# ٣- مساكن الإلكترونات داخل الذرة وداخل المادة

## ١/٣ مقدمة

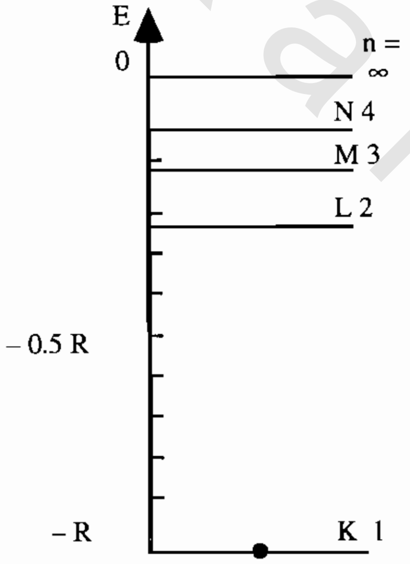
المقصود بمساكن الإلكترونات هى الأماكن المتاحة لتواجد هذه الإلكترونات داخل الذرة وداخل المادة ، وسعة هذه الأماكن . بالنسبة للذرة المنعزلة ، يمكن تعريف هذه الأماكن على أنها المدارات التى تدور فيها هذه الإلكترونات حول النواة فى الفراغ الذرى . أو يمكن تعريفها على أنها مستويات الطاقة لهذه المدارات محسوبة على أساس الشحنة السالبة . تعريف المساكن أو الأماكن على أنها مستويات الطاقة هو الأنسب والمستعمل عادة فى دراسة الإلكترونيات . بالنسبة للمواد ، حيث تتقارب الذرات وتؤثر فى بعضها البعض ، تتحول بعض مستويات الطاقة ، وخاصة العالية منها ، إلى حزم للطاقة . سنرى فيما بعد أن لهذه الحزم السكنية وواقع إشغالها بالإلكترونات تأثيراً كبيراً على الخواص الكهربية لتلك المواد . هذا من ناحية تواجد الأماكن . أما من ناحية الإشغال الفعلى لهذه الأماكن بالإلكترونات ، فيتحكم فى ذلك ثلاثة عوامل . العامل الأول ، وهو أوضح فى حالة الذرة ، هو عدد الإلكترونات فى كل ذرة . فمثلا فى حالة ذرة الهيدروجين يوجد عدد لا نهائى من الأماكن المتاحة ، ولكن ذرة الهيدروجين بها إلكترون واحد فقط لا غير يلزمه مكان واحد فقط لا غير . العامل الثانى هو درجة الحرارة . العامل الثالث ، وينطبق على المواد أساسا ، هو التعادل الإحصائى الذى يؤدى إلى نظرية فيرمى – Fermi لاحتمال إشغال الأماكن بالإلكترونات . فكى تشغل الإلكترونات فى المواد مستويات معينة للطاقة ، يلزم تواجد مساكن خالية فى هذه المستويات ، كما يلزم فى الوقت نفسه سماح نظرية فيرمى لهذا الإشغال . عند درجة حرارة الصفر المطلق ، يبدأ إشغال الإلكترونات المتواجدة للمساكن المتاحة من أسفل إلى أعلى حتى يكتمل إسكانها جميعا . لا يرتفع أى إلكترون من مكانه إلى مستوى أعلى خالٍ إلا إذا اكتسب طاقة خارجية كافية لذلك إما بالتسخين أو التعرض لإشعاع أو غير ذلك .

## ٢/٣ مساكن الإلكترونات داخل الذرة

كانت أول خطوة مؤثرة فى اتجاه تحديد مساكن الإلكترونات داخل الذرة هى ما قام به نيلز بور – Niels Bohr عام ١٩١٣م بالنسبة لذرة الهيدروجين . كان نيلز بور مستنيرا ومستعينا فى خطواته بما سبق أن افترضه رذرفورد – Rutherford عام ١٩١١م بالنسبة للتركيب الداخلى للذرات من أنها تتكون من نواة موجبة تدور حولها الإلكترونات فى مدارات محددة ، وكذلك مستنيرا بالافتراض الكمى لبلانك – Planck عام ١٩٠١م بالنسبة للإشعاع كما سبق ذكره . قدم بور اقتراحاً كمياً للحركية الدائرية للإلكترونات حول النواة على النحو التالى :

