الفصل الثامن

الخواص البصرية للجوامد
Optical Properties of Solids

(٨,١) مقدمة
Introduction

ربما يكون المثال المعروف أكثر لتبيطات بصرية لحالة صلبة هو الليزر Laser ومع الاستعمال الواسع لـ أقراص CD، DVD وطابعات الليزر، فقد أصبحت الليزرات شائعة الاستخدام ومألوفة. يهتم كيميائيو الحالة الصلبة بنوعين من الليزر، المصنفة بليزر الياقوت **ruby Laser** وليزر أرزنيد الجاليوم **gallium arsenide**. بسبب أن ضوء الليزر يكون أسهل بكثير في الضبط والتعديل فقد تزايدت استخداماته لإرسال المعلومات: انتقال الضوء عبر ألياف بصرية والإحلال محل الإلكترونات للانتقال بداخل الأسلاك في الاتصالات السلكية واللاسلكية. لكي ينتقل الضوء عبر مسافات طويلة، فلابد للألياف البصرية أن تكون لها خواص امتصاص وانعكاس معينة، وقد أصبح تطوير مواد مناسبة منطقة مهمة في البحث العلمي.

لقد كانت تطبيقات الخواص البصرية للحالة الصلبة معروفة ومهمة من الناحية التجارية قبل تطوير الليزرات، مثال على هذه أيضاً اعتبار صمامات ثنائية باعثة للضوء **light- emitting diodes (LEDs)** التي تستخدم في الساعات الرقمية والأجهزة العلمية. تكون الميكانيكية التي بها يتم إنتاج الضوء في (LEDs) مماثلة لتلك في ليزر أرزنيد الجاليوم. مجموعة أخرى مهمة من الجوامد هي الجوامد الباعثة للضوء المعروفة على أنها المتفسفرات **phosphors** التي تستخدم في شاشات التليفزيون وأنابيب الضوء الفلوري. في العقدين الماضيين كان هناك نوع جديد من المواد، البلورات الفوتونية photonic crystals، بإمكانية استخدامها لتكون الأساس لدوائر بصرية متكاملة هدفاً لكثير من الاهتمام. سوف نناقش هذه باختصار في هذا الفصل.

بشكل عام، هناك موضعان يجب دراستهما في تفسير الأدوات مثل تلك التي ذكرناها. في الأول، الذي له علاقة بليزر الياقوت والمتفسفرات للضوء الفلوريّ، يحدث انبعاث الضوء بأيون شائبة في الشبكية العائل. سوف نركز هنا مع ما هو طيف ذري أساسي معدّل بالشبكية. في الحالة الثانية والتي تطبق مع LEDs وليزر أزرنيد الجاليوم، تكون الخواص البصرية للإلكترونات غير المتمركزة في المادة الصلبة الكتلية مهمة.

سوف نبدأ بالحالة الأولى ونأخذ الأطياف الذرية كنقطة بداية.

(٨,٢) تداخل الضوء مع الذرات

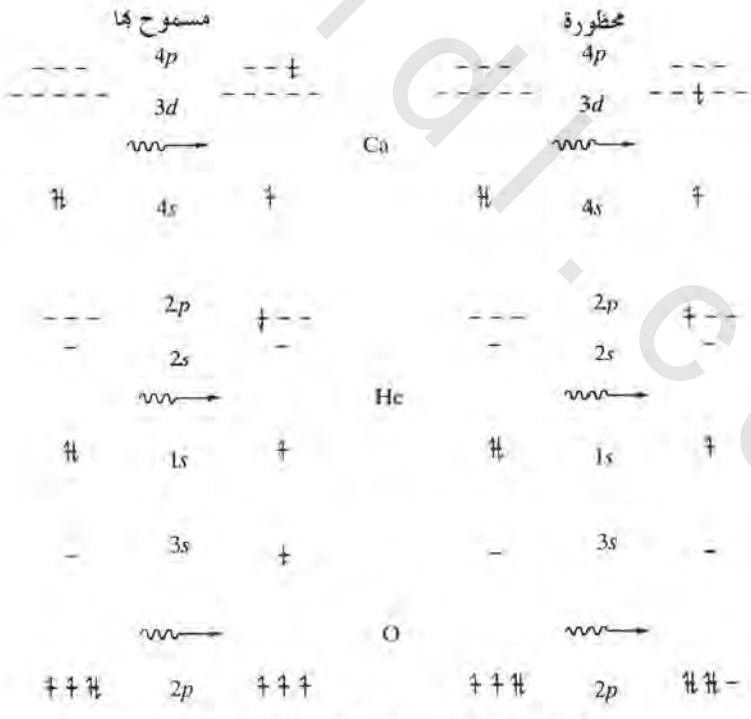
The Interaction of Light with Atoms

عندما تمتص الذرة فوتوناً من الضوء بطول موجي صحيح فإنها تخضع إلى انتقال لمستوى طاقة أعلى. في التقريب الأول في كثير من الحالات، يمكن التفكير في إلكترون واحد في الذرة، يمتص الضوء وتتم إثارته. سوف يمتص الإلكترون الفوتون فقط لو أن طاقة الفوتون تكون مساوية لفرق الطاقة بين مستوى الطاقة الإلكتروني الأولي والنهائي ولو طُبقت بعض القواعد المعينة تعرف بقواعد الاختيار. في ذرات الضوء لا يمكن للإلكترون تغيير مغزليته ولابد لكمية الحركة الزاوية المدارية أن تتغير بمقدار الوحدة؛ في حدود أعداد الكم $\Delta s = 0$، $\Delta l = \pm 1$. (إحدى الطرق للتفكير في هذا هو أن الفوتون يكون له غزل صفر ووحدة واحدة من كمية الحركة الزاوية. ومن ثم ينتج حفظ الغزل وكمية الحركة الزاوية هذه القواعد). لذرة الصوديوم، على سبيل المثال، يمكن للإلكترون 3s أن يمتص فوتوناً واحداً ويذهب إلى المستوى 3p. (ليس هناك قيود على تغيرات عدد الكم الرئيسي). لن يذهب إلكترون 3s، من ناحية ثانية، إلى المستوى 3d أو المستوى 4s. (يوضح الشكل رقم ٨,١ الانتقالات المسموحة والمحظورة).

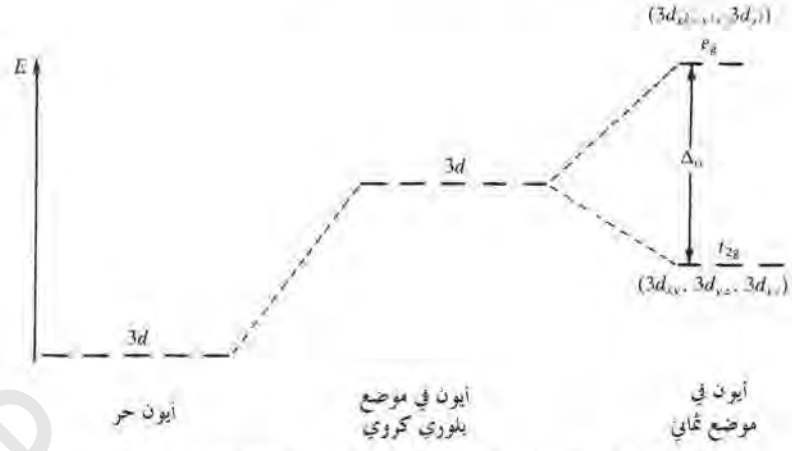
لا تكون كمية الحركة المغزلية والمدارية مستقلتين بشكل خالص عن بعضهما ويتيح الاتحاد بينهما للانتقالات المحظورة أن تحدث، ولكن تكون احتمالية إلكترون أن يمتص الضوء وتتم إثارته إلى مستوى محظور أقل بكثير جداً عن احتمالية إثارته إلى مستوى مسموح، بالتالي تكون الخطوط الطيفية المقابلة للانتقالات المحظورة أقل شدة من تلك المقابلة للانتقالات المسموح بها. سيعود الإلكترون الذي تمت إثارته إلى مستوى طاقة أعلى عاجلاً أم آجلاً إلى الحالة الأرضية. قد يفعل هذا بعدة طرق، قد يشع الإلكترون ببساطة فوتوناً بطول موجي صحيح بعد أن يتم إثارته. تسمى هذه **بالانبعاث التلقائي spontaneous emission**. كبديلٍ عن ذلك، قد يأتي فوتون ثان وبدلاً من

امتصاصه قد يحث الإلكترون كي ينبعث. تسمى هذه بالانبعاث المستحث أو المُستثار **induced or stimulated emission** ويلعب دوراً مهماً في فعل الليزرات. يكون الفوتون المنبعث في هذه الحالة في الطور وينتقل في نفس الاتجاه مثل الفوتون المحرض على الانبعاث؛ يطلق على حزمة الضوء الناتجة بأنها منسجمة coherent. أخيراً، قد تتصادم الذرة مع ذرة أخرى، لتفقد طاقة في العملية أو تعطي طاقة لمحيطاتها في شكل طاقة اهتزاز. تكون هذه أمثلة على انتقالات لا إشعاعية **non -radiative transitions**. يخضع الانبعاث التلقائي والمُستحث لنفس قواعد الانتقاء كما في الامتصاص. يكون للانتقالات اللا إشعاعية قواعد مختلفة في بلورة (أو بالطبع في جزئ) تكون مستويات الطاقة الذرية وقواعد الاختيار مُعدّلة. دعنا نأخذ مثال أيون بإلكترون d واحد خارج مدار مغلق (Ti^{3+} على سبيل المثال). سوف يساعدنا هذا على فهم ليزر الياقوت.

