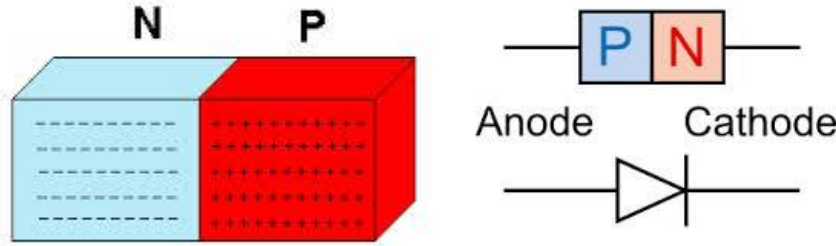


الفصل الثالث

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 بعضها . ويتم هذا الجمع بتصنيع الثنائي على بلورة واحدة من مادة شبه موصلة بحيث يصبح احد نصفها سالب والاخر موجب وذلك عن طريق ادخال المادة الشائبة المناسبة الى نصف البلورة . وتدعى البلورة عندئذ بالبلورة الثنائية اوالثنائي البلوري وقد اشتهر استعمال نوعين من الثنائيات البلورية هما ثنائي السليكون وثنائي الجرمانيوم. والشكل (1-3) يوضح شكل ورمز الثنائي البلوري.



شكل (1-3) تركيب ورمز الوصلة الثنائية PN

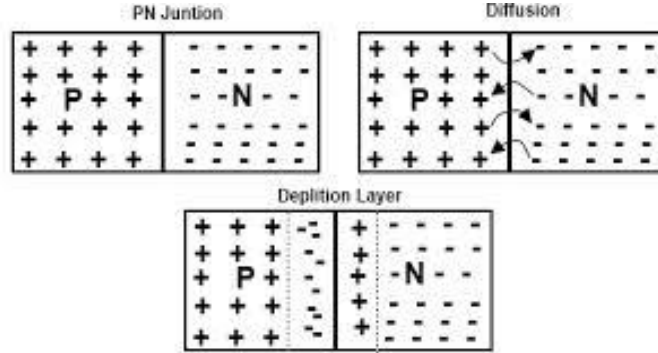
• منطقة الاستنزاف depletion region

عند جمع نصف 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 $(\frac{dn}{dx})$ في المنطقة السالبة وكذلك انحدار في تركيز الفجوات $(\frac{dp}{dx})$ 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 اقل وبوجود الاعداد الكبيرة من الفجوات حوله يكون زمن بقاءه قصيراً فحال دخوله المنطقة (P) يسقط في فجوة وعندما يتم هذا فان الفجوة تختفي ويصبح الالكترون الحر إلكترونًا تكافؤيًا , كذلك هو الحال بالنسبة للفجوات العابرة الى المنطقة (N) حيث تقوم بأقتران الالكترون حر من بين الاعداد الكبيرة المحيطة بها . حيث تتعادل حاملات الشحنة مع بعضها ويحصل ما يسمى باللتحام الالكترون- فجوة (electron – hole recombination) فنصبح المنطقة القريبة من الفاصل خالية من ناقلات الشحنة الحرة من الجهتين N و P كما في الشكل (2-3) 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 (2-3). ان كل زوج متكون من الايون الموجب والسالب يدعى بثنائي القطب (dipole), وان وجود مثل هذا الثنائي القطب يعني ان

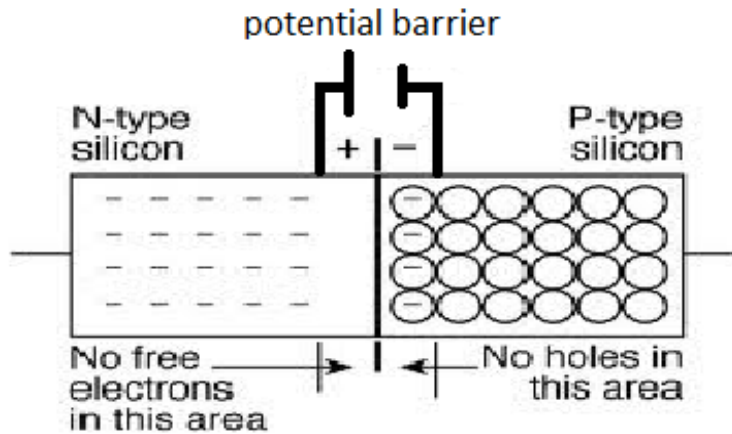
الكترناً واحداً من الكترنات حزمة التوصيل وفجوة واحدة قد توقفتا عن التجوال وبتزايد اعداد هذه الشنائيات القطبية ستخلي المنطقة القريبة من الحد الفاصل بين وصليتي PN من الشحنات المتحركة مكونة منطقة الاستنزاف التي تم توضيحها سابقاً . ومن الجدير بالذكر ان معظم مقاومة وصلة PN تتركز في منطقة الاستنزاف حيث تكون مقاومتها كبيرة مقارنة مع بقية اجزاء شبه الموصلين N, P.



شكل (2-3) انتشار الحاملات خلال وصلة الثنائي وتكوين منطقة الاستنزاف

• جهد الحاجز (The potential barrier)

من المعروف ان وجود شحنتين مختلفتين ومفصولتين عن بعضها بمسافة سوف يعمل على خلق مجال كهربائي يؤدي بدوره الى احداث جهد كهربائي. ونتيجة لانتقال حاملات الشحنة بين نصفي الوصلة يزداد عدد الالكترنات 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 لايقاف هذا الانتشار فيحصل التوازن (equilibrium) حيث ان الالكترنات الحرة لن تتمكن من العبور من (N) الى (P) بسبب القوة المعاكسة الناتجة من المجال المتولد، كذلك فإن 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 (3-3) يبين وصلة ال PN مع الجهد الحاجز V_B .

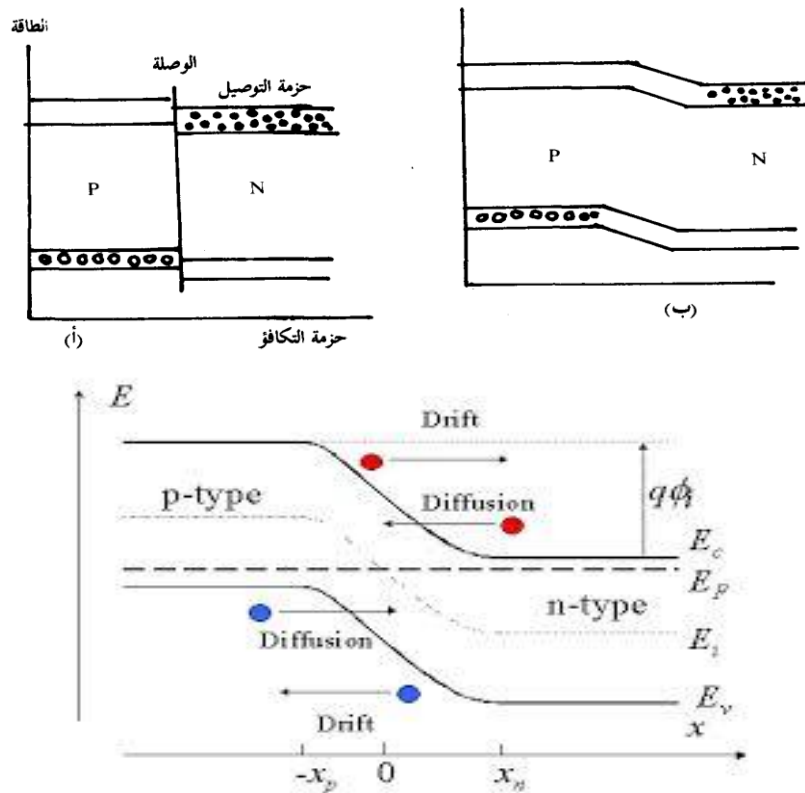


شكل (3-3) الجهد الحاجز للوصلة الثنائية PN

● 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 (3-4-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 فإن الطاقة الكامنة للالكترونات في الذرات الخماسية التكافؤ تكون اصغر من الطاقة الكامنة للالكترونات في الذرات الثلاثية التكافؤ , اي ان الطاقة اللازمة لتحريرها تكون اكبر . ولهذا فإن 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 (3-4-ب) مخطط الطاقة بعد ان يتم التوازن ويلاحظ فيها ان حزم (P) قد تحركت الى الاعلى نسبة الى حزم (N) وذلك بسبب عبور الالكترونات للوصلة فإنه 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 وه ذا هو سبب تحرك حزم (P) الى الاعلى نسبة الى حزم (N) بعد ان تكون طبقة الاستنزاف قد تكونت.