الحركة الدائرية للإلكترون = $n\ (h/2) = mvr$

حيث "n" رقم كمى يأخذ قيماً صحيحة من واحد إلى مالا نهاية . استنتج بور بذلك أن مساكن الإلكترونات فى ذرة الهيدروچين عبارة عن عدد لا نهائى من المدارات الدائرية نصف قطر كل منها "rn" حيث "r" هو نصف قطر أصغر وأول مدار داخلى مقابل (n=1) قيمته ٥٣, أنجستروم . ولكل مدار مستوى محدد للطاقة قيمته "-R/n" حيث "R" تسمى وحدة رايدبرج – Rydberg للطاقة قيمتها ١٣,٦ إلكترون فولت (eV) . من ذلك ، فإن مستوى الطاقة الأول لأصغر مدار فى ذرة الهيدروچين ، مقابل "n=1" ، هو "-R" ، ثم يزداد (يقل سالبية) كلما زادت "n" حتى يصل إلى الصفر عند "n = ∞" . مستوى الطاقة صفر هذا ، هو الحد الفاصل بين داخل الذرة وخارجها . يمثل الشكل رقم (٣–١) مستويات الطاقة لذرة الهيدروچين لبعض قيم الرقم الكمى "n" كما حصل عليها بور . نستنتج من هذا الشكل الملاحظات المهمة الآتية :




**شكل (٣–١) : مستويات الطاقة لذرة الهيدروچين .**

أ – القوانين الكلاسيكية ، مثل قوانين نيوتن ، لا تنطبق على الأجسام داخل الذرة . بل يلزم قوانين جديدة ، هى القوانين الكمية .

ب– تنحصر مساكن الإلكترونات داخل الذرة عند مستويات محددة للطاقة . وفيما عدا ذلك غير مسموح بأى تواجد للإلكترونات .

جـ- مستويات الطاقة ، المسموح تواجد الإلكترونات بها ، تتقارب عند القيم المرتفعة ، وتؤول فى النهاية إلى ما نعرفه كلاسيكيا باستمرارية السماح بتواجد الإلكترون عند أى قيمة للطاقة خارج الذرة .

د - بما أن ذرة الهيدروچين بها إلكترون واحد ، فإنه فى درجة حرارة الصفر المطلق يتواجد هذا الإلكترون عند أقل مستوى مسموح للطاقة ، وهو المقابل للرقم الكمى "n=1" .

إذا تعرضت ذرة الهيدروچين لطاقة خارجية سواء بالتسخين أو بالإشعاع أو بأى صورة أخرى ، فإن هذه الطاقة الخارجية يلزم أن تساوى أو تزيد عن الفرق بين المستويين الأول والثانى كى ينتقل الإلكترون من المستوى الأول إلى المستوى الثانى ، وإلا بقى الإلكترون كما هو فى المستوى الأول ، وفى هذه الحالة تستهلك الطاقة الخارجية بأكملها فى تسخين الذرة . إذا زادت الطاقة الخارجية عن الفرق بين المستويين الأول والثانى ولكنها ما زالت أقل من الفرق إلى المستوى الثالث ، فإن الإلكترون ينتقل إلى المستوى الثانى مكتسبا الفرق بين المستويين الأول والثانى ، والباقى من الطاقة الخارجية يستهلك فى تسخين الذرة . عند سقوط الإلكترون من المستوى الثانى إلى المستوى الأول ، فإنه يعطى إشعاعا أو فوتون يتحدد تردده بالقانون "E2–El = hf" . إذا تساوت الطاقة الخارجية أو زادت عن "R" ، فإن الإلكترون يترك الذرة كلية ، وتتحول الذرة إلى أيون موجب . لذلك تسمى قيمة الطاقة "R" بطاقة التأين لذرة الهيدروچين .

بهذه المفاهيم ، استطاع بور تقديم الإثبات النظرى لنتائج التجارب المعملية المعروفة للتحليل الطيفى لإشعاع ذرات الهيدروچين . هكذا نجحت نظرية بور بالنسبة لذرة الهيدروچين . لكنها لم تنجح عند تطبيقها على الذرات الأثقل ، وكان لابد من البحث عن الأسباب . بالمزيد من البحث والتجارب والمشاهدة ، توصل العلماء إلى تعديلات مهمة على نظرية بور . من أهم هذه التعديلات مايلى :

أ - أول تعديل ، قدمه أرنولد سومرفيلد – Arnold Sommerfeld (١٨٦٨ - ١٩٥١) عام ١٩١٦م ، هو أن المدارات التى تدور فيها الإلكترونات حول النواة ليست جميعها بالضرورة دائرية كما افترض بور ، بل من الممكن أن تكون أيضا على شكل قطع ناقص "elliptical" . وأضاف رقماً كمياً جديداً "*l*" يأخذ قيماً صحيحة من صفر إلى (n-1) ، حيث "(*l*+1)/n" تساوى نسبة المحور الأصغر إلى المحور الأكبر للقطع الناقص . وأعطيت رموز للرقم الكمى "*l*" كمايلى :

صفر (s) ، ١ (p) ، ٢ (d) ، ٣ (f) ، .... .