في الأيون الحر، يكون لمدارات 3d الخمسة كلها نفس الطاقة. في بلورة، تكون هذه المستويات منقسمة على سبيل المثال، إذا شغل الأيون فجوة ثمانية، ستنقسم مستويات 3d إلى مستوى منحل ثلاثياً أقل في الطاقة (t_{2g}) ومستوى منحل ثنائياً أعلى في الطاقة (e_g) يصف الشكل رقم (٨,٢) هذا.



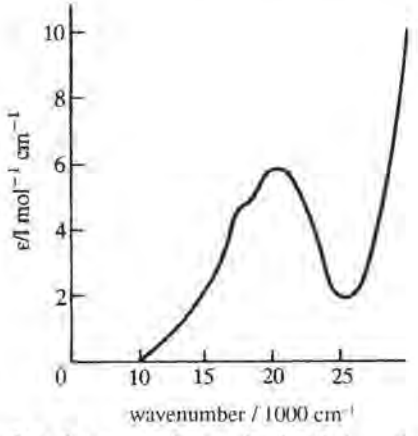
الشكل رقم (٨,١). انتقالات ذرية مسموح بها ومحظورة.



الشكل رقم (٨,٢). انقسام المستويات d في موضع ثماني في بلورة.

يكون الانتقال الإلكتروني بين هذه المستويات الآن ممكناً. في الأيون الحر، يشمل الانتقال من المستوى d إلى آخر تغيراً صفرياً في الطاقة، ومن ثم لن يشاهد حتى لو كان مسموحاً به. في البلورات، يشمل الانتقال تغيراً في الطاقة، لكن يظل محظوراً بقواعد الانتقاء. يمكن رغم هذا، مشاهدة الخطوط المقابلة لمثل تلك الانتقالات وإن تكن بشدة أقل، بسبب أن اهتزازات البلورة تخلط مستويات طاقة إلكترونية مختلفة. هكذا قد تختلط مستويات 3d مع 4p لتعطي d كسراً صغيراً من السماحية بالانتقال. ويصف الشكل رقم (٨,٣) حزمة امتصاص تعزى إلى انتقال من t_{2g} إلى e_g لأيون Ti^{3+}، الذي له إلكترون d واحد. (هذه الحزمة في الحقيقة هي عبارة عن حزمتين متقاربتين حيث تكون الحالة المثارة مشوهة عن ثماني الأوجه الصحيح وينقسم مستوى e_g أكثر إلى اثنين).

سوف نرى الآن القاعدة المستخدمة بانتقال محظور مماثل في عملية ليزر الياقوت (الأحمر الداكن).

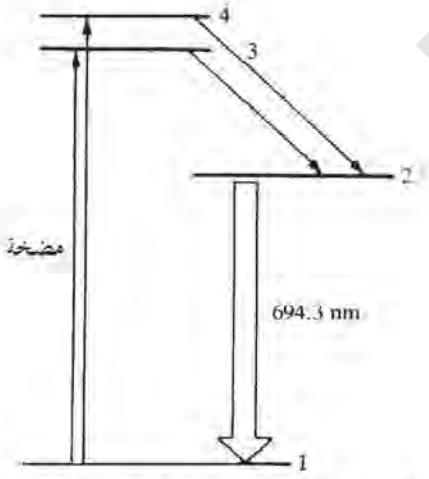


الشكل رقم (٨,٣). انتقال t_{2g} إلى e_g في Ti^{3+}. يكون النطاق في الحقيقة نطاقين متداخلين. يكون هذا بسبب انقسام أكثر للمستويات e_g.

(٨,٢,١) ليزر الياقوت (أحمر داكن) The Ruby Laser

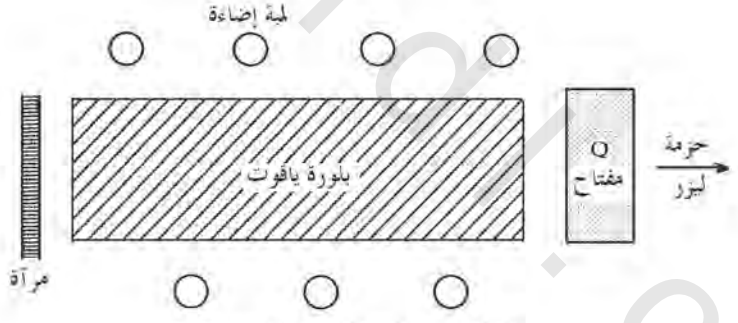
الياقوت هو الكورندیوم (إحدى صور Al_2O_3) بنسبة من 0.04 إلى 0.5% من أيونات Cr^{3+} كشائبة تحل محل أيونات الألومنيوم. وتشغل أيونات الألومنيوم، ومن ثم أيونات الكروم مواضع ثمانية مشوهة. كما نوقش سابقاً سوف تنقسم مستويات 3d لأيون الكروم. يكون لـ Cr^{3+} ثلاثة إلكترونات 3d، وفي الحالة الأرضية تشغل هذه الإلكترونات مدارات منفصلة بغزول متوازية. عندما يمتص الضوء، يخضع واحد من هذه الإلكترونات إلى مستوى من 3d أعلى في الطاقة. يكون هذا مماثلاً للانتقال المناقش في القطاع السابق، لكن مع ثلاثة إلكترونات يكون من الضروري أن نعتبر التغيرات في تنافر الإلكترون بالإضافة إلى التغيرات في الطاقة المدارية. بتضمين تنافر الإلكترون يعطي انتقالين مقابلين للقفز من مستوى 3d أقل إلى مستوى أعلى.

بامتصاص الضوء وإجراء إحدى هذه الانتقالات، يمكن لأيون الكروم ببساطة أن يبث إشعاعاً بنفس الطول الموجي ويعود إلى الحالة الأرضية. من ناحية ثانية، يحدث في الياقوت انتقال لا إشعاعي سريع، الذي يفقد فيه الإلكترون المثار بعضاً من طاقته وتكتسب البلورة طاقة اهتزازية. يترك أيون الكروم في حالة يمكن أن يعود بها إلى الحالة الأرضية فقط بانتقال يحدث فيه تغيراً في غزل الإلكترون. يكون مثل ذلك الانتقال محظوراً ثنائياً بسبب أنه يظل يخالف القواعد التي تحظر 3d↔3d ويكون أيضاً أقل احتمالية في الحدوث عن طريقة الامتصاص الأصلي. الحالات موصوفة تخطيطياً في الشكل رقم (٨,٤).



الشكل رقم (٨,٤). حالات أيون Cr^{3+} الداخلة في انتقال ليزر ياقوت.

تمتص الأيونات الضوء وتذهب إلى الحالتين 3 و4. من ثم تخضع إلى انتقال لا إشعاعي إلى الحالة 2. بسبب أن احتمالية الانبعاث التلقائي للحالة 2 تكون منخفضة ولا يوجد هناك مسار لا إشعاعي مناسب إلى الحالة الأرضية، يمكن بناء تعداد ضخم من الحالة 2. عندما تعود بعض الأيونات في الحالة 2 حتمياً (حوالي 5 ملي ثانية لاحقا)، تتفاعل بعض من الفوتونات الأولى المنبعثة تلقائياً مع أيونات أخرى في الحالة 2 وتحرض هذه لكي تنبعث. ستكون الفوتونات الناتجة في الطور وتنتقل في نفس الاتجاه مثل الفوتونات المنبعثة تلقائياً وسوف تُحثّ على انبعاث أكثر كلما انتقلت خلال الياقوت. يكون الياقوت في فجوة عاكسة بحيث تنعكس الفوتونات للخلف إلى البلورة عندما تصل إلى الحافة. تُحثّ الفوتونات المنعكسة على مزيد من الانبعاث وبواسطة هذه الطرق يتم بناء حزمة يمكن تقديرها من الضوء المتجانس. يمكن إزالة المرآة على إحدى الأطراف وتنبعث نبضة من الضوء. إن الاسم ليزر هو انعكاس لهذا البناء من الشدة. إنها اختصار لتكبير الضوء بالانبعاث المستثار للإشعاع "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". (تنتج بعض الوسائل المماثلة حزماً متجانسة من إشعاع الميكروويف معروفة باسم ميزر masers). يصف الشكل رقم (٨,٥) تنظيماً تقليدياً لليزر ياقوت نبضيّ.



الشكل رقم (٨,٥). مخطط ليزر ياقوت.

عند شدة مرتفعة تُثير لمبة وميض أيونات Cr^{3+} من المستوى 1 إلى المستويين 3 و 4. يمكن وضع اللمبة على طول حافة القضيب البلوري من الياقوت أو تُلف حوله. عند أحد أطراف الفجوة العاكسة محاطاً ببلورة الياقوت يكون هناك مفتاح Q، الذي يتحول من كونه عاكس إلى ناقل لضوء الليزر ويمكن اعتباره ببساطة على أنه مرآة دوارة، لكن يكون عادة جهاز أكثر تعقيداً.

