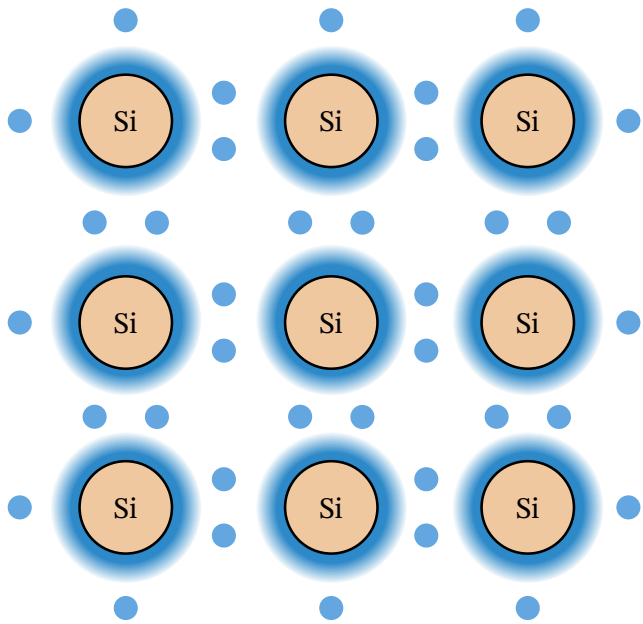
شارح: الدايودات شبه الموصلة

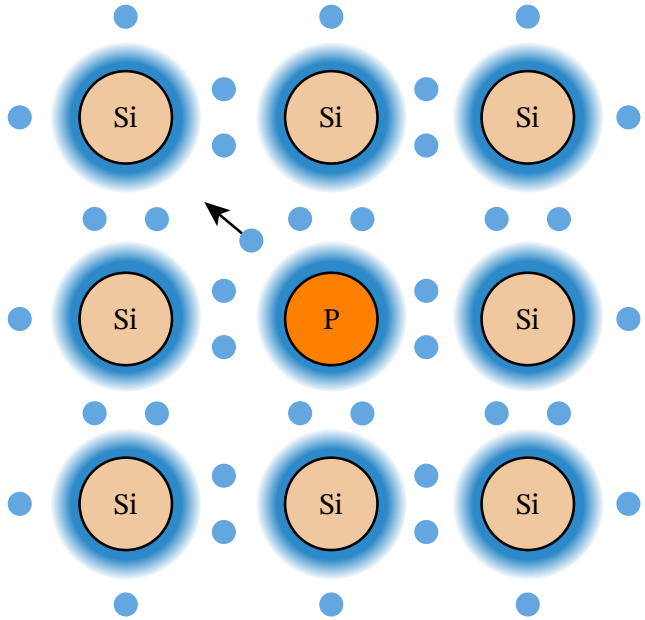
في هذا الشارح، سوف نتعلَّم كيف نمثِّل الدايود شبه الموصِّل باعتباره وصلة بين أشباه الموصِّلات المطعَّمة من النوع n والنوع p.

الدايودات مكوِّنات تسمح بمرور التيار الكهربي في اتجاه واحد فقط في الدائرة الكهربية. وفي هذا الشارح، سوف نتعرَّف على كيفية عمل الدايودات على المستوى دون الذري.

تُصنع الدايودات من أشباه الموصِّلات. ويُعد السليكون أكثر أشباه الموصِّلات شيوعًا في هذه الصناعة. في ذرَّة السليكون، يوجد أربعة إلكترونات في الغلاف الخارجي، أو غلاف التكافؤ، متاحة لتكوين روابط مع الذرَّات المجاورة. في شبكة ذرَّات السليكون، يساهم كل إلكترون في الغلاف الخارجي برابطة مع ذرَّة سليكون مجاورة. وهذا ما يوضِّحه الشكل الآتي.

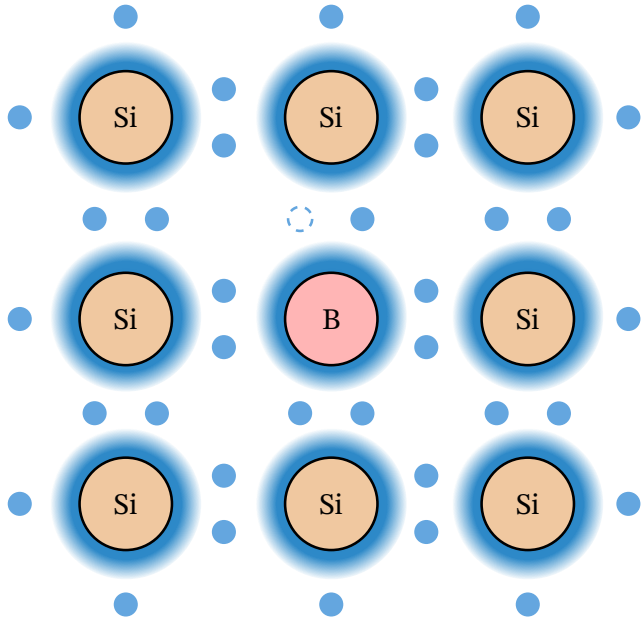


عندما نُطعِّم هذه الشبكة بعنصر آخر مثل الفوسفور، الذي يحتوي على خمسة إلكترونات في غلافه الخارجي، يتبقى إلكترون «إضافي» لم تشمله الرابطة المتكوِّنة مع ذرَّة السليكون المجاورة. هذا الإلكترون، (المشار إليه بالسهم في الشكل الآتي)، يصبح إلكترونًا حرًّا للتحرُّك في الشبكة. وبما أن جميع هذه الإلكترونات الحرة تكون سالبة الشحنة، يُسمى هذا النوع من أشباه الموصِّلات المطعَّمة بالنوع n.

