

Direct conversion of sunlight (photovoltaic systems)

1. المقدمة

قد يرتبط مستوى المعيشة في مجتمع ما من خلال استهلاكه للكهرباء، ومن ثم، فإن الكهرباء هي المورد الأكثر أهمية لتطور الحضارات الإنسانية. هناك مصادر متنوعة للحصول على الكهرباء، من خلال طرق توليد مختلفة مثل احتراق الوقود الأحفوري، الممتد إلى أنظمة المفاعلات النووية. ومن بين مصادر الطاقة المتعددة، فإن ضوء الشمس هو المصدر النظيف والأمن والأكثر وفرة للحصول على الطاقة الكهربائية اللازمة للنمو الاقتصادي بشكل مستدام.

وقد اكتشف الفيزيائي الفرنسي ألكسندر إدموند بيكريل في عام 1839 أن التأثير الكهروضوئي (PV) قابل للتطبيق لاستخراج الطاقة الكهروضوئية أو الطاقة الكهربائية مباشرة من ضوء الشمس. ويمكن ملاحظة هذا التأثير في المواد شبه الموصلة التي تتميز بتوصيلها الكهربائي الوسيط بين الموصل والعازل. تقوم إلكترونات المواد شبه الموصلة بامتصاص الفوتونات التي تصل إلى المادة من خلال الإشعاع الساقط، ونتيجة لذلك ينتقل الإلكترون إلى حالة طاقة أعلى. ويمكن أن تبدأ هذه الإلكترونات في الحركة داخل المادة بعد كسر اصطناعي إذا تجاوزت حالة طاقتها فجوة الطاقة للمادة، أي قيمة العتبة. ونتيجة لذلك، يحدث فرق الجهد بين الطرفين ويبدأ تيار كهربائي في التدفق في الدائرة.

2. ولادة الخلايا الشمسية الحديثة

في عام 1953، أنشأت مختبرات بيل مشروعاً بحثياً لتوفير الكهرباء للأجزاء النائية من العالم التي لا تتوفر فيها شبكة كهرباء. واقترح العالم الرائد، داريل تشابين (Darryl Chapin)، استخدام الخلايا الشمسية. في ذلك الوقت، تم تسويق التأثير الضوئي في السيليونيوم، الذي اكتشف في سبعينيات القرن التاسع عشر، لقياس شدة الضوء للتصوير الفوتوغرافي. يتم ترسيب طبقة من السيليونيوم على قاعدة نحاسية، ثم تغطي بطبقة شبه شفافة من الذهب. عندما يضيء الجهاز بالضوء المرئي، يتولد جهد كهربائي يولد بدوره تياراً كهربائياً. ويتناسب التيار الكهربائي مع شدة الضوء. وقد كانت أداة قياسية في النصف الأول من القرن العشرين للمصورين لقياس ظروف الإضاءة.

3. مراجعة خصائص أشباه الموصلات Review of Semiconductor Properties

3.1 حزم الطاقة في المواد الصلبة:

في المواد الصلبة البلورية، تكون الذرات مرتبة في نمط منتظم، مما يؤدي إلى تكوين حزم طاقة للإلكترونات. وتمثل حزم الطاقة هذه التي يمكن أن تشغلها الإلكترونات. وتوجد بين هذه الحزم مناطق محظورة تسمى فجوات الطاقة (band gaps) أو فجوات الحزم، حيث لا توجد حالات إلكترونية مسموح بها.

أنواع حزم الطاقة:

حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل: (Valence and Conduction Bands) في أشباه الموصلات أو العوازل، يوجد عادةً حزمتان رئيسيتان: حزمة التكافؤ (وهي مملوءة بالإلكترونات) وحزمة التوصيل (وهي فارغة أو مملوءة جزئيًا بالإلكترونات). وتسمى فجوة الطاقة بين هذين الحزمتين بفجوة الحزمة أو الفجوة المحظورة.

