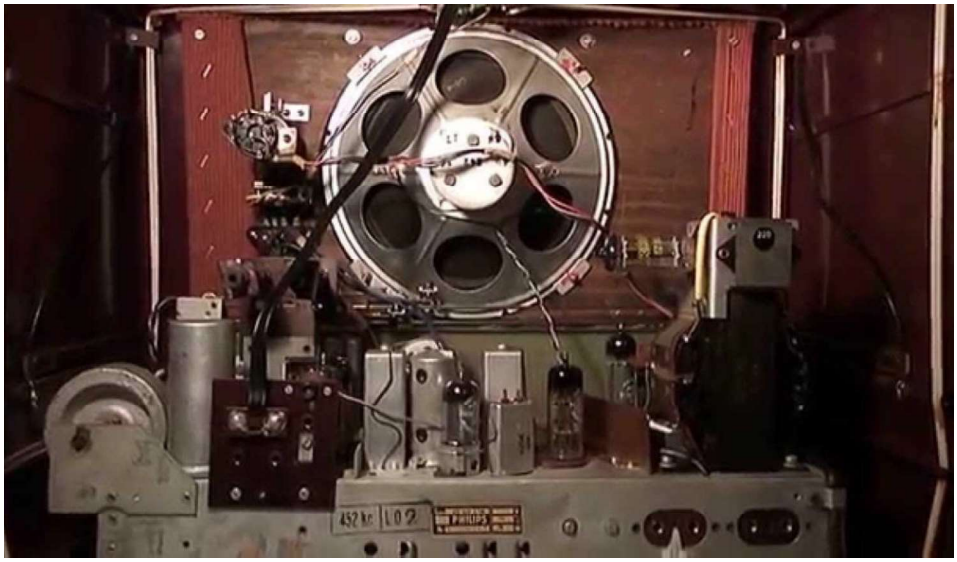


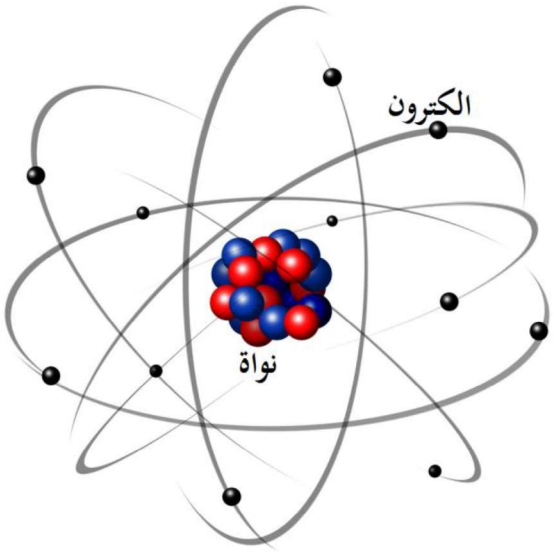
شكل (١–٨) صورة لجهاز راديو يعمل بالصمامات المفرغة

ان نبائط أشباه الموصلات مثل الثنائي البلوري، الترانزستور والدوائر المتكاملة مصنوعة من مواد شبه موصلة ولفهم عملها لابد من دراسة التركيب الذري للمواد بصورة عامة وتركيب المواد الصلبة البلورية بشكل خاص. الشكل (١–٩) يمثل مقارنة بين شكل وحجم ترانزستور أشباه الموصلات والصمامات المفرغة.

شكل (١–٩) مقارنة بين ترانزستور أشباه الموصلات والصمام المفرغ

٤.١ التركيب الذري Atomic Structure:

ان جميع المواد مكونة من ذرات، وكل ذرة مكون من نواة تتركز فيها كتلة الذرة وتضم بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة الشحنة (باستثناء ذرة الهيدروجين إذ تحتوي نواتها على بروتون واحد فقط)، وتدور حول النواة جسيمات متناهية في الصغر تسمى الإلكترونات وذات شحنة سالبة تساوي عددياً شحنة البروتون ($1.602X10^{-19}C$) وبمدارات محددة (دائرية أو قطع ناقص). وكما هو موضح بالشكل (١–١٠). في الحالة الاعتيادية يكون عدد الإلكترونات مساوياً لعدد البروتونات وبالتالي تكون الذرة متعادلة كهربائياً.



