



جامعة بغداد

كلية التربية للعلوم الصرفة (إبن الهيثم)

قسم الفيزياء – المرحلة الثالثة

مفردات مادة الإلكترونيات

عدد الساعات = 3 نظري + 3 عملي: 7 وحدات - للعام الدراسي (2018-)

ت	عنوان الفصل	مفردات الفصل
1	مقدمة عامة عن فيزياء أشباه الموصلات	التركيب الذري ، نظرية الحزم و مستويات الطاقة في المواد الصلبة ، تصنيف المواد ، أشباه الموصلات و علاقة فجوة الطاقة ، التوصيل في المواد الصلبة ، توزيع الإلكترونات و منسوب مستوى فيرمي ، أشباه الموصلات النقية ، التطعيم ، شبه الموصل من نوع n-type و p-type ، كثافة الشحنات في أشباه الموصلات المشوبة.
2	الثنائي البلوري	تكوين الوصلة PN ومخطط حزم الطاقة لها ، الثنائي البلوري ، الجهد الحاجز و حسابه ، وصلة PN في حالة الإنحياز ، معادلة الثنائي ، تأثير درجة الحرارة على خواص الثنائي ، الدائرة المكافئة للثنائي البلوري ، خصائص الثنائي ، خط الحمل و نقطة التشغيل Q.
3	تطبيقات الثنائي البلوري	التعديل (التقويم) ، المعدل النصف و الكامل ، المعدل القنطري ، عامل التموج r.f. ، كفاءة التعديل ، فولتية الذروة العكسية PIV ، دوائر الترشيح ، المرشح السعوي ، مرشح الادخال الخانق ، مرشح RC، مرشح LC ، دوائر تشكيل الموجة : التحديد و انواعه ، الإلزام و أنواعه ، مضاعف الفولتية ، الثنائيات الخاصة (10 ثنائيات) .
4	ثنائي زينر	التركيب ، الخصائص ، الرمز ، الدائرة المكافئة لثنائي زينر ، المعامل الحراري لثنائي زينر ، القدرة المبددة في ثنائي زينر ، هبوط القدرة بسبب ارتفاع درجة الحرارة ، تطبيقات ثنائي زينر ، معادلة تنظيم الفولتية ، محدد زينر بدائرة متكاملة .
5	الترانزستور ثنائي الوصلة (BJT)	تركيب الترانزستور و انواعه ، مخطط حزم الطاقة ، انواع الانحياز للترانزستور ، معامل تكبير التيار α_{dc} ، β_{dc} ، طرق ربط الترانزستور ، مميزات ربط CB ، مميزات ربط CE ، مناطق عمل الترانزستور ، خط الحمل و نقطة العمل Q-point ، تأثير موقع نقطة التشغيل على شكل الإشارة الخارجة ، تأثير درجة الحرارة ، عامل الاستقرار ، طرق انحياز CE ، الانحياز الثابت ، إنحياز القاعدة ، إنحياز التغذية الخلفية ، إنحياز مقسم الجهد ، إستقرارية العمل للترانزستور ، إنحياز المصدرين.
6	مكبرات الترانزستور	مكبر الباعث المشترك ، مكبر الجامع المشترك ، مكبر القاعدة المشتركة ، مقارنة بين المكبرات الثلاثة ، الكسب في التيار و الجهد و القدرة ، ممانعه الادخال و الاخراج للباعث المشترك ، المكبرات متعددة المراحل ، الدائرة المكافئة المتناوبة للترانزستور ، خط الحمل المتناوب ، الثوابت الهجينية ، العلاقة مع معاملات r ، عرض نطاق التردد B.W للمكبر و تردد القطع الأدنى و الأعلى ، انواع الاقران للمكبرات متعددة المراحل.
7	الثايروستر	ثنائي شوكلي ، الثايروستر SCR ، الداياك ، الترياك ، المفتاح السيلكوني المسيطر SCS ، تطبيقات عملية لكل نوع ، الترانزستور احادي القطبية و تطبيقاته UJT.
8	ترانزستور تأثير المجال الوصلي JFET	JFET قناة n- و قناة p- ، مبدأ العمل ، الخصائص الانتقالية و خصائص الاخراج ، طرق انحياز JFET ، تعيين خط الحمل و نقطة العمل Q ، ترانزستور تأثير المجال ذي الاوكسيد المعدني MOSFET ، أنواعه ، خصائصه ، E-MOSFET ، D-MOSFET ، مكبرات JFET

9	مكبرات القدرة	مكبرات القدرة من الصنف A ، الصنف B ، الصنف AB، الصنف C ، القدرة المبذدة في مكبر القدرة ، وحدة الديسبل في القدرة ، مكبر العمليات OP-Amp و أجزاءه ، المكبر التفاضلي و أنماط الإدخال.
10	التغذية الخلفية السالبة	OP-Amp مع تغذية خلفية سالبة ، تابع الفولتية ، المكبر ذي الإدخال العاكس ، تأثير التغذية الخلفية السالبة على ممانعه الإدخال وممانعة الإخراج للمكبر ، زحزحة الطور.
11	المذبذبات	التغذية الخلفية الموجبة ، شروط التذبذب ، مذبذب قنطرة واين ، مذبذب زحزحة الطور ، مذبذب اقتران T- ، مذبذبات LC ، مذبذب كوليتس ، مذبذب هارثلي ، مذبذب كلاب ، مذبذب بلورة الكواتز ، المذبذبات اللاجيبية: متعدد الاهتزازات احادي الاستقرارية ، متعدد الاهتزازات ثنائي الاستقرارية ، متعدد الاهتزازات اللامستقر .
12	دوائر المنطق	لغة الحاسبة ، البوابات المنطقية الأساسية ، AND ، OR ، NOT ، جبر بوللين ، بوابة NAND، NOR ، تطبيق عملي لدوائر المنطق في السيطرة على منظومة صناعية.
13	مقدمة في النانو تكنولوجيا	مقدمة عامة عن مفهوم النانو تكنولوجيا ، الاستعراض التاريخي لتطور تقنية النانو ، علاقة تقنية النانو بالحياة اليومية ، أنابيب الكربون النانوية ، الترانزستور النانوي ، التطبيقات العملية لتقنية النانو.
14	تحديث المنهج: تضمن اضافة بعض البنود في الفصول مع اضافة فصل14	(الهترو جنكشن و تطبيقاته) خصائص الثنائي المختلف الوصلة (الهتروجنكشن) ، مقارنة بين الدايدود المتشابه الوصلة و الدايدود المختلف الوصلة ، مخطط مستويات الطاقة للهتروجنكشن ، تطبيقات الهتروجنكشن ، الخلايا الشمسية ، كفاءة الخلايا الشمسية ، الكواشف الضوئية .

المصادر:

- فيزياء الالكترونيات (1987) صبحي سعيد الراوي ، جامعة الموصل.

2- مبادئ الالكترونيات (1979)، الطبعة الثانية، أي. بي. مالفينو، ترجمة (بدر محمد علي الوتار ود. رياض كمال محمد الحكيم)، وزارة التعليم العالي والبحث العلمي.

References proposed update:

- 1- Albert Malvino and David Bates, Electronic Principles 8th edition, McGraw-Hill Education, USA, 2016.
- 2- S. M. Sze and Kwok K. Ng, Physics of Semiconductor Devices, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc. Canada, 2007.
- 3- Neamen, Donald A., Microelectronics: Circuit Analysis and Design, fourth edition, McGraw-Hill Companies, 2010
- 4- R. L. Boylestad and L. Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory*, 10th Edition, Prentice Hall, 2009.
- 5- Neamen, Donald A., Semiconductor Physics & Devices: Basic Principles, fourth edition, McGraw-Hill Companies, 2012.

مدرسين المادة:

أ.د. سمير عطا مكي + أ.د. إيمان حميد خضير + أ.م.د. بشرى هاشم حسين
م.د. أياد أحمد صالح + م.د. علي محمد رحيمة

الفصل الاول

فيزياء اشباه الموصلات (Physics of Semiconductors)

التركيب الذري

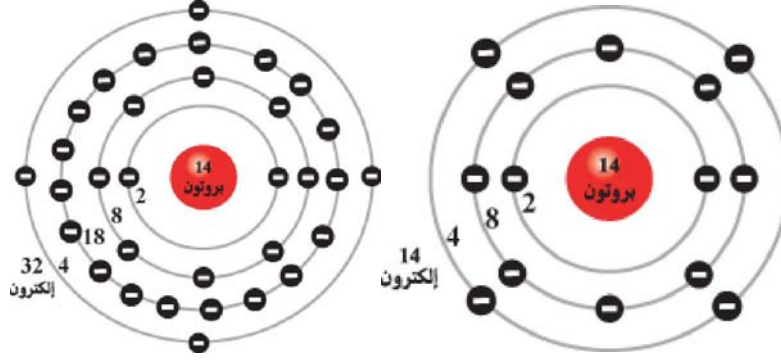
في عام 1913م اقترح الفيزيائي الدانماركي نيلز بور نموذجًا للذرة اعتمد فيه على فروض نموذج رذرفورد. ويقترح بور أن كل إلكترون يدور حول النواة ليس في مدارات إلكترونية بالمعنى التقليدي، وإنما يكون لكل مدار طاقة محددة وثابتة، وبالتالي فإن الإلكترونات تدور حول النواة في مستويات طاقة مساوية لطاقة الإلكترون فعند إعطاء الإلكترون كمية من الطاقة (كالتسخين مثلاً) عندئذ يكتسب الإلكترون طاقة إضافية وينتقل من مستوى طاقته إلى مستوى طاقة أكبر ويكون الفرق بين طاقتي المستويين مساوي للطاقة التي اكتسبها الإلكترون وبعد مرور فترة زمنية متناهية في الصغر تقدر بجزء من مائة مليون جزء من الثانية يفقد الإلكترون طاقته المكتسبة على شكل [إشعاع ضوئي](#). وقد اطلق بور على عملية انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة الكبير إلى مستوى الطاقة الأقل بقفزة الكم للإلكترون، وقد نجح بور بهذا الافتراض أن يفسر الترددات والأطوال الموجية المحددة للطيف الخطي المنبعث من الذرات . ولقد ساعد نموذج بور للذرة على تفسير الكيفية التي تتفاعل بها الذرات مع الضوء والأشكال الأخرى للإشعاع. فقد افترض بور أن [إمتصاص وإنبعاث](#) (إطلاق) الضوء من الذرة يستلزم تغييراً في موضع وطاقة الإلكترون فيقفز من مستوى لآخر.

نأخذ مثلاً السيليكون هو عنصر كيميائي رمزه Si وعدده الذري 14. يصنف السيليكون من أشباه الفلزات وهو رباعي التكافؤ. تحتوي ذرة السيليكون على 14 إلكترون وطبقاً لتوزيع الإلكترونات في مدارات الذرة الذي يخضع للعلاقة

$$2(n)^2 \quad \text{حيث } n \text{ رقم المدار}$$

فإن المدار الأخير يحتوي على 4 إلكترونات وتكون قوة جذب نواة الذرة لتلك الإلكترونات متوسطة بين الموصلات والعوازل ، ولكي تصل الذرة الى حالة الاستقرار ترتبط ذرات السيليكون ببعضها عن طريق روابط تساهمية (covalent bonds)، حيث تساهم كل ذرة بالإلكترونات المدار الأخير (الإلكترونات التكافؤ) مع أربع ذرات أخرى وهكذا حتي يتم بناء البنية البلورية لمادة السيليكون.