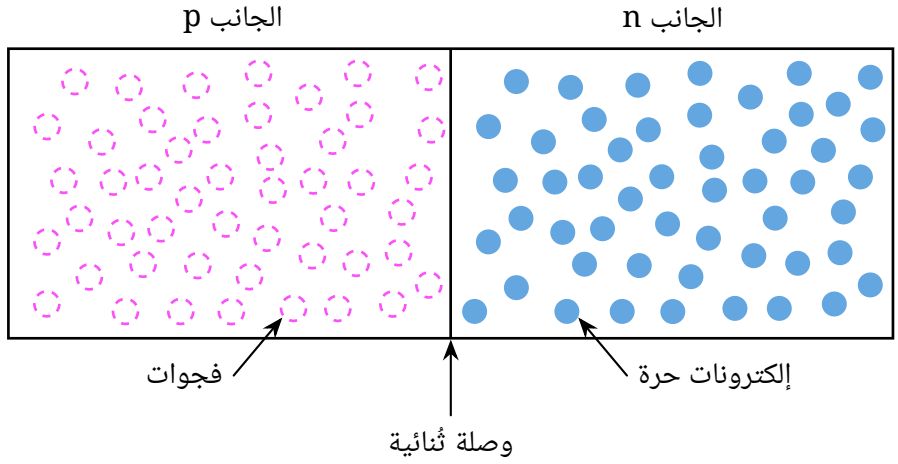


من المهم أن نتذكَّر أن المادة بأسرها لا تكون لها شحنة؛ فأعداد البروتونات والإلكترونات متساوية إجمالًا. وعندما نقول إنها من النوع n، فإننا نعني فقط أن حاملاتِ الشحنةِ الحرةَ الحركةِ؛ أيِ الإلكترونات في هذه الحالة، لها شحنة سالبة.

يمكننا أيضًا تطعيم السليكون بذرَّةٍ لها ثلاثة إلكترونات في الغلاف الخارجي، مثل البورون. وفي هذه الحالة، تنتُج فجوة. وكما نعلم، ليس للفجوة في حد ذاتها شحنة، لكنها تمثِّل شحنة موجبة بالنسبة إلى الإلكترون. ونتيجةً لذلك، تنجذب إلكترونات أخرى إلى هذه الفجوة، وفي بعض الأحيان قد تترك الإلكترونات ذرَّة أخرى وتأتي لملء الفجوة. وعلى الرغم من أن الإلكترونات هي التي تتحرك فعليًّا، فإننا نعتبر أن الفجوة تتحرك عبر الشبكة كلما انتقلت إلكترونات مختلفة لمَلْئها. وهذا يعني أن حاملات الشحنة في هذه الحالة تكون موجبة؛ لذا نسمي هذا النوع من أشباه الموصِّلات المطعَّمة بالنوع p. في الشكل الآتي، نشير إلى الفجوة بدائرة متقطعة.

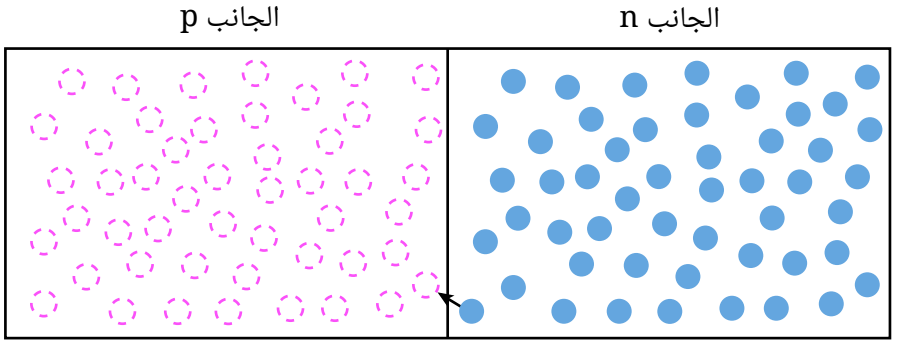


لأشباه الموصِّلات المطعَّمة هذه خواصُّ مثيرةٌ عند تجميعها. في الشكل الآتي، لدينا شبه موصِّل من النوع p على اليسار، وشبه موصِّل من النوع n على اليمين. عند تجميعهما، نحصل على وصلة نسميها الوصلة الثُّنائية.

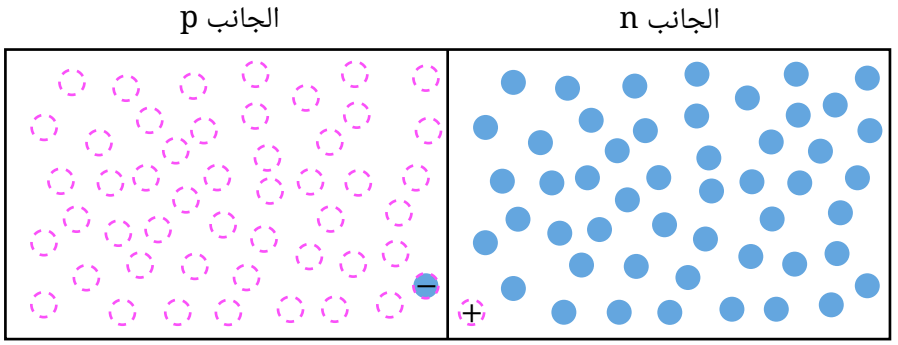


للتبسيط، استبعدنا نوى الذرات وإلكترونات الروابط، وعرضنا فقط حاملات الشحنة؛ أي الفجوات الموجبة الشحنة على اليسار، والإلكترونات السالبة الشحنة على اليمين. ولكن تَذكَّر أن الطرفين متعادلان كهربيًّا.

