This file has been cleaned of potential threats.

To view the reconstructed contents, please SCROLL DOWN to next page.

الفصل الأول

عناصر أشباه الموصلات الإلكترونية البصرية– أساسيات وخصائص

تستخدم عناصر أشباه الموصلات الضوئية فى نطاق واسع من التطبيقات تتدرج من نظم إتصالات الألياف البصرية ونظم الإلكترونيات الأكثر حداثة الى الإلكترونيات الإستهلاكية، وأصبح لا غنى عنها في المعدات والنظم التي تشكل البنية التحتية والبحثية لمجتمعاتنا٠ معظم عناصر أشباه الموصلات الضوئية هي عناصر ثنائية التكوين ، مثل ثنائيات الليزر والثنائيات الباعثة للضوء ٠ الإهتمام الرئيسي في مجال العناصر الإلكترونية البصرية الإستفادة من مبادئ الفيزياء وأسس تشغيلها فى التطبيقات٠ فنحن فى حاجة الى المزيد من المعلومات المتصلة بعناصر أشباه الموصلات الإلكترونية البصرية ثنائية التكوين من حيث الخصائص والتطبيق؟ ومعظمها يتمثل فى ثنائيات أشباه الموصلات وأدائها الذي يعتمد على المواد المستخدمة وخصائصها، وأسس تشغيلها وطرق إنتاجها وتطبيقاتها والتعرف على مستويات الطاقة للذرات لكل نطاق لمجموعة المستويات المكونة للمادة الصلبة. ومن الضروري أن نستوعب أساسيات العمليات التي ينطوي عليها وصف لتشغيل عناصر الليزر وعناصر مشعات الضوء وغيرها.

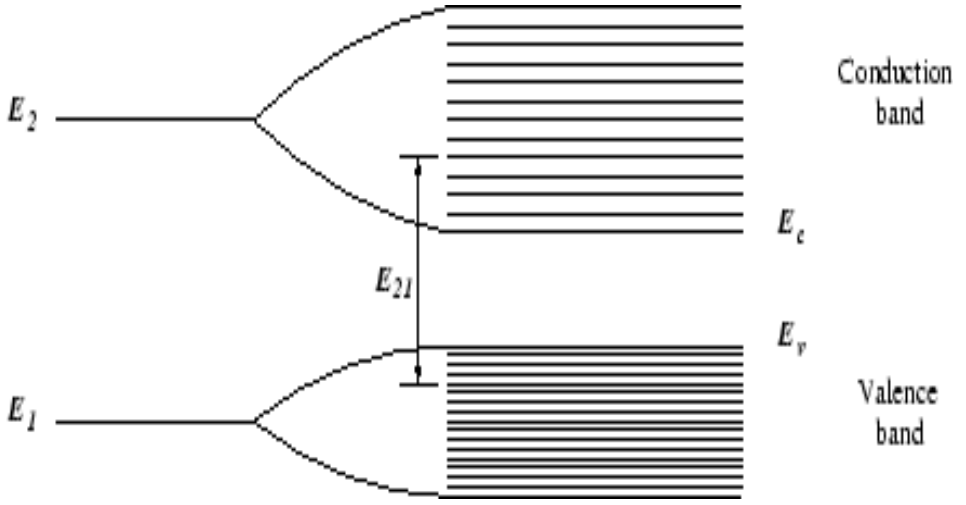
١ – ١ مستويات الطاقة وإنبعاث الفوتونات في عناصر أشباه الموصلات

لكي نتفهم كيف يتم الحصول على أشعة الليزر [١]، يجب التعرف على مستويات الطاقة التي يمكن أن تحتلها الإلكترونات في حيز الطاقة التساهمية فى المواد الصلبة مثل مواد أشباه الموصلات المستخدمة للحصول على ثنائى الليزر. تنقسم مستويات الطاقة الأعلى للذرات الفردية المكونة للمادة إلى مجموعة من المستويات الفرعية.

---

[١] يشير مصطلح الليزر (Laser) الى تكبير الضوء بتحفيز إنبعاث الإشعاع Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation وهو عنصر مشع للضوء (إشعاع كهرومغناطيسى) خلال آلية التكبير الضوئى (optical amplification) المبنية على تحفيز إشعاع (stimulated emission) الفوتونات.

يوضح الشكل (١-١) تخطيط لمستويات الطاقة المرتبطة بالإنتقال المستحث بصريا في كل ذرة معزولة فى مواد أشباه الموصلات الصلبة.

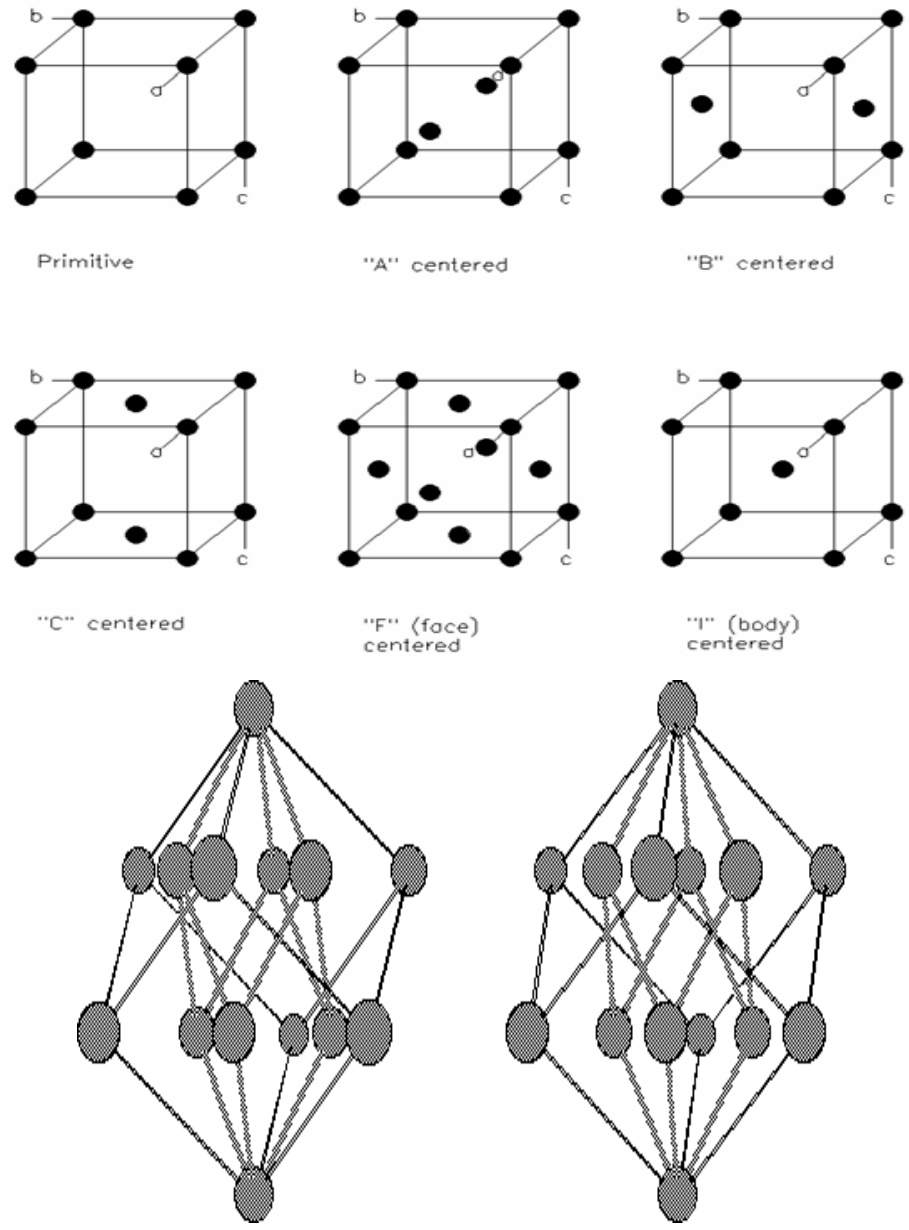


الشكل (١ – ١) مستويات الطاقة المنفصلة من الذرة

▪ تتقاسم إلكترونات النطاقات الخارجية لعدد من الذرات الكثيرة مستوى التكافؤ وتشكل دالة موجية ممتدة في جميع أنحاء البلورة. ينقسم مستوى طاقة الإلكترون إلى مستويين بناء على ترتيب الإلكترونات نفسها حول ذرتين. يعتبر تقسيم مستويات الطاقة ظاهرة أساسية مرتبطة بأساسيات الموجات الكهرومغناطيسية.

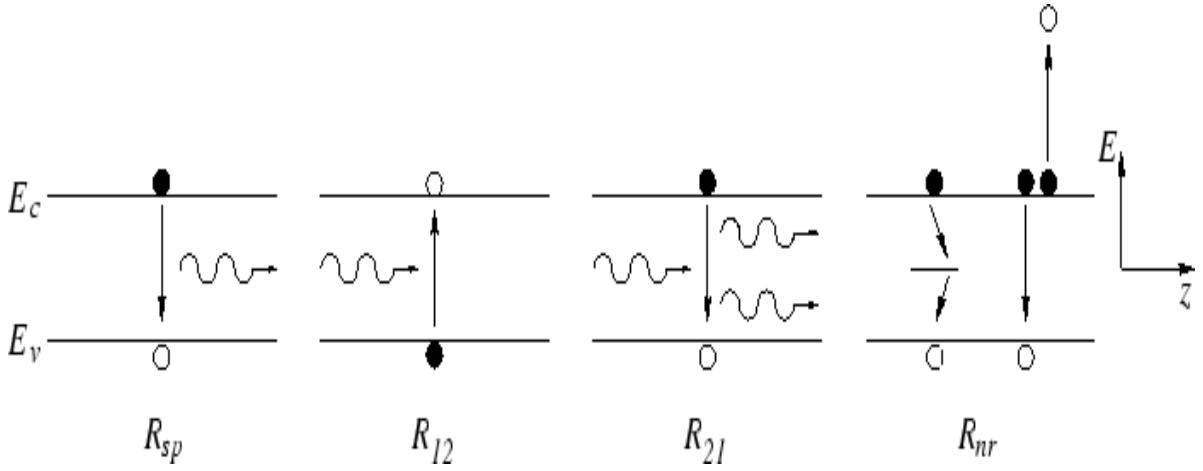
▪ تشغل إلكترونات الذرتين مستوى الطاقة الأدنى (مستوى التكافؤ) لترابط الطاقة، في حين يظل مستوى الطاقة الأعلى (مستوى التوصيل) خاليا – فى ذرات السلسلة الخطية فإن الإنحطاط العكسى يسمح لكل الإلكترونات الوقوع في النصف السفلي من حيز الطاقة تاركة النصف العلوي لمستوى الطاقة فارغا. في التكوين النموذجى لبلورات أشباه الموصلات نجد أن كل وحدة خلية أولية تشتمل على ذرتين إثنين. يتكون مستوى التكافؤ فى أشباه الموصلات بالإنقسام المتعدد لمستويات الطاقة الأعلى للذرات المكونة – فى مواد أشباه الموصلات فإن مستوى التكافؤ مملوء بدون أى إثارة خارجية عند الصفر

المطلق. بالمثل، ينقسم نطاق التوصيل فى أشباه الموصلات الى مجموعة من مستويات الطاقة وكلها خالية من الإلكترونات وذلك فى عدم وجود إثارة خارجية وبغرض حفظ توازن الطاقة فإن ذلك يحد من التفاعلات فى الحالات المتعلقة بإنتقال معين للطاقة.



الشكل (١ –٢) التكوين النموذجى لبلورات أشباه الموصلات

في عملية تلاحم الإلكترونات بالثقوب، تسقط الإلكترونات من مستوى التوصيل إلى مستوى التكافؤ. وينتج فرق طاقة يتمثل فى إنطلاق فوتونات [٢] أو فونون [٣] أو كليهما.



الشكل (١ –٣) الإنتقالات الإلكترونية بين مستوى التوصيل ومستوى التكافؤ

ويبين الشكل (١ – ٣) أنواع مختلفة من الإنتقالات الإلكترونية التي تنطوي على إمتصاص أو إنبعاث الفوتونات (الموجه االضوئية). تمثل الثلاث الحالات الأولى التحولات الإشعاعية للطاقة لتحرير أو ربط إلكترون مكتسب أو معطى الى فوتون – الحالة الرابعة توضح عمليتين غير إشعاعتين. يتطلب المحافظة على قوة الزخم والدفع إختيار عدد محدود من نطاقات مستوى التوصيل والتكافؤ المتعلقة بإنتقال معين للطاقة. في الواقع ، إذا لم يكن عرض النطاق الترددي للتفاعل محدود نظراً لعمر حوامل الشحنة المحدودة ، فقد تنجح أحد الحالتين. وبالتالى يتأثر حساب الكسب وغيره من الآثار على عدد الحالات المنفردة التى تتكامل مع التفاعلات مع حالات اخرى – كما يوضح شكل (١ – ٣) حالات الإنتقال الإلكترونية الأساسية الأربعة لآليات تلاحم وتوليد الإلكترونات والتى يجب التعرف لكل منها.

---

[٢] الفوتونات هى جسيمات أولية الكم الضوئى وجميع الأشكال الأخرى للإشعاع الكهرومغناطيسي، وشحنات القوة الكهرومغناطيسية، والفوتون ليس له كتلة

[٣] الفونون يمثل إثارة جماعية في الترتيب الدوري، ومرونة فى ترتيب الذرات أو الجزيئات في المواد المكثفة

١- التلاحم العفوى [٤] (إنبعاث فوتون) يتمثل فى حالة إلكترون في مستوى التوصيل يتلاحم عفويا مع ثقب فى مستوى التكافؤ لتوليد فوتون٠ ينتج عن ذلك حدوث عدد من إنبعاثات غير متماسكة وحيث أن زمن وإتجاه الإنبعثات عشوائى - لا تميل الفوتونات إلى المساهمة التفاعلية في مجال إشعاع متماسك - هذه هي الآلية الرئيسية لإنبعاث ضوء من عنصر ثنائي مشع للضوء [٥]، التى لا توفر فوتونات مرتجعة ٠

٢- تحفيز توليد (إمتصاص فوتون) - يساعد على توليد إلكترون في مستوى التوصيل مع ترك ثقب في مستوى التكافؤ.

٣- تحفيز التلاحم (إنبعاث فوتونات متماسكة) وتوليد فوتون مع عكس علامة التفاعل. يسبب حدوث توليد فوتون إزعاجا لنظام الطاقة، تحفيز تلاحم الإلكترونات مع الثقوب تولد فوتونات جديدة بإنتظام. كل هذا يحقق مكاسب إيجابية بالغة الأهمية وضرورية لتشغيل أشعة الليزر.

٤- تلاحم الجزئ الغير إشعاعي- يساعد إلكترون فى مستوى التوصيل التلاحم مع ثقب فى مستوى التكافؤ دون توليد أي فوتونات ٠ ويتمثل كتبديد للطاقة على شكل حرارة في التكوين البلورى فى مواد أشباه الموصلات. ينبغي تجنب هذه الآثار السلبية كلما أمكن ذلك. في الممارسة العملية هناك آليتان غير إشعاعيتين لحوامل الشحنة.

أ - مراكز التلاحم الغير إشعاعية [٦] مثل نقاط عيوب فى الشكل البلورى والأسطح والواجهات في المنطقة النشطة من الشريحة.

---

[٤] الإنبعاثات العفوية (Spontaneous emission) هي آلية فيها يتمثل مصدر الضوء كذرة وجزيء أو بلورة نانو أو نواة في حالة إثارة تخضع للتحول إلى حالة بطاقة أقل

[٥] الدايود المشع للضوء (LED) light-emitting diode هو مصدر ضوئى شبة موصل بطرفين٠ يشع ضوء عند تنشيطة٠ بتوصيل جهد مناسب بين الطرفين تتمكن الإلكترونات التلاحم مع الثقوب فى الدايود, تولد طاقة على شكل فوتونات٠ ويسمى هذا التأثير إضاءة كهربية (electroluminescence) ويتحدد لون الضوء معتمدا على قيم الفجوة الطاقية لمادة شبه الموصل المقابلة لطاقة فوتون ٠

[٦] التلاحم الغير مشع هو آلية فى مادة الفسفور ومواد أشباة الموصلات، حيث حاملات الشحنات تتلاحم بدون تحرير الفوتونات ويتم تحرير فونون بدلاً من ذلك

ب – التلاحم المثقب [٧] التي تعطي طاقة جزئ إلكترون– ثقب كمية طاقة قدرها الفرق بين مستوي التوصيل والتكافئ (طاقة ٢١) [٨] الى إلكترون آخر أو ثقب في شكل طاقة حركية٠ طاقات الفوتون تميل إلى أن تكون أكبر قليلاً من مستوى الفجوة الطاقية،

$$E_{21} = hv \sim E_g.$$

تزداد كثافة الإلكترونات فى مستوى التوصيل بإضافة وسائل ضخ خارجى لزيادة كثافة الإلكترونات لقيمة أعلى من مستوى الإتزان٠ حيث يتطلب التلاحم العفوى تواجد إلكترون وثقب – يتناسب معدل التلاحم مع حاصل ضرب كثافة الإلكترونات والثقوب٠ فى المناطق النشطة الغير محقنة– يتطلب أن تكون كثافة الإلكترونات والثقوب متساوية ليصبح معدل التلاحم العفوي متناسباً مع مربع كثافة الإلكترونات وبالمثل في المنطقة النشطة الغير محقنة ، تعتمد محصلة التلاحم العفوى على تواجد الفوتونات بالإضافة الى قيمة معينة من كثافة الإلكترونات حتى تتغلب على إمتصاص الفوتونات٠ يزداد معدل التلاحم الإشعاعي مع كثافة كل من حوامل الشحنة الأقلية والأغلبية وعدد الفوتونات المنبعثة لكل وحدة حجوم فى الثانية كما يلي:

$$R = B_{rec}\, p\, \Delta n \qquad \text{المعادلة (١–١)}$$

حيث : (P) تمثل كثافة الشحنات الأكثرية و(N) تمثل كثافة الشحنات الأقلية و(B_{rec}) تمثل معامل تلاحم الجزئ٠ تركيز حوامل الشحنة الأغلبية يزداد بزيادة كثافة الشوائب المحقنة كما يمكن زيادة كثافة حوامل الشحنة الأقلية بحقن المزيد منها٠ كل مواد أشباه الموصلات فردية العنصر أو ثنائية العنصر لها فجوة طاقية معلومة ومحددة عند درجة حرارة معينة٠ إذا كان إختيار مادة التصنيع مقيد بتكوينها البلورى فردي العنصر أو ثنائي العناصر (أشباه الموصلات ثنائية العنصر هى مركبات مصنوعة من عناصر مجموعتين مختلفتين من الجدول الدوري (على سبيل المثال: من المجموعة

---

[٧] تأثير أوجير (Auger effect) هو ظاهرة فيزيائية التى ترافق ملء نطاقات الطاقة الداخلية الشاغرة (an inner–shell vacancy) فى الذرة مصحوبة بانبعاث إلكترون من نفس الذرة

[٨] طاقة الفوتون (E21=E2–E1) وكثافة الفوتون ((nph(E21) تتفاعل بالإنتقال المباشر لأشباه الموصلات.

الثالثة والخامسة أوالثانية والسادسة، إلخ.) فإن الأطوال الموجية المتاحة سيكون محدودا إلى حد ما٠ فى المعادلة (١ – ١) معامل تلاحم الجزئ لمواد أشباة الموصلات ذات الفجوة الطاقية الغير مباشرة [٩] مثل الجرمانيوم والسيلكون وجاليوم فوسفيد أصغر بثلاث الى خمس مرات فى المقدار عن مواد أشباة الموصلات ذات الفجوة الطاقية المباشرة.

كما نعلم، ينبعث الضوء كذلك من محاليل لمواد أشباه الموصلات الصلبة، عن طريق خلط مادتين أو أكثر من مواد أشباه الموصلات الثنائية، يمكننا الحصول على محاليل لمواد صلبة ثلاثية أو رباعية البلورات. يمكن ضبط مستوى الفجوة الطاقية، ومعامل الإنكسار، وثابت المعامل البلورى لمثل هذه المحاليل للمواد الصلبة بتغيير تكوين المواد المساهمة وكيفية النمو البلورى لهذه المحاليل.

