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.

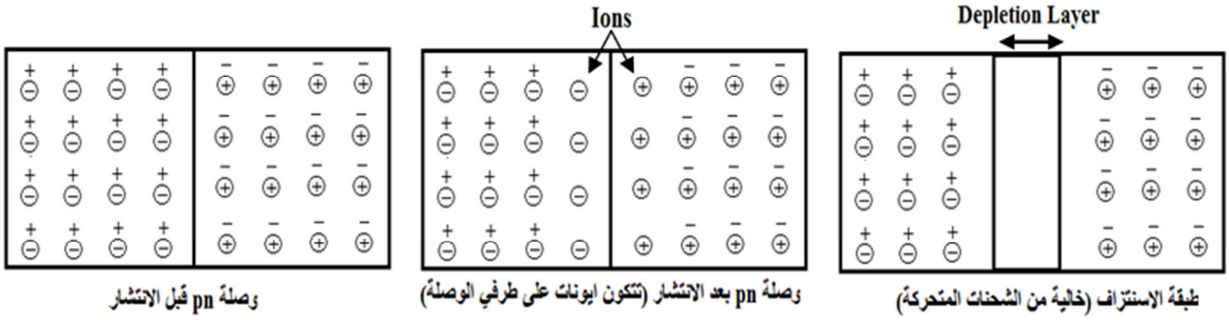
١.٢ تكوين وصلة pn (pn-Junction):

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).

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 ، 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 ايون سالب بينما الذرة (خماسية التكافؤ) التي قدم منها (في جهة N) تتحول إلى ايون موجب.

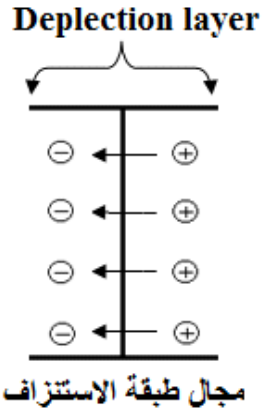
في كل مرة ينتشر الكترون ما عبر الوصلة ينتج زوجاً من الأيونات (على طرفي الوصلة) والتي تكون ثابتة في التركيب البلوري بسبب الربط التساهمي وهي بذلك لا تستطيع التحرك كما تفعل الإلكترونات الحرة أو الفجوات. ان كل زوج متكون من ايون موجب وسالب يدعى ثنائي قطب (dipole) ووجود ثنائي قطب يعني ان الكترون واحد من الكترونات 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 (٢-١) 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 ٢-١: مخطط لوصلة pn قبل وبعد الانتشار وتكوين طبقة الاستنزاف

٢.٢ جهد الحاجز (Barrier Potential) وحسابه



شكل ٢-٢: مخطط لمجال طبقة الاستنزاف

في لحظة تكوين وصلة pn فان انتقال الإلكترونات من جهة N إلى جهة P يولد أيونات موجبة وسالبة على طرفي الوصلة (ثنائي قطب) والتي بدورها تولد مجال كهربائي يعاكس اتجاه حركة الإلكترونات، ويزداد ذلك المجال بزيادة عدد الإلكترونات المنتقلة إلى ان تصبح قيمة المجال من الكبر بحيث تمنع انتقال أي الكترونات إضافية عبر الوصلة فيحدث الاتزان وكما هو موضح بالشكل (٢-٢).

ان المجال المتولد على طرفي طبقة الاستنزاف والتي تكون عادة بسمك عدة مايكرومترات يكافئ فرق جهد كهربائي (**E=V/d**) والذي يزداد تدريجياً إلى ان يصل إلى اعظم قيمة له عند الاتزان ويسمى عندها بجهد الحاجز (Barrier Potential) ويرمز له بالرمز (V_J) أو (V_B). يعتمد مقدار جهد الحاجز على كل من طبيعة شبه الموصل النقي (السليكون أو الجرمانيوم)، نسبة التشويب المعتمدة عند تطعيم جهة N و P ودرجة الحرارة. فمثلاً جهد الحاجز في درجة حرارة الغرفة تكون بحدود (0.7V) للوصلة المصنوعة من السليكون بينما تكون بحدود (0.3V) للوصلة المصنوعة من الجرمانيوم.

يمكن حساب جهد الحاجز لأي وصلة باستعمال المعادلة (٢-١):

$$V_B = \frac{kT}{q}\ln(\frac{N_d N_a}{n_i^2}) \qquad (2-1)$$

حيث k ثابت بولتزمان

T درجة الحرارة بالكلفن

q شحنة الإلكترون

N_d تركيز الواهبات (عدد ذرات الشائبة الخماسية المضافة لوحدة الحجوم)

N_a تركيز القابلات (عدد ذرات الشائبة الثلاثية المضافة لوحدة الحجوم)

n_i تركيز حاملات الشحنة في شبه الموصل النقي عند درجة الحرارة المعنية (الناتجة من عمليات تولد زوج الكترون–فجوة)، في درجة حرارة الغرفة تكون قيمته بحدود ($1.45X10^{10}cm^{-3}$) للسليكون، بينما تكون بحدود ($2.4X10^{13}cm^{-3}$) للجرمانيوم.

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:

$$V_B = \frac{kT}{q}\ln(\frac{N_d N_a}{n_i^2}) \quad ,T=300K, q=1.6\times10^{-19}C, k=1.38\times10^{-23}J/K$$

$$V_B = \frac{(1.38\times10^{-23})\times300}{1.6\times10^{-19}}\ln[\frac{(10^{15})\times(10^{18})}{(1.45\times10^{10})^2}]$$

$$V_B = 258.75\times10^{-4}\ln[\frac{10^{33}}{2.1025\times10^{20}}]$$

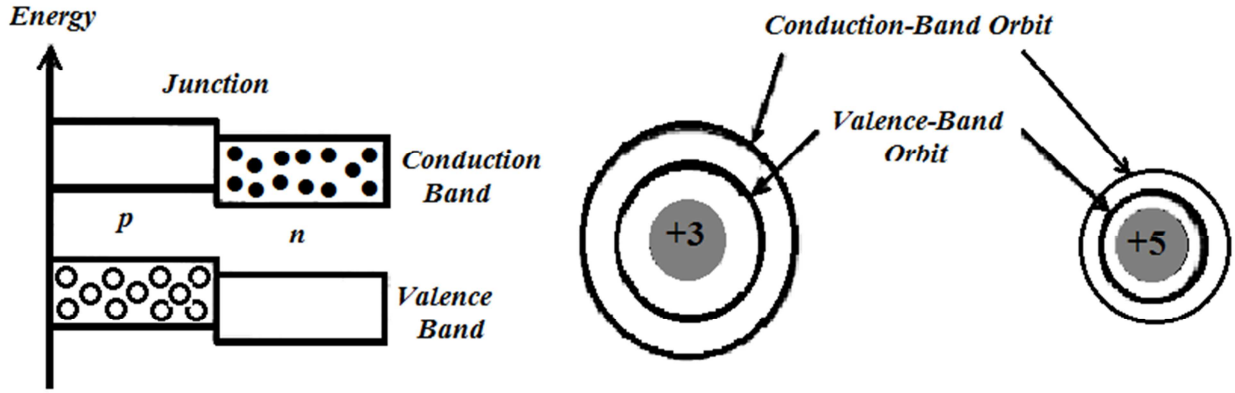
$$V_B = 0.025875\times\ln[4.756\times10^{12}]$$

$$V_B = 0.7553V$$

٣.٢ 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 (٢-٣) 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 .

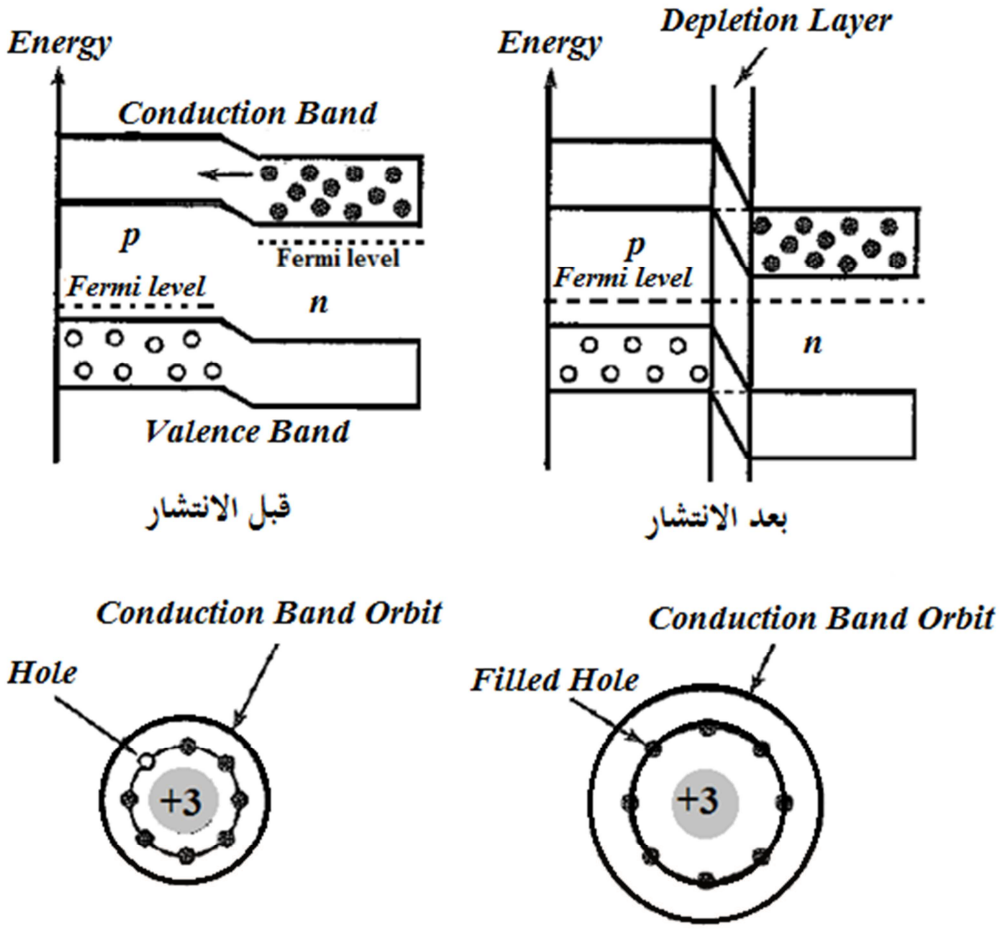


شكل (٢-٣) مخطط مستويات الطاقة لوصلة فجائية

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 (٢-٤) 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 اي الكترون آخر يأتي إلى منطقة p يحتاج إلى طاقة اكبر من السابق ليدخل إلى مدار نطاق التوصيل، .



