الفصل الاول

فيزياء اشباه الموصلات (Physics of Semiconductors)

التركيب الذري

في عام 1913م اقترح الفيزيائي الدانماركي نيلز بور نموذجًا للذرة اعتمد فيه على فرضيات 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 متناهيه 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 امتصاص وانبعاث (إطلاق) الضوء من الذرة يستلزم تغييرًا في موضع وطاقة الإلكترون فيقفز من مستوى لآخر.

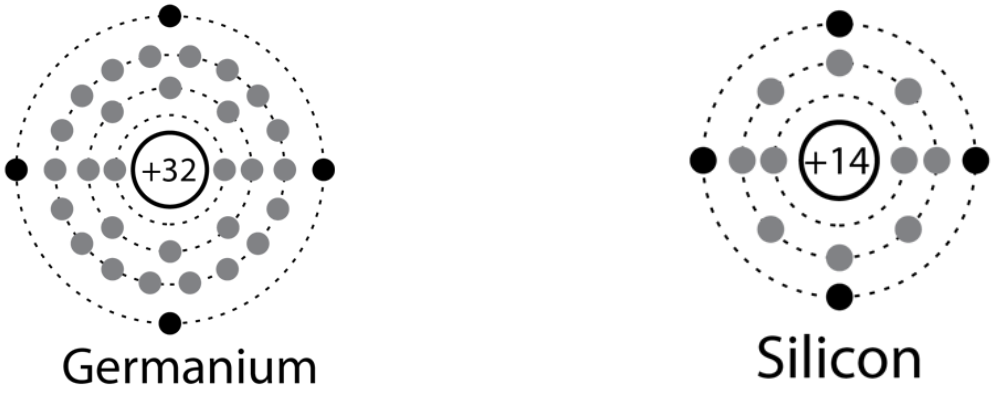
نأخذ مثلا السليكون هو عنصر كيميائي رمزه Si وعدده الذري 14. يصنف السليكون من أشباه الموصلات وهو رباعي التكافؤ. تحتوي ذرة السيليكون علي 14 الكترون وطبقا لتوزيع الإلكترونات في مدارات الذرة الذي يخضع للعلاقة

$$2n^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث n رقم المدار

فإن المدار الاخير يحتوي علي 4 إلكترونات وتكون قوة جذب نواة الذرة لتلك الإلكترونات متوسطة بين الموصلات والعوازل , ولكي تصل الذرة الي حالة الاستقرار ترتبط ذرات السيليكون ببعضها عن طريق روابط تساهمية(covalent bonds)، حيث تساهم كل ذرة بإلكترونات المدار الاخير (إلكترونات التكافؤ) مع أربع ذرات اخري 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 الغرفة تكتسب بعض الإلكترونات طاقة حرارية كافية فتتحول الى إلكترونات حرة.



البناء الذري للسليكون البناء الذري للجرمانيوم

الشكل (1 – 1) البناء الذري للسليكون والجرمانيوم

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. وتنتظم ذرات هذه العناصر في صفوف منتظمة غالبا, حيث يكون التركيب البلوري لهذه الصفوف متشابه الابعاد 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 الفيزياوية والكيمياوية 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.

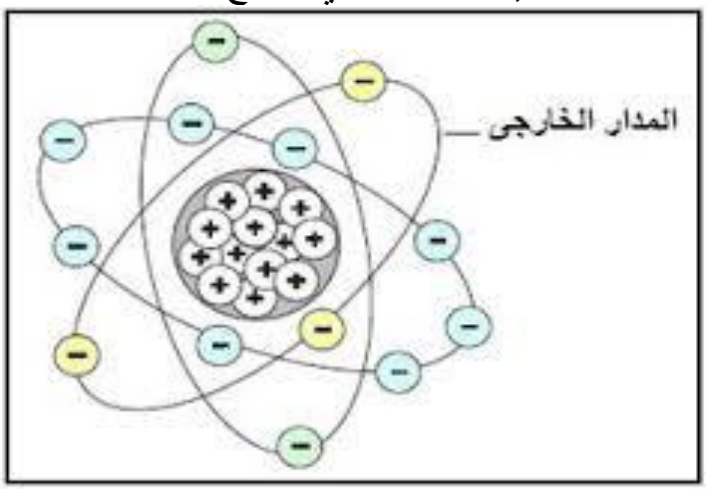
ان موصلية (conductivity) المواد شبه الموصلة تقع بين موصلية العوازل مثل الكوارتز (quartz) والتي تكون بحدود $10^{-6}\ (\Omega.m)^{-1}$ بينما تلك للموصلات تقع في حدود $\rightarrow 10^{6}$ $10^{8}(\Omega.m)^{-1}$ فمثلا النحاس له موصلية تساوي $58 \times 10^{7}\ (\Omega.m)^{-1}$ اما موصلية المواد شبه الموصلة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

- **مستويات الطاقة (Energy Levels)**

يمتلك كل الكترون طاقة معينة ضمن المستوي الذي يدور فيه. واذا امتلك طاقة اضافية تجعل طاقته مساوية الى طاقة مستوي اخر فأنه 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 بالكترونين فقط. اما المدار الثاني فأنه يتشبع بثمانية الكترونات والثالث يتشبع بثمانية عشر الكترون وهكذا وهي تتبع العلاقة (1). تنقسم جميع المدارات (عدا المدار الاول) الى مدارات ثانوية (subshells) وتحتوي على عدد من الالكترونات (عندما تكون مشبعة) كالاتي:

المدار الثانوي الاول = 2 الكترون, المدار الثانوي الثاني = 6 الكترون

المدار الثانوي الثالث = 10 الكترون, المدار الثانوي الرابع = 14 الكترون

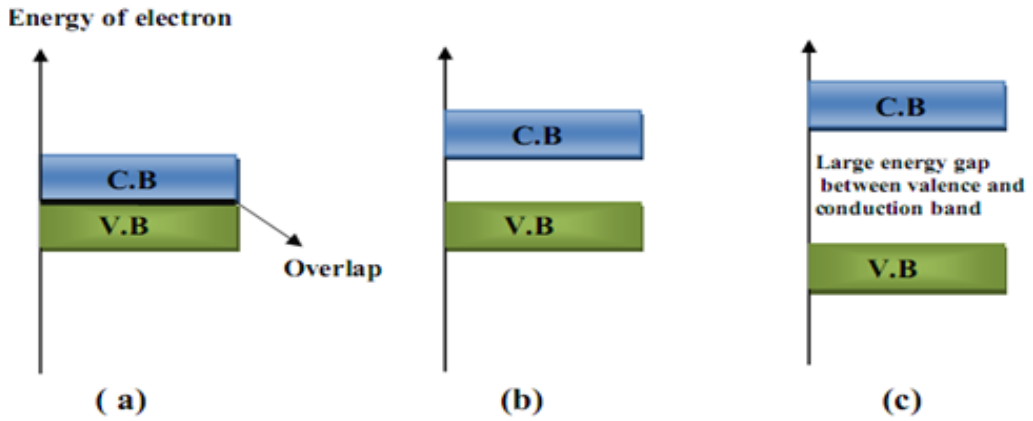


الشكل (1 – 2) تركيب الذرة

ان الذي يعنينا 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 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 فأن 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 تشترك بالتوصيل الكهربائي وحين تحصل الكترونات التكافؤ على طاقة كافية تكون فيها متحررة من الارتباط بالذرة تقفز الى الحزمة التالية وهي حزمة التوصيل (conduction band) وسميت

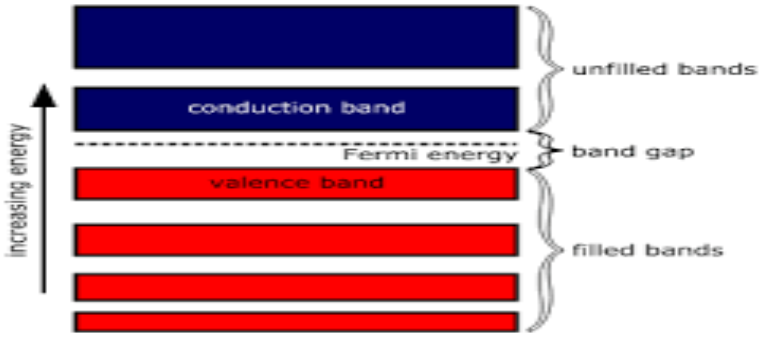
حزمة التوصيل لان الالكترونات المتواجدة فيها تشارك في عملية التوصيل الكهربائي ويرمز لها بالرمز E_C. وتوجد بين الحزمتين منطقة محرمة لا يوجد فيها مستويات طاقة.

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 تشترك الذرات بعدد من الكترونات التكافؤ كما يحصل في المواد شبه الموصلة وهذا ما يسمى بالأصرة 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 معتدلةً. وقيمتها للسليكون حوالي 1.1 eV وللجرمانيوم 0.72 eV . كما موضح في الشكل (2-2).



الشكل (1 – 3) حزم الطاقة النموذجية في a . الموصلات ، b . اشباه الموصلات ، c . العوازل

ان حزمة التكافؤ تتكون من مستويات طاقة متعددة اعلاها هو مستوي E_V. اما حزمة التوصيل فهي بدورها تتكون من من مستويات طاقة متعددة واقلها 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 مملؤة تماماً كما في الشكل (2-3) حيث يبين احزمة الطاقة في درجة الصفر المطلق. كذلك يبن هذا الشكل حزم داخلية مملؤة بالالكترونات.



الشكل (1 – 4) مستويات الطاقة في اشباه الموصلات

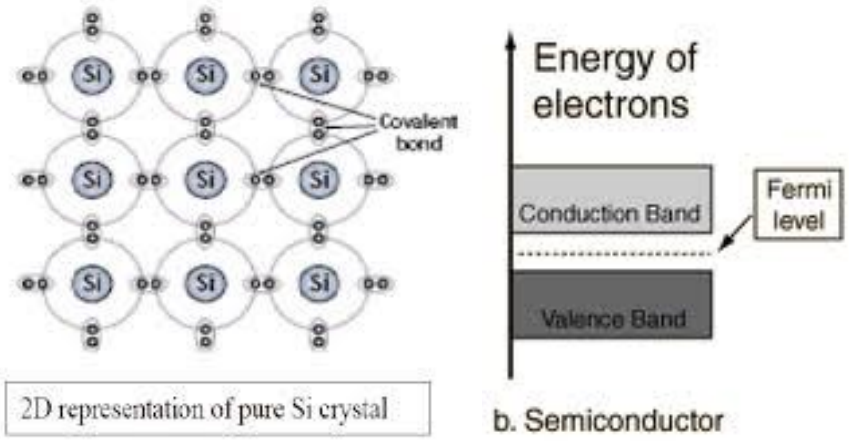
لقد اصطلح العلماء على تثبيت مستوي طاقة خاص يعتبر كمرجع تقاس على اساسه مستويات الطاقة الاخرى يسمى مستوى فيرمي (Fermi level) ويرمز له E_F وهو يمثل احتمال وجود الكترون في هذا المستوي بمقدار 50% ولذلك فهو يقع بين منتصف المنطقة المحرمة وفي درجة الصفر المطلق تكون طاقة الالكترونات في غايتها العظمى عند مستوى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

- **انواع المواد الشبه الموصلة**

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

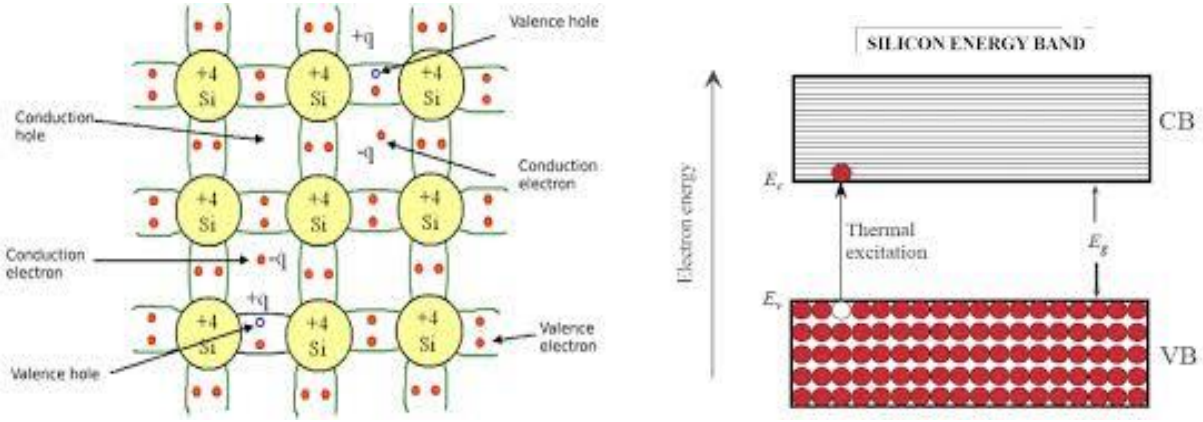
1- اشباه الموصلات (النقية) الذاتية (Intrinsic semiconductors)

تدعى اشباه الموصلات النقية والخالية من الشوائب والعيوب (في درجة الصفر المطلق) بأشباه 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 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 بالأصرة التساهمية (covalent bond) مكونة الشبيكة البلورية. كما في الشكل (4-2).



الشكل (1 – 5) مخطط لبلورة السليكون النقية عند (T = 0K) .

نلاحظ من الشكل (4-2) بأن جميع الشحنات مقيدة او متعادلة كهربائياً. اما في درجات الحرارة العالية فأن 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 (5-2) يبين شبه موصل نقي في درجة حرارة اكبر من الصفر المطلق ونلاحظ فيها الالكترونات الحرة واماكنها الموجبة وتزداد اعداد الالكترونات الحرة الطليقة بزيادة درجة الحرارة.



الشكل (1 – 6) مخطط لبلورة السليكون النقية عند (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.

$$n_i = p_i \quad \text{.....(2)}$$

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} = \frac{Eg}{2} \quad \text{... ... ...(3)}$$

تبين معادلة 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.

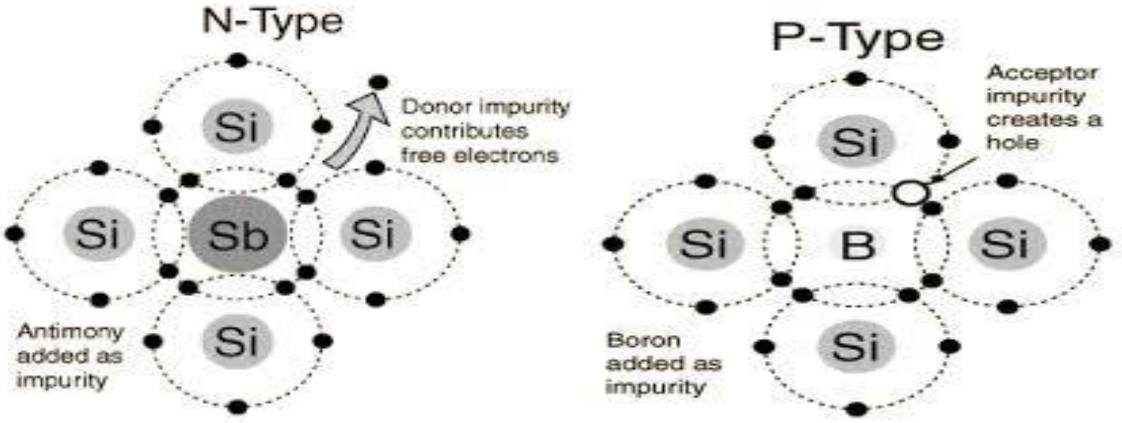
2- اشباه موصلات الغير نقية (المشوبة) اللا ذاتية *(Extrinsic or Doped Semiconductors)*

ان التأين 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. وبهذا 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 بإضافة 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 تضاؤل 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 الانتيمون) الى شبه موصل نقي من المجموعة الرابعة كالسليكون, فأن هذه الذرات الشائبة (التي لها خمسة الكترونات تكافؤ) تدخل ضمن تركيب السليكون 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 الالكترون عن الذرة الام (ذرة الانتيمون 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 الالكترون بالكترون الهبة او المانح *(donor electron)* والشوائب بالشوائب المانحة او الواهبة. كما في الشكل *(2-7)* ادناه:



الشكل (1 – 7) اشباه الموصلات نوع السالب ونوع الموجب

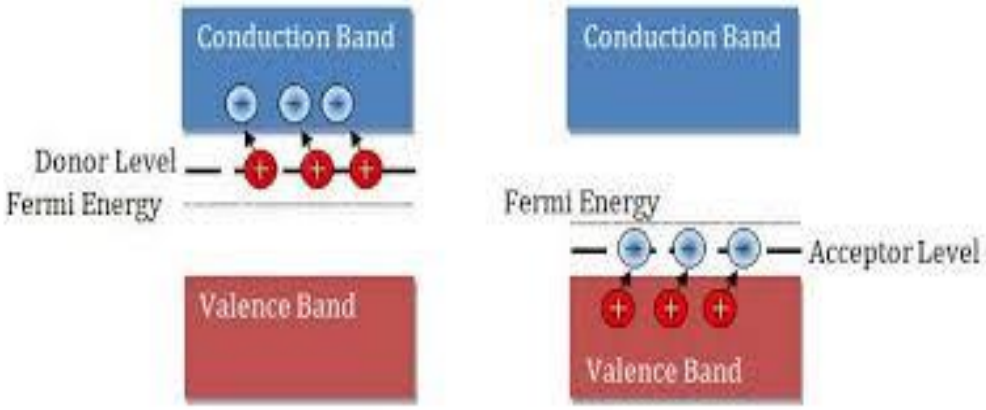
n-type and p-type semiconductors

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

b) نوع موجب *(p-type)*

اذا اضيفت كمية من عناصر المجموعة الثالثة من الجدول الدوري (كالبورون او الالمنيوم او الكاليوم او الانديوم) الى شبه موصل نقي من المجموعة الرابعة كالسيليكون, فأن هذه الذرات الشائبة سوف تحتل مواقع ذرات السليكون وتكون مع الذرات الاربعة المحيطة بكل واحدة منها اواصر تساهمية. ولما 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 لاستكماله, 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)*.



الشكل (1 – 8) مستويات الشوائب المانحة والمتقبلة في اشباه الموصلات نوع السالب والنوع الموجب

- **كثافة الشحنات في اشباه الموصلات الشائبة**

مما تقدم تبين لنا ان توصيلية الشوائب تكون غالبة 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 الاكثرية فأذا كان $n_i=n_n=p_n=10^{13}cm^{-3}$ في الجرمانيوم ثم تضاعف تركيز الالكترونات بعد اضافة الذرات المانحة بـ 1000 مرة بحيث اصبح $n_n=10^{16}cm^{-3}$ فسيقل تركيز الفجوات بـ 1000 مرة ويصبح $p_n=10^{10}cm^{-3}$ 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:

$$n_n . p_n = n_i^2 \rightarrow 10^{16} \times 10^{10} = (10^{13})^2 \dots\dots\dots\dots (4)$$

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:

$$n_p . p_p = p_i^2 = n_i^2 \rightarrow 10^{10} \times 10^{16} = (10^{13})^2 \dots\dots\dots\dots\dots\dots (5)$$

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.