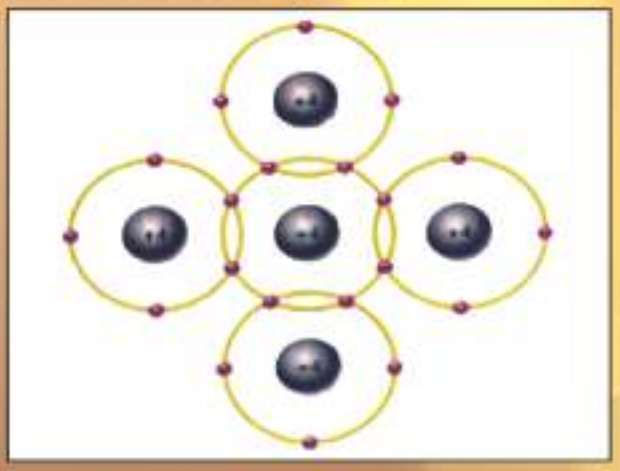
الفصل السابع 7

الكترونيات الحالة الصلبة
Solid-State Electronics



مفردات الفصل:

7-1 مقدمة

7-2 المدارات الالكترونية ومستويات الطاقة

7-3 الموصلات والعوازل وأشباه الموصلات

7-4 حزم الطاقة في المواد الصلبة

7-5 أشباه الموصلات النقية

7-6 أشباه الموصلات المُطَعَّمة

7-7 الثنائي pn

7-8 فولطية الانحياز للثنائي pn

7-9 بعض أنواع الثنائيات

7-10 الترانزستور

الاهداف السلوكية

بعد دراسة الفصل ينبغي للطالب ان يكون قادرا على ان:

- يوضح مفهوم المدارات الالكترونية ومستويات الطاقة.
- يذكر مفهوم غلاف التكافؤ والكترونات التكافؤ.
- يقارن بين الموصلات واشباه الموصلات.
- يوضح مفهوم حزم الطاقة في المواد الصلبة.
- يتعرف أشباه الموصلات النقية.
- يقارن بين تيار الالكترونات والفجوات.
- يوضح أشباه الموصلات المطعمة (غير النقية).
- يذكر الثنائي Pn
- يعرف مفهوم فولطية الانحياز للثنائي.
- يعدد بعض انواع الثنائيات.
- يعرف مفهوم الترانستور.
- يعدد بعض استعمالات الترانستور.

المصطلحات العلمية	
Energy Levels	مستويات الطاقة
Conductors	الموصلات
Insulators	العوازل
Semiconductors	أشباه الموصلات
Energy Bands	حزم الطاقة
Conduction Band	حزمة التوصيل
Valence Band	حزمة التكافؤ
Forbidden Energy Gap	ثغرة الطاقة المحظورة
Covalent Bond	الأصرة التساهمية
Valence Electron	الكترون التكافؤ
Donor Atom	الذرة المانحة
Acceptor Atom	الذرة القابلة
Electron-Hole Pair	الزوج الكترون- فجوة
Doping	التشويب
Depletion Region	منطقة الاستنزاف
pn diode	الثنائي
Junction	المفرق (الملتقى)
Forward Bias	الانحياز الامامي
Reverse Bias	الانحياز العكسي
rectifier	المقوّم
Light-Emitting Diode	الثنائي الباعث للضوء
The Photodiode	الثنائي الضوئي
Transistor	الترانزستور

1-7 مقدمة

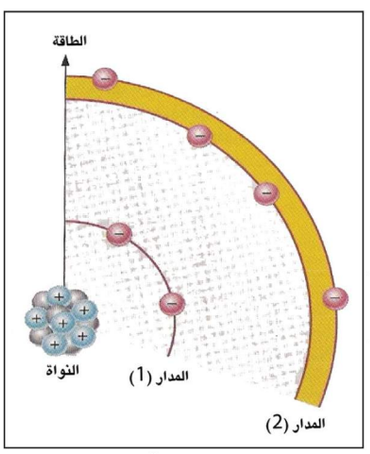
شكل (1)

دخل علم الالكترونيات حيّز التطبيق في مجالات العلوم كافة منذ عشرات السنين وأخذ يتطور وبسرعة كبيرة، فصُنِّعت الكثير من الأجهزة الالكترونية من أمثلتها الراديو والتلفاز، مكبرات الصوت ، مجهزات القدرة الكهربائية، الكاشف الالكتروني ، أجهزة تضمين الإشارات الكهربائية، الفولطميتر الالكتروني ، راسم الاشعة الكاثودية ، أجهزة البث والتسلم، الرادار والعديد من الاجهزة الالكترونية التي تستعمل في ميادين الطب والهندسة والفضاء والفلك والكيمياء وعلوم الحياة وأجهزة التحسس عن بعد وغيرها.

إن جميع تلك الأجهزة تعتمد في عملها على الثنائيات البلورية المختلفة والترانزستورات. لاحظ الشكل (1).

2-7 المدارات الالكترونية ومستويات الطاقة

لعلك تتساءل؟ ما الأغلفة الألكترونية التي تشارك إلكتروناتها في التفاعلات الكيميائية وتحدد الخواص الكهربائية للمادة؟



شكل (2)

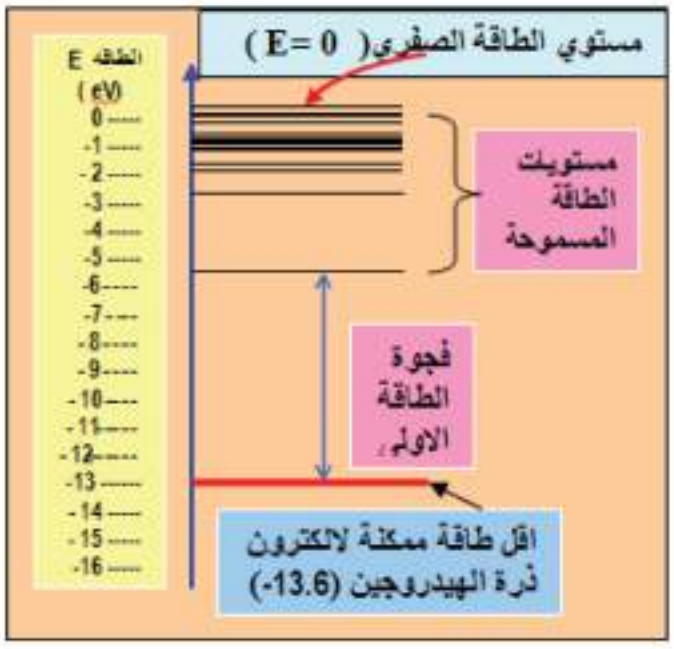
إن الإلكترونات التي تدور في الأغلفة الخارجية الأبعد عن النواة تمتلك أعلى قدرا من الطاقة، وتكون مرتبطة بالنواة بأقل قوة جذب (النواة موجبة الشحنة والإلكترونات سالبة الشحنة) مقارنة بالإلكترونات في الأغلفة الأقرب إلى النواة.

لذا فالإلكترونات ذات الطاقة الأعلى تشغل الاغلفة الخارجية الأبعد عن النواة لتلك الذرة، ويسمى الغلاف الخارجي الأبعد عن النواة غلاف التكافؤ Valence shell لاحظ الشكل (2). والإلكترون في هذا الغلاف يسمى إلكترون التكافؤ Valence electron. وهذا يعني أن إلكترونات التكافؤ هذه هي التي تسهم في التفاعلات الكيميائية وتحدد الخواص الإلكترونية للمادة.

تذكر

- الغلاف الثانوي الخارجي الأكثر بعدا عن النواة يسمى بغلاف التكافؤ، وإلالكترونات التي تشغل هذا الغلاف تسمى إلكترونات التكافؤ.
- تمتلك إلكترونات التكافؤ اكبر قدرا من الطاقة، فتكون ضعيفة الارتباط جدا مع نواة ذرتها مقارنة بالإلكترونات الأقرب إلى النواة.
- ألكترونات التكافؤ تسهم في التفاعلات الكيميائية وهي التي تحدد الخواص الالكترونية للمادة.

لكي نوضح عملية تحرر إلكترون الذرة وتخلصه من قوة جذب النواة. لاحظ الشكل (3)، الذي يمثل مخططا ذا بعد واحد لمستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين، إذ إن المحورالشاقولي (y) يمثل الطاقة E المقاسة بـ (eV) على التدريج السالب، ويمتلك الإلكترون طاقة سالبة نسبة الى مستوى الطاقة الصفري (E=0) والذي يعد أعلى مستوى طاقة في الذرة، وذلك بسبب ارتباط الإلكترون بقوة جذب مع النواة.



شكل (3) (للاطلاع فقط)

أن أقل مقدار طاقة ممكن أن يمتلكه الإلكترون في ذرة الهيدروجين يساوي (-13.6eV)، هذا يعني عند اكتساب هذا الإلكترون طاقة مقدارها (+13.6eV) يتحرر من ذرة الهيدروجين (وهو في المستوى الأرضي ground level). وليكن معلوما بإن هذا ينطبق فقط على الذرة المنفردة.

3-7 الموصلات والعوازل وأشباه الموصلات

بماذا تتميز كل من المواد الموصلة والعازلة وشبه الموصلة ؟

من المعروف أن مادة الموصل تسهل انسياب التيار الإلكتروني خلالها لذا تتحرك الشحنات الكهربائية بسهولة في الموصلات (من أمثلتها النحاس ، الفضة ، الذهب ، والألمنيوم) وتمتاز ذراتها بإن لها ألكترون تكافؤ واحد يرتبط مع النواة ارتباطا ضعيفا جدا. وهذه إلالكترونات تتمكن بسهولة من فك ارتباطها مع النواة وتصير حرة الحركة (إلكترونات حرة)، لذا فإن المواد الموصلة تحتوي وفرة من الالكترونات الحرة، فينشأ تيار الكتروني خلال الموصل بتسليط فرق جهد مناسب بين طرفيه نتيجة لحركة هذه إلالكترونات باتجاه واحد. إذ إن المقاومة الكهربائية النوعية للمواد الموصلة بحدود (10^{-8} - $10^{-5}\Omega\,m$).

أما المادة العازلة فهي تلك المادة التي لا تسمح بانسياب التيارالالكتروني خلالها في الظروف الاعتيادية، تكون إلكترونات التكافؤ فيها مرتبطة ارتباطا وثيقا بالنواة، والمقاومة الكهربائية النوعية للمواد العازلة تقع بحدود (10^{10} - $10^{16}\Omega.m$)

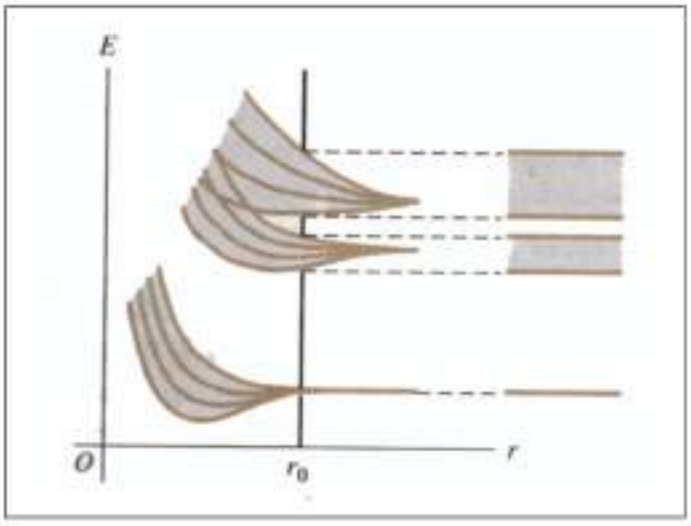
أما المادة شبه الموصلة فهي تلك المادة التي تتحرك الشحنات الكهربائية فيها بحرية أقل مما هي عليه في الموصل وأن المقاومة الكهربائية النوعية لمادة شبه الموصل تقع بين المقاومة النوعية للمواد الموصلة والمواد العازلة في قابليتها على التوصيل الكهربائي والتي تقع بحدود (10^{-5} - $10^{8}\Omega\,m$)

4-7 حزم الطاقة في المواد الصلبة Energy Bands in solid materials

بما أن إلكترونات الذرة المنفردة تدور حول النواة بمدارات محددة وأن لكل مدار مستوى محدد من الطاقة.

كيف ستكون مستويات الطاقة للمواد الصلبة التي تحتوي عددا هائلا من الذرات المتراصفة؟

لو امعنا النظر بالشكل (4)، الذي يوضح تأثير تداخل مستويات الطاقة مع بعضها بعض في المواد الموصلة، مما يؤدي إلى تأثر الكترونات أية ذرة بالكترونات الذرات الأخرى المجاورة لها في المادة نفسها، ونتيجة لهذا التفاعل بين الذرات المتجاورة في المادة الواحدة تقسم مستويات الطاقة المسموح بها في الأغلفة الثانوية الخارجية المتقاربة جدا من بعضها بشكل حزم، وكل حزمة منها ذات مستويات طاقة ثانوية متقاربة جدا من بعضها مكونة ما يسمى حزم الطاقة Energy Bands .



شكل (4) للاطلاع يوضح حزم الطاقة

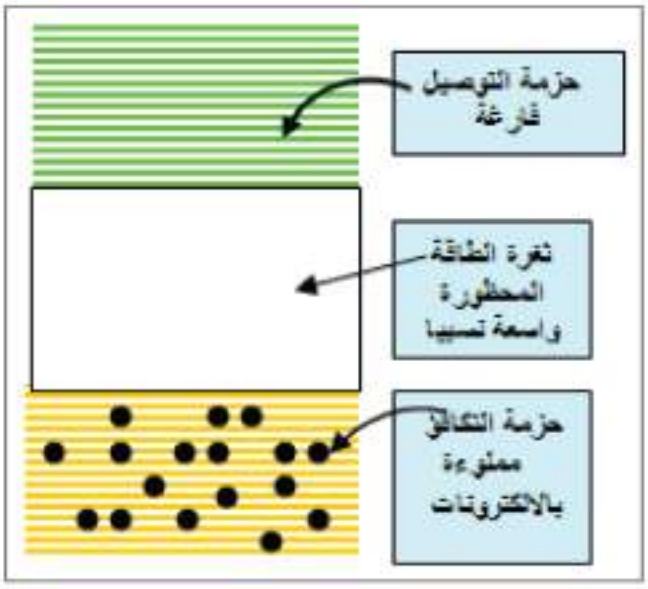
هناك نوعان من حزم الطاقة يحددان الخواص الالكترونية للمادة هما: لاحظ الشكل (5).

