كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : الكترونيات١

المحاضرة: الرابعة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

٦

2026

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

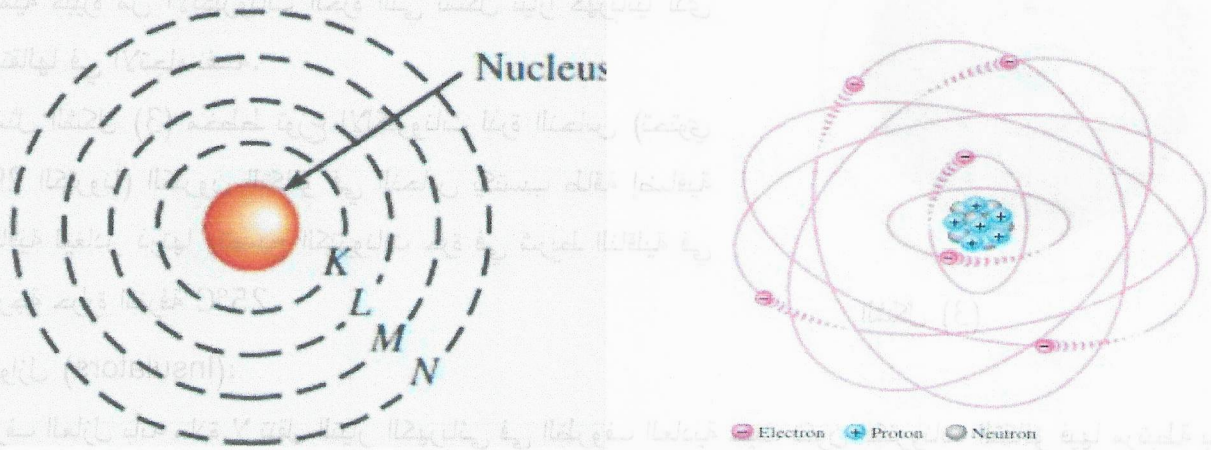
الديودات (Diodes)

يعتمد أساس الدارات المتكاملة (Integrated Circuits)، والديودات (Diodes)، والترانزستورات (Transistors)، والنبائط الالكترونية (Electronic Devices) على المواد نصف الناقلة (Semiconductor Materials) التي تشكل البنية الأساسية القائمة عليها هذه الأجهزة والالكترونيات الحديثة لما لها من أهمية في توضع الالكترونات في الذرة وتوزعها فيها مما يساهم في تحديد التيار الكهربائي المار فيها.

أساسيات أنصاف النواقل:

كل المواد مكونة من ذرات وقلب الذرة مكون من النواة التي تتكون من بروتونات ونترونات، والكترونات تتحرك وفق مدارات معينة حول النواة تدعى بالمدارات الالكترونية والتي تمتلك طاقة معينة حسب بعدها وقربها من النواة، ويوافق كل مدار مستوي طاقي محدد وكل مدار يمتلك عدداً من الالكترونات مقداره $N_e = 2n^2$ حيث يمثل n رقم المدار (الطبقة الالكترونية) ويرمز للطبقات الالكترونية بالرموز K و L و M و N والتي توافق 2 و 8 و 18 و 32 الكترون لكل طبقة على الترتيب.

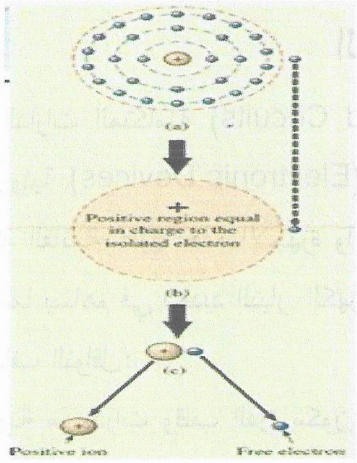
يمثل الشكل (1) نموذج بور للذرة ومكوناتها، والمدارات (الطبقات) الالكترونية.



الشكل (1)

يجب أن تكون جميع الطبقات ممتلئة بالالكترونات ماعدا الطبقة الأخيرة، وتمتلك الالكترونات الواقعة في المدارات (الطبقات) الأبعد عن النواة طاقة أعلى من تلك الالكترونات الواقعة في المدارات الأقرب إلى النواة فضلاً على أنها أقل ارتباطاً منها بالذرة وتدعى بطبقة التكافؤ وتسمى الالكترونات فيها بالكترونات التكافؤ وتساهم في تحديد الخصائص الكهربائية للمادة المكونة لها، وبما فيها قدرتها على نقل التيار الكهربائي.

عند تقديم طاقة خارجية (منبع جهد أو منبع حراري) تمتص الالكترونات هذه الطاقة مما يسبب زيادة طاقتها وتكتسب الكترونات الطبقة الأخيرة (الكترونات التكافؤ) طاقة أكثر من الطاقة التي تكتسبها الالكترونات الداخلية ويكون ارتباطها بالذرة أكثر ضعفاً من ارتباط الالكترونات الداخلية بحيث يمكنها القفز بسهولة إلى مدارات أعلى ضمن طبقة التكافؤ. ويمكنها مغادرة الطبقة الأخيرة في حال كانت الطاقة الممتصة عالية وكافية ويصبح الالكترون حر الحركة وفقدان الذرة