ب- لوحظ ، فيما يعرف بتأثير زيمان – Zeeman effect ، أن تعرض الذرات لمجال مغناطيسى خارجى يتسبب فى انشقاق معظم مستويات الطاقة إلى أكثر من مستوى . أدى هذا إلى تحديد كمى لاتجاهات مستويات مدارات الإلكترونات فى الفضاء لكل قيمة "$l$" ، وذلك بتقديم رقم كمى فضائى "m" يأخذ قيماً صحيح من صفر إلى "$\pm l$" أى أن كل رقم كمى "$l$" يمثل عدداً من المساكن يساوى $(2l+1)$ .

جـ- وجد كذلك أن كل إلكترون ، بالإضافة إلى دورانه حول النواة ، يدور أيضا حول نفسه (spin) إما يمينا أو يسارا . وكل مسكن معروف عنوانه بالأرقام الكمية الثلاثة "$n,l,m$" يقبل إلكترونين اثنين على الأكثر للإقامة به ، أحدهما يدور حول نفسه يمينا والآخر يدور حول نفسه يسارا .

دون الدخـــول فـــى تفاصيل أكثر والخوض فى المياه العميقة ، يكفينا هنا ، وبنـــاء علـى ما تقدم ، تلخيص الوضع بالنسبة لمساكن الإلكترونات فـــى الذرات كما يلى :

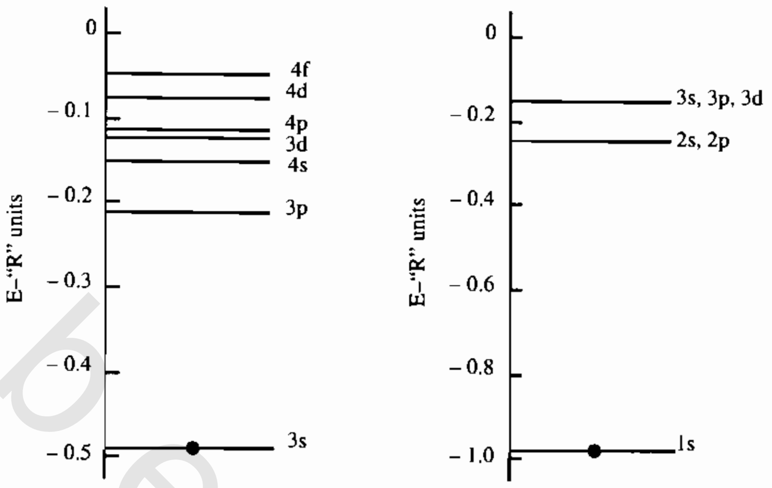
أ – رغم التعديلات السابق ذكرها ، فإن مساكن الإلكترونات فى أى ذرة مازالت مركزة فى مستويات حادة ومحددة للطاقة . وتواجد الإلكترونات فيما بين هذه المستويات ممنوع .

ب- كل مستوى مسموح للطاقة له عنوان أو مسمى يعرف بالرقمين الكمين "$l,n$" ولكل عنوان سعة قدرها $(2l + 1)$ مسكن ، يسع كل مسكن عدد اثنين إلكترون لكل منهما دوران ذاتى (spin) مضاد للآخر . بذلك لدينا العناوين الآتية ، حيث لكل عنوان سعة قصوى للإلكترونات ممثلة بالرقم بين القوسين :

1s (2)    2s (2) 2p (6)   3s (2) 3p (6) 3d (10)

4s (2) 4p (6) 4d (10) 4f (14) ....

جـ- قد ينطبق أكثر من عنوان على المستوى نفسه للطاقة كما هو الحال فى حالة ذرة الهيدروجين (الرقم الذرى $Z=1$ ) الموضح بالشكل رقم (٣-٢) أ . وقد يدل كل عنوان على مستوى مختلف للطاقة كما هو الحال فى حالة ذرة الصوديوم (الرقم الذرى $Z=11$ ) الموضح بالشكل رقم (٣-٢) ب .




أ- مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين Z = 1

ب- مستويات الطاقة لذرة الصوديوم Z = 11

**شكل (٣-٢)**

د - كل عنوان له سعة إلكترونية محددة لا يقبل أكثر منها . فى درجة حرارة الصفر المطلق ، تملأ مستويات الطاقة من أسفل إلى أعلى حتى يتم إسكان جميع الإلكترونات المتاحة ، وتبقى باقى المساكن خالية . عند ارتفاع درجة الحرارة يحدث ما سبق أن ذكرناه من انتقال بعض الإلكترونات إلى مساكن عالية خالية ، وفى عودتها تطلق إشعاعا .

هـ - المستوى صفر للطاقة يمثل الحد بين داخل الذرة وخارجها . الطاقات خارج الذرة موجبة ، ومسموح للإلكترونات بالتواجد عند أى قيمة منها كما هو معروف كلاسيكيا .

