

بسم الله الرحمن الرحيم

مَكْتَبُ اسْمَاءِ الْعَشِيِّ

مقالة في

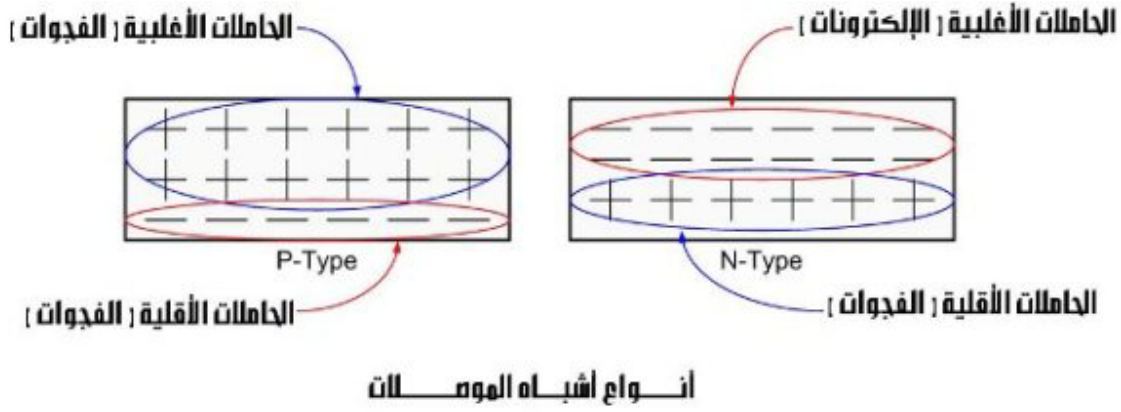
مقدمة عن أشباه الموصلات Introduction to Semiconductors

أسامة عمر مسعود العشّي

الجميل - ليبيا

حقوق النشر غير محفوظة

الثنائيات The Diodes

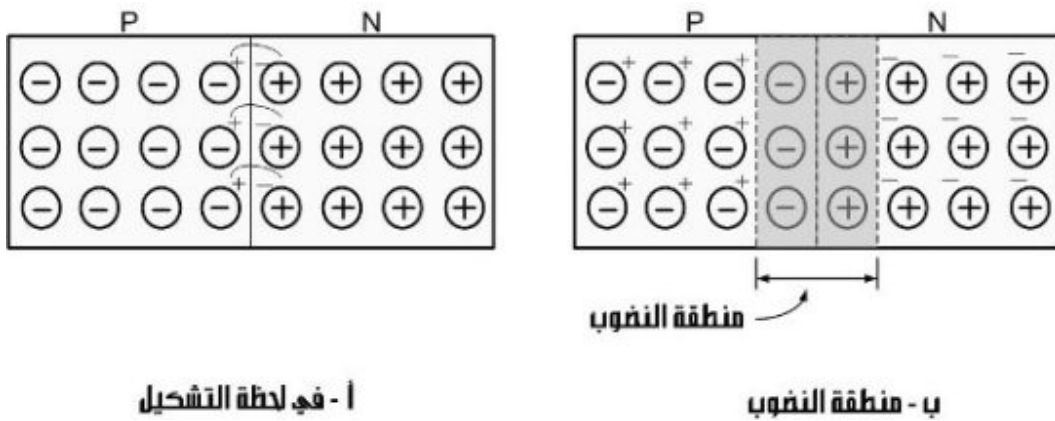


الشكل (1-1)

هناك نوعان رئيسيان من أشباه الموصلات يمكن تحديدها بواسطة عملية إضافة الشوائب إلى السليكون النقي Doping وهما :

- 1- P-type : وفي هذا النوع فإن حاملات الشحنات الأكثرية هي الفجوات كما موضحة في الشكل (1-1).
- 2- N-type : وفي هذا النوع فإن حاملات الشحنات الأكثرية هي الإلكترونات ، وحاملات الشحنات الأقلية هي الفجوات كما موضحة أيضاً بالشكل (1-1) .

منطقة النضوب Depletion Layer



أ - لحظة التشكيل

ب - منطقة النضوب

في حالة دمج طبقتين من أشباه الموصلات (طبقة P مع طبقة N) فينتج عن هذه العملية إعادة ارتباط الإلكترونات القريبة من الحاجز في طبقة N مع الفجوات القريبة من الحاجز في طبقة P ، وتدعى هذه العملية بإعادة الارتباط Recombination .

وسوف ينشأ عن هذه العملية أيونات موجبة في المنطقة القريبة من الحاجز من جهة N ، وأيونات سالبة في المنطقة القريبة من الحاجز في منطقة P . أي سوف تنشأ منطقة خالية من الإلكترونات الحرة أو الفجوات قريبة من الحاجز تدعى بمنطقة النضوب Depletion Layer . إن عمق منطقة النضوب يمتد أكثر باتجاه المنطقة ذات التطعيم أو الشوائب الأقل .

جهد الإعاقة Barrier Potential

$$\begin{aligned} (0.7V) &\longrightarrow (Si) \\ (0.34V) &\longrightarrow (Ge) \end{aligned}$$

بسبب وجود الأيونات في منطقة النضوب فإنها ستمتلك قوة إعاقة بالنسبة للإلكترونات الحرة التي تحاول الانتقال عبر منطقة النضوب من طبقة N إلى طبقة P . وأن قوة الإعاقة هذه تمثل بجهد يسمى جهد الإعاقة ، وأن قيمة هذا الجهد تساوي 0.7 فولت بالنسبة للثنائي المصنوع من مادة السليكون Si ، و 0.3 فولت بالنسبة للثنائي المصنوع من مادة الجرمانيوم Ge . ويرمز لهذا الجهد بالرمز V_0 ، وأن قيمته تحسب من المعادلة التالية :

$$V_0 = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{ni^2} \right)$$

K : Boltsman constant = 1.38×10^{-23} j/k

T : Temperature in Kelvin , $K = 273 + C^\circ$

q : Electron charge = 1.6×10^{-19} C

N_A : Acceptor doping density

N_D : Donor doping density

ni : intrinsic carrier concentration

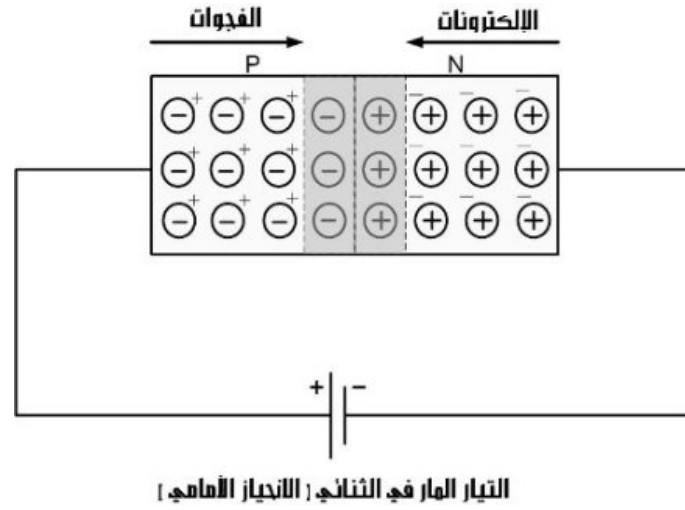
كذلك فإن : V_t (Thermal voltage) = kt/q

وهي تتراوح بين (25mV – 40mV) ، وتساوي تقريباً 25.8 ملي فولت عند درجة حرارة الغرفة $300K^\circ$.

ملاحظة : إن قيمة جهد الإعاقة تعتمد على ثلاثة متغيرات هي :

- 1- مستوى التطعيم في الطبقتين P-N (نسبة الشوائب) .
- 2- نوع شبه الموصل Si أو Ge .
- 3- درجة الحرارة .

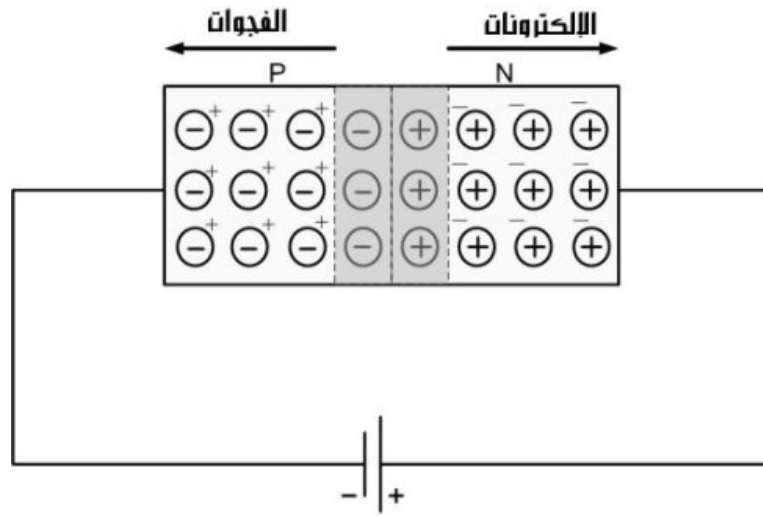
الانحياز الأمامي والانحياز العكسي Forward and Reversed bias



الشكل (3-1)

1- الانحياز الأمامي Forward bias

عند ربط مصدر جهد على طرفي وصلة P-N كما موضحة بالشكل (1-3) فإن الفجوات التي تمثل حاملات الشحنات الأكثرية في الطبقة P سوف تتحرك مبتعدة عن الطرف الموجب ، كذلك فإن الإلكترونات الحرة التي تمثل حاملات الشحنات الأكثرية سوف تتحرك مبتعدة عن الطرف السالب للمصدر . هذا يعني أن حاملات الشحنات الأكثرية (الفجوات والإلكترونات الحرة سوف تتحرك باتجاه الحاجز) ، وفي حالة تسليط جهد (V) أكبر من جهد الإعاقة فإن هذا يعني أن الإلكترونات سوف تعبر الحاجز نتيجة تغلبها على جهد الإعاقة ، وينتج عن ذلك مرور تيار كهربائي تعتمد قيمته على قيمة جهد الوصلة .

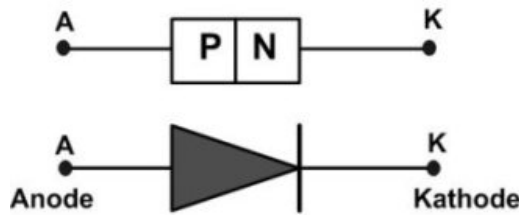


التيار المار في الثنائي [الانحياز العكسي]

الشكل (1-4)

الشكل (1-4) يوضح طريقة ربط المصدر عبر طرفي P-N في حالة الانحياز العكسي . يتضح من هذا الشكل أن حاملات الشحنات الأكثرية في طبقة P هي الفجوات التي سوف تتحرك باتجاه الطرف السالب للمصدر (أي مبتعدة عن الحاجز) . كذلك فإن حاملات الشحنات الأكثرية في طبقة N وهي الإلكترونات سوف تتحرك باتجاه الطرف الموجب للمصدر ، أي مبتعدة عن الحاجز . هذا يعني أن حاملات الشحنات سواء كانت الفجوات أو الإلكترونات سوف لن تعبر الحاجز وينتج عن ذلك عدم مرور تيار كهربائي . بسبب وجود حاملات الشحنات الأقلية والتي تمثل الإلكترونات في طبقة P والفجوات في طبقة N فإن هذه الشحنات الأقلية سوف تتحرك باتجاه الحاجز وينتج عن عبورها الحاجز مرور تيار كهربائي صغير جداً يسمى بتيار الانحياز العكسي .

خصائص الثنائي The diode characteristics

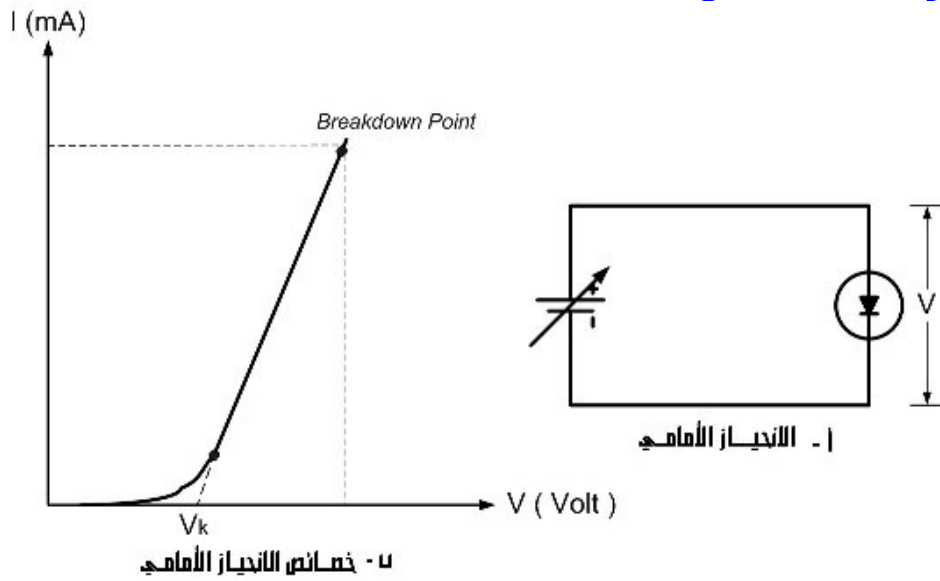


الرمز التخطيطي للثنائي

الشكل (5-1)

الشكل (5-1) يمثل رمز الثنائي ، حيث أن طبقة P تُربط إلى طرف يسمى Anode ، ويرمز له بالرمز A ، وطبقة N تُربط إلى الكاثود ، ويرمز له بالرمز K .

6-1 فولتية العتبة Knee Voltage

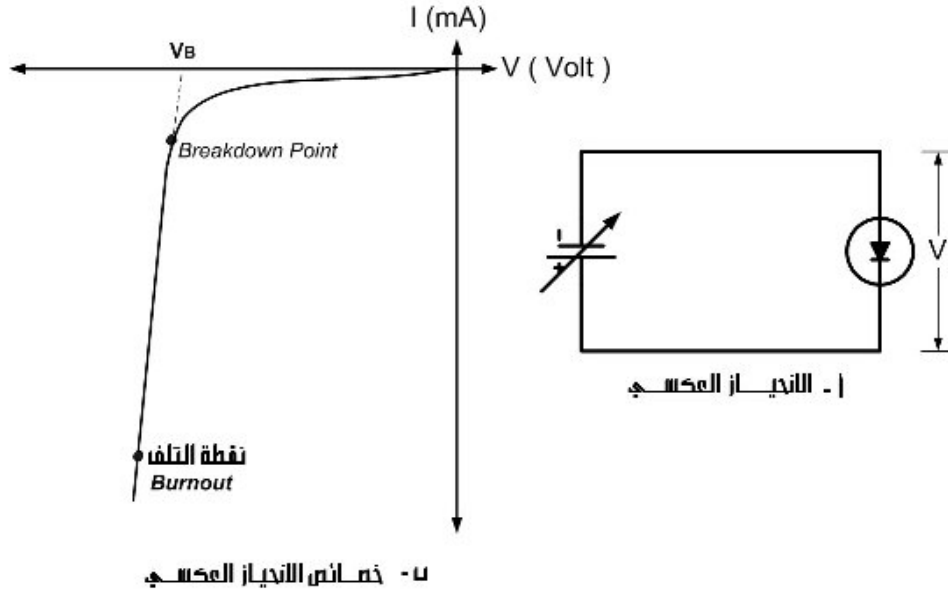


الشكل (6-1)

إن الدائرة (6-1-أ) تمثل دائرة ثنائي يشتغل في حالة انحياز أمامي، وبالنسبة لهذا الدايود عندما يكون جهد المصدر أصغر من جهد الإعاقة فإن الإلكترونات التي تعبر الحاجز تكاد تكون معدومة ، لذلك يعتبر التيار في هذه الحالة صغير جداً . وعندما نبدأ بزيادة جهد المصدر بحيث يكون مساوياً لجهد الإعاقة أو أكبر قليلاً فسوف نلاحظ أن الإلكترونات ستعبر الحاجز بكميات كبيرة ، وينتج عن ذلك مرور تيار كهربائي عالي. إن الجهد الذي يتغلب على جهد الإعاقة (يكون مساوياً أو أكبر من جهد الإعاقة) ويتسبب في مرور تيار كهربائي عالي في حالة الانحياز الأمامي يسمى بجهد العتبة Knee Voltage .

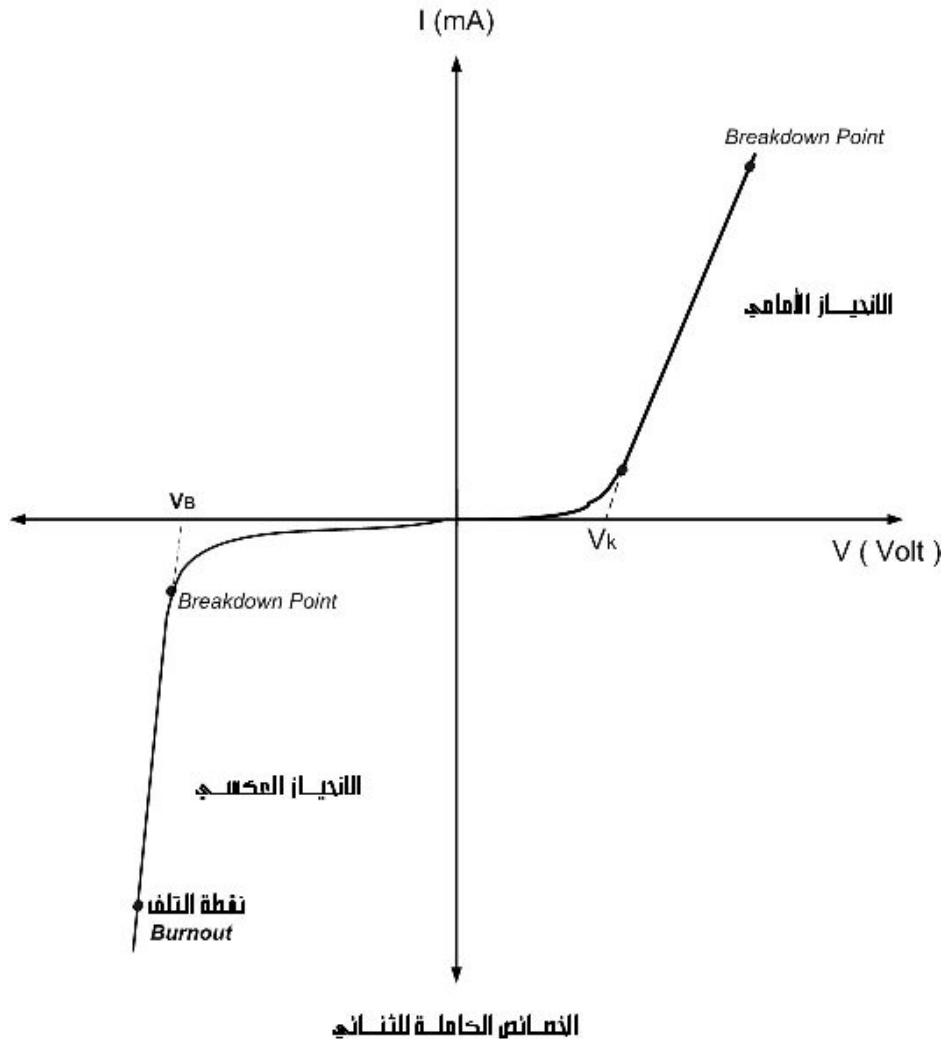
ملاحظة : يجب تجنب الزيادة الغير طبيعية في جهد المصدر وبعد جهد العتبة وذلك لتجنب مرور تيار عالي جداً خلال الثنائي والذي ينتج عنه تحطم الثنائي .

7-1 فولتية الانهيار Breakdown Voltage



الشكل (7-1)

الشكل (7-1 أ) يبين ربط الثنائي في حالة الانحياز العكسي، وكما نعرف فإنه في حالة الانحياز العكسي سوف لن يعبر أيًا من حاملات الشحنات الحاجز الوسطي وإنما الذي يعبر الحاجز هو فقط حاملات الشحنات الأقلية، وبما أن عدد حاملات الشحنات الأقلية يكون صغير جداً لذلك فالتيار العكسي في هذه الحالة يكون صغير جداً أيضاً . وعند زيادة الجهد العكسي المسلط على الثنائي سوف يؤدي ذلك إلى الوصول إلى حالة تحطم في الأواصر في التركيب البلوري، وينتج عن ذلك تحرر عدد كبير جداً من الإلكترونات والذي ينتج عنه مرور تيار عكسي عالي جداً استمراره يؤدي إلى تلف الثنائي . إن الجهد المسلط على طرفي الثنائي والذي ينتج عنه مرور تيار عكسي عالي جداً يسمى بجهد الانهيار Breakdown Voltage . بعد معرفة خصائص الثنائي في حالة الانحياز الأمامي أو العكسي فإن الخصائص الكاملة للثنائي موضحة في الشكل (8-1) .



الشكل (8-1)

إن المعادلة التي تحمل العلاقة بين التيار في الثنائي والجهد المسلط بين طرفيه هي كالتالي :

$$I_D = I_S (e^{V_D / V_T} - 1)$$

I_S : Reverse saturation current

I_D : Diode current

V_D : Diode voltage

V_T : Thermal voltage

إن المقصود بالتيار I_S هو التيار العكسي الناتج عن عبور حاملات الشحنات الأقلية للحاجز .

ملاحظة :

إذا كانت V_D تزداد بالسالب

$$\frac{V_D}{V_T} \rightarrow 0$$

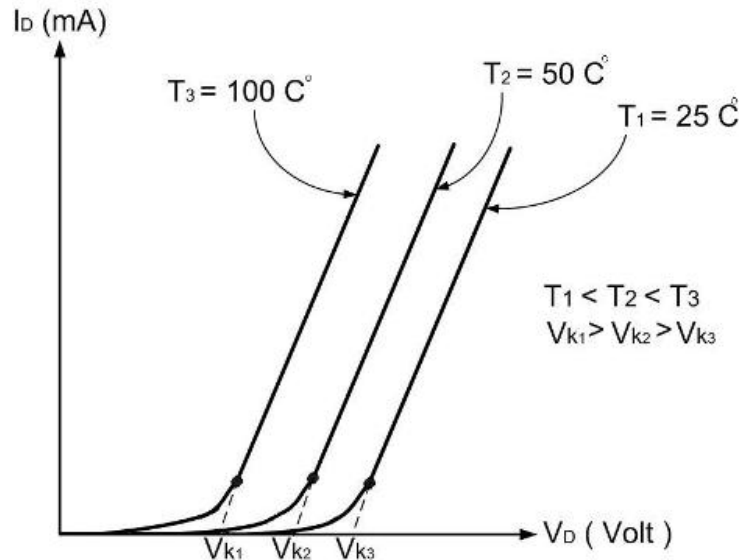
فهذا يعني أن :

$$I_D = - I_S$$

3-2 ملاحظات حول عمل الثنائي :-

$$V_0 = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{ni^2} \right)$$

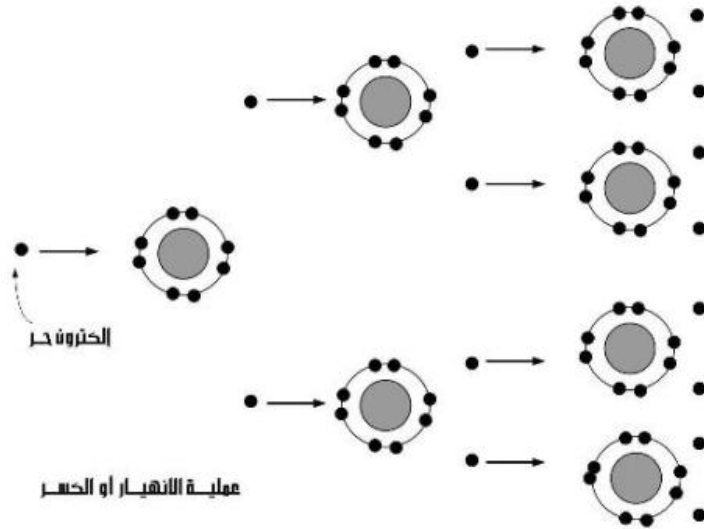
عند ارتفاع درجة الحرارة فإن البسط سوف يزداد ، ولكن بالمقابل فإن ارتفاع درجة الحرارة سوف يزيد من حاملات الشحنات في السيليكون النقي (ni) وهذا يعني أن المقام سوف يزداد بنسبة (ni^2) ، وبالنتيجة فإن الزيادة في المقام سوف تكون أكبر من الزيادة في البسط عند ارتفاع درجة الحرارة . وبالتالي فإن ارتفاع درجة الحرارة سيقول من الجهد المسلط على الثنائي . عملياً فإن جهد الإعاقة يقل بمقدار 2mV لكل زيادة درجة مئوية واحدة في درجات الحرارة ، والشكل (9-1) يوضح هذه الحقيقة .



تأثير درجة الحرارة على جهد العتبة (V_k)

الشكل (9-1)

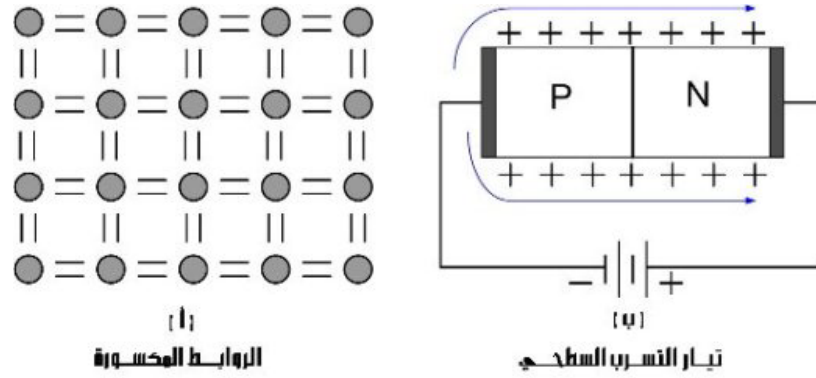
2- لحظة الكسر Avalanching



الشكل (10-1)

في حالة الانحياز العكسي فإن التيار المار في الثنائي يكون صغير جداً وناتج عن عبور حاملات الشحنات الأقلية ، ولكن زيادة الجهد العكسي المسلط على الدايمود ينتج عن هذه العملية اكتساب الإلكترونات الأقلية سرعة عالية جداً ونتيجة اصطدام كل إلكترون من هذه الإلكترونات ببلورة ضمن التركيب البلوري فسوف يحرر إلكترون آخر ، وأن الإلكترونين الجديدين سوف يكسبان نفس السرعة . وباصطدام كل واحد من هذين الإلكترونين ببلورة سوف يحرر إلكترون آخر . ونتيجة لذلك فإن كل إلكترون من حاملات الشحنات الأقلية سوف يحرر عدداً هائلاً من الإلكترونات ضمن التركيب البلوري ، أي مرور تيار عكسي عالي جداً يؤدي إلى تلف الثنائي ، هذه العملية تسمى بظاهرة الكسر أو الانهيار Avalanching كما موضحة بالشكل (10-1) .

3- تيار التسرب السطحي Surface leakage current



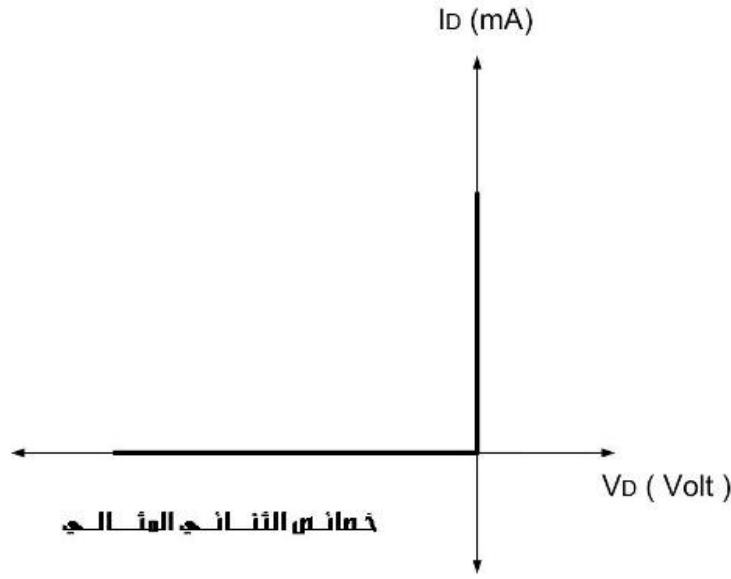
الشكل (11-1)

نتيجة قطع قطعة شبه موصل إلى قطع صغيرة فإن هذه القطع الصغيرة المراد صنع الدايود منها سوف تفقد الإلكترونات الموجودة على السطح ضمن التركيب البلوري ، بمعنى أن السطح سوف يكون مشحون بشحنات موجبة كما موضح بالشكل (11-1) ب . إن وجود هذه الشحنات الموجبة على السطح سوف يسهل من انتقال الإلكترونات من الطرف السالب إلى المصدر عبر سطح الثنائي إلى الطرف الآخر، وهذا يعني أن هناك تيار صغير سوف يمر عبر الثنائي من خلال السطح . هذا التيار يسمى بتيار التسرب السطحي Surface leakage current .

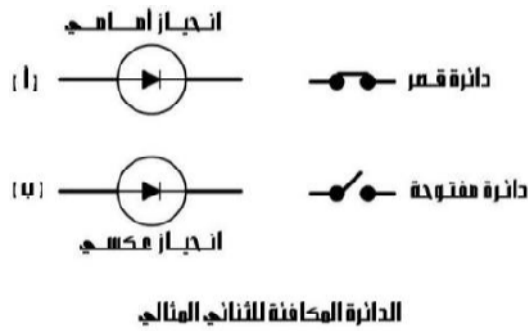
إذاً في حالة الانحياز العكسي هناك تياران يمران من خلال الثنائي، الأول هو التيار الناتج من حاملات الشحنات الأقلية للوصلة أو الحاجز، والثاني هو تيار التسرب السطحي .

9-1 الثنائي المثالي والثنائي العملي Ideal and Practical diodes

1- الثنائي المثالي Ideal diode



الشكل (1-12)



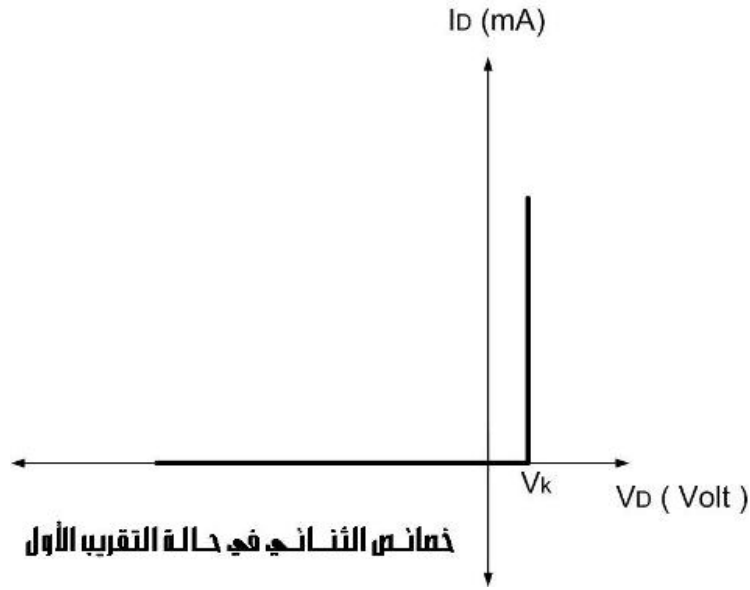
الشكل (1-13)

- بالنسبة للثنائي المثالي يمكن تمييز حالتين :
- أولاً : في حالة الانحياز الأمامي نعتبر أن V_k يساوي صفراً ($V_k = 0$) . وهذا يعني أن الثنائي سيتحول إلى حالة ON عند جهد يساوي صفر .
 - ثانياً : في حالة الانحياز العكسي نعتبر أن التيار العكسي يساوي صفر مع استمرار زيادة الجهد العكسي .

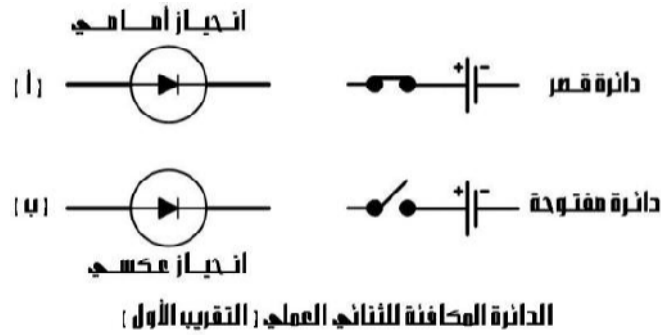
والشكل (12-1) يوضح خصائص الثنائي المثالي . نستنتج من ذلك بأنه في حالة الانحياز العكسي يمكن اعتبار مقاومة الثنائي تساوي ما لا نهاية ، أي يمكن الاستعاضة عن الثنائي بمفتاح مفتوح . هذا يعني أنه بالتحكم في الجهد المسلط على طرفي الثنائي يمكن استخدام الثنائي كمفتاح تلقائي Automatic switch .

2- الثنائي العملي Practical diode

أ – التقريب الأول .



الشكل (14-1)



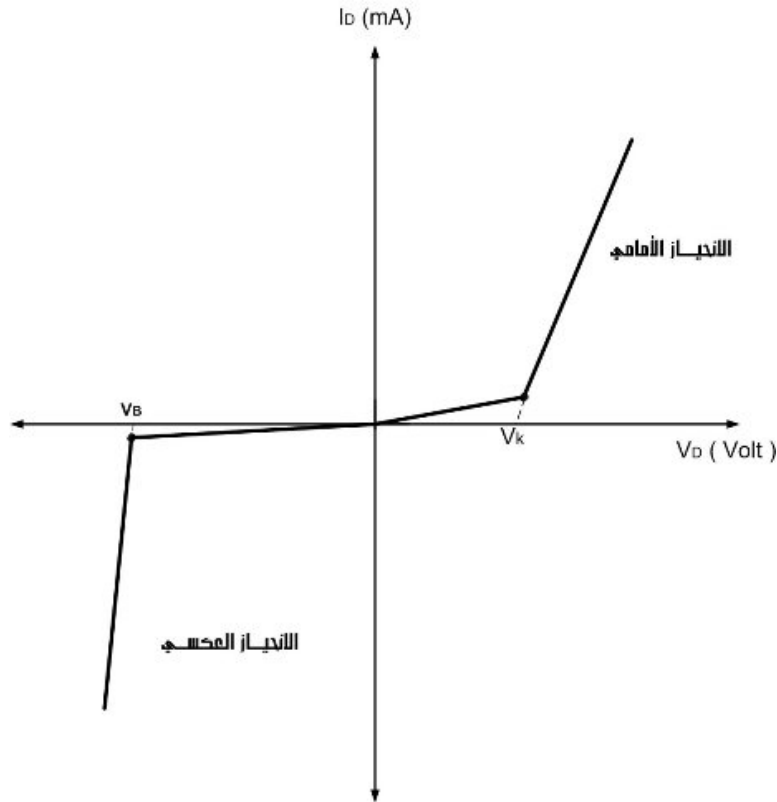
شكل (15 - 1)

التقريب الأول : في هذه الحالة نفترض أولاً : أنه في حالة الانحياز الأمامي أن تيار الثنائي يزداد زيادة سريعة عندما يكون الجهد المسلط على طرفيه يساوي V_k كما موضح بالشكل (15-1) أ .

ثانياً : في حالة الانحياز العكسي فإن التيار العكسي يبقى مساوياً للصفر، وهنا يمكن اعتبار الثنائي في هذه الحالة كمفتاح مفتوح Open switch ومربوط على التوالي مع مصدر جهد قيمته V_k كما موضح بالشكل (15-1) ب .

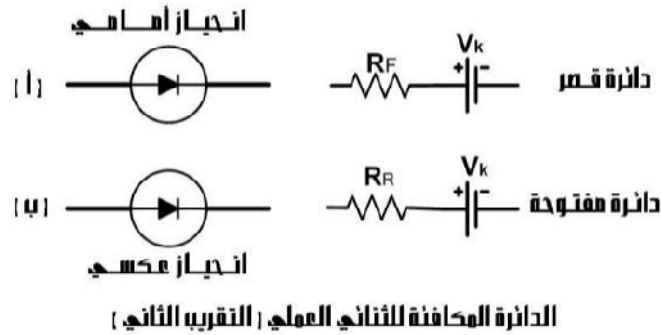
إن خصائص التقريب الأول في الثنائي العملي موضحة في الشكل (14-).

ب - التقريب الثاني



خصائص الثنائي العازل (التقريب الثاني)

الشكل (16-1)



الشكل (17-1)

في حالة التقريب الثاني يمكن تمييز دائرتين للثنائي .
 أولاً في حالة الانحياز الأمامي : تلاحظ أن هناك تغير في الجهد أو زيادة صغيرة في الجهد مقابل زيادة كبيرة في التيار عندما تصل إلى جهد العتبة V_k ، لذلك في هذه الحالة يمكن اعتبار الثنائي عبارة عن مصدر جهد قيمته V_k مربوط على التوالي مع مقاومة صغيرة وهي مقاومة الدايمود في حالة الانحياز الأمامي، ويرمز لها بالرمز R_F ، حيث :

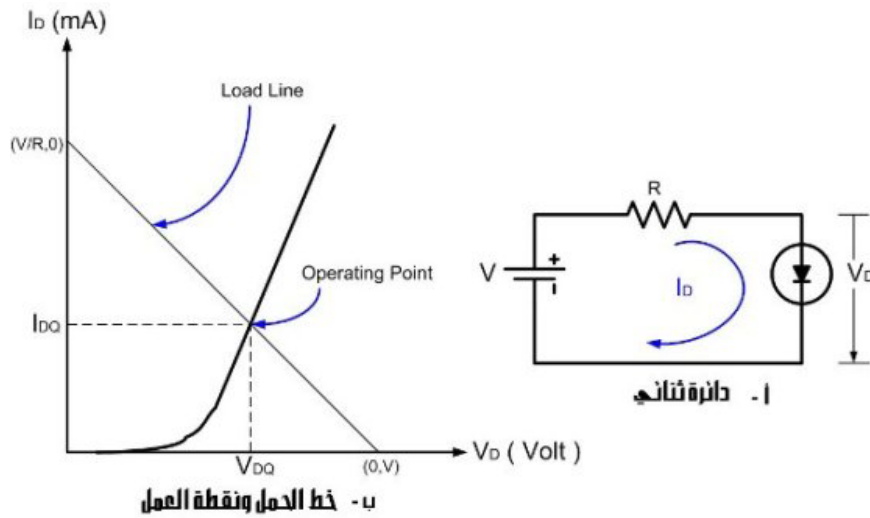
$$R_F = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{\text{كمية صغيرة}}{\text{كمية كبيرة}} = \text{مقاومة صغيرة}$$

كما موضح بالشكل (17-1) أ فإن قيمة المقاومة R_F لا تتجاوز عدة أومات . أما في حالة الانحياز العكسي نلاحظ أن هناك زيادة صغيرة بالتيار مقابل زيادة كبيرة في جهد الانحياز العكسي ، لذلك يمكن تمثيل الثنائي في هذه الحالة بمصدر جهد قيمته V_k مربوط على التوالي مع مقاومة R_F ، وهي مقاومة الثنائي في حالة الانحياز العكسي . وأن قيمة هذه المقاومة تكون عالية جداً ، أي بالميجا أوم ، حيث :

$$R_R = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{\text{كمية كبيرة}}{\text{كمية صغيرة}} = \text{كمية كبيرة جداً}$$

كما موضح بالشكل (17-1) ب فإن خصائص الثنائي العملي في حالة التقريب الثنائي موضحة بالشكل (16-1) .

10-1 خط الحمل load line ونقطة العمل The operating point



الشكل (18-1)

لمعرفة قيمة التيار الذي يمر في الثنائي في حالة الانحياز الأمامي ، والجهد على طرفي الثنائي فلنتبع الخطوات التالية :

أولاً : نكتب معادلة الحلقة الكهربائية التي تحتوي على الثنائي . وبالنسبة للدائرة الموضحة في الشكل (18-1) أ فإن معادلة هذه الحلقة هي :

$$+ V - I_D R - V_D = 0$$

وهذه المعادلة تمثل معادلة خط الحمل بالثنائي .

ثانياً : إن هذه المعادلة عبارة عن معادلة خط مستقيم . ولرسم هذا الخط المستقيم فلنتبع الخطوات التالية :

1- When $V_D = 0$

$$V - I_D = 0$$

$$I_D = V / R$$

إحداثيات النقطة الأولى $(V/R, 0)$

2- When $I_D = 0$

$$V_D = V$$

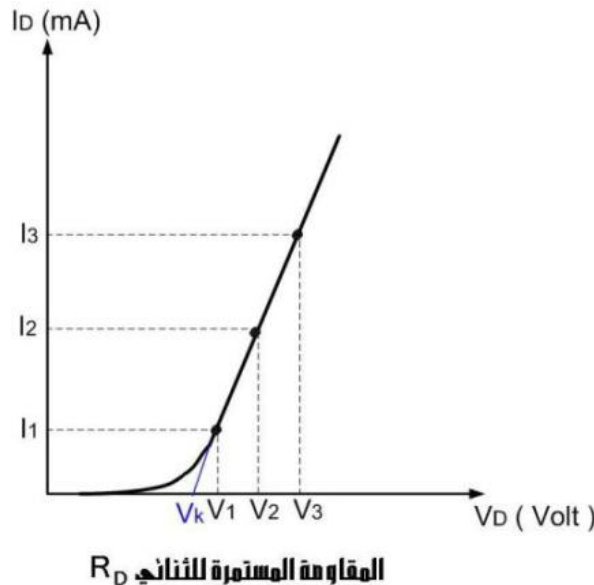
إحداثيات النقطة الثانية $(0, V)$

بعد تحديد النقطتين نصل بينهما بخط مستقيم . هذا الخط المستقيم يسمى بخط الحمل .
ثالثاً : لتحديد نقطة العمل ستلاحظ أن خط الحمل يتقاطع مع منحنى الخواص في نقطة ، هذه النقطة تمثل نقطة العمل Operating Point للثنائي .

رابعاً : بعد تحديد نقطة العمل يمكننا معرفة التيار الذي يمر في الثنائي وذلك برسم خط عمودي على محور التيار يمثل قيمة التيار المار في الثنائي عند نقطة العمل I_{DQ} .
وأيضاً برسم خط مستقيم من نقطة العمل عمودي على محور الجهد ، عندها ستحصل على الجهد بين طرفي الثنائي عند نقطة العمل V_{DQ} .

11-1 مقاومة التيار المستمر والتيار المتناوب للثنائي

1- مقاومة التيار المستمر DC Resistance



الشكل (1 - 19)

المقصود بمقاومة التيار المستمر للثنائي هي مقاومة الثنائي الناتجة من التيار المستمر المار في الثنائي والجهد المستمر المسلط على الثنائي ، وبتطبيق قانون أوم فإن مقاومة التيار المستمر R_D وحسب قانون أوم :

$$R_D = V_D / I_D$$

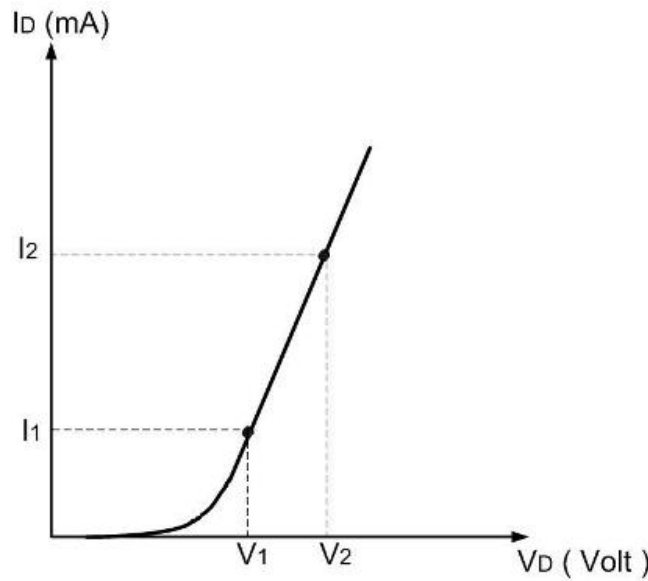
$$R_{D1} = V_1 / I_1$$

$$R_{D2} = V_2 / I_2$$

$$R_{D3} = V_3 / I_3$$

ونلاحظ من المعادلات أعلاه بأن قيمة المقاومة المستمرة تعتمد على موضع نقطة العمل، بحيث أن زيادة الجهد المسلط على الثنائي بكميات صغيرة ينتج عنه زيادة كبيرة في التيار المار من خلال الثنائي، وهذا يعني أن : $R_{D1} > R_{D2} > R_{D3}$.
ملاحظة : تستخدم الحروف الكبيرة لرمز المقاومة المستمرة للثنائي لتمييزها عن المقاومة المتناوبة .

2 - مقاومة التيار المتناوب AC Resistance



حساب مقاومة التيار المتناوب للثنائي r_D

الشكل (1 - 20)

أحياناً نحتاج على تسليط جهد متناوب على طرفي الثنائي، وينتج ن ذلك مرور تيار متناوب ، وبالتالي سوف نحصل على مقاومة للدايود تسمى مقاومة الدايود المتناوبة ويرمز لها بالرمز r_D ، حيث أن :

$$r_D = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = \frac{1}{\text{Slope}}$$

$$\text{Slope} = \frac{I_2 - I_1}{V_2 - V_1}$$

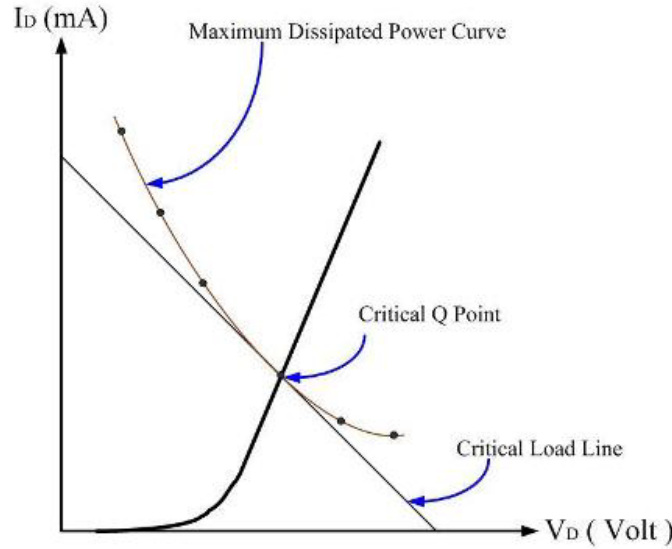
$$r_D = \text{Constant}$$

$$r_D = \frac{V_T}{I} , V_T \text{ Thermal Voltage} = \frac{KT}{q}$$

نستنتج من ذلك بأن مقاومة الثنائي في حالة التيار المتناوب تكون ثابتة بقيمة معينة من مرور التيار .

أيضاً هناك مقاومة أخرى يطلق عليها المقاومة الحجمية Bulk Resistance ، هذه المقاومة عبارة عن مجموع مقاومتين الأولى مقاومة مادة شبه الموصل، والثانية هي مقاومة نقاط اللحام ، ويرمز لهذه المقاومة بالرمز r_B . وعادة فإن : $r_B \ll r_D$. ولكن أحياناً تكون قيمة هذه المقاومة كبيرة نسبياً 0.1Ω بالمقارنة مع r_D ، لذلك يجب أن تؤخذ في الاعتبار .

12-1 قدرة الثنائي Diode The Power of



منحنى القدرة للثنائي

الشكل (1 - 21)

عادة يعطي المصنعون قيمة أعلى قدرة يمكن أن يتحملها الثنائي والتي يرمز لها بالرمز P_{Dmax} ، وهذه القدرة تمثل أعلى قدرة يمكن أن يتحملها الثنائي دون أن يتلف بحيث إذا زادت القدرة المسلطة على الثنائي عن هذه القيمة فسوف يؤدي ذلك إلى تلف الثنائي . لذلك يجب معرفة حدود المنطقة الآمنة التي يعمل بها الثنائي وذلك برسم منحنى أعلى قدرة على خصائص الثنائي كما في الشكل أعلاه .

بعد رسم منحنى أعلى قدرة نلاحظ أن هذا المنحنى سوف يتقاطع مع منحنى الخواص بالثنائي عند نقطة معينة ، هذه النقطة تمثل نقطة العمل الحرجة Critical Q Point ، وأن خط الحمل الذي يرسم مماس لمنحنى القدرة عند هذه النقطة Q يسمى بخط الحمل الحرج Critical Load Line . لذلك عند تصميم دائرة ثنائي يجب عدم تجاوز هذه الخطوط الحمراء وإلا فالنتيجة سوف تكون تلف الثنائي .