- الحزمة الأولى تسمى حزمة التكافؤ Valence Band

تحتوي مستويات طاقة مسموح بها طاقتها واطئة، وتكون مملوءة كليا أو جزئيا بالإلكترونات ولا يمكن أن تكون خالية من إلالكترونات. وإلكتروناتها تسمى بإلكترونات التكافؤ، فلا تتمكن إلكترونات التكافؤ من الحركة بين الذرات المتجاورة بسبب قربها من النواة، فهي ترتبط بالنواة بقوى كبيرة نسبيا.

- الحزمة الثانية تسمى حزمة التوصيل Conduction Band

تحتوي مستويات طاقة مسموحاً بها ذات طاقة عالية، أعلى من مستويات الطاقة المسموح بها في حزمة التكافؤ، وإلكتروناتها تسمى بإلكترونات التوصيل، تتمكن إلكترونات التوصيل من الانتقال بسهولة لتشارك في عملية التوصيل الكهربائي.



شكل (5) يبين حزم الطاقة

- ثغرة الطاقة المحظورة (Forbidden Energy Gap)

لاتحتوي ثغرة الطاقة المحظورة مستويات طاقة مسموحاً بها (ولاتسمح للإلكترونات أن تشغلها).

وكل إلكترون لكي ينتقل من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل عبر ثغرة الطاقة المحظورة يتطلب أن يكتسب طاقة كافية من مصدر خارجي (بشكل طاقة حرارية أو طاقة ضوئية أو بتاثير مجال كهربائي)، مقدارها لا يقل عن مقدار ثغرة الطاقة المحظورة.

لعلك تسأل بماذا تتصف حزم الطاقة في المواد العازلة والموصلة وشبه الموصلة؟

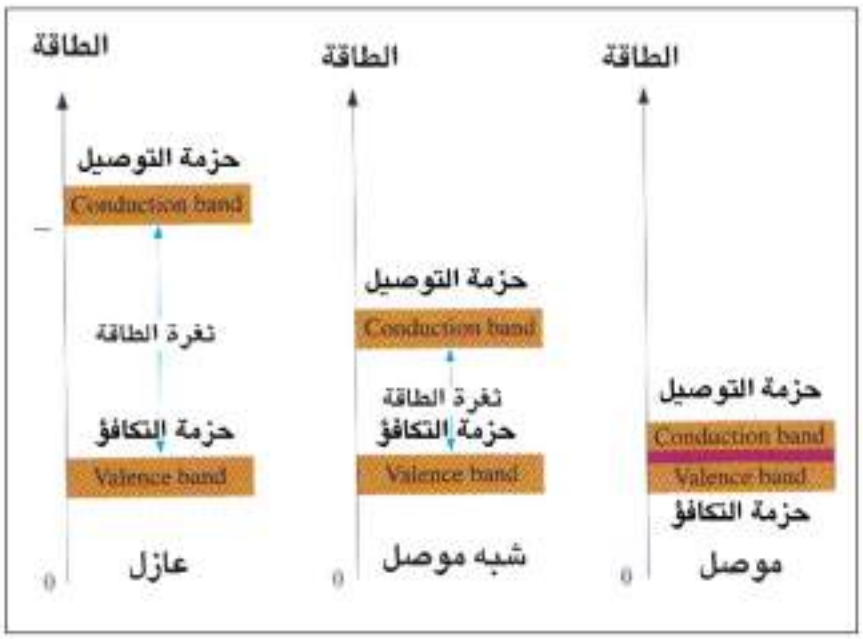
للاجابة عن هذا السؤال لاحظ الشكل (6) الذي يوضح مخططا أنموذجياً لحزم الطاقة في المواد العازلة والموصلة وشبه الموصلة ويتضح من الشكل (6) ما يأتي.

a- حزم الطاقة في المواد الموصلة (المعادن مثلا):

1. تتداخل حزمة التكافؤ مع حزمة التوصيل.
2. تنعدم ثغرة الطاقة المحظورة بين حزمتي التكافؤ والتوصيل.

ونتيجة لذلك تكون إلكترونات التكافؤ طليقة في حركتها خلال المادة الموصلة ولهذا السبب تمتلك المعادن قابلية توصيل كهربائية عالية.

3- تقل قابلية التوصيل الكهربائي في المعادن بارتفاع درجة حرارتها نتيجة لإزدياد مقاومتها الكهربائية (وذلك لإزدياد المعدل الزمني للطاقة الاهتزازية للذرات او الجزيئات).



شكل (6)

b- حزم الطاقة في المواد العازلة: لاحظ الشكل (6)

1. حزمة التكافؤ مملوءة بالكترونات التكافؤ.
2. حزمة التوصيل تكون خالية من الالكترونات.
3. ثغرة الطاقة المحظورة تكون واسعة نسبيا

يتوضح من ذلك أن المادة العازلة لاتمتلك قابلية توصيل كهربائية، وسبب ذلك كون ثغرة الطاقة المحظورة في الماد العازلة واسعة نسبيا (مقدارها حوالي 5eV) أو أكثر من ذلك، لذا فان الكترونات حزمة التكافؤ لاتتمكن عبور ثغرة الطاقة المحظورة والانتقال الى حزمة التوصيل عندما تكون الطاقة المجهزة أقل من ثغرة الطاقة المحظورة، وبالنتيجة تبقى حزمة التكافؤ مملوءة بالكترونات التكافؤ، في حين حزمة التوصيل خالية من الالكترونات.

ومن الجدير بالذكر أن تأثير تسليط مجال كهربائي كبير المقدار على المادة العازلة أو تعرّضها لتأثير حراري كبير قد يؤدي ذلك إلى انهيار العازل فينساب تيار قليل جداً خلال العازل.

c- حزم الطاقة في أشباه الموصلات: لاحظ الشكل (6)

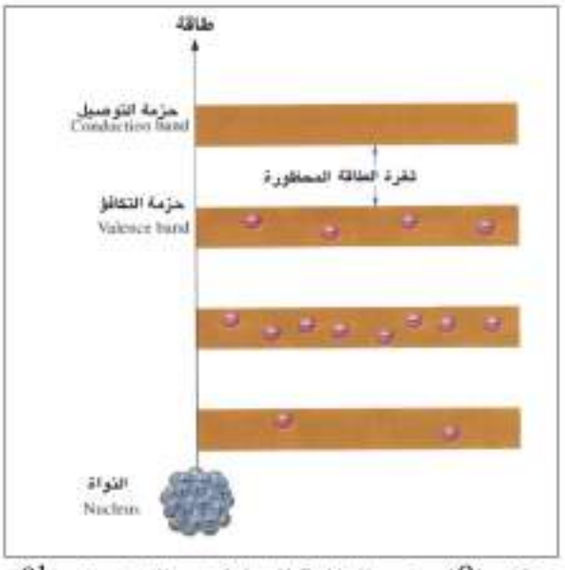
عند درجات حرارية منخفضة جدا (عند درجة الصفر كلفن 0K) وفي انعدام الضوء، تسلك مادة شبه الموصل النقية سلوك المادة العازلة، لذا (عند هذه الظروف) فان:

1. حزمة التكافؤ تكون مملوءة بالكترونات التكافؤ.
2. حزمة التوصيل خالية من الالكترونات.
3. ثغرة الطاقة المحظورة ضيقة نسبة للمواد العازلة .

5-7 أشباه الموصلات النقية Intrinsic Semiconductors

شكل (7)

يُعَّد الجرمانيوم (Ge) والسيلكون (Si) من أهم أشباه الموصلات الأكثر استعمالاً في التطبيقات الالكترونية. اذ تحتوي كل ذرة منهما على أربعة الكترونات تكافؤ، لذا فإن كل ذرة سليكون (Si) تتحد بوساطة الكترونات التكافؤ الاربعة مع أربع ذرات مجاورة لها من السليكون، لاحظ الشكل (7) وبهذا تنشأ ثمانية الكترونات تكافؤ، يكوّن كل زوج منها آصرة تساهمية تربط كل ذرتين متجاورتين في بلورة السليكون وتجعل البلورة في حالة استقرار كيميائي.

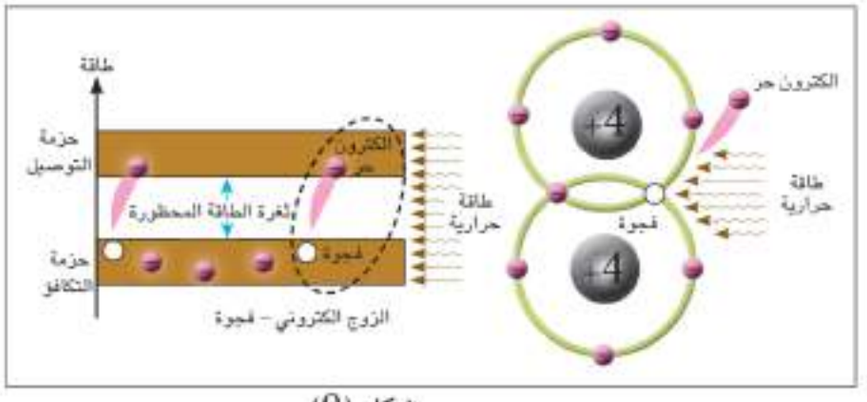


شكل (8) حزم الطاقة للسليكون النقي عند 0k

الشكل (8) يبين حزم الطاقة لذرات السيلكون النقي عند درجة حرارة الصفر كلفن (0K)

كيف بامكاننا جعل شبه الموصل النقي (السليكون مثلا) يمتلك قابلية توصيل كهربائي بوساطة التأثير الحراري؟

للإجابة عن ذلك نجد أنه عند ارتفاع درجة حرارة شبه الموصل النقي الى درجة حرارة الغرفة (300K)، تكتسب الكترونات التكافؤ طاقة كافية لكسر بعض الأواصر التساهمية (مصدرها طاقة حرارية) تمكنها من الانتقال من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل عبر ثغرة الطاقة المحظورة، وعندئذ تكون هذه ألكترونات حرة في حركتها خلال حزمة التوصيل. لاحظ الشكل (9).



شكل (9)

بانتقال هذه الالكترونات يحصل شيء مهم، إذ يترك كل الكترون حيزا فارغا في حزمة التكافؤ في الموقع الذي انتقل منه يسمى هذا الموقع الخالي من الالكترونات بالفجوة (hole) التي تعمل عمل الشحنة الموجبة، وعند هذه الظروف تتولد الكترونات حرة في حزمة التوصيل واعداد مساوية لها من الفجوات في حزمة التكافؤ وبهذه العملية يتولد ما يسمى بالزوج (الكترون- فجوة) electron- hole pair.

تستمر عملية توليد الأزواج (الكترون-فجوة) مع استمرار التأثير الحراري، فيزداد بذلك المعدل الزمني لتوليد الازواج (الكترون- فجوة) بارتفاع درجة حرارة مادة شبه الموصل النقية. إذ يزداد عدد الالكترونات الحرة المنتقلة من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل ويزداد نتيجة لذلك عدد الفجوات الموجبة، ماذا يعني ذلك؟

يعني حصول نقصان في المقاومة النوعية لمادة شبه الموصل بارتفاع درجة حرارته.

يعتمد المعدل الزمني لتوليد الأزواج (الكترون– فجوة) في شبه الموصل النقي على:
(1) درجة حرارة شبه الموصل وعلى (2) نوع مادة شبه الموصل.

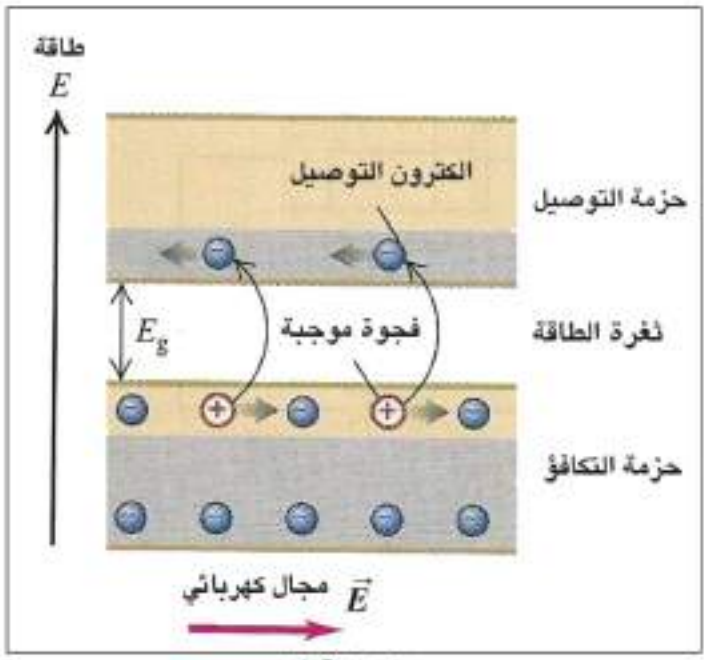
يقل مقدار ثغرة الطاقة المحظورة في السليكون النقي بارتفاع درجة حرارته فوق الصفر كلفن حتى درجة حرارة الغرفة (300K) فيكون مقدارها عند تلك الدرجة (1.1eV للسيلكون النقي) و(O.72eV للجرمانيوم النقي).

من الجدير بالذكر أنه في شبه الموصل النقي وعند درجة حرارة الغرفة (300K): يكون تركيز الفجوات الموجبة المتولدة في حزمة التكافؤ مساوياً لتركيز الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل.

