

الفصل الثانى

ثنائيات أشباه الموصلات

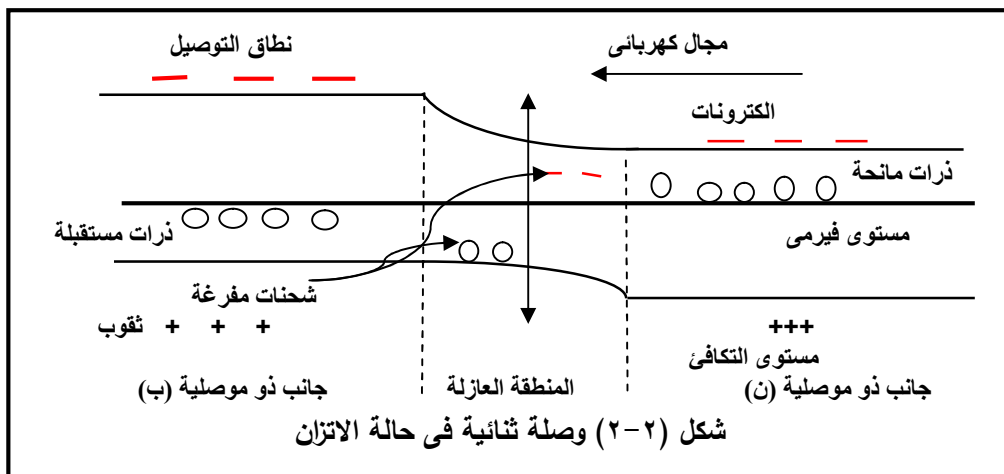
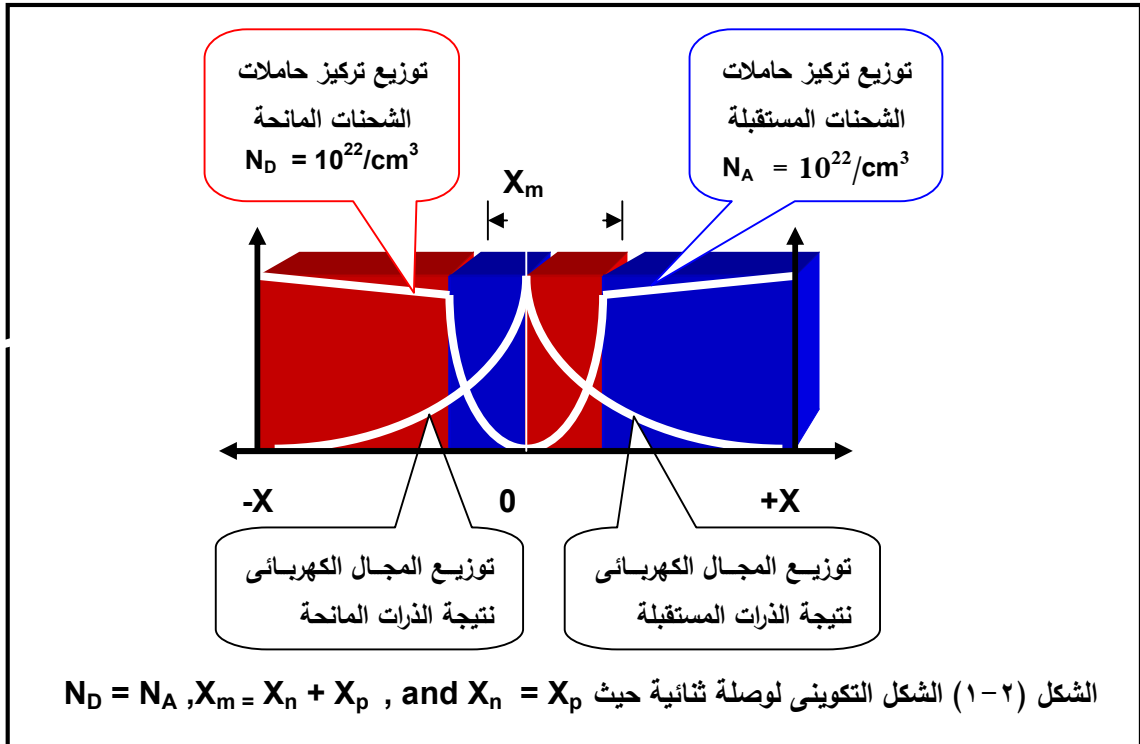
نبدأ بدراسة الكهرياء الساكنة^(١) للوصلات والتي تشتمل على نظرية وصلات المواد ذات الموصلية (ن و ب) ، الشحنات فى المنطقة العازلة بين الوصلتين ، الظواهر الكهربائية داخل المنطقة العازلة ، رسم تخطيطي لمستويات الطاقة فى حالة الإتزان الكهربائى وتحت تأثير المجال الكهربائى ، تأثير السعة، مكونات التيار المار فى الوصلة ، إنهاء الوصلات ، ثم بعد لك حدود المتطلبات العملية لتطبيقات ثنائي أشباه الموصلات .

٢ - ١ نظرية وصلات المواد ذات الموصلية (ن) و (ب)

تتكون الوصلة الثنائية من جانبيين متلاصقين من مادة شبه موصل مختلفين فى نوع الموصلية (ن) و(ب) . وتعتبر الوصلة الثنائية اللبنة الأساسية لجميع عناصر أشباه الموصلات النشطة . قبل بدأ إلتصاق جانبي الوصلة - تتواجد كثافة كبيرة للإلكترونات فى الجانب ذى الموصلية السالبة (ن) وكثافة كبيرة للثقوب فى الجانب ذى الموصلية الموجبة (ب) . عند إلتصاق الجانبين مباشرة، تنتشر الإلكترونات من الجانب ذى الموصلية السالبة (ن) الى الجانب ذى الموصلية الموجبة (ب) كما تنتشر الثقوب من الجانب ذى الموصلية الموجبة (ب) الى الجانب ذى الموصلية السالبة (ن) - يترك كل إلكترون تحرك الى داخل الجانب ذى الموصلية الموجبة (ب) ذرة مانحة موجبة فى الجانب ذى الموصلية السالبة (ن) ، وبالمثل يترك كل ثقب تحرك داخل الجانب ذى الموصلية السالبة (ن) ذرة مستقبلة سالبة فى الجانب ذى الموصلية الموجبة (ب) . ينشأ مجال كهربائى بين الذرات المانحة المتأينة والذرات المستقبلة المتأينة فى إتجاه يعارض مزيد من إنتشار الإلكترونات والثقوب حتى تصل الوصلة الى حالة التوازن .

^١ (Electrostatics) الكهرياء الساكنة هي دراسة الظواهر الكهرومغناطيسية التي تحدث عندما لا يكون هناك أي شحنات متحركة - بعد حدوث توازن ثابت تصل الشحنات إلى حالة التوازن بسرعة نظراً لأن القوة الكهربائية قوية . الطرق الرياضية للكهرياء الساكنة تجعل من الممكن حساب توزيعات المجال والجهد الكهربائي لتكوين الشحنات

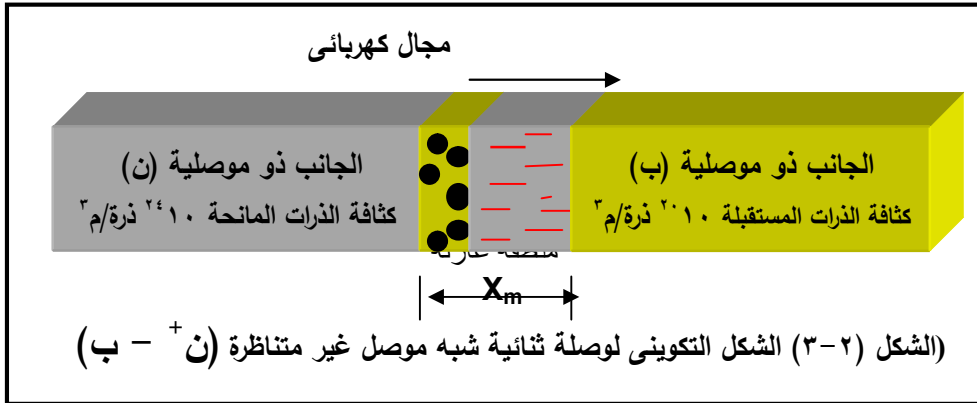
توضح الأشكال (١-٢) و(٢-٢) الشكل التكويني لوصلة متناظرة^(٢) ذات كثافة حاملات شحنات متساوية في الجانبين ومختلفة الموصلية . إلى يسار الوصلة كثافة تركيز إلكترونات عالية تتناقص بحدّة إلى الصفر تقريبا عند حافة المنطقة المفرغة . إلى يمين الوصلة كثافة تركيز ثقب عالية تتناقص بحدّة إلى نسبة تركيز الصفر تقريبا عند الحافة الأخرى للمنطقة المفرغة وتقترب كثافة تركيز الإلكترونات والثقب في الوصلة الثنائية إلى حالة الإتزان العادية .



^٢ (symmetrical junction) عادة يتساوى تركيز الشوائب على جانبي الوصلة الثنائية (ن و ب) في المنطقة العازلة $X_m = X_n + X_p$ وتتساوى سمك $X_n = X_p$

ويتناقص خطياً داخل المنطقة العازلة (X_m) وتتواجد في المنطقة العازلة^(٣) ذرات الشوائب المفرغة من الإلكترونات والثقوب ، وتسلك المنطقة المفرغة كأنها منطقة عازلة، حيث أنها لا تحتوي على حاملات شحنات متحركة ، ويمكن حساب الجهد الناشئ (V_T) من العلاقة التالية:

$$V_T = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} \quad \text{المعادلة (١-٢)}$$



عادة فإن تركيز الشوائب على جانبي الوصلة الثنائية ليست متساوية، وتسمى الوصلة في هذه الحالة وصلة غير متناظرة^(٤) . يوضح الشكل (٣-٢) تكوين مماثل للمنطقة المفرغة حيث أن أحد جانبي الوصلة أكثر تركيزاً للشوائب (ن - ب) ، وفي هذه الحالة تمتد المنطقة العازلة إلى الجانب الذي يحتوي على نسبة تركيز أقل ، وتتساوى كثافة الشحنات المفرغة الموجبة والسالبة في المنطقة العازلة حتى يتحقق الإتزان الكهربائي ، حيث تتواجد طاقة حرارية كافية تؤين عدد من الثقوب والإلكترونات عند درجة حرارة الغرفة كما هو موضح بوجود الإلكترونات في نطاق طاقة التوصيل في الجانب ذو موصلية (ب) ووجود ثقوب في مستوى طاقة التكافئ في الجانب ذو موصلية

^٣ (depletion region) تعتبر منطقة عازلة داخل مادتين موصلتين مثل مواد أشباه الموصلات المطعمة حيث تم إبعاد الشحنات المتحركة بواسطة المجال الكهربائي ، لعناصر التي تركت في منطقة النضوب أو المنطقة المفرغة هي ذرات شوائب مانحة أو مستقبلة متأينة ، وتمت تسمية منطقة النضوب أو المنطقة المفرغة بسبب تكوينها من منطقة موصلة قبل إزالة جميع الشحنات الحرة ولم تترك مجال لسريان تيار. ومصطلحات أخرى للتسمية (depletion layer, space charge region or space charge layer)

^٤ (un-symmetrical junction) عادة لا يتساوى تركيز الشوائب على جانبي الوصلة الثنائية (ن و ب) في

المنطقة العازلة $X_m = X_n + X_p$ ولا تتساوى سمك $X_n = X_p$

(ن) . وحيث أن التوازن الكهربائي في الوصلة هو شرط لعدم تدفق التيار في الدائرة الخارجية حيث تكون طاقة الإلكترونات متساوية في الجانبين . حيث أن مستوى فيرمي ثابت على خط واحد على طول ثنائية شبة الموصل .

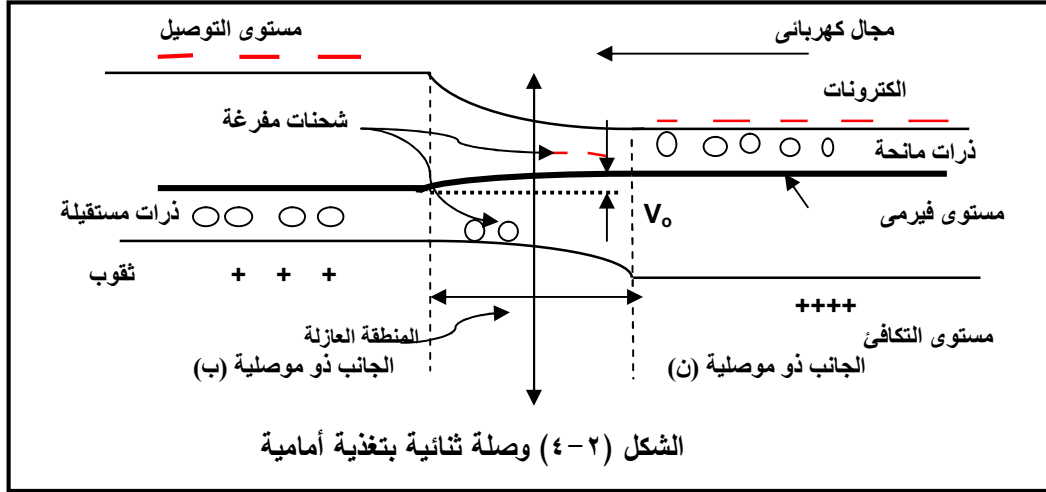
يوجد فارق طاقة على حافتي الوصلة نتيجة لثبات مستوى فيرمي . الفرق في الجهد^(٥) وهو عائق فولتي يمنع إستمرار إنتشار الشحنات من الجانب الأكثر تركيزا الى الجانب الأقل تركيزا . تميل الإلكترونات للإنتشار من الجانب الأكثر تركيزا ذو الموصلية (ن) الى الجانب الأقل تركيزا ذو الموصلية (ب) حيث يحدث إتحاد الشحنات^(٦) . تعتبر الشحنات المفرغة للذرات المانحة المتخلفة شحنات موجبة في الجانب ذو الموصلية (ن) من المنطقة العازلة . وبنفس الطريقة، يعتبر إنتشار الثقوب كشحنات سالبة في الجانب ذو الموصلية (ب) من المنطقة العازلة . يجب أن تتساوى الشحنات المفرغة السالبة والموجبة . كما يجب أن يكون الفرق في جهد الشحنات المفرغة السالبة والموجبة في الطبقة المزدوجة بالمنطقة العازلة في حالة الإتزان مساوى للجهد الناشئ والذي يمثل جهد الوصلة .

يحدد سمك المنطقة العازلة الرفيعة جدا في حدود 10^{-1} الى 10^{-6} سم بعدة عناصر منها أسلوب توزيع الشوائب المتأينة في المنطقة العازلة وأيضا بجهد الطاقة المانعة . مع مراعاة إتجاه المجال الناشئ من تيار الإنحراف للإلكترونات المتولدة حراريا في عكس إتجاه تيار إنتشار الإلكترونات - وأيضا يكون إتجاه تيار الإنحراف المتولد حراريا نتيجة لحركة الثقوب في عكس إتجاه تيار الإنتشار يفترض أن يكون جهد الوصلة للثقوب عند الإتزان هو القيمة المطلوبة حتى يتساوى تيار الإنحراف وتيار الإنتشار ومعاكسين في الإتجاه وبالتالي لا ينشأ تيار . ينشأ تيار الإنحراف نتيجة إنتشار

^٥ (built-in voltage) في وصلة شبه الموصل الثنائية في حالة عدم توصيل جهد خارجي تتحقق حالة إتزان كهربائي حيث يتكون فرق في الجهد عند الوصلة ويسمى الجهد العائق (V_T و V_B و V_J)

^٦ (carrier generation and recombination) في عملية توليد الشحنات فإن حاملات الشحنات تنشأ (الإلكترونات والثقوب) وتتحد . وهي عملية أساسية في فيزياء الجوامد . زوج (إلكترون - ثقب) هو الوحدة الأساسية لتوليد وإتحاد حاملات الشحنات وهي العملية المقابلة لانتقال إلكترون بين مستوى التكافئ ومستوى التوصيل.

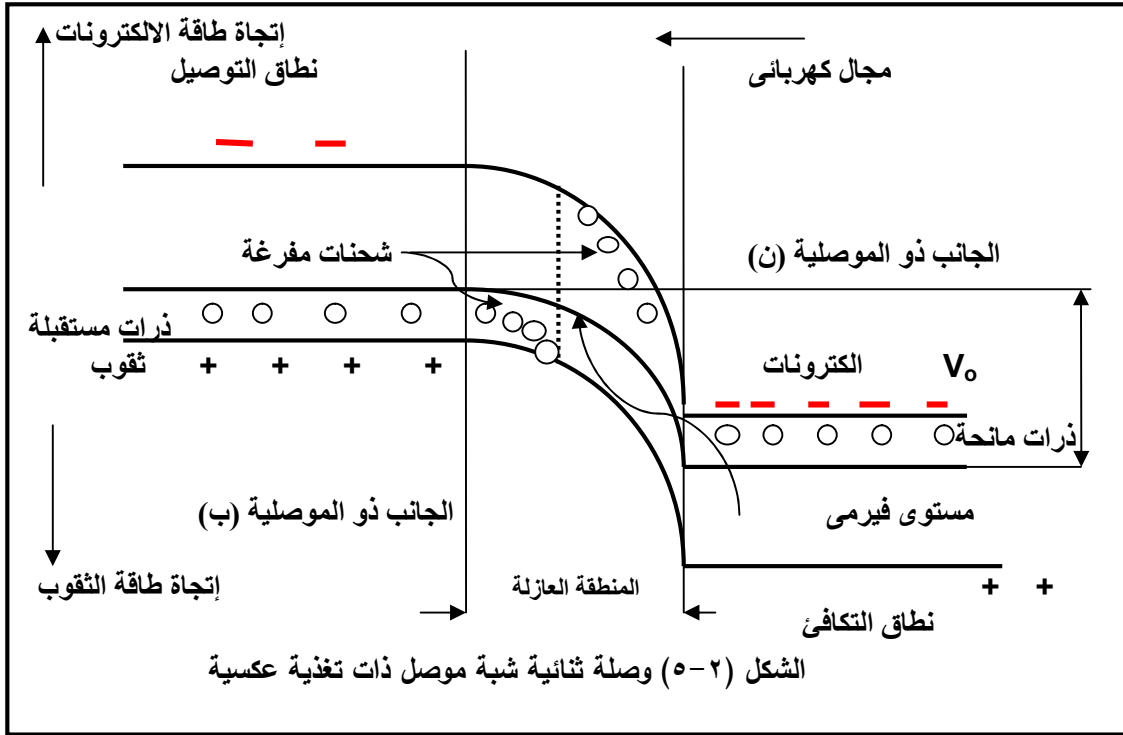
الشحنات الأقلية والشحنات المماثلة في الإشارة والمتولدة حرارياً في المنطقة العازلة كما ينشأ تيار الانتشار نتيجة إنتشار الشحنات الأغلبية والشحنات المماثلة في الإشارة والمتولدة حرارياً في المنطقة العازلة .



عندما يختل إتران الوصلة الثنائية بتغذيتها بجهد (V_0) فولت نلاحظ وجود تأثير بسيط على تيار الإنحراف - ولكن التأثير أضعافاً مضاعفة على تيار الإنتشار الذي يتناسب بشكل أسى مع جهد التغذية (V_0) . عندما تكون التغذية أمامية بمعنى جهد التغذية (V_0) موجب في الجانب ذو الموصلية (ب) أو سالب في الجانب ذو الموصلية (ن) - يسمى في هذه الحالة جهد تغذية أمامي حيث تتناقص قيمة طاقة المنع وتزداد كثافة الشحنات التي تنتشر خلال المنطقة العازلة كما هو موضح في الشكل (٢-٤) ، تتحرك الشحنات الأقلية الى داخل المنطقة العازلة وتعتبر الوصلة . ويعرف بالإتجاه الأقل مقاومة ويمر التيار معتمداً على كثافة الشحنات ومساحة الوصلة وجهد التغذية ويمكن تمثيل المقاومة الكلية لثنائية شبه الموصل بمقاومة ذات قيمة كبيرة متصلة على التوازي مع مكثف يمثل عزل المنطقة المانعة .

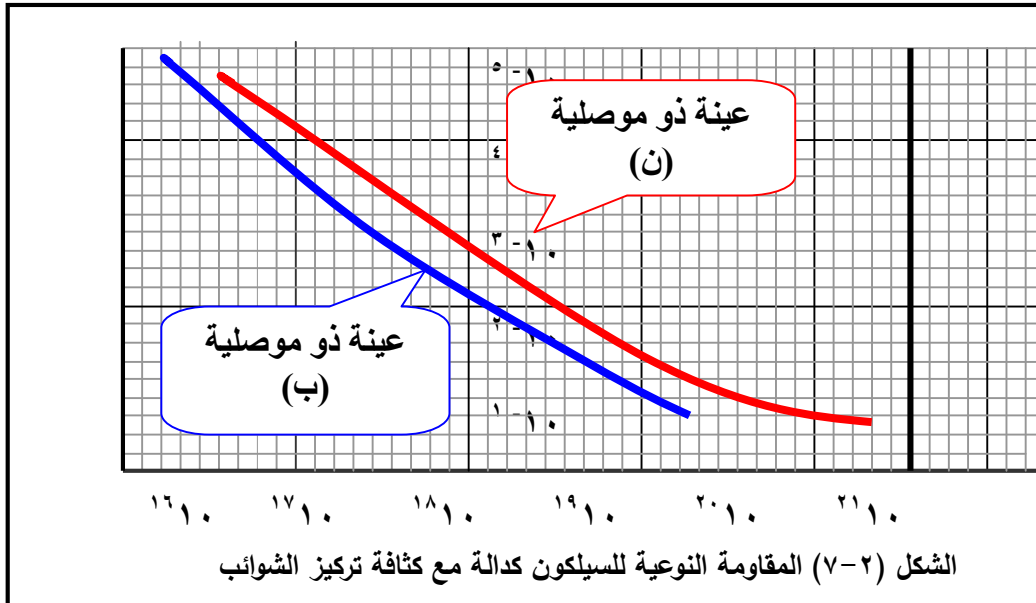
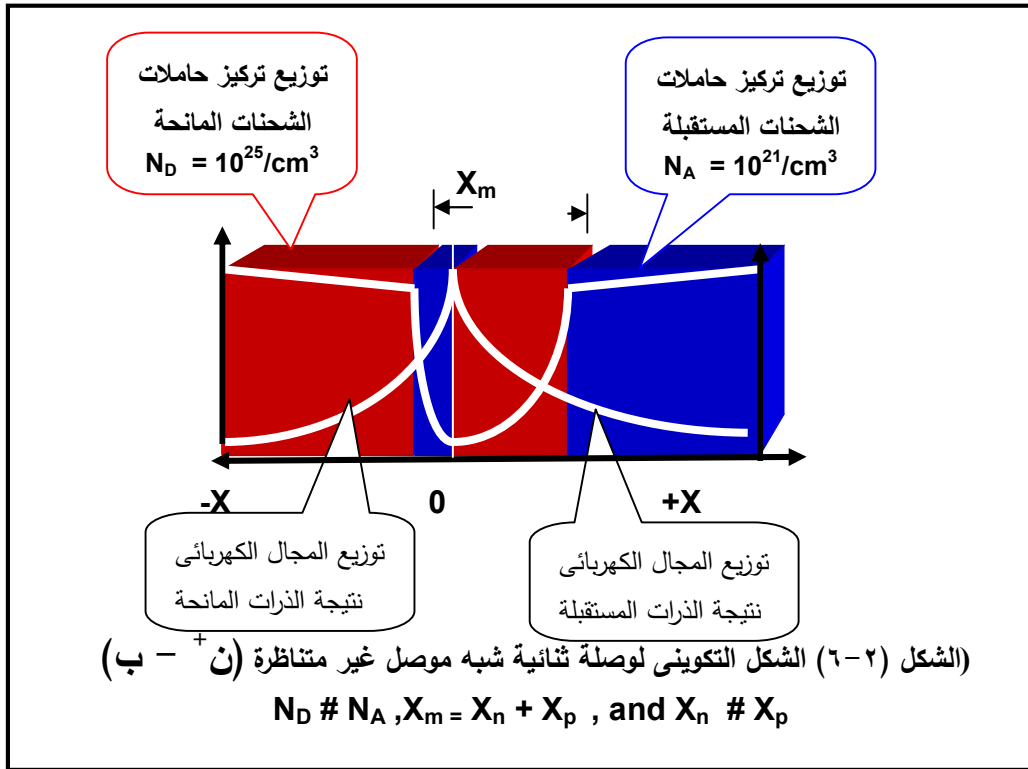
يتم الحصول على خواص تقويم جيدة لثنائية شبه الموصل مع قيم تيار إنحراف صغيرة (في درجة حرارة متوسطة وكثافة تركيز شوائب من متوسطة الى كبيرة) حيث أن عملية الإتحاد مع تيار الإنتشار بسيطة وغير ملحوظة في المنطقة العازلة ويزيد تيار الإنتشار أسياً مع جهد التغذية . كما نلاحظ أن التيار العكسي لا يتأثر كثيراً مع الجهد كما يتضح من الشكل (٢-٥) . كما يوضح الشكل (٢-٦) الشكل التكويني لوصله

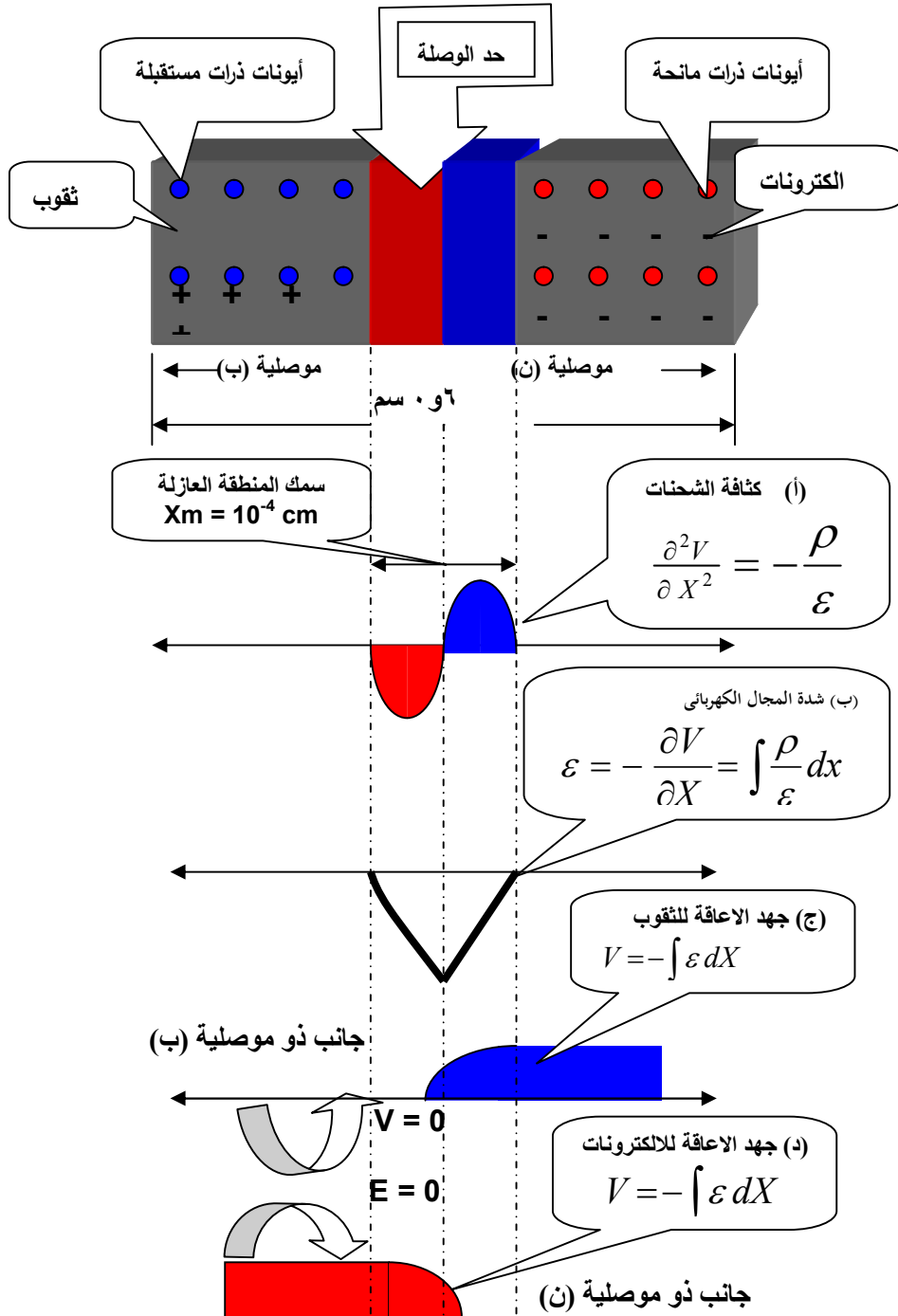
غير متناظره أو غير متجانسة - كنتيجة لإلتصاق الجانبين يحدث إنتشار للإلكترونات والثقوب حتى الوصول لحالة الإتزان وينشأ المجال الكهربائي عند حد الإلتصاق (الشكل ٠(٦-٢



سمك المنطقة العازلة الناتجة عن الذرات المستقبلة ($X_p \# X_n$) تنشأ حالة الإتزان الكهربائي عندما يزداد المجال ويصبح كافى لمنع المزيد من الإنتشار بين جانبي الثنائية وتنشأ المنطقة العازلة التي تحتوى على شحنات مفرغة غير قادرة على الحركة . وتعتبر المنطقة العازلة قلب الوصلة الثنائية حيث تتم فيها كل الظواهر الكهربائية . يوضح الشكل (٧-٢) منحنى المقاومة النوعية كدالة لكثافة تركيز الشوائب على جانبي الوصلة لمادة السيلكون . يوضح الشكل (٨-٢ أ) شدة المجال الكهربائي عند حد إلتصاق جانبي الثنائية - يوضح الشكل (٨-٢ ب) تكامل كثافة الشحنات فى المنطقة العازلة - ويوضح الشكل (٨-٢ ج) تغير الجهد الإلكتروستاتيكي فى المنطقة العازلة والذي يمثل طاقة الوضع المانعة للشحنات وهى تكامل سلبى لشدة المجال الكهربائي .

في حالة كون الدائرة الكهربائية غير مغلقة فإن التيار الناشئ يساوى صفر وهذا يسمح بحساب قيمة الجهد المانع والذي يقدر بأجزاء من الفولت .





الشكل (٨-٢) الظواهر الكهربائية داخل المنطقة العازلة لوصلة ثنائية

٢ - ٢ الوصف المادي لثنائي أشباه الموصلات

مقاومة ثنائي أشباه الموصلات المثالي تساوى صفر أوم بمعنى الجهد على الثنائي يساوى صفر - يوضح الشكل (٢ - ٨ ج) تناقص حاجز الطاقة الكامنة للشحنات \cdot فى حال التغذية الأمامية^(٧) لصمام أشباه الموصلات الثنائي تتحرك شحنات الثقوب من الجانب ذات الموصلية (ب) الى الجانب ذات الموصلية (ن) وتتحرك شحنات الإلكترونات من الجانب ذات الموصلية (ن) الى الجانب ذات الموصلية (ب) عابرة منطقة النضوب فى الوصلة الثنائية - هذه الشحنات المتحركة من الجانبين تمثل الشحنات الأغلبية المسببة لتدفق وسريان التيار الكهربائى فى إتجاه واحد \cdot وفى حالة عكس قطبى منبع الجهد المغذى - يختفى التيار الكهربائى - وتسمى هذه الحالة بالتغذية العكسية^(٨) \cdot تبعد كل من شحنات الثقوب من الجانب ذات الموصلية (ب) والإلكترونات من الجانب ذات الموصلية (ن) عن الوصلة \cdot وتظهر أزواج من الثقوب- والإلكترونات بسبب الطاقة الحرارية المتولدة مكونة تيار كهربائى صغير يعرف بإسم تيار التشبع العكسى^(٩) \cdot يمكن إهمال قيمة تيار التشبع العكسى لصغره وذلك حتى يزيد جهد التغذية العكسى زيادة كبيرة - عندما يصل جهد التغذية العكسية لقيمة حرجة تحدث طفرة لتدفق التيار فى الصمام الثنائى مسببة حالة إنهيار للوصلة \cdot حاجز الطاقة الكامنة عبر الوصلة السابق توضيحه فى الشكل (٢ - ٨ د) يتزايد عند توصيل جهد تغذية عكسى مما يتسبب فى تناقص تدفق تيار الشحنات الأغلبية للثقوب (P_p) ولالإلكترونات (n_n) وكذلك يتناقص مرور الشحنات الأقلية (P_n) و (n_p) مع ملاحظة أن قيمة التيار تتزايد بزيادة درجات الحرارة \cdot

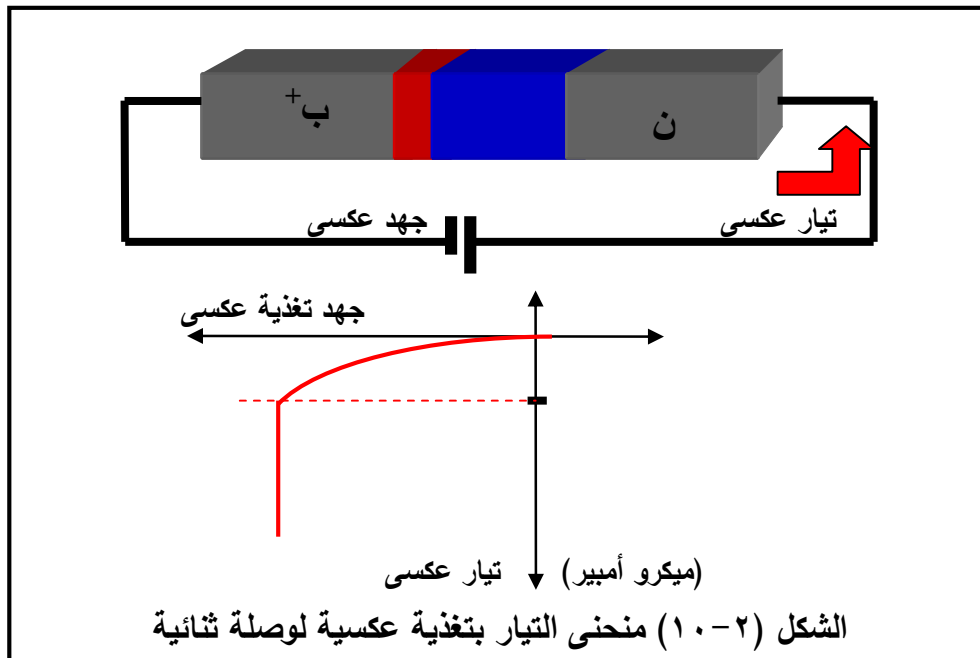
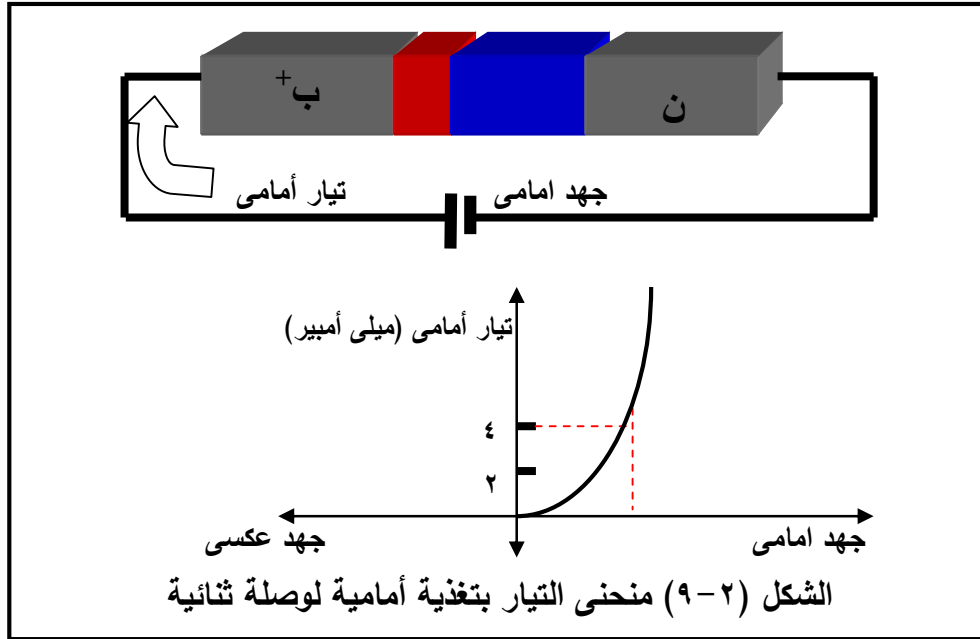
^٧ (Forward bias) فى وصلة شبه الموصل الثنائية يتم توصيل الجانب ذو الموصلية (ب) بالطرف الموجب للبطارية والجانب ذو الموصلية (ن) بالطرف السالب \cdot

^٨ (Reverse bias) فى وصلة شبه الموصل الثنائية يتم توصيل الجانب ذو الموصلية (ب) بالطرف السالب للبطارية والجانب ذو الموصلية (ن) بالطرف الموجب \cdot

^٩ (reverse saturation current) هو جزء من التيار العكسى بسبب إنتشار الشحنات الأقلية من منطقة

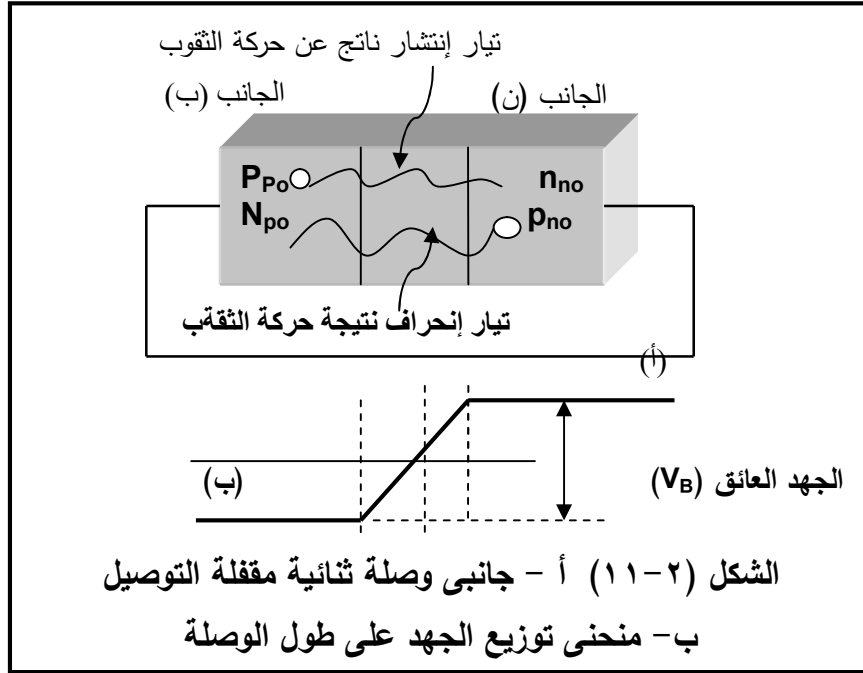
الإنتزان الى منطقة النضوب ولا يعتمد على جهد التغذية العكسية وله أكثر من رمز (I_s, I_o, I_R)

يعمل صمام أشباه الموصلات كمقوم يسمح بمرور التيار في إتجاه واحد وليس العكس . في حال توصيل الصمام الثنائي بجهد تغذية أمامي كما هو موضح بالشكل (٢ - ٩) يلاحظ تدفق كبير للتيار الكهربائي وتتزايد قيمته بشكل مضاعف مع جهد التغذية والذي يعرف بإسم التغذية الأمامية .



يوضح الشكل (٢ - ١٠) حالة التغذية العكسية للصمام الثنائي . ويمكن إستخدام الصمام الثنائي في عدة تطبيقات منها مقوم للتيار ومفتاح تبديل وكاشف

ضوئى وخلية شمسية وصمام ثنائى للموجات المتناهية الصغر أو فى العناصر المركبة مثل باعث الضوء أو ليزر أشباه الموصلات . من السهولة إستنباط قيمة الجهد العائق بالمعادلة (١-٢) حيث لا يوجد تيار يسرى فى الوصلة الثنائية فى حالة عدم توصيلها بجهد من خلال الدائرة الكهربائية الخارجية حتى عند اغلاق الدائرة لجانبى الوصلة كما هو موضح بالشكل (١١-٢)



وهكذا، يجب أن تكون مكونات التيار الكلى خلال الوصلة صفراً سواء بالنسبة للإلكترونات الحرة أو الثقوب . وإذا أخذنا فى الإعتبار التيار الناشئ عن الإلكترونات الحرة فقط عند الوصلة كما فى الشكل (١١-٢)، نجد أن هناك مكونين لشدة التيار المتدفق من خلال الوصلة . يمثل المكون الأول تدفقات التيار (J_{1n}) أسفل حاجز الجهد العائق والمعروف بتيار الإنحراف بسبب الإلكترونات الأقلية الحرة تحت تأثير المجال بسبب الجهد العائق ويمكن كتابة مكون التيار (J_{1n}) على النحو التالى :

$$J_{1n} = q n \mu_n \varepsilon \quad \text{المعادلة (٢-٢)}$$

حيث : (ε) شدة المجال الكهربائى، وكثافة الإلكترونات الحرة (ن) . وينشأ مكون تدفق التيار (J_{2n}) نتيجة سريان الإلكترونات الحرة وهى الشحنات الأغلبية من جانب الوصلة ذو الموصلية (ن) وتسرى الى الجانب ذو الموصلية (ب) ،

$$J_{2n} = q D_n \frac{dn}{dx} \quad \text{المعادلة (٢-٣)}$$

حيث (D_n) هو ثابت إنتشار الإلكترونات و (dn/dx) يمثل تدرج كثافة الإلكترونات فى الاتجاه (x) ، عندما يساوى جهد التغذية صفر فان مجموع مكونى التيار - تيار الإنتشار و تيار الإنحراف مساويا للصفر - وبالتالي:

$$J_{1n} + J_{2n} = q n \mu_n \epsilon + q D_n \frac{dn}{dx} = 0 \quad \text{المعادلة (٢-٤)}$$

بإعادة ترتيب وتكامل المعادلة عبر المنطقة العازلة ما بين النقطة (a) والنقطة (b) بالقرب من الوصلة ،

$$- \int_a^b \epsilon dx = \frac{D_n}{\mu_n} \int_{n_p}^{n_n} \frac{dn}{n} \quad \text{المعادلة (٢-٥)}$$

حيث (n_p) و (n_n) يمثلان كثافة الإلكترونات فى الجانبين (ن) و(ب):

$$V_b - V_a = V_T = \frac{D_n}{\mu_n} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad \text{المعادلة (٢-٦)}$$

حيث (V_a) و (V_b) يمثلان الجهود الكهربائية عند النقطة (a) والنقطة (b) بالقرب من الوصلة على التوالي (الشكل ٢-١١ ب) وبإستخدام علاقة أينشتاين والتي تمثل العلاقة بين ثابت الإنتشار وحركية الإلكترونات والتي تساوى $D_n/\mu_n = KT/q$ -

نحصل على قيمة جهد الإعاقه

$$V = \frac{KT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad \text{المعادلة (٢-٧)}$$

$$n_n = n_p \exp \frac{q V_B}{KT} \quad \text{المعادلة (٢-٨) أو :}$$

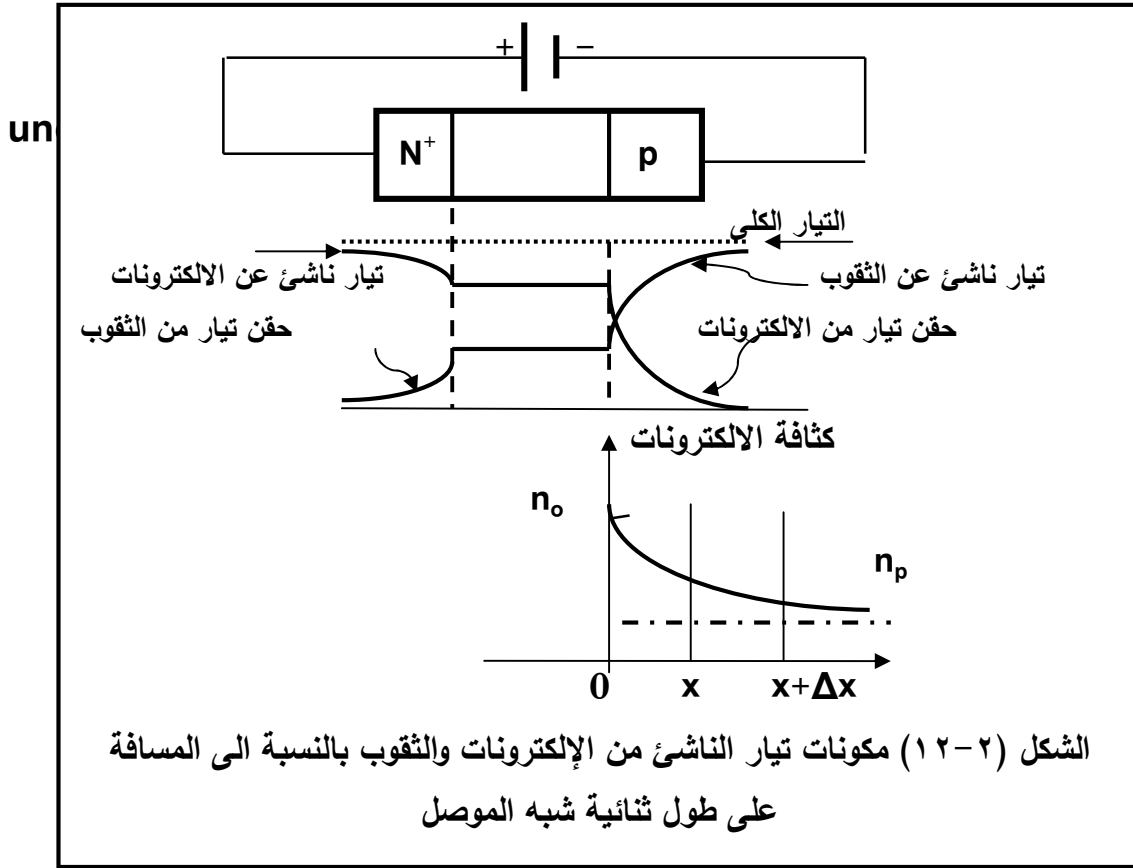
بالنسبة الى التيار الناشئ عن الثقوب وإستخدام العلاقة $(p_n = n_i^2/n_n)$:

$$V_T = \frac{KT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{KT}{q} \ln \frac{p_p n_n}{n_i^2} \quad \text{المعادلة (٢-٩)}$$

$$p_p = p_n \exp \left(\frac{q V_B}{KT} \right) \quad \text{المعادلة (٢-١٠) أو}$$

نجد أن جهد الإعاقه فى درجة حرارة الغرفة العادية حوالى ٠.٣ فولت لوصلة ثنائية نموذجية من الجرمانيوم مطعمة بذرات شوائب كثافتها 10^{16} فى سم^٣ ، ولا يمكن قياس هذا الجهد بين طرفى الوصلة الثنائية حيث أن التيار الصافى يساوى صفر وأن الوصلة الثنائية محايدة كهربائيا من الخارج .

٢-٢-١ تحليل الجهد والتيار المباشر فى الوصلة الثنائية
 نبدأ بدراسة الإشتقاق الرياضى للتيار المباشر على النحو التالى:



يوضح الشكل (٢-١٢) مكونات التيارات الناشئة بسريان الإلكترونات والثقوب على طول ثنائية شبه الموصل الغير متجانسة فى حالة التغذية الأمامية . فمن المفترض أن تدفق التيار يتم فى بعد واحد، حيث لا يحدث اتحاد للشحنات فى المنطقة العازلة وأن تيار الإنحراف فى المنطقة العازلة ذو قيمة صغيرة . فى الجانب ذو الموصلية (ن) فى منطقة نائية عن الوصلة فإن التيار الكلى يساوى التيار الناشئ عن سريان الإلكترونات - تحتفظ هذه المنطقة النائية عن الوصلة ببعض الإلكترونات التى تتحد مع الثقوب القادمة الى داخل الجانب ذو الموصلية (ن⁺) من الجانب ذو الموصلية (ب) . وهكذا، فإن تيار الإلكترونات يتناقص فى إتجاه الوصلة حيث أن مجموع التيار الناشئ عن إنتشار الإلكترونات والتيار الناشئ عن الثقوب المحقنة يساوى التيار الكلى . ينتشر التيار الناشئ عن سريان الإلكترونات (In) المتبقى عند الوصلة الى داخل الجانب ذو

الموصلية (ب) . تتحد هذه الإلكترونات المحقنة وتتناقص كثافتها في الجانب ذو الموصلية (ب) على طول المسافة من الوصلة حتى تصل كثافة الإلكترونات الى كثافة الإتزان (n_p) في الجانب ذو الموصلية (ب) . تتم نفس الملاحظات للتيار الناشئ عن الثقوب المحقنة في الجانب ذو الموصلية (ن) . ويتساوى التيار الكلى المتدفق لمجموع تيار الإنتشار الناتج عن سريان الإلكترونات وتيار الإنتشار الناتج عن سريان الثقوب عند الوصلة . في ظل هذه الظروف يمكن الحصول على علاقة رياضية للتيار الناشئ عن سريان الإلكترونات من خلال إعتبرات الإستمرارية في وحدة الحجم الممتدة من النقطة (x) الى النقطة ($x+dx$) ، يجب أن يكون صافي تدفق الشحنات بالإضافة إلى معدل إتحاد الشحنات في وحدة الحجم في الحالات الثابتة يساوي الصفر . تدفق الإلكترونات السارية الى الجانب الآخر كما في العلاقة التالية:

$$F(x) = D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad \text{المعادلة (١١-٢)}$$

كما وأن تدفق الإلكترونات الخارجة عند النقطة ($x+dx$) كما يلي:

$$F(x+dx) = F(x) + \frac{\partial F}{\partial x} dx \quad \text{المعادلة (١٢-٢)}$$

وهكذا فإن التدفق الصافي الداخل الى وحدة الحجم يساوى،

$$F(x) - F(x+dx) = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} dx \quad \text{المعادلة (١٣-٢)}$$

حيث يتم إتحاد حاملات الشحنات الزائدة بشكل أسي ، فإن معدل إتحاد الشحنات يتناسب مع الشحنات الزائدة ومعدل إزالة الشحنات من وحدة الحجم عن طريق إتحاد الشحنات وتساوى :

$$+ \frac{(n-n_p)}{\tau_n} \quad \text{المعادلة (١٤-٢)}$$

حيث (τ_n) زمن عمر الإلكترون في الجانب ذو الموصلية (ب) - نحصل من معادلة الإستمرارية على:

$$D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{(n-n_p)}{\tau_n} = 0 \quad \text{المعادلة (١٥-٢)}$$

يمكن حل المعادلة (١٥-٢) رهنا بشروط الحدود ($n = n_0$) عند $x = 0$ و $n = n_p$ عند $(x = \infty)$ ،

$$n - n_p = (n_o - n_p) \frac{e^{-x}}{\sqrt{D_n \tau_n}} \quad \text{المعادلة (١٦-٢)}$$

معدل إنتشار الإلكترونات الذى يؤدى الى تيار إنتشار الإلكترونات يتناسب طرديا مع تناقص تركيز الإلكترونات ، وفى حالة البعد الواحد - نجد

$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx} + q n \mu_n \varepsilon \quad \text{المعادلة (١٧-٢)}$$

حيث (J_n) يمثل كثافة تيار الإلكترونات الكلى ، (D_n) يمثل ثابت إنتشار الإلكترونات بوحدة م^٢/ث ، (dn/dx) يمثل تدرج تركيز الإلكترونات ، حيث أخذ فى الإعتبار كل من كثافة تيار الإلكترونات ($qD_n (dn/dx)$) وكثافة تيار إنحراف الإلكترونات ($qn\mu_n\varepsilon$) حيث أنه فى الحالات العملية كما هو الحال فى حركة الإلكترونات فى منطقة القاعدة فى الترانسسستور - من المعادلة (١٧-٢) ،

$$I_n = q A D_n \frac{\partial n}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{qAD_n (n_o - n_p)}{\sqrt{D_n \tau_n}} \quad \text{المعادلة (١٨-٢)}$$

حيث (A) تمثل مساحة مقطع الوصلة ، يتناسب تركيز الإلكترونات عند الحافة اليمنى للمنطقة العازلة مع جهد التغذية (V_o) ، من الإعتبارات الخاصة بمستوى فيرمى فى الوصلة الثنائية - فإن مستوى حقن الإلكترونات يساوى :

$$n_o = n_p e^{qV_o/KT} \quad \text{المعادلة (١٩-٢)}$$

$$I_n = \frac{qAD_n n_p}{L_n} \left(e^{qV_o/KT} - 1 \right) \quad \text{المعادلة (٢٠-٢)}$$

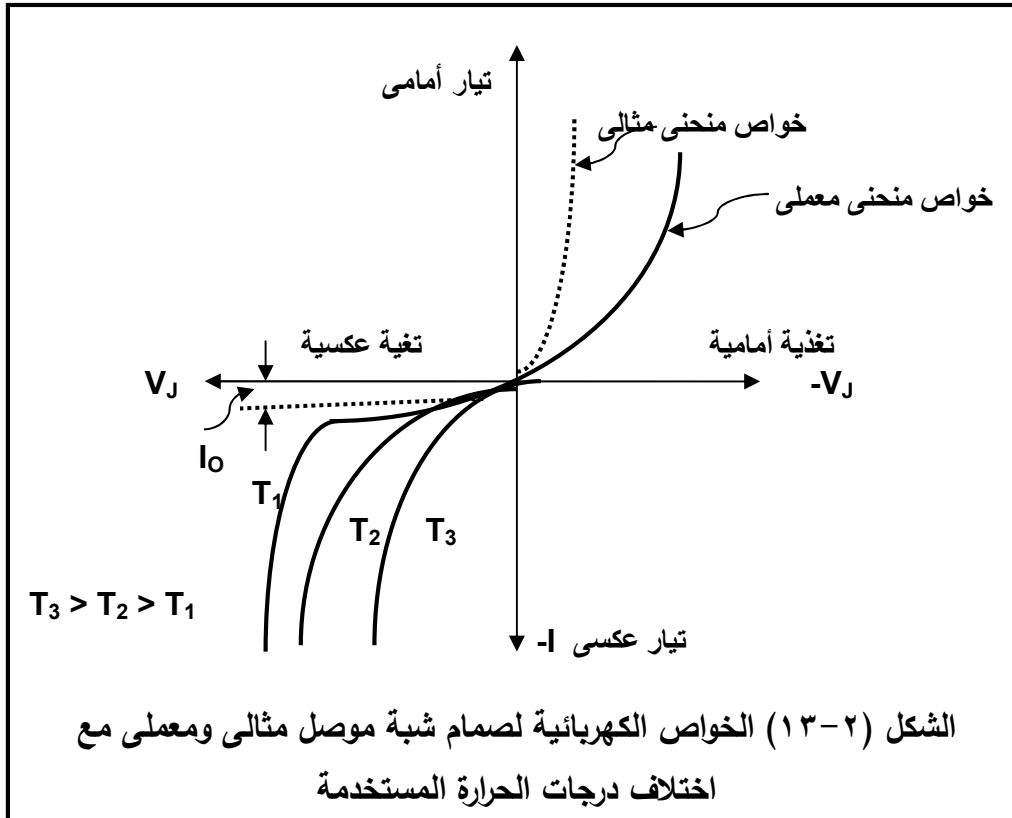
حيث (L_n) ثابت إنتشار الإلكترونات فى الجانب ذو الموصلية (ب) ويساوى ($L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$) ، يمكن إنشاء تعبير مماثل للتيار الناشئ عن الثقوب ليصبح سريان التيار الكلى يساوى :

$$I = I_s \left(e^{qV_o/KT} - 1 \right) \quad \text{المعادلة (٢١-٢)}$$

$$I_s = qA \left[\left(\frac{n_p}{\tau_n} \right) L_n + \left(\frac{p_n}{\tau_p} \right) L_p \right] , \text{ حيث تيار التشبع } (I_s) \text{ ويساوى}$$

و (τ_p) زمن عمر الثقوب فى الجانب ذو الموصلية (ن) و (p_n) تمثل كثافة

الثقوب في الجانب ذو الموصلية (ن) و (D_p) ثابت إنتشار الثقوب و (L_p) يمثل طول إنتشار الثقوب في الجانب ذو الموصلية (ن) ويساوى ($L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$) . المعادلة (٢) - (٢١) معروفة باسم معادلة التقويم المثالية- بالرغم من أن المعادلة تم إستنباطها للوصلات في حالة التغذية الأمامية فإنها صالحة أيضا في حالة التغذية العكسية للوصلة الثنائية . وقد وجد معمليا أن العديد من الثنائيات تتبع معادلة التقويم المثالية حتى لقيم تيار أكبر من ستة مرات من القيمة الإبتدائية . خصائص المقوم المثالي لها ذات الدقة نفسها لعناصر إعاقة شوتكي^(١٠) ذات الجهد العالي للإعاقة (ϕ) عند السطوح بين المواد المعدنية ومواد أشباه الموصلات،



^{١٠} (Schottky barrier) عبارة عن طاقة جهد مانع للإلكترونات المتكونة عند وصلة بين جانب معدني وجانب شبه موصل . الجهد العائق لشوتكي له خواص التقويم وهو مناسب للإستخدام كدايود . أحد خواصه الأساسية إرتفاع الجهد العائق (Φ_B) والذي يعتمد على التكوين الهندسي للمعدن وشبه الموصل . وجدير بالذكر ليس كل الوصلات المعدنية وشبه الموصل تكون عائق تقويم شوتكي، الوصلات المعدنية- شبه موصل تولد تيار في الإتجاهين بدون تقويم وقد يكون ذلك لصغر جهد شوتكي العائق والذي يسمى وصلة أومية .

تسمح بقيمة تيار تشبع (I_s) بالمعادلة التالية:

$$I_s = AT^2 e^{-q\phi/KT} \quad \text{المعادلة (٢-٢٢)}$$

يتم رسم معادلة الصمام الثنائي بالشكل (٢-١٣) والتي تمثل خواص الجهد والتيار للصمام المثالي والتطبيقي عند درجات حرارة مختلفة .

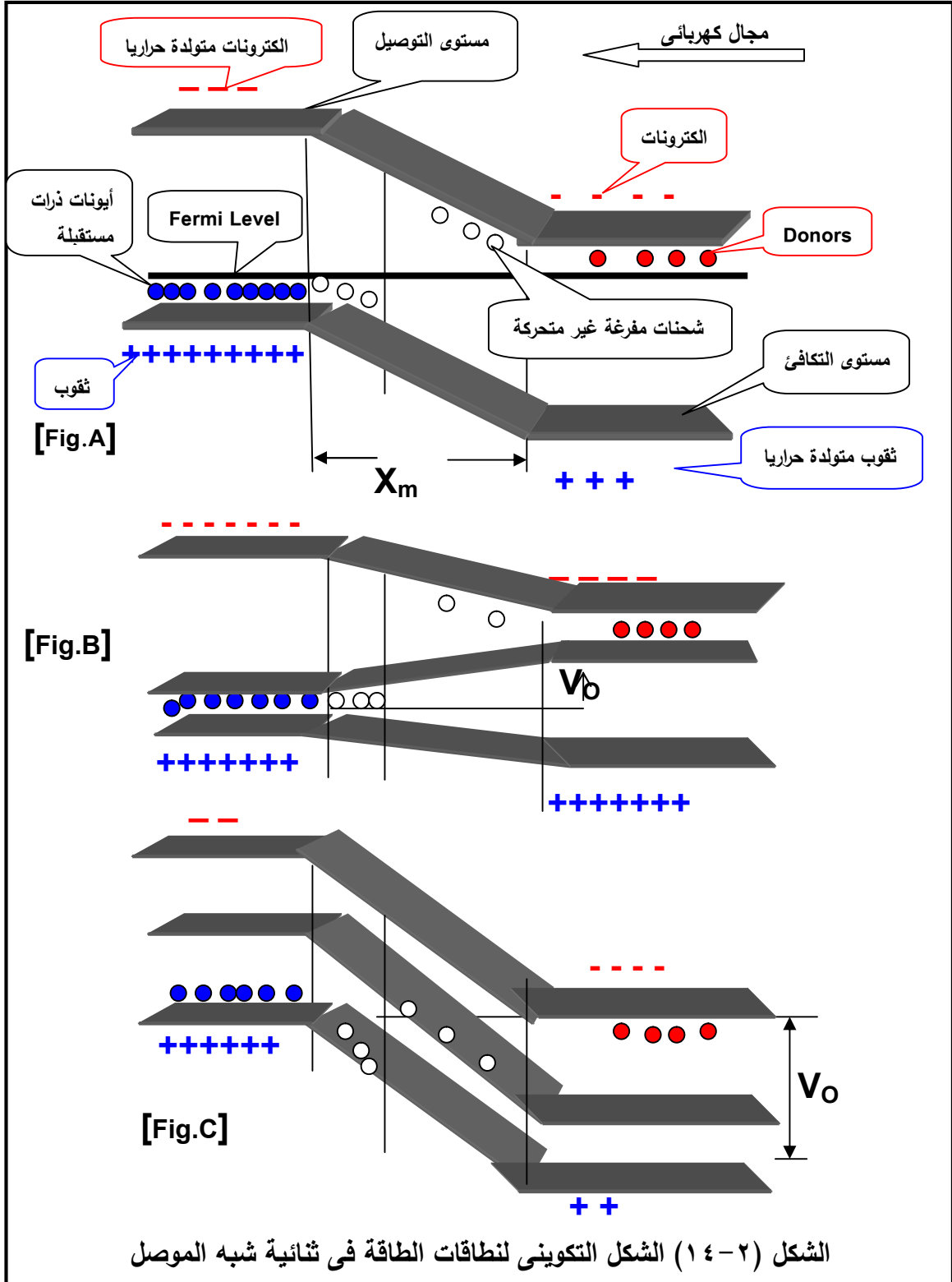
٢ - ٢ - ٢ مقاومة الإتصال^(١١)

يتم سبك قطبين معدنيين لأطراف ثنائي شبه الموصل للسماح بتدفق التيار في الدائرة الخارجية . نفترض مجازاً أن تصنيع وسبك مثل هذه الأقطاب ذات مقاومة تساوى صفر وتعتبر عناصر غير مقاومة لمرور التيار . بأسلوب آخر فإن الجهد الواقع جراء توصيل سبيكة الأقطاب بمادة شبه الموصل على طرفي الثنائي لا تعتمد على إتجاه أو قيمة التيار - وتسمى مقاومة الإتصال .

يجب أن تكون قيمة التيار المار في الوصلة الثنائية يساوى صفر عندما تكون في وضع دائرة مغلقة مع عدم وجود جهد تغذية - ويظل حاجز الطاقة الكامنة (V_o) أو (V_t) أو (V_B) بدون تغيير . ترتفع درجة حرارة المعدن المصنوع منه الأقطاب إذا كان التيار لا يساوى صفر ($I \neq 0$) عند جهد تغذية يساوى صفر بسبب الطاقة المتولدة في الوصلات نفسها مما يستدعي إيجاد وسائل لتبريدها . في حالة كون الدائرة مغلقة فإن حاصل جمع الجهود الواقعة على الدايمود تساوى صفر ويتم تعويض جهد الطاقة الكامنة (V_o) بالجهد الواقع بين معدن القطب وشريحة شبه الموصل عند نقطة إتصالهما .

^{١١} (ohmic contact) هي ليست وصلة تقويم وهي وصلة كهربائية بين موصلين لها خواص خطية في منحنى الجهد والتيار على غرار قانون أوم . تستخدم الوصلة الأومية منخفضة المقاومة للسماح لسريان الشحنات بسهولة في الإتجاهين بدون إعاقة تقويم أو فقد طاقة زائدة بسبب الجهد

٢ - ٢ - ٣ الشكل التكويني لنطاقات الطاقة في دائرة الوصلة الثنائية المفتوحة
يجب أن يكون مستوى فيرمي ثابت على طول وصلة ثنائية شبه الموصل
للتوصل لحالة الإتزان الكهربائي في الوصلة ،

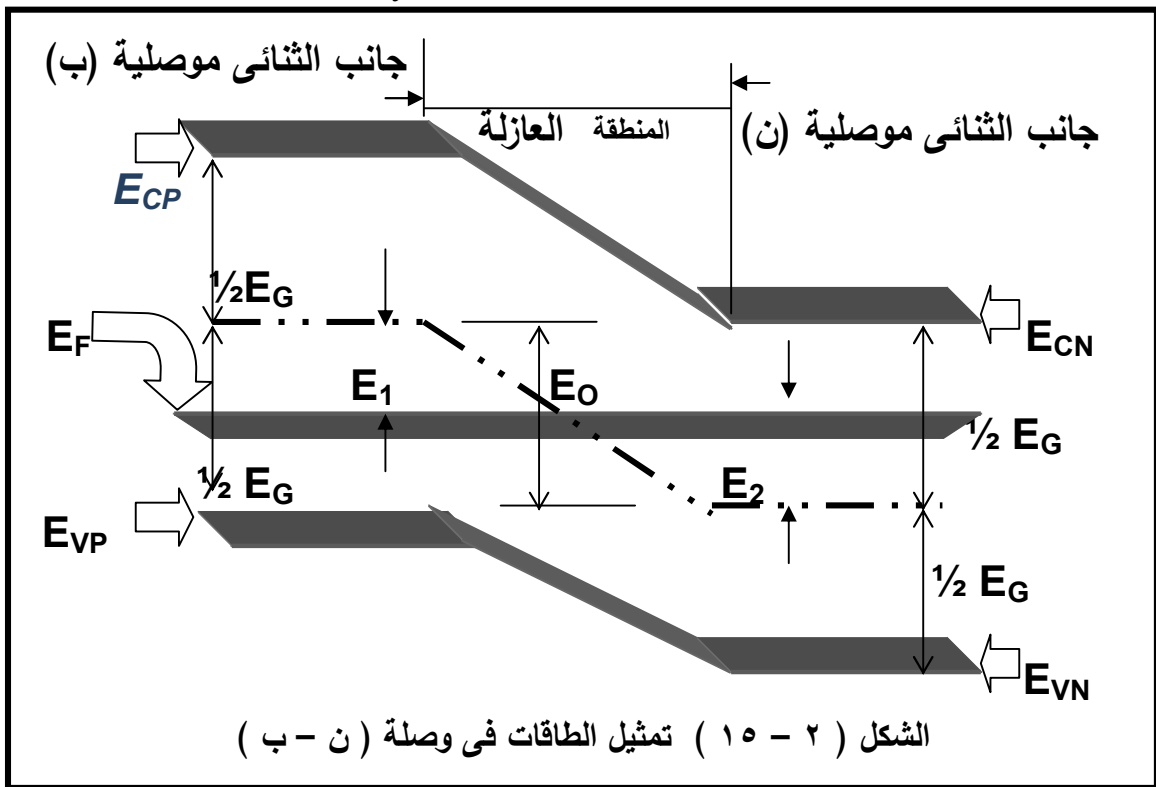


الشكل (٢-٤) الشكل التكويني لنطاقات الطاقة في ثنائية شبه الموصل

مع مراعاة أن مستوى فيرمي ملاصق لمستوى الطاقة الأدنى من مستويات نطاق التوصيل على جانب الشريحة ذات الموصلية (ن) وملاصق لمستوى الطاقة الأعلى من مستويات الطاقة في نطاق التكافئ على جانب الشريحة ذات الموصلية (ب). الشكل (١٤ - ٢) يوضح نموذج تكوين نطاقات الطاقة في ثنائي شبه الموصل ومنه يتضح إنحراف مستوى الطاقة (E_o)

$$E_o = E_{cp} - E_{cn} = E_{vp} - E_{vn} = E_1 + E_2 \quad (٢٣ - ٢) \text{ المعادلة}$$

$$E_g = KT \ln \frac{N_c N_v}{n_i^2} \quad (٢٤ - ٢) \text{ المعادلة}$$



يتضح من الشكل (١٥ - ٢) حيث (E_o) تمثل إرتفاع الطاقة الكامنة أو قيمة

الجهد المانع عند وصلة الثنائي

$$\frac{1}{2} E_g - E_1 = E_F - E_{vp} \quad (٢٥ - ٢) \text{ المعادلة}$$

$$\frac{1}{2} E_g - E_2 = E_{cnF} - E_F \quad (٢٦ - ٢) \text{ المعادلة}$$

بجمع المعادلة (٢٥ - ٢) والمعادلة (٢٦ - ٢) نحصل على :

$$E_1 + E_2 = E_g - (E_{cn} - E_F) - (E_F - E_{vn}) \quad (٢٧ - ٢) \text{ المعادلة}$$

من المعادلة (٢٤-٢) والمعادلة (٢٧-٢) نجد:

$$E_o = E_1 + E_2 = E_g - (E_{cn} - E_f) - (E_f - E_{vn}) \quad (٢٨-٢) \text{ المعادلة}$$

ومما سبق نعلم أن:

$$n_i^2 = n p = N_c N_v e^{-\left(\frac{E_g}{KT}\right)}$$

$$E_g = KT \ln \frac{N_c N_v}{n_i^2} \quad (٢٩-٢) \text{ المعادلة}$$

ومما سبق نعلم أن مستوى فيرمي للجانب ذو الموصلية (ن)

$$E_f = E_c - KT \ln \frac{N_c}{N_D}$$

$$E_{cn} - E_f = KT \ln \frac{N_c}{N_D} \quad (٣٠-٢) \text{ المعادلة}$$

ومما سبق نعلم أن مستوى فيرمي للجانب ذو الموصلية (ب)

$$E_f = E_v - KT \ln \frac{N_v}{N_A}$$

$$E_f - E_{vn} = KT \ln \frac{N_v}{N_A} \quad (٣١-٢) \text{ المعادلة}$$

بالتعويض بالمعادلات المعادلة (٢٩-٢) و المعادلة (٣٠-٢) فى المعادلة (٢٨-٢) نحصل

$$E_o = KT \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} = V_o \quad (٣٢-٢) \text{ المعادلة}$$

عند توصيل منبع تغية أمامية - تتناقص الشحنات الأقلية المحقنة بشكل مضاعف مع بعد المسافة من الوصلة .

$$P_n - P_{no} = K_1 e^{-x/L_p} + K_2 e^{x/L_p}$$

وأیضا نحصل على تيار الانتشار

$$J_p = -q D_p \frac{\partial P}{\partial x}$$

من الواضح أن التيار الكلى فى الجانب ذو الموصلية (ن) يساوى التيار الناتج عن الشحنات الأغلبية (I_{nn}) مضافا الى التيار الناتج عن الشحنات الأقلية (I_{pn}) . يوضح الشكل (١٦-٢) أربع مكونات للتيار (I_{pp} , I_{nn} , I_{pn} , I_{np}) ويمكن حساب التيار الكلى الناتج من الشحنات الأقلية عند مسافة تساوى صفر

$$I = I_{pn(o)} + I_{np(o)} \quad (\text{المعادلة } 2 - 33)$$

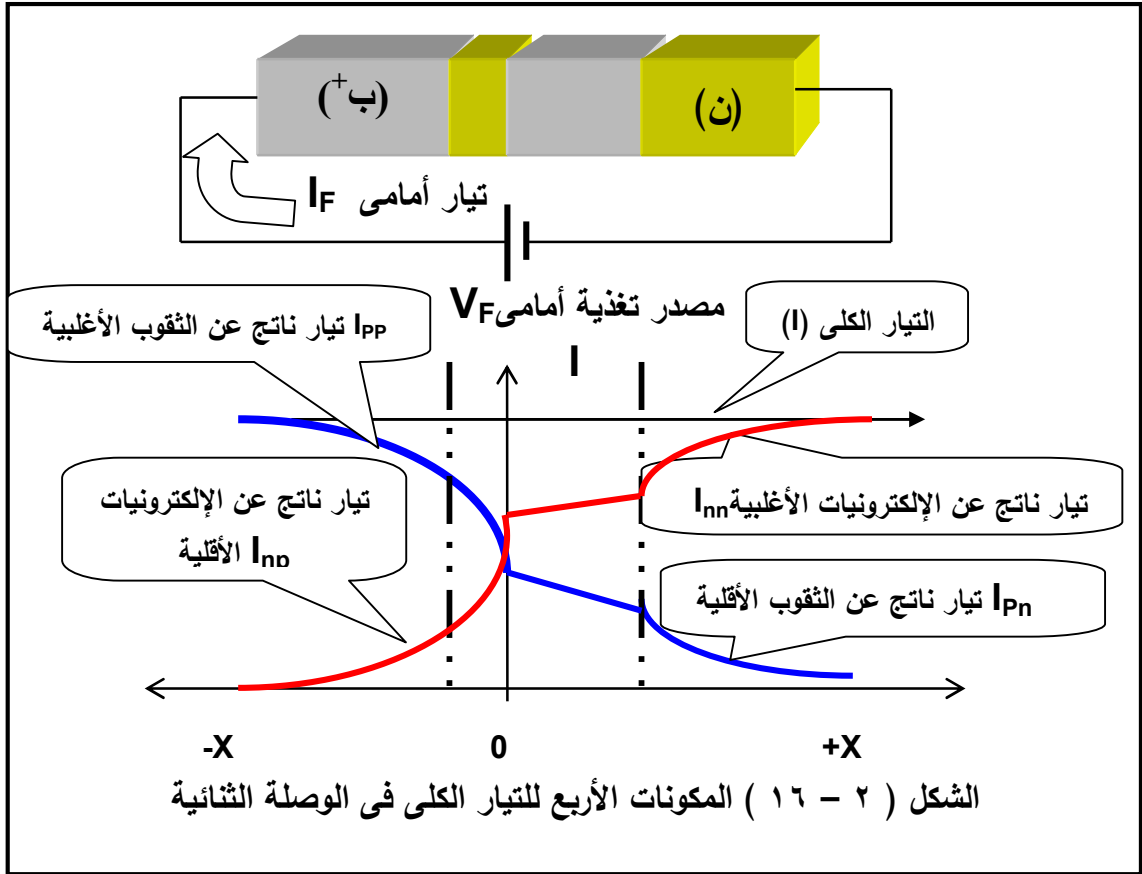
من الواضح أن التيار الكلى (I) فى الجانب ذو الموصلية (ب) يساوى التيار الناتج عن الشحنات الأغلبية (I_{pp}) مضافا الى التيار الناتج عن الشحنات الأقلية (I_{np})

$$I_{pp}(x) = I - I_{np}(x) \quad (\text{المعادلة } 2 - 34)$$

$$I_{nn}(x) = I - I_{pn}(x) \quad (\text{المعادلة } 2 - 35)$$

التيار الكلى فى الصمام الثنائى عند الوصلة يساوى صفر

$$I_T = I_{pp} + I_{np} - I_{nn} - I_{pn} = 0 \quad (\text{المعادلة } 2 - 36)$$

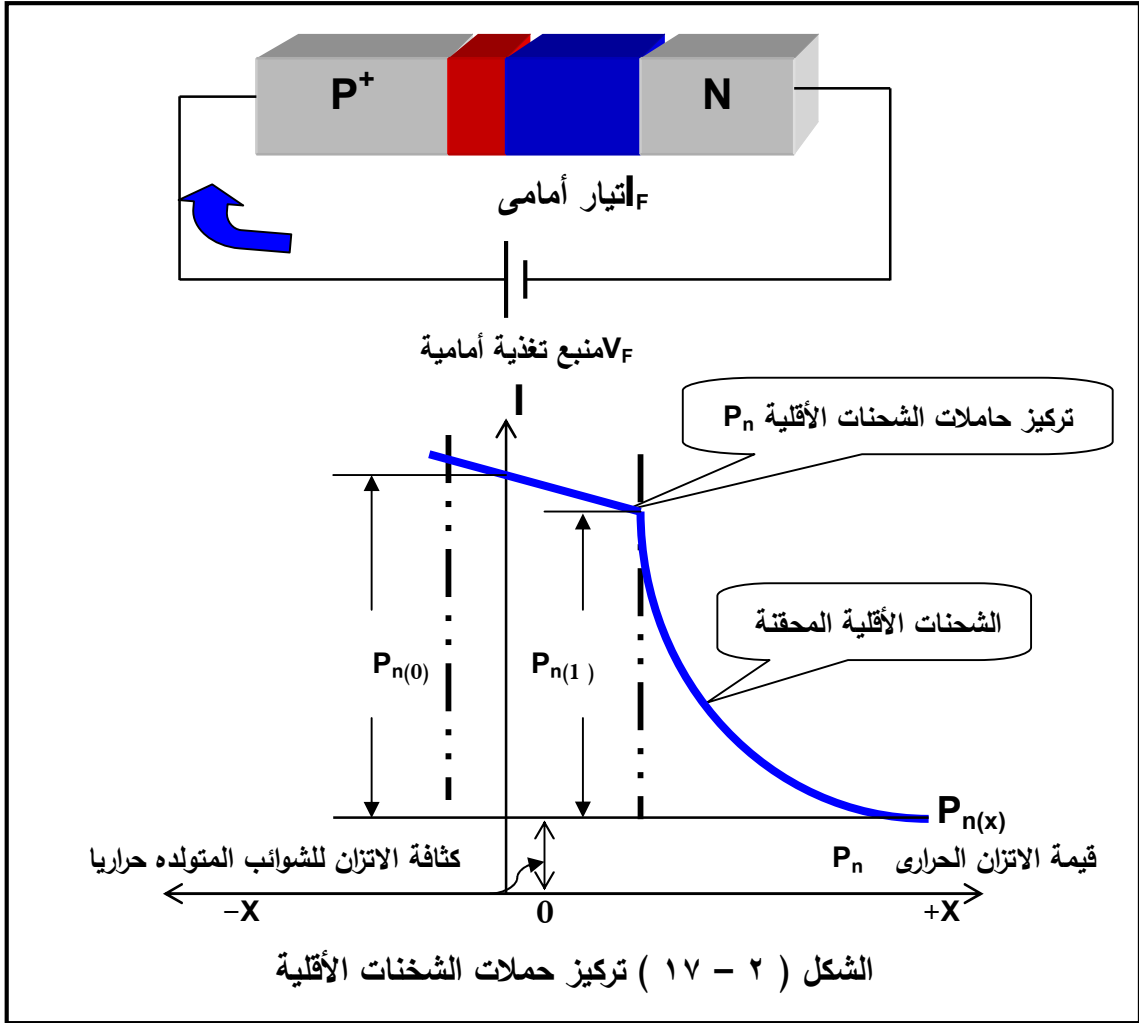


مع ملاحظة أن كل المعادلات السابقة صالحة فى حالة الوصلات الغير متناظرة والغير متجانسة .

$$I_{nn} \neq I_{pp} \text{ \& } I_{np} \neq I_{pn}$$

٢ - ٢ - ٤ النظرية الكمية للتيارات فى وصلات أشباه الموصلات الثنائية

فى حالة التغذية الأمامية للوصلة الثنائية تتحرك الثقوب من الجانب (ب) الى الجانب (ن) وأيضا تتحرك الإلكترونات من الجانب (ن) الى الجانب (ب) . نبدأ بتحليل مكون واحد فقط للتسهيل .



على سبيل المثال ينطبق نفس التحليل على الثقوب المحقنة فى الجانب (ن) والإلكترونات المحقنة فى الجانب (ب) ويزيد تركيز الثقوب فى الجانب (ن) أكثر من قيمة الإتزان الحرارى (p_n) والتي يمكن حسابها بالمعادلة التالية:

$$P_{n(x)} = P_{n(1)} e^{-\left(\frac{x}{L_p}\right)} + P_n \quad \text{المعادلة (٢ - ٣٧)}$$

تحتسب الشحنات المحقنة أو كثافة الشحنات الإضافية عند مسافة تساوى صفر

$$P_{n1} = P_{n(0)} - P_n$$

مما سبق فإن تيار الإنتشار يساوى

$$J_p = -q D_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

يمكن الحصول على تيار الانتشار نتيجة تدفق الثقوب في الجانب (ن) بالمعادلة التالية:

$$I_{pn} = -qAD_p \frac{\partial p_n}{\partial x} \quad (\text{المعادلة } 2 - 38)$$

بتفاضل المعادلة (2 - 36) والتعويض في المعادلة (2 - 38) نحصل على:

$$I_{pn(x)} = \frac{qAD_p P_{n1}}{L_p} e^{-(x/L_p)} \quad (\text{المعادلة } 2 - 39)$$

تحقق المعادلة (2 - 39) تناقص التيار الناتج عن تدفق الثقوب بشكل أسى مع المسافة . يشتمل المكون (p_{n1}) على تيار الشحنات الأقلية (I_{pn}) اعتمادا على جهد التغذية .

٢-٢-٤ - ١ القانون العام للتيار في وصلات أشباه الموصلات

يمكن حساب كثافة الشحنات الموجبة الأغلبية والأقلية (الثقوب) عند طرفى المنطقة العازلة للوصلة إذا كانت قيمة الجهد العائق لعبور المنطقة العازلة هو (V_B) - فتكون قيمة كثافة الشحنات الموجبة الأغلبية (p_p) كما يلي :

$$p_p = p_n e^{\left(\frac{V_B}{V_T}\right)} \quad (\text{المعادلة } 2 - 40)$$

تعرف المعادلة (2 - 40) بعلاقة بولتزمان لنظرية الغازات الحرة^(١٢) وهى صالحة تحت حقن حاملات شحنات ذات مستوى منخفض ونجد عند تطبيقها فى حالة وصلة شبه موصل مفتوحة أن :

$$p_p = p_{p(o)} \ \& \ p_n = p_{n(o)} \ \& \ V_B = V_o$$

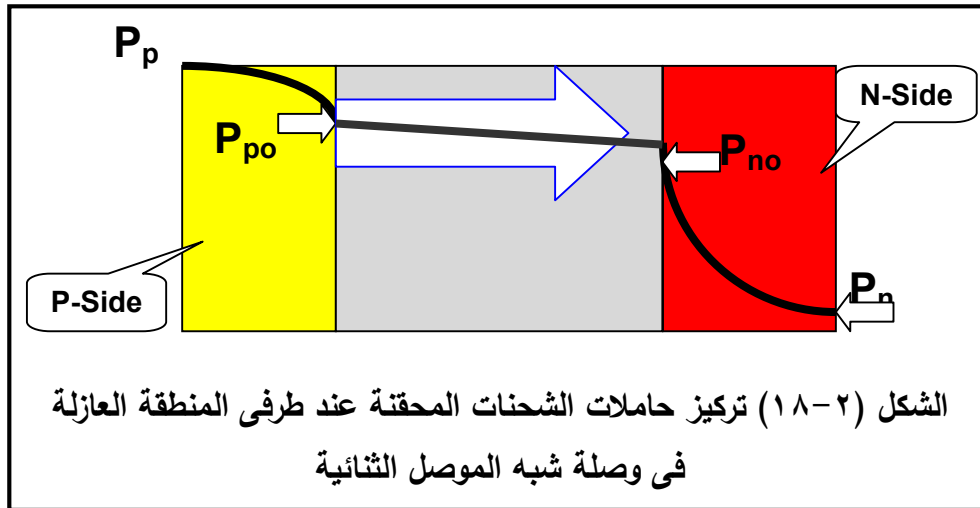
^{١٢} (kinetic theory) توضح أن الغاز يتكون من عدد كبير من الجسيمات المجهرية (ذرات أو جزيئات)، كلها فى حركة ثابتة مستمرة وعشوائية . الجسيمات المتحركة بسرعة باستمرار تتصادم مع بعضها البعض ومع جدران الغلاف . تفسر النظرية الحركية الخصائص المجهرية للغازات مثل الضغط والحرارة واللزوجة والموصلية الحرارية والحجم باعتبار التركيب الجزيئي والحركة . النظرية تفترض أن ضغط الغاز بسبب التصادم على جدران الغلاف مع جزيئات أو ذرات تتحرك فى سرعات مختلفة . تحدد النظرية الحركية درجة الحرارة بطريقتها، وليست متطابقة مع تعريف الديناميكا الحرارية .

بالتعويض فى المعادلة (٤٠-٢) يمكن إيجاد قيمة جهد الوصلة العائق (V_o) فى حالة توصيل جهد أمامى للوصلة قدرة (V) تتناقص قيمة الجهد العائق فى الوصلة (V_B) عن قيمتها الأساسية بقيمة (V) على النحو التالى:

$$V_B = V_o - V \quad \text{المعادلة (٤١-٢)}$$

الكثافة الكلية للشحنات الموجبة عند طرف الخرج للشريحة (ب) ذات قيمه ثابتة تقريبا وتساوى قيمتها عند الإتزان الحرارى أى ($p_p \cong p_{p(o)}$) ثم تتناقص عبر المسافة داخل الشريحة (ن) عند حافة المنطقة العازلة كما هو مبين بالشكل (١٨-٢) حيث :

$$x = 0 \text{ \& } p_n = p_{n(o)}$$



ويعاد صياغة المعادلة (٤٠-٢) لتصبح :

$$p_{p(o)} = p_{no} e^{(V_o - V)/V_T} \quad \text{المعادلة (٤٢-٢)}$$

$$p_{p(o)} = p_n e^{(V_B)/V_T} \quad \text{المعادلة (٤٣-٢)}$$

يسمى هذا الشرط الحدى قانون الحقن^(١٣) . قيمة الجهد فى حالة التغذية الأمامية أكبر من الصفر ($V > 0$) وكثافة حاملات الشحنات الموجبة (الثقوب) الأقلية

^{١٣} (Low level injection) ويشير إلى الحالة التى فيها عدد حاملات الشحنات الأقلية المتولدة قليلة مقارنة لحاملات الشحنات الأغلبية فى المواد. أساسا، تركيز حاملات الشحنات الأغلبية بأشباه الموصلات ستظل بدون تغيير (نسبيا)، ، فى حين أن تركيز الشحنات الأقلية تزيد زيادة كبيرة. فى هذه الحالة فإن معدل إتحاد الشحنات الأقلية هو معدل خطي.

(p_{no}) عند الوصلة أكبر من قيمة هذه الشحنات في حالة الإتزان الحرارى (P_n) - يمكن تطبيق قانون مماثل في حالة حاملات الشحنات السالبة (الإلكترونات) الأقلية - كثافة حاملات الشحنات الموجبة (الثقوب) الأقلية (p_{n1}) المحققة داخل الشريحة (ن) عند الوصلة يمكن إيجاده بالتعويض بالمعادلة (٢-٤٣) في المعادلة (٢-٣٧)

$$p_{n(o)} = p_n \left[e^{V/V_T} - 1 \right] \quad \text{المعادلة (٢-٤٤)}$$

يمكن إيجاد قيمة التيار الناتج عن الشحنات الموجبة (الثقوب) الأقلية ($I_{pn(o)}$) العابرة خلال المنطقة العازلة الى الجانب (ن) بإستخدام المعادلة (٢-٤٤)

$$I_{pn(o)} = \frac{q A D_p p_n}{L_p} \left[e^{V/V_T} - 1 \right] \quad \text{المعادلة (٢-٤٥)}$$

يمكن إيجاد قيمة التيار الناتج عن الشحنات السالبة (الإلكترونات) الأقلية ($I_{np(o)}$) العابره خلال المنطقة العازلة الى الجانب (ب)

$$I_{np(o)} = \frac{q A D_n n_p}{L_n} \left[e^{V/V_T} - 1 \right] \quad \text{المعادلة (٢-٤٦)}$$

يمكن إيجاد قيمة التيار الكلى النهائى بجمع عنصرى تيار الأقلية ($I_{pn(o)}$) و ($I_{np(o)}$)

على النحو التالى :

$$I = I_o \left(e^{V/V_T} - 1 \right) \quad \text{المعادلة (٢-٤٧)}$$

$$I_o = \left[\frac{q A D_p p_n}{L_p} + \frac{q A D_n n_p}{L_n} \right] \quad \text{المعادلة (٢-٤٨)}$$

في حالة التغذية العكسية عندما يكون الجهد العكسى أكثر سلبية من الجهد العائق

($-V > V_T$) يعاد كتابة المعادلة (٢-٤٧) على النحو التالى:-

$$I = I_o \quad \text{المعادلة (٢-٤٩)}$$

حيث (I_o) هو تيار التشبع العكسى وبإعادة كتابة المعادلة (٢-٤٨) نحصل على:

$$I_o = q A \left[\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right] n_i^2 \quad \text{المعادلة (٢-٥٠)}$$

$$n_i^2 = A_o T^3 e^{-E_{go}/KT} = A_o T^3 e^{-V_{go}/V_T} \quad \text{المعادلة (٢-٥١)}$$

حيث القيمة (V_{go}) عدديا تساوى قيمة الفجوة الطاقية (E_{go}) بالإلكترون - فولت ،
توضح المعادلة التالية إعتماضية درجة الحرارة على قيمة تيار التشبع العكسى:

$$I_o = K_1 T^2 e^{V_{go}/V_T} \quad \text{المعادلة (٥٢-٢)}$$

حيث (K_1) ثابت لا يعتمد على درجات الحرارة - مع مراعاة أن تطبيق المعادلة
(٤٧-٢) يعتمد على مادة شبه الموصل المصنع منها الدايدود الثنائى - وبالتالي يمكن
إعادة كتابتها على النحو التالى:

$$I = I_o \left[\left(e^{V/\eta V_T} - 1 \right) \right] \quad \text{المعادلة (٥٣-٢)}$$

حيث أن قيمة المقدار (η) لبعض المواد يمكن أن يكون أكبر من الواحد الصحيح
ويصبح قيمة تيار التشبع العكسى على النحو التالى:

$$I_o = K_2 T^{3/2} e^{-V_{go}/2V_T} \quad \text{المعادلة (٥٤-٢)}$$

حيث الثابت (K_2) لا يعتمد على درجات الحرارة

٢-٤-٢-٢ خصائص الجهد والتيار الكهربائى فى ثنائى شبه الموصل

توضح المعادلة (٤٧-٢) علاقة التيار الناشئ بجهد التغذية ، كما توضح القيمة
الموجبة لتيار الوصلة (I_a) إتجاه التيار المار من الجانب (ب) الى الجانب (ن) بجهد
التغذية أمامى ، وكما هو معلوم أن قيمة الثابت (η) فى المعادلة (٤٤-٢) يساوى واحد
للعناصر المصنعة من مادة الجرمانيوم ويساوى إثنان للعناصر المصنعة من مادة
السيلكون وبالتعويض عن الجهد الحرارى الناشئ تحت تأثير درجات الحرارة بقيمته (V_T)

$$V_T = T/11600 \quad \text{المعادلة (٥٥-٢)}$$

قيمة الجهد الحرارى (V_T) فى درجة حرارة الغرفة يساوى ٠.٠٢٦ فولت ، عند جهد
تغذية (V) أكبر من الجهد الحرارى (V_T) تصبح المعادلة (٥٣-٢) على النحو التالى:

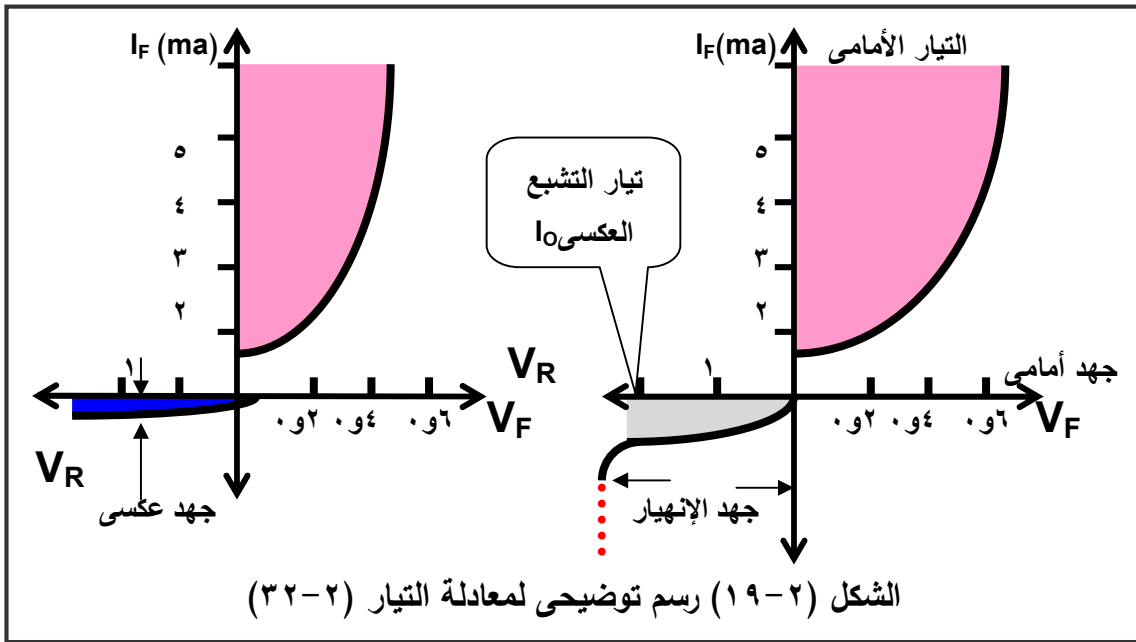
$$I_j = I_o e^{V_F/\eta V_T} \quad \text{المعادلة (٥٦-٢)}$$

يزداد تيار الثنائى بزيادة جهد التغذية - وعندما يكون جهد تغذية الدايدود عكسى وأكثر

سلبية من الجهد الحرارى ($-V > V_T$) تصبح معادلة التيار على النحو التالى:

$$I_j = I_R \quad \text{المعادلة (٥٧-٢)}$$

يوضح الشكل (١٩-٢) رسم توضيحي لمعادلة التيار (٥٣-٢). نلاحظ أن تيار التشبع العكسى ثابت ولا يعتمد على قيمة جهد التغذية العكسية (V_R) - للتوضيح الجزء المنقط فى المنحنى فى إتجاه التغذية العكسية يوضح قيمة جهد جديدة (V_Z) - عند هذه القيمة ينشأ تيار عكسى كبير جدا مما يتسبب فى وضع الدايمود فى حالة إنهيار.



• جهد القطع^(١٤)

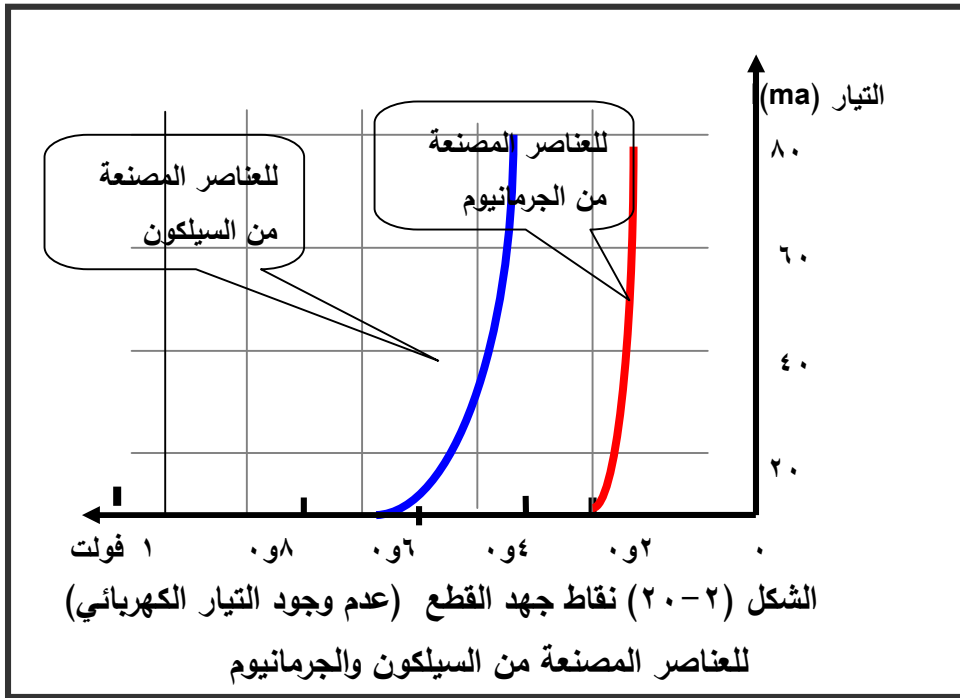
يوضح الشكل (٢٠-٢) الإختلاف فى خصائص الجهد والتيار لمواد تصنيع العناصر الإلكترونية السيلكون والجرمانيوم مثل جهد القطع وجهد الإزاحة وجهد الإعاقه^(١٥) عندما تكون قيم هذه النقاط أصغر من القيم القياسية يكون التيار الأمامى

^{١٤} (Cut in voltage or Knee voltage) هو جهد تغذية أمامى عندما يبدأ التيار خلال الوصلة فى الزيادة

بسرعة

^{١٥} (threshold Voltage) هو الجهد المانع وهو أقل جهد أمامى بين أطراف الدايمود حيث يبدأ الدايمود فى توصيل التيار ويساوى تقريبا ٠.٢ فولت للجرمانيوم و٠.٧ فولت للسيلكون. فى أى دايمود له قيمة أصغر من الجهد المانع سيتم إسقاطة فقط عبرالأطراف ولا يسرى تيار.

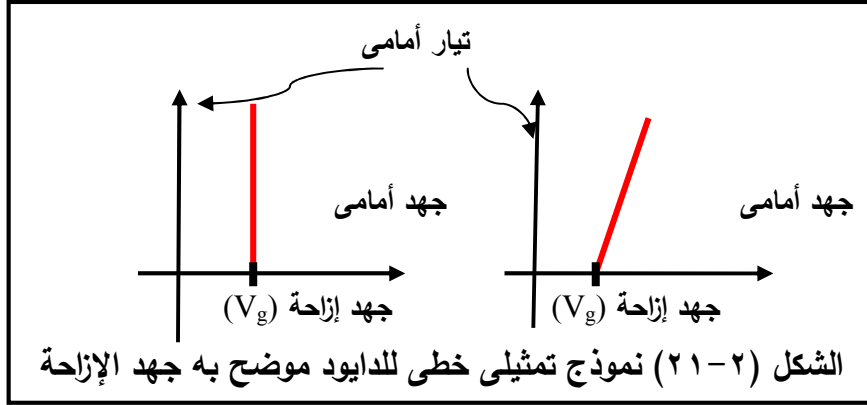
ذو قيمة صغيرة جدا (أقل من ١% من قيمة التيار القصوى) عند جهد التغذية أكبر من قيمة جهد القطع يرتفع التيار الأمامى بسرعة - وقيمة جهد القطع لمادة السيلكون يساوى ٠.٦ فولت ولمادة الجرمانيوم يساوى ٠.٢ فولت . للتوضيح فان جهد القطع للعناصر المصنعة من مادة السيلكون أكبر من العناصر المصنعة من مادة الجرمانيوم بسبب أن تيار التشبع العكسى للعناصر المصنعة من مادة الجرمانيوم أكبر بحوالى ١٠٠٠ ضعف عن قيمة تيار التشبع العكسى للعناصر المصنعة من مادة السيلكون .



نجد فى التطبيقات العملية أن قيمة تيار التشبع العكسى للعناصر المصنعة من مادة الجرمانيوم بضع ميكرو- أمبير (١٠^{-٦}) فى حين أن قيمة تيار التشبع العكسى للعناصر المصنعة من مادة السيلكون بضع نانو أمبير (١٠^{-٩}) . وحيث أن الثابت (η) للسيلكون يساوى ٢ فإن التيار يزداد بقيم ($e^{V/2VT}$) للتغذية الأولية ثم يزداد مع ($e^{V/VT}$) . هذا الإعتماد الأولى للتيار على قيمة الجهد يتسبب فى تأخير فى إرتفاع قيمة التيار فى خواص العناصر المصنعة من مادة السيلكون .

• جهد الإزاحة^(١٦)

الاعتماد الأسي على جهد الانتشار في النظم الغير خطية يتيح لنا لبناء نموذج أبسط لصمام ثنائي محسن (الشكل ٢ - ٢١) . في النموذج جهد الإزاحة (V_g) يمثل 0.7 فولت . يعبر ميل الخط الرأسى الكبير عن مقاومة مكافئة صغيرة (R_f) للدايود فيمكن إهمالها ($R_f=0, \text{slope}=\infty$) .



والدافع لهذا الحصول على نموذج معدل لصمام ثنائي ويسمى نموذج إزاحة لصمام ثنائي - جهد الإزاحة للسيلكون يساوى 0.7 فولت وللجرمانيوم يساوى 0.2 فولت . لا يتم التعامل بالنموذج المثالى للدايود فى وجود جهد الإزاحة . يتكون نموذج إزاحة للدايود من دايود مثالى مع بطارية على التوالي جهدها يساوى جهد الإزاحة . هذه البطارية تحرك منحنى الجهد - التيار الى اليمين بقيمة جهد الإزاحة وتلاشى عدم الخطية فى المنحنى والحصول على تيار عالى عند قيمة جهد الإزاحة . نموذج إزاحة لصمام ثنائي يمثل دائرة مفتوحة لجهد تغذية ($V_D < 0.6 V (V_g)$) و 0.6 فولت لجهد ($V_D \geq 0.6 V$)

٢-٢-٤ - ٣ مقاومة الدايدود

تعرف المقاومة أنها النسبة بين الجهد والتيار - عند أى نقطة فى منحنى خصائص الجهد والتيار للدايود فإن قيمة المقاومة (R) تساوى مقلوب الخط المائل الواصل بين

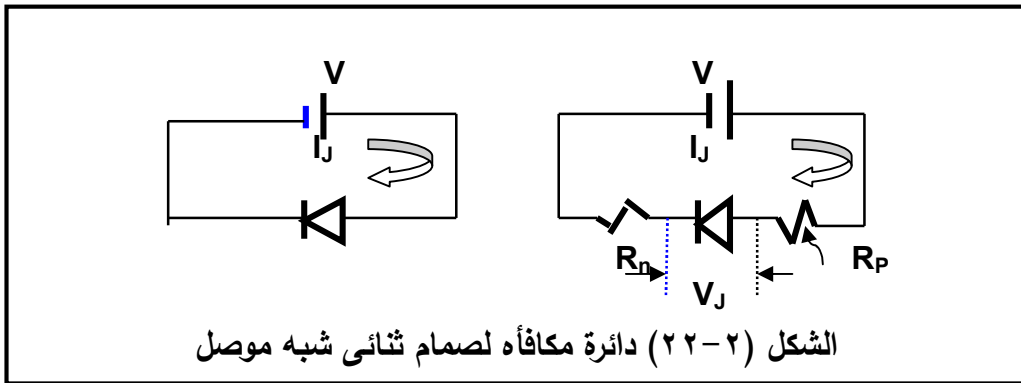
^{١٦} (Offset voltage) جهد الإزاحة كأنها بطارية جهد الإزاحة (V_g) تحرك منحنى الجهد - التيار الى اليمين والدافع لهذا الحصول على نموذج كامل لصمام ثنائي ويسمى نموذج إزاحة لصمام ثنائي

نقطة التشغيل ونقطة الأصل . توضح كراسات المواصفات للعناصر الإلكترونية لأى دايود القيمة القصوى لجهد التغذية الأمامية للحصول على تيار أمامى وأيضاً جهد التغذية العكسى للحصول على تيار عكسى على سبيل المثال:

• عند جهد تغذية أمامى ٠.٨ فولت مع تيار أمامى ١٠ ميللى أمبير فإن مقاومة الداىود تساوى ٨٠ أوم .

• عند جهد تغذية عكسى ٥٠ فولت مع تيار عكسى ٠.١ ميكروأمبير فإن مقاومة الداىود تساوى ٥٠٠ ميغا أوم .

فى العناصر التى لا تحقق قانون أوم - هناك مقاومتين نتيجة سريان التيار يجب أخذهم فى الإعتبار . مقاومة إستاتيكية نتيجة سريان التيار المباشر والأخرى هى مقاومة ديناميكية نتيجة سريان تيار المتقطع .



يوضح الشكل (٢٢-٢) دائرة مكافئة لصمام شبه موصل ثنائى . تمثل المقاومتين (R_p) و (R_n) مقاومة المادة المصنوع منها الصمام - ويحتسب جهد الوصلة كما يلى:

$$V_J = V = I_J (R_n + R_p) \quad \text{المعادلة (٥٨-٢)}$$

ويمكن إيجاد المقاومة الإستاتيكية المكافئه نتيجة سريان تيار مباشر كما يلى:

$$\frac{V}{I_J} = \frac{V_J}{I_J} + R_n + R_p \quad \text{المعادلة (٥٩-٢)}$$

$$R_{dc} + R_n + R_p \quad \text{المعادلة (٦٠-٢) أو}$$

المقاومة الإستاتيكية لصمام ثنائى مثالى (r_{dc}) يمكن الحصول عليها من الرسم البيانى

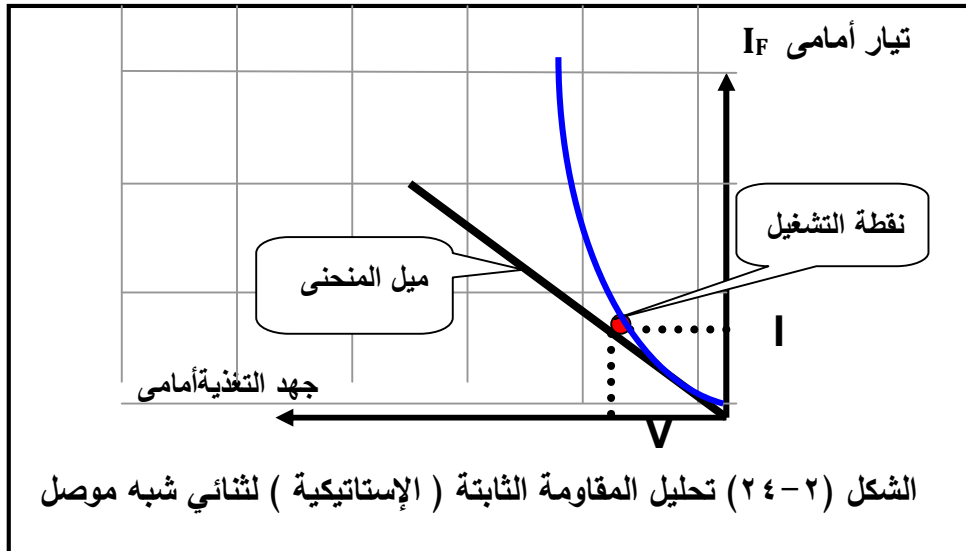
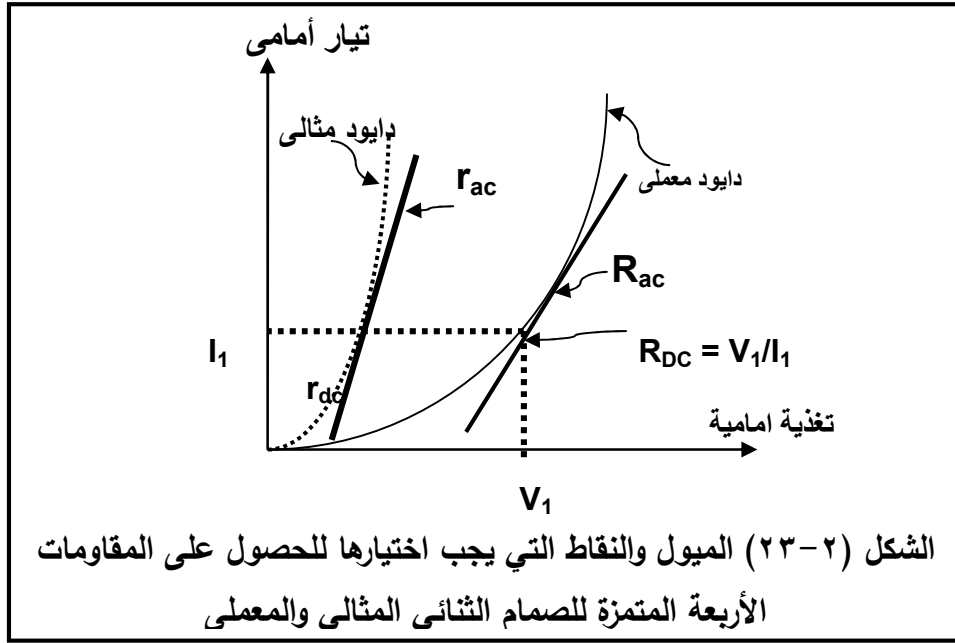
كما فى الشكل (٢٣-٢) كما يمكن إيجادها بالمعادلة

$$r_{dc} = \frac{V_J}{I_J} = \frac{V_J}{I_S \exp \left[\frac{qV_J}{KT} - 1 \right]} \quad \text{المعادلة (٦١-٢)}$$

تعتبر المقاومة الديناميكية للدايود (r) معامل أساسي هام عند تحليل عناصر أشباه الموصلات وتساوى:

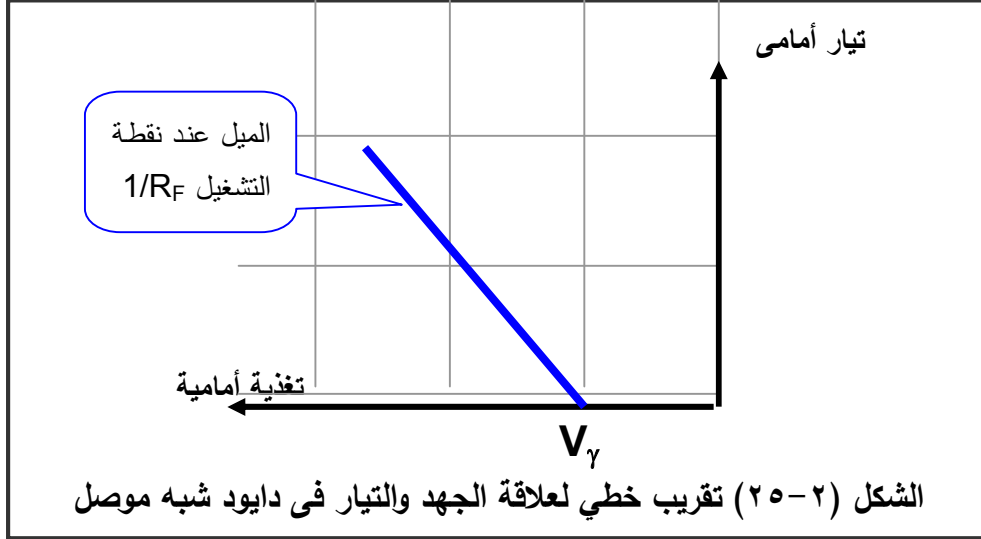
$$r = \frac{\partial V}{\partial I} \quad \text{المعادلة (٦٢-٢)}$$

وهي غير ثابتة القيمة وتعتمد على جهد التغذية .



ويمكن إستنتاج قيم الموصلية الديناميكية لدايود شبه موصل مثالي على النحو التالي:

$$g = \frac{1}{R} = \frac{\partial I}{\partial V} = \frac{I_0 e^{V/\eta V_T}}{\eta V_T} = \frac{I + I_0}{\eta V_T} \quad \text{المعادلة (٦٣-٢)}$$



في حالة التغذية العكسية حيث المقدار ($V/\eta V_T \ll 1$) فإن الموصلية (g) تؤول الى قيمة صغيرة جدا كما تؤول المقاومة الديناميكية للدايود الى قيمة كبيرة جدا. في حالة التغذية الأمامية حيث المقدار ($V/\eta V_T \gg 1, I \gg I_0$) فإن المقاومة الديناميكية للدايود تساوى:

$$r = \frac{\eta V_T}{I} \quad \text{المعادلة (٢-٦٤)}$$

يمكن إيجاد قيمة المقاومة الديناميكية (r_{ac}) للدايود مثالي من ميل منحنى الخواص عند نقطة التشغيل كما في الشكل (٢-٢٤) والشكل (٢-٢٥) وكذلك يمكن إيجاد قيمتها رياضيا ومن المناسب إحتساب قيمة الموصلية للتيار المتردد (g_{ac}):

$$I_J = I_S \exp \left[\frac{q V_J}{KT} - 1 \right]$$

$$g_{ac} = \frac{d I_J}{d V_J} = I_S \frac{q}{KT} \exp \frac{q V_J}{KT} \quad \text{المعادلة (٢-٦٥)}$$

$$g_{ac} = \frac{q}{KT} (I_J + I_S) = \frac{1}{r_{ac}} \quad \text{المعادلة (٢-٦٦)}$$

وبالتالي فإن قيمة المقاومة الديناميكية (r_{ac}) للدايود معمل

$$R_{ac} = r_{ac} + R_n + R_p \quad \text{المعادلة (٢-٦٧)}$$

$$R_{ac} = \frac{KT}{q} \left(\frac{1}{I_S + I_J} \right) + R_n + R_p \quad \text{المعادلة (٢-٦٨)}$$

قيمة المقاومة الديناميكية (r_{ac}) عند درجة حرارة الغرفة العادية

$$r_{ac} = \frac{25}{I_S + I_J} \text{ ohm} \quad \text{المعادلة (٢-٦٩)}$$

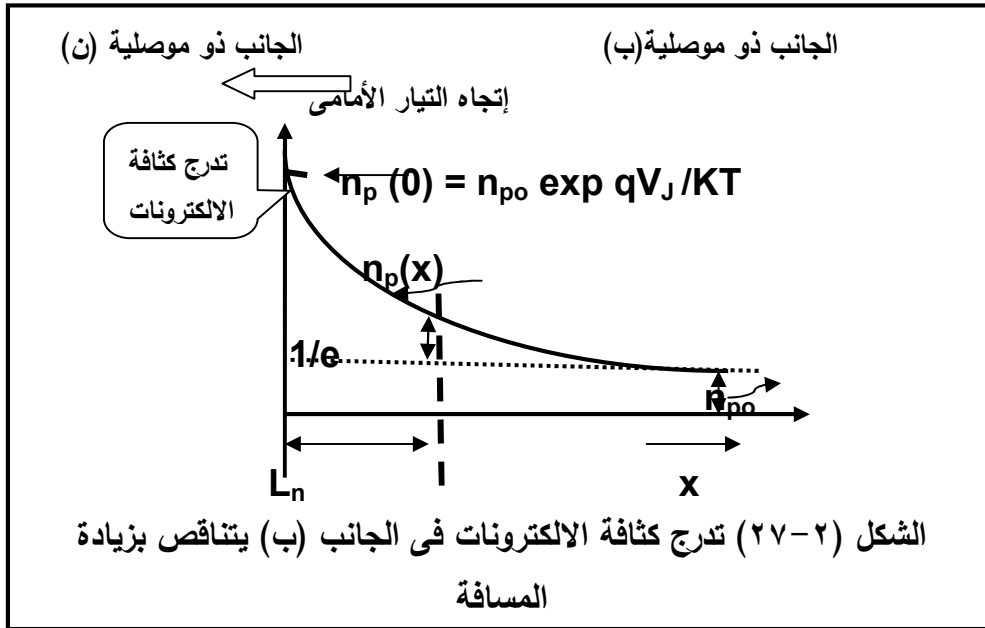
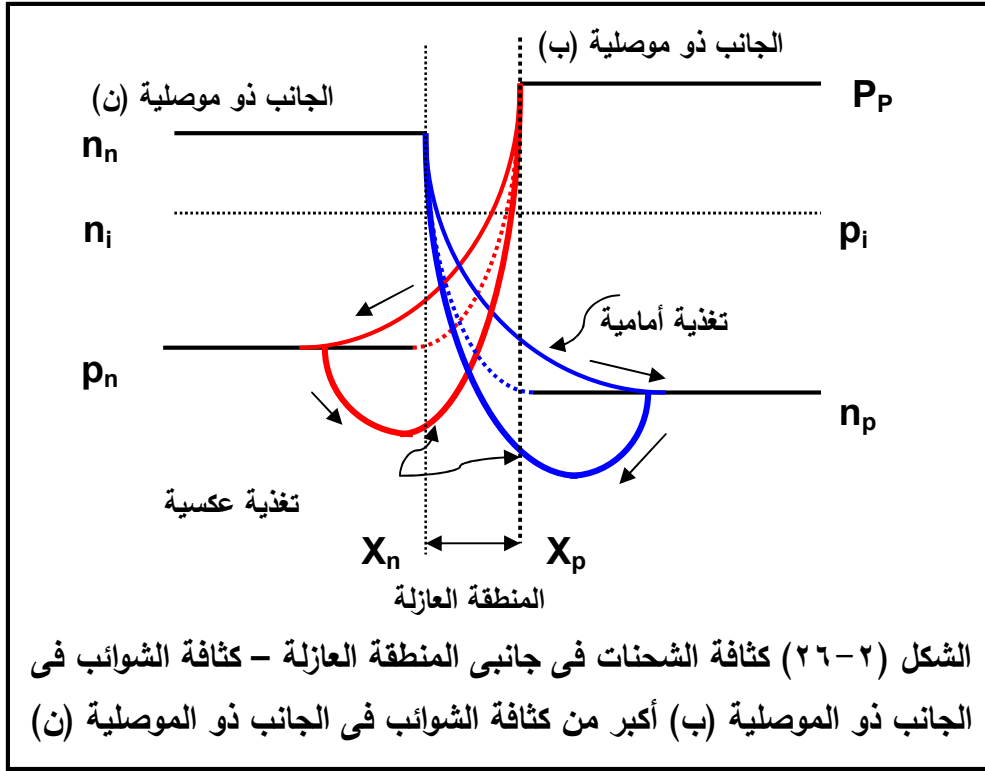
سيكون من المهم ملاحظة أنه في بعض الحالات أن قيمة المقاومة المتصلة على التوالي ذات أهمية دون بعض الحالات الأخرى . يمكن إهمال مقاومة الدايمود المثالي في حالة التغذية الأمامية عند سريان تيار كهربائي عالي وذلك بالمقارنة مع المقاومة المتصلة على التوالي . وحيث أن المقاومة المتصلة على التوالي بوحدات الأوم وبالتالي فإن خواص المنحنى التطبيقي تصبح خاضعة لقانون أوم عند سريان تيار عالي .

٢-٢-٥ حساب التيار الناشئ عن الإلكترونات والثقوب

يعتمد التيار الناشئ في الوصلة الثنائية على الخصائص الفيزيائية للوصلة منها خواص البلورة المصنع منها الثنائي وكثافة الشوائب وأسلوب توزيعها والعديد من العوامل الأخرى . الإعتداد الأهم لكل من التيارات الناشئة عن الشحنات الأقلية ($I_{np}(0)$) و ($I_{pn}(0)$) يتمثل في العوامل الفيزيائية التي سيتم مناقشتها . عندما يتم تغذية الوصلة تغذية عكسية فإن التيار الناشئ عن حركة الإلكترونات من الجانب (ن) الى الجانب (ب) من المنطقة العازلة هو أساسا يساوى الصفر . وأيضا عند الجانب (ب) من المنطقة العازلة فيجب أن تكون كثافة الإلكترونات تساوى صفر حيث تصل الإلكترونات إلى النقطة أسفل قمة الجهد . وبالتالي، تتناقص كثافة الإلكترونات في الجانب (ب) عن قيمة كثافة الإتزان بعيداً عن الوصلة حتى الصفر عند حافة المنطقة العازلة . يتم إنشاء حالة مماثلة للثقوب في الجانب (ن) من الوصلة كما هو موضح بالشكل (٢ - ٢٦) . في حالة التغذية الأمامية فإن الإلكترونات من الجانب (ن) تزيد كثافة الشحنات في الجانب (ب) . يعتبر معدل التدرج في كثافة الشحنات داخل البلورة بالقرب من الوصلة ذو أهمية حيث لا يوجد مجال كهربائي في البلورة وأن التيار يحدث بالكامل بخاصية الإنتشار بسبب تدرج الكثافة . فلننظر الى التيار الناشئ عن الشحنات الأقلية للإلكترونات في الجانب (ب) . المعادلة التفاضلية التي تصف تدرج كثافة الإلكترونات في الجانب (ب) في حالة الإستقرار هي معادلة الإستمرارية .

$$\frac{d n_p}{dt} = - \frac{n_p - n_{po}}{n} + \frac{1}{q} \frac{d I_{np}}{dx} \quad \text{المعادلة (٧٠-٢)}$$

حيث (n_p) هي كثافة الإلكترونات كدالة في المسافة على طول البلورة الشكل (٢ - ٢٧)



ومع ذلك، حيث أنه يمكن إهمال شدة المجال الكهربائي (ع) في المنطقة - سنؤخذ في الاعتبار فقط تيار الانتشار .

$$I_{np} = q D_n \frac{d n_p}{dx} \quad \text{المعادلة (٢-٧١)}$$

في حالة إستقرار تدفق التيار فلدينا المقدار $(dn_p/dt = 0)$ ، من المعادلتين (٧٠-٢) و (٧١-٢) نجد :

$$-\frac{n_p - n_{p0}}{n} + D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} = 0 \quad \text{المعادلة (٧٢-٢)}$$

$$n_p(x) = n_{p0} + D_n \tau_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} = n_{p0} L_n^2 \frac{d^2 n_p}{dx^2}$$

حيث ان طول الإنتشار $(L_n = \sqrt{D_n \tau_n})$ وحيث أن شحنات الأقلية (n_{p0}) ثابتة

- نجد

$$n_p(x) - n_{p0} = L_n^2 \frac{d^2 (n_p - n_{p0})}{dx^2}$$

ويصبح الحل العام للمعادلة في الصورة التالية:

$$n_p(x) - n_{p0} = A \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) + B \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) \quad \text{المعادلة (٧٣-٢)}$$

• حيث الثابتين (A) و (B) يمكن تحديدهما من شروط الحدود

$(n_p(x) = n_{p0})$ عند $(x = \text{infinity})$ - ونتيجة لذلك $(B = 0)$ حيث (n_p) تتجه

الى ما لانهاية للمسافة $(x \rightarrow \text{infinity})$.

• المعادلة $(n_p(0) = n_{p0} \exp qV_j/KT)$ عند $(x = 0)$ تحدد الثابت (A)

$$A = n_{p0} \exp \frac{qV_j}{KT} - n_{p0} = n_{p0} \left(\exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \right)$$

ويكون حل هذه المعادلة كما يلي :

$$n_p(x) = n_{p0} \left(\exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \right) \exp \frac{-x}{L_n} + n_{p0} \quad \text{المعادلة (٧٤-٢)}$$

تنتشر الشحنات الى الأسفل ويتناقص معدل تدرج كثافة الشحنات ، وتتحرك في

المتوسط مسافة تساوى طول الإنتشار (L_n) قبل عملية إتحاد الشحنات كما توضح

المعادلة (٧٣-٢) تعتمد كثافة الإلكترونات في المادة (ب) على عدد الإلكترونات

المحقنة خلال الوصلة. ويمكن التحكم في عدد الإلكترونات المحقنة بواسطة جهد

التغذية (V_j) . كلما إبتعدنا عن الوصلة تتجه الإلكترونات الى كثافة الإتزان (n_{p0}) في

المادة (ب) - من المعادلتين (٧١-٢) و (٧٤-٢) نحصل على:

$$I_{np}(x) = -q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \left(\exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \right) \exp \frac{-x}{L_n} \quad \text{المعادلة (٧٥-٢)}$$

عند المسافة $(x = 0)$ ،

$$I_{np}(0) = \frac{q D_n n_{po}}{L_n} \left(\exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \right) \quad \text{المعادلة (٧٦-٢)}$$

الإشارة السالبة نتيجة الى تدرج الكثافة (dn/dx) وبالمعالجة الرياضية بنفس

الأسلوب لإنتشار الثقوب في الجانب (ن) نحصل على:

$$I_{pn}(0) = \frac{q D_p p_{no}}{L_p} \left(\exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \right) \quad \text{المعادلة (٧٧-٢)}$$

يمكن حساب تيار الوصلة (I_J) بالمعادلة:

$$I_J = I_{np}(0) + I_{pn}(0) \quad \text{المعادلة (٧٨-٢)}$$

$$I_J = \left[\frac{q D_n n_{po}}{L_n} + \frac{q D_p p_{no}}{L_p} \right] \left(\exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \right) \quad \text{المعادلة (٧٩-٢)}$$

وبالتالى حصلنا على علاقة رياضية للتيار فى الدايمود من حيث الخصائص الفيزيائية

للبلورة التى يتم تصنيع الدايمود منها .

$$I_{pn}(0) = \frac{q D_p p_{no}}{L_p} \quad \text{المعادلة (٨٠-٢)}$$

$$I_{np}(0) = \frac{q D_n n_{po}}{L_n} \quad \text{المعادلة (٨١-٢)}$$

وهكذا، لدينا الصيغ الرياضية للتيارات المرجوة من حيث الخصائص القابلة للقياس .

ومن الأفضل أن نحصل على صيغ رياضية للتيارات فى الدايمود فى ضوء زمن عمر

شحنات الإلكترونات والثقوب . بإستخدام أطوال إنتشار الشحنات () ، $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$

$$\cdot (L_p = \sqrt{D_p \tau_p})$$

$$I_J = q \left[\frac{p_{no}}{\tau_p} L_p + \frac{n_{po}}{\tau_n} L_n \right] \quad \text{المعادلة (٨٢-٢)}$$

يتزايد تيار التشبع العكسى طرديا مع زيادة كثافة الشحنات الأقلية التى تتزايد بشكل

أسى مع درجات الحرارة . ومن ثم تم توضيح العلاقة بين التغذية العكسية للدايمود وتيار

التشبع العكسى . يمكن إعادة كتابة المعادلة (٨٠ - ٢) فى ضوء بعض المعاملات

البسيطة على النحو التالى . فى حال تأين كل الذرات المانحة والذرات المستقبلية - نحصل

على :

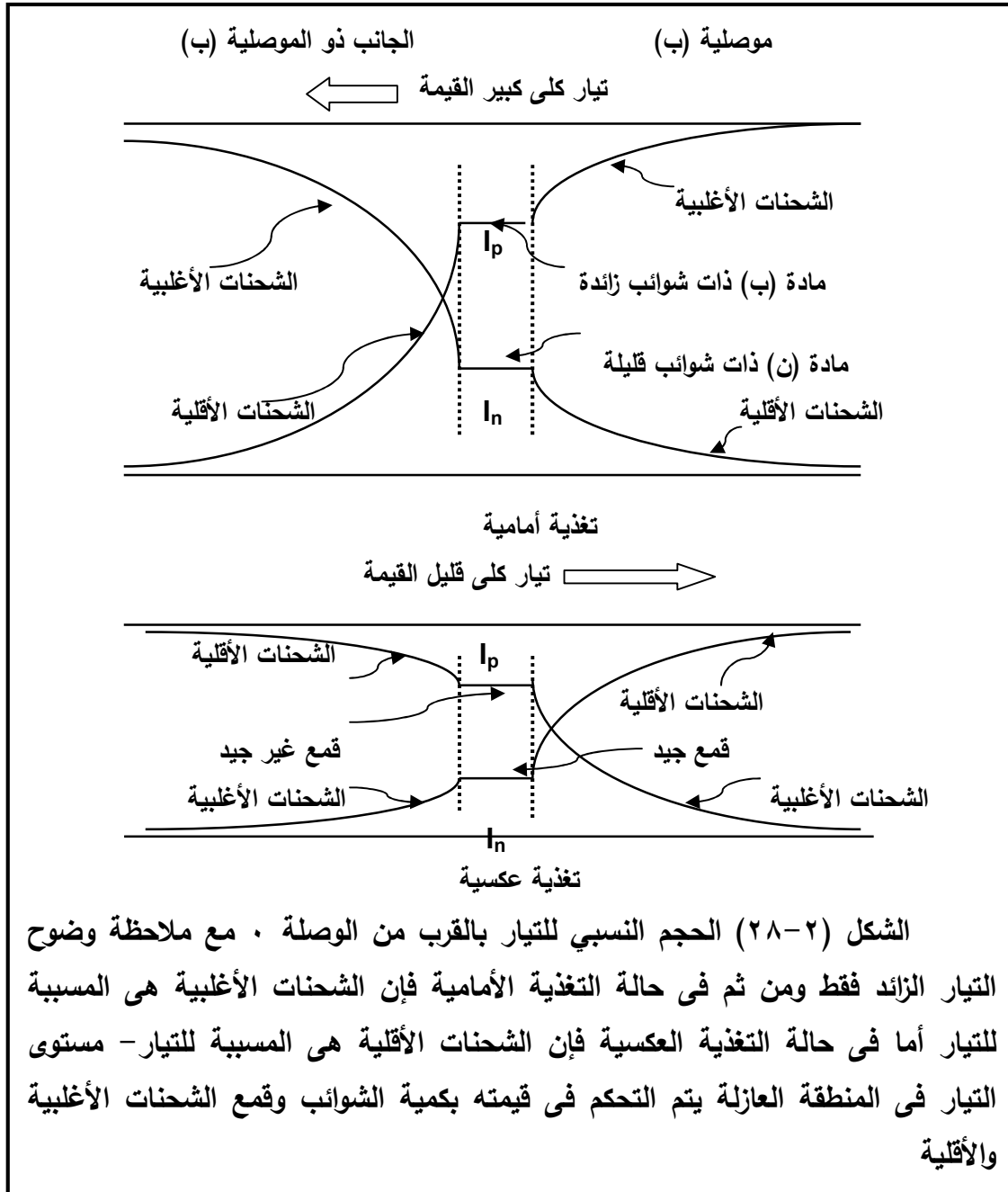
$$p_{no} n_{no} = n_i^2 , p_{po} n_{po} = n_i^2 \quad \text{المعادلة (٨٣-٢)}$$

$$p_{po} = N_A \quad \text{and} \quad n_{no} = N_D \quad \text{المعادلة (٨٤-٢)}$$

$$p_{no} = \frac{n_i^2}{N_D} \quad \text{and} \quad n_{po} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$I_o = q n_i^2 \left[\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right] \quad \text{المعادلة (٢-٨٥)}$$

توضح إعتداد معادلات التيار على المسافة للتيار الناشئ عن حركة الثقوب عند بعض النقاط في الوصلة وكذلك بالنسبة الى التيار الناشئ عن حركة الالكترونات .



يوضح الشكل (٢-٢٨) هذا التغير . يمكن إستخدام المعادلة (٢-٨٥) لحساب تيار التشبع العكسى في حالة معرفة نسبة الشوائب أو المقاومة النوعية لجانبى الوصلة . من المهم عند التعرض لدراسة الترانسستور فيما بعد يمكن الحديث عن نسبة تيار الناشئ عن

الإلكترونات والتيار الناشئ عن الثقوب ، من المعادلتين (٧٥-٢) و(٧٦-٢) نجد:

$$\frac{I_n}{I_p} = \frac{D_n L_p n_{p0}}{D_p L_n p_{n0}} \quad \text{المعادلة (٨٦-٢)}$$

وحيث أننا على علم بمعادلة أينشتاين ($D_n/D_p = \mu_n/\mu_p$)

$$\frac{I_n}{I_p} = \frac{\mu_n L_p n_{p0}}{\mu_p L_n p_{n0}} = \frac{\sigma_n L_p}{\sigma_p L_n} \quad \text{المعادلة (٨٧-٢)}$$

وبفرض أن نسبة طول الانتشار لكل من الإلكترونات والثقوب (L_p/L_n) تساوى تقريبا واحد - فإنه يمكن حساب النسبة بين التيار الناشئ عن الإلكترونات الى التيار الناشئ عن الثقوب من خلال الموصلية (σ_n) الى (σ_p) ، وهكذا لو كانت قيمة الموصلية (σ_n) أكبر ١٠٠ مرة من الموصلية (σ_p) فإن ٩٩% من التيار المار خلال الوصلة بسبب سريان الإلكترونات و ١% بسبب سريان الثقوب ، القيم النموذجية لثابت الانتشار (L_n) و (L_p) حوالى ١٠^{-٣} م .

٦-٢-٢ إعتماضية درجات الحرارة فى الوصلات الثنائية

تم إستنتاج التغير فى التيار مع درجات الحرارة ($\partial I/\partial t$) يساوى ٠,٨ و ٠% لكل إرتفاع درجة حرارة واحدة للعناصر المصنعة من السيلكون و ١,١ و ٠% لكل إرتفاع درجة حرارة للعناصر المصنعة من الجرمانيوم - وأيضا يتزايد تيار التشبع العكسى بنسبة ٧% لكل إرتفاع درجة حرارة للعناصر المصنعة من الجرمانيوم والسيلكون ، يتضاعف تيار التشبع العكسى مع كل إرتفاع ١٠ درجات حرارة مئوية ، قيم تيار التشبع العكسى فى الجرمانيوم أكبر من قيمته فى السليكون وحيث أن إعتماضية درجات الحرارة هى نفسها لكل من الجرمانيوم والسيلكون فإن درجات الحرارة المرتفعة فى العناصر المصنعة من الجرمانيوم تنتج تيار تشبع عكسى مفرط بينما فى العناصر المصنعة من السيلكون فإن تيار التشبع العكسى متواضع للغاية ، للتوضيح أكثر - بإرتفاع درجات الحرارة من درجة حرارة الغرفة (٢٧ م°) الى درجة حرارة (٩٠ م°) يتزايد تيار التشبع العكسى للعناصر المصنعة من الجرمانيوم الى مئات الميكروامبير فى حين يتزايد تيار التشبع العكسى للعناصر المصنعة من السيلكون الى جزء من الميكروامبير .

٢-٢-٧ سعة المنطقة المفرغة أو المنطقة الإنتقالية

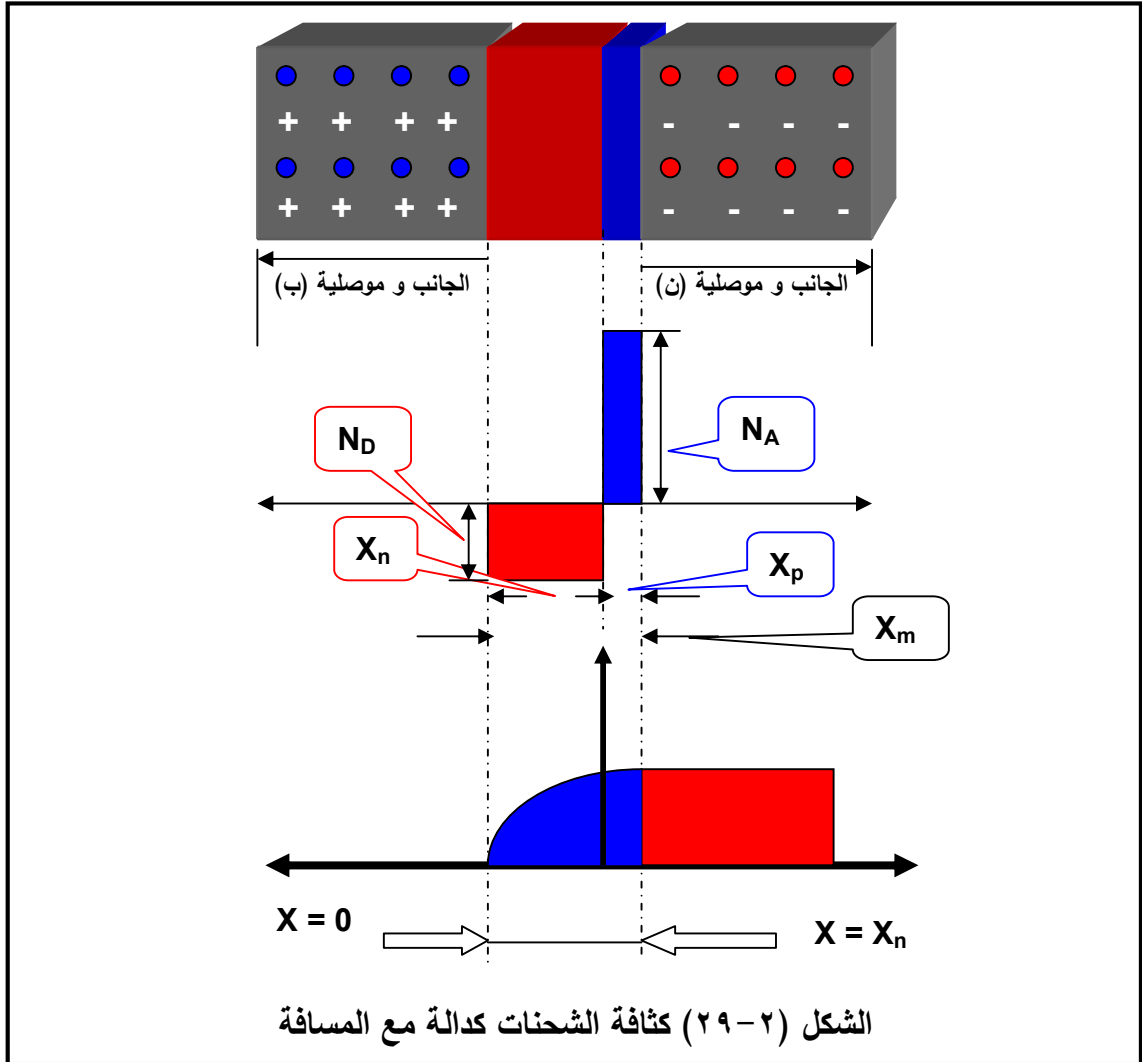
في حالة التغذية العكسية - تتحرك حاملات الشحنات الأغلبية بعيداً عن الوصلة ويزيد إتساع المنطقة العازلة- تشتمل هذه الظاهرة على تأثير السعة

$$C_T = \left| \frac{\partial Q}{\partial V} \right| \quad \text{المعادلة (٨٨-٢)}$$

التغير في زيادة في الشحنات (∂Q) بتأثير تغير الجهد (∂V) مع التغير في الزمن (∂t) ينتج تيار

$$i = C_T \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{المعادلة (٨٩-٢)}$$

يجب الأخذ في الإعتبار تأثير السعة (C_T) عندما يتطلب تحليل الدائرة الكهربائية خاصة اذا كان توزيع الشوائب في الوصلة فجائياً^(١٧).



^{١٧} (abrupt junction) هي الوصلة التي يتغير نوع المواد الشائبة في مسافة صغيرة جداً

يوضح الشكل (٢-٢٩) كثافة الشحنات كدالة في المسافة للوصلة الفجائية . وحيث انه يجب ان تكون قيمة صافى الشحنات تساوى صفر فى حالة عدم وجود تغذية- نجد :

$$q N_A x_p = q N_D x_n \quad \text{المعادلة (٢-٩٠)}$$

إذا كانت كثافة ذرات الشوائب المستقبلية أصغر من كثافة ذرات الشوائب المانحة ($N_A \ll N_D$) فان سمك المنطقة العازلة فى جانبي الوصلة يكون ($X_p \gg X_n$) وللتبسيط نهمل سمك المنطقة العازلة (X_n) وبالتالي يمكن حساب العلاقة بين جهد التغذية وكثافة الشحنات من خلال معادلة بوسون .

$$\text{المعادلة (٢-٩١)} \quad \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{q N_A}{\epsilon} \quad \text{حيث } (\epsilon = \epsilon_r \epsilon_o)$$

عند قيمة مجال كهربائى يساوى سالب تغير الجهد مع المسافة ويساوى صفر عند مسافة تساوى صفر ($\epsilon = -\partial V / \partial X = 0 \text{ at } X=0$) نجد ان الجهد يساوى صفر عند مسافة تساوى صفر ($V=0 \text{ at } X=0$) ويتكامل معادلة بوسون:

$$V = \frac{q N_A x^2}{2 \epsilon} \quad \text{المعادلة (٢-٩٢)}$$

عندما يساوى سمك المنطقة العازلة فى الجانب (ب) مع السمك الكلى للمنطقة العازلة

($X = X_p \cong X_m$) وجهد التغذية يساوى جهد الاعاقة ($V = V_B$) - نجد:

$$V_B = \frac{q x_m^2 N_A}{2 \epsilon} \quad \text{المعادلة (٢-٩٣)}$$

عندما تكون (A) مساحة الوصلة

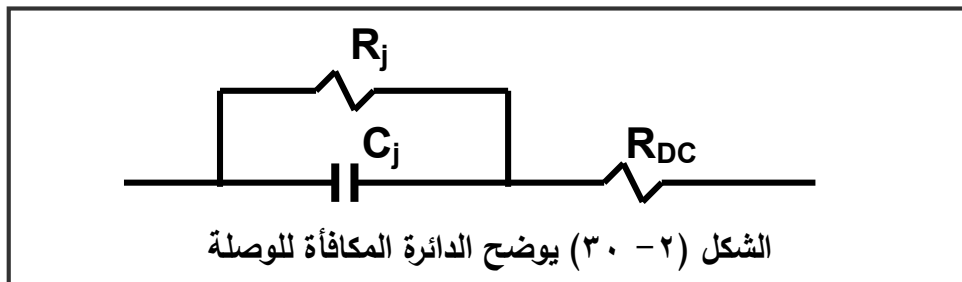
$$Q = q N_A x_A \quad \text{المعادلة (٢-٩٤)}$$

$$C_T = \frac{\partial Q}{\partial V} = q A N_A \left| \frac{\partial x}{\partial V} \right| \quad \text{المعادلة (٢-٩٥)}$$

$$\frac{\partial x}{\partial V} = \frac{\epsilon}{q x N_A} \quad \text{المعادلة (٢-٩٦)}$$

$$C_T = \frac{\epsilon A}{x} \quad \text{و المعادلة (٢-٩٧)}$$

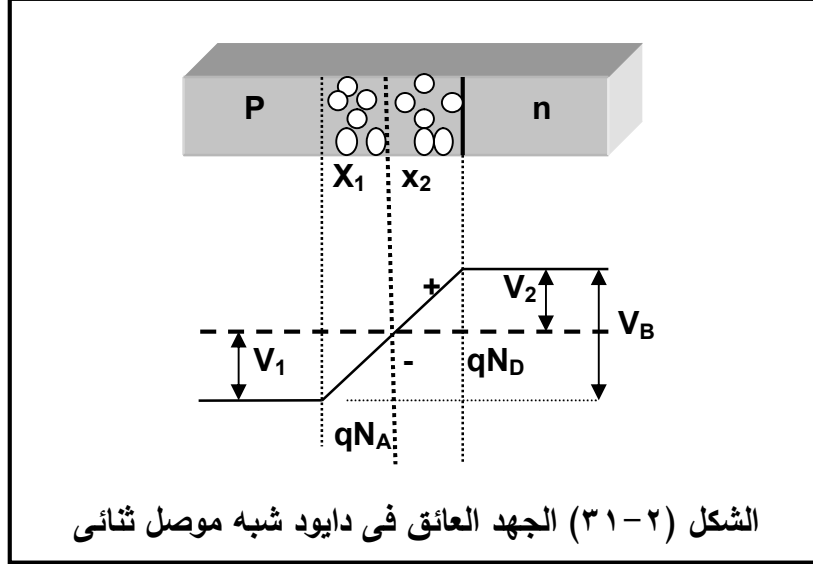
الشكل (٢-٣٠) يوضح الدائرة المكافأة للوصلة



• المنطقة العازلة والسعة العازلة

تسلك المنطقة العازلة سلوك مكثف له نفس الشكل الهندسى وثابت العزل ، كما هو

موضح فى الشكل (٢-٣١)



يتضح من الشكل أن المساحة الصغيرة للمنطقة العازلة خالية من أى شحنات متحركة ولكنها تشتمل على شحنات غير متحركة نتيجة لذرات الشوائب . نجد فى أحد جانبي الوصلة فى المنطقة (ب) شحنات سالبة غير متحركة نتيجة للأيونات السالبة لذرات الشوائب المستقبلية وفى الجانب الآخر من الوصلة نجد فى المنطقة (ن) كمية متساوية من الشحنات الموجبة الغير متحركة نتيجة للأيونات الموجبة لذرات الشوائب المانحة . وبالرجوع الى الشكل فإن سمك المنطقة العازلة القريبة من الوصلة تساوى:

$$X_m = X_p + X_n$$

حيث أن الشحنات فى البلورة على الإجمال محايدة ، فإن كمية الشحنات فى منطقتى المنطقة العازلة متساوية . ويمكن إعادة صياغتها رياضيا على النحو التالى:

$$qAN_A X_p = qAN_D X_n \quad \text{المعادلة (٢-٩٨)}$$

يمكن استخدام هذه المعادلة فى الوصلات الغير متجانسة لحد معين . وهكذا عندما تكون كمية الشوائب فى الجانب (ن) أكثر من كمية الشوائب فى الجانب (ب) فإن الجزء الأكبر من المنطقة العازلة يكون بجوار الجانب (ب) . على سبيل المثال - عندما تكون كثافة ذرات الشوائب المانحة فى الجانب (ن) أكبر عشر مرات عن كثافة ذرات الشوائب

المستقبلية فى الجانب (ب) - فإن سمك المنطقة العازلة بجوار الجانب (ب) أكبر بعشرة مرات عن سمك المنطقة العازلة بجوار الجانب (ن) . ويمكن بسهولة حساب المساحة الفعلية فى المنطقة العازلة بمساعدة معادلة بوسون التي تنص على أن المشتقة الثانية المحتملة للجهد بالنسبة الى المسافة تتناسب مع كثافة الشحنات . فى حالة البعد الواحد البسيط عندما يتغير الجهد فى الإتجاه الأفقى فقط على طول البلورة - يمكن إعادة كتابة معادلة بوسون على النحو التالى:

$$\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad \text{المعادلة (٩٩-٢)}$$

حيث الجهد المراد قياسه عند مسافة $V(x)$ وكثافة الشحنات $\rho(x)$ عند نفس المسافة فى الجزء من المنطقة العازلة الواقع فى الجانب (ب) بالقرب من الوصلة (الشكل ٢-٣١) يمكن حساب كثافة الشحنات:

$$\rho = -q N_a \quad \text{المعادلة (١٠٠-٢)}$$

يتم وضع علامة السالب نظراً لأن ذرات الشوائب المستقبلية سالبة التأيّن . بالتعويض فى المعادلة (٩٩-٢) يمكن الحصول على سمك المنطقة العازلة فى الجانب ذو الموصلية (ب) على النحو التالى:

$$\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} = \frac{q N_a}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad \text{المعادلة (١٠١-٢)}$$

وبنفس الطريقة يمكن تطبيق معادلة بوسون لحساب سمك المنطقة العازلة الواقعة فى الجانب (ن) بالقرب من الوصلة . بالأخذ فى الإعتبار كثافة الشحنات فى هذه المنطقة نتيجة ذرات الشوائب المانحة المتأينة والموجبة - ويمكن صياغة معادلة بوسون لهذا الجزء من المنطقة العازلة على النحو التالى:

$$\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} = \frac{q N_d}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad \text{المعادلة (١٠٢-٢)}$$

يمكن حل المعادلة (٩٩-٢) لتوزيع شحنات معين للحصول على سمك المنطقة العازلة كدالة مع جهد الوصلة . فهناك احتماليّن لتوزيع الشحنات حتى تتلائم مع معظم التطبيقات . تستخدم الوصلة ذات التوزيع الفجائى عندما يكون التغير فى كثافة الشحنات فجائى عند الوصلة وأن تركيز الشوائب فى أى من جانبي الوصلة منتظم . وتعرف الوصلات المجهزة من خلال تكنولوجيا السبك بالوصلات ذات التوزيع المفاجئ لتركيز

الشحنات بين حافتي المنطقة العازلة وتعرف الوصلات ذات التدرج الخطى فى تركيز الشحنات خلال المنطقة العازلة بوصلات الانتشار ذات التدرج الخطى . حل معادلة بوسون للوصلات ذات التغير المفاجئ فى كثافة الشحنات باستخدام المعادلات التالية:

$$x_p = \sqrt{V \left(\frac{2 \epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_D}{N_A N_D + N_A^2} \right)} \quad \text{المعادلة (١٠٣-٢)}$$

$$x_n = \sqrt{V \left(\frac{2 \epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_A}{N_A N_D + N_D^2} \right)} \quad \text{و المعادلة (١٠٤-٢)}$$

بجمع سمكى المنطقة العازلة بالمعادلتين (١٠٣-٢) و (١٠٤-٢) نحصل على السمك الكلى لجزئى المنطقة العازلة على النحو التالى:

$$x_m = \sqrt{V \left(\frac{2 \epsilon_r \epsilon_0}{q(N_A + N_D)} \right) \left[\sqrt{\frac{N_A}{N_D}} + \sqrt{\frac{N_D}{N_A}} \right]} \quad \text{المعادلة (١٠٥-٢)}$$

للبلورات متجانسة الحقل كما فى المعادلة السابقة - يتغير سمك المنطقة العازلة مع الجذر التربيعى لجهد الوصلة . وكثال عددى على سبيل المثال لبلورة من الجرمانيوم حيث ثابت العزل (ϵ_r) يساوى ١٦ وأن كثافة ذرات الشوائب المانحة تساوى كثافة ذرات الشوائب المستقبلية وتساوى 10^{10} سم^٣ وأن ثابت الفراغ (ϵ_0) يساوى 8.85×10^{-12} فاراد/سم وأن الجهد المانع فى عدم وجود تغذية يساوى ٢٠٠ ميلى فولت - نحصل على سمك المنطقة العازلة ويساوى 8×10^{-6} سم .

وهناك حالة خاصة لمستويات الحقل التى تحدث فى عناصر أشباه الموصلات . فى حالات كثيرة فإن أحد جانبي الوصلة يشتمل على كثافة ذرات شوائب أكبر من الجانب الآخر والتي تعرف بالوصلات الغير متجانسة على شكل ($n^+ - p$) أو ($p^+ - n$) كما هو الحال فى الوصلات بتكنولوجيا السبك . يمكن تبسيط المعادلتين (١٠٣-٢) و (١٠٤-٢) للحصول على قيمة تقديرية لسمك المنطقة العازلة (x_m) - للوصلات ($n^+ - p$) حيث أن كثافة ذرات الشوائب المانحة أكبر من كثافة ذرات الشوائب المستقبلية - نجد :

$$x_m = x_p \cong \sqrt{V \left(\frac{2 \epsilon_r \epsilon_0}{q N_A} \right)} \quad \text{المعادلة (١٠٦-٢)}$$

للوصلات ذات الموصلية ($p^+ - n$) حيث أن كثافة ذرات الشوائب المستقبلية أكبر من كثافة ذرات الشوائب المانحة - نجد :

$$x_m = x_n \cong \sqrt{V \left(\frac{2 \epsilon_r \epsilon_0}{q N_D} \right)} \quad \text{المعادلة (١٠٧-٢)}$$

مع ملاحظة - عندما يكون أحد جانبي الوصلة كثير الحقن (+) - تمتد المنطقة العازلة كليا في الجانب الأقل حقنا . فى حالة الوصلات ذات تدرج فى الشوائب منتظم وخطيا - يتم حساب سمك المنطقة العازلة كالتالى:

$$x_m = x_p + x_n = \left[\frac{12 V \epsilon_r \epsilon_0}{q a} \right]^{1/3} \quad \text{المعادلة (١٠٨-٢)}$$

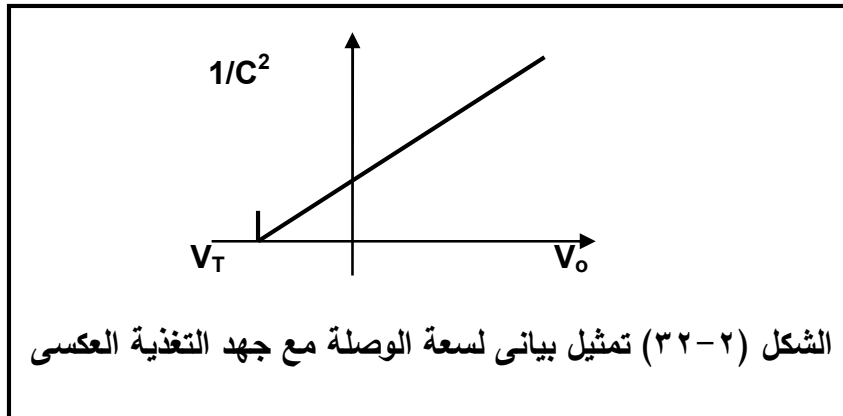
حيث (a) تمثل ميل معدل التدرج الخطى للشوائب ، وتستخدم نفس المعادلة لحساب السعة للمنطقة العازلة والتي تستخدم لحساب السعة لمكثف متوازي الوجهين بسبب الزيادة الطفيفة فى الجهد نضيف بعض الشحنات على الحدود والتي تسمى سعة الوصلة ،

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = C'_T = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{x_m} \quad \text{المعادلة (١٠٩-٢)}$$

حيث (C'_T) تمثل سعة المنطقة العازلة لوحدة المساحة بالفرد لكل متر مربع وتعتمد على جهد التغذية وثابت العزل ومساحة الوصلة وكثافة الشوائب . من المعادلتين (٩٩-٢) و (١٠٥-٢) نحصل على:

$$C'_T = \sqrt{\left(\frac{q \epsilon_r \epsilon_0 (N_A + N_D)}{2V} \right)} \left[\sqrt{\frac{N_A}{N_D}} + \sqrt{\frac{N_D}{N_A}} \right] \quad \text{المعادلة (١١٠-٢)}$$

مقلوب مربع السعة ($1/C^2$) فى البلورات المتجانسة يمثل دالة خطية مع جهد التغذية . والتمثيل البياني لمقلوب مربع السعة ($1/C^2$) مع جهد التغذية عبارة عن خط مستقيم يحدد نقطة جهد الإعاقة (V_T) كما هو موضح بالشكل (٣٢-٢)



مع ملاحظة فى حالة جهد التغذية الأمامى يكون جهد الإعاقة يساوى سالب جهد التغذية ($V_T = -V_0$) . ويبدو أنه يصل إلى سمك المنطقة العازلة ويساوى صفر والسعة

لانتهائية - وهذا غير منطقي بسبب أنه في التغذية الأمامية يتزايد التيار بشدة مع جهد تغذية أمامي أقل من جهد الإعاقة . ويتمثل جهد الوصلة في المعادلة التالية:

$$V = V_T - V_o \quad \text{المعادلة (١١١-٢)}$$

حيث (V_o) جهد التغذية و(V_T) جهد الإعاقة في عدم وجود تغذية يمكن تحديدها:

$$V_T = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

تتناقص سعة الوصلة كلما زاد جهد التغذية العكسي وتناقص كثافة الشوائب . ويمكن إستنتاج السعة للوصلات ذات كثافة الشوائب العالية بالتعويض في المعادلتين (٢-١٠٦) و (٢-١٠٧) في المعادلة (٢-١٠٩) للوصلات (ن⁺ - ب) حيث أن كثافة ذرات الشوائب المانحة أكبر من كثافة ذرات الشوائب المستقبلية

$$C'_T = \sqrt{\left(\frac{q N_A \epsilon_r \epsilon_o}{2V}\right)} \quad \text{المعادلة (١١٢-٢)}$$

للوصلات (ب⁺ - ن) حيث أن كثافة ذرات الشوائب المستقبلية أكبر من كثافة ذرات الشوائب المانحة .

$$C'_T = \sqrt{\left(\frac{q N_D \epsilon_r \epsilon_o}{2V}\right)} \quad \text{المعادلة (١١٣-٢)}$$

وتحدد السعة للوصلات ذات توزيع كثافة الشوائب منتظم خطيا بالتعويض بالمعادلة

$$(١١٠-٢) \quad \text{في المعادلة (٢-١٠٩)}$$

$$C'_T = \left[\frac{q a \epsilon_r \epsilon_o}{12V}\right]^{1/3} \quad \text{المعادلة (١١٤-٢)}$$

• سعة الانتقال^(١٨)

يوضح الشكل (٢-٣٣) منحنيات توزيع كثافة الشحنات والجهد المستخدمة لحساب

سعة الانتقال .

$$C_T = \frac{\partial Q}{\partial V_j} - \frac{\partial Q}{\partial V_B} = \frac{-\partial Q}{\partial W_B} - \frac{\partial W_B}{\partial V_B} \quad \text{المعادلة (١١٥-٢)}$$

حيث (Q) تمثل الشحنات المخزونة في كلا جانبي الوصلة ،

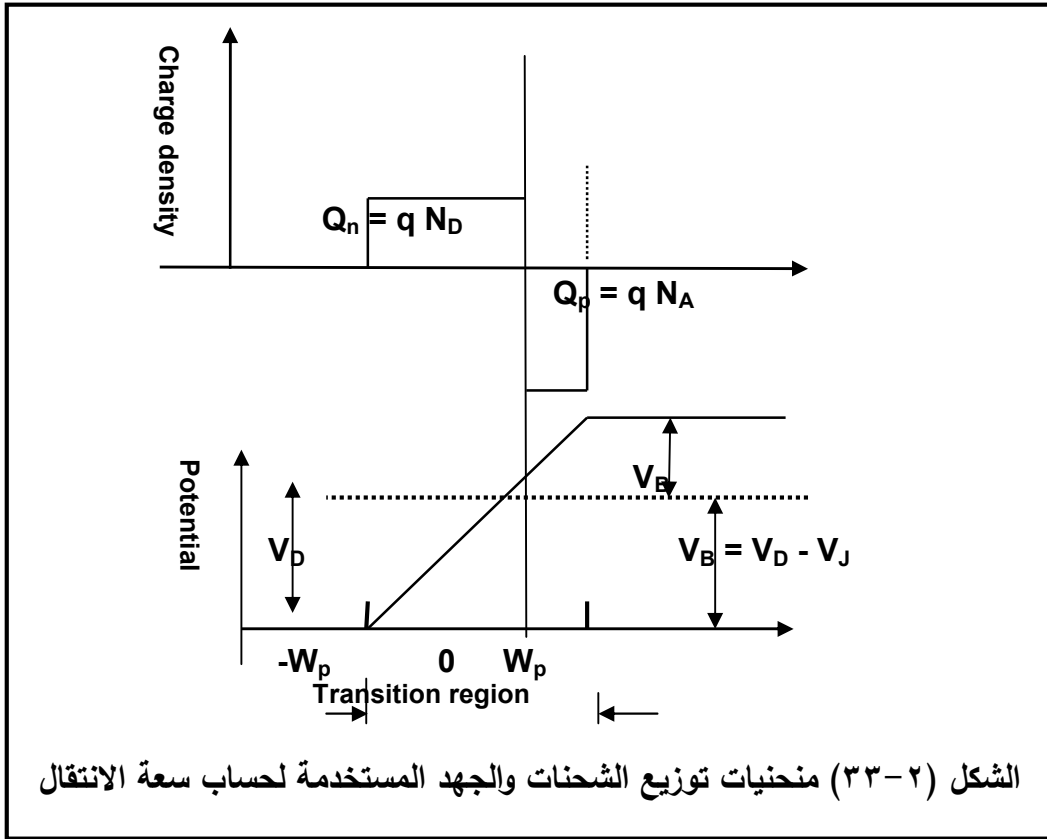
^{١٨} (Transition capacitances) عندما تكون التغذية عكسية تسلك منطقة نضوب مثل مادة عازلة بينما الجانبين

(ب) و (ن) من الوصلة على جانبي لهما مقاومة منخفضة، ويمكن إعتبار الوصلة كأنها قطبين متوازيين لمكثف .

$$\frac{-\partial Q}{\partial W_B} = -q N_A \quad (\text{constant wrt } W_p) \quad (116-2) \text{ المعادلة}$$

بتفاضل المعادلة (116-2):

$$\frac{\partial W_p}{\partial V_B} = \left[\frac{2 \epsilon}{q N_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)} \right]^{1/2} (V_B)^{-1/2} \quad (117-2) \text{ المعادلة}$$



الشكل (2-33) منحنيات توزيع الشحنات والجهد المستخدمة لحساب سعة الانتقال

بدمج المعادلات (115-2) ، (116-2) و (117-2) نحصل على علاقة رياضية

لحساب سعة الانتقال (C_T)

$$C_T = \left(\frac{q \epsilon N_A N_D}{2} \right)^{1/2} (N_D + N_A)^{-1/2} (V_B)^{-1/2} \quad (118-2) \text{ المعادلة}$$

مع ملاحظة - ($V_B = V_D - V_J$) - في حالة التغذية العكسية يكون جهد الوصلة (V_J) سالب بينما في حالة التغذية الأمامية فإن جهد الوصلة اصغر من جهد التغذية ($V_J < V_D$) - وهكذا فإن سعة الوصلة ليست كبيرة في حالة التغذية الأمامية. في

حالة الوصلات ذات توزيع شوائب خطية يمكن التعامل معها بذات القواعد المستخدمة في حالة الوصلات ذات توزيع فجائية. في الشكل (٢-٣٣) تتغير كثافة الشحنات مع المسافة بشكل خطي - وينتج عن ذلك،

$$C_T = \epsilon^{2/3} \left(\frac{a}{12 V_B} \right)^{1/3} \quad \text{المعادلة (٢-١١٩)}$$

حيث

$$a = q \left(\frac{N_A + N_D}{W_I} \right) \quad \text{المعادلة (٢-١٢٠)}$$

$$\rho(x) = a x \quad \text{المعادلة (٢-١٢١)}$$

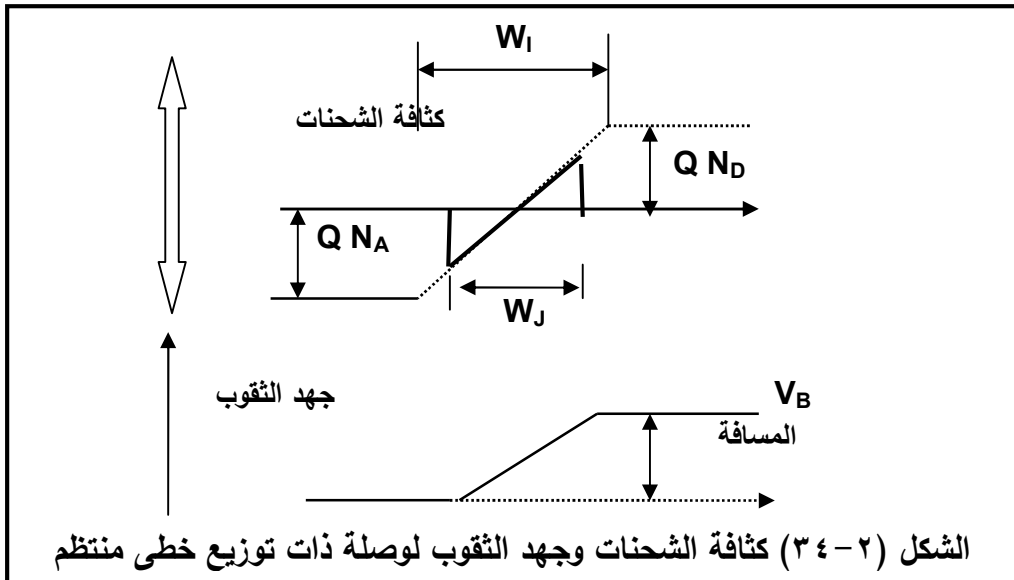
مع ملاحظة أن الوصلة متجانسة ومنها

$$W_n = W_p \text{ or } W_J = 2W_n \text{ and } V_n = (٢-١٢٢) \text{ المعادلة}$$

$$V_p \text{ or } V_B = 2V_n$$

• سعة الانتشار^(١٩)

تزداد سعة الانتقال في حالة تغذية الوصلة بجهد أمامي - وأيضا هناك تأثير آخر وهو الأهم والذي يسمى سعة التخزين أو سعة الانتشار. يحقن كثافة من الشحنات الأقلية مع التغذية الأمامية من الجانب المعاكس للوصلة. كثافة الشحنات الأقلية المحقنة ذات قيمة كبيرة بالقرب من الوصلة وتتناقص بخروجها من المنطقة العازلة - يوضح الشكل (٢-٣٤) تغير كثافة الشحنات مع التيار.



^{١٩} (diffusion capacitances.) عندما تكون التغذية أمامية تنشأ سعة أكبر من سعة الانتقال

يمتد ذيل من الثقوب الى الجانب (ن) وكذلك يمتد ذيل من الإلكترونات الى الجانب (ب) . التعبير الرياضى الذي يصف هذا التوزيع في حالة الإلكترونات الزائدة - من المعادلة (٢-٧٥) :

$$n_p(x) = n_{po} \left(\exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \right) \exp \frac{-x}{L_n} \quad \text{المعادلة (٢-١٢٢)}$$

حيث $(n_p(x))$ تمثل كثافة الشحنات الزائدة فقط وهى الشحنات الكلية فى منحنى الذيل . والتي يجب أن تتعادل من خلال الشحنات الأكثرية من الدائرة الخارجية والتي تؤدى الى سعة التخزين أو سعة الإنتشار - نحصل على الشحنات الكلية بتكامل كثافة الشحنات فى ذيل الإنتشار كما يلى:

$$\begin{aligned} Q_n &= -q \int_0^{\infty} n_p^+(x) dx \\ &= -q \int_0^{\infty} n_{po} \left(\exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \right) \exp \frac{-x}{L_n} dx \\ &= qn_{po} L_n \left(\exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \right) \exp \frac{-x}{L_n} dx \Big|_0^{\infty} \end{aligned}$$

$$Q_n = -q n_{po} L_n \left(\exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \right) \quad \text{المعادلة (٢-١٢٤)}$$

فى حالة تغيير الجهد - نلاحظ سعة تفضيلية نتيجة للتغيير فى شحنات الإلكترونات المخزونة وهى:

$$C_n = - \frac{\partial Q_n}{\partial V_j} \quad \text{المعادلة (٢-١٢٥)}$$

$$C_D = \frac{q^2}{KT} (n_{po} L_n + p_{no} L_p) \exp \frac{qV_j}{KT} \quad \text{المعادلة (٢-١٢٦)}$$

مع ملاحظة أن سعة التخزين تزداد بسرعة مع التغذية الأمامية وهى ذات علاقة طردية مع التيار . تأثير السعة التي تهيم فى حالة التغذية الأمامية هى نتيجة الحركة وتخزين الشحنات . بينما نجد أن سعة الإنتقال بسبب تشتت التيار كما هو الحال فى المكثف العادى . تستخدم سعة الإنتشار عند مناقشة الدائرة المكافئة للترانسستور . وبالتالي توضع النتيجة بالصيغ التالية - السعة الناشئة عن حركة الإلكترونات

$$C_n = \frac{g_n L_n^2}{D_n}$$

حيث:

$$g_n = \frac{q D_n n_{po}}{L_n} \left(\frac{q}{KT} \exp \frac{qV_j}{KT} \right) = \frac{q L_n}{KT} \quad (127-2) \text{ المعادلة}$$

الموصلية (g_n) تمثل موصلية الإلكترونات عند الإشارات الصغيرة عند الوصلة. وبالمثل أيضا بالنسبة للسعة الناشئة عن حركة الثقوب

$$C_p = \frac{g_p L_p^2}{D_p}$$

حيث:

$$g_p = \frac{q D_p p_{no}}{L_p} \left(\frac{q}{KT} \exp \frac{qV_j}{KT} \right) = \frac{q L_p}{KT} \quad (128-2) \text{ المعادلة}$$

وهكذا يمكن كتابة الصيغة الرياضية لسعة الانتشار كما يلي:

$$C_D = \frac{g_n L_n^2}{D_n} + \frac{g_p L_p^2}{D_p} \quad (129-2) \text{ المعادلة}$$

وللتبسيط - نبدأ بالوصلات ذات توزيع شوائب فجائى حيث الجانب (ب) ذو كثافة شحنات عالية ($^{++}$) وبالتالي فإن التيار الكلى (I) يساوى ($I = I_{pn(0)}$) وأن شحنات الأقلية الزائدة (Q) توجد فى الجانب (ن).

$$Q = \int_0^{\infty} q A p_{n(o)} e^{-x/L_p} dx = q A L_p p_{n(o)} \quad (130-2) \text{ المعادلة}$$

$$C_D = \frac{\partial Q}{\partial V} = q A L_p \frac{\partial p_{n(0)}}{\partial V} \quad (131-2) \text{ والمعادلة}$$

التيار الناشئ عن الثقوب ($I = I_{pn(x)}$) عند مسافة ($x = 0$)

$$I = \frac{q A D_p p_{n(o)}}{L_p} \quad (132-2) \text{ المعادلة}$$

$$\frac{\partial p_{n(o)}}{\partial V} = \frac{L_p}{q A D_p} \frac{\partial I}{\partial V} = \frac{g L_p}{q A D_p} \quad (133-2) \text{ والمعادلة}$$

بجمع المعادلتين (131-2) و (133-2) نحصل على قيمة سعة الانتشار

$$C_D = \frac{g L_p^2}{D_p} \quad (134-2) \text{ المعادلة}$$

$$\tau_p = \frac{L_p^2}{D_p} = \tau \quad (135-2) \text{ المعادلة} \quad \text{وحيث:}$$

$$C_D = \tau_n g_n + \tau_p g_p \quad (136-2) \text{ أو المعادلة}$$

كثيرا ما يكون صحيحاً أن تيار واحد هو الأكبر عند الوصلة ومن ثم سيتم تبسيط

قيمة سعة الانتشار. فى حال هيمنة التيار الناشئ عن الثقوب على سبيل المثال - نجد

$$C_D = \tau_p g_p = \tau_p g_{ac} \quad \text{المعادلة (١٣٧-٢)}$$

من المعادلتين المعادلة (١٣٤-٢) و المعادلة (١٣٥-٢) - نحصل على:

$$C_D = g\tau \quad \text{المعادلة (١٣٨-٢)}$$

من المعادلة (١١٥-٢) ، نجد

$$\frac{1}{R} = g = \frac{I}{\eta V_T}$$

بالتعويض في المعادلة (١٣٨-٢) بالمعادلة (١١٥-٢) - نحصل على:

$$C_D = \frac{\tau I}{\eta V_T} \quad \text{المعادلة (١٣٩-٢)}$$

من المعادلة (١٠٦-٢) يتبين أن سعة الإنتشار تتناسب طرديا مع التيار ($C_D \propto I$)

وبالفرض التيار الكلى هو التيار الناشئ عن الثقوب فقط - وللحصول على إفتراض دقيق

فإن سعة الإنتشار (C_D) في المعادلة (١٣٩-٢) تساوى (C_{Dp}) ويمكن الحصول على

تعبير رياضى مماثل لقيمة (C_{Dn}) - نحصل على:

$$C_D = C_{Dp} + C_{Dn} \quad \text{المعادلة (١٤٠-٢)}$$

نجد فى حال التغذية العكسية أن قيمة الموصلية (g) صغيرة جدا وبالتالي يمكن

إهمال سعة الإنتشار (C_D) مقارنة بقيمة سعة الإنتقال (C_T) . فى حالة التغذية الأمامية

نجد أن قيمة سعة الإنتشار (C_D) كبيرة بملايين المرات عن (C_T) وبالتالي يمكن إهمال

سعة النقل (C_T) .

٢-٢-٨ زمن التحويل فى دايود شبه الموصل

عند تحويل الصمام الثنائي من حالة التغذية العكسية الى حالة التغذية الأمامية يحتاج

فاصل زمنى قبل عودة الصمام إلى حالته المستقرة . يسمى هذا الفاصل الزمنى زمن

الإسترداد الأمامى (t_{fr}) ويمثل الفارق الزمنى بين نسبة ١٠% من جهد الصمام الى أن

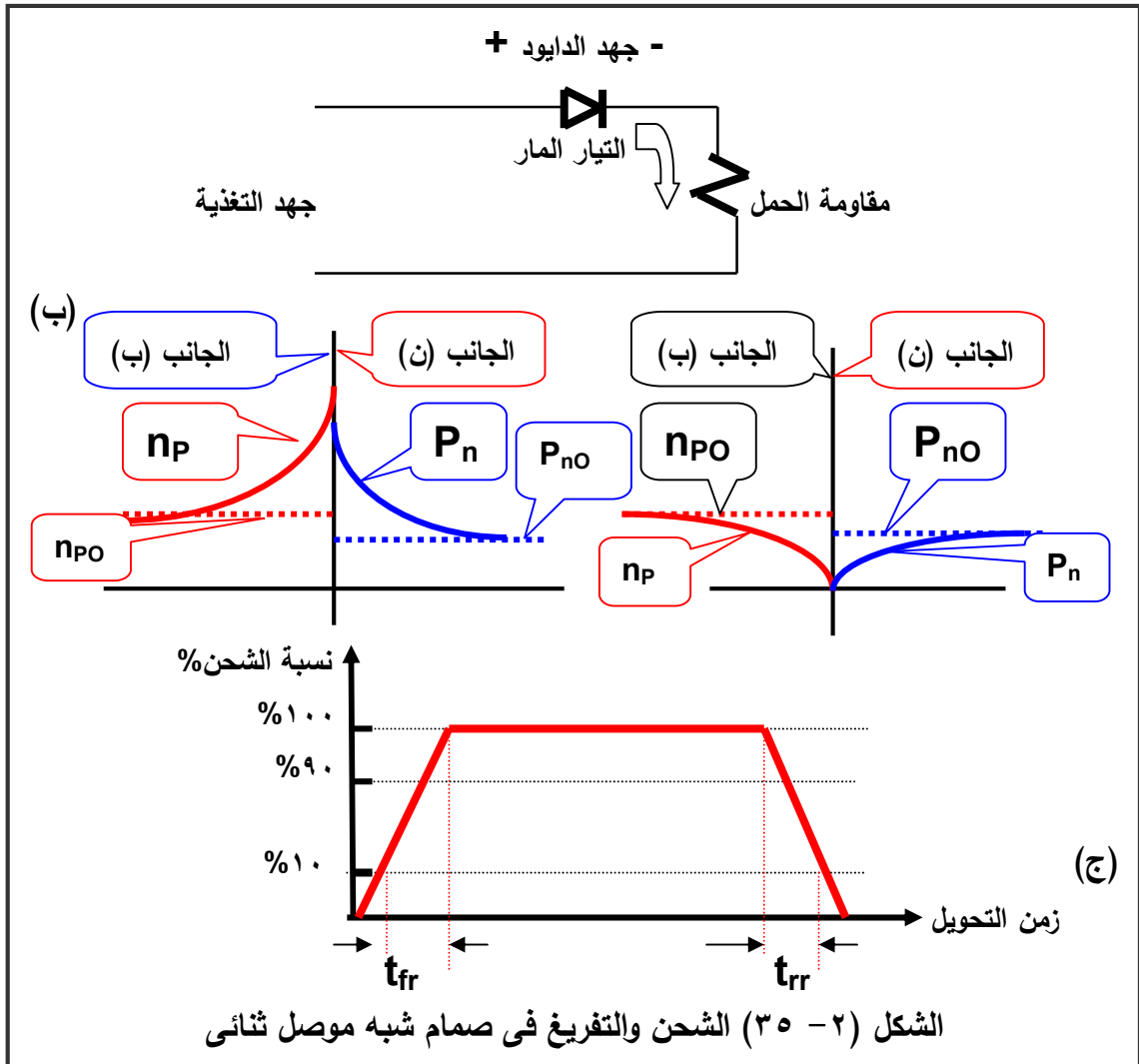
يصل ٩٠% من قيمته النهائية . فى حالة التغذية الأمامية - كثافة كل من الشحنات

الأقلية هى الأكبر كما هو موضح بالشكل (٢-٣٥ أ) . فى حالة التغذية العكسية عندما

تصل الى مرحلة الإستقرار فإن تركيز الشحنات عند الوصلة يساوى صفر كما هو موضح

بالشكل (٢-٣٥ ب) . تصل تركيز الشحنات الأقلية الى قيمتها عند قيمة الإتزان الحرارى

$(p_{n(0)})$ و $(n_{p(0)})$ بعيدا عن الوصلة- وتصل الى هذه القيمة بعد زمن الإسترجاع العكسي (t_{rr}) من تركيز للشحنات ٩٠% الى ١٠% من قيمتها النهائية.



الشكل (٢- ٣٥) يوضح التسلسل المصاحب لحالة التغذية العكسية لصمام ثنائي التوصيل . عندما تتم تغذية الصمام بجهد أمامي لفترة زمنية حتى زمن (t_1) فإن الجهد على مقاومة الحمل (R_L) كبير بالمقارنة الى الجهد على الدايمود ويساوي

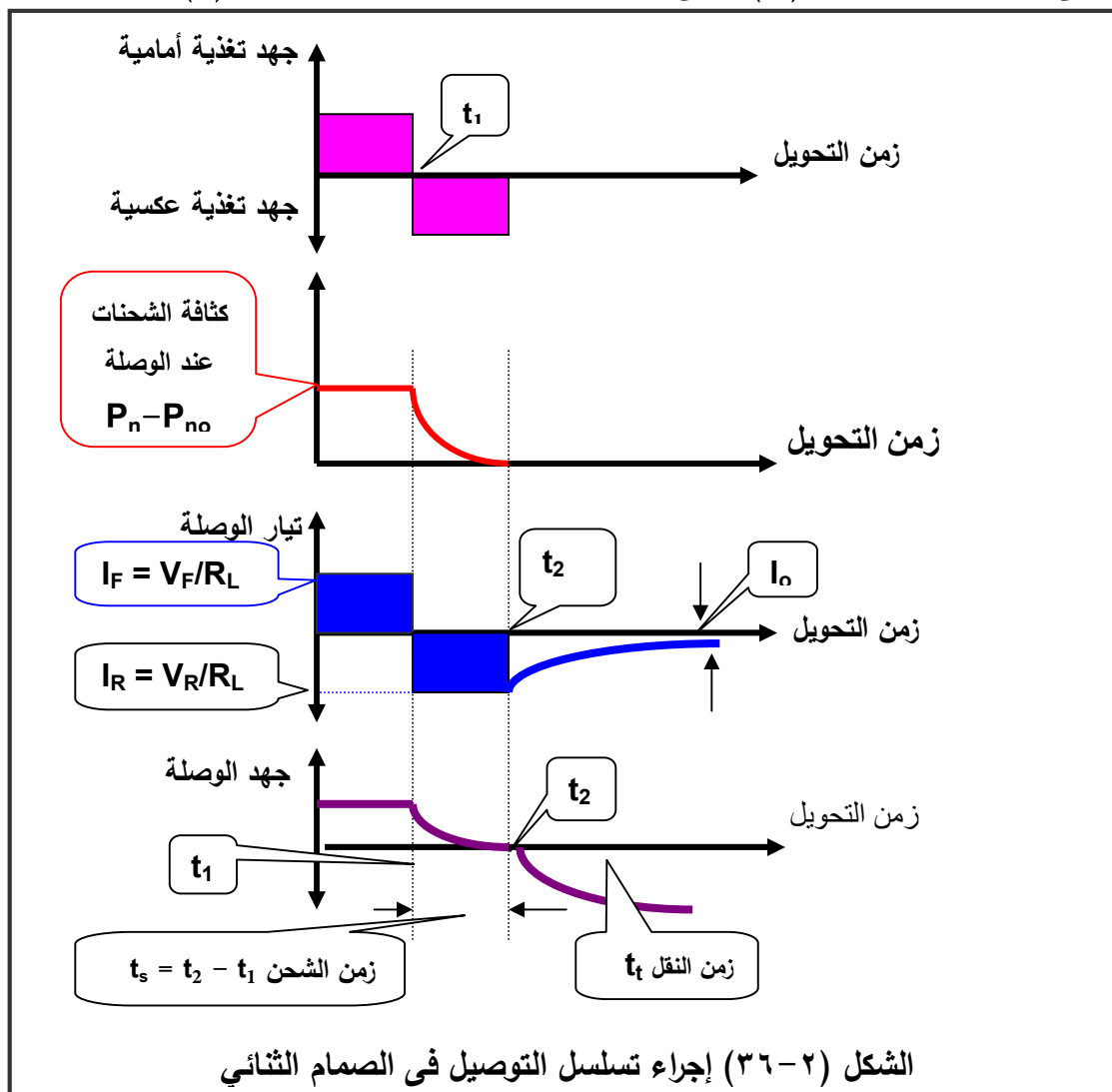
$$I_F = V_F/R_L.$$

عند زمن (t_1) ينعكس جهد التغذية ويصبح $(V = -V_R)$ ولا يتناقص تيار الدايمود الى الصفر ولكن تنعكس إشارته وتظل قيمته

$$i = - V_R/R_L = - I_R$$

حتى زمن يساوي (t_2) . عند زمن يساوي $(t = t_2)$ فإن شحنات الأقلية المحقنة عند

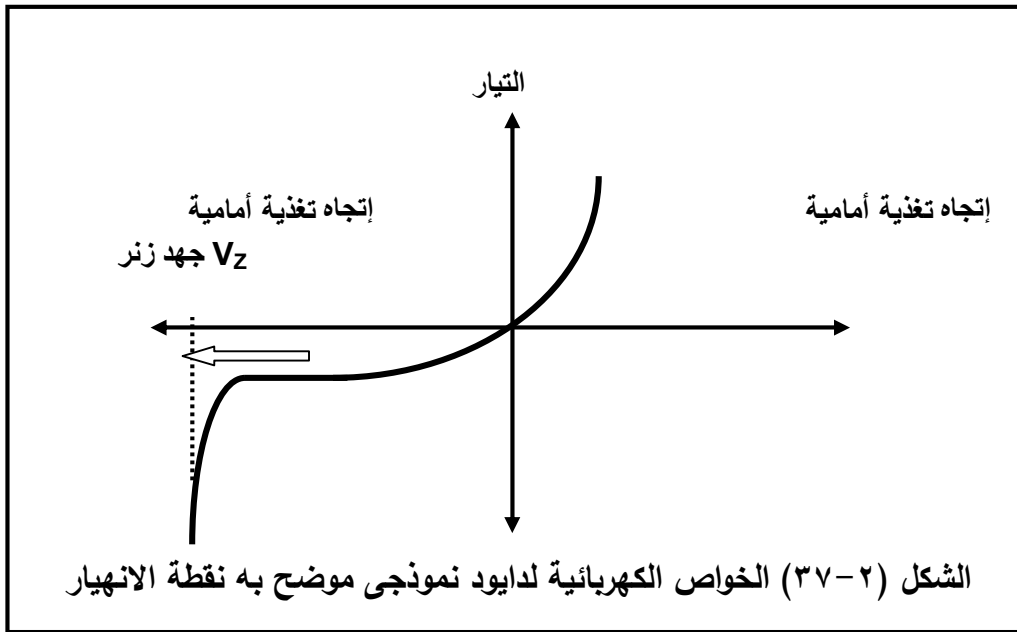
مسافة تساوى صفر تصل الى حالة الاتزان . عند زمن (t_1) ينخفض جهد الدايمود بقيمة تساوى ($I_f + I_R$) R_L ولكن لا تنعكس إشارته . عند زمن ($t = t_2$) - يبدأ الجهد فى عكس إشارته ويزيد التيار . تسمى الفترة الزمنية من (t_1) الى (t_2) بزمن الشحن (t_s) وتسمى الفترة الزمنية من (t_2) حتى الزمن معافاة الدايمود بزمن النقل (t_f) .



تسمى الفترة الزمنية من (t_1) الى (t_2) بزمن الشحن (t_s) وتسمى الفترة الزمنية من (t_2) حتى الزمن معافاة الدايمود بزمن النقل (t_f) . يصل الدايمود الى زمن الإسترداد (t_f) عندما يتم شحن المكثف (C_T) من خلال مقاومة الحمل (R_L) بجهد تغذية عكسى ($-V_R$) . زمن الاسترداد العكسى (t_{rr}) هو الفترة الزمنية من الزمن (t_1) حتى زمن الإسترداد العكسى (t_{rr}) والذى يقدر بحوالى ٤٠٠ نانو ثانية .

٢-٢-٩ جهد الإنهيار العكسي (٢٠)

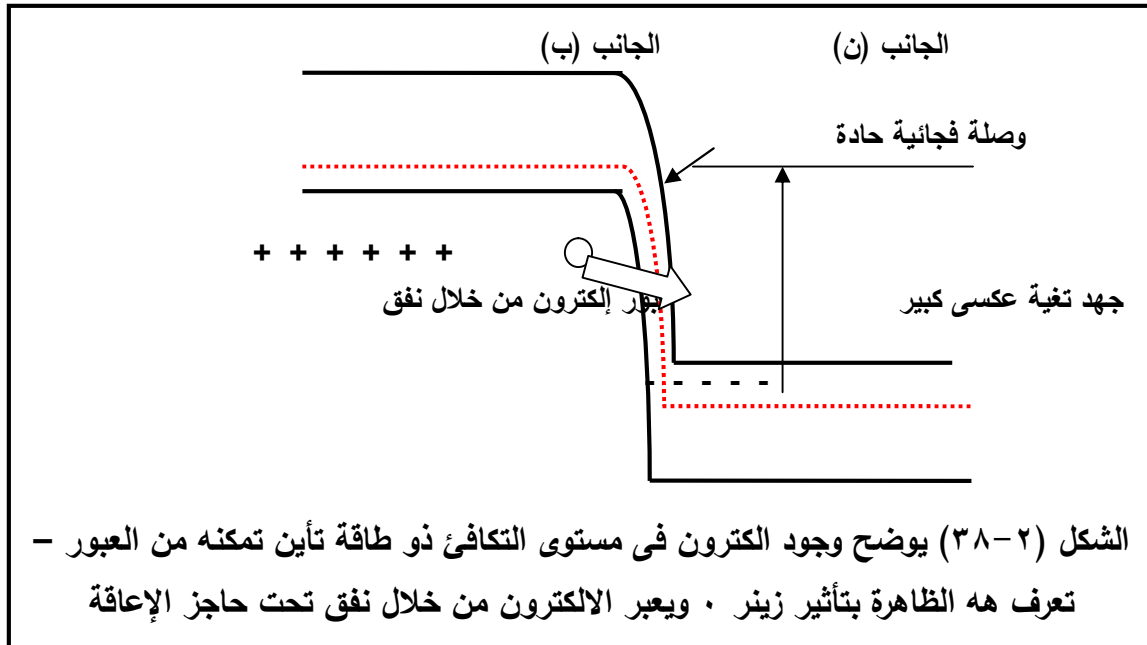
توضح معادلة الدايدود المثالي وجود تيار تشبع (I_0) لا يعتمد على جهد التغذية العكسي . يوجد عاملين يتسببان بانحراف قيمة تيار التشبع عن قيمته بالمعادلة المثالية . العامل الأول هو التيار المتسرب الناشئ نتيجة تسرب الشحنات على حواف سطح الدايدود وهو غالبا ما يحقق قانون أوم والذي يضاف الى تيار التشبع العكسي وبالتالي فهناك تزايد تدريجي في التيار بزيادة جهد التغذية العكسي . أما السبب الثاني يتمثل في جهد إنهاء الدايدود والموضح بالشكل (٢-٣٧) . نلاحظ من منحنى الخصائص الكهربائية حدوث ظاهرة الإنهيار نتيجة الى إرتفاع فجائي في قيمة التيار العكسي عند جهد تغذية عكسي معين (V_R) . تعتبر حدية التغير عند الركبة في منحنى التيار العكسي عند نقطة الإنهيار وميل المنحنى خاصية مقبولة حيث يتم التحكم في التيار المار فقط من خلال مقاومة الدائرة الخارجية .



٢٠ (Breakdown voltage) إنهيار الجهد للمادة ليس له قيمة محددة لأنها شكل من أشكال الإنهيار وهناك احتمال إحصائي ما إذا كانت المواد التي سوف تنهار في جهد معين .
(Reverse break down voltage) جهد التغذية العكسية الذي يسبب إنهاء دايدود شبه الموصل ويتم التوصيل في الاتجاه العكسي . مع التأكيد أن الإنهيار الحادث لا يتسبب في أضرار ولكن ببساطة يعود الى الجهد المطلوب للتغلب على الميل الطبيعي للوصلة شبه الموصل بعدم إجراء توصيل في الاتجاه العكسي .

وهناك آليتان متميزتان تستخدم لشرح ظاهرة الإنهيار ، أحدها يسمى إنهيار زينر والآخر يسمى الإنهيار الجليدي^(٢١) وسيتم مناقشة الآليتين بسبب حدوث واضح لظاهرة الإنهيار الجليدي فى الوصلات ذات منطقة عازلة نسبيا كبيرة ، من الممكن التمييز بين الآليتين حيث يتناقص جهد الإنهيار كلما زادت درجات الحرارة فى ظاهرة جهد انهيار زنر - أما فى ظاهرة الإنهيار الجليدي يتزايد جهد الإنهيار كلما زادت درجات الحرارة .

اولا - كان يعتقد أن ظاهرة زينر هى السبب لكل إنهيار فى وصلات أشباه الموصلات الثنائية حيث كان يعتقد أنه نتيجة إنبعث لمجالات كهربائية داخلية حيث أن المجال الكهربائى الناشئ ذو قيمة كبيرة مع جهد تغذية عكسى صغير القيمة فى الوصلات ذات منطقة عازلة رفيعة السمك وبالتالي فإن مستويات الطاقة فى المنطقة الإنتقالية ذات ميل حاد مما يجعل من الإمكان عبور الإلكترونات مستوى الطاقة المانع كما هو موضح بالشكل (٢ - ٣٨) .



ينتج مجال كهربائى (٤) عبر الوصلة بتطبيق جهد (٧) الى وصلة ثنائية من

^{٢١} (Avalanche breakdown & Zener breakdown) إنهيار الزينر والانهييار جليدي كلاهما فى حالة التغذية العكسية وهى المسؤولة عن سريان تيار عكسى كبير ، انهيار الزينر: يحدث بسبب وجود مجال كهربائى قوى ووجود الجهد انحياز عكسى كبير ، الانهييار الجليدي: يحدث بسبب انجراف الشحنات الأقلية المولدة حرارياً عن طريق الوصلات تحت تأثير من المجال الكهربائى الخارجى .

$$\varepsilon = 2 \times 10^4 \left(\frac{2V}{\rho} \right)^{1/2} v/cm$$

حيث (ρ) المقاومة النوعية في الجانب الآخر من الوصلة . وكمثال للتبسيط بفرض أن المقاومة النوعية تساوي ٥ أوم - سم وجهد تغذية يساوي ١٠ فولت فإن المجال الكهربائي الناشئ عبر الوصلة في حدود ٤٠٠٠٠ فولت/سم . تعتبر قيمة هذا المجال نظريا كافية لأن تسبب إنبعاثات كبيرة للإلكترونات عبر الفجوة الطاقية . بالطبع فإن المجال العكسي يتسبب في زيادة أو ارتفاع المنطقة الإنتقالية . وبالتالي فإن المجال الكهربائي العالي يساعد على تسارع أى إلكترون حر في مستوى طاقة التكافئ - مثل هذه الإلكترونات يمكنها العبور من مستوى التكافئ عبر الفجوة الطاقية وتنتقل الإلكترونات من أحد مستويات الطاقة إلى مستوى آخر أعلى .

وهكذا يبدو أن جهد خارجي صغير نسبيا قادر على أن يسبب إنبعاثات مباشرة من نطاق التكافئ إلى نطاق التوصيل في الوصلات ذات المنطقة الإنتقالية قليلة السمك . هذه العملية تمثل ظاهرة زينر أو إنبعاث مجال كهربائي داخلي . وتبين أن المجال اللازم لتحقيق هذه الظاهرة حوالى ٢٠٠,٠٠٠ فولت/سم في عناصر الجرمانيوم . يمكن الحصول على هذا المجال خلال توصيل الدايمود بجهد عكسي يتسبب في حدوث ظاهرة الإنهيار المعروفة باسم زينر عند شدة مجال معين، وبالتالي يعتمد جهد الإنهيار الفعلي على سمك المنطقة العازلة وهذا بدوره ثابت بتوزيع شحنات ذرات الشوائب في الوصلة . في الوصلات ذات المنطقة الإنتقالية الحادة حيث هناك تغير مفاجئ في كثافة الشوائب - يمكن حساب الجهد المسبب في إنهيار زينر على النحو التالي:

$$V_z = 100 \rho_n + 50 \rho_p \quad (in Ge),$$

$$= 40 \rho_n + 8 \rho_p \quad (in Si) \quad (١٤٢-٢) \text{ المعادلة}$$

حيث (ρ_n) و (ρ_p) يمثلان المقاومة النوعية لكل من جانبي الوصلة ، (V_z) جهد زينر بالفولت إذا كانت المقاومات النوعية (ρ_n) و (ρ_p) بالأوم - سم . في معظم الحالات التطبيقية تهمل قيمة إحدى المقاومات النوعية (ρ_n) أو (ρ_p) وتحسب قيمة جهد زينر (V_z) في ضوء قيمة المقاومة النوعية التي لم تهمل .

وقد وجد أن قيمة الثوابت في المعادلة أعلاه لمجموعة خاصة من الوصلات والتي تختلف قيمتها إختلاف بسيط طبقا لجودة العناصر المختلفة من الجرمانيوم والسيلكون حيث أنها تعتمد على قيم حركية الشحنات . إذا كان الإنتقال من الوصلات (ب) الى الوصلات (ن) ذات توزيع كثافة الشوائب خطيا ومنتظم - يمكن حساب تركيز الشوائب عبر الوصلة كما يلي:

$$N_D - N_A = a x \quad \text{المعادلة (٢-١٤٣)}$$

حيث (x) هي المسافة بالسنتيمتر والثابت (a) بالسنتيمتر (سم^{-٤}) - بالتالى فإن جهد الإنهيار زينر بالفولت في العناصر المصنعة من الجرمانيم يساوى ،

$$V_Z = \frac{5 \times 10^{11}}{\sqrt{a}}$$

بزيادة درجات الحرارة يتناقص إتساع الفجوة الطاقية مما يتسبب فى زيادة إحتتمالات إنبعاثات المجال الكهربائى وحدث إنهيار زينر عند جهد تغذية أقل .

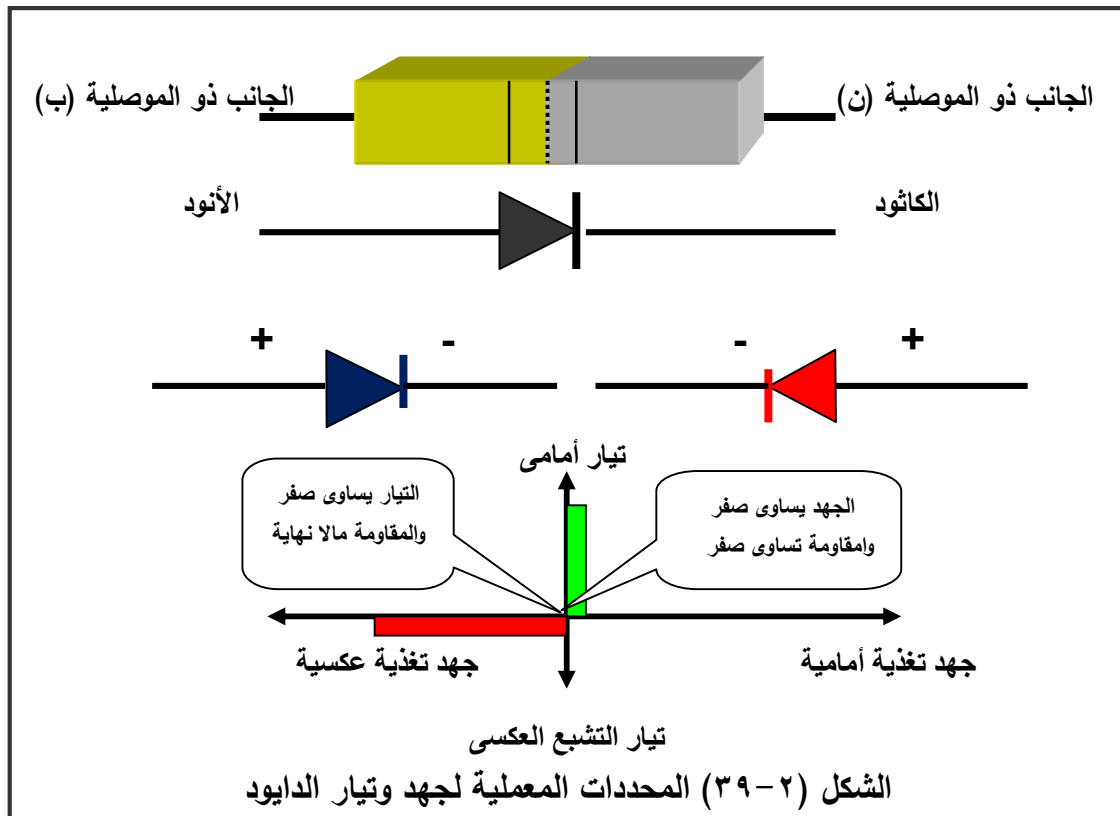
فى الوصلات ذات المنطقة الانتقالية العريضة ، يحدث الإنهيار عند توصيل جهد تغذية أقل بما لا يتحقق مع مفهوم نظرية إنهيار زينر - يعتقد أن حدوث الإنهيار عند توصيل جهد تغذية أقل بسبب ظاهرة الإنهيار الجليدي - ولمزيد من إستيعاب هذه الظاهرة يجب أن ندرك أن هناك آليتين لحدوث الإنهيار . فى المقام الأول يجب أن يكون هناك عملية تأين أولية بسبب تسريع الإلكترونات من الجانب (ب) الى الجانب (ن) فى المنطقة الإنتقالية . وعادة تعاني الإلكترونات من الإصطدامات العشوائية التى لا تسمح بما يكفي من الطاقة للإنتقال فى مسار واحد ، حيث أنه قد يحدث التأين فى كل تكوينات البلورة .

إذا كانت قيمة المجال الناشئ كبيرة مما يمكن إكتساب إلكترون طاقة كافية فى إتجاه حر واحد وبالتالي يتسبب فى إثارة إلكترون آخر للخروج من حالة الإرتباط وينتقل أعلى فى إتجاه نطاق طاقة التوصيل . مقدار الطاقة الحركية اللازمة لهذه الظاهرة تسمى طاقة إنتاج الشحنات وعادة تساوى ٧٢ و٠ إلكترون- فولت . ينتج عن ظاهرة إنتاج الشحنات إلكترون فى نطاق التوصيل وثقب فى نطاق التكافئ . عند حدوث هذه الظاهرة فى المنطقة الإنتقالية كلا من الإلكترون والثقب تتسارع بسبب المجال الكهربائى . يتسبب الإلكترون فى إثارة إلكترونات أخرى ويدخل الثقب فى عملية ثانوية ضرورية لحدوث

الإنهيار - تتسارع الثقوب فى إتجاه معاكس لإتجاه الإلكترونات وتتسبب هى الأخرى فى الإثارة وتزيد ظاهرة إنتاج الشحنات . ومن هنا نرى أن هناك عملية تغذية مرتدة مما يتسبب فى إضافة إلكترون والذى يتسبب فى إنتاج زوج من الشحنات وهكذا - فإن هذه العملية من جهة أخرى مستمرة طالما أن المجال الكهربائى موجود . هناك توضيحين مهمين لهذه الظاهرة . أحدها أن هناك منطقة تضاعف بالقرب من الإنهيار التى تتسبب فى عملية التأين ولكن الثقوب لم تتسبب بعد فى التأين حيث أن طاقتها المكتسبة لا تكفى لجهد الإنهيار . عند درجات الحرارة المرتفعة فإن المسارات الحرة للإلكترونات والثقوب هى أقصر ولذلك يتطلب الأمر مسارات أكبر لحدوث التأين والإنهيار .

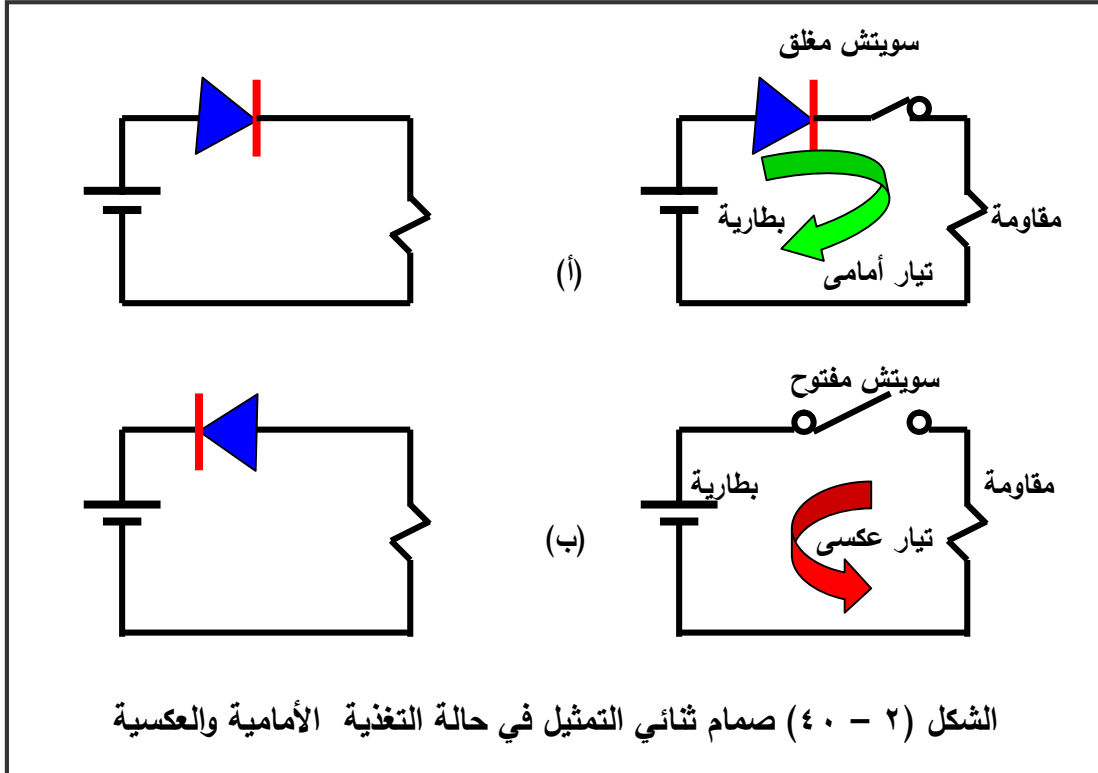
٢-٣ الحدود المعملية لثنائيات أشباه الموصلات

يوضح الشكل (٢-٣٨) الرمز العلمى المستخدم لثنائيات أشباه الموصلات ويستخدم مسمى أنود وكاثود لتعريف طرفى التوصيل لكل من الأقطاب الكهربية لجانبى الثنائى ذات الموصلية (ن) و (ب) .



عندما يتم توصيل طرفى الدايمود بجهد تغذية أمامى - يبدأ الدايمود فى التوصيل وينشأ

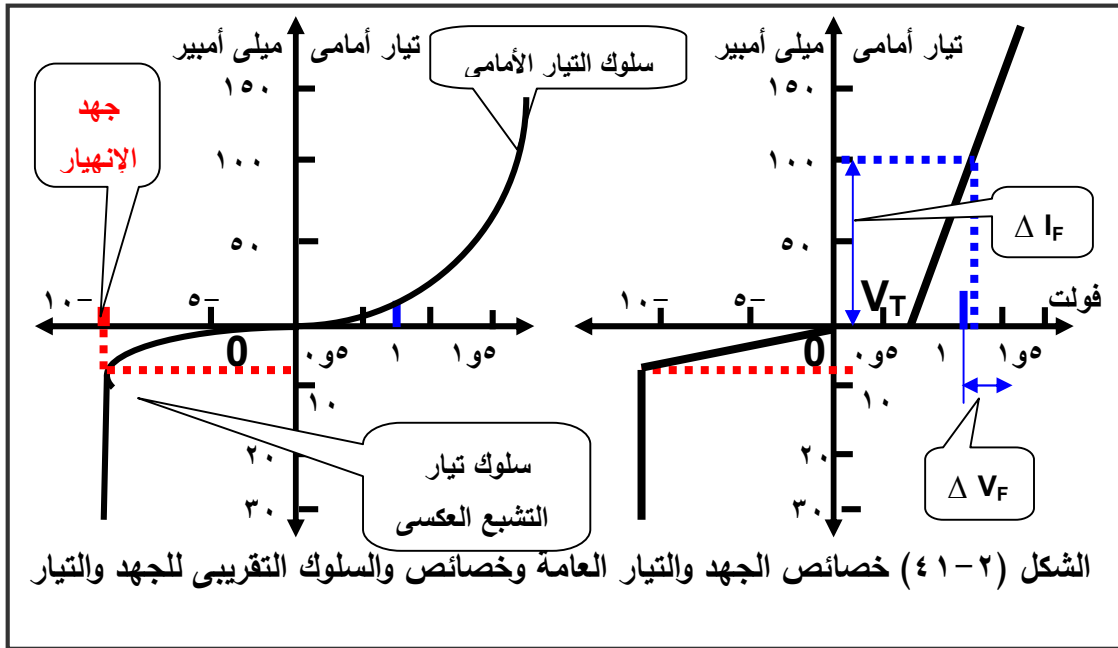
تيار أمامي وتؤول مقاومة الدايمود الى الصفر عند جهد تغذية يساوى صفر . عند توصيل طرفي الدايمود بجهد تغذية عكسي - لا ينشأ تيار وقيمته تساوى صفر وتؤول مقاومة الدايمود الى مالانهاية لأى قيم تغذية عكسية . فى الشكل (٢ - ٤٠ أ) نلاحظ أن جهد تغذية الدايمود جهد أمامي - يتصرف الدايمود كأنه سويتش مغلق ويقع الجهد الكلى على المقاومة دون السويتش (الدايمود) ويبدأ سريان التيار .



فى الشكل (٢ - ٤٠ ب) نلاحظ أن جهد تغذية الدايمود جهد عكسي - فإن الدايمود يسلك كأنه سويتش مفتوح ولا ينشأ جهد على المقاومة ولا يسرى التيار والجهد الكلى يقع على طرفي السويتش (الدايمود) . وحيث أن الطاقة الناتجة تساوى حاصل ضرب الجهد الناشئ فى التيار المار ($P = V I$) وبالتالي إذا كان أى من التيار أو الجهد يساوى صفر فإن الطاقة تساوى صفر ولا توجد طاقة ناتجة حيث عندما يعمل الدايمود فإن التيار يصل الى مالانهاية والجهد الواقع على الدايمود يساوى صفر حيث أن مقاومة الدايمود تساوى صفر - فى حالة التغذية العكسية فإن التيار يساوى صفر والجهد الواقع يساوى (V_R) بسبب أن مقاومة الدايمود تؤول الى مالانهاية - بالتالى فإنه فى حالة الدايمود المثالى لا يوجد تبديد للطاقة حيث أنها تساوى صفر .

• تشغيل الإشارات الكبيرة فى الصمام الثنائي

تختلف سلوك وخواص الثنائيات العملية عن سلوك وخواص الثنائيات المثالية - وغالبا يهمل الإختلاف بينهما ويتم التحليل والمعالجة على أنها ثنائيات مثالية . يوضح الشكل (٢-٤١ أ) سلوك وخصائص التغذية الأمامية والعكسية للدايود - فى حالة توصيل الدايود بجهد تغذية أمامى بقيم جهد صغيرة ينتج عنها تيار ذو قيم كبيرة - أما فى حالة توصيل الدايود بجهد تغذية عكسية ينتج تيار ذو قيم صغيرة جدا حتى ولو كان جهد التغذية ذو قيمة كبيرة .

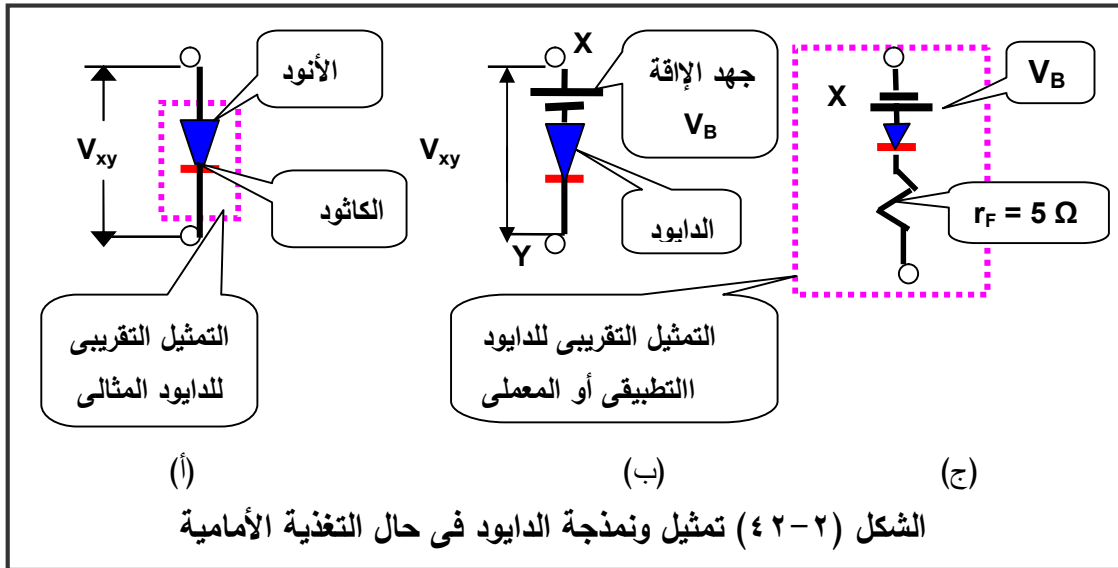


فى حالة توصيل جهد أمامى فيجب التغلب أولا على الجهد العائق قبل أن تتم عملية التوصيل . لا يتم التوصيل مباشرة حتى بعد أن يتعدى جهد التغذية الأمامى قيمة الجهد العائق بسبب وجود مقاومة ديناميكية للدايود (r_F) . وبسبب السلوك اللاخطي للمقاومة هناك ضرورة لعمل تقريب لخصائص الدايود كما هو موضح بالشكل (٢-٤١) خاصة عندما تكون قيم جهد التغذية والتيار أكبر من الجهد العائق أو جهد الإنهيار - وتبعا لهذا التقريب يمكن بسهولة الحصول على معاملات تشغيل الدايود مباشرة من منحنى خصائص الدايود .

على سبيل المثال عند جهد إعاقة يساوي ٠.٨ فولت وجهد التغذية الأمامية ١.٣ فولت وتيار دايود الكلي ١٠٠ ميلي أمبير كما هو موضح بالشكل (٢-٤) يمكن حساب قيمة المقاومة (r_F) للدايود على النحو التالي:

$$r_F = \frac{\partial V_F}{\partial I_F} = \frac{1.3 - 0.8}{(100 - 0) \times 10^{-3}} = 5 \Omega$$

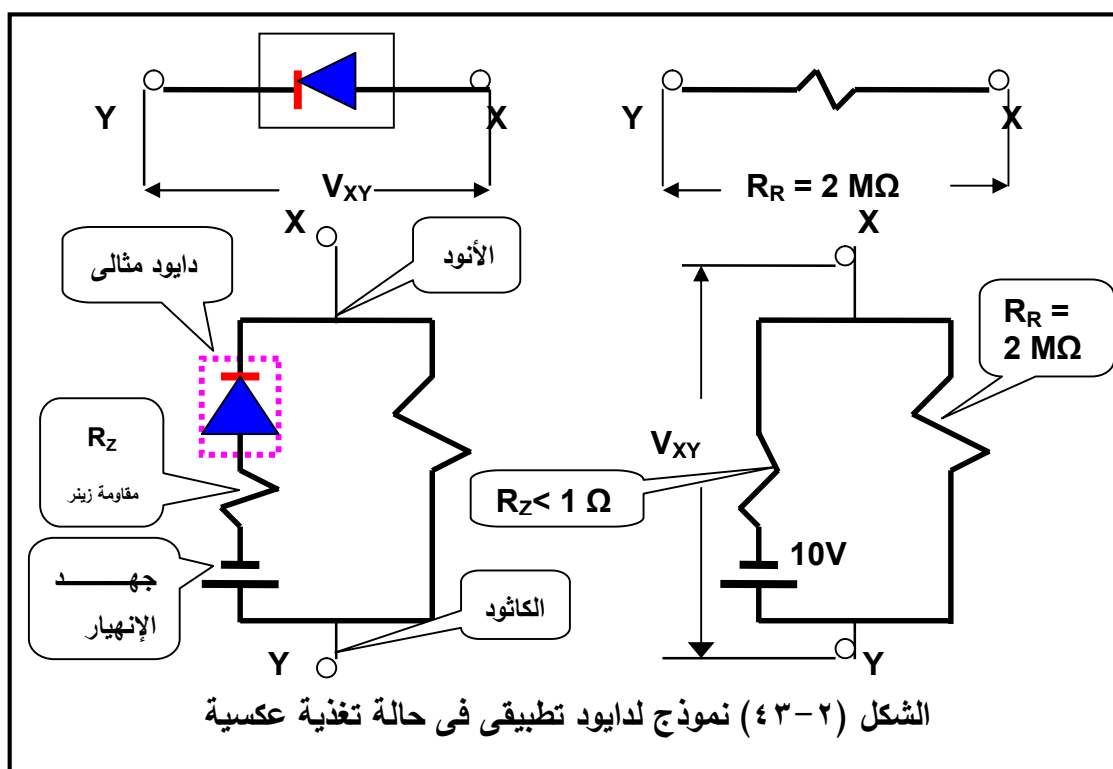
وبالتالي يمكن تمثيل الدايود التطبيقي من خلال قيم كل من جهد الإعاقة ومقاومة الدايود. لعمل نموذج تمثيلي- نبدأ بنمذجة الدايود المثالي ثم تضاف العناصر المختلفة للدائرة التي يجب مراعاتها عند تمثيل ونمذجة الدايود التطبيقي.



الشكل (٢-٤) تمثيل ونمذجة الدايود في حال التغذية الأمامية

يتم توصيل مصدر جهد لتيار مستمر (بطارية) وبفرض وجود جهد خارجي بين القطبين لتغذية الدايود بجهد أمامي. بمعنى يتم توصيل الإلكتروود (X) بالطرف الموجب بالنسبة للإلكتروود (Y) - فإن الجهد الواقع على الدايود المثالي هو الفرق بين الجهد على طرفي الدايود (V_{xy}) وجهد الإعاقة (V_B). في حالة أن يكون الجهد بين القطبين أصغر من جهد الإعاقة ($V_{xy} < V_B$) فيصبح الأنود موجب بالنسبة للكاثود - ويبدأ الدايود في التوصيل. النموذج في الشكل (٢-٤ ب) لا يشتمل مقاومة للدايود (r_F) وأضيفت للنموذج في الشكل (٢-٤ ج) - المكونات (V_B) و (r_F) والدايود المثالي توضح بالتقريب نموذج للدايود التطبيقي. يستخدم النموذج في الشكل (٢-٤ ج) فقط عندما

تكون تغذية الدايمود تغذية أمامية ، عندما يتم توصيل الدايمود بجهد تغذية عكسي فيتحول الإهتمام الى تيار التشبع العكسي وجهد الإنهيار وكما نعلم سابقا أن قيم تيار التشبع العكسي كبيرة ويعتمد على درجات الحرارة وحيث أن مواصفات وسلوك الدايمود ثابتة لكل درجة حرارة محددة وبالتالي يمكن تطبيق أى نموذج لأى درجة حرارة مطلوبة . يوضح الشكل (٢-٤٣ أ) نموذج لدايمود تطبيقي فى حالة تغذية عكسية - وتوضح قطبية القطبين (V_{xy}) أن القطب (x) سالب بالنسبة الى القطب (y) .



النموذج التقريبي فى الشكل (٢-٤١) يوضح التغير فى جهد التغذية (V_R) من صفر الى - ١٠ فولت ينتج تغير فى تيار التشبع العكسي (I_R) من صفر الى - ٥ ميكرو أمبير فتزيد مقاومة الدايمود (R_R) وتحدد قيمتها كما يلى:

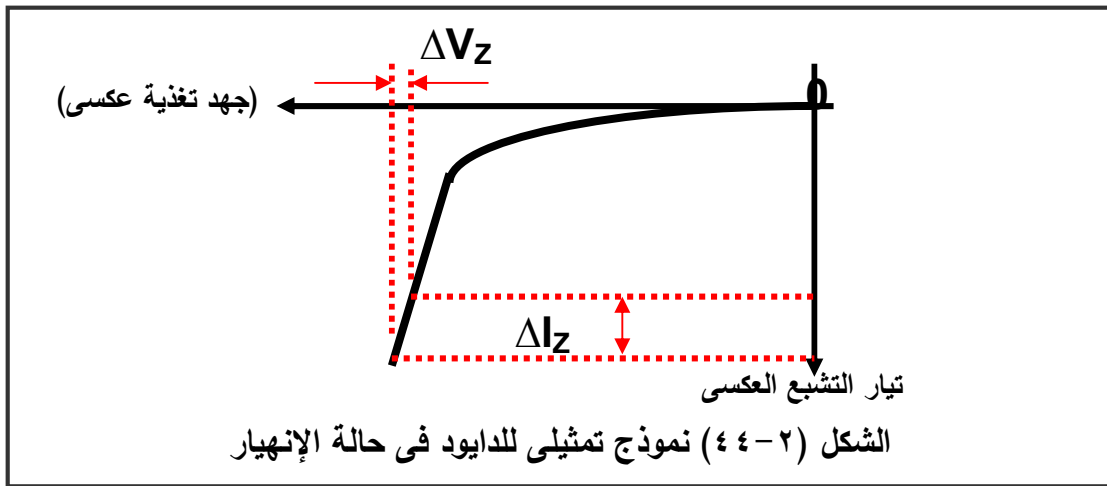
$$r_R = \frac{\partial V_R}{\partial I_R} = \frac{10}{5 \times 10^{-6}} = 2M\Omega$$

يمكن تمثيل نموذج لدايمود تطبيقي كمقاومة فى حالة التغذية بجهد عكسي أصغر من جهد الإنهيار ($V_R < BV$) كما هو موضح فى الشكل (٢-٤٣ ب) . عند التغذية بجهد عكسي أكبر من جهد الإنهيار ($V_R > BV$) فإن أى زيادة صغيرة فى الجهد العكسي ينتج

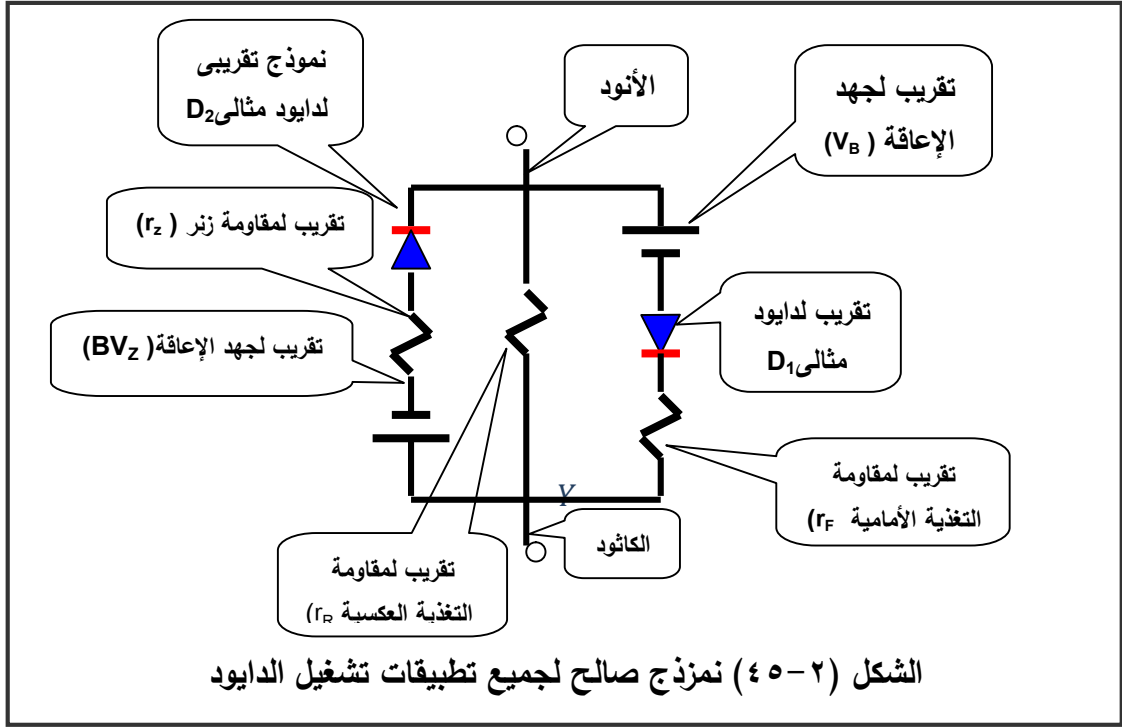
عنها تيار كبير ويصل الدايمود الى مرحلة الإنهيار وتقل مقاومة الدايمود ، ويمكن تمثيل ذلك بإضافة مكونات أكثر كما هو موضح فى الشكل (٢-٤٣ ج) ، بفرض أن جهد التغذية العكسى أصغر من جهد الإنهيار ($V_R < BV$) - فى المثال المذكور جهد التغذية العكسى أصغر من -١٠ فولت ($V_R < -10V$) مما يجعل مقاومة الدايمود هى الوحيدة فى الدائرة وتساوى ٢ ميغا أوم - لحظيا بزيادة جهد التغذية العكسى أكبر من -١٠ فولت ($V_R > -10 V$) يتغير النموذج الى الشكل (٢-٤٣ د) ويمكن تطبيقه فقط فى حالة الإنهيار وتصبح مقاومة زينر (r_z) هى المكون الوحيد للحد والتحكم فى تيار الدايمود ويمكن إستنتاجه على النحو التالى:

$$r_z = \frac{\partial V_z}{\partial I_z}$$

يوضح الشكل (٢-٤٤) تحديد قيمة مقاومة زينر (r_z) وهى ذات قيمة صغيرة جدا



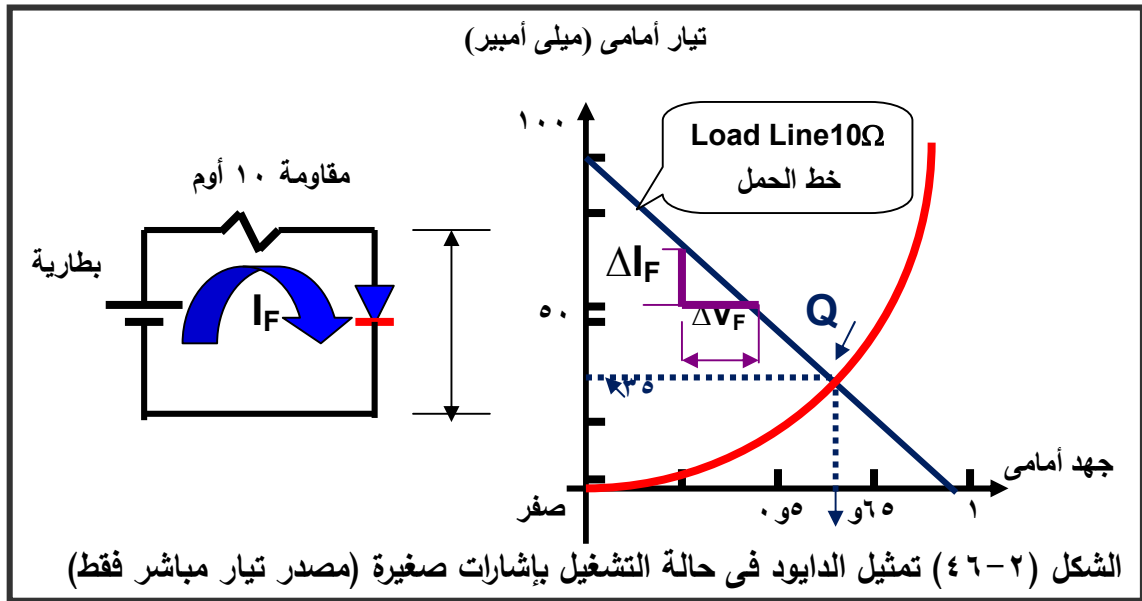
يمكن تكوين نموذج جديد لكلا حالتى التغذية الأمامية والعكسية لدايمود تطبيقى ويمكن إستخدامه فى كل الحالات كما هو موضح بالشكل (٢-٤٥) ، يسلك الدايمود فى أى وقت مسلك واحد من الثلاث الحالات الممكنة ، فى حالة التغذية الأمامية يتم التعامل فقط مع الفرع الذى يشتمل على جهد الإعاقه (V_B) والدايمود (D_1) ومقاومة الدايمود (r_F) بالرغم من وجود المقاومة (r_R) فى النموذج وتمثل قيمة كبيرة بالنسبة الى (r_F) ويمكن إهمالها حيث أنها متصلة على التوازي مع (r_F) ($r_R // r_F$) ، فى حالة التغذية العكسية وليس فى حالة إنهيار الدايمود فإن كلا من الدايمود (D_1) و (D_2) غير فاعلين ومن ثم يؤخذ فى الإعتبار الفرع المشتمل على المقاومة (r_R) .



في حالة أن يكون جهد التغذية العكسية أكبر من جهد الإنهيار ($V_R > V_B$) يتفاعل الدايود (D_2) ويتم التعامل مع فرع الدائرة المشتمل على الدايود (D_2) ومقاومة زينر (r_z) وجهد الإنهيار (V_B). فرع الدائرة المشتمل على الدايود (D_1) خارج الدائرة بينما المقاومة (r_R) ذات قيم كبيرة جدا ويجب أخذها في الاعتبار.

- تشغيل الإشارات الصغيرة في الدايود

أيضا تستخدم الإشارات الصغيرة (حول المركبتين في منحنى خواص الجهد والتيار للدايود) بقيم ما بين جهد التغذية العكسية (V_B) وجهد الإنهيار (V_B) - توضح الدائرة الكهربائية في الشكل (٢-٤٦ أ) تحليل لتطبيقات الإشارات الصغيرة. قطبي البطارية (١ فولت) متصلة بالدايود في حالة التغذية الأمامية. عند مرور التيار في الدائرة يقع الجهد على طرفي المقاومة (١٠ أوم) ويكون الجهد الواقع على طرفي الدايود أقل من ١ فولت - بمعنى تشغيل الدايود حول إنحناء (الركبة) للمنحنى في الجزء الخاص بالتغذية الأمامية. تستخدم تقنية الرسوم البيانية لتحديد الجهد الفعلي والتيار في الدايود - باستخدام قانون كيرشيهوف للجهود في الدائرة الكهربائية الموضحة - جهد المنبع (V_S) يساوي التيار الأمامي (I_F) مضروب في المقاومة (R) بالإضافة الى جهد التغذية



الأمامية $[V_s = I_F R + V_F]$ وبالتعويض بقيم المكونات في الدائرة يمكن تحديد قيم التيار والجهد الأمامي $[1 = 10 I_F + V_F]$ وتمثل معادلة خط مستقيم تشتمل على متغيرين - حل هذه المعادلة يتمثل في النقطة التي يتقاطع فيها الخط المستقيم مع المنحنى . حتى يمكن رسم الخط المستقيم يتم التعويض عن أحد المتغيرين (V_F) بصفر ومرة أخرى التعويض عن (I_F) بصفر .

١ . بالتعويض عن قيمة المتغير (V_F) بصفر في المعادلة $[1 = 10 I_F + V_F]$

نحصل على قيمة المتغير (I_F) ويساوى ٠.١ أمبير (١٠٠ ميلي أمبير)

٢ . بالتعويض عن قيمة المتغير (I_F) بصفر في المعادلة $[1 = 10 I_F + V_F]$

نحصل على قيمة المتغير (V_F) ويساوى ١ فولت . بعد تحديد قيم المتغيرين - يتم رسم

الخط المستقيم بين قيمتي المتغيرين $[I_F = 0.1 A$ و $V_F = 1 V]$ الذي يتقاطع مع

منحنى خواص الدايدود عند نقطة (Q) وقيمتها $[I_F = 0.35 ma$ و $V_F = 35 mV]$.

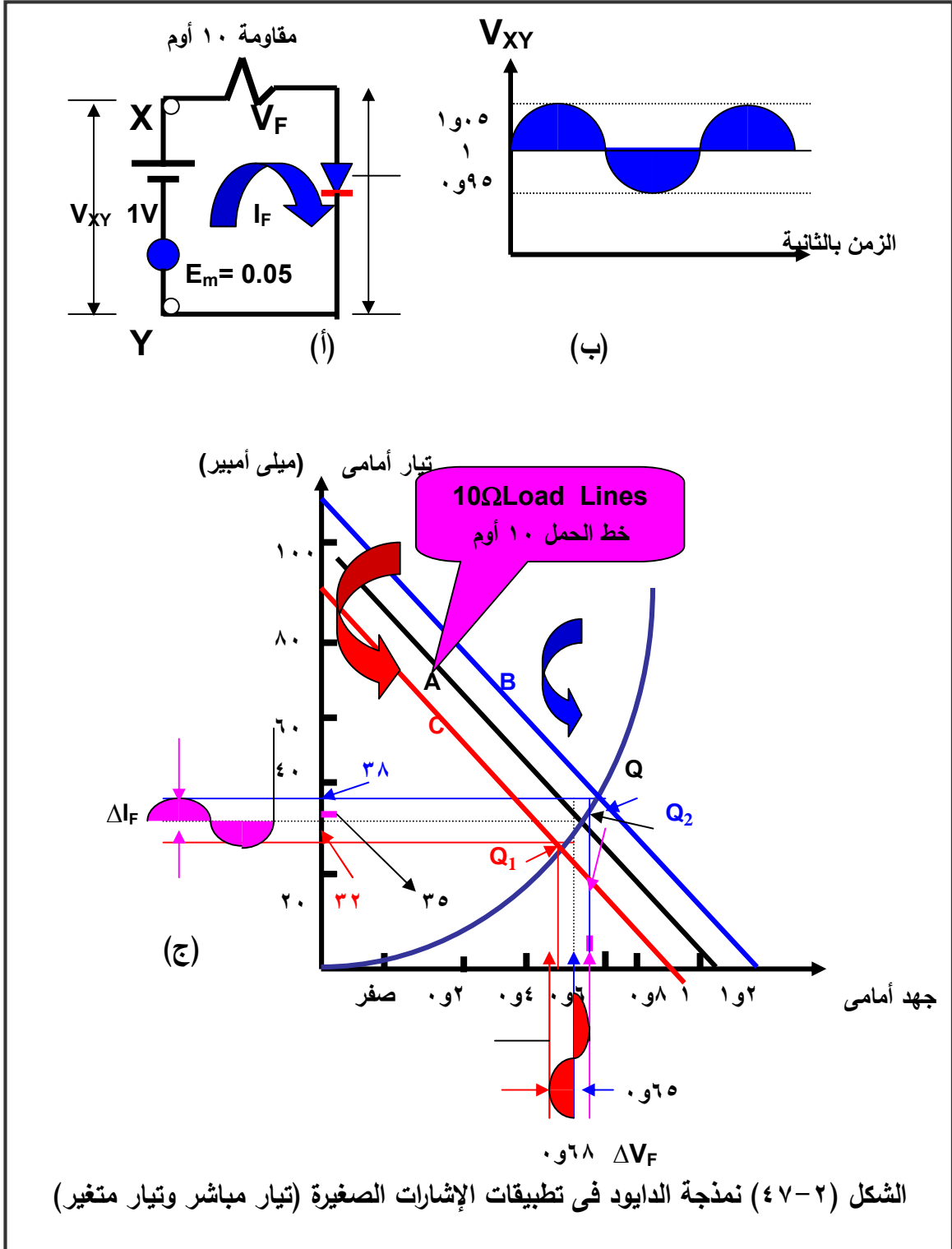
يسمى الخط المستقيم الناشئ بخط الحمل (load line) . نجد تشابه في الدائرة الكهربائية

بالشكل (٤٧-٢) مع الدائرة بالشكل (٤٦-٢) ماعدا إضافة مصدر تيار

متغير ($E_{max} = 0.05 V$) متصل على التوالي مع مصدر التيار الثابت (البطارية) الذي

يساوى في الدائرة ١ فولت وبالتالي فإن الجهد الواقع بين الطرفين (x ، y) على النحو

التالي:

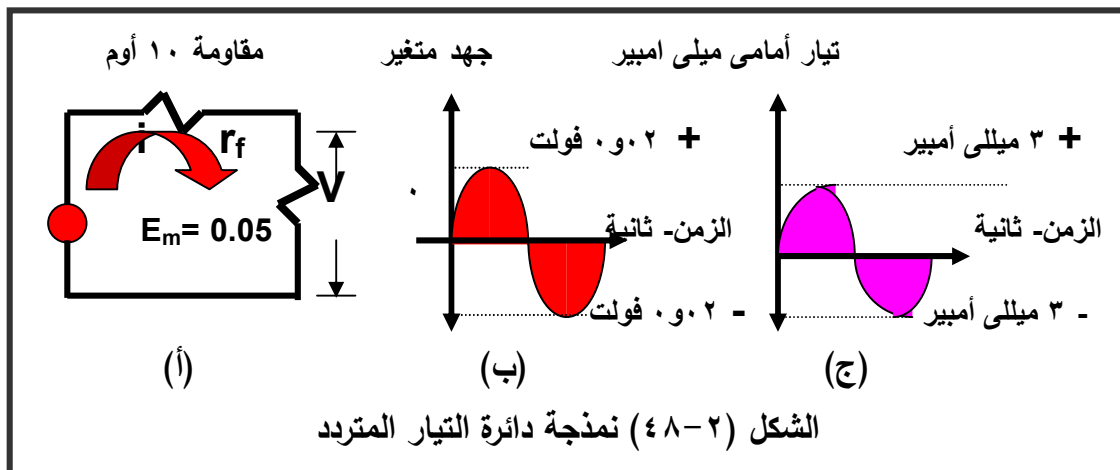


١. خلال نصف الدورة الموجب من جهد التيار المتغير يساوى جهد البطارية الثابت مضافا له القيمة القصوى لجهد التيار المتغير أي يساوى ١.٠٥ فولت (١ + ٠.٠٥ فولت)

٢. خلال نصف الدورة السالب من جهد التيار المتغير يساوى جهد البطارية الثابت مطروحا منه القيمة القصوى لجهد التيار المتغير أي يساوى ٠.٩٥ فولت (١- ٠.٥ و. فولت).

يوضح الشكل (٢- ٤٧ ب) النموذجين - ويجب ملاحظة أنه فى لحظة عكس قطبية التيار المتغير فإن قيمة الجهد المتردد يساوى صفر والجهد على الطرفين (x ، y) يساوى ١ فولت ($V_{xy} = 1 \text{ volt}$) وقيمة التيار تساوى ١٠٠ ميلي أمبير الممثل بخط الحمل (أ) (٢- ٤٧ ج) وأيضا ملاحظة خط الحمل (ب) الذى يمثل القيمة القصوى الموجبة للجهد وخط الحمل (ج) الذى يمثل القيمة القصوى السالبة - وهذا يعنى أن خط الحمل يتحرك بشكل موجة جيبيية بين ذروتى قيمتى خط الحمل (ب) و (ج) وأيضا فإن التيار والجهد الواقع على الداىود يتغير بشكل موجه جيبيية من ٠.٦٣ فولت الى ٠.٦٧ فولت ومن ٣٢ الى ٣٨ ميلي أمبير طبقا للقيم السابق إفتراضها فى الدائرة وهذا يعنى القيمة القصوى للجهد الواقع على الداىود ٠.٢ و. فولت وأعلى تيار مار فى الداىود ٣ ميلي أمبير .

يمكن إستخدام الداىود فى عدد من التطبيقات وذلك فقط بتغيير مكونات التيار المتردد الجهد والتيار . على سبيل المثال فقيمة جهد البطارية الثابت مطلوب لتحديد نقطة تشغيل الداىود (Q) عند جهد يساوى ٠.٦٥ و. فولت وتيار يساوى ٣٥ ميلي أمبير . بمجرد تحديد مستوى التيار الثابت (كجهد مرجعى) فمن الممكن الأخذ فى الإعتبار مكونات التيار المتغير فقط .



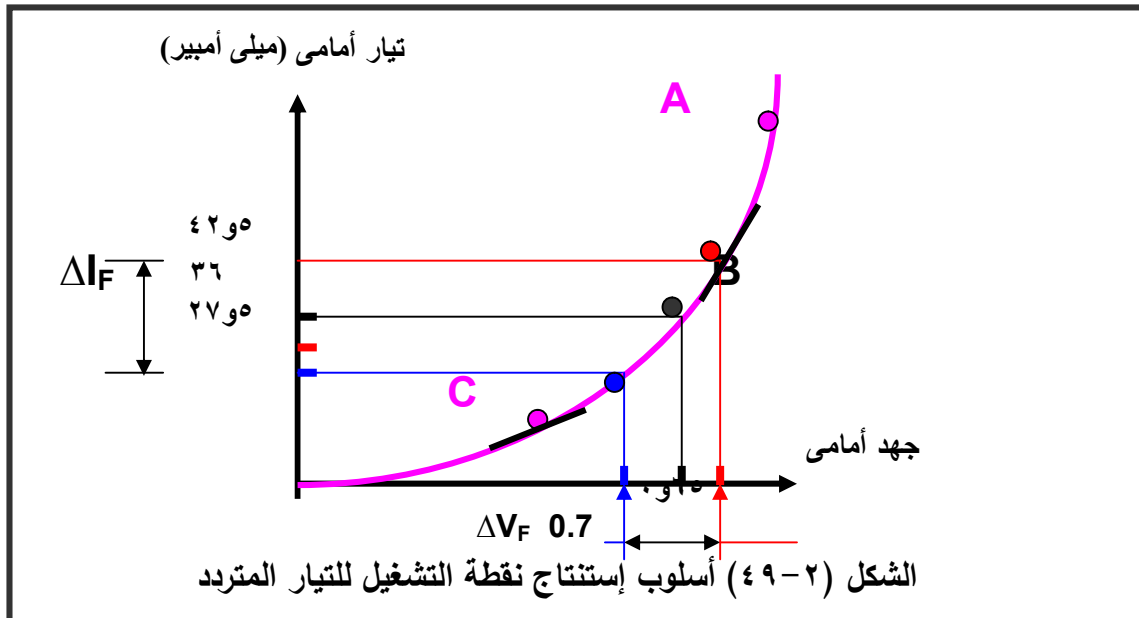
يوضح الشكل (٢-٤٨ أ) الدائرة المكافئة للتيار المتردد للدائرة السابق العمل عليها في الشكل (٢-٤٧) . حيث أخذ في الإعتبار إستجابة التيار المتردد فقط كما أن مصدر التيار الثابت (البطارية) غير ممثلة .
كما هو معلوم فإن المقاومة (r_F) تمثل المقاومة الديناميكية أو مقاومة التيار المتردد في الدايمود

$$r_F = \left. \frac{\partial V_F}{\partial I_F} \right|_Q$$

نقطة التشغيل (Q) تتغير بمقدار ٠,٥ فولت في كل جانب من نقطة التشغيل (النقطة ب في الشكل (٢-٤٩)) والتي تحقق تيار كلي يساوى ٣٥ ميلي أمبير .

$$r_f = \left. \frac{\partial V_F}{\partial I_F} \right|_B = \frac{0.7 - 0.6}{(42.5 - 27.5) \times 10^{-3}} = 6.6 \Omega$$

يجب ملاحظة الفرق بين (r_f) و (r_F) حيث تستخدم المقاومة (r_f) عند تشغيل الدايمود في تطبيقات الإشارات الصغيرة حول نقطة التشغيل بينما المقاومة (r_F) تستخدم للإشارات الكبيرة للجهد والتيار .



ويمكن إستنتاج قيم الذروة للتيار والجهد في الدائرة بالشكل (٢-٤٨ أ) على النحو

التالى:

$$I_m = \frac{E_m}{R + r_f} = \frac{0.05}{10 + 6.6} = 3 \text{ mA} \&$$

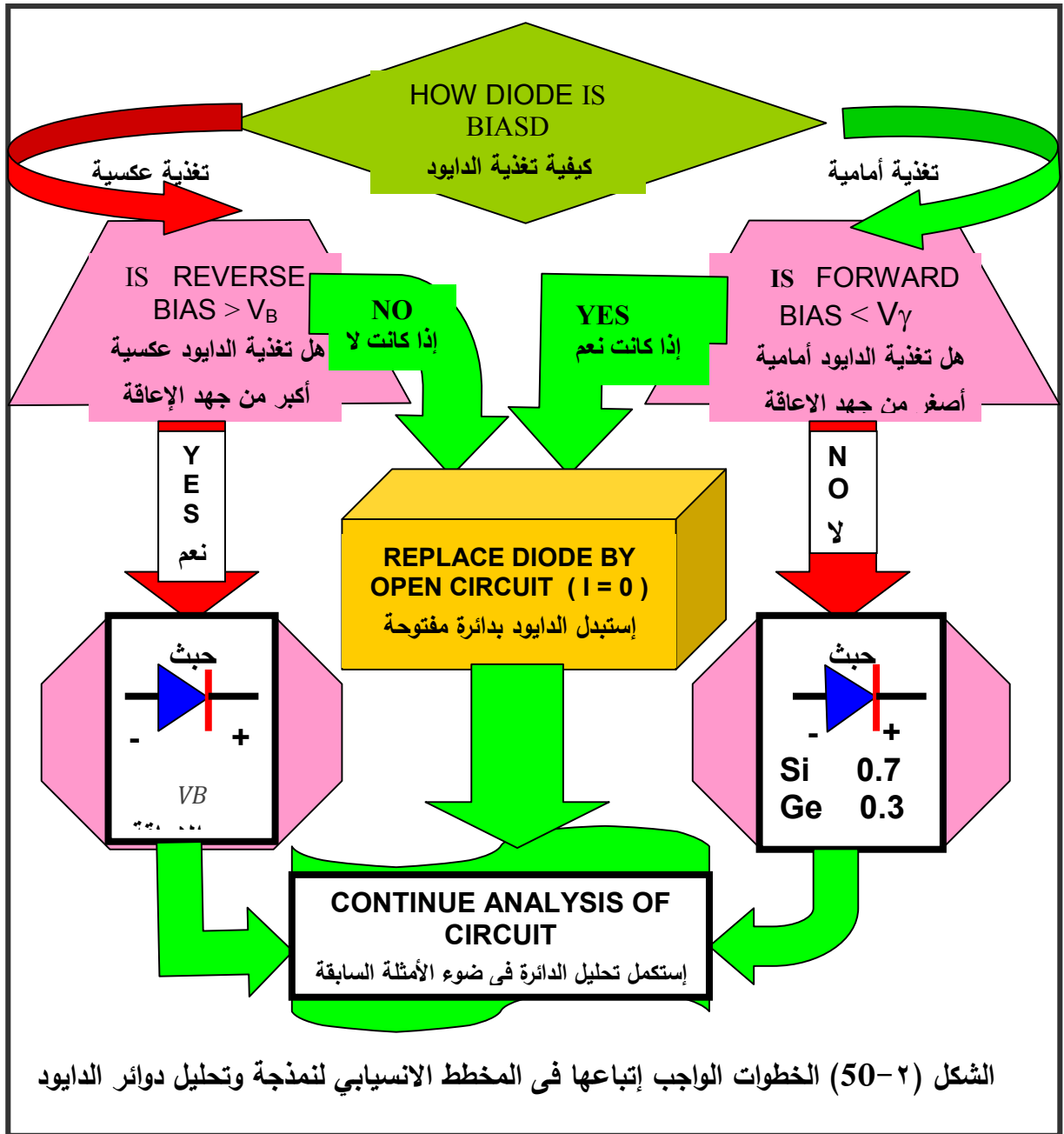
$$V_m = I_m r_f = 3 \times 10^{-3} \times 6.6 = 0.02 \text{ V}$$

$$r_f = \left. \frac{\partial V_F}{\partial I_F} \right|_B = \frac{0.7 - 0.6}{(42.5 - 27.5) \times 10^{-3}} = 6.6 \Omega$$

• ملخص لنمذجة وتحليل دوائر الدايمود

يمكن تلخيص الطريقة التقريبية لتحليل دائرة الدايمود في المخطط الإنسيابي بالشكل

(٢-٤٩) والذي يحتاج الى الدراسة ما سبق من أمثلة وتطبيقات بعناية .



الشكل (٢-50) الخطوات الواجب إتباعها في المخطط الإنسيابي لنمذجة وتحليل دوائر الدايمود

References for chapter one and two

1. ELECTRONIC DEVICES AND CIRCUIT.
(BOGART, MERRIL PUBLISHING COMPANY)
2. SOLID STATE ELECTRONIC CIRCUITS.
(MILLMAN & HALETTAS)
3. ELECTRONIC CIRCUIT, DISCRETE AND INTEGRATED.
(MENERA & SHILLING).
4. ELECTRONICS (EL- DOKANY, MENOUFIA UNIVERSITY)
5. SEMICONDUCTOR DEVICES AND APPLICATION (GREINER)
6. TRANSISTOR PHYSICS AND CIRCUIT DESIGN (D.C SARKER)
7. HAND BOOK OF SEMICONDUCTOR ELECTRONICS.
(LLOYD P HUNTER)
8. SOLID STATE ELECTRONICS (EDWIN R. JONES)
9. PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES (S.M. SZE)
10. SEMICONDUCTOR DEVICES
(EL- DOKANY, MENOUFIA UNIVERSITY)
11. SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY
(EL- DOKANY , MENOUFIA UNIVERSITY)
12. THE ART OF ELECTRONICS (HOROWITZ HILL)