بقى أن نلاحظ أن الصفات السابقة تنطبق فقط على الذرات المنعزلة حيث تمثل كل ذرة نظاما مستقلا بعيدا عن التأثر بأى نظام آخر . من الناحية النظرية ، لا يوجد فى العالم نظام منعزل . فجميع النظم التى نعرفها متأثرة ببعضها البعض بدرجات متفاوتة ، والكون الذى لا نعرف مداه يشمل جميع الأنظمة المعروفة لنا والغير معروفة صغيرها وكبيرها . رغم هذا ، فمن الناحية العملية ، يمكن اعتبار الذرة نظاماً منعزلاً فى الغازات والأبخرة عند الضغوط المنخفضة . فكلما انخفض ضغط الغاز أو البخار تباعدت الذرات عن بعضها بحيث تقل التأثرات فيما بينها لدرجة يمكن إهمالها . هذا ما يلجأ إليه العلماء لدراسة خواص الذرات المنعزلة . فى الغازات والأبخرة ذات الضغوط المرتفعة وفى السوائل والجوامد تظهر التأثرات بين الذرات المتقاربة ، وهذا يؤثر على



obeikandi.com

الخواص الذاتية للذرات . كما هو متوقع ، فإن التأثير يكون أشد بالنسبة للمدارات الخارجية للذرات ، ويقل للمدارات الأعمق حتى حد معين يختفى عنده التأثير تماما . أى أن هناك قلباً (core) للذرة مكون من النواة وبعض المدارات القريبة منها لا تشعر بالعالم الخارجى ، مهما تقاربت الذرات أو تعرضت للمؤثرات الخارجية المعتادة . اللهم إلا إذا حدث اختراق بقوى خارجية فائقة مثل ما يحدث فى الانشطار والاندماج النووى. وهذا موضوع كبير مستقل خارج نطاق اهتماماتنا هنا .

## ٣-٣ مساكن الإلكترونات داخل الجوامد

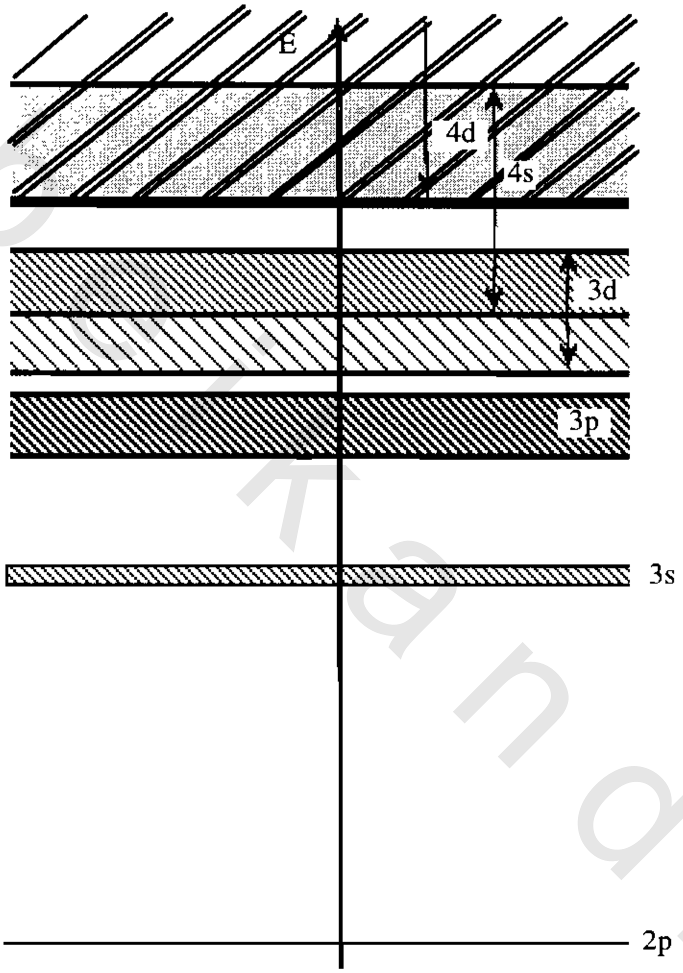
داخل المادة وخاصة الجوامد ، تتقارب الذرات من بعضها على مسافات مستقرة ومحددة حسب نوع المادة ، تقدر قيمها عادة ببضعة أنجسترومات (Angstroms) . فى دراسة الإلكترونيات ، نتعرض غالبا إلى الجوامد البللورية التى تنتظم فيها الذرات فى خلايا هيكلية تتكرر بانتظام على مدى حجم المادة فيما يعرف بالتركيب البللورى . رغم أن الجوامد المتعددة التبلور (Polycrystalline) والجوامد ذات التركيب العشوائى (Amorphous) تستعمل أحيانا فى التطبيقات الإلكترونية ، إلا أننا سنركز هنا على الجوامد البللورية التى هى أكثر استعمالا وأسهل نمذجة وتحليلا .