عند درجة حرارة الصفر المطلق 0 Kelvin لا تحتوي ذرة السيليكون في بلورة السيليكون النقية على إلكترونات حرة ، ولكن عند درجة الحرارة تكتسب بعض الإلكترونات طاقة حرارية كافية فتتحول الى إلكترونات حرة.



البناء الذري للجرمانيوم

البناء الذري للسليكون

بينما ذرة الجرمانيوم تحتوي على 32 بروتون

تصنيف المواد

تصنف المواد الصلبة البلورية الى عناصر موصلة للكهرباء وعناصر شبه موصلة واخرى عازلة نسبة الى قابليتها لحمل التيار الكهربائي. وتنظم ذرات هذه العناصر في صفوف منتظمة غالبا، حيث يكون التركيب البلوري لهذه الصفوف متشابه للابعاد الثلاثة ومن هذا الانتظام تتشكل وحدات او خلايا مكونة الشبكة البلورية. ان الالكترونات الخارجية لذرات المواد الصلبة مشتركة لجميع ذرات المادة، وهي حرة الحركة بين هذه الذرات في مجال واسع من درجات الحرارة. ان الكترونات الذرة الخارجية هذه تسمى الكترونات التكافؤ (valence electrons). ولها الدور الرئيسي في تحديد الخواص الفيزيائية والكيميائية للمادة. وتميل المدارات الخارجية الحاوية على الكترونات تكافؤ ان تكون مشبعة.

ان المواد ذات التوصيل العالي عندها الكترون تكافؤ مستعد لان يكون حراً باستلامه طاقة بسيطة. اما المواد العازلة فهي ذات تركيب وتوزيع الكتروني تكون فيه الالكترونات مشدودة دائماً الى الذرات الام، ومن الصعوبة ان نجد الكترونات حرة في درجة الحرارة الاعتيادية. اما شبه الموصل فهو ليس موصل جيد ولا عازل جيد في درجات الحرارة الاعتيادية الا انه عازل في الدرجات الواطئة وموصل جيد في الدرجات العالية ومن امثلته عنصر السليكون (Si) والجرمانيوم (Ge) والتي تستخدم بكثرة في الشئالي البلوري والترانزستورات.

ان موصلية (conductivity) المواد شبه الموصلة تقع بين موصلية العوازل مثل الكوارتز (quartz) والتي تكون محدود $10^{-6} (\Omega.m)^{-1}$ بينما تلك للموصلات تقع في حدود $10^6 \rightarrow 10^8 (\Omega.m)^{-1}$ فمثلا النحاس له موصلية تساوي $58 \times 10^7 (\Omega.m)^{-1}$ اما موصلية المواد شبه الموصلة فهي في حدود $10^{-2} \rightarrow 10^{-3} (\Omega.m)^{-1}$ في درجة حرارة الغرفة ($27^\circ C$).

• مستويات الطاقة (Energy Levels)

يمتلك كل إلكترون طاقة معينة ضمن المستوي الذي يدور فيه. وإذا امتلك طاقة اضافية تجعل طاقته مساوية الى طاقة مستوي اخر فإنه يقفز اليه ويدور ضمنه. وتكون طاقة المستويات القريبة من النواة قليلة وتزيد عند الابتعاد عن النواة. أي ان الإلكترون ذو الطاقة العالية يكون في المستويات البعيدة عن النواة. ولذا يكون اقل ارتباطاً بالنواة. لقد سمي المدار الاول بالحرف K والثاني L والثالث M والى المدار الاخير الذي هو Q. ان هناك مناطق بين هذه المستويات خالية من وجود الإلكترونات تسمى المناطق المحرمة او المحظورة (forbidden regions). يتشبع المدار الاول بالإلكترونين فقط. اما المدار الثاني فإنه يتشبع بثمانية الإلكترونات والثالث يتشبع بثمانية عشر إلكترون وهكذا وهي تتبع العلاقة $(2n^2)$ حيث ان n هو رقم المدار ابتداء من K وهو المدار رقم (1). تنقسم جميع المدارات (عدا المدار الاول) الى مدارات ثانوية (subshells) وتحتوي على عدد من الإلكترونات (عندما تكون مشبعة) كالآتي:

المدار الثانوي الاول = 2 إلكترون، المدار الثانوي الثاني = 6 إلكترون
المدار الثانوي الثالث = 10 إلكترون، المدار الثانوي الرابع = 14 إلكترون

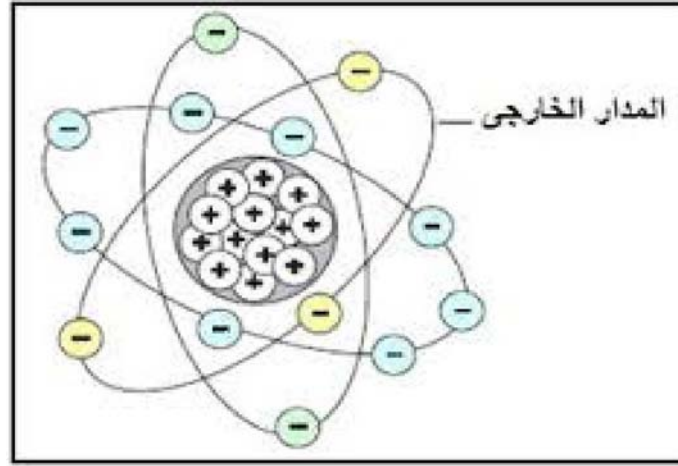


Figure (2-1) Structure of an atom.

ان الذي يعيننا في هذا الموضوع ليس المدارات الداخلية المشبعة وانما المدارات الخارجية غير المشبعة ويدعى هذا المدار بمدار التكافؤ (valence level) واما المدار الذي يليه والخالي من الإلكترونات في درجة الصفر المطلق فهو مدار التوصيل (conduction level) وبين هذين المدارين هناك فجوة طاقة محرمة او ممنوعة (forbidden energy gap). يوجد في البلورة ملايين الذرات المتجاورة ولذلك فإن الإلكترونات للذرات المتجاورة تتأثر ببعضها البعض وينتج عن هذا الارتباط اندماج مستويات الطاقة للذرات جميعا وتتكون حزمة مستويات طاقة بدلا عن مدارات منفردة. وبذلك ينتج حزمة من مستويات الطاقة تسمى حزمة التكافؤ (valence band) ونرمز لها بالرمز E_V وتكون الإلكترونات ضمن هذه الحزمة مقيدة بالذرة ولا تشارك بالتوصيل الكهربائي وحين تحصل الإلكترونات التكافؤ على طاقة كافية تكون فيها متحررة من الارتباط بالذرة تقفز الى الحزمة التالية وهي حزمة التوصيل (conduction band) وسميت حزمة التوصيل لان الإلكترونات المتواجدة فيها تشارك في عملية التوصيل الكهربائي ويرمز لها بالرمز E_C . وتوجد بين الحزمتين منطقة محرمة لا يوجد فيها مستويات طاقة.

ان ذرات المواد الصلبة مترابطة فيما بينها بطرق عديدة فهي اما ان تفقد الكترون لينتقل الى ذرة اخرى او تكتسب الكترون من ذرة اخرى وطريقة الترابط هذه تدعى الاصرة الايونية (Ionic bond) بسبب تأين الذرات. واما ان تشترك الذرات بعدد من الالكترونات التكافؤ كما يحصل في المواد شبه الموصلة وهذا ما يسمى بالاصرة التساهمية (Covalent bond). ان عرض المنطقة المحظورة او المحرمة بين حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ يختلف من مادة الى اخرى. ففي المواد العازلة تكون سمك المنطقة المحرمة عريضاً جداً ويحتاج الالكترون الى طاقة كبيرة لكي يعبر هذه المنطقة من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل. اما في المواد الموصلة فأن حزمة التكافؤ تتداخل مع حزمة التوصيل وتكون حركة الالكترونات فيها حرة مكونة ما يسمى بغاز الالكترون (electron gas) بينما في المواد شبه الموصلة فتكون المنطقة المحرمة معتدلة. وقيمتها للسليكون حوالي 1.1 eV وللجرمانيوم 0.72 eV. كما موضح في الشكل (2-2).

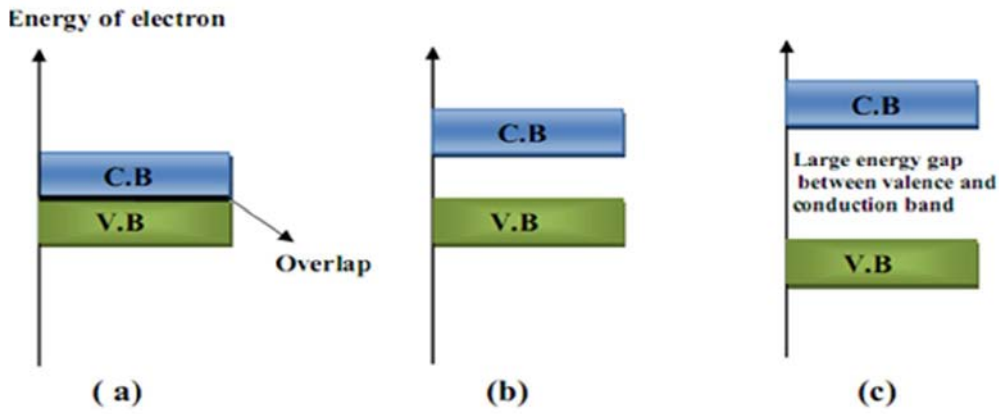


Figure (2-2) Typical energy bands a. Conductors, b. Semiconductors, c. Insulators.

ان حزمة التكافؤ تتكون من مستويات طاقة متعددة اعلاها هو مستوي E_V . اما حزمة التوصيل فهي بدورها تتكون من مستويات طاقة متعددة واطلها هو E_C . اما قيمة الفجوة المحرمة (F.G. (forbidden gap) فهي $(E_V - E_C)$. وتكون حزمة التوصيل فارغة تماماً من الالكترونات في درجة الصفر المطلق بينما تكون حزمة التكافؤ مملوءة تماماً كما في الشكل (2-3) حيث يبين احزمة الطاقة في درجة الصفر المطلق. كذلك بين هذا الشكل حزم داخلية مملوءة بالالكترونات.

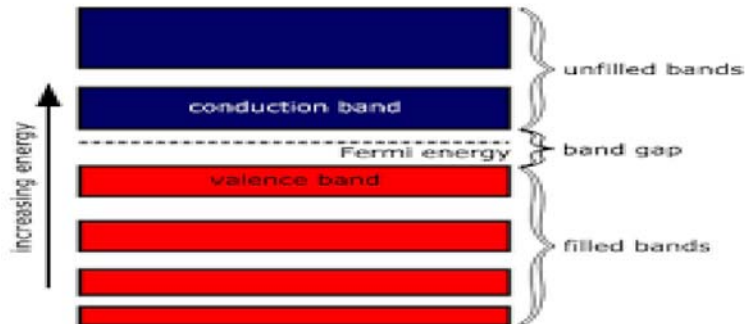


Figure (2-3) Energy levels in semiconductor.

لقد اصطلح العلماء على تثبيت مستوى طاقة خاص يعتبر كمرجع تقاس على اساسه مستويات الطاقة الاخرى يسمى مستوى فيرمي (Fermi level) ويرمز له E_F وهو يمثل احتمال وجود الكترون في هذا المستوي بمقدار 50% ولذلك فهو يقع بين منتصف المنطقة المحرمة وفي درجة الصفر المطلق تكون طاقة الالكترونات في غايها العظمى عند مستوى فيرمي.

• انواع المواد شبه الموصلة

هناك نوعين من اشباه الموصلات، ذاتية (نقية) (intrinsic) ولاذاتية (غير نقية) (extrinsic).

