مقدمة عامة

تتكون المادة من الذرات التي تحتوي على بروتونات وإلكترونات ونيوترونات، وتترتب الذرات وتجتمع لتكوّن الكتلة أو الحجم، وتعتمد خصائص المواد مثل المرونة والتماسك وقابليتها للسحب والطرق وغيرها على البُنية الداخلية لها. وفي الظروف العادية لكل مادة حالة فيزيائية معينة، قد تختلف هذه الحالة إذا تغيرت ظروف الضغط ودرجة حرارة، وكذلك لكل مادة خصائصها الكيميائية المميزة لها، ويجب معرفة ودراسة هذه الخصائص جيداً قبل التعامل مع أي مادة.

تصنيف المواد

يمكن تقسيم او تصنيف المواد الصلبة الى ثلاثة أصناف : موصلة وشبه موصلة و عازلة.

1- المواد الموصلة: وهي المواد التي يمكن لإلكترونات المدار الخارجي فيها أن تتحرر من ذر اتها وتتحرك حركة عشوائية بين الذرات، وإذا تعرضت لفرق جهد(أي الالكترونات) يتشكل تيار كهربائي. من أمثلة المواد الموصلة كهربائيا : الفضة ، النحاس ، الألمنيوم وعموم المعادن.
2- المواد شبه الموصلة:
3- المواد العازلة: وهي المواد التي تشتد فيها قوة جذب النواة لإلكترونات المدار الخارجي فلا تستطيع الخروج من الذرة. ومن أمثلة المواد العازلة للكهرباء : الورق ،الزجاج ،الميكا ، البلاستيك ، المطاط وغيرها.

المواد شبه الموصلة (اشباه الموصلات) Semiconductor

هي مواد تقع قيمة موصليتها الكهربائية بين المواد الموصلة - مثل النحاس، والذهب، وغيرها- وبين المواد العازلة، مثل الزجاج. تنخفض مقاومتها مع ارتفاع درجة الحرارة، المخالف لسلوك الفلزات. كما يمكن لمجال كهربائي خارجي تغيير درجة مقاومة شبه الموصل.

ان ذرات المواد الصلبة مترابطة فيما بينها بطرق عديدة فهي اما ان تفقد الكترون لينتقل الى ذرة اخرى او تكتسب الكترون من ذرة اخرى وطريقة الترابط هذه تدعى الاصرة الايونية (Ionic bond) بسبب تأين الذرات. واما ان تشترك الذرات بعدد من الكترونات التكافؤ كما يحصل في المواد شبه الموصلة وهذا ما يسمى بالاصرة التساهمية (Covalent bond). ان عرض المنطقة المحظورة او المحرمة بين حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ يختلف من مادة الى اخرى. ففي المواد العازلة تكون سمك المنطقة المحرمة عريضاً جداً ويحتاج الالكترون الى طاقة كبيرة لكي يعبر هذه المنطقة من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل. اما في المواد الموصلة فأن حزمة التكافؤ تتداخل مع حزمة التوصيل وتكون حركة الالكترونات فيها حرة مكونة ما يسمى بغاز الالكترون) (electron gas) بينما في المواد شبه الموصلة فتكون المنطقة الحرجة معتدلة وهي محصورة

بين $(0.05 \rightarrow 6)eV$ تقريباً. وقيمتها للسليكون حوالي 1.1 eV وللجرمانيوم 0.72 eV

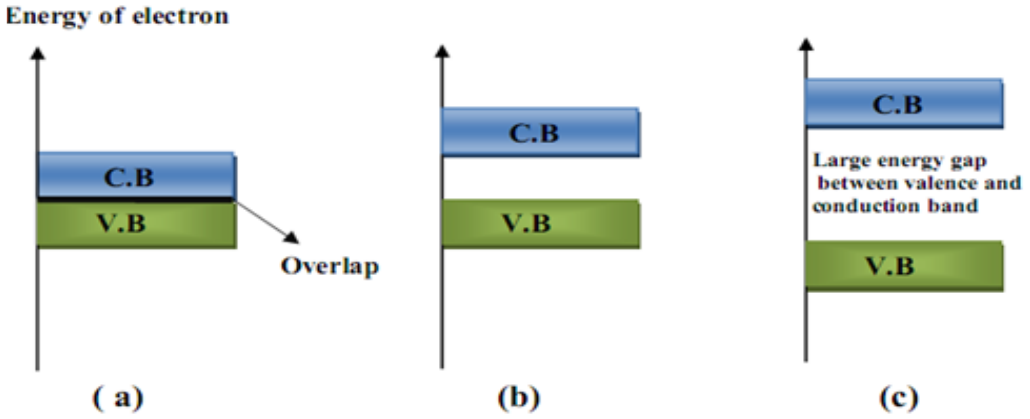
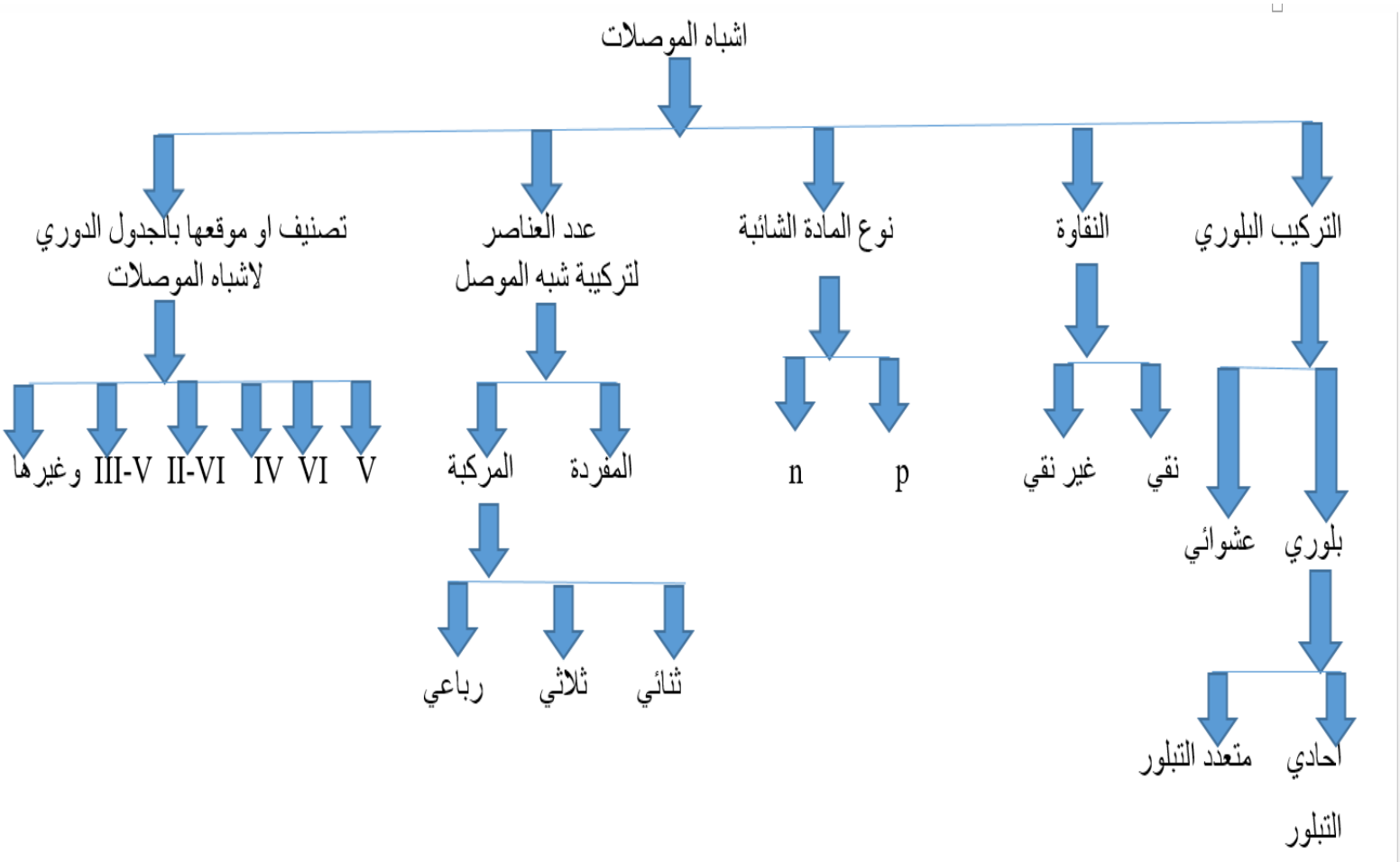


Figure (1-1) Typical energy bands a. Conductors, b. Semiconductors, c. Insulators.

ويمكن تقسيم المواد شبه الموصلة الى عدد من التصنيفات يمكن جمعها بالمخطط ادناه وحسب الاعتبارات الاتية :



شكل (1-2) مخطط يوضح انواع اشباه الموصلات وتصنيفاتها

الجدول الدوري لاشباه الموصلات

مقدمة : حسب ماتقدم من التصنيف يمكن توضيح الصنفين (حسب عدد العناصر المكونة لشيه الموصل و حسب الموقع في الجدول الدوري) وتعتبر هذا التصنيف الاهم والاعمق في دراسة المواد شبه الموصلة ومعرفة خواصها او تصنيع اجهزتها.

بدأت دراسة المواد شبه الموصلة في اوائل القرن التاسع عشر . وتم خلال السنين اللاحقة دراسة الكثير من اشباه الموصلات ويبين لنا الجدول جزء من الجدول الدوري يتضمن العناصر التي ترتبط بشبه الموصلات فالمواد شبه الموصلة المؤلفة من عنصر مفرد كالسليكون او الجيرمانيوم (Ge) تقع في العمود الرابع من الجدول ولكن هنالك عدداً كبيراً من اشباه الموصلات المؤلفة من مركبات تحتوي على عنصرين او اكثر من العناصر الكيمياوية مثل ارسنيد الكاليوم (GaAs) المؤلفة من عنصر الكاليوم من المجموعة III والزرنيخ (As) من المجموعة V من الجدول الدوري ويعرف شبه الموصل هذا بالنوع المركب V--III.

جدول (1-1) الجدول الدوري الخاص باشباه الموصلات

اشباه الموصلات المفردة : هي عناصر كيميائي تتكون من نوع واحد من العناصر الكيميائية مثل السلكون Si و الزرنيخ (ارسنايد) As . كما يبين الجدولين ادناه:

الجدول (١) جزء من الجدول الدوري الخاص بالمواد شبه الموصلة

Period	Column II	III	IV	V	VI
2		B Boron	C Carbon	N Nitrogen	
3	Mg Magnesium	Al Aluminum	Si Silicon	P Phosphorus	S Sulfur
4	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Selenium
5	Cd Cadmium	In Indium	Sn Tin	Sb Antimony	Te Tellurium
6	Hg Mercury		Pb Lead		

نلاحظ ان هناك انواع :

- 1- عناصر أشباه موصلات المجموعة 4 IV ، (C, Si, Ge, Sn)
- 2- عناصر أشباه موصلات المجموعة 5 V
- 3 - عناصر أشباه موصلات المجموعة 6 VI ، (S, Se, Te)

اشباه الموصلات المركبة : هي مركبات كيميائية تتكون على الاقل من عنصرين كيميائيين من نوعين مختلفين وقد تتكون من عنصرين مثل مركب الكاليوم ارسنايد GaAs ويسمى شبه موصل ثنائي او قد تتكون من ثلاثة عناصر مثل ارسنايد الكاليوم انديوم InGaAs ويسمى شبه موصل ثلاثي او تتكون من اربعة عناصر ليكون سبائك رباعية مثل فوسفيد الالومنيوم كاليوم انديوم AlInGaP و سبائك ارسنايد انتيمونيد فوسفيد الانديوم InAsSbP وتسمى اشباه موصلات رباعية . كما في الجدول ادناه :

الجدول (2) اشباه الموصلات من العناصر المنفردة والمركبة

Element	IV–IV Compounds	III–V Compounds	II–VI Compounds	IV–VI Compounds
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		InSb		

نلاحظ من الجدول (3) اعلاه بعض المواد شيه الموصلة المؤلفة من عنصر مفرد ومن عناصرمركبة.

نجد في العديد من اشباه الموصلات المركبة من اكثر من عنصر واحد خواص كهربائية لانجد مثلها في السليكون وتستخدم اشباه الموصلات هذه . وخصوصاً ارسنيد الكاليوم في تطبيقات الموجات الدقيقة (المايكروويف microwave) والتطبيقات الفوتوالكترونية ان تكنولوجيا اشباه الموصلات المركبة لاتضاهي تكنولوجيا السليكون من حيث درجة تطورها بل ان تطور الاولى يعود جزئياً الى تطور تكنولوجيا السليكون .

أشباه موصلات المجموعة III–V : تتبلور بدرجة عالية من القياس المتكافئ، ويمكن الحصول على معظمها في صورة النوع P والنوع n .يمتلك العديد منها قابلية تنقل عالية للناقل وفجوات طاقة مباشرة، مما يجعلها مفيدة **للإلكترونيات الضوئية**، تشبه خصائص أشباه الموصلات المركبة III-V نظيراتها من المجموعة الرابعة.

أشباه موصلات المجموعة II–VI : عادة ما تكون من النوعP، باستثناء ZnTe و ZnO اللذان ينتميان للنوع n . تميل الأيونية الأعلى في هذه المركبات، وخاصة في مركبII-VI ، إلى زيادة فجوة النطاق الأساسية فيما يتعلق بالمركبات الأيونية الأقل. [ ]

التطعيم Doping

مقدمة :

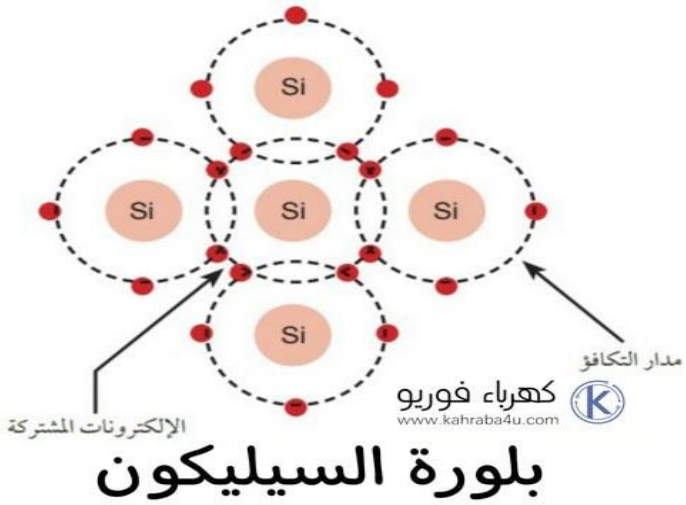
أن الإلكترونات الحرة والفجوات تنتج بواسطة الطاقة الحرارية وذلك أثناء تأثيرها في شبه الموصل النقي ، ولكن من ناحية عملية فإن الطاقة الحرارية لن تنتج إلا عدد قليل جداً من الإلكترونات والفجوات (أي تيار قليل جداً) . وحتى نزيد عدد الإلكترونات الحرة والفجوات فإننا سنعتمد على طريقة جديدة تدعى بعملية إضافة الشوائب إلى شبه الموصل (التطعيم Doping) ، وهي تعني ببساطة أنه يمكننا إضافة شوائب ذرية إلى بلورة الجرمانيوم أو السليكون . إن شبه الموصل الذي تضاف إليه الشوائب يدعى بشبه الموصل الفعلي Intrinsic Semiconductor .

شبه الموصل النقي او الذاتي او الجوهري او الفعلي Intrinsic Semiconductor : هوشبه موصل نقي وخالي من الشوائب والعيوب (في درجة الصفر المطلق) مثل السيليكون والجرمانيوم اللذان يقعان في المجموعة الرابعة من الجدول الدوري حيث انها تمتلك اربعة الكترونات في مدار التكافؤ.

شبه الموصل النقي يحتوي على عدد من الفجوات **مساو** لعدد الإلكترونات الحرة لكنه يختلف عن العازل حيث انه في درجة حرارة أعلى من الصفر المطلق هناك إمكانية محدودة أن يتحرر الإلكترون من مكانه ويترك خلفه فجوة إلكترونية لكن في درجات الحرارة الاعتيادية ينبغي أن خضع شبه الموصل النقي إلى عملية معينة

حتى يمكن استغلاله في التطبيقات الإلكترونية لإن عدد الإلكترونات في نطاق التوصيل يكون مساو لعدد الفجوات في نطاق التكافؤ.

ولتكن على دراية بأن أشباه الموصلات النقية في درجة حرارة الغرفة العادية لا توصل التيار جيدًا، بل يجب أن ترفع درجة الحرارة إلى 300 درجة مئوية على الأقل حتى تحصل على تيار معقول. ومثل درجة الحرارة هذه كفيلة أن تصهر قطعة من السيليكون مثلًا. وبالتالي لا نجد مهربًا من إضافة شوائب بتركيز منخفض للغاية لزيادة قابلية توصيل المادة.



شكل (1-3) يوضح شبه الموصل النقي

التشويب : هو نوع من التطعيم وهو إضافة كمية من ذرات مادة معينة إلى بلورة شبه الموصل النقي (تشويب) بنسب تصل إلى (1 : 1.000.000) بهدف زيادة الإلكترونات أو الثغرات الإلكترونية في البلورة. و التشويب أو التطعيم Doping هي عملية مصنعية تتم لتحويل نبيطة شبه الموصل من كونها شبه موصل نقية (ذاتية) لتصبح شبه موصل مشوب(غير ذاتي) عن طريق إضافة إلى النبيطة في سبيل خلق فجوة إلكترونية أو لإيجاد إلكترون حر.

الشوائب : ذرات عناصر غريبة تسمى بالشوائب (*impurities*).

س/ لماذا الشوائب ؟

ج/ فوجود الشوائب في شبه الموصل يزيد من موصليتها ويسيطر عليها من خلال كمية الشوائب المضافة ويختصر الاعتماد على درجة الحرارة ويؤدي الى ظهور نوع واحد من حاملات الشحنة واختفاء او تضاؤل النوع الاخر.

❖ هناك نوعين من الشوائب، شوائب **تزيد من عدد الإلكترونات الحرة** وتقلل عدد الفجوات تسمى مادة **مانحة** [لأنها مادة خماسية التكافؤ تمنح إلكترونًا إضافيًا لمادة السيليكون] ، وشوائب أخرى **تزيد من عدد الفجوات** وتقلل عدد الإلكترونات الحرة تسمى مادة **مستقبلة** [لأنها مادة ثلاثية التكافؤ تستقبل إلكترونًا حرًا من بللورة السيليكون]].8[

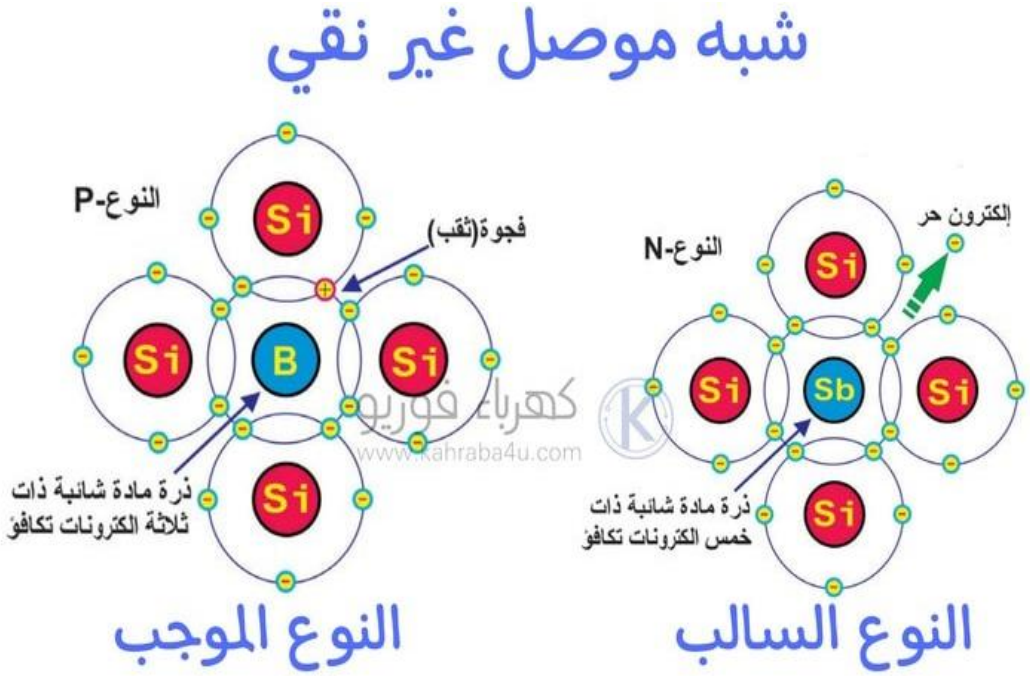
❖ تؤثر الشوائب على المنطقة المحرمة لشبه الموصل حيث تقللها بسبب استحداث مستوى المانح او الواهب *(donor level)* الذي يقع اسفل حزمة التوصيل فيزاح مستوى فيرمي نحو حزمة التوصيل ضمن المنطقة المحرمة.