تيار الالكترونات والفجوات:

الشكل (10) يوضح تأثير تسليط مجال كهربائي مناسب بين جانبي بلورة شبه موصل نقي مثل السليكون وعند درجة حرارة الغرفة، (300K)، بعد ملاحظتك الشكل (10) أجب عن الاسئلة الآتية:

- هل ينساب تيار كهربائي خلال المادة شبه الموصلةالنقية (Si)؟
- في حالة إجابتك بنعم، ما نوع هذا التيار؟

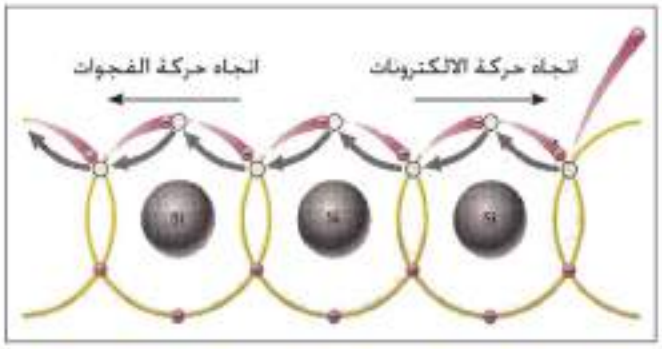


شكل (10)

عند تسليط مجال كهربائي بين جانبي بلورة السليكون النقية عند درجة حرارة الغرفة تنجذب الالكترونات الحرة بسهولة نحو الطرف الموجب. ونتيجة حركة الالكترونات الحرة هذه خلال مادة شبه الموصل النقية ينشأ تيار يسمى تيار الالكترونات.

ويتولد نوعا اخر من التيار في حزمة التكافؤ، يسمى تيار الفجوات، ويكون اتجاه حركة الفجوات الموجبة داخل البلورة باتجاه المجال الكهربائي المسلط، في حين تتحرك

الالكترونات باتجاه معاكس لاتجاه المجال الكهربائي المسلط، وهذا يعني أن الفجوات تتحرك باتجاه معاكس لاتجاه حركة الالكترونات، لاحظ الشكل (11).



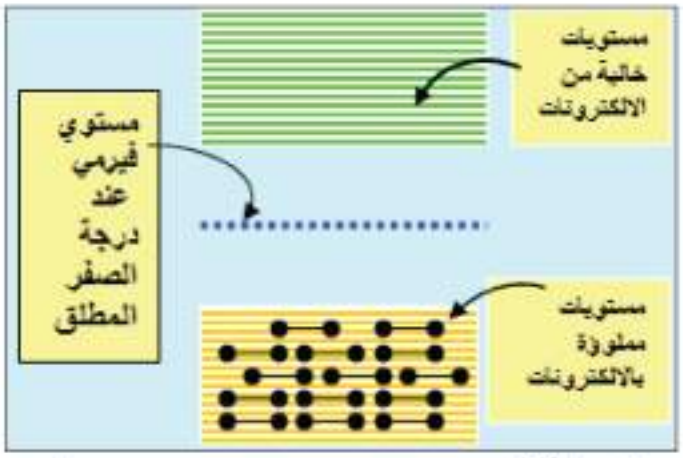
شكل (11)

والتيار الكلي المنساب خلال شبه الموصل النقي هو التيار الناتج من مجموع تيار الالكترونات وتيار الفجوات. وتسمى كل من الالكترونات والفجوات حوامل الشحنة Charge Carriers.

لعلك تتسائل، ما الذي يحدد إشغال الالكترونات مستوي معين من مستويات الطاقة المسموح بها للالكترونات؟

ان اشغال الالكترونات بمستوي طاقة مسموح بها يقارن نسبة الى مستوى طاقة معين يسمى مستوى فيرمي (Fermi level) اذ يعد أعلى مستوى طاقة مسموح به يمكن ان يشغله الالكترون عند حرارة الصفر المطلق (0K).

وفي الموصلات وعند درجة حرارة الصفر كلفن يقع مستوى فيرمي فوق المنطقة المملوءة بالالكترونات من حزمة التوصيل ومستوى الطاقة التي تشغله هذه الالكترونات يكون تحت مستوى فيرمي.



شكل (12) يوضح موقع مستوى فيرمي لشبه الموصل النقي

أما بالنسبة لاشباه الموصلات النقية يقع مستوى فيرمي في منتصف ثغرة الطاقة المحظورة بين حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ لاحظ الشكل (12).

عند تطعيم شبه الموصل النقي باضافة شوائب عندها ينزاح موقع مستوى فيرمي نحو الاسفل أو نحو الاعلى، وتتحدد تلك الازاحة على وفق نوع الشائبة المضافة. (سنتطرق لذلك لاحقاً).

6-7 أشباه الموصلات المُطَعّمة (المشوبة او غير النقية) Extrinsic Semiconductors

إذا كان التأثير الحراري في شبه الموصل النقي يعمل على زيادة قابليته في التوصيل الكهربائي، لماذا نلجأ الى عملية اخرى وذلك بتطعيمه بشوائب خماسية التكافؤ أو ثلاثية التكافؤ؟

للاجابة على هذا السؤال وذلك لعدم إمكانية السيطرة على قابلية التوصيل الكهربائي لمادة شبه الموصل النقية بطريقة التأثير الحراري، لذا يتطلب عمليا ايجاد طريقة أفضل للتحكم في توصيليته الكهربائية من خلال إضافة ذرات عناصر خماسية التكافؤ او ثلاثية التكافؤ تسمى الشوائب (impurities)، بعناية وبمعدل مسيطر عليه (بنسبة واحد لكل 10^8 تقريباً) وبدرجة حرارة الغرفة وبنسب قليلة ومحددة في بلورة شبه موصل نقية، تسمى هذه العملية بالتطعيم (Doping)

وعليه فإنه بعملية التطعيم يكون بالإمكان السيطرة على قابلية التوصيل الكهربائي في شبه الموصل وزيادتها بنسبة كبيرة نتيجة لإزدياد حاملات الشحنة (الالكترونات والفجوات) بالبلورة مقارنة مع ما يحصل في التأثير الحراري.

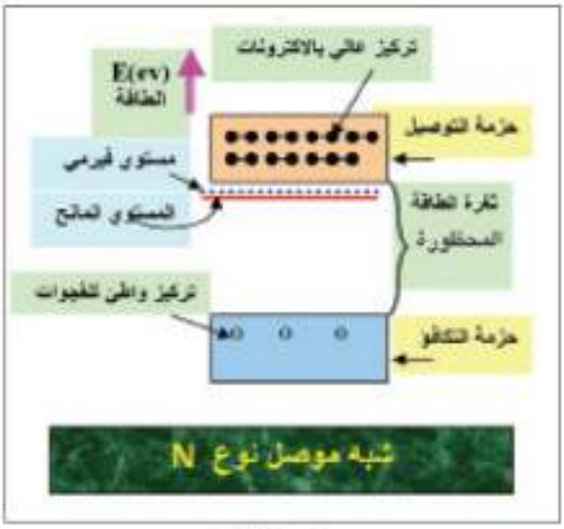
شبه الموصل نوع N (N- type):

شكل (13) بلورة شبه موصل نوع (N)

للحصول على بلورة شبه موصل نوع N يتطلب تطعيم بلورة شبه موصل نقية (سليكون أو جرمانيوم) بشوائب ذراتها خماسية التكافؤ (انتيمون Sb مثلا) بعناية وبمعدل مسيطر عليه وبدرجة حرارة الغرفة، ونتيجة لذلك فان كل ذرة شائبة تزيح ذرة سليكون من التركيب البلوري وترتبط مع أربع ذرات سليكون مجاورة لها.

وتتم عملية الارتباط هذه بوساطة أربعة من الكترونات التكافؤ الخمسة للذرة الشائبة أما الكترون التكافؤ الخامس للذرة خماسية التكافؤ فيُترك حرا في الهيكل البلوري. لاحظ الشكل (13).

وتُسهم الالكترونات الحرة في عملية التوصيل الكهربائي لمادة شبه الموصل المُطعَّمة ويدعى هذا النوع من الشائبة خماسية التكافؤ، بالذرة المانحة Donor atom. الـتي تصير أيوناً موجباً يرتبط مع الهيكل البلوري ارتباطاً وثيقاً ولا يُعد عند ئذ من حاملات الشحنة لأنه لايشارك في عملية التوصيل الكهربائي لشبه الموصل المطعم.



شكل (14)

إن الذرات المانحة هذه تتسبب في ازدياد تركيز الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل، وتقلل من تركيز الفجوات الموجبة في حزمة التكافؤ (المتولدة اصلا بالتاثير الحراري) لذا فإن الذرات المانحة تضيف مستوى طاقة جديد يسمى المستوى المانح (donor level) يقع ضمن ثغرة الطاقة المحظورة وتحت حزمة التوصيل مباشرة، لاحظ الشكل (14).

والمستوى المانح تشغله الالكترونات التي حررتها الذرات المانحة ويمنح الكتروناته إلى حزمة التوصيل.

ونتيجة لذلك يرتفع مستوى فيرمي ويقترب من حزمة التوصيل.

- من الجدير بالذكر أن الالكترونات التي تحررها الشوائب خماسية التكافؤ لاتترك فجوات في حزمة التكافؤ عند انتقالها إلى حزمة التوصيل، (كما حصل ذلك بالتأثير الحراري)، ولهذا السبب يكون تركيز الالكترونات في حزمة التوصيل أكبر من تركيز الفجوات في حزمة التكافؤ لذا تسمى الالكترونات بحاملات الشحنة الرئيسة (أو الحاملات الأغلبية) Majority Carriers لأنها تولدت من عمليتي التطعيم والتأثير الحراري. أما الفجوات الموجبة فتسمى بحاملات الشحنة الثانوية (او الحاملات الاقلية) Minority Carriers لأنها تولدت فقط نتيجة التأثير الحراري.

وبالنتيجة نحصل على بلورة شبه موصل من النوع N .

ولكن لماذا تسمى بلورة شبه الموصل بعد تطعيمها بشوائب خماسية التكافؤ بشبه الموصل نوع N وأحياناً بالبلورة السالبة؟ وهل أن شحنة هذه البلورة سالبة ؟

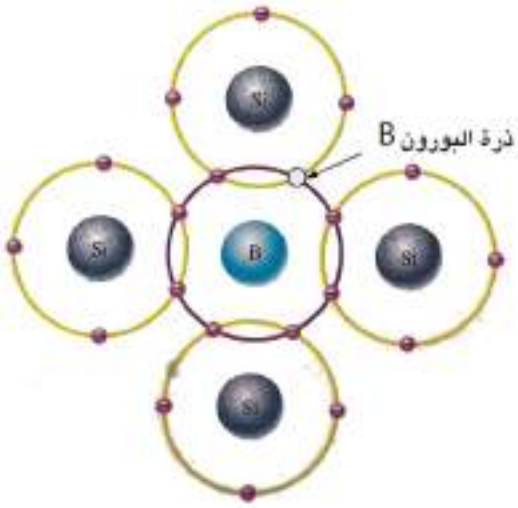
أن سبب تسميتها بالنوع N لأن الحاملات الاغلبية للشحنة هي الالكترونات والحاملات الاقلية للشحنة هي الفجوات الموجبة.

ومن المهم أن تعرف أن صافي الشحنة الكلية للبلورة نوع N يساوي صفرا، أي متعادلة كهربائيا. وذلك لأنها تمتلك عددا من الشحنات السالبة مساويا لعدد الشحنات الموجبة.

شبه الموصل نوع P (P- type):

للحصول على بلورة شبه موصل نوع P يتطلب تطعيم بلورة شبه موصل نقية (سليكون او جرمانيوم) بذرات شوائب ثلاثية التكافؤ (البورون B مثلا) بعناية وبمعدل مسيطر عليه، و بدرجة حرارة الغرفة، ونتيجة لذلك فإن كل ذرة شائبة تزيح ذرة سليكون من التركيب البلوري وترتبط مع ثلاث ذرات سليكون مجاورة لها.

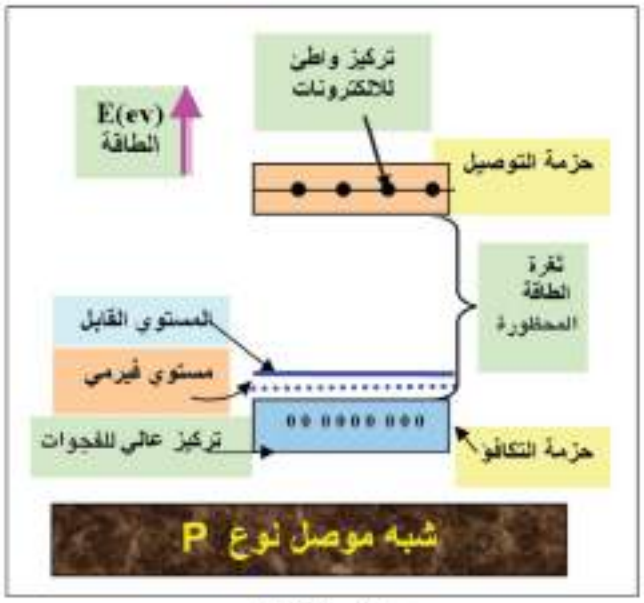
ولكن الشائبة ثلاثية التكافؤ تترك آصرة تساهمية تفتقر الى الكترون واحد، لاحظ الشكل (15) ونتيجة لذلك تتولد فجوة في بلورة السليكون المطعمة بشوائب ثلاثية التكافؤ، وكل ذرة شائبة ثلاثية التكافؤ تقبل الكترونا من الكترونات التكافؤ لكي ترتبط باربعة اواصر تساهمية مع أربع ذرات سليكون، ولهذا السبب فإن الشائبة ثلاثية التكافؤ، تسمى بالذرة القابلة Acceptor atom ومن أمثلة الشوائب ثلاثية التكافؤ (البورون ، الالمنيوم،الانديوم).



شكل (15) بلورة شبه موصل نوع (P)

وفي عملية تطعيم السليكون بشوائب ثلاثية التكافؤ(مثل البورون)، فالشائبة تصبح أيونا سالبا، لان ذرة البورون بعد قبولها الكتروناً من ذرة السليكون في الهيكل البلوري، تصير أيونا سالبا. والايون السالب لايُعد من نواقل الشحنة لأنه يرتبط مع الهيكل البلوري ارتباطا قويا (باواصر تساهمية) ولا يشارك في عملية التوصيل الكهربائي لشبه الموصل المطعم.

إن الذرات القابلة هذه تضيف مستوى طاقة جديد يسمى المستوى القابل Acceptor level يقع ضمن ثغرة الطاقة المحظورة وفوق حزمة التكافؤ مباشرة، ونتيجة لذلك ينخفض مستوى فيرمي، ويقترب من حزمة التكافؤ. لاحظ الشكل (16).