جدول (١ – ١) يوضح معامل تلاحم الجزيئات لعدد من مواد أشباة الموصلات

مادة شبة الموصل	نوع الفجوة الطاقية	معدل تلاحم الجزيئات فى سم^{٣}/ ثانية
سيليكون	غير مباشرة	١و٩٧ X ١٠$^{-١٥}$
جرمانيوم	غير مباشرة	٥و٢٥ X ١٠$^{-١٥}$
جاليوم فوسفيد	غير مباشرة	٥و٣٧ X ١٠$^{-١٤}$
انتيمون انديوم	مباشرة	٤و٥٨ X ١٠$^{-١١}$
خرسينات انديوم	مباشرة	٨و٥٠ X ١٠$^{-١١}$
انتيمون جاليوم	مباشرة	٢و٣٩ X ١٠$^{-١٠}$
جاليوم ارسينيد	مباشرة	٧و٢١ X ١٠$^{-١٠}$

---

[٩] فى فيزياء أشباه الموصلات نجد أن الفجوة الطاقية لها نوعان٠ فجوة طاقية مباشرة وأخرى غير مباشرة٠ يتسم الحد الأدنى لكل حالة طاقة في نطاق التوصيل والحد الأعلى للطاقة في نطاق التكافؤ بزخم بلورى معيناً (k–vector) فى منطقة برلين (Brillouin zone.) ٠ إذا تساوى المتجه (k–vectors)، فى هذه الحالة تسمى فجوة طاقية مباشرة٠ وفى حالة إختلافهما تسمى فجوة طاقية غير مباشرة٠ تسمى الفجوة الطاقية مباشرة فى حالة تساوى كثافة الإلكترونات والثقوب فى نطاقى طاقة التوصيل والتكافؤ , يمكن أن تنبعث الفوتونات مباشرة من الإلكترونات ٠ فى حالة الفجوة الطاقية الغير مباشرة لا يمكن أن تنبعث فوتونات لأن الإلكترونات يجب أن تمر عبر نقل قوة دفع فى الحالة الوسط الى شعيرات البلورات

١-٢ مواد أشباه الموصلات للعناصر الإلكترونية البصرية

يعتمد تصنيع العناصر الإلكترونية البصرية على خصائص المواد المستخدمة٠ وهناك مجموعة محدودة من مواد أشباه الموصلات التي تعطى كافة الخصائص اللازمة لتصنيع العناصر الإلكترونية البصرية٠ أحد المواد المستخدمة للتصنيع وصلة غير متجانسة مزدوجة[١٠] والمكونة من مادتين على الأقل من مواد متوافقة ، أحدهما تستخدم لعمل طبقة الكسوة أو التغليف والأخرى للمنطقة النشطة٠ في المكونات الأكثر تعقيداً يستخدم ثلاث أو أربع مواد مختلفة الفجوة الطاقية داخل نفس البنية٠ الشرط الأساسي للمواد المستخدمة والمختلفة فى قيمة الفجوة الطاقية أن يكون لها نفس البنية البلورية وتقريبا نفس ثابت التكوين البلورى (الأطوال التي تدل على حجم الخلية فى وحدة التكوين البلورى مكعب الشكل، فيمثل طول الضلع أحد جوانب وحدة الخلية التى تتكون منها المادة. ومن الصعب وضع تعريف بسيط للمصطلح، ويجب الأخذ فى الإعتبار ثابت التكوين البلورى بالتكوين الهندسى في كل حالة٠ حتى يمكن ترسيب طبقة أحادية البلورة على طبقة أخرى والتى تعرف بالنمو الفوقي [١١] يجب أن تكون الشريحة المرسب عليها خالية من العيوب وتستوفي الشروط الأساسية للتصنيع.

- **مركبات أشباه الموصلات من عناصر المجموعتين الثالثة والخامسة**

تتألف هذه المركبات من العناصر من العمودين الثالث والخامس من الجدول الدوري – ظهرت هذه المركبات كمواد تستخدم لتصنيع العناصر الضوئية التي ينبعث منها موجات ضوئية ذات طول موجي في نطاق ٧و٠ الى ٦و١ ميكرومتر. يتضمن هذا الحيز أهم نطاق يستخدم فى الإتصالات عبر الألياف الضوئية ذات الطول الموجى ٨٥و٠ و

---

١٠ تتكون الوصلة الغير متجانسة المزدوجة من مادتين شبه موصل أو أكثر وتنمو مختلطة٠ يستخدم مركب مثل ألومنيوم – جاليوم– خراصين (AlGaAs) لتغطية الطبقات الخارجية ومادة أخرى بفجوة طاقية أصغر مثل مركب ألومنيوم – خراصين (GaAs) لتغطية الطبقات الداخلية

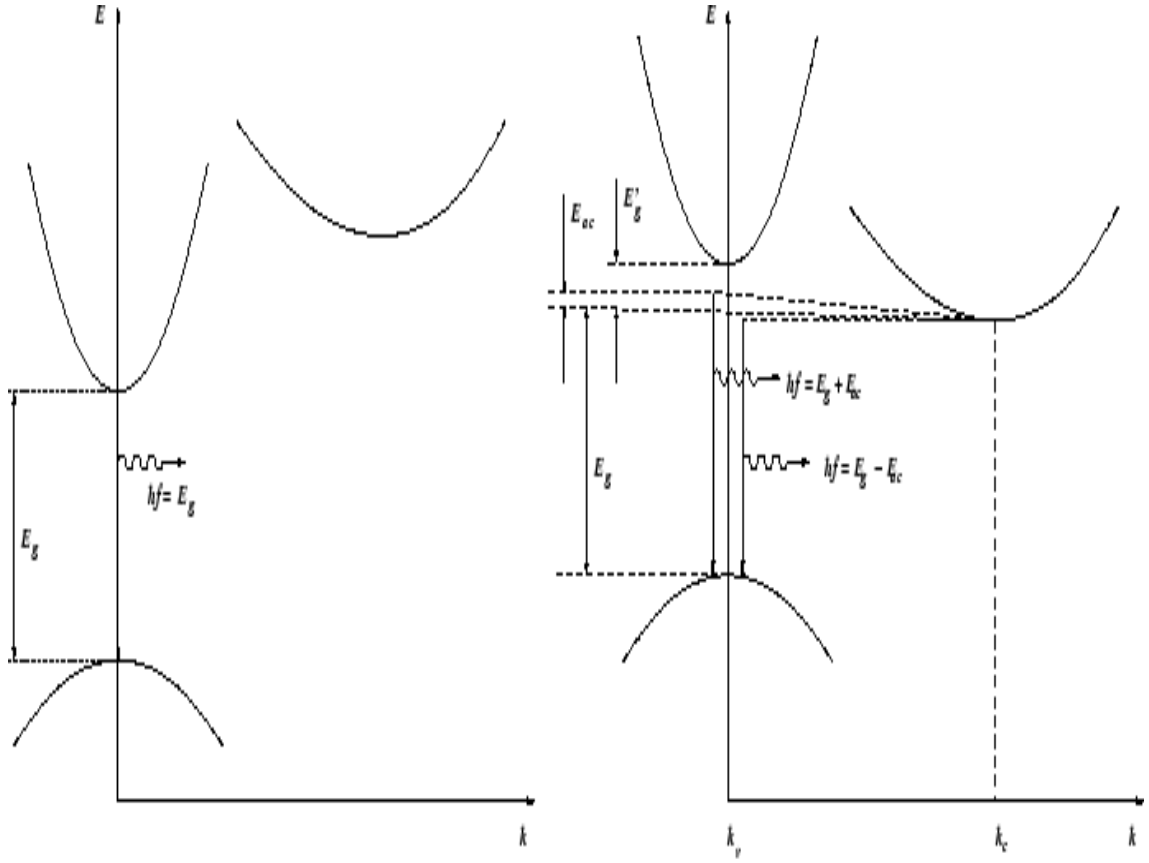
١١ النمو الفوقي، ويشير إلى ترسب طبقة بلورية عليا على ركيزة بلورية، فى كلمات أخرى، يجب أن يكون هناك إتجاه أو أكثر من الطبقات العليا فيما يتعلق بالركيزة لهذا يطلق عليه النمو الفوقي.

١٣٠و١ و٥٥و١ ميكرومتر، وأيضا نطاق الضخ لمكبرات الصوت عبر الألياف الضوئية عند طول موجى ١٤٨و١ و ٩٨و٠ ميكرومتر- ولضخ جزيئات نيديميم (يوتريوم- الومنيوم- عقيق (جرانيت او رخام) المعروفة باسم (ى أ ج)[١٢] عند طول موجى ٨١و٠ ميكرومتر والطول الموجي المستخدم حاليا لمشغلات الأقراص الضوئية ٧٨و٠ ميكرومتر٠ معظم هذه المواد ذات فجوة طاقية مباشرة في الفراغ ما بين الحد الأدنى والحد الأقصى لمستوى نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ على التوالي كما هو مبين في الشكل (١ - ٤) ٠ يوضح إنبعاث الفوتون فى مواد أشباه الموصلات ذات الفجوة الطاقية المباشرة والغير مباشرة٠ ونظراً لوجود ثلاث مجموعات من ذرات عناصر العمود الثالث (إلومنيوم وجاليوم وإنديوم) وثلاث مجموعات من ذرات عناصر العمود الخامس (فوسفور وخارصين وأنتيمون) وهناك ١٨ مجموعة ممكنة ثلاثية التكافئ من محاليل عناصر العمود الثالث والخامس. يتضح أن بعض محاليل المواد الصلبة من عناصر العمود الثالث والخامس لها فجوة طاقية مباشرة والبعض الآخر له فجوة طاقية غير مباشرة٠ وهذا يعني أن جميع مواد أشباه الموصلات ثلاثية التكافئ لا تصلح لتصنيع العناصر البصرية. يمكن حساب ثابت التكوين البلورى للمواد الرباعية من قانون فيجارد [١٣] والذي يعطي قيمة مساوية للمتوسط المرجح لكل من الأربعة مكونات الممكنة والمكونة للمركبات الثنائية.

---

[١٢] جرانيت الأتريوم ألومنيوم المطعم بمادة نيوديميوم ($Nd:Y_3Al_5O_{12}$) هى بلورات تستخدم كوسط تحفيز لليزر المواد الصلبة٠ مادة التخدير نيوديميوم المتأين (triply ionized neodymium) ، جرانيت الأتريوم ألومنيوم المطعم بمادة نيوديميوم ((Nd(III)) عادة ما يقوم باستبدال جزء صغير(١%) من أيونات يتريوم في بنية بلورية للمركب المضيف ((yttrium aluminium garnet (YAG) حيث الأيونات بحجم مماثل. وهو أيون نيوديميوم الذي يوفر التحفيز في البلورة، بنفس الطريقة كأيون الكروميوم الأحمر في ليزر روبي (ruby lasers).

[١٣] في علم المواد، القانون فيجارد (Vegard's law) هو الكشف عن مجريات الأمور التجريبية أن المعاملات الشعرية لمحلول مكونين من المواد الصلية المساوية تقريبا لقاعدة خلط المعاملات الشعرية للمكونين في نفس درجة الحرارة: يفترض قانون فيجارد ($a_{\mathrm{A}_{(1-x)}\mathrm{B}_x} = (1-x)\,a_{\mathrm{A}} + x a_{\mathrm{B}}$)أن المكونين أ و ب فى حالتهم النقية لها نفس التكوين البلورى (قبل الخلط) ٠



(a) Direct band–gap semiconductors (a) Indirect band–gap semiconductors

الشكل (١ – ٤) انبعاث فوتون فى مستويات الطاقة المباشرة وغير المباشرة

على سبيل المثال يمكن حساب قيمة المتوسط المرجح للمركب المكون من العناصر إنديوم وجاليوم وخراصين وفوسفور على النحو التالى:

$$a(x, y) = x\,y\,a_{GaAs} + x(1 - y)\,a_{GaP} + (1-x)\,y\,a_{InAs} + (1-x)(1-y)\,a_{InP}$$

المعادلة (١ – ٢)

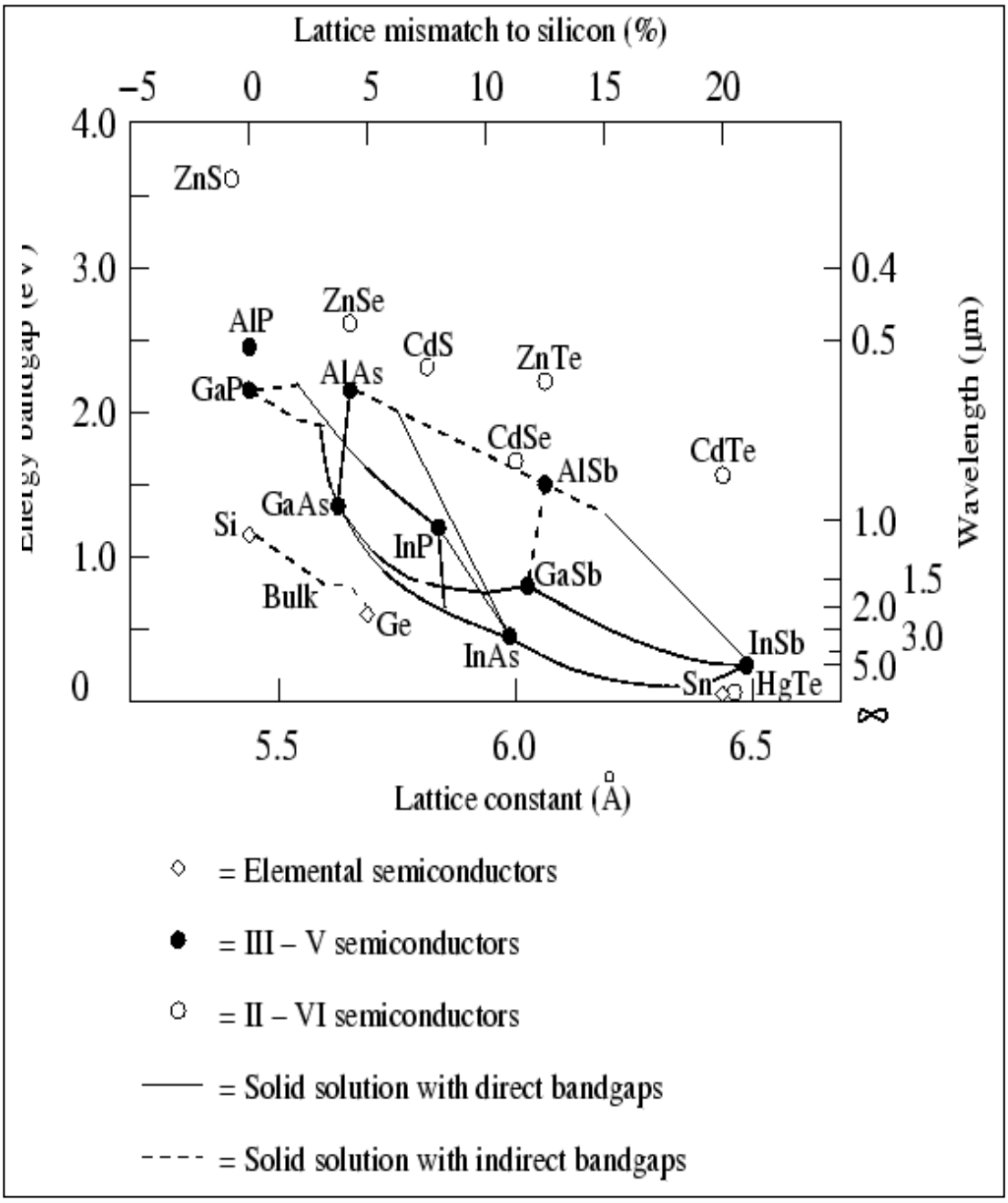
وبالمثل، يمكن حساب ثابت التكوين البلورى لسبائك أخرى بإستخدام المعادلة (١ – ٢)٠ وبالإضافة إلى ذلك أن بعض مركبات النتريد التى إكتسبت الإهتمام بسبب إستخدامها في العناصر التي تنبعث منها الطاقات العالية في الطيف المرئي. تعتبر المحاليل من المواد الصلبة ذات جودة بصرية جيدة إذا كان ثابت التكوين البلورى للمواد

الثنائية التكوين مطابق بشكل جيد (فى حدود نسبة ٠,١% لسمك معين حوالي ٢٠ نانومتر)٠ فى حالة عدم توافق التكوين البلورى تظهر عيوب بلورية وتتوزع هذه العيوب عشوائياً في جميع أنحاء المادة. كنتيجة لذلك، تصبح هذه المواد غير مفيدة للتطبيقات البصرية ولذلك يتحتم معرفة شاملة بخصائص أشباه الموصلات المختلفة والتى تعتبر مفيدة٠

- مركبات أشباه الموصلات من عناصر المجموعتين الثانية والسادسة

تتراوح قيمة الفجوة الطاقية من قيم كبيرة جداً الى قيم صغيرة جداً أو حتى لقيم سلبية – جميع مركبات أشباه الموصلات ثنائية التكوين المكونة من عناصر العمودين الثاني والسادس ذات فجوة طاقية مباشرة٠ ويعتبر العيب الرئيسي لمواد العمودين الثاني والسادس هى الصعوبة فى تشكيل وصلة ثنائية (من مواد شبة موصل ذات الموصلية (ن) (ب) منهما على نفس الشريحة وأيضا من الصعب تشكيل نقاط توصيل.

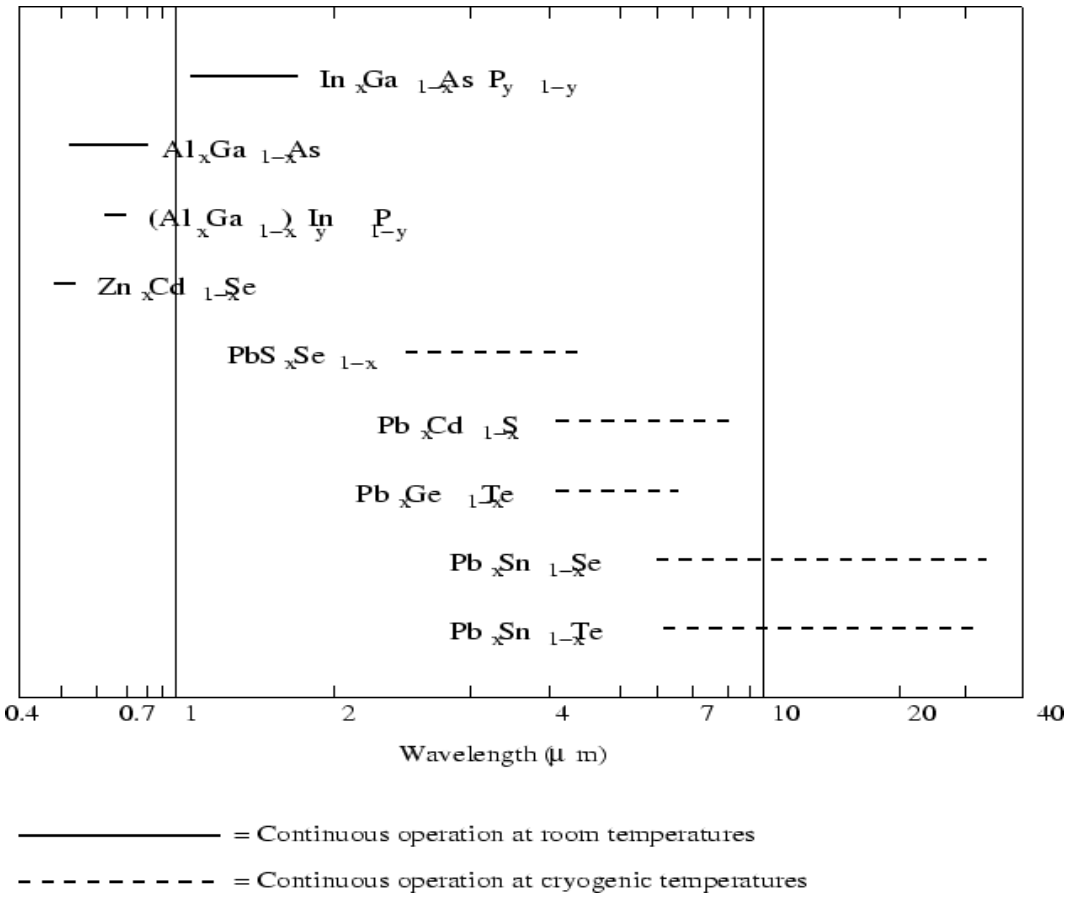
يوضح الشكل (١ – ٥) خصائص وقيم الفجوة الطاقية وثابت التكوين البلورى للعناصر المعتادة لمركبات العمودين الثالث والخامس ومركبات العمودين الثانى والسادس. بشكل عام، يتطلب تشكيل عنصر ليزر من مركب ثنائى التكوين مركب رباعي يسمح بتعديل فجوة الطاقة مع الحفاظ على تطابق التكوين البلورى. وهناك بعض الحالات التي تسمح بإستخدامات أكثر بساطة. كما نرى فى الشكل فإن خط التوصيل للمركب الثلاثى (الومنيوم – جاليوم – خراصين) غالبا عمودي تقريبا. وهذا يعني أن الإستعاضة بعنصر الألمنيوم بعنصر الجاليوم في مركب الجاليوم خراصين لا يغير ثابت التكوين البلورى كثيرا. ينبعث من مركب (الومنيوم – جاليوم – خراصين) / (جاليوم–خراصين) أشعة ليزر بطول موجي يتراوح ما بين ٧و٠ – ٩و٠ ميكرومتر.



الشكل (١ – ٥) خصائص وقيم الفجوة الطاقية

- **مركبات أشباه الموصلات من عناصر المجموعتين الرابعة والسادسة**

تتصف مركبات أشباه الموصلات المكونة من عناصر العمودين الرابع والسادس بأنها ذات فجوة طاقية صغيرة جداً وأطوال موجية الإنبعاثات طويلة ويتغير مقدار الفجوة الطاقية على نطاق واسع بالتحكم في درجة الحرارة والضغط أو المجالات المغناطيسية المستخدمة فى أشباه الموصلات.



