الفصل الثاني

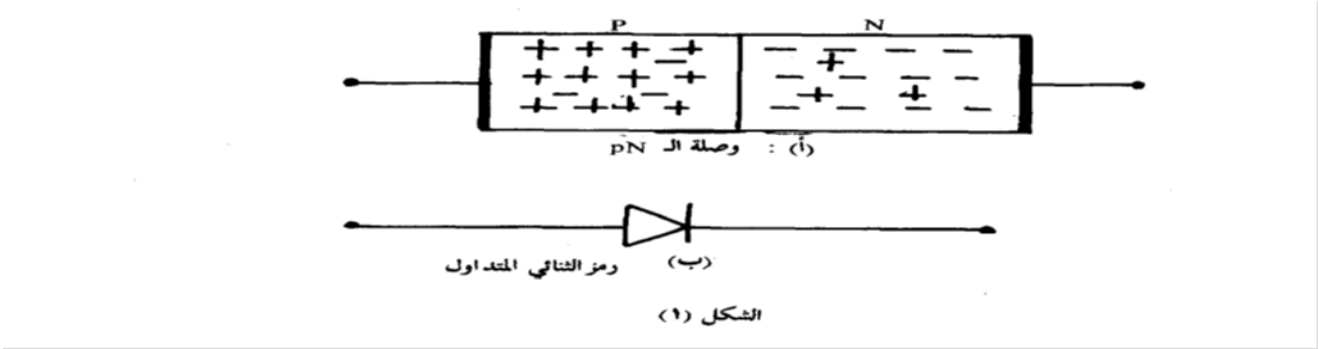
المقدمة:

رأينا في ما سبق ان بالإمكان الحصول على مادة شبه موصلة من نوع موجب (P – type) او من نوع سالب (N – type) عن طريق ادخال مادة شائبة ثلاثية التكافؤ او خماسية التكافؤ الى مادة شبه موصلة نقية وعلى التوالي . وعلى الرغم من ان كلا النوعين ، من اشباه الموصلات ، يحتوي على حاملات الشحنة الاكثرية (التي يعتمد عددها على تركيز الذرات الشائبة الداخلة) وكذلك على حاملات الشحنة الاقلية (التي تنتج حرارياً وبالتالي يعتمد عددها على درجة حرارة المادة) الا ان هذه المواد ليست بذات اهمية عملية عند استعمالها ، في الدوائر الالكترونية ، بصورة منفردة .

من جهة اخرى يمثل ثنائي الوصلة PN واحداً من اهم المكونات الالكترونية ويمكن لهذا الثنائي ان يقوم بعمل الصمام الثنائي المفرغ ويمتاز عليه في كثير من النواحي التي ستذكر لاحقاً .

وصلة او مفرق PN: الثنائي البلوري (PN Junction: Crystal Diode)

يتم الحصول على ثنائي الوصلة PN عند جمع (combine) النوعين، السالب والموجب من شبه الموصل الى بعضهما. ويتم هذا الجمع بتصنيع الثنائي على بلورة واحدة من مادة شبه موصلة بحيث يصبح احد نصفيها سالب والاخر موجب وذلك عن طريق ادخال المادة الشائبة المناسبة الى نصفي البلورة. وتدعى البلورة عندئذ بالبلورة الثنائية او الثنائي البلوري وقد اشتهر استعمال نوعين من الثنائيات البلورية هما ثنائي السليكون وثنائي الجرمانيوم. والشكل (1) يوضح شكل ورمز الثنائي البلوري.



شكل (1) تركيب ورمز الوصلة الثنائية PN

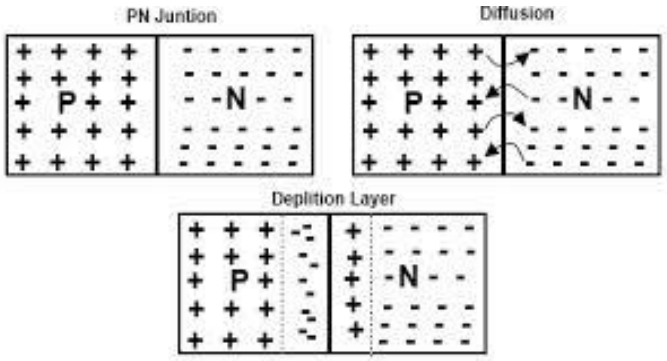
- **منطقة الاستنزاف Depletion region**

عند جمع نصفي الوصلة PN، وبسبب ان تركيز حاملات الشحنة (الالكترونات في النوع السالب والفجوات في النوع الموجب) هو اكبر بكثير مما هو في النوع الاخر اي وجود انحدار في تركيز الالكترونات في المنطقة السالبة وكذلك انحدار في تركيز الفجوات في المنطقة الموجبة, ذلك سيؤدي الى انتقال او انتشار بعض الالكترونات الى المنطقة الموجبة عبر الوصلة وكذلك انتقال بعض الفجوات الى المنطقة السالبة.

