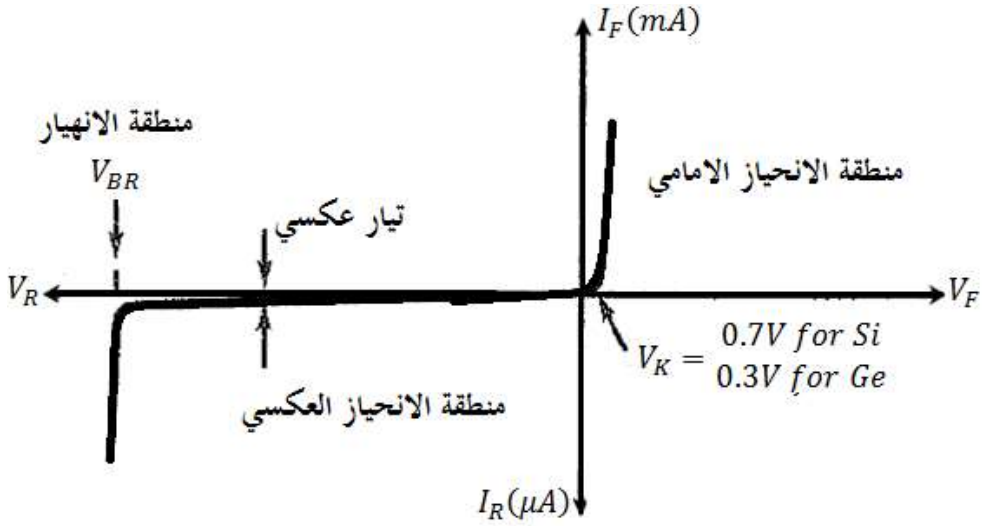


شكل (٢–١٨) منحنى الخواص للثنائي

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:

$$I_D = I_s(e^{\frac{V_D}{\eta V_{TH}}} - 1) \qquad (2-24)$$

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:

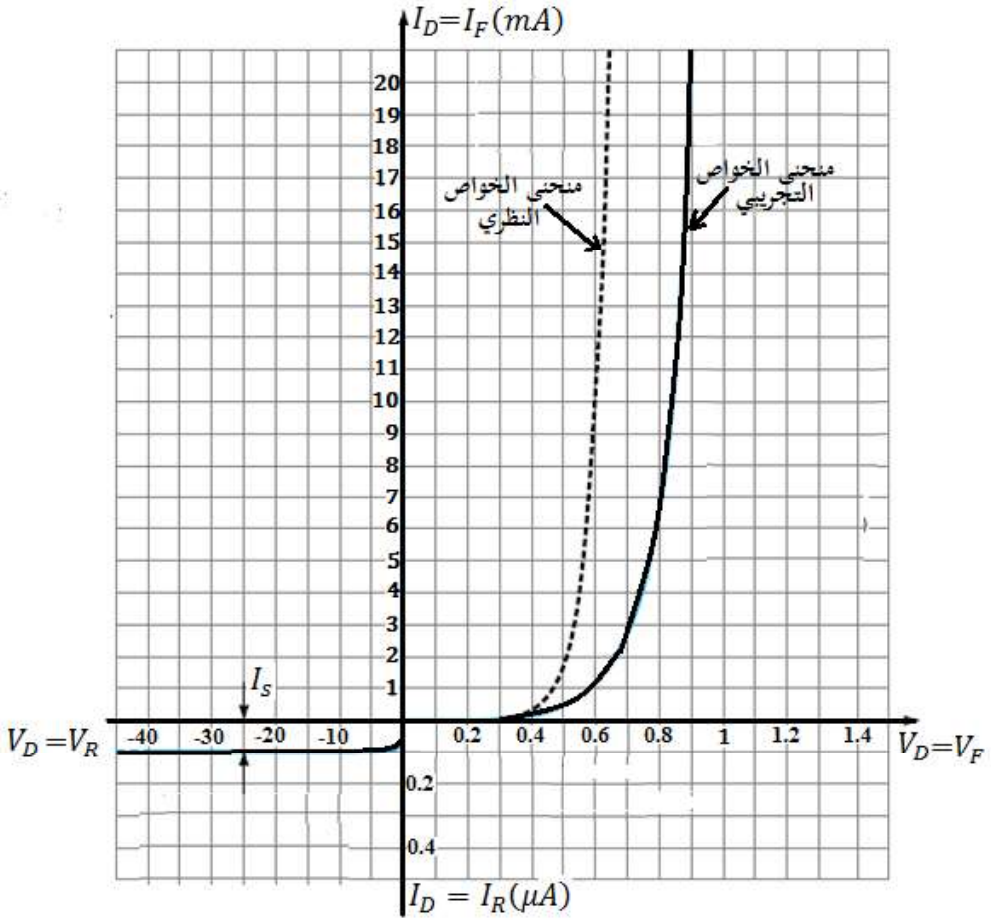
$$V_{TH} = \frac{KT}{q} \qquad (2-25)$$

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:

$$I_D = I_s(e^{\frac{11600V_D}{\eta T}} - 1) \qquad (2-26)$$

ان معادلة الثنائي هو وصف رياضي لمنحنى الخواص للثنائي، وهو يختلف قليلا عن منحنى الخواص التجريبي (الواقعي)، نلاحظ من الشكل (٢-١٩) ان منحنى الخواص المرسوم وفقاً لمعادلة الثنائي مزاح قليلاً إلى يسار منحنى الخواص الحقيقي ببضعة أعشار الفولت.



شكل (٢-١٩) 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.

مثال (٢-٣): ثنائي شبه موصل عند درجة حرارة الغرفة وله $(I_s = 10^{-14}A\,,\eta = 1)$، اوجد قيمة التيار المار في الثنائي عند تسليط فرق جهد مقداره: $1-V_D = 0.7V\ ,\ \ 2-V_D = -0.7V$

الحل:

$$I_D = I_s\left(e^{\frac{11600V_D}{\eta T}} - 1\right)$$

$$1-V_D = 0.7V$$

$$I_D = 10^{-14}\left(e^{\frac{11600}{1\times 300}(0.7)} - 1\right)$$

$$I_D = 5.69\times 10^{-3}A$$

$$2-V_D = -0.7V$$

$$I_D = 10^{-14}\left(e^{\frac{11600}{1\times 300}(-0.7)} - 1\right)$$

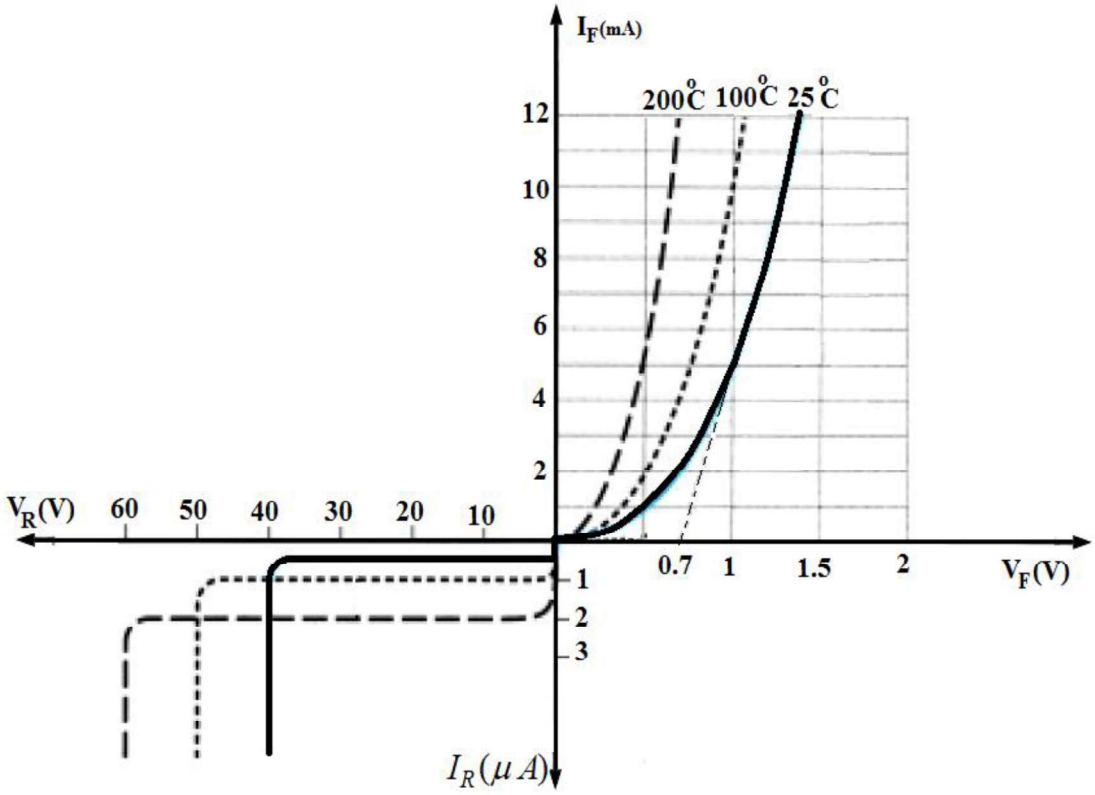
$$I_D \cong 10^{-14}A$$

٧.٢ تأثير درجة الحرارة على خواص ثنائي أشباه الموصلات

الشكل (٢-٢٠) 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:

$$\Delta V_B = -0.002\Delta T \qquad (2-27)$$

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



شكل (٢–٢٠) 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:

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

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

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

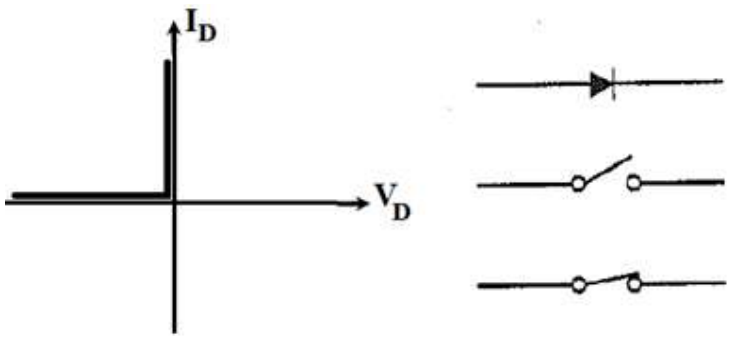
٨.٢ الدائرة المكافئة لثنائي أشباه الموصلات

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

في حالة ثنائي أشباه الموصلات هناك ثلاث تقريبات أساسية 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 (٢-٢١).

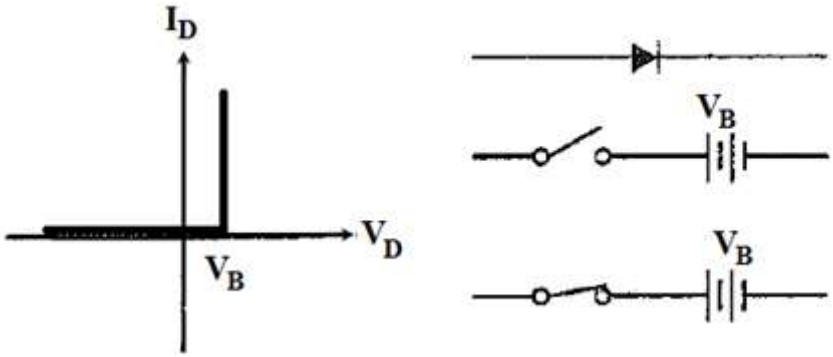


شكل (٢-٢١) التقريب الأول لثنائي أشباه الموصلات

ان التقريب المثالي (التقريب الأول) له أهمية كبيرة لأنه يبسط دوائر الثنائي، غير انه لا يصلح في جميع الحالات (فالثنائي الواقعي أو العملي يختلف عن الثنائي المثالي) ولهذا نحتاج إلى أنواع أخرى 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 (٢-٢٢).



شكل (٢-٢٢) التقريب الثاني لثنائي أشباه الموصلات

حسب هذا التقريب فان الثنائي في الانحياز الأمامي سوف لن يمرر التيار إلا 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.

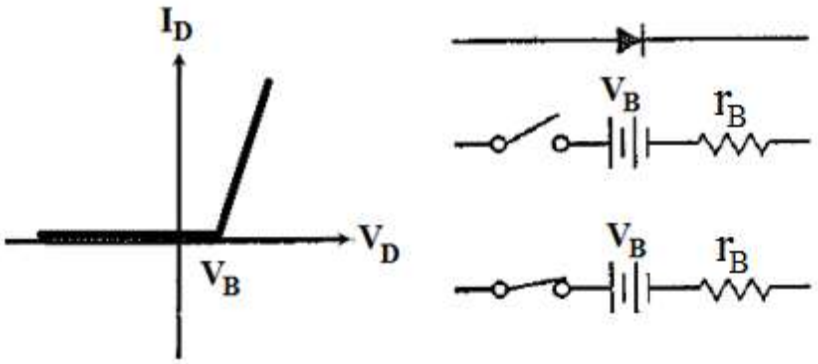
٣.٨.٢ التقريب الثالث

في هذا التقريب يتم الأخذ بنظر الاعتبار تأثير المقاومة الإجمالية (r_B) في حالة الانحياز الأمامي، فبالرغم من ان للثنائي مقاومة أمامية صغيرة الا انها ليست كدائرة مغلقة، وبمرور التيار عبر الثنائي يتولد على طرفي المقاومة الإجمالية 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).

$$V_D = V_B + I_F r_B \qquad (2-28)$$

الشكل (٢-٢٣) يوضح دائرة التقريب الثالث.

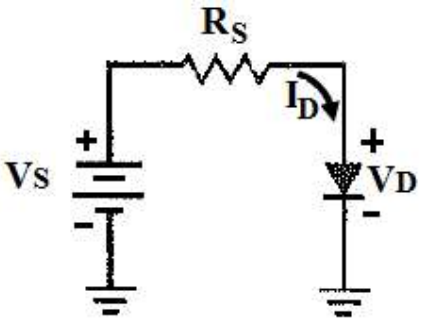


شكل (٢-٢٣) التقريب الثالث لثنائي أشباه الموصلات

٩.٢ خط الحمل ونقطة العمل Load Line and Operating Point

ان خط الحمل هي أداة 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 الأكبر 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 أولا إيجاد 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 أي 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:

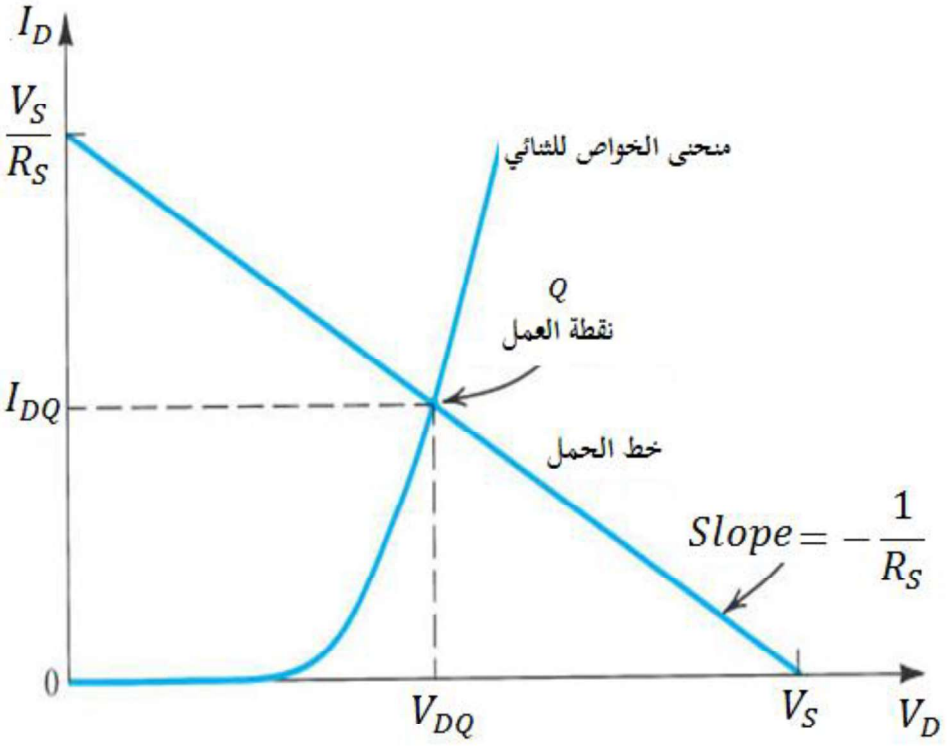
$$V_S - I_D R_S - V_D = 0$$

$$I_D = \frac{V_S - V_D}{R_S} \qquad (2-28)$$

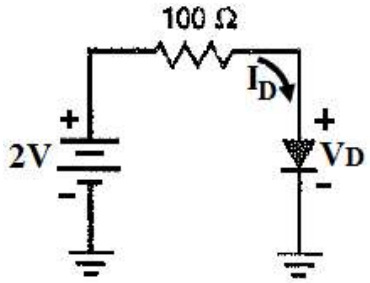
المعادلة الأخيرة تمثل معادلة خط الحمل.

ولرسم خط الحمل لابد من معرفة إحداثيات نقطتان على الأقل تنتميان له وهي تكون عادة نقطتي التقاطع مع المحاور (محور التيار ومحور الفولتية)، والتي يمكن إيجادها من معادلة خط الحمل، فلإيجاد نقطة التقاطع مع محور التيار نعوض $(V_D = 0)$ ومنه نجد احداثي التقاطع مع محور التيار والذي يكون $(V_S/R_S, 0)$، ولإيجاد التقاطع مع محور الجهد نعوض $(I_D = 0)$ في معادلة خط الحمل فنحصل على

احداثي نقطة التقاطع $(0, V_S)$، ومن تحديد نقطتي التقاطع يمكننا رسم خط الحمل وكما هو موضح بالشكل (٢-٢٤)، اما إحداثيات نقطة العمل فتمثل احداثي نقطة تقاطع خط الحمل مع منحنى الخواص للثنائي والذي يكون من الصفات المميزة له بصرف النظر عن الدائرة التي يعمل فيها.



شكل (٢-٢٤) خط الحمل ونقطة العمل للثنائي



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

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

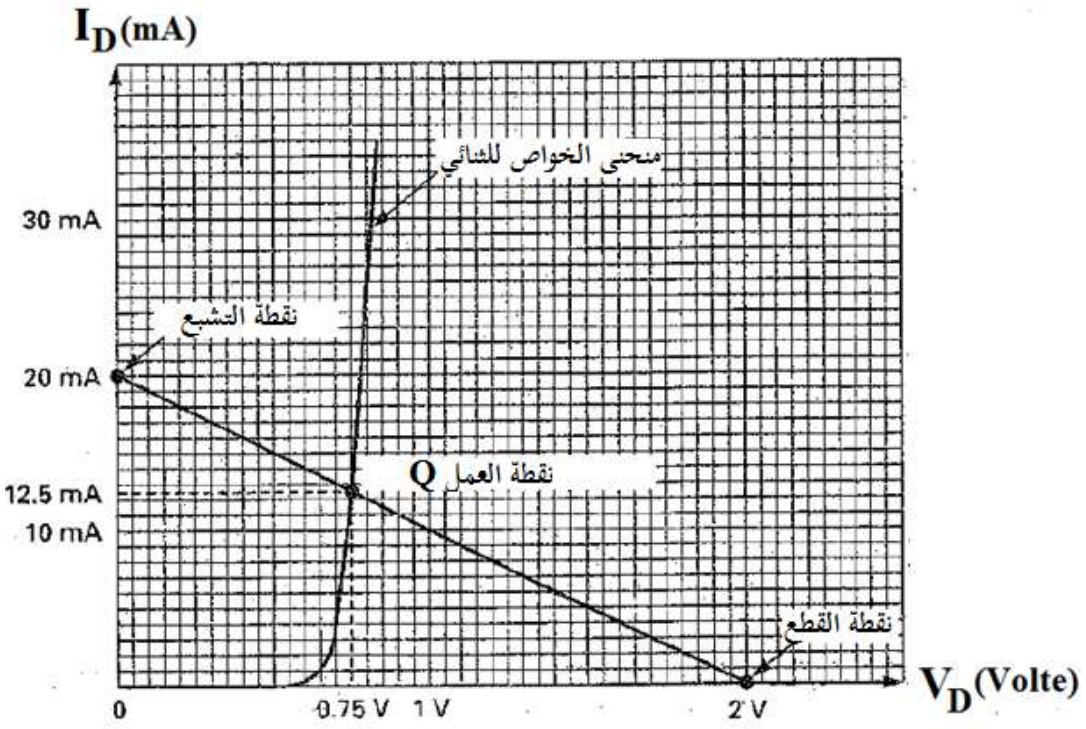
المعادلة السابقة تمثل معادلة خط مستقيم، ولرسمها نجد نقطتي تقاطع الخط مع المحاور وكما يلي:

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

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

$(b)\ for\ I_D = 0, V_D = 2V,$ (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 كما هو موضح بالشكل (٢-٢٥)، وتمثل نقطة تقاطع خط الحمل مع منحنى الخواص احداثي نقطة العمل وبأنزال المساقط على المحورين نجد ان احداثي نقطة العمل في هذه الحالة هي (V_D=0.75V, I_D=12.5mA).



شكل (٢-٢٥) خط الحمل ونقطة العمل لثنائي أشباه الموصلات المصنوع من السليكون

أسئلة الفصل الثاني

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

س٢: علل: 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: 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)؟

س٥: 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)؟

س٦: احسب قيمة جهد الحاجز لوصلة شبه موصل مصنوعة من مادة السليكون عند درجة حرارة الغرفة ، علماً بان تركيز حاملات الشحنة كانت ($N_a=N_d=10^{16}cm^{-3}$) ، ($n_i=1.45X10^{10}cm^{-3}$).

س٧: باستعمال معادلة الثنائي أوجد التيار المار عند درجة حرارة (20^oC) في ثنائي شبه موصل مصنوع من السليكون له ($6 \times 10^{-13}A$) عند فولتية تحييز أمامية (0.6V).

س٨: 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.

س٩: ثنائي شبه موصل عند درجة حرارة الغرفة وله ($I_s = 10^{-14}A\ ,\eta = 1$)، اوجد قيمة التيار المار في الثنائي عند تسليط فرق جهد مقداره: $1-V_D = 0.5V$, $2-V_D = -0.4V$

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 ($r_B=2\Omega$).