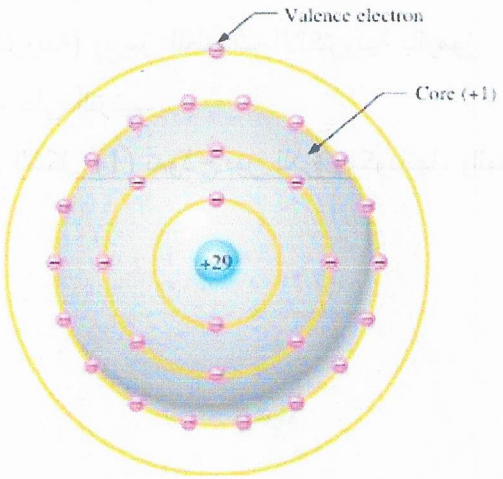
الشكل (2)

للالكترون يجعلها تكتسب شحنة موجبة (أيون موجب) وأما في حال كسبت الذرة الكترون تصبح الالكترونات أكثر وتحمل الذرة شحنة سالبة (أيون سالب) كما هو موضح في الشكل (2) بالنسبة لذرة النحاس Cu.

تصنف المواد تبعاً لخصائصها الكهربائية إلى ثلاث فئات: النواقل(Conductors)، أنصاف النواقل (Semiconductors)، العوازل (Insulators).

النواقل (Conductors):

يعرف الناقل بأنه مادة تنقل التيار الكهربائي نسبياً بسهولة وتعد المعادن مثال على النواقل مثل النحاس والقضة والذهب والالمنيوم التي تتصف بذرات تمتلك الكترون تكافؤ وحيد ضعيف الارتباط بذرته ويمكنه مغادرة الذرة ويصبح الكترون حر ولهذا المعادن تمتلك كمية كبيرة من الالكترونات الحرة التي تشكل تياراً كهربائياً لدى انتقالها في الاتجاه نفسه.



الشكل (3)

يمثل الشكل (3) مخطط توزع الالكترونات لذرة النحاس (تحتوي 29 الكتروناً) الكترون التكافؤ في النحاس يكتسب طاقة إضافية كافية ليغادر ذرتها وتصبح الكترونات حرة في شريط الناقلية في درجة حرارة الغرفة 25°C.

العوازل (Insulators):

يعرف العازل بأنه مادة لا تنقل التيار الكهربائي في الظروف العادية حيث تكون الكترونات التكافؤ فيها مرتبطة بشدة في ذراتها بروابط قوية ولا تمتلك سوى عدد قليل من الالكترونات الحرة ومن الأمثلة عليها الزجاج والبورسلان المطاط البلاستيك، وفي حال تطبيق جهد كهربائي عالٍ جداً على مادة العازل يجبر الالكترونات على التحرر من روابطها مما يؤدي على انهيار العازل وتحويله إلى ناقل كهربائي.

أنصاف النواقل (Semiconductors):

يعرف نصف الناقل بأنه مادة تقع بين النواقل والعوازل من حيث قدرتها على نقل التيار الكهربائي ومن أشهر العناصر الشائعة الاستعمال السليكون Si والجرمانيوم Ge والكربون C وهي عناصر تقع في العمود الرابع من الجدول الدوري وتمتلك أربع الكترونات في مدارها الأخير وتعتبر الأساس في تصنيع الديودات، والترانزستورات، والدارات الالكترونية المتكاملة كما وتوجد مواد نصف ناقلة مركبة ومنها زرنيخ الغاليوم $GaAs$.

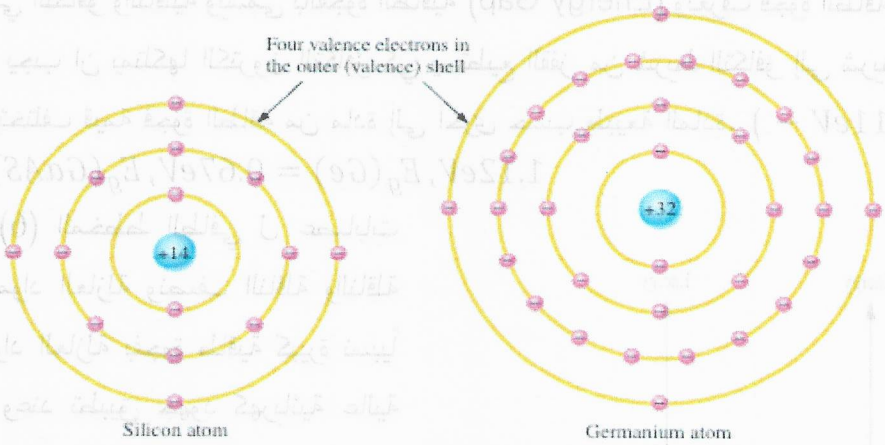
تتميز المواد عن بعضها حسب المقاومة النوعية وفق الجدول التالي:

MATERIALS	RESISTIVITY (Ω · cm)
Insulators	$10^5 < \rho$
Semiconductors	$10^{-3} < \rho < 10^5$
Conductors	$\rho < 10^{-3}$

مقارنة بين نصفي الناقل السليكون والجرمانيوم المادتين الأساسيتين في المواد نصف الناقلة:

يبين الشكل (4) مقارنة بين التركيب الذري للسليكون والجرمانيوم.

