محاضرات مادة الفيزياء /2/

لطلاب السنة الأولى

(ميكاترونيكس)

الأستاذ الدكتور جبُّور نوفل جبُّور

2025 - 2024

الفصل الخامس

مفاهيم أساسية حول أنصاف النواقل

Basics about semiconductors

1- مقدمة:

2- أنصاف النواقل:

3- أنصاف النواقل الصافية أو الذاتية:

4- أنصاف النواقل المشوبة أو غير الأصلية:

4-1- إشابة أنصاف النواقل:

4-2- نصف ناقل مُشاب (غير أصلي) من نوع N:

4-3- نصف ناقل مُشاب (غير أصلي) من نوع P:

5- متصل ثنائي من نوع P-N:

5-1- تعريف:

5-2- متصل ثنائي من نوع P-N غير مستقطب:

5-3- متصل ثنائي من نوع P-N مستقطب:

5-3-1- استقطاب مباشر (تغذية أمامية):

5-3-2- استقطاب غير مباشر (أو تغذية عكسية):

مفاهيم أساسية حول أنصاف النواقل

1- مقدمة:

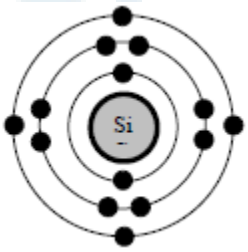
لفهم عمل المركبات الإلكترونية، يجب أولاً دراسة المواد النصف ناقلة التي تُعتبر لا نواقل ولا عوازل.

2- أنصاف النواقل:

- تتموضع بين النواقل والعوازل،
- تمتلك مقاومة وسطية ما بين مقاومة النواقل ومقاومة العوازل: وهي تسلك سلوك العوازل في درجات الحرارة المنخفضة وذلك لأن الحركة الحرارية ضعيفة، وتسلك سلوك نواقل في درجات الحرارة المرتفعة،
- مقاومة النصف ناقل تتناقص عند زيادة الحرارة.

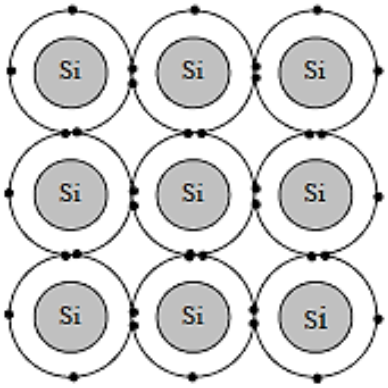
3- أنصاف النواقل الصافية أو الذاتية:

عندما يكون الجسم صافي تماماً، نُطلق عليه صفة الذاتية. مثال على ذلك: السيليسيوم (السيليكون Silicium Si-)، الجرمانيوم (Germanium Ge)، السيلينيوم (Selenium Se). الشكل (1) يوضح ذرة السيليسيوم Si.



الشكل (1): ذرة السيلينيوم Si.

تُعتبر ذرة السيليسيوم رباعية التكافؤ: تمتلك أربعة إلكترونات تكافؤ التي تكون مشتركة مع ذرات السيليسيوم الأخرى لتشكل بلورة كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2): بلورة السيليسيوم Si.

عند درجة الحرارة صفر كيلفين $(0\ K)$ كل ارتباطات التكافؤ تكون موجودة. وفي هذا الحالة البلورة عبارة عن عازل جيد: أي ليس هناك من إلكترونات حرة.

عند زيادة درجة حرارة البلورة، بعض الإلكترونات التكافؤية تترك مكانها، بعض ارتباطات التكافؤ تكون مقطوعة. نقول إنه لدينا انقطاع لرابطة التكافؤ وبالتالي:

- ارتباط بعض الإلكترونات التي ستنتقل بشكل حر تؤدي إلى توليد تيار كهربائي،
- يبقى ترابط مقطوع، أي يكون لدينا شاردة سيليسيوم Si^*، وهذا يؤدي لتوليد زوج من الشحنة: إلكترون حر (شحنة سالبة) وثقب (شحنة موجبة).