❖ ويتراوح تأثير هذه الشوائب على زيادة قابلية توصيل أشباه الموصلات من 100000 مرة إلى 10000000 مرة في درجة حرارة الغرفة [25°C] .

❖ يمكننا صناعة قطعة سيليكون مضافًا إليها شوائب مادة مانحة، ونسمي تلك المادة N-type، وبالمثل يمكن إضافة شوائب مادة مستقبلة لمادة السيليكون ونسميها في هذه الحالة P-type.

شبه الموصل المشوب او غير النقي او اللاذاتي *Extrinsic or Doped Semiconductors*:

هي مواد شبه موصلة مضاف إليها ذرات من عناصر ثلاثية أو خماسية التكافؤ مثل الفسفور والجاليوم بهدف زيادة عدد الإلكترو نات الحرة في المواد شبه الموصلة، و بالتالي زيادة قدرتها على التوصيل.



شكل (1-4) شبه الموصل غير النقي

س: لماذا عملية التطعيم ؟

ج/ في الاجهزة الالكترونية من الضروري السيطرة على موصلية المواد لتؤدي الاغراض المطلوبة. ولهذا السبب تعالج او تشوب (تطعم) المواد شبه الموصلة النقية مثل السيليكون بأضافة كميات قليلة من ذرات عناصر غريبة تسمى بالشوائب *(impurities)*. فوجود الشوائب في شبه الموصل يزيد من موصليتها ويسيطر عليها من خلال كمية الشوائب المضافة ويختصر الاعتماد على درجة الحرارة ويؤدي الى ظهور نوع واحد من حاملات الشحنة واختفاء او تضاؤل النوع الاخر. وهناك نوعين من اشباه الموصلات غير النقية : نوع **سالب** ***(n-type)*** ونوع **موجب** ***(p-type)***.

اما حالة اللاتزان فتحدث عند ادخال حاملات إضافية الى شبه الموصل اذ تصبح $pn > n_i^2$ وتدعى الحاملات الإضافية **بالحاملات الفائضة** excess carriers. وتعرف عملية ادخال الحاملات الإضافية **بحقن الحاملات** ويمكن الحقن بأستخدام طرائق عديدة منها: **التهيج البصري optical excitation والانحياز الامامي لمفرق p-n.**

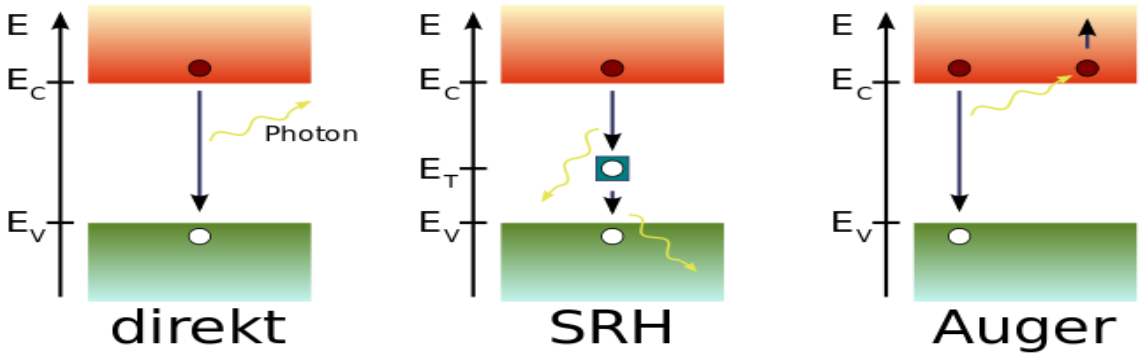
- يتحدد مستوى الحقن حسب كثافة الحاملات الفائضة بالمقارنة بكثافة الحاملات الأغلبية. وعليه سيكون هناك نوعيين او مستوويين للحقن : الأول وهو الحقن **واطيء المستوى low-level injection** الذي تكون فيه كثافة الحاملات الفائضة صغيرة مقارنة بكثافة التطعيم.