كل ذرة من ذرتي السليكون والجرمانيوم تمتلك أربع الكترونات تكافؤ في طبقتها الأخيرة، ومن التوزع الالكتروني على الطبقات لمادتي نصف الناقل نلاحظ إلكترونات التكافؤ في ذرة الجرمانيوم تقع في الطبقة الرابعة في حين تقع في الطبقة الثالثة الأقرب إلى النواة في ذرة السليكون هذا يعني أن الكترونات التكافؤ في الجرمانيوم تقع في مستويات طاقة أعلى من مستويات الطاقة في السليكون ولذا تتطلب كمية أقل من الطاقة الإضافية لتبتعد عن الذرة المعنية وهذه الخاصية هي التي تجعل الجرمانيوم أقل استقراراً في درجات الحرارة العالية وهذا يشير إلى أن المادة النصف الناقلة الأكثر استخداماً في الأجهزة الالكترونية هي السليكون.

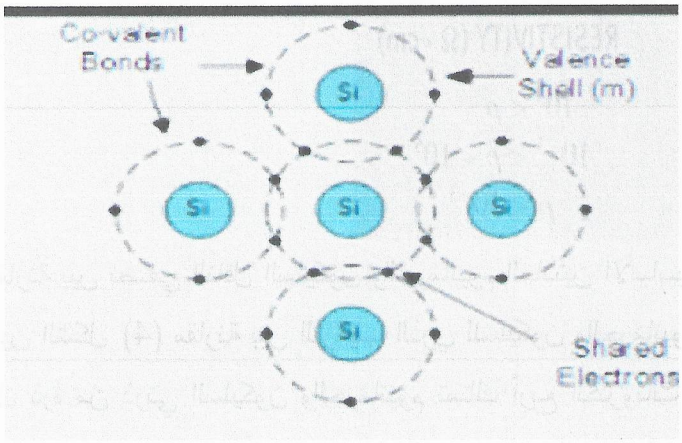


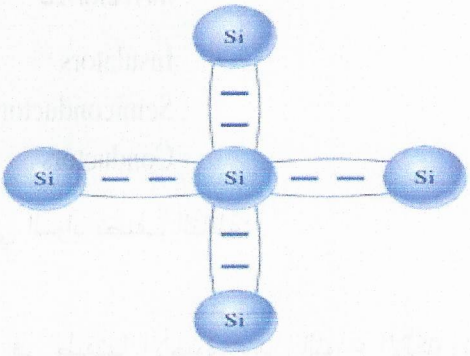
الشكل (4)

تتجمع الذرات لتكون جسماً صلباً (مادة متبلورة) تنظم نفسها في نمط متناظر وتتماسك الذرات ضمن البنية البلورية مع بعضها البعض بروابط تكافؤية (Covalent Bond) نتيجة التأثير المتبادل بين الالكترونات التكافؤية للذرات.

السليكون مادة متبلورة تتشكل بلورة السليكون من خلال ارتباط كل الكترون في المدار الأخير في ذرة ما مع الكترون في المدار الأخير لذرة مجاورة ضمن البنية البلورية وتشبه في تركيبها البلوري بنية الألماس (بنية بلورية مكعبية).

يبين الشكل (5) تموضع ذرة السليكون نفسها مع أربع ذرات سليكون مجاورة لتشكيل بلورة السليكون من خلال تشارك ذرة السليكون بإلكتروناتها التكافؤية الأربعة بالكترون واحد مع كل ذرة من الذرات الأربعة المجاورة لها وهذا ما يتشكل بفعالية ثمانية الكترونات تكافؤ تشاركية من أجل كل ذرة وتنتج حالة استقرار كيميائي وهذه التشاركية بالالكترونات التكافؤ تنتج روابط تساهمية تربط الذرات مع بعضها البعض حيث ينجذب كل الكترون تكافؤ بذرتين مجاورتين تشاركان به بشكل متساوٍ (نفس الترابط يحصل في بلورة الجرمانيوم لأنها تحتوي أربع الكترونات تكافؤ في مدارها الأخير).



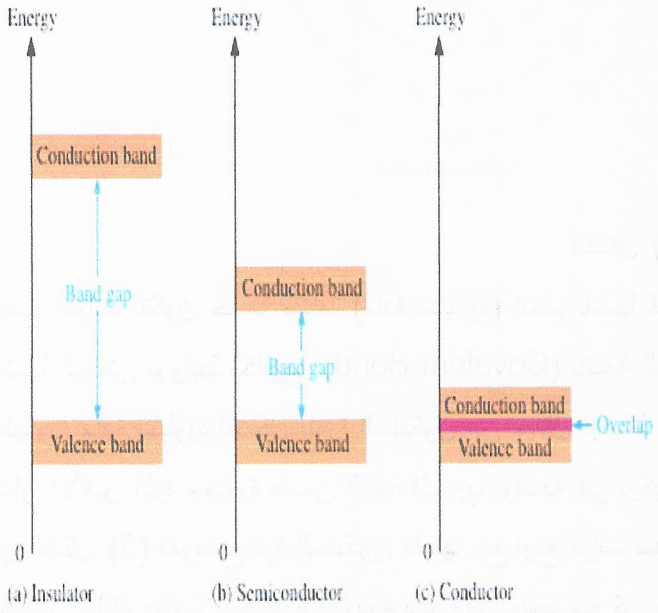


الشكل (5)

عصابات الطاقة Energy Band:

تمثل طبقة التكافؤ لذرة ما شريطاً من سويات الطاقة يسمى بشريط التكافؤ (عصابة التكافؤ) (Valence Band) وتنحصر الكترونات التكافؤ به وعندما نقدم طاقة خارجية للالكترون يكتسب طاقة إضافية كافية تمكنه من مغادرة طبقة التكافؤ ويصبح الكتروناً حراً ويتواجد في عصابة الطاقة ونسمى بعصابة الناقلية (Conductive Band) ويوجد فرق طاقي بين عصابتي التكافؤ والناقلية ويسمى بالفجوة الطاقية (Energy Gap) وتعرف فجوة الطاقة أو حزمة الطاقة بأنها كمية الطاقة التي يجب ان يمتلكها الكترون التكافؤ كي يستطيع القفز من شريط التكافؤ إلى شريط الناقلية ويصبح حراً ولا يرتبط بالذرة وتختلف قيمة فجوة الطاقة من مادة إلى أخرى حسب طبيعة المادة. ($E_{g300K}(Si) = 1.11eV - 1.12eV, E_g(Ge) = 0.67eV, E_g(GaAS) = 1.42eV$)

يوضح الشكل (6) المخطط الطاقي ل عصابات الطاقة لأنواع المواد العازلة ونصف الناقلة والناقلة حيث تتميز المواد العازلة بفجوة طاقية كبيرة نسبياً $E_g \geq 5eV$ وعند تطبيق جهود كهربائية عالية يحدث الانهيار الكهربائي للعازل وتغادر الكترونات التكافؤ طبقتها الأخيرة وتصبح حرة الحركة وتتحول المادة إلى مادة ناقلة، بينما بالنسبة لأنصاف النواقل فجوة طاقية أضيق مما هي عليه في العوازل أقل من $5eV$ بينما في النواقل تلاحظ فجوة الطاقة معدومة $(E_g \cong 0eV)$ حيث تتداخل عصابة التكافؤ وعصابة الناقلية ويكون عدد الالكترونات الحرة كبير جداً في المادة.



الشكل (6)

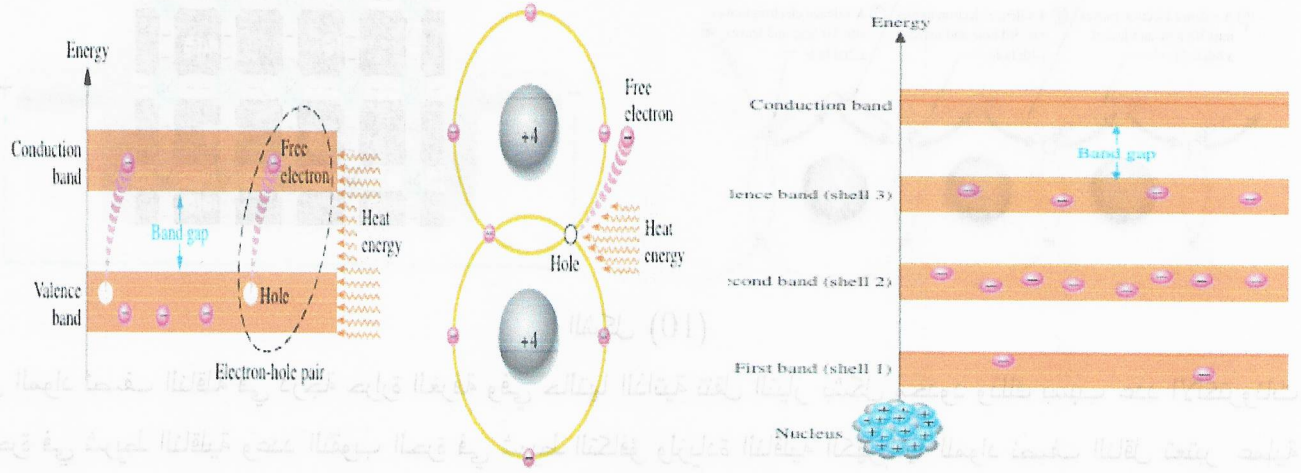
الناقلية الكهربائية في أنصاف النواقل:

لفهم آلية عمل النبائط الالكترونية مثل الديود أو الترانزستور والدارات المتكاملة لابد من معرفة آلية انتقال التيار الكهربائي في المواد المتبلورة نصف الناقلة.

الكترونات الذرة في حالتها النقية يمكن ان تتواجد فقط في شرائط طاقية محددة (عصابات) وتنفصل عن الطبقات المجاورة بفجوات طاقية كما في الشكل (7a) يلاحظ في مخطط عصابة الطاقة لذرة في بلورة السليكون في درجة الصفر المطلق عدم وجود الكترونات في عصابة الناقلية وإنما فقط في عصابة التكافؤ (عصابة التكافؤ تمتلك عدة سويات طاقية (First Band, Second Band(Shell2),..).

وفي درجة حرارة الغرفة (تقديم طاقة حرارية لبلورة السليكون) يمكن لبعض الكترونات التكافؤ أن تمتلك طاقة حرارية كافية تمكنها من تجاوز فجوة الطاقة وتنتقل إلى عصابة الناقلية وتصبح الكترونات حرة وتسمى هذه الالكترونات بالكترونات الناقلية كما في الشكل (7b).