شكل ٢–٤: مخطط حزم الطاقة لوصلة pn قبل وبعد الانتشار

بعد الاتزان لا يمتلك اي 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 .

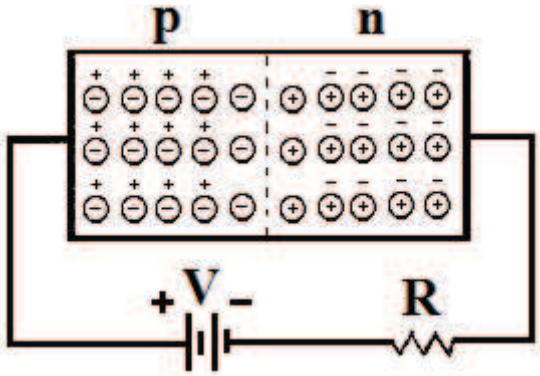
يلاحظ من الشكل (٢–٤) أيضا انه وبسبب ارتفاع حزم طاقة جهة p بالمقارنة من حزم طاقة جهة n فان مستوى فيرمي يتخذ موضعه على شكل خط مستوى طاقة واحد للجهتين وذلك بعد الوصول إلى حالة الاتزان.

٤.٢ وصلة pn في حالة الانحياز

ناقشنا في الفقرات السابقة تكوين الوصلة وخصائصها بداية من بدأ انتشار حاملات الشحنة عبر الوصلة وصولاً لحالة الاتزان، وهذه العمليات تحدث عند تصنيع الثنائي ويبقى الثنائي محافظاً على خصائصه عند الاتزان ما لم يسلط على طرفيه جهد كهربائي ويسمى الثنائي عندها بغير المنحاز (Unbiased)، غير ان تلك الثنائيات صُنعت لكي تستعمل في دوائر الكترونية وعندها فلا بد ان تكون تحت تأثير فولتيات خارجية تعمل على تحييزها، وهناك نوعان من الانحياز هما:

١- الانحياز الأمامي (Forward Bias):

عند ربط مصدر جهد مستمر (بطارية) على طرفي الثنائي، بحيث يكون القطب الموجب متصل بالجهة P والقطب السالب بالجهة N فان الثنائي يكون منحاز أماميا (Forward Bias) كما موضح بالشكل (٢-٥).

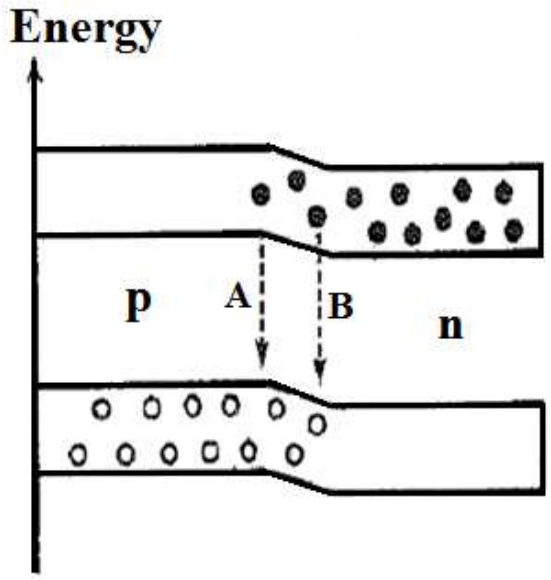


شكل ٢-٥: وصلة pn في حالة الانحياز الأمامي

تعمل البطارية على دفع الفجوات والإلكترونات الحرة باتجاه الوصلة، اذا كان جهد اقل من جهد الحاجز للوصلة فان الإلكترونات الحرة لا تمتلك الطاقة الكافية لعبور طبقة الاستنزاف، حيث تتمكن الأيونات الموجودة في طبقة الاستنزاف من دفعها لتعيدها مرة ثانية لمنطقة n، ونتيجة لذلك لن يكون هناك تيار يمر في الوصلة.

عندما تكون الفولتية الأمامية المسلطة اكبر من جهد الحاجز، يقوم جهد البطارية بدفع الإلكترونات الحرة باتجاه الوصلة ، في هذه المرة فان الإلكترونات الحرة سيكون لها الطاقة الكافية لعبور طبقة الاستنزاف لتنتقل إلى جهة p لتعيد التحامها مع احدى فجواتها ليتحول إلى الكترون تكافؤي ويكمل طريقه من فجوة لأخرى إلى ان تصل للجهة الثانية من البلورة وعند انتقالها للقطب الموجب للبطارية تترك في محلها فجوة لتتكرر العملية مرة ثانية، وحيث ان لدينا مليارات الإلكترونات تمر بنفس العملية يتكون لدينا تيار أمامي مستمر يمر عبر الثنائي، مقاومة التوالي التي تظهر في الدائرة (الشكل السابق) وضعت لتحديد مقدار التيار المار في الثنائي وذلك لتجنب ان يمر تيار اكثر من تحمل الثنائي حيث ان لكل ثنائي حد اقصى للتيار يمكن ان يتحمله.

ان الانحياز الأمامي يعمل على التقليل من عرض طبقة الاستنزاف، وكلما زاد جهد الانحياز الأمامي قل عرض طبقة الاستنزاف.



شكل ٢–٦: تأثير الانحياز الأمامي على حزم الطاقة للوصلة

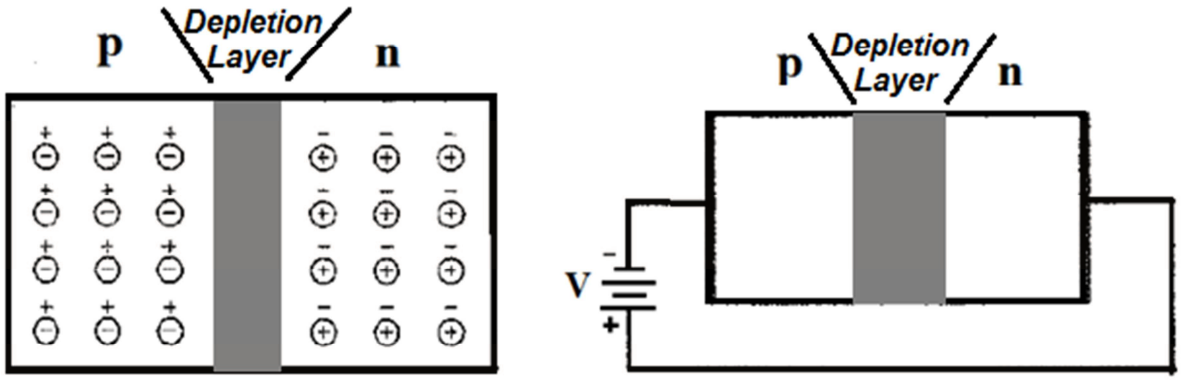
الشكل (٢–٦) يوضح تأثير الانحياز الأمامي على حزم الطاقة للوصلة. نلاحظ من الشكل ان الانحياز الأمامي يقلل من تل الطاقة وبتعبير آخر ان جهد البطارية يزيد من مستويات الطاقة للإلكترونات الحرة وهذا يقابله ارتفاع لمستويات حزم الطاقة لجهة n، ونتيجة لذلك فان الإلكترونات الحرة ستمتلك الطاقة الكافية للانتقال إلى الجهة p، وحال دخولها فانها ستسقط في الفجوات (المسار A) وتتحول إلى الكترونات تكافؤ، وتستمر في حركتها من فجوة لأخرى إلى ان تصل إلى الجهة المقابلة للبلورة، وهذا يكافئ حركة الفجوات باتجاه الوصلة (عكس اتجاه حركة الكترونات التكافؤ).

بعض الفجوات تتمكن من الوصول إلى الجهة n عبر الوصلة، وفي هذه الحالة فانها ستلتحم مع الكترونات التوصيل (المسار B). وبصرف النظر عن مكان حدوث إعادة الالتحام بين الكترونات التوصيل والفجوات، فان النتيجة تكون واحدة وهي سيل ثابت من الكترونات حزمة التوصيل تتحرك باتجاه الوصلة لتسقط في الفجوات بالقرب منها، وتلك الإلكترونات الساقطة (والتي أصبحت الكترونات تكافؤ) تتحرك إلى الجهة المقابلة بسيل ثابت خلال الفجوات في المنطقة P وبهذه الطريقة نحصل على تدفق مستمر من الإلكترونات (تيار) خلال الثنائي.