الشكل (١ – ٦) الأطوال الموجية للإنبعاثات في مواد أشباه الموصلات المستخدمة فى ثنائى باعث الضوء

تستخدم مصادر الضوء الإنضباطي المنبعث من مواد أشباه الموصلات فى تطبيقات التحليل الطيفي بجودة عالية الدقة. كما تستخدم عناصر اشباه الموصلات من عناصر العمودين الرابع – السادس فى تصنيع العناصر الضوئية الباعثة للضوء في درجات

الحرارة الباردة (حوالي ٥٠ ° درجة حرارة مطلقة)٠ بلورات مواد العمودين الرابع والسادس ذات خواص مثيرة للإهتمام حيث أنها مستقرة فى حالة الإتزان في مختلف التراكيبات القياسية. وتعتبر ذرات مادة الرصاص الزائدة في مركب (الرصاص – سيلنيوم) بمثابة إلكترون مانح، ويعتبر فائض ذرات السلنيوم بمثابة مستقبل للإلكترون. كما أنه بتغيير نسب المكونات يمكن تغيير مواد أشباه الموصلات من مواد العمودين الرابع والسادس من نوع الموصلية (ن) إلى نوع الموصلية (ب). يوضح الشكل (١ – ٦) أطوال موجية لإنبعاثات لبعض مواد أشباه الموصلات المستخدمة فى ثنائى باعث الضوء ٠

١ – ٣ تكوينات أشباه الموصلات الأساسية لعنصر ثنائي الإنارة

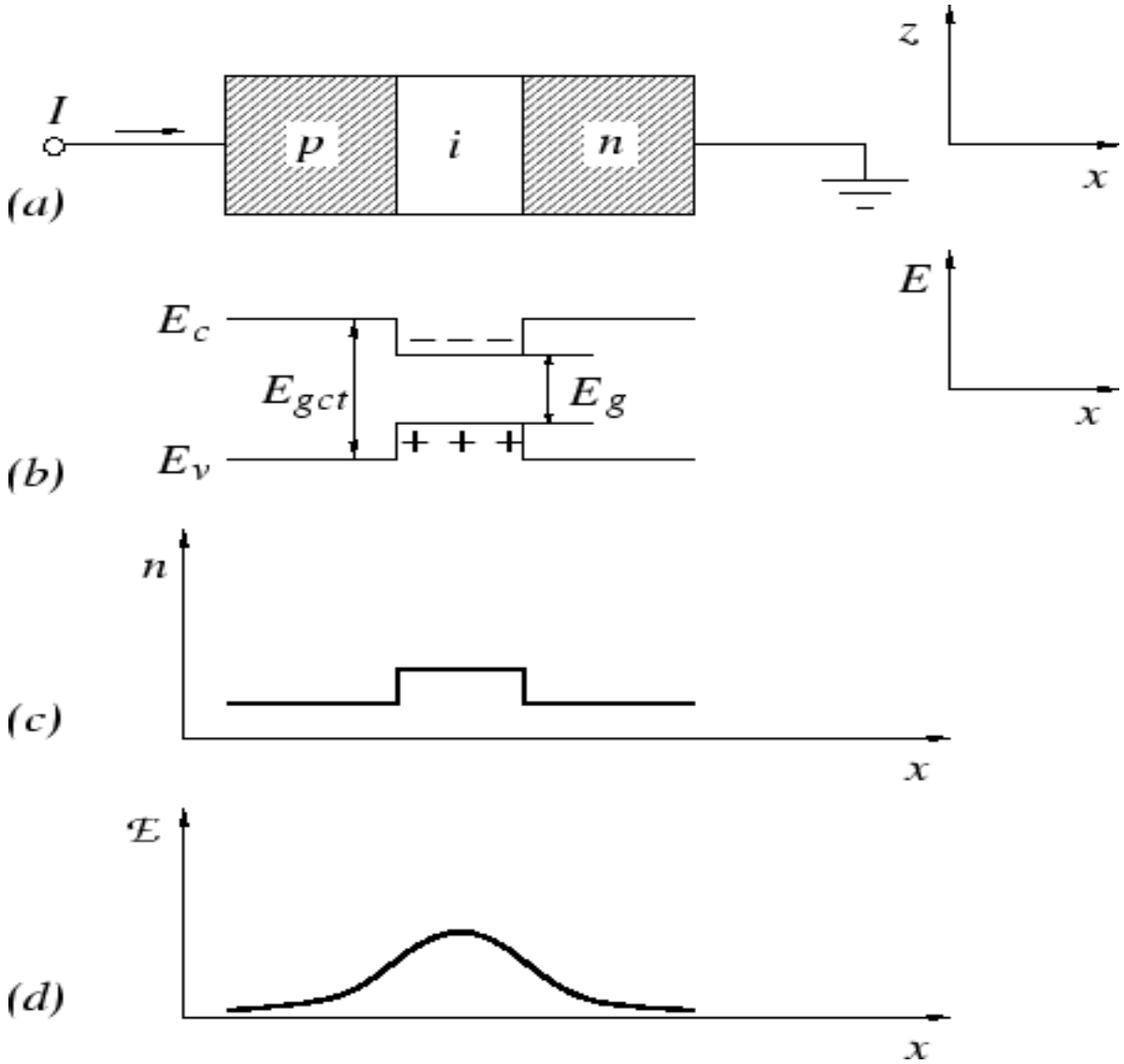
يتكون عنصر ثنائي الإنارة في أشباه الموصلات من طبقة إنتشارية نشطة تقع بين طبقتين من الكسوة. وهناك وصلتين إثنين، واحدة على كل جانب من الطبقة النشطة. ولتشغيل أمثل لمادة شبه الموصل، يجب ضخ أو تحفيز حوامل الشحنة من مصادر الطاقة الخارجية. السمة الرئيسية لعنصر الليزر الثنائي هى قدرته على الضخ مباشرة عند توصيله بتيار كهربائي. وبطبيعة الحال، تتحفز حوامل الشحنة فى المواد النشطة نتيجة لإمتصاص الضوء، وهذه العملية هامة في توصيف مواد أشباه الموصلات قبل أن تتم التوصيلات الكهربائية. يتكون الدايود المشع للضوء[٥] من وصلة متجانسة[١٤] ثنائية (ن– ب) أما العناصر الأكثر حداثة مثل ثنائيات الإنارة الكهربائية تتكون من وصلة ثنائية واحدة أو وصلتين ثنايتين غير متجانستين[١٥] – يتشكل الدايود الثنائي ذو الوصلة

---

١٤ واجهة وصلة أشباه الموصلات المتجانسة (homojunction) التي تحدث بين طبقات من مواد أشباه الموصلات مماثلة؛ هذه المواد لها فجوات طاقية متساوية ولكن عادة ما تكون بنسب شوائب تطعيم مختلفة٠ في معظم الحالات التطبيقية تحدث الوصلات المتجانسة عند الواجهة بين طبقتي شبه الموصل (ن) و(ب) مثل السليكون، هذا ليس شرطا ضروريا كالشرط الوحيد أن تكون الوصلة من نفس مادة شبه الموصل (نفس الفجوة الطاقية) وعلى نقيض الوصلات الغير متجانسة٠

١٥ أسطح الوصلات الغير متجانسة التي تحدث بين الطبقات أو مناطق متباينة (dissimilar crystalline) من أشباه الموصلات البلورية

الواحدة من مادتين مختلفتين كل منها أحدهما متجانسة والأخرى غير متجانسة كما تم تصنيع دايود ثنائي يتكون من ثلاث مواد ووصلتين غير متجانستين. وبعد العديد من الجهود السابقة وللمرة الأولى تم إستخدام وصلات متجانسة أو غير متجانسة مفرده، وأنتج عنصر ليزر دايود بمركبات غير متجانسة مزدوجة.



الشكل (١ – ٨) ليزر صمام ثنائي لوصلة غير متجانسة

أ- شكل تخطيطي للهيكل المادي – ب- رسم تخطيطي لمستويات طاقة التوصيل والتكافؤ مقابل المسافة العرضية ج – معامل الانكسار د- تشكيل المجال الكهربائي في الوصلة

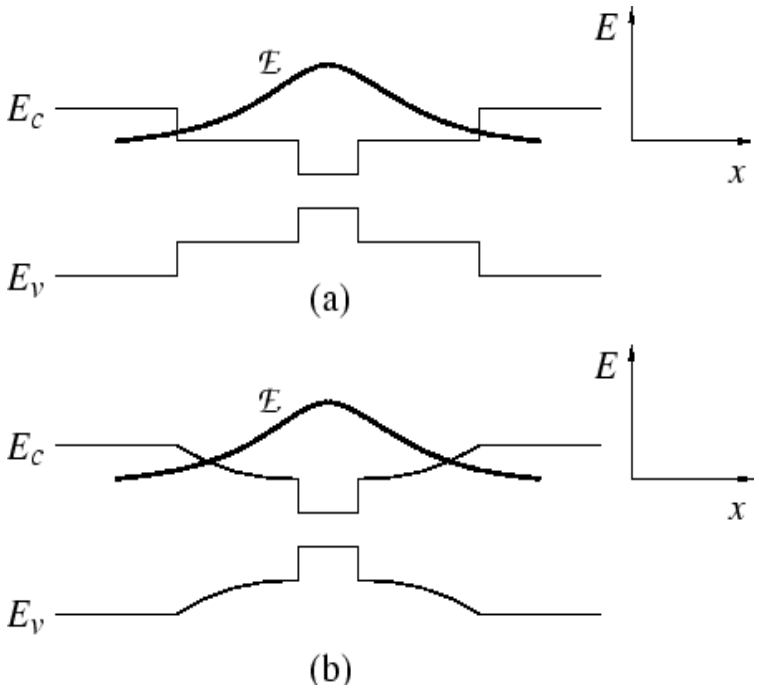
يبين الشكل (١ – ٨) رسم تخطيطي لمجال واسع لتكوين دايود ليزر غير متجانس مزدوج (ب – أى – ن) [١٦] وتخطيط الفجوه الطاقية ومعامل الإنكسار والوضع البصري عبر منطقة الوصلة الغير متجانسة المزدوجة. يتكون الدايود من شريحة رقيقة من مادة غير نشطة بين شريحتين أحدهما (ن) والثانية (ب) ذات فجوة طاقية عالية فى مستوى التوصيل ومستوى التكافؤ. فى مركبات مواد أشباه الموصلات الغير متجانسة المزدوجة، فان الإلكترونات والثقوب التي يتم حقنها من نوع (ن وب) تشكل مصدر جهد عرضي (الإتجاه الأفقى) فى وجود التحيز الأمامى مما سيزيد من إحتمال إعادة تلاحم حوامل الشحنة مع بعضها البعض – ويعتبر مصدر جيد لحوامل الشحنة من الإلكترونات والثقوب التي يتم حقنها فى المنطقة النشطة من النوع (ن وب) على التوالي والتى يتم إلتقاطها وتجميعها معا فى وجود التحيز الأمامى مما يزيد من إحتمال إعادة ضخ حوامل الشحنة مع بعضها البعض.

خلافا لما هو مطلوب في معظم عناصر أشباه الموصلات الثنائية (دايود) أو الترانزستور التي تستخدم في الدوائر الإلكترونية من تلاحم جميع حوامل الشحنة فى المنطقة النشطة لتكوين الفوتونات فى دايود الليزر أو الدايود المشع للضوء. لسوء الحظ هناك دائماً إمكانية لتسرب تيار ناتج عن بعض حوامل الشحنة المنبعثة حراريا أعلى حواجز التكوين للمركب الغير متجانس قبل تلاحمها. ويمكن إعاقة التيار المتسرب بطلاء السطوح بمواد مانعة للإنعكاسات. وبالرغم من وجود بعض التعقيدات في النقل الأفقى لحوامل الشحنة والفوتونات فى الطبقات العازلة لعدد كبير من عناصر الليزر الحديثة إلا أن المفاهيم الأساسية لا تزال صالحة. ويبين الشكل (١ – ٩) ملامح الفجوة الطاقية العرضية لمركبات الوصلات الغير متجانسة المنفصلة والتى تعطى دايود ليزر معروف

---

[١٦] دايود ب أى ن (PIN diode) ذو منطقة واسعة، غير مطعمة من أشباه الموصلات بين منطقة نوع (ن) وأخرى (ب) – المنطقتين نوع (ن) و (ب) عادة بكثافة ذرات تطعيم بشكل كبير لأنهما تستخدمان كأطراف توصيل.

بالتكوين الثنائى المنفصل أحادى البئر الكمى (إس سى إتش – إس كيو ويل) [١٧] وكثافة الطاقة الضوئية العرضية الناتجة لإظهار حوامل الشحنة من المصدر الكمى الداخلى والمضافة لانتاج الفوتونات المحصورة أساسا بالأسطح الخارجية لسطح الوصلات الغير متجانسة٠



الشكل (١ – ٩)، يوضح هياكل النطاقات العرضية لمركبات غير متجانسة لتكوينين منفردين منفصلين أ– تكوين مركب غير متجانس عيارى ب – مؤشر معامل تدريجى– لتكوين مركب غير متجانس

يحدد المجال الكهربائي الناتج عن الفوتونات المتولدة فى مركبات الوصلات الغير متجانسة ذات التغير التدريجي أو عمودية الحقن للإلكترونات٠ وبتحديد المصدر الكمى الأساسى للإلكترونات يمكن مقارنة أداء الثنائيات المختلفة بكثافة تيار العتبة – قيمة

[١٧] لنمذجة فهرس تدريج منفصل الحبس لوصلة غيرمتجانسة ذات بئر كم واحد (GRIN–SCH SQW) –graded) (index separate confinement heterostructure single quantum well يتم إستخدام ليزر دليل موجه ريدج، يتم الحصول على النتائج التجريبية. يستخدم النموذج للحصول على أفضل تكوين لليزر (GRIN–SCH SQW laser) بأقل تيار عتبة وأعلى كفاءة ٠ الوصلة الغيرمتجانسة منفصلة الحبس (SCH) وكذلك بئر الكم الواحد (SQW)، ثنائى الليزر أشباه الموصلات لمكبر ضوئى مطعم بالإربيوم.

التيار المحقون فى الدايود المشع للضوء أقل من تيار العتبة وهو أساسا من الإنبعاثات ذات النطاق العريض والغير مترابطة والعفوية٠ أما فى حالة زيادة حقن حوامل الشحنة فتكون قيم تيار أكبر من قيم تيار العتبة ويصبح ذات عرض النطاق الطيفى متماسك وأرفع٠ أول تطوير دايود حقن الليزر[١٨] تشكلت كل الطبقات المكونة للدايود من مادة جاليوم – خراصين بتقنيات الإنتشار للوصلات المتجانسة[١٤]٠ ومن خصائص تقنيات الإنتشار المستخدمة في التصنيع عدم تحديد أحد جوانب المنطقة النشطة بدقة، مما يعني أن حوامل الشحنة المحقنة لا يقتصر تواجدها فى المنطقة النشطة الضيقة فقط ويختلف التغير فى نسبة حقن الإلكترونات إختلاف بسيط جدا فى الطبقات المختلفة للتكوينات وتعتبر كثافة تيار العتبة أو التيار العائق فى عناصر حقن الليزر كبير القيمة حوالى ١٠٠ كيلو أمبير فى السنتيمتر المربع٠

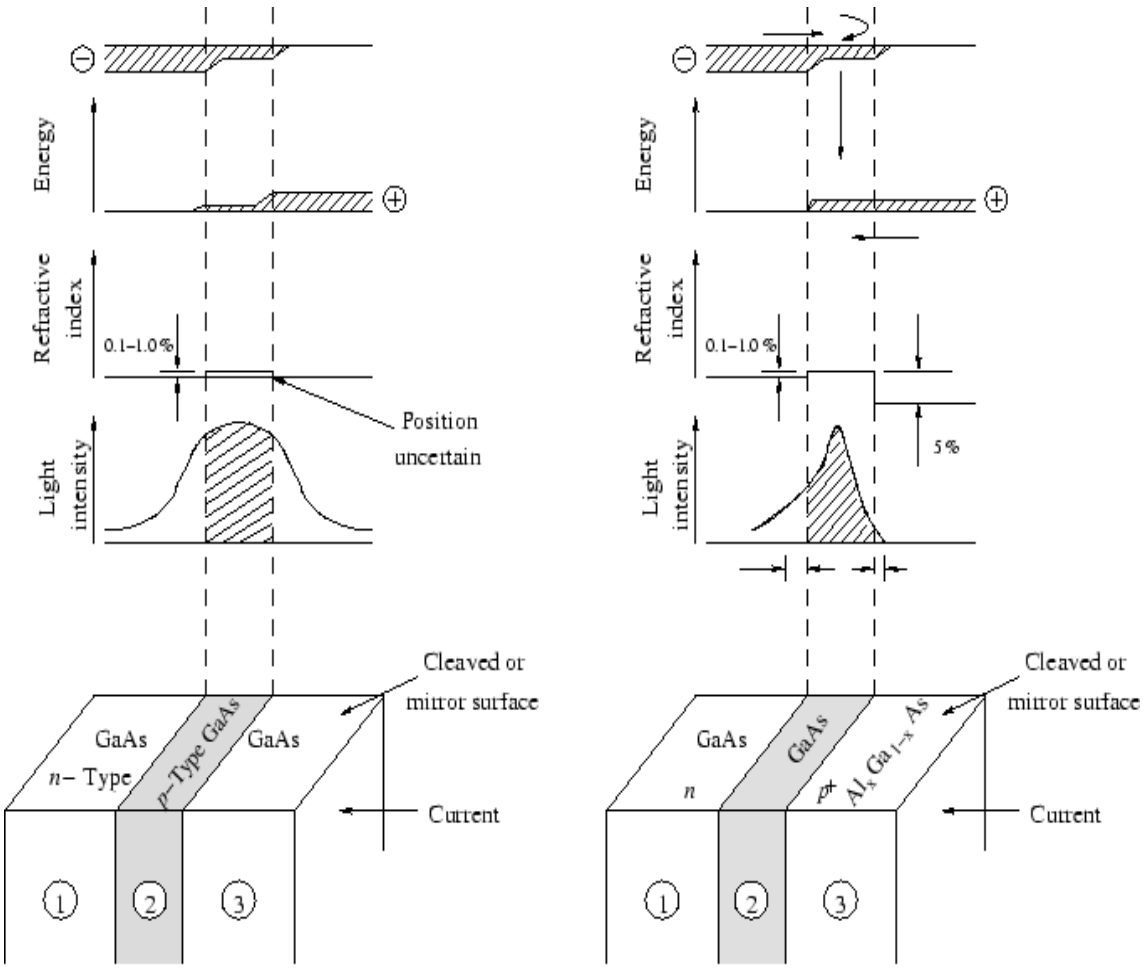
تم تصنيع الجيل الثاني من ثنائيات الليزر بتقنيات ترسيب بلورات فى الحالة السائلة على ركيزة بلورية التكوين (التنضيد)[١٩] وكانت الوصلات من مواد متجانسة والحدود الفاصلة بين الطبقات محددة تحديداً جيدا٠ حيث تستند كل الطبقات لمركب الجاليوم – خراصين ، مما ساعد فى تناقص قيم الفجوة الطاقية وبسبب حدة تقاطع سطوح الواجهات تم حصر حوامل الشحنة فى المنطقة النشطة وإنخفض تيار العتبة الى ٤٠ كيلو أمبير فى السنتيمتر المربع – تنحصر حوامل الشحنة والشعاع الضوئي المتوقع بإستخدام مركبات التكوينات الغير متجانسة[١٤] ٠ وتوزيع المجال البصري لمركب متجانس، ومركب غير متجانس مفرد للثنائيات الباعثة للضوء وعناصر التباين المحدود٠ يبين الشكل رقم (١ – ١٠ أ و ب) كثافة الثقوب$^{+}$ بطبقة من مادة ذات موصلية ب$^{+}$ من الجاليوم – خراصين

---

[١٨] صمام ثنائي حقن ليزر (Injection laser diode (ILD هو عنصر شبه موصل مكون من وصلة ب – ن يمكن أن ينبعث منها شعاع متماسك (emitting coherent)، تحفيز الإشعاع (stimulated Radiation) تحت شروط محددة.

[١٩] تقنيات تنضيد المستويات المسطحة من الحالة السائلة (Liquid phase epitaxy techniques)، ويشير المصطلح لترسيب طبقة عليا (crystalline overlayer) على سطع ركيزة بلورية (crystalline substrate)

التى تم إستبدالها بطبقة من مادة ذات موصلية ب$^{+}$ بتكوينات ألومنيوم – جاليوم – خراصين – كما أن الفجوة الطاقية لمركبات ألومنيوم – جاليوم أوسع من الفجوة الطاقية لمركبات جاليوم – خراصين ٠ الوصلة بين الطبقتين والتى تعتبر وصلة من مركبات غير متجانسة مفردة ذات تكوين ثنائى منفصل [٢٠].



