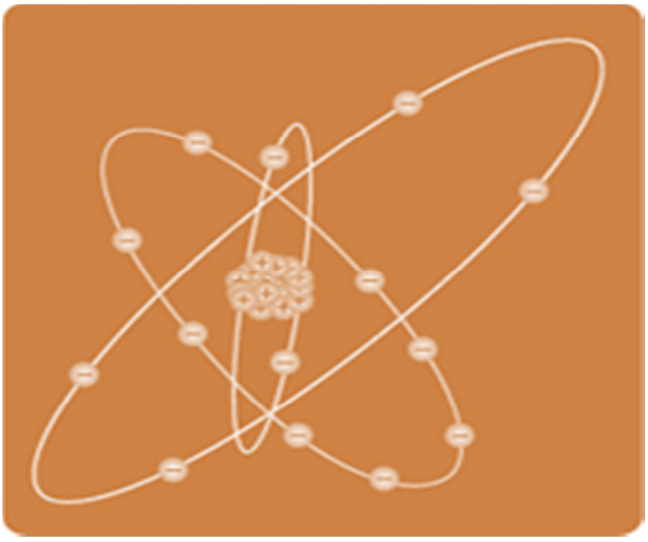
الفصل الأول

أشباه الموصلات

في هذا الفصل ، نستعرض النظريات والتكوينات الأساسية والخصائص لمواد وعناصر أشباه الموصلات كمقدمة لعلم "إلكترونيات أشباه الموصلات أو إلكترونيات الجوامد.

١ – ١ حركة الإلكترونات فى ذرة السيلكون

تشتمل ذرة السيلكون على أربعة عشر إلكترون موزعة فى ثلاث مدارات وتشغل الإلكترونات المدرات الثلاث كل إلكترون له مستوى طاقة يطلق عليه مستوى طاقة الإلكترون.



الشكل (١–١) عدد أربعة عشر إلكترون موزعة على ثلاث مدارات فى ذرة السيلكون

فى الصورة العامة تتكون بلورات المواد من عدد من الذرات كل منها يشتمل على عدد من المدارات التى تصل الى أربعة مدارات يشتمل كل منها على عدد أقصى محدد من الإلكترونات. المدرات الأربعة الأولى فى الذرة لبعض المواد بصفة عامة مسماه بدءا من المدار الداخلى للذرة (ك – إل – إم – إن) . يمكن حساب عدد الإلكترونات فى أى من المدرات كما يلى :

$$N_e=2n^2 \quad (\text{معادلة } ١-١)$$

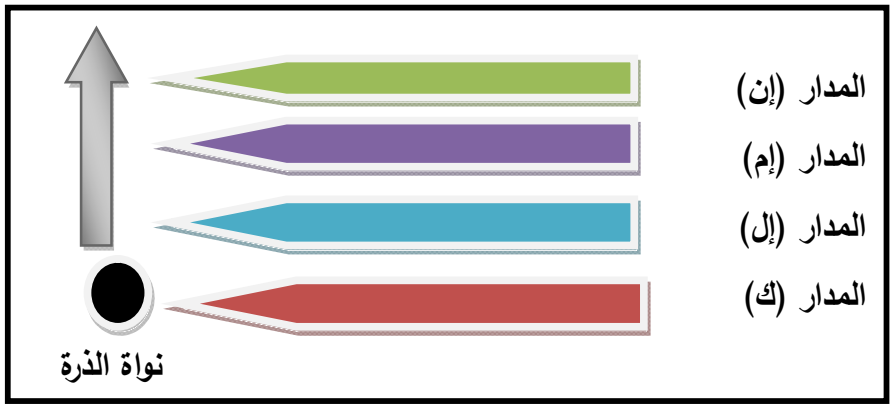
عدد الإلكترونات فى المدار (نم) = ٢ ن^{٢} حيث نم تمثل رقم المدار فى الذرة و (م) رقم المدار الفرعى على سبيل المثال لتطبيق المعادلة رقم (١-١) نجد :

عدد الإلكترونات فى المدار (ك) = ٢ X (١) ^{٢} = ٢ إلكترون

عدد الإلكترونات فى المدار (إل) = ٢ X (٢) ^{٢} = ٨ إلكترون

عدد الإلكترونات فى المدار (إم) = ٢ X (٣) ^{٢} = ١٨ إلكترون

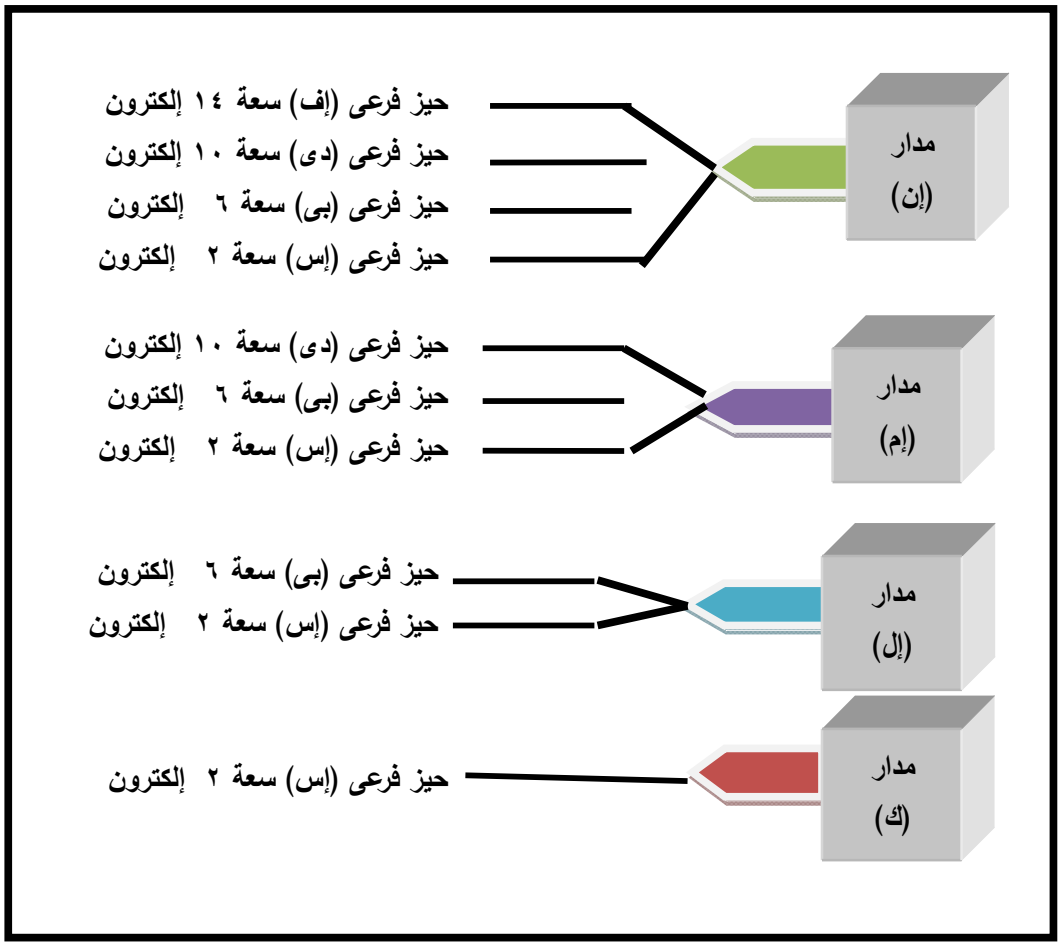
عدد الإلكترونات فى المدار (إن) = ٢ X (٤) ^{٢} = ٣٢ إلكترون



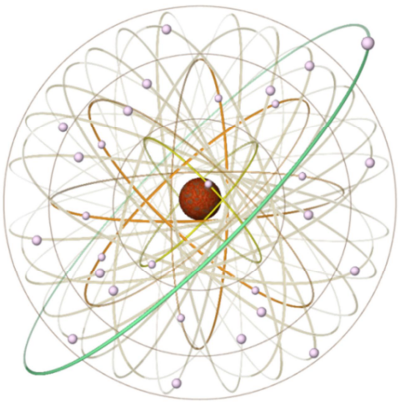
الشكل (١-٢) تكوينات المدرات فى الذرة

كل من هذه المدرات تنقسم الى مستويات طاقة فرعية يحددها التسلسل في تكوين مدارات أى ذرة٠ يشتمل كل مستوى فرعى على عدد أقصى من الإلكترونات. يسمى المستوى الأقل طاقة فى أى مدار لأى ذرة فى أى مادة بالمستوى الفرعى (إس) s ويجب أن يشتمل على الحد الأقصى من سعتة للإلكترونات قبل البدأ لملأ المستوى الفرعى الأعلى منه فى مستوى الطاقة .السعة الإلكترونية لكل من المستويات الفرعية فى الذرة هى عدد إلكترونان فى المستوى الفرعى الأول (إس) الأقرب الى نواة الذرة وعدد ستة إلكترون فى المستوى الفرعى الثانى (بى) وعدد عشرة إلكترونات فى المستوى الفرعى الثالث (دى) وعدد أربعة عشر إلكترون فى المستوى الفرعى الرابع والأخير (إف) كما هو موضح فى الشكل (١-٣).

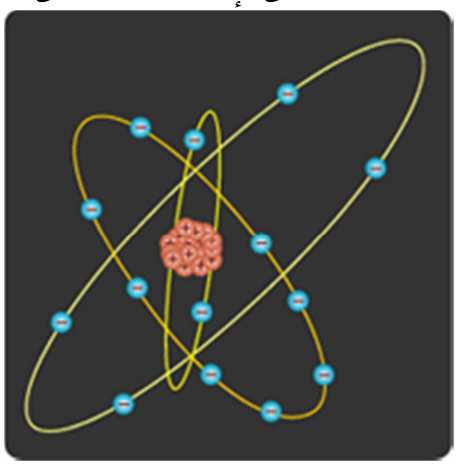
ومما هو جدير بالذكر أن إلكترونات مستوى التكافئ فى المواد العازلة مترابطة بإحكام مع نواة الذرة وبالتالى فإن طاقة الوضع المحفوظة فى نواة المواد العازلة أكبر من طاقة الوضع المحفوظة فى نواة المواد الموصلة. يوضح الشكل (١-٤) تكوين ذرات النحاس والجرمانيوم والكبريت وعدد الإلكترونات فى كل ذرة وعدد الإلكترونات فى المدار الخارجى لكل منها.



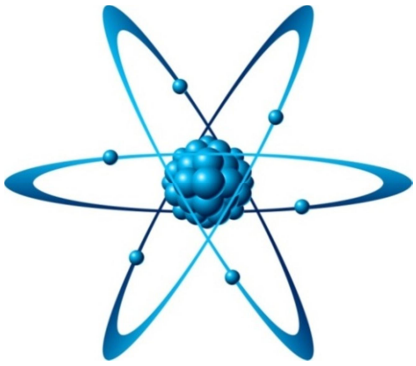
الشكل (١- ٣) المدارات والمستويات الفرعية فى تكوين الذرة



الشكل (١- ٤أ) ذرة مادة النحاس – مادة جيدة التوصيل الكهربائى وتشتمل على ثمانى وعشرون إلكترون فى المدارات الثلاث الأولى وإلكترون واحد فى المدار الرابع والأخير



الشكل (١-٤ ب) ذرة مادة الجرمانيوم – مادة شبه موصل وتشتمل على عشرة إلكترونات فى المدارين الأول والثانى وعدد أربع إلكترونات فى المدار الثالث والأخير



الشكل (١- ٤ج) ذرة مادة الكبريت – مادة عازلة وتشتمل على ستة عشر إلكترون فى المدارات الثلاث الأولى منهم ستة إلكترونات فى المدار الثالث والأخير .

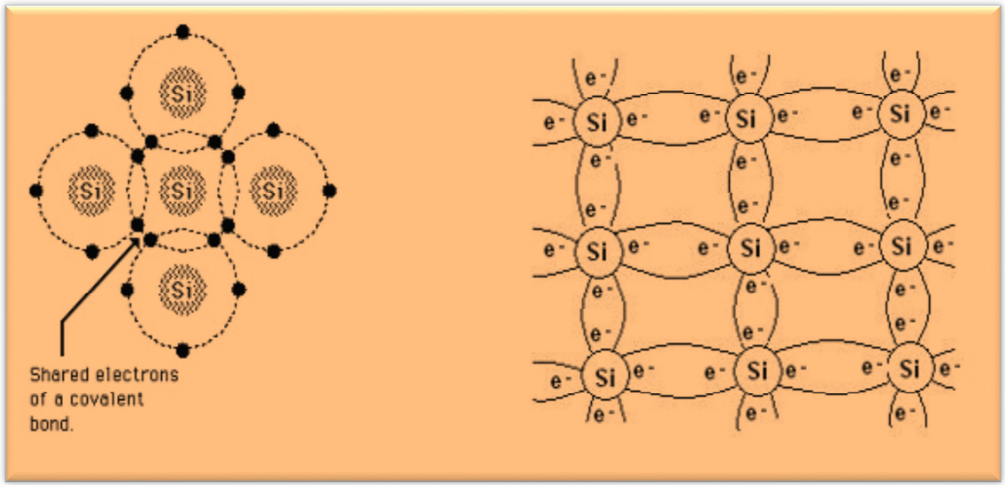
١ – ٢ مواد أشباه الموصلات

يتم تصنيع كل العناصر الإلكترونية من مادة شبة موصل . كما يوحى الإسم فإن مادة شبه موصل إما أن تكون مادة عازلة كهربائيا مثل البلاستيك أو تكون ماد موصلة جيدة كهربائيا مثل النحاس. تتضح الآلية التى تتدفق بها حوامل الشحنات داخل مادة شبه الموصل من ترابط الذرات مع بعضها البعض لتكوين بلورات المادة . بينما مواد الموصلات تشتمل غالبا على مستويات تكافئ غير مكتملة الحد الأقصى من عدد الإلكترونات وتميل لإنتاج الكترونات حرة . على سبيل المثال فى ذرة مادة السيلكون[١] فإن تكافؤية المدرات الفرعية إس١ وإس٢ وبى٢ وإس٣ مكتملة الإلكترونات (الشكل ١–٣) في حين أن المدار الفرعي بى٣ يتشبع بإلكترونين وبإمكانه التشبع بأربعة آخرين تاركا مكان لعدد إربع إلكترونات يمكن أن تنتقل الي هذا المدار (إم) ٠ وحيث أن ذرة *السليكون* تميل الى حالة الإستقرار والتى يمكن تحقيقها بمشاركة عدد ٤ إلكترونات من الذرات المتجاورة – وبالتالى تتشارك كل ذرة مع ٤ذرات متجاورة مما يؤدى لإستكمال وملأ المستوى الفرعى (بى) فى المدار (إم) الخارجى بعدد ٦ إلكترونات٠ تكرر كل ذرة على طول المادة هذه العملية بمعنى أن تستخدم أربع إلكترونات فى مستواها الفرعى (بى) فى المدار (إم) الخارجى علاوة على إلكترون من كل من الذرات الأربعة المتجاورة حتى تستكمل سعة مستواها الفرعى (بى) بعدد ٦ إلكترونات وتكون النتيجة ترابط الذرات فى التكوين البلورى والوصول الى حالة إتزان وإستقرار وتترتب الذرات فى التكوين البلورى بفاصل زمنى ثابت كنتيجة لقوى الترابط بين الذرات.

---

[١] السليكون صلب في درجة حرارة الغرفة، ودرجة انصهاره وغليانه النسبيتين ١٤١٤° و٣٢٦٥° درجة مئوية. كثافته أكبر في حالته السائلة. لا ينكمش حينما يتجمد كمعظم المواد بل يتمدد، بقدرة نقل حرارة نسبية عالية ، فإن السليكون موصل جيد للحرارة ونتيجة لذلك فإنه لا يستخدم غالبًا لعزل الأشياء الساخنة. يتلون السليكون باللون الرمادي وله بريق معدني، السليكون قوي نوعًا ما وهش للغاية وعرضة للتقطيع. يتبلور في شكل بنية بلورية ذات شكل مكعب ماسي، بوجود مسافات بينية تقدر بحوالي (٥.٤٣٠٧١٠ أنغستروم). المدار الذري الخارجي للسليكون، لديه ٤ إلكترونات تكافؤية. المدرات الفرعية s١ وs٢ وp٢ وs٣ مكتملة إلكروناتها في حين أن المدار الفرعي p٣ يتشبع بإلكترونين وبإمكانه التشبع بأربعة آخرين. هو عنصر شبه موصل. لديه معدل عكسي لدرجة حرارة المقاومة، لأن عدد الشحنات التي يحملها يزداد بالحرارة. المقاومة الكهربية لبلورة مفردة من السليكون تتغير بشكل ملحوظ بفعل الضغط الميكانيكي بفضل تأثير المقاومة الانضغاطية.

يوضح الشكل (١-٥) أن كل إلكترونين من الإلكترونات المشاركة تنشأ إرتباط تساهمى محاط بشكل بيضاوي مع ملاحظة أن الذرة المتوسطة تظهر مع مجموعة كاملة من أربع روابط تساهمية بمعنى تستخدم الذرة المتوسطة الإلكترونات الأربعة الخاصة بها ، ورابط واحد من كل من الأربعة ذرات المتجاورة . وهذا يعنى من الوجهة الفعلية إستكمال العدد الأقصى من الإلكترونات فى المستوى (إم) وهو عدد ثمانى إلكترون.



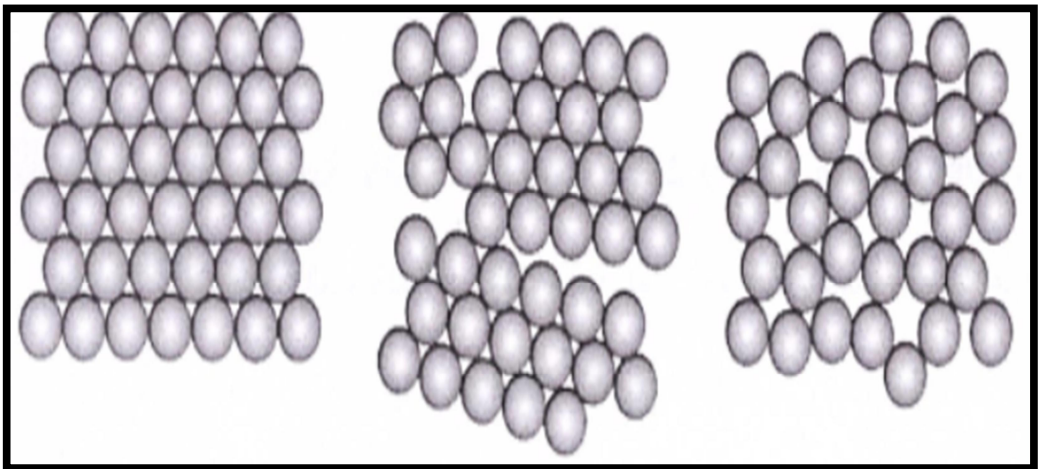
الشكل (١-٥) ارتباط تساهمى محاط بشكل بيضاوي للسيلكون

ذرات مواد السيليكون والجرمانيوم والكربون لها نفس الروابط التساهمية والتى تتشابك ذراتها من خلال تقاسم الإلكترونات للإستخدمات الإلكترونية . أحد أهم خواص مواد أشباه الموصلات هى أن الموصلية لهذه المواد يمكن تعديلها بإستخدام إشارات خارجية – على سبيل المثال:

- الموصلية سيجما (σ) تتناسب طرديا مع عدد الشحنات الحرة سواء كانت إلكترونات سالبة الشحنة أو ثقوب موجبة الشحنة وبالتالى فإن الموصلية سيجما تتحكم فى قيمة التيار الكهربائى فى العنصر الإلكترونى.
- تركيز الإلكترونات (ن) أو الثقوب (ب) تتناسب طرديا مع المجال الكهربى إبسيلون (ε) .

- **يتأثر تركيز الإلكترونات (ن) أو عدد الثقوب (ب) بالمؤثرات الخارجية مثل شدة الضوء – درجات الحرارة – المجالات المغناطيسية وأيضا الإجهادات الميكانيكية.**
- **يتغير تركيز حوامل الشحنات وبالتالى الموصلية بإضافة كميات صغيرة من ذرات الشوائب الأكثر أو الأقل من أربع إلكترونات فى المدار الخارجى لذراتها.**
- **تتأثر حركة حوامل الشحنات بالعيوب فى البلورات وبقربها من سطوح المواد الموصلة أو سطوح المواد العازلة كهربائيا ٠**

سيتم إستعراض مواد أشباه الموصلات فى الحالة الصلبة والتى تتميز بتكوينات أحادية البلورات ٠التى تتصف تكويناتها بدرجة نقاوة عالية جدا وتكوينات البلورات الأحادية لها نمط تكرارى دقيق على طول المادة الصلبة أما المواد متعددة البلورات تتكون من العديد من بلورات مجهرية (تسمى "بذر بلوري" أو "الحبوب") – المواد الصلبة الغير متبلورة (مثل الزجاج) لا يوجد لها ترتيب دوري حتى مجهريا الشكل (١-٦)

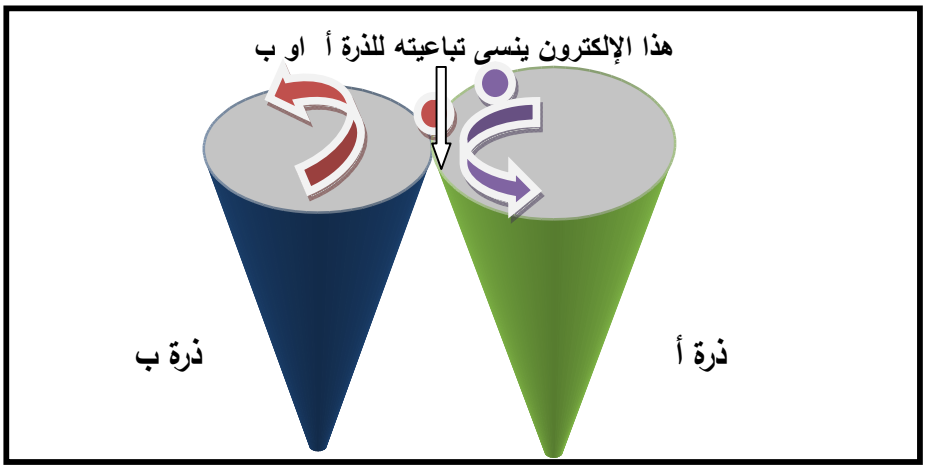


أ – مواد غير متبلورة ب- مواد متعددة البورات ج – مواد أحادية البلورات

الشكل (١-٦) شكل تكوينات وترتيب المواد الصلبة (مواد غير متبلورة – مواد متعددة البلورات – مواد أحادية البلورات)

١ – ٣ نظرية التوصيل فى المواد الصلبة

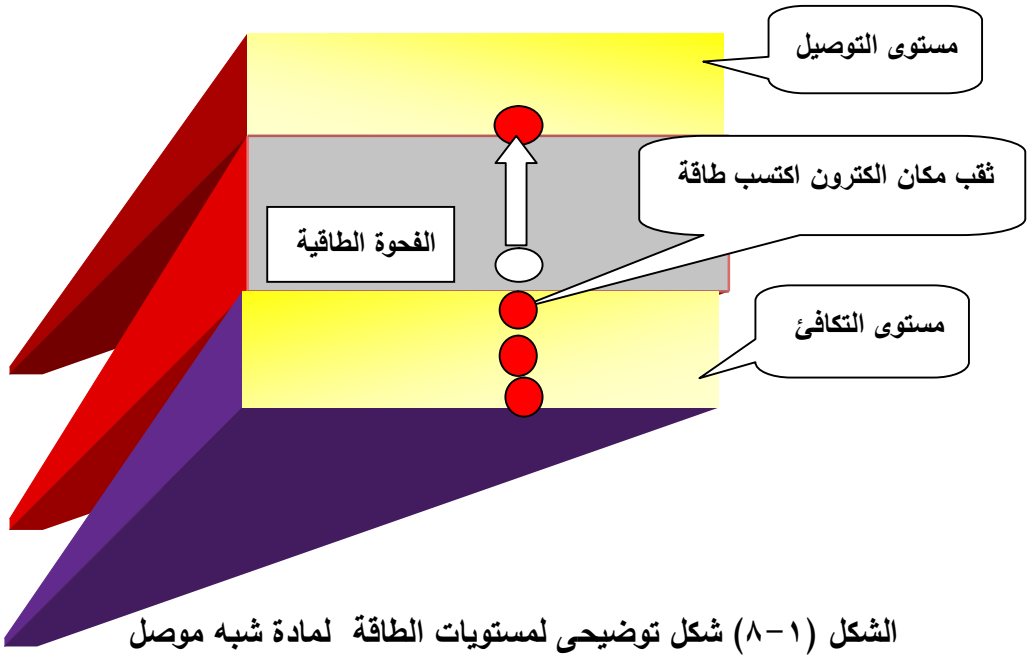
نجد الذرات فى المواد الصلبة مرتبطة بإحكام مع بعضها. فذرات المواد الموصلة مرتبة على مسافات منتظمة نتيجة قوى الترابط بينها ذات تقارب شديد للذرات مع بعضها وأن الفجوة الطاقية لها صغيرة جدا وتكاد فى بعض المواد الموصلة أن تكون متداخلة. نجد الإلكترونات فى المدار الخارجى أحيانا تتداخل مع بعضها كما هو الحال فى تكوينات ذرات مادة النحاس كما هو موضح فى الشكل (١–٧). نجد بعض الإلكترونات فى المدار الخارجى تنسى تباعبتها لأى من الذرات المتلاحمة٠ ونتيجة لذلك فإن الإلكترونات المتواجدة فى مستوي طاقة التكافئ حرة الحركة مما يتسبب فى ظاهرة التوصيل الكهربائى.



الشكل (١–٧) حركة الإلكترون الحر فى ذرة النحاس

فى المواد الصلبة نجد أن كل من مستويات طاقة التوصيل وطاقة التكافئ منفصلة بمستوى يطلق عليه الفجوة الطاقية أو الفجوة الممنوعة كما هو موضح فى الشكل (١–٨). يسمى مستوي الطاقة الأقل مستوى التكافئ ويطلق على المستوي الأعلى من الطاقة مستوى التوصيل٠ وهذا يعنى بمصطلحات الطاقة أن ظاهرة التوصيل ممكنة إذا تمكنا من إكساب طاقة حركية للإلكترونات أو الثقوب فى تكوينات المادة الصلبة. تتحرك الإلكترونات تجاه الجانب الموجب ويتدفق التيار الكهربائي إذا تم توصيل جهد كهربائي إبسيلون (ε) . جميع الإلكترونات فى مستويات التوصيل والتكافئ لها إحتمالات متساوية لتحتل أى مستوى طاقة طبقا إستنادا لقانون باولى للإستبعاد والذى يوضح أنه لا يوجد أكثر من إلكترون واحد فى

نفس مستوى الطاقة فى نفس الذرة فى نفس الوقت. تعتبر المعادن موصلة جيدة كهربائيا ومعظم هذه المواد يشتمل المدار الخارجى لكل من ذراتها إلكترون واحد . هذا الإلكترون شبه الحر يتجول بحرية كما هو موضح بالشكل (١-٨).

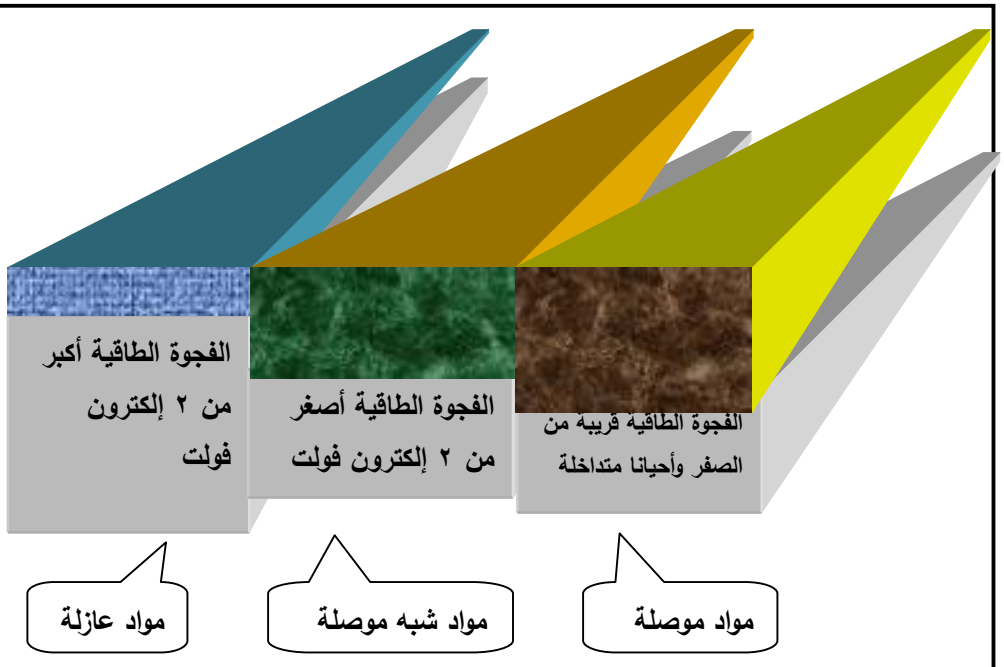


الشكل (١-٨) شكل توضيحى لمستويات الطاقة لمادة شبه موصل

١ – ٤ تصنيف المواد

تنقسم المواد الى ثلاث مجموعات أساسية (المواد الموصلة – المواد العازلة – مواد أشباه الموصلات) يوضح الشكل (١-٩) مستويات الطاقة المعبرة لكل من هذه المجموعات. فى المواد الموصلة كهربائيا فإن الإلكترونات فى مستوى التكافئ تتمتع بحرية الحركة مكونة تدفق للإلكترونات ، والتى لها قدرة الحركة بإكتسابها مقدار ضئيل من الجهد الكهربائى. على سبيل المثال فإن مستوى طاقة التكافئ والتوصيل لمادة الألمنيوم متداخلين – ولا توجد فجوة طاقية مما يسمح بحركة الإلكترون الأعلى فى مستوى الطاقة للإنتقال الى المستوى الثانى الأعلى بمعنى إكتساب الإلكترون طاقة حركية مما يحدث التوصيل الكهربائى.

فى المواد العازلة كهربائيا مثل مادة ثانى أكسيد السليكون – نجد أن الإلكترونات فى مستوى التكافئ متماسكة بروابط قوية مع الذرات المجاورة . هذه الروابط من الصعب كسرها أو تخطيها فلا يوجد إلكترونات حرة لحدوث التوصيل – كما أن فى المواد العازله نجد مستوى التكافئ ومستوى التوصيل يفصلهما الفجوة الطاقية ذات مستوى طاقة كبير. كما يمكن تعريف المواد العازلة هى التى تحتاج الى كمية طاقة أكبر من إلكترونان فولت حتى تتمكن الإلكترونات فى مستوى التكافئ أن تنتقل عبر الفجوة الطاقية أو المنطقة العازلة كما يحلو للبعض تسميتها الى مستوى طاقة التوصيل. الطاقة المطلوبة لإنتقال الإلكترونات من مستوى التكافئ الى مستوى التوصيل فى المواد العازلة تسمى طاقة التأين والتى لا يمكن تحقيقها فى درجات الحرارة العادية٠المواد ذات فجوة طاقية أقل من إلكترونان– فولت يمكن تسميتها بمواد أشباه الموصلات. يوضح الشكل (١–١٠) طاقة التأين لبعض أهم المواد المستخدمة فى تصنيع العناصر.

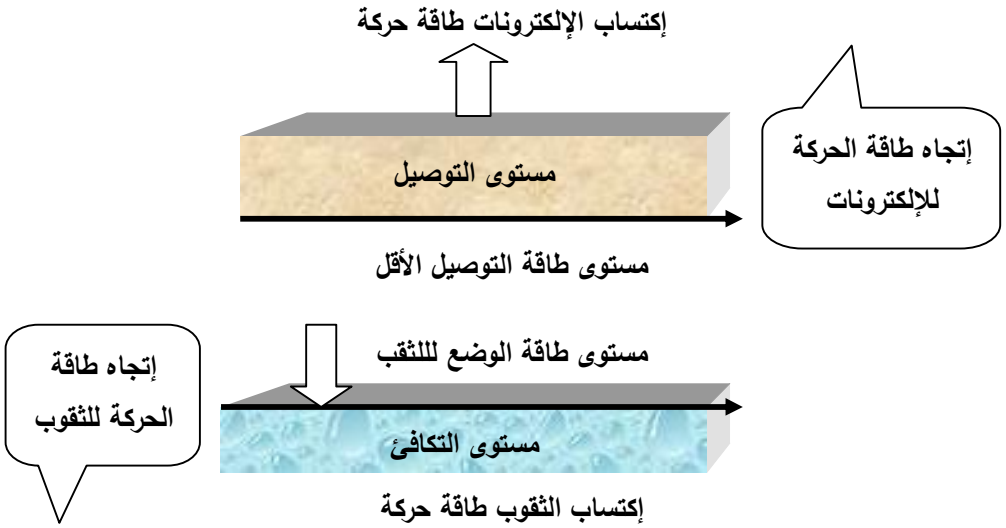


الشكل (١–٩) مستويات الطاقة المعبرة لكل من مجموعات المواد الصلبة

الروابط بين ذرات مادة السليكون متوسطة القوة – بعض من هذه الروابط تنكسر بسبب الإهتزاز الحراري عند درجات حرارة أعلى من الصفر المطلق (سالب مئتان ثلاث وسبعون درجة مئوية) – الذى يتسبب فى توليد عدد من الإلكترونات الحرة لإتمام عملية التوصيل. مستوى الطاقة التى سبق أن إحتلها الإلكترون قبل أن تنكسر الرابط تسمى ثقب. يقفز أحد الإلكترونات من المستوى الفرعى التالى فى الروابط المتجاورة فى نطاق مستوى التكافئ ليحتل مستوى طاقة الثقب الغير مشغول بإلكترون وبالتالى ينتج توصيل إضافى كلما تحركت الثقوب حوامل الشحنات الموجبة فى الإتجاه العكسى.

الشكل (١-١٠) طاقة التأين لبعض مواد أشباه الموصلات

بمقارنة مستويات الطاقة فإن الفجوة الطاقية لمواد أشباه الموصلات ليست بذات الإتساع كما فى المواد العازلة وبالتالى تتمكن بعض الإلكترونات من القفز من مستوى طاقة التكافئ الى مستوى طاقة التوصيل تاركة ثقوب فى مستوى طاقة التكافئ. بتطبيق جهد كهربائى – تكتسب الإلكترونات الحرة طاقة حركية ويتم التوصيل الكهربائى. وهكذا عندما زادت طاقة الإلكترون وإنتقل لمستوى أعلى يحتل إلكترون آخر هذا المستوى الغير مشغول فى إتجاه مستوى التوصيل – وعندما زادت طاقة الثقب وإنتقل لمستوى أعلى فى إتجاه المستوى الفرعى الأدنى فى نطاق مستوى التكافئ – فإن كل من الإلكترونات والثقوب إكتسبت طاقة حركة والتى تساوى الفرق بين طاقة الإلكترون وطاقة الثقب,



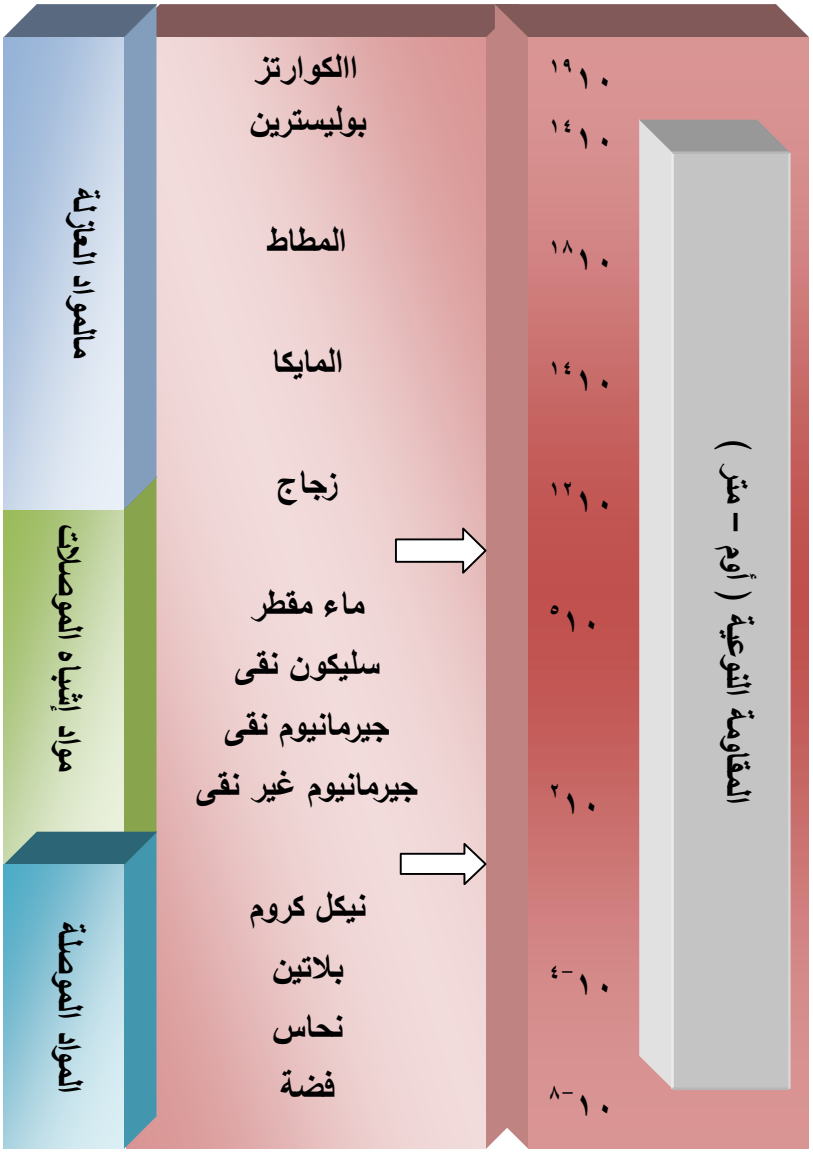
الشكل (١-١١) اتجاهات الطاقاقة الحركية لكل من الالكترونات والثقوب

الشكل (١-١١) يوضح المستويات الفرعية لطاقة الوضع للإلكترونات والثقوب ٠ من المهم التأكيد – على أن أقل مستوى فرعى فى نطاق مستوى التوصيل يرمز له بالرمز E_c ويعرف بمستوى طاقة الوضع للإلكترون. أيضا فإن أعلى مستوى فرعى فى نطاق مستوى التكافئ يرمز له بالرمز E_v ويطلق عليه طاقة الوضع للثقب. فى حالة إكتساب الإلكترون مستوى طاقة أعلى من مستوى طاقة الوضع للإلكترون E_c أو يحتل الثقب مستوى طاقة فرعى أعلى من مستوى الوضع للثقب E_v فى إتجاه المستوى الفرعى الأقل طاقة فى نطاق مستوى التكافئ.

١-٥ الموصلية

قيم الموصلية سيجما σ وقيم المقاومة النوعية (رو) ρ للمواد وهى القيم الحاكمة للشحنات الكهربائية موضحة بالرسم البيانى التوضيحى للمقاومات النوعية للمواد فى الشكل (١-١٢) . تحتل المقاومة النوعية للمواد العازلة مثل البلاستيك – الزجاج – السيراميك – الماس قيم كبيرة جدا حوالى $١٠^{١٢}$ أوم لكل متر أو قيم أكبر ويتراوح ثابت العزل لهذه المواد ما بين ١ الى ١٠ . وهى مواد غير بلورية مثل الكبريت أما قيم المقاومة النوعية للمواد الموصلة فهى قيم صغيرة جدا فى حدود $١٠^{-٨}$ أوم لكل متر أو أقل كما تعتمد قيم المقاومة

النوعية على درجات الحرارة. أيضا فإن مسميات بعض المواد بشبه موصل ترجع الى تواجد هذه المواد فى الشكل البيانى للمقاومة النوعية والموصلية بين المواد العازلة والمواد الموصلة – فلا يوجد حد فاصل لقيم المقاومة النوعية لمواد أشباه الموصلات – تتراوح قيم المقاومة النوعية لمواد أشباه الموصلات بين $١٠^{-٤}$ الى ١٠ أوم لكل متر وقيم ثابت العزل ما بين خمسة الى خمسون.



شكل (١– ١٢) رسم بيانى لتحديد المقاومة النوعية لمواد العازل – أشباه الموصلات – الموصلات

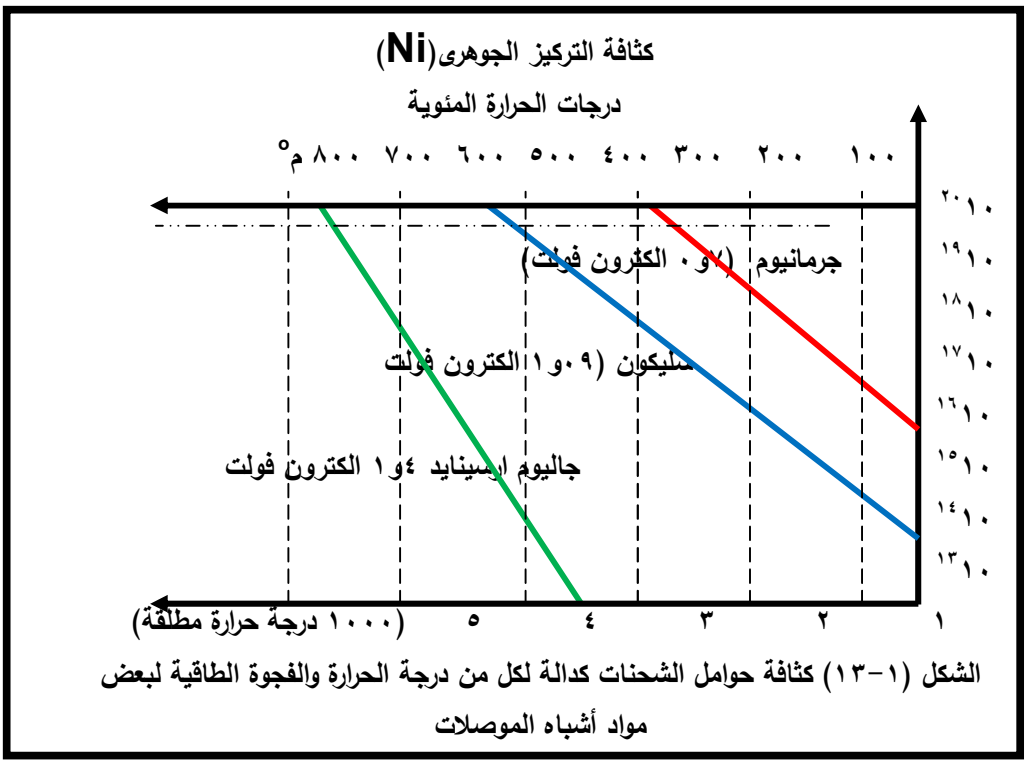
الخواص الكهربائية للمجموعات الثلاث تتأثر بدرجة نقاوة المادة وعلى وجه الخصوص لمواد أشباه الموصلات – حيث أن نسبة بسيطة من الشوائب تستخدم أساسا للتحكم فى الخواص الكهربائية لهذه المواد. المعامل الحرارى للمقاومة النوعية للمعادن ذو قيم موجبة عند درجات الحرارة العادية أما بالنسبة لمواد أشباه الموصلات فإن قيم المعامل الحرارى للمقاومة النوعية أما أن تكون موجبة أو سالبة وتتغير قيمها بشكل غير خطى مع درجات الحرارة . عدد حوامل الشحنة فى المواد العازلة ذات قيم صغيرة ولكنها تعتمد كثيرا على درجات الحرارة .

الجدول (١–١) قيم المقاومة النوعية لبعض المواد

نوع المادة	أسماء بعض المواد	قيم المقاومة النوعية
المواد العازلة	الكوارتز	10^{19}
	المطاط	10^{18}
	النيلون	14×10^{14}
	الزجاج	17×10^{12}
	بورسلين	3×10^{11}
مواد أشباه الموصلات	سليكون نقى	2×10^{5}
	جيرمانيوم نقى	٦٥
	كربون	4×10^{-3}
المواد الموصلة	بلاتين	10^{-5}
	ألومنيوم	2.8×10^{-6}
	النحاس	1.7×10^{-6}
	الفضة	1.6×10^{-6}

١ – ٦ الإلكترونات والثقوب فى مواد أشباه الموصلات

فى مواد أشباه الموصلات ذات النقاوة المطلقة تنتج الإلكترونات والثقوب المسببة للتوصيل الكهربائى عن طريق تحطيم الروابط بين الذرات وبالتالى فإن معدلات تركيز الإلكترونات والثقوب متساوية (ن = ب) وتسمى المادة فى هذه الحالة مادة متجانسة أو مادة جوهرية ويسمى تركيز حوامل الشحنات الجوهرية[٢] ويرمز لها بالرمز (شج) تركيز حوامل الشحنات الجوهرية هى دالة لقيم الطاقة الإهتزازية وتكوينات ذرات المادة نفسها .



الشكل (١–١٣) كثافة حوامل الشحنات كدالة لكل من درجة الحرارة والفجوة الطاقية لبعض مواد أشباه الموصلات

---

[٢] (intrinsic concentration) تركيز الشحنات الجوهرية – تتسبب الإثارة الحرارية للشحنات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل لتوليد شحنات حرة في كلا النطاقين٠ . تركيز الشحنات يسمى تركيز الشحنات الجوهرية٠ وتسمى مواد أشباه الموصلات التي لم يضاف لها شوائب من أجل تغيير تركيزالشحنات بالمواد الجوهرية.٠ أن تركيز الشحنات الجوهرية هو عدد الإلكترونات في نطاق التوصيل أو عدد الثقوب في نطاق التكافئ في المواد الجوهرية. يعتمد عدد الشحنات على الفجوة الطاقية للمادة وعلى درجة الحرارة ٠

يوضح الشكل (١-١٣) كثافة تركيز حاملات الشحنات الجوهرية ويرمز له بالرمز (نج)[٣] لثلاث مواد مختلفة من مواد أشباه الموصلات الجرمانيوم - السيليكون - جاليوم أرسنيد - كما يتبين من الشكل :

- كثافة تركيز حاملات الشحنات الجوهرية (نج) تتزايد بشكل كبير مع درجات الحرارة.
- كثافة تركيز حاملات الشحنات الجوهرية تتناقص بشكل كبير مع إتساع الفجوة الطاقية

يمكن توضيح الشكل السابق بالمعادلة (٢) بالإعتماد الأسى على درجة الحرارة :

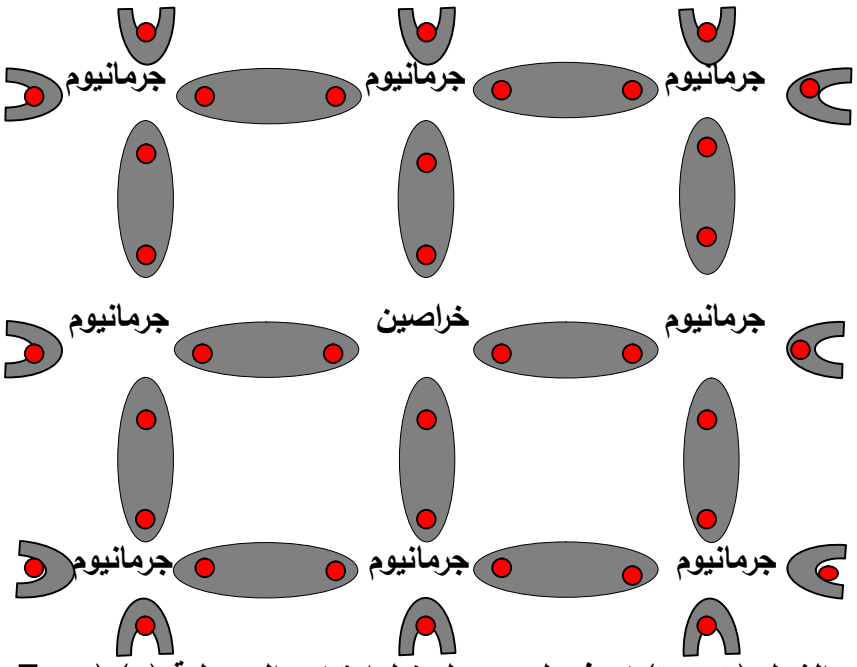
$$n_i \propto e^{\left(-E_a/KT\right)}$$ المعادلة رقم (٢)

$$E_a = \frac{1}{2} E_g$$ المعادلة رقم (٣)

نستعرض بالدراسة في حالة إضافة بعض الشوائب من مواد العمود الخامس أو العمود الثالث من الجدول الدورى لمواد أشباه الموصلات مثل السيليكون أو الجرمانيوم وكل منها يحتل مكاناً في العمود الرابع من الجدول الدوري .

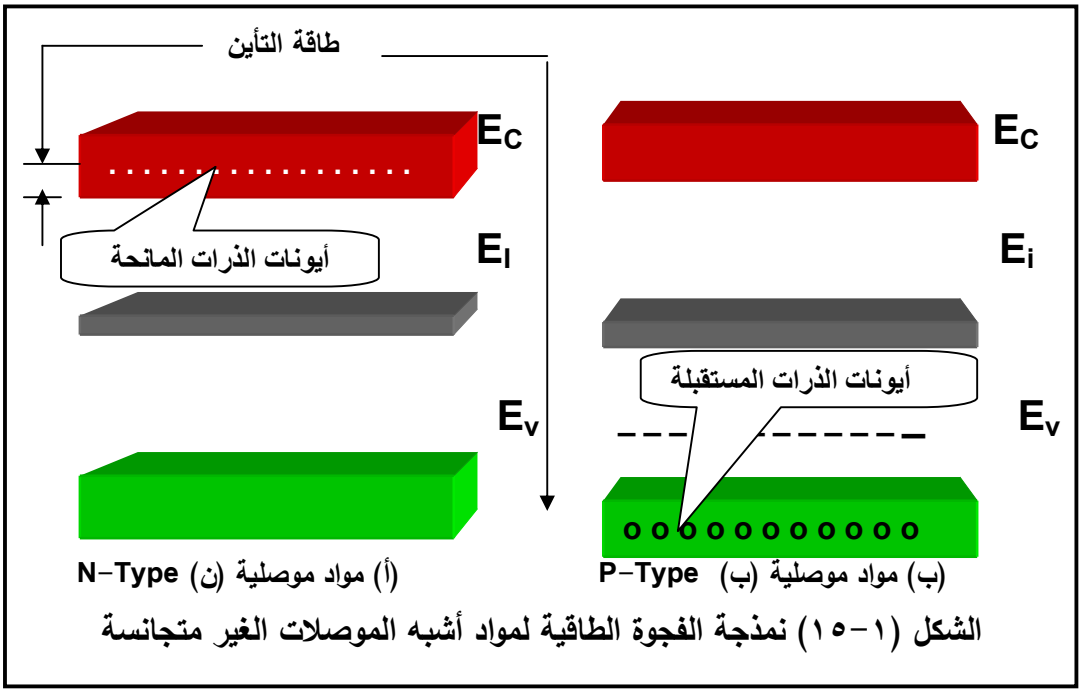
[٣] تركيز حاملات الشحنات الجوهرية (نج) N_i Can be denoted in Arabic

١-٦-١ مواد أشباه الموصلات بإضافة شوائب من مواد العمود الخامس (نوع المادة- ن) بإضافة شوائب يشتمل مدارها الخارجى على خمس إلكترونات لمادة شبه موصل يشتمل مدارها الخارجى على أربع إلكترونات بمعنى آخر بإضافة مواد من العمود الخامس مثل مواد الفوسفور – الأنتيمون – الخراصين الى مواد من العمود الرابع من الجدول الدورى للمواد (الشكل ١-١٤) – فان الإلكترون االخامس فى المدار الخارجى لذرات المادة المضافة لا يجد مكان فى الراوابط المنتظمة لتكوينات ذرات بلورات الجرمانيوم أو السيلكون. بالتالى يتمتع هذا الإلكترون بخاصية الحركة والتجوال حيث أن طاقة التأين للمادة الشائبة حوالى ٠و٠٥ إلكترون فولت . وهذا المقدار من الطاقة يسهل الحصول عليه فى درجات الحرارة المحيطة. وبالتالى فإن الشوائب المضافة من العمود الخامس إلى مواد الجرمانيوم أو السليكون تتأين عند درجات حرارة الغرفة.



الشكل (١-١٤) نموذج لتكوين بلورة لمادة نوع الموصلية (ن) (N-Type)

وبالتالى ينتج عدد متساوى من إلكترونات التوصيل وتسمى هذه الظاهرة بالتأين الكامل[٤] مما تعطى كثافة إلكترونات (ن) مساويا لعدد الإلكترونات المسببة لظاهرة التوصيل (نم) وتمثل كمية تركيز الشوائب من العمود الخامس وتسمى الإلكترونات المانحة حيث أنها تظهر كشحنات سالبة فى مستوى نطاق التوصيل لبلورات الجرمانيوم أو السليكون. في (الشكل ١-١٥أ) نموذج لتمثيل مستويات الطاقة حيث تتساوى إلكترونات التوصيل والإلكترونات المانحة كما هو مبين. وتظهر أيونات الإلكترونات المانحة كشحنات موجبة فى مستوى أدنى بقليل من مستوى الحد الأدنى للطاقة فى نطاق التوصيل.



الشكل (١-١٥) نمذجة الفجوة الطاقية لمواد أشبه الموصلات الغير متجانسة

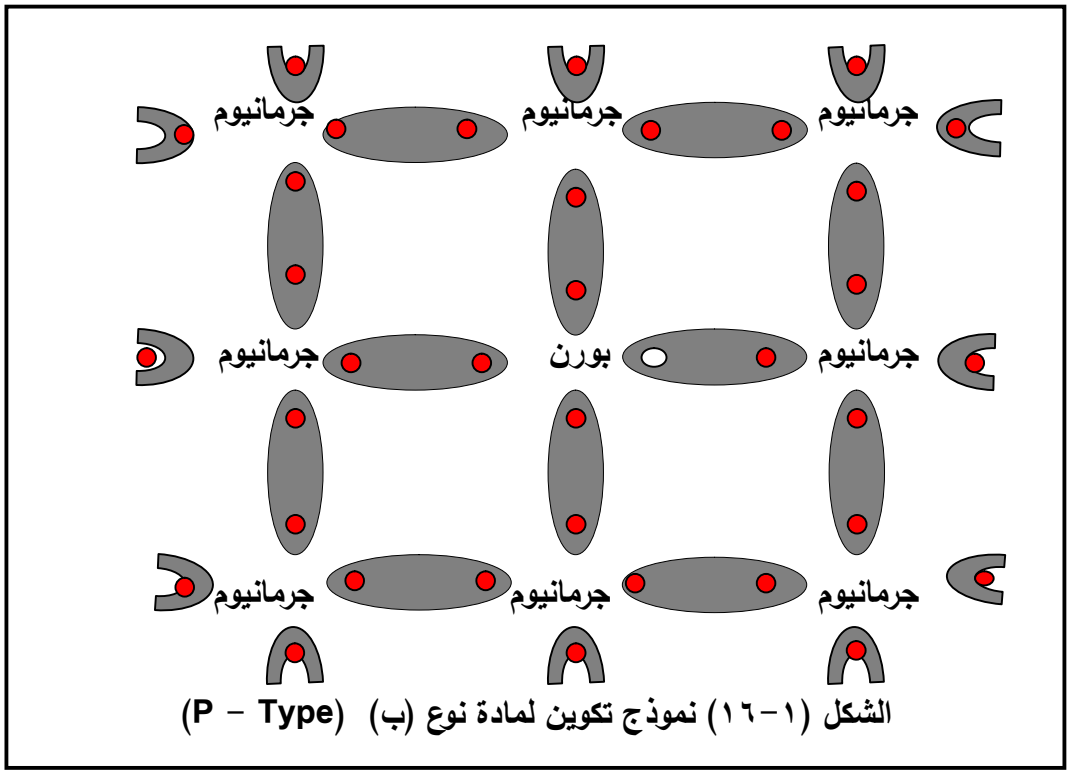
في النموذج (الشكل ١-١٥) لتمثيل مستويات الطاقة فى حالة التأين الكامل يتساوى تركيز حاملات الشحنات المانحة والثقوب المستقبلة.

---

٤ - االتأين الكامل يحدث عندما تتأين كل الذرات المانحة (نم) المتعارف عليها (N_D) أو الذرات المستقبلة فى مادة شبه موصل مخدرة ٠ كل الذرات المانحة موجبة الشحنة وكل الذرات المستقبلة سالبة الشحنة وغالبا ما يحدث التأين الكامل فى درجات حرارة الغرفة٠

١ – ٦ – ٢ مواد أشباه الموصلات بإضافة شوائب من مواد العمود الثالث (نوع المادة– ب)

بإضافة شوائب يشتمل مدارها الخارجى على ثلاث إلكترونات لمادة شبه موصل يشتمل مدارها الخارجى على أربع إلكترونات بمعنى آخر بإضافة مواد من العمود الثالث مثل مواد البورن – الألمنيوم – الجاليوم – الإنديوم الى مواد من العمود الرابع من الجدول الدورى للمواد (الشكل ١ –١٦) – وحيث أن مواد العمود الثالث تشتمل فى مدارها الخارجى على ثلاث الكترونات فقط ينقصها إلكترون واحد أقل من مواد العمود الرابع مثل الجرمانيوم أو السليكون فيمكن إعتبار ذرات مواد العمود الثالث حاملة الى ثقب ذات شحنات موجبة . بالتالى فمن السهل أن يتمتع هذا الثقب بخاصية الحركة والتجوال فى حال إكتسابه طاقة تأين حوالى ٠٫٠٥ الكترون فولت .



الشكل (١–١٦) نموذج تكوين لمادة نوع (ب) (P – Type)

هذه الكمية من الطاقة سهل الحصول عليها فى درجات الحرارة المحيطة. وبالتالى فإن الشوائب المضافة من العمود الثالث الى مواد الجرمانيوم أو السليكون تتأين عند درجات حرارة

الغرفة – وعندما تصل الى مرحلة التأين الكامل تنتج عدد متساوى من ثقوب التوصيل وتكون كثافة ثقوب (ب) مساويا لعدد الثقوب المطعمة لظاهرة التوصيل (ب$_{م_1}$)[٥] وتمثل كمية تركيز الشوائب من العمود الثالث وتسمى الثقوب المستقبلة حيث أنها تستقبل إلكترون من مستوى التكافئ لبلورة الجرمانيوم أو السليكون كما فى النموذج (الشكل ١-١٥) لتمثيل مستويات الطاقة فى حالة التأين الكامل وتظهر أيونات الثقوب المستقبلة كشحنات سالبة أعلى بقليل من أعلى مستوى فى نطاق التكافئ. فى المواد نوع (ن) فإن عدد الإلكترونات أكبر بكثير من عدد الثقوب (ن > ب) والتيار الناتج هو نتيجة لحركة الإلكترونات محدثا ظاهرة التوصيل الكهربائى فى مستوى طاقة التوصيل. فى المواد نوع (ب) فإن عدد الثقوب أكبر بكثير من عدد الإلكترونات (ب > ن) والتيار المار نتيجة لحركة الثقوب محدثا ظاهرة التوصيل الكهربائى فى نطاق مستوى التكافئ وبصفة عامة يتم تحديد نوع التوصيل فى أى من مواد أشباه الموصلات بمادة الشوائب المضافة – وتوضح المعادلات التالية عدد أو تركيز حاملات الشحنات الأغلبية.

$$n = N_D - N_A \quad (If \ N_D \rangle N_A) \qquad \textbf{المعادلة رقم (١-٤)}$$

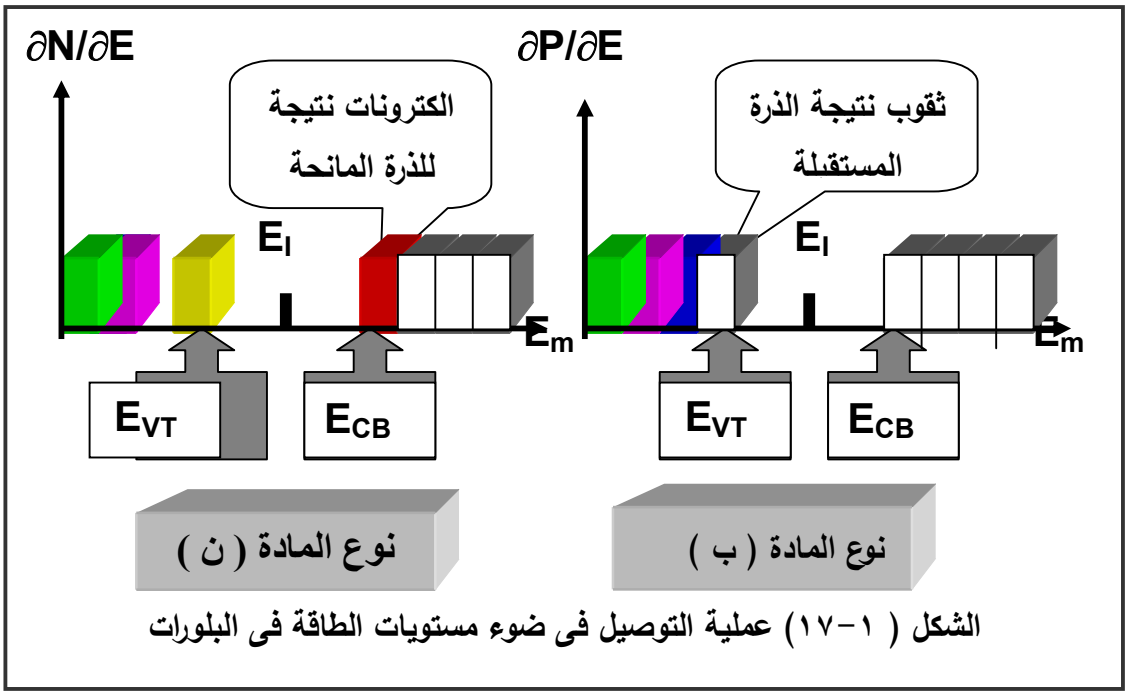
$$p = N_A - N_D \quad (If \ N_A \rangle N_D) \qquad \textbf{المعادلة رقم (١-٥)}$$

موضح بالشكل (١-١٧) مستويات الطاقة فى البلورات فى مادة شبه الموصل النوع (ن) فإن الإلكترون الحر الزائد من الذرة المانحة يمتلك من الطاقه ما يكفى لإشغال المستوى الأدنى لنطاق التوصيل[٦](**ط$_{م}$ ت**) (**E_{CB}**) **ويحدث التوصيل نتيجة للإلكترونات فى نطاق مستوى التوصيل .**

---

[٥] (ب$_{م_1}$) تركيز حاملات الشحنات الجوهرية (ن$_{ج}$) **$p=N_A$ Can be denoted**

[٦] E_{CB} **Can be denoted in Arabic** (ط$_{م}$ ت)



الشكل (١-١٧) عملية التوصيل فى ضوء مستويات الطاقة فى البلورات

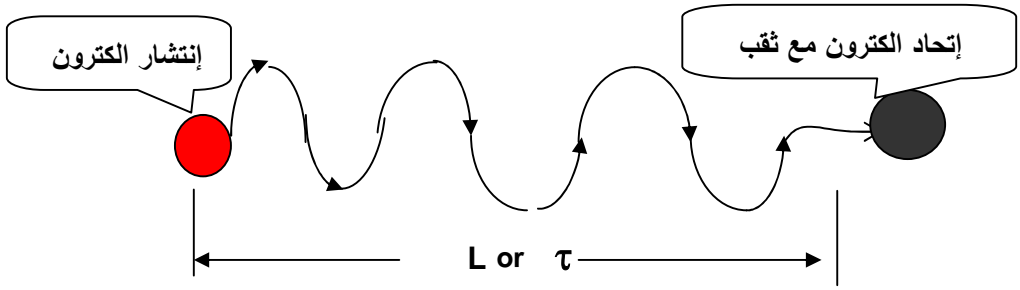
فى مادة شبه الموصل النوع (ب) فى غياب إلكترون واحد يتسبب فى عدم إستكمال مستوى التكافئ مما يسمح بإنتقال إلكترون من ثقب الى ثقب آخر مما يتسبب فى تغيير مكان الثقب وهذا يعنى أن عملية التوصيل فى مواد أشباه الموصلات النوع (ب) تحدث نتيجة حركة الثقوب فى نطاق مستوى التكافئ – فى حال تساوى عدد الذرات المانحة والذرات المستقبلة المضافة الى بلورة سليكون أو جرمانيوم نقية فإن إلكترونات الذرات المانحة تملأ الثقوب فى الذرات المستقبلة فإن عملية التوصيل الكهربائى تقترب من نسب التركيز فى ذرات الجرمانيوم أو السيلكون النقية. وتسمى فى هذه الحالة مادة معوضة ٠ المواد المعوضة[٧] هى مواد غير جوهرية لها نفس خواص المواد الجوهرية. تنتشر حوامل الشحنات من مكان إنطلاقها ثم تتحد بعد مسافة معروفة بإسم طول الإنتشار أو عمر الشحنات[٨] كما هو

---

[٧] (compensated material) مواد أشباه الموصلات المعوضة هى التى تحتوى على كل من ذرات مانحة ومستقبلة قليلة – كميات متساوية من النوعين تعوض بعضها البعض لا تسفر عن شحنات حرة٠ إلكترونات الذرات المانحة تقع فى مستوى الذرات المستقبلة ٠ تتأين الذرات المستقبلة بدون الكترون أو ثقي حر مما تنشأ كثافة شحنات تساوى الفرق بين تركيز الذرات المانحة والمستقبلة

[٨] طول الإنتشار L is the diffusion length and τ is the life time of charge carriers

موضح بالشكل (١ – ١٧) وقد تم ملاحظة أن تركيز حوامل الشحنات المحقنة تتناقص مع الوقت حيث تتم عملية الإنتشار كدالة أسية $e^{t/\iota}$ او $e^{-x/Ln}$ وتبين المعادلتين (١–٦) و(١–٧) متوسط مسافة إنتشار الإلكترونات أو الثقوب قبل عملية الإتحاد



الشكل (١ – ١٨) عملية إنتشار الكترون ثم إتحاده مع ثقب

المعادلة (١ – ٦) $$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

المعادلة (١ – ٧) $$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

االجدول (١ –٢) تلخيص لخواص المواد ذات النوع (ن) و (ب)

الخواص	مادة النوع (ن)	مادة النوع (ب)
عدد إلكترونات التكافئ للمادة الشائبة المضافة	أكثر من أربع إلكترونات	أقل من أربع إلكترونات
نوع حاملات الشحنات	الذرات المانحة	الذرات المستقبلة
أسماء المواد	خراصين فوسفور أنتيمون بزيموس	إنديوم بورن جاليوم الومنيوم
حوامل الشحنات الأغلبية	الكترونات	ثقوب
حوامل الشحنات الأقلية	ثقوب	الكترونات
النطاق الذى تتحرك فيه حاملات الشحنات	مستوى نطاق التوصيل	مستوى نطاق التكافئ

جدول (١-٣) حاملات شحنات فى السيلكون ذات موصلية (ن) عند درجات حرارة مختلفة

	إلكترونات حرة ناتجة من ذرات مانحة	إلكترونات حرة متولدة حراريا	العدد الكلى للإلكترونات	ثقوب متولدة حراريا
حرارة الصفر المطلق	لا يوجد	لا يوجد	لا يوجد	لا يوجد
درجة الحرارة ٢١ م$^{\circ}$	١٠ ^{١٥}	١٠ ^{١٠}x٥و١	١٠ ^{١٥}	١٠ ^{١٠}x٥و١
درجة الحرارة ٢٠٠ م$^{\circ}$	١٠ ^{١٥}	١٠ ^{١٥}	١٠ ^{١٠}x٢	١٠ ^{١٥}
درجة الحرارة ٢٥٠ م$^{\circ}$	١٠ ^{١٥}	١٠ ^{١٥}	١٠ ^{١٦}x١و١	١٠ ^{١٦}

١ – ٧ دالة توزيع فيرمي ديراك[٩]

فى ضوء نموذج تمثيل مستويات الطاقة في المواد الصلبة – نجد أن مستويات الطاقة تنقسم الى نطاقات ويمكن أن تحتل الإلكترونات بعض من هذه النطاقات . وبناء على منطوق باولى[١٠] الذى أشار الى أن هناك العديد من مستويات الطاقة الغير مشغولة بإلكترونات كما أنه لا يوجد إلكترونين لهما نفس الطاقة فى نفس الذرة فى نفس الوقت .إذا فما هى إحتمالات شغل مستوى طاقة معين بإلكترونات؟ يمكن التعبير عن الكثافة الفعلية للإلكترونات التى إكتسبت كمية من الطاقة وتشغل مستويات طاقة فى نطاق معين بين مستويين عند درجة حرارة الصفر المطلق بإستخدام دالة توزيع قيرمي على النحو التالى :

$$dN = \frac{C\sqrt{E}\,dE}{e^{(E-E_f)+1}}$$ معادلة رقم (١-٨)

---

[٩] (Fermi–Dirac statistics) تصف إحصائيات فيرمى ديرك توزيع الجسيمات عبر مستويات الطاقة في النظم لتكون العديد من الجسيمات المتماثلة٠ و يمكن تطبيقها على جسيمات متماثلة مع نصف عدد صحيح قابل للزيادة والنقصان في نظام في حالة توازن ديناميكى حراري. بالإضافة ، يفترض بأن الجزيئات في هذا النظام أن لا يكون لها تفاعل متبادل يعتد به٠ مما يسمح بتوصيف العديد من الجسيمات من حيث مستوى الطاقة بأنها جسيمات أحادية الطاقة

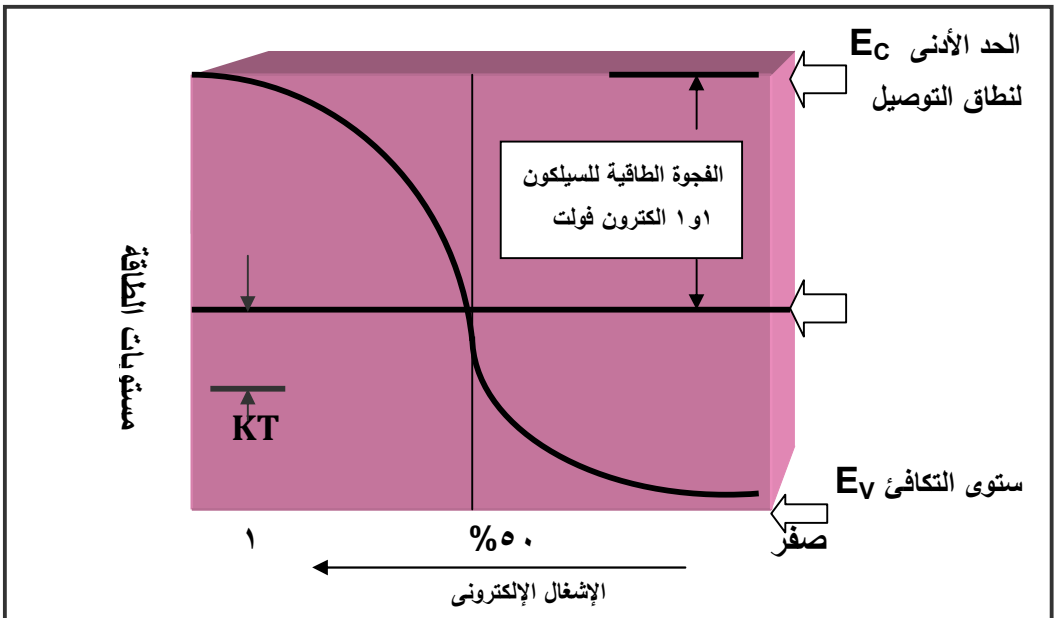
[١٠] (Pauli Exclusion) يشتمل مبدأ استبعاد باولي شرط أنه لا يوجد جسيمين اثنين يمكنهما شغل نفس مستوى الطاقة مما يؤثر تأثيراً كبيرا على خصائص النظام.

حيث يمكن تحديد قيمة ثابت الإحتمالات (C) كما فى المعادلة رقم (١-٩) :

$$C = \frac{4\pi\,(2\,m_e)^{3/2}}{h^2} = 6.28\ x\,10^{27}\ electrons \quad / m / e V^{3/2}$$

معادلة رقم (١-٩)

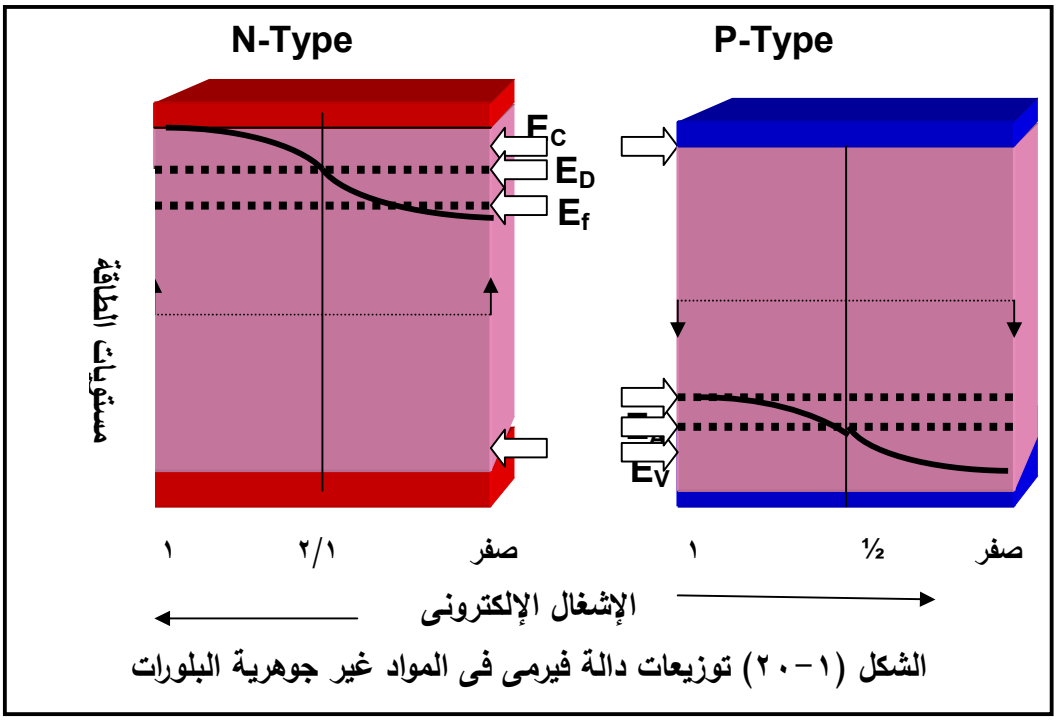
حيث (h) ثابت بلانك و(E_f) أعلى مستوى طاقة إلكترونية عند درجة حرارة الصفر المطلق – ومن المهم التأكيد على أنه عند درجة حرارة الصفر المطلق فإن كل حاملات الشحنات فى حالة تجمد غير قادرة على الحركة وتحتل المستوى الأدنى فى الفجوة الطاقية – يتبين أن إحتمال وجود إلكترونات عند مستوى طاقة يساوى مستوى طاقة فيرمى يساوى ٥٠% . فى نطاق التوصيل يتواجد عدد كبير من مستويات طاقة غير مشغولة بإلكترونات وإحتمالات تواجد إلكترونات إحتمال بسيط فهناك عدد ليس بكثير من الإلكترونات فى نطاق مستوبات التوصيل وفي المقابل نجد عدد كبير من مستويات الطاقة فى نطاق مستوى التكافئ مشغولة بإلكترونات وتصل إحتمالات شغل هذه المستويات بإلكترونات الى ١٠٠% وبالتالى فان عدد بسيط من مستويات الطاقة فى نطاق مستوى التكافئ غير مشغول بإلكترونات- يوضح الشكل (١ -١٩) دالة توزيع "فيرمي ديراك" متناظرة حول مستوى فيرمي.



الشكل (١ -١٩) دالة توزيع "فيرمي ديراك" متناظرة حول مستوى فيرمي

إذا كان عدد مستويات الطاقة في نطاقى التوصيل والتكافئ متساوى وإذا كان عدد

الإلكترونات في النطاقين أيضا متساوى . يقع مستوى فيرمي فى منتصف الفجوة الطاقية في حالة المواد الجوهرية وبالتالى فى المواد جوهرية البلورات نجد أن عدد الإلكترونات يساوى عدد الثقوب ومستوى طاقة الإشغال يساوى مستوى طاقة فيرمى ويرمز له (E_{fi}) .

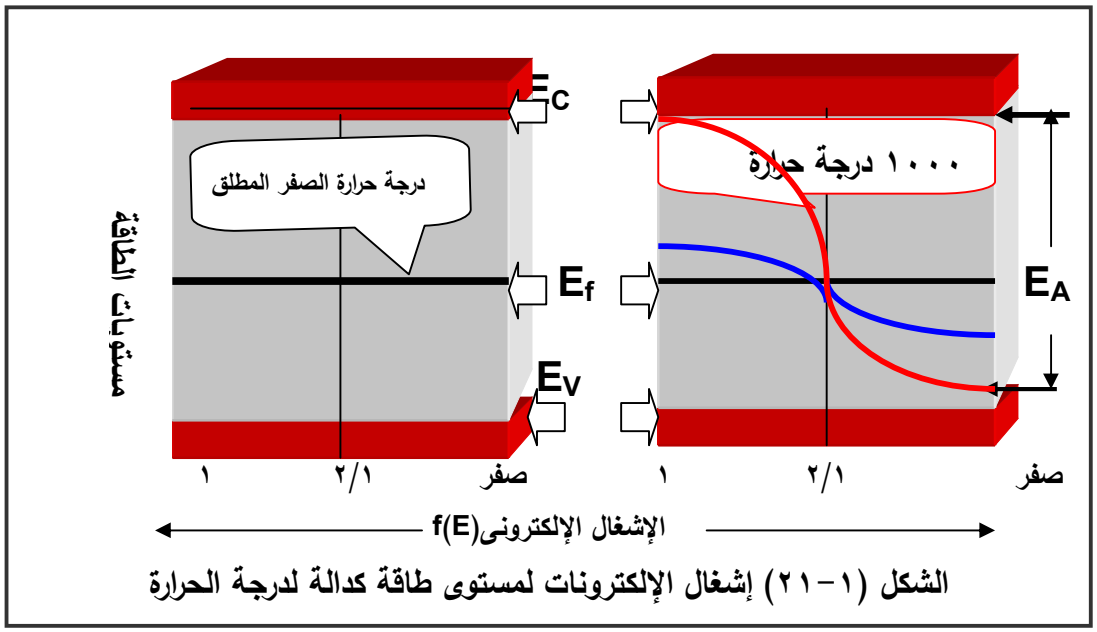


الشكل (١-٢٠) توزيعات دالة فيرمى فى المواد غير جوهرية البلورات

فى المواد ذات الموصلية (ن) فإن تركيز الإلكترونات فى مستوى التوصيل أكبر من تركيز الإلكترونات فى المواد الجوهرية وأن تركيز الثقوب فى مستوى التوصيل مساويا لتركيز الشحنات الموجبة (الثقوب) فى المواد الجوهرية وبالتالى فان دالة فيرمى تتحرك إلى الأعلى في نموذج تكوينات الطاقة فى المواد ذات الموصلية (ن) وفي المقابل فى المواد ذات الموصلية (ب) فإن مستوى فيرمى ودالة الإحتمالات لفيرمى سوف تتحرك إلى الأسفل في إتجاه نطاق التكافئ ويمكن إعتبار مستوى فيرمي مقياس لشغل مستويات الطاقة بالإلكترونات في المواد ويمكن التعبير عن مستوى فيرمى بالمعادلة (١- ١٠) وتساوى:

$$E_f = \left[\frac{3N}{2C} \right]^{3/2} = 3.64 \ x \ 10^{-19} \ N^{2/3}$$ المعادلة (١ – ١٠)

حيث (N) كثافة الإلكترونات الحرة فى المتر المكعب . تعتمد الخواص الكهربائية للمادة على وجود أو عدم وجود إلكترونات فى حيز طاقة معين. تستخدم إحصائيات فيرمى لتحديد كثافة الإلكترونات فى أى مستوى طاقة وبالتالى يمكن التعبير عن هذه الإحتمالات بإستخدام دالة فيرمى (f(E)).



الشكل (١-٢١) إشغال الإلكترونات لمستوى طاقة كدالة لدرجة الحرارة

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/KT}}$$ المعادلة رقم (١-١١)

فى حالة أن يكون مستوى الطاقة المراد تحديد شغله بإلكترونات مساويا لمستوى فيرمى وبالتالى فإن إحتمالات دالة فيرمى تساوى ٢/١ أى أن هناك فرصة خمسون فى المائة أن يكون مستوى الطاقة مشغول بإلكترونات – يوضح الشكل (١-٢١) إشغال الإلكترونات لمستوى طاقة كدالة لدرجة الحرارة – إحتمالات إشغال مستوى الطاقة يتزايد بزيادة درجة الحرارة ويتناقص كلما إنخفضت درجة الحرارة – عند درجة حرارة الصفر المطلق فإن إحتمالات وجود إلكترونات عند مستوى طاقة أعلى من مستوى فيرمى يساوى صفر وتصل إحتمالات شغل إلكترونات لمستويات طاقة أقل من مستوى فيرمى الى ١٠٠% .