فى هذه البللورات ، ونتيجة التفاعل المتبادل بين الإلكترونات فى المدارات الخارجية للذرات ، يحدث اتساع فى مستويات الطاقة لهذه المدارات . فإذا تخيلنا أن الذرات تبدأ بخواصها الذاتية وهى متباعدة ، ثم بدأت تتقارب لتستقر فى النهاية عند بعدها الطبيعى للمادة "r" ، فإن اتساع مستويات الطاقة ، كما هو متوقع ، يبدأ مبكرا فى مستوى طاقة المدار الخارجى ، ثم يبدأ الاتساع فى مستوى طاقة المدار الذى يليه داخليا ، وهكذا . كذلك ، فإنه من المعروف أن هناك بعداً محدداً بين الذرات ، يعتمد على نوع المادة ، يمثل الاستقرار الطبيعى للبللورات . عند بعد الاستقرار هذا (r) ، يكون وضع مستويات وحزم الطاقة للمادة البللورية كما هو موضح بالشكل رقم (٣-٣) . من هذا الشكل نرى أن مستويات طاقة المدارات العميقة فى الذرة لم تتأثر ، وتحتفظ بخواصها فى الذرة المنعزلة كمستويات حادة ومحددة . بينما تتحول مستويات طاقة المدارات المرتفعة إلى حزم من الطاقة المسموحة يفصل بينها فجوات من الطاقة الممنوعة . يزداد عرض حزم الطاقة المسموحة ويقل عرض فجوات الطاقة الممنوعة كلما ارتفعنا بالطاقة . يلاحظ أنه عند حد معين تندمج حزم الطاقات المرتفعة المسموحة فى حزمة واحدة متصلة إلى خارج الذرة حيث كل قيم الطاقة مسموحة . فى المواد البللورية ، تحتسب مساكن الإلكترونات وإشغال هذه المساكن عادة بالنسبة لوحدة الحجم وهو متر مكعب . متوسط عدد الذرات فى المتر المكعب يقع فى حدود $١٠^{٢٨}$ ذرة . من هذا يمكن ، إذا أردنا ، حساب السعات والإشغالات لمستويات الطاقة سواء



obeikandi.com

بقيت هذه المستويات حادة ومحددة كما هو الحال فى قلب الذرة (core) ، أو تحولت إلى حزم كما ذكرنا .

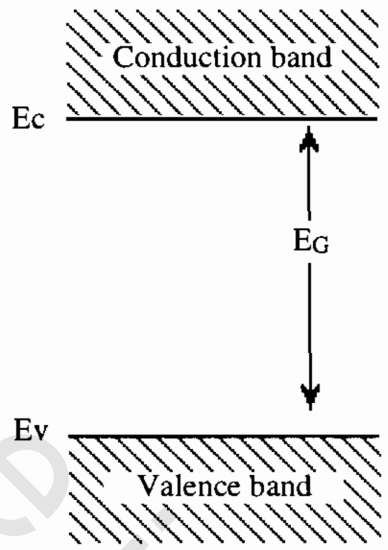



**شكل (٣-٣) : مستويات وحزم الطاقة للمواد البللورية .**

فى الدراسات الإلكترونية ، يكفينا التركيز على حزمة الطاقة المندمجة العليا وتسمى حزمة التوصيل "Conduction Band" حدها الأدنى "$E_C$" ، والحزمة المسموحة التى تليها إلى أسفل وتسمى حزمة التكافؤ "Valence Band" حدها الأعلى "$E_V$" ومسافة الطاقة الممنوعة بينهما تسمى الفجوة الممنوعة "Forbidden Gap" عرضها $E_G$ حيث < "$E_G = (E_c - E_V)$" . هذا النموذج يسمى فى الإلكترونيات بالنموذج الحزمى للطاقة "Energy Band Model" كما هو موضح فى الشكل رقم (٣-٤) .

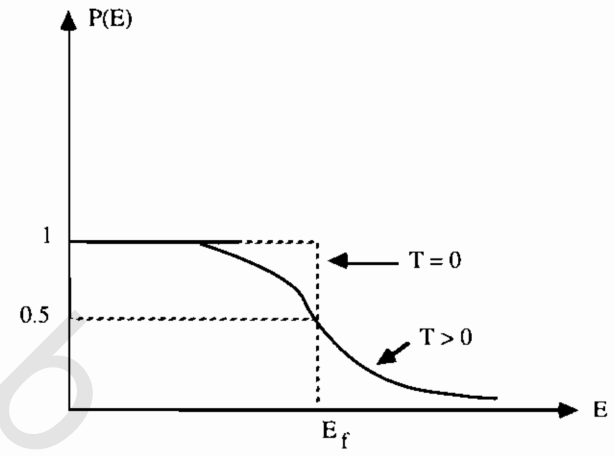


olkandil.com




شكل (٣-٤) : النموذج الحزمى للطاقة للمواد البللورية .