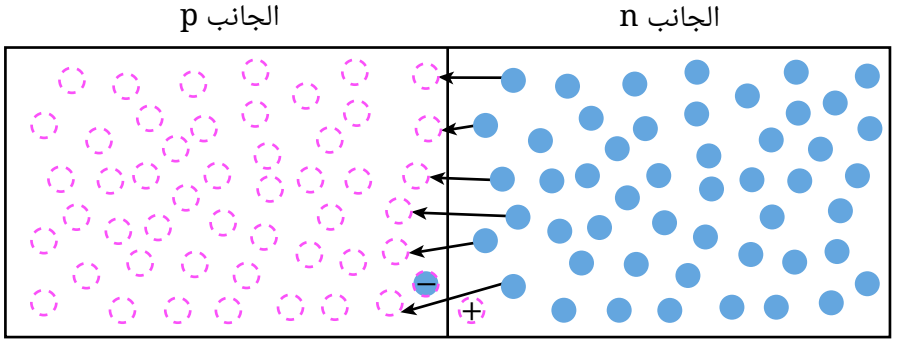
عند ترتيب أشباه الموصِّلات المطعَّمة بهذه الطريقة، نحصل على فجوات في أحد الجانبين تجذب الإلكترونات، ونحصل في الجانب الآخر على الكثير من الإلكترونات الحرة. وعليه، تنتشر بعض الإلكترونات القريبة من الحد الفاصل عبر الوصلة لملء الفجوات في الجانب p، كما هو موضَّح في الشكل الآتي.



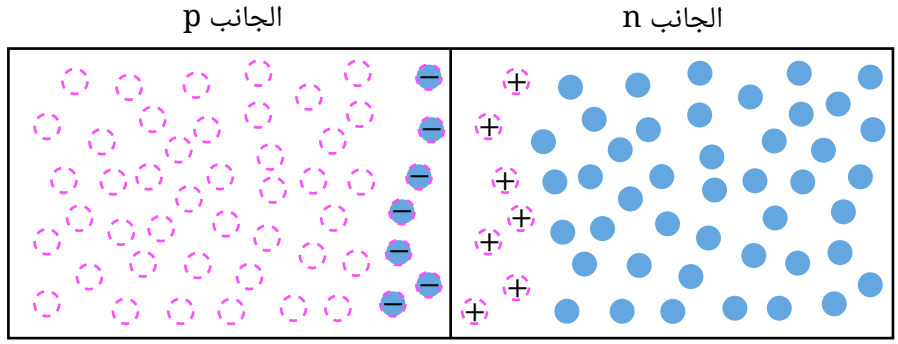
والآن، اكتسب الجانب p، الذي كان متعادلًا من قبل، إلكترونًا إضافيًا؛ ومن ثَم، أصبح سالب الشحنة. وبالمثل، فَقَدَ الجانب n إلكترونًا؛ وبذلك أصبح عدد البروتونات فيه يزيد عن عدد الإلكترونات، وأصبح موجب الشحنة. في الشكل الآتي، نمثِّل الفجوة المملوءة بأنها شحنة سالبة، ونمثِّل غياب الإلكترون من الجانب n بأنه شحنة موجبة.



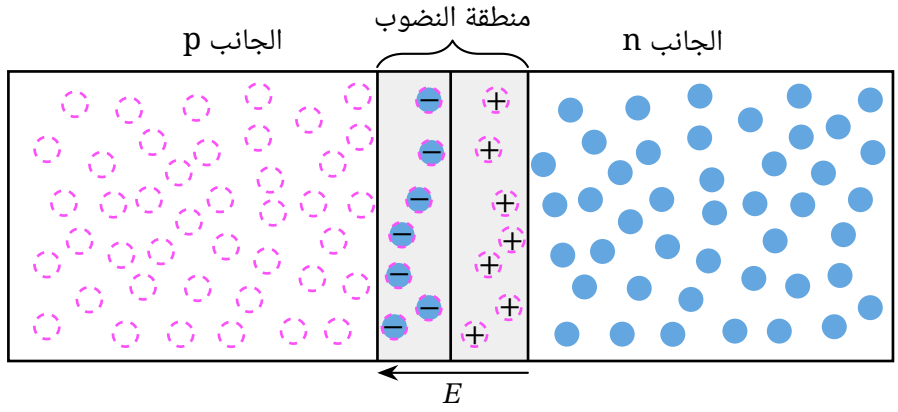
يَعْبر عدد أكبر من الإلكترونات القريبة من الحد الفاصل لملء الفجوات في الجانب p، كما هو موضَّح في الشكل الآتي.



ينتهي المطاف بتراكُم شحنات سالبة بالقرب من الحد الفاصل على الجانب p، وتراكُم شحنات موجبة بالقرب من الحد الفاصل على الجانب n. وهذا ما يوضِّحه الشكل الآتي.



هذه المنطقة حيث توجد شحنة سالبة على أحد طرفيها وشحنة موجبة على الطرف الآخر تُعرَف باسم **منطقة النضوب** (تُسمى أيضًا المنطقة القاحلة). يولِّد تراكُم الشحنات هذا مجالًا كهربيًّا عبر منطقة النضوب، يُرمز له بالرمز E في الشكل الآتي.