كان الياقوت هو المادة الأولى لليزرات، لكن تم الآن تطبيق عديد من البلورات الأخرى. تكون البلورات المستخدمة بحاجة إلى احتوائها على شائبة بمستوى طاقة بحيث تكون العودة إلى الحالة الأرضية ممكنةً فقط بانتقال محظور في تحت الحمراء، المرئي والقريب من الفوق بنفسجي. لابد أن يكون بالإمكان أيضاً تعدد هذا المستوى بواسطة انتقال مسموح (أو على الأقل أقل حظراً). لقد اتجه البحث إلى التركيز على أيونات الفلز الانتقالي وأيونات اللانثانيد في عوائل مختلفة حيث إن لهذه الأيونات انتقالات مناسبة بطول موجي صحيح. بعض الأمثلة معطاة في الجدول رقم (٨,١) بالطول الموجي لانبعاث الليزر.

الجدول رقم (٨,١). أيونات شائبة مستخدمة في الليزرات.

أيون	مضيف	طول موجي منبعث (nm)
Nd^{3+}	فلوريديت (CaF_2)	1046
Sm^{3+}	فلوريت	708.5
Ho^{3+}	فلوريت	2090
Nd^{3+}	تنجستات الكالسيوم ($CaWO_4$)	1060

(٨,٢,٢) المتفسفرات في مصابيح الإضاءة الفلوريّة

Phosphors In Fluorescent Lights

المتفسفرات هي مواد صلبة تمتص الطاقة وتعيد بثها كضوء. كما وصفنا بالضبط في الليزرات، يكون الباعث هو أيون شائبة في شبكية عائل. من ناحية ثانية، ليس من الضروري لمستخدمي المتفسفرات أن يتم إنتاج حزم شديدة ومتجانسة من الضوء، وتكون عملية الانبعاث تلقائية بدلاً من كونها مُحثَّة. قد يكون للمتفسفرات عديد من التطبيقات، على سبيل المثال، يمكن إنتاج ألوان صورة التلفزيون بمتفسفرات يتم قذفها بإلكترونات من حزمة (أشعة كاثود) أو من ترانزستور (شاشات عرض LCD بشاشة مسطحة). في حدود الطُنية الناتجة، فإن إحدى أهم التطبيقات هي أنبوبة الإضاءة الفلوريّة.

تُنتج الإضاءة الفلورّية الإشعاع في فوق البنفسجي (254 nm) بإمرار تفريغ كهربي خلال ضغط منخفض من بخار الزئبق. يتم طلاء الأنبوبة من الداخل بمسحوق أبيض يمتص الضوء فوق البنفسجي ويبث إشعاعاً مرئياً. ينبغي لمصباح الإضاءة الفلورية الجيد أن يكون له كفاءة تحويل مرتفعة وينبغي للضوء المنبعث أن يكون قادراً على

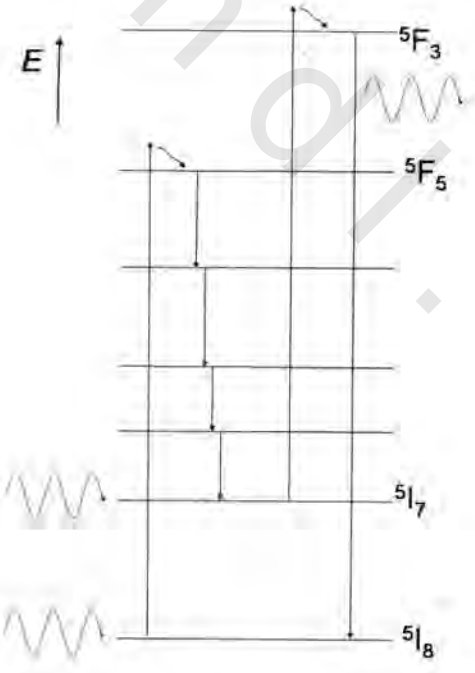
أن يجعل مشاهدة الأشياء اليومية مشابهة تماماً للمشاهدة في ضوء النهار. وتعتمد معظم مواد التفسفر أو المتفسفرات لمصابيح الإضاءة الفلورّية على هاليدات الفوسفات بقلويات أرضية مثل $3Ca_3(PO_4)_2.CaF_2$. كما في الليزرات تكون المدممات أو مواد الإشابة عبارة عن أيونات فلز انتقالي أو أيون لانثانيد، لكن يكون أكثر من أيون شائبة مطلوباً لتقريب طيف الضوء المرئي بالكامل. ليست كل أيونات الشائبة مطالبة بأن تكون قادرة على امتصاص إشعاع مثار حيث يمكن للشبكية العائلة من ناحية ثانية أن تعمل على نقل الطاقة من موضع إلى آخر. على سبيل المثال، في المتفسفرة المشابة أو المدممة بأيونات Mn^{2+} وSb^{3+}، يتم امتصاص الإشعاع فوق البنفسجي من لمبة الزئبق بواسطة أيونات الأنتيمون (Sb^{3+}) فقط. يسقط أيون الأنتيمون المثار أسفل إلى حالة إثارة أقل بواسطة انتقال لا إشعاعي. ينتج الانبعاث من الحالة الأقل هذه حزمة عريضة في المنطقة الزرقاء من الطيف المرئي. ينتقل بعض من الطاقة المنبعثة بواسطة الأنتيمون خلال البلورة العائل ويتم امتصاصها بواسطة أيونات المنجنيز. تشع أيونات Mn^{2+} المثارة ضوءاً أصفر وتعود إلى الحالة الأرضية. تنتج حزمتا الانبعاث معاً شيئاً قريب إلى ضوء النهار. لقد تم إدخال المتفسفرات على أنها أكثر كفاءة وتعطي تقريباً أضيق إلى ضوء النهار. يعطي تقريباً جيداً، على سبيل المثال، باتحاد من أزرق من ألومينات المغنسيوم والباريوم مشابة بعنصر اليروبيوم الثنائي (Eu^{2+})، أخضر من الألومينات المدممة بأيونات السريوم (Ce^{3+}) والتربيوم (Tb^{3+})، وأحمر من أكسيد اليتريوم مدمم بأيون اليروبيوم الثلاثي (Eu^{3+}).

تبث مصابيح الإضاءة الفلورّية أيضاً إشعاعاً عريض النطاق في إشعاع تحت الحمراء القريب near-infrared. لقد أحدث إيجاد مواد التألق ضوئي luminescent التي بإمكانها تحويل هذا إلى ضوء مرئي كثيراً من الاهتمام. يكون الضوء الساقط في هذه الحالة بطاقة أقل من الضوء المنبعث وتسمى العملية **بتحول علوي upconversion**. تُستغل مثل تلك الطرق في تحول علوي لليزرات حيث تستخدم المتفسفرة في إنتاج ضوء بطول موجي أقصر من ليزر أحمر. من الواضح أن الحالة الأرضية للذرة أو الأيون لا يمكنها امتصاص فوتون بإشعاع ذي تردد واضح ومن ثم يبث فوتون بإشعاع ذي تردد أعلى من الحالة المثارة التي تم الوصول إليها بعملية الامتصاص. من ثم كيف يعمل التحول العلوي؟

في أنظمة التحول العلوي يحدث الامتصاص في خطوتين. يمتص الأيون فوتوناً من الإشعاع الساقط ويذهب إلى الحالة المثارة. من ثم ينقل معظم الطاقة إما إلى حالة أخرى لذاك الأيون أو إلى حالة مثارة من أيون آخر. لو أن حالة الإثارة الثانية هذه تكون حالة شبه مستقرة، سيكون لديها وقت لكي تمتص فوتوناً آخر قبل أن

تبث إشعاعاً تلقائيا وتعود إلى حالة أقل. أما أيون الامتصاص أو الأيون الذي يتم نقل الطاقة إليه يكون الآن في مستوى أعلى، حيث تكون طاقته فوق الحالة الأرضية أكبر من طاقة الفوتون الممتص. ينتج الانبعاث من مستوى الطاقة الأعلى هذا إشعاعاً بطول موجي أقصر عن ذاك الممتص. تكون الأيونات المدمة في المحولات التصاعدية أحيـاناً أيونات اللانثانيد أو أيون فلز انتقالي وأيون لانثانيد. على سبيل المثال، يمتص تركيزات منخفضة من Ho^{3+} في Y_2O_3 ضوء ليزر أحمر وتشع ضوء أصفر- أخضر. Ho^{3+} في الحالة الأرضية، يمتص $^5I_8$ فوتون ويثار إلى حالة الإثارة $^5F_5$، التي منها يسقط إلى تعاقبات من حالات طاقة أقل تنتهي بحالة $^5I_7$، الشكل رقم (٨,٦). بينما في الحالة $^5I_7$ يمتص الأيون فوتوناً آخر من ضوء أحمر ويذهب إلى الحالة $^5F_3$ التي منها ينبعث ضوء أصفر - أخضر ويعود إلى الحالة الأرضية (الشكل رقم ٨,٦).