شكل (16)

ومن الجدير بالذكر أن الذرة الشائبة ثلاثية التكافؤ تتسبب في نشوء فجوة في حزمة التكافؤ عند قبولها الكترونا من الكترونات التكافؤ، (ولا يحصل انتقال الكترونات إضافية إلى حزمة التوصيل كما حصل في التاثير الحراري) ونتيجة لذلك يكون تركيز الفجوات في حزمة التكافؤ أكبر من تركيز الالكترونات في حزمة التوصيل لذا تسمى الفجوات في حزمة التكافؤ بالنواقل الرئيسة (أو الحاملات الاغلبية) للشحنة Majority Carriers والالكترونات في حزمة التوصيل تسمى بالحاملات الثانوية للشحنة (أو الحاملات الأقلية) Minority Carriers وبالنتيجة نحصل على بلورة شبه موصل من النوع P.

ولكن لماذا تسمى بلورة شبه الموصل بعد تطعيمها بشوائب ثلاثية التكافؤ (مثل البورون) بشبه الموصل نوع P أحياناً بالبلورة من النوع الموجب؟ وهل ان شحنة هذه البلورة موجبة؟

أن سبب تسميتها بالنوع الموجب او النوع P لأن الحاملات الأغلبية للشحنة هي الفجوات الموجبة في حزمة التكافؤ والحاملات الاقلية للشحنة هي الالكترونات في حزمة التوصيل. أن صافي الشحنة الكلية للبلورة نوع P تساوي صفرا، أي متعادلة كهربائيا، وذلك لأنها تمتلك عددا من الشحنات السالبة (الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل والأيونات السالبة للشوائب ثلاثية التكافؤ) مساويا لعدد الشحنات الموجبة (الفجوات في حزمة التكافؤ).

تذكر

مقدار ثغرة الطاقة المحظورة لشبه الموصل النقي:

– عند درجة الصفر المطلق

(1.2eV) للسليكون و(0.78eV) للجرمانيوم.

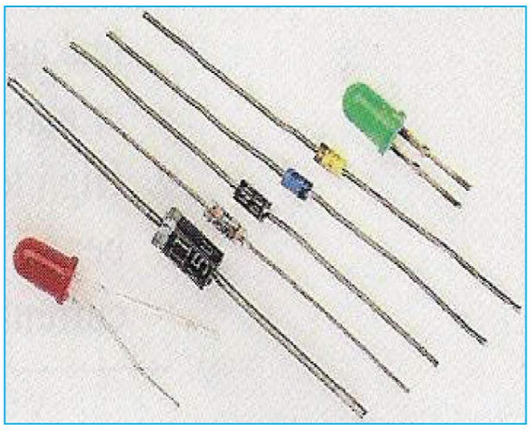
– عند درجة حرارة المختبر (300K)

(1.1eV) للسليكون و(0.72eV) للجرمانيوم.

7-7 الثنائي PN (PN diode)

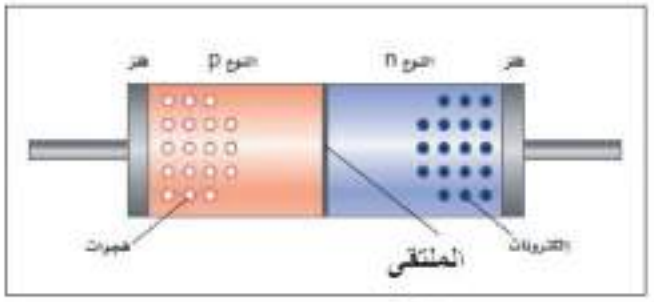
نحتاج في بعض الدوائر الكهربائية والالكترونية الى وسيلة تتحكم باتجاه التيار أو لتغير أو تحسين أشكال الاشارات الخارجة ولاجل ذلك يستعمل الثنائي البلوري pn، الشكل (17) يبين أشكالا مختلفة من الثنائيات البلورية المستعملة في الاجهزة الالكترونية.

ويُحصل على الثنائي البلوري pn ، بان تأخذ بلورة شبه موصل نقية (سليكون أو جرمانيوم)، تطعم بنوعين من الشوائب أحدهما ثلاثية التكافؤ (البورون مثلاً) فنحصل على منطقة شبه موصل نوع p والشوائب الأخرى خماسية التكافؤ (الانتيمون) فنحصل



شكل (17)

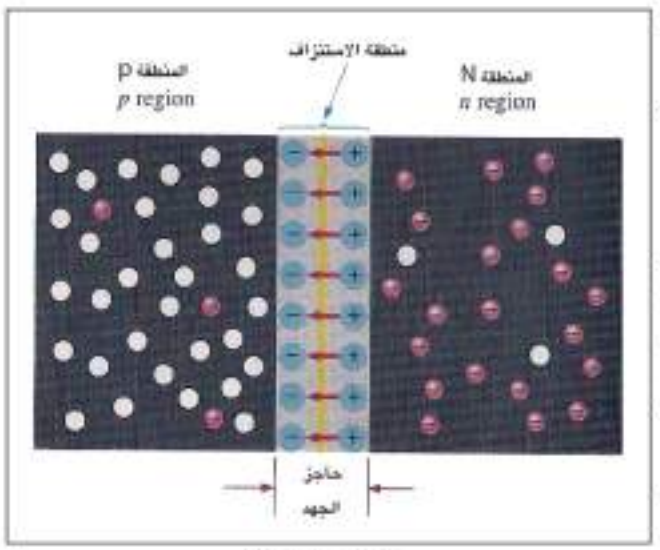
على منطقة شبه موصلة من النوع N وتطلى منطقة الاتصال بمادة فلزية بحيث يمكن وصل الأسلاك الموصلة بها عند ربط الثنائي البلوري (pn) بالدائرة الخارجية، لاحظ الشكل (18)، ويطلق على السطح الفاصل بين المنطقتين الملتقى junction .



شكل (18) ثنائي البلوري pn

وقد عرفنا أن حوامل الشحنة الأغلبية في المادة نوع N هي الالكترونات وحوامل الشحنة الأقلية في المادة نوع N هي الفجوات الموجبة.

ومن ملاحظتنا للشكل (19) نجد أن الالكترونات الحرة في المنطقة N القريبة من الملتقى PN تنتشر (تنضح) إلى المنطقة PN مولدة ايونات موجبة في المنطقة N وانتقال فجوات من المنطقة p الى المنطقة N عبر الملتقى مولدة ايونات سالبة في المنطقة P، وعندئذ تلتحم الالكترونات مع الفجوات القريبة من الملتقى.



شكل (19)

ونتيجة لهذه العملية تنشأ منطقة رقيقة على جانبي الملتقى تحتوي أيونات موجبة في المنطقة N وايونات سالبة في المنطقة p وتكون خالية من حاملات الشحنة تسمى منطقة الاستنزاف Depletion region .

يتوقف انتشار الالكترونات عبر الملتقى PN عندما تحصل حالة التوازن.

ما تفسير حصول ذلك؟

أن استمرار انتشار الالكترونات عبر الملتقى PN يولد أيونات موجبة أكثر وأيونات سالبة أكثر على جانبي الملتقى PN في منطقة الاستنزاف فيتولد نتيجة لذلك مجال كهربائي (يمثل باسهم حمراء اللون) في الشكل (19)، يعمل فرق الجهد الكهربائي الناتج عن هذا المجال على منع عبور الكترونات إضافية عبر الملتقى PN فتتوقف عندئذ عملية انتشار الالكترونات، يسمى بحاجز الجهد (Potential barrier).

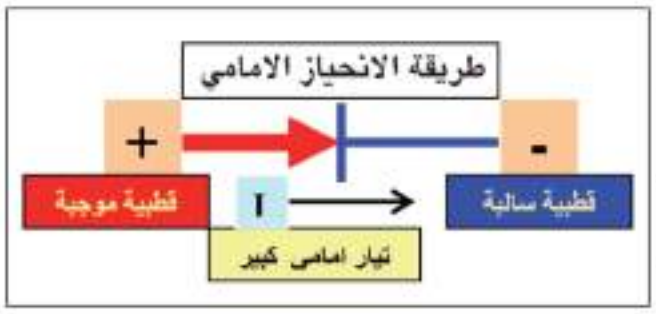
يعتمد مقدار حاجز الجهد في الثنائي PN على نوع مادة شبه الموصل المستعملة ونسبة الشوائب المطعمة بها ودرجة حرارة المادة.

ومقدار حاجز الجهد في الثنائي PN عند درجة حرارة الغرفة (300K) يساوي (0.7V) للمصنوع من السليكون و (0.3V) المصنوع من الجرمانيوم.

8-7 فولطية الانحياز للثنائي PN

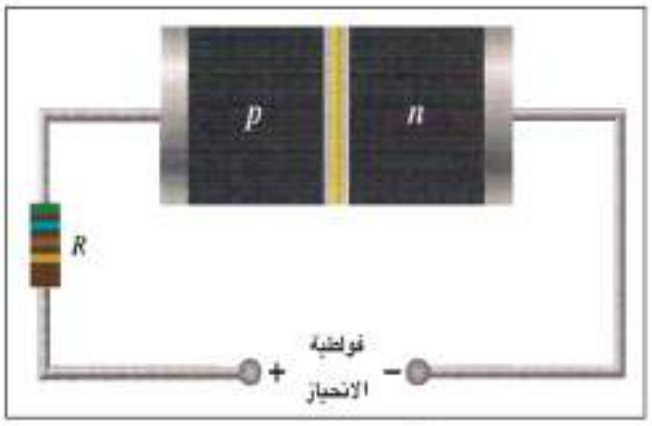
لقد عرفنا سابقا أن انتشار الالكترونات عبر الملتقى PN يتوقف عند حصول حالة التوازن، لذا يتطلب تسليط فرق جهد كهربائي مستمر يسمى فولطية الانحياز (Biasing potential) لتوافر ظروف عملية مناسبة للجهاز الالكتروني المستعمل. توجد طريقتان لانحياز الملتقى PN، وهما طريقة الانحياز الامامي وطريقة الانحياز العكسي.

a- طريقة الانحياز الامامي Forward Bias method:



شكل (20)

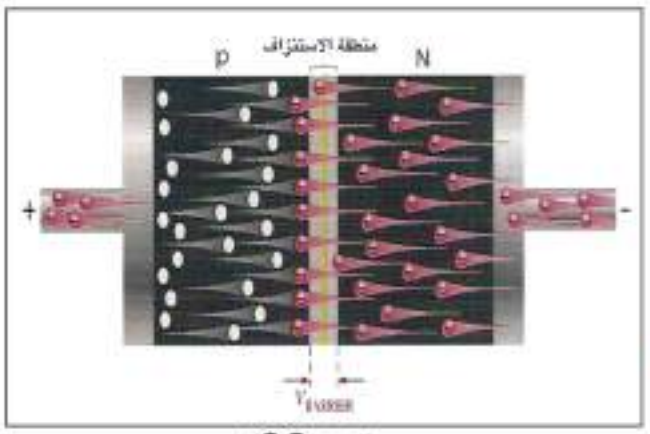
يربط طرفا الثنائي PN بين قطبي بطارية (بوساطة اسلاك توصيل ومقاومة R) لتحديد مقدار التيار المنساب خلال الثنائي ولتجنب تلف الثنائي، لاحظ الشكلين (20) و (21) في هذه الطريقة يربط القطب الموجب للبطارية مع المنطقة P للثنائي والقطب السالب للبطارية يربط مع المنطقة N للثنائي، ويجب أن يكون فرق الجهد المسلط على طرفي الثنائي أكبر من فرق جهد الحاجز للملتقى PN .



شكل (21) الانحياز الامامي

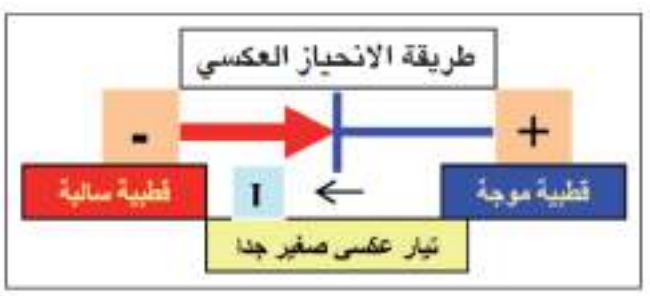
ماذا يحصل للثنائي PN عندما يكون محيّزاً أمامياً ؟

تتنافر الالكترونات الحرة في المنطقة N (وهي الحاملات الاغلبية للشحنة في المنطقة N) مع القطب السالب للبطارية مندفعة نحو الملتقى pn، مكتسبة طاقة من البطارية تمكنها من التغلب على حاجز الجهد الكهربائي وتعبر الملتقى pn الى المنطقة P، وفي الوقت نفسه تتنافر الفجوات في المنطقة P (وهي الحاملات الاغلبية للشحنة في المنطقة p) مع القطب الموجب للبطارية نحو الملتقى، pn مكتسبة طاقة من البطارية تمكنها من التغلب على حاجز الجهد وتعبر الملتقى pn الى المنطقة N، وبذلك تضيق منطقة الاستنزاف ويقل حاجز الجهد للملتقى pn . لاحظ الشكل (22). لأن اتجاه المجال الكهربائي المسلط على الثنائي يكون معاكسا لاتجاه المجال الكهربائي لحاجز الجهد وأكبر منه، وتقل بذلك مقاومة الملتقى، ولهذه الأسباب ينساب تيار كبير خلال الملتقى، pn يسمى بالتيار الأمامي.