عند انتقال الإلكترونات الحرة من حزمة التوصيل إلى حزمة التكافؤ فانها تبعث طاقة تعادل فرق الطاقة بين المستويين بشكل حرارة أو إشعاع كهرومغناطيسي، في الثنائي العادي فان الطاقة المنبعثة تكون على شكل طاقة حرارية غير مفيدة، بينما الأمر مختلف في الثنائيات الباعثة للضوء (LED) حيث تكون الطاقة المنبعثة على شكل إشعاع كهرومغناطيسي مرئي (احمر، اخضر، اصفر، ابيض) أو غير مرئي (تحت الحمراء) ولمثل هذه الثنائيات استعمالات واسعة في التطبيقات الإلكترونية (إنارة، شاشات عرض وغيرها من التطبيقات) وسوف نأتي على هذا النوع من الثنائيات في الفصل الثالث.

٢- الانحياز العكسي (Reverse Bias):

الشكل (٢-٧) يمثل ثنائي شبه موصل في حالة انحياز عكسي حيث يربط القطب السالب من البطارية بالجهة p للثنائي بينما القطب الموجب للبطارية يربط بالجهة n.



شكل ٢-٧: مخطط لوصلة pn في حالة الانحياز العكسي

ان الطرف السالب للبطارية سوف يعمل على جذب الفجوات باتجاهه وكذلك الطرف الموجب يقوم على جذب الإلكترونات الحرة باتجاهه، ونتيجة لذلك سوف تبتعد الفجوات والإلكترونات الحرة عن الوصلة، تُخلف الإلكترونات الهاربة وراءها أيونات موجبة، وتُخلف الفجوات المغادرة أيونات سالبة. لهذا السبب تتوسع طبقة الاستنزاف (يزداد عرضها) وكلما زاد جهد الانحياز العكسي زاد عرض طبقة الاستنزاف. ان الأيونات الجديدة تزيد من فرق الجهد على طبقة الاستنزاف. وكلما زاد عرض طبقة الاستنزاف كبر فرق الجهد، ويتوقف نمو طبقة الاستنزاف عندما يتساوى فرق جهد الوصلة مع فولتية التحييز العكسية المسلطة.

في حالة الانحياز العكسي هناك عدة ثلاث أنواع رئيسية من التيار المار عبر الثنائي وهي:

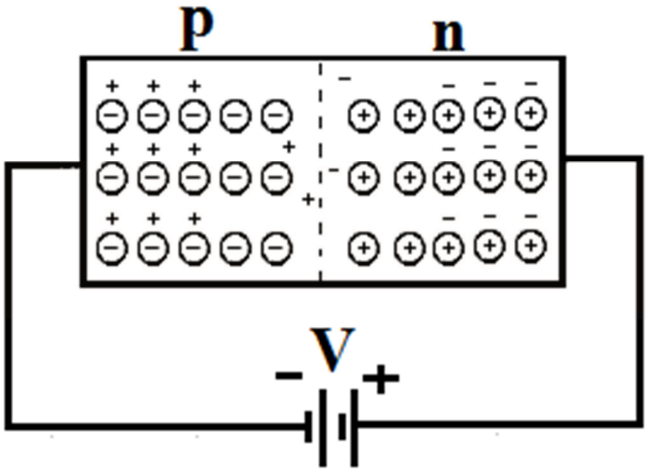
أ- تيار العبور الزائل (Transient Current):

وهو تيار مؤقت يجري في الدائرة الخارجية للوصلة أثناء توسع طبقة الاستنزاف عند الانحياز العكسي، ويتوقف سريان التيار عند توقف توسع طبقة الاستنزاف، ومدته قصيرة جداً إذ يستغرق عادة بضع نانو ثانية. ويمكن تجاهل تأثيرها عملياً عند العمل ضمن ترددات اقل من (10MHz).

ب - تيار التشبع العكسي (Reverse Saturation Current):

وهو تيار صغير ينتج عن حاملات الشحنة الأقلية المتولدة حرارياً (الإلكترونات الحرة في جهة p والفجوات في جهة n) ويرمز له بالرمز (I_S). ان الإلكترونات الحرة والفجوات المتولدة على جهتي الوصلة غالباً ما يُعاد التحامها مع حاملات الشحنة الأكثرية المتواجدة في جهتها، غير ان حاملات الشحنة الأقلية

المتولدة داخل طبقة الاستنزاف يكون لها زمن بقاء اكبر مما يمكنها من عبور طبقة الاستنزاف، ونتيجة لذلك يتولد تيار ضعيف يمر عبر الدائرة الخارجية، وكما هو موضح بالشكل (٢–٨).



شكل ٢–٨: تيار التشبع العكسي لوصلة pn

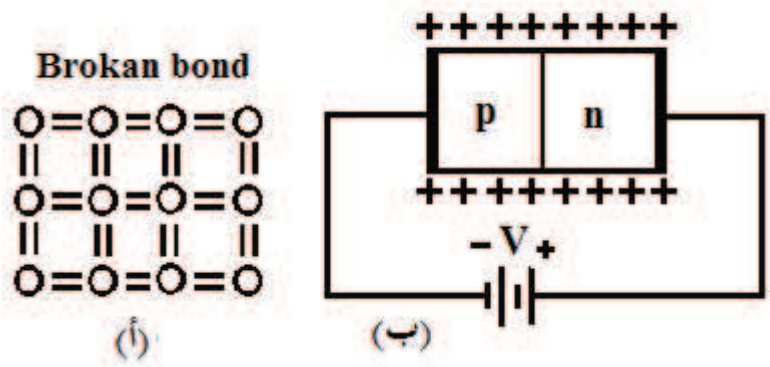
ان تيار التشبع العكسي لا يعتمد على قيمة الجهد العكسي المسلط لان زيادة الجهد العكسي المسلط لا يودي إلى زيادة حاملات الشحنة الأقلية الناتجة عن الحرارة. ان الطاقة الحرارية هي التي تنتج تيار التشبع العكسي، وكلما زادت درجة الحرارة زاد مقدار تيار التشبع العكسي.

ان الطاقة الحرارية تنتج حاملات اقليه في الثنائيات المصنوعة من السليكون بأعداد اقل مما تنتج في الثنائيات المصنوعة من الجرمانيوم (وذلك لكون فجوة الطاقة للسليكون اكبر من فجوة الطاقة للجرمانيوم)، وبعبارة أخرى فان قيمة تيار التشبع العكسي في ثنائي السليكون سيكون أقل بكثير عنه في ثنائي الجرمانيوم، وهذه الميزة المهمة هي احد الأسباب التي جعلته يسود مجال اشباه الموصلات.

لقد وجد عملياً ان قيمة تيار التشبع العكسي للثنائيات المصنوعة من السليكون تتضاعف تقريباً مع كل زيادة في درجة الحرارة قدرها (10^oC). فعلى سبيل المثال لو كان تيار التشبع العكسي (I_S) يساوي (5nA) عند (25^oC) فانه يساوي (10nA) تقريباً عند (35^oC) و (20nA) عند (45^oC) و (40nA) عند (55^oC) وهكذا. اما بخصوص الثنائيات المصنوعة من الجرمانيوم فانها تتضاعف مرتين تقريباً عند زيادة درجة الحرارة عشر درجات.

جـ – تيار التسرب السطحي (Surface-Leakage Current)

وهو تيار ضعيف ناتج عن عدم اكتمال الاواصر التساهمية على سطح البلورة والشوائب الموجودة عليه، كما هو موضح بالشكل (٢–٩).



شكل ٢–٩: تيار التسرب السطحي لوصلة pn

على فرض ان الذرات الموجودة في قمة وقعر الشكل (٢–٩) (أ) هي ذرات على سطح البلورة، نلاحظ ان لتلك الذرات فقط ثلاث ذرات جوار، ولذلك فهي تمتلك فقط ست الكترونات في غلافها التكافؤي وينتج عن ذلك فجوتان لكل ذرة واقعة على السطح، وبانتشار تلك الفجوات على سطح البلورة يظهر سطح البلورة قد تغطى بطبقة رقيقة من مادة شبه موصل من النوع p ، ان تلك الطبقة الرقيقة على السطح ستمكن بعض الإلكترونات من ان تمر عبرها إلى طرف الثاني للبلورة. وينتج عن ذلك سريان تيار صغير على امتداد سطح الثنائي. ويعتمد مقدار تيار التسرب السطحي بصورة مباشرة على الجهد العكسي المسلط كما موضح بالشكل (٢–٩) (أ)، فعلى سبيل المثال اذا تضاعف مقدار الجهد العكسي فان قيمة تيار التسرب السطحي يتضاعف كذلك.

تعرف مقاومة التسرب السطحي R_{SL} (Surface-Leakage Resistance) بالصيغة:

$$R_{SL} = \frac{V_R}{I_{SL}} \qquad (2-2)$$

حيث V_R هو قيمة الجهد العكسي المسلط.

I_{SL} هو قيمة تيار التسرب السطحي.

مثال (٢–٢): اذا كانت قيمة التيار السطحي هو (2 nA) لجهد عكسي مقداره (25 V)، اوجد قيمة تيار التسرب السطحي عند جهد عكسي مقداره (35 V) ؟

الحل:

نجد اولاً قيمة مقاومة التسرب السطحي باستعمال العلاقة:

$$R_{SL} = \frac{V_R}{I_{SL}}$$

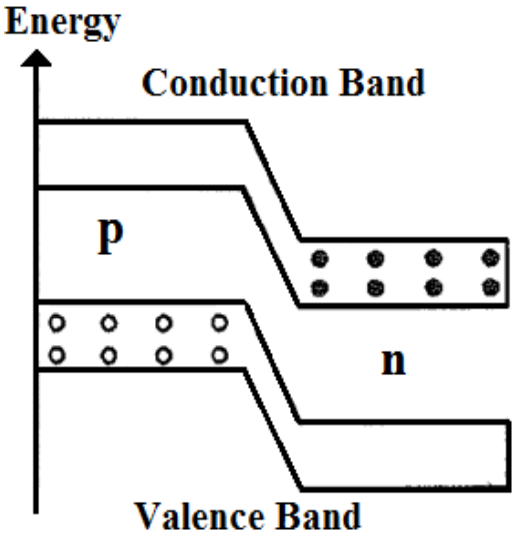
$$R_{SL} = \frac{25V}{2\times10^{-9}\,A} = 12.5\times10^{9}\,\Omega$$

وبعدها يمكننا ان نحسب قيمة تيار التسرب السطحي عند جهد عكسي مقداره (35V) كالتالي:

$$I_{SL} = \frac{V_R}{R_{SL}}$$

$$I_{SL} = \frac{35V}{12.5\times10^{9}\,\Omega} = 2.8\times10^{-9}\,A = 2.8nA$$

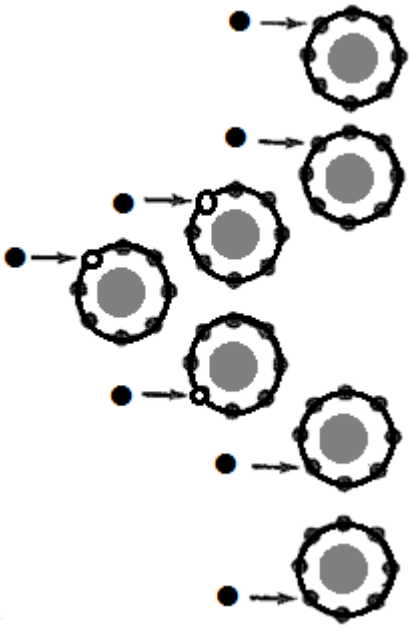
بخصوص حزم الطاقة فان الانحياز العكسي يعمل على زيادة تل الطاقة كما موضح بالشكل (٢-١٠). بشكل عام يكون التيار حاملات الشحنة الأقلية المار في ثنائي شبه الموصل صغير جداً في حالة الانحياز العكسي، غير ان هناك حد اقصى للفولتية العكسية التي يمكن ان يتحملها الثنائي قبل ان يتلف، إذ انه باستمرار زيادة الجهد العكسي المسلط على الثنائي فانه سنصل إلى حد تنهار فيه مقاومة الثنائي العكسية وتسمى تلك الفولتية بفولتية الانهيار (Breakdown Voltage).



شكل ٢-١٠: تأثير الانحياز الأمامي على حزم الطاقة للوصلة

للثنائيات الاعتيادية (ثنائيات التقويم) تكون فولتية الانهيار اكبر من (50V) ، ولكل ثنائي فولتية انهيار خاصة به وتكون مدونة في قائمة المميزات الخاصة به. عند الوصول إلى فولتية الانهيار تظهر فجأة اعداد كبيرة من حاملات الشحنة الاقلية في طبقة الاستنزاف وتزداد توصيلة الثنائي (تنهار المقاومة العكسية)، وفيما يلي شرح لكيفية حدوث عملية الانهيار:

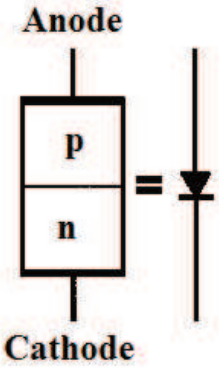
في الظروف الاعتيادية يكون هناك عدد بسيط من حاملات الشحنة الاقلية المتولدة حرارياً والتي تُعجل بواسطة المجال الناشئ عن الجهد العكسي المسلط، و بزيادة الجهد العكسي فانه يزيد من سرعة حاملات الشحنة الاقلية، وعندما امتلاك تلك الحاملات سرعة كافية فانها سوف تتمكن من ان تحرر بعضاً من الكترونات التكافؤ نتيجة اصطدامها بذرات البلورة في منطقة الاستنزاف.



شكل ٢–١١: مخطط لعملية الانهيار التهدمي

الشكل (٢–١١) يوضح عملية الانهيار التهدمي (avalanche breakdown) التي تحدث في طبقة الاستنزاف، فالإلكترون المعجل بواسطة الجهد العكسي يصطدم بذرة ما فينقل احد الكتروناتها من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل، ونتيجة لوجود الجهد العالي المسلط فان الإلكترون الحر الذي نتج من التصادم الأول سوف يرافق الإلكترون الأول ليصطدما بذرتين فتحرر كل واحدة منها الكتروناً حراً فيكون لدينا بالنتيجة اربع الكترونات حرة والتي بدورها تُعجل لتصطدم بذرات أخرى مولدة المزيد من الإلكترونات الحرة. وباستمرار العملية يتكون عدد كبير من الإلكترونات الحرة فتزداد توصيلة الثنائي. ان قيمة فولتية الانهيار لثنائي معين تعتمد على كمية الشوائب التي اضيفت له عند تصنيعه.

ان معظم الثنائيات لا يسمح لها ان تصل إلى الانكسار التهدمي، وبعبارة أخرى فان الفولتية العكسية المسلطة يجب ان تبقى اقل من فولتية الانكسار.



شكل ٢–١٢: رمز ثنائي أشباه الموصلات

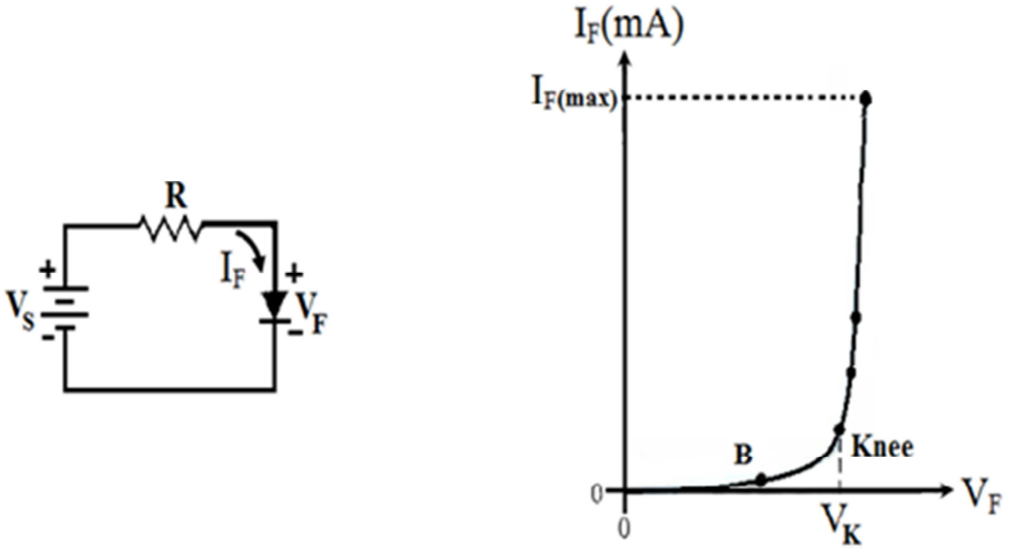
الشكل (٢–١٢) يمثل رمز ثنائي أشباه الموصلات، حيث تسمى الجهة p من الثنائي بالمصعد (Anode) والجهة n تسمى بالمهبط (Cathode)، ويلاحظ ان الرمز يشبه سهم يؤشر من جهة p إلى جهة n (اي باتجاه التيار الاصطلاحي والذي يكون عكس اتجاه حركة الالكترونات).

٥.٢ منحنى الخواص لثنائي أشباه الموصلات

يسمى منحنى العلاقة بين الفولتية المسلطة على طرفي الثنائي والتيار المار فيه بمنحى خصائص الثنائي ويسمى ايضاً منحنى (تيار–فولتية) للثنائي. وعادة يكون المحور الافقي (السيني) هو محور فرق الجهد على طرفي الثنائي لكونه المتغير المستقل، بينما يكون المحور العمودي هو محور التيار المار في الثنائي (المتغير التابع)، يتكون منحنى الخواص من منطقتين هما:

أ- منطقة الانحياز الأمامي (The Forward Region):

الشكل (٢-١٣) يمثل دائرة الانحياز الأمامي ومنحى الخواص المقابل له:



شكل ٢-١٣: دائرة ومنحنى الخواص للثنائي في حالة الانحياز الأمامي

نلاحظ من منحنى الخواص ان التيار المار عبر الثنائي يكون قليلاً لفروق الجهد الاقل من جهد الحاجز (V_B) وعند زيادة الجهد المسلط نلاحظ حدوث زيادة كبيرة في التيار المار عبر الثنائي، وتسمى الفولتية التي تبدأ عندها الزيادة الملحوظة في التيار بفولتية الركبة (Knee-Voltage) ويرمز لها بالرمز (V_K) وهي تكون عادة قريبة من جهد الحاجز، اي ان:

$$V_K \approx V_B \approx \begin{matrix} 0.7V \ \ for \ \ Si \\ 0.3V \ \ for \ \ Ge \end{matrix}$$

وفي حالة الاستمرار في زيادة جهد الانحياز الأمامي المسلط لقيم اكبر من جهد الركبة يزداد التيار المار في الثنائي بصورة سريعة. وتفسير ذلك انه في حالة الفولتيات التحييز الاقل من جهد الركبة فان الكترونات التوصيل والفجوات لا تمتلك الطاقة الكافية لعبور الوصلة، ولكن بزيادة الجهد الأمامي المسلط لقيم قريبة من جهد الحاجز فان الكترونات التوصيل والفجوات ستمتلك الطاقة الكافية لعبور الوصلة ويبدأ سريان تيار ملحوظ عبر الثنائي. بعد التغلب على جهد الحاجز فان اي زيادة بسيطة في الجهد المسلط سيسبب زيادة حادة في قيمة التيار المار عبر الثنائي.

بعد التغلب على جهد الحاجز فان كل ما يعيق سريان التيار عبر الثنائي هو مقاومة جهتي p و n ويسمى مجموع مقاومة الجهتين بالمقاومة الإجمالية للثنائي وتعطى بالعلاقة (٢-٣):

$$r_B = r_p + r_n \qquad (2-3)$$

ان قيمة المقاومة الاجمالية للثنائي تعتمد على التطعيم وعلى حجم المنطقتين p و n وتتراوح عادة بين (1Ω) إلى (25Ω).

ان القدرة المبددة في الثنائي (P_D) تعطى بالعلاقة (٢-٤):

$$P_D = V_F I_F \qquad (2-4)$$

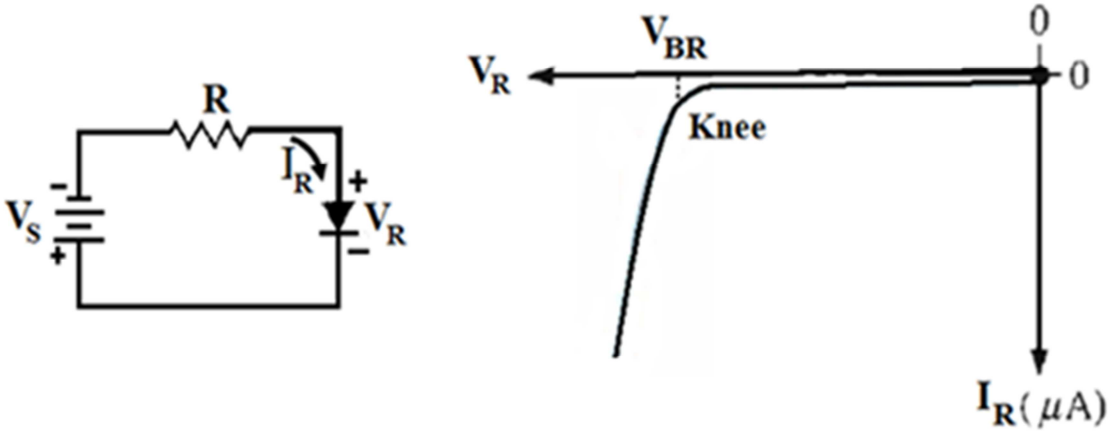
لكل ثنائي هناك اقصى تيار امامي $I_{F(max)}$ يمكن ان يتحمله الثنائي قبل ان يتلف او تتغير خصائصه، وتثبت قيمة اقصى تيار امامي في استمارة معلومات المصنع (Data sheet) الخاصة بالثنائي. وفي بعض الاحيان تعطى قيمة اعظم قدرة يتحملها الثنائي بدلاً من اقصى تيار، ويعرف اقصى قدرة يمكن ان يبددها الثنائي دون ان يتلف أو تتغير خصائصه بالصيغة (٢-٥):

$$P_{max} = V_{max} I_{max} \qquad (2-5)$$

حيث V_{max} هو قيمة الفولتية المقابلة لأقصى تيار.

ب- منطقة الانحياز العكسي (The Reverse Region):

عندما ينحاز ثنائي ما عكسياً، نحصل على تيار صغير جداً وبواسطة قياس تيار وفولتية الثنائي نستطيع رسم المنحني العكسي وكما هو موضح بالشكل (٢-١٤):

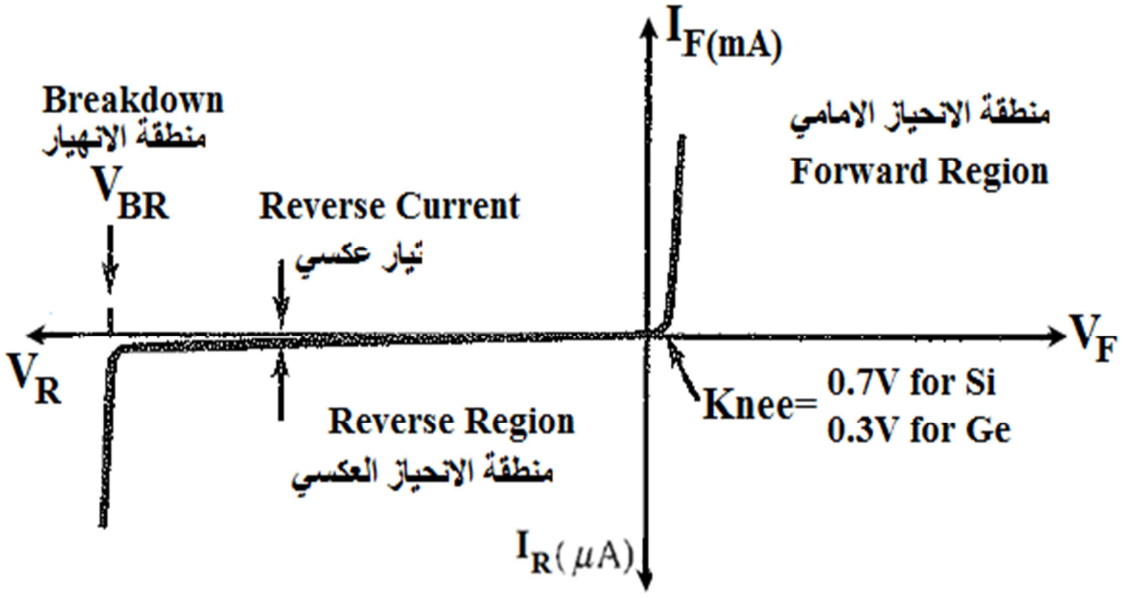


شكل ٢-١٤: دائرة ومنحنى الخواص للثنائي في حالة الانحياز العكسي

نلاحظ من الشكل ان التيار المار في الثنائي يكون صغيراً جداً لكل الفولتيات العكسية التي تقل قيمتها عن فولتية الانهيار (Breakdown Voltage) وتفسير ذلك ان الانحياز العكسي يزيد من تل الطاقة بين حزم الطاقة عند الوصلة وبالتالي لن تتمكن حاملات الشحنة الاكثرية من عبور الوصلة، بينما تتمكن حاملات الشحنة الاقلية في الجهتين من عبور الوصلة غير ان عددها في الظروف الاعتيادية يكون قليلاً

وبالتالي يكون التيار العكسي صغيراً جداً، وعندما تصل الفولتية العكسية إلى فولتية الانهيار يزداد التيار العكسي بسرعة كبيرة لحدوث عملية الانهيار التهدمي.

باستعمال قيم موجبة للفولتية والتيار في حالة الانحياز الأمامي وقيم سالبة للفولتية والتيار في حالة الانحياز العكسي يمكننا ان نرسم المنحني الأمامي والعكسي في رسم بياني واحد كما موضح بالشكل (٢-١٥):



شكل ٢-١٥: منحنى الخواص للثنائي

٦.٢ معادلة ثنائي أشباه الموصلات

هي صيغة رياضية عامة تم اشتقاقها بالاعتماد على مفاهيم فيزياء الحالة الصلبة ويمكن بواسطتها وصف منحنى الخواص لثنائي أشباه الموصلات في حالتي الانحياز الأمامي والانحياز العكسي. حسب هذا العلاقة فان التيار المار في الثنائي يعطى بالعلاقة:

$$I_D = I_s(e^{\frac{V_D}{\eta V_{TH}}} - 1) \qquad (2-6)$$

حيث: I_D التيار المار بالثنائي (Diode Current) ، I_s هو تيار التشبع العكسي للثنائي (Reverse Saturation current)، V_D فرق الجهد المسلط على طرفي الثنائي (Diode Voltage) وتكون إشارته موجبة عند التحييز الأمامي وسالبة عند التحييز العكسي، η مقدار ثابت يعتمد على طبيعة مادة الثنائي ففي حالة كون التيار المار في الثنائي صغيرا (في حالة التيارات المقابلة لفولتية اقل من فولتية الركبة) فان ($\eta = 1$) للثنائي المصنوع من الجرمانيوم ويكون ($\eta = 2$) للثنائي المصنوع من السليكون، اما في حالة التيارات العالية فيكون ($\eta = 1$) للثنائي المصنوع من السليكون أو الجرمانيوم، V_{TH} مقدار يعتمد على درجة حرارة الثنائي ويسمى (Thermal Voltage) ويعطى بالعلاقة:

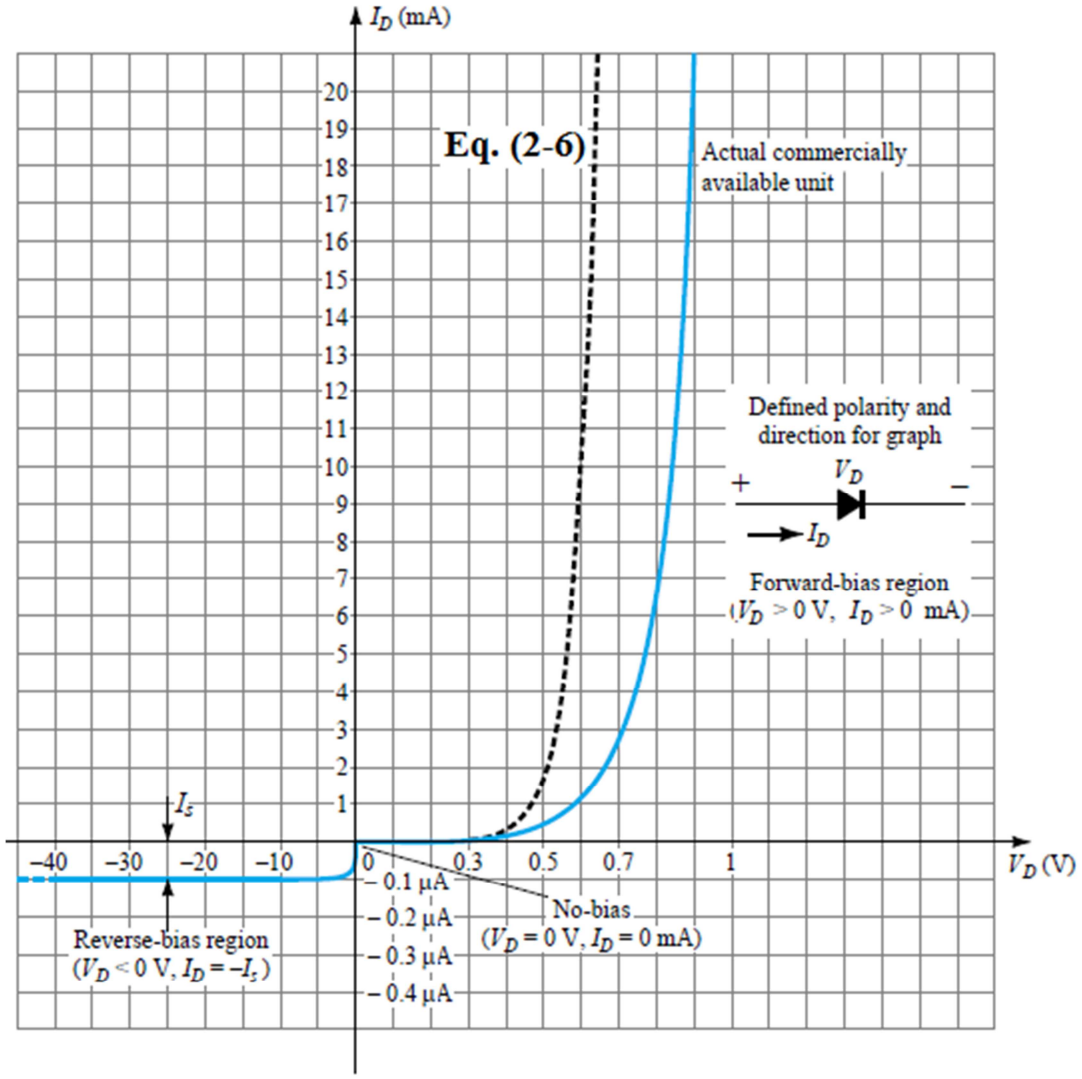
$$V_{TH} = \frac{KT}{q}$$

حيث k ثابت بولتزمان، T درجة الحرارة المطلقة، q شحنة الإلكترون.

يمكن كتابة معادلة الثنائي بصيغة ثانية بعد التعويض عن ثابت بولتزمان وشحنة الإلكترون فنحصل على:

$$I_D = I_s(e^{\frac{11600V_D}{\eta T}} - 1) \qquad (2-7)$$

ان معادلة الثنائي هو وصف رياضي لمنحنى الخواص للثنائي، وهو يختلف قليلا عن منحنى الخواص التجريبي (الواقعي)، نلاحظ من الشكل (٢-١٦) ان منحنى الخواص المرسوم وفقاً لمعادلة الثنائي مزاح قليلاً إلى يسار منحنى الخواص الحقيقي ببضعة اعشار الفولت.



شكل ٢-١٦: مقارنة بين منحنى الخواص الحقيقي لثنائي سليكون ومنحنى الخواص المقابل لمعادلة الثنائي

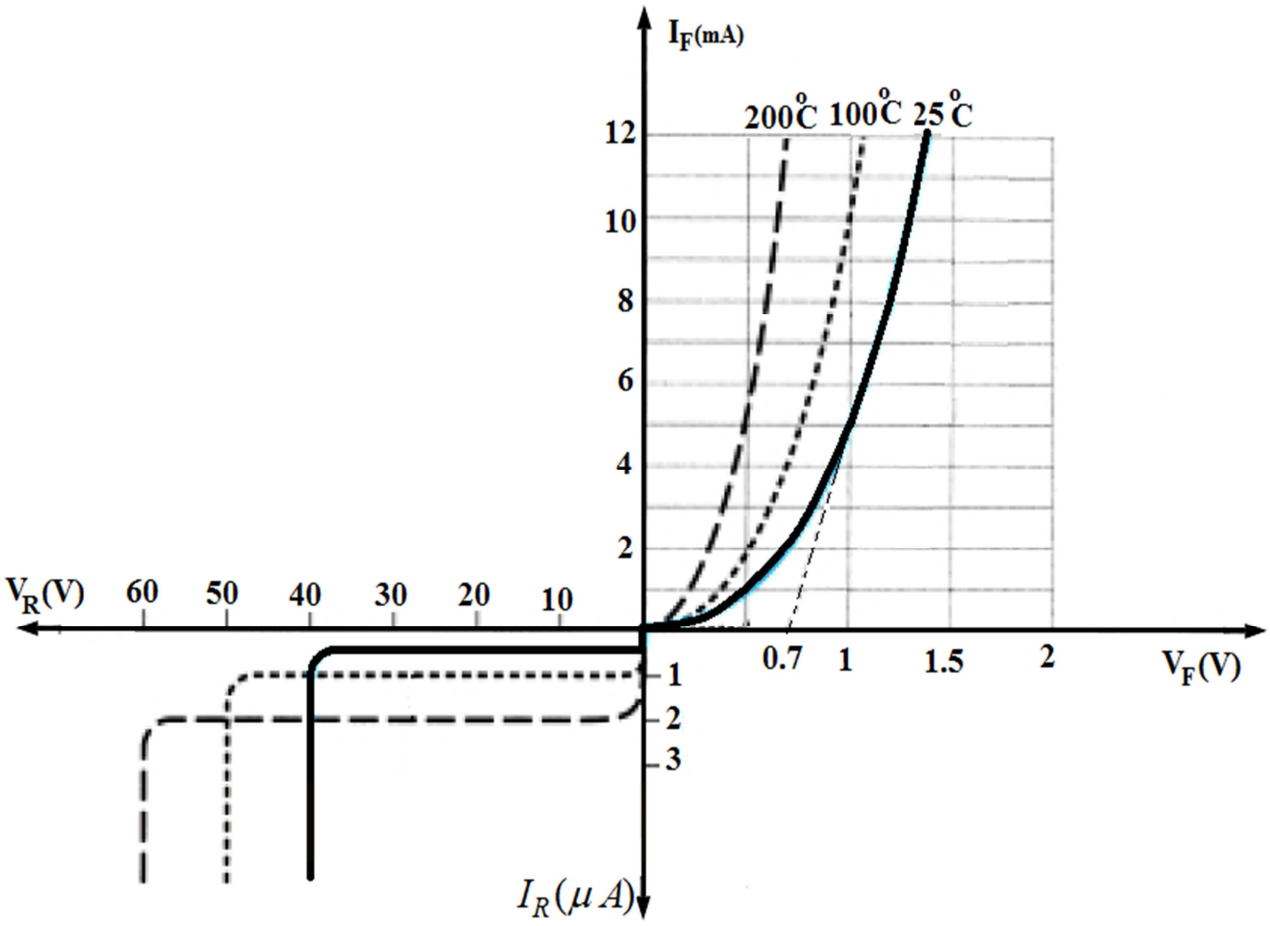
ان الاختلاف بين منحنى الخواص التجريبي ومنحنى الخواص المتحصل عليه من معادلة الثنائي يعود إلى تأثير مقاومة الثنائي ومقاومة نقطتي توصيل الطرفين المعدنيين للثنائي مع طرفي بلورة الثنائي.

٧.٢ تأثير درجة الحرارة على خواص ثنائي أشباه الموصلات

الشكل (٢-١٧) يوضح تأثير درجة الحرارة على منحنى الخواص لثنائي مصنوع من السليكون، نلاحظ انه في حالة الانحياز الأمامي فان زيادة درجة الحرارة ستؤدي إلى زيادة التيار الأمامي عند جهد أمامي معين، وكذلك فان زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى التقليل من جهد الحاجز للوصلة. وقد وجد عملياً ان جهد الحاجز للسليكون يقل بمقدار (2mV) عند زيادة درجة الحرارة درجة مئوية واحدة، حيث يعطى مقدار التغير في جهد الحاجز نتيجة للتغير في درجة الحرارة بالعلاقة:

$$\Delta V_B = -0.002\Delta T \qquad (2-8)$$

اما في حالة الانحياز العكسي فان ارتفاع درجة سيزيد من عدد حاملات الشحنة الاقلية المتولدة حرارياً وبالتالي يزداد مقدار تيار التشبع العكسي اما جهد الانهيار فيزداد بزيادة درجة الحرارة.