ان عبور الالكترونات الى المنطقة (P) سوف يجعل منه حاملاً اقليا وبوجود الاعداد الكبيرة من الفجوات حوله يكون زمن بقائه قصيراً فحال دخوله المنطقة (P) يسقط في فجوة وعندما يتم هذا فان الفجوة تختفي ويصبح الالكترون الحر الكتروناً تكافؤياً, كذلك هو الحال بالنسبة للفجوات العابرة الى المنطقة (N) حيث تقوم باقتناص الكترون حر من بين الاعداد الكبيرة المحيطة بها. حيث

تتعادل حاملات الشحنة مع بعضها ويحصل ما يسمى بالتحام الالكترون- فجوة (electron – hole recombination) فتصبح المنطقة القريبة من الفاصل خالية من ناقلات الشحنة الحرة من الجهتين N و P كما في الشكل (2) اذ تبقى الشحنات مقيدة على جهتي الفاصل (او الوصلة) وتدعى هذه المنطقة بمنطقة الاستنزاف (depletion region) او طبقة الاستنزاف (depletion layer).

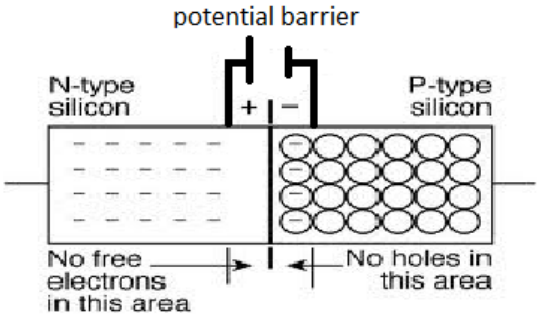
ان انتشار الحاملات وانتقالها من جهة الى اخرى لا يعني انتقال الذرات الام التابعة لها, ذلك لان الذرات الام تكون مرتبطة مع مثيلاتها من الذرات الاخرى بأواصر تساهمية يصعب كسرها، وانما يؤدي الى تكوين شحنتين مختلفتي الاشارة على جانبي الحد الفاصل في وصلة PN. ويسبب تخلف الايونات الموجبة في المنطقة (N) والايونات السالبة في المنطقة (P) كما في شكل(2). ان كل زوج متكون من الايون الموجب والسالب يدعى بثنائي القطب (dipole)، وان وجود مثل هذا الثنائي القطب يعني ان الكتروناً واحداً من الكترونات حزمة التوصيل وفجوة واحدة قد توقفتا عن التجوال وبتزايد اعداد هذه الثنائيات القطبية ستخلي المنطقة القريبة من الحد الفاصل بين وصلتي PN من الشحنات المتحركة مكونة منطقة الاستنزاف التي تم توضيحها سابقاً. ومن الجدير بالذكر ان معظم مقاومة وصلة PN تتركز في منطقة الاستنزاف حيث تكون مقاومتها كبيرة مقارنة مع بقية اجزاء شبه الموصلين P, N.



شكل (2) انتشار الحاملات خلال وصلة الثنائي وتكوين منطقة الاستنزاف

- **جهد الحاجز (The potential barrier)**

من المعروف ان وجود شحنتين مختلفتين ومفصولتين عن بعضهما بمسافة سوف يعمل على خلق مجال كهربائي يؤدي بدوره الى احداث جهد كهربائي. ونتيجة لانتقال حاملات الشحنة بين نصفي الوصلة يزداد عدد الالكترونات في المنطقة (P) وعدد الفجوات في المنطقة (N) وبذلك يتكون فرق جهد بين المنطقتين مولداً مجالاً كهربائياً معاكساً لحركة حاملات الشحنة وسيستمر انتشار حاملات الشحنة الاغلبية خلال الفاصل الى ان يصبح المجال الكهربائي المتولد كافياً لإيقاف هذا الانتشار فيحصل التوازن (equilibrium) حيث ان الالكترونات الحرة لن تتمكن من العبور من (N) الى (P) بسبب القوة المعاكسة الناتجة من المجال المتولد، كذلك فأن الفجوات في (P) لن تتمكن من العبور الى (N) لنفس السبب. اذ يؤدي هذا المجال الكهربائي الى توليد حاجز جهد (potential barrier) ويدعى الجهد المتولد في حالة التوازن **بجهد الوصلة (V_B)**. وتعتمد قيمته على نوع المادة فمثلا يكون جهد الوصلة للسيليكون $V_B = 0.7V$ وللجرمانيوم $V_B = 0.3V$. والشكل (3) يبين وصلة الـ PN مع الجهد الحاجز V_B.