4- أنصاف النواقل المشوبة أو غير الصافية:

4-1- إشابة أنصاف النواقل:

إن الإشابة تقتضي إدخال في نصف ناقل صافي كمية قليلة من جسم غريب يُدعى منشطاً. من أجل أنصاف النواقل الأكثر استخداماً (Si, Ge)، يتم إشابتها غالباً:

- إما بعناصر تحتوي على خمس إلكترونات محيطية، أمثلة على ذلك: الزرنيخ (As)، الأنتموان (Sb)، الفوسفور (P)،...و بعناصر تحتوي ثلاث إلكترونات محيطية، أمثلة على ذلك: البور (B)، الغاليوم (Ga)، الأنديوم (In)،...

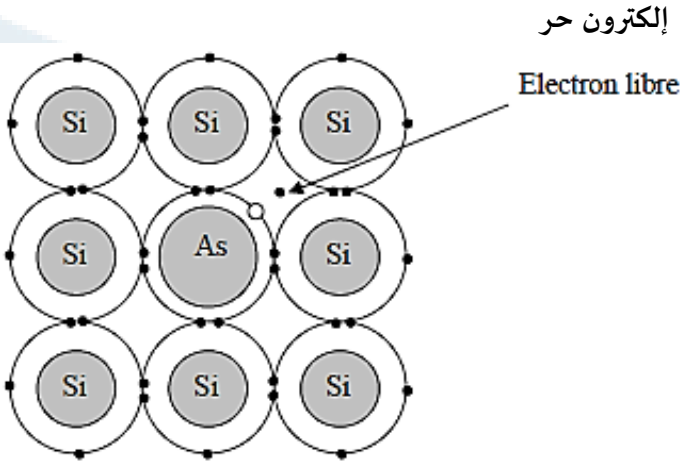
إن هذه المنشطات يتم إدخالها بكميات قليلة (من مرتبة ذرة منشطة من أجل 10^6 ذرة من نصف الناقل).

بعد الإشابة، نصف الناقل لم يعد صافي لكن مُشاب، أي غير أصلي أو غير ذاتي.

4-2- نصف ناقل مُشاب (غير أصلي) من نوع N:

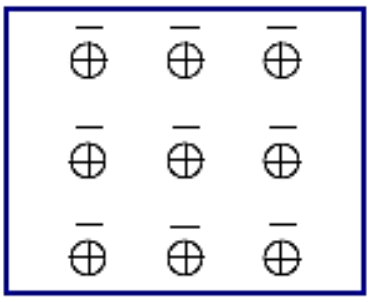
إن العناصر المضافة تنتمي إلى عائلة العناصر التي تحتوي خمسة إلكترونات محيطية (As, Sb, P,..). إن العنصر المضاف أو الشائبة تندمج في بلورة نصف الناقل، مع ذلك، لتأمين الارتباطات بين الذرات المجاورة، 4 إلكترونات تكون ضرورية: الإلكترون الخامس يكون زائداً وليس له مكان. نقول في هذه الحالة

إنه لدينا نصف ناقل مشاب ونُطلق عليه اسم مُعطي أو مانح من نوع (N)، إلكترونات (حاملات شحنة سالبة). ونشير هنا إلى أن هذا الإلكترون عندما يغادر ذرته، يترك مكانه شاردة موجبة ثابتة لا تتحرك، الشكل (3).



الشكل (3): ذرة زرنيخ مضافة أو مدخلة لبلورة نصف ناقل من السيليسيوم Si.