في المتفسفرات وفي ليزر الياقوت يكون الضوء ممتصاً ومنبعثاً بواسطة إلكترونات متمركزة على موضع شائبة، لكن في أجهزة بصرية أخرى تبثّ الإلكترونات غير المتمركزة الإشعاع. سوف ندرس في القطاع التالي الامتصاص والانبعاث في مواد صلبة بإلكترونات غير متمركزة، خاصة في أشباه الموصلات.

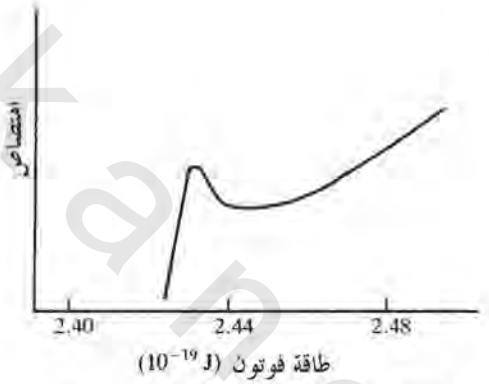


الشكل رقم (٨,٦). حالات ذرية في Ho^{3+}.

(٨,٣) امتصاص وانبعاث الإشعاع في أشباه المواصلات

Absorption and Emission of Radiation in Semiconductors

سوف يتم امتصاص الإشعاع الساقط على شبه الموصل بإلكترونات في نطاقات غير متمركزة، خاصة تلك القريبة من قمة نطاق التكافؤ، متسببة في ارتقاء هذه الإلكترونات إلى نطاق التوصيل. بسبب وجود عديد من المستويات المتراصة المتقاربة في نطاق التوصيل لا يكون طيف الامتصاص سلسلة من الخطوط كما في الأطياف الذرية، لكن قمة عريضة مع مَدْخَل أو مَشْرف حاد قريب إلى طاقة فجوة النطاق. يصف الشكل رقم (٨,٧) طيف امتصاص GaAs على سبيل المثال.

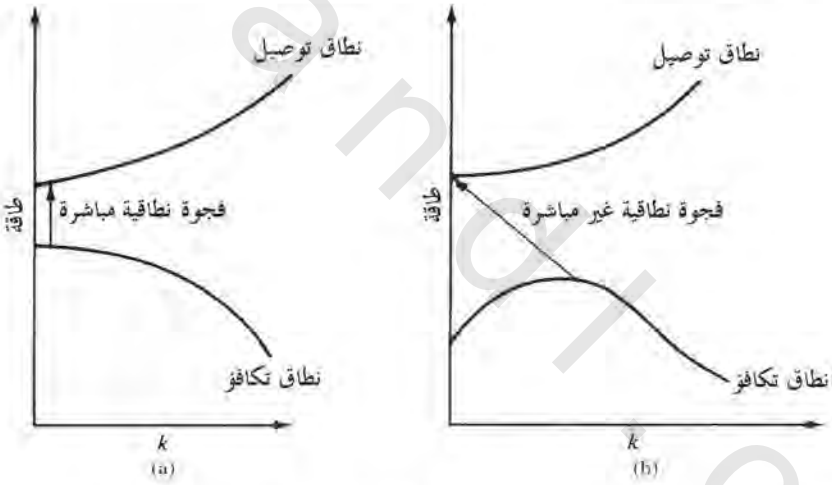


الشكل رقم (٨,٧). طيف امتصاص GaAs.

تكون الانتقالات إلى بعض المستويات في نطاق التوصيل أكثر احتمالاً أو ترجيحاً عن الانتقالات إلى مستويات أخرى. يكون هذا بسبب أن الانتقالات بين مستويات نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل، مثل تلك التي بين مستويات الطاقة الذرية تكون محكومة بقواعد الانتقاء. تظل قاعدة الانتقاء للغزل تعمل؛ وعندما يرتقي إلكترون إلى نطاق التوصيل لا يغير الإلكترون غزله. لا تكون قواعد كمية الحركة الزاوية المدارية مناسبة لنطاقات الطاقة، ومن ثم يتم إحلال القاعدة التي تحكم التغير في رقم الكم l بقيد على متجه الموجة k. كما نوقش في الفصل الرابع، تكون مستويات الطاقة في نطاق متميزة بمتجه الموجة، تكون كمية حركة موجة الإلكترون معطاة بـ $\hbar k$. تكون كمية حركة الفوتون بطول موجي في تحت الحمراء، المرئي أو فوق البنفسجي صغيرة جداً مقارنة بتلك للإلكترون في النطاق، ومن ثم ينتج تحول كمية الحركة قاعدة الانتقاء للانتقالات بين النطاقات. لا يمكن لإلكترون أن يغير متجه الموجه له عندما يمتص أو يبعث إشعاعاً. هكذا يمكن لإلكترون في نطاق التكافؤ بمتجه k_i

أن يخضع إلى انتقالات مسموح بها إلى مستويات في نطاق التوصيل التي يكون لها أيضا متجه موجة k. في بعض المواد الصلبة، Ga As على سبيل المثال، يكون المستوى عند القمة من نطاق التكافؤ وذاك عند القاع من نطاق التوصيل لهما نفس متجه الموجه. طبقاً لذلك يحدث انتقال مسموح به عند طاقة فجوة النطاق. يقال لمثل تلك المواد الصلبة بأنها تملك فجوة نطاق مباشرة **direct band gap**.

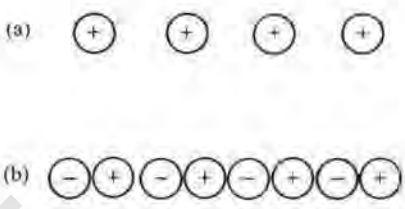
لبعض أشباه الموصلات الأخرى، على سبيل المثال السيلكون، يكون الانتقال المباشر من القمة لنطاق التكافؤ إلى القاع من نطاق التوصيل محظوراً. مثل تلك المواد الصلبة يكون لها **فجوة نطاق غير مباشرة indirect band gap**. يعطي الشكل رقم (٨,٨) توضيحات لتراكيب النطاق للمواد الصلبة بفجوتي نطاق مباشرة وغير مباشرة. لاحظ أنه في هذه المخططات تكون الطاقة لنطاق في اتجاه واحد مرسومة ضد رقم الموجة k. مخططات مماثلة معطاة في الفصل الرابع، لكن مع طاقة مرسومة ضد كثافة الحالات.



الشكل رقم (٨,٨). مخطط نطاقات طاقة لـ (a) مادة صلبة بفجوة نطاقية مباشرة (b) مادة صلبة بفجوة نطاقية غير مباشرة. لاحظ أن في هذا المخطط يكون المحور الأفقي هو k، ليس كثافة حالات. في هذا التمثيل يوصف النطاق على أنه خط يذهب من 0 إلى القيمة القصوى من k التي تحدث لذاك النطاق.

قد يقترح نموذج الإلكترون الحر البسيط أن المدار الأقل طاقة في أي نطاق هو المدار ذو k = 0. من ناحية ثانية، يوضح الشكل رقم (٨,٩) اتحادين من المدارات التي سيكون لها k = 0 لسلسلة بسبب أن المدارات الذرية تكون متوحدة في طور. يكون الاتحاد من مدارات p عكس رابط بوضوح ومن ثم من المتوقع أن يكون له الطاقة الأعلى في

نطاقه أو في النطاق الخاص به؛ يكون الاتحاد من مدارات s رابطاً وسيكون له الطاقة الأقل في النطاق الخاص به. لو أن نطاق p يقع دون نطاق s، سيكون الانتقال بين هذه المستويات مسموحاً به وسيقابل انتقال مباشر عبر فجوة النطاق. في المواد الصلبة الحقيقية، سوف تحتوى مستويات الطاقة الأعلى والأقل في النطاقات اشتراكات من أنواع مختلفة من مدارات ذرية وسيكون من الصعب التنبؤ فيما لو أن نطاق التوصيل سيكون مباشراً أو غير مباشر.



الشكل رقم (٨,٩). صف من (a) مدارات s و(b) مدارات p، مع k = 0.

إحدى نتائج فجوة نطاق غير مباشرة هي أن الإلكترون في مستوى القاع من نطاق التوصيل له فقط احتمالية صغيرة لإصدار فوتون والعودة إلى القمة من نطاق التكافؤ، يكون هذا مُهماً عند اختيار مواد لبعض من أنواع التطبيقات في طريقنا إلى دراستها.

