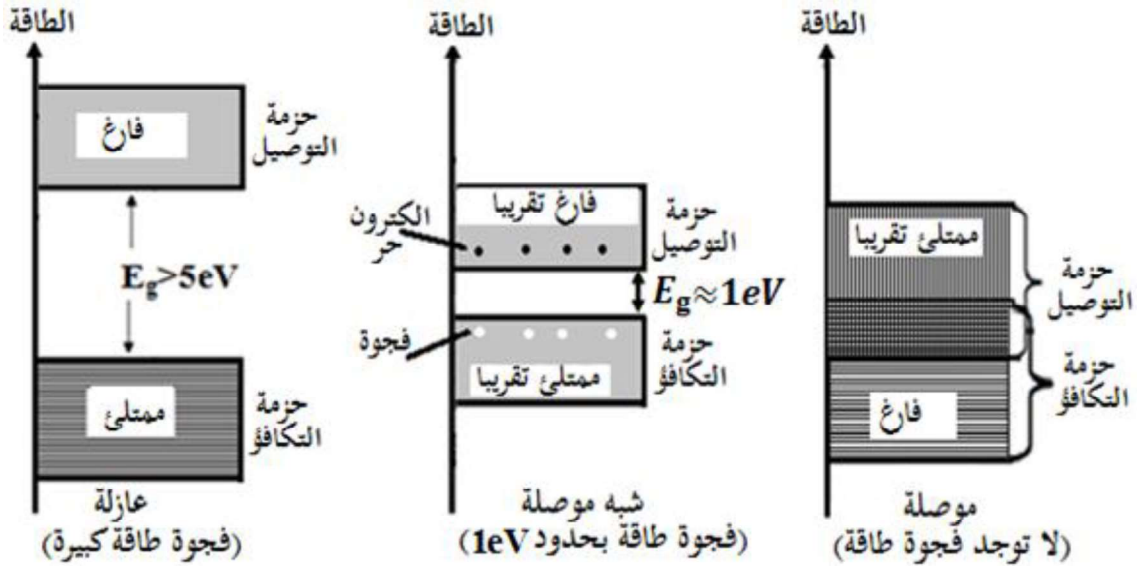
و لتسهيل المقارنة الشكل (١-١٨) يوضح حزم الطاقة للمواد العازلة، شبه الموصلة و الموصلة في درجة حرارة الغرفة.

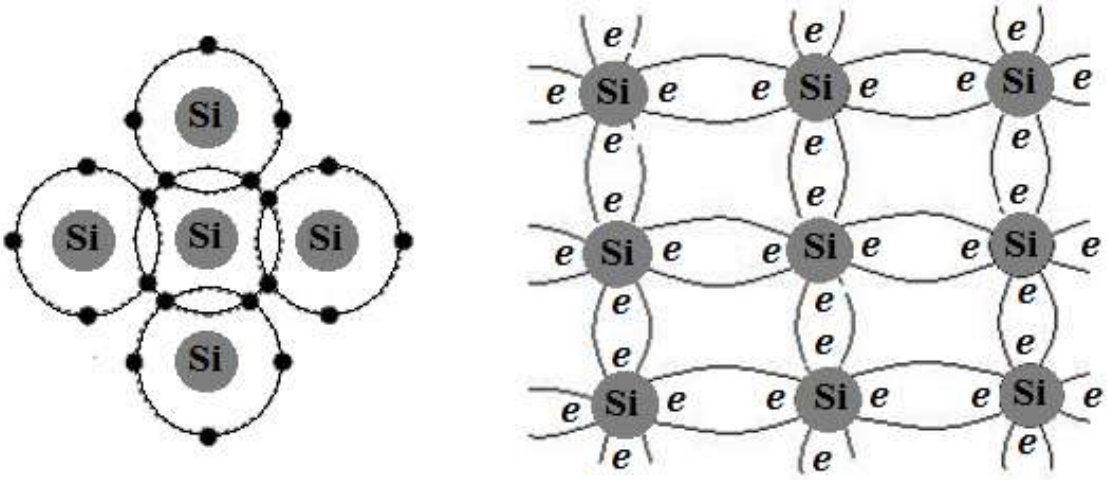


شكل (١-١٨) مقارنة بين مخططات حزم الطاقة للمواد: العازلة، شبه الموصلة و الموصلة في درجة حرارة الغرفة

٨.١ أشباه الموصلات النقية (Intrinsic Semiconductors):