تمثيل مبسط لنصف ناقل من نوع N:



شاردة موجبة ثابتة للمعطي

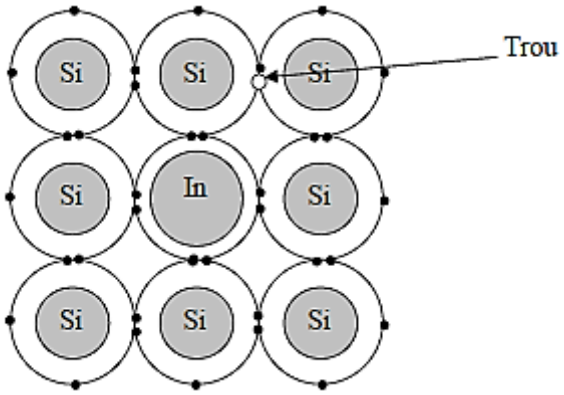
إلكترون حر (حامل شحنة سالبة)

3-4- نصف ناقل مُشاب (غير أصلي) من نوع P:

إن العناصر المضافة تنتمي إلى عائلة العناصر التي تحتوي ثلاثة إلكترونات محيطية (B, Ga, In,..).

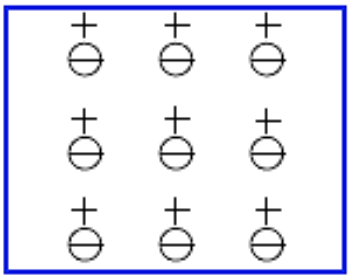
إن العنصر المضاف أو الشائبة تندمج في بلورة نصف الناقل، مع ذلك، لتأمين الارتباطات بين الذرات المجاورة، 4 إلكترونات تكون ضرورية، بينما العاطي (الشائبة لا تحمل إلا 3 إلكترونات)، إذاً هناك فراغ (ثقب) متوفر يمكن أن يستقبل إلكترون. إلكترون من ذرة مجاورة يمكن أن يشغل هذا الثقب. الذرة المشابة تصبح شاردة سالبة ثابتة. الذرة المغادرة سيصبح لديها ثقب وشحنة موجبة زائدة. نقول في هذه الحالة إنه لدينا نصف ناقل مشاب ونُطلق عليه اسم مستقبل أو مشاب من نوع (P)، الشكل (4).

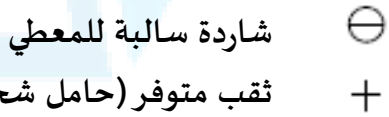
ثقب



الشكل (4): ذرة أنديوم مضافة أو مدخلة لبلورة نصف ناقل من السيليسيوم Si.

تمثيل مبسط لنصف ناقل من نوع P:

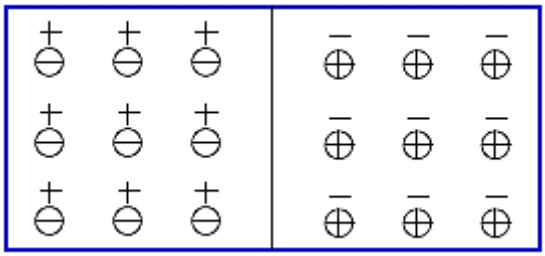




5- متصل ثنائي من نوع P-N:

5-1- تعريف:

اجتماع في نفس البلورة نصف ناقل من نوع P ونصف ناقل من نوع N يؤدي إلى ظهور، عند النهايتين لـ P و N، منطقة انتقالية يُطلق عليها اسم: متصل ثنائي من نوع P-N، الشكل (5).



الشكل (5): متصل ثنائي من نوع P-N.

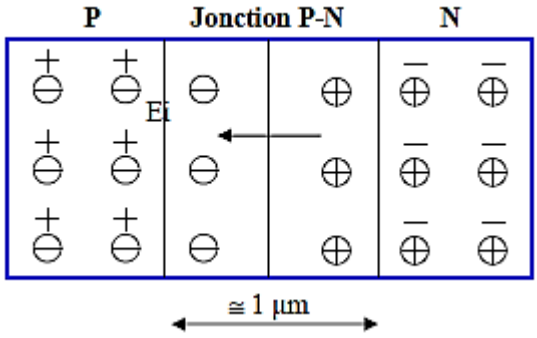
5-2- متصل ثنائي من نوع P-N غير مستقطب:

على مستوى نصف الناقل P-N:

- الإلكترونات الحرة للجزء N تنتشر أو تتجه نحو الثقوب المتوفرة في الجزء P،
- الثقوب المتوفرة في للجزء P تنتشر أو تتجه نحو الجزء N ومن ثم تلتقط أو تأسر الإلكترونات في تلك الجزء.

