جامعة الموصل
كلية علوم / قسم الفيزياء

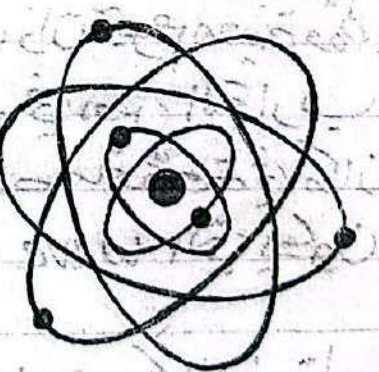
بسم الله الرحمن الرحيم

1- نظرية شبه الموصل Semiconductor's Theorem

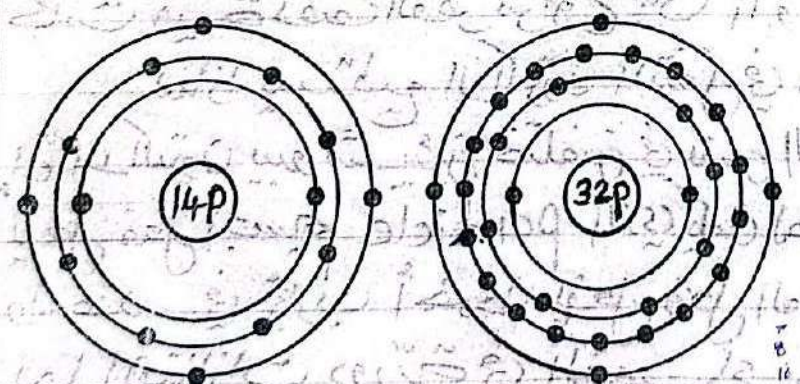
1.1 التركيب الذري :

صوّر بوهر الذرّة مثالياً ، فقدّر آها نواة محاطة بالكترونات دوّارة الشكل (1) . تمتلك النواة شحنة موجبة وبذلك تجذب الالكترونات ، ولولا وجود القوّة الطاردة عن المركز Centrifugal force والناتجة عن حركتها لسقطت الالكترونات في النواة عندما ينتقل الكترون في مدار مستقر Stable Orbit ، تكون له السرعة المناسبة التي تجعل القوّة الطاردة عن المركز تعادل أو توازن الجذب النووي .

إنّ الرسومات ذات الابعاد الثلاثة كما في الشكل (1) يصعب رسمها للذرّات المعقّدة . ولهذا السبب فنحن غالباً ما نصوّر الذرّة ببعدين فقط . الشكل (2a) يبيّن ذرّة سليكون مغزولة لها 14 بروتون في نواتها . ينتقل إلكترونان في المدار الأوّل ، وثمانية إلكترونات في المدار الثاني . وأربعة في المدار الخارجي أو مدار التكافؤ Valence Orbit . إنّ الالكترونات الدائرة الأربعة عشر تعادل شحنة النواة ولذلك يكون تأثير الذرّة ، عن بعد ، متعادلاً كهربائياً . الشكل (2b) يبيّن ذرّة جيرمانيوم مغزولة . لاحظ أنّ عدد البروتونات في النواة هو 32 وعدد الإلكترونات الدوّارة 32 أيضاً .



شكل (1) نموذج بوهر



(a) Si 2-8-4 (b) Ge 2-8-18-4

شكل (2) (a) ذرّة سليكون (b) ذرّة جيرمانيوم

يحتوي المدار الخارجي على أربعة إلكترونات، تماماً كما في ذرّة السليكون. وهذا يعطيها أهميّة خاصة، ولهذا السبب أيضاً جاءت تسمية السليكون والجيرمانيوم بالعناصر رباعية التكافؤ tetravalent elements (العنصر الرباعي يعني ذلك العنصر الذي يملك أربعة إلكترونات تكافؤيّة).

1.2 نصف القطر المداري:

قد نعتقد بأنّ الالكترون يستطيع أن ينتقل في مداره أي نصف قطر ما دامت سرعته مناسبة. الفيزياء الحديثة تقول غير ذلك، هناك أحجام مداريّة معيّنة متاحة فقط. بعبارة أخرى فإنّ بعض أنصاف الأقطار محظورة (forbidden).