شكل ٢-١٧: تأثير درجة الحرارة على منحنى خواص ثنائي أشباه الموصلات المصنوع من السليكون

مثال (٢-٣): على فرض ان جهد الحاجز لثنائي سليكون هو (0.7V) عند درجة حرارة (25^oC)، أوجد جهد الحاجز لنفس الثنائي عند درجة حرارة (100^oC) وكذلك عند (0^oC).

الحل:

في حالة درجة الحرارة (100^oC) لدينا:

$$\Delta V_B = -0.002\Delta T \ , \ \Delta T = (100\ ^oC - 25\ ^oC)$$
$$\Delta V_B = -0.002(100\ ^oC - 25\ ^oC) = -0.15V$$

وهذا معناه ان جهد الحاجز قد نقص بمقدار (0.15V) وبالتالي فان جهد الحاجز للثنائي عند درجة حرارة (100^oC) سيكون:

$$V_B = 0.7 - 0.15 = 0.55V$$

وبنفس الطريقة يمكننا ان نجد جهد الحاجز عند (0^oC) وكما يلي:

$$\Delta V_B = -0.002\Delta T \ , \ \Delta T = (0\ ^oC - 25\ ^oC)$$
$$\Delta V_B = -0.002(0\ ^oC - 25\ ^oC) = 0.05V$$

اي ان جهد الوصلة في هذه الحالة قد زاد بمقدار (0.05V) وقيمة جهد الحاجز يكون:

$$V_B = 0.7 + 0.05 = 0.75V$$

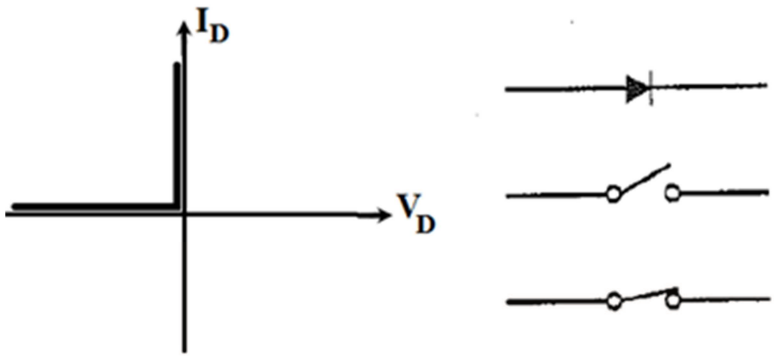
٨.٢ الدائرة المكافئة لثنائي أشباه الموصلات

تعرف الدائرة المكافئة بانها تركيب معين يضم مجموعة من العناصر مختارة بعناية لتكافئ بعملها عمل عنصر (او دائرة) معينة. وبتعبير آخر فانه بالإمكان الاستعاضة عن عنصر معين بوضع دائرة مكافئة تقوم مقامه ولا يؤثر ذلك على عمل او سلوك النظام.

في حالة ثنائي أشباه الموصلات هناك ثلاث تقريبات اساسية وهي كالتالي:

١.٨.٢ التقريب الأول (الثنائي المثالي) Ideal Diode

حسب التقريب الأول يعامل الثنائي معاملة مفتاح تلقائي، ففي حالة الانحياز الأمامي يكون بمثابة دائرة مغلقة (مقاومة صفر) وفي حالة الانحياز العكسي يكون بمثابة دائرة مفتوحة (مقاومة مالانهاية)، وكما هو موضح بالشكل (٢-١٨).

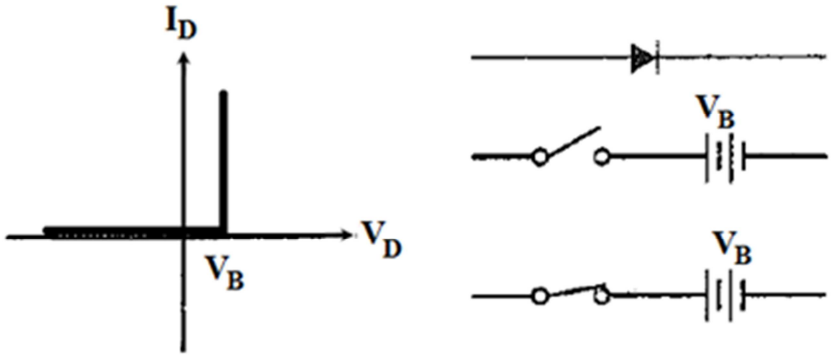


شكل ٢–١٨: التقريب الأول لثنائي أشباه الموصلات

ان التقريب المثالي (التقريب الأول) له اهمية كبيرة لانه يبسط دوائر الثنائي، غير انه لا يصلح في جميع الحالات (فالثنائي الواقعي او العملي يختلف عن الثنائي المثالي) ولهذا نحتاج إلى انواع اخرى من التقريب (الثاني والثالث)، ولكن في كل التحليلات الابتدائية في دوائر الثنائي يعتبر التحليل المثالي ملائم.

٢.٨.٢ التقريب الثاني

في التقريب الثاني يتم اخذ تأثير جهد الحاجز بنظر الاعتبار، فالثنائي العملي لا يمرر التيار في حالة الانحياز الأمامي إلا بعد ان تتغلب الفولتية المسلطة على جهد الحاجز، لذا تضاف بطارية جهد يساوي جهد الحاجز وبقطبية بحيث يكون قطبها الموجب باتجاه الانود، كما هو موضح بالشكل (٢–١٩):



شكل ٢–١٩: التقريب الثاني لثنائي أشباه الموصلات

حسب هذا التقريب فان الثنائي في الانحياز الأمامي سوف لن يمرر التيار الا بعد ان تتغلب الفولتية المسلطة على جهد الحاجز للثنائي، فيصبح الثنائي بمثابة دائرة مغلقة (ولحساب تيار الدائرة في هذه الحالة يطرح جهد الحاجز من فولتية التحييز ويقسم الناتج على المقاومة الكلية للدائرة)، ان التقريب الثاني يكون ضروريا في حالة كون فولتية التحييز الصغيرة ، اما عند تسليط فولتيات تحييز كبيرة بالمقارنة مع جهد الحاجز فيمكن تجاهل تأثير جهد الحاجز.

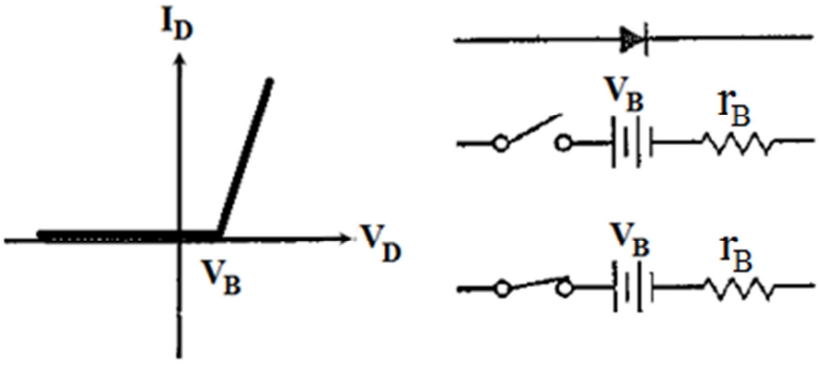
٣.٨.٢ التقريب الثالث

في هذا التقريب يتم الاخذ بنظر الاعتبار تأثير المقاومة الاجمالية (r_B) في حالة الانحياز الامامي، فبالرغم من ان للثنائي مقاومة امامية صغيرة الا انها ليست كدائرة مغلقة، وبمرور التيار عبر الثنائي يتولد على طرفي المقاومة الاجمالية فرق جهد ، وكلما كان التيار الأمامي كبيراً كلما زاد فرق الجهد على طرفيها.

ان الدائرة المكافئة للتقريب الثالث عبارة عن مفتاح على التوالي مع بطارية قيمتها (V_B) ومقاومة مقدارها (r_B)، وبعد ان تتغلب الدائرة الخارجية على جهد الحاجز ترغم تياراً اعتيادياً على المرور بنفس اتجاه سهم الثنائي، وتكون حصيلة الفولتية على طرفي الثنائي (V_D) بالمعادلة (٢-٧):

$$V_D = V_B + I_F r_B \qquad (2-9)$$

الشكل (٢-٢٠) يوضح دائرة التقريب الثالث:

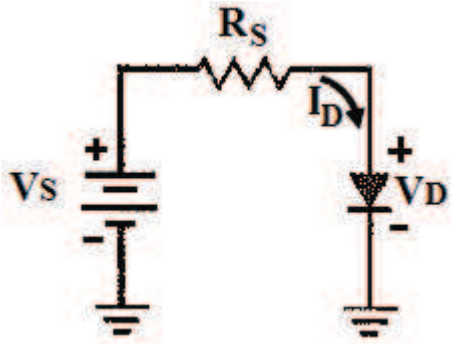


شكل ٢-٢٠: التقريب الثالث لثنائي أشباه الموصلات

٩.٢ خط الحمل ونقطة العمل Load Line and Operating Point

ان خط الحمل هي اداة للتحديد التيار المار وفرق الجهد على طرفي نبائط أشباه الموصلات بدقة، وعليه يمكن استعمال خط الحمل لتحديد القيم الممكنة للتيار والفولتية على طرفي ثنائي في دائرة ما، علماً بان الفائدة الاكبر من خط الحمل هو في تحديد فروق الجهد والتيارات في نبيطة اكثر تقدماً وهي الترانزستور والتي سنأتي عليها لاحقاً.

في حالة خط الحمل الخاص بثنائي أشباه الموصلات فهو يمثل المحل الهندسي لجميع قيم التيار والفولتية التي يمكن ان يمتلكها ثنائي ما في دائرة معينة، ولرسم خط الحمل علينا اولاً ايجاد العلاقة بين فرق الجهد على طرفي الثنائي والتيار المار من خلاله والتي غالباً ما نتحصل عليها بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد (المجموع الجبري لفروق الجهد حول اي دائرة كهربائية مغلقة تساوي صفر).



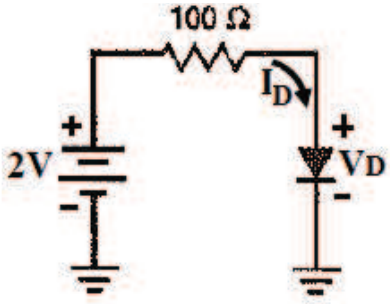
لنأخذ على سبيل المثال الدائرة المجاورة ونحاول ان نجد معادلة خط الحمل لها. بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد نحصل على:

$$V_S - I_D R_S - V_D = 0$$

$$I_D = \frac{V_S - V_D}{R_S}$$

المعادلة الاخيرة تمثل معادلة خط الحمل.

ولرسم خط الحمل لابد من معرفة إحداثيات نقطتان على الاقل تنتميان له.



لنفس المثال السابق اذا كانت فولتية المصدر (2V) وقيمة المقاومة (R_S=100Ω) كما مبين في الشكل المجاور، فان معادلة خط الحمل ستكون بالصورة:

$$I_D = \frac{2 - V_D}{100}$$

المعادلة السابقة تمثل معادلة خط مستقيم، ولرسمها نجد نقطتي تقاطع الخط مع المحاور(حيث المحور العمودي يمثل محور تيار المار بالثنائي والمحور الافقي يمثل محور فرق الجهد بين طرفي الثنائي) وكما يلي:

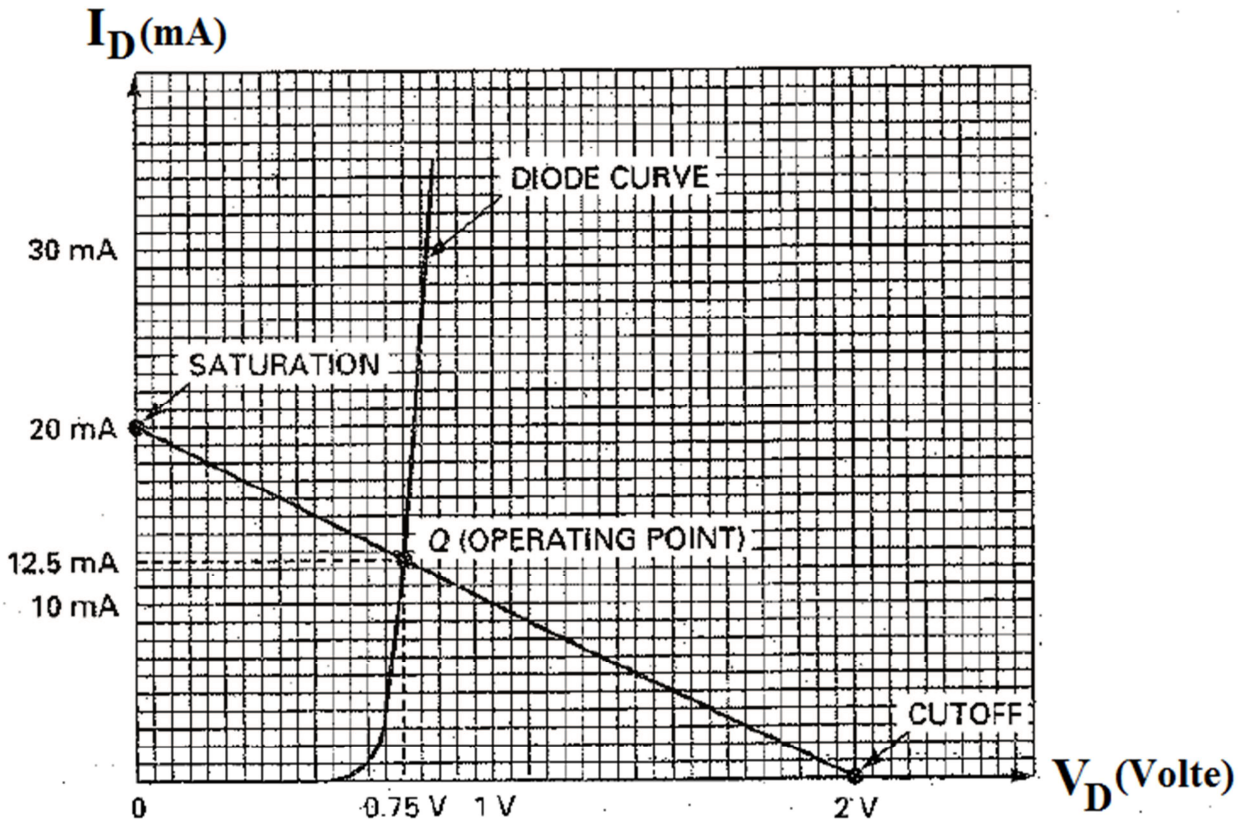
$$I_D = \frac{2 - V_D}{100}$$

$(a)\ for V_D = 0, I_D = 0.02A = 20mA,\ \ (0,20)$

$(b)\ for\ I_D = 0, V_D = 2V,\quad (2,0)$

ان النقطة (V_D=0, I_D=20mA) تسمى نقطة التشبع (Saturation) (لانها تمثل اعظم قيمة للتيار يمكن ان يمر بالثنائي) بينما النقطة (V_D=2V, I_D=0) تسمى نقطة القطع (Cutoff) لانها تمثل اقل تيار يمكن ان يمر بالثنائي.

وبعد تحديد نقطتي التشبع والقطع يمكننا رسم خط الحمل على منحنى الخواص الخاص بالثنائي (والذي يكون من الصفات المميزة له بصرف النظر عن الدائرة التي يعمل فيها) وكما هو موضح بالشكل (٢-٢١).



شكل ٢–٢١: خط الحمل ونقطة العمل لثنائي أشباه الموصلات المصنوع من السليكون

اما نقطة العمل (Operating Point) فهي بشكل عام تمثل نقطة على خط الحمل تحددها قيمة التيار والفولتية عند وضعية تشغيل معينة، في حالة الثنائي البلوري فان نقطة العمل له تمثل النقطة المشتركة (نقطة التقاطع) بين خط الحمل ومنحنى الخواص للثنائي، وبأنزال المساقط على المحورين نجد ان احداثي نقطة العمل في هذه الحالة هي (V_D=0.75V, I_D=12.5mA).

أسئلة الفصل الثاني

س١: عرف: جهد الحاجز، تيار التشبع العكسي، تيار العبور الزائل، الانهيار التهدمي، نقطة العمل.

س٢: علل كل ما يلي:

أ- في لحظة بدأ الانتشار تكون حزم الطاقة في جهة p اعلى قليلاً من حزم طاقة جهة n.

ب- قيمة التيار التشبع العكسي لثنائي الجرمانيوم اكبر من قيمة تيار التشبع العكسي لثنائي السليكون عند درجة حرارة معينة.

س٣: وضح المقصود بمنحنى الخواص للثنائي البلوري ثم ارسمه مع التأشير.

س٤: وضح تأثير درجة الحرارة على منحنى خواص أشباه الموصلات مع الرسم.

س٥: اذا كانت قيمة تيار التسرب السطحي لثنائي ما (10nA) عند جهد عكسي مقداره (10V)، أوجد قيمة تيار التسرب السطحي عند زيادة الجهد العكسي إلى (40V)؟

س٦: التيار العكسي لثنائي سليكون يساوي (30nA) عند (25^oC)، فاذا علمت ان مركبة تيار التسرب السطحي تساوي (20nA) واذا بقيت قيمة التيار السطحي نفسها عند (75^oC)، فما مقدر التيار العكسي عند (75^oC)؟

س٧: احسب قيمة جهد الحاجز لوصلة شبه موصل مصنوعة من مادة السليكون عند درجة حرارة الغرفة ، علماً بان تركيز حاملات الشحنة كانت ($N_a=N_d=10^{16}cm^{-3}$) ، ($n_i=1.45X10^{10}cm^{-3}$).

س٨: باستعمال معادلة الثنائي أوجد التيار المار عند درجة حرارة (20^oC) في ثنائي سليكون له ($I_s=60nA$) عند فولتية تحييز أمامية (0.6V).

س٩: يستعمل مصمم ثنائي سليكون للعمل في ظروف درجة حرارة تتراوح بين (0^oC-75^oC) أوجد اقل واعظم قيمة يمكن ان يصل اليها حاجز الجهد.

س١٠: أوجد قيمة تيار الحمل في الدائرة المجاورة باستعمال:

أ- التقريب الأول (الثنائي المثالي).

ب-التقريب الثاني (علماً بان الثنائي مصنوع من السليكون).

جـ - التقريب الثالث ($r_B=2\Omega$).