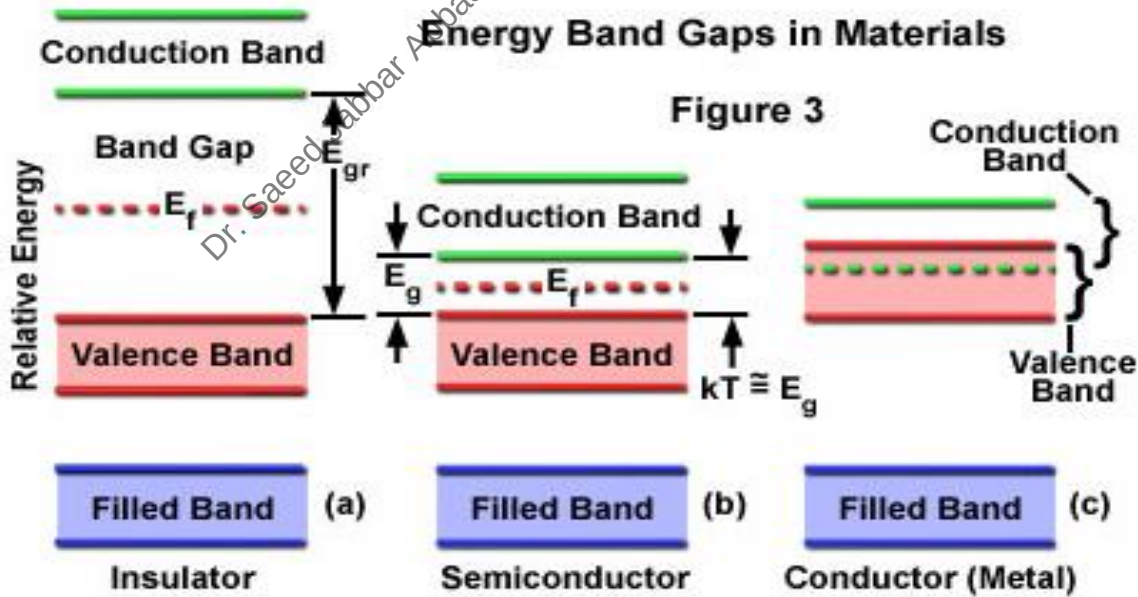
الفجوة المحظورة (فجوة الطاقة): غالبًا ما يشار إلى فجوة الطاقة بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل باسم فجوة الطاقة المحظورة لأن الإلكترونات لا يمكن أن توجد في هذه المنطقة في الظروف العادية. يجب أن تكتسب الإلكترونات طاقة كافية للانتقال من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل.

أنواع المواد بناءً على فجوات الطاقة:

أشباه الموصلات: تحتوي على فجوة حزمة معتدلة (مثل السيليكون أو الجرمانيوم) ويمكنها توصيل الكهرباء في ظروف معينة (مثل عندما يتم توفير الطاقة على شكل حرارة أو ضوء).

العوازل: لديها فجوة طاقة كبيرة محظورة (مثل الماس أو المطاط)، ولا يمكن للإلكترونات الانتقال بسهولة من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل في الظروف العادية.

الموصلات (المعادن): لا تحتوي على فجوة حزمة كبيرة؛ حيث تتداخل حزمة التكافؤ مع حزمة التوصيل، مما يسمح للإلكترونات بالتدفق بحرية.



الشكل (1): - يوضح حزم الطاقة في المواد: (a) العوازل (b) أشباه الموصلات (c) الموصلات

فجوة الطاقة المحظورة في ميكانيكا الكم:

وفقاً لميكانيكا الكم، لا يمكن للإلكترونات في المادة أن تشغل سوى مستويات طاقة منفصلة معينة. وتشكل مستويات الطاقة المسموح بها هذه حزم في المادة الصلبة، بينما تُعرف المناطق الواقعة بين الحزم (حيث لا يُسمح بحالات إلكترونية) بفجوات الطاقة المحظورة.

أهمية فجوات الطاقة المحظورة:

يحدد حجم فجوة الطاقة المحظورة الخصائص الكهربائية والبصرية..... الخ، للمادة. تسمح الفجوة الصغيرة (كما هو الحال في أشباه الموصلات) بالتحكم في حركة الإلكترونات، مما يجعل هذه المواد مناسبة للأجهزة الإلكترونية مثل الترانزستورات والثنائيات. فجوة الطاقة المحظورة مهمة أيضاً في تحديد كيفية تفاعل المادة مع الضوء. فعندما تمتص الإلكترونات في مادة ما الطاقة (من الفوتونات على سبيل المثال)، يمكنها القفز عبر الفجوة المحظورة من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل، مما يؤدي إلى ظواهر مثل التوصيلية الضوئية أو الامتصاص الضوئي أو الظاهرة الكهروضوئية (photovoltaic).

