد كبيرة من الالكترونات من المنطقة السالبة إلى المنطقة الموجبة. تحت شروط فرق الجهد المسلط الذي يولد تيارات كبيرة للفجوات ولكن باتجاه معاكس لتلك التيارات بالنسبة للإلكترونات.

وعلى هذا الأساس يعضى التيار الكهربائي المحمول بواسطة الفجوات بالعلاقة الآتية:

$$\left(\begin{array}{l} I_p = e(J_{pr} - J_{pg}) \\ I_p = eJ_{pg}(V = 0) \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] \dots \dots \dots (2 - 54) \end{array} \right)$$

لما كانت تيارات الكهربائية المحمولة بواسطة الالكترونات والفجوات يمكن جمعها ولما كان كل من (I_p) , (I_n) في الاتجاه نفسه (من القطب الموجب الى القطب السالب لمصدر الطاقة الذي يكون عادة بطارية) لذلك يعطى التيار الكهربائي الكلي (I) لانحياز أمامي بالعلاقة الآتية:

$$\left(\begin{array}{l} I = (I_n + I_p) \\ I = e[J_{ng}(V = 0) + J_{pg}(V = 0)] \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] \dots \dots \dots (2 - 55) \end{array} \right)$$

وإذا افترضنا ان (I_0) تمثل مجموع التيارين الكهربائيين الناشئين عن التوليد الحراري ولا تعتمد على فرق جهد الانحياز V ، أي أن

$$I_0 = e[J_{ng}(V = 0) + J_{pg}(V = 0)] \dots \dots \dots (2 - 56)$$

أمكن كتابة المعادلة (2-55) بالصيغة الآتية:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] \dots \dots \dots (2 - 57)$$

المعادلة (2-57) تشير الى أن (I) يعتمد اسيا على (V) . ولما كانت (V) عادة أكبر من $\left(\frac{k_B T}{e}\right)$ أي ان (V) أكبر من 0.025 فولت عند درجة حرارة الغرفة (أي الحد الأول كبير بالمقارنة مع 1 أي يهمل 1) أمكن تقريب المعادلة (2-56) وكتابتها بالصيغة الآتية:

$$I \cong I_0 \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) \dots\dots\dots (2 - 58)$$

لقد وجد أن المعادلة (2-58) تصح تماماً لملتقيات (p-n) في الجرمانيوم ولكنها لا تصح تماماً وبصورة مقنعة لغيره من أشباه الموصلات .

وبعد أن ناقشنا تفصيلاً الانحياز الامامي لملتقى (p-n) يجدر بنا أن نتعرف ما يحدث عند عكس قطبيه فرق الجهد الخارجي V المسلط على ملتقى (p-n)، أي عندما تربط المنطقة الموجبة بالقطب السالب وتربط المنطقة السالبة بالقطب الموجب لمصدر الطاقة وهو ما يسمى بانحياز جهدي خلفي (back voltage bias) أو انحياز معكوس (reverse bias) ، يسبب الانحياز المعكوس زيادة فرق الجهد بين المنطقتين الموجبة والسالبة أي يزداد علو حاجز طاقة الجهد بمقدر (eV). وبموجب هذا، تحدث القوى الكهروستاتيكية أثراً تكون نتيجته سحب أو انتزاع الفجوات في المنطقة الموجبة من ملتقى (p-n) وكذلك الالكترونات في المنطقة السالبة منه ويتضاءل التيار وقد تصبح قيمته صفراً لان الملتقى في هذه المسألة ينشئ مقاومة عالية جدا (يصعب على الالكترونات تسلق حاجز طاقة الجهد من الجهة الواطئة الى الجهة العالية)، وإذا كنا نلاحظ تياراً واطناً خلال الملتقى فإنه ينشأ بوساطة حاملات شحنة أقلية نتيجة حركتها المتوافقة هي وقطبية فرق الجهد المسلط.

وزيادة في الايضاح، في مسألة انحياز معكوس توجد تيارات توليد وإعادة إتحاد لكل من الالكترونات والفجوات إن تيارات التوليد (التيارات الناشئة عن حاملات شحنة أقلية متولدة حرارياً). ومهما كانت قيمة فرق الجهد الخارجي المسلط لا تتأثر بعملية تسليط فرق الجهد (كما هو الحال في مسألة انحياز أمامي) لان مجال الملتقى لاتزال قوته كافية لإنجاز عملية جرف تلك الحاملات عندما تكون قطبية الفولتية المسلطة مواتية لذلك، وللتمثيل على ذلك، ان التيار المرافق الالكترونات متولدة حرارياً لا يتأثر بفولتية الانحياز المعكوس اذ تنتقل مثل هذه الالكترونات عادة من المنطقة الموجبة الى المنطقة السالبة ، كما هو الحال عند تسليط، فولتية في اتجاه أمامي . أي أن