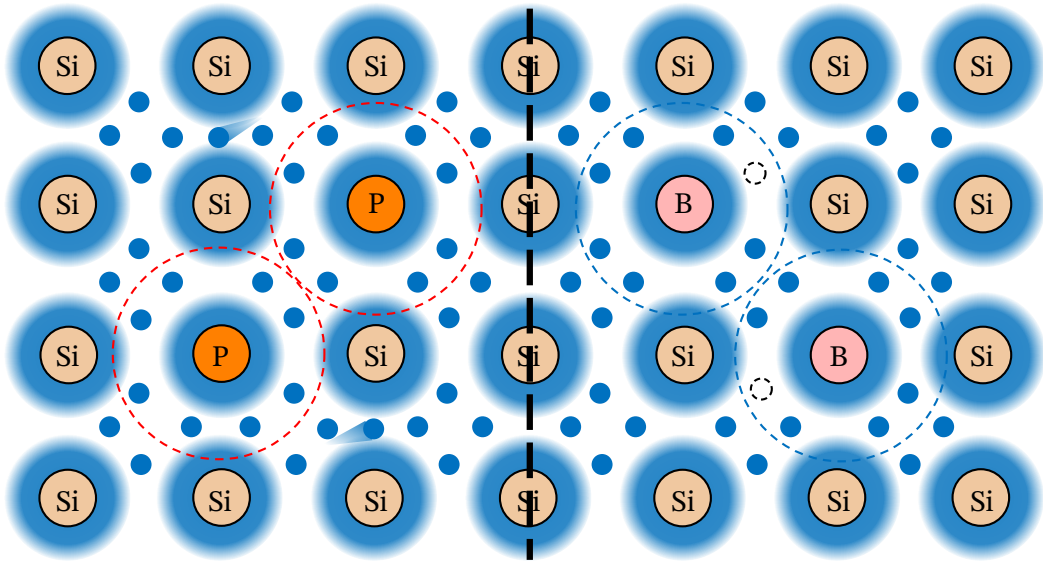


يعمل تراكُم الشحنات السالبة بالقرب من الحد الفاصل على الجانب p حاجزًا يتنافر مع أيِّ إلكترونات إضافية ويمنعها من العبور.

والآن، دعونا نتناول بعض الأمثلة على أشباه الموصِّلات المطعَّمة وخواص الوصلة الثُّنائية.

مثال ١: فهْم أشباه الموصِّلات المطعَّمة

يوضِّح الشكل شبكة من ذرَّات السليكون في شبه موصِّل. طُعِّم الجانب الأيسر من الشبكة بأيونات مانِحة. يُسمَّى هذا الجانب: الجانب n. طُعِّم الجانب الأيمن من الشبكة بأيونات مستقبِلة. يُسمَّى هذا الجانب من الشبكة: الجانب p. حجمَا المنطقتين على جانبَي الخط الذي يقسم الشبكة متساويان، وتركيز الأيونات متساوٍ على الجانبين. شبه الموصِّل في حالة اتزان حراري.



١. ما نسبة الإلكترونات الحرة على الجانب n، إلى الفجوات على الجانب p؟

٢. ما الفرق بين الشحنة الكهربية النسبية الكلية في المنطقتين؟

الحل

الجزء الأول

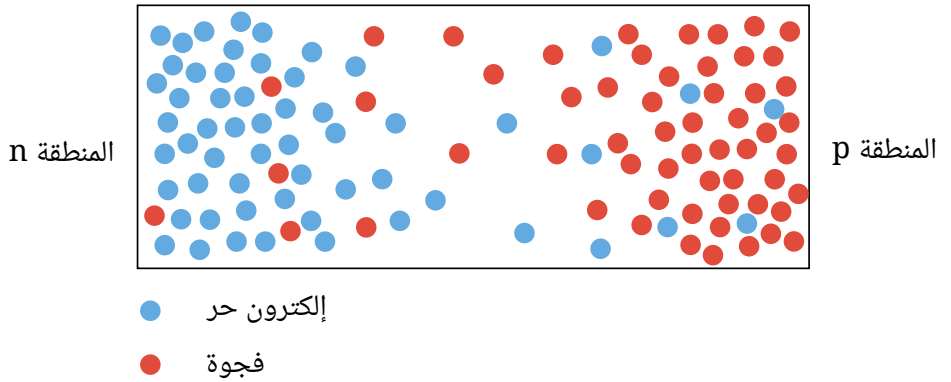
في هذا المثال، لدينا شبه موصِّل مطعَّم حيث يقع الجانب n على اليسار، والجانب p على اليمين. طُعِّم الجانب n بالفوسفور، الذي يحتوي على خمسة إلكترونات في غلافه الخارجي. هذا يعني أن كل ذرَّة توفِّر إلكترونًا واحدًا «حرًّا». كذلك، طُعِّم الجانب p على اليمين بالبورون، الذي يحتوي على ثلاثة إلكترونات في غلافه الخارجي. وهذا يعني، أن كل ذرَّة بورون تساهِم بفجوة واحدة، أو حاملة شحنة موجبة. يخبرنا السؤال أن المنطقتين متساويتان في الحجم وتركيز الأيونات؛ أيْ إن كثافة الأيونات المستقبِلة والمانحة لهما واحدة. هذا يعني أن عدد الإلكترونات الحرة في الجانب n والفجوات في الجانب p سيكون متساويًا. ولذا، فإن نسبة الإلكترونات الحرة في الجانب n إلى الفجوات في الجانب p تساوي واحدًا.

الجزء الثاني

علينا الآن تناوُل الشحنة الكهربية الكلية في كل منطقة. ثمة اعتقاد خطأ شائع بأن وجود إلكترونات حرة يجعل منطقة النوع n سالبة الشحنة. في الواقع، هذه المنطقة متعادلة كهربيًّا، وذلك لأن الذرَّات المانحة تحتوي على عدد متساوٍ من البروتونات والإلكترونات. ينطبق الأمر نفسه على الجانب p؛ حيث تحتوي الأيونات المستقبِلة على إلكترونات أقل من ذرَّات السليكون، ولكنها تحتوي على بروتونات أقل من ذرَّات السليكون أيضًا. إجمالًا، كلتا المنطقتين متعادلتان كهربيًّا. وعليه، يكون الفرق بين الشحنة الكهربية الكلية في المنطقتين صفرًا.

مثال ٢: فهْم الوصلات الثُّنائية

في الوصلة الثُّنائية، يمكن أن ينتشر كلٌّ من الإلكترونات الحرة والفجوات عبر الوصلة، كما هو موضَّح بالشكل.