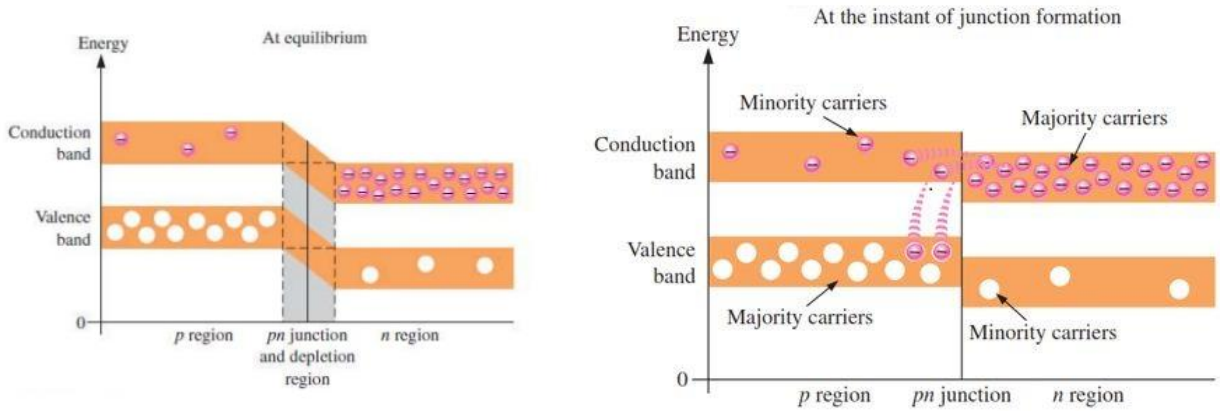


شكل (3) الجهد الحاجز للوصلة الثنائية PN

- **مخطط الطاقة لوصلة PN**

ان انتشار الالكترونات والفجوات عبر وصلة PN لا ينتج عنه طبقة الاستنزاف وحسب بل يغير ايضاً مستويات الطاقة في منطقة الوصلة. يلاحظ في الشكل (4- أ) حزم الطاقة قبل انتشار الالكترونات عبر الوصلة وقد احتوت الجهة (P) على العديد من الفجوات في حزمة التكافؤ بينما تحتوي الجهة (N) على العديد من الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل كذلك يلاحظ ان حزم الطاقة للمنطقة (P) قد رسمت اعلى قليلاً من حزم الطاقة للمنطقة (N). ان سبب ذلك يعود الى ان ارتباط الالكترونات بالنواة في ذرات خماسية التكافؤ يكون اقوى من ارتباط الالكترونات بالنواة في ذرات ثلاثية التكافؤ ومن ثم فأن الطاقة الكامنة للإلكترونات في الذرات الخماسية التكافؤ تكون اصغر من الطاقة الكامنة للإلكترونات في الذرات الثلاثية التكافؤ, اي ان الطاقة اللازمة لتحريرها تكون اكبر. ولهذا فأن المدارات في ذرة ثلاثية التكافؤ (جهة P) تكون اكبر بقليل من مدارات ذرة خماسية التكافؤ (جهة N) وهذا يشرح سبب كون حزم (P) اعلى قليلاً من حزم (N).

يبين الشكل (4- ب) مخطط الطاقة بعد ان يتم التوازن ويلاحظ فيها ان حزم (P) قد تحركت الى الاعلى نسبة الى حزم (N) وذلك بسبب عبور الالكترون للوصلة فأنه سوف يملأ فجوة احدى الذرات الثلاثية التكافؤ وبالتالي فان هذا الالكترون الاضافي سيرفع مدار حزمة التوصيل بعيدا عن الذرة الثلاثية او بعبارة اخرى ان اي الكترون اخر يأتي الى المنطقة (P) سوف يحتاج الى طاقة اكبر من طاقة الالكترون السابق ليدخل الى مدار نطاق التوصيل وهذا هو سبب تحرك حزم (P) الى الاعلى نسبة الى حزم (N) بعد ان تكون طبقة الاستنزاف قد تكونت.



(ب) (أ)

شكل (4) مستويات الطاقة للثنائي البلوري: أ- قبل الانتشار. ب- بعد الانتشار في حالة توازن.

- **وصلة PN في حالة الاستقرار (عدم الانحياز)**

ذكرنا سابقاً ان وجود انحدار في تركيز الالكترونات والفجوات عبر وصلة PN سيعمل على انتشار هذه الحاملات الاكثرية عبر الوصلة. ان انتقال الحاملات الاكثرية نتيجة للانتشار سوف يؤدي الى احداث تيار الانتشار، ان حركة الفجوات تكون بعكس حركة الالكترونات , ومن جهة اخرى فأن وجود جهد الحاجز والناتج بسبب عملية الانتشار, سوف يعمل على تحريك الحاملات الاقلية في كل من المنطقتين N و P مؤدياً بذلك الى احداث تيار يسمى بتيار التوصيل. وحيث ان الحاملات الاقلية تتكون هي الاخرى من نوعين, الالكترونات والفجوات, لذا فأن تيار التوصيل يتكون هو الاخر من مركبتين هما: تيار التوصيل للإلكترونات وتيار التوصيل للفجوات . وبذلك تكون محصلة التيار الساري في وصلة *PN* بسبب حركة الالكترونات تكون مساوية لتيار الانتشار+ تيار التوصيل . على اي حال تكون محصلة التيار الكلي في وصلة *PN* في حالة انعدام الجهد الخارجي مساوي لمجموع تيار الانتشار وتيار التوصيل . في حالة التوازن الحركي لوصلة *PN* يتساوى هذان التياران مقداراً ويتعاكسان اتجاهاً وبالتالي يكون التيار الكلي المار خلال الوصلة *PN* مساوياً للصفر. وهذا هو المفروض في حالة انعدام الجهد الخارجي. وبعبارة اخرى ان الجهد الحاجز سيأخذ دائماً تلك القيمة او الوضع الذي يكفل التعادل بين تياري الانتشار والتوصيل.

لنفرض الان ان تيار الانتشار قد ازداد بسبب ارتفاع درجة الحرارة ان هذه الزيادة في تيار الانتشار معناها عبور عدد اكبر من الالكترونات الى الجهة *(P)* وكذلك عبور عدد اكبر من الفجوات الى المنطقة *(N)* مؤدية الى زيادة عدد الايونات المتخلفة وبالتالي الى زيادة قيمة الجهد الحاجز. ان نمو ارتفاع الجهد الحاجز سوف يؤدي الى زيادة مقابلة في تيار التوصيل اي الى انتقال الحاملات الاقلية في الاتجاه العكسي يتواصل نمو ارتفاع الجهد الحاجز وفي نهاية المطاف ونتيجة لزيادة تيار التوصيل يحدث الاتزان ويتوقف نمو V_B.