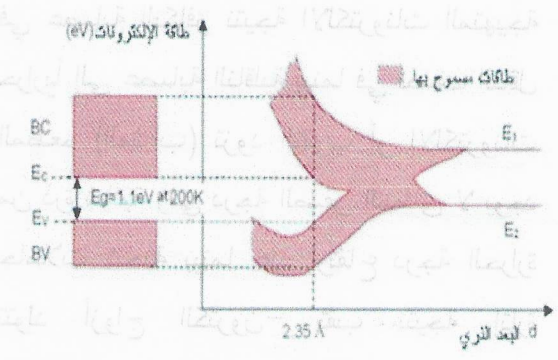
وعند انتقال الالكترون إلى عصابة الناقلية تخلف وراءها شاغراً في عصابة التكافؤ ضمن البلورة يسمى الشاغر بالثقب حيث يتشكل زوج الكترون–ثقبElectron–Hole Pair نتيجة عملية الانتقال الالكتروني وتجري عملية إعادة الاتحاد الكترون–ثقب Recombination عندما يفقد الكترون الناقلية الطاقة ويسقط عائداً إلى ثقب في عصابة التكافؤ(7b).



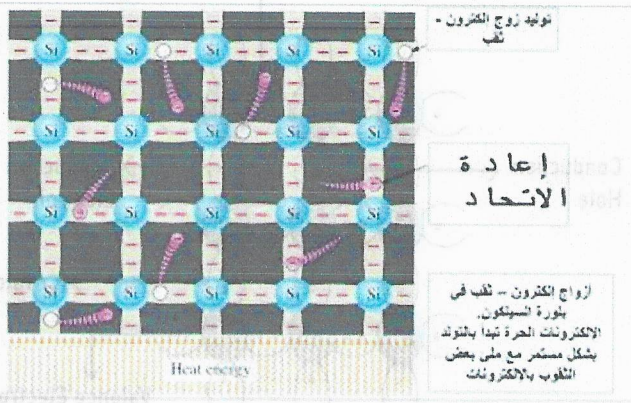
الشكل (7b) الشكل (7a)

تملك قطعة من السليكون الذاتي في درجة حرارة الغرفة وفي كل لحظة زمنية عدداً من الكترونات الناقلية الحرة غير المرتبطة بأية ذرة وتنتقل عشوائياً في المادة وبالمقابل يوجد عدد مساو من الثقوب في شريط التكافؤ تشكلت عندما قفزت هذه الالكترونات إلى شريط الناقلية ويوضح الشكل (8) كيفية تشكيل أزواج الكترون–ثقب (Electron–Hole Pair) وإعادة الاتحاد (Recombination) لبلورة سليكون نقية.

يمثل الشكل (9) سويات الطاقة للالكترونات في بلورة سليكون لها بنية الألماس.



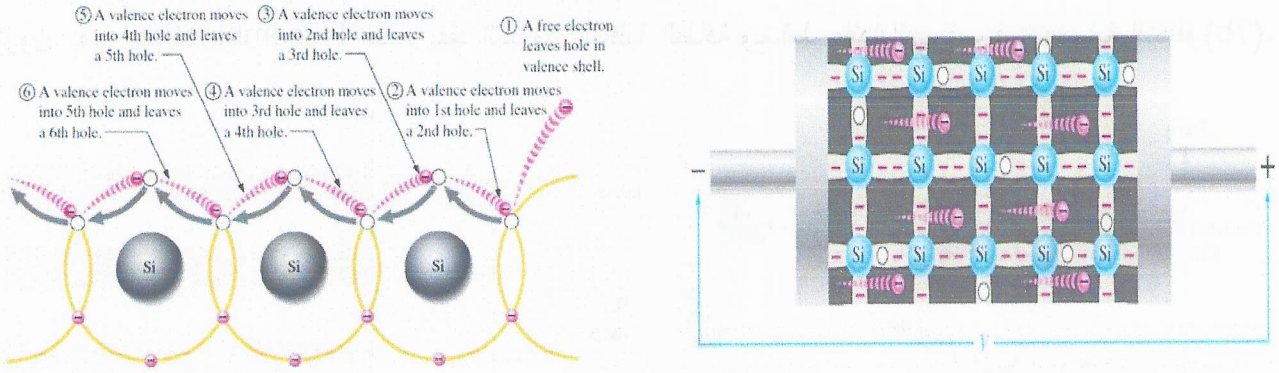
الشكل (9)



الشكل (8)

وعند تطبيق جهد كهربائي على طرفي قطعة السليكون النقية المدروسة كما في الشكل (10a) نلاحظ أن الالكترونات المتولدة حرارياً في عصابة الناقلية وأصبحت حرة الحركة تتحرك عشوائياً في البنية البلورية وتتساق الأن باتجاه الطرف الموجب للمولد وتعد هذه الحركة للالكترونات الحرة أحد أنواع التيارات الكهربائية في المادة نصف الناقلة ويسمى التيار الجاري بالتيار الالكتروني، وبالمقابل التيار الجاري في عصابة التكافؤ نتيجة تواجد الثقوب المتولدة بالالكترونات الحرة يدعى التيار الثقبي وتبقى الالكترونات المتبقية في عصابة التكافؤ مرتبطة بذرتها ولا تكون حرة الحركة عشوائياً في البلورة ولكن بإمكان الكترون التكافؤ الانتقال إلى ثقب مجاور تغير مستواه الطاقي بشكل ضعيف مخلفاً وراءه ثقباً أخر في المكان الذي غادره كما يوضح الشكل (10b).