١. باتجاه أيّ جانب من جانبَي الوصلة يكون اتجاه محصِّلة تيار الانتشار؟

٢. أيُّ المناطق الآتية يكون فيها تركيز الإلكترونات الحرة أكبر ما يمكن؟

أ. الجانب p

ب. عند منتصف الوصلة

ج. الجانب n

٣. أيُّ المناطق الآتية يكون فيها تركيز الفجوات أكبر ما يمكن؟

أ. الجانب n

ب. الجانب p

ج. عند منتصف الوصلة

٤. أيُّ المناطق الآتية يكون فيها تركيز كلٍّ من الإلكترونات الحرة والفجوات أقل ما يمكن؟

أ. عند منتصف الوصلة

ب. الجانب p

ج. الجانب n

الحل

الجزء الأول

لدينا هنا شبه موصِّل؛ حيث تقع المنطقة n التي تحتوي على الإلكترونات الحرة على اليسار، والمنطقة p التي تحتوي على الفجوات على اليمين. تنتشر الإلكترونات الحرة من المنطقة n عبر الوصلة لملء الفجوات في المنطقة p. وبالمثل، يمكننا القول إن الفجوات تنتشر من المنطقة p إلى المنطقة n. عندما نتحدث عن التيارات الكهربية، فقد اصطُلح على القول إن اتجاهها يكون من الموجب إلى السالب. ومن ثَم، فاتجاه محصِّلة تيار الانتشار سيكون نحو المنطقة n.

الجزء الثاني

توجد إلكترونات حرة موزَّعة عبر هذه الوصلة الثُّنائية. إلا أن أعلى تركيز لها يكون ناحية اليسار، في المنطقة n، وبإمكاننا ملاحظة ذلك على الشكل، أو تذكُّر أن المنطقة n سُميت بهذا الاسم لأنها طُعِّمت لتحتوي على إلكترونات حرة. إذن، الإجابة هي الخيار ج، الجانب n.

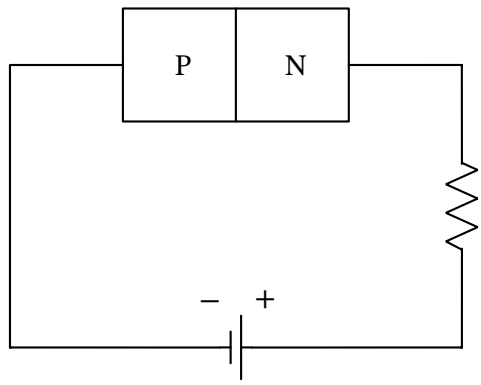
الجزء الثالث

لدينا فجوات منتشرة عبر الوصلة بالكامل، إلا أن أعلى تركيز لها يكون على الجانب p. إذن، الإجابة هي الخيار ب، الجانب p.

الجزء الرابع

إذا كان أعلى تركيز للإلكترونات الحرة على الجانب n، وأعلى تركيز للفجوات على الجانب p، فإن الإلكترونات ستميل إلى الانتشار عبر الوصلة لملء الفجوات في الجانب p. لم تَعُد الإلكترونات «حرة» بعد الآن. وبالمثل، بمجرد ملء الفجوات، لم تَعُد شاغرة. وبذلك، سيكون تركيز كلٍّ من الإلكترونات الحرة والفجوات أقل ما يمكن في المنتصف حيث يحدث ذلك، وتكون الإجابة هي الخيار أ، عند منتصف الوصلة.

دعونا الآن نوصِّل الوصلة الثُّنائية بمصدر طاقة في دائرة كهربية. يوضِّح الشكل الآتي مخططًا لدائرة كهربية.



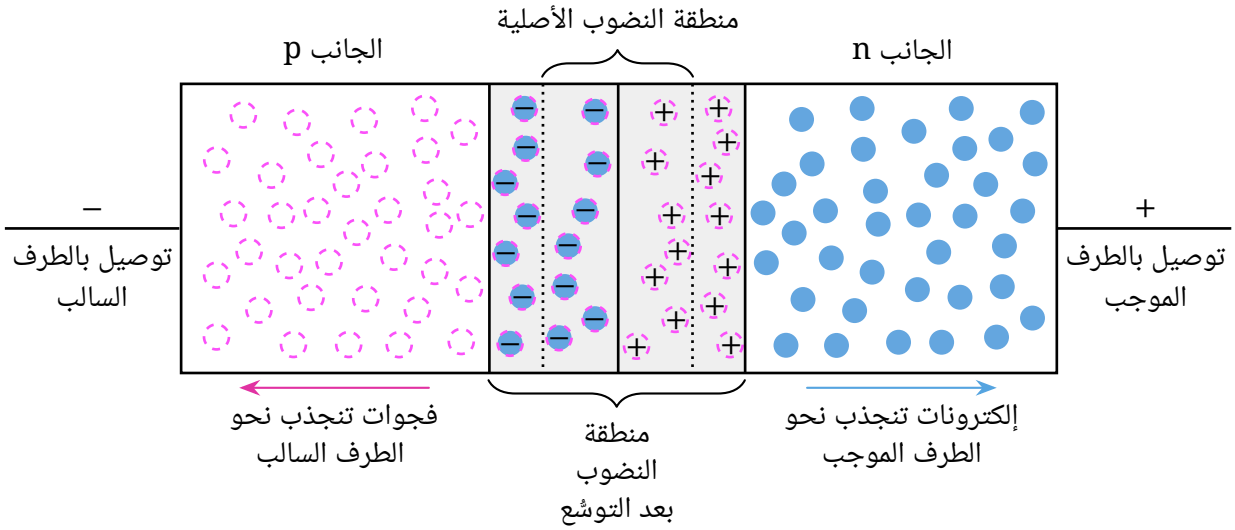
تَذكَّرْ أن اتجاه التيار الاصطلاحي يكون من الطرف الموجب إلى الطرف السالب، وهذا يعني أن اتجاه التيار سيكون في عكس اتجاه عقارب الساعة في هذه الدائرة.

هيَّا نرَ كيف تتأثَّر حاملات الشحنة الموجبة والسالبة في الوصلة الثُّنائية عند تطبيق فرق جهد عليها.