3.2 أشباه الموصلات

أشباه الموصلات هو المصطلح العام للمواد ذات التوصيل الكهربائي بين الموصلات (مثل النحاس والألمنيوم) والعوازل (مثل المطاط والزجاج). من بين 92 عنصراً، يمكن استخدام عدد قليل فقط من العناصر الـ 92 كمادة شبه موصلة (الموضحة في الشكل أدناه). ويعد السيليكون والجرمانيوم والسيلينيوم أمثلة على المواد التي تعد أشباه موصلات. ومن بين هذه المواد، كان السيليكون ولا يزال أكثر أشباه الموصلات شيوعاً. ولها تطبيقات تجارية واسعة الانتشار ومتاحة بسهولة.

Element(s)	Material
Single	Si, Ge
Compound	Group II-VI ZnSe CdTe
	Group III-V GaAs InGaP InP
	Group IV-IV SiC

Group II	Group III	Group IV	Group V	Group VI
Be Beryllium	B Boron	C Carbon	N Nitrogen	O Oxygen
Mg Magnesium	Al Aluminum	Si Silicon	P Phosphorus	S Sulfur
Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Selenium
Cd Cadmium	In Indium	Sn Tin	Sb Antimony	Te Tellurium
Hg Mercury	Tl Thallium	Pb Lead	Bi Bismuth	Po Polonium

الشكل (1): - أشباه الموصلات في الجدول الدوري (العناصر)، مركبات أشباه الموصلات الناتجة من اتحاد العناصر

أشباه الموصلات المركبة

أشباه الموصلات المركبة هي أشباه موصلات مصنوعة من عنصرين أو أكثر. يُصنع السيليكون من عنصر واحد، وبالتالي فهو ليس شبه موصل مركب. وتتكون معظم أشباه الموصلات المركبة من توليفات من عناصر من المجموعتين الثالثة والخامسة من الجدول الدوري للعناصر (GaAs و GaP و InP وغيرها). وتُصنع أشباه الموصلات المركبة الأخرى من المجموعتين الثانية والسادسة (CdTe و ZnSe وغيرها). ومن الممكن أيضاً استخدام عناصر مختلفة من نفس المجموعة (الرابعة) لصنع أشباه موصلات مركبة مثل SiC. ويمكن ان تصنع من ثلاثة أو أربع مركبات.

أشباه الموصلات البوليمرية

أجهزة أشباه الموصلات المصنوعة من البوليمر الاصطناعي (synthetic polymers) مثل الثنائي الباعث للضوء أو الترانزستور. هذه "البوليمرات المترافقة" (conjugated polymers) عبارة عن مادة بلاستيكية تتحول من عازل إلى شبه موصل بعد تشوبها. تعتبر "الإلكترونيات البلاستيكية" أبسط بكثير في صنعها لأنه يمكن طباعتها بدلاً من تصنيعها عبر عملية التصنيع الضوئي (photomasking process) الشاقة. كما أن المنتجات المصنوعة من أشباه الموصلات المصنوعة من البوليمر أكثر مرونة ويمكن تشكيلها في أجهزة قابلة للانحناء مثل المواد البلاستيكية بشكل عام، حيث يمكن أن تنكسر الإلكترونيات العادية.

تصنيف اشباه الموصلات بصورة عامة الى:

أ- اشباه موصلات نقية

ب- اشباه موصلات غير نقية أو مشوبة

ت- يمكن تصنيفها حسب نوع المادة الى العضوية وغير العضوية

ث- تصنيف حسب فجوة الطاقة (مباشرة، غير مباشرة)

هناك طريقتان لتعريف أشباه الموصلات النقية. بكلمات بسيطة، هو شبه الموصل الذي يتكون من مادة شبه موصلة نقية للغاية. وفي المصطلحات الأكثر تقنية، يمكن القول بأن أشباه الموصلات النقية هي تلك التي يكون فيها عدد الفجوات مساوياً لعدد الإلكترونات في حزمة التوصيل.