$$J_{ng}(V_{back}) = J_{ng}(V = 0)$$

$$J_{pg}(V_{back}) = J_{pg}(V = 0) \dots \dots \dots (2 - 59)$$

اما تيار اعادة الاتحاد (سوا كان ذلك للإلكترونات أم للفجوات) فيتضاءل بسبب ازدياد علو حاجز طاقة الجهد بوساطة عامل بولتزمان $\exp\left(\frac{-eV}{k_B T}\right)$ الذي ينظم (على سبيل المثال) عدد الالكترونات التي تمتلك طاقة حركية كافية تمكنها من القفز من فوق حاجز طاقة الجهد $(e\phi + eV)$. أي أن

$$I_{nr}(V_{back}) = I_{nr}(V = 0) \left[\exp\left(\frac{-eV}{k_B T}\right) \right] \dots \dots \dots (2 - 60)$$

ومهما يكن الأمر يهيمن التيار المتولد حرارياً لانحياز معكوس (على الرغم من صغره في درجات الحرارة الاعتيادية) على تيار اعادة الاتحاد. ويمكن توضيح هذا كالآتي:
ان التيار الكهربائي الكلي الجاري من المنطقة السالبة الى المنطقة الموجبة) من القطب الموجب الى القطب السالب لمصدر الطاقة الكهربائية) يعطى بالعلاقة الآتية:

$$I = (I_n + I_p)$$

$$I = e[J_{ng}(V = 0) - J_{nr}] + e[J_{pg}(V = 0) - J_{pr}] \dots \dots \dots (2 - 61)$$

وباستخدام المعادلتين (2-60) و(2-49) وما يشابههما بالنسبة للفجوات يمكن اعادة كتابة المعادلة (2-61) بالصيغة الآتية:

$$I = [eJ_{ng}(V = 0)] \left[1 - \exp\left(\frac{-eV}{k_B T}\right) \right]$$

$$+ [eJ_{pg}(V = 0)] \left[1 - \exp\left(\frac{-eV}{k_B T}\right) \right] \dots \dots \dots (2 - 62)$$

وباستخدام المعادلة (2-56) نحصل على علاقة بين (I) و (V) لانحياز معكوس:

$$I = I_0 \left[1 - \exp\left(\frac{-eV}{k_B T}\right) \right] \dots \dots \dots (2 - 63)$$

ولما كانت $(eV \gg k_B T)$ في الظروف الاعتيادية كان الحد الاسي في المعادلة (2-63) صغيرا جدا بحيث يمكن اهماله والتعبير عن التيار الكهربائي الكلي في مسألة انحياز معكوس بوساطة العلاقة البسيطة الآتية

$$I = I_0 \dots \dots \dots (2 - 64)$$

وفي الحقيقة. يمكن دمج المعادلتين (2-57) و (2-63) في معادلة منفردة هي:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] \dots \dots \dots (2 - 65)$$

حيث تعد (V) موجبة لانحياز أمامي وسالبة لانحياز معكوس. وعندما تكون قيمة (I) موجبة فان التيار يسري عبر الملتقى من المنطقة الموجبة الى المنطقة السالبة بينما تشير القيمة السالبة للتيار (I) الى جريانه في الاتجاه المعاكس. ونؤكد هذا مرة أخرى أن (I) تيار كهربائي ثابت القيمة ولا يعتمد على (V).

ان خلاصة ما تقدم تعني أن ملتقى p-n يعمل مثل مقوم للتيار الكهربائي، إذ قد يجري تيار كبير عند تسليط فرق جهد خارجي عبر الملتقى باتجاه ما ويجري تيار صغير جداً عند تسليط فرق جهد عبر الملتقى باتجاه معاكس لذلك الاتجاه. وبتعبير آخر عند تسليط فرق جهد متناوب عبر الملتقى سوف يجري التيار الكهربائي بصورة أساسية باتجاه واحد محدد وبذلك يكون الملتقى قد قوم التيار الكهربائي وهكذا يمكن تصميم جهاز من مادة شبه موصلة ذات ملتقى p-n ليعمل مثل مقوم للتيار (rectifier) أي مقوم ثنائي شبه موصل (diode) ولكنه يستهلك طاقة أقل مما يستهلكه صمام أيوني حراري.

تستخدم في الوقت الحاضر للأغراض العملية وبشكل واسع عناصر أشباه موصلات أكثر تعقيدا من ملتقى (p-n) ومن بين هذه العناصر الترانزستور (transistor) حيث يتألف من جزأين سالبين يفصلهما جزء موجب أو جزأين موجبين يفصلهما جزء سالب. وأخيراً، تؤكد ما ذكرناه في سابقاً. أنه يمكن الحصول عادة على ملتقيات p-n في صمامات ثنائية شبه موصلة وصمامات ثلاثية شبه موصلة خلال البلورة الاحادية (بلورة واحدة) نفسها.