

الفصل الثاني : فيزياء اشباه الموصلات (Physics of Semiconductors)

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 غالباً، حيث يكون التركيب البلوري لهذه الصفوف متشابه للابعاد الثلاثة ومن هذا الانتظام تتشكل وحدات او خلايا مكونة الشبيكة 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 الثنائي البلوري والترانزستورات

ان موصلية (conductivity) المواد شبه الموصلة تقع بين موصلية العوازل مثل الكوارتز (quartz) والتي تكون بحدود $10^{-6} (\Omega \cdot m)^{-1}$ بينما تلك للموصلات تقع في حدود $10^6 \rightarrow 10^8 (\Omega \cdot m)^{-1}$ فمثلاً النحاس له موصلية تساوي $58 \times 10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}$ اما موصلية المواد شبه الموصلة فهي في حدود $10^{-2} \rightarrow 10^{-3} (\Omega \cdot m)^{-1}$ في درجة حرارة الغرفة (25°C).

• مستويات الطاقة (Energy Levels)

يملك كل الكترون طاقة معينة ضمن المستوي الذي يدور فيه. واذا 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. اي ان الالكترون 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 الالكترونات تسمى المناطق المحرمة او المحظورة (forbidden regions). يتشبع المدار الاول بالكترنين فقط. اما المدار الثاني فإنه يتشبع بثمانية الكترونات والثالث يتشبع بثمانية عشر الكترون 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 الالكترونات (عندما تكون مشبعة) كالآتي:

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

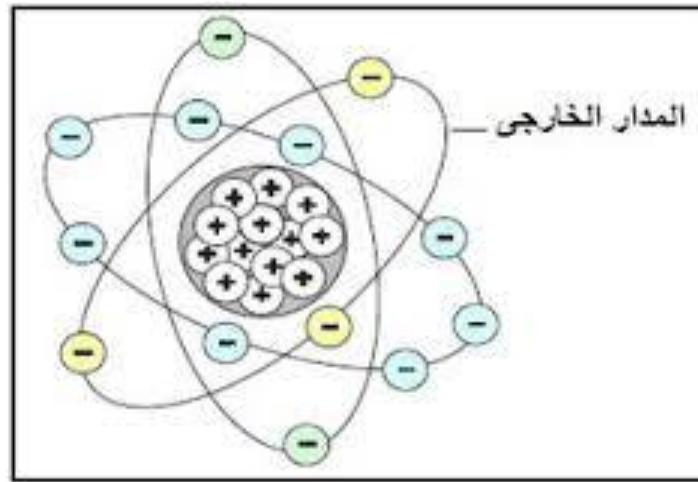


Figure (2-1) Structure of an atom.

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 والحالي من الالكترونات 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 الالكترونات 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 الالكترونات ضمن هذه الحزمة مقيدة بالذرة ولا تشارك بالتوصيل الكهربائي وحين تحصل الالكترونات التكافؤ على طاقة كافية تكون فيها متحررة من الارتباط بالذرة تقفز الى الحزمة التالية وهي حزمة التوصيل (conduction band) وسميت حزمة التوصيل لان الالكترونات 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 تشارك 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 عريضا جداً ويحتاج الالكترون الى طاقة كبيرة لكي يعبر هذه المنطقة من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل. اما في المواد الموصلة فإن 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 الحرجة معتدلة وهي محصورة بين $0.05 \rightarrow 6$ eV تقريباً. وقيمتها للسليكون حوالي 1.1 eV وللجرمانيوم 0.72 eV . كما موضح في الشكل (2-2).