والمستوى الثاني هو **الحقن عالي المستوى high-level injection** اذ تكون في هذه الحالة كثافة الحاملات الفائضة مقاربة او اكبر من كثافة الحاملات الناجمة عن التطعيم أي في هذه الحالة قد تطغى الحاملات المحقونة على الحاملات الأغلبية الموجودة عند الاتزان.

عمليات التوليد والاتحاد Generation and Recombination Processes

كلما تختل حالة الاتزان (أي ان $pn \neq n_i^2$) تبرز عمليات لاعادة المنظومة الى حالة الاتزان (أي $pn = n_i^2$) . ان الآلية التي يتم من خلالها العودة الى حالة الاتزان بعد حقن المادة بالحاملات الفائضة هي آلية الاتحاد لحاملات الاقلية المحقونة مع الحاملات الاغلبية . وتبعاً لطبيعة عملية الاتحاد فان الطاقة الناجمة من العملية قد تنبعث على هيئة فوتونات او تتبدد كحرارة في المشبك . وتدعى العملية التي يصاحبها انبعاث الفوتون بالاتحاد المشع **radiative recombination** وبخلاف ذلك فانها تدعى بالاتحاد غير المشع **nonradiative recombination** ويمكن تصنيف ظاهرة الاتحاد الى عملية الاتحاد المباشر وغير المباشر فالاتحاد المباشر الذي يدعى ايضاً بالاتحاد (حزمة لحزمة) يهيمن عادة في حالة شبه موصل ذي فجوة حزمة مباشرة **direct-bandgap semiconductors** مثل ارسنيد الكاليوم . في حين يهيمن الاتحاد غير المباشر الذي يحدث خلال مراكز اتحاد **recombination centers** الموجود في فجوة

وتوجد ثلاثة أنواع من عودة الارتباط : **باعثة للضوء** ، و عودة ارتباط شوكلي-ريد-هول , SRH و عودة ارتباط أوجي.Auger Recombination



شكل (1-5) يوضح انواع عودة الارتباط : عودة الارتباط مباشرة باعثة للضوء ، و عودة ارتباط شوكلي-ريد-هول SRH(عبر مرحلة وسطية) ، و عودة ارتباط أوجي

وتنتقل الالكترونات من مستويات حزمة التكافؤ المملوءة إلى مستويات حزمة التوصيل الفارغة فيحدث تهيج بصري وتصبح احتمالية الانتقال كبيرة عندما تكون طاقة الضوء $h\nu$ اكبر من طاقة الفجوة Eg . والانتقال على نوعين الانتقال **المباشر** والذي تكون فرق القيمة لمستوي الطاقة الابتدائي والنهائي مساويا لطاقة الفوتون $h\nu = E_2 - E_1$ ، اذ ان المستوي الابتدائي E_1 و المستوي النهائي E_2 اي إن: لا يحدث تغيير في قيمة متجه الموجة أي إن $\Delta K = 0$ لا يحدث تغير في زخم البلورة. اما الامتصاص غير المباشر يحدث تغيير في متجه الموجة أي إن $\Delta K \neq 0$ وهذا يعني حدوث تغيير في زخم البلورة.

مسألة :

أحسب الجهد الداخلي الناشيء في مفرق $p-n$ سليكوني يحتوي على $N_A = 10^{18}\ cm^{-3}$ و $N_D = 10^{15}\ cm^{-3}$ عند درجة حرارة 300 كلفن .

فرق الجهد الكهروستاتيكي بين المنطقتين المتعادلتين في الطرفين p و n عند الاتزان الحراري يدعى بالجهد الداخلي V_{bi} built- in potential ويحسب من المعادلة الاتية :

$$V_{bi} = \psi_n - \psi_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$V_{bi} = (0.0259) \ln \frac{10^{18} \times 10^{15}}{(1.45 \times 10^{10})^2} = 0.755\ v$$

H.W. : تعريف : عملية الانتشار Diffusion Process و عملية الانجراف Drift Process / مراجعة الدايود