تكون الانتقالات عبر فجوة النطاق مسئولة أيضاً عن ظهور عديد من المواد الصلبة. بسبب أن المادة الصلبة تكون مركزة جداً، تكون احتمالية امتصاص فوتون بطاقة مقابلة لانتقال مسموح به عالية جداً. عديد من تلك الفوتونات سوف تمتص عند أو بالقرب من سطح المادة الصلبة. سوف يعاد بث هذه الفوتونات في اتجاهات عشوائية بحيث أن بعضاً منها سوف ينعكس خلفياً تجاه مصدر الإشعاع وبعضها سوف ينتقل أبعد في المادة الصلبة. يمثل الانتقال في المادة الصلبة فرصة جيدة جداً لإعادة الامتصاص ومن ثم إعادة البث مرة ثانية في اتجاهات مختلفة. تكون النتيجة الخالصة هي أن الإشعاع لا يتغلغل في المادة الصلبة ولكن ينعكس بواسطة سطحها. لو أن السطح يكون منتظماً بدرجة كافية، من ثم سوف تظهر المواد الصلبة التي تعكس الإشعاع المرئي لامعة. هكذا يظهر السيلكون بفجوة نطاق تكون عند الطرف الأدنى من منطقة المرئي ويكون له انتقالات مسموح بها تغطي معظم الأطوال الموجية المرئية لامعاً وفلزياً. يكون لمعظم الفلزات انتقالات بين نطاق التوصيل ونطاق أعلى طاقة التي تؤدي إلى لمعانها الفلزي المميز. يكون لبعض الفلزات مثل التنسجتين والزنك فجوة نطاق في تحت الحمراء، ولا تكون الانتقالات في المرئي قوية بدرجة كافية. تظهر هذه الفلزات معتمة نسبياً. يكون للذهب

والنحاس نطاقات امتصاص قوية بسبب إثارة إلكترونات نطاق d إلى نطاق التوصيل s/p. في هذه العناصر يكون النطاق d ممتلئاً ويقع عند مسافة ما دون مستوى فرمي، الشكل رقم (٨,١٠). تكون قمم الانعكاسية في الجزء الأصفر من الطيف ويكون الضوء الأزرق والأخضر أقل امتصاصاً بكثير، من ثم تظهر الفلزات ذهبية. تظهر الأغشية الرفيعة جداً من الذهب خضراء بسبب امتصاص الضوء الأصفر والأحمر وينُفذ فقط الأزرق والأخضر.

تكون للمواد العازلة فجوات نطاقية تقليدية في فوق البنفسجي، وتظهر عديمة اللون إذا لم يحدث انتقال متمركز في منطقة المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي.

سوف تعنى الأجهزة التي ندرسها والتي تشتمل على انتقالات فجوة نطاقية فقط بانبعاث الضوء بدلاً من الامتصاص أو الانعكاس؛ وستكون الإلكترونات مثارة في الأصل بطاقة كهربية.

الشكل رقم (٨,١٠). تركيب نطاق النحاس.

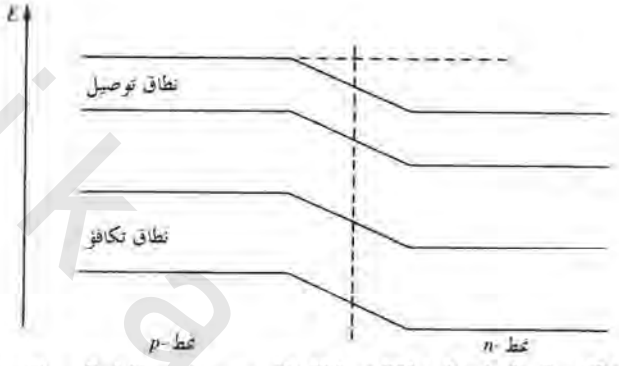
(٨,٣,١) صمامات ثنائية باعثة للضوء Light -Emitting Diodes

تستخدم الصمامات الثنائية للضوء بشكل واسع في شاشات العرض. إنها مثل الترانزستورات تعتمد على وصلة p-n، لكن يقود الجهد المطبق عبر وصلة p-n في هذه الحالة إلى انبعاث ضوء.

إن الشكل رقم (٨,١١) هو وصلة p-n في شبه موصل مثل GaAs.

يكون نطاق التركيب الموصوف هو الوصلة في الظلام وبدون جهد كهربي مطبق. افترض الآن أن مجالاً كهربياً سيطبق بحيث يكون نمط -n معمولاً سلباً نسبة إلى نمط -p (أي في الاتجاه المعاكس للجهد المطبق في الترانزستورات؛ انظر الفصل الرابع). سوف تمر الإلكترونات حينئذ من نوع -n إلى نوع -p. يمكن لإلكترون في نطاق التوصيل المتحرك ناحية النمط -p أن يسقط أسفل إلى واحدة من الشغرات في نطاق التوصيل على جانب

نمط -p، باعثاً فوتون في العملية. يكون هذا أكثر احتمالية للحدوث لو أن الانتقال يكون مسموحاً به، هكذا تكون أشباه الموصلات بفجوات نطاق مباشرة هي المستخدمة عادة في مثل تلك الصمامات. لاستخدام LED لعرض بيانات، على سبيل المثال، فإنه يكون على هيئة سلك بحيث يطبق تيار كهربي عبر الأجزاء صانعاً الحروف أو الأرقام المطلوبة. باستخدام أشباه موصلات بفجوة نطاقية متغيرة يمكن إنتاج ألوان مختلفة. ينتج GaP لون أحمر، لكن بواسطة خلط بنسب متنوعة من الألومنيوم لتكوين $Ga_{1-x}Al_xP$ يمكن إنتاج ضوء أخضر أو برتقالي.



الشكل رقم (٨,١١). نطاقات طاقة بالقرب من الوصلة في الوصلة p-n.

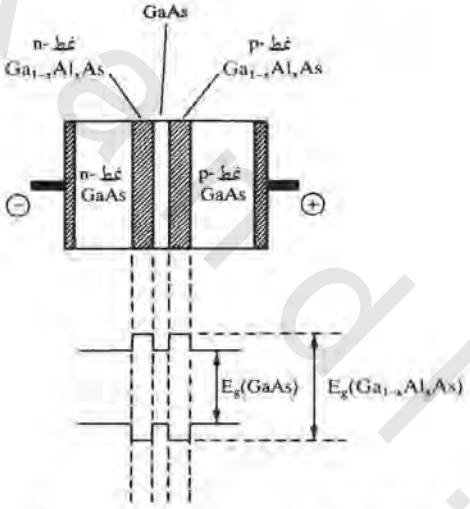
ينبغي ملاحظة أن أشباه الموصلات بفجوات إضافية (غير مباشرة) تكون مستخدمة في LEDs، لكن في هذه الحالات، تلعب مستويات الشائبة دوراً مهماً. هكذا يكون GaP مستخدماً رغم أن له فجوة نطاقية غير مباشرة لا يكون السليكون مناسباً بسبب أن انتقالاً لا إشعاعياً يكون متاحاً للإلكترونات عند القاع من نطاق التوصيل وتعطي هذه الإلكترونات طاقة حرارية إلى الشبكية البلورية بدلاً من انبعاث ضوء عندما تعود إلى نطاق التكافؤ.

عندما يتسبب التيار الكهربي في تحرك إلكترونات التوصيل عبر وصلة p-n، يكون الوضع الناتج هو هذا الذي يكون فيه التعداد في نطاق التوصيل أكبر من تعداد الاتزان الحراري. تكون زيادة الإلكترونات في الحالة المثارة صفة أساسية لليزرات وتعتمد عديد من ليزرات أشباه موصلات على الوصلة p-n. المثال الأفضل على هذا هو ليزر أرزنيد الجاليوم.

(٨,٣,٢) ليزر أرزنيد الجاليوم The Gallium Arsenide Laser

يحتوى ليزر أرزنيد الجاليوم على طبقة من GaAs مشطورة بين طبقتين من أرزنيد الجاليوم نمط -p ونمط -n ($Ga_{1-x}Al_xAs$). كما هو موصوف في الشكل رقم (٨,١٢) تكون الفجوة النطاقية لأرزنيد الألومنيوم الجاليوم أكبر من تلك لأرزنيد الجاليوم.

يمر تيار كهربي عبر وصلة الـ p-n كما في LEDs ينتج زيادة من الإلكترونات في نطاق التوصيل من أرزنيد الجاليوم. من ناحية ثانية لا تنجرف هذه الإلكترونات عرضا إلى طبقة أرزنيد الألومنيوم الجاليوم، بسبب أن قاع نطاق التوصيل في هذه الطبقة يكون أعلى في الطاقة وسوف تكون الإلكترونات بحاجة إلى أن تكتسب طاقة لكي تتحرك من جانب إلى آخر. تكون إلكترونات نطاق التوصيل الزائدة لهذا مفيدة بالبقاء بداخل طبقة GaAs. حتمياً يسقط واحد من هذه الإلكترونات أسفل إلى نطاق توصيل آخر كما تعود إلى نطاق التكافؤ، باعثاً فوتوناً كلما فعل هذا. يستثير أو يحرض هذا الفوتون إلكترونات نطاق توصيل أخرى كما تعود إلى نطاق التكافؤ وهكذا تبدأ حزمة متجانسة من الضوء في البناء. كما في ليزر الياقوت، ينعكس التدفق الأصلي من الفوتونات خلفياً بواسطة مرايا موضوعة على النهايات ويُحث على مزيد من الانبعاث. ستنبعث أخيراً حزمة من إشعاع تحت الحمراء.



الشكل رقم (٨,١٢). ترتيب مناطق شبه موصل مختلفة في ليزر GaAs. يكون المنظر الجانبي للفجوة النطاقية موصوفاً أسفل هذه المناطق.

تم تطوير عديد من أمثال تلك الليزرات، تقدر معظمها على مركبات III-V (أي مركبات من In، Ga و/ أو Al مع As ، P أو Sb). بالإمكان تصنيع مواد بفجوات نطاقية فوق المدى من 400 إلى 1300 nm بالتحكم بعناية في نسب العناصر المختلفة.

تستخدم ليزرات أشباه موصلات تحت الحمراء بين عديد من الأشياء الأخرى لقراءة الأقراص المضغوطة أو المدمجة. يتكون القرص المضغوط من قرص بلاستيكي مدهون بغشاء ألومنيوم شديد الانعكاسية ويتم حمايته ضد التلف الميكانيكي بطبقة من بوليمر. ينقسم الصوت الأصلي المسجل إلى عدد من قنوات تردد ويعطى التردد

لكل قناة كشفرة ثنائية (التي تكون سلسلة من 0s و 1s). يتحول هذا إلى سلسلة من الحفر في مسارات على القرص مفصولة تقريبا بمسافة 1.6 μm. يتم تسليط الليزر على القرص وينعكس إلى كاشف ضوئي. تتسبب الحفر في تشتت بعض الضوء وهكذا يتم اختزال شدة الحزمة المنعكسة. تُقرأ الإشارة بواسطة الكاشف الضوئي على أنها 1 عندما تتواجد شدة ضوء عالية و 0 عندما يختزل التشتت الشدة. يعاد تغطية الشفرات الثنائية وبالإمكان أن تحول خلفياً إلى صوت أو صورة. تكون DVDs مماثلة لكن باستخدام ليزر بطول موجي أقصر يمكن أن يقرأ حفراً متقاربة أكثر. يعنى هذا التقاط مزيد من المعلومات في مساحة معطاة.

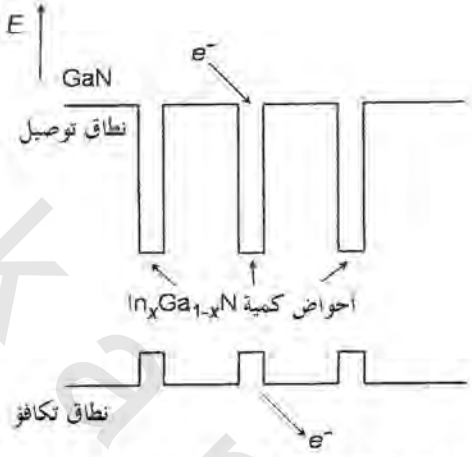
(٨,٣,٣) أحواض كمية – ليزرات زرقاء Quantum Wells –Blue Lasers

تسمح الليزرات الزرقاء بتحليل عالٍ ومن ثم كثافة أعلى من المعلومات البصرية المخزنة على الأجهزة مثل DVDs عنها في ليزرات GaAs تحت الحمراء. اعتمدت الليزرات الزرقاء الأولى على ZnSe لكن كان نصف العمر لها قصيراً جداً للاستخدامات التجارية. تم عرض الليزرات المعتمدة على نيتريد الجاليوم (GaN) للمرة الأولى في 1995، وأثبتت أن لها أنصاف أعمار أكبر. في هذه الليرزات، يتم إنتاج الفوتونات، ليس في شبه موصل كتلي، لكن في أحواض كمية.

تتكون المنطقة الفعالة من ليزرات GaN من GaN يحتوى على طبقات رفيعة عديدة (30-40 Å في السمك) من GaN مدمم بالأنديوم. تختزل إضافة الأنديوم الفجوة النطاقية داخل الطبقات الرفيعة بحيث تكون قاع نطاق التوصيل عند طاقة أقل من تلك في GaN الكتلي. يتم اقتناص الإلكترونات في نطاق التوصيل هذا بشكل فعال بسبب أنها تكون بحاجة إلى اكتساب طاقة من مصدر خارجي للمرور إلى نطاق التوصيل من GaN الكتلي. يوضح الشكل رقم (٨,١٣) تخطيطاً القاع من نطاق التوصيل والقمة من نطاق التكافؤ لسلسلة من طبقات رفيعة من $In_xGa_{1-x}N$ في GaN.

تسلك الإلكترونات المقتنصة مثل الدقائق في صندوق (انظر الفصل الرابع) لكن مع أحواض طاقة محددة للصندوق. تكون مثل تلك **الصناديق أحواض كمية quantum wells**. بداخل الحوض، تكون طاقة الإلكترون مقننة وتعتمد على مسافة الفصل بين مستويات الطاقة على عمق (طاقة) واتساع (الحيز) الحوض. يكون عمق الأحواض محكوماً بمقدار التدميم (قيمة x). رغم أن الإلكترونات في الأحواض يكون لها طاقة غير كافية لكي تغير حاجز الطاقة للوصول إلى الحوض الثاني، إلا أن الاحتمالية موجودة في كونها سوف تتحرك إلى مستوى طاقة مماثل في الحوض التالي عبر التنفّق الميكانيكي الكمي. تنتقل الإلكترونات من GaN الكتلي بداخل مستوى عالٍ في

الحوض الأول (الشكل رقم ٨,١٣). من هذا المستوى، يمكن للإلكترون أن يبعث فوتوناً ويذهب إلى مستوى أقل أو من ثم يكون بإمكانه أن يعبر النفق إلى الحوض التالي. تكون عملية التنفّق أسرع من انبعاث الفوتون بحيث يتم بناء تعداد المستوى الأعلى. تكون هناك إلكترونات أكثر الآن في المستوى الأعلى عنه في المستويات الأقل، هكذا يتواجد تحول انقلاب – المطلوب لفعل الليزر.



الشكل رقم (٨,١٣). مخطط مستوى الطاقة لنطاق التوصيل في سلسلة من الطبقات الرقيقة من $In_xGa_{1-x}N$ في GaN.

تكون المنطقة الفعالة المحتوية على أحواض كمية مشطورة بين طبقات من GaN مدمة بنمط -n ونمط -p وGaN مدمة بألومنيوم $Al_yGa_{1-y}N$ التي توفر الإلكترونات الداخلة الحوض الكمي وتحتفظ بها حصرياً للمنطقة الفعالة. يتم بناء كل هذه الطبقات فوق الركيزة، على سبيل المثال، الياقوت الأزرق، سفير sapphire. تكون نهايات أو أطراف الجهاز ككل منمشة أو منظّفة لكي تكون مرآة جانبية التي تعكس الفوتونات المنبعثة لكي تسمح ببناء حزمة متجانسة.

إحدى استخدامات ليزرات شبه الموصل هو كمصدر ضوء في البصريات الأليافيّة .

(٨,٤) ألياف بصرية

Optical Fibres

تستخدم الألياف البصرية لنقل الضوء بالطريقة التي تستخدم فيها أسلاك فلز لنقل الكهرباء. على سبيل المثال، يمكن إرسال مكالمة تليفون على طول الألياف البصرية في صورة سلسلة من نبضات ضوء من ليزر. يمكن تحسين الشدة، الزمن بين النبضات وطول النبضة لتوصيل محتويات المكالمة في صورة مشفرة. لكي يمكن انتقال

المعلومة فوق مسافات مفيدة (من رتبة الكيلومترات) لابد من الاحتفاظ بشدة الضوء بحيث تظل إشارة يمكن الكشف عنها موجودة عند الطرف الآخر من الألياف. هكذا فإن كثيراً من فن صناعة الألياف البصرية التجارية تكمن في إيجاد طرف لاختزال فقد الطاقة.

يكون المتطلب الأول هو الاحتفاظ بحزمة الليزر بداخل الألياف. تكون حزم الليزر أقل انفراجاً من حزم الضوء التقليدية بحيث يكون استخدام ضوء الليزر مفيداً، لكن، حتى مع هذا، يوجد بعض التوجه للحزمة في أن تنتشر خارج الليف. لهذا يتم تشييد الألياف بمعامل انكسار متغير عبر الألياف. يتم إرسال الحزمة أسفل لُبّ مركزي. يكون للمنطقة المحيطة معامل انكسار منخفض عن اللُبّ، بحيث يتم انعكاس كلى داخلي للضوء المُحاد عن المسار المستقيم ومن ثم يظل في اللُبّ. يكون هذا موضحاً في الشكل رقم (٨,١٤).

الشكل رقم (٨,١٤). أشعة ضوء تنتقل على طول ليف بصري.

إن إضافة شوائب مختارة يمكن أن تغير معامل الانكسار. في الحالة الموضحة في الشكل رقم (٨,١٤)، يمكن للأشعة المنعكسة داخليا بشكل تام أن تنتقل مساراً أطول من تلك التي تنتقل في مسار مستقيم على طول اللُبّ. سيقود هذا إلى نبضة تكون متناثرة خارجياً في زمن. إحدى الطرق لحفظ النبضات معاً هو أن تستخدم لُبّب ضيقة جداً بحيث ينتقل الضوء في الأساس في مسار مستقيم. كبديل عن ذلك هو لب بمعامل انكسار متغير. يكون معامل الانكسار هو مقياس لكيفية انتقال الضوء في وسط؛ كلما قل معامل الانكسار، كلما كانت سرعة الضوء أسرع. لو أن الأجزاء الخارجية من اللُب يكون لها معامل انكسار منخفض، من ثم فإن الضوء المنعكس يتحرك أسرع ويعوض هذا طول المسار.

لكي نرى لماذا يتغير معامل الانكسار بواسطة التركيب، سندرس باختصار المصدر الذري لمعامل الانكسار. يكون مصاحباً للإشعاع الكهرومغناطيسي مجال كهربي متذبذب. حتى لو لم يتم امتصاص الإشعاع، سيكون لهذا المجال تأثير على الإلكترونات في المادة الصلبة. لو فكرت في مجال كهربي مطبق على الذرة، يمكنك أن تتخيل أن

الإلكترونات تكون مجذوبة بواسطة المجال بحيث لا تكون الذرات كروية بعد. ينتج المجال الكهربي فصلاً لمراكز الشحنة الموجبة والشحنة السالبة (أي أنه يحث على عزم قطبي كهربي). (قد يكون للجزيء في المادة الصلبة أيضاً عزم قطبي كهربي دائم منتج بواسطة عدم تساوي توزيع الإلكترونات بين الأنوية، لكن يكون هذا موجوداً في غياب مجال مطبق).

يمكن اعتبار المجال المتذبذب على أنه جذب للإلكترونات بالتعاقب بطريقة تتبعها الأخرى. تعتمد كمية الإلكترونات المستجيبة على مدى ارتباط الإلكترونات بالنواة. تسمى مثل هذه الخاصية **بالاستقطابية polarisability** وتكون أعلى لأيونات كبيرة بشحنة منخفضة، Cs^{+} على سبيل المثال، عنها للأيونات الصغيرة عالية الشحنة مثل Al^{3+}. لو أن تركيزاً عالياً من أيونات قابلة للاستقطاب يحدث في مادة صلبة، من ثم يؤدي هذا إلى تباطؤ الإشعاع، هكذا سوف يزيد معامل انكسار المادة. يكون ضبط معامل الانكسار بإضافة شوائب مختارة بعناية مفيداً أيضاً في تطبيقات أخرى. على سبيل المثال، يكون التحكم في معامل انكسار الزجاج مهماً جداً عند عمل عدسات للتلسكوبات، المجهر ثنائي العينية والكاميرات. تكون أيونات Pb^{2+} عالية الاستقطاب وتستخدم في إنتاج زجاج بمعامل انكسار عالٍ.

تحدث بالضرورة بعض العيوب في الألياف وتكون هذه مصدر آخر لفقد الطاقة. تحدث العيوب بعض التشتت للضوء من نوع معروف على أنه **تشتت رايلخ Rayleigh scattering**. لا يحدث تشتت رايلخ أي تغير في الطول الموجي للضوء، فقط في الاتجاه. تعتمد كمية التشتت على $(1/\lambda^4)$ حيث λ هي الطول الموجي؛ لهذا يحدث تشتت أقل بكثير للأطوال الموجية الطويلة. يكون الاختزال في الذهاب من الضوء الأزرق إلى الضوء الأحمر ملحوظاً أيضاً ويكون مسئولاً عن لون السماء. لكي تختزل تشتت رايلخ، تشع الليزرات المستخدمة لأنظمة الألياف البصرية أشعة تحت الحمراء.

مصدر ثالث لفقد الطاقة هو امتصاص الضوء بواسطة الألياف. في الألياف بعدة كيلومترات في الطول يمكن لكمية صغيرة جداً من الشائبة أن تتسبب في امتصاص جوهري. يمكن أن تأخذ فكرة عن هذا بالنظر إلى لوح من زجاج نافذة محفوف بدلاً من كونه نقي، يبدو الزجاج أخضر. يكون هذا بسبب الامتصاص بواسطة أيونات Fe^{2+} في الزجاج.

يكون زجاج النافذة حوالي ½ متر في الفصل، بحيث يمكن مشاهدة أنه في ليفة بطول بضع كيلومترات، سيكون هناك فقد ضخم نتيجة لذلك الامتصاص. في الزجاج يكون طيف أيونات الشائبة مشابهاً لذاك في البلورة،

لكن بسبب أن الأيونات تشغل أنواعاً مختلفة من المواضع في الزجاج، فإن حزم التوصيل تكون أعرض؛ ينشأ عن كل موضع حزمة عند طول موجي مختلف قليلاً. في الألياف البصرية بطول من 3 km تعمل عند 1300 nm في إشعاع تحت الحمراء القريب (الأدنى) تظل شدة امتصاص Fe^{2+} بحيث أن تركيزاً بجزئين في 10^{10} سيختزل كمية الإشعاع إلى النصف لهذا لابد لمواد الألياف البصرية أن تكون نقية جداً. أحد أسباب عدم استخدام السليكا بشكل واسع أن رباعي كلوريد السيلكون عالي النقاوة المطور لصناعة شبة الموصل يكون متاحاً تجارياً كمواد بادئة.

لا تكون أيونات الفلز هي المصدر الوحيد للامتصاص، من ناحية ثانية، يعنى استخدام إشعاع تحت الحمراء أن هناك احتمالية لكي يفقد بسبب الامتصاص بواسطة اهتزازات جزيئية. في زجاج السليكا قد يحتوى التركيب على روابط SiO متدلية تتفاعل بسهولة مع الماء لتكوين روابط OH. تكون الترددات الاهتزازية لروابط OH عالية وقريبة من الاهتزازات المستخدمة للانتقال. من المهم لهذا استبعاد الماء عند تصنيع ألياف بصرية من السيلكا. حتى مع استبعاد الماء وغياب روابط OH فإن الامتصاص بالأنماط الاهتزازية لا يمكن إهماله. تهتز روابط SiO عند ترددات أقل عن روابط OH، ومن ثم لا يتداخل أو لا يتعارض الحد الأقصى في الامتصاص. من ناحية ثانية، يكون امتصاص SiO قوياً جداً وتدخل القمة لمنطقة تردد النفاذية أو الإنفاذ. هناك بعض البحوث عن مواد بترددات اهتزاز منخفضة عن السليكا، بصفة خاصة الفلوريدات، لكن لم يتم تقييمها اقتصادياً حتى الآن، كونها صعبة التصنيع وأكثر كلفة من السليكا.

يظل الفقد يحدث في الألياف المطورة للاستخدام التجاري. رغم ذلك، تم اختزال هذا الفقد إلى نقطة تكون النفاذية عندها ممكنة عبر كيلومترات. بالإضافة إلى انتقال المعلومات في أنظمة التليفون والتطبيقات المشابهة، فقد تم اقتراح أن ألياف الأجهزة البصرية يمكن أن تحل محل الإلكترونيات التقليدية تطبيقات أكثر تطوراً مثل الحاسوبات. لمثل تلك التطبيقات يكون من الضروري، تطوير مفاتيح تحويلة أو محولات بصرية، صمامات تقوية وهكذا. تم تطوير مواد جديدة في العقدين الأخيرين التي يمكن أن تكون قاعدة لدوائر بصرية متكاملة. تسمى هذه المواد بلورات فوتونية.

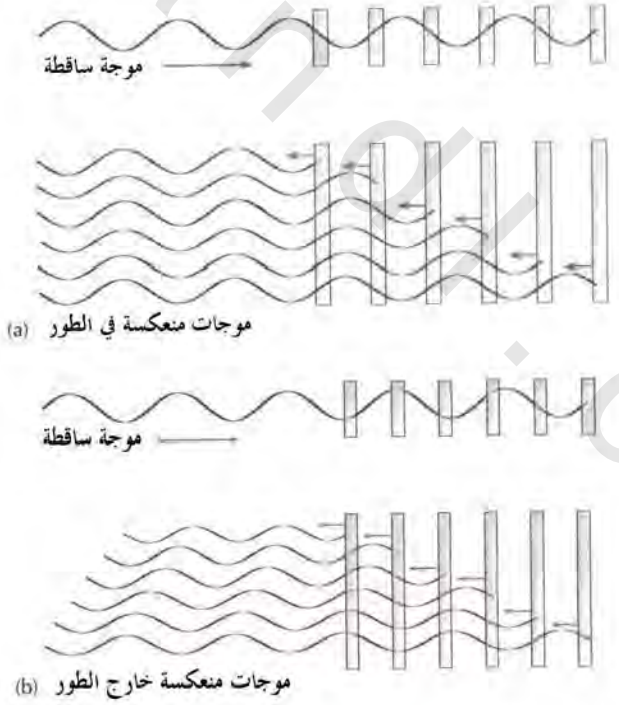
(٨,٥) بلورات فوتونية

Photonic Crystals

تم الترحيب بالبلورات الفوتونية كمكافئات بصرية لأشباه الموصلات. طور إيلي يابلونوفيتش Eli Yablonovitch في مركز أبحاث اتصالات بل Bell فكرة مثل تلك البلورات في الثمانينيات.

تتكون البلورة الفوتونية من ترتيب دوري من مادتين بمعاملي انكسار مختلفين. سوف ينكسر الضوء أو أي إشعاع كهرومغناطيسي آخر عند كل سطح فاصل أو حد بين المادتين وينعكس جزئياً. سوف تقوى الحزم من تداخلات مختلفة أو تلاشي بعضها البعض خارجياً اعتماداً على أطوارها النسبية. يحدد الطول الموجي للإشعاع، اتجاه مساره، معامل الانكسار لمواد البلورة الفوتونية والترتيب الدوري الخاص فيما لو أن الحزمتين ستكونا في الطور. لأطوال موجية معينة من الإشعاع، معاملات انكسار، والمسافات بين المواد يمكن أن يحدث تلاشياً كاملاً في كل الاتجاهات بحيث لا تُنفذ البلورة مثل تلك الأطوال الموجية. يعرف مدى تلك الأطوال الموجية المحظورة بالمماثلة لأشباه الموصلات على أن فجوة نطاقية فوتونية **photonic band gap**. يوضح الشكل رقم (٨,١٥) كيف يمكن للطول الموجي المحظور أن يحدث لترتيب في بعد واحد – صف من ألواح من مادة عازلة.

عند وصول ضوء إلى اللوح، البعض ينعكس بسبب التغير في معامل الانكسار. عند المسافات الصحيحة بين الألواح تكون الحزم المنعكسة من الألواح في الطور مع بعضها البعض لكن تكون خارج الطور مع الضوء الساقط. لمثل تلك الأطوال الموجية تلاشي الحزم الساقطة والمنعكسة بعضها البعض.



الشكل رقم (٨,١٥). صف من ألواح عازلة. يمكن للضوء المتنقل خلالها أن يتداخل تداخلاً هدّاماً مع الضوء المنعكس لينشأ عن هذا أطوال موجية محظورة. في (a) تكون كل الموجات المنعكسة في الطول مع حدوث تداخل هدام. في (b) تكون المسافات للألواح هي تلك التي تنعكس عندها الموجات باختلاف طفيف في الطور وينتقل الضوء خلال الترتيب.

تم إنتاج البلورة الفوتونية الأصلية بتثقيب فجوات بقطر ملليمتر بعناية في كتلة من مادة بمعامل انكسار 3.6. يكون لهذه البلورة فجوة نطاقية فوتونية في منطقة الميكروويف. تستخدم تراكيب مماثلة بفجوات نطاقية في منطقتي الميكرويف والراديو لعمل هوائيات توجه الإشعاع بعيداً عن رؤوس مستخدمي الهواتف النقالة. يكون إنتاج بلورات فوتونية ذات نطاقية عند أطوال موجية أقصر، تحت الحمراء و المرئي أقل وضوحاً ودقة. تكون حجم الفجوة أو مسافة الفصل في الشبكية اللازمة للبلورات الفوتونية مساوية تقريبا للطول الموجي للإشعاع مقسوماً على معامل الانكسار. ينتج ليزر GaAs إشعاع بطول موجيnm 904. وسوف يتطلب استخدام هذا الإشعاع مع بلورة فوتونية مكونة من السليكا بمعامل انكسار 1.45 مسافة فصل nm 623 نانوميتر أو 0.623 ميكروميتر. لا يكون التصنيع الميكني لفجوات بهذا الحجم غير عملي ويكون إنتاج تراكيب منتظمة دورياً بمسافات من هذه الرتبة مسألة فنية وتحتاج في التغلب عليها إلى تضييع الدوائر البصرية المتكاملة والأجهزة الأخرى. أحد المداخل لهذا هو أن نعلق دوائر (عادة من السليكا) بقطر أقل من الميكروميتر في معلق غرواني أو جلّ مائي. تنظم الكرات نفسها في تركيب محكم التراص.

تكون المواد الفوتونية ثنائية الأبعاد (المواد التي يكون فيها الضوء محصوراً أو محجوزاً خلال طبقة لكن ينفذ في اتجاه عمودي على المستوى) مفيدة كألياف بصرية. طريقة سهلة لتشييد مثل تلك الألياف هو أن نخرم سلسلة من أنابيب شعرية مجوفة حول لُبّ مركزي من الزجاج. يتم بعد ذلك تسخين التركيب ويُسحب حتى يكون بضع µm في السمك. يكون اللُبّ المركزي محاطاً بتنظيم دوري من الأنابيب بالقطر الصحيح لكي يكون لدينا فجوة نطاقية فوتونية في تحت الحمراء القريب (الأدنى). بالإمكان أيضاً أن تستبدل اللُبّ الزجاجي المركزي بالهواء وسوف يمكن هذا إشارات ليزر عالية القدرة أن تنفذ على طول الألياف بدون إتلاف مادة الليف.

تشمل تطبيقات أخرى للبلورات الفوتونية بلورات بصفوف من فجوات لإرشاد الإشعاع حول منحنيات (شيء ما لا يمكننا الحصول عليه بالألياف البصرية التقليدية)، تتكون ليزرات نانوسكوبي من هذه الشرائح، تتكون الصبغات فوق البيضاء من ترتيب منتظم من دقائق ثاني أكسيد التيتانيوم دون الميكروني، العواكس بترددات اللاسلكي للتشخيص الطنيني المغنطيسي (MRI) و LED_s.

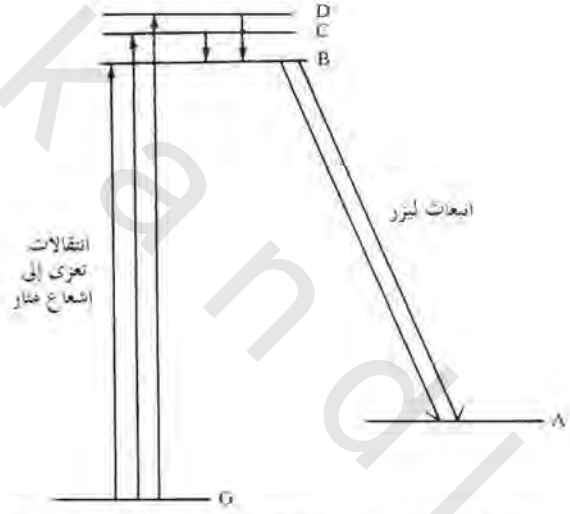
تمت دراسة البلورات الفوتونية فقط في المعمل لعقدين من الزمن، لكن هناك أمثلة متواجدة طبيعياً مع حجر كريم أوبال gemstone opal المعروف جيداً. يتكون الأوبال من كرات صغيرة جداً من السليكا مرتبة في تركيب ممركز الوجه. يعتقد أن هذه قد تكونت من محاليل سليكا غروانية ويعتمد اللون على حجم الكرات.

الأسئلة

Questions

١ – في الأكسيد MnO تشغل أيونات Mn^{2+} الفجوات الثمانية في شبكية أكسيد. يكون انقسام مستويات 3d للمنجنيز إلى جزئين كما في Ti^{3+}. تشغل الإلكترونات الخمس لأيونات Mn^{2+} مدارات d منفصلة ويكون لها غزول متوازية. اشرح لماذا تكون خطوط الامتصاص بسبب الانتقالات بين مستوي 3d ضعيفة جداً لأيون Mn^{2+}.

٢ – يوضح الشكل رقم (٨,١٦) مستويات طاقة Nd^{3+} في عقيق ألومنيوم أتريوم ($Y_3Al_5O_{12}$) الداخلة في تأثير الليزر لهذه البلورة (معروفة على أنها ليزر نيوديميوم YAG). صِفْ العمليات التي تحدث عند تشغيل الليزر.

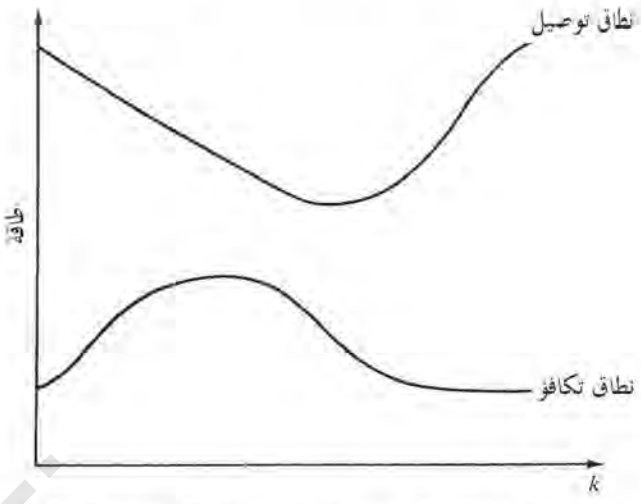


الشكل رقم (٨,١٦). مستويات طاقة Nd^{3+} في العقيق الأحمر إتريوم ألومنيوم.

٣– مادة متفسفرة تستخدم عادة على شاشات التلفزيون هي Zns المشابة بواسطة Cu^{+}. يكون هذا أكثر تأثيراً عند تحويل الطاقة إلى مواضع الشائبة للانبعاث عن المواد المتفسفرة المعتمدة على الفوسفات كمضيف. يكون ZnS شبه موصل. اقترح سبباً لكفاءة التحويل في هذه المادة الصلبة.

٤ – يوضح الشكل رقم (٨,١٧) نطاقين لشبه موصل. هل الفجوة النطاقية لهذه المادة الصلبة مباشرة أم غير مباشرة.

obeikandl.com



الشكل رقم (٨,١٧). رسم الطاقة ضد k لنطاقين من مادة صلبة.

٥- اشرح لماذا يستخدم السيلكون للخلايا الشمسية، وليس لـ **LEDs**.

٦- يحتوى لُبّ ألياف السليكا البصرية على بعض B_2O_3، GeO_2 و P_2O_5. كيف يمكن لهذه الشوائب أن تزيد معامل الانعكاس؟

٧- تحتوى الأوبالات الحمراء - البرتقالية على كرات أكبر من الأوبالات الزرقاء - الخضراء. كيف يمكن للأطوال الموجية للفجوة النطاقية الفوتونية أن تتغير مع اللون؟

obeikandl.com