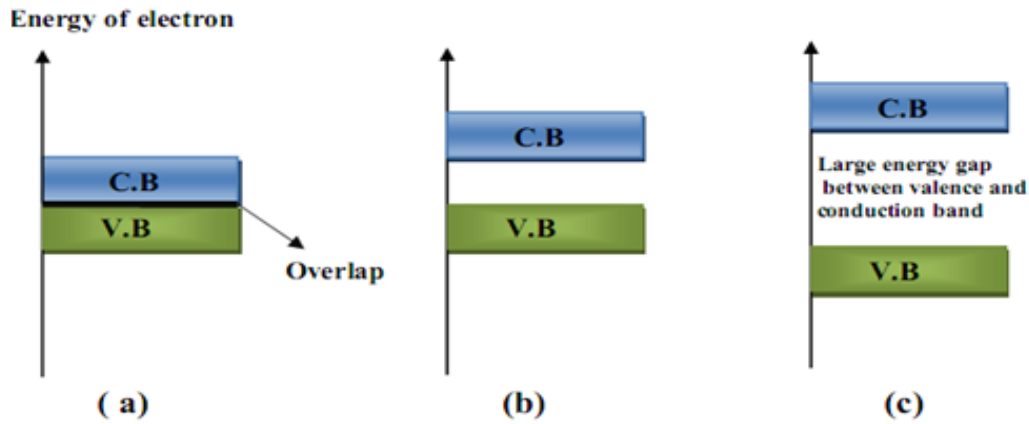


Figure (2-2) Typical energy bands a. Conductors, b. Semiconductors, c. Insulators.

ان حزمة التكافؤ تتكون من مستويات طاقة متعددة اعلاها هو مستوي E_V . اما حزمة التوصيل فهي بدورها تتكون من من مستويات طاقة متعددة اقلها هو E_C . اما قيمة الفجوة الحزمة 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.

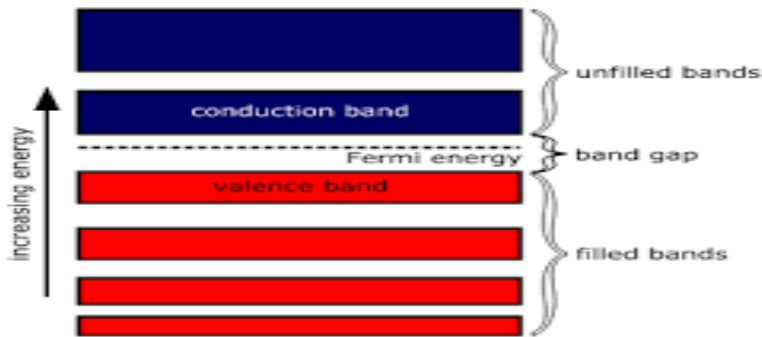


Figure (2-3) Energy levels in semiconductor.

لقد اصطلح العلماء على تثبيت مستوي طاقة خاص يعتبر كمرجع تقاس على اساسه مستويات الطاقة الاخرى يسمى مستوي 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 غايتها العظمى عند مستوي فيرمي.

• انواع المواد الشبه الموصلة

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

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

تدعى اشباه الموصلات النقية والخالية 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 فأن 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 أربع ذرات مجاورة (حيث هناك أربع ذرات متساوية البعد عن ذرة خامسة في المركز ، اما بقية الذرات فبعيدة نسبياً) فنظهر كل ذرة وكأنها تمتلك ثمان الكترونات في مدارها الخارجي . وتدعى الاصرة بالاصرة التساهمية (covalent bond) مكونة الشبكة البلورية. كما في الشكل (2-4).

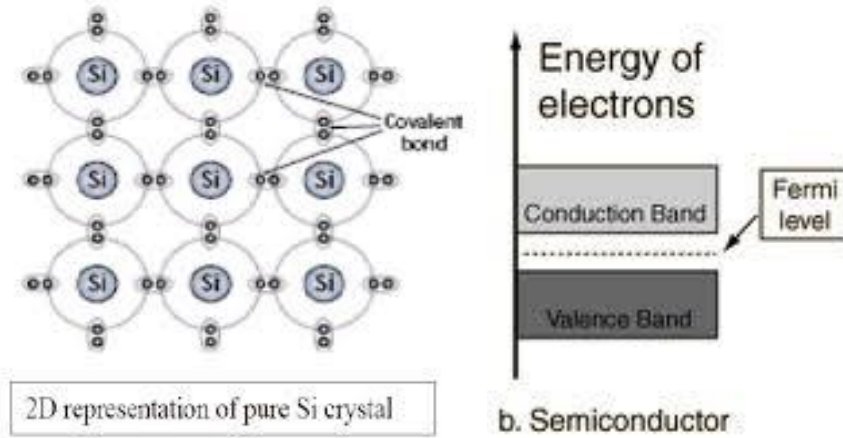


Figure (2-4) representation of pure Si crystal at $(T = 0K)$.

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 أكبر من الصفر المطلق ونلاحظ فيه الالكترونات الحرة واماكنها الموجبة وتزداد اعداد الالكترونات الحرة الطليقة بزيادة درجة الحرارة.