شكل(١-١٠) مخطط للتركيب الذري

ان الإلكترونات التي تكون في مدارات ابعد عن النواة تمتلك طاقة اكبر وهي بنفس الوقت الأقل ارتباطاً مع الذرة بالمقارنة مع الإلكترونات في المدارات الأقرب، وهذا بسبب كون قوة التجاذب بين النواة الموجبة والإلكترون تتناقص كلما زادت المسافة بين الإلكترون والنواة.

تسمى الإلكترونات الأعلى طاقة والمتواجدة في الغلاف الخارجي الأبعد للنواة والتي تكون الأقل ارتباطاً بالنواة بإلكترونات التكافؤ (Valence electron) والغلاف الخارجي الأبعد يسمى غلاف التكافؤ (Valence shell). ان الكترونات التكافؤ هي التي تسهم في التفاعلات الكيميائية والروابط بين الذرات ضمن المادة وكذلك هي التي تحدد الخواص الكهربائية للمادة.

ان اقصى عدد من الإلكترونات (N_e) يمكن ان تتواجد في غلاف معين لذرة ما تعطى بالمعادلة:

$$N_e = 2n^2 \qquad (1-5)$$

حيث n هو تسلسل الغلاف. وفيما يلي امثله لأقصى عدد من الإلكترونات تتواجد لأول أربعة أغلفة:

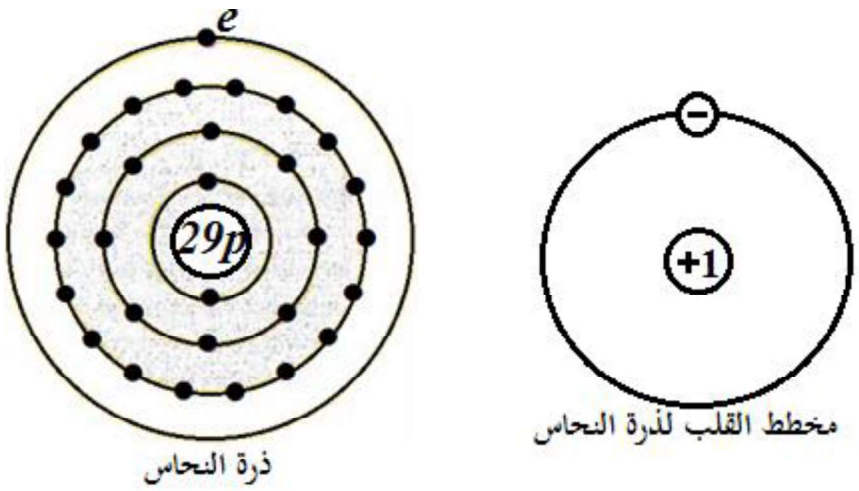
For $n=1,\ N_e = 2$

$n=2,\ N_e = 8$

$n=3,\ N_e = 18$

$n=4,\ N_e = 32$

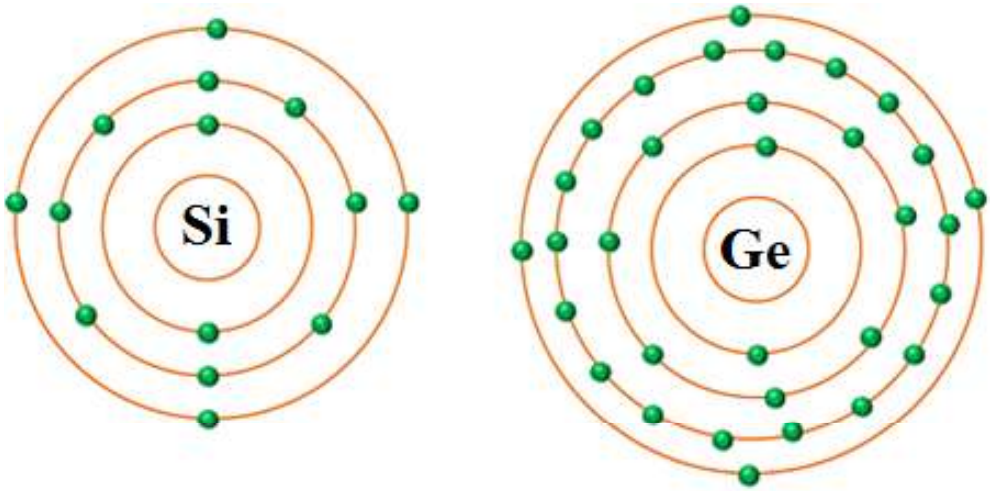
لتوضيح أهمية غلاف التكافؤ يعرف قلب (core) ذرة ما بانه النواة وكل الأغلفة الداخلية المحيطة بها، فعلى سبيل المثال تحتوي ذرة النحاس Cu على 29 الكترون بالشكل (١-١١).



شكل (١-١١) ذرة النحاس ومخطط القلب لها

يلاحظ من الشكل ان لقلب ذرة النحاس شحنة صافية مقدارها (+e) وذلك لانها تحتوي على 29 بروتون و 28 الكترون في الأغلفة الداخلية الثلاث، وحيث ان الكترون التكافؤ في مدار بعيد نسبياً عن قلب الذرة التي تحمل شحنة بروتون واحد (+e) لذلك يكون ارتباط الكترون التكافؤ في حالة ذرة النحاس ضعيف جداً وبالتالي فان أي قوة خارجية يمكنها بسهولة ان تحرر الكترون التكافؤ من ذرة النحاس وعند تسليط أي جهد كهربائي بسيط يتحرك الإلكترون من ذرة نحاس إلى أخرى ولهذا السبب يعتبر النحاس موصل جيد للكهرباء.

ان افضل الموصلات مثل الفضة ، النحاس والذهب تمتلك الكترون تكافؤ واحد ، بينما افضل العوازل تمتلك ثمان الكترونات تكافؤ (إذ ان غلاف التكافؤ يتشبع بثمان الكترونات) اما أشباه الموصلات فلها خواص كهربائية تقع بين الموصلات والعوازل ، أي ان افضل أشباه الموصلات تمتلك اربع الكترونات تكافؤ ومن امثلتها السليكون Si والجرمانيوم Ge وكما هو موضح بالشكل (١-١٢).