تنجذب الفجوات الموجبة الشحنة على الجانب p من الوصلة إلى طرفها السالب؛ أيْ بعيدًا عن منطقة النضوب. وهذا يسمح بانتقال المزيد من الإلكترونات الحرة من الجانب n إلى الجانب p في منطقة النضوب.

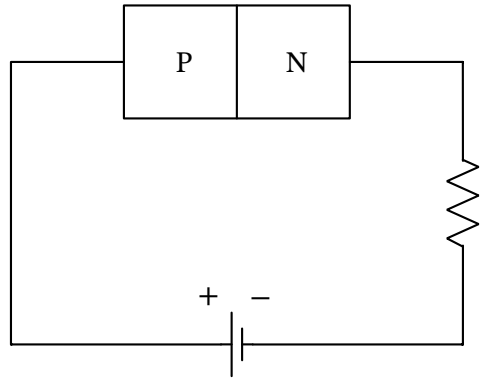
وبالمثل، تنجذب الإلكترونات الحرة السالبة الشحنة على الجانب n من الوصلة إلى طرفها الموجب؛ أيْ بعيدًا عن منطقة النضوب. وهذا يُتيح انتقال المزيد من الفجوات من الجانب p إلى الجانب n في منطقة النضوب.

ومن ثَم، نلاحظ أن منطقة النضوب تتوسَّع نتيجة فرق الجهد المطبَّق. وهذا ما يوضِّحه الشكل الآتي.



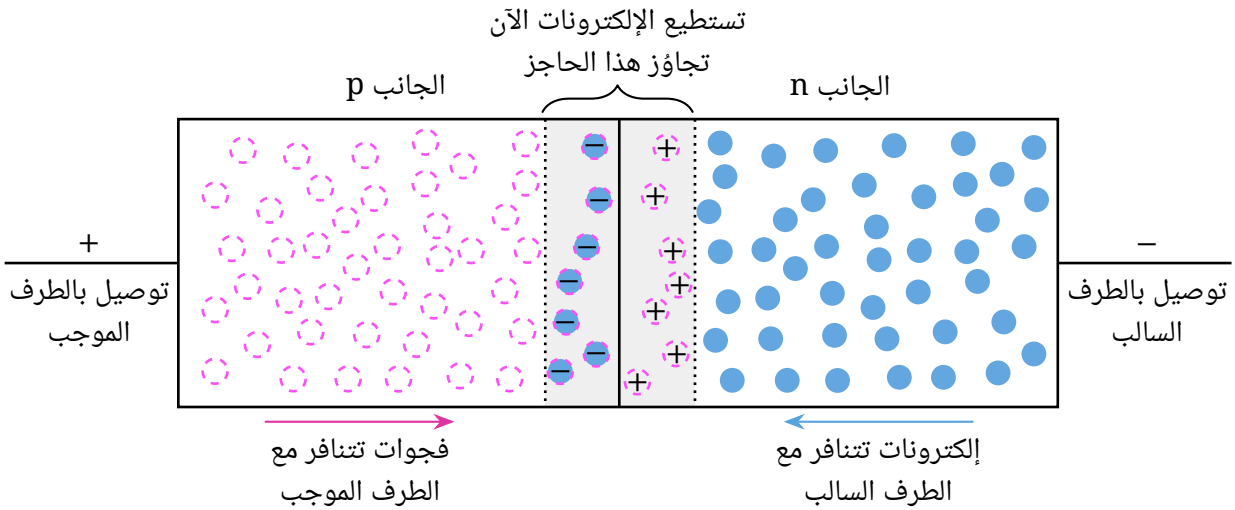
تعمل منطقة النضوب الموسَّعة عمل حاجز أقوى يمنع الإلكترونات من المرور عبر الوصلة. وعليه، لن يمر تيار كهربي في هذه الدائرة. في هذه الحالة تُعرَف الوصلة الثُّنائية بأنها «موصَّلة عكسيًّا».

دعونا الآن نعكس قطبية مصدر الطاقة في الدائرة، كما هو موضَّح في الشكل الآتي.



في هذه الحالة، أصبح الجانب p موصَّلًا بالطرف الموجب، والجانب n موصَّلًا بالطرف السالب.

وكما هو موضَّح في الشكل الآتي، تتنافر الإلكترونات الحرة في الجانب n مع الطرف السالب، وهو ما يدفعها باتجاه منتصف الوصلة. ومن ثَم، يتغلب هذا «الدفع» على الحاجز في الوصلة الثُّنائية، ما يسمح للإلكترونات بالعبور إلى الجانب الآخر وملء الفجوات.

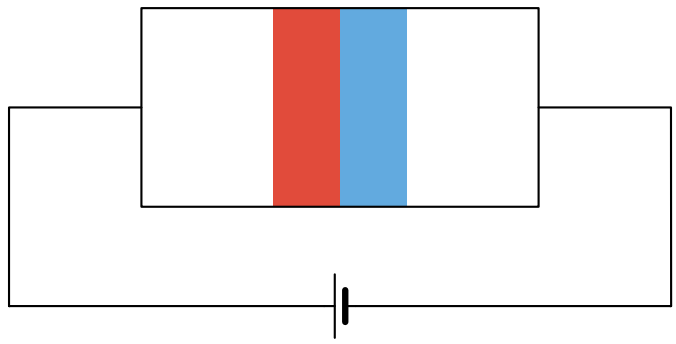


بما أن الإلكترونات أصبحت قادرة الآن على تجاوُز الحاجز، فإن التيار يمر في هذه الدائرة. ويُشار إلى توصيل الوصلة الثُّنائية بهذه الطريقة بأنه «توصيل أمامي».

إن هذه الخواص المميزة للوصلات الثُّنائية هي التي تجعلها مفيدة في حال إذا ما أردنا السماح للتيار بالمرور في اتجاه واحد دون الآخر في الدوائر الكهربية. تُمثِّل الوصلات الثُّنائية أساسًا لمكوِّن يُعرف باسم **الدايود**. ويعمل الدايود في الدائرة عمل الصمام؛ فعندما يوصَّل الدايود توصيلًا أماميًا، يستطيع التيار المرور عَبْره، وعندما يوصَّل توصيلًا عكسيًا، فلا يستطيع التيار المرور عَبْره.