- **حساب الجهد الحاجز**

لقد ذكرنا سابقاً بان جهد الحاجز يأخذ دائما القيمة او الوضع الذي يكفل فيه حصول التعادل بين تيار الانتشار (الناتج من الحاملات الاكثرية) وتيار التوصيل (الناتج من الحاملات الاقلية) . من المعادلة التالية نحسب عن طريقها الجهد الحاجز V_B :

$$V_B = \frac{KT}{q} ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \text{ ..... (1)}$$

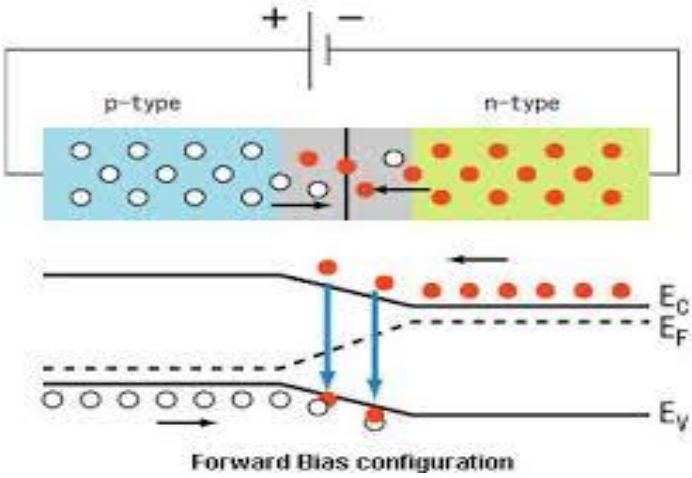
ان اهمية المعادلة تكمن في حقيقة ان V_B قد تم حسابه بدلالة كثافة الذرات الشائبة التي سببت وجوده.

يمثل $V_B/\frac{KT}{q}$ نسبة قيمة حاجز الجهد الى معدل الطاقة للشحنات او بعبارة اخرى هو معدل قدرة هذه الشحنات لعبور هذا الحاجز الجهدي.

- **أنحياز الوصلة PN (Biasing of PN junction)**

اذا ربط مصدر جهد خارجي على الوصلة PN فأنه يدعى جهد الانحياز (bias) وان هذا الجهد قد يزيد او يقلل من جهد الوصلة (V_B) معتمداً على ربط اقطاب هذا الجهد الى طرفي الوصلة PN.

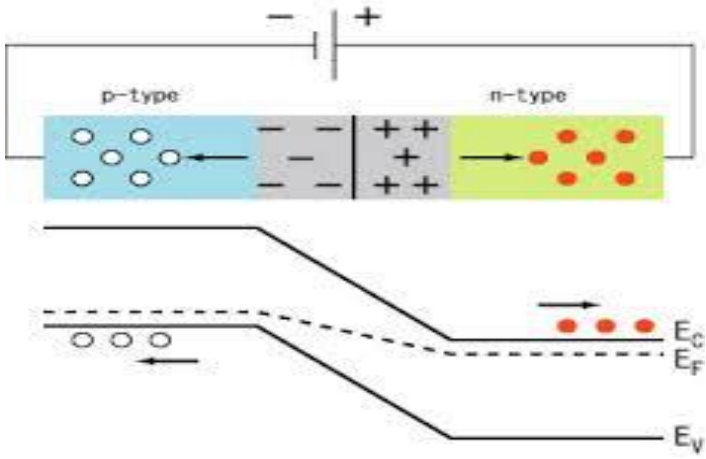
فاذا سلطت فولتية انحياز بحيث يكون القطب الموجب على P والقطب السالب على N، كما في الشكل (5) ، فأن الفجوات في منطقة P تتحرك مبتعدة عن القطب الموجب فتحاول عبور الحاجز الى المنطقة N. وكذلك فان الالكترونات في المنطقة N تتحرك مبتعدة عن القطب السالب نحو المنطقة P. وهذه الحاملات سوف تتحد مع الشحنات المقيدة في منطقة الاستنزاف وتتعادل معها مما يؤدي الى انخفاض جهد الوصلة تدريجياً. وباستمرار زيادة الجهد المجهز الى ان يزول (V_B) نهائياً مسبباً عبور حاملات الشحنة بعد ذلك بدون مقاومة تذكر. ويسمى جهد الانحياز في هذه الحالة بجهد الانحياز الامامي (forward bias) ولهذا فأن جهد الانحياز الامامي يسبب ممانعة قليلة للتيار وتشارك فيه حاملات الشحنة الاقلية والاغلبية معاً.



شكل (5) الانحياز الامامي للوصلة الثنائية (PN junction).

يبين الشكل (5) تأثير الانحياز الامامي على مستويات الطاقة، حيث تتقارب حزمتي التوصيل والتكافؤ مع مثيلتيها في كلا المادتين وبذلك يسهل انتقال حاملات الشحنة من احد الطرفين الى الطرف الاخر وهي في نفس مستوي الطاقة وذلك لاختفاء الحاجز الجهدي. اما توزيع الشحنات المقيدة عبر الوصلة فأنه سينخفض تدريجياً ثم يزول بزوال الحاجز الجهدي.