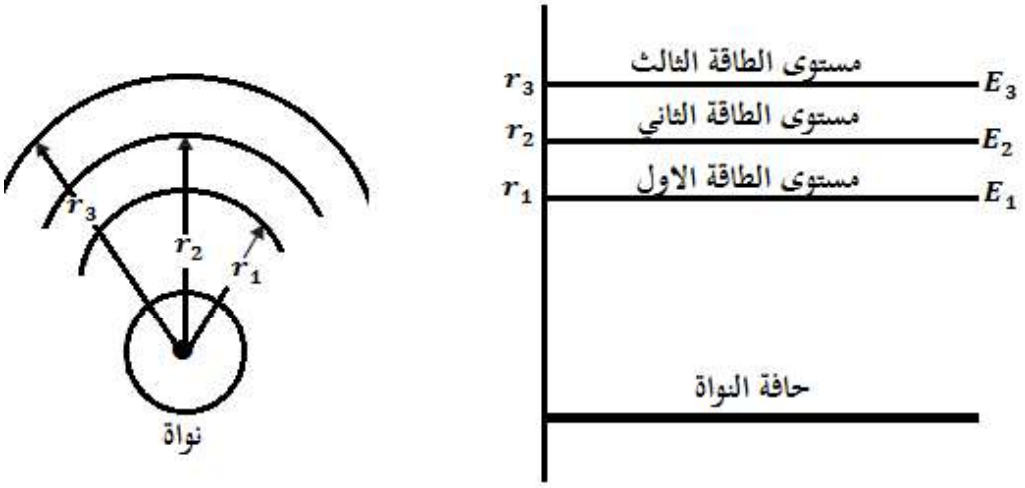


شكل (١-١٢) مخطط لذرة السليكون وذرة الجرمانيوم

في الشكل (١-١٢) نلاحظ الكترونات التكافؤ لذرة الجرمانيوم تقع في الغلاف الرابع بينما الكترونات التكافؤ الأربعة للسليكون تقع في الغلاف الثالث الأقرب للنواة. وهذا يعني ان الكترونات التكافؤ للجرمانيوم اعلى طاقة من مثيلاتها في ذرة السليكون وبالتالي فان الكترونات التكافؤ للجرمانيوم سوف تحتاج إلى طاقة اقل للإفلات من مجال جذب نواتها. وهذا يجعل الجرمانيوم اقل استقراراً في درجات الحرارة العالية، وذلك هو سبب أساسي لجعل السليكون المادة شبه الموصلة الأكثر استعمالاً في الوقت الراهن. علماً ان هناك سبباً آخر وهو وفرة السليكون بكثرة في الطبيعة إذ يُعد العنصر الثاني بعد الأوكسجين وفرة في الطبيعة ، إلا ان صعوبة استخلاص عنصر السليكون من مركباته ومن ثم تنقيته كانت وراء انتشار استعمال الجرمانيوم في بدايات عصر الكترونيات أشباه الموصلات وبعد التغلب على تلك المشكلات التقنية اصبح السليكون العنصر الأكثر استعمالاً في تصنيع نبائط أشباه الموصلات.

١.٥ نظرية حزم الطاقة في المواد الصلبة: Energy Bands Theory in Solids

في حالة ذرة مفردة معزولة فان مدار الإلكترون يتأثر فقط بالشحنات الموجودة في الذرة المعزولة، وفي هذه الحالة تكون مستويات الطاقة محددة لكل مدار مسموح للإلكترون وكما موضح بالشكل (١-١٣).



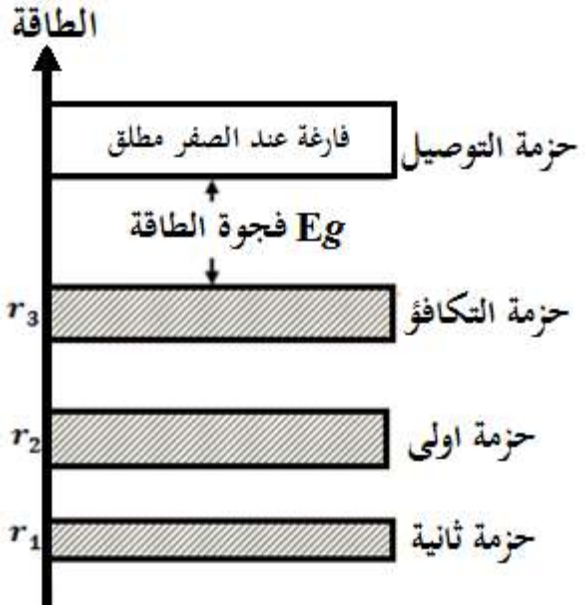
شكل (١-١٣) مخطط مستويات الطاقة لذرة منفردة معزولة

ان ما ذكر بخصوص الذرة المعزولة لا ينطبق في حالة الذرات المكونة للمادة الصلبة. ان معظم المواد الصلبة تكون بلورية التركيب (Crystalline Structure) حيث تصطف مكوناتها الذرية بصورة منتظمة ومتكررة في نسق ثلاثي الأبعاد تسمى البلورة (Crystal).

على سبيل المثال عندما تتحد ذرات السليكون لتكوين بلورة السليكون فان مدار الكترون في ذرة معينة سوف يتأثر بالنوى والإلكترونات الموجودة في كافة الذرات الأخرى التي تحتويها البلورة بالإضافة للشحنات الموجودة في ذرته. وبما ان كل الكترون له موقع مختلف داخل البلورة لذا لا يوجد الكترونان يتأثران

بالشحنات الموجودة بنفس التأثر. ولهذا السبب يختلف مدار كل الكترون عن مدارات الإلكترونات الأخرى وبالتالي فان مستويات الطاقة لكل الكترون ستكون مختلفة.