فعلى سبيل المثال، أصغر مدار في ذرّة الهيدروجين له نصف قطر مقداره

$$r_1 = 0.53\ (10^{-10})\ m$$

أمّا المدار المتاح التالي فله نصف قطر مقداره

$$r_2 = 2.12\ (10^{-10})\ m$$

جميع أنصاف الأقطار بين r_1 و r_2 محظورة. وبغض النظر عن سرعته فإن أي إلكترون لا يستطيع أن يبقى في مدار مستقر إذا كانت قيمة نصف القطر تتراوح بين r_1 و r_2.

لماذا يستطيع الالكترون التنقل في مدارات ذات حجوم معيّنة فقط؟

إنّ الالكترون يسلك سلوكين مختلفين في نفس الوقت. في بعض التجارب يفعل فعل الجسيم particle الذي يكون له كتلة متجمّعة في مكان واحد، في تجارب أخرى يفعل فعل الموجة wave التي يكون لها اهتزازات دوريّة في الفضاء.

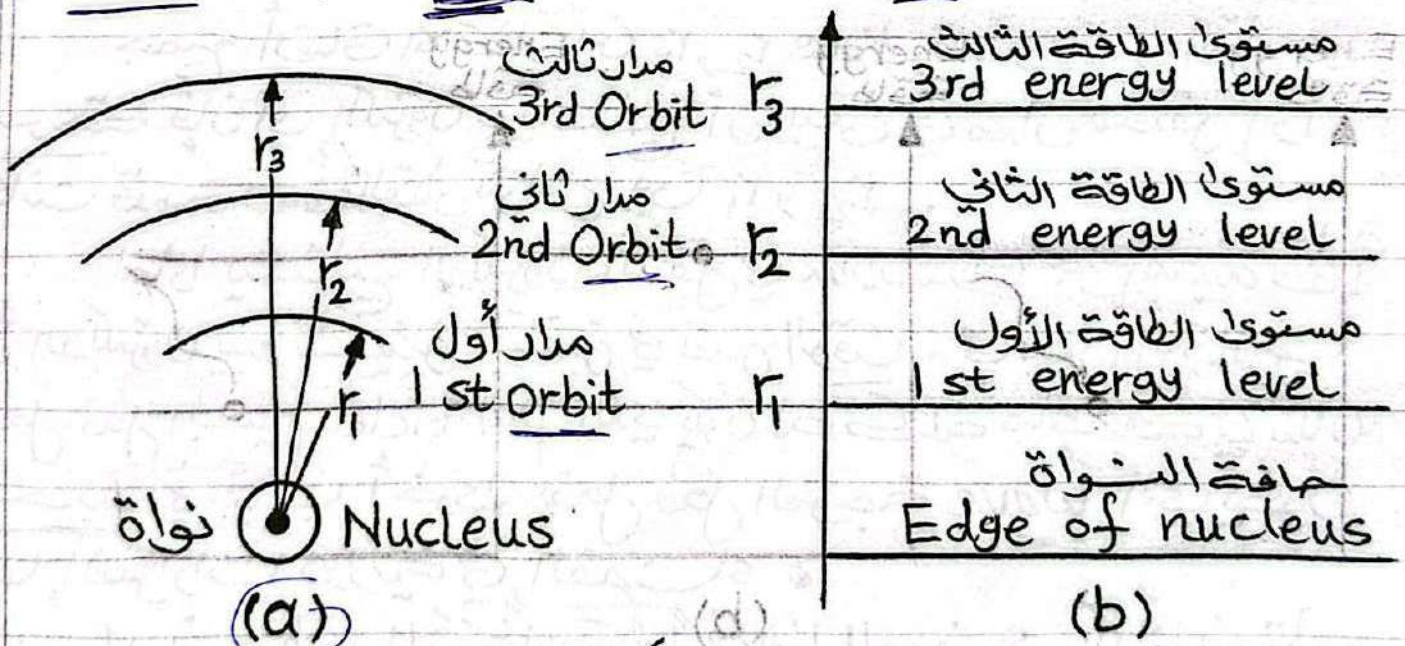
(a) لا نستطيع التوغّل كثيراً في هذا الموضوع ولكننا نستطيع أن نقول ما يأتي:

مدار أي إلكترون لا يجب أن تنطبق عليه معادلات الطبيعة الجسيمية فحسب، ولكن معادلات الطبيعة الموجية أيضاً. ولكونه موجة، فإن أي إلكترون يصلح فقط لمدار يساوي محيطه طول موجة ذلك الإلكترون أو مضاعفاته (طول الموجة Wavelength هو المسافة التي تنتقلها الموجة في دورة واحدة).

1.3 مستويات الطاقة:

في الشكل (3a) نحتاج الى طاقة لتحريك إلكترون من مدار صغير الى مدار أكبر لأنه يجب إنجاز شغل للتغلب على قوة جذب النواة. لذلك كلما كان مدار إلكترون ما كبيراً، كبرت طاقته الكامنة نسبة الى النواة.

لتسهيل الرسم نستطيع أن نمثل المدارات لمنحنية بخطوط أفقية مستقيمة كما في الشكل (3b) المدار الأول يمثل مستوى الطاقة الأول (1st energy level)، المدار الثاني يمثل مستوى الطاقة الثاني... الخ. كلما كان مستوى الطاقة عالياً كانت طاقة الالكترون أعظم وكان مداره أكبر.

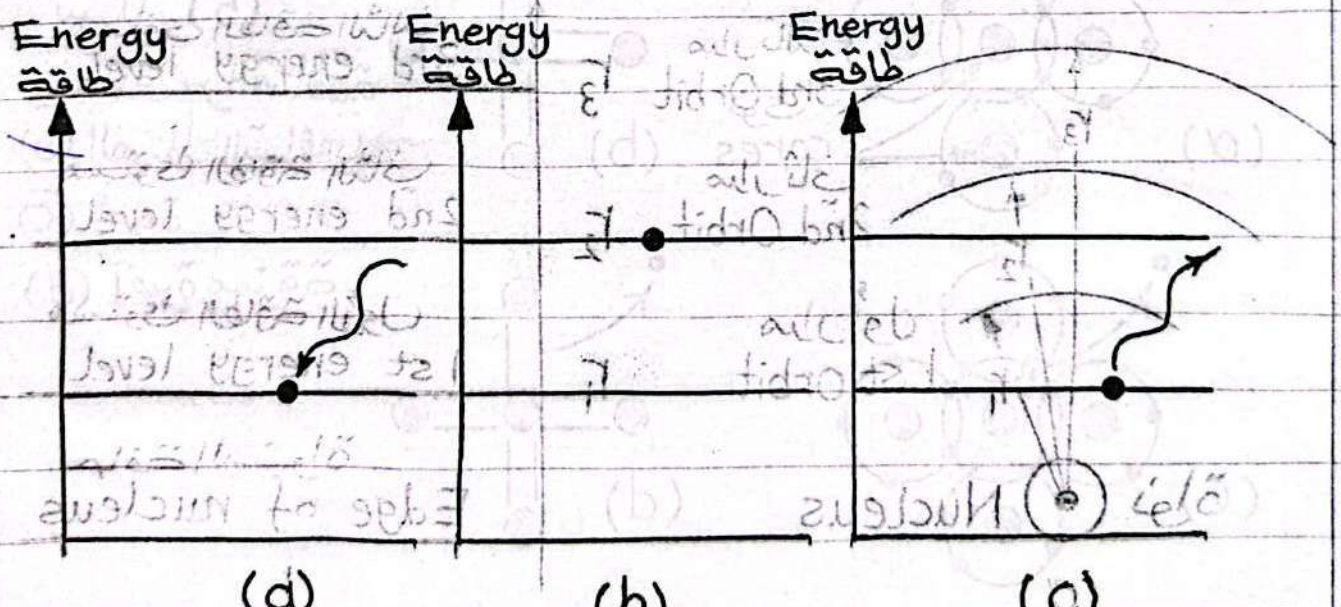


شكل (3) (a) منظر مكبّر لذرّة (b) مستويات الطاقة

لو سقطت طاقة خارجيّة، كالحرارة أو الضوء أو إشعاعات أخرى على ذرّة ما فانها تستطيع رفع إلكترون الى مستوى طاقة أعلى (مدار أكبر). وتوصف الذرّة آنذاك بأنها في حالة إستثارة (State of excitation). إنّ هذه الحالة لا تدوم طويلاً لأنّ الالكترون سرعان ما يرتد الى مستواه الأصلي محرراً بذلك عند إرتداده الطاقة المكتسبة على شكل حرارة أو ضوء أو إشعاعات أخرى.

الشكل (4) يُلخّص عمليّة الاستثارة والاشعاع، فالسهم المُتموّج في الشكل (4a) يُمثّل الطاقة المُسلّطة، فعندما يمتص الالكترون هذه الطاقة تزداد طاقته الكليّة، لذلك يستطيع أن يهرب من جذب النواة وينتقل الى مدار أكبر (لاحظ الشكل 4b). الذرّة الآن في حالة إستثارة. بعد فترة وجيزة يرتد الالكترون الى مداره الأصلي، مشعاً طاقة كما مبيّن في الشكل (4c).

إنّ مستويات الطاقة مهمّة لأنها تفسّر عمل العارضات الفلوريّة وشاشات الباعث الضوئي والشاشات الضوئيّة والترانزستورات.



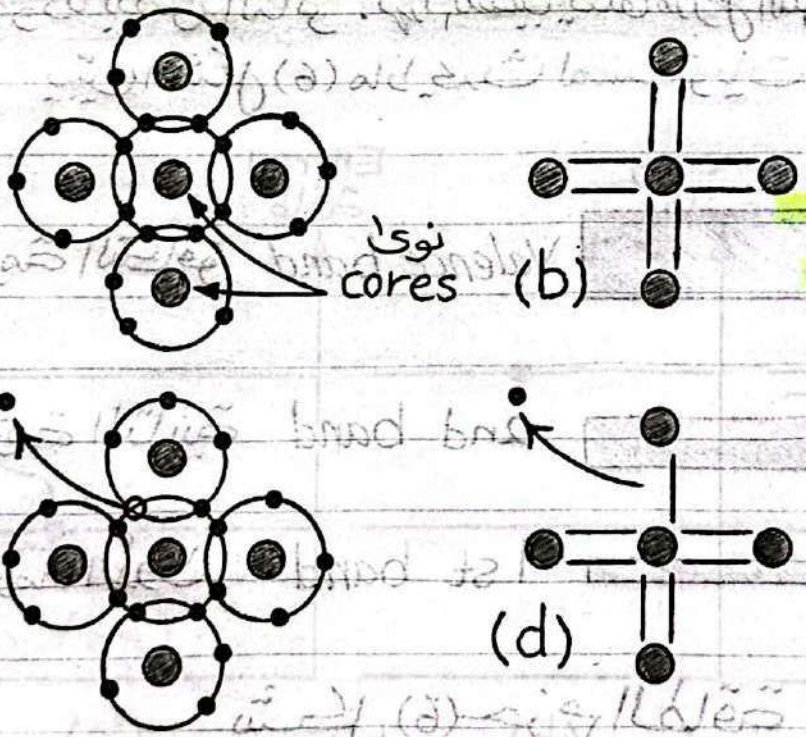
شكل (4) (a) الالكترون يمتص طاقة (b) حالة الاستثارة (c) الالكترون يشع الطاقة

بسم الله الرحمن الرحيم

1.4 البلّورات :

عندما تتحد الذرّات لتكوّن مادة صلبة، تنظم نفسها بنسق مُرتّب يدعى البلّورة (crystal). والقوى التي تربط الذرّات معاً تدعى الأواصر التساهميّة (covalent bonds). ولكي ندرس الأواصر التساهميّة، نأخذ السليكون.

إنّ ذرّة السليكون المعزولة تمتلك أربعة إلكترونات في مدارها التكافؤي. ولأسباب يمكن دراستها في معادلات متقدّمة، تتحد ذرّات السليكون بطريقة بحيث تحوي في مداراتها التكافؤيّة ثمانية الكترونات. ولكي يتم هذا، فانّ كل ذرّة سليكون تضع نفسها بين أربعة ذرّات سليكون أخرى (لاحظ الشكل 5a). إنّ كل جار يساهم بالكترون مع الذرّة المركزيّة وبذلك تكون الذرّة المركزيّة قد التقطت أربعة إلكترونات جامعة ثمانية في مدارها التكافؤي. في الواقع إنّ هذه الإلكترونات لم تعد عائدة الى ذرّة معيّنة ولكنّ الذرّات المجاورة قد ساهمت بها، هذا التساهم هو الذي يشكّل الأواصر التساهميّة.

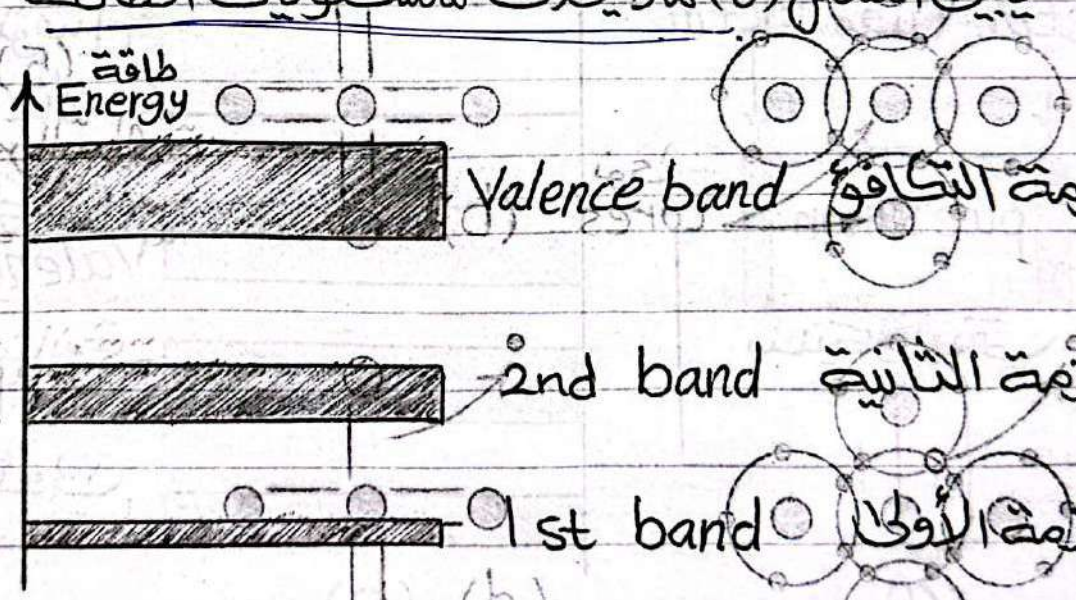


شكل (5)
(a) الأواصر التساهميّة
(b) المخطط التساهمي
(c) فجوة
(d) آصرة ممزقة

الشكل (5b) يمثل التساهم المتبادل بين الإلكترونات حيث يمثل كل خط إلكتروناً مساهماً. كل إلكترون مساهم يُكوّن آصرة بين الذرّة المركزيّة وجارتها. ولهذا السبب ندعو كل خط بالآصرة التساهميّة. عندما ترفع طاقة خارجيّة إلكتروناً تكافؤياً الى مستوى طاقة أعلى (مدار أكبر). يُخلّف الإلكترون المغادر فراغاً في المدار الخارجي (لاحظ الشكل 5c). هذا الفراغ يدعى فجوة أو ثقب hole. إنّ الفجوة تكافئ آصرة تكافؤيّة ممزقة، لاحظ الشكل (5d).

5. حزم الطاقة:

عندما تتحد ذرّات السليكون مكوّنة بلّورة. لا يتأثّر مدار أي إلكترون بالشحنات الموجودة بذرّته فحسب، بل يتأثّر بالنوى والإلكترونات الموجودة في كافة الذرّات الأخرى التي تحويها البلّورة. وبما أنّ كل إلكترون له موقع مختلف داخل البلّورة، لذا لا يوجد إلكترونان يتأثران بالشحنات الموجودة بنفس التأثر. لهذا السبب يختلف مدار كل الكترون عن المدارات الأخرى. يبيّن الشكل (6) ماذا يحدث لمستويات الطاقة. إنّ كلّ

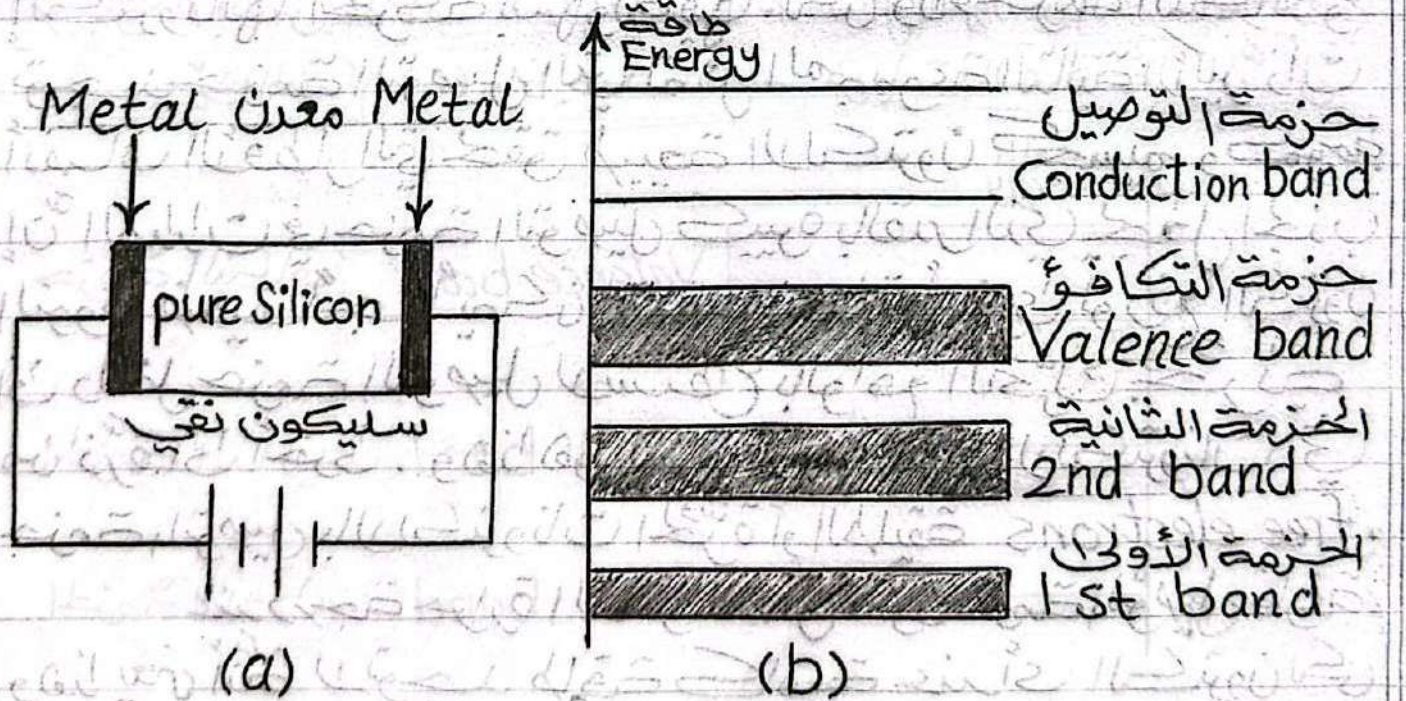


شكل (6) حزم الطاقة

الإلكترونات المُتنقّلة في المدارات الأولى لها مستويات طاقة مختلفة قليلاً. لأنّه، وكما أسلفنا، لا يوجد إثنان يتأثّران بالشحنات الموجودة نفس التأثّر. وبما أنّ هناك مليارات من الكترونات المدار الأول فإنّ مستويات الطاقة المتباينة قليلاً تشكّل تجمعاً أو حزمة (band). كذلك بوجود مليارات من إلكترونات المدار الثاني يتشكل شريط الطاقة الثاني، بسبب الاختلاف القليل في مستوى الطاقة أيضاً. وتشكّل كافة إلكترونات المدار الثالث الحزمة الثالثة. الشكل (6) يبيّن حزم الطاقة كمناطق داكنة، وستكون هذه طريقتنا في تبيان الحزم الممتلئة أو المشبّعة، ومعنى ذلك أنّ كل مدار متاح قد شُغِل بالكترون واحد. الشكل (6) يبيّن حزم الطاقة في بلّورة سليكون عند درجة حرارة الصفر المطلق (-273° c).

1.6 التوصيل في البلّورات:

الشكل (7a) يبيّن قضيباً من السليكون بنهايتين معدنيتين.



شكل (7) (a) البائرة (b) حزم الطاقة عند درجة حرارة الصفر المطلق

مصدر الفولتيّة الخارجيّة سوف يسبب مجالاً كهربائياً بين نهايتي البلّورة.
هل يسري تيار؟ هذا يعتمد على ماذا؟ فيما إذا كانت هناك إلكترونات متحرّكة داخل البلّورة أو لا.

الصفر المطلق

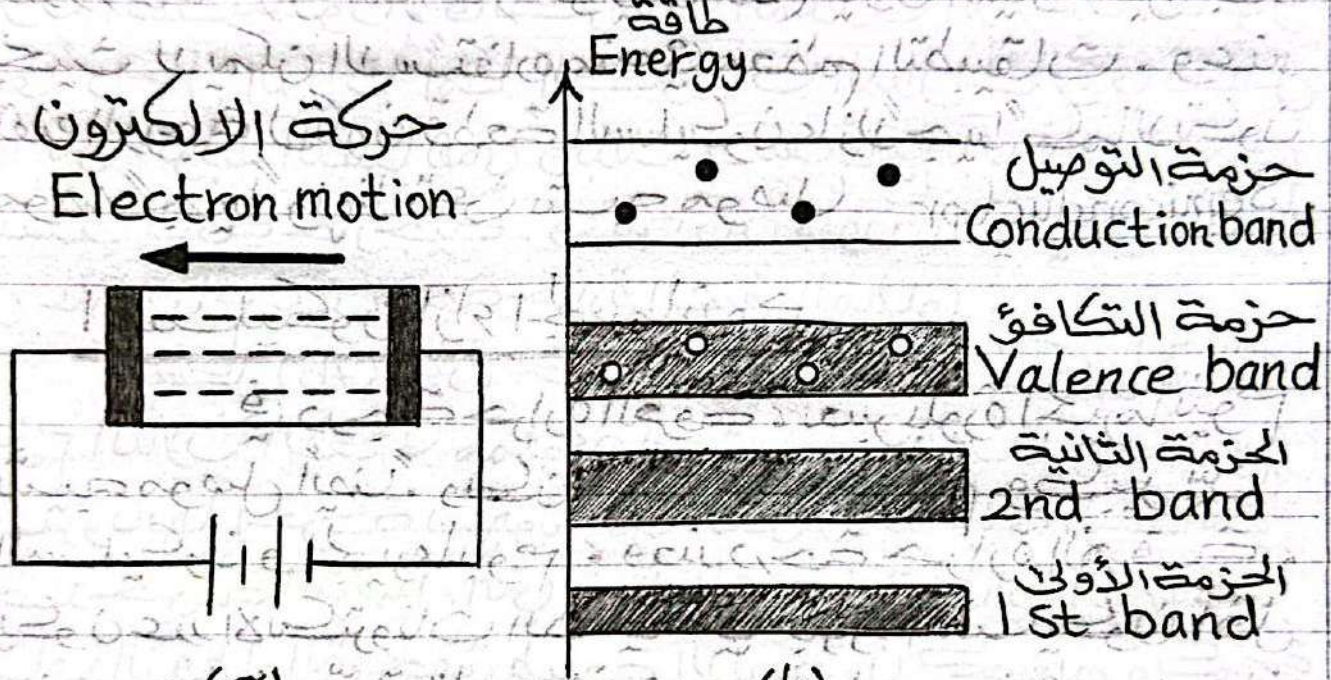
عند درجة حرارة الصفر المطلق لا تستطيع الإلكترونات التحرّك خلال البلّورة، ذلك لأنّها جميعاً مرتبطة بشدّة بذرّات السيليكون. فالكترونات المدارات الداخليّة مطمورة عميقاً داخل الذرّات أمّا إلكترونات المدار الخارجي فتشكّل جزءاً من الربط التساهمي وبذلك لا تستطيع الإفلات مالم تكتسب طاقة خارجيّة. وعليه فإنّ بلّورة السليكون تعمل عمل عازل تام عند درجة حرارة الصفر المطلق.