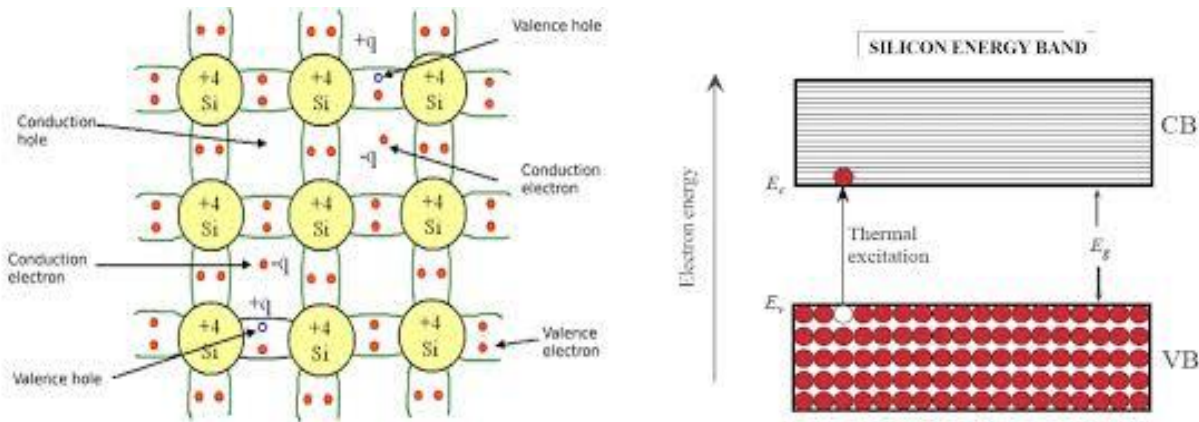


Figure (2-5) representation of pure Si crystal at $(T > 0K)$.

ان عملية توليد ازواج الكترون - 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 الكترون ليتعادل لذا فهو يستطيع ان يحمل شحنة موجبة ويدعى فجوة (hole), وبذلك تتكون الازواج الكترون - فجوة.

• حساب التوصيلية الكهربائية (conductivity) (معامل التوصيل) في اشباه الموصلات النقية او الذاتية

تعطى كثافة التيار (حسب النظرية الكلاسيكية للالكترونات الحر) بالعلاقة التالية: $J = n e \mu E \dots\dots (1)$

اما في حالة اشباه الموصلات ولوجود الالكترونات والفجوات, فأن كثافة التيار للالكترونات والفجوات يعطى على التوالي:

$$J_e = n e \mu_e E \dots\dots(2)$$

$$J_p = p e \mu_p E \dots\dots(3)$$

حيث ان :

E = شدة المجال الكهربائي (V/m).

J_e, J_p = كثافة التيار للالكترونات والفجوات (A / m^2).

μ_e, μ_p = الانجرافية او التحركية (mobility) لكل من الالكترونات والفجوات على التوالي ($m^2 V^{-1} s^{-1}$).

n, p = هي كثافة الالكترونات والفجوات (عدد الالكترونات او الفجوات لوحدة الحجم) على التوالي.

وبما ان كثافة التيار الكلي في شبه الموصل تساوي مجموع كثافة تيار الالكترونات والفجوات, اي

$$J = J_e + J_p = e[n \mu_e + p \mu_p]E = \sigma E \dots\dots(4)$$

حيث ان (σ) تمثل التوصيلية الكهربائية. واضح ان معادلة (4) تمثل قانون اوم, حيث

$$\sigma = e[n \mu_e + p \mu_p] \dots\dots(5)$$

وبما ان في اشباه الموصلات النقية (الذاتية) تكون ($p=n$) فأن معادلة (5) تصبح:

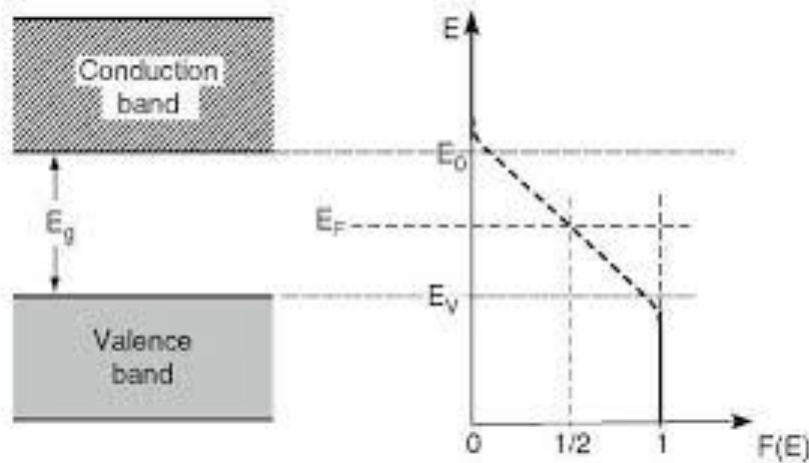
$$\sigma = en[\mu_e + \mu_p] \dots\dots (6) \quad (\text{التوصيلية الكهربائية لشبه موصل نقي})$$

• تركيز الالكترونات والفجوات في اشباه الموصلات النقية (الذاتية) (Concentration of electrons and holes)

يمكن ايجاد تركيز الالكترونات والفجوات بالاعتماد على النموذج الموضح ادناه . نفرض ان عرض كل من حزمة التوصيل (C.B)

وحزمة التكافؤ (V.B) صغيرة مقارنة مع فسحة الطاقة (E_g). كذلك نفرض ان كل الالكترونات في حزمة التوصيل تمتلك طاقة

(E_c) وان كل الالكترونات في حزمة التكافؤ تمتلك طاقة (E_v).



شكل (2-6) العلاقة بين احتمالية تواجد الالكترونات مع الطاقة

فأذا اعتبرنا بأن (n) تمثل عدد الالكترونات في حزمة التكافؤ عند درجة حرارة الصفر المطلق (اي قبل ان تتهيح الى حزمة التوصيل), وان (n_C) تمثل عدد الالكترونات المتهيجة الى حزمة التوصيل عند زيادة درجة الحرارة , وان عدد الالكترونات المتبقية في حزمة التكافؤ هي (n_V) , فأن عند اي درجة حرارة اعلى من الصفر المطلق تكون:

$$n = n_C + n_V \dots\dots\dots (1)$$

ولحساب n_V, n_C نستخدم دالة توزيع فيرمي- ديراك, كما يلي:

$$n_C = n \cdot f(E_C) \dots\dots\dots (2) \quad n_V = n \cdot f(E_V) \dots\dots\dots (3)$$

$$f(E_C) = \frac{1}{e^{\frac{E_C-E_F}{K_B T}} + 1} \dots\dots\dots (4) \quad f(E_V) = \frac{1}{e^{\frac{E_V-E_F}{K_B T}} + 1} \dots\dots\dots (5)$$

وتمثل كل من $f(E_V), f(E_C)$ احتمالية وجود الالكترون في المستوي E_V و E_C على التوالي.

وبتعويض معادلة (4) في معادلة (2), ومعادلة (5) في معادلة (3) وتعويض النتيجة في معادلة (1) نحصل على:

$$n = \frac{n}{e^{\frac{E_C-E_F}{K_B T}} + 1} + \frac{n}{e^{\frac{E_V-E_F}{K_B T}} + 1} \rightarrow 1 = \frac{1}{e^{\frac{E_C-E_F}{K_B T}} + 1} + \frac{1}{e^{\frac{E_V-E_F}{K_B T}} + 1}$$

$$1 = \frac{e^{\frac{E_V-E_F}{K_B T}} + 1 + e^{\frac{E_C-E_F}{K_B T}} + 1}{(e^{\frac{E_C-E_F}{K_B T}} + 1)(e^{\frac{E_V-E_F}{K_B T}} + 1)}$$

$$e^{\frac{E_C+E_V-2E_F}{K_B T}} + e^{\frac{E_V-E_F}{K_B T}} + e^{\frac{E_C-E_F}{K_B T}} + 1 = e^{\frac{E_V-E_F}{K_B T}} + e^{\frac{E_C-E_F}{K_B T}} + 2$$

$$e^{\frac{E_C+E_V-2E_F}{K_B T}} = 1$$

هذا يعني ان الاس للحد الاسي (*exponential*) يجب ان يساوي صفر اي ان:

$$\frac{E_C+E_V-2E_F}{K_B T} = 0 \rightarrow E_C + E_V - 2E_F = 0$$

$$E_F = \frac{E_C+E_V}{2} \dots\dots\dots (6)$$

تبين معادلة (6) بان مستوى طاقة فيرمي E_F في هذا النموذج المبسط يقع عند منتصف المسافة بين حزمتي التكافؤ E_V والتوصيل E_C وان موقع E_F لايعتمد على درجة الحرارة في اشباه الموصلات النقية او الذاتية.

س / اذا كانت احتمالية اشغال حالة عند حافة حزمة التوصيل E_C اي $[f(E_C)]$ هي نفسها, احتمالية افرغ حالة عند حافة حزمة التكافؤ $[1 - f(E_V)]$ في اشباه الموصلات الذاتية (النقية). أثبت ان مستوى فيرمي E_F يجب ان يقع عند منتصف المسافة بين E_V و E_C .

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

ان التآين الحراري في المواد الصلبة يعتمد كثيرا على درجة الحرارة حيث ان اي تغير طفيف في درجة الحرارة يحدث تغيراً جذرياً في عدد الشحنات الموجودة في شبه الموصل . وهذا تكون التوصيلية (*conductivity*) لشبه الموصل حساسة جدا لدرجة الحرارة . الا ان في الاجهزة الالكترونية من الضروري السيطرة على موصلية المواد لتؤدي الاغراض المطلوبة. ولهذا السبب تعالج او تشوب (تطعم) المواد شبه الموصلة 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*)

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

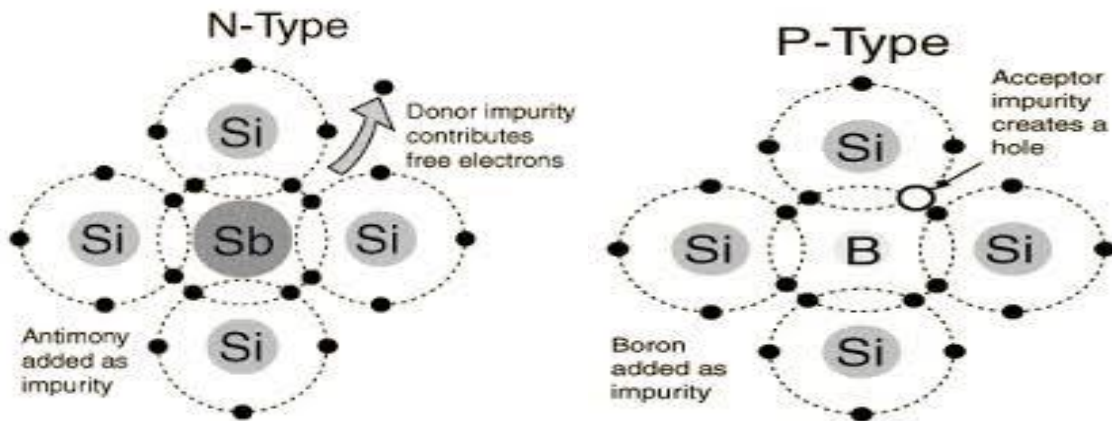


Figure (2-7) n-type and p-type semiconductors

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

(b) نوع موجب (*p-type*)

اذا اضيفت كمية من عناصر المجموعة الثالثة من الجدول الدوري (كالبورون او الالمنيوم او الكالسيوم او الانديوم) الى شبه موصل نقي من المجموعة الرابعة كالسيليكون, فإن هذه الذرات الشائبة سوف تحتل مواقع ذرات السيليكون وتكون مع الذرات الاربعة

المحيطة بكل واحدة منها اواصر تساهمية. ولم كانت ذرات الشوائب (البورون مثلا) تحتوي على ثلاث الكترونات تكافؤ فقط , فعليه سوف تبقى اصرة تساهمية واحدة تحتوي على الكتروناً واحداً وتحتاج الى الكترون اخر لاستكمال البنية البلورية الاعتيادية . فيكون نقصان في عدد الكترونات الاواصر التساهمية ويسمى فجوة (hole) وهو مكان فارغ يحتاج الى الكترون وقد اعتبرت الفجوات كناقلات او حاملات (carriers) شحنة موجبة مساوية لشحنة الالكترون بالمقدار . ولهذا فان ذرة البورون تتقبل الكترون 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).

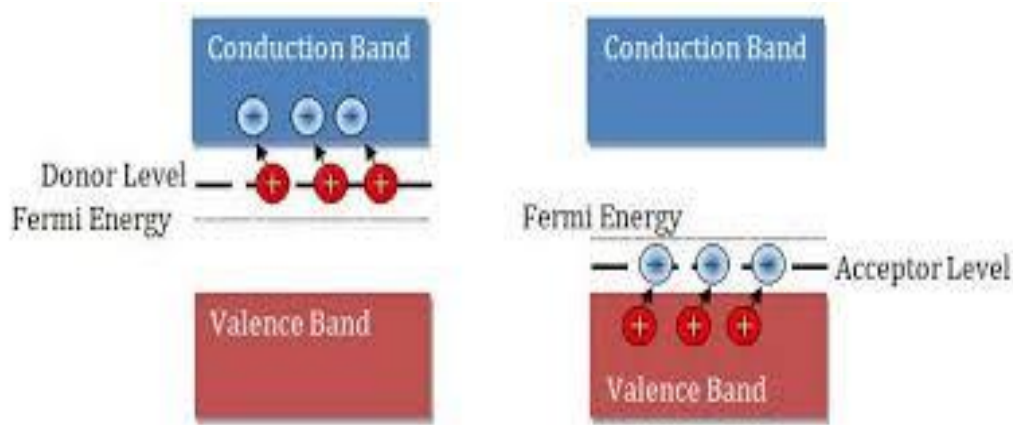


Figure (2-8) Donor and acceptor levels in n-type and p-type semiconductors

• 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 تهيمن 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.

• سريان التيار في اشباه الموصلات الشائبة

يسري التيار في المواد بصورة عامة اذا كان هناك:

1 - انحدار في الجهد $\left(\frac{dV}{dx}\right)$.

2 - انحدار في كثافة الحاملات للشحنات السالبة او الموجبة $\left(\frac{dn}{dx}\right)$ او $\left(\frac{dp}{dx}\right)$.

3 - تغير في الازاحة الكهربائية مع الزمن $\left(\frac{dD}{dt}\right)$.

يسمى التيار الناتج عن التغير في الازاحة الكهربائية بتيار الازاحة (*displacement current*) وهو يظهر في العوازل فقط . اما التيار الناتج من وجود انحدار في الجهد فيسمى بتيار الحمل او التوصيل وهو يظهر في الموصلات واشباه الموصلات , ويسمى التيار الناتج من حركة كل الالكترونات في حزمة التوصيل او الفجوات في حزمة التكافؤ في شبه موصل ذاتي عند تسليط مجال كهربائي بتيار الانسياب (*drift current*) تماشياً مع السرعة النهائية التي تصلها حاملات الشحنة اي سرعة الانسياب (*drift velocity*). ومن جهة اخرى هناك تيار اخر يظهر فقط في اشباه الموصلات عند غياب المجال الكهربائي وعندما يكون توزيع الشحنات داخل مادة شبه الموصل غير منتظم ويسمى بتيار الانتشار (*diffusion current*) (I_D) . ففي الشكل (9-2) , اذا كان تركيز الالكترونات في المنطقة n - في داخل المادة شبه الموصلة اكبر مما هو عليه في المنطقة p - فإن وجود هذا الانحدار في التركيز (*concentration gradient*) سوف يعمل على دفع الالكترونات للانتشار من المنطقة n - باتجاه المنطقة p - مؤدياً بذلك الى احداث تيار الانتشار.

هذا وقد وجد ان كثافة تيار الانتشار الناتج من انتشار الالكترونات J_{D_n} تتناسب طردياً مع انحدار التركيز لهذه الالكترونات في

$$J_{D_n} = eD_n \frac{dn}{dx}$$

المادة شبه الموصلة السالبة حيث ان:

$$D_n \text{ يسمى } D_n \text{ بثابت التناسب ويساوي } \frac{KT}{e} \mu_e$$

كذلك فان كثافة تيار الفجوات الناتجة عن انتشار الفجوات J_{D_p} تتناسب طردياً مع انحدار التركيز لهذه الفجوات في المادة شبه

$$J_{D_p} = -eD_p \frac{dp}{dx}$$

الموصلة الموجبة حيث ان:

$$D_p \text{ يمثل ثابت التناسب ويساوي } \frac{KT}{e} \mu_p .$$

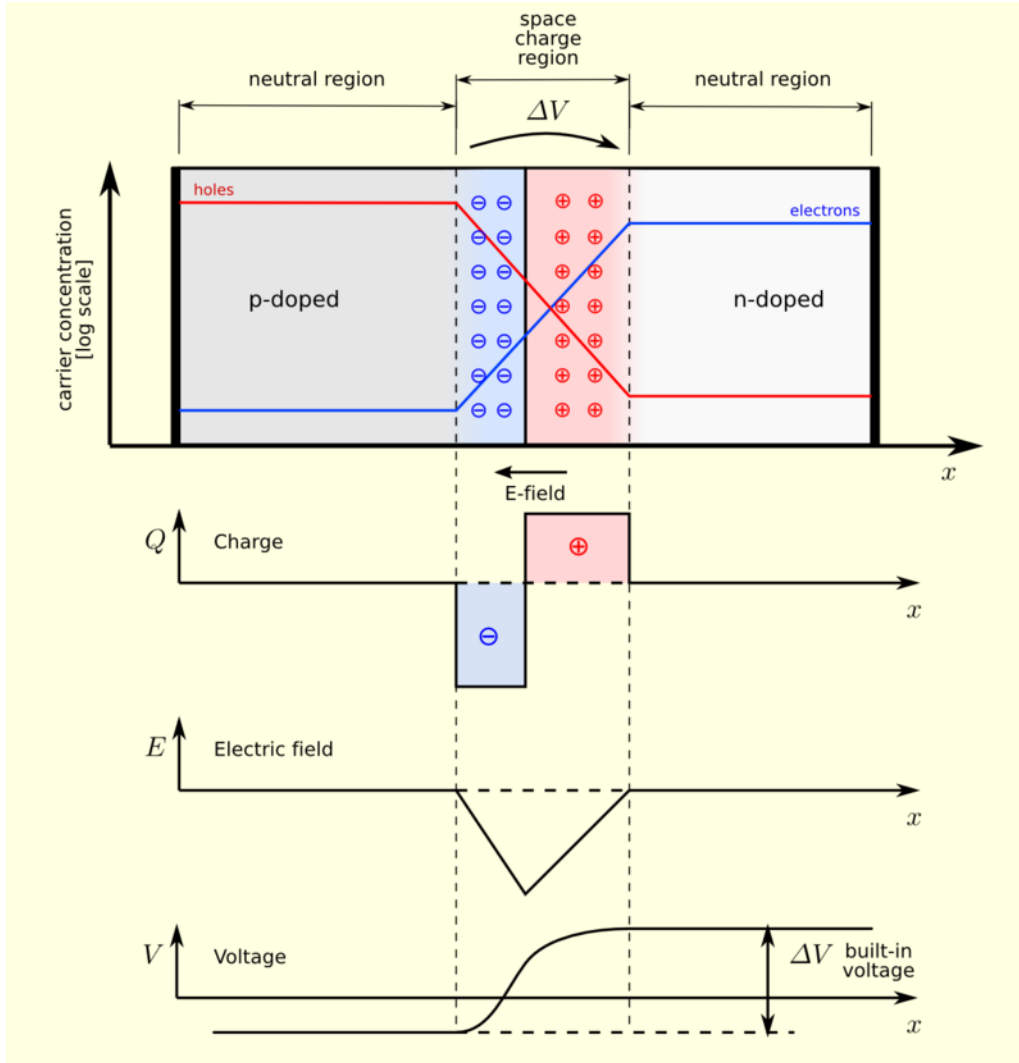
والاشارة السالبة تدل على ان اتجاه سريان الفجوات هو في الاتجاه المعاكس لتيار الفجوات بينما يكون تيار انتشار الالكترونات في نفس اتجاه سريان الالكترونات.

مما تقدم يتبين انه في حالة تسليط مجال كهربائي على شبه موصل يحمل انحداراً في تركيز الشحنات بداخله فإن نوعين من التيار سوف يسريان فيه هما: تيار الانسياب وتيار الانتشار وعليه فإن كثافة التيار الكلي J_n الراجعة عن الالكترونات مثلاً , هي:

$$J_n = J_e + J_{D_n} = ne\mu_e E + eD_n \frac{dn}{dx}$$

وكذلك الحال بالنسبة لكثافة التيار الكلي J_n الناجمة عن الفجوات:

$$J_p = J_h + J_{D_p} = p e \mu_h E - e D_p \frac{dp}{dx}$$



شكل (2-9) تغير تركيز الإلكترونات والفجوات مع المسافة في شبه الموصل

(أعلى: تركيز الإلكترونات والفجوات في الوصلة الثاني من أعلى: توزيع كثافة الشحنات؛ المنحنى الثالث: توزيع المجال الكهربائي؛ أسفل: توزيع الجهد الكهربائي)