وبما ان هناك مليارات من الكترونات المدار الأول فان مستويات الطاقة المتباينة قليلاً تشكل تجمعاً أو حزمة (band) الطاقة الأول. كذلك وجود مليارات من الكترونات المدار الثاني يشكل حزمة الطاقة الثاني بسبب الاختلاف البسيط في مستوى طاقة المدار الثاني وتشكل كافة الكترونات المدار الثالث حزمة الطاقة الثالثة وهكذا. الشكل (١-١٤) يوضح مخطط لحزم الطاقة لبلورة السليكون عند درجة حرارة الصفر المطلق (-273 ^{o}C).



شكل (١-١٤) مخطط حزم الطاقة لبلورة السليكون عند درجة الصفر المطلق

يلاحظ من الشكل كذلك انه بمستوى اعلى من حزمة التكافؤ توجد حزمة التوصيل (Conduction band) التي تمثل المجموعة الأعلى طاقة وذات أنصاف الأقطار التي تحقق طبيعة الإلكترون كجسيم وكموجة. ان المدارات في حزمة التوصيل كبيرة بالقدر الذي يجعل جذب النواة للإلكترون ضعيفاً جداً وبعبارة أخرى لو رفع الكترون إلى داخل حزمة التوصيل لاستطاع التحرك بحرية من ذرة إلى أخرى ولهذا السبب تسمى الإلكترونات الموجودة في حزمة التوصيل بالإلكترونات الحرة (*free electrons*).

عند درجة حرارة الصفر المطلق تكون حزمة التوصيل فارغة وهذا يعني انه لا توجد طاقة كافية عند أي الكترون لكي ينتقل إلى مدار حزمة التوصيل. وتسمى المنطقة التي تفصل بين حزمتي التكافؤ والتوصيل بفجوة الطاقة (Energy gap) وتسمى أيضا فجوة الطاقة الممنوعة (Forbidden Energy gap) وذلك لعدم احتوائها على حالات طاقة مسموحة بها.

٦.١ مستوى فيرمي (Fermi level)

ان احتمالية $f_{(E)}$ أي الكترون للتواجد في مستوى معين من الطاقة (E) في حالة الاتزان الحراري في درجة حرارة معينة (T) تعطى بدلالة دالة فيرمي–ديراك:

$$f_{(E)} = \frac{1}{1+e^{(E-E_f)/kT}} \qquad (1-6)$$

حيث E_f هي طاقة فيرمي وقيمتها تعتمد على طبيعة المادة ودرجة الحرارة.

k ثابت بولتزمان ($k=1.38x10^{-23}$ J/K)

T درجة الحرارة بالكلفن

من دالة فيرمي–ديراك نلاحظ انه في حالة الصفر المطلق فانه:

$$If \;\; T = 0k$$

$$f_{(E)} = \begin{cases} 0 & for \;\; E \rangle E_f \\ 1 & for \;\; E \langle E_f \end{cases}$$

من النتيجة الأخيرة نجد انه في حالة درجة حرارة الصفر المطلق فأن مستويات الطاقة الأعلى من طاقة فيرمي تكون فارغة تماماً ($f_{(E)}=0$) بينما مستويات الطاقة الأقل من طاقة فيرمي تكون مملؤة تماماً ($f_{(E)}=1$) ومن ذلك يمكننا ان نعرف **طاقة فيرمي** (Fermi energy) بانها اعلى قيمة للطاقة يمكن ان يمتلكها الكترون في درجة حرارة الصفر المطلق.

كما يمكننا ان نلاحظ من دالة فيرمي–ديراك انه في حالة درجة الحرارة الأكبر من الصفر المطلق وكانت ($E=E_f$) فان

$$If \;\; E = E_f \;\; and \;\; T \neq 0k$$

$$f_{(E_f)} = \frac{1}{2}$$

من النتيجة السابقة يمكن ان نعرف **مستوى فيرمي** (Fermi level) بانه مستوى الطاقة الذي تكون احتمالية اشغاله من الكترون مساوية لـ 50%

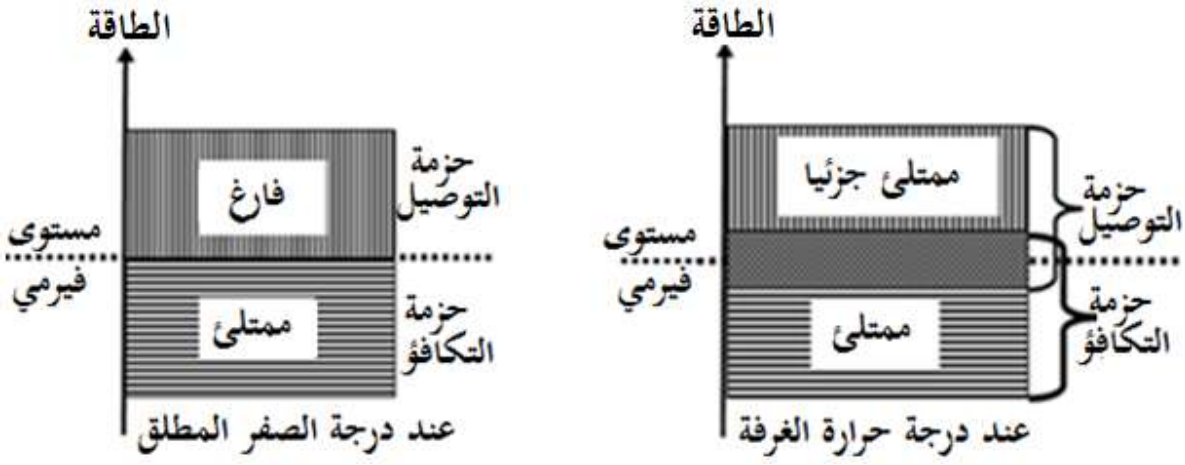
٧.١ تصنيف المواد حسب نظرية الحزم:

بالاعتماد على نظرية حزم الطاقة يمكن تصنيف المواد الصلبة حسب توصيليتها الكهربائية إلى:

١- مواد موصلة (Conductors):

الشكل (١-١٥) يوضح مخططاً نموذجياً لحزم الطاقة في المواد الموصلة. يلاحظ ان مستويات الطاقة قد رسمت بشكل مستمر في حزمة التكافؤ بحيث ظهرت هذه الحزمة متداخلة مع حزمة التوصيل وبالتالي لم يعد هناك وجود لفجوة الطاقة. ان اختفاء فجوة الطاقة في البلورات الموصلة يعني ان أي الكترون تكافؤي سوف يكون حراً في التجوال خلال البلورة وكذلك التحرك استجابة للمجال الكهربائي عند وجوده فيه وهذا هو السبب المباشر في عده موصلاً.

تتوزع الإلكترونات في الحزم حسب قاعدة الاستثناء لباولي وعند درجة حرارة الصفر المطلق لا تستطيع الإلكترونات التحرك خلال البلورة وذلك لانها جميعاً مرتبطة بشدة إلى ذراتها وبالتالي تملأ حزمة التكافؤ من أوطأ مستوى طاقة فيها إلى اعلى مستوى طاقة فيها والذي يسمى مستوى فيرمي (Fermi Level). أي ان حزمة التوصيل في المواد الموصلة تكون فارغة عند درجة حرارة الصفر المطلق إذ لا توجد طاقة كافية عند أي الكترون لكي ينتقل في مدار حزمة التوصيل. عند ارتفاع درجة الحرارة فوق الصفر المطلق فأن الطاقة الحرارية التي سوف تكتسبها الإلكترونات ستمكن بعضاً منها من الإفلات من ذراتها والانتقال إلى حزمة التوصيل فيحدث تداخل بين حزمتي التكافؤ والتوصيل ، وعند تسليط فرق جهد عبر الموصل فان مجالاً كهربائياً يتولد داخل الموصل يعمل على تعجيل الإلكترونات الحرة في حزمة التوصيل وتوليد تيار كهربائي. الشكل التالي يوضح مخطط لحزم الطاقة للمواد الموصلة في درجة حرارة الصفر المطلق وكذلك في درجة حرارة الغرفة (300K) حيث يحدث التداخل بين حزمتي التكافؤ والتوصيل.