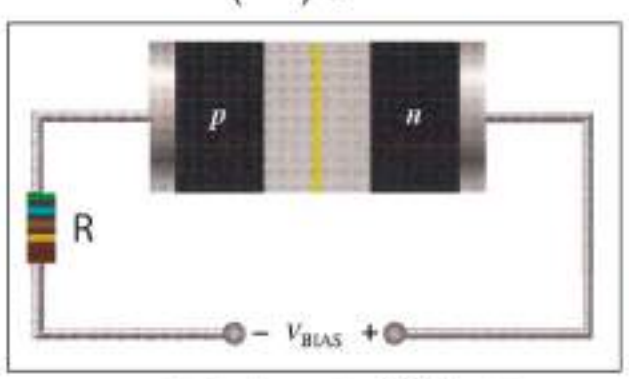
شكل (22)

b- طريقة الانحياز العكسي Reverse Bias method:



شكل (23)

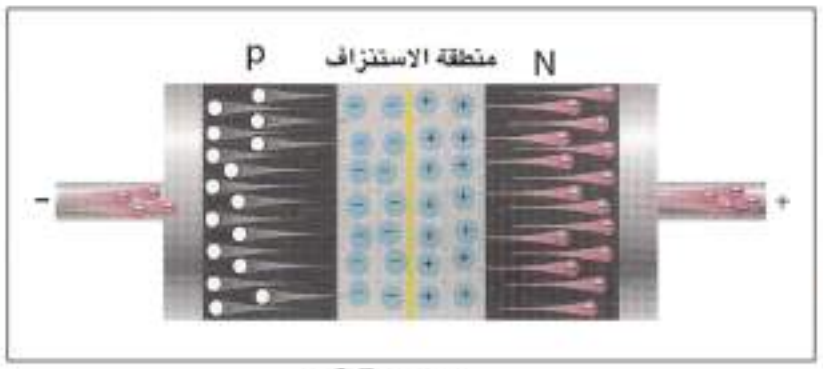
يربط طرفا الثنائي pn بين قطبي بطارية (بوساطة اسلاك توصيل ومقاومة R)، لاحظ الشكلين (23) و (24) في هذه الطريقة يربط القطب السالب للبطارية مع المنطقة P للثنائي والقطب الموجب للبطارية يربط مع المنطقة N للثنائي، ماذا يحصل للثنائي pn عندما يكون محيّزاً عكسيا ؟



شكل (24) الانحياز العكسي

تنجذب الالكترونات الحرة في المنطقة N نحو القطب الموجب للبطارية مبتعدة عن الملتقى pn، وفي الوقت نفسه تنجذب الفجوات

في المنطقة P نحو القطب السالب للبطارية مبتعدة عن الملتقى، pn لاحظ الشكل (25).

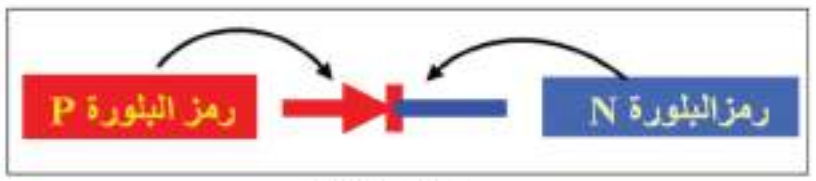


شكل (25)

وبذلك تتسع منطقة الاستنزاف ويزداد حاجز الجهد للملتقى pn لأن اتجاه المجال الكهربائي المسلط على الثنائي يكون باتجاه المجال الكهربائي لحاجز الجهد للملتقى pn، فتزداد بذلك مقاومة الثنائي.

ولهذه الأسباب ينساب تيار صغير جدا (يمكن ان يهمل) خلال الملتقى للثنائي، pn يسمى بالتيار العكسي.

يرمز للثنائي pn بالرمز الموضح في الشكل (26)

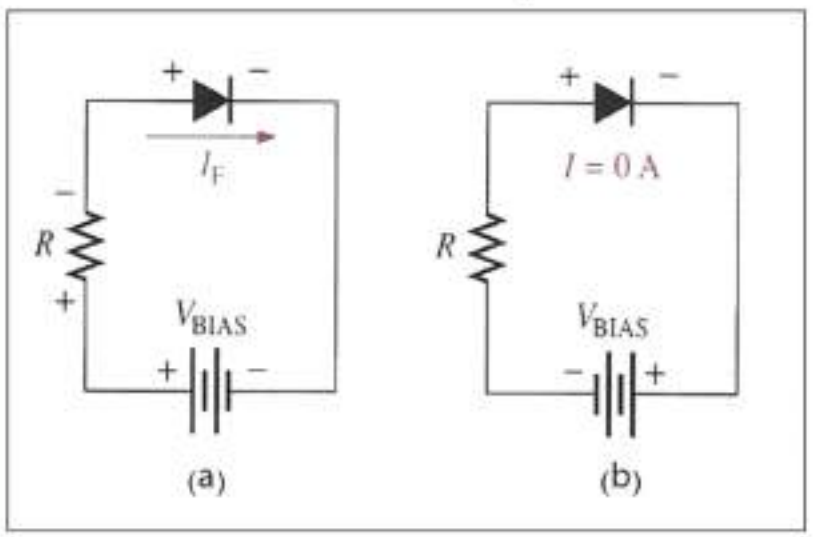


شكل (26)

الشكل (27) يوضح مخطط للدائرة الكهربائية المستعمل فيها رمز الثنائي pn بطريقتين.

الشكل (27-a) يوضح رسم مخطط لدائرة كهربائية فيها ثنائي pn مربوط بطريقة انحياز أمامي (لاحظ انسياب تيار في الدائرة).

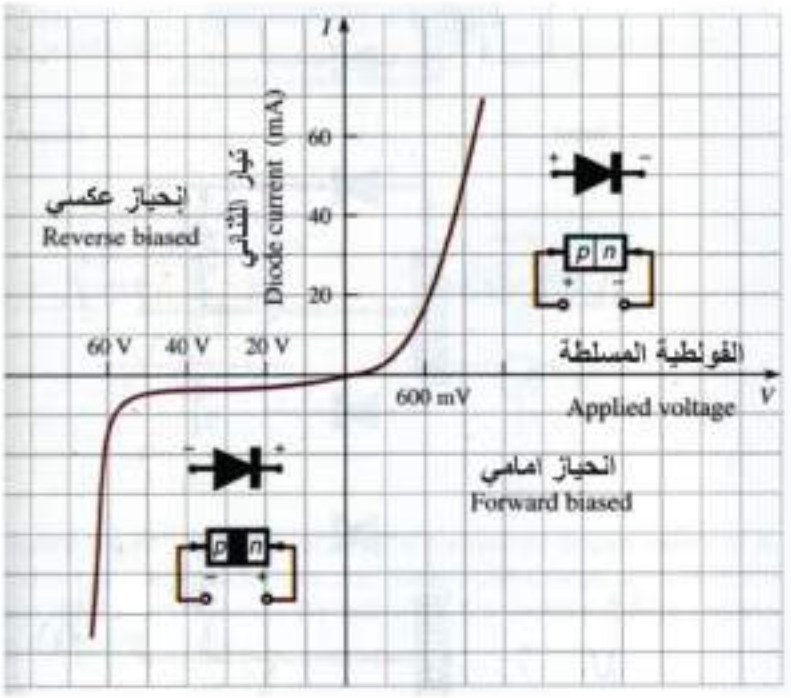
الشكل (27-b) يوضح رسم مخطط لدائرة كهربائية فيها ثنائي pn مربوط بطريقة انحياز عكسي (لاحظ عدم انسياب تيار في الدائرة).



شكل (27)

ويمكن تمثيل تغير مقدار التيار المنساب في الثنائي البلوري مع تغير مقدار الفولطية المسلطة على طرفي الثنائي في حالتي الانحياز الأمامي والانحياز العكسي.

فعند زيادة مقدار فولطية الانحياز الأمامي يزداد مقدار التيار الامامي، لاحظ الشكل (28)، وإذا عكسنا قطبية الفولطية المسلطة (فولطية الانحياز العكسي) يكون التيار المنساب عبر الثنائي البلوري مقارباً للصفر.



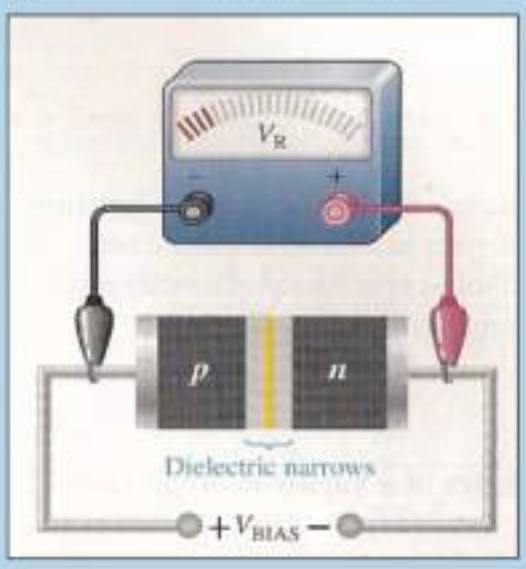
شكل (28) للاطلاع

هل

تعلم (للاطلاع)

أن منطقة الاستنزاف (بين المنطقة p والمنطقة N) في الثنائي البلوري pn تعد عازلا كهربائيا بين لوحي متسعة.

- فعند ربط الثنائي البلوري pn بطريقة الانحياز الأمامي، تضيق منطقة الاستنزاف، ويكون سمك العازل الكهربائي رقيقا وهذا يؤدي إلى زيادة مقدار سعة المتسعة بين المنطقتين نتيجة لنقصان البعد بين الصفيحتين على وفق العلاقة:



$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

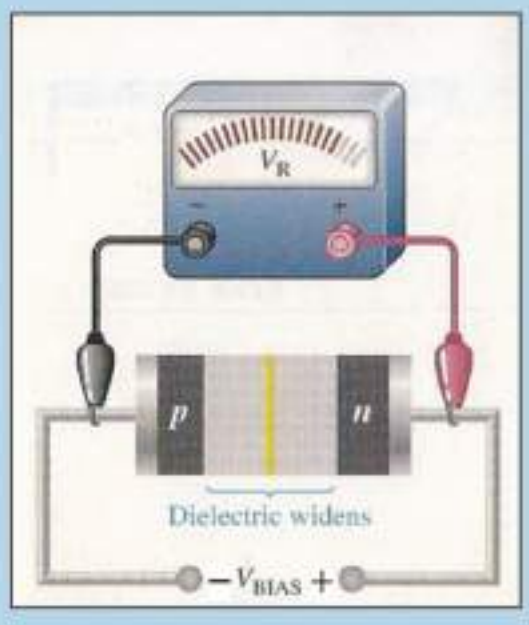
فتقل رادة السعة ويقل بذلك حاجز الجهد على جانبي الملتقى.

نلاحظ ذلك بربط فولطميتر بين طرفي الثنائي فيشير الى فرق جهد صغير عبر طرفي الثنائي المحيّز أمامياً. لاحظ الشكل المجاور.

- وعند ربط الثنائي البلوري pn بطريقة الانحياز العكسي، تتسع منطقة الاستنزاف، ويكون العازل الكهربائي سميكا وهذا يؤدي الى نقصان مقدار سعة المتسعة بين المنطقتين.

فتزداد رادة السعة ويزداد بذلك حاجز الجهد على جانبي الملتقى.

نلاحظ ذلك بربط فولطميتر بين طرفي الثنائي فيشير الى فرق جهد كبير عبر طرفي الثنائي المحيّز عكسيا.لاحظ الشكل المجاور.



9-7 بعض انواع الثنائيات

سبق أن عرفنا أن مصدر الطاقة اللازمة لتوليد الازواج (الكترون-فجوة) في أشباه الموصلات هو طاقة حرارية، في أغلب الاحيان فإن تلك الطاقة هي التي تزودها حرارة الغرفة. ولكن هل بالامكان الإفادة من الطاقة الضوئية أو الأشعة الكهرومغناطيسية للاغراض نفسها؟ وهل يمكن استعمال الضوء للتحكم في قابلية التوصيل الكهربائي للمواد شبه الموصلة وللثنائي pn ؟

أن الطاقة الضوئية (طاقة الفوتون) الساقطة على الثنائي pn يمكن تحويلها الى طاقة كهربائية، والثنائيات المستعملة لهذه الاغراض تكون بنوعين، الاول الثنائي المتحسس للضوء والثاني ثنائي الخلية الضوئية أو الخلية الشمسية.

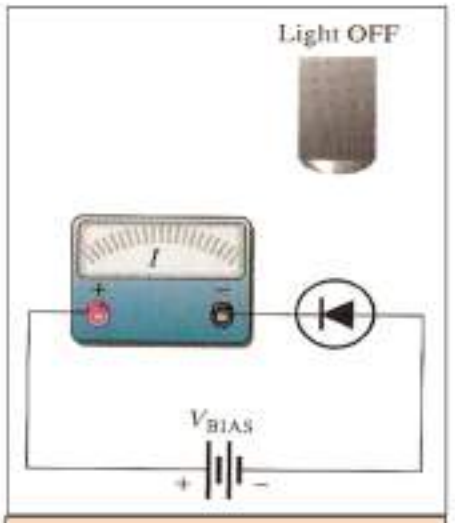
- **الثنائي المتحسس للضوء:**

يربط هذا الثنائي بطريقة الانحياز العكسي قبل تسليط الضوء عليه، لاحظ الشكل (29) لكي يكون التيار المنساب فيه ضعيفا جدا فيهمل (وهو تيار الالكترونات والفجوات المتولد بالتاثير الحراري) وهذا يعني أن التيار في دائرة هذا الثنائي يساوي صفرا في حالة عدم توافر تأثير ضوئي في الثنائي.

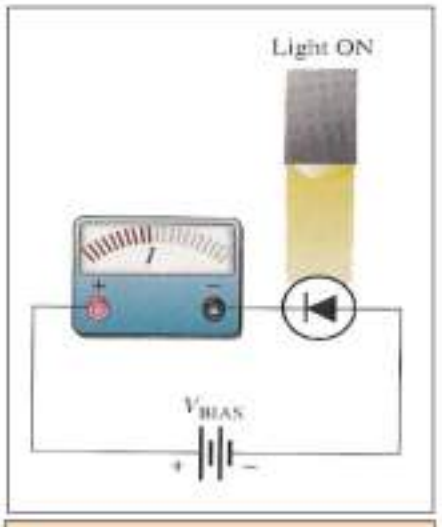
يعمل هذا الثنائي على تحويل الطاقة الضوئية الى طاقة كهربائية، فعند تعرض الثنائي pn للضوء لاحظ الشكل (30).

تتولد حاملات جديدة للشحنة وبكمية تعتمد على شدة الضوء الساقط عليه، وقد وجد عمليا إن مقدار التيار في دائرة الثنائي المتحسس للضوء يتناسب طرديا مع شدة الضوء الساقط عليه.

من استعمالات الثنائي المتحسس للضوء استعماله في كاشفات الضوء وكمقياس لشدة الضوء.



الشكل (29) الثنائي pn المتحسس للضوء قبل اسقاط الضوء عليه. لاينساب تيار في دائرته، لاحظ جهاز الاميتر (يكون التيار صفرا).