ومن ثم يتم تشكيل إلكترون-ثقب.

في البداية، الجزئين P و N هما حياديان. إن انتشار الإلكترونات والثقوب يؤدي إلى شحن إيجابياً الجزء N، وسلبياً الجزء P، وهذا بدوره يؤدي إلى خلق أو توليد حقل كهربائي داخلي. هذا الحقل يقوم بدفع غالبية حوامل الشحنات لكل جزء ويوقف الانتشار، شكل (6). بين الجزئين P و N يظهر إذاً فرق في الكمون يُطلق عليه اسم **حاجز الكمون**، وهو من مرتبة $(0,7\ V)$ للسيليسيوم، و $(0,3\ V)$ للجرمانيوم.

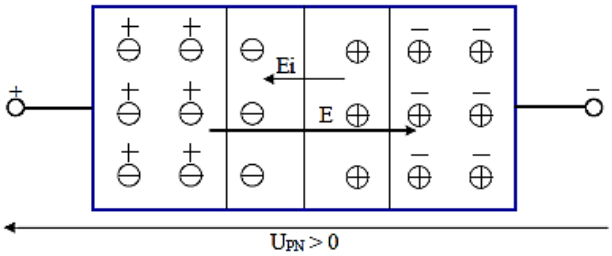


الشكل (6): متصل ثنائي من نوع P-N غير مستقطب في حالة توازن.

5-3- متصل ثنائي من نوع P-N مستقطب:

5-3-1- استقطاب مباشر (تغذية أمامية):

عند تطبيق جهد موجب بين الجزء P والجزء N $(U_{PN} > 0)$، المتصل P-N يكون مستقطب مباشرة، أو نقول إنه لدينا تغذية أمامية، شكل (7). وهذا يعود إلى تركيب أو جمع الحقل الكهربائي الداخلي E_i، والحقل الكهربائي الخارجي E، والحقل الناتج يقوم بإنقاص ارتفاع حاجز الكمون، وبالتالي، فإن غالبية حوامل الشحنات قادرة على اجتياز المتصل، أي منطقة الاتصال بين الجزئين التي تزداد أو تكبر.

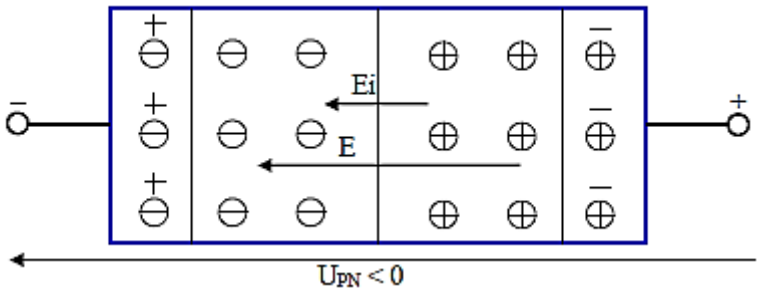


الشكل (7): متصل ثنائي من نوع P-N مستقطب مباشرة أو في حالة تغذية أمامية.

انطلاقاً من قيمة عتبة معينة للجهد U_0 من مرتبة $(0,7\ V)$ من أجل السـيليسـيوم، حوامل الشحنات تستطيع اجتياز بشكل حر المتصل P-N، يمرر المتصل تيار مستمر مُتشكل.

5-3-2- استقطاب غير مباشر (أو تغذية عكسية):

عند تطبيق جهد سـالب بين الجزء P والجزء N $(U_{PN} < 0)$، يكون المتصـل P-N في حالة اسـتقطاب عكسـي (تغذية عكسـية)، شـكل (8). إن محصـلة الحقل الكهربائي تؤدي إلى منع مرور الغالبية العظمى من حوامل الشحنة. في هذه الحالة نقول إن المتصل مغلق. إن التيار العكسي هو عملياً معدوم.



الشكل (8): متصل ثنائي من نوع P-N مستقطب بشكل عكسي أو في حالة تغذية عكسية.