مثال ٣: تحديد إذا ما كانت الوصلات الثُّنائية موصَّلة توصيلًا أماميًا أم عكسيًا

يوضِّح الشكل وصلة ثُنائية في دائرة كهربية. يوضِّح الجانب الموجب الشحنة لمنطقة النضوب في الوصلة الثُّنائية باللون الأحمر، والجانب السالب الشحنة باللون الأزرق. هل الوصلة موصَّلة أماميًا أم عكسيًا؟



الحل

لدينا دائرة مكوَّنة من مصدر طاقة ووصلة ثُنائية. يقع الجانب الموجب الشحنة لمنطقة النضوب على اليسار، والجانب السالب الشحنة على اليمين. تَذكَّرْ أن المنطقة الموجبة الشحنة تتكوَّن نتيجة انتقال الإلكترونات الحرة من هذا الجانب عبر

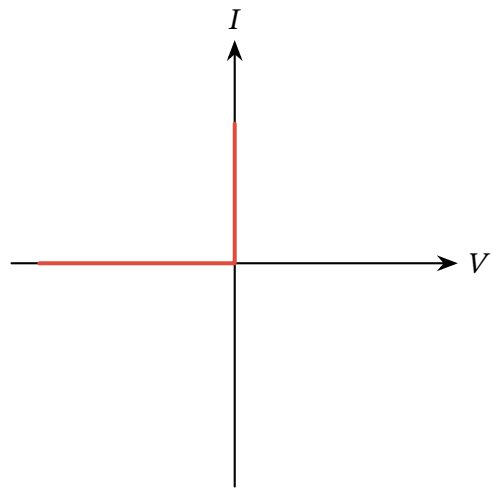
الحد الفاصل لملء الفجوات في الجانب الآخر. ومن ثَم، يكون الجانب الأيسر هو الجانب n، أو الجانب الذي يحتوي على إلكترونات حرة.

تَذكَّر أيضًا أن التيار الاصطلاحي هو تدفُّق الشحنة الموجبة من الطرف الموجب إلى الطرف السالب؛ أيْ في اتجاه عقارب الساعة في هذه الدائرة. هذا يعني أن تدفُّق الإلكترونات سيكون في عكس اتجاه عقارب الساعة. ومن ثَم، نجد أن الإلكترونات تنتقل إلى الجانب p على اليمين؛ حيث تلتئم مع الفجوات وتقوِّي الجانب السالب الشحنة لمنطقة النضوب. يعمل هذا على تكوين حاجز يتنافر مع الإلكترونات الإضافية. يحدث العكس مع الجانب p؛ حيث تتنافر الفجوات مع الطرف الموجب الشحنة، وهو ما يقوِّي الحاجز في هذا الجانب.

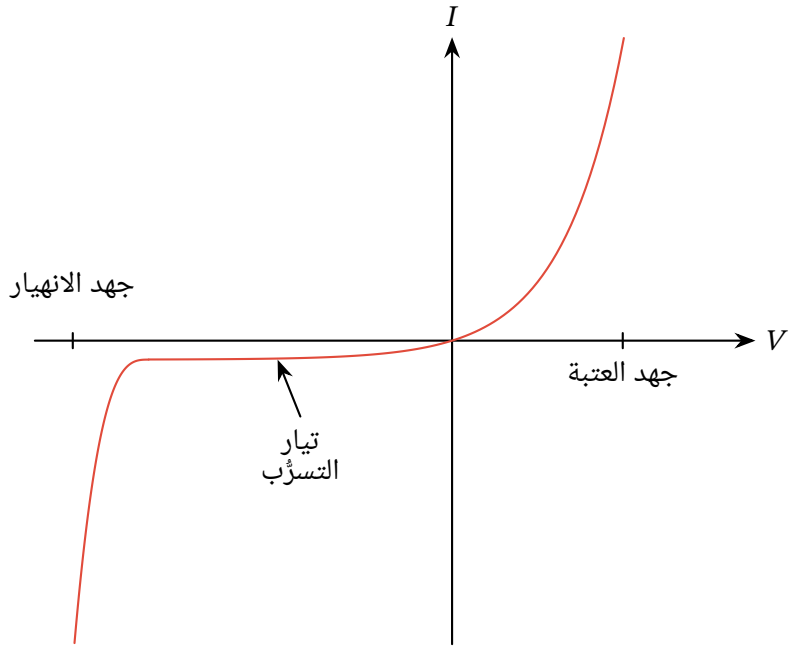
هذا الحاجز المقوَّى يُعيق مرور التيار؛ ولذا تكون الوصلة موصَّلة عكسيًّا.

إذا كان لدينا دائرة كهربية تحتوي على وصلة ثُنائية يتغير فرق الجهد عَبْرها، فكيف سيؤثِّر ذلك على شدة التيار؟ يمكننا ملاحظة ذلك في التمثيل البياني لشدة التيار مقابل الجهد، أو منحنى *V-I*.

إذا كانت الوصلة تعمل بمثابة مفتاح، فربما نتوقع أن يبدو التمثيل البياني كما هو موضَّح. حيث تكون شدة التيار صفرًا عندما تكون الوصلة موصَّلة عكسيًّا (يدل عليها الجهد السالب)، وعندما يكون الجهد موجبًا، يمر التيار.



نطلق على هذا الدايود «الدايود المثالي». لكن من الناحية العملية، لا تعمل الدايودات بشكل مثالي. فمنحنى *V-I* للدايود الحقيقي يبدو كالآتي.