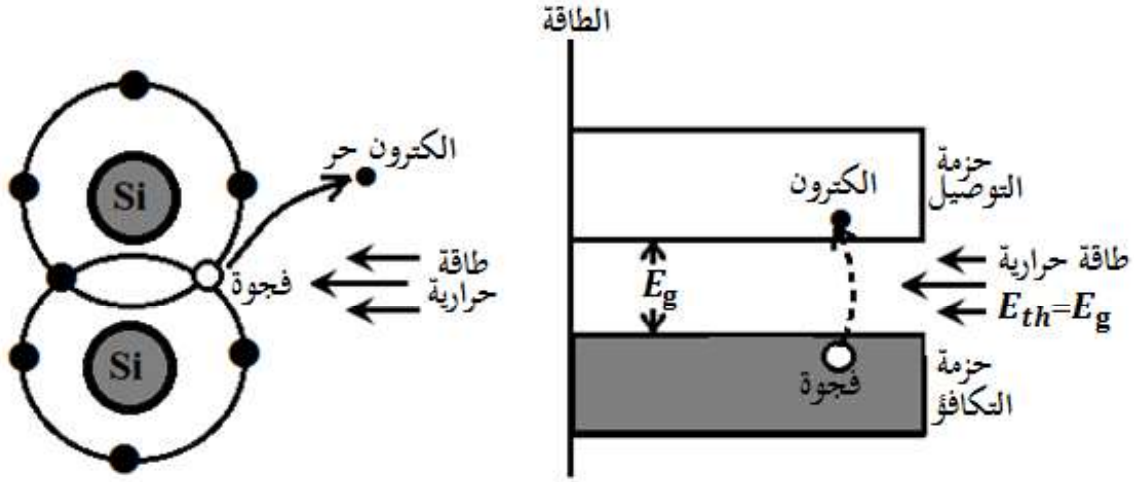
المواد شبه الموصلة النقية (Intrinsic semiconductor material) هي مواد شبه موصلة منقاه بعناية للتقليل من الشوائب والعيوب البلورية لأقصى حد ممكن ، ومن امثلتها السليكون النقي والجرمانيوم النقي. ان أشباه الموصلات هي مواد رباعية التكافؤ حيث يحتوي غلاف التكافؤ على أربعة الكترونات. عندما ترتبط ذرات شبه الموصل 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 (١-١٩).

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 ($-273^{o}C$).



شكل (١-١٩) تمثيل الأواصر التساهمية لبلورة السليكون

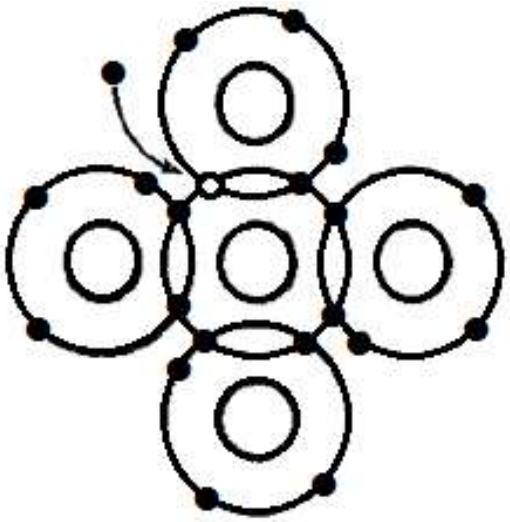
عند ارتفاع درجة الحرارة عن الصفر المطلق فأن بلورة شبه الموصل النقي تبدأ بالاهتزاز الميكانيكي ومتى ما كانت الطاقة الحرارية المكتسبة تساوي أو اكبر من فجوة الطاقة فأن الآصرة التساهمية تنكسر وينتج عن ذلك توليد الكترون حر Free electron وفجوة Hole (مكان الكترون فارغ) وتسمى هذه العملية عملية توليد زوج الكترون–فجوة (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 (١-٢٠).



شكل (١-٢٠) تمثيل لعملية تولد زوج الكترون–فجوة

ان الفجوة تتصرف كشحنة موجبة (positive charge) حيث ان فقدان الإلكترون من ذرة ما يولد أيون موجب، والفجوة المتولدة سوف تعمل على جذب واقتناص أي 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.

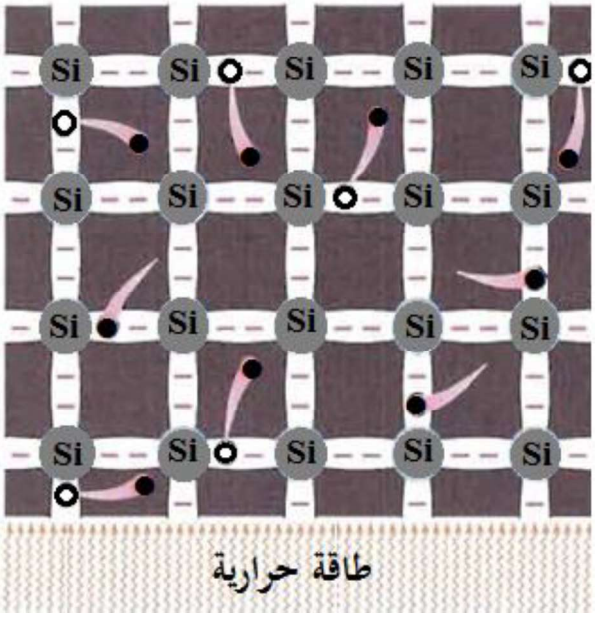
ان الطاقة الحرارية المكتسبة من قبل مادة شبه الموصل النقي ستولد عدد متساوي من الإلكترونات الحرة والفجوات. الإلكترونات الحرة المتولدة ستتحرك بصورة عشوائية داخل البلورة ونتيجة لذلك فان بعضاً من تلك الإلكترونات الحرة سوف تقترب من الفجوات وتصبح تحت تأثير جذبها الكهربائي وتلتحم معها وتدعى هذه العملية بإعادة الالتحام (Recombination) ونتيجة لذلك يختفي الإلكترون الحر والفجوة ويعاد تشكيل آصرة تساهمية كما موضح بالشكل (١-٢١).



شكل (١-٢١) مخطط لعملية إعادة الالتحام

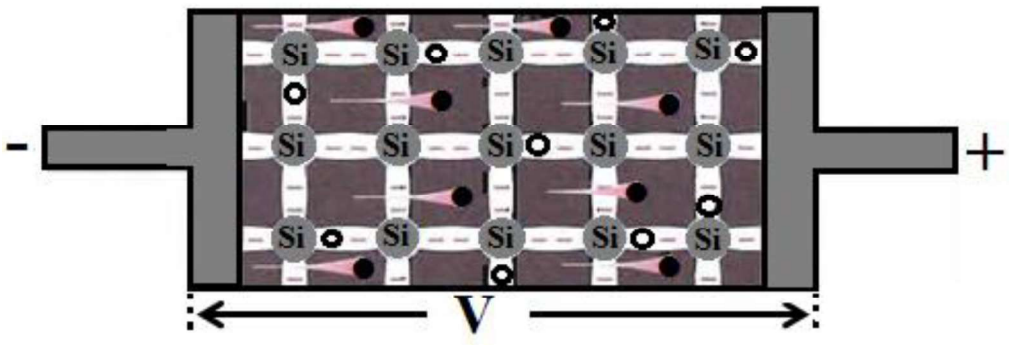
ان إعادة الالتحام تحصل في شبه الموصل لذلك فكل فجوة تملأ أخيراً بإلكترون حر إلا في حالة وجود ضخ مستمر لطاقة حرارية حيث تنتج باستمرار أزواج (الكترون–فجوة) جديدة. ان متوسط الزمن بين ولادة واختفاء زوج (الكترون–فجوة) يدعى زمن البقاء (Lifetime) وهو يتراوح عادة بين بضعة نانو ثانية (*nsec*) إلى عدة ملي ثانية(*msec*)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

الشكل (١-٢٢) 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.



شكل (١–٢٢) مخطط لعملية توليد مستمرة لأزواج الكترون–فجوة

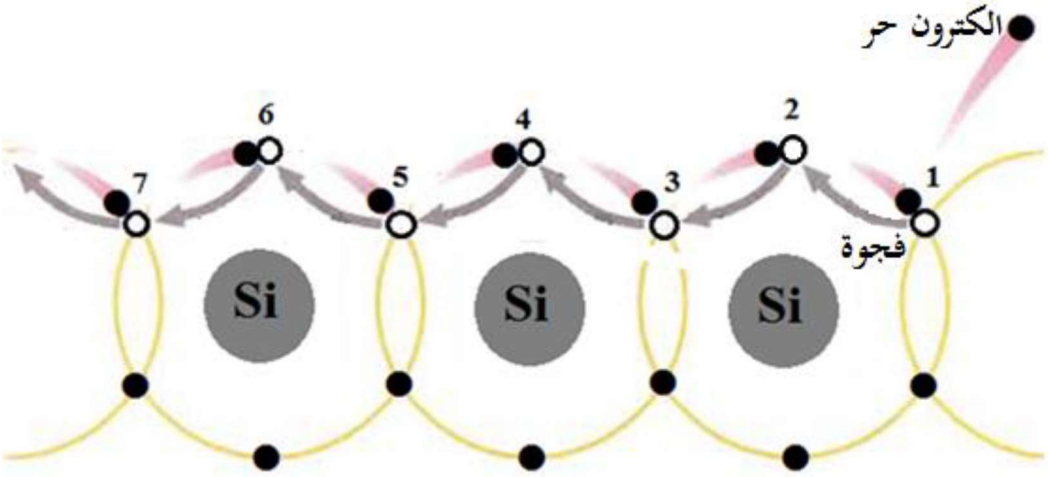
عند تسليط فرق جهد على طرفي شبه موصل نقي، يتولد نوعان من التيار داخلها، الأول هو من الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل المتولدة حرارياً والتي تتجه باتجاه معاكس لاتجاه المجال الكهربائي المسلط (باتجاه القطب الموجب للبطارية)، ويسمى التيار الناتج بتيار الإلكترون (*electron current*)، كما موضح بالشكل (١–٢٣).



شكل (١–٢٣) 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 (١-٢٤) يوضح حركة الكترون تكافؤ لليمين لملىء فجوة لليترك فجوة في مكانه والتي تملئ بإلكترون تكافؤي من ذرة مجاورة فيظهر وكأن الفجوة تحركت لليسار.



شكل (١-٢٤) 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 أي ان:

$$I = I_{electron} + I_{hole} \qquad (1-7)$$

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.

عند تسليط مجال كهربائي خارجي على بلورة شبه الموصل النقي تكتسب حاملات الشحنة (الإلكترونات الحرة والفجوات) طاقة إضافية تضاف إلى طاقتها الحرارية، ونتيجة لتأثير المجال الخارجي تتعجل حاملات الشحنة وتصل سرعتها بعد فترة إلى قيمة ثابتة تسمى سرعة الانجراف (drift velocity) تعطى بالعلاقة:

$$\left.\begin{aligned} v_e &= \mu_e E \\ v_h &= \mu_h E \end{aligned}\right\} \qquad (1-8)$$

حيث (v_e) و (v_h) هي سرعة الانجراف لكل من الإلكترونات الحرة والفجوات، E شدة المجال الخارجي المسلط، μ_e و μ_h هي حركية الإلكترون والفجوة على الترتيب وهي قيمة ثابتة تعتمد على طبيعة المادة.

من تعريف التيار الكهربائي (المعدل الزمني لانتقال الشحنة) لدينا:

$$\Delta I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \qquad (1-9)$$

من تعريف كثافة الشحنة الحجمية ρ (الشحنة لوحدة الحجوم) لدينا:

$$\rho = \frac{\Delta q}{\Delta V} \quad \Rightarrow \quad \Delta q = \rho \Delta V \quad , \quad \Delta V = \Delta S \Delta x$$

حيث ΔS هي مساحة المقطع العرضي التفاضلي، Δx هي الإزاحة التفاضلية التي قطعتها حاملات الشحنة، بالتعويض عن الشحنة في المعادلة (١-٩) نحصل على:

$$\Delta I = \rho \Delta S \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (1-10)$$

من تعريف الكثافة السطحية للتيار لدينا:

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta S}$$

بالاستفادة من المعادلة (١-١٠) يمكننا التعبير عن الكثافة السطحية للتيار بالصيغة:

$$J = \rho v \qquad (1-11)$$

حيث تمثل سرعة الانجراف، ρ الكثافة الشحنة الحجمية، من المعادلة الأخيرة يمكننا التعبير عن الكثافة السطحية للتيار الناشئ من كلا نوعي حاملات الشحنة بالصيغة:

$$J_e = \rho_e v_e$$

$$J_h = \rho_h v_h$$

ان الكثافة الشحنة الحجمية ρ (الشحنة الكلية لوحدة الحجم) يمكن التعبير عنها بدلالة حاصل ضرب شحنة الإلكترون q في الكثافة العددية n لحاملات الشحنة $(\rho = qn)$ وبالتعويض في العلاقتين الأخيرتين نحصل على:

$$\left.\begin{aligned} J_e &= qnv_e \\ J_h &= qpv_h \end{aligned}\right\} \qquad (1-12)$$

حيث تمثل n و p الكثافة العددية لكل من الإلكترونات الحرة والفجوات على الترتيب.

ان كثافة التيار السطحي الكلية المارة في مادة شبه الموصل النقي تكون عبارة عن مجموع تياري الإلكترونات الحرة والفجوات، أي ان:

$$J = J_e + J_h \qquad (1-13)$$

بالتعويض عن كثافة التيار للإلكترونات الحرة والفجوات التي تحصلنا عليها من المعادلة (1-12) في المعادلة (1-13) نحصل على:

$$J = q(nv_e + pv_h) \qquad (1-14)$$

بالتعويض عن سرعتي الانجراف للإلكترونات الحرة والفجوات التي تحصلنا عليها من المعادلة (1-8) في المعادلة الأخيرة نحصل على:

$$J = q(n\mu_e + p\mu_h)E \qquad (1-15)$$

في حالة شبه الموصل النقي فان لكل الكترون توصيل يتولد من عملية تكوين الكترون–فجوة يرافقه فجوة أي ان عدد الإلكترونات الحرة لوحدة الحجوم في شبه الموصل النقي يساوي عدد الفجوات لوحدة الحجوم أي ان:

$$n = p = n_i$$

حيث n_i تمثل عدد حاملات الشحنة لوحدة الحجوم في شبه الموصل النقي. من ذلك يمكننا كتابة العلاقة (1-15) بالصورة:

$$J = qn_i(\mu_e + \mu_h)E \qquad (1-16)$$

ينص قانون أوم (Ohm's Law) على ان النسبة بين كثافة التيار إلى شدة المجال الكهربائي هو مقدار ثابت ولا يعتمد على المجال المسبب لسريان التيار، لذا يعبر عن قانون أوم رياضيا بالصيغة:

$$J = \sigma E \qquad (1-17)$$

حيث σ مقدار ثابت يعتمد على طبيعة المادة ويسمى بالتوصيلية (conductivity).

بالمقارنة بين العلاقة (1-16) والعلاقة الواردة في قانون أوم (1-17) يمكننا استنتاج العلاقة التالية:

$$\sigma = qn_i(\mu_e + \mu_h) \qquad (1-18)$$

العلاقة الأخيرة تعطي التوصلية لمادة شبه الموصل النقي بدلالة كل من شحنة الإلكترون والكثافة العددية لحاملات الشحنة وحركية كل من الإلكترونات الحرة والفجوات.

ان الكثافة العددية لحاملات الشحنة في شبه الموصل النقي تعتمد بشكل كبير على درجة الحرارة وتعتمد كذلك على طبيعة المادة وتعطى بالعلاقة:

$$n_i = A_o T^3 e^{-(E_g/KT)} \qquad (1-19)$$

حيث A_o هو مقدار ثابت يعتمد على طبيعة المادة، T درجة الحرارة، K ثابت بولتزمان.

بالإضافة إلى التيار الانجراف الناتج عن تسليط مجال كهربائي خارجي فانه يمكن ان توجد هناك تيار آخر ناشئ عن اختلاف تركيز حاملات الشحنة في مادة شبه الموصل يسمى تيار الانتشار (Diffusion Current)، هذا النوع من التيار لا يوجد في المواد الموصلة وحدوثه في مواد أشباه الموصلات ناتج لعدم انتظام كثافة حاملات الشحنة في مادة شبه الموصل، ان كثافة التيار الانتشار يتناسب طردياً مع انحدار التركيز في مادة شبه الموصل، ففي حالة شبه الموصل من النوع السالب يمكن التعبير عن كثافة تيار الانتشار J_{Dn} بالصيغة:

$$J_{Dn} = qD_n \frac{dn}{dx} \qquad (1-20)$$

حيث D_n هو مقدار ثابت يسمى معامل الانتشار ويعطى بعلاقة آينشتاين $\left(D_n = \frac{KT}{q}\mu_e\right)$.

اما كثافة تيار الفجوات الناتجة عن انتشار الفجوات فتتناسب طردياً مع انحدار تركيز الفجوات في مادة شبه الموصل الموجب وتعطى بالعلاقة:

$$J_{Dp} = -eD_p \frac{dp}{dx} \qquad (1-22)$$

حيث هو معامل انتشار الفجوات ويعطى بعلاقة آينشتاين $\left(D_p = \frac{KT}{q}\mu_h\right)$.

في حالة تسليط مجال كهربائي على مادة شبه موصلة فان التيار الناشئ سيكون عبارة عن مجموع تيار الانجراف وتيار الانتشار لكل من الإلكترونات الحرة والفجوات، يمكننا التعبير عن التيار الناشئ عن حركة الإلكترونات الحرة في شبه الموصل بالصيغة:

$$J_n = qn_i\mu_e E + qD_n \frac{dn}{dx} \qquad (1-23)$$

وبنفس الطريقة يمكننا التعبير عن التيار الناشئ عن حركة الفجوات بالصيغة: