1-2 النبائط الالكترونية لأشباه الموصلات

ومفردها النبيطة (Semiconductor device) :- هي مكونات الكترونية تصنع من مواد شبه موصلة يمكن معالجتها لتصبح موصلة عن طريق التشويب بواسطة التطعيم بما يسمى عملية إشابة .

كما تم شرحه بالمحاضرة السابقة. ويمكن التحكم بالموصلية الكهربائية للنبائط عن طريق المجال الكهربائي أو الضوء أو الحرارة و تحل الآن النبائط الإلكترونية محل الصمامات المفرغة بسبب قدرتها على التوصيل الكهربائي في الحالة الصلبة بعكس الصمامات التي تعتمد الحالة الغازية للتوصيل الكهربي.
أحد الأمثلة على نبائط أشباه الموصلات الدقيقة رقيقة السليكون المستخدمة في الحواسيب والآلات الحاسبة. وتسمى الرقائق الدقيقة حيث تحتوي على عدة ملايين من الصمامات الثنائية أو الترانزستور في شريحة واحدة chip لتكون اجهزة اشباه الموصلات .

2-2 ما هي اجهزة اشباه الموصلات (اجهزة النبائط الالكترونية)

أجهزة أشباه الموصلات ليست سوى مكونات إلكترونية تستغل الخصائص الإلكترونية لمواد أشباه الموصلات، مثل السيليكون والجرمانيوم وزرنيخيد الغاليوم، وكذلك أشباه الموصلات العضوية. تتكون أجهزة أشباه الموصلات من مادة ليست موصلاً جيداً ولا عازلاً جيداً، أنشأت هذه الأجهزة تطبيقات واسعة بسبب موثوقيتها، والتكلفة المنخفضة. هذه هي المكونات المنفصلة التي تستخدم في العديد من الأجهزة مثل أجهزة الطاقة وأجهزة الإستشعار الضوئية للضغط وبواعث الضوء، بما في ذلك ليزر الحالة الصلبة. لدى هذه الأجهزة مجموعة واسعة من قدرات التعامل مع التيار والجهد، مع التصنيفات الحالية أكثر من 5000 أمبير ومعدلات الجهد أكثر من 100000 فولت. لقد حلت أجهزة أشباه الموصلات محل الأنابيب المفرغة في العديد من التطبيقات، **تستخدم** هذه الأجهزة التوصيل الإلكتروني في الحالة الصلبة **بدلاً** من الإنبعاث الحراري في الفراغ العالي. يتم تصنيع أجهزة أشباه الموصلات لكل من الأجهزة المنفصلة والدوائر المتكاملة، والتي تتكون من عدد قليل إلى مليارات من الأجهزة المصنعة والمترابطة على ركيزة أو رقاقة واحدة (chip) من أشباه الموصلات.

3-2 بعض اجهزة اشباه الموصلات (النبائط الالكترونية)

الصمام الثنائي (الدايود):Diode –

الترانزستور :Transistor –

1-3-2 قائمة بأجهزة أشباه الموصلات الشائعة:

تتضمن قائمة أجهزة أشباه الموصلات الشائعة بشكل أساسي أجهزة تحتوي على طرفين أو ثلاثة أطراف أو أربعة أطراف:

الأجهزة ذات الطرفين هي:

- الصمام الثنائي (الصمام الثنائي المعدل).(Diode (rectifier diode –
- الدايود.Gunn diode –
- الدايود.IMPATT diode –
- الليزر دايود.Laser diode –
- دايود زينر .Zener diode –
- دايود شوتكي .Schottky diode –
- الدايود المدبب.PIN diode –
- الدايود.Tunnel diode –
- الدايود الباعث للضوء.(LED) – Light-emitting diode – (LED)
- ترانزيستور الضوئي .Photo transistor –
- الخلايا الضوئية.Photocell –
- الخلايا الشمسية .Solar cell –
- دايود قمع الجهد العابر.Transient-voltage-suppression diode –
- VCSEL.

الأجهزة ذات الثلاثة أطراف:

- الترانزيستور ثنائي القطب.Bipolar transistor –
- ترانزيستور حقل التأثير.FET – Field-effect transistor
- الترانزيستور.Darlington transistor –
- الترانزيستور. Insulated-gate bipolar transistor (IGBT)–
- الترانزيستور الأحادي.Unijunction transistor –
- السيليكون المعدل.Silicon-controlled rectifier –
- الثايرستور.Thyristor –
- TRIAC.

الأجهزة ذات الأطراف الأربعة:

- مقرنة الصور.(Optocoupler) . مستشعر التأثير (مستشعر المجال المغناطيسي)

4-2 تطبيقات أجهزة أشباه الموصلات الالكترونية (تطبيقات نبائط اشباه الموصلات) :

تعتبر مواد أشباه الموصلات **مفيدة** من **خلال سلوكها الذي يمكن التلاعب به بسهولة** عن طريق إضافة الشوائب، يمكن أن يتم التحكم في موصلية أشباه الموصلات عن طريق المجال الكهربائي أو المغناطيسي، عن طريق التعرض **للضوء أو التعرض للحرارة الحرارة**، أو عن طريق **التشوه الميكانيكي** لشبكة بلورية أحادية مطعمة، وبالتالي، يمكن لأشباه الموصلات أن تصنع أجهزة إستشعار ممتازة. يحدث التوصيل الحالي في أشباه الموصلات خالياً من الإلكترونات والثقوب، والتي تُعرف مجتمعة باسم ناقلات الشحنة، يتم تنشيط السيليكون عن طريق إضافة كمية صغيرة من ذرات الشوائب وأيضًا للفوسفور أو البورون، الذي بدوره يزيد بشكل كبير من عدد الإلكترونات أو الثقوب داخل أشباه الموصلات.

1- وتؤدي النبائط الإلكترونية المصنوعة من المواد شبه الموصلة عدة أغراض منها **وظيفة الصمامات المفرَّغة**.

2- يمكن إستخدام جميع أنواع الترانزستور **كوحدات بناء للبوابات المنطقية**، وهو أمر مفيد لتصميم الدوائر الرقمية، في الدوائر الرقمية مثل المعالجات الدقيقة.

3- تعمل الترانزستورات **كمفتاح (تشغيل / إيقاف)** في(MOSFET) ، على سبيل المثال، يحدد الجهد المطبق على البوابة ما إذا كان المفتاح قيد التشغيل أو الإيقاف.

4- تستخدم الترانزستورات للدوائر التناظرية (**لا تعمل كمفاتيح** (تشغيل – إيقاف) نسبياً)، يستجيبون لنطاق مستمر من المدخلات مع نطاق مستمر من المخرجات، حيث تشمل الدوائر التناظرية الشائعة المذبذبات ومكبرات الصوت، تُعرف الدوائر التي تتفاعل أو تترجم بين الدوائر التناظرية والدوائر الرقمية **بدوائر الإشارة المختلطة**.

5- تُـقـوِّم نبائط أشباه الموصِّلات، التيار الكهربائي مثل الصمامات (تحويل التيار الكهربائي المتناوب إلى تيار مستمر).

6- **تـضـخـم الإشارات الكهربائية الضعيفة**. اذ تعتمد أجهزة الراديو والتلفاز وغيرها من النبائط الإلكترونية على **المقوّم والمكبرّ والمذبذب**.

7- إن بعض أشباه الموصلات يمكنها **توليد ضوء Photonic Devices** .

8- بعض أشباه الموصلات **تكشف عن الضوء Light Detector** . وأغلب آلات تصوير التلفاز من نبائط أشباه الموصِّلات.

9- بعض أشباه الموصلات تعمل كحساسات او متحسسات **Sensor**.

10- بعض أشباه الموصلات تعمل على **توليد موجات دقيقة Microwave Devices .**

5-2 مميزات أجهزة أشباه الموصلات الالكترونية (نبائط اشباه الموصلات) :

1- نظراً لأنّ أجهزة أشباه الموصلات **لا تحتوي على أسلاك كهربائية**، فلا حاجة إلى طاقة لتسخينها للتسبب في إنبعاث الإلكترونات.

2- نظراً **لعدم الحاجة إلى تسخين**، يتم ضبط أجهزة أشباه الموصلات على التشغيل بمجرد تشغيل الدائرة.

3- أثناء التشغيل، **لا تصدر** أجهزة أشباه الموصلات أي ضوضاء وطنين.

4- تتطلب أجهزة أشباه الموصلات **تشغيلاً منخفض الجهد مقارنة** بالأنابيب المفرغة.

5- نظراً **لأحجامها الصغيرة**، فإنّ الدوائر التي تتضمن أجهزة أشباه الموصلات تكون مضغوطة للغاية.

6- أجهزة أشباه الموصلات هي أجهزة **مقاومة للصدمات**.

7- أجهزة أشباه الموصلات **أرخص مقارنة** بالأنابيب المفرغة.

8- تتمتع أجهزة أشباه الموصلات **بعمر غير محدود** تقريباً.

9- نظراً لعدم وجود أنابيب مفرغة في أجهزة أشباه الموصلات، فلا **توجد مشكلة** في تدهور أو خراب هذه الأنابيب.

10- تستخدم **قدرة اقل**.

11- تعمل لفترة اطول (ذات عمر تشغيلي طويل)

12- والأهم من ذلك، أنّ أجهزة أشباه الموصلات **قابلة للاندماج في الدوائر الإلكترونية الدقيقة المعقدة** ولكنّها سهلة الإنشاء، والعناصر الأساسية لغالبية الأنظمة الإلكترونية بما في ذلك الإتصالات مع معالجة البيانات والمستهلكين ومعدات التحكم الصناعي.

6-2 عيوب أجهزة أشباه الموصلات الالكترونية (نبائط اشباه الموصلات) :

1- مستوى الضوضاء يكون **أعلى** في أجهزة أشباه الموصلات مقارنة بالأنابيب المفرغة.

2- **لا تستطيع** أجهزة أشباه الموصلات العادية التعامل مع قدر أكبر من الطاقة مثل الأنابيب المفرغة العادية.

3- في نطاق **التردد العالي**، لدى هذه الأجهزة **استجابة ضعيفة**.

وبالتالي، فإنّ كل هذه المميزات والعيوب تتعلق بالأنواع المختلفة من أجهزة أشباه الموصلات والتي تشمل جهاز ذو طرفين، أوثلاثة أطراف أو أربعة أطراف.

7-2 وصلة او مفرق PN: الثنائي البلوري (PN Junction: Crystal Diode)

يتم الحصول على ثنائي الوصلة PN عند جمع (combine) النوعين، السالب والموجب من شبه الموصل الى بعضهما. ويتم هذا الجمع بتصنيع الثنائي على بلورة واحدة من مادة شبه موصلة بحيث يصبح احد نصفيها سالب والاخر موجب وذلك عن طريق ادخال المادة الشائبة المناسبة الى نصفي البلورة. وتدعى البلورة عندئذ بالبلورة الثنائية اوالثنائي البلوري.

كما ان المادة نوع p تحتوى على كثافة عالية من الثقوب وقليل من الالكترونات نرى عكس ذلك في المادة نوع n.
يتكون المفرق $p-n$ عند وصل المنطقتين معاً. وعند تصنيع النبيطة يصنع هذا المفرق باستخدام عمليات مثل التنمية الفوقية epitaxy والانتشار diffusion والزرع الايوني ion implantation.

وقد اشتهر استعمال نوعين من الثنائيات البلورية هما ثنائي السليكون وثنائي الجرمانيوم. والشكل (2-1) يوضح شكل ورمز الثنائي البلوري.

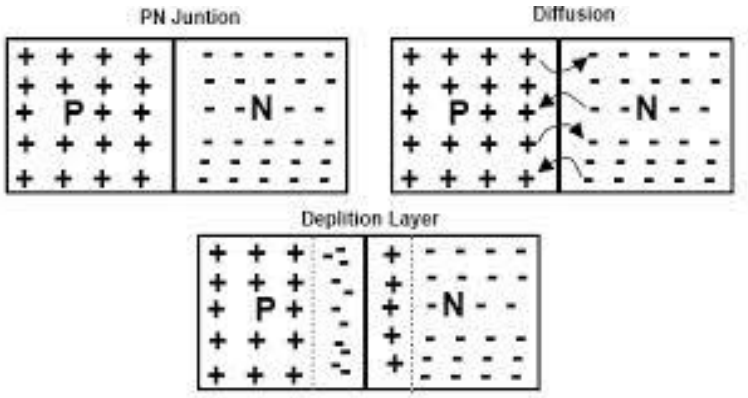
شكل (2-1) تركيب ورمز الوصلة الثنائيةPN

1-7-2 منطقة الاستنزاف depletion region

عند جمع نصفي الوصلة PN، وبسبب ان تركيز حاملات الشحنة (الالكترونات في النوع السالب والفجوات في النوع الموجب) هو اكبر بكثير مما هو في النوع الاخر اي وجود انحدار في تركيز الالكترونات $(\frac{dn}{dx})$ في المنطقة السالبة وكذلك انحدار في تركيز الفجوات $(\frac{dp}{dx})$ في المنطقة الموجبة, ذلك سيؤدي الى انتقال او انتشار بعض الالكترونات الى المنطقة الموجبة عبر الوصلة وكذلك انتقال بعض الفجوات الى المنطقة السالبة.

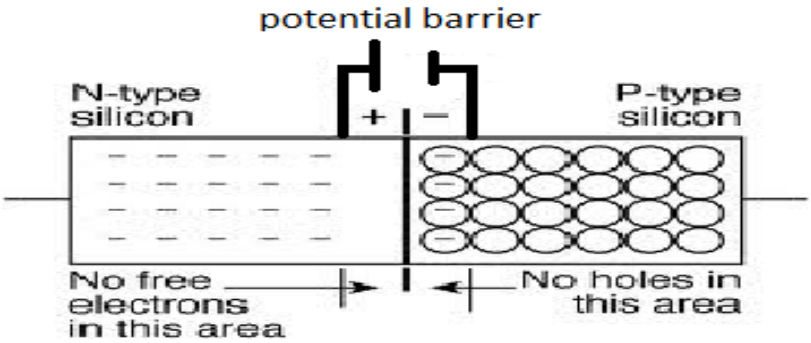
ان عبور الالكترونات الى المنطقة (P) سوف يجعل منه حاملاً اقليا وبوجود الاعداد الكبيرة من الفجوات حوله يكون زمن بقائه قصيراً فحال دخوله المنطقة (P) يسقط في فجوة وعندما يتم هذا فان الفجوة تختفي ويصبح الالكترون الحر الكتروناً تكافؤياً, كذلك هو الحال بالنسبة للفجوات العابرة الى المنطقة (N) حيث تقوم بأقتناص الكترون حر من بين الاعداد الكبيرة المحيطة بها. حيث تتعادل حاملات الشحنة مع بعضها ويحصل ما يسمى

بألتحام الالكترون- فجوة (electron – hole recombination) فتصبح المنطقة القريبة من الفاصل خالية من ناقلات الشحنة الحرة من الجهتين N و P كما في الشكل (2-2) اذ تبقى الشحنات مقيدة على جهتي الفاصل (او الوصلة) وتدعى هذه المنطقة **بمنطقة الاستنزاف** (depletion region)او **طبقة** الاستنزاف(depletion layer).



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

ان انتشار الحاملات وانتقالها من جهة الى اخرى لا يعني انتقال الذرات الام التابعة لها، ذلك لان الذرات الام تكون مرتبطة مع مثيلاتها من الذرات الاخرى بأواصر تساهمية يصعب كسرها, وانما يؤدي الى تكوين شحنتين مختلفتي الاشارة على جانبي الحد الفاصل في وصلة PN. ويسبب تخلف الايونات الموجبة في المنطقة (N) والايونات السالبة في المنطقة (P) كما في شكل (2-3). ان كل زوج متكون من الايون الموجب والسالب يدعى بثنائي القطب (dipole)، وان وجود مثل هذا الثنائي القطب يعني ان الكتروناً واحداً من الكترونات حزمة التوصيل وفجوة واحدة قد توقفتا عن التجوال وبتزايد اعداد هذه الثنائيات القطبية ستخلي المنطقة القريبة من الحد الفاصل بين وصلتي PN من الشحنات المتحركة مكونة منطقة الاستنزاف التي تم توضيحها سابقاً. ومن الجدير بالذكر ان معظم مقاومة وصلة PN تتركز في منطقة الاستنزاف حيث تكون مقاومتها كبيرة مقارنة مع بقية اجزاء شبه الموصلين P، N.



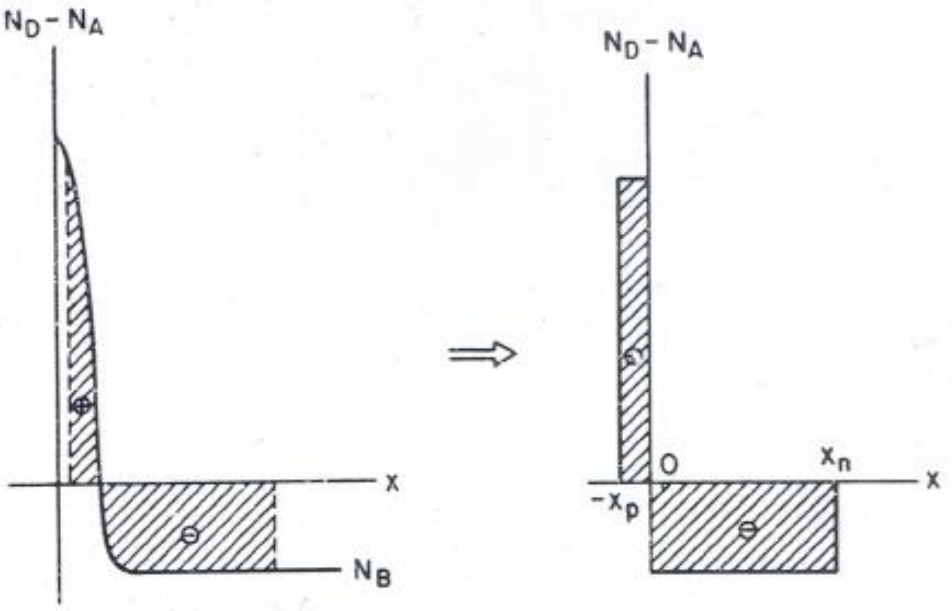
شكل(2-3) الجهد الحاجز للوصلة الثنائيةPN

2-7-2 جهد الحاجز (The potential barrier)

من المعروف ان وجود شحنتين مختلفتين ومفصولتين عن بعضهما بمسافة سوف يعمل على خلق مجال كهربائي يؤدي بدوره الى احداث جهد كهربائي. ونتيجة لانتقال حاملات الشحنة بين نصفي الوصلة يزداد عدد الالكترونات في المنطقة (P) وعدد الفجوات في المنطقة (N) وبذلك يتكون فرق جهد بين المنطقتين مولداً مجالاً كهربائياً معاكساً لحركة حاملات الشحنة وسيستمر انتشار حاملات الشحنة الاغلبية خلال الفاصل الى ان يصبح المجال الكهربائي المتولد كافياً لايقاف هذا الانتشار فيحصل التوازن (equilibrium) حيث ان الالكترونات الحرة لن تتمكن من العبور من (N) الى (P) **بسبب القوة المعاكسة الناتجة من المجال المتولد**، كذلك فأن الفجوات في (P) لن تتمكن من العبور الى (N) لنفس السبب. اذ يؤدي هذا المجال الكهربائي الى توليد **حاجز جهد** (potential barrier) ويدعى الجهد المتولد في حالة التوازن **بجهد الوصلة** (V_B). وتعتمد قيمته على نوع المادة فمثلا يكون جهد الوصلة للسيليكون $V_B = 0.7V$ وللجرمانيوم $V_B = 0.3V$. والشكل (2-3) يبين وصلة الـ PN مع الجهد الحاجز V_B.

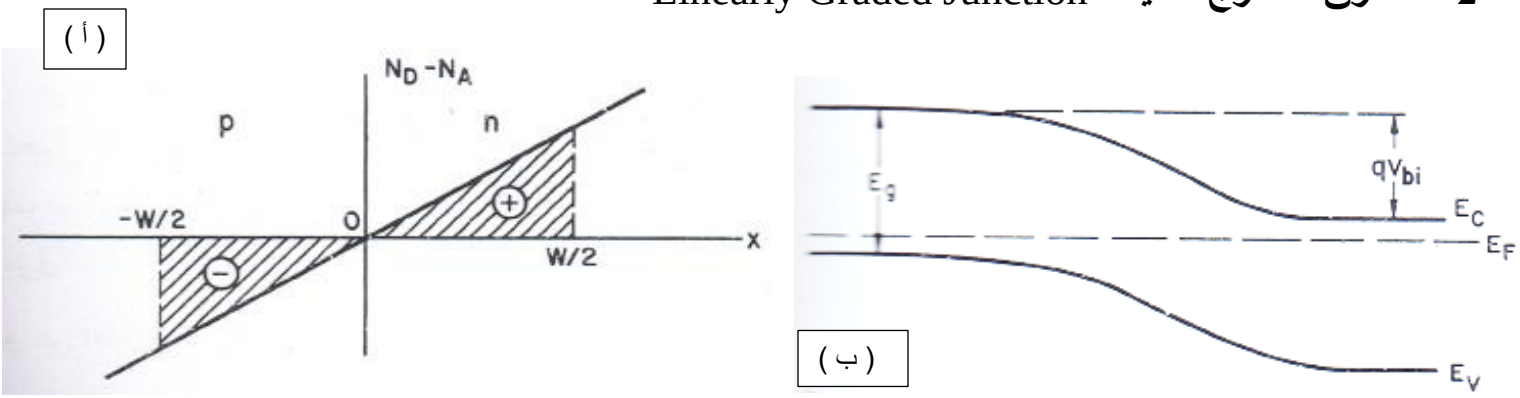
وهناك حالتين رئيستين من المفرق وهما :

1- المفرق الفجائي Abrupt Junction



شكل (2-4) يوضح مفرق فجائي

2- المفرق المتدرج خطيا Linearly Graded Junction



شكل (2-5) يوضح : أ- المفرق المتدرج خطيا ، ب- مخطط حزمة الطاقة له

8-2 تأثير درجة الحرارة على النبيطة : Temperature Effect

لدرجة الحرارة تأثير كبير على أداء النبيطة . ففي كلتا الحالتي الانحياز الامامية والعكسية تعتمد قيم الانتشار والتوليد- الاتحاد لدرجة كبيرة على درجة الحرارة.

ان درة الحرارة التي يعمل فيها الثنائي تؤر لى خصائصه الكهرئية

1- الانحياز الامامي :

ان نسبة تيار انتشار الثقوب الى تيار الاتحاد تعتمد على درجة الحرارة وكذلك فجوة الحزمة لشبه الموصل. عند درجة حرارة الغرفة ولفولتيات انحياز واطئة يهيمن تيار الاتحاد عادة اما عند فولتيات الانحياز الامامية العالية فتيار الانتشار هو المهيمن عادة. وعند فولتية انحياز معينة تؤدي الزيادة في درجة الحرارة الى زيادة تيار الانتشار بخطى اسرع من الزيادة لتيار الاتحاد وبذا تتسع مديات فولتية الانحياز الامامي التي تنطبق عندها المميزات مع معادلة الثانئي المثالثية مع زيادة درجة الحرارة.

2- الانحياز العكسي:

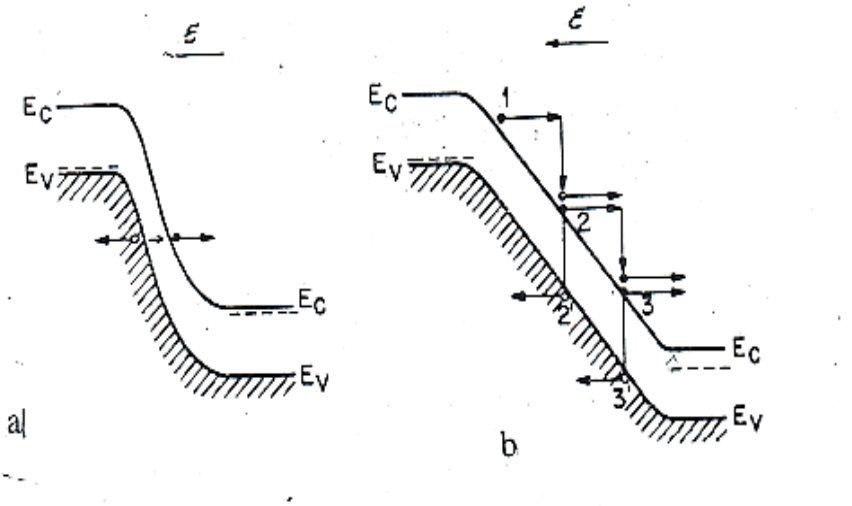
و في هذه الحالة نسبة تيار الانتشار الى تيار التولد تتناسب مع الكثافة الذاتية للحاملات n_i . وبزيادة درجة الحرارة نصل الحالة التي يهيمن بها تيار الانتشار

9-2 انهياز المفرق : JUNCTION BREAKDOWN

عند تسليط فولتية عالية عبر مفرق $p-n$ فان المفرق ينهار ويسمح بمرور تيار عال جدا . ومع ان عملية الانهيار ليست هدامة بحد ذاتها الا انه يجب تحديد القيمة القصوى للتيار المار باستخدام دائرة خارجية محددة وذلك منعا من نشوء حرارة مفرطة في المفرق . ومن الاليات المهمة المسؤولة عن الانهيار آليتا النفق tunneling والتضاعف التهوري avalanche multiplication وسنتناول الالية الاولى بايجاز وبعدها نشرح بالتفصيل الية التضاعف التيهوري وذلك لان هذه الالية هي التي تحدد فولتية الانحياز العكسي القصوى لمعظم الثنائيات . وهذه الالية تحدد ايضا فولتية الجامع للترانزستورات مزدوج الشحنة وفولتية المصرف drain voltage للترانزستور MOSFET وفضلا عن ذلك فان الية التضاعف التيهوري يمكنها ان تولد القدرة في الموجات الدقيقة microwave كما هو الحال في ثنائي IMPATT وان تكشف الاشارات الضوئية كما هو الحال في الكاشف الضوئي التيهوري avalanche photodetector

10-2 ظاهرة النفق Tunneling Effect

يمكن لالكترون التكافؤ ان ينتقل من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل عند تسليط مجال كهربائي كبير عبر مفرق $p-n$ باتجاه عكسي . وكما هو موضح في الشكل a ادناه وتدعى هذه العملية التي يتم خلالها اختراق الالكترون لفجوة الحزمة بعملية النفق . ويحدث النفق عندما يكون المجال كبيراً جداً ففي السليكون وارسنيد الكاليوم يكون المجال بحدود 10^6 V/cm او أعلى من ذلك . ولاجل الحصول على مجال كهربائي بهذه القيمة يجب ان يكون التطعيم في كلتا المنطقتين p و n ذا تركيز عال تماماً (أعلى من $5\times10^{17}\ cm^{-3}$) . ان آليات الانهيار للمفرق السليكوني وارسنيد الكاليوم بفولتيات انهيار أقل من $4E_g/q$. حيث يمثل E_g فجوة الحزمة . تعود الى ظاهرة النفق . أما الانهيار الذي يحدث عند فولتيات تفوق $6E_g/q$ فانه يرجع الى التضاعف التيهوري . اما الانهيار الذي يحدث عند فولتيات بين 4 و $6E_g/q$ فانه يرجع الى مزيج من النفق والتضاعف التيهوري .



الشكل يوضح ، حزمة الطاقة تحت ظروف الانهيار (a) ظاهرة النفق (b) ظاهرة التضاعف التيهوري

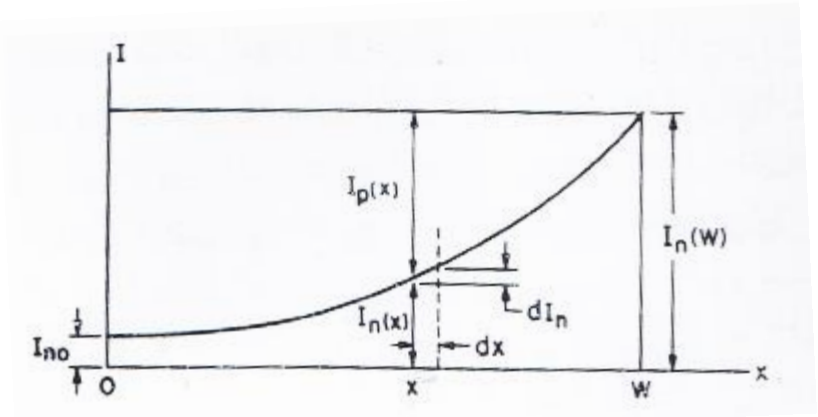
11-2 التضاعف التيهوري Avalanche Multiplication

ان الشكل b اعلاه يوضح عملية التضاعف التيهوري . فالمفرق $p-n$ ذو التركيز المعتدل من الشوائب . وليكن مثلاً مفرقاً احادي الجانب نوع p^+-n ذو تركيز $N_D \simeq 10^{17}\,cm^{-3}$ أو أقل من ذلك . خاضع لانحياز عكسي . فالالكترون المتولد حرارياً (مؤشر بـ 1) يكسب طاقة حركية من المجال الكهربائي فاذا كان المجال بدرجة كافية من الشدة فان الالكترون يكتسب طاقة حركية كافية تسمح له عند الاصطدام بذرة ان يكسر اصرة المشبك ويولد زوجاً من الكترون ـ ثقب (2 و 2') . ويدعى هذا بالتأين الاصطدامي *impact ionization* . فالالكترون والثقب المتولد حديثاً يكتسبان طاقة حركية من المجال الكهربائي وبدورهما يتمكنان من توليد زوج جديد من الكترون ـ ثقب (مثلاً 3 و 3') وهذان يستمران في العملية لتوليد ازواج اخرى . لهذا فان العملية تدعى بالتضاعف التيهوري .

لاجل اشتقاق معادلة الانهيار نفرض ان تيار I_{no} يرد الى الجانب الايسر من منطقة النضوب التي عرضها W وكما هو مبين في الشكل (اعلاه) . واذا كان المجال الكهربائي في منطقة النضوب من الشدة بحيث يسمح ببدء عملية التضاعف التيهوري فان التيار الالكتروني I_n سيزداد بازدياد المسافة داخل منطقة النضوب ويصل عند W الى القيمة $M_n I_{no}$ حيث يعرف M_n بعامل التضاعف .

$$M_n \equiv \frac{I_n(W)}{I_{no}} \qquad \text{..... (*)}$$

P-n



شكل يوضح منطقة النضوب لمفرق مع تضاعف التيارات اليها

وكذلك بالنسبة لتيار الثقوب I_p فأنه يزداد عبر المسافة من (X=W) الى (X=0) . وفي الحالة المستقرة يبقى التيار الكلي $I = (I_P + I_n)$ ثابتا، وفي الزيادة الجزئية عند X ونحصل على:

$$i - \frac{1}{M_n} = \int_0^W \alpha \, dx \quad \text{..... (**)}$$

وتعرف فولتية الانهيار التايهوري بتلك الفولتية التي يقترب عندها M_n من اللانهاية . و بذلك فالانهيار يتحدد بالشرط:

$$\int_0^W \alpha \, dx = 1 \quad \text{..... (***)}$$

مثال/

اذا كان تيار الاشباع 10^{-9} الى 10^{-14} عند تغير درجة الحرارة من 20°C الى 125°C, احسب VB في كلا الحالتين على فرض عند ا احلالتني عل فرض ان التيار الامامي يبقى ثابتاً عند القيمة (1mA) ؟

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

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

$$V_B = \frac{KT}{q} l\,n\frac{I}{I_S} = \frac{1.38 \times 10^{-23}\,J/K\;(125+273)K}{1.6 \times 10^{-19}J} ln\frac{10^{-3}A}{10^{-9}A} = 34\,mV\;ln\frac{10^{-3}A}{10^{-9}A}$$
$$= 460\,mV$$

وعليه فأن V_B يقل مع زيادة درجة الحرارة على الرغم من ثبات التيار الامامي (ثبوت جهد الانحياز الامامي).