و عند تسليط جهد انحياز بحيث يكون القطب الموجب مربوط الى الطرف N والقطب السالب مربوط الى الطرف P فأنه يدعى بالانحياز المعكوس (reverse bias), وفيه تنجذب الالكترونات والفجوات بعيداً عن الحاجز بفعل اقطاب المصدر الخارجي وينتج عن هذا اتساع في منطقة الافراغ لان حاملات الحرة ستبتعد عن الحاجز ويزيد عدد ايونات الذرات الشائبة وعندئذ يزداد المجال الكهربائي المتولد في منطقة الاستنزاف ويزيد معه جهد الحاجز مما يتعذر على الشحنات الاغلبية الاشتراك في التيار الكهربائي. وكذلك يزداد سمك منطقة الافراغ ويزداد تركيز الشحنات المقيدة كما في الشكل (6). اما مستويات الطاقة للوصلة الثنائية في حالة الانحياز العكسي حيث تزداد الهوة بين حزمتي التكافؤ والتوصيل مع مثيلتيها في كلا المادتين وبذلك تزداد صعوبة عبور ناقلات الشحنة الاغلبية.



شكل (6) الانحياز العكسي للوصلة الثنائية (PN junction).

اما في درجات الحرارة الكافية لتوليد ازواج الكترون- فجوة في كل من N و P (في درجة حرارة الغرفة) فأن الفجوات وهي ناقلات الشحنة الاقلية في المنطقة N تحاول ان تبتعد عن القطب الموجب فتقترب من الحاجز وعند امتلاكها الطاقة الكافية تعبره. وكذلك فان الالكترونات وهي ناقلات الشحنة الاقلية في المنطقة P حيث تتنافر مع القطب السالب عابرة من المنطقة P الى المنطقة N. ولهذا فأن هذا التيار المتكون من انتقال حاملات الشحنة الاقلية فقط يمثل تيار التسرب (leakage current) في حالة الانحياز العكسي. وبما ان حاملات الشحنة الاقلية ناتجة من التأين الحراري لذا فهي تزداد بارتفاع درجات الحرارة ولهذا يزداد تيار التسرب مع ارتفاع درجات الحرارة.

منحني المميز للوصلة PN (Characteristics of PN junction)

تدعى العلاقة بين جهد الانحياز والتيار المار في الوصلة PN بمنحني المميزة او منحني التيار- جهد (I-V characteristics) وينقسم هذا المنحني الى ثلاث مناطق معتمداً على جهد الانحياز، وهذه المناطق هي منطقة الانحياز الامامي ومنطقة الانحياز العكسي ومنطقة الانهيار (breakdown region).

- فعند زيادة جهد الانحياز الامامي تدريجاً من الصفر، لا يمر تيار, الى ان تصل قيمة الجهد المسلط الى جهد الوصلة V_B حيث تتم معادلة جميع الايونات او الشحنات المقيدة في منطقة الاستنزاف وبعد ذلك يبدأ التيار بالزيادة بشكل سريع كما في الشكل (7) اي ان المقاومة التي تبديها الوصلة تصبح صغيرة جداً. عند تسليط جهد انحياز امامي V على وصلة الـ PN فأن التيار الامامي الكلي يساوي:

$$I_F = B(e^{V/\frac{KT}{q}} - 1) \text{ ..... (2)}$$

- اما عند تسليط جهد انحياز عكسي على وصلة الـ PN, فأن المجال الكهربائي الخارجي المسلط يؤثر في نفس اتجاه مجال الجهد الحاجز وبالتالي فأن الحاملات الاكثرية (الفجوات والالكترونات) سوف تتحرك بعيداً عن الملتقى PN لتخلف وراءها الايونات السالبة والموجبة الاضافية ولهذا السبب يزداد عرض منطقة الاستنزاف كلما ازداد الانحياز العكسي (جهد الانحياز), وبذلك فأن تياراً صغيراً عكسياً يمر خلال الوصلة ويسمى بتيار التسرب *(leakage current)* او التيار العكسي

(reverse current) ويكون ثابتاً بتغير الجهد ولكن يجب ان لا يتعدى الجهد العكسي عن حد معين بحيث يبدأ تيار عكسي كبير بالمرور ويصل الثنائي الى منطقة الانهيار.