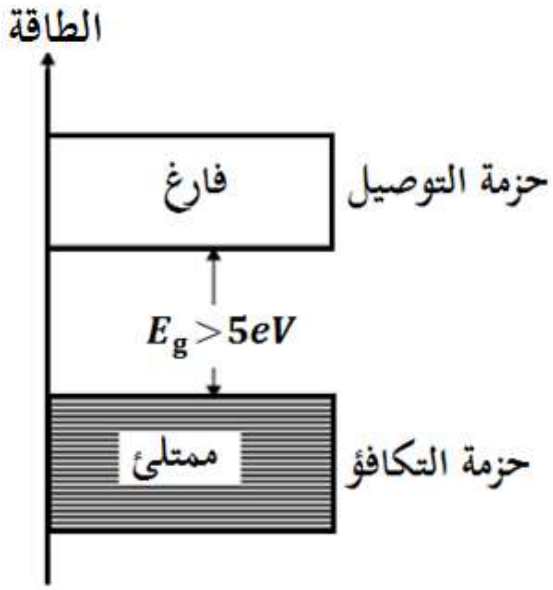


شكل (١-١٥) مخطط حزم الطاقة للمواد الموصلة

بشكل عام تزداد مقاومة المواد الموصلة بزيادة درجة الحرارة وذلك لان ارتفاع درجة الحرارة يزيد من معدل التصادمات التي تحدث بين الإلكترون المتحرك والذرات المهتزة حول مواضع اتزانها في البلورة.

٢- مواد عازلة (Insulators):

الشكل (١-١٦) يوضح مخططاً نموذجياً لحزم الطاقة في المواد العازلة ، حيث يلاحظ ان حزمة التكافؤ تكون مفصولة عن حزمة التوصيل بفجوة طاقة كبيرة نسبيا (5 eV أو اكثر)، في درجات الحرارة الاعتيادية لا تمتلك الإلكترونات في حزمة التكافؤ الطاقة التي تمكنها من الانتقال إلى حزمة التوصيل وبالتالي فانه يمكن القول ان بلورة المادة العازلة تتميز بامتلاكها فجوة طاقة كبيرة نسبياً وتكون حزمة التكافؤ فيها مملؤة بالإلكترونات بينما تكون حزمة التوصيل فارغة.



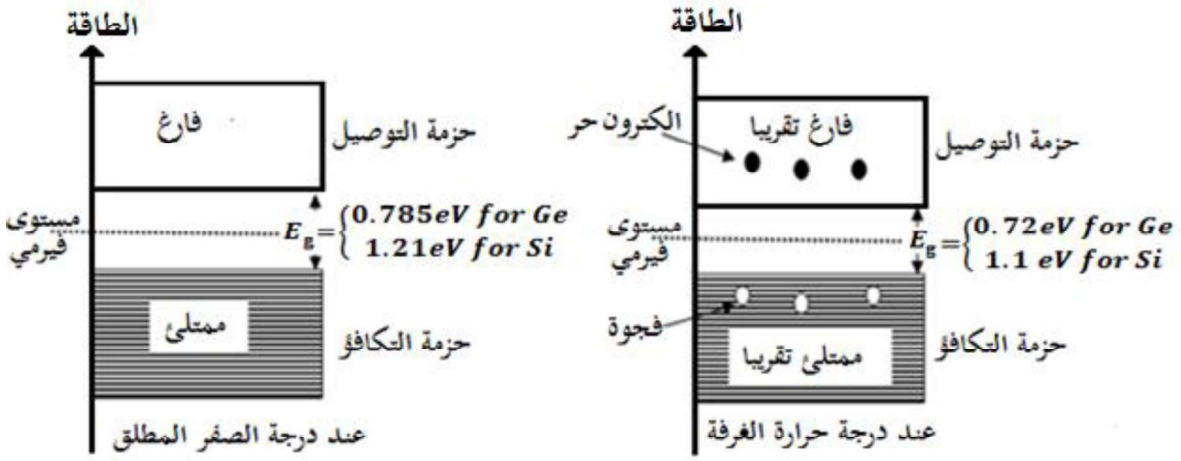
شكل (١-١٦) مخطط حزم الطاقة للمواد العازلة

يتضح مما سبق عدم وجود شحنات حرة في المواد العازلة حيث تكون الكتروناتها مقيدة في أماكنها بقوى ذرية وجزيئية كبيرة جداً، وعند تسليط فرق جهد على هذه المواد فان المجال الكهربائي المتولد سوف يعمل فقط على ازاحة هذه الإلكترونات قليلاً عن مواضع اتزانها الأصلية. في حالات خاصة وعند تسليط فرق جهد كهربائي عالي جداً بحيث تكتسب الكترونات التكافؤ طاقة اكبر من فجوة الطاقة فيحدث انتقال للإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل فيسري تيار كهربائي في العازل وفي هذه الحالة يقال ان مقاومة العازل انهارت بتأثير المجال الكهربائي العالي.

ان تأثير ارتفاع درجة الحرارة على مقاومة المواد العازلة طفيف جداً ، إذ ان زيادة درجة الحرارة تقلل بصورة طفيفة جداً من مقاومة المادة العازلة إلا ان قيمة المقاومة لا تزال عالية جداً.

٣- مواد شبه موصلة (Semiconductors):

لا يختلف مخطط الطاقة لأشباه الموصلات عن نظيره في العوازل إلا في سعة فجوة الطاقة حيث تكون قيمتها في أشباه الموصلات في حدود واحد الكترون فولت (1eV). وتتميز المواد شبه الموصلة بكونها عازلة تماماً عند درجة حرارة الصفر المطلق حيث تكون حزمة التوصيل فارغة (أي لا توجد طاقة كافية عند أي الكترون لكي ينتقل إلى حزمة التوصيل) وفجوة الطاقة تكون (0.785eV) للجرمانيوم و (1.21eV) للسليكون عند الصفر المطلق. وعند ارتفاع درجة الحرارة تنتقل بعض الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل وكذلك تقل فجوة الطاقة بزيادة درجة الحرارة فمثلاً عند درجة حرارة الغرفة تكون فجوة الطاقة (0.72eV) للجرمانيوم و (1.1eV) للسليكون. وبزيادة درجة الحرارة يزداد عدد الإلكترونات المنتقلة إلى حزمة التوصيل وبالتالي تزداد التوصيلية أي ان مقاومة شبه الموصل تقل بارتفاع درجة الحرارة (ويقال عندها ان للمواد شبه الموصلة معامل حراري سالب *negative temperature coefficient*) وعند درجات الحرارة العالية جداً تصبح المادة شبه الموصلة ذات توصيلية عالية أي تصبح مادة موصلة في درجات الحرارة العالية جداً. وفي درجة حرارة الغرفة لا تكون المادة شبه الموصلة عازلاً جيداً كما لا تكون موصلاً جيداً ولهذا تدعى شبه موصل. الشكل (١-١٧) يوضح مخطط حزم الطاقة للمواد شبه الموصلة في درجة حرارة الصفر المطلق وفي درجة حرارة الغرفة.



شكل (١-١٧) مخطط حزم الطاقة للمواد شبه الموصلة

ان قيمة فجوة الطاقة لمادة معينة تعتمد على طبيعة المادة وكذلك على درجة الحرارة حيث تقل فجوة الطاقة بزيادة درجة الحرارة (T). وحسب العلاقة التجريبية لكل من السليكون والجرمانيوم:

For Si, $E_g = 1.21 - 3.6\times10^{-4}\times T \quad (eV)$, where T in K

For Ge, $E_g = 0.785 - 2.23\times10^{-4}\times T\,(eV)$, where T in K