1- اشباه الموصلات (النقية) الذاتية (Intrinsic semiconductors)

تدعى اشباه الموصلات النقية والحالية من الشوائب والعيوب (في درجة الصفر المطلق) باشباه الموصلات الذاتية، مثل السيليكون والجرمانيوم، اللذان يقعان في المجموعة الرابعة من الجدول الدوري حيث انها تمتلك اربعة الكترونات في مدار التكافؤ. ولذلك فإن هذا المدار الخارجي يحتاج الى اربعة الكترونات اخرى لكي يتشبع وتكون الذرة في اقل طاقة ممكنة. ويحصل هذا عندما تساهم كل ذرة بأربع الكترونات مع اربع ذرات مجاورة (حيث هناك اربع ذرات متساوية البعد عن ذرة خامسة في المركز، اما بقية الذرات فبعيدة نسبياً) فتظهر كل ذرة وكأنها تمتلك ثمان الكترونات في مدارها الخارجي. وتدعى الاصرة بالاصرة التساهمية (covalent bond) مكونة الشبكة البلورية. كما في الشكل (2-4).

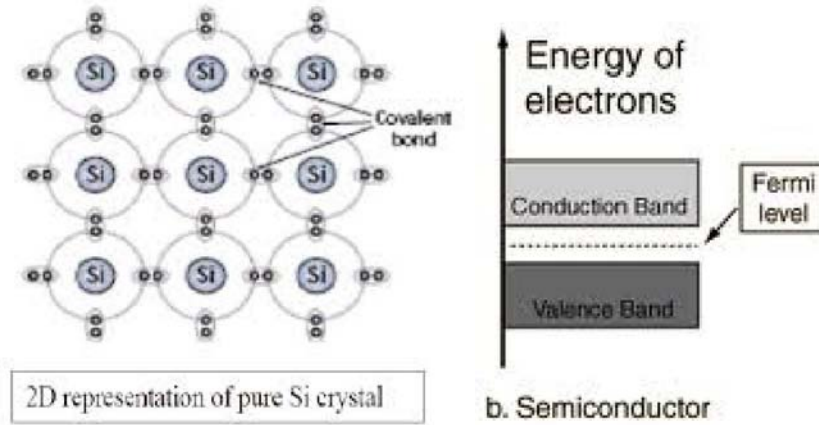


Figure (2-4) representation of pure Si crystal at ($T = 0K$).

نلاحظ من الشكل (2-4) بأن جميع الشحنات مقيدة او متعادلة كهربائياً. اما في درجات الحرارة العالية فإن الالكترونات تكتسب طاقة كافية لتقطع الاواصر فتصبح حرة طليقة تساهم في عملية التوصيل الكهربائي عند تسليط فرق جهد عليها. حيث تكون حركة الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل باتجاه معاكس لاتجاه المجال الكهربائي المسلط بينما تتحرك الفجوات بنفس اتجاه المجال. والشكل (2-5) يبين شبه موصل نقي في درجة حرارة اكبر من الصفر المطلق ونلاحظ فيها الالكترونات الحرة وامكانها الموجبة وتزداد اعداد الالكترونات الحرة الطليقة بزيادة درجة الحرارة.

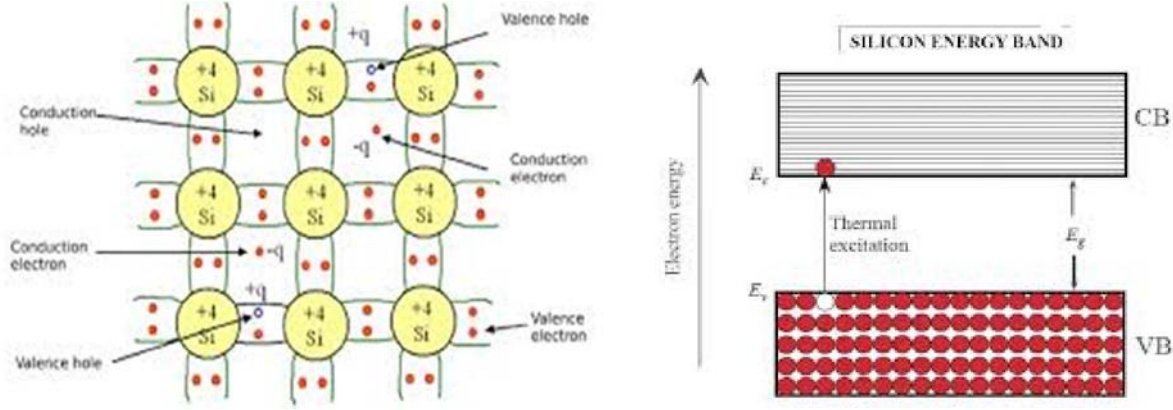


Figure (2-5) representation of pure Si crystal at $(T > 0K)$.

ان عملية توليد ازواج الالكترون - فجوة تسمى بالتأين الحراري (thermal ionization)، وذلك لان بارتفاع درجة الحرارة تحصل بعض الالكترونات على طاقة وتقفز من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل تاركة خلفها مكاناً شاغراً يحتاج الى الالكترون ليتعادل لنا فهو يستطيع ان يحمل شحنة موجبة ويدعى فجوة (hole)، وبذلك تتكون الازواج الالكترون - فجوة.

$$n_i = p_i$$

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} = \frac{E_g}{2}$$

تبين معادلة بان مستوى طاقة فيرمي E_F في هذا النموذج المبسط يقع عند منتصف المسافة بين حزمي التكافؤ E_V والتوصيل E_C وان موقع E_F لا يعتمد على درجة الحرارة في اشباه الموصلات النقية او الذاتية.

2- اشباه موصلات الغير نقية (المشوبة) الاذاتية (Extrinsic or Doped Semiconductors)

ان التأين الحراري في المواد الصلبة يعتمد كثيراً على درجة الحرارة حيث ان اي تغير طفيف في درجة الحرارة يحدث تغيراً جذرياً في عدد الشحنات الموجودة في شبه الموصل. وبهذا تكون التوصيلية (conductivity) لشبه الموصل حساسة جداً لدرجة الحرارة. الا ان في الاجهزة الالكترونية من الضروري السيطرة على موصلية المواد لتؤدي الاغراض المطلوبة. ولهذا السبب تعالج او تشوب (تطعم) المواد شبه الموصل النقية مثل السيليكون بأضافة كميات قليلة من ذرات عناصر غريبة تسمى بالشوائب (impurities). فوجود الشوائب في شبه الموصل يزيد من موصليتها ويسيطر عليها من خلال كمية الشوائب المضافة ويختصر الاعتماد على درجة الحرارة ويؤدي الى ظهور نوع واحد من حاملات الشحنة واختفاء او تضائل النوع الاخر. وهناك نوعين من اشباه الموصلات الغير

نقية : نوع سالب (n -type) ونوع موجب (p -type).

(a) نوع سالب (n -type)

إذا اضيفت كمية من عناصر المجموعة الخامسة (كذرات شائبة) من الجدول الدوري (*periodic table*) (كالفسفور او الزرنيخ او الانثيمون) الى شبه موصل نقي من المجموعة الرابعة كالسليكون، فإن هذه الذرات الشائبة (التي لها خمسة إلكترونات تكافؤ) تدخل ضمن تركيب السليكون وتكون اواصر تساهمية مع الذرات الاربعة المحيطة بكل منها ويبقى إلكترون واحد، دون ان يدخل ضمن اي اصرة (يبقى مرتبطاً بالذرة الام في درجة الصفر المطلق)، وان فصل هذا الإلكترون عن الذرة الام (ذرة الانثيمون مثلاً) لا يحتاج الى طاقة كبيرة، حيث ان هذه الطاقة هي اقل بكثير من الطاقة اللازمة لنقل الإلكترون من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل في اشباه الموصلات النقية. ويدعى هذا الإلكترون بالإلكترون الهبة او المانح (*donor electron*) والشوائب بالشوائب المانحة او الواهبة. كما في الشكل (2-7) ادناه:

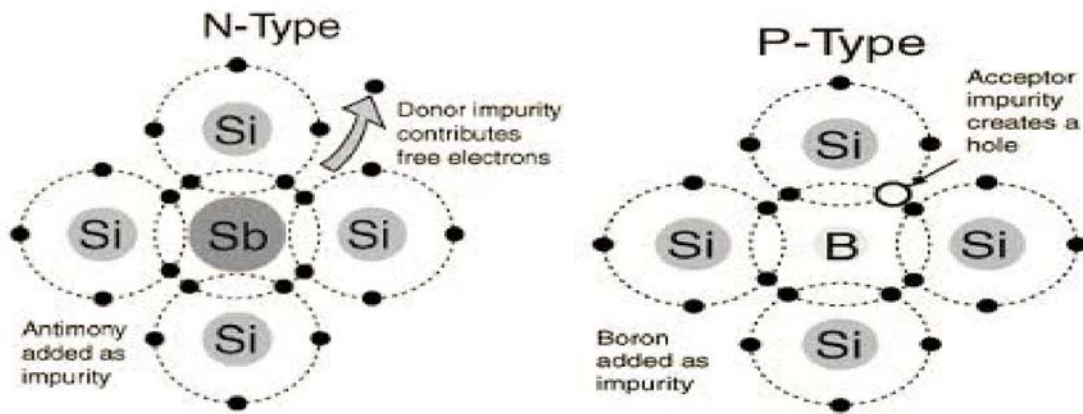


Figure (2-7) n-type and p-type semiconductors

تؤثر الشوائب على المنطقة المحرمة لشبه الموصل حيث تقللها بسبب استحداث مستوى المانح او الواهب (*donor level*) الذي يقع اسفل حزمة التوصيل فيزيح مستوى فيرمي نحو حزمة التوصيل ضمن المنطقة المحرمة.

(b) نوع موجب (*p-type*)

إذا اضيفت كمية من عناصر المجموعة الثالثة من الجدول الدوري (كلبورون او الألمنيوم او الكالسيوم او الانديوم) الى شبه موصل نقي من المجموعة الرابعة كالسليكون، فإن هذه الذرات الشائبة سوف تحتل مواقع ذرات السليكون وتكون مع الذرات الاربعة المحيطة بكل واحدة منها اواصر تساهمية. ولما كانت ذرات الشوائب (البورون مثلاً) تحتوي على ثلاث إلكترونات تكافؤ فقط، فعليه سوف تبقى اصرة تساهمية واحدة تحتوي على إلكترون واحد وتحتاج الى إلكترون اخر لاستكمال البنية البلورية الاعتيادية. فيكون نقصان في عدد إلكترونات الاواصر التساهمية ويسمى فجوة (*hole*) وهو مكان فارغ يحتاج الى إلكترون وقد اعتبرت الفجوات كناقلات او حاملات (*carriers*) شحنة موجبة مساوية لشحنة الإلكترون بالمقدار. ولهذا فان ذرة البورون تتقبل الإلكترون ضمن التركيب البلوري لاستكمالها، ولهذا سميت هذه الشوائب بالشوائب المتقبلة (*acceptor impurities*). كما موضح في شكل (2-7). يقلل التشويب بالمادة المتقبلة من عرض المنطقة المحرمة ويزيح مستوى فيرمي نحو حزمة التكافؤ ويتكون مستوى الذرات المتقبلة قرب حزمة التكافؤ كما في الشكل (2-8).

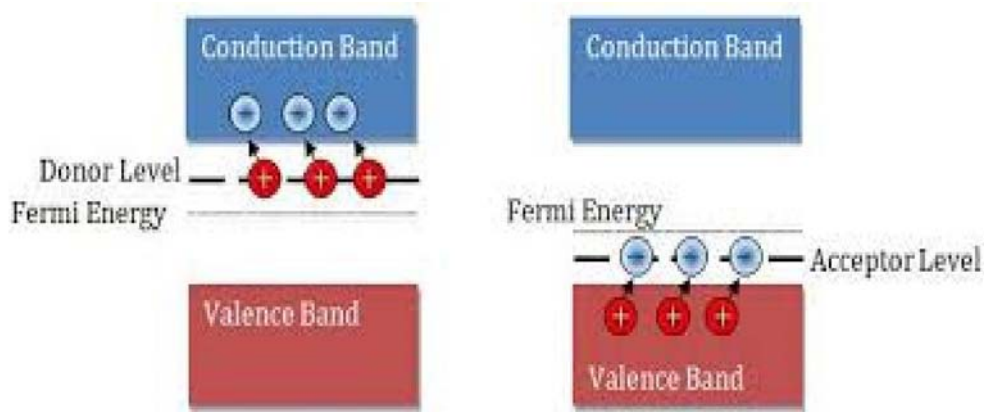


Figure (2-8) Donor and acceptor levels in n-type and p-type semiconductors

• كثافة الشحنات في اشباه الموصلات الشائبة

مما تقدم تبين لنا ان توصيلية الشوائب تكون غالبية على التوصيلية الذاتية اذا كان تركيز الشوائب الواهبة N_d او المتقبلة N_a اكبر من تركيز حاملات الشحنة الذاتية $n_i = p_i$. وفي شبه الموصل الشائب يقل تركيز الحاملات الاقلية بنفس عدد المرات التي يزيد بها تركيز الحاملات الاكثريه فأذا كان $n_i = n_n = p_n = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ في الجرمانيوم ثم تضاعف تركيز الالكترونات بعد اضافة الذرات المانحة بـ 1000 مرة بحيث اصبح $n_n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ فسيقل تركيز الفجوات بـ 1000 مرة ويصبح $p_n = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ اي اقل بمليون مرة من تركيز الالكترونات والسبب في ذلك، ان اعادة الاتحاد تتناسب طردياً مع تركيز الالكترونات وبذلك سيتضاعف عدد الالكترونات التي تتحد ثانية مع الفجوات بـ 1000 مرة فتصبح الفجوات 1000 مرة اقل مما كانت عليه. وبالنسبة الى شبه موصل السالب فأن العلاقة:

$$n_n \cdot p_n = n_i^2 \rightarrow 10^{16} \times 10^{10} = (10^{13})^2$$

وما قيل عن شبه الموصل السالب يصح قوله على شبه الموصل الموجب حيث ان $N_a \gg p_i$ ويمكن اعتبار $p_p \approx N_a$ اي ان:

$$n_p \cdot p_p = p_i^2 = n_i^2 \rightarrow 10^{10} \times 10^{16} = (10^{13})^2$$

عندما ترتفع درجة حرارة شبه الموصل الشائب كثيراً عن درجة حرارة الغرفة فأن الالكترونات او الفجوات سوف تتهين على الالكترونات والفجوات الشائبة وتصبح كثافة الالكترونات في حزمة التوصيل مساوية مرة اخرى لكثافة الفجوات في حزمة التكافؤ وهكذا فأن الحرارة العالية غير مرغوب فيها، فهي تبعد عناصر شبه الموصل من اداء عملها بالصورة الاعتيادية.

الفصل الثاني

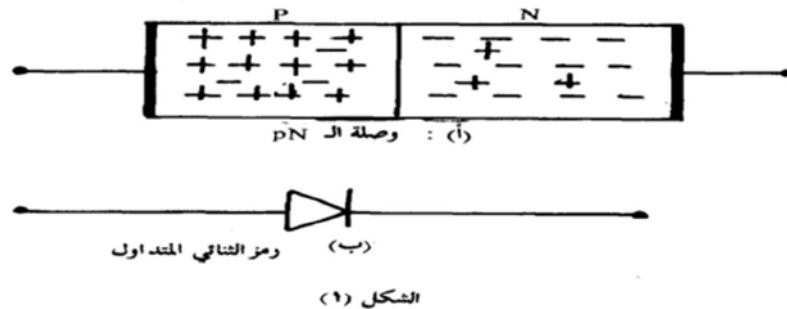
المقدمة:

رأينا فيما سبق ، ان بالامكان الحصول على مادة شبه موصلة من نوع موجب P - type او من نوع سالب N - type عن طريق ادخال مادة شائبة ثلاثية التكافؤ او خماسية التكافؤ الى مادة شبه موصلة نقية وعلى التوالي . وعلى الرغم من ان كلا النوعين ، من اشباه الموصلات ، يحتوي على حاملات الشحنة الاكثريّة (التي يعتمد عددها على تركيز الدرات الشائبة الداخلة) وكذلك على حاملات الشحنة الاقليّة (التي تنتج حرارياً وبالتالى يعتمد عددها على درجة حرارة المادة) الا ان هذه المواد ليست بذات اهمية عملية عند استعمالها ، في الدوائر ، بصورة منفردة .

من جهة اخرى يمثل ثنائي الوصلة PN واحداً من اهم الاجهزة الالكترونية ويمكن لهذا الثنائي ان يقوم بعمل الصمام الثنائي المفرغ ويمتاز عليه في كثير من النواحي التي سنأتي على ذكرها لاحقاً .

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 بعضها. ويتم هذا الجمع بتصنيع الثنائي على بلورة واحدة من مادة شبه موصلة بحيث يصبح احد نصفها سالب والاخر موجب وذلك عن طريق ادخال المادة الشائبة المناسبة الى نصف البلورة. وتدعى البلورة عندئذ بالبلورة الشائبة والثنائي البلوري وقد اشتهر استعمال نوعين من الثنائيات البلورية هما ثنائي السليكون وثنائي الجرمانيوم. والشكل (1) يوضح شكل ورمز الثنائي البلوري.



شكل (1) تركيب ورمز الوصلة الثنائية PN

• منطقة الاستنزاف Depletion region

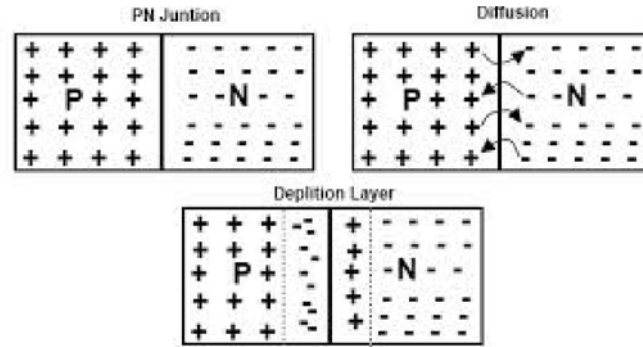
عند جمع نصفى الوصلة PN، وبسبب ان تركيز حاملات الشحنة (الالكترونات في النوع السالب والفجوات في النوع الموجب) هو أكبر بكثير مما هو في النوع الاخر اي وجود انحدار في تركيز الالكترونات ($\frac{dn}{dx}$) في المنطقة السالبة وكذلك انحدار في تركيز الفجوات ($\frac{dp}{dx}$) في المنطقة الموجبة، ذلك سيؤدي الى انتقال 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 اقل 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 إلكترونًا تكافؤيًا، كذلك

الفصل الثاني الثنائي البلوري

هو الحال بالنسبة للفجوات العابرة الى المنطقة (N) حيث تقوم بأقتناص الكترول حر من بين الاعداد الكبيرة المحيطة بها. حيث تتعادل حاملات الشحنة مع بعضها ويحصل ما يسمى بالتحام الالكترولون- فجوة (electron – hole recombination) فتصبح المنطقة القريبة من الفاصل خالية من ناقلات الشحنة الحرة من الجهتين N و P كما في الشكل (2) اذ تبقى الشحنات مقيدة على جهتي الفاصل (او الوصلة) وتدعى هذه المنطقة بمنطقة الاستنزاف (depletion region) او طبقة الاستنزاف (depletion layer).

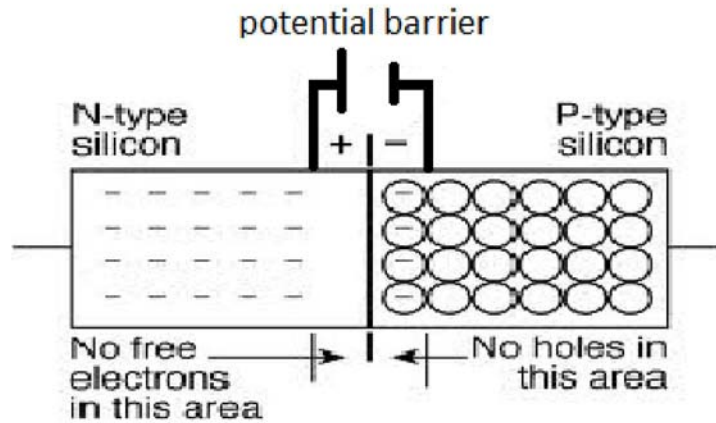
ان انتشار الحاملات وانتقالها من جهة الى اخرى لا يعني انتقال الذرات الام التابعة لها، ذلك لان الذرات الام تكون مرتبطة مع مثيلاتها من الذرات الاخرى بأواصر تساهمية يصعب كسرها، وانما يؤدي الى تكوين شحنتين مختلفتي الاشارة على جانبي الحد الفاصل في وصلة PN. ويسبب تخلف الايونات الموجبة في المنطقة (N) والايونات السالبة في المنطقة (P) كما في شكل (2). ان كل زوج متكون من الايون الموجب والسالب يدعى بثنائي القطب (dipole)، وان وجود مثل هذا الثنائي القطب يعني ان الكترولوناً واحداً من الكترولونات حزمة التوصيل وفجوة واحدة قد توقفنا 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) انتشار الحاملات خلال وصلة الثنائي وتكوين منطقة الاستنزاف

● جهد الحاجز (The potential barrier)

من المعروف ان وجود شحنتين مختلفتين ومفصولتين عن بعضها بمسافة سوف يعمل على خلق مجال كهربائي يؤدي بدوره الى احداث جهد كهربائي. ونتيجة لانتقال حاملات الشحنة بين نصفي الوصلة يزداد عدد الالكترولونات 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 الالكترولونات الحرة لن تتمكن من العبور من (N) الى (P) بسبب القوة المعاكسة الناتجة من المجال المتولد، كذلك فإن 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 (3) يبين وصلة ال PN مع الجهد الحاجز V_B .

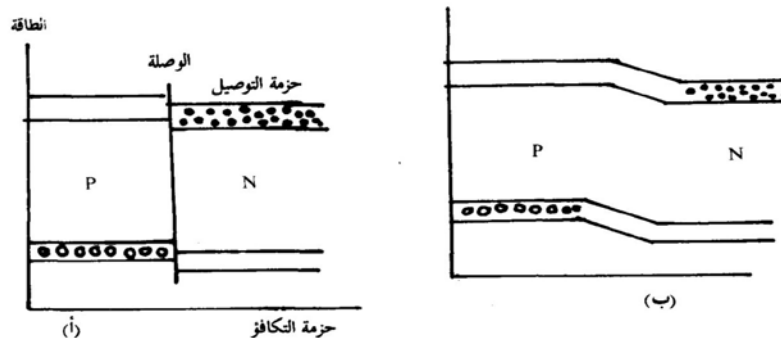


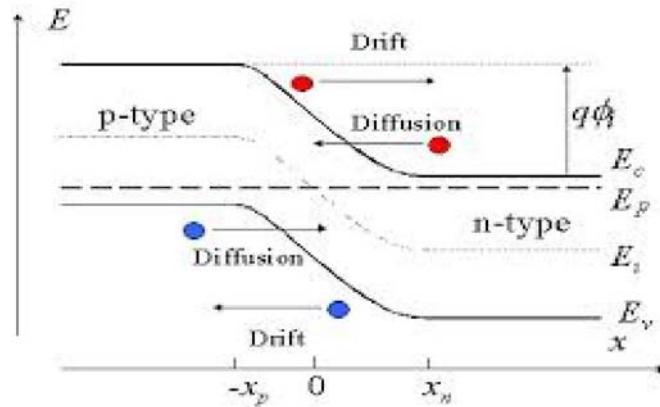
شكل (3) الجهد الحاجز للوصلة الثنائية PN

• مخطط الطاقة لوصلة PN

ان انتشار الالكترونات والفجوات عبر وصلة PN لا ينتج عنه طبقة الاستنزاف وحسب بل يغير ايضاً مستويات الطاقة في منطقة الوصلة. يلاحظ في الشكل (4-أ) حزم الطاقة قبل انتشار الالكترونات عبر الوصلة وقد احتوت الجهة (P) على العديد من الفجوات في حزمة التكافؤ بينما تحتوي الجهة (N) على العديد من الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل كذلك يلاحظ ان حزم الطاقة للمنطقة (P) قد رسمت اعلى قليلاً من حزم الطاقة للمنطقة (N). ان سبب ذلك يعود الى ان ارتباط الالكترونات بالنواة في ذرات خماسية التكافؤ يكون اقوى من ارتباط الالكترونات بالنواة في ذرات ثلاثية التكافؤ ومن ثم فأن الطاقة الكامنة للالكترونات في الذرات الخماسية التكافؤ تكون اصغر من الطاقة الكامنة للالكترونات في الذرات الثلاثية التكافؤ، اي ان الطاقة اللازمة لتحريرها تكون اكبر. ولهذا فأن المدارات في ذرة ثلاثية التكافؤ (جهة P) تكون اكبر بقليل من مدارات ذرة خماسية التكافؤ (جهة N) وهذا يشرح سبب كون حزم (P) اعلى قليلاً من حزم (N).

يبين الشكل (4-ب) مخطط الطاقة بعد ان يتم التوازن ويلاحظ فيها ان حزم (P) قد تحركت الى الاعلى نسبة الى حزم (N) وذلك بسبب عبور الالكترون للوصلة فأنه سوف يملأ فجوة احدى الذرات الثلاثية التكافؤ وبالتالي فان هذا الالكترون الاضافي سيرفع مدار حزمة التوصيل بعيداً عن الذرة الثلاثية او بعبارة اخرى ان اي الكترون اخر يأتي الى المنطقة (P) سوف يحتاج الى طاقة اكبر من طاقة الالكترون السابق ليدخل الى مدار نطاق التوصيل وهذا هو سبب تحرك حزم (P) الى الاعلى نسبة الى حزم (N) بعد ان تكون طبقة الاستنزاف قد تكونت.





شكل (4) مستويات الطاقة للثنائي البلوري: أ- قبل الانتشار. ب- بعد الانتشار في حالة توازن.

• وصلة PN في حالة الاستقرار (عدم الانحياز)

ذكرنا سابقاً ان وجود انحدار في تركيز الالكترونات والفجوات عبر وصلة PN سيعمل على انتشار هذه الحاملات الاكثريّة عبر الوصلة. ان انتقال الحاملات الاكثريّة نتيجة للانتشار سوف يؤدي الى احداث تيار الانتشار، وفقاً لمعادلة الانتشار التالية:

$$J_{Dn} = qD_n \frac{dn}{dx} \quad \dots\dots\dots (1)$$

حيث يمثل J_{Dn} كثافة تيار الانتشار الناتج عن الالكترونات التي تنتشر من الجانب N الى الجانب P ويمثل D_n ثابت الانتشار للالكترونات ويقاس بالمتر المربع لكل ثانية. وهناك معادلة مشابهة بالنسبة لكثافة انتشار التيار الناتج عن الفجوات:

$$J_{Dp} = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad \dots\dots\dots (2)$$

الاشارة السالبة تعني ان حركة الفجوات تكون بعكس حركة الالكترونات وعليه فان محصلة كثافة تيار الانتشار في وصلة PN

$$J_D = J_{Dn} + J_{Dp} = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx} \quad \dots\dots\dots (3) \quad \text{تساوي:}$$

ومن جهة اخرى فأن وجود جهد الحاجز والناتج بسبب عملية الانتشار، سوف يعمل على تحريك الحاملات الاقلية في كل من المنطقتين N و P مؤدياً بذلك الى احداث تيار يسمى بتيار التوصيل. وحيث ان الحاملات الاقلية تتكون هي الاخرى من نوعين، الالكترونات والفجوات، لذا فأن تيار التوصيل يتكون هو الاخر من مركبتين هما:

$$J_e = \sigma_e E = nq\mu_e E \quad \dots\dots\dots (4) \quad \text{(كثافة تيار التوصيل للالكترونات)}$$

$$J_h = \sigma_h E = pq\mu_p E \quad \dots\dots\dots (5) \quad \text{(كثافة تيار التوصيل للفجوات)}$$

تمثل n ، p عدد كل من الالكترونات والفجوات الاقلية وعلى التوالي. بما تمثل μ_e ، μ_p تحريكية كل من الالكترونات والفجوات. وعند جمع المعادلتين اعلاه فأن كثافة تيار التوصيل الكلي يساوي:

$$J_C = (\mu_e n + \mu_p p) q E \quad \dots\dots (6)$$

وبذلك تكون محصلة التيار الساري في وصلة PN بسبب حركة الالكترونات تكون مساوية لتيار الانتشار + تيار التوصيل اي ان:

$$J_n = J_e + J_{Dn} = nq\mu_e E + qD_n \frac{dn}{dx} \quad \dots\dots (7)$$

$$J_p = J_h + J_{Dp} = pq\mu_h E - qD_p \frac{dp}{dx} \quad \dots\dots (8)$$

وكذلك بالنسبة لمحصلة التيار الناتج عن حركة الفجوات:

على اي حال تكون محصلة التيار الكلي (J) في وصلة PN في حالة انعدام الجهد الخارجي مساوي لمجموع تيار الانتشار و تيار التوصيل:

$$J = J_D + J_C \quad \dots\dots\dots (9)$$

في حالة التوازن الحركي لوصلة PN يتساوى هذان التياران مقدراً ويتعاكسان اتجاهاً وبالتالي يكون التيار الكلي (J) المار خلال الوصلة PN مساوياً للصفر. وهذا هو المفروض في حالة انعدام الجهد الخارجي.

وبعبارة اخرى ان الجهد الحاجز سيأخذ دائماً تلك القيمة او الوضع الذي يكفل التعادل بين تيار الانتشار والتوصيل.

لنفرض الان ان تيار الانتشار قد ازداد بسبب ارتفاع درجة الحرارة ان هذه الزيادة في تيار الانتشار معناها عبور عدد أكبر من الالكترونات الى الجهة (P) وكذلك عبور عدد أكبر من الفجوات الى المنطقة (N) مؤدية الى زيادة عدد الايونات المتخلفة وبالتالي الى زيادة قيمة الجهد الحاجز. ان نمو ارتفاع الجهد الحاجز سوف يؤدي الى زيادة مقابلة في تيار التوصيل اي الى انتقال الحاملات الاقلية في الاتجاه العكسي وطالما ان $J_C < J_D$ يتواصل نمو ارتفاع الجهد الحاجز وفي نهاية المطاف ونتيجة لزيادة J_C يحدث الاتزان $J_C = J_D$ ويتوقف نمو V_B .

• حساب الجهد الحاجز

لقد ذكرنا سابقاً بان جهد الحاجز يأخذ دائماً القيمة او الوضع الذي يكفل فيه حصول التعادل بين تيار الانتشار (الناتج من الحاملات الاكثرية) و تيار التوصيل (الناتج من الحاملات الاقلية)، ويمكن ذلك بجعل معادلة (7)، ومعادلة (8) مساوية للصفر:

$$J_n = J_e + J_{Dn} = 0 \quad \rightarrow \quad J_e = -J_{Dn} \quad \rightarrow \quad nq\mu_e E = -qD_n \frac{dn}{dx} \quad \dots\dots (10)$$

$$\frac{dn}{n} = -\frac{\mu_e}{D_n} E dx \quad \dots\dots (11)$$

$$\frac{D_n}{\mu_e} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{q} \quad \dots\dots\dots (12)$$

حيث من معادلة انشتاين في الانتشار

$$\frac{dn}{n} = -\frac{q}{KT} E dx \quad \dots\dots (13)$$

وبتعويض عن قيمة $\frac{D_n}{\mu_e}$ من معادلة (12) في معادلة (11) نحصل على:

وبأخذ التكامل عبر الوصلة PN اي ان:

$$\int_{n_p}^{n_n} \frac{dn}{n} = \frac{q}{KT} \int_{x_1}^{x_2} (-E) dx \quad \dots\dots\dots (14)$$

حيث ان $V = - \int E dx$ وعليه فأن معادلة (14) تصبح بعد اجراء التكامل:

$$n_n = n_p e^{V_B / \frac{KT}{q}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

هذه المعادلة تمثل العلاقة بين كثافة الالكترونات عند حافة طبقة الاستنزاف في المنطقة N وكثافتها عند حافة الطبقة في المنطقة P من وصلة الشائ. ومن جهة اخرى يمثل الاس $V_B / \frac{KT}{q}$ نسبة قيمة حاجز الجهد الى معدل الطاقة للشحنات او بعبارة اخرى هو معدل قدرة هذه الشحنات لعبور هذا الحاجز الجهدي.

$$p_p = p_n e^{V_B / \frac{KT}{q}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

وباتباع نفس الخطوات اعلاه نحصل على معادلة لكثافة الفجوات:

المعادلتين (15) ، (16) تعرفان بمعادلتى بولتزمان (Boltzmann equations)

عند وضع $n_n = N_D$ ، $n_p = n_i^2 / N_A$ وبتعويضها في المعادلة اعلاه نحصل على:

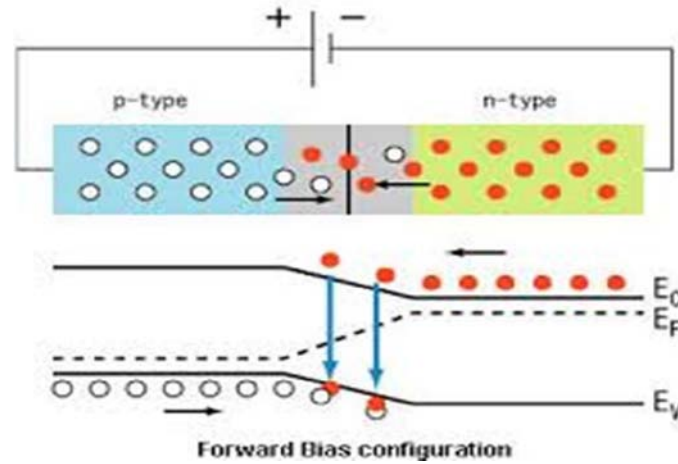
$$V_B = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ان اهمية المعادلة (17) تكمن في حقيقة ان V_B قد تم حسابه بدلالة كثافة الذرات الشائبة التي سببت وجوده.

• أنحياز الوصلة PN (Biasing of PN junction)

اذا ربط مصدر جهد خارجي على الوصلة PN فإنه يدعى جهد الانحياز (bias) وان هذا الجهد قد يزيد او يقلل من جهد الوصلة (V_B) معتمداً على ربط اقطاب هذا الجهد الى طرفي الوصلة PN.

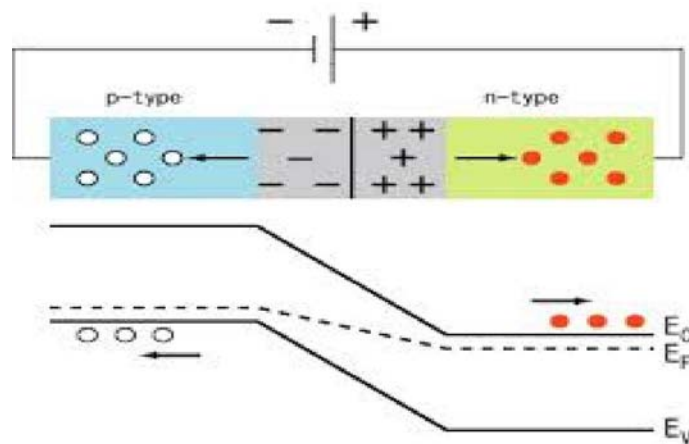
فإذا سلطت فولتية انحياز بحيث يكون القطب الموجب على P والقطب السالب على N، كما في الشكل (5) ، فأن الفجوات في منطقة P تتحرك مبتعدة عن القطب الموجب فتحاول عبور الحاجز الى المنطقة N. وكذلك فان الالكترونات في المنطقة N تتحرك مبتعدة عن القطب السالب نحو المنطقة P. وهذه الحاملات سوف تتحد مع الشحنات المقيدة في منطقة الاستنزاف وتتعاذل معها مما يؤدي الى انخفاض جهد الوصلة تدريجياً. وباستمرار زيادة الجهد المجهز الى ان يزول (V_B) نهائياً مسبباً عبور حاملات الشحنة بعد ذلك بدون مقاومة تذكر. ويسمى جهد الانحياز في هذه الحالة بجهد الانحياز الامامي (forward bias) ولهذا فأن جهد الانحياز الامامي يسبب ممانعة قليلة للتيار وتشارك فيه حاملات الشحنة الاقلية والاعلبية معاً.



شكل (5-3) الانحياز الامامي للوصلة الثنائية (PN junction).

يبين الشكل (5) تأثير الانحياز الامامي على مستويات الطاقة، حيث تتقارب حزمتي التوصيل والتكافؤ مع مثيلتيهما في كلا المادتين وبذلك يسهل انتقال حاملات الشحنة من احد الطرفين الى الطرف الاخر وهي في نفس مستوي الطاقة وذلك لاختفاء الحاجز الجهدي. اما توزيع الشحنات المقيدة عبر الوصلة فإنه سينخفض تدريجياً ثم يزول بزوال الحاجز الجهدي.

و عند تسليط جهد انحياز بحيث يكون القطب الموجب مربوط الى الطرف N والقطب السالب مربوط الى الطرف P فإنه يدعى بالانحياز المعكوس (reverse bias)، وفيه تنجذب الالكترونات والفجوات بعيداً عن الحاجز بفعل اقطاب المصدر الخارجي وينتج عن هذا اتساع في منطقة الافراغ لان حاملات الحرة ستبتعد عن الحاجز ويزيد عدد ايونات الذرات الشائبة وعندئذ يزداد المجال الكهربائي المتولد في منطقة الاستنزاف ويزيد معه جهد الحاجز مما يتعذر على الشحنات الاغلبية الاشتراك في التيار الكهربائي. وكذلك يزداد سمك منطقة الافراغ ويزداد تركيز الشحنات المقيدة كما في الشكل (6). اما مستويات الطاقة للوصلة الثنائية في حالة الانحياز العكسي حيث تزداد الهوة بين حزمتي التكافؤ والتوصيل مع مثيلتيهما في كلا المادتين وبذلك تزداد صعوبة عبور ناقلات الشحنة الاغلبية.



شكل (6) الانحياز العكسي للوصلة الثنائية (PN junction).

الفصل الثاني الثنائي البلوري

اما في درجات الحرارة الكافية لتوليد ازواج الكترون- فجوة في كل من N و P (في درجة حرارة الغرفة) فأن الفجوات وهي ناقلات الشحنة الاقلية في المنطقة N تحاول ان تباعد عن القطب الموجب فتقترب من الحاجز وعند امتلاكها الطاقة الكافية تعبره. وكذلك فان الالكترونات وهي ناقلات الشحنة الاقلية في المنطقة P حيث تتنافر مع القطب السالب عابرة من المنطقة P الى المنطقة N. ولهذا فأن هذا التيار المتكون من انتقال حاملات الشحنة الاقلية فقط يمثل تيار التسرب (leakage current) في حالة الانحياز المعكوس. وبما ان حاملات الشحنة الاقلية ناتجة من التأين الحراري لذا فهي تزداد بارتفاع درجات الحرارة ولهذا يزداد تيار التسرب مع ارتفاع درجات الحرارة.

منحني المميز للوصلة PN (Characteristics of PN junction)

تدعى العلاقة بين جهد الانحياز والتيار المار في الوصلة PN بمنحني الميزة او منحني التيار- جهد (I-V characteristics) وينقسم هذا المنحني الى ثلاث مناطق معتمداً على جهد الانحياز، وهذه المناطق هي منطقة الانحياز الامامي ومنطقة الانحياز العكسي ومنطقة الانهيار (breakdown region).

- فعند زيادة جهد الانحياز الامامي تدريجاً من الصفر، لا يمر تيار، الى ان تصل قيمة الجهد المسلط الى جهد الوصلة V_B حيث تتم معادلة جميع الايونات او الشحنات المقيدة في منطقة الاستنزاف وبعد ذلك يبدأ التيار بالزيادة بشكل سريع كما في الشكل (7) اي ان المقاومة التي تبديها الوصلة تصبح صغيرة جداً.

يمكن اعادة كتابة معادلتى بولتزمان (15)، (16) بالطريقة التالية:

$$p_n = p_p e^{-V_B/\frac{KT}{q}} \dots\dots\dots (18)$$

$$n_p = n_n e^{-V_B/\frac{KT}{q}} \dots\dots\dots (19)$$

عند تسليط جهد انحياز اممي V على وصلة الـ PN فأن الجهد الحاجز يصبح عندئذ مساوياً $(V_B - V)$ وتصبح كثافة الفجوات:

$$p_n + \Delta p_n = p_p e^{-(V_B - V)/\frac{KT}{q}} = p_p e^{-V_B/\frac{KT}{q}} e^{V/\frac{KT}{q}} \dots\dots\dots (20)$$

هذه الزيادة في عدد الفجوات Δp_n تكون بسبب ان هناك عدد أكثر من الفجوات والتي اصبحت تمتلك الطاقة الكافية التي تمكنها من اجتياز حاجز الجهد الجديد والمختزل الى قيمة اقل (بفعل الجهد الخارجي المعاكس لجهد الوصلة). وبطبيعة الحال هذا يعود الى تسليط جهد انحياز V .

كذلك يزداد عدد الالكترونات في الجهة المقابلة من طبقة الاستنزاف بحيث ان:

$$n_p + \Delta n_p = n_n e^{-(V_B - V)/\frac{KT}{q}} = n_n e^{-V_B/\frac{KT}{q}} e^{V/\frac{KT}{q}} \dots\dots\dots (21)$$

عند طرح المعادلة (18) من معادلة (20) نحصل على مقدار الزيادة في كثافة الفجوات:

$$\Delta p_n = p_p e^{-V_B/\frac{KT}{q}} (e^{V/\frac{KT}{q}} - 1) \dots\dots\dots (22)$$

وبنفس الطريقة عند طرح المعادلة (19) من المعادلة (21) نحصل على مقدار الزيادة في كثافة الالكترونات:

$$\Delta n_p = n_n e^{-V_B/KT/q} (e^{V/KT/q} - 1) \dots\dots\dots (23)$$

الان على فرض ان A تمثل مساحة الوصلة و v_h معدل سرعة الفجوات فأن حاصل الضرب $\Delta p_n e v_h$ سوف يمثل مركبة التيار الناتج عن الفجوات المحقونة الى المنطقة N اي ان:

$$I_h = p_p e v_h e^{-V_B/KT/q} (e^{V/KT/q} - 1)$$

$$I_h = B_h (e^{V/KT/q} - 1) \dots\dots\dots (24)$$

وبنفس الطريقة يمكن إيجاد ان مركبة التيار الناتج عن الالكترونات المحقونة الى المنطقة P تكون:

$$I_e = B_e (e^{V/KT/q} - 1) \dots\dots\dots (25)$$

وبالتالي فأن التيار الكلي يساوي:

$$I_F = I_h + I_e = (B_h + B_e) (e^{V/KT/q} - 1) \dots\dots\dots (26)$$

● اما عند تسليط جهد انحياز معكوس على وصلة الـ PN ، فأن المجال الكهربائي الخارجي المسلط يؤثر في نفس اتجاه مجال الجهد الحاجز وبالتالي فأن الحاملات الاكثية (الفجوات والالكترونات) سوف تتحرك بعيداً عن الملتقى PN لتخلف وراءها الايونات السالبة والموجبة الاضافية ولهذا السبب يزداد عرض منطقة الاستنزاف كلما ازداد الانحياز العكسي (جهد الانحياز)، وبذلك فأن تياراً صغيراً معكوساً يمر خلال الوصلة ويسمى بتيار التسرب ($leakage current$) او التيار المعكوس ($reverse current$) ويكون ثابتاً بتغير الجهد ولكن يجب ان لا يتعدى الجهد المعكوس عن حد معين بحيث يبدأ تيار معكوس كبير بالمرور ويصل الثنائي الى منطقة الانهيار.

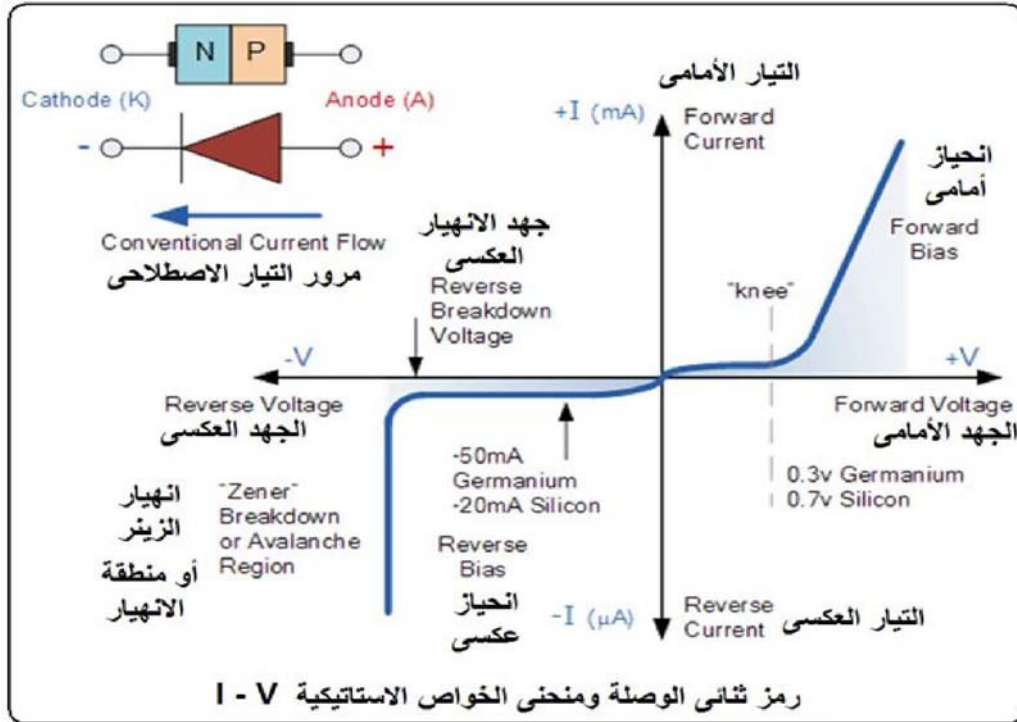
عند تسليط جهد انحياز عكسي V على وصلة الـ PN فأن الجهد الحاجز يصبح عندئذ مساوياً $(V_B + V)$ ، وعند التعويض في معادلة (26) عن V بـ $(V_B + V)$ فأن الكمية $(e^{-V/KT/q} - 1)$ سوف تكون صغيرة الى الحد الذي يمكن اهمالها اي ان:

$$I_R = I_S = -(B_h + B_e) \dots\dots\dots (27)$$

وبالتالي فأن معادلة الفولتية – التيار للثنائي البلوري تصبح بالشكل التالي:

$$I = I_S (e^{V/KT/q} - 1) \dots\dots\dots (28)$$

حيث تمثل (I_S) تيار الاشباع العكسي او تيار التسرب، الناتج عن حركة الازواج الكترون- فجوة المنتجة حرارياً. ويعود سبب ثبوت تيار الاشباع المعكوس الى كونه ناتج عن انتقال الشحنات الاقلية وهي ذات عدد محدود اولاً، ولان الزيادة في الجهد الانحياز العكسي يصاحبه زيادة في عرض منطقة الاستنزاف وكثافة الشحنات المقيدة فيها مما يعرقل مرور حاملات الشحنة الاقلية هذه.



شكل (7) منحنى التيار- الجهد للثنائي البلوري

● جهد الانهيار (Breakdown Voltage)

للتعرف على جهد الانهيار او الانكسار سوف نقوم بالاجابة على السؤال التالي:

الى اي حد يمكن ان يزداد عرض منطقة الاستنزاف بزيادة جهد الانحياز العكسي، وهل يمكن زيادة الجهد العكسي الى المالا نهاية؟

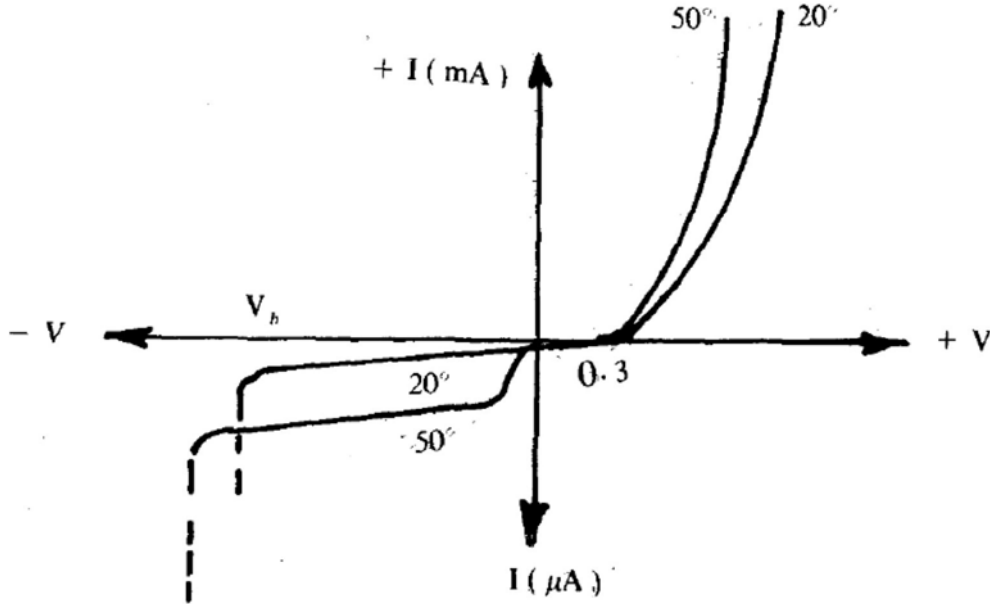
ان كل من الالكترونات والفجوات سوف تهرب مبتعدة عن الملتقي مخلقة وراءها ايونات موجبة وسالبة عند منطقة الاستنزاف وعليه فان الايونات الجديدة سوف تزيد من فرق الجهد على طبقة الاستنزاف وكلما زاد عرض طبقة الاستنزاف كبر فرق الجهد عبرها ويتوقف نمو طبقة الاستنزاف عندما يتساوى فرق جهدها مع الجهد الخارجي العكسي المسلط عليها.

ولا يمكن زيادة الجهد العكسي الى المالا نهاية، وذلك لان الاستمرار في زيادة الفولتية العكسية سوف يؤدي الى زيادة شدة المجال الكهربائي عبر الوصلة بشكل كبير وبالتالي تتعجيل ناقلات الشحنة الاقلية ومن ثم زيادة سرعتها بدرجة كبيرة. لذلك فان زيادة جهد الانحياز العكسي عن الحد المعين (جهد الانكسار *breakdown voltage*) سوف يعمل على اكساب الحاملات الاقلية طاقة كبيرة يجعلها قادرة على تحرير الكترونات التكافؤ للذرات الاخرى عند اصطامها بها. ان هذه الالكترونات الاخيرة قد تمتلك قدراً من الطاقة يجعلها قادرة على تحرير الكترونات اخرى من الذرات الاخرى وبهذه الطريقة سوف نحصل على عدد من الالكترونات الحرة والتي يتضاعف عددها بسرعة كبيرة جداً مؤديا الى ما يسمى بالانهيار الكهربائي (*electrical breakdown*) والذي يعمل على الاخلال بالاستقرار الحراري للوصلة الثنائية. وهكذا يزداد التيار مع زيادة بسيطة في فولتية الانحياز العكسي. وتدعى هذه العملية بالانهيار التهديمي (*avalanche breakdown*) والجهد الذي عنده يحصل الانهيار يسمى بجهد الانهيار (*breakdown voltage*).

• تأثير درجة الحرارة على الثنائي البلوري

ان درجة الحرارة التي يعمل فيها الثنائي تؤثر على خصائصه الكهربائية والسبب الرئيسي في ذلك يعود الى ازدياد حاملات الشحنة الاقلية بسبب ازواج الالكترون - فجوة الذي ينتج من اكتساب الكترون من حزمة التكافؤ طاقة كافية فيقفز الى حزمة التوصيل تاركاً فجوة في محله. ومن نتائج ازدياد حاملات الشحنة الاقلية هو انخفاض جهد الوصلة V_B بسبب الانخفاض النسبي بين تركيز حاملات الشحنة الاغلبية والاقلية. وكذلك يقل عرض منطقة الاستنزاف مؤدياً الى انخفاض جهد الانهيار. ومن النتائج السلبية لارتفاع درجة الحرارة هو ازدياد تيار التسرب او الاشباع الناتج من الحاملات الاقلية. وترجع خطورة هذه النقطة الى فقدان خاصية مهمة للثنائي البلوري وهي منع مرور التيار في الانحياز العكسي. ويوضح الشكل (3-8) منحنى (I-V) للثنائي البلوري عند درجتى حرارة مختلفتين لثنائي بلوري الجيرمانيوم.

يلاحظ من شكل (8) ان التيار الامامي لا ينمو عند رفع درجة الحرارة بنفس القوة التي ينمو فيها التيار العكسي، وذلك لان التيار الامامي يعتمد اساساً على تركيز الشوائب (الواهة والقابلة) ولا علاقة له بدرجة الحرارة، الا ان رفع درجة الحرارة يزيد من تيار الاشباع I_S وبالتالي فإن الجهد الحاجز يجب ان يقل ليسمح عندئذ للحاملات الاكثريّة بالانتشار للوصول الى حالة الاتزان الحركي على فرض ان الجهد الخارجي المسلط يساوي صفر. وبالتالي يمكن القول ان انخفاض الجهد الحاجز مع ارتفاع درجة الحرارة هو السبب المباشر وراء زيادة التيار الامامي. ومن الجدير بالملاحظة ان التيار الامامي لا يبدأ بالسريان الا عند جهد معين يدعى بجهد العتبة (*threshold voltage*) او جهد القطع ويتناسب جهد العتبة عكسياً مع تيار التشبع العكسي.



شكل (8) منحنى (I-V) لثنائي بلوري الجيرمانيوم عند درجتى حرارة مختلفة.

مثال/ اذا كان تيار الاشباع I_S يتغير من 10^{-14} الى 10^{-9} عند تغير درجة الحرارة من 20°C الى 125°C ، احسب V_B في كلا الحالتين على فرض ان التيار الامامي يبقى ثابتاً عند القيمة (1 mA) .

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

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

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

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

• الدائرة المكافئة للثنائي البلوري

بعد ان تعرفنا على سلوك الثنائي البلوري عند وقوعه تحت تأثير جهد مستمر سنقوم هنا باستبدال الثنائي بنموذج (model) يتصرف كهربائياً بنفس الطريقة التي يتصرف بها الثنائي وبالتالي يصبح هذا النموذج او الدائرة المكافئة للثنائي اداة مفيدة لتحليل وتصميم دوائر الثنائيات.

يتم الحصول على النموذج المناسب للثنائي البلوري من خلال منحنى الخواص (I-V) للثنائي. وذلك على النحو التالي: يتم تقريب المنحنى بين الفولتية $(0 \rightarrow 0.35) \text{ V}$ - مثلاً - بخط مستقيم، كما موضح بالخط الموضح OA في الشكل (9). وتكون العلاقة بين الفولتية والتيار خطية لذلك بالامكان اعتبار الثنائي في المدى $(0 \rightarrow 0.35) \text{ V}$ مقاومة تكون قيمتها تبعاً للشكل (9) مساوية لـ $(\frac{0.28}{0.006} = 47 \Omega)$. وعلى هذا الاساس يعرف الخط المتقطع OA بالمقاومة الامامية المستمرة للثنائي (D.C forward resistance) ويرمز لها بالرمز r_F .

على اية حال، تمثل r_F مقاومة الثنائي عند نقطة واحدة وهي $(0.28 \text{ V}, 0.006 \text{ A})$ ومن ثم فان هذه المقاومة سوف تختلف من نقطة على المنحنى الى نقطة اخرى. لذلك فان المقاومة من نوع $\frac{\Delta V}{\Delta I}$ ستكون اكثر اهمية لانها تمثل مقاومة الاشارة الصغيرة التي تربط بين التيار المتناوب والفولتية المتناوبة. فاذا كانت I_a تمثل القيمة الانية لتيار الانود و V_a تمثل القيمة الانية لفولتية الانود فأن:

$$r_f = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} \quad \text{or} \quad r_f = \frac{dV_a}{dI_a}$$

حيث تعرف r_f بمقاومة الثنائي الامامية الحركية (dynamic forward resistance) فاذا كانت V_a تتغير حول القيمة 0.28 V

فان المقاومة الحركية سوف تكون مساوية لانحدار الخط CD في الشكل (3-9) اي ان: $(r_f = \frac{0.1}{0.01} = 10 \Omega)$.