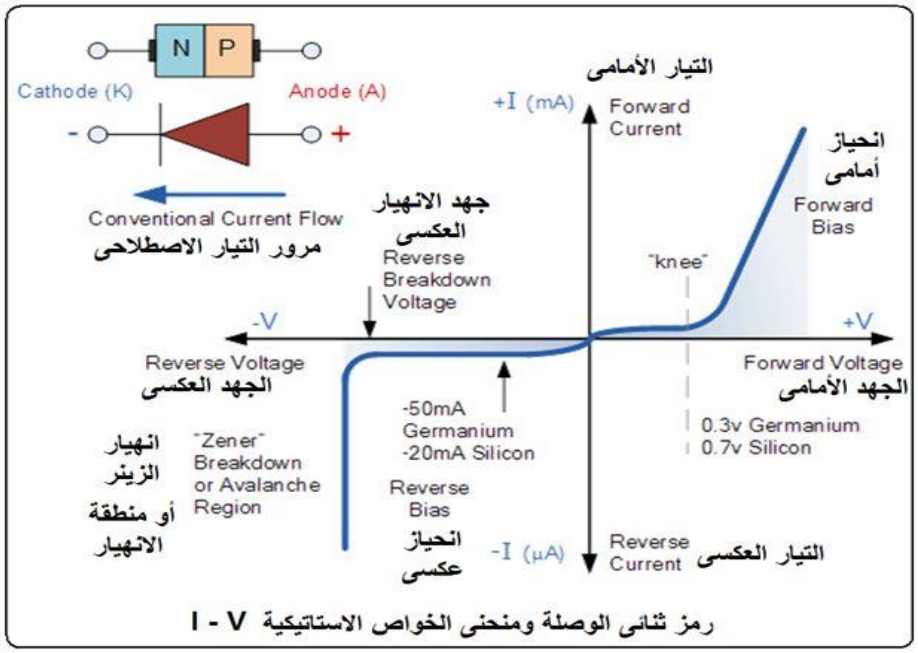
عند تسليط جهد انحياز عكسي V على وصلة الـ PN فأن الجهد الحاجز يصبح عندئذ مساوياً (V_B+V), وعند التعويض في معادلة (2) عن V بـ (V_B+V)- فأن الكمية $(1 >> e^{-V/\frac{KT}{e}})$ سوف تكون صغيرة الى الحد الذي يمكن اهمالها اي ان:

$$I_R = I_S = -B \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

وبالتالي فأن معادلة الفولتية – التيار للثنائي البلوري تصبح بالشكل التالي:

$$\boldsymbol{I = I_S\,(e^{V/\frac{KT}{q}} - 1)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

حيث تمثل (I_S) تيار الاشباع العكسي او تيار التسرب, الناتج عن حركة الازواج الكترون- فجوة المنتجة حرارياً. ويعود سبب ثبوت تيار الاشباع العكسي الى كونه ناتج عن انتقال الشحنات الاقلية وهي ذات عدد محدود اولاً, ولان الزيادة في الجهد الانحياز العكسي يصاحبه زيادة في عرض منطقة الاستنزاف وكثافة الشحنات المقيدة فيها مما يعرقل مرور حاملات الشحنة الاقلية هذه.



شكل (7) منحنى التيار- الجهد للثنائي البلوري

- **جهد الانهيار *(Breakdown Voltage)***

للتعرف على جهد الانهيار او الانكسار سوف نقوم بالإجابة على السؤال التالي:

الى اي حد يمكن ان يزداد عرض منطقة الاستنزاف بزيادة جهد الانحياز العكسي, وهل يمكن زيادة الجهد العكسي الى المالانهاية؟

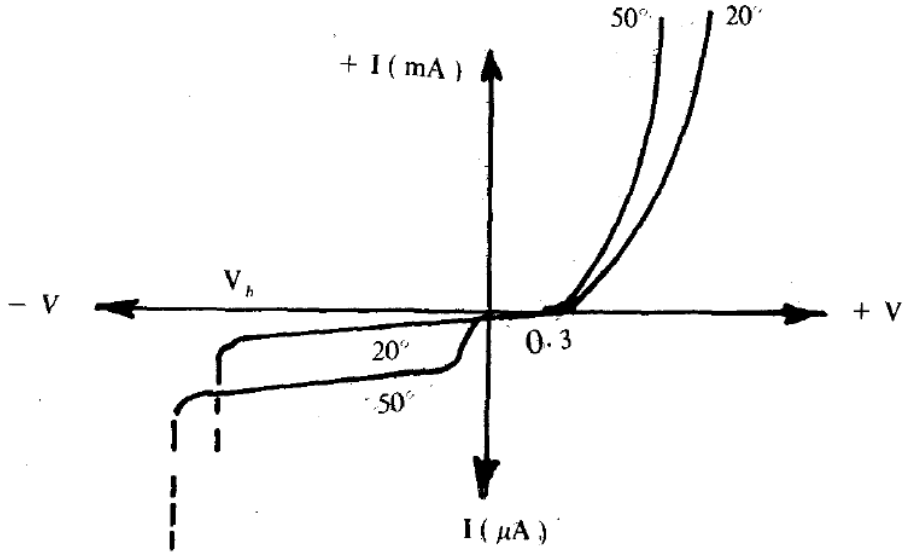
ان كل من الالكترونات والفجوات سوف تهرب مبتعدة عن الملتقى مخلفة وراءها ايونات موجبة وسالبة عند منطقة الاستنزاف وعليه فان الايونات الجديدة سوف تزيد من فرق الجهد على طبقة الاستنزاف وكلما زاد عرض طبقة الاستنزاف كبر فرق الجهد عبرها ويتوقف نمو طبقة الاستنزاف عندما يتساوى فرق جهدها مع الجهد الخارجي العكسي المسلط عليها.

ولا يمكن زيادة الجهد العكسي الى المالانهاية، وذلك لان الاستمرار في زيادة الفولتية العكسية سوف يؤدي الى زيادة شدة المجال الكهربائي عبر الوصلة بشكل كبير وبالتالي تتعجل ناقلات الشحنة الاقلية ومن ثم زيادة سرعتها بدرجة كبيرة. لذلك فان زيادة جهد الانحياز العكسي عن الحد المعين (جهد الانكسار *breakdown voltage)* سوف يعمل على اكساب الحاملات الاقلية طاقة كبيرة يجعلها قادرة على تحرير الكترونات التكافؤ للذرات الاخرى عند اصطامها بها. ان هذه الالكترونات الاخيرة قد تمتلك قدراً من الطاقة يجعلها قادرة على تحرير الكترونات اخرى من الذرات الاخرى وبهذه الطريقة سوف نحصل على عدد من الالكترونات الحرة والتي يتضاعف عددها بسرعة كبيرة جداً مؤديا الى ما يسمى بالانهيار الكهربائي *(electrical breakdown)* والذي يعمل على الاخلال بالاستقرار الحراري للوصلة الثنائية. وهكذا يزداد التيار مع زيادة بسيطة في فولتية الانحياز العكسي. وتدعى هذه العملية بالانهيار التهديمي *(avalanche breakdown)* والجهد الذي عنده يحصل الانهيار يسمى بجهد الانهيار *(breakdown voltage).*

- **تأثير درجة الحرارة على الثنائي البلوري**

ان درجة الحرارة التي يعمل فيها الثنائي تؤثر على خصائصه الكهربائية والسبب الرئيسي في ذلك يعود الى ازدياد حاملات الشحنة الاقلية بسبب ازواج الالكترون – فجوة الذي ينتج من اكتساب الكترون من حزمة التكافؤ طاقة كافية فيقفز الى حزمة التوصيل تاركاً فجوة في محله. ومن نتائج ازدياد حاملات الشحنة الاقلية هو انخفاض جهد الوصلة V_B بسبب الانخفاض النسبي بين تركيز حاملات الشحنة الاغلبية والاقلية. وكذلك يقل عرض منطقة الاستنزاف مؤدياً الى انخفاض جهد الانهيار. ومن النتائج السلبية لارتفاع درجة الحرارة هو ازدياد تيار التسرب او الاشباع الناتج من الحاملات الاقلية. وترجع خطورة هذه النقطة الى فقدان خاصية مهمة للثنائي البلوري وهي منع مرور التيار في الانحياز العكسي. ويوضح الشكل (8) منحنى (I-V) للثنائي البلوري عند درجتي حرارة مختلفتين لثنائي بلوري الجيرمانيوم.

يلاحظ من شكل (8) ان التيار الامامي لا ينمو عند رفع درجة الحرارة بنفس القوة التي ينمو فيها التيار العكسي، وذلك لان التيار الامامي يعتمد اساساً على تركيز الشوائب (الواهبة والقابلة) ولا علاقة له بدرجة الحرارة, الا ان رفع درجة الحرارة يزيد من تيار الاشباع I_S وبالتالي فأن الجهد الحاجز يجب ان يقل ليسمح عندئذ للحاملات الاكثرية بالانتشار للوصول الى حالة الاتزان الحركي على فرض ان الجهد الخارجي المسلط يساوي صفر. وبالتالي يمكن القول ان انخفاض الجهد الحاجز مع ارتفاع درجة الحرارة هو السبب المباشر وراء زيادة التيار الامامي. ومن الجدير بالملاحظة ان التيار الامامي لا يبدأ بالسريان الا عند جهد معين يدعى بجهد العتبة *(threshold voltage)* او جهد القطع ويتناسب جهد العتبة عكسياً مع تيار التشبع العكسي.



شكل (8) منحنى (I-V) لثنائي بلوري الجيرمانيوم عند درجتي حرارة مختلفة.

مثال/ اذا كان تيار الاشباع I_S يتغير من 10^{-14} الى 10^{-9} عند تغير درجة الحرارة من 20°C الى 125°C، احسب V_B في كلا الحالتين على فرض ان التيار الامامي يبقى ثابتاً عند القيمة (1 mA).

$$I = I_S\,(e^{V_B/\frac{KT}{q}} - 1) \quad \rightarrow \quad \frac{I}{I_S} = (e^{V_B/\frac{KT}{q}} - 1) \quad \rightarrow \quad ln\frac{I}{I_S} = \frac{q\,V_B}{K\,T}$$

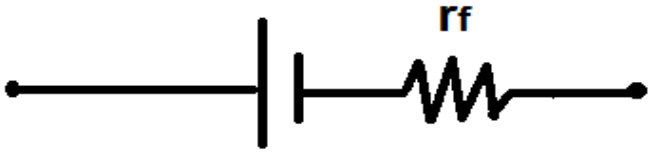
$$V_B = \frac{K\,T}{q} ln\frac{I}{I_S} = \frac{1.38\times10^{-23}\,J/K\;(20+273)K}{1.6\times10^{-19}J} ln\frac{10^{-3}A}{10^{-14}A} = 25\,mV\;ln\frac{10^{-3}A}{10^{-14}A}$$
$$= 633\,mV$$

$$V_B = \frac{K\,T}{q} ln\frac{I}{I_S} = \frac{1.38\times10^{-23}\,J/K\;(125+273)K}{1.6\times10^{-19}J} ln\frac{10^{-3}A}{10^{-9}A} = 34\,mV\;ln\frac{10^{-3}A}{10^{-9}A}$$
$$= 460\,mV$$

وعليه فأن V_B يقل مع زيادة درجة الحرارة على الرغم من ثبات التيار الامامي (ثبوت جهد الانحياز الامامي).