الشكل (30) الثنائي pn المتحسس للضوء عند اسقاط الضوء عليه. ينساب تيار في دائرته، لاحظ جهاز الاميتر (يشير الى انسياب تيار)

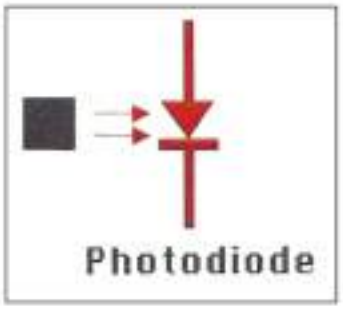
- **ثنائي الخلية الضوئية photovoltaic diode أو الخلية الشمسية solar cell:**

يعمل ثنائي الخلية الشمسية pn على تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية.

يرمز له كما في الشكل (31)

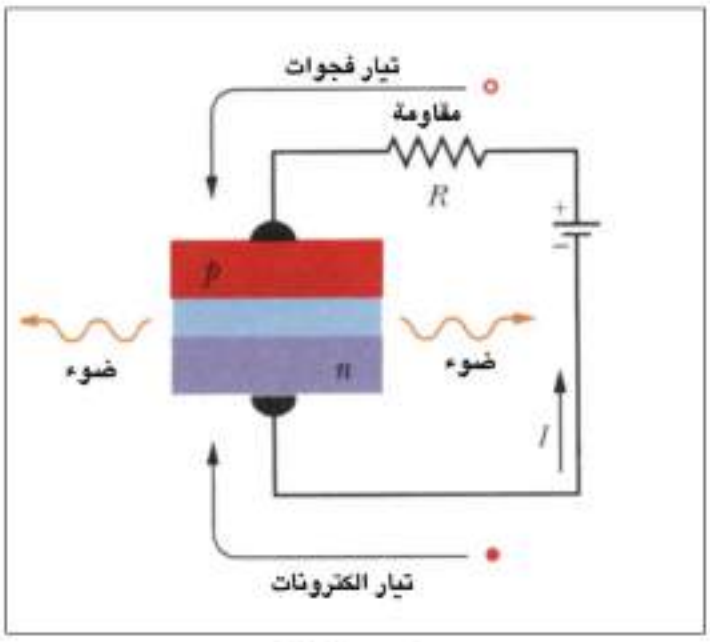
إذ يربط هذا الثنائي بطريقة الانحياز العكسي قبل تسليط الضوء على منطقة الملتقى pn فالفوتون الذي يمتلك طاقة تساوي أو تزيد على (1.1ev) يتمكن من توليد زوج من الالكترون فجوة في السليكون والفوتون الذي تمتلك طاقة تساوي أو تزيد على 0.72 ev يتمكن من توليد زوج من الالكترون. فجوة في الجرمانيوم فيعمل هذا الثنائي على توليد قوة دافعة كهربائية بين طرفيه عند سقوط الضوء عليه، ومقدارها في الثنائي المصنوع من السليكون (0.5V) والمصنوع من الجرمانيوم (0.1V).

كما يستعمل هذا الثنائي كثيرا في الاقمار الصناعية كمصدر طاقة، فيمكن ربط هذه الخلايا على التوالي مع بعضها لزيادة جهدها، وتربط على التوازي مع بعضها لزيادة قدرتها.



شكل (31) رمز الثنائي pn الخلية الشمسية.

• الثنائي الباعث للضوء Light Emitting Diode ويرمز له (LED):



شكل (32)

يعمل هذا الثنائي على تحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ضوئية، إذ يربط بطريقة الانحياز الأمامي، لاحظ الشكل (32) وعند تسليط فرق جهد كهربائي خارجي بين طرفيه ينساب تيار في دائرته نتيجة حصول عملية إعادة الالتحام التي تحصل بين الالكترونات والفجوات فتتحرر طاقة نتيجة سقوط الالكترونات في الفجوات وهذه الطاقة تظهر بشكل حرارة داخل التركيب البلوري، وإذا كانت مادة الثنائي من زرنيخيد الكاليوم (GaAs) تكون الطاقة المتحررة نتيجة سقوط الالكترونات في الفجوات بشكل طاقة ضوئية.

وتبعث هذه الثنائيات الضوء بألوان مختلفة (أحمر ، أصفر ،أخضر) على وفق المادة المصنوع كل منها.

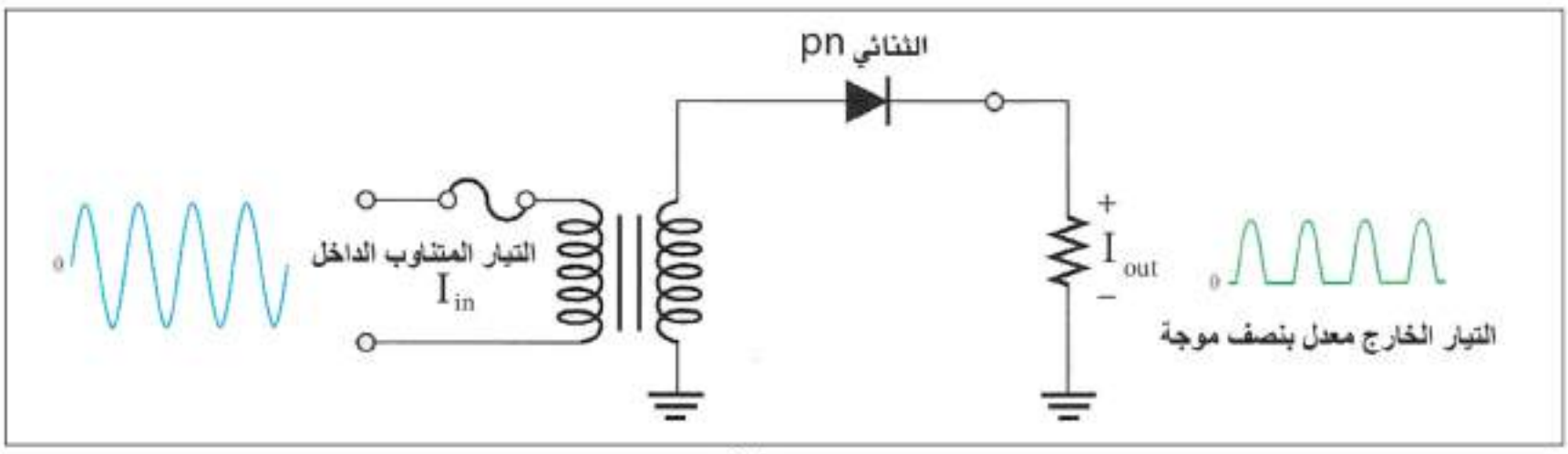
وهناك ثنائيات أخرى تبعث أشعة تحت الحمراء.

شكل (33)

تزداد شدة الضوء المنبعث من الثنائي الباعث للضوء بازدياد مقدار التيار الامامي للثنائي البلوري المنساب في دائرته. تستعمل الثنائيات الباعثة للضوء في الحاسبات والساعات الرقمية لإظهار الارقام وتعتمد فكرة الشاشات الرقمية على تركيب مجموعة من الثنائيات على شكل مكون من سبع اضلاع، إذ يمكن اظهار الرقم المضيء من (9 – 0) بتوزيع التيار الكهربائي على الثنائي المستعمل لغرض معين، لاحظ الشكل (33).

• الثنائي المعدل للتيار:

يعمل على تعديل التيار المتناوب الى تيار معدل باتجاه واحد، فعند ربط الثنائي بمصدر للفولطية المتناوبة، فإن أحد نصفي الموجة مثلاً (القطبية الموجبة) مثلاً تجعل انحيازه بالاتجاه الامامي فيسمح للتيار أن ينساب في الدائرة. لاحظ الشكل (34).



شكل (34)

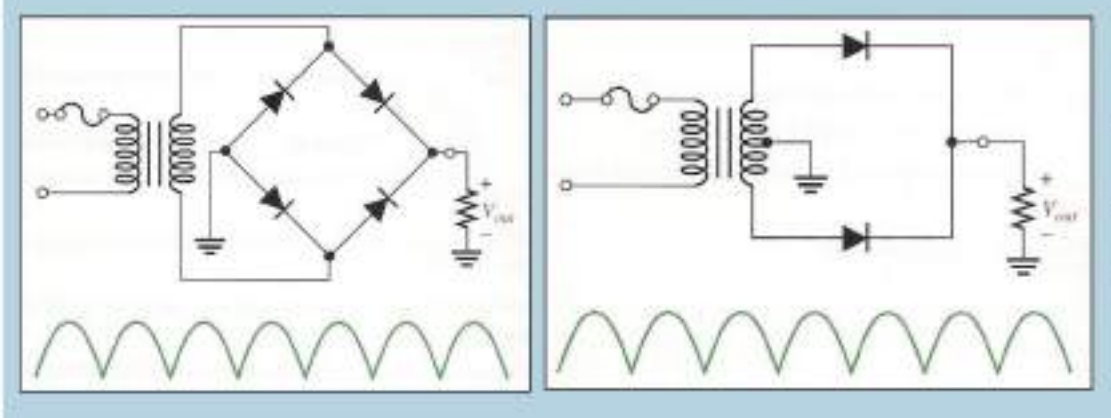
أما النصف الثاني للموجة فإنه يجعل انحياز الثنائي بالاتجاه العكسي، وعندئذ لايسمح للتيار أن ينساب في الدائرة.

نستنتج من ذلك أن هذا الثنائي يعمل على تحويل التيار المتناوب الى تيار معدل بنصف موجة.

هل

تعلم (للاطلاع)

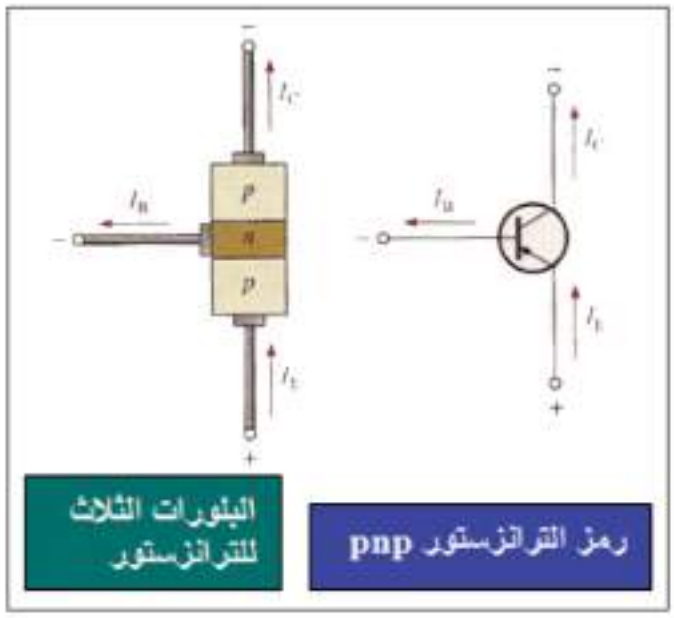
يمكن الحصول على تيار معدل بموجة كاملة وذلك باستعمال أكثر من ثنائي بلوري pn، لاحظ الشكلين المجاورين.



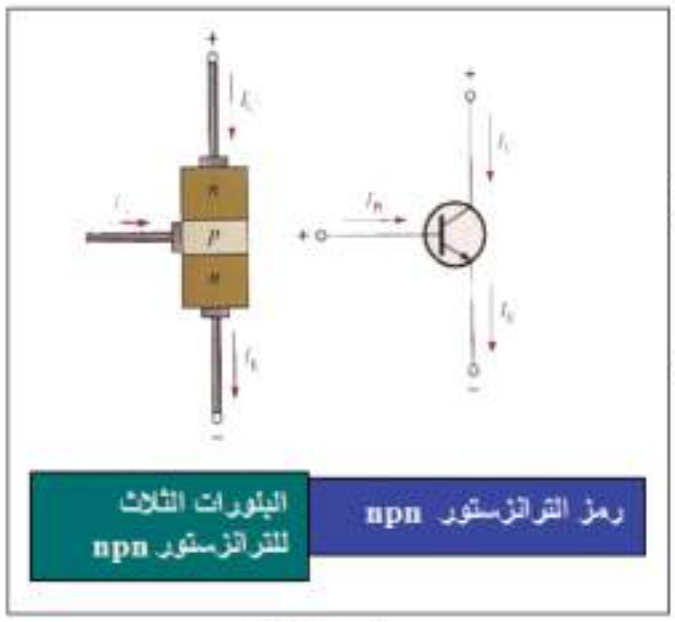
10-7 الترانزستور Transistor

الترانزستور نبيطة (جهاز device) تتكون من ثلاث مناطق مصنوعة من مادة شبه موصلة (سليكون أو جرمانيوم)، يفصل بينها ملتقيان، المناطق الثلاث تسمى، (الباعث Emitter ويرمز له E، القاعدة Base ويرمز لها B، والجامع Collector ويرمز له C). منطقة الباعث تُطعَّم دائما بنسبة عالية من الشوائب ومنطقة القاعدة تُطعَّم بنسبة قليلة من الشوائب، أما منطقة الجامع فتكون نسبة الشوائب فيها متوسطة نسبياً. ويكون الترانزستور بنوعين:

النوع الأول ترانزستور pnp لاحظ الشكل (35) والثاني ترانزستور npn ، لاحظ الشكل (36).



شكل (35)



شكل (36)

بما أن الباعث هو الذي يجهز حاملات الشحنة (charge carriers) لذا فانه يحيّز دائما انحيازاً أمامياً.

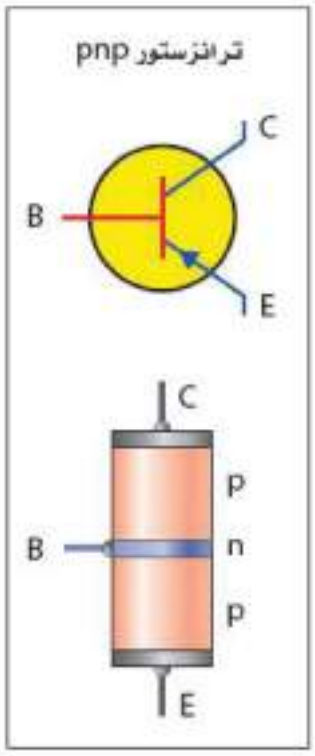
وبما أن الجامع يعمل على جذب تلك الحاملات خلال القاعدة لذا فإنه يحيّز دائما انحيازاً عكسياً.