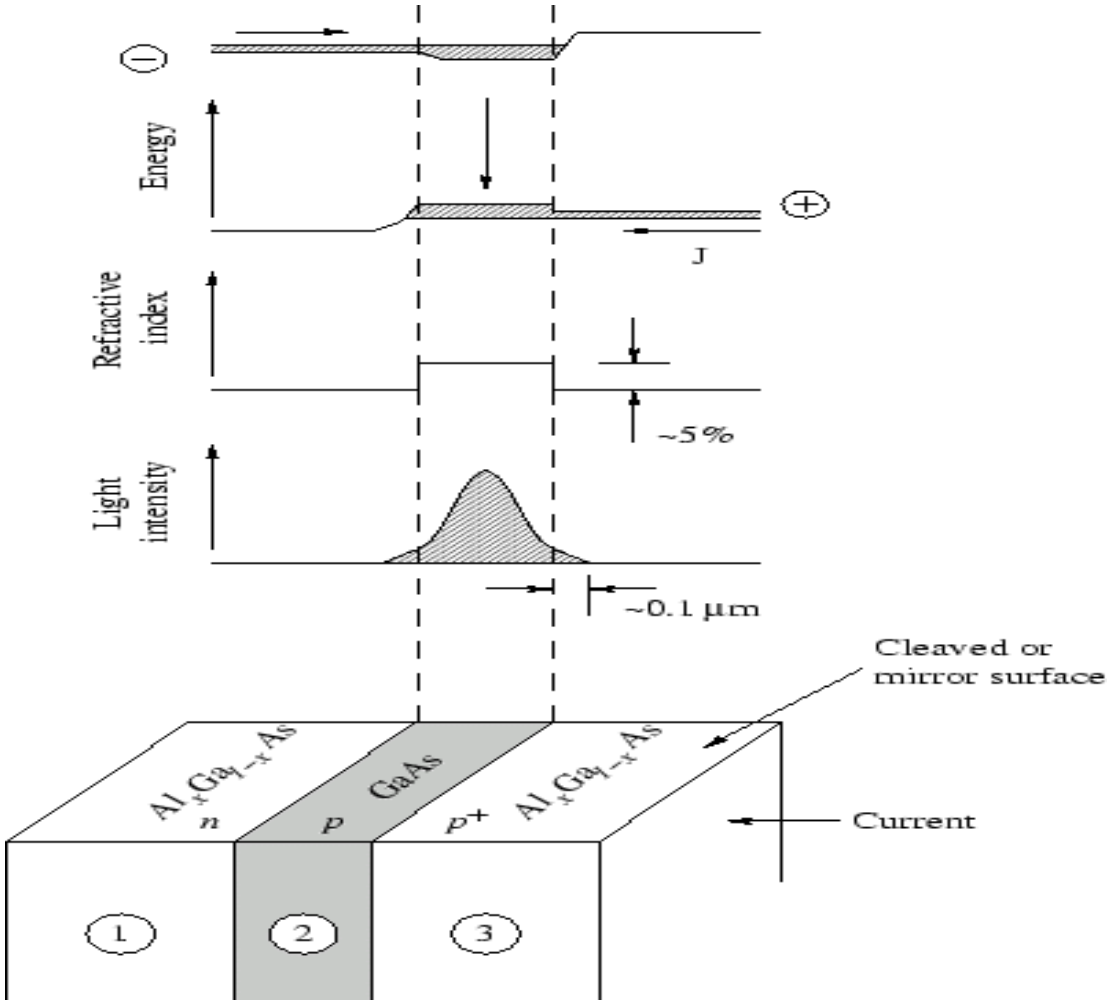
(a) Liquid phase epitaxial homostructure diodes

(b) Single heterostructure diodes

الشكل رقم (١ – ١٠) يوضح رسم تخطيطي للفجوة الطاقية وتخطيط لمعامل الإنكسار تستخدم المركبات الغير متجانسة فى دالتان:

[٢٠] دايود النموذج القصير لأشباه الموصلات Short form Semiconductor (SH) له العديد من التطبيقات في الدوائر الإلكترونية، والتكوينات الغير متجانسة المنفصلة،

تكون جهد حاجز عند الوصلات مما يساعد فى قصر حوامل الشحنة فى المنطقة النشطة. مما يساعد فى تخفيض كثافة تيار العتبة الى حوالي ١٠ كيلو أمبير لكل سم. وقد تحقق مزيد من التطوير بإدماج وصلة غير متجانسة ثانية والذي أسفر عن ظهور الليزر الثنائى للتكوينات الغير متجانسة٠ يبين الشكل (١ – ١٠) رسم تخطيطي لصمام ثنائي غير متجانس التكوين – كما يوضح الإختلاف بين الثنائي غير متجانس التكوين وثنائي التكوينات المنفصلة.



شكل رقم (١ – ١١) رسم تخطيطي للفجوة الطاقية وتخطيط لمعامل الإنكسار، وتوزيع المجال البصري لمركب غير متجانس ثنائى لثنائيات الباعثة للضوء وعناصر التباين المحدود ٠

قصر الطاقة الضوئية في الطبقة النشطة، يضعف الفقد البصري في طبقة الكسوة.

❖ حاجز الجهد المحتمل للثقوب عند وصلة (P_N) والإلكترونات عند الوصلة (Pp)

❖ معامل الإختلاف بين الطبقة النشطة وطبقة الكساء المحيطة والتى تعمل كدليل للموجات الضوئية الناتجة عن ذلك٠ وبسبب هذا التطوير إنخفضت كثافة تيار العتبة الى ٥و٠ كيلو أمبير لكل سنتيمتر مربع عند درجة حرارة الغرفة كما أمكن تخفيض الكثافة الحالية لتيار العتبة بإستخدام طبقات رقيقة جداً معروفة بالآبار الكمية (حيث أن حركة حوامل الشحنة العمودية على الطبقة الرقيقة مقيدة وكمية الطاقة الحركية بمستويات الطاقة المنفصلة)٠ الهياكل المكونة من طبقات رقيقة للغاية لها مستويات طاقة تسمى هياكل آبار الكم)[٢١] ، وتسمى مستويات الفجوة الطاقية جهد البئر. وإحدى النتائج الرئيسية لجهد البئر أن الإلكترونات في المواد الصلبة يمكن أن تتصرف مثل الإلكترونات الحرة مع حلول معادلات مستويات الموجه المكافأه لعلاقات مستويات الطاقة.

١-٤ موجز للهيكل الأساسي لعناصر الضوئية (دايود حقن الليزر – ومشعات للضوء – والإضاءة المتألقة [٢٢])

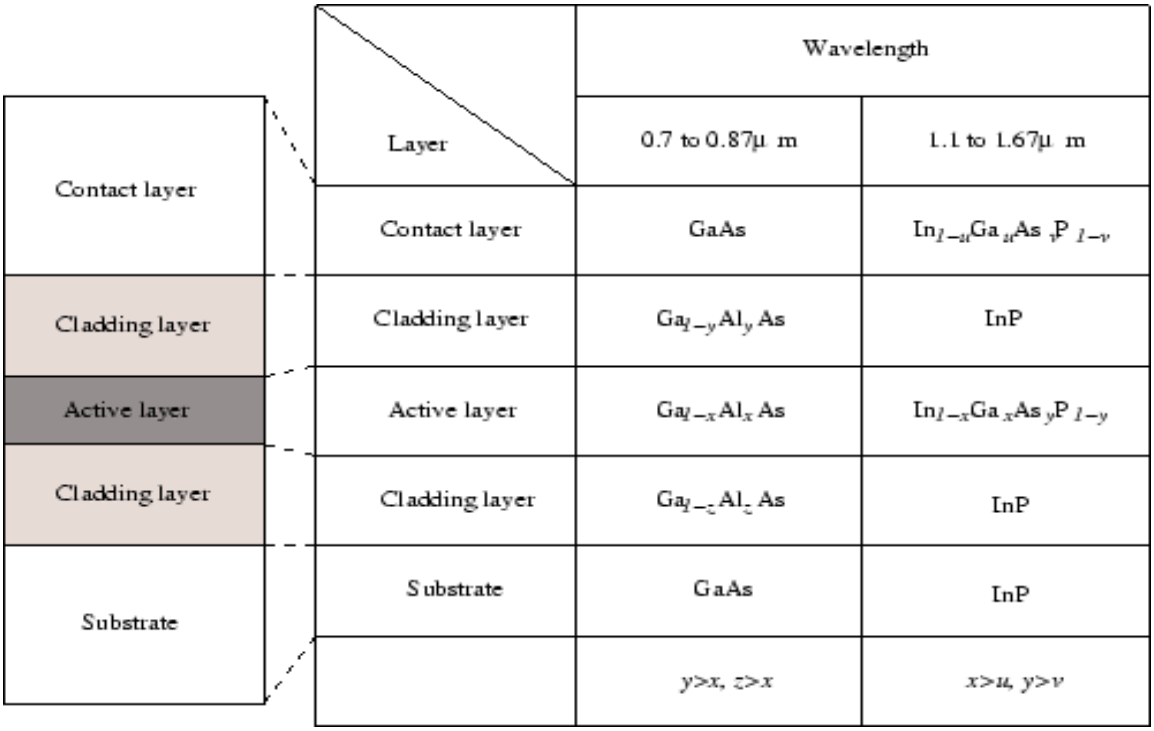
كل العناصر الإلكترونية الحديثة مثل عناصر (دايود حقن الليزر – ومشعات الضوء – والإضاءة المتألقة) تتكون من طبقة نشطة بين طبقتين مرسبة على ركيزة وطبقة موصلات علوية كما هو مبين بالشكل (١ -١٢)

---

[٢١] ليزر البئر الكمى ((quantum well laser هو دايود ليزر به طبقة نشطة ضيقة تحدث بها حبس كمى (narrow that quantum confinement) ٠ يتكون دايود الليزر فى مركبات مواد أشباه الموصلات تختلف عن السيلكون (quite unlike silicon) قادرة على تبعث الضوء بكفاءة.

[٢٢] الثنائيات الإضاءة السوبر superluminescent diodes (SLDs) هى عنلصر أشباه موصلات تجمع بين الطاقة العالية وتألق ليزر أشباه الموصلات ببغض الخواص الدايود المشعه للضوء (LED)٠ تستخدم الانبعاثات العفوية (spontaneous emission) ولكن تحقق درجة عالية من الإضاءة عبر مسافات قصيرة (choerence over short distances)

- **الطبقة النشطة تمثل وسط توليد الضوء فى الدايود ويجب أن تكون من مادة ذات فجوة طاقية مباشرة، مع إتساع مماثل للطول الموجي للإنبعاثات المطلوبة كما يجب أن تكون الفجوة الطاقية أضيق وذات معامل إنكسار أكبر من تلك المناطق المحيطة بالمنطقة النشطة.**
- **تحاصر طبقات الكسوة حركة حوامل الشحنة وحصر الطاقة الضوئية في الطبقة النشطة مع مراعاة أن تكون الفجوة الطاقية لطبقات الكسوة أوسع من الفجوة الطاقية للطبقة النشطة للحيلولة من إنتشار حوامل الشحنة لخارج الطبقة النشطة. ويجب أن يكون معامل الإنكسار فى طبقات الكسوة أقل من معامل الإنكسار فى الطبقة النشطة لحصر الطاقة الضوئية في المنطقة النشطة حتى لا تنبعث الفوتونات من طبقات الكسوة، المواد المستخدمة فى تصنيع الدايود يمكن أن تكون ذات فجوة طاقية مباشرة أو غير مباشرة.**



Layer	Wavelength	
	0.7 to 0.87μ m	1.1 to 1.67μ m
Contact layer	GaAs	$In_{1-u}Ga_uAs_vP_{1-v}$
Cladding layer	Cladding layer	$Ga_{1-y}Al_yAs$	InP
Active layer	Active layer	$Ga_{1-x}Al_xAs$	$In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$
Cladding layer	Cladding layer	$Ga_{1-z}Al_zAs$	InP
Substrate	Substrate	GaAs	InP
	$y>x,\ z>x$	$x>u,\ y>v$

الشكل (١٢-١) هندسة تكوين العناصر الالكترونية الحديثة

- **توفر الركيزة الدعم الميكانيكي، والقدرة على تبديد الحرارة وحدوث تماس كهربائي كما يتحتم أن تكون التكوينات للركيزة بلورية متماثلة نقية لنمو طبقات مركبات أشباه الموصلات أو محاليل المواد الصلبة.**
- **توفر طبقة التوصيل الإتصالات الكهربائية ويراعى ان تكون طبقة السطح التي تنبعث منها الفوتونات شفافة بالنسبة للطول الموجي للإنبعاثات. وتعتمد على التكوينات البلورية المناسبة فى طبقات الوصلات، يمكن تصنيف عناصر دايود حقن الليزر على أنها عناصر ضوئية ذات منطقة واسعة أو شريطية التكوين.**

١-٥ العناصر الضوئية

١ – ٥ – ١ الميزر[٢٣]

مصطلح ميزر تغير قليلاً – في البداية تم تعريف المختصر عالمياً " "تضخيم الموجات المتناهية بتحفيز إنبعاث الإشعاع" حيث يصف العناصر التي تنبعث منها إشعاعات في حيز الموجات المتناهية القصر من الطيف الكهرومغناطيسي. لضخ، وتضخيم، وإنتقال عالي التركيز لشعاع موجات الراديو العالية التردد ومبدأ تحفيز الإنبعاثات منذ إستخدامها أدى إلى مزيد من العناصر والترددات كذلك تم تعديل المختصر الأصلي إلى "التضخيم الجزيئى بتحفيز إنبعاث الإشعاع٠ ويعمل عنصر الميزر كمذبذب له خاصية التحكم فى التردد الأساسي من الرنين الذري بدلاً من دائرة إلكترونية رنانة (للتوليف)٠ الموجات الناتجة من عنصر الميزر هى موجات متماسكة، جميعها بنفس التردد والإتجاه وعلاقات الأوجه٠ فى حين أن الموجات التي تنتجها معظم مصادر الإشعاع الكهرومغناطيسي تنبعث في كل الإتجاهات فى نطاق واسع من الترددات وجميعها لها علاقات الأوجة الممكنة المختلفة٠ موجات الراديو المنبعثة من عنصر الميزر أقرب بكثير إلى مصدر مثالى أحادى التردد بعكس أجهزة إرسال البث الإذاعي العادية ونتيجة لذلك فان الموجات الصادرة من عنصر الميزر يمكن أن تنتقل عبر مسافات كبيرة بنسبة فقد صغيرة.

---

[٢٣] مصطلح ميزر (maser) إختصار للكلمات تضخيم الموجات الميكروية بتحفيز إنبعاث الإشعاع

تستند الفكرة الأساسية لعنصر الميزر إلى التطورات التي حدثت فى نظرية الكم، ظهر أول عنصر ميزر في عام ١٩٦٠ (الميزر البصري يسمى الآن ليزر). وتطورت البحوث فى عناصر الميزر لتعمل في أطوال موجية مختلفة كثيرة. الإشعاع الكهرومغناطيسي الناتج فى عناصر الميزر بتحفيز الإنبعاثات؛ جعل الذرة أو الجزيء في حالة إثارة (أي فى حالة زيادة الطاقة) لإنتاج فوتون بتردد معين عند إصطدامه بفوتون ثاني له نفس التردد٠ الفوتون المنبعث والفوتون القاذف له نفس الوجه ونفس الإتجاه٠ حتى تتم هذه الإنبعاثات بإعداد كافية لإنتاج مصدر ثابت للإشعاع يتطلب ضخ العديد من الذرات أو الجزيئات أولاً إلى مستوى الطاقة الأعلى٠

عنصر الميزر المنتج والمكبر للإشعاع الكهرومغناطيسي في نطاق الموجات المتناهية القصر من الطيف الإشعاعى له طول موجي ثابت ويمكن إستخدامه فى التحكم فى عقارب الساعة بحيث لا يزيد مقدار التقديم أو التأخير عن ثانية واحدة على مدى مئات السنين. وقد أستخدم عنصر الميزر لتضخيم الإشارات الضعيفة المرتجعة من أجهزة الرادار والإتصالات بالأقمار الصناعية، وكذلك يستخدم لقياس موجات الراديو المنبعثة الضعيفة من كوكب الزهرة والتى تعطي مؤشرا لدرجات الحرارة على كوكب الأرض والكواكب الأخرى. ويعتبر عنصر الميزر الأساس لإستحدات عناصر الليزر٠ وعلى الرغم من أن إنبعاثات عناصر الميزر الحديثة تغطى نطاق واسع من الطيف الكهرومغناطيسي مما أدى لإستبدال الموجات المتناهية القصر بالموجات الجزيئية٠ بإختصار عند الظهور الأول لعناصر التذبذب المتماسكة بصريا كانت تسمى الميزر الضوئي، فقد أصبح أكثر شيوعاً بعد ذلك للإشارة إلى هذه التذبذبات كأشعة الليزر٠ هناك بعض الأنواع الشائعة من عناصر الميزر مثل:

- **ميزر الشعاع الذرى منها أمونيا ميزر وهيدروجين ميزر**
- **ميزر الغاز منها روبديوم ميزر**
- **ميزر الحالة الصلبة منها روبى ميزر**

كما تستخدم عناصر الميزر الحديثة المطابقة للتصميم الأصلى فى العديد من الإستخدمات منها:

- **أجهزة إشارات التردد عالية الدقة.**
- **ضبط معايير الساعة الذرية ذات التواتر الذري الواحد.**
- **مكبرات الصوت الإلكترونية في التلسكوبات اللاسلكية.**
- **المذبذبات التى تعتمد على تحفيز الإنبعاثات بين مستويين طاقة متناهية الدقة.**

إشارات الموجات المتناهية القصر الخارجة من الميزر ضعيفة جداً (بيكو وات قليلة) وذات تردد ثابت ومستقر للغاية. كما يستخدم فى أجهزة الإستقبال المتماسكة لتضخيم الإشارات وتغيير الترددات ويتم ذلك بإستخدام سلسلة من دوائر الأوجه المغلقة ومذبذبات كوارتز عالية الأداء. عندما أكتشف الليزر، ظهر مصطلح الميزر الضوئ ، ولكن تم التخلي عن هذا المصطلح لصالح الليزر. في الإستخدامات الحديثة عادة ما أطلق إسم الليزر على الأجهزة التي تنبعث منها موجات في نطاق الأشعة السينية من حيز الأشعة تحت الحمراء من الطيف ، وأطلق مصطلح ميزر على الأجهزة التي تعمل فى نطاق الموجات المتناهية القصر والنطاقات الأقل بغض النظر عن ما إذا كان ينبعث منها موجات متناهية القصر أو ترددات أخرى أقل. هناك أجهزة كثيرة تنبعث منها موجات في كل نطاقات الطيف مثل أجهزة الليزر المنبعث منها أشعة جاما ، وأجهزة أشعة اكس ، وأجهزة الأشعة فوق البنفسجية وأجهزة أشعة الليزر المرئى ، وأجهزة الأشعة تحت الحمراء، وأجهزة الموجات المتناهية القصر وأجهزة موجات الراديو. إلا أن هذه المسميات لم تنتشر وأصبحت جزء من الخيال العلمي عفا عليها الزمن بإستثناء عناصر الميزر وعناصر الليزر.

١-٥-٢ عناصر الميزر في الخيال العلمي

ظهرت عناصر الميزر غالباً كأسلحة في الروايات وأفلام الخيال العلمي. وتختلف خصائصها كثيراً عن عناصر الميزر الحقيقية، وأنه من المشكوك فيه ما إذا كان يمكن فعلا تطوير سلاح ميزر عملي كما هو موجود فى أفلام الخيال العلمي. بعض المظاهر والإستخدمات البارزة في مجال الخيال العلمي لعناصر الميزر يمكن سردها مثل:

- **كثيرا ما تنتشر أمثلة "ميزر الدبابات" والتى تستخدم ضد الوحوش وتشكل دفعات النار الخارجه منها شحنات كهربائية تم تنفيذها بواسطة تضخيم الموجات المتنهية القصر. وظهرت أجهزة ميزر الدبابات في مختلف ألعاب الفيديو وغيرها من أفلام الخيال العلمي.**
- **تستخدم عناصر الميزر كالأسلحة، سواء من سفن الفضاء والقوات البرية في الكون،**
- **أجهزة الميزر كثيرا ما تستخدم كأسلحة هجومية من القوات العسكرية**
- **في أفلام الخيال العلمى المعروفة بإسم "الكون وتوسيع حرب النجوم، فيستخدم الميزر كسلاح رئيسي للمقاتلين بالبنادق اليدوية.**
- **في ألعاب فيديو ومسلسلات "مراقبة النجوم"، سلاح يسمى "راسم الليزر". عند ترقيتة تماما إلى المستوى الرابع، فيتحول الى " حزم من شعاع ميزر ضوئي".**
- **يستخدم الميزر في حروب المجرات كأجهزة الإتصالات.**
- **فى البرنامج تلفزيوني المميز أي بي سي تم تركيب ميزر على قمر صناعي صيني، قادر على تحديد أهداف الإغتيال من الفضاء.**
- **يستخدم ميزر الكون للإتصالات على متن المركبات الفضائية وبشكل شائع فى أسلحة المركبات الفضائية.**
- **يستخدم "ميزر الحزم الضوئية" لتحريك تخاطر بين البشر في عدة حلقات تمثيلية.**
- **تستخدم تكنولوجيا ميزر فى السيوف لعمليات قطع أكثر فعالية.**

١ – ٥ – ٣ ثنائيات الليزر

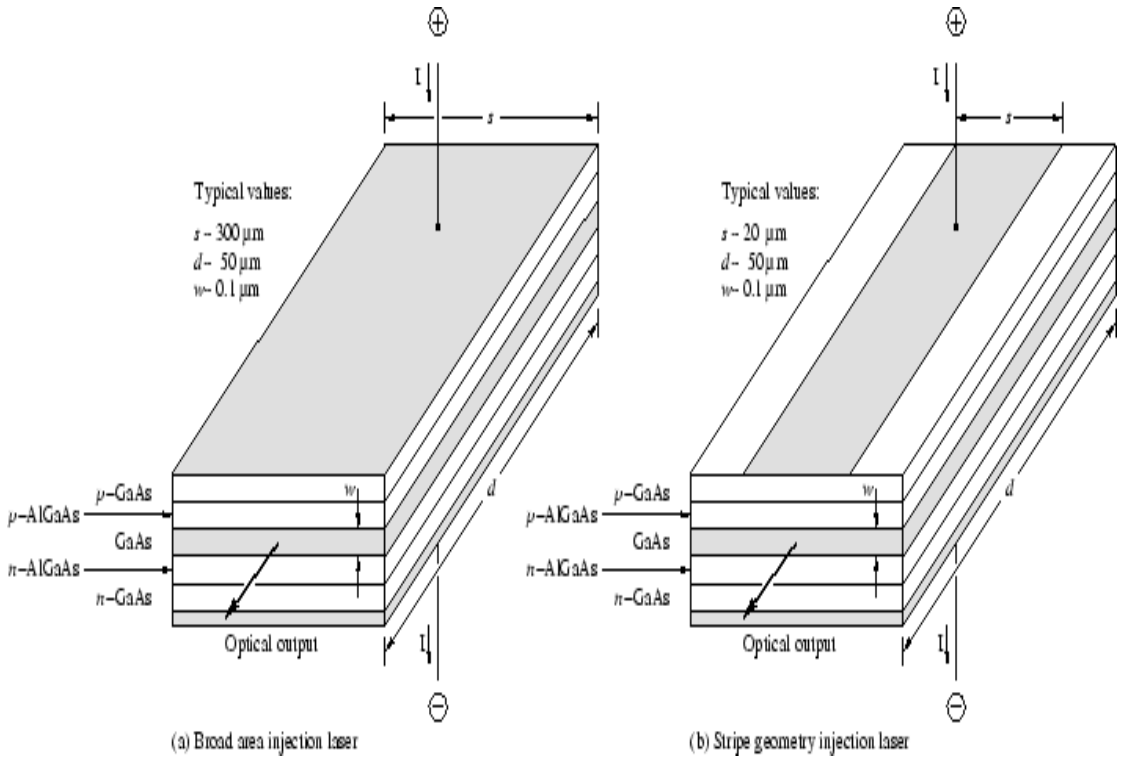
الثنائيات الليزر عبارة عن وصلات شبه موصل نموذجية المستخدمة في إطار تحيز أمامى٠ مصطلح ليزر هو إختصار "تضخيم الضوء بتحفيز الإشعاعات المنبعثة وتعتمد آلية التشغيل الأساسية لثنائيات الليزر على الخصائص الكهربائية والضوئية للوصلات الثنائية لمواد أشباه الموصلات. ثنائيات الليزر هى عناصر ثنائية ينبعث منها ضوء متماسك ناتج من عملية تحفيز الإشعاعات المنبعثة وهي أكثر تعقيداً مما هو معروف فى ثنائيات الباعثة للضوء في عملية الإنبعاث العفوي٠ يتراوح الطول الموجي من النطاق المرئي لنطاق الأشعة تحت الحمراء معتمدا على مواد الطبقة النشطة المستخدمة٠ الأطوال الموجية الشائع إستخدامها فى أنظمة إتصالات الألياف الضوئية منها ٨٥٠ نانومتر المصنعة من مركبات المواد الومنيوم – جاليوم – خراصين / جاليوم – خراصين والنطاق الموجى ١٣٠٠/١٥٥٠ نانومتر المصنعة من مركبات المواد انديوم – جاليوم – خراصين / انديوم – فوسفور ، كما تستخدم في نطاق الطول الموجي المرئي مركبات المواد الومنيوم – جاليوم – خراصين / الومنيوم – جاليوم – خراصين ونيتريدات العمود الثالث، ومواد أخرى. تحقق فى عام ١٩٧٠ مع مرحلة تطور ثنائيات الليزر، الحصول على موجه مستمرة [٢٤] من المركبات الثنائية الغير متجانسة الومنيوم – جاليوم – خراصين / جاليوم – خراصين في درجة حرارة الغرفة ومنذ ذلك الحين أصبحت المركبات الغير متجانسة الثنائية مكون رئيسى لثنائيات الليزر.