الفصل الثاني الثنائي البلوري

$$I = I_S(e^{qV/KT} - 1)$$

كما يمكن حساب r_f من استخدام معادلة الثنائي:

$$\frac{dI}{dV} \approx \left(\frac{q}{KT}\right) I = \frac{1}{r_f}$$

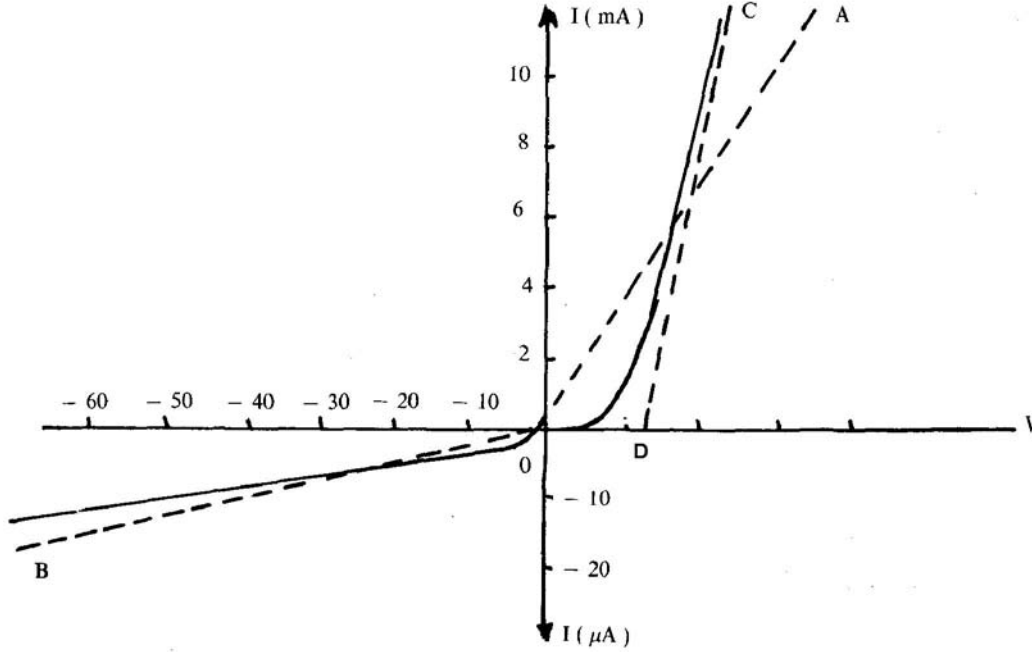
وذلك باخذ التفاضل لهذه المعادلة بالنسبة لـ V

$$r_f = \frac{KT}{qI} = \frac{0.026}{I} = \frac{26}{I(mA)}$$

لذا فأن:

$$r_f = \frac{26}{6} = 4.33\Omega$$

وعليه فان r_f سوف تكون في حال كون $I=6mA$ انظر الشكل (9) تساوي:



شكل (9) حساب r_f العملية من منحنى الخواص

ان المقاومة 10Ω تمثل القيمة العملية لمقاومة الثنائي المحسوبة بتقريب جيد اما المقاومة 4.33Ω فتمثل القيمة النظرية المحسوبة من معادلة الثنائي معادلة (28). على الرغم من ان القيمة الثانية (4.33Ω) هي التي يفترض فيها ان تكون القيمة الفعلية الا ان القياسات العملية تشير الى القيمة الاولى (10Ω) هي القيمة الفعلية لمقاومة الثنائي، وعليه فأن مقاومة الثنائي تتكون من المقاومة النظرية r_f ومقاومة اخرى (R_S) مربوطة معها على التوالي كما في الشكل (3-10) بحيث تكون قيمة (R_S) تساوي:

$$(R_S) = 10 - 4.33 = 5.67\Omega$$

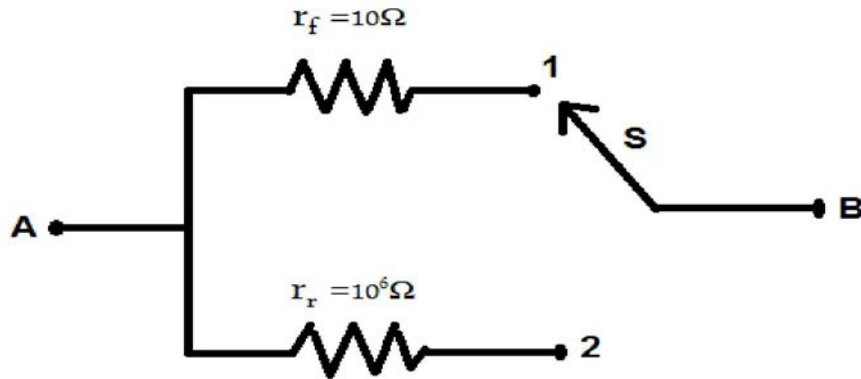


شكل (10)

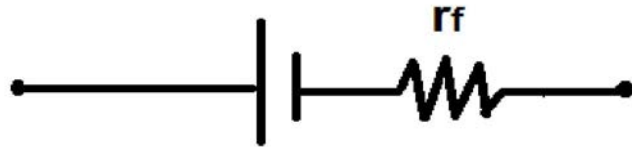
يمكن اعتبار الشكل (10) الدائرة المكافئة للثنائي البلوري المنحاز امامياً. ويمكن ايجاد الدائرة المكافئة للثنائي البلوري في حالة انحيازه عكسياً، بنفس الطريقة اعلاه حيث يتم تقريب منحنى الانحياز العكسي في الشكل (9) بالخط OB اي ان:

$$(r_r = \frac{V_a}{I_a} = \frac{10}{10 \times 10^{-6}} = 1M\Omega)$$

وبالتالي فإن الدائرة المكافئة للثنائي البلوري في كلا الاتجاهين سوف تكون كما في الشكل (11). وعلى الرغم من ان الدائرة في الشكل (11) تعد تقريبا جيداً للدائرة المكافئة للثنائي البلوري الا انه يجب ان لا ننسى ان التيار لا يبدأ بالسريان في حالة الانحياز الامامي الا عندما تكون فولتية المصدر الخارجي مساوية لجهد العتبة او جهد الوصلة والذي يساوي 0.7V للسليكون و 0.3V للجيرمانيوم، وبالتالي فإن الدائرة المكافئة التي تكشف عن السلوك الكهربائي للثنائي البلوري تكون كما في الشكل (12).



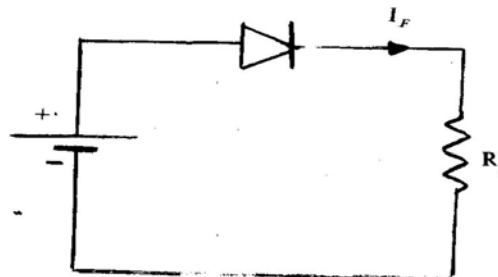
شكل (11) الدائرة المكافئة للثنائي البلوري في حالة الانحياز الامامي r_f وفي حالة الانحياز العكسي r_r



شكل (12) الدائرة المكافئة للثنائي المنحاز امامياً

• تحليل دائرة الثنائي: خط الحمل (Load – Line)

يبين الشكل (13) دائرة بسيطة واساسية من دوائر الثنائي وتتكون من مصدر فولتية خارجي V_s ومقاومة R مربوطة على التوالي مع الثنائي والمطلوب ايجاد قيمة التيار المار في المقاومة R او بعبارة اخرى التعرف على طبيعة ومقدار الفولتية الخارجة. وذلك باستخدام طريقة خط الحمل Load Line .



شكل (13) دائرة الثنائي المنحاز امامياً

الفصل الثاني الثنائي البلوري

من الواضح في هذه الدائرة ، ان الثنائي منحاز امامياً حيث تم ربط الانود من الثنائي الى القطب الموجب لمصدر الجهد وعليه فانه من المتوقع ان التيار الساري في الدائرة I_F سيكون من نوع تيار امامي وبالتالي فان المطلوب ايجاد قيمة هذا التيار I_F وكذلك مقدار الهبوط في الجهد عبر الثنائي V_F .

$$V_S = V_F + V_L$$

من الشكل (13) يكون:

$$V_S = V_F + I_F R$$

على فرض ان التيار المار في الدائرة هو I_F فان:

$$V_F = V_S - I_F R \quad \dots\dots\dots (29)$$

تمثل المعادلة (29) معادلة خط مستقيم وتربط بين V_F ، I_F لقيم معينة من V_S ، R ويسمى هذا الخط بخط الحمل Load Line ويتم رسمه على النحو التالي: يتم تعيين النقطة الاولى من هذا الخط، على المحور الصادي حيث ان $V_F=0$ فان

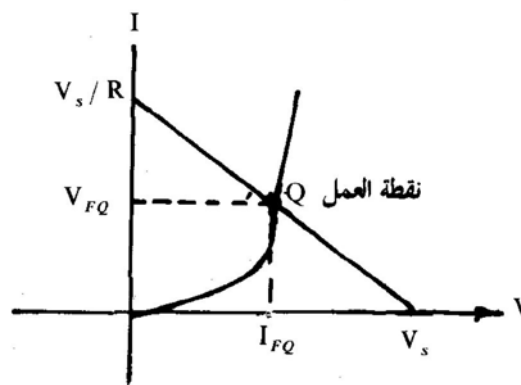
$$I_{F(max)} = \frac{V_S}{R} \quad \dots\dots\dots (30)$$

وهكذا تتحدد النقطة الاولى بـ $(0, \frac{V_S}{R})$ ، ويتم تحديد النقطة الثانية على المحور السيني حيث تكون $I_F=0$ وبذلك يكون:

$$V_{F(max)} = V_S \quad \dots\dots\dots (31)$$

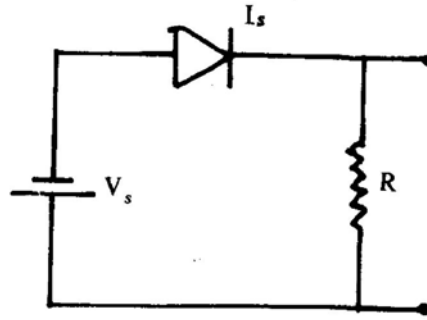
وبذلك تكون النقطة الثانية $(V_S, 0)$

اخيراً يتم رسم خط مستقيم بين هاتين النقطتين ويدعى هذا الخط عندئذ بخط الحمل لدائرة الثنائي وتسمى نقطة تقاطع خط الحمل مع المنحنى $(I-V)$ للثنائي بنقطة تشغيل الثنائي operating point ويرمز لها بـ Q وهي تمثل قيمة التيار I_{FQ} في دائرة الثنائي ومقدار الهبوط في الجهد V_{FQ} عبر الثنائي.

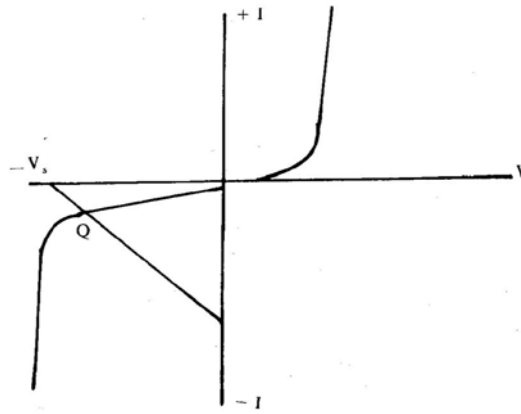


شكل (14) خط الحمل للثنائي البلوري

وباستخدام نفس الطريقة اعلاه يتم تحديد نقطة عمل الثنائي البلوري المنحاز عكسياً الموضح في الشكل (15). ويمثل الشكل (16) خط الحمل لهذه الدائرة



شكل (3-15) دائرة الثنائي المنحاز عكسياً



شكل (4-16) منحنى الخواص مع خط الحمل للثنائي المنحاز عكسياً

شكل (3-23) منظم الجهد