ترانزستور pnp

يتألف من منطقتين من شبه موصل نوع p إحداهما تسمى الباعث والأخرى تسمى الجامع تفصل بينهما منطقة رقيقة نسبيا من نوع n تسمى القاعدة والمناطق الثلاث هي اقطاب الترانزستور لاحظ الشكل (37).

ولعلك تريد أن تعرف نوع حاملات الشحنة التي تقوم بعملية التوصيل الكهربائي خلال الترانزستور pnp ؟ وما علاقة تيار الباعث بتيار الجامع؟

الإجابة عن ذلك هوان الفجوات هي التي تتحرك من الباعث إلى الجامع خلال الترانزستور pnp. (وهي الحاملات الاغلبية للشحنة).



شكل (37)

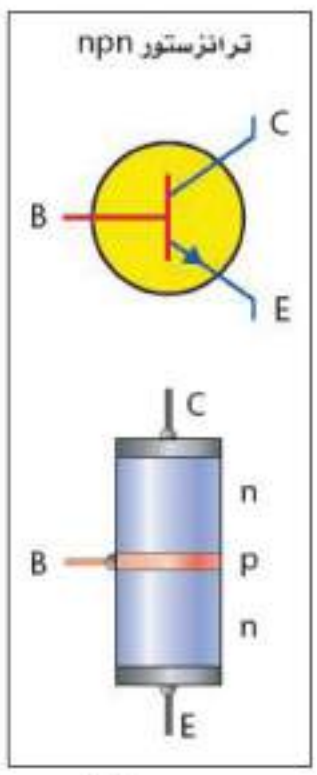
ترانزستور npn

يتألف من منطقتين من شبه موصل نوع n إحداهما تسمى الباعث والاخرى تسمى الجامع، تفصل بينهما منطقة رقيقة نسبيا من نوع p تسمى القاعدة والمناطق الثلاث هي اقطاب الترانزستور لاحظ الشكل (38).

وبإمكانك أن تسأل: ما نوع حاملات الشحنة التي تقوم بعملية التوصيل الكهربائي خلال الترانزستور npn ؟

وما علاقة تيار الباعث بتيار الجامع؟

الإجابة عن ذلك هوان الالكترونات هي التي تتحرك من الباعث الى الجامع خلال الترانزستور npn. فهي الحاملات الاغلبية.



شكل (38)

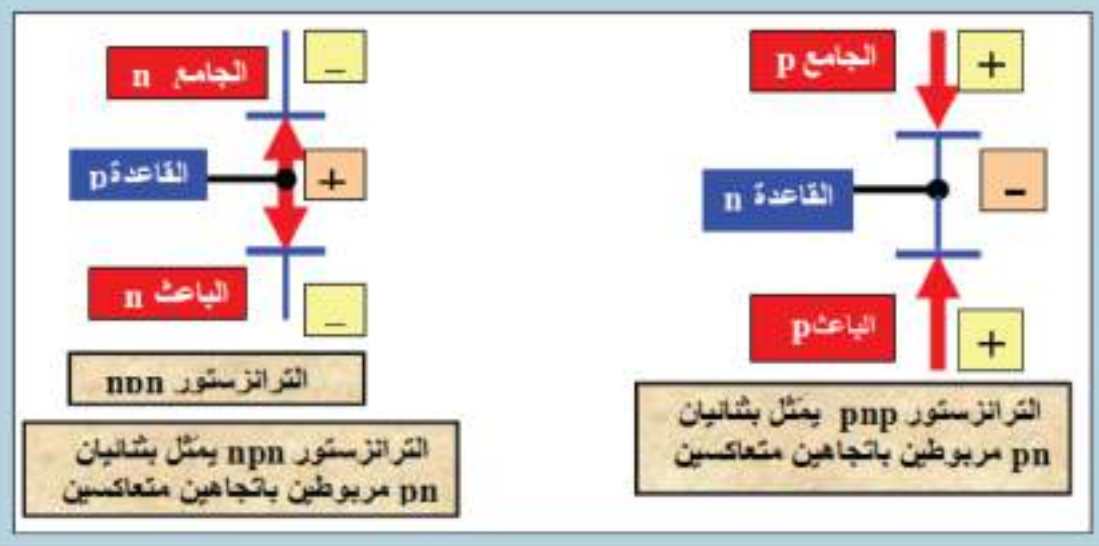
تذكر

* تيار الجامع I_C يكون دائما أقل من تيار الباعث I_E بمقدار تيار القاعدة I_B، وذلك بسبب حصول عملية إعادة الالتحام التي تحصل في منطقة القاعدة بين الفجوات والالكترونات. فيكون ($I_C = I_E - I_B$).
* تيار القاعدة يكون صغيرا جدا نسبة لتيار الباعث I_E، لأن منطقة القاعدة رقيقة ونسبة تطعيمها بالشوائب قليلة.
* إذا كان تيار القاعدة I_B يساوي مثلاً 1% من تيار الباعث I_E، فيكون تيار الجامع I_C حوالي 99% من تيار الباعث

هل

تعلم (للاطلاع)

أن الترانزستور نوع pnp يمكن أن يمثل ربط pn ثنائيين باتجاهين متعاكسين وكذلك الحال للترانزستور npn كما في الشكل المجاور.



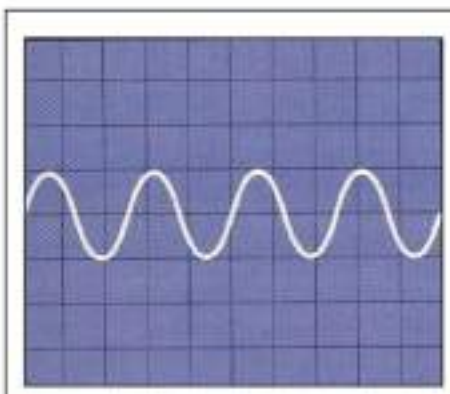
استعمال الترانزستور كمضخم:

إن العمل الأساسي للترانزستور هو تضخيم الإشارة الداخلة فيه، ومن هذه المضخمات: المضخم pnp ذو القاعدة المشتركة (القاعدة المؤرضة) والمضخم pnp (ذو الباعث المشترك). واختيار شكل ونوع الترانزستور لتطبيق معين يعتمد اعتمادا كبيرا على ممانعة الدخول وممانعة الخروج.

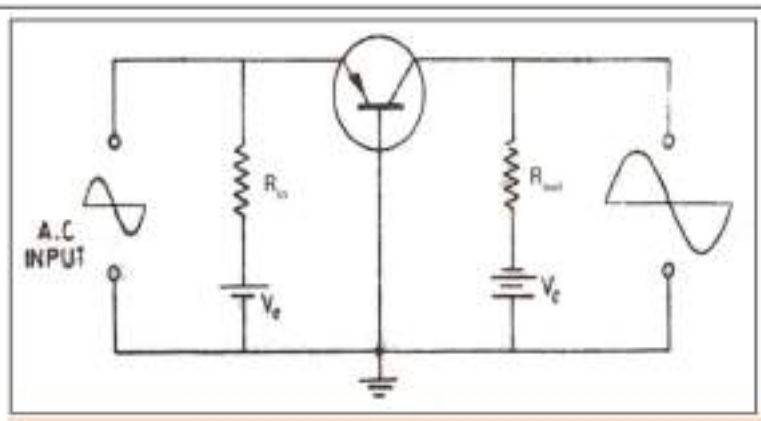
المضخم pnp ذو القاعدة المشتركة (القاعدة المؤرضة):

إن عملية التضخيم في الترانزستور تعتمد سيطرة دائرة الدخول ذات القدرة الواطئة على دائرة الخروج ذات القدرة العالية.

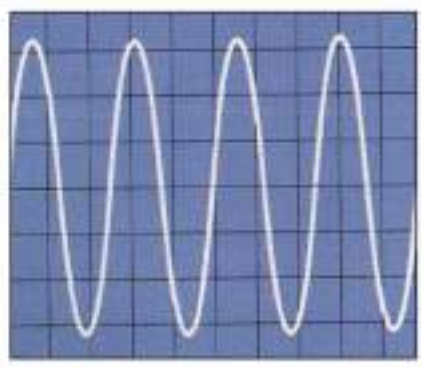
من ملاحظتنا للشكل (39) الذي يمثل مخططا لدائرة المضخم باستعمال الترانزستور pnp ذي القاعدة المشتركة (القاعدة مؤرضة) نجد أن ملتقى (الباعث–قاعدة) محيّزاً بالاتجاه الأمامي، وملتقى (الجامع–قاعدة) محيّزاً بالاتجاه العكسي.



الإشارة الداخلة في دائرة الباعث



دائرة المضخم باستعمال الترانزستور pnp ذو القاعدة المشتركة (القاعدة المؤرضة)



إلاشارة الخارجة من دائرة الجامع تكون مكبرة وبالطور نفسه مع الإشارة الداخلة في دائرة الباعث (فرق الطور بينهما = صفر)

شكل (39) دائرة المضخم pnp ذو القاعدة المشتركة (للاطلاع)

ويتميّز بان:

- دائرة الدخول (دائرة الباعث–قاعدة) ممانعتها صغيرة جدا (لان ملتقى الباعث– قاعدة يكون محيّزاً باتجاه امامي)، ودائرة الخروج (دائرة الجامع– قاعدة) تكون ممانعتها كبيرة جدا (لان ملتقى الجامع –قاعدة يكون محيّزاً باتجاه عكسي).
- فولطية انحياز دائرة الدخول صغيرة جدا في حين أن فولطية انحياز دائرة الخروج كبيرة جدا، فيكون ربح الفولطية (Voltage gain) كبيراً:

$$\text{Voltage gain } (A_v) = \frac{\text{output voltage } (V_{out})}{\text{input voltage } (V_{in})}$$

- ربح التيار (current gain) أقل من الواحد الصحيح.

إذ إن ربح التيار (Current gain) هو نسبة تيار الخروج (تيار دائرة الجامع I_C) الى تيار الدخول (تيار دائرة الباعث I_E):

$$\text{Current gain } (\alpha) = \frac{I_c}{I_E}$$

- ربح القدرة (Power gain) يكون متوسطا:

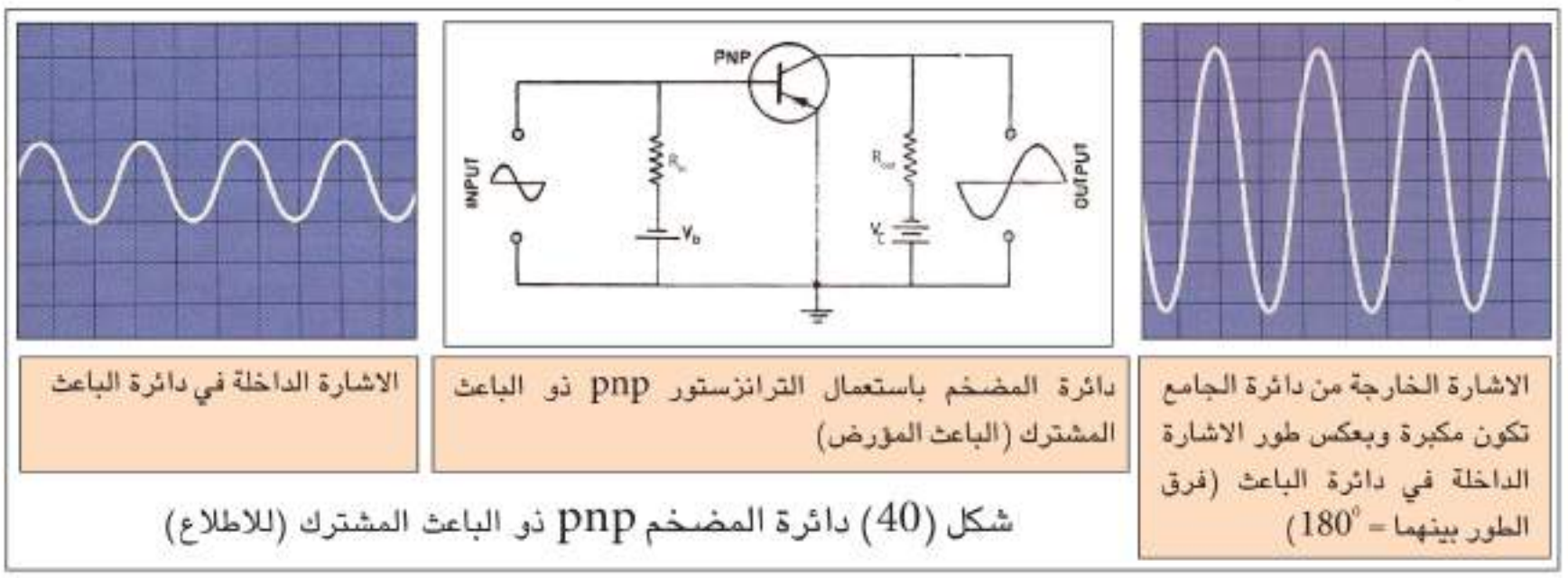
$$\text{Power gain } (G) = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\text{Power gain } (G) = \text{Current gain } (\alpha) \times \text{Voltage gain } (A_v)$$

- الإشارة الخارجة تكون بالطور نفسه مع الإشارة الداخلة. فما هو تفسير ذلك ؟

ان سبب ذلك هو ان تيار الجامع يتغير باتجاه تيار الباعث نفسه.

المضخم pnp ذو الباعث المشترك (الباعث المؤرض):



الاشارة الداخلة في دائرة الباعث	دائرة المضخم باستعمال الترانزستور pnp ذو الباعث المشترك (الباعث المؤرض)	الاشارة الخارجة من دائرة الجامع تكون مكبرة وبعكس طور الاشارة الداخلة في دائرة الباعث (فرق الطور بينهما = 180°)

شكل (40) دائرة المضخم pnp ذو الباعث المشترك (للاطلاع)

من ملاحظتنا للشكل (40) الذي يمثل مخططا لدائرة المضخم باستعمال الترانزستور pnp ذي الباعث المشترك (الباعث مؤرض) نجد أن:

القاعدة تكون بجهد سالب نسبة إلى الباعث، والجامع يكون بجهد سالب نسبة إلى كل من الباعث والقاعدة.

عند وضع فولطية إشارة متناوبة (ac. Signal voltage) بين طرفي دائرة الدخول ستعمل على تغيير جهد القاعدة. وقد وجد أن أي تغيير صغير في جهد القاعدة سيكون كافيا لإحداث تغيراً كبيراً في تيار دائرة (الجامع–قاعدة). وبما أن هذا التيار ينساب خلال حمل مقاومته (R_L) كبيرة المقدار فهو يولد فرق جهد كبير المقدار عبر مقاومة الحمل والذي يمثل فرق جهد الاشارة الخارجة.