الشكل (76) يبيّن مخطط حزم الطاقة. فكما ترى، الحزم الثلاث الأولى مملوءة أو مشبّعة وبذلك لا تستطيع إلكتروناتها الحركة بسهولة فيها. لكن وراء حزمة التكافؤ توجد حزمة التوصيل التي تمثّل المجموعة التالية الأكبر ذات أنصاف الأقطار التي تحقق طبيعة الإلكترون كجسيم وكموجة. إنّ المدارات في حزمة التوصيل كبيرة بالقدر الذي يجعل الجذب النووي ضعيفاً جداً يمكن إهماله. بعبارة أخرى لو رفع الكترون الى داخل حزمة التوصيل لاستطاع بالواقع التحرّك بحريّة من ذرّة الى أخرى. وهذا هو السبب في تسمية الإلكترونات في حزمة التوصيل بالإلكترونات الحرّة أو الطليقة (free electrons).

عند درجة حرارة الصفر المطلق تكون حزمة التوصيل فارغة، وهذا يعني أنّه لا توجد طاقة كافية عند أي إلكترون لكي ينتقل في مدار حزمة التوصيل.

فوق الصفر المطلق

إرفع درجة الحرارة فوق الصفر المطلق، تتبدّل الأمور. فالطاقة الحراريّة الداخلة تُحطّم بعض الأواصر التساهميّة. وتدفع الإلكترونات التكافؤيه إلى حزمة التوصيل. وهكذا نحصل على عدد محدود من الإلكترونات في حزمة التوصيل المُمثّلة بإشارات سالبة بالشكل (8a). تحت تأثير المجال الكهربائي، تتحرك هذه الإلكترونات الطليقة إلى اليسار مكونة تياراً.



شكل (8) (a) مسرى الإلكترون (b) حزم الطاقة عند درجة حرارة الغرفة

الشكل (8) يبيّن حزم الطاقة فوق الصفر المطلق. إنّ الطاقة الحراريّة قد رفعت بعض الإلكترونات الى حزمة التوصيل حيث تستطيع هناك التنقّل في مدارات ذات أنصاف أقطار اكبر من السابق. يكون إرتباط الإلكترونات بالذرّات ضعيفاً جداً في مدارات حزمة التوصيل هذه وبذلك تستطيع التنقّل من ذرّة الى أخرى بسهولة.

في كل مرّة يرفع إلكترون في الشكل (8b) الى حزمة التوصيل، يُخلّف وراءه فجوة في حزمة التكافؤ. وبذلك لم تعد حزمة التكافؤ مملوءة أو مشبّعة حيث تمثّل كل فجوة مداراً متاحاً للدوران.

كلّما إرتفعت درجة الحرارة إزداد عدد الالكترونات المرفوعه الى حزمة التوصيل وبذلك يكبر التيار المبيّن بالشكل (8a). عند درجة حرارة الغرفة (حوالي 25°c) يكون التيار صغيراً جداً بحيث لا يمكن الاستفاده منه في معظم التطبيقات. وعند هذه الدرجة لا تكون قطعة السليكون عازلاً جيداً كما لا تكون موصلاً جيداً ولهذا تدعى شبه موصل Semiconductor.

السليكون ازاء الجيرمانيوم

في درجة حرارة الغرفة، تعتبر بلورة الجيرمانيوم شبه موصل أيضاً. ولكن هناك فرق حاسم وكبير بين السليكون والجيرمانيوم، فعند درجة حرارة الغرفة، يكون عدد الالكترونات الطليقة في بلّورة السليكون أقل من عددها في بلّورة الجيرمانيوم وهذا واحد من الاسباب التي جعلت السليكون هو شبه الموصل الرئيسي المستخدم حالياً.