ميزة أخرى لأشباه الموصلات النقية هي أن مستوى فيرمي من هذه المواد يقع في مكان ما بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل، مصطلح مستوى فيرمي، يشير إلى ذلك المستوى من الطاقة حيث يكون احتمال العثور على إلكترون 0.5 أو نصف (تذكر أن الاحتمال يقاس على مقياس من 0 إلى 1).

التشويب أو التطعيم Doping

يشير مصطلح التشويب في أشباه الموصلات إلى عملية إضافة كميات صغيرة من الشوائب (dopants) اختياريًا إلى مادة شبه موصلة نقية (مثل السيليكون أو الجرمانيوم) لتعديل خواصها. ويتم ذلك لتعزيز خواص المادة أو تحسينها، وهو أمر ضروري لعمل أجهزة أشباه الموصلات مثل الثنائيات والترانزستورات والدوائر المتكاملة.

ولكي نكون أكثر تحديدًا، تُعرف الشوائب باسم المنشطات أو عوامل المنشطات. يجب أن نضع في اعتبارنا أن إضافة مثل هذه الشوائب ضئيلة للغاية ويمكن أن يكون تركيز المادة المشوبة النموذجية في حدود جزء واحد في مائة مليون جزء أو ما يعادل 0.01 جزء في المليون.

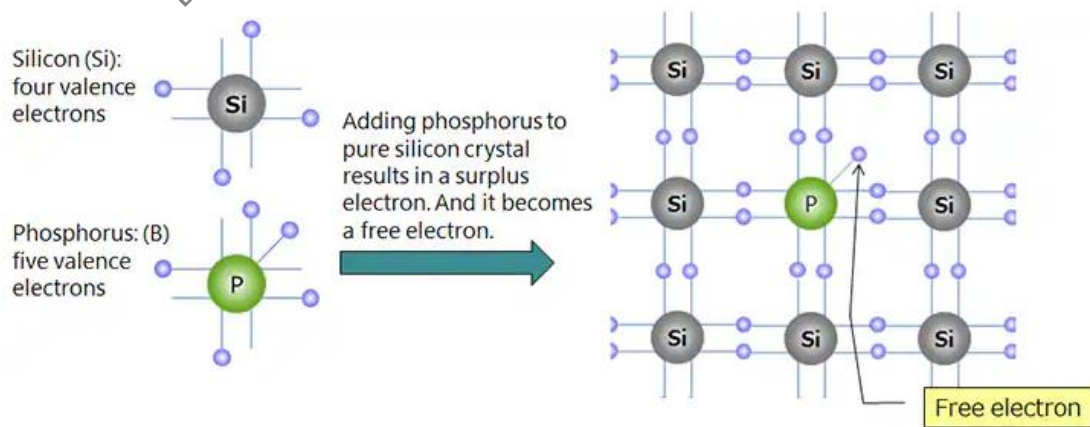
أنواع التشويب: ذرات الشوائب المضافة إلى أشباه الموصلات. يتم اختيارها بناءً على ما إذا كانت تمنح إلكترونات حرة (مانحات : Donors) أو تخلق فجوات (مقبلات: Acceptors).

كيف يعمل تطعيم أشباه الموصلات؟

كما ذكرنا بإيجاز أعلاه، ينطوي التطعيم على إدخال كميات صغيرة من الذرات الغريبة، المعروفة باسم الشوائب في مادة شبه موصلة لتغيير خواصها. هناك نوعان رئيسيان من التطعيم هما:

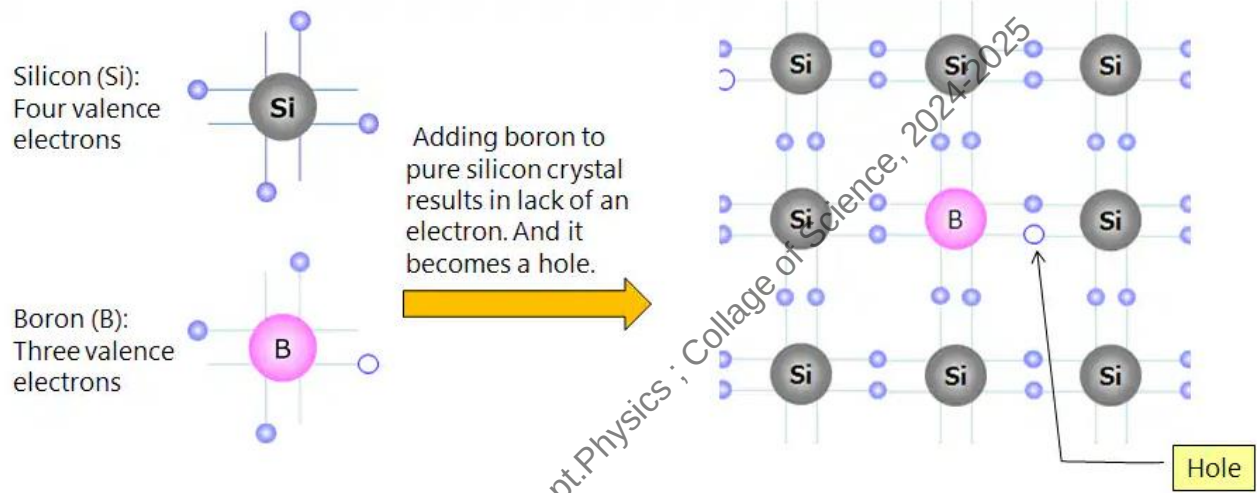
التطعيم من النوع N: التطعيم من النوع N: تضيف ذرات مانحة مع إلكترونات إضافية. **والنتيجة:** تصبح الإلكترونات الحرة حاملات الأغلبية.

بالنسبة إلى السيليكون: يتضمن هذا النوع إضافة ذرات خماسية التكافؤ (ذرات تحتوي على 5 إلكترونات تكافؤ) مثل الزرنيخ (As) إلى شبه الموصل. وتحتوي هذه الذرات على إلكترون تكافؤ واحد أكثر من السيليكون. عندما يتم إدخال الشوائب التي تحتوي على 5 إلكترونات تكافؤ في بلورة السيليكون، فإنها تخلق إلكترونات حرة إضافية تزيد من توصيلية المادة بشكل كبير. يحتوي السيليكون النقي على أربع إلكترونات تكافؤ في غلافه الخارجي، مما يشكل روابط تساهمية مع أربع ذرات سيليكون مجاورة.



عندما يتم إدخال مادة منشّطة خماسية التكافؤ مثل الفوسفور، فإنها تحل محل ذرة السيليكون ويكون الفوسفور أربع روابط تساهمية مع ذرات السيليكون المحيطة به باستخدام إلكترونات التكافؤ الأربعة الخاصة به. ويظل إلكترون التكافؤ الخامس في الفوسفور مرتبطاً ارتباطاً غير وثيق ويتطلب الحد الأدنى من الطاقة ليصبح إلكترونًا حرًا. يمكننا افتراض أن جميع ذرات الفوسفور تقريباً تساهم بالإلكترون حر. ولذلك، فإن تركيز الإلكترونات الحرة (n) الناتجة عن التطعيم يساوي تقريباً تركيز المادة المشوبة:

التطعيم من النوع P: يتضمن ذلك إضافة ذرات ثلاثية التكافؤ (ذرات تحتوي على 3 إلكترونات تكافؤ) مثل الكاليوم (Ga) إلى شبه الموصل. تحتوي هذه الذرات على إلكترون تكافؤ أقل بالإلكترون واحد من السيليكون.



كيف تعمل الشوائب من النوع P: يحتوي السيليكون النقي على أربع إلكترونات تكافؤ للترابط مع جيرانه عندما يتم إدخال مادة مشوبة ثلاثية التكافؤ، مثل البورون (B)، فإنها تحل محل ذرة السيليكون. يكون البورون روابط تساهمية مع ثلاث ذرات سيليكون محيطة باستخدام إلكترونات التكافؤ الثلاثة الخاصة به. وهذا يترك فراغاً (فجوة) في الشبكة البلورية حيث يجب أن تكون الرابطة الرابعة.