---

[٢٤] **الموجه المستمرة أو الشكل الموجي المستمر((continuous waveform (CW) هى موجه كهرومغناطيسية ثابتة السعة والتردد؛ في التحليل الرياضي، لمدة لا نهائية٠ الموجات المستمرة هو الاسم الذي أطلق على طريقة مبكرة للبث الإذاعي، ، التى يتم فيها تبديل الموجه الحاملة وإيقاف تشغيلها٠**

- **ثنائيات الليزر ذات السطوح الكبيرة**

ثنائيات الليزر ذات السطوح الكبيرة هى عناصر الليزر البدائية نظراً لأن عرض العنصر أكبر بكثير من السمك، (الشكل ١ – ١٣) ٠



الشكل (١ – ١٣) شكل صندوقى لثنائى ليزر حقن ذو سطح واسع والآخر لشكل ليزر حقن ذو سطح شريطي

ويمكننا أن نفترض أن المجالات البصرية والتيار المحقون موزعة بصورة متسقة في الإتجاه الرأسى ومجالات عرضية كثيرة يمكن أن يشتملها التركيب الهندسى إن لم يتم منعها ٠ ومن عيوب عناصر الليزر كبيرة السطوح:

- **ليس بالضرورة توزيع تيار منتظم فى جميع أنحاء عرض الليزر في الإتجاه الرأسى حيث أن المواد المستخدمة غير متجانسة وعيوب التصنيع عوامل لا مفر منها ، نتيجة**

لذلك فإن كثافة التيار قد تتجاوز المستوى المانع في بعض المناطق، وقد يكون أقل من هذا المستوى في أماكن أخرى.

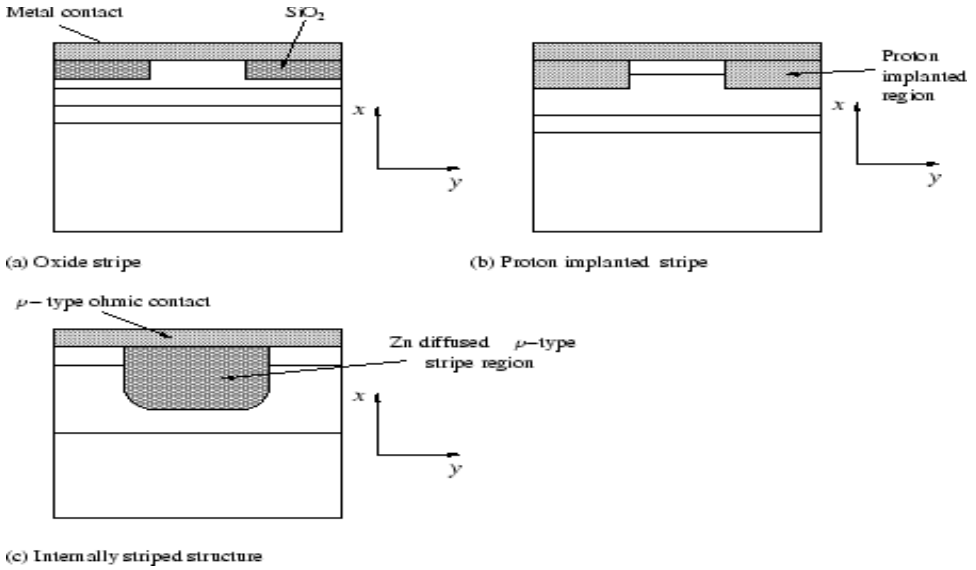
- هناك إجهاد زائد بالقرب من مراكز العيوب، مما يؤدي إلى زيادة في معامل الإنكسار، مما يسبب بدوره مجالات تتركز في المنطقة ذات معامل إنكسار أكبر. كنتيجة لذلك، يظهر الضوء في شكل شعاع غير مستقر، وتتغير مع كثافة التيار المحقون. نتيجة لذلك فان عناصر دايود حقن الليزر ذات السطح غير فعالة وغير مستقرة وعفى عليها الزمن.

- الليزر ذو التكوين الشريطى

من الأفضل التحكم في تشكيل وتكوين المنطقة الشريطية التى يتراوح عرضها عادة من ١٠ إلى ٢٠ ميكرومتر مع ضرورة حصر التيار فى هذه المنطقة تجنبا لمنع الإضطرابات فى المجالات الكهربائية< وذلك بإستخدام أحد أطراف الشريحة كأحد الأقطاب الكهربائية لتحديد وقصر التيار بمنطقة الإنبعاثات بإلتحام جزئ الإلكترونات المحقون مع الثقوب مما يتسبب فى خفض الكثافة الحالية للتيار المانع< عناصر دايود حقن الليزر من هذا النوع من العزل الأفقي تعرف بليزر الحقن شريطية التكوين الهندسى. أو ليزر ذو الشكل الشريطى موجه الكسب وهناك طرق قليلة لتقييد مسار التيار وحصره في المنطقة الضيقة.

- الليزر ذو أكسيد فى الشريط العازل – إستخدام تكنولوجيا غرس الأيونات – تكوين شريطي داخلي

ينخفض التيار المحصور فى المنطقة الشريطية النشطة عندما يقل عرضها عن ١٠ ميكرومتر – كما تتزايد كثافة التيار المانع بزيادة التيار المنتشر مما يزيد الكسب في المنطقة الضيقة. وأمثلة لهذه التكوينات موضحة في الشكل (١ – ١٤) والكسب البصري على علاقة بالجزء التخيلي لمعامل الانكسار



الشكل (١ – ١٤) مقطع عرضي لثلاثة تكوينات لعناصر دايود حقن الليزر موجه الكسب

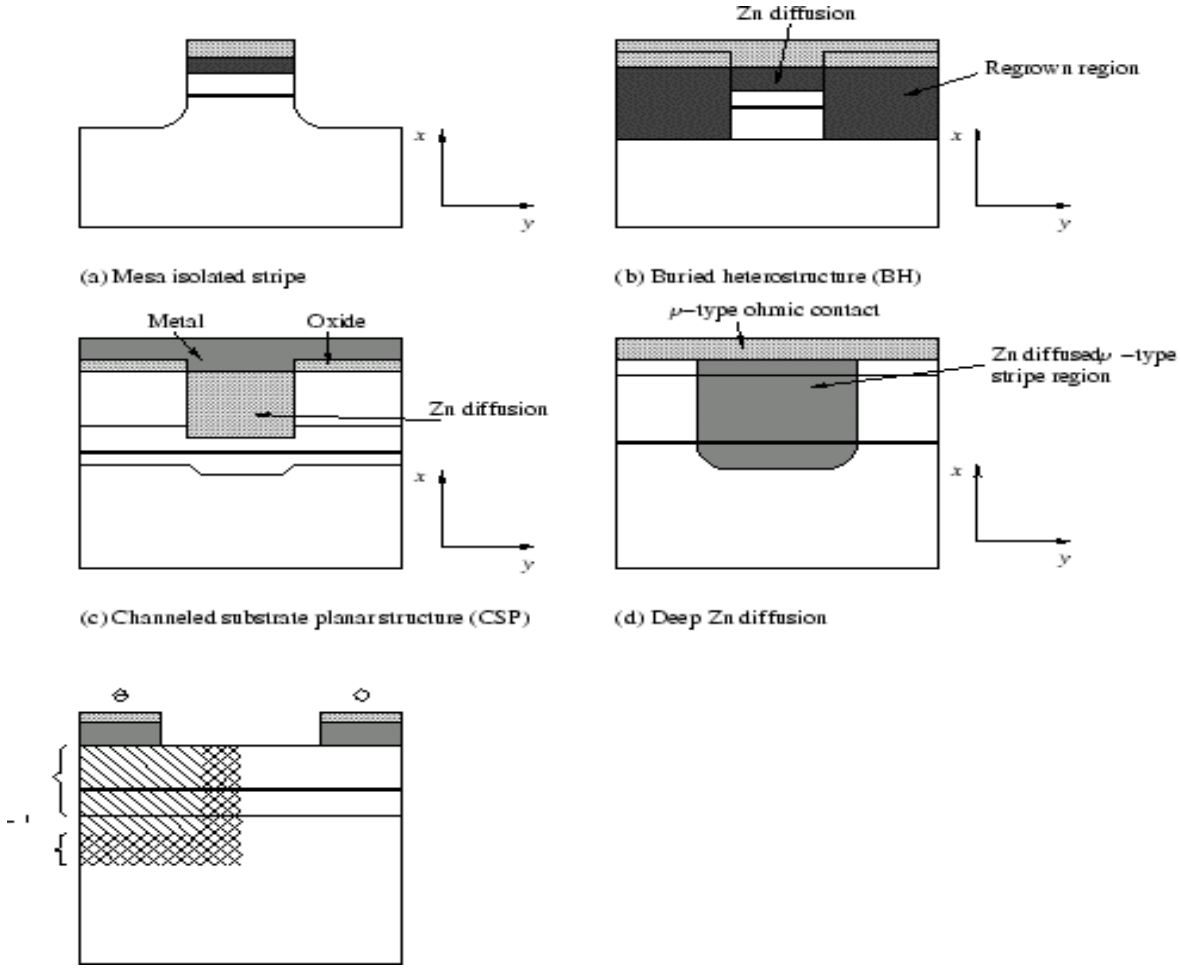
- **التكوين الهندسى لليزر الشريطى موجه المعامل**

كما نرى في الشكل (١ – ١٤)، يختلف معامل التغير فى الأطراف الجانبية. مما يسبب، تقييد وحبس الشعاع الضوئي الجانبى في داخل هيكل الليزر. فإن المناطق خارج الشريحة تكوين (ميزا) [٢٥] على شكل هضبة في الشريحة المعزولة تتم إزالته تماما، وينخفض الرقم القياسي لتلك المنطقة خارج الشريط لمعامل الهواء أو الفراغ ويساوى واحد صحيح. وفى تكنولوجيا (ميزا) فأن معامل الفرق بين المنطقة النشطة والمنطقة المحيطة بها كبير جداً مما يقلل الكثير من المشاكل ما لم تكن المنطقة النشطة رفيعة جدا ٠ وهناك تقنيات أخرى بديلة تساعد على تقليل هذه العيوب ٠تختلف هياكل الليزر

---

[٢٥] مصفوفة الصمام الثنائى المشع بتكوين عزل التكوين الهرمي السطحى وتصنيعها (MESA ISOLATION MONOLITHIC LIGHT EMITTING DIODE ARRAY AND ITS FABRICATING PROCESS)٠تتم معالجة طبقة نشطة لفيلم رقيق في تعدد للأشكال ميسا، وتتشكل طبقة عزل وطبقة تلميع معدنية لها إنعكاس على سطح ميسا. يتم إزالة الغلاف البلاستيكي للهيكل على شكل شريط ميسا وتتشكل مناطق عزل الوصلة ب ن على جانبي شريط ميسا ٠

(الوصلة الشريطية العرضية) [٢٦] عن سائر هياكل العناصر الثنائية. مما يضاعف إنتشار الشوائب مرتين وتتشكل وصلتين غير متجانستين. ينشأ العزل الجانبى في الإتجاه الأفقى بواسطة الوصلتين الغير متجانستين في الإتجاه الرأسى. يحقن التيار أفقياً، متى كان التيار يمر عبر المنطقة النشطة فى التكوين الهندسى لدايود الليزر.

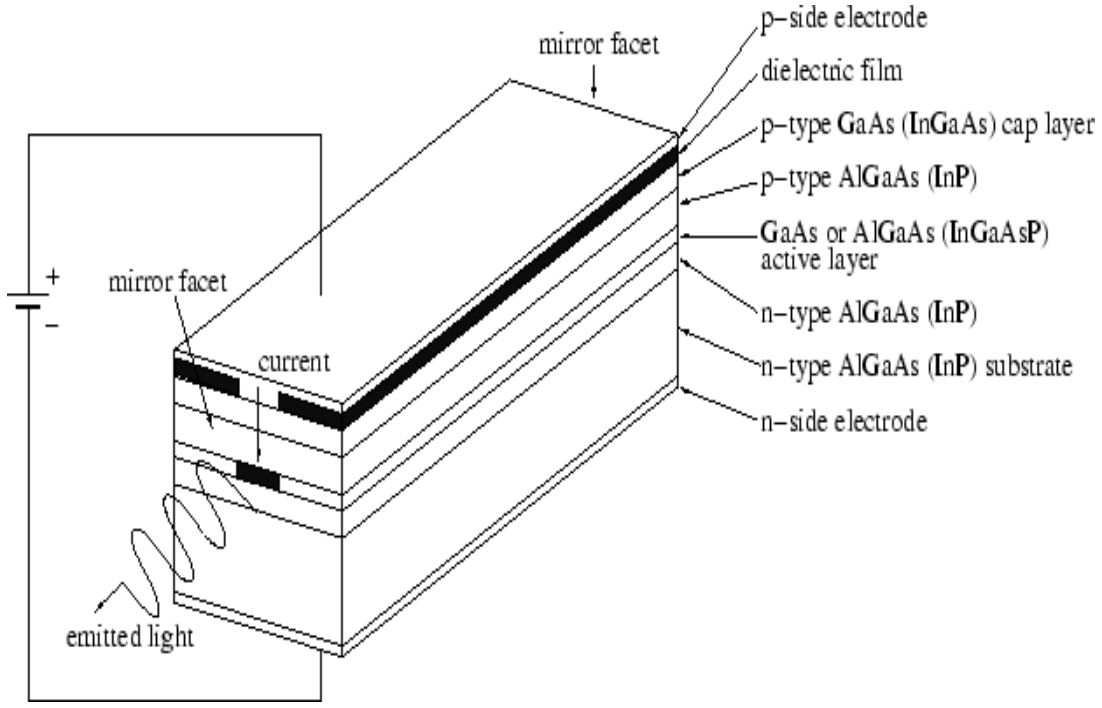


الشكل (١ – ١٥) مقطع عرضي لخمسة تكوينات هندسية لعناصر دايود حقن الليزر موجه الكسب

---

[٢٦] هيكل جديد لليزر أشباه الموصلات المسماة الليزر وصلة شريطية عرضية– (TJS) –transverse–junction– laser stripe ، المنطقة النشطة فيه وصلة ثنائية ب ن من الجاليوم خراصين متجانسة بين طبقات جاليوم ألمنيوم خراصين

- **ليزر الحقن أحادي التردد إحادى الوضع: الليزر فابري– بيرو**



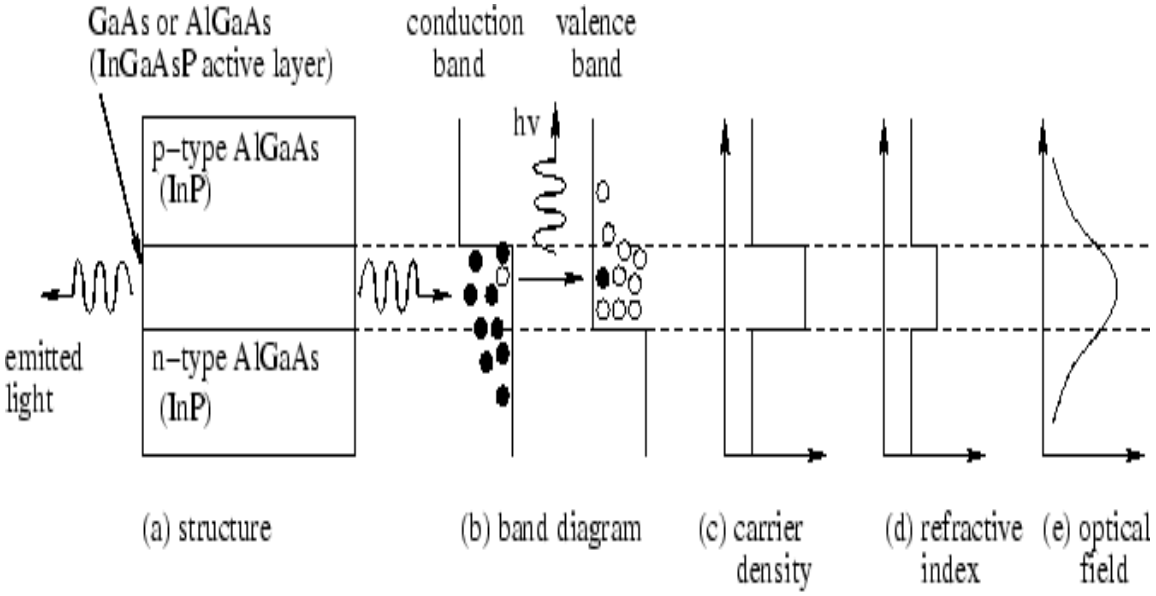
الشكل (١ – ١٦) الهيكل الأساسي لصمام ثنائي ليزر فابري–بيرو

يشتمل على مرآتين جانبيتين – عادة ما تكون موضوعة فى الجانبين بدرجة (°١١٠) – مرآه عند كل طرفى نهاية من الطبقة النشطة. جوانب المريا متوازية لبعضها البعض وعمودية على الطبقة النشطة. يمثل ها التكوين الهندسى دايود فابري– بيرو[٢٧] ذو التجويف البصري ٠ ينبعث الضوء المتماسك من عملية تحفيز الإنبعاثات في الطبقة النشطة من الجوانب في إتجاهين متعاكسين٠ يوضح شكل (١ – ١٧) التكوين الأساسي

---

[٢٧] **ليزر الإتصالات الأكثر شيوعاً يسمى الليزر "فابري–بيرو" (Fabry–Perot) ويعطي هذا النوع من الليزر في كثير من الحالات خدمة جيدة. ومع ذلك، لأنها تنتج عرض طيفي على نطاق واسع نسبيا، ولا يعتبر مناسبة للتطبيقات التي تتطلب مسافات طويلة، واستقبال متماسك (coherent reception)، أو الطول الموجي ذو الإرسال المتعدد لصمام ثنائي ليزر "فابري بيرو " هو النوع الأكثر شيوعاً من صمامات الليزر الثنائية. خاصة فى الوضع الواحد (single mode)٠**

لليزر دايود ثنائى غير متجانس التكوين حيث تستخدم مركبات مواد إنديوم – جاليوم – خراصين / إنديوم – فوسفور كمثال نموذجى٠ تحت شرط التحيز الأمامى يتم حقن حاملات الشحنة الأقلية في الطبقة النشطة من خلال وصلة شبه موصل ثنائية٠ بسبب الحاجة إلى التعادل الكهربائي الذى يحدث يتم حقن مزدوج (حاملات الشحنة الأغلبية تنتشر أيضا في الطبقة النشطة) بكثافة عالية جداً (أكثر من١٠ ^{١٨} لكل سم$^{-٣}$) لتحيفز الإنبعاثات لتشكل الإنعكاس٠