شكل (3-4) مستويات الطاقة للثنائي البلوري أ- قبل الانتشار. ب- بعد الانتشار في حالة توازن

• وصلة PN في حالة الاستقرار (عدم الانحياز)

ذكرنا سابقاً أن وجود انحدار في تركيز الإلكترونات والفجوات عبر وصلة PN سيعمل على انتشار هذه الحاملات الاكثرية عبر الوصلة. ان انتقال الحاملات الاكثرية نتيجة للانتشار سوف يؤدي الى احداث تيار الانتشار, وفقاً لمعادلة الانتشار التالية:

$$J_{Dn} = eD_n \frac{dn}{dx} \quad \text{..... (1)}$$

حيث يمثل J_{Dn} كثافة تيار الانتشار الناتج عن الإلكترونات التي تنتشر من الجانب N الى الجانب P ويمثل D_n بثابت الانتشار للإلكترونات ويقاس بالتر مربع لكل ثانية. وهناك معادلة مشابهة بالنسبة لكثافة انتشار التيار الناتج عن الفجوات:

$$J_{Dp} = -eD_p \frac{dp}{dx} \quad \text{..... (2)}$$

الإشارة السالبة تعني أن حركة الفجوات تكون بعكس حركة الإلكترونات وعليه فإن محصلة كثافة تيار الانتشار في وصلة PN

$$J_D = J_{Dn} + J_{Dp} = eD_n \frac{dn}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx} \quad \text{..... (3)}$$

تساوي: ومن جهة أخرى فإن 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 أن الحاملات الاقلية تتكون هي الأخرى من نوعين, الإلكترونات والفجوات, لذا فإن تيار التوصيل يتكون هو الآخر من مركبتين هما:

$$J_e = \sigma_e E = ne\mu_e E \quad \text{..... (4)} \quad \text{(كثافة تيار التوصيل للإلكترونات)}$$

$$J_h = \sigma_h E = pe\mu_p E \quad \text{..... (5)} \quad \text{(كثافة تيار التوصيل للفجوات)}$$

تمثل n, p عدد كل من الإلكترونات والفجوات الاقلية وعلى التوالي. بما تمثل μ_e, μ_p تحريك كل من الإلكترونات والفجوات. وعند جمع المعادلتين اعلاه فإن كثافة تيار التوصيل الكلي يساوي:

$$J_C = (\mu_e n + \mu_p p)eE \quad \text{..... (6)}$$

وبذلك تكون محصلة التيار الساري في وصلة PN بسبب حركة الإلكترونات تكون مساوية لتيار الانتشار+تيار التوصيل أي أن:

$$J_n = J_e + J_{Dn} = ne\mu_e E + eD_n \frac{dn}{dx} \quad \text{..... (7)}$$

$$J_p = J_h + J_{Dp} = pe\mu_h E - eD_p \frac{dp}{dx} \quad \text{..... (8)}$$

وكذلك بالنسبة لمحصلة التيار الناتج عن حركة الفجوات:

على أي حال تكون محصلة التيار الكلي (J) في وصلة PN في حالة انعدام الجهد الخارجي مساوي لمجموع تيار الانتشار وتيار

$$J = J_D + J_C \quad \text{..... (9)}$$

التوصيل:

في حالة التوازن الحركي لوصلة PN يتساوى هذان التياران مقداراً ويتعاكسان اتجاهًا وبالتالي يكون التيار الكلي (J) المار خلال الوصلة PN مساوياً للصفر. وهذا هو المفروض في حالة انعدام الجهد الخارجي.

وبعبارة أخرى ان الجهد الحاجز سيأخذ دائماً تلك القيمة او الوضع الذي يكفل التعادل بين تيارى الانتشار والتوصيل.

لنفرض الان ان تيار الانتشار قد ازداد بسبب ارتفاع درجة الحرارة ان هذه الزيادة في تيار الانتشار معناها عبور عدد أكبر من الالكترونات الى الجهة (P) وكذلك عبور عدد أكبر 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 وطالما ان $J_C < J_D$ يتواصل نمو ارتفاع الجهد الحاجز وفي نهاية المطاف ونتيجة لزيادة J_C يحدث الاتزان $J_C = J_D$ ويتوقف نمو V_B .

• حساب الجهد الحاجز

لقد ذكرنا سابقاً بان جهد الحاجز يأخذ دائماً القيمة او الوضع الذي يكفل فيه حصول التعادل بين تيار الانتشار (الناتج من الحاملات الاكثرية) وتيار التوصيل (الناتج من الحاملات الاقلية)، ويمكن ذلك بجعل معادلة (7)، ومعادلة (8) مساوية للصفر:

$$J_n = J_e + J_{D_n} = 0 \rightarrow J_e = -J_{D_n} \rightarrow ne\mu_e E = -eD_n \frac{dn}{dx} \dots\dots (10)$$

$$\frac{dn}{n} = -\frac{\mu_e}{D_n} E dx \dots\dots (11)$$

$$\frac{D_n}{\mu_e} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{e} \dots\dots\dots (12) \quad \text{حيث من معادلة انشتاين في الانتشار}$$

$$\frac{dn}{n} = -\frac{e}{KT} E dx \dots\dots (13) \quad \text{وبتعويض عن قيمة } \frac{D_n}{\mu_e} \text{ من معادلة (12) في معادلة (11) نحصل على:}$$

وباخذ التكامل عبر الوصلة PN على فرض ان عرض منطقة الاستنزاف ($x_2 - x_1$) وكذلك من n_p الى n_n . حيث يمثل n_n عدد الالكترونات على حافة منطقة الاستنزاف في الجانب N من الوصلة، و n_p عدد الالكترونات على حافة منطقة الاستنزاف من الجانب P من الوصلة اي ان:

$$\int_{n_p}^{n_n} \frac{dn}{n} = \frac{e}{KT} \int_{x_1}^{x_2} (-E) dx \dots\dots\dots (14)$$

حيث ان $V = - \int E dx$ وعليه فأن معادلة (14) تصبح بعد اجراء التكامل:

$$n_n = n_p e^{V_B / \frac{KT}{e}} \dots\dots\dots (15)$$

هذه المعادلة تمثل العلاقة بين كثافة الالكترونات عند حافة طبقة الاستنزاف في المنطقة N وكثافتها عند حافة الطبقة في المنطقة P من وصلة الثنائي. ومن جهة أخرى يمثل الاس $V_B / \frac{KT}{e}$ نسبة قيمة حاجز الجهد الى معدل الطاقة للشحنات او بعبارة أخرى هو معدل قدرة هذه الشحنات لعبور هذا الحاجز الجهدي.

$$p_p = p_n e^{V_B / \frac{KT}{e}} \dots\dots\dots (16) \quad \text{وباتباع نفس الخطوات اعلاه نحصل على معادلة لكثافة الفجوات:}$$

المعادلتين (15) , (16) تعرفان بمعادلتَي بولتزمان (Boltzmann equations)

عند وضع $n_p = n_i^2 / N_A$, $n_n = N_D$ وتعويضها في المعادلة اعلاه نحصل على:

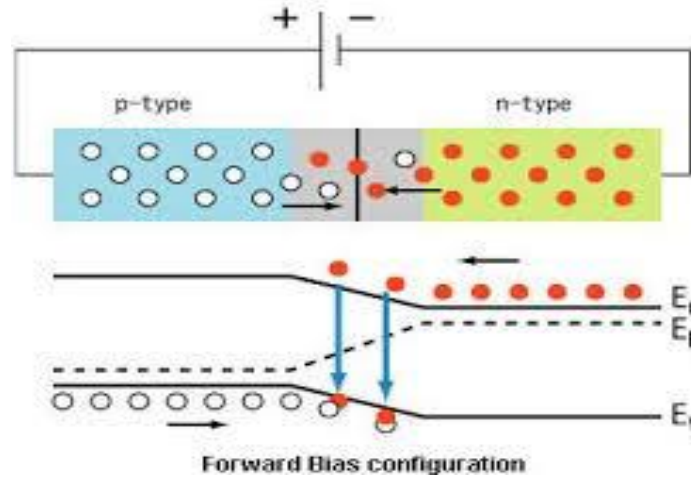
$$V_B = \frac{KT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \dots\dots\dots (17)$$

ان اهمية المعادلة (17) تكمن في حقيقة ان V_B قد تم حسابه بدلالة كثافة الذرات الشائبة التي سببت وجوده.

• أنحياز الوصلة PN (Biasing of PN junction)

اذا ربط مصدر جهد خارجي على الوصلة PN فإنه 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.

فإذا سلطت فولتية انحياز بحيث يكون القطب الموجب على P والقطب السالب على N, كما في الشكل (5-3) , فإن 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 الافراغ او الاستنزاف وتتعاقد 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 فإن جهد الانحياز الامامي يسبب ممانعة قليلة للتيار وتشارك فيه حاملات الشحنة الاقلية والاعلبية معاً.

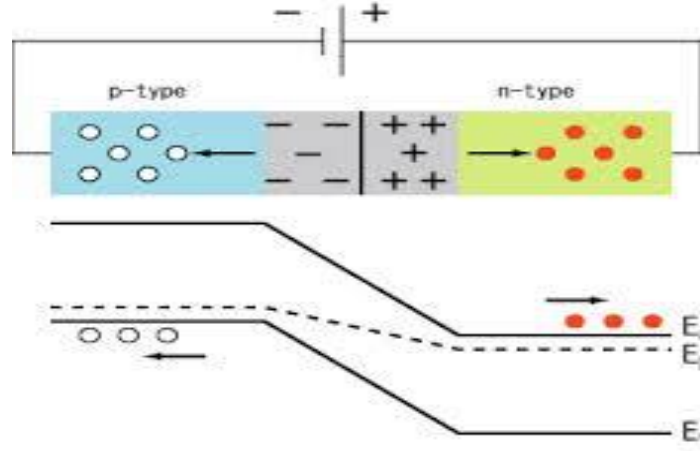


شكل (5-3) الانحياز الامامي للوصلة الثنائية (PN junction).

يبين الشكل (5-3) تأثير الانحياز الامامي على مستويات الطاقة , حيث تتقارب حزمتي التوصيل والتكافؤ مع مثيلتيهما 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 فإنه 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 فإنه 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 (6-3). اما مستويات الطاقة للوصلة الشائبة في حالة الانحياز العكسي حيث تزداد الهوة بين حزمتي التكافؤ والتوصيل مع مثيلتيهما في كلا المادتين وبذلك تزداد صعوبة عبور ناقلات الشحنة الاغلبية.



شكل (6-3) الانحياز العكسي للوصلة الشائبة (PN junction).

اما في درجات الحرارة الكافية لتوليد ازواج الكترون- فجوة في كل من P و N (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 المعكوس. 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 الميزة 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 (7-3) اي ان المقاومة التي تبديها الوصلة تصبح صغيرة جداً.

يمكن اعادة كتابة معادتي بولتزمان (15), (16) بالطريقة التالية:

$$p_n = p_p e^{-V_B/\frac{KT}{e}} \dots\dots\dots (18)$$

$$n_p = n_n e^{-V_B/\frac{KT}{e}} \dots\dots\dots (19)$$

عند تسليط جهد انحياز امامي V على وصلة الـ PN فإن الجهد الحاجز يصبح عندئذ مساوياً $(V_B - V)$ وتصبح كثافة الفجوات:

$$p_n + \Delta p_n = p_p e^{-(V_B - V)/\frac{KT}{e}} = p_p e^{-V_B/\frac{KT}{e}} e^{V/\frac{KT}{e}} \dots\dots\dots (20)$$

هذه الزيادة في عدد الفجوات Δp_n تكون بسبب ان هناك عدد أكثر من الفجوات والتي اصبحت تمتلك الطاقة الكافية التي تمكنها من اجتياز حاجز الجهد الجديد والمختزل الى قيمة اقل (بفعل الجهد الخارجي المعاكس لجهد الوصلة). وبطبيعة الحال هذا يعود الى تسليط جهد انحياز V .

كذلك يزداد عدد الالكترونات في الجهة المقابلة من طبقة الاستنزاف بحيث ان:

$$n_p + \Delta n_p = n_n e^{-(V_B - V)/\frac{KT}{e}} = n_n e^{-V_B/\frac{KT}{e}} e^{V/\frac{KT}{e}} \dots\dots\dots (21)$$

عند طرح المعادلة (18) من معادلة (20) نحصل على مقدار الزيادة في كثافة الفجوات:

$$\Delta p_n = p_p e^{-V_B/\frac{KT}{e}} (e^{V/\frac{KT}{e}} - 1) \dots\dots\dots (22)$$

وبنفس الطريقة عند طرح المعادلة (19) من المعادلة (21) نحصل على مقدار الزيادة في كثافة الالكترونات:

$$\Delta n_p = n_n e^{-V_B/\frac{KT}{e}} (e^{V/\frac{KT}{e}} - 1) \dots\dots\dots (23)$$

الان على فرض ان A تمثل مساحة الوصلة و v_h معدل سرعة الفجوات فإن حاصل الضرب $\Delta p_n e v_h$ سوف يمثل مركبة التيار الناتج عن الفجوات المحقونة الى المنطقة N اي ان:

$$I_h = p_p e v_h e^{-V_B/\frac{KT}{e}} (e^{V/\frac{KT}{e}} - 1)$$

$$I_h = B_h (e^{V/\frac{KT}{e}} - 1) \dots\dots\dots (24)$$

وبنفس الطريقة يمكن ايجاد ان مركبة التيار الناتج عن الالكترونات المحقونة الى المنطقة P تكون:

$$I_e = B_e (e^{V/\frac{KT}{e}} - 1) \dots\dots\dots (25)$$

وبالتالي فإن التيار الكلي يساوي:

$$I_F = I_h + I_e = (B_h + B_e)(e^{V/\frac{KT}{e}} - 1) \dots\dots\dots (26)$$

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

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

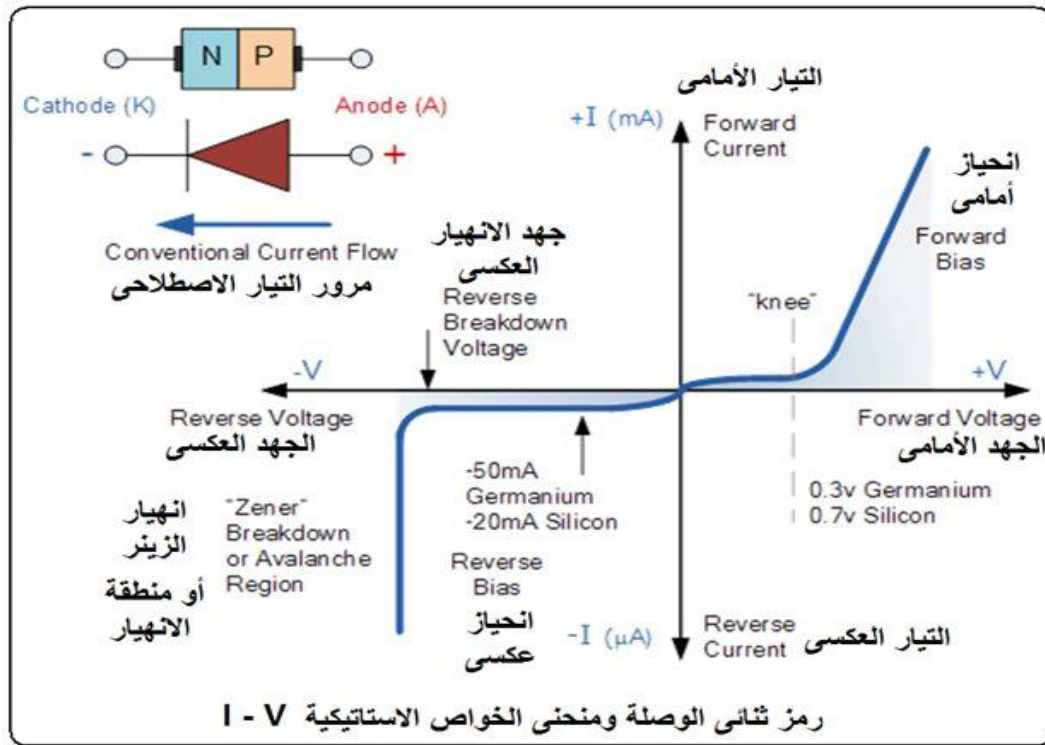
عند تسليط جهد انحياز عكسي V على وصلة ال PN فإن الجهد الحاجز يصبح عندئذ مساوياً $(V_B + V)$, وعند التعويض في معادلة (26) عن V بـ $(V_B + V)$ فإن الكمية $(e^{-V/(KT/e)} >> 1)$ سوف تكون صغيرة الى الحد الذي يمكن اهمالها اي ان:

$$I_R = I_S = -(B_h + B_e) \dots\dots\dots (27)$$

وبالتالي فإن معادلة الفولتية - التيار للثنائي البلوري تصبح بالشكل التالي:

$$I = I_S (e^{V/(KT/e)} - 1) \dots\dots\dots (28)$$

حيث تمثل (I_S) تيار الاشباع العكسي او تيار التسرب , الناتج عن حركة الازواج الكترون - فجوة المنتجة حرارياً . ويعود سبب ثبوت تيار الاشباع المعكوس 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 (7-3) منحنى التيار- الجهد للثنائي البلوري

● جهد الانهيار (Breakdown Voltage)

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

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

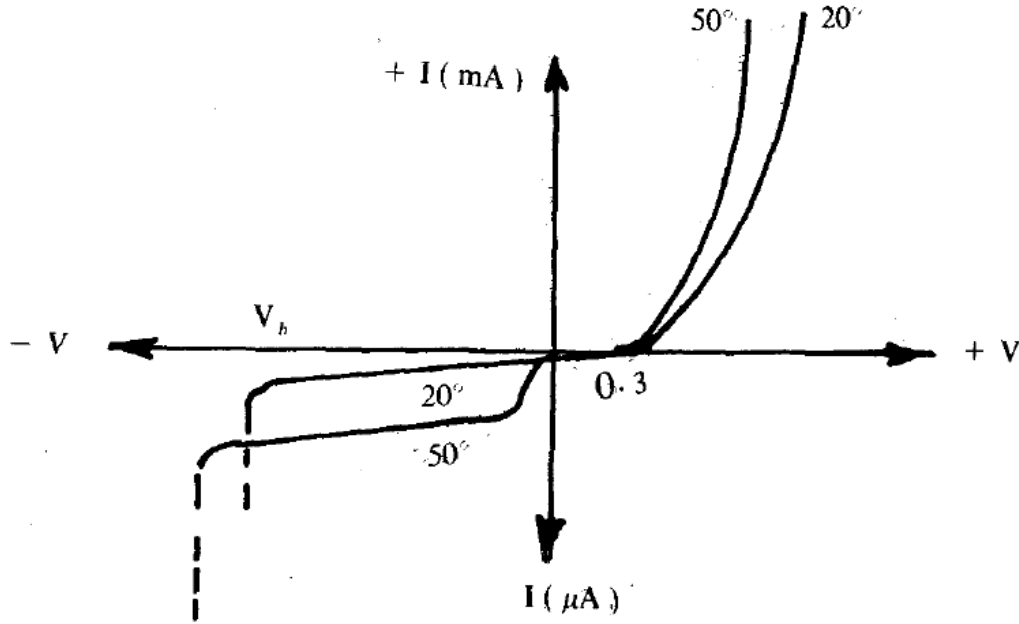
ان كل من الالكترونات والفجوات سوف تهرب مبتعدة عن الملتقى مخلقة وراءها ايونات موجبة وسالبة عند منطقة الاستنزاف وعليه فان الايونات الجديدة سوف تزيد من فرق الجهد على طبقة الاستنزاف وكلما زاد عرض طبقة الاستنزاف كبر فرق الجهد عبرها ويتوقف نمو طبقة الاستنزاف عندما يتساوى فرق جهدها مع الجهد الخارجي العكسي المسلط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

ولا يمكن زيادة الجهد العكسي الى الملائمة , وذلك لان الاستمرار في زيادة الفولتية العكسية سوف يؤدي الى زيادة شدة المجال الكهربائي عبر الوصلة بشكل كبير وبالتالي تتعجيل 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 مؤدياً 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 (3-8) منحنى (I-V) للثنائي البلوري عند درجتي حرارة مختلفتين لثنائي بلوري الجيرمانيوم.

يلاحظ من شكل (3-8) 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 (الواهة والقابلة) ولا علاقة له بدرجة الحرارة , الا ان رفع درجة الحرارة يزيد من تيار الاشباع I_S وبالتالي فان 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 (8-3) 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).

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

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

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

وعليه فإن 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. وذلك على النحو التالي: يتم تقريب المنحنى بين الفولتية $(0 \rightarrow 0.35) \text{ V}$ - مثلاً - بخط مستقيم, كما موضح بالخط الموضح OA في الشكل (9-3). وتكون العلاقة

بين الفولتية والتيار خطية لذلك بالامكان اعتبار الثنائي في المدى $V(0 \rightarrow 0.35)$ مقاومة تكون قيمتها تبعاً للشكل (9-3) مساوية لـ $(\frac{0.28}{0.006} = 47\Omega)$. وعلى هذا الاساس يعرف الخط المتقطع OA بالمقاومة الامامية المستمرة للثنائي (D.C forward resistance) ويرمز لها بالرمز r_F .

على اية حال, تمثل r_F مقاومة الثنائي عند نقطة واحدة وهي $(0.28V, 0.006A)$ ومن ثم فلي هذه المقاومة سوف تختلف من نقطة على المنحني الى نقطة اخرى. لذلك فان المقاومة من نوع $\frac{\Delta V}{\Delta I}$ ستكون أكثر اهمية لانها تمثل مقاومة الاشارة الصغيرة التي تربط بين التيار المتناوب والفولتية المتناوبة. فاذا كانت I_a تمثل القيمة الانية لتيار الانود و V_a تمثل القيمة الانية لفولتية الانود فأن:

$$r_f = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} \quad \text{or} \quad r_f = \frac{dV_a}{dI_a}$$

حيث تعرف r_f بمقاومة الثنائي الامامية الحركية (dynamic forward resistance) فاذا كانت V_a تتغير حول القيمة $0.28V$ فان المقاومة الحركية سوف تكون مساوية لانحدار الخط CD في الشكل (9-3) اي ان: $(r_f = \frac{0.1}{0.01} = 10\Omega)$.

$$I = I_S(e^{qV/KT} - 1)$$

كما يمكن حساب r_f من استخدام معادلة الثنائي:

$$\frac{dI}{dV} \approx \left(\frac{q}{KT}\right) I = \frac{1}{r_f}$$

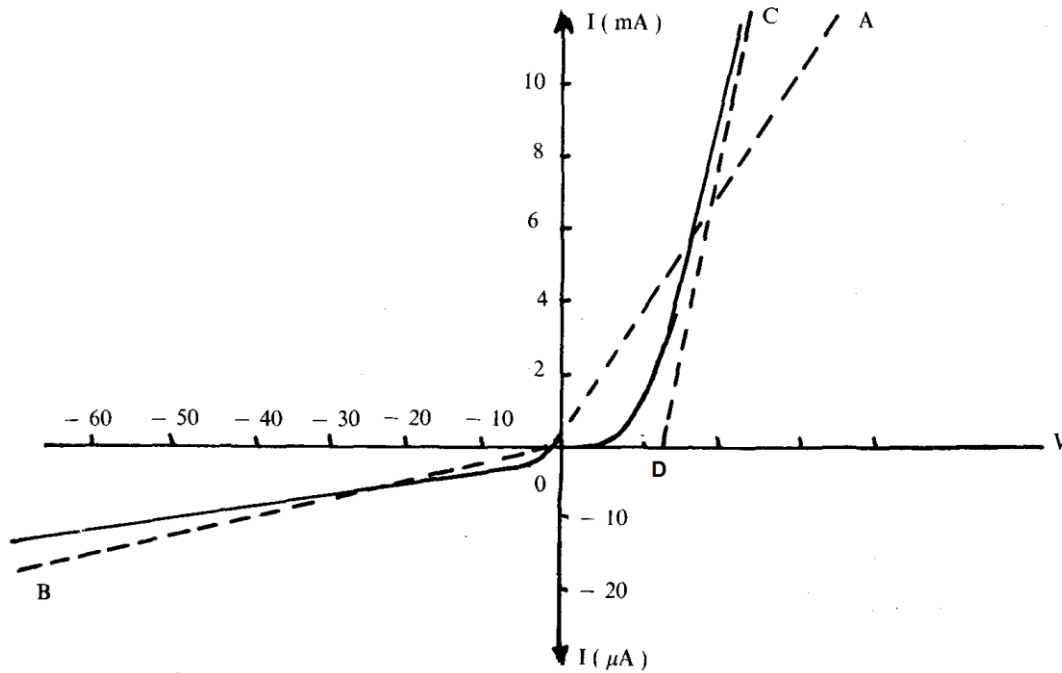
وذلك باخذ التفاضل لهذه المعادلة بالنسبة لـ V

$$r_f = \frac{KT}{qI} = \frac{0.026}{I} = \frac{26}{I(mA)}$$

لذا فأن:

$$r_f = \frac{26}{6} = 4.33\Omega$$

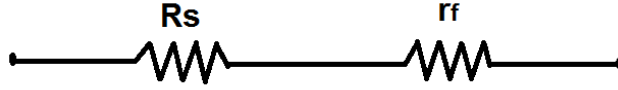
وعليه فان r_f سوف تكون في حال كون $I=6mA$ اظهر الشكل (9-3) تساوي:



شكل (9-3) حساب r_f العملية من منحني الخواص

ان المقاومة 10Ω تمثل القيمة العملية لمقاومة الثنائي المحسوبة بتقريب جيد اما المقاومة 4.33Ω فتمثل القيمة النظرية المحسوبة من معادلة الثنائي معادلة (28) . على الرغم من ان القيمة الثانية (4.33Ω) هي التي يفترض فيها ان تكون القيمة الفعلية الا ان القياسات العملية تشير الى القيمة الاولى (10Ω) هي القيمة الفعلية لمقاومة الثنائي , وعليه فأن مقاومة الثنائي تتكون من المقاومة النظرية r_f ومقاومة اخرى (R_S) مربوطة معها على التوالي كما في الشكل (10-3) بحيث تكون قيمة (R_S) تساوي:

$$(R_S) = 10 - 4.33 = 5.67\Omega$$

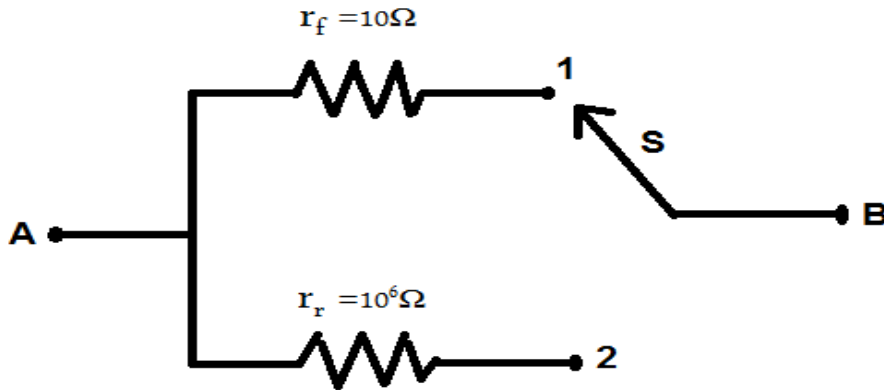


شكل (10-3)

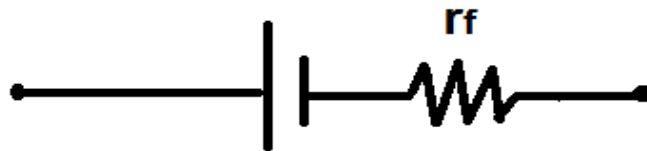
يمكن اعتبار الشكل (10-3) الدائرة المكافئة للثنائي البلوري المنحاز امامياً . ويمكن ايجاد الدائرة المكافئة للثنائي البلوري في حالة انحيازه عكسياً, بنفس الطريقة اعلاه حيث يتم تقريب منحني الانحياز العكسي في الشكل (9-3) بالخط OB اي ان:

$$(r_r = \frac{V_a}{I_a} = \frac{10}{10 \times 10^{-6}} = 1M\Omega)$$

وبالتالي فأن الدائرة المكافئة للثنائي البلوري في كلا الاتجاهين سوف تكون كما في الشكل (11-3). وعلى الرغم من ان الدائرة في الشكل (11-3) تعد تقريبا جيداً للدائرة المكافئة للثنائي البلوري الا انه يجب ان لا ننسى ان التيار لا يبدأ بالسريان في حالة الانحياز الامامي الا عندما تكون فولتية المصدر الخارجي مساوية لجهد العتبة او جهد الوصلة و الذي يساوي $0.7V$ للسليكون و $0.3V$ للجيرمانيوم, وبالتالي فأن الدائرة المكافئة التي تكشف عن السلوك الكهربائي للثنائي البلوري تكون كما في الشكل (12-3).



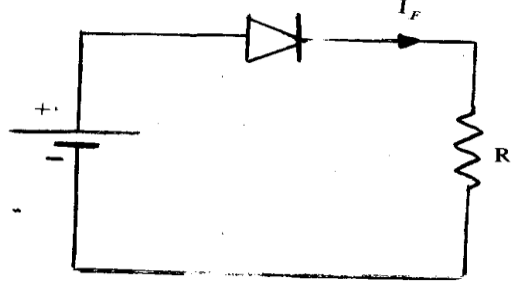
شكل (11-3) الدائرة المكافئة للثنائي البلوري في حالة الانحياز الامامي r_f وفي حالة الانحياز العكسي r_r



شكل (12-3) الدائرة المكافئة للثنائي المنحاز امامياً

● تحليل دائرة الثنائي: خط الحمل (Load – Line)

يبين الشكل (13-3) دائرة بسيطة واساسية من دوائر الثنائي وتتكون من مصدر فولتية خارجي V_S ومقاومة R مربوطة على التوالي مع الثنائي والطلب إيجاد قيمة التيار المار في المقاومة R او بعبارة اخرى التعرف على طبيعة ومقدار الفولتية الخارجة . وذلك باستخدام طريقة خط الحمل Load Line .



شكل (13-3) 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 إيجاد قيمة هذا التيار I_F وكذلك مقدار الهبوط في الجهد عبر الثنائي V_F .

$$V_S = V_F + V_L$$

من الشكل (13-3) يكون:

$$V_S = V_F + I_F R$$

على فرض ان التيار المار في الدائرة هو I_F فان:

$$V_F = V_S - I_F R \quad \dots\dots\dots (29)$$

تمثل المعادلة (29) 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

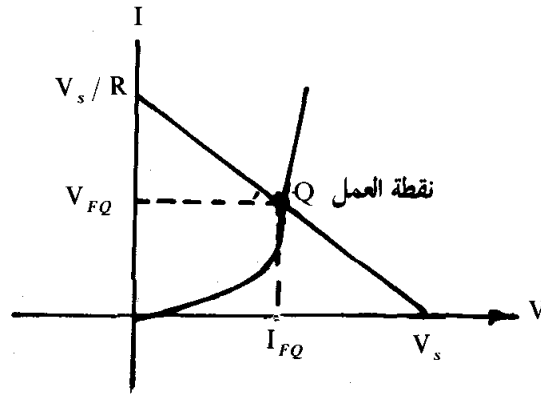
$$I_{F(max)} = \frac{V_S}{R} \quad \dots\dots\dots (30)$$

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

$$V_{F(max)} = V_S \quad \dots\dots\dots (31)$$

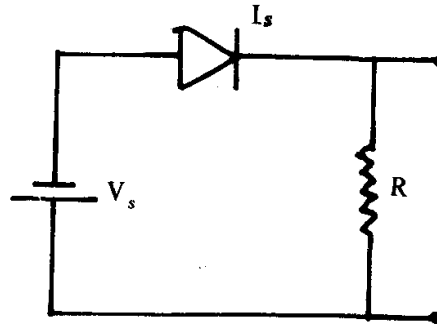
وبذلك تكون النقطة الثانية $(V_S, 0)$

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.

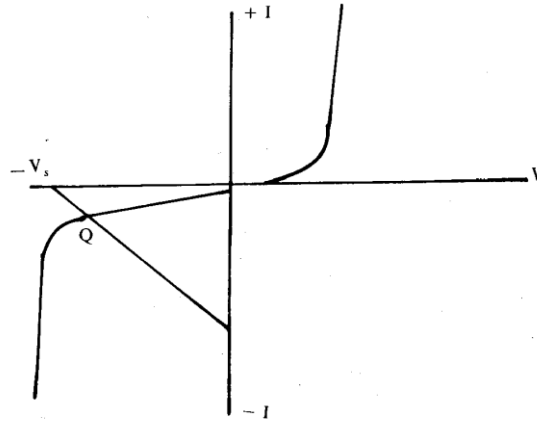


شكل (14-3) خط الحمل للثنائي البلوري

وباستخدام نفس الطريقة اعلاه يتم تحديد نقطة عمل الثنائي البلوري المنحاز عكسياً الموضح في الشكل (15-3). ويمثل الشكل (16-3) خط الحمل لهذه الدائرة



شكل (15-3) دائرة الثنائي المنحاز عكسياً



شكل (16-4) منحى الخواص مع خط الحمل للثنائي المنحاز عكسياً

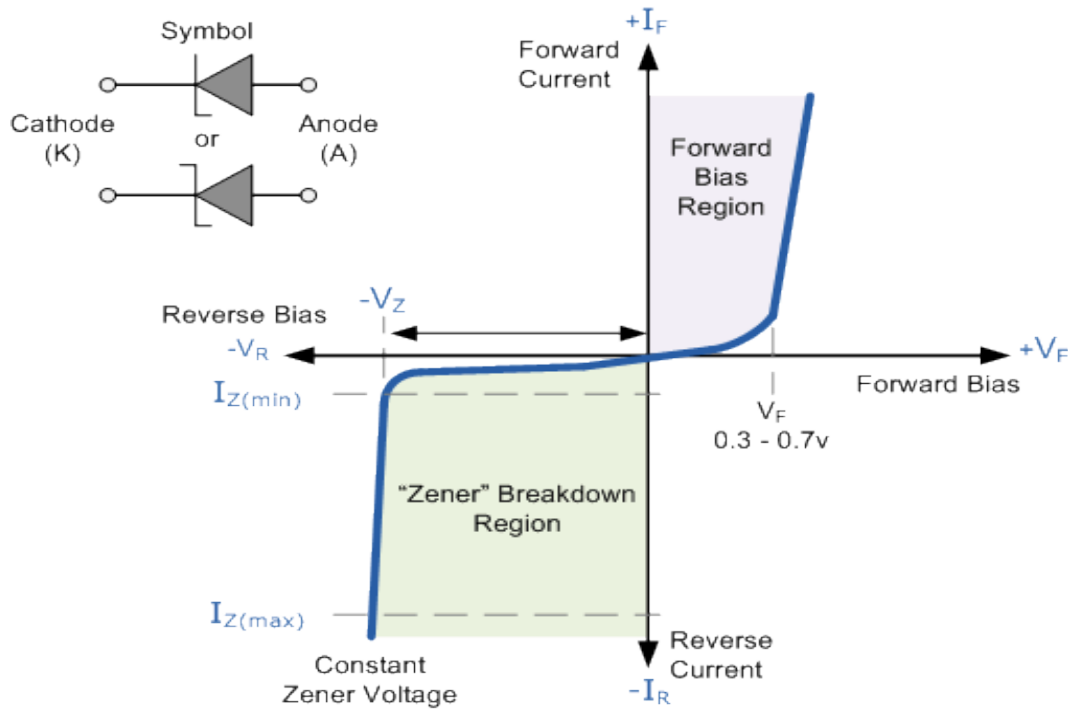
• ثنائي زنر (Zener Diode)

يحصل الانهيار التهديمي في جهود معكوسة عالية دائماً وهو ينتج من اصطدام الالكترونات السريعة وتحرير الكترونات من مدارها الخارجي وتكرار هذه العملية . الا عند تأين الاواصر التساهمية بسبب شدة المجال الكهربائي العالي جداً عبر الوصلة PN ذات الانحياز العكسي فإن هذه الظاهرة تدعى بتأثير زنر نسبة الى العالم زنر . فإذا كانت منطقة الافراغ ضيقة جداً فإن جهداً صغيراً

يكفي لتوليد شدة مجال كبيرة جداً عبر الوصلة PN (لان شدة المجال تساوي (V/d)), حيث V هو جهد بين طرفي الوصلة و d هو سمك منطقة الاستنزاف) مسبباً فصح الكترون من حزمة التكافؤ والذي سوف ينساب تحت تأثير هذا المجال الكهربائي وبذلك يزداد التيار المعكوس.

للحصول على منطقة استنزاف ضيقة فأن نسبة التشويب في المادتين P, N يجب ان تكون عالية. لان وجود تركيز عالي لحاملات الشحنة يجعلها متراخمة عندما تنتشر عبر الوصلة PN الى ان يصل فرق الجهد بين المنطقتين P, N الى جهد الوصلة V_B والذي يعتمد قيمته على نوع المادة فيحصل التوازن.

يجدر الاشارة بانه من الصعب التمييز بين تأثير زنر والتأثير التهدي وغالبا ما يكون ثنائي زنر مستفيداً من الخاصيتين معاً . يمثل الشكل (17-3) منحنى مميزة نموذجي لثنائي , وهو لا يختلف كثيراً عن الثنائي البلوري الا في حدة المنحنى عند منطقة الانهيار V_{BD} او V_Z . ويستخدم زنر في جهة الانحياز العكسي وبالضبط في منطقة الانهيار حيث يكون الجهد ثابتاً تقريباً لمدى كبير من التيار المار فيه والذي يجب السيطرة عليه لحماية الثنائي من التلف . يستعمل ثنائي زنر عادة في دوائر منظم الجهد (voltage regulator)

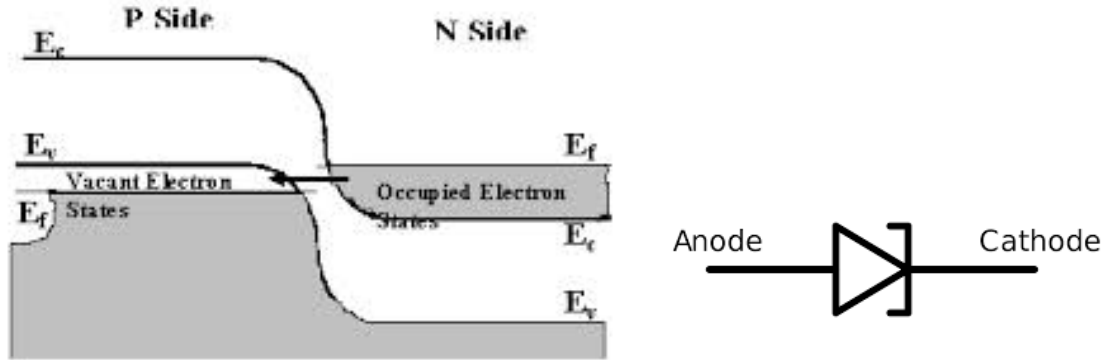


شكل (17-3) المنحنى المميزة لثنائي زنر

• ثنائي النفق (Tunnel Diode)

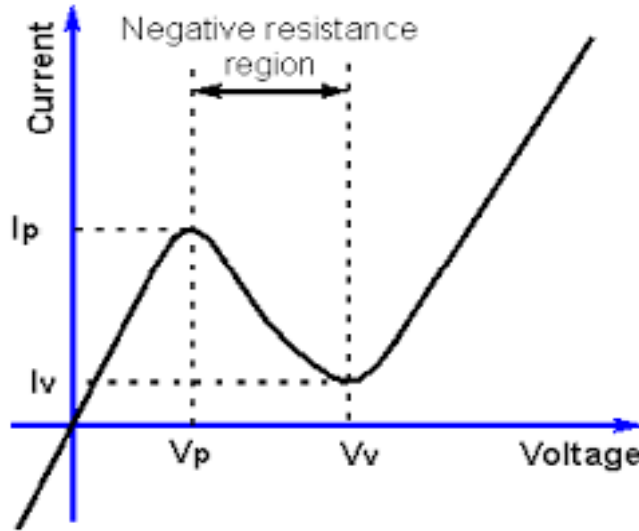
عند ازدياد مستوى تشويب المواد شبه الموصلة أكثر من ذلك المستخدم لثنائي زنر فأن جهد الانهيار المعكوس سيقبل تدريجياً حتى يصل الى الصفر, وعند زيادته أكثر الى حد ذوبان الشوائب في شبه الموصل ويحصل هذا عندما تكون نسبة التشويب أكثر من ذرة لكل 10000 ذرة من المادة شبه الموصلة وعندئذ يحصل انهيار قليل في الجهد الامامي.

ان نسبة التشويب العالية تؤدي الى تضيق عرض منطقة الاستنزاف الى اقل من $0.1 \mu m$ (اي حوالي خمس طول موجة الضوء المرئي). لذا فأن حاملات الشحنة الاغلبية يمكن ان تمر عبر منطقة الاستنزاف حتى عند عدم وجود اي انحياز كما يتضح من مخطط الطاقة المبين في الشكل (18-3) ويدعى هذا المرور بالمرور النفقي (tunneling).



شكل (18-3) مخطط احزمة الطاقة عند الانحياز صفر لثنائي النفق مع رمز الثنائي

يبين الشكل (19-3) نموذجاً لمنحنى مميزة ثنائي النفق . فعندما يكون جهد الانحياز بين 0 وجهد القمة (peak point voltage) V_p الى جهد نقطة الوادي (valley point voltage) V_v يتحول مرور حاملات الشحنة من المرور النفقي الى المرور التقليدي خلال الوصلة PN تدريجياً. واخيراً عندما يتجاوز جهد الانحياز القيمة V_v فأن التوصيل يتبع كلياً مميزات وصلة PN التقليدي.



شكل (19-3) منحنى المميزات لثنائي النفق

ان الخاصية المهمة التي تميز ثنائي النفق هي المقاومة السالبة التي يبدئها في المنطقة المحصورة بين V_p و V_v من منحنى مميزته حيث يقل التيار المار فيه مع زيادة فرق الجهد بين طرفيه . تمر حاملات الشحنة النفقية بسرعة عالية جداً وتقترب من سرعة الضوء ولذلك فإنه يعتبر من الاجهزة السريعة حيث تصل سرعة عمله اذا استخدم كفتاح في الدوائر الالكترونية الى (1 ns) او اقل. ويعمل في مدى حراري واسع وبالتحديد من 265 درجة مئوية الى عدة مئات من الدرجات المئوية.

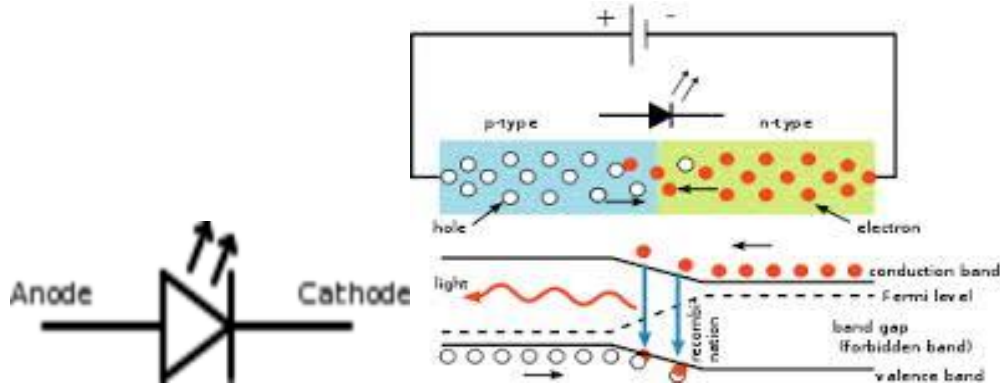
• الثنائي الباعث للضوء LED (Light Emitting Diode)

ان هذا الثنائي هو حالة خاصة من ثنائي الوصلة , حيث يتم اختيار المادة التي يصنع منها الثنائي بطريقة خاصة لتحقيق الشرط التالي:-

عند وضع جهد انحياز امامي على الوصلة PN تندفع الالكترونات من المادة نوع N والفجوات من المادة نوع P عبر منطقة الافراغ ويتم التلامح مكوناً التيار . ويلتحم كل الكترون مع الفجوة بطرق عديدة عبر منطقة الافراغ . وعند هذا التلامح تتحرر طاقة من الالكترونات لنزوله الى مستويات طاقة اوطأ . وتكون الطاقة المنبعثة على شكل حرارة . الا ان قسماً من هذه الطاقة قد ينبعث على شكل ضوء اذا كان طول موجة الطاقة المنبعثة ضمن الطيف المرئي . وقد تطورت هذه الفكرة واصبح بالامكان صنع ثنائيات باعثة للضوء ذات كفاءة جيدة ووجد ان طول موجة الضوء المنبعث تعتمد على عرض المنطقة المحظورة حسب العلاقة:

$$\lambda = \frac{1240}{E_g} \text{ nm}$$

ومن الامثلة على ذلك فأن ثنائي GaAs الذي عرض المنطقة المحظورة له تساوي 1.3eV ويبعث الضوء الاحمر الغامق الذي طول موجته $\lambda = 910 \text{ nm}$ وكذلك ثنائي GaP الذي عرض المنطقة المحظورة له يساوي 2.25eV, يبعث الضوء الاخضر ذو طول موجة $\lambda = 560 \text{ nm}$.



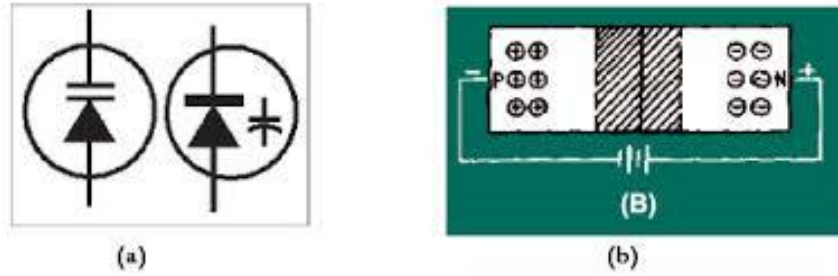
شكل (20-3) مخطط حزم الطاقة ورمز الثنائي الباعث للضوء

ثنائي المتسعة المتغيرة (Varactor)(Variable Capacitor Diode)

عند وضع ثنائي الوصلة PN تحت انحياز عكسي تتكون منطقة الاستنزاف وهي ذات مقاومة عالية بين المادتين شبه الموصلة وبذلك ستكون الوصلة PN بمثابة متسعة وفيها تكون المنطقتين N, P بمثابة الصفيحتين ومنطقة الاستنزاف تمثل المادة العازلة بينهما كما في الشكل (b-21-3) وبما ان سمك منطقة الافراغ يعتمد على جهد الانحياز المعكوس V_{rev} وان سعة المتسعة C_T تتناسب عكسياً مع سمك منطقة الاستنزاف d فيكون:

$$C_T \propto \frac{1}{d} , \quad C_T = \frac{1}{V_{rev}}$$

ولذلك فأن السعة تتناسب عكسياً مع جهد الانحياز المعكوس



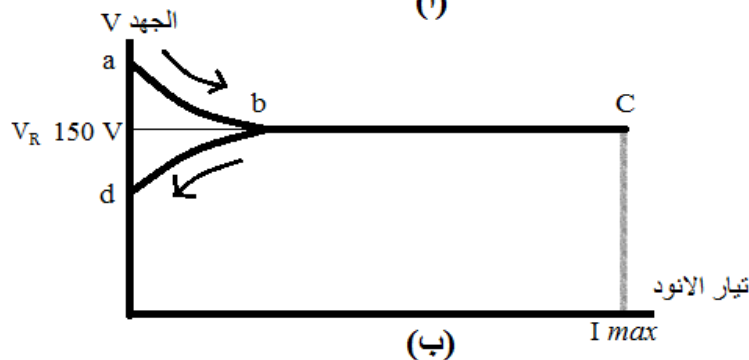
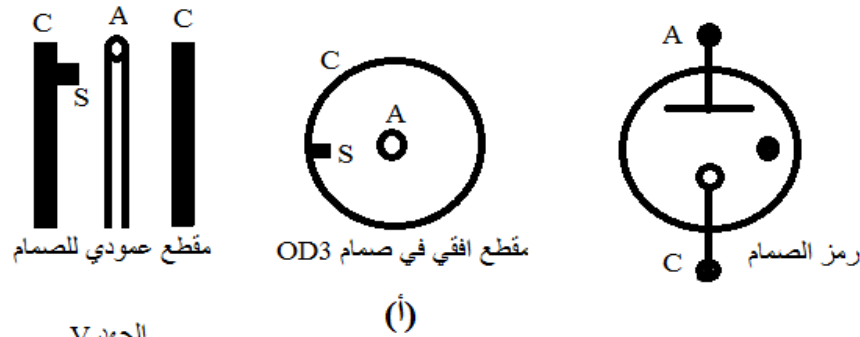
شكل (21-3) رمز وتركيب ثنائي المتسعة المتغيرة

يستخدم ثنائي السعة المتغيرة في دوائر الرنين (resonance circuits) التي تتم فيها السيطرة على التردد بواسطة الجهد.

صمام الكاثود البارد (Cold Cathode Diode) او منظم الجهد (Voltage Regulator-VR Tube)

يتركب هذا الصمام من انود وكاثود كما في الشكل (22-3-أ) موضوعين داخل انبوب فيه غاز خامل . ويكون الانود عبارة عن انبوب رفيع في مركز الصمام ويحيط الكاثود به بشكل اسطواني وفي الكاثود نتوء صغير الى الداخل.

عند وضع فرق جهد بين الكاثود والانود لا يمر تيار في الصمام وذلك لعدم انبعاث الالكترونات من اي قطب ولكن عندما يصل الجهد الى V_a انظر الشكل (22-3-ب) يبدأ وهج مرئي قرب النتوء S عند الجهد V_a . اي يبدأ الغاز بالتأين عندها. فيهبط الجهد قليلاً الى V_b وذلك لانخفاض مقاومة الغاز عند تأينه. وعن زيادة التيار يبقى الجهد ثابتاً لغاية النقطة C حيث عندها يكون التوهج قد ملأ الصمام بأكمله . اي ان الغاز جميعه قد تأين فيثبت التيار عند زيادة الجهد الى ان يرتفع الى الحد الذي يحصل فيه تأين مضاعف للغاز. ولكن في معظم التطبيقات العملية يكفني بثوت التيار الى حد النقطة C. عند تخفيف الجهد من المصدر يقل التيار في الصمام تدريجياً من النقطة C الى النقطة b دون تغيير في فرق الجهد بين الانود والكاثود ويقل التوهج تدريجياً ثم يهبط التيار والجهد الى النقطة d حيث يختفي التوهج نهائياً.

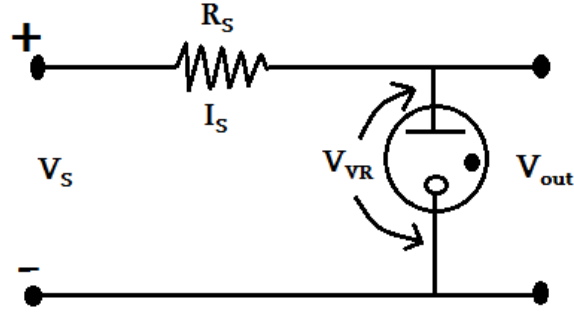


شكل (22-3) أ- مقاطع في صمام الكاثود البارد OD3 ب- مميزة صمام الكاثود البارد

ونظراً لشبوت الجهد لمدى كبير من التيار فإن الصمام ذو الكاثود البارد يستخدم في دوائر تنظيم الجهد بنفس الطريقة التي استخدم فيها ثنائي زنر كما في الدائرة الموضحة في الشكل (3-23) وتوضع في الدائرة مقاومة R_s على التوالي مع الصمام لحماية من مرور تيار كهربائي عالي وتحسب قيمتها من العلاقة:

$$R_s = \frac{V_s - V_{VR}}{I_{max}}$$

ومن الصمامات التجارية المشهورة هو الصمام OD3 والذي له جهد تنظيم V_{VR} ويساوي 150V.



شكل (3-23) منظم الجهد