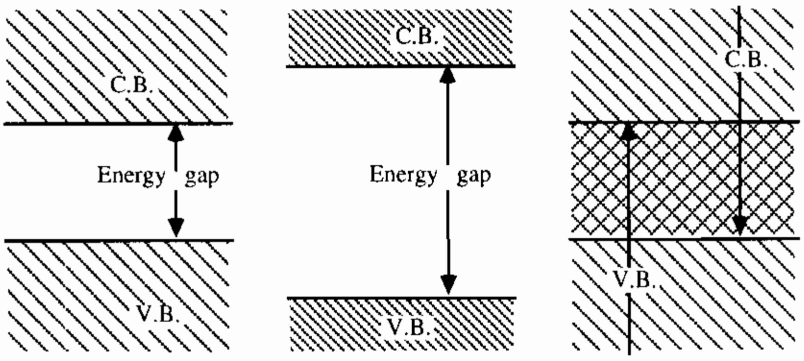
هذا من ناحية المساكن ، أما من ناحية التعادل الإحصائى ، فإن نظرية فيرمى للاحتمالات تحدد احتمال تواجد الإلكترونات عند الطاقات المختلفة . عند درجة حرارة الصفر المطلق ، تسمح نظرية فيرمى للإلكترونات بإشغال المساكن المتاحة بالكامل حتى مستوى معين للطاقة يسمى مستوى فيرمى (Fermi level "$E_f$") . بعد هذا المستوى للطاقة ينعدم احتمال التواجد الإلكترونى ، وبالتالى غير مسموح مهما توافرت المساكن. عند إزدياد درجة الحرارة ، يكون احتمال تواجد الإلكترونات عند مستوى فيرمى "$E_f$" ٥٠ ٪ ، ويصبح هناك احتمال لتواجد الإلكترونات عند طاقات أعلى من "$E_f$" مقابل تقليل مساو لاحتمال التواجدعند طاقات أقل من "$E_f$" كما هو موضح بالشكل رقم (٣-٥) . بذلك يمكن تعريف مستوى فيرمى للطاقة "$E_f$" أنه أعلى مستوى للطاقة يمكن تواجد إلكترونات عنده عند درجة حرارة الصفر المطلق .




شكل (٣-٥) : احتمال فيرمى لتواجد الإلكترونات عند الطاقات المختلفة .

بالرجوع إلى النموذج الحزمى للطاقة فى المواد البللورية ، وبالذات فى منطقتى حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ الموضحة فى شكل (٣-٤) ، نرى أن هناك ثلاث إحتمالات لا أكثر لإشغال المساكن المتاحة بالإلكترونات على الوجه التالى :

أ- مساكن حزمة التكافؤ مشغولة بالكامل بالإلكترونات . ومساكن حزمة التوصيل مشغولة جزئيا إبتداء من حدها الأسفل "$E_c$" إلى حد معين حسب عدد الإلكترونات المتوفرة ، أو حصل تداخل بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل ، شكل (٣-٦) أ. الإلكترونات فى حزمة التوصيل تسمى إلكترونات حرة ، لأنها سهلة الحركة داخل المادة نظرا لوجود مساكن عديدة خالية قريبة ومتصلة . والمواد التى لها هذه الخواص تسمى موصلات كهربية حيث إنها عالية التوصيل للتيار الكهربى . أوضح مثال لذلك المعادن وخاصة الذهب والفضة والنحاس والألمونيوم . واضح أن مستوى فيرمى لهذه المواد يقع فى حزمة التوصيل فوق "Ec" .




جـ- أشباه الموصلات  ب- المواد العازلة  أ - المواد الموصلة

شكل (٣-٦) إشغال المساكن بالإلكترونات



obeikandl.com

ب- مساكن حزمة التكافؤ مشغولة بالكامل بالإلكترونات . ومساكن حزمة التوصيل مفرغة تماما من الإلكترونات وعرض فجوة الطاقة الممنوعة "$E_G$" كبير ، شكل (٣-٦)ب ، فى هذه الحالة تكون الطاقة الخارجية المطلوبة لنقل إلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل عالية لدرجة أنها إما غير متوفرة أو تتسبب فى تغيير المادة كيميائيا . لذلك ، فإن مثل هذا الانتقال غير وارد ، ولا توجد حوامل شحنات حرة فى أى من حزمة التوصيل أو حزمة التكافؤ . هذه هى صفات المواد العازلة للكهرباء ، ومن أشهرها إستعمالا فى الإلكترونيات هو أكسيد السيليكون "SiO" حيث $E_G$ = ٩ إلكترون ڤولت . يقع مستوى فيرمى "$E_C$" لهذه المواد فى منتصف فجوة الطاقة الممنوعة "$E_G$" .