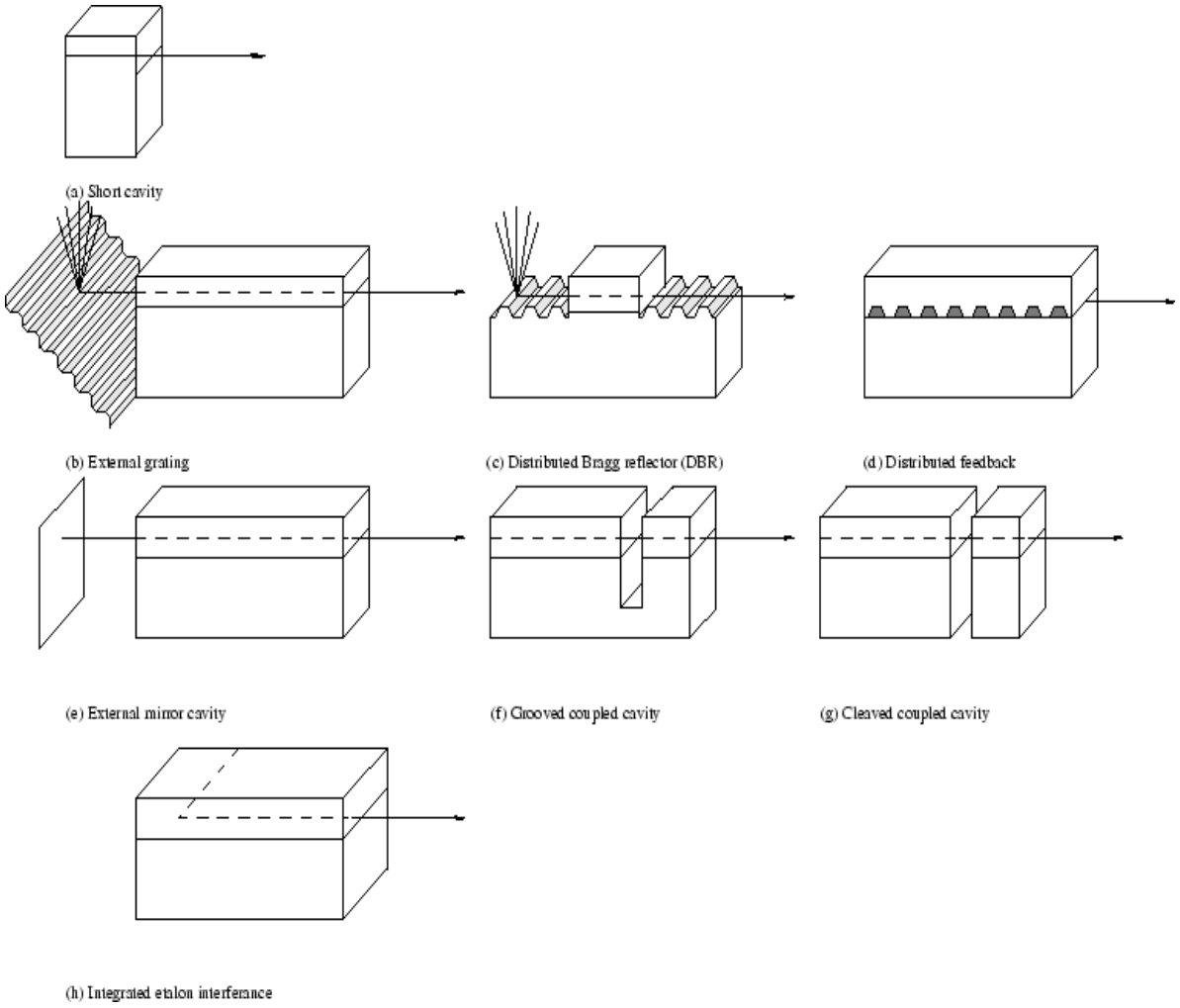


الشكل (١ – ١٧) التكوين الأساسي لليزر دايود ثنائى غير متجانس التكوين

ويتحقق حقن حوامل الشحنة بكثافة عالية بتقليل سمك المنطقة النشطة لأقل من ١٥٠ نانومتر لحصر حوامل الشحنة والفوتونات داخل المنطقة النشطة، كما يمكن ضبط معامل الإنكسار على النحو المبين في الشكل (١ – ١٧)٠ سيؤدي هذا الحبس حدوث تحفيز إشعاعى بمعدل عالى يؤدي إلى تخفيض الطاقة الداخلة. يمكننا ملاحظة أن الفصل بين الطرق الطولية من تجويف فابري– بيرو بطول مقداره (d) مالآتى:

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{2\,d\left[n-\lambda\frac{dn}{d\lambda}\right]}$$ المعادلة (١ – ٣)

حيث: n معامل الإنكسار للمادة المستخدمة و$dn/d\lambda$ هو تشتت المواد (مصدر التشتت الناجم عن حقيقة أن الإنكسار هو في الواقع دالة للطول الموجي والمسمى التشتت اللوني ولكن المسمى الأكثر شيوعاً هو تشتت المادة).



الشكل (١ – ١٨) أساليب للسيطرة على الطرق الطولية لعناصر دايود حقن الليزر

الجدول (١ – ٢) هندسة تكوين ثنائي ليزر

أولاً هياكل الطبقات
١. وصلة متجانسة [بتقنيات الإنتشار أو الحالة السائلة للنمو السطحى [٢٨]،
٢–وصلة متجانسة منفردة (بواسطة تقنيات الحالة السائلة للنمو السطحى)
٣–وصلة غير متجانسة مزدوجة (بتقنيات نمو مختلفة)
مثال نموذجى مكون من مواد موصلية (ن) لمركبات الومنيوم – جاليوم – خراصين/ جاليوم – خراصين /مواد موصلية (ب) لمركبات الومنيوم – جاليوم – خراصين
٤. آبار الكم
ثانيا– تكوينات في الإتجاه العرضي
١. ليزر ذو سطح واسع: مجال أشعة الليزر: طرق طولية وعرضية متعددة
٢. ليزر الشريحة التكوين (ليزر طريقة منفردة): وضع عرضي منفرد وأوضاع متعددة طولية
أولاً: ليزر موجة الكسب شريطي التكوين
ثانيا– ليزر موجة المعامل شريطي التكوين
ثالثا– تجويف بصري (شكل منفرد – تردد منفرد)
١–ليزر قصير التجويف
٢– ليزر بعواكس موزعة لردود الفعل أو عواكس خارجية
٣–ليزر مع المرايا الخارجية، ذو تجويفين مزدوجين مرتبطين، تجويف مزوج مشقوق أو ذو التدخل المتكامل

من أجل تقييد أو إختيار الأوضاع الطولية، تم وضع ثلاث مخططات أساسية (الشكل ١ – ١٨). يتراوح معامل التشتت لمركب جاليوم أرسنيد بين (– ٥و١ الى– ٢) وبناء

---

[٢٨] مصطلح (Epitaxy) يشير الى ترسيب طبقة بلورية عليا على ركيزة بلورية ٠ تسمى الطبقة العليا المرسبة فيلم فوقي أو طبقة فوقية٠ كلمة (*epitaxy*) تعنى فوق وكلمة (*taxis*) تعنى طريقة مرتبة٠ فإنه يمكن أن يترجم ذلك "ترتيب علي" (arranging upon). نمت الأفلام الفوقية من السلائف السائلة أو الغازية. حيث الركيزة تسلك كنواة بلورية ٠(,seed crystal) إذا كانت الطبقة الفوقية عشوائية البلورات بالنسبة الى الركيزة فيسمى نمو غير فوقي. (non–epitaxial growth) ٠ إذا تم ترسيب فيلم فوقي على ركيزة بنفس التركيب، تسمى العملية طبقة فوقية متجانسة (homoepitaxy)؛ وإلا فإنه يسمى طبقة فوقية غير متجانسة (heteroepitaxy)

على ذلك إذا كان طول الدايود ٥٠٠ ميكرومتر فيتراوح شكل الفصل الطولى ما بين ٠,١ إلى ٠,٣ نانومتر. كما ان نطاق الفصل الطيفى للأوضاع العرضية يكون أضيق. ومع ذلك، يمكن قمع الأوضاع العرضية الأعلى فى الترتيب بإدخال فقد مفرط للأوضاع العرضية الأعلى فى الترتيب، التي تتم بواسطة معامل التغير أو معامل الكسب فى الشرائح إلا أنه يصعب التمييز أو الفصل للأوضاع الطولية.

[١] التحكم فى التكوين الهندسى- يكون معامل فصل الوضع الطولي متناسبا عكسيا مع طول التجويف معادلة (١ - ٣) وأحد الأوضاع الطولية يتلائم مع طول النطاق الترددي المكتسب إذا كان طول التجويف صغير بما فيه الكفاية. (ليزر ذو تجويف قصير).

[٢] في تجاويف فابري- بيرو المعتاد فإن التغذية المرتدة للتردد الإنتقائي، تتم بإستخدام عاكسات ذو نطاق عريض التردد إلى المسافة الفاصلة الكبيرة بين المرايا أو إستخدام بديل بإستخدام المشابك مع عدد من التجاويف، معامل الإنعكاس يعتمد على التردد.

[٣] التجاويف المترابطة يمكن تصنيع ليزر دايود ذو تجويفين مترابطين بأطوال تجويف مختلفة قليلاً. إذا تم ضبط الطول الموجى للتجويفين بطول موجي واحد، فإن ثنائي ليزر سوف يعمل بهذا الطول الموجي المحدد.

- الخصائص الأساسية لثنائيات الليزر

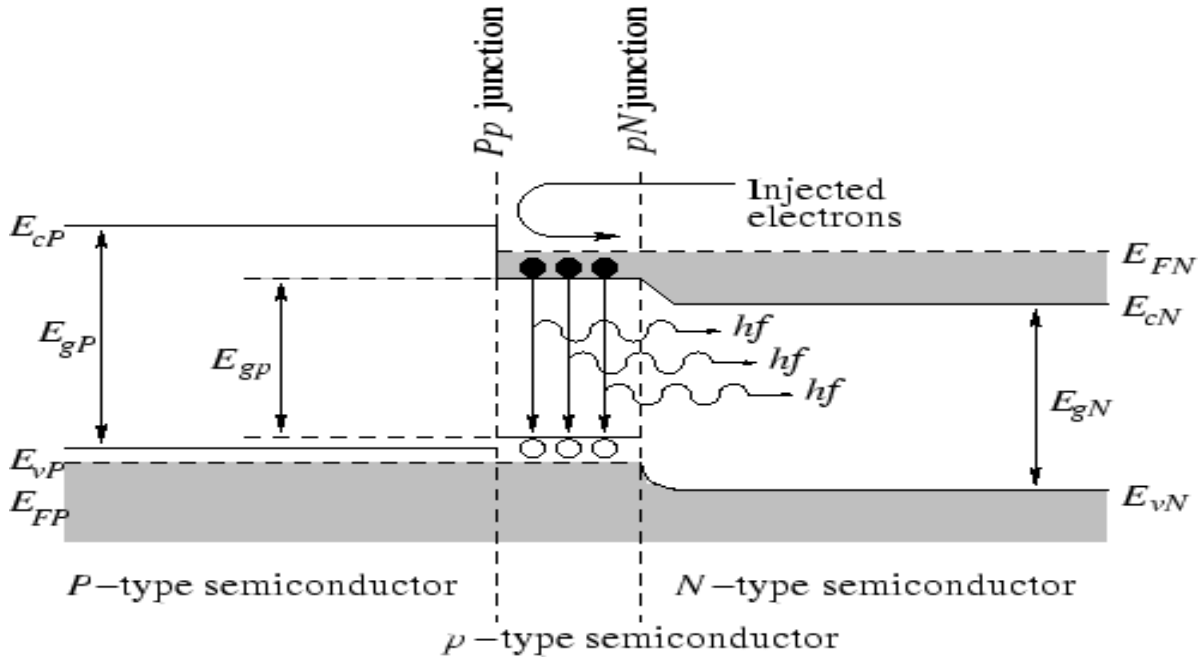
هناك ثلاث مكونات أساسية في نظام الليزر هي وسط التكبير- والشعاع البصري المرتد - ومصدر الضخ. ويمكن وصف تشغيل عناصر دايود حقن الليزر كما يلي:

[١] يتم حقن الإلكترونات من جانب الوصلة (ن) الى الوصلة (ب) كما يتم حقن الثقوب من الجانب (ب) الى جانب الوصلة)ن) (الإتجاه المعاكس)٠

[٢] في المنطقة العازلة، تكون الإلكترونات قريبة من النطاق الأسفل من مستوى التوصيل، بينما تكون الثقوب بالقرب من المستوى العلوي من مستوى التكافؤ.

[٣] تنبعث الفوتونات عند إلنحام الإلكترونات والثقوب عندما يكون التيار المحقون أعلى من جهد العتبة مما يحفز الإنبعاثات، وينبعث ضوء متماسك من ثنائي الليزر.
[٤] تعود الشحنات الكهربائية من خلال الدائرة الخارجية.

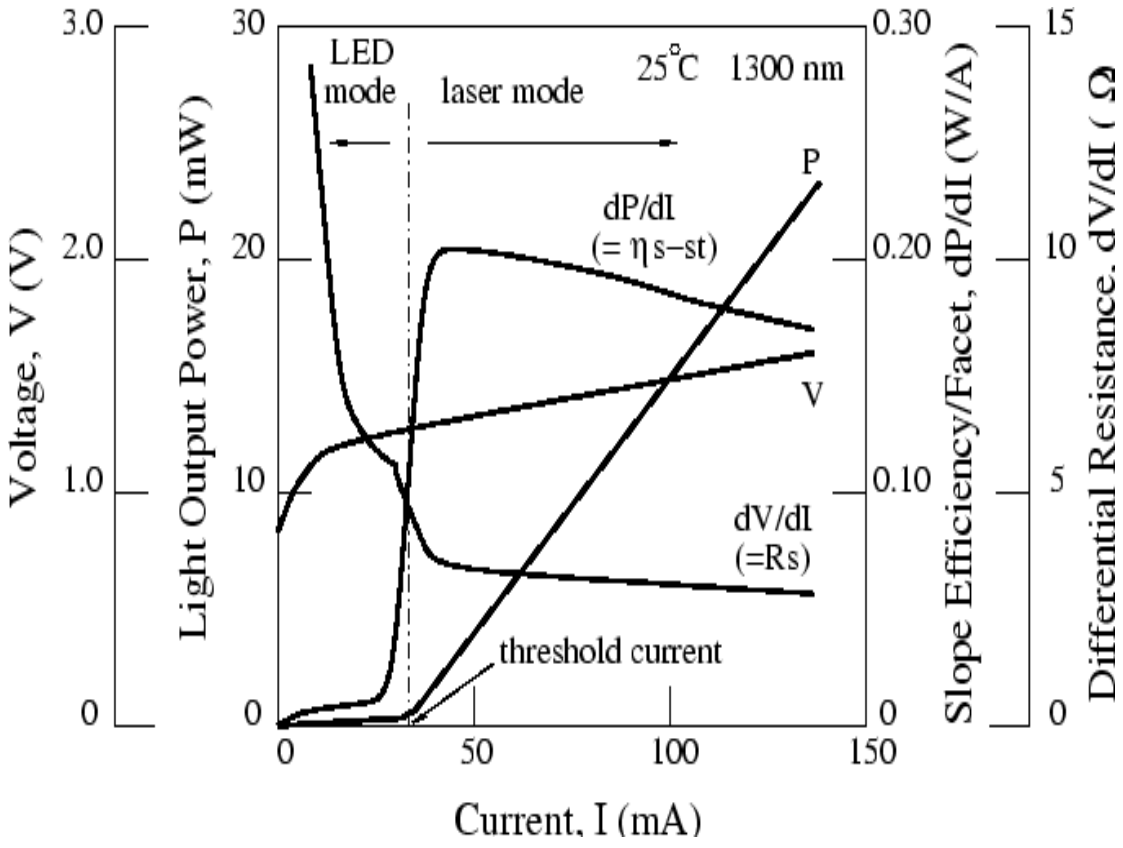
تصنف ثنائيات الليزر كنظم لثلاث أو أربعة مستويات ولتصنيف عناصر دايود حقن الليزر، نفترض ثنائى ليزر ذو وصلة غير متجانسة مزدوجة مع رسم تخطيطي للطاقة كما هو موضح في الشكل (١ – ١٩) كما نرى من الشكل،



شكل (١ – ١٩) مخطط الطاقة لعناصر دايود حقن الليزر ذو وصلة غير متجانسة

يحدث الإنبعاث في مستوى النطاق الترددى لطبقة شبه الموصل وهى طبقة ضيقة الإنتشارية تقع بين مادتى شبه موصل ذو فجوة طاقية ذات نطاق طاقة واسع. الفرق بين النظم الثلاث والأربع مستويات ينطوي على ما إذا كان مستوى طاقة التنشيط ممتلأ حيث أنه فى عناصر دايود حقن الليزر فإن النطاق الأعلى من مستوى التكافؤ في المنطقة النشطة عادة ما يكون شاغرا، تعتبر عناصر دايود حقن الليزر كنظام ذو أربعة

مستويات٠ في مستوى التحيز المنخفض ذو إثارة منخفضة فإن الإنبعاثات العفوية هى المهيمنه نظراً لكثافة حوامل الشحنة في الطبقة النشطة ليست عالية بما يكفي لتشكيل مجموعة من النطاقات (عندما تتوفر الوسائل الخارجية التي بموجبها يمكن ملء المستويات العليا المرتبطة بشكل تفضيلي، من الممكن في بعض الأحيان إنشاء أوضاع يمكن بها زيادة عدد ذرات كل وحدة حجم٠ كلما زادت التغذية تحدث الإنعكاسات فى الطبقة النشطة – وهكذا يصبح تحفيز الإنبعاثات المهيمنة في وجود جهد تغذية مناسب ويسمى جهد تحيز العتبة ، والتيار المناظر يسمى تيار العتبة٠



شكل (١ – ٢٠) خصائص عنصر لثنائى ليزر من مركبات أشباه الموصلات انديوم – جاليوم – خراصين – فوسفور / انديوم – فوسفور مع جوانب مشقوقة بنطاق ١٣٠٠ نانومتر

- **تيار وكسب العتبة**

يعتير تيار العتبة أو التيار العائق العامل الأساسى والأكثر أهمية لثنائيات الليزر. ينتشر الضوء المنبعث في الطبقة النشطة على طول الطبقة إذا كان التيار الناشئ أقل من تيار العتبة حيث أن معامل الإنكسار في الطبقة النشطة أعلى من معامل الإنكسار فى طبقات الكسوة الخارجية. ينعكس جزء من الضوء المنتشر على وجه المرآة وينعكس ما تبقى منه خارج الأوجه٠ يتم تكرار إنتشار وإنعكاس الضوء داخل التجويف البصري فى الطبقة النشطة وجوانب المرآتين. ونتيجة لذلك يتم فقد جزء من الضوء والكسب. يتجمع الفقد فى الضوء مع الفقد فى التجويف (الفقد فى الإمتصاص في الطبقة النشطة وطبقات الكسوة)، الفقد فى المرآة الناجم عن إنعكاس جانب المرآة أقل من ١٠٠% (حوالي ٣٠% فقط) والفقد الناجم عن الإنتشار العشوائى بسبب التكوين الغير متجانس (خشونة أسطح الوصلة الغير متجانسة). وينبع الكسب من الإثارة نتيجة للحقن. توضح المعادلة (١ – ٤) معامل الكسب على العتبة (كسب العتية)

$$g_m = \propto_i + \left\{\frac{1}{2\,L}\right\} \ln\left\{\frac{1}{R_1\ R_2}\right\}$$ **المعادلة (١ – ٤)**

حيث: (α_i) الفقد الداخلي فى التجويف بفعل إمتصاص حوامل الشحنة الحره فى المنطقة النشطة و(L) طول الطبقة النشطة و(R_1 , R_2) مقدار الإنعكاس من كل من وجهي المرآتين. يشير الجانب الأيمن من المعادلة إلى قيمة الفقد فى المرآة ويتناسب عكسيا مع طول التجويف، تتجمع الفوتونات ذات الصلة بتحفيز الإنبعاثات داخل التجويف لزمن يتناسب مع طول التجويف. المعادلة (٥) تحدد الإنعكاس على سطح المرآه ٠

$$R_1 = R_2 = R_{Cleavage} = \left\{\frac{n_r - 1}{n_r + 1}\right\}$$ **المعادلة (١ – ٥)**

حيث: n_r معامل الإنكسار للمواد المصنع منها ثنائي الليزر، يمكن تبسيط المعادلة (١ – ٤) على النحو التالى:

$$g_m = \alpha + \left\{\frac{1}{L}\right\} \ln\left\{\frac{1}{R}\right\}$$ **المعادلة (١ – ٦)**

كمثال، لتكوين ثنائيات الليزر ألومنيوم – جاليوم – خراصين/ جاليوم – خراصين وأيضا إنديوم – جاليوم – خراصين / إنديوم – فوسفور ذو طول تجويف ٣٠٠ ميكرومتر للطبقة النشطة والوجهين، من خلال المعادلة (١ – ٥) نجد أن معامل الإنكسار فى المنطقة النشطة حوالي ٣و٣ – وإنعكاسية القدرة حوالي ٣١% ، ومقدار الفقد فى المرآة حوالي٤٠/ سم والفقد فى التجويف الداخلي في الطبقة النشطة بين ١٠/ سم و٢٠/ سم٠ وكسب العتبة فى ثنائيات الليزر بين ٥٠/ سم إلى ٦٠/ سم. ويزداد الكسب بزيادة التيار المحقون (كثافة حوامل الشحنة) ويتم إحتساب معامل أكبر كسب الذي يمثل دالة لكثافة حوامل الشحنة المحقونة:

$$g_{max} = \beta \left(\frac{J}{d} - J_o\right)^m \quad \text{المعادلة (١ – ٧)}$$

حيث: (β) معاما ثابت الكسب و(J/d) قيمة التيار لكل وحدة سمك للطبقة النشطة و(A/cm^2/μm) كثافة حوامل الشحنة المحقونة و(J) كثافة التيار.