الغرض من التطعيم:

- زيادة التوصيلية: أشباه الموصلات النقية (intrinsic) هي موصلات ضعيفة، لكن التطعيم يسمح بتحكم أفضل في توصيلها، مما يجعلها مفيدة في الأجهزة الإلكترونية.
- التحكم في الخصائص الكهربائية: من خلال ضبط تركيز الشوائب ونوعها، يمكن ضبط خصائص أشباه الموصلات مثل التوصيل وحركية الإلكترون وبنية حزمة الطاقة لتطبيقات محددة.

- إنشاء وصلات p-n junctions: يعد التطعيم أمراً بالغ الأهمية في تشكيل وصلات p-n، التي تشكل أساس العديد من أجهزة أشباه الموصلات مثل الثنائيات والخلايا الشمسية والترانزستورات والخلايا الشمسية.

المواد المضافة: عادةً السيليكون (Si) أو الجرمانيوم (Ge) أو أشباه الموصلات المركبة مثل زرنيخيد الكاليوم (GaAs).

*التشويب بالفوسفور (P) من المجموعة الخامسة في السيليكون (Si) من المجموعة الرابعة يصنع أشباه موصلات من النوع n.

* التشويب بالبورون (B) من المجموعة الثالثة في السيليكون (Si) من المجموعة الرابعة يصنع أشباه موصلات من النوع p.

حاملات الشحنات في أشباه الموصلات

في أشباه الموصلات النقية غير المشوبة، يكون عدد الإلكترونات في حزمة التوصيل مساوياً لعدد الفجوات في حزمة التكافؤ. وتسمى هذه الإلكترونات والفجوات حاملات الشحنة الذاتية. وعندما يتم إدخال شوائب في شبه موصل، ينتج عن ذلك فائض إما من الإلكترونات لتكوين شبه موصل من النوع n وتصبح حاملات أغلبية وفجوات لتكوين شبه موصل من النوع p وتصبح أغلبية. تُعرف حاملات الشحنة الزائدة هذه باسم حاملات الشحنة الخارجية.

التأثير على التوصيلية

تعمل الإلكترونات الحرة الإضافية كحاملات شحنات سالبة، مما يزيد بشكل كبير من التوصيلية الكهربائية لبلورة السيليكون. ويمكنها أن تتحرك بحرية داخل البلورة تحت مجال كهربائي مسطح، مما يسمح بتدفق التيار بشكل أسهل.

حركة الفجوة والتوصيلية

يمكن للإلكترونات الموجودة في ذرات السيليكون المجاورة أن "تقفز" إلى الفجوة (الفارغة) لتكوين رابطة تساهمية. تخلق هذه الحركة فجوة جديدة في الموضع الأصلي للإلكترون. وتؤدي عملية ملء الإلكترونات للفجوات هذه إلى تدفق شحنة موجبة (بما أن الفجوة نفسها يعمل كحامل موجب) عبر البلورة تحت مجال كهربائي. تعمل هذه "الفجوات" كحاملات شحنات موجبة وتساهم بشكل كبير في التوصيلية الكهربائية للسيليكون المشوب. عندما يتم تسليط مجال كهربائي، تسمح حركة هذه الفجوات بتدفق التيار الكهربائي.

تتضمن عملية التشويب عادةً عدة خطوات:

1. إدخال الشوائب (Dopants)

يمكن إدخال الشوائب في مواد أشباه الموصلات من خلال طرق مختلفة مثل الانتشار أو زرع الأيونات أو صناعة السبائك. ويتضمن الانتشار وضع أشباه الموصلات في بيئة غازية تحتوي على الذرات المراد التشويب بها عند درجات حرارة عالية مما يسمح لذرات الشوائب بالانتشار في البلورة.

أما الزرع الأيوني فيستخدم شعاعاً من أيونات المادة المشوبة التي يتم تسريعها إلى سطح شبه الموصل، مما يؤدي إلى دمج الأيونات في البنية البلورية.