- **الدائرة المكافئة للثنائي البلوري**

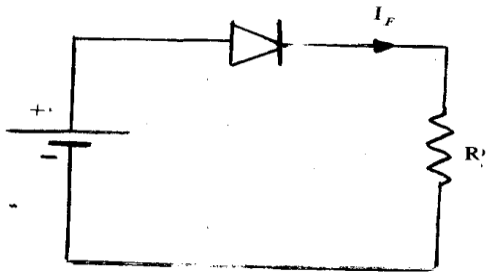
بعد ان تعرفنا على سلوك الثنائي البلوري عند وقوعه تحت تأثير جهد مستمر سنقوم هنا باستبدال الثنائي بنموذج (model) يتصرف كهربائياً بنفس الطريقة التي يتصرف بها الثنائي وبالتالي يصبح هذا النموذج او الدائرة المكافئة للثنائي اداة مفيدة لتحليل وتصميم دوائر الثنائيات. يتم الحصول على النموذج المناسب للثنائي البلوري من خلال منحنى الخواص (I-V) للثنائي.



شكل (9) الدائرة المكافئة للثنائي المنحاز امامياً

- **تحليل دائرة الثنائي: خط الحمل (Load – Line)**

يبين الشكل (10) دائرة بسيطة واساسية من دوائر الثنائي وتتكون من مصدر فولتية خارجي V_S ومقاومة R مربوطة على التوالي مع الثنائي والمطلوب ايجاد قيمة التيار المار في المقاومة R او بعبارة اخرى التعرف على طبيعة ومقدار الفولتية الخارجة. وذلك باستخدام طريقة خط الحمل Load Line .



شكل (10) دائرة الثنائي المنحاز امامياً

من الواضح في هذه الدائرة ، ان الثنائي منحاز امامياً حيث تم ربط الانود من الثنائي الى القطب الموجب لمصدر الجهد وعليه فانه من المتوقع ان التيار الساري في الدائرة I_F سيكون من نوع تيار امامي وبالتالي فان المطلوب ايجاد قيمة هذا التيار I_F وكذلك مقدار الهبوط في الجهد عبر الثنائي V_F.

من الشكل (10) يكون: $V_S = V_F + V_L$

على فرض ان التيار المار في الدائرة هو I_F فان: $V_S = V_F + I_F R$

$$V_F = V_S - I_F R \quad \text{..... (5)}$$

تمثل المعادلة (5) معادلة خط مستقيم وتربط بين V_F, I_F لقيم معينة من V_S، R ويسمى هذا الخط بخط الحمل Load Line ويتم رسمه على النحو التالي: يتم تعيين النقطة الاولى من هذا الخط, على المحور الصادي حيث ان V_F=0 فان

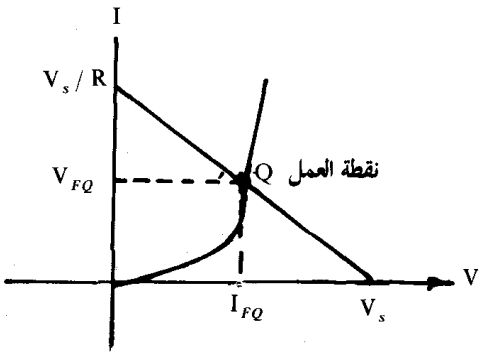
$$I_{F(\max)} = \frac{V_S}{R} \quad \text{..... (6)}$$

وهكذا تتحدد النقطة الاولى بـ ($\frac{V_S}{R}$, 0), ويتم تحديد النقطة الثانية على المحور السيني حيث تكون I_F=0 وبذلك يكون:

$$V_{F(\max)} = V_S \text{ ..... (7)}$$

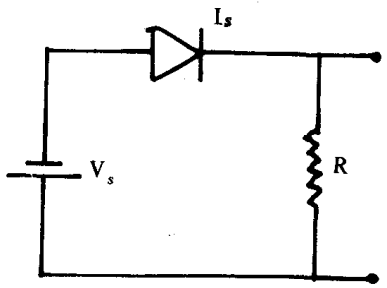
وبذلك تكون النقطة الثانية (V_S, 0)

اخيرا يتم رسم خط مستقيم بين هاتين النقطتين ويدعى هذا الخط عندئذ بخط الحمل لدائرة الثنائي وتسمى نقطة تقاطع خط الحمل مع المنحنى (I-V) للثنائي بنقطة تشغيل الثنائي operating point ويرمز لها بـ Q وهي تمثل قيمة التيار I_{FQ} في دائرة الثنائي ومقدار الهبوط في الجهد V_{FQ} عبر الثنائي.

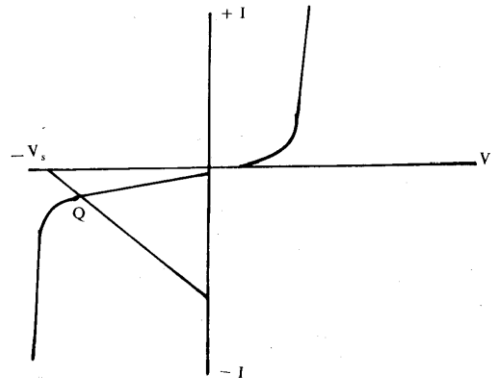


شكل (11) خط الحمل للثنائي البلوري

وباستخدام نفس الطريقة اعلاه يتم تحديد نقطة عمل الثنائي البلوري المنحاز عكسياً الموضح في الشكل (12). ويمثل الشكل (13) خط الحمل لهذه الدائرة



شكل(12) دائرة الثنائي المنحاز عكسياً



شكل(13) منحنى الخواص مع خط الحمل للثنائي المنحاز عكسياً