لتعويض الفقد في التجويف يتطلب أن يكون التيار أمبير/ سم^2 لكل ميكرومتر. كما يمكن حساب معامل العزل البصري حيث أنه نسبة الضوء المحصورة داخل الطبقة النشطة لإجمالى الضوء أكبر من صفر وأقل من ١ ٠ معامل العزل البصري هو دالة لسمك الطبقة النشطة ومعامل الإنكسار فيها وفى الطبقات المتاخمة لها كما يمكن حساب معامل الإمتصاص على النحو التالى:

$$\propto_i = \Gamma_a \propto_a + \{1 - \Gamma_a\} \propto_{a\,d} \quad \text{المعادلة (١ – ٨)}$$

حيث: α_a and α_{ad} معاملات إمتصاص الطبقة النشطة والطبقات المتاخمة لها و(Γ_a) معامل العزل البصري، يرتبط الضوء المحصور داخل الطبقة النشطة بمعامل الكسب البصري، ويمكن إعادة كتابة المعادلة (٨ – ٤) على النحو التالى:

$$g_{th} = \left\{\frac{1}{\Gamma_a}\right\} [\propto_i + \{1/L\} \ln\{1/(R)\}] \quad \text{المعادلة (١ – ٩)}$$

الآن، بإستخدام المعادلة (١ –٧) و (١ – ٩)، يمكن كتابة قيمة الكثافة التقريبية لتيار العتبة J_{th} (امبير/ سم^{٢})،

المعادلة (١ – ١٠) $$g_{th} = d \left\{ \frac{1}{\beta \Gamma_a} \left[\propto_i + \{1/L\} ln\{1/(R)] \right\} \right. + d_{Jo}$$

حيث: d سمك الطبقة النشطة بالميكرومتر. يمكن إيجاد كثافة تيار العتبة المقابل لتيار العتبة nth من:

المعادلة (١ – ١١) $$J/_{g\,d} \quad n \approx \Delta n = \tau_c$$

المعادلة (١ – ١٢) $$P \approx \Delta P = \tau_n \frac{J}{q\,d}$$

سوف نحصل

المعادلة (١ – ١٣) $$n_{th} = \tau_c \frac{J_{th}}{q\,d}$$

حيث: τ_c عمر حاملات الشحنة الأقلية المحقونة بشرط أن تكون الإنبعاثات العفوية ذات علاقة مباشرة بحالة التشغيل. كما يراعى أن تكون حالة الضوء المنتشر بعد رحلة ذهابا وإيابا تتزامن مع الرحلة السابقة لها وشرط المرحلة التالية التي يتعين الوفاء بها (يحدده هندسة فابري– بيرو):

المعادلة (١ – ١٤) $$m\ \lambda_m = 2\ L,\ (m = 1, 2, 3, \ldots.)$$

حيث: (m) معامل الوضع و(λ_m) الطول الموجى للوضع فى التجويف البصري

إذا يمكننا تعريف معامل الإنكسار للمنطقة النشطة n_r، بإعادة كتابة المعادلة (٨ – ١٤) على النحو التالى:

المعادلة (١ – ١٥) $$m \left(\frac{\lambda_0}{n_r}\right) = 2\ L$$

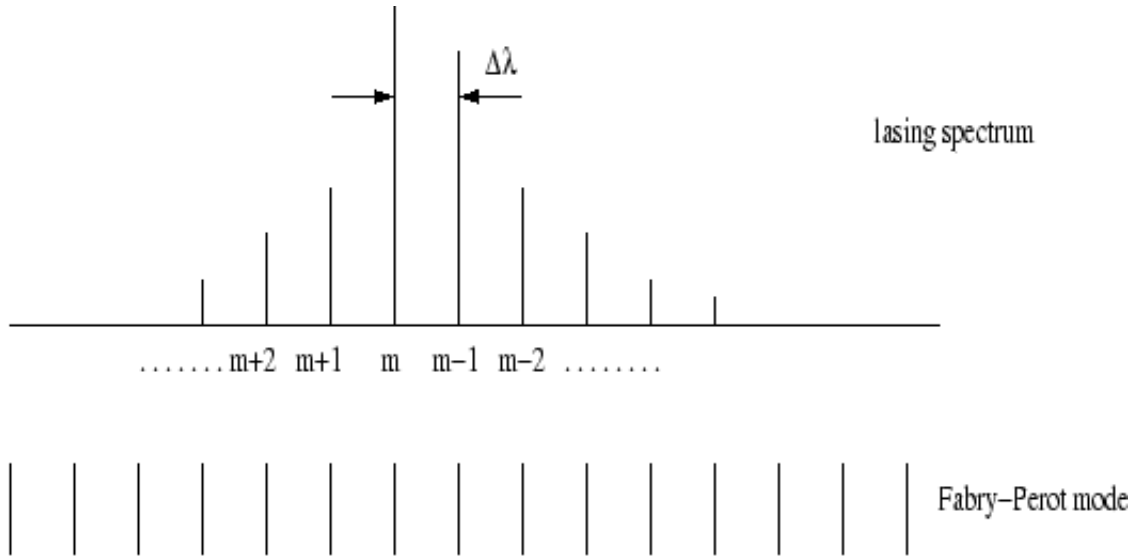
حيث: (λ_0) الطول الموجى فى الفراغ d qd لكل وضع كما نرى من المعادلة (١ – ١٤) والشكل (١ – ٢٢). بإستخدام المعادلة (١ – ١٥)، والأخذ فى الإعتبار الوضع التالي (m+1) ، يمكن أن نجد التباعد فى الوضع Δλm:

المعادلة (١ – ١٦) $$(m + 1) \left[\frac{\lambda_o - \Delta\lambda}{n_r}\right] = 2\ L$$

$$= \frac{\lambda_o^2}{2\ n_{eff}\ \ L}\quad \Delta\ \lambda_m \qquad \text{المعادلة (١ – ١٧)}$$

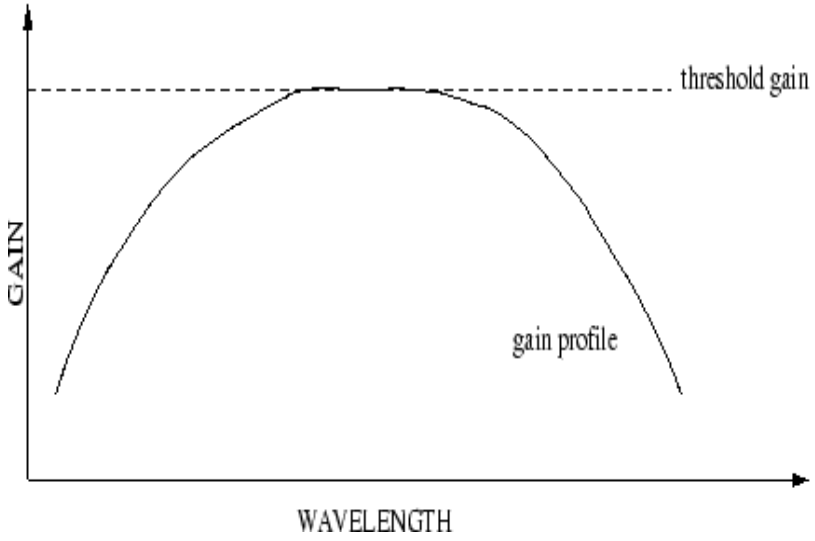
حيث: يتم إستبدال n_r بمعامل الإنكسار الفعال n_{eff} فى

$$n_{eff} = n_r \left[1 - \left(\frac{\lambda_o}{n_r}\right)\left(\frac{d\, n_r}{d\, \lambda_o}\right)\right] \qquad \text{المعادلة (١ – ١٨)}$$



الشكل (١ – ٢١)

يحدث التشغيل عند طول موجي عندما يصل الكسب مستوى العتبة المعادلة (١ – ١٤)



الشكل (١ – ٢٢) الرسم التوضيحي للكسب وأطياف الانبعاث (طرق طولية).

- **الكفاءة والقدرة الخارجة**

يتشابه سلوك ثنائيات الليزر تماما لعناصر دايود حقن الليزر وينبعث جزء من قدرة الإنبعاث العفوي في الطبقة النشطة من كلا الجوانب. الكفاءة منخفضة للغاية، والقدرة الكلية الخارجة من كلا الجوانب أقل بنسبة قليلة عن القدرة المنبعثة في الطبقة النشطة. يتجاوز تحفيز الإنبعاثات العفوية عند عتبة التشغيل مما يزيد الكفاءة فوق العتبة. تمثل القدرة الناتجة فقد المرآه من وجهة نظر علاقة الكسب والفقد كماهو موضح في الشكل (١ – ٢٢)، نتيجة للتيار المحقون خلال الوصلة الثنائية يحقق كسب. بالأخذ فى الإعتبار القدرة الناتجة من وجهى المرآتين يمكن تحديد كفاءة الكم الخارجية ηd %، على النحو التالى:

$$\eta_d = \eta_{id} \frac{\frac{2\Delta P_{out-st}}{h\nu}}{\frac{\Delta I}{q}} = \quad \text{المعادلة (١ – ١٩)}$$

$$\eta_{id} \left\{ \frac{\left(\frac{1}{2L}\right) \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)}{\alpha_i + \left(\frac{1}{2L}\right) \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)} \right\}$$

حيث: η_{id} كفاءة الكم الداخلية التفاضلية (%) تساوى

$$\eta_{id} = \frac{\Delta P_{act-st}/h\nu}{\Delta L/q} \quad \text{المعادلة (١ – ٢٠)}$$

حيث: P_{act-st} قدرة التشغيل بسبب تحفيز الإنبعاثات داخل الطبقة النشطة.

بإستخدام كفاءة الكم الخارجية التفاضلية، فإنه يمكن حسساب قدرة التشغيل الناتجة لكل جانب (وات أو ميلى وات)

$$P_{out-st} = \frac{1}{2} h\nu \, \eta_{id} \, S_{act} \, \frac{J - J_{th}}{q}$$

$$\eta_{id} \frac{I_F - I_{th}}{q} = \frac{1}{2} h\nu \quad \text{المعادلة (١ – ٢١)}$$

حيث: (S_{act}) مساحة الطبقة النشطة و(I_F) التيار الأمامى و(I_{th}) تيار العتبة

وبالإضافة إلى كفاءة الكم الخارجية التفاضلية، يستخدم في كثير من الأحيان ميل الكفاءة (أو الاستجابة) لثنائيات الليزر η_{s-st}، ويمكن حسابها من خلال المشتقة الأولى للقدرة الناتجة بالنسبة للتيار الأمامى:

$$\eta_{is\,std} = \frac{d\,P_{out-st}}{d\,I_F} = \qquad \text{المعادلة (١ - ٢٢)}$$

$$\frac{1}{2}\ \eta_d\ \frac{h\,\nu}{q} = 0.62\ \frac{\eta_d}{\lambda\,(\mu\,m)}\ ,\left({}^{W}/_{A}\ \ or\ mW_{mA}\right)$$

الآن، فى حالة إستخدام ميل الكفاءة، يتم تبسيط قدرة التشغيل الناتجة بالمعادلة (١ - ٢١) على النحو التالى:

$$P_{out-st} = \frac{1}{2}\ h\,\nu\ \eta_d\ \frac{I_F - I_{th}}{q}$$

$$= \eta_{s-st}\,(I_F - I_{th}) \qquad \text{المعادلة (١ - ٢٣)}$$

توضح المعادلتين (١ - ٢١) و (١ - ٢٣) الزيادة المثلى لمدخلات القدرة الضوئية أعلى عتبة التشغيل.

- خصائص الجهد - التيار

يمكن حساب علاقة الجهد بالتيار بالمعادلة كالتالى:

$$\propto \exp\left[\frac{g\ V_F}{a_F\ K_B\ T}\right]I_F \qquad \text{المعادلة (١ - ٢٤)}$$

يمكن حساب التيار في نطاق التحيز الأقل الذي يحدث التشغيل،

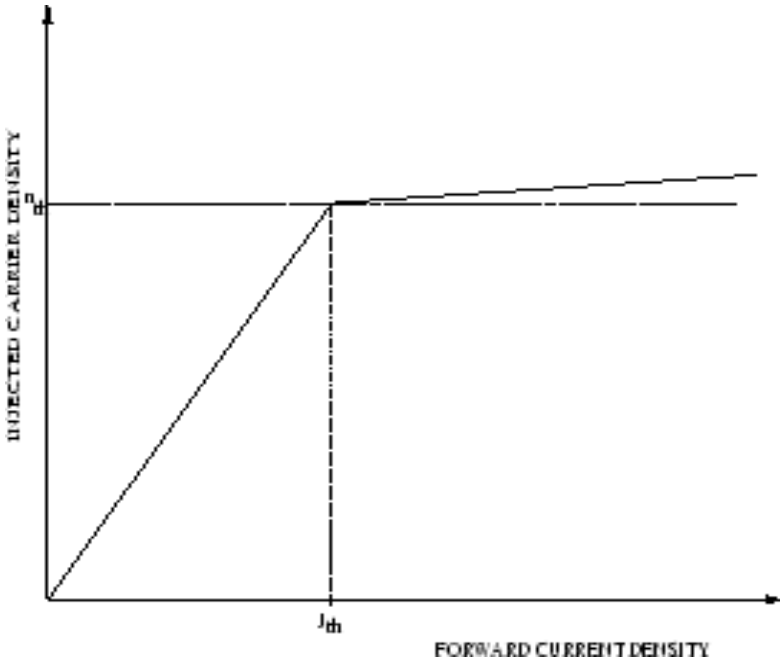
$$= S_{act}\ J_{so}\ \exp\left[q\ \frac{V_b - R_s\ I_F}{K_B\ T}\right]I_F \qquad \text{المعادلة (١ - ٢٥)}$$

تزيد كثافة حوامل الشحنة المحقونة في الطبقة النشطة الشكل (١ - ٢٣)، ويمكن حساب المقاومة التفاضلية على النحو التالى:

$$\frac{d\,V_b}{d\,I_F} = \frac{K_B\ T}{q}\ \frac{1}{I_F} + R_2 \qquad \text{المعادلة (١ - ٢٦)}$$

تنخفض المقاومة التفاضلية بسرعة مع التيار المحقون، وتقترب المقاومة على التوالى R_s في وضع ما قبل تشغيل الدايود الباعث للضوء، عند تيار تشغيل العقبة تصبح

المقاومة التفاضلية المقابلة لميل علاقة الجهد بالتيار ثابتة كما هو موضح في الشكل (١ – ٢٣).



شكل (١ – ٢٣) كثافة حوامل الشحنة المحقونة كداله للتيار الأمامى المحقون

كنتيجة للتلاحم السريع لحوامل الشحنة يتم تحويل معظم حوامل الشحنة المحقونه الى قدرة التشغيل، وبثبات كثافة حوامل الشحنة فى الطبقة النشطة (الشكل ١ – ٢٣) يمكن حساب جهد الوصلة كالتالى:

$$V_J = V_b - R_s I_F \quad \text{المعادلة (١ – ٢٧)}$$

بإعتبار التغير فى جهد الوصلة مع التغير الأمامى للتيار تقريبا يساوى صفر

$$d V_J / d I_F \approx 0$$

نحصل على:

$$\frac{d V_b}{d I_F} = R_s \quad \text{المعادلة (١ – ٢٨)}$$

يمكننا أن نرى أن المقاومة التفاضلية تتغير سريعاً من القيمة التى تم الحصول عليها من المعادلة (١ – ٢٦) إلى القيمة التى يمكن حسابها بالمعادلة (١ – ٢٨). عندما ينخفض مستوى التغذية، وبالتالى يصبح تشغيل ثنائيات الليزر بطريقة مماثلة لثنائى

باعث الضوء ٠ ويتميز ثنائى الليزر عن الأنواع الأخرى أساسا بقدرتها على الضخ مباشرة بواسطة تيار كهربائي. وتعتير كفاءة تحويل القدرة الكلية حوالي ~ ٥٠% غير معتاده بالنسبة لثنائى الليزر. ولكن بالنسبة لليزر فى الحالة الغازية وليزر الحالة الصلبة التي تضخ جسيمات البلازما أو مصدر فلاش بصري غير متماسك على التوالي، فإن الكفاءه فى حدود ١% تعتبر عادية بسبب طول تجاويفها ونطاقها الترددي الضيق – كما تميل الليزر فى الحالة الغازية وليزر الحالة الصلبة أن تكون أكثر تماسكاً عن ليزر أشباه الموصلات البسيطة. ومع ذلك، يمكن أن يكون ثنائي ليزر ذو تردد واحد أكثر تقدما وتطوراً فى إطار مقارنة النطاق الترددى المنخفض لعدد قليل بالميجا هرتز. إختلاف آخر بين أشباه الموصلات وعناصر الليزر الأخرى هو حجم العنصر فيبلغ طول ثنائى الليزر فى الحالة السائلة وليزر الحالة الصلبة عشرات السنتيمترات، والشريحة المستخدمة فى ثنائي الليزر يبلغ حجمها حجم حبة الملح وحتى بعض سنتيمترات مكعبة معظمها بغرض المناولة (تركيب والتعبئة والتغليف)٠ تستخدم ثنائى الليزر على نطاق واسع بسبب مرونتها العالية وعمر إستخدامها، في تطبيقات نظم إتصالات الألياف البصرية. العمر الإنتاجي لليزر الحالة الغازية أو ليزر الحالة الصلبة يقاس عادة بآلاف الساعات (مئات السنين). ويمكن وصف خصائص ليزر أشباه الموصلات الحقن بستة خصائص:

- طول موجه الإشعاع – كثافة تيار العتبة – كفاءة الكم الخارجية – كفاءة إستهلاك الطاقة – نمط الإشعاع بعيد المجال – عرض النطاق الضوئى

➢التطورات الأخيرة فى مجال ثنائيات الليزر

- ليزر البئر الكمى. تتكون مركبات الليزر الغير متجانس المزدوج من طبقة من مادة شبه موصل ذات فجوه طاقية ضيقة سمكها فى حدود ٠,١ ميكرومتر محصورة بين مادتين ذو فجوة طاقية واسعة٠ مع هذا السمك تتحرك الإلكترونات بحرية في كل الإتجاهات. إذا قل سمك الطبقة إلى ٢٠ نانومتر أو أقل فإن حركة الإلكترونات عادة في الطبقة النشطة إذا كانت دالة الموجة للإلكترونات تستوفى الشروط التي تمليها ميكانيكا

الكم لأن الإلكترونات في الطبقة النشطة ذات الفجوة الطاقية الضيقة محاصرة بحواجز الجهد المحتملة بسبب المواد ذات الفجوة الطاقية الواسعة وهذه هى مشكلة بئر الجهد٠ الليزر ذو المركبات الغير متجانسة ذات طبقة نشطة واحدة بسمك ٢٠ نانومتر أو أقل معروفة بإسم ليزر وحيد بئر الكم وتلك المكونة من عدة طبقات نشطة رقيقة معروفة بإسم ليزر متعدد آبار الكم٠ وكثافة التيار فى هذا النوع من العناصر حوالى ٨٠ أمبير/ سم^{٢} لتجويف طويل ذو سمك ٣و٣ ميكرومتر. الميزات الرئيسية لليزر بئر الكم:

١-الحد من كثافة تيار العتبة

٢-إمكانية تنغيم الطول الموجي للإنبعاثات بالتحكم في سمك الطبقة الرقيقة.

- ليزر شبه الموصل ذو حقن السطح المشع حقن ٠

يتكون الليزر الثنائي، من طبقة نشطة محاطة بطبقات كسوة على الجانبين. تصنع عادة المرايا العاكسة بواسطة حفر فى مادة شبه الموصل وينبعث الضوء من أحد أو كل من الجوانب المحفورة. ويعرف هذا الدايود المشع للضوء بمشعات الحواف التقليدية والمستخدمة غالبا فى مشغلات الأقراص المضغوطة والإتصالات البصرية.

العيوب:

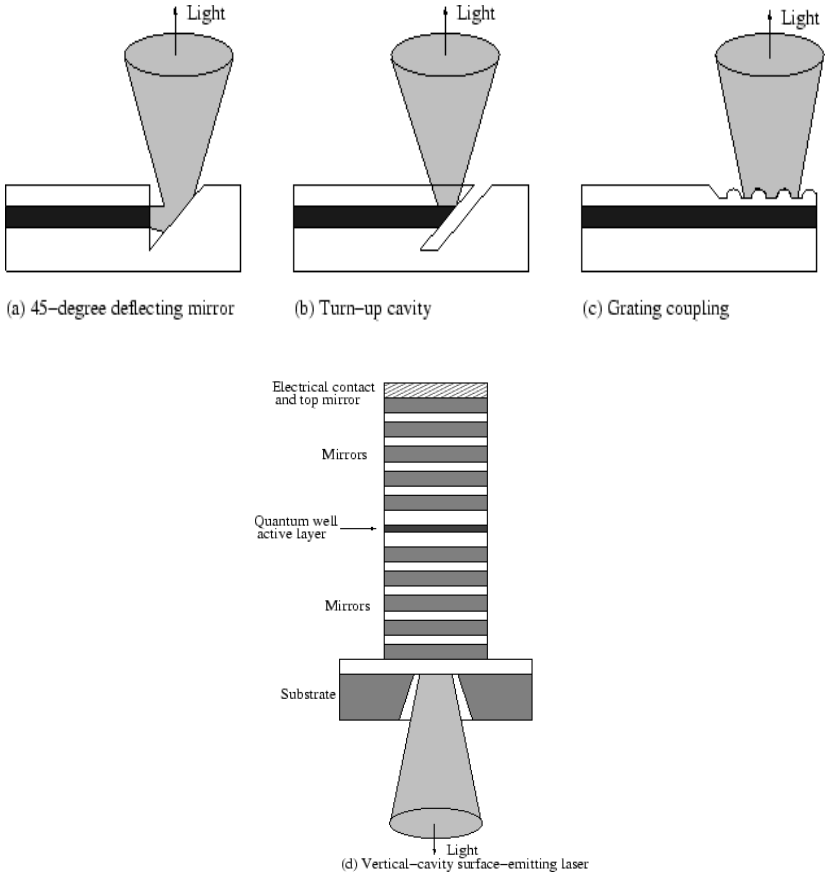
[١] ذات إشعاع بيضاوي الشكل، ويحيد بسرعة (لا سيما في مستوى الوصلة).