يلاحظ من الشكل (40) ان الاشارة الخارجة من دائرة الجامع تكون بطور معاكس لطور الاشارة الداخلة في دائرة الباعث (فرق الطور بينهما $=180^0$). فما هو تفسير ذلك ؟

إن جواب ذلك هو:

إن النصف الموجب لإشارة فولطية الدخول يقلل من مقدار فولطية الانحياز الأمامي لملتقى (الباعث– قاعدة) فيقل بذلك مقدارالتيارالمنساب في دائرة (الجامع–قاعدة) والمنساب في الحمل (R_L)، وبالنتيجة يتناقص فرق الجهد عبر الحمل وهذا يجعل جهد الإشارة الخارجة سالبا، أما النصف السالب للإشارة الداخلة فهو يتسبب في زيادة مقدار فولطية الانحياز الأمامي لملتقى (الباعث– قاعدة) ومن ثم يجعل جهد الإشارة الخارجة موجبا.

وتتمّيز دائرة المضخم pnp ذي الباعث المشترك (الباعث المؤرض) بان:

- ربح التيار (Currentgain) عالياً تيار الخروج (تيار دائرة الجامع I_C) أكبر من تيار الدخول (تيار القاعدة I_B) لأن:

ربح التيار (Current gain) هو نسبة تيار الخروج (تيار دائرة الجامع I_C) الى تيار الدخول (تيار القاعدة I_B).

$$\text{Current gain } (\alpha) = \frac{I_C}{I_B}$$

- ربح الفولطية A_v (Voltage gain) كبيراً (فولطية الخروج أكبر من فولطية الدخول).

$$\text{Voltage gain } (A_v) = \frac{\text{output voltage } (V_{out})}{\text{input voltage } (V_{in})}$$

- ربح القدرة G (Power gain) يكون كبيراً جدا (ربح القدرة يساوي ربح الفولطية A_v × ربح التيار α).

$$\text{Power gain } (G) = \text{Current gain } (\alpha) \times \text{Voltage gain } (A_v)$$

$$\text{Power gain } (G) = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

- الإشارة الخارجة تكون بطور معاكس للإشارة الداخلة فرق الطور (180^0) وسبب ذلك هو أن تيار الجامع يتغير باتجاه معاكس لتغير تيار القاعدة.

مثال (1)

في دائرة الترانزستور كمضخم ذي القاعد المشتركة (القاعدة مورضة) إذا كان تيار الباعث: $I_E = 3\,mA$ وتيار الجامع $I_C = 2.94\,mA$ ومقاومة الدخول $R_{in} = 500\,\Omega$ ومقاومة الخروج $R_{out} = 400K\,\Omega$ احسب:

1- ربح التيار Current gain (α) 2- ربح الفولطية (A_V)

الحل

1) $$\alpha = \frac{I_c}{I_E} = \frac{2.94\times10^{-3}\,A}{3\times10^{-3}\,A} = 0.98$$ ربح التيار

2) $$V_{in} = I_E\,R_{in} = (3\times10^{-3}\,A)(500\Omega) = 1.5V$$

$$V_{out} = I_c\,R_{out} = (2.94\times10^{-3}\,A)(400000\Omega)$$

$$V_{out} = 1176V$$

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1176V}{1.5V} = 784$$ ربح الفولطية

مثال (2)

في دائرة الترانزستور كمضخم ذي القاعدة المشتركة (القاعدة مؤرضة) إذا كان ربح القدرة $G = 768$ وتكبير الفولطية (ربح الفولطية) يساوي $A_V = 784$ وتيار الباعث $(I_E = 3\times10^{-3}\,A)$ جد تيار القاعدة (I_B)

الحل

$$\text{power gain}(G) = \alpha \times A_V$$

$$768 = \alpha \times 784$$

$$\therefore \alpha = \frac{768}{784} = 0.98$$

$$\alpha = \frac{I_c}{I_E}$$

$$0.98 = \frac{I_c}{3\times10^{-3}\,A}$$

$$\therefore I_c = 2.94\times10^{-3}\,A$$ تيار الجامع

$$I_B = I_E - I_c$$

$$= 3\times10^{-3}\,A - 2.94\times10^{-3}\,A$$

$$I_B = 0.06\times10^{-3}\,A$$ تيار القاعدة

أسئلة ومسائل الفصل السابع

س1 اختر العبارة الصحيحة لكل من العبارات الآتية:

1- إذا كان الثنائي البلوري pn محيزا باتجاه أمامي فعند زيادة مقدار فولطية الانحياز الأمامي، فان مقدار التيار الامامي:

a- يزداد b- يقل c- يبقى ثابتا d- يزداد ثم ينقص

2- عند زيادة حاجز الجهد في الثنائي البلوري pn المحيز انحيازاً أمامياً، فان مقدار التيار الامامي في دائرته:

a- يزداد b- يقل c- يبقى ثابتا d- يزداد ثم ينقص

3- الالكترونات الحرة في شبه الموصل النقي وبدرجة حرارة الغرفة تشغل :

a- حزمة التكافؤ b- ثغرة الطاقة المحظورة c- حزمة التوصيل d- المستوي القابل

4- تتولد الازواج الكترون – فجوة ، في شبه الموصل النقي ، بوساطة:

a- إعادة الالتحام b- التأين c- التطعيم d- التأثير الحراري

5- التيار المنساب في شبه الموصل النقي ناتج عن:

a- الالكترونات الحرة فقط b- الفجوات فقط

c- الأيونات السالبة d- الالكترونات والفجوات كليهما

6- في شبه الموصل نوع n وعند درجة حرارة الغرفة، يكون:

a- عدد الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل يساوي عدد الفجوات في حزمة التكافؤ

b- عدد الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل أكبر من عدد الفجوات في حزمة التكافؤ

c- عدد الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل أقل من عدد الفجوات في حزمة التكافؤ

d- جميع الاحتمالات السابقة، يعتمد ذلك على نسبة الشوائب

7- تتولد منطقة الاستنزاف في الثنائي pn بوساطة:

a- إعادة الالتحام b- التناضح c- التأين d- جميع الاحتمالات السابقة (a ، b ،c)

8- الثنائي pn الباعث للضوء (LED) ،يبعث الضوء عندما:

a- يحيز باتجاه امامي b- يحيز باتجاه عكسي

c- يكون حاجز الجهد عبر الملتقى كبيرا d- يكون بدرجة حرارة الغرفة

9- تيار الباعث I_E في دائرة الترانزستور، يكون دائما:

a- أكبر من تيار القاعدة b- أقل من تيار القاعدة

c- أكبر من تيار الجامع d- الأجوبة (a و c)

10- منطقة الاستنزاف في الثنائي البلوري في المنطقة n تحتوي فقط:

a- الكترونات حرة b- فجوات c- أيونات موجبة d- ايونات سالبة

11- يسلك السليكون سلوك العازل عندما يكون :

a- نقياً b- في الظلمة c- بدرجة الصفر المطلق d- الأجوبة الثلاث (a,b,c) مجتمعة

12- يزداد المعدل الزمني لتوليد الأزواج الكترون - فجوة في شبه الموصل:

a- بادخال شوائب خماسية التكافؤ b- بادخال شوائب ثلاثية التكافؤ

c- بارتفاع درجة الحرارة d- ولا واحد مما سبق

13- منطقة القاعدة في الترانزستور تكون:

a- واسعة وقليلة الشوائب b- واسعة وكثيرة الشوائب

c- رقيقة وقليلة الشوائب d- رقيقة وكثيرة الشوائب

14- ربح التيار (α) في المضخم pnp ذي الباعث المشترك هو نسبة :

a- $\frac{I_E}{I_c}$ b- $\frac{I_B}{I_C}$ c- $\frac{I_c}{I_B}$ d- $\frac{I_c}{I_E}$

15- فرق الطور بين الإشارة الخارجة والإشارة الداخلة في المضخم pnp ذي القاعدة المشتركة يساوي:

a- صفرا b- 90^0 c- 180^0 d- 270^0

16- ربح التيار (α) في دائرة الترانزستور pnp المستعمل كمضخم ذي القاعدة المشتركة يساوي نسبة :

a- $\frac{I_E}{I_B}$ b- $\frac{I_c}{I_E}$ c- $\frac{I_c}{I_B}$ d- $\frac{I_B}{I_E}$

17- يقع مستوي فيرمي في شبه الموصل نوع N عند درجة حرارة (0K).

a- أسفل المستوى المانح. b- منتصف المسافة بين قعر حزمة التوصيل والمستوى المانح.

c- في منتصف ثغرة الطاقة. d- منتصف المسافة بين قمة حزمة التكافؤ والمستوى المانح.

18- مستوى فيرمي هو:

a- معدل قيمة كل مستويات الطاقة. b- مستوى الطاقة في قمة حزمة التكافؤ.

c- أعلى مستوى طاقة مشغول عند 0^oC. d-أعلى مستوى طاقة مشغول عند 0K.

س2 ضع كلمة صح أو خطأ أمام كل عبارة من العبارت التالية، مع تصحيح الخطأ،دون ان تغير ما تحته خط:

1- بلورة السليكون نوع n، تكون سالبة الشحنة. (خطأ)

2- منطقة الاستنزاف في الثنائي pn تحتوي أيونات موجبة في المنطقة p وايونات سالبة في المنطقة n. (صح)

3- تزداد قابلية التوصيل الكهربائي في شبه الموصل النقي بارتفاع درجة حرارته. (صح)

4- الثنائي الباعث للضوء يحيّز باتجاه أمامي. (صح)

5- مقدار ثغرة الطاقة المحظورة في الجرمانيوم (1.1eV)، بدرجة حرارة 300 k .

6- يزداد مقدار حاجز الجهد في الثنائي البلوري عندما يكون محيّزا بالاتجاه الامامي.

7- يحيّز الباعث في الترانزستور دائما بانحياز امامي .

8- في الموصلات وعند درجة 0k تكون مستويات الطاقة التي تقع تحت مستوي فيرمي تكون مشغولة بالالكترونات.

9- ربح القدرة في المضخم pnp ذي القاعدة المشتركة يكون كبيراً جدا.

10- تتولد الازواج الكترون فجوة في شبه الموصل نتيجة عملية أعادة الالتحام بين الالكترونات والفجوات.

11- منطقة القاعدة في الترانزستور تكون دائما رقيقة ونسبة الشوائب قليلة.

12- في الترانزستور npn نو القاعدة المشتركة يكون تيار الباعث أكبر من تيار الجامع.

13- في الترانزستور npn نو الباعث المشترك تكون الاشارتين الخارجة والداخلة بالطور نفسه.

14- بلورة الجرمانيوم نوع p تكون الفجوات هي حاملات الشحنة الاغلبية .

س3 ما الفرق بين كل مما يلي:

1- الأيون الموجب والفجوة في أشباه الموصلات.

2- الثنائي الباعث للضوء والثنائي المتحسس للضوء.

3- شبه موصل نوع n وشبه موصل نوع p من حيث (a - نوع الشائبة المطعمة فيه، b- حاملات الشحنة الاغلبية وحاملات الشحنة الاقلية، c- المستوي الذي تولده كل شائبة وموقعه).

4- الباعث والجامع في الترانزستور (من حيث : a - جمع حاملات التيار اوارسالها b - طريقة الانحياز c- ممانعة الملتقى d- نسبة الشوائب)

س4 علل ما يأتي:

a- سبب تولد منطقة الاستنزاف في الثنائي البلوري pn؟

b- ممانعة ملتقى (الجامع-قاعدة) في الترانزستور تكون عالية، بينما ممانعة ملتقى الباعث-قاعدة واطئة؟

c- عند درجة حرارة الصفر المطلق وفي الظلمة تكون حزمة التوصيل في شبه الموصل النقي خالية من الالكترونات؟

d- انسياب تيار كبير في دائرة الثنائي البلوري pn عندماتزداد فولطية الانحياز بالاتجاه الأمامي؟

e- يحيّز الثنائي البلوري pn المتحسس للضوء باتجاه عكسي قبل سقوط الضوء عليه؟

f- الايون الموجب المتولد عند اضافة شائبة من نوع المانح إلى بلورة شبه موصل نقية لايعد من حاملات الشحنة؟

س5 ما المقصود بكل مما يأتي:

a- مستوي فيرمي.

b- المستوي المانح وكيف يتولد؟.

c- منطقة الاستنزاف في الثنائي البلوري pn. وكيف تتولد؟

d- الفجوة في شبه الموصل. وكيف تتولد؟

e- الزوج الكترون – فجوة وكيف يتولد؟

س6 علام يعتمد مقدار كل مما يأتي:

a- حاجز الجهد الكهربائي في الثنائي البلوري pn.

b- معدل توليد الازواج الكترون- فجوة في شبه الموصل النقي؟

c- عدد الالكترونات الحرة المنتقلة إلى حزمة التوصيل في بلورة شبه موصلة نوع n بثبوت درجة الحرارة؟

d- التيار المنساب في دائرة الثنائي البلوري pn المتحسس للضوء؟

س7 ماذا يحصل للتيار المتناوب لو وضع في طريقه ثنائي بلوري pn ؟

س8 بعد تطعيم بلورة شبه الموصل (مثل السليكون): بشوائب ثلاثية التكافؤ (مثل البورون) مانوع البلورة التي من نحصل عليها. أتكون شحنتها موجبة؟ ام سالبة ؟ ام متعادلة كهربائيا؟

س9 في دائرة الترانزستور ذو الباعث المشترك إذا كان تيار الباعث يساوي $I_E = (0.4)\,mA$ وتيار القاعدة $I_B = (40)\,\mu A$ ومقاومة الدخول $R_{in} = 100\Omega$ ومقاومة الخروج $R_{out} = 50k\,\Omega$.

أحسب:

1- ربح التيار (α) 2- ربح الفولطية (A_v) 3- ربح القدرة (G)

س10 في دائرة الترانزستور ذي الباعث المشترك. احسب ربح التيار (α) وتيار الباعث I_E إذا كان تيار القاعدة يساوي $I_B = (50)\,\mu A$ وتيار الجامع يساوي $I_C = (3.65)\,mA$