b a

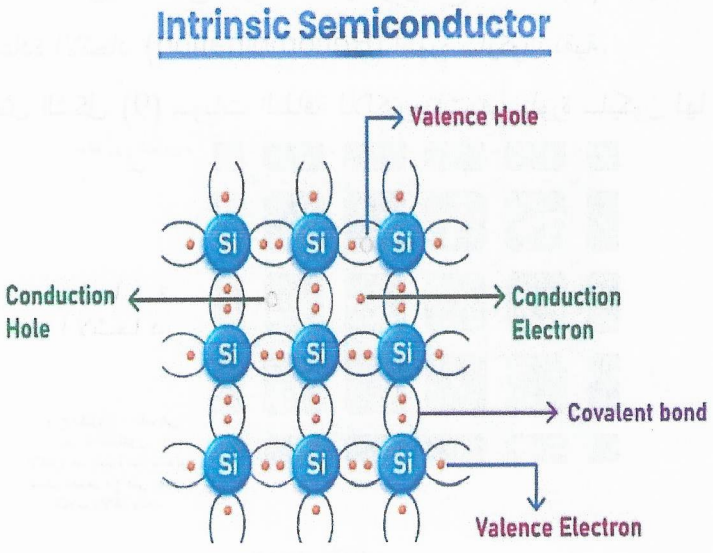


الشكل (10)

إن المواد نصف الناقلة في درجة حرارة الغرفة وفي حالتها الذاتية تنقل التيار بشكل محدود وذلك بسبب عدد الالكترونات الحرة في شريط الناقلية وعدد الثقوب الحرة في شريط التكافؤ ولزيادة الناقلية الكهربائية للمواد نصف الناقل تعتبر عملية إضافة شوائب لمادة نصف الناقل أفضل الطرائق لزيادة عدد حاملات الشحنة الكهربائية سواء الالكترونات الحرة أو الثقوب ومنه الناقلية الكهربائية له وتسمى هذه العملية بالتطعيم ويتشكل نصف ناقل من نوع N أو P حسب نوع حوامل الشحنة.

نصف الناقل الذاتي:

هو نصف ناقل نقي غير مطعم بشوائب غريبة وخالية من العيوب وهذا يعني أن الثقوب المتولدة في عصابة التكافؤ نتيجة الالكترونات المتهيجة حرارياً إلى عصابة الناقلية بينما في نصف الناقل المطعم (المشاب) تزود الثقوب أو الالكترونات من ذرة شائبة وفي درجة الصفر المطلق لا يوجد حاملات شحنة بينما عند ارتفاع درجة الحرارة تتولد أزواج الكترون- ثقب نتيجة إثارة الالكترونات من عصابة التكافؤ وانتقالها إلى عصابة الناقلية وتجاوز فجوة الطاقة.



يمكن زيادة ناقلية السليكون والجرمانيوم بإضافة شوائب بكمية محددة إلى مادة نصف الناقل النقي ويصبح نصف ناقل مشوب بإحدى حاملات الشحنة حسب التطبيق المطلوب.

نصف الناقل غير الذاتي (Extrinsic Semiconductor):

دراسة نصف ناقل من النوع N:

إضافة ذرات شائبة خماسية التكافؤ بكميات محددة لبلورة السليكون يؤدي إلى زيادة عدد الالكترونات في شريط الناقلية للسليكون النقي ومن الأمثلة على الذرات خماسية التكافؤ الزرنيخ (As)، والفوسفور (P)، والبيزموت (Bi)، والأنتيمون(Sb).

يمتلك السليكون النقي أربع الكترونات تكافؤ ويمتلك الفوسفور خمس الكترونات تكافؤ ولتشكيل نصف ناقل من النوع N تتشكل أربع روابط تساهمية بين أربع ذرات سليكون نقي مع أربع الكترونات تكافؤ من ذرة الفوسفور لتشكيل قاعدة الثمانية ويبقى الكترون زائد من الفوسفور ويسمى بالكترون الناقلية لأنه حر لا يرتبط بأي ذرة ويتشكل نصف ناقل من النوع N لأن معظم حاملات الشحنة هي الالكترونات وتسمى بحاملات الشحنة الأكثرية (The Majority Carriers) وتسمى ذرة الفوسفور بالذرة المانحة (Donner atom) لأنها قدمت الكترون للسليكون ويمكن التحكم بعدد الذرات الشائبة المضافة من خلال ضبط عدد إلكترونات الناقلية جيداً، وأيضاً يوجد عدد قليل من الثقوب نتيجة عملية التوليد الحراري وتشكيل أزواج (الكترون-ثقب) وتدعى بحاملات الشحنة الأقلية (The Minority Carriers).

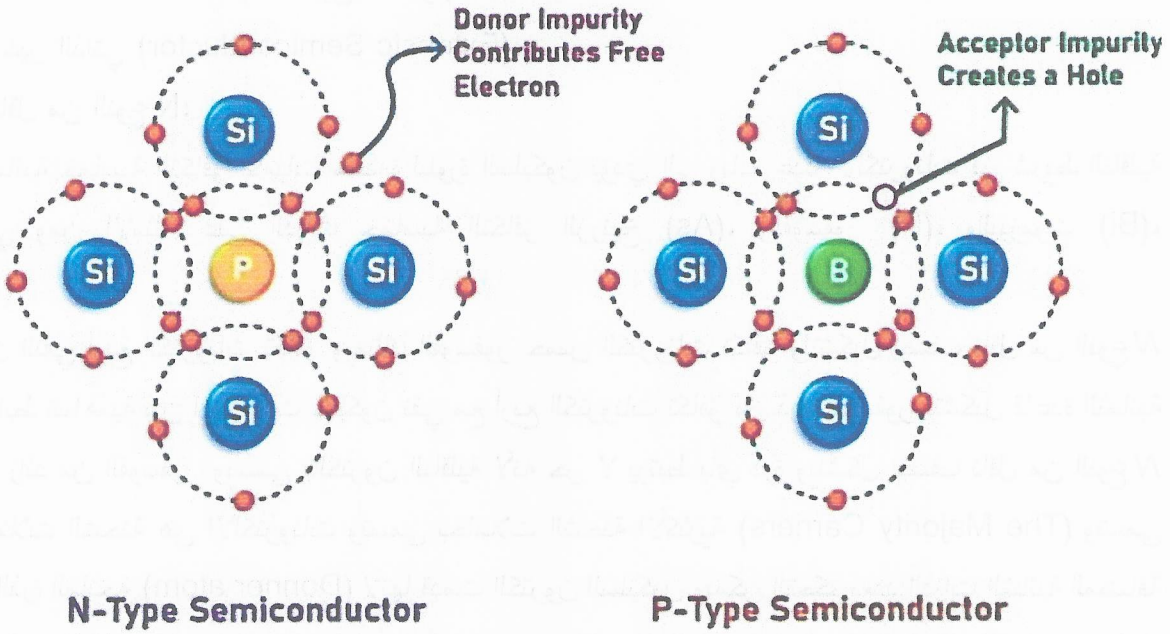
دراسة نصف ناقل من النوع P:

لزيادة عدد الثقوب في شريط التكافؤ لبلورة السليكون النقي نطعم البلورة بذرات شائبة ثلاثية التكافؤ ومن الأمثلة على الذرات التي تمتلك ثلاث الكترونات تكافؤ البور (B)، الإنديوم (In)، الغاليوم (Ga).

تتشكل الروابط التساهمية الثلاث لالكترونات ذرة البور الثلاث في الطبقة الأخيرة مع ثلاث الكترونات تكافؤ من السليكون ويبقى الكترون من ذرة السليكون ويسبب تشكل ثقب في الذرة الشائبة نتيجة عملية التطعيم هذه ولا يترافق بالكترون ناقلية حر وعليه تسمى الذرة الشائبة بذرة أخذة (Acceptor atom) ويكون معظم حاملات الشحنة هي شحنة موجبة الثقوب وتسمى بحاملات الشحنة الأكثرية والالكترونات المتولدة حرارياً نتيجة تشكل أزواج الكترون ثقب تكون قليلة وتسمى بحاملات الشحنة الأقلية.

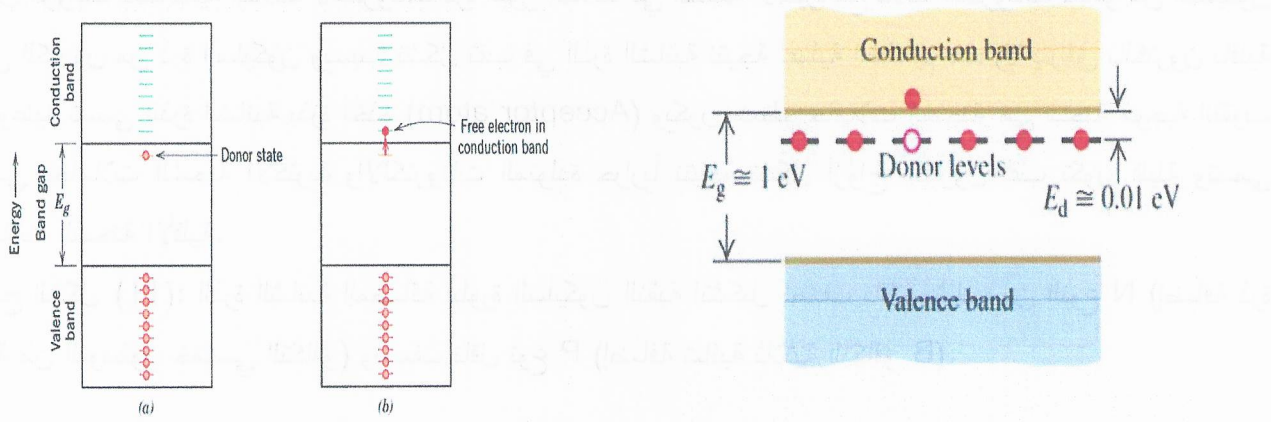
يوضح الشكل (11): الذرة الشائبة المضافة لبلورة السليكون النقية لتشكيل نصف ناقل مشاب من النوع N (إضافة ذرة شائبة من الفوسفور خماسي التكافؤ) ونصف ناقل نوع P (إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ B).

Extrinsic Semiconductor



الشكل (11)

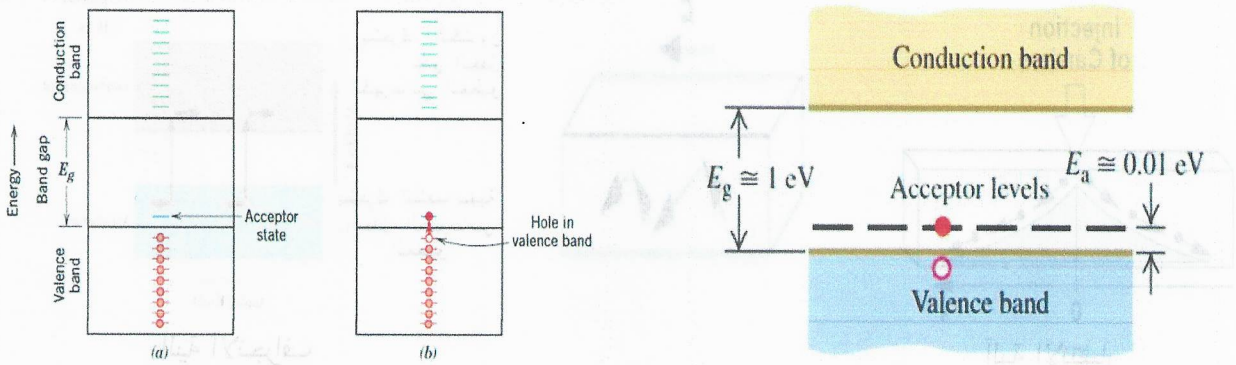
يوضح الشكل (12) مخطط عصابات الطاقة لنصف الناقل نوع *n* وأماكن توضع السويات المانحة عند درجة حرارة منخفضة حيث نلاحظ تحفيز الكترون من السوية المانحة القريبة من عصابة الناقلية وانتقالها إليها ليصبح الكترون حر يساهم في عملية نقل التيار الكهربائي (شكل 12a). يمثل الشكل (12b) عصابة الطاقة لسوية الالكترون المانح في فجوة الطاقة أسفل عصابة الناقلية وانتقالها لعصابة الناقلية عند تحفيزه.



b a

الشكل (12)

يوضح الشكل (13) مخطط عصابات الطاقة لنصف الناقل نوع P وأماكن توضع السويات الأخذة عند درجة حرارة منخفضة حيث نلاحظ تحفيز الكترون من السوية القريبة من عصابة التكافؤ وانتقالها إليها تاركاً خلفه ثقباً (شكل 13a). يمثل الشكل (13b) عصابة الطاقة لسوية الشائبة الأخذة في فجوة الطاقة أعلى قمة عصابة التكافؤ.



b a

الشكل (13)

لفهم آلية تشكيل الوصلة pn وتشكيل الديود لابد من فهم آلية النقل لحوامل الشحنة في مادة نصف الناقل (ستدرس آلية النقل بشكل مفصل في مقرر أنصاف النواقل لاحقاً).

كثافة الالكترونات الحرة تعطى بالعلاقة (1−1):

$$n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{KT}\right) \qquad (1-1)$$

في حالة التوازن الحراري تركيز الثقوب يساوي تركيز الالكترونات

$$n_i^2 = np$$

تتم آلية انتقال حوامل الشحنة في مادة نصف الناقل وفق آليتين:

آلية انجراف حوامل الشحنة ويسمى التيار المتشكل بتيار الانجراف حيث عند تطبيق حقل كهربائي تنجرف حوامل الشحنة (الكترونات وثقوب) استجابة للحقل الكهربائي المطبق حيث تنساق الثقوب باتجاه الحقل والالكترونات بعكس اتجاه الحقل ويتشكل تيار النقل الناتج من كل الالكترونات والثقوب ويعطى بالعلاقة (1−2):

$$\begin{pmatrix} j_n = q\mu_n E \\ j_p = q\mu_p E \end{pmatrix}$$

$$j = j_n + j_p = q(n\mu_n + p\mu_p)E \qquad (1-2)$$

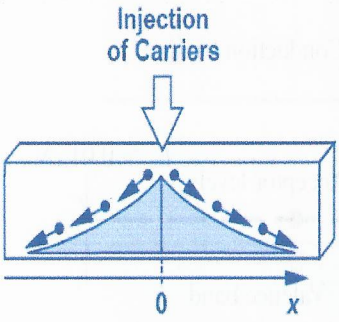
والآلية الثانية آلية انتشار حوامل الشحنة وترتبط بالتدرج في توزيع حاملات الشحنة مع البعد في المادة.

آلية الانتشار تنتقل الجسيمات المشحونة من المنطقة ذات التركيز العالي إلى المنطقة ذات التركيز المنخفض ويتناسب تيار الانتشار مع تدرج الشحنة $\frac{dn}{dx}$.

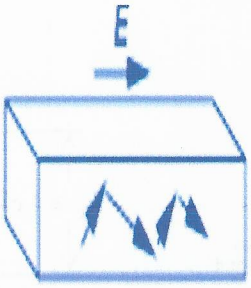
تمثل كثافة الشحنة الخطية تيار الانتشار المستمر وتمثل كثافة الشحنة غير الخطية تيار الانتشار المتغير وتعطى كثافة الشحنات للالكترونات والثقوب وفق العلاقات (1−3):

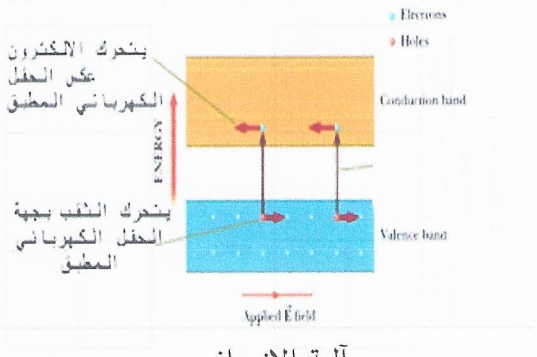
$$\begin{pmatrix} j_n = qD_n \dfrac{dn}{dx} \\ j_p = -qD_p \dfrac{dp}{dx} \end{pmatrix} \qquad (1-3)$$

يوضح الشكل (14) آليتي انتقال حوامل الشحنة في نصف الناقل:



آلية الانتشار





آلية الانجراف

الشكل (14)

مكتبة A to Z