[٢] دايود حقن الليزر كبيرة جداً فى المساحة مقارنة بسائر ثنائيات أشباه الموصلات والترانزستورات ومكونات الدوائر المتكاملة.

[٣] دايود حقن الليزر يصعب إنتاجه بالجملة، حيث تتشكل معظم مرايا التجاويف بالحفر.

[٤] من الصعب تشكيل صفين الليزر، لا سيما تلك التي في حاجة إلى العديد من تكوينات الصور الضوئية وتطبيقات معالجة الإشارات. (القدرة على التحكم إلكترونيا في الإنبعاثات الصادرة من كل منبع مشع بشكل مستقل).

لتجنب أوجه القصور المشار اليها، تم تصميم نوع جديد من دايود مشعات الضوء معروف باسم دايود مشعات الحواف [٢٩]يمكن تحويلة لسطح مشع بإستخدام مرايا عاكسة ملتصقة أو منحنية داخل التجويف كما هو موضح فى الشكل (١ – ٢٤)، هذا النوع من ثنائيات الليزر صغير الحجم جداً ويبلغ طول كل مشع حوالي ٦ إلى ١٠ ميكرومترات وقطرها ١٠ ميكرومتر وكثيرا ما تعرف باسم ميكروليزر.



الشكل (١ – ٢٤) أنواع الليزر الحقن التي تنبعث من السطح

---

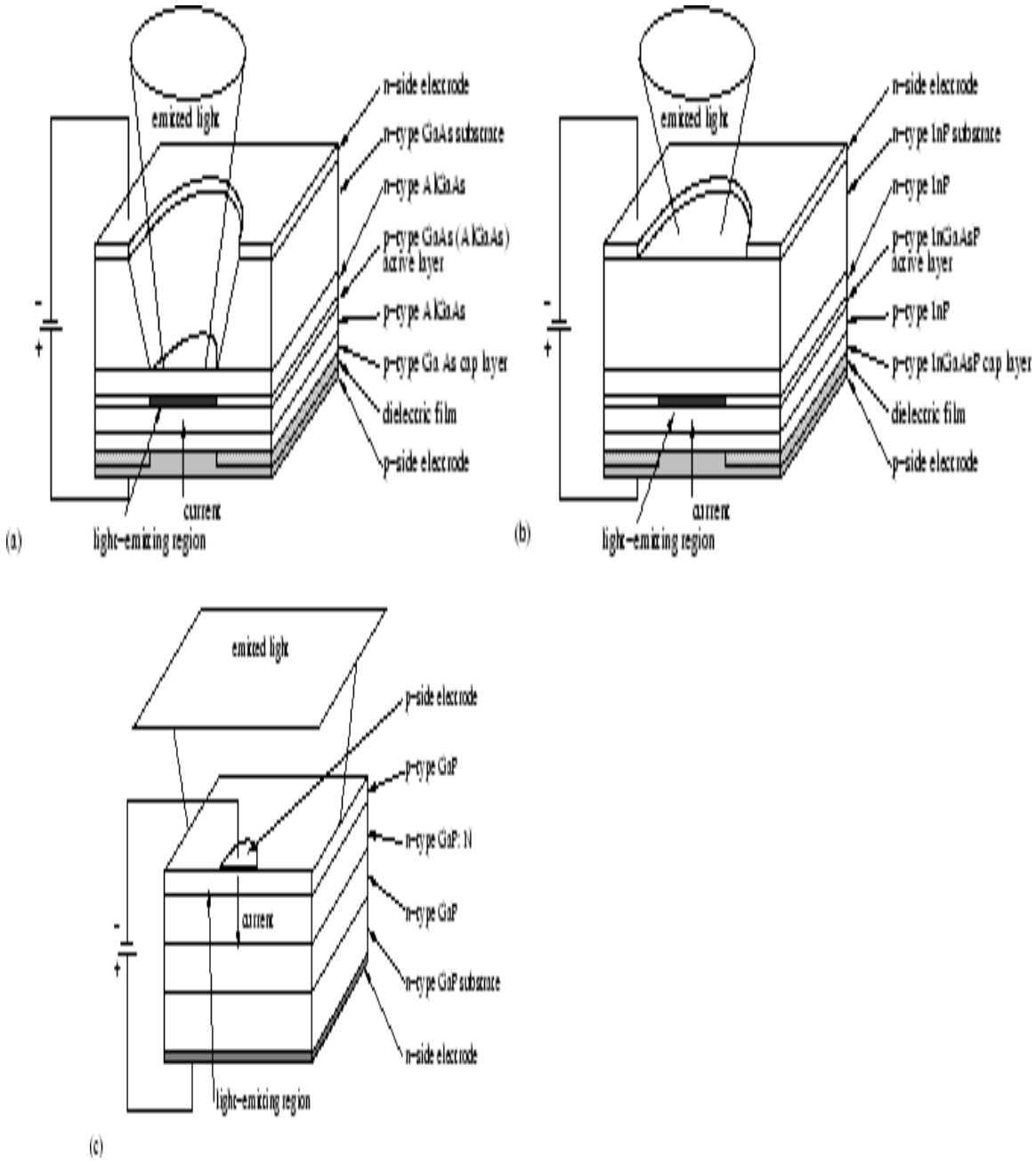
[٢٩] دايود مشعات الحواف (Edge–emitting) له تكوين فيزيائى يشبه الشكل السطحي لثنائي ليزر حقن (injection laser diode) ، يعمل دايود مشعات الحواف عند قيم أقل من جهد العتبة (lasing threshold) التي ينبعث منها الضوء الغير متماسك (incoherent light) . وله تباين شعاع صغير نسبيا (beam divergence) ، وبالتالي قادر على إطلاق المزيد من الطاقة الضوئية داخل ألياف بصرية معينة أكثر من صمامات السطح التقليدية التي ينبعث منها الضوء.

١ – ٥ – ٤ الثنائيات الباعثة – الضوء

هي عناصر من وصلة شبه موصل ثنائية نموذجية تستخدم في إطار تحيز أمامى ينبعث منها ضوء غير متماسك عند مرور التيار من خلال الوصلة٠ تنبعث الفوتونات عند تلاحم حوامل الشحنة الأقلية مع حوامل الشحنة الأكثرية وهى عملية توليد الضوء الأساسية في أشباه الموصلات التي ينبعث منها الضوء والطول الموجي للضوء المنبعث ضمن النطاق المرئي للأشعة تحت الحمراء٠ العناصر المتاحة تجارياً مصنوعة من مركبات أشباه الموصلات من العمودين الثالث والخامس كما تستخدم بعض المركبات من العمودين الثانى والسادس مثل مركبات زنك – كبريت وأنتيمن – سلينيوم ٠ لا تستخدم بكثرة ثنائيات الباعثة للضوء المرئى المصنعة من هذه المواد بسبب صعوبة تكوين الوصلة٠ تتكون الثنائيات الباعثة للضوء من خليط من الإنديوم – الجاليوم – الخراصين – الفوسفور وغطاء من الإنديوم – فوسفور – أطوالها الموجية تتراوح فى حيز ١٣٠٠ الى ١٥٥٠ نانومتر وهى الوحيدة التى تستخدم فى نظم إتصالات الألياف الضوئية٠ كما يستخدم خليط من مواد الجاليوم – خراصين و الألومنيوم – الجاليوم – خراصين لتصنيع الثنائيات الباعثة للضوء فى نطاق موجى يتراوح من ٧٨٠ الى ٩٠٠ نانومتر فى نظم إتصالات الألياف الضوئية ووصلات المعلومات وأجهزة التحكم عن بعد ٠٠٠٠٠٠ تستخدم كثير من الثنائيات الباعثة للضوء من نطاق الضوء الأزرق الى الضوء الأحمر فى إستخدمات العرض الضوئى والمؤشرات٠ تبلغ كثافة التيار حوالى ١٠ أمبير/سم^{٢} والذى يتوافق مع حقن ٦ ×١٠^{١٩} حوامل شحنة/سم^{٢} ٠ حتى بالنسبة لحقن تيار معتدل ، مثل ١٠ أمبير/سم^{٢}، فإن عدد حوامل الشحنة الأقلية يتجاوز بكثير كثافة حوامل الشحنة الأقلية في التوازن الحراري في درجة حرارة الغرفة٠ لتصميم عناصر الثنائيات الباعثة للضوء فى تطبيقات الإتصالات تبلغ كثافة التيار حوالى ١٠٠٠ أمبير/سم^{٢} أو أكثر, مما يعنى أن كثافة حوامل الشحنة الأقلية المحقونة لهذه الثنائيات الباعثة للضوء حوالى مرتين أكبر من الكثافة المطلوبة للعرض بثنائيات الباعثة للضوء٠

❖ **تكونين أساسيين لثنائيات الباعثة للضوء**

الهياكل الأساسية لبعض الثنائيات الباعثة للضوء موضحة في الشكل (١ – ٢٥).



الشكل (١ – ٢٥) المقطع العرضي لأنواع الثنائيات التي تنبعث من السطح

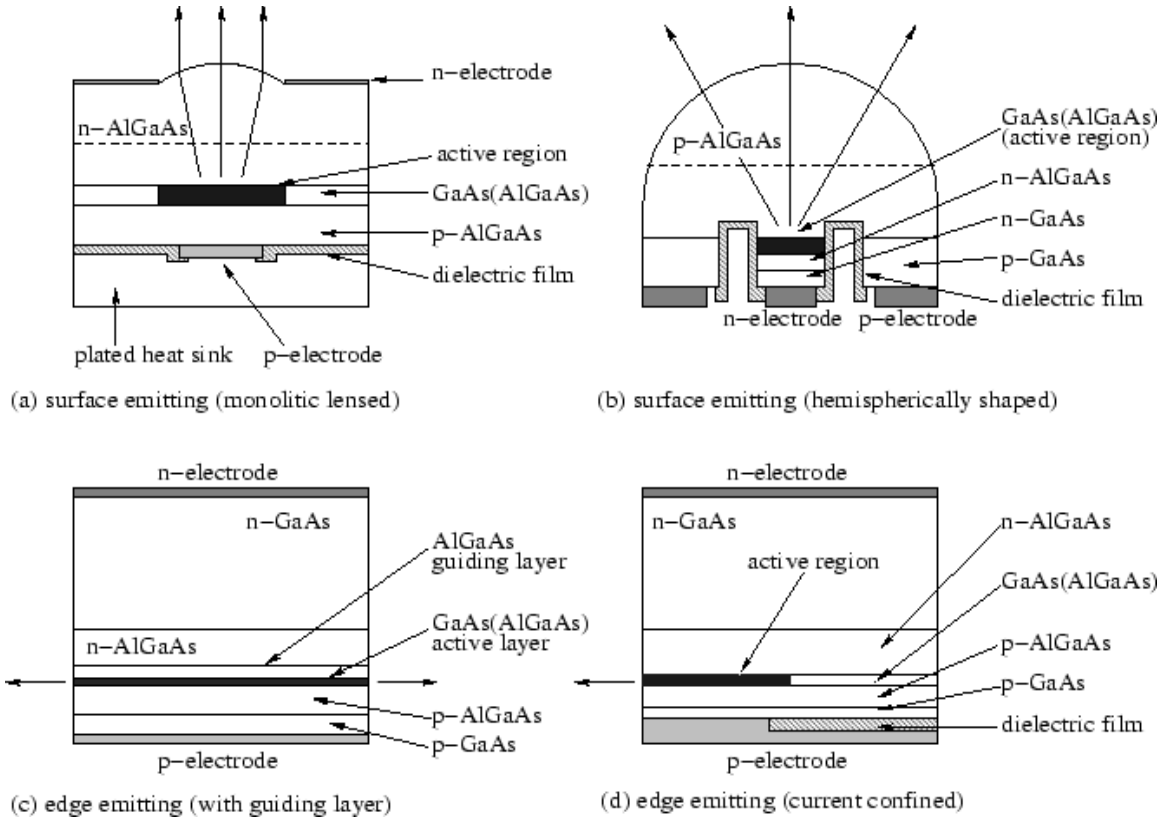
أ – نظام بروس – ب – تكوين إنبعاث السطح (المركبات الثنائية لأشباه الموصلات الغير متجانسة – ج – تكوين إنبعاث السطح (مركبات أشباه الموصلات المتجانسة)

يفضل أن يكون مصدر كفاءة الإنبعاث العفوي في عناصر الثنائيات الباعثة للضوء عن طريق الإثارة المحقنة لخفض مدخلات القدرة، وهكذا يتم إستخدام وصلة شبه موصل ثنائية غير متجانسة٠ تستخدم وصلات شبه موصل ثنائية متجانسة أو الغير متجانسة فى الثنائيات الباعثة للضوء الأحمر أو الأصفر وذلك لسهولة تصنيعها٠ وحيث أن الضوء الناشئ في عملية الإنبعاث العفوي ينبعث من الطبقة النشطة في جميع الإتجاهات. لذلك تم تصميم عدة هياكل لحصر الضوء المنبعث فى إتجاهات معينة وتنقسم إلى مجموعتين:

- ثنائيات السطح الباعثة للضوء

ينبعث الضوء من ثنائيات السطح الباعثة للضوء في إتجاه عمودي على مستوى وصلة شبه الموصل الثنائية٠ يوضح الشكل (١ – ٢٥) ثلاث أنواع من ثنائيات السطح الباعثة للضوء ٠ والفكرة العامة لهذه الثنائيات أن الطبقة النشطة الضيقة تقع بين طبقتين من الكسوة ويقتصر حقن حوامل الشحنة داخل المنطقة النشطة الرقيقة على كلا جانبي الطبقة النشطة، كما يتم إستخدام ركائز سميكة لتوفير الدعم الميكانيكي والإتصالات الكهربائية٠ فى التكوين المعروف بإسم نظام بروس تمتص الركيزة الضوء المنبعث٠ يتم إمتصاص معظم الضوء المنبعث إذا كان الطول الموجي (طاقة الفوتون) للضوء أكبر من الفجوة الطاقية لمادة الركيزة، في مثل هذه الحالة، يتم إزالة أو حفر جزء من الركيزة المقابل للمنطقة التي ينبعث منها الضوء لمنع الإمتصاص٠ المنطقة التي ينبعث منها الضوء عادة محدودة من أجل الحفاظ على خفض قيمة تيار التشغيل للثنائيات الباعثة للضوء المستخدمة في نظم إتصالات الألياف الضوئية تيسيرا لإقتران الضوء إلى الألياف البصرية٠ ينبعث الضوء من منطقة محدوده وذلك بتوصيل التيار المحقون بأحد الأقطاب الكهربائية٠ يتم توصيل القطب الكهربى (الكترود) بطبقة الغطاء التى يتراوح قطرها من ٣٠ الى ٥٠ ميكرومتر وهى من طبقة عازلة مثل ثانى أكسيد السيلكون . يمكن الحفر أو الإزالة فى الركيزة كيميائيا أو بطرق أخرى وصولاً إلى بنية العدسة لتحسين نمط الضوء المنبعث. في أشباه الموصلات ذات النطاق المباشر للفجوة الطاقية يكون الإلتحام

الإشعاعي أكثر إحتمالاً من مواد أشباه الموصلات ذات النطاق الغير مباشر للفجوة الطاقية ولذلك يفضل إستخدام مواد أشباه الموصلات ذات النطاق المباشر للفجوة الطاقية للثنائيات الباعثة للضوء (شكل ١ – ٢٦)٠ تحدد المنطقة النشطة فى الثنائيات الباعثة للضوء النموذجية المصممة لأغراض الإتصالات بالألياف الضوئية على سبيل المثال بشريحة مؤكسدة عرضها من ٢٠ إلى ٥٠ ميكرومتر، الذي يطابق القطر الداخلى الأساسي للألياف النموذجية.



الشكل (١ – ٢٦) مقطع لبعض الثنائيات الباعثة للضوء من خلال الإشعاع السطحى

أ –عدسات سطحية [٣٠] ب– نظام كروي الشكل [٣١]

ج– نظام اشعاع الحواف موجه [٣٢] د – نظام اشعاع الحواف بحصر الضوء [٣٣]

---

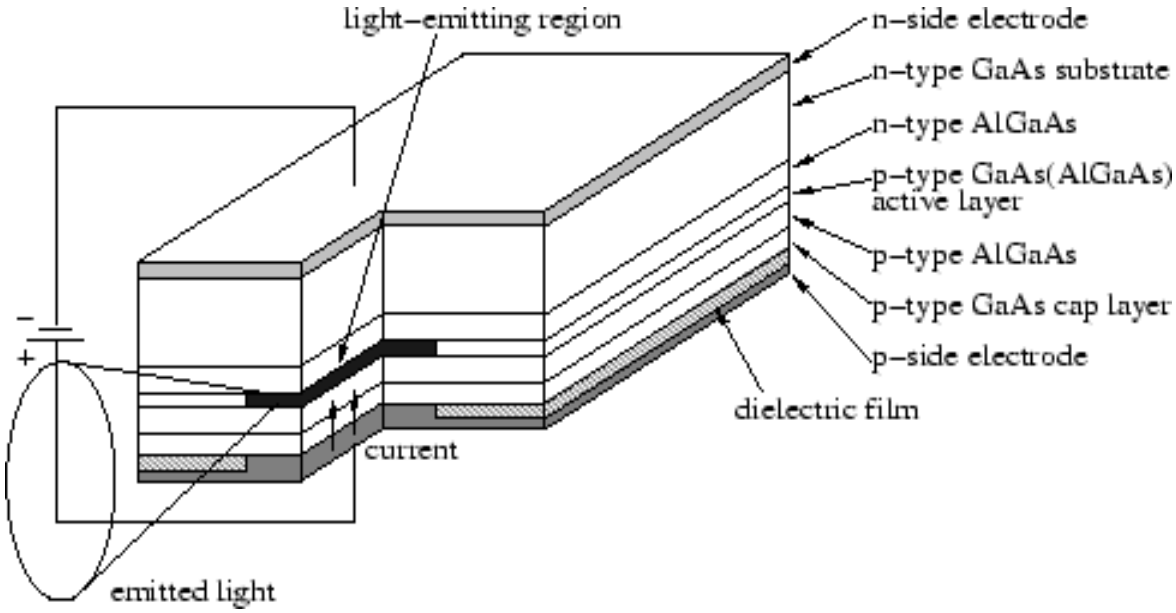
[٣٠] نوع من عدسات فوقية (monolithic–lensed)

[٣١] نوع من عدسات على شكل كروى (Hemispherically shaped)

[٣٢] نوع من عدسات إشعاع الحافة مع طبقة توجيه (edge–emitting type with a guiding layer)

- **ثنائيات الحواف الباعثة للضوء**

الهيكل والتكوين مشابه لتلك الثنائيات الباعثة للضوء (الشكل ١ – ٢٧)٠ ينبعث الضوء في إتجاه موازي لمستوى الوصلة الثنائية ٠ كما أن التيار محصور بواسطة طبقة من مادة عازلة لشريحة عرضها أقل من عدة عشرات من الميكرومتر ويتجمع في المناطق التي ينبعث منها الضوء على طول منطقة حقن التيار. ويتم إختيار طبقات الكسوة لتحقق حبس حوامل الشحنة، فضلا عن التوجيه البصري وحيث أن معامل العزل لمواد طبقات الكسوة أقل قليلا من معامل العزل لمادة الطبقة النشطة، مما يسبب إنعكاس الأشعة كليا داخليا بزاوية كبيرة بالحدود الفاصلة بين الطبقتين. وهذا يعني أن الضوء محاصر داخل الطبقة ذات المعامل المادى الكبير التي ينبعث منها الضوء ويخرج فقط من حافة الثنائي.



الشكل (١ – ٢٧) الرسم التوضيحي لثنائيات الحواف الباعثة للضوء.

---

[٣٣] نوع من عدسات إشعاع الحافة مع منطقة إشعاع محلية (edge–emitting with local emitting area.)

- **ثنائيات الحواف الباعثة للضوء ذات نمط القطع الناقص**

فى بعض ثنائيات الحواف الباعثة للضوء – ينخفض التيار المحقون فى المنطقة القريبة من الجوانب الخلفية مما يعنى أن المنطقة القريبة من الجانب الخلفى تمتص الضوء أكثر من توليد الضوء. لا يستخدم هذا النوع من ثنائيات الحواف الباعثة للضوء فى المصادر البصرية لنظم الإتصالات بالألياف البصرية.

- **الخصائص الأساسية للثنائيات الباعثة للضوء**

ينبعث الضوء في هذه الثنائيات من الإنبعاثات العفوية في الطبقة النشطة الناتجة من الإلتحام الإشعاعى للألكترونات والثقوب ٠ يوضح الشكل (١ – ٢٨) تكوين النطاق وتوزيع كثافة حوامل الشحنة تحت تأثير التحيز الأمامى. فى تكوين المركبات الثنائية الغير متجانسة (p–type/p–type/n–type DH) من مواد إشباه موصلات ذات الفجوة الطاقية المباشرة.

نجد أن توزيع حوامل الشحنة المحقونة داخل المنطقة النشطة منتظم حيث أن سمك المنطقة النشطة أقل من طول الإنتشار لحوامل الشحنة (ميكرومترات قليلة)٠ سمك الطبقة النشطة فى الثنائيات الباعثة للضوء غالبا حوالي ٥و٠ الى ٢ ميكرومتر٠ يتم التعبير عن كثافة الإلكترونات والثقوب فى المنطقة النشطة بالمعادلات:

