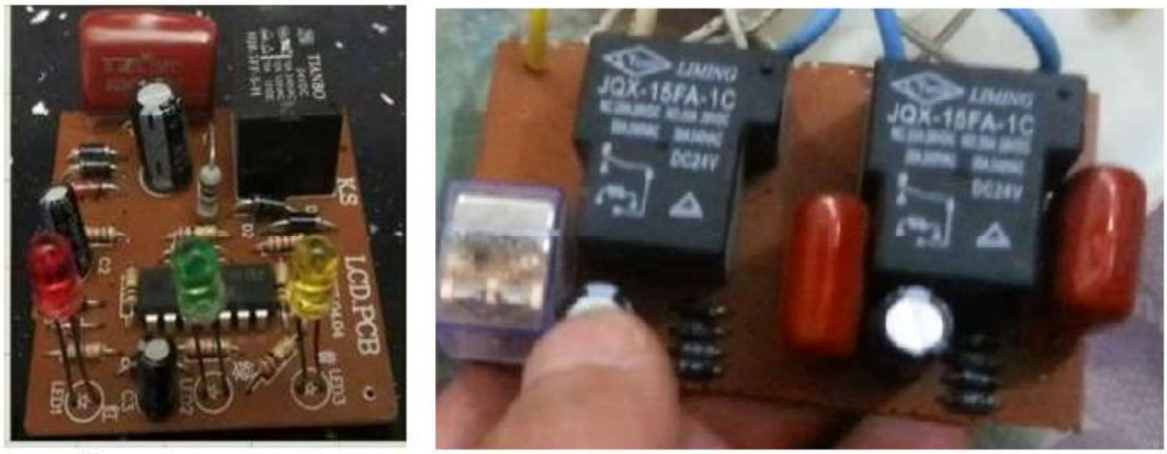
ان قطعة مفردة من شبه موصل النوع السالب تعتبر قليلة الفائدة من الناحية العملية إذ انها تعتبر في الظروف الاعتيادية مادة ذات مقاومة متوسطة وبالإمكان الحصول على مادة ذات قيمة مقاومة مقاربة بطريقة اسهل وتكلفة اقل (مثل المقاومة الكربونية)، ونفس الكلام ينطبق على قطعة من مادة شبه موصل موجب، ولكن عند قيام المُصنع بتطعيم بلورة شبه موصل نقي بحيث يكون نصفها شبه موصل سالب ونصفها الآخر شبه موصل من النوع الموجب تنتج نبيطة مختلفة تماماً ولها أهمية بالغة وهذا ما سنتناوله في هذا الفصل.

للثنائي شبه الموصل أهمية كبيرة في التطبيقات العملية فاغلب التطبيقات العملية لا تستغني عن احد أنواع الثنائيات، الشكل (٢-١) صورة لدائرتين الكترونيتين شائعة الاستعمال وهما جهاز الحماية الإلكترونية للأجهزة الإلكترونية والثاني هو جهاز المبدل الإلكتروني (change over) والذي يعرف بالجنج وفر، حيث يلاحظ استعمال ثنائي أشباه الموصلات في كلا الجهازين.



جهاز الحماية للاجهزة الالكترونية

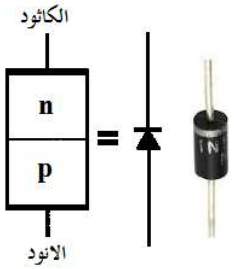
جهاز المبدل الالكتروني (جنج اوفر)

شكل (٢-١) جهاز المبدل الإلكتروني وجهاز الحماية للأجهزة الإلكترونية

٢.١ تكوين وصلة pn (pn-Junction):

عند تطعيم مادة شبه موصل نقي (سليكون أو جرمانيوم) في احد جوانبها بشوائب ثلاثية التكافؤ (شبه موصل من النوع الموجب p-type) والجانب الآخر بشوائب خماسية التكافؤ (شبه موصل من النوع السالب n-type) نحصل على تركيب يسمى ثنائي الوصلة أو الدايود (Diode والذي يمثل مختصر لعبارة two electrode حيث Di بادئة تعني ثُنائي والمقطع ode هو مختصر electrode الذي يعني قطب) وتسمى منطقة التقاء شبه الموصل من النوع P و N بالوصلة (Junction).

الشكل (٢-٢) يمثل رمز ثنائي أشباه الموصلات، حيث تسمى الجهة p من الثنائي بالانود (Anode) والجهة n تسمى بالكاثود (Cathode)، ويلاحظ ان الرمز يشبه سهم يؤشر من جهة p إلى جهة n (أي باتجاه التيار الاصطلاحي والذي يكون عكس اتجاه حركة الالكترونات).

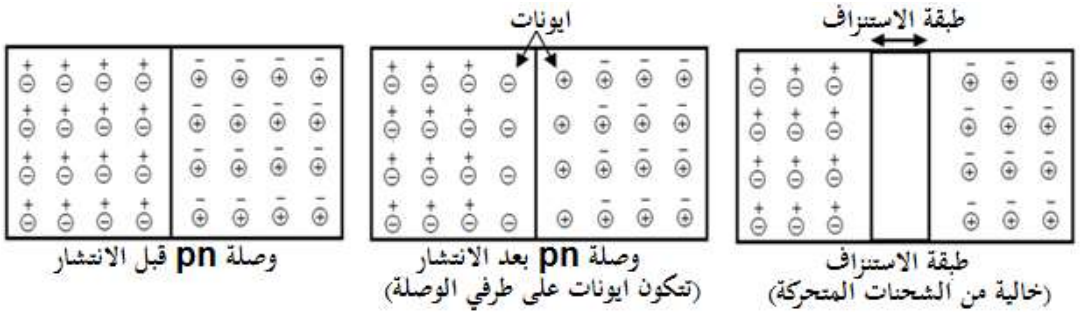


شكل (٢-٢) رمز ثنائي أشباه الموصلات

ان عدد الإلكترونات الحرة الناتجة من عملية التطعيم في جهة N تكون اكبر بكثير من عدد الإلكترونات الحرة الناتجة من عمليات توليد زوج (الكترون–فجوة) في جهة P كما هو موضح بالشكل (٢-٣)، ونتيجة لهذا الاختلاف في تركيز الإلكترونات الحرة تنتقل الإلكترونات الحرة من جهة N إلى جهة P عبر الوصلة. ان الإلكترون الذي يعبر الوصلة إلى منطقة P سيكون محاطاً بعدد كبير من الفجوات وبالتالي يكون زمن بقائه قصير جداً فسرعان ما يسقط في فجوة ويتحول إلى الكترون تكافؤ ، والذرة التي اقتنصته (ثلاثية التكافؤ) تتحول إلى أيون سالب بينما الذرة (خماسية التكافؤ) التي قدم منها (في جهة N) تتحول إلى أيون موجب.

في كل مرة ينتشر الكترون ما عبر الوصلة ينتج زوجاً من الأيونات (على طرفي الوصلة) والتي تكون ثابتة في التركيب البلوري بسبب الربط التساهمي وهي بذلك لا تستطيع التحرك كما تفعل الإلكترونات الحرة أو الفجوات. ان كل زوج متكون من أيون موجب وسالب يدعى ثنائي قطب (dipole) ووجود ثنائي قطب يعني ان الكترون واحد من الكترونات حزمة التوصيل وفجوة واحدة قد توقفا عن التحرك وبتزايد أعداد ثنائي القطب تُخلى المنطقة المتاخمة للوصلة من الشحنات المتحركة وتدعى تلك المنطقة الخالية من الشحنات المتحركة بطبقة الاستنزاف (Depletion Layer).

الشكل (٢-٣) يوضح وصلة pn لحظة التطعيم (قبل الانتشار) وكذلك الوصلة بعد الانتشار وتكوين طبقة الاستنزاف، للتبسيط لم تؤخذ حاملات الشحنة الأقلية في الجهتين (الفجوات في جهة N والإلكترونات في الجهة P) بنظر الاعتبار وسوف يتم دراسة تأثيرها لاحقاً.