2. التلدين Alloying

بعد إضافة ذرات الشائبة يتم تسخين أشباه الموصلات إلى درجات حرارة عالية في عملية تسمى التلدين. وتساعد هذه المعالجة الحرارية المواد المشوبة على الاستقرار في المواضع الصحيحة داخل البنية البلورية. وبمجرد استقرارها في مكانها الصحيح، توفر المواد المشوبة إلكترونات أو فجوات حرة تحسن من توصيلية أشباه الموصلات.

أنواع الانتقالات الضوئية في أشباه الموصلات

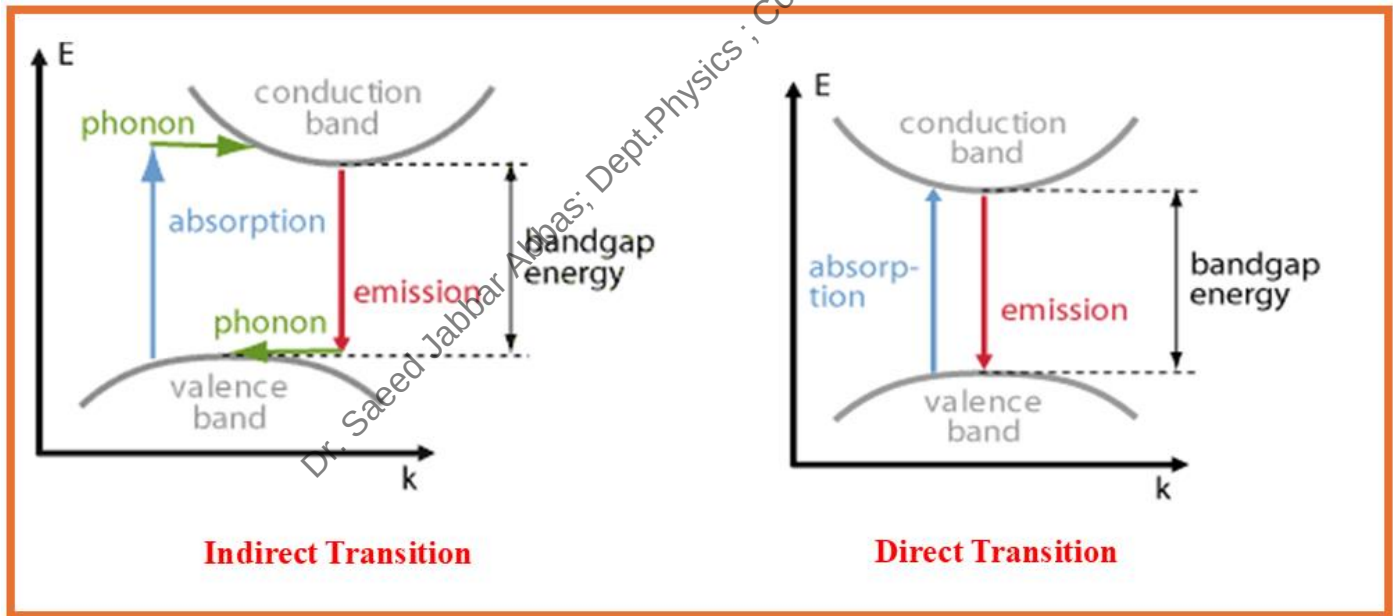
الانتقالات الضوئية في أشباه الموصلات تصف العمليات التي يتم فيها امتصاص أو انبعاث الضوء نتيجة انتقال الإلكترونات بين نطاقات الطاقة المختلفة في المادة. هناك نوعان رئيسيان من الانتقالات الضوئية في أشباه الموصلات:

Indirect Transition

Direct Transition

أ. انتقال مباشر

ب. انتقال غير مباشر



الشكل 2: في الحالات ذات فجوة الحزمة غير المباشرة، يجب أن تشارك فونونات إضافية في عمليات الامتصاص والانبعاث من أجل حفظ كمية الزخم للإلكترونات. في الحالات ذات فجوة الحزمة المباشرة، تتطابق واطئ نقطة (القعر) لحزمة التوصيل مع أعلى نقطة (القمة) للتكافؤ. ويحدث الانبعاث عادةً مع طاقات الفوتون القريبة من طاقة فجوة الحزمة، في حين أن الامتصاص ممكن أيضاً عند أطوال موجية أقصر.