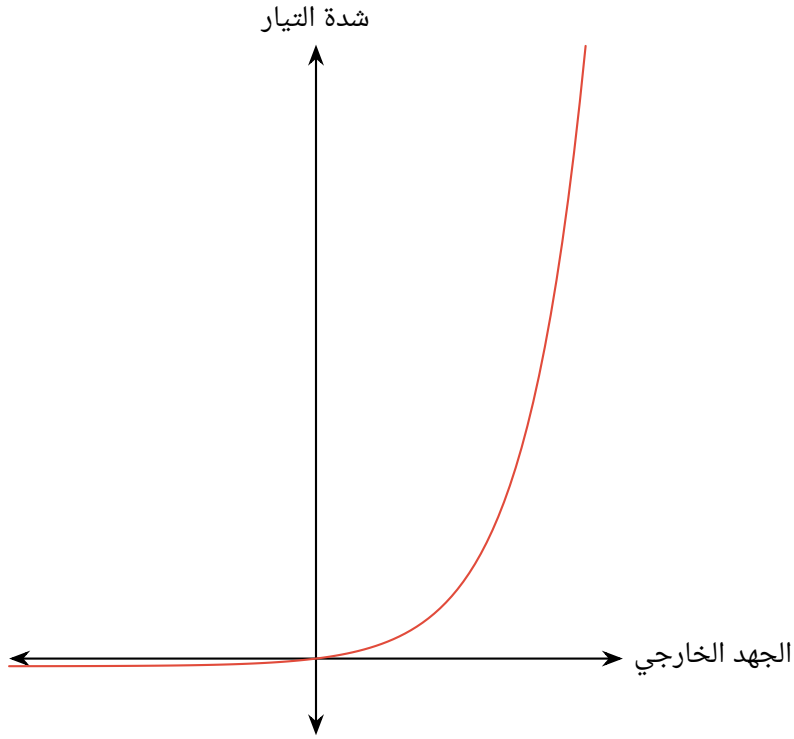
هنا، عندما يكون الجهد سالبًا (أو الوصلة موصَّلة عكسيًّا)، تكون شدة التيار المار مساوية تقريبًا، وليس تمامًا، للصفر. وتكون شدة التيار الصغيرة تلك سالبة؛ لتوضيح أن اتجاه التيار معاكس لاتجاهه في حالة التوصيل الأمامي. وعندما يكون الجهد السالب كبيرًا بما يكفي، تنهار الوصلة وتتوقف عن إعاقة التيار. ويُعرَف الجهد الذي يحدث عنده ذلك بـ «جهد الانهيار».

عندما توصَّل الوصلة أماميًّا، لا يسمح الدايود الحقيقي بمرور تيار كبير على الفور. فهناك ما يُسمى بجهد العتبة، وهو الجهد الذي إن قل عنه الجهد المطبَّق، مرَّ تيار صغير، وإن زاد عنه الجهد المطبَّق، مرَّ تيار كبير.

في المثال الأخير، سنتدرب على تفسير التمثيل البياني لشدة التيار مقابل الجهد لوصلة ثُنائية.

مثال ٤: فهْم التمثيلات البيانية لشدة التيار مقابل الجهد لوصلة ثُنائية

يوضِّح التمثيل البياني شدة التيار المار خلال وصلة ثُنائية مقابل الجهد الخارجي المُطَبَّق على الوصلة. في التمثيل البياني منطقةٌ تكون شدة التيار فيها صفرًا تقريبًا. هل تتوافق هذه المنطقة مع توصيل الوصلة الثُّنائية توصيلًا أماميًّا، أم توصيلًا عكسيًّا؟



الحل

يوضِّح التمثيل البياني ما يحدث للتيار أثناء مروره عبر وصلة ثُنائية مع زيادة الجهد. عندما يكون الجهد سالبًا، تكون شدة التيار سالبة ومنخفضة. وعندما يكون الجهد موجبًا، تكون شدة التيار موجبة أيضًا وتزداد سريعًا بزيادة الجهد.

يتناول السؤال المنطقة التي تكون شدة التيار فيها صفرًا تقريبًا. تشير هذه المنطقة إلى الجزء الذي يكون فيه الجهد سالبًا وشدة التيار سالبة أيضًا ولكنها قريبة للغاية من الصفر. في هذه المنطقة، تكون مقاومة الوصلة الثُّنائية عالية جدًّا؛ بحيث تعيق مرور أيِّ تيار تقريبًا. وعند عكس قطبية الجهد الخارجي المطبَّق، لا يكون للوصلة الثُّنائية أيُّ مقاومة تقريبًا؛ وعليه، تكون شدة التيار مرتفعة للغاية. وهذا يتوافق مع توصيل الوصلة عكسيًّا ثم أماميًّا على الترتيب. إذن، حيث تكون شدة التيار صفرًا تقريبًا، تكون الوصلة الثُّنائية موصَّلة عكسيًّا.

النقاط الرئيسية

- يتركب الدايود من وصلة ثُنائية بين نوعين من أشباه الموصِّلات المطعَّمة؛ النوع p والنوع n.
- كلٌّ من أشباه الموصِّلات من النوع p والنوع n متعادل كهربيًّا.
- تحتوي المنطقة p على فجوات تنقل الشحنة، أما في المنطقة n، فتُحمَل الشحنة بواسطة الإلكترونات الحرة.
- في الوصلة الثُّنائية، تتحرك الإلكترونات الحرة من الجانب n إلى الجانب p لملء بعض الفجوات. وينتُج عن ذلك منطقة نضوب مجاورة للحد الفاصل.
- تعمل منطقة النضوب عمل حاجز يمنع أيَّ إلكترونات إضافية من عبور الحد الفاصل.
- عندما تكون الوصلة الثُّنائية موصَّلة عكسيًّا، تملأ الإلكترونات الفجوات وتُقوِّي الحاجز في منطقة النضوب؛ فلا يُسمح بمرور التيار.

- عندما تكون الوصلة الثُّنائية موصَّلة أماميًا، يصبح بإمكان الإلكترونات الحرة التغلُّب على الحاجز في منطقة النضوب؛ فيُسمح بمرور التيار.