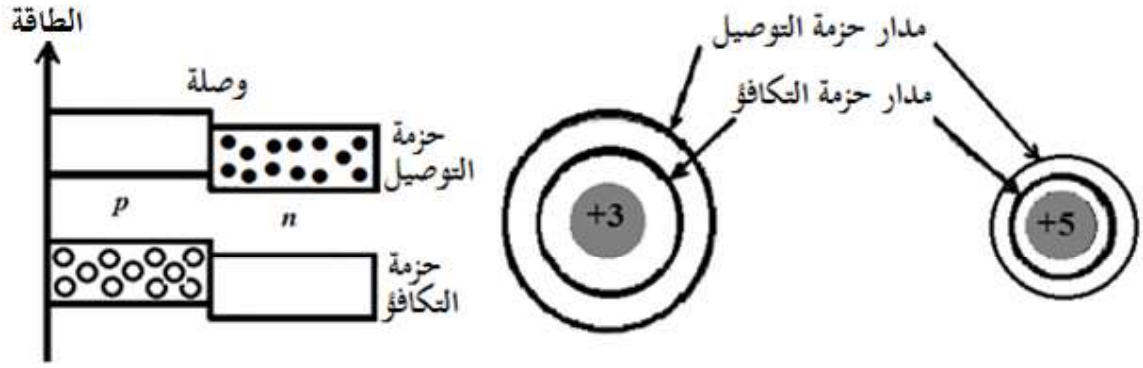


شكل (٢-٣) مخطط لوصلة pn قبل وبعد الانتشار وتكوين طبقة الاستنزاف

٢.٢ مخطط حزم الطاقة لوصلة pn

لفهم اكثر لعمل وصلة pn وبالتالي ثنائي أشباه الموصلات لابد من دراسة مخطط حزم الطاقة للوصلة قبل وبعد الانتشار وهذا بدوره يمهد لفهم عمل نبائط اكثر تقدماً (مثل الترانزستور).

الشكل (٢-٤) يوضح مستويات الطاقة لوصلة فجائية (وهي تلك الوصلة التي تتغير فجأة من مادة p إلى مادة n) ، حيث تحتوي حزمة التكافؤ في جهة p على العديد من الفجوات بينما تحتوي الجهة n على العديد من الإلكترونات الحرة، يلاحظ ان حزم طاقة جهة p اعلى قليلاً من مستويات الطاقة لجهة n، ويمكن تفسير ذلك للاختلاف في خصائص الشوائب المضافة لكل جهة، فالجهة p فيها ذرات ثلاثية التكافؤ لها شحنة قلب (core) مقدارها (+3) بينما الجهة n فيها ذرات خماسية التكافؤ ولها شحنة قلب مقدارها (+5)، ان قلب شحنته (+3) يجذب الكتروناً ما اقل مما يجذبه قلب آخر شحنته (+5) ولهذا السبب فان المدارات في الذرة ثلاثية التكافؤ (جهة p) تكون اكبر بقليل من مدارات الذرة خماسية التكافؤ (جهة n) كما هو موضح في الشكل المقابل لمخطط الحزم، ولهذا السبب تكون حزم الطاقة في جهة p اعلى بقليل (طاقة اكبر ونصف قطر اكبر) من حزمة جهة n .