جـ- كالحالة ب السابقة ، غير أن عرض فجوة الطاقة الممنوعة "$E_G$" صغير فى حدود واحد إلكترون فولت ، شكل (٣-٦) ج . عند درجة حرارة الصفر المطلق لا توجد فرصة لتحرك الإلكترونات ، حيث لا توجد إلكترونات حرة . تعتبر المادة فى هذه الحالة غير موصلة أو عازلة للكهرباء . ولكن ، نظرا لأن "$E_G$" صغيرة : هنا تكفى طاقة خارجية بسيطة ، مثل تواجد المادة عند درجة حرارة الغرفة (٣٠ مئوية) ، لنقل بعض الإلكترونات من قمة حزمة التكافؤ إلى قاع حزمة التوصيل. الإلكترونات المنقولة إلى حزمة التوصيل تصبح إلكترونات حرة، والفجوات التى تركتها الإلكترونات عند قمة حزمة التكافؤ تأخذ خاصية جسيمات موجبة الشحنة يطلق عليها اسم الفجوات ، وهى حرة الحركة داخل حزمة التكافؤ. الإلكترونات السالبة الحرة والفجوات الموجبة الحرة يشتركان سويا لجعل المادة موصلة للتيار الكهربى ، ولكن بدرجة أقل من المواد الموصلة . لذلك يطلق عليها مواد شبه موصلة أو أشباه الموصلات . كما هو متوقع ، فإن معامل التوصيل لهذه المواد يزداد سريعا مع ازدياد درجة الحرارة نتيجة تزايد عدد الإلكترونات والفجوات الحرة . هذا بعكس المواد الموصلة حيث يقل معامل التوصيل مع ازدياد درجة الحرارة نتيجة تزايد تصادم الإلكترونات الحرة بهيكل بناء المادة . ولعل هذه الخاصية أسرع اختبار للكشف عما إذا كانت مادة ما موصلة أو شبه موصلة ، كذلك يمكن إثبات أن مستوى فيرمى "$E_F$" لهذه المواد يقع فى منتصف فجوة الطاقة "$E_G$" .

لكل من المواد السابقة استعمالات وفوائد فى مجال الإلكترونيات . فالمواد الموصلة تستعمل للتوصيل الكهربى بين النقاط المختلفة . والمواد العازلة تستعمل كحوامل وشرائح عازلة . أما أشباه الموصلات فلها استعمالات أعمق وأهم ، حيث منها تصنع النبائط الإلكترونية والدوائر الإلكترونية المتكاملة كما سنرى فيما بعد .

## ٤/٣ أشباه الموصلات

من أهم العناصر التى لها صفات أشباه الموصلات السيليكون – Silicon ، وهو عنصر يقع فى العمود الرابع من جدول مندليف رقمه الذرى Z = ١٤ ، وعرض فجوة الطاقة الممنوعة به $E_G = 1.1$ eV . ومن أهم المركبات التى لها صفات أشباه الموصلات زرنيخات الجاليوم – Gallium Arsenide "GaAs" ، وهو مركب من مادتى الزرنيخ فى العمود الخامس والجاليوم فى العمود الثالث من جدول مندليف ، وعرض فجوة الطاقة الممنوعة به $E_G$ = ٤ و ١ إلكترون فولت . وهاتان المادتان هما الأكثر شيوعا واستعمالا فى عالم الإلكترونيات فى الوقت الحالى . وبما أن السيليكون أرخص سعرا وأسهل تصنيعا من زرنيخات الجاليوم ، فإن الأخير يستعمل فقط فى السرعات والترددات المرتفعة نظرا لزيادة حركية الإلكترونات به مقارنة بقيمتها فى السيليكون (أكثر من خمسة أضعاف) .

فى تكنولوجيا أشباه الموصلات ، يلزم أن تكون المواد بللورية تماما دون خلل ، كما يلزم أن تكون نقية . والنقاء فى هندسة الإلكترونيات لا يقاس بالنسبة المئوية كما هو الحال مثلا فى الكيمياء أو حتى فى الدواء ، ولكنه يقاس بعدد ذرات الشوائب المسموح بها فى المتر المكعب . تسمى بللورات أشباه الموصلات النقية ضمنية (Intrinsic) ، وفيها يتساوى عدد كل من حوامل الشحنات الحرة السالبة والموجبة . أى أن كثافة تواجد الإلكترونات الحرة "n" مساوية لكثافة تواجد الفجوات الحرة "p" ، أي أن :

$$n = p = n_i$$

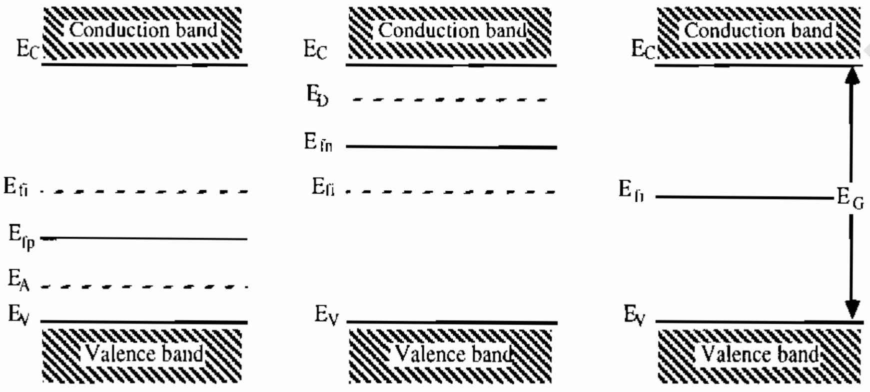
حيث "$n_i$" يطلق عليها الكثافة الضمنية لتواجد حوامل الشحنة الحرة فى بللورات أشباه الموصلات الضمنية ، وتعتمد فقط على قيمة $E_G$ ودرجة الحرارة . يلاحظ أن "$np = n_i^2$" ، وهذه العلاقة مهمة فى دراسة اتزان حوامل الشحنات داخل الجوامد .

أشباه الموصلات الضمنية فوائدها محدودة . فهى تصلح مثلا لبناء مقاومة تعتمد قيمتها على درجة الحرارة أو شدة الضوء ، وقد تكون هناك تطبيقات أخرى هامشية . التطبيق الأهم لأشباه الموصلات فى الإلكترونيات يكمن فى استعمال ما يسمى بأشباه الموصلات غير النقية أو غير الضمنية (Extrinsic) .

## ٥/٣ أشباه الموصلات غير الضمنية Extrinsic

أشباه الموصلات غير الضمنية أو غير النقية هى أساس تطبيقات أشباه الموصلات فى الإلكترونيات الحديثة . يجب ألا تؤخذ كلمة غير نقية هنا بمعناها الدارج . فالمقصود هنا هو أن نبدأ بأشباه موصلات نقية ، ثم نضيف الشوائب باختيارنا من حيث النوع والكمية . هناك نوعان من مواد الإضافة . نوع من العامود الخامس فى جدول

منديليف مثل الفوسفور والزرنيخ ، وهذه تسمى معطيات (Donors) . تخلق هذه المعطيات مستوى جديداً مسموحاً للإلكترونات فى فجوة الطاقة الممنوعة وقريب جدا من قاع حزمة التوصيل $E_C$ ، وهذا يعطى إلكترونات حرة بسهولة لحزمة التوصيل . بذلك تصبح $n >> p$ مع الاحتفاظ بالعلاقة $np = n_i^2$ فى حالة الاستقرار . فى هذه الحالة تسمى n بحوامل الشحنات الأغلبية ، وتسمى p بحوامل الشحنات الأقلية ، وتسمى مادة شبه الموصل من نوع n (n-type) . النوع الآخر من مواد الإضافة يقع فى العمود الثالث من جدول منديليف مثل الإنديام والجاليوم ، وهذه تسمى متقبلات (Acceptors) . تخلق هذه المتقبلات مستوى طاقة جديداً مسموحاً للإلكترونات فى فجوة الطاقة الممنوعة وقريب جدا من قمة حزمة التكافؤ $E_V$ . وهذا يتقبل إلكترونات بسهولة من حزمة التكافؤ ، أى أنه يخلق فجوات بسهولة فى حزمة التكافؤ . بذلك تصبح $p >> n$ ، مع الاحتفاظ أيضا بالعلاقة $np = n_i^2$ فى حالة الاستقرار . فى هذه الحالة تسمى p بحوامل الشحنات الأغلبية وتسمى n بحوامل الشحنات الأقلية ، وتسمى مادة شبه الموصل من نوع p (p-type) . فى شبه الموصل من نوع n يقع مستوى فيرمى فى النصف الأعلى من فجوة الطاقة الممنوعة ، ويسمى $E_{fn}$ . بينما فى شبه الموصل من نوع p يقع مستوى فيرمى فى النصف الأسفل من فجوة الطاقة الممنوعة ويسمى $E_{fp}$ . يوضح الشكل (٣-٧) مستويات الطاقة المختلفة فى المنطقة من قمة حزمة التكافؤ $E_V$ إلى قاع حزمة التوصيل $E_C$ لكل من شبه موصل ضمنى ، ونوع n ، ونوع p . ترتيب هذه الأنواع من أشباه الموصلات والمواجهة بين بعضها البعض وبين غيرها من المواد الموصلة والعازلة فى هياكل مختلفة هو أساس بناء النبائط الإلكترونية والدوائر الإلكترونية المتكاملة بكثافاتها المختلفة وتطبيقاتها المتغلغلة فى جميع أوجه الحياة كما سنرى فيما بعد .




جـ - نوع - p ب- نوع - n أ - ضمنى

**شكل (٣-٧) : مستويات الطاقة فى أشباه الموصلات.**

obeikandl.com