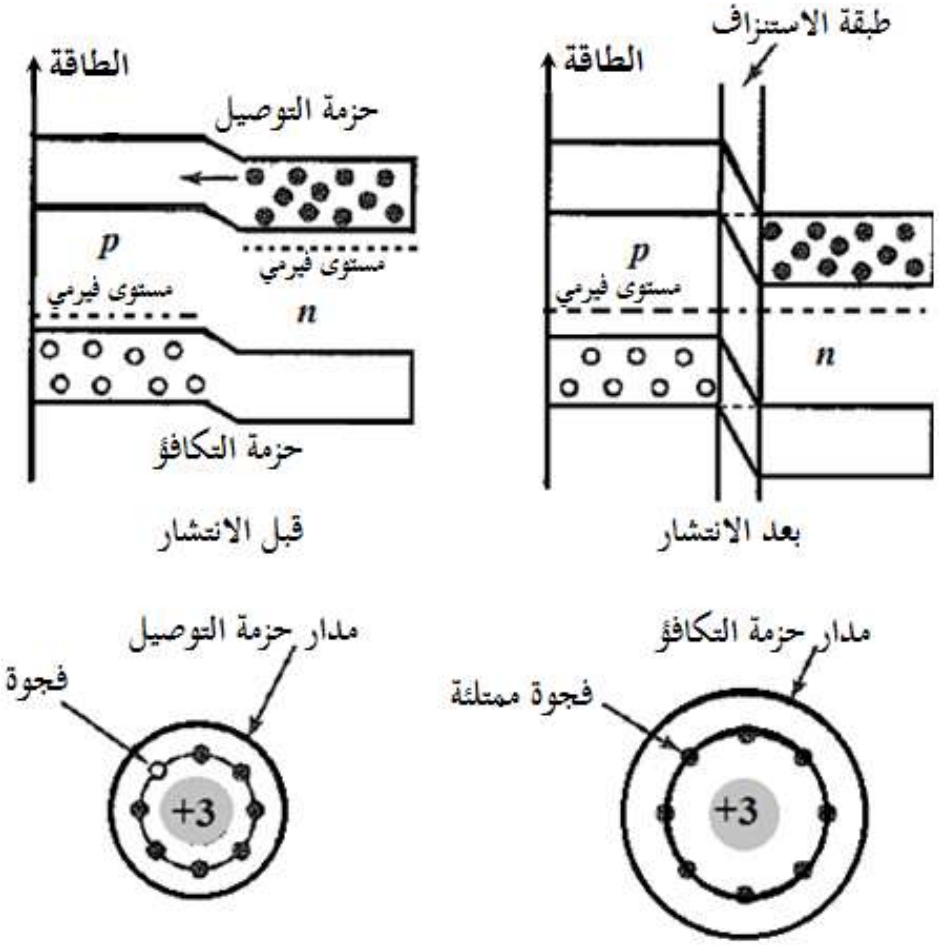


شكل (٢-٤) مخطط مستويات الطاقة لوصلة فجائية

ان الوصلة الفجائية هي شيء مثالي لان جهة p لا تنتهي تماماً عندما تبدأ جهة n ، فالوصلة العملية لابد ان يكون هناك نوع من التغير التدريجي في منطقة الاتصال بين الجهتين وكما هو موضح بالشكل التالي و الذي يوضح مخطط حزم الطاقة قبل الانتشار وبعد الاتزان لوصلة pn.

ان انتقال الإلكترونات الموجودة في اعلى حزمة التوصيل في منطقة n إلى منطقة p تؤدي إلى تغيير مستويات الطاقة في منطقة الوصلة، حيث نلاحظ من الشكل (٢-٥) ان حزم الطاقة لمنطقة p قد تحركت إلى الأعلى نسبة إلى حزم طاقة منطقة n بحيث اصبح قعر كل حزمة من جهة p على مستوى اعلى من قمة مستوى الطاقة المقابل له من حزمة جهة n وهذا يعني ان الإلكترونات الموجودة في جهة n لم تعد لها الطاقة الكافية لكي تعبر الوصلة، ويمكن تفسير ذلك على النحو التالي:

عندما يعبر الكترون ما الوصلة يملئ فجوة احدى الذرات ثلاثية التكافؤ، وهذا الإلكترون الإضافي يرفع مدار (Orbit) حزمة التوصيل بعيداً عن الذرة ثلاثية التكافؤ (كما هو موضح بالشكل اسفل مخطط حزم الطاقة) ولذلك فان أي الكترون آخر يأتي إلى منطقة p يحتاج إلى طاقة اكبر من السابق ليدخل إلى مدار نطاق التوصيل.



شكل (٢-٥) مخطط حزم الطاقة لوصلة pn قبل وبعد الانتشار

بعد الاتزان لا يمتلك أي الكترون من جهة n طاقة كافية لعبور الوصلة، ويمكن تشبيه الطريق الذي يسلكه الإلكترون للانتقال من جهة n إلى p كعبور تل ، وبتعبير آخر الإلكترون الذي يريد الانتقال عبر الوصلة عليه ان يتغلب على تل طاقة (energy hill) المتولد على طرفي الوصلة، ولا يمكن للإلكترون ان يتسلق ذلك التل ما لم يستلم طاقة من مصدر خارجي، والذي يمكن ان يكون مصدر جهد، حرارة و ضوء .

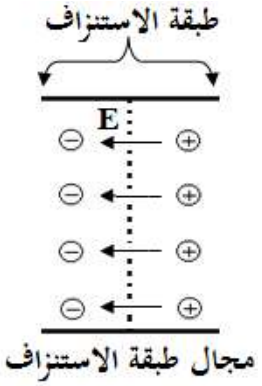
يلاحظ من الشكل (٢-٥) أيضا انه وبسبب ارتفاع حزم طاقة جهة p بالمقارنة من حزم طاقة جهة n فان مستوى فيرمي يتخذ موضعه على شكل خط مستوى طاقة واحد للجهتين وذلك بعد الوصول إلى حالة الاتزان.

٣.٢ جهد الحاجز (Barrier Potential) وحسابه

نظراً لاختلاف تراكيز حاملات الشحنة على طرفي وصلة الثنائي حيث يلاحظ ان تركيز الالكترونات الحرة والتي تمثل حاملات الشحنة الأكثرية (الناتجة من التطعيم وعمليات توليد أزواج الكترون–فجوة) في جهة (n) ستكون اكثر بكثير من تركيز الالكترونات الحرة (الناتجة من عمليات توليد أزواج الكترون–فجوة) في جهة (p)، وبصورة مشابهة يكون تركيز الفجوات في (p) يكون اكثر بكثير من تركيز الفجوات في جهة (n) وكما هو موضح بالشكل (٢–٦)، ونتيجة لاختلاف تراكيز حاملات الشحنة على طرفي الوصلة سيحدث انتشار لحاملات الشحنة على طرفي الوصلة، فيتولد نتيجة لذلك تيار الانتشار.

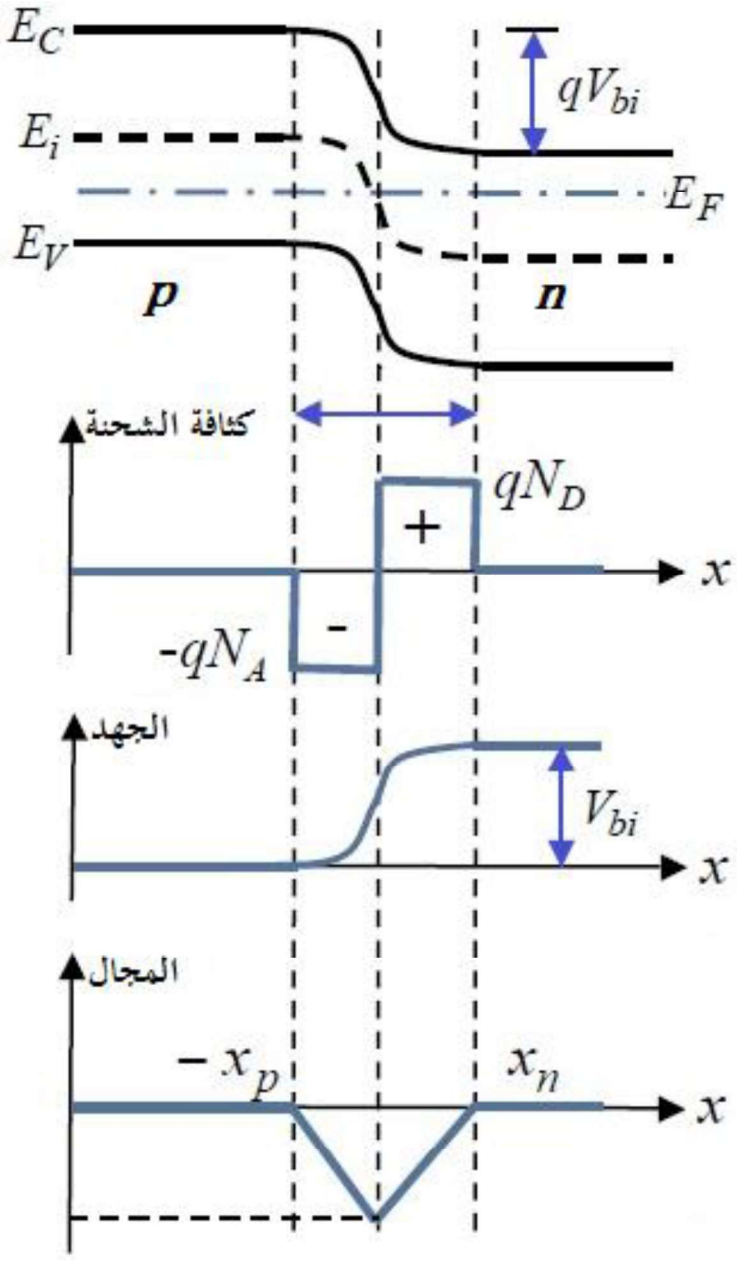
شكل (٢–٦) اختلاف تراكيز حاملات الشحنة على طرفي الوصلة

نتيجة لانتشار حاملات الشحنة على طرفي يتولد مجال كهربائي يعاكس اتجاه حركة الإلكترونات، ويزداد ذلك المجال بزيادة عدد الانتقالات إلى ان تصبح قيمة المجال من الكبر بحيث تمنع انتقال أي الكترونات إضافية عبر الوصلة فيحدث الاتزان وكما هو موضح بالشكل (٢–٧).



شكل (٢–٧) مخطط لمجال طبقة الاستنزاف

ان انتقال حاملات الشحنة على طرفي الوصلة يؤدي إلى تولد جهد كهربائي يعمل على إعاقة انتقال المزيد من حاملات الشحنة وباستمرار عمليات الانتقال يزداد الجهد تدريجيا إلى يصل إلى قيمة معينة عند الاتزان تمنع انتقال أية حاملات شحنة إضافية عندها يدعى ذلك الجهد بجهد الحاجز (*Barrier Potential*) ويرمز له بالرمز (V_{bi}) ، وسمي بجهد الحاجز لكونه يمثل حاجزا لأي انتقال لحاملات الشحنة عبر الوصلة، ولكي ينتقل أي الكترون إضافي عليه ان يتغلب على ذلك الحاجز كما هو موضح بالشكل (٢-٨) يوضح مخطط حزم الطاقة وتراكيز حاملات الشحنة والمجال والجهد لوصلة شبه الموصل.



شكل (٢-٨) مخطط حزم الطاقة وتراكيز حاملات الشحنة والمجال والجهد لوصلة شبه الموصل

لحساب مقدار جهد الحاجز علينا أولا إيجاد التيارات الناتجة عن حركة حاملات الشحنة عبر الوصلة بعدها يمكننا إيجاد قيمة الجهد الذي سيتمكن من إيقاف أية انتقالات إضافية (التيار يساوي صفر) وكما يلي:

هناك نوعان من التيارات التي يمكن ان تسري عبر الصلة، الأول تيار انتشار ناتج عن اختلاف التراكيز لحاملات الشحنة على جهتي الوصلة والثاني تيار توصيل ناتج عن تأثير المجال الكهربائي الناشئ في طبقة الاستنزاف، وفيما يلي حساب كل منها:

أولاً: حساب تيار الانتشار

ان كثافة تيار الانتشار الناتجة نسبب اختلاف تراكيز الالكترونات الحرة على طرفي الوصلة (J_{De}) تعطى بالصيغة:

$$J_{De} = qD_e \frac{dn}{dx} \qquad (2-1)$$

حيث μ_e هو معامل الانتشار للإلكترونات الحرة $\left(D_e = \frac{KT}{q}\mu_e\right)$.

اما كثافة تيار الانتشار الناتجة نسبب اختلاف تراكيز الفجوة على طرفي الوصلة (J_{Dh}) تعطى بالصيغة:

$$J_{Dh} = -qD_h \frac{dp}{dx} \qquad (2-2)$$

حيث μ_h هو معامل الانتشار للإلكترونات الحرة $\left(D_h = \frac{KT}{q}\mu_h\right)$. والإشارة السالبة في العلاقة للدلالة على ان اتجاه حركة الفجوات هو بعكس اتجاه حركة الإلكترونات الحرة.

من العلاقتين (1-2) و (2-2) يمكننا التعبير عن تيار الانتشار الكلي المار عبر الوصلة بالصيغة:

$$J_D = q\left(D_e \frac{dn}{dx} - D_h \frac{dp}{dx}\right) \qquad (2-3)$$

ثانياً: حساب تيار التوصيل

ينشئ تيار التوصيل نتيجة تأثير المجال الكهربائي الناتج من عمليات الانتشار، حيث يعمل المجال في طبقة الاستنزاف على تحريك حاملات الشحنة الأقلية (الالكترونات الحرة في جهة p والفجوات في جهة n) على طرفي الوصلة، لذا يكون تيار التوصيل على نوعين وهما:

كثافة تيار توصيل الالكترونات الحرة (J_{Ce}) ويعطى بالعلاقة:

$$J_{Ce} = \sigma_e E = qn\mu_e E \qquad (2-4)$$

اما كثافة تيار توصيل الفجوات (J_{Ch}) ويعطى بالعلاقة:

$$J_{Ch} = \sigma_h E = qp\mu_h E \qquad (2-5)$$

من العلاقتين (2-4) و (2-5) يمكننا التعبير عن تيار التوصيل الكلي المار عبر الوصلة بالصيغة:

$$J_C = q(n\mu_e + p\mu_h)E \qquad (2-6)$$

ان كثافة التيار الناتج عن حركة الإلكترونات الحرة عبر الوصلة سيكون عبارة عن تيار الانتشار للإلكترونات الحرة وتيار التوصيل للإلكترونات والتي يمكن التعبير عنها بالاستفادة من العلاقتين (2-1) و (2-4) بالصيغة التالية:

$$J_e = J_{De} + J_{Ce} = qD_e \frac{dn}{dx} + qn\mu_e E \qquad (2-7)$$

اما كثافة التيار الناتج عن حركة الفجوات عبر الوصلة سيكون عبارة عن تيار الانتشار للفجوات وتيار التوصيل للفجوات والتي يمكن التعبير عنها بالاستفادة من العلاقتين (2-2) و (2-5) بالصيغة التالية:

$$J_h = J_{Dh} + J_{Ch} = -qD_h \frac{dp}{dx} + qp\mu_h E \qquad (2-8)$$

ان كثافة التيار الكلي المارة عبر الوصلة فتكون عبارة عن مجموع تيار الانتشار والتوصيل للإلكترونات الحرة والفجوات والتي يمكن التعبير عنها بالعلاقة:

$$\mathrm{J} = J_e + J_h \qquad (2-9)$$

في حالة الاتزان وبسبب تكون جهد الحاجز يتوقف سريان التيار عبر الوصلة، وهذا يتطلب ان يكون تيار الالكترونات الحرة مساوياً للصفر وكذلك تيار الفجوات.

بالاستفادة من العلاقة (2-7) يمكننا التعبير عن تيار الالكترونات الحرة في حالة الاتزان بالصيغة:

$$qD_e \frac{dn}{dx} + qn\mu_e E = 0 \qquad (2-10)$$

العلاقة الأخيرة يمكن كتابتها بالصيغة:

$$\frac{dn}{n} = -\frac{\mu_e}{D_e} E dx \qquad (2-11)$$

من علاقة أينشتاين (Einstein relation) في الانتشار لدينا:

$$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{D_h}{\mu_h} = \frac{KT}{q} \qquad (2-12)$$

حيث K هو ثابت بولتزمان ، T درجة الحرارة بالكلفن، q شحنة الإلكترون.

بالتعويض عن $\left(\frac{\mu_e}{D_e}\right)$ من المعادلة (2−12) في المعادلة (2−11) نحصل على:

$$\frac{dn}{n} = -\frac{q}{KT}Edx \qquad (2-13)$$

بتكامل طرفي المعادلة الأخيرة نحصل على:

$$\int_{n_p}^{n_n}\frac{dn}{n} = \frac{q}{KT}\left(\int_{x_n}^{x_p} -Edx\right) \qquad (2-14)$$

حيث تمثل n_n تركيز الالكترونات الحرة في جهة n بينما تمثل n_p تركيز الالكترونات الحرة في جهة p، اما x_n و x_p فتمثل حدود منطقة الاستنزاف.

يرتبط الجهد الكهربائي بالمجال الكهربائي بالعلاقة $\left(V = \int_{x_n}^{x_p} -Edx\right)$ وهو في حالتنا جهد الحاجز (V_{bi}) وبالتعويض في العلاقة (2−14) وحل التكامل نحصل على:

$$\ln\frac{n_n}{n_p} = \frac{q}{KT}V_{bi} \qquad (2-15)$$

بأخذ اللوغاريتم الطبيعي للطرفي وترتيب الحدود نحصل على:

$$n_n = n_p e^{\left(\frac{qV_{bi}}{KT}\right)} \qquad (2-16)$$

العلاقة الأخيرة تعطي تركيز الإلكترونات الحرة (n_n) عند حافة طبقة الاستنزاف في منطقة (n) في حالة الاتزان بدلالة تركيز الالكترونات الحرة $\left(n_p\right)$ عند حافة طبقة (p) وكذلك درجة الحرارة (T) و جهد الحاجز (V_{bi}).

بنفس الطريقة يمكننا وبالاستفادة من (2−8) الحصول على العلاقة الخاصة بتركيز الفجوات بالصيغة:

$$p_p = p_n e^{\left(\frac{qV_{bi}}{KT}\right)} \qquad (2-17)$$

المعادلتان (2−16) و (2−17) تعرفان بعلاقة بولتزمان (Boltzmann relation).

من المعادلة (2−15) يمكننا التعبير عن جهد الحاجز بالصيغة:

$$V_{bi} = \frac{KT}{q}\ln\frac{n_n}{n_p} \qquad (2-18)$$

ان تركيز الالكترونات n_n على حافة طبقة الاستنزاف في جهة n يساوي تركيز الشوائب الواهبة المضافة $(n_n = N_D)$ ، اما تركيز الالكترونات الحرة n_p على حافة طبقة الاستنزاف في جهة p فيمكن إيجادها بالاستفادة من العلاقة $(pn = n_i^2)$ حيث تمثل p تركيز الفجوات في جهة p الناتجة من عملية التطعيم بالذرات القابلة $(p = N_A)$ بينما تمثل n تركيز الالكترونات الحرة في جهة p والتي هي نفسها n_p أي ان $(N_A n_P = n_i^2)$ ومنه نجد ان $(n_p = n_i^2/N_A)$ وبالتعويض في العلاقة (2-18) بالصيغة:

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \qquad (2-19)$$

المعادلة الأخيرة تعطي قيمة جهد الحاجز (V_{bi}) لوصلة شبه الموصل في حالة الاتزان.

حيث N_A تركيز القابلات (عدد ذرات الشائبة الثلاثية المضافة لوحدة الحجوم).

N_D تركيز الواهبات (عدد ذرات الشائبة الخماسية المضافة لوحدة الحجوم).

n_i تركيز حاملات الشحنة في شبه الموصل النقي عند درجة الحرارة المعنية.

T درجة الحرارة بالكلفن، K ثابت بولتزمان، q شحنة الإلكترون.

يلاحظ من المعادلة الأخيرة ان مقدار جهد الحاجز يعتمد على تركيز حاملات الشحنة في شبه الموصل النقي (n_i) الناتجة من عمليات توليد أزواج الكترون–فجوة والذي بدوره يعتمد على كل من طبيعة شبه الموصل النقي (السليكون أو الجرمانيوم) ودرجة الحرارة ، وكذلك تعتمد على نسب الأشابة N_A لجهة p و نسبة الأشابة N_D لجهة n وهي قيم تتحدد في لحظة تصنيع ثنائي شبه الموصل.

جهد الحاجز في درجة حرارة الغرفة تكون بحدود (0.7V) للوصلة المصنوعة من السليكون بينما تكون بحدود (0.3V) للوصلة المصنوعة من الجرمانيوم.

مثال (٢-١): احسب قيمة جهد الحاجز لوصلة شبه موصل مصنوعة مادة السليكون عند درجة حرارة الغرفة، علماً بان تركيز حاملات الشحنة كانت $(N_a=10^{18}cm^{-3})$ ، $(N_d=10^{15}cm^{-3})$ و $(n_i=1.45X10^{10}cm^{-3})$.

الحل: من معطيات المسألة لدينا:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \quad , T = 300K, q = 1.6\times10^{-19}C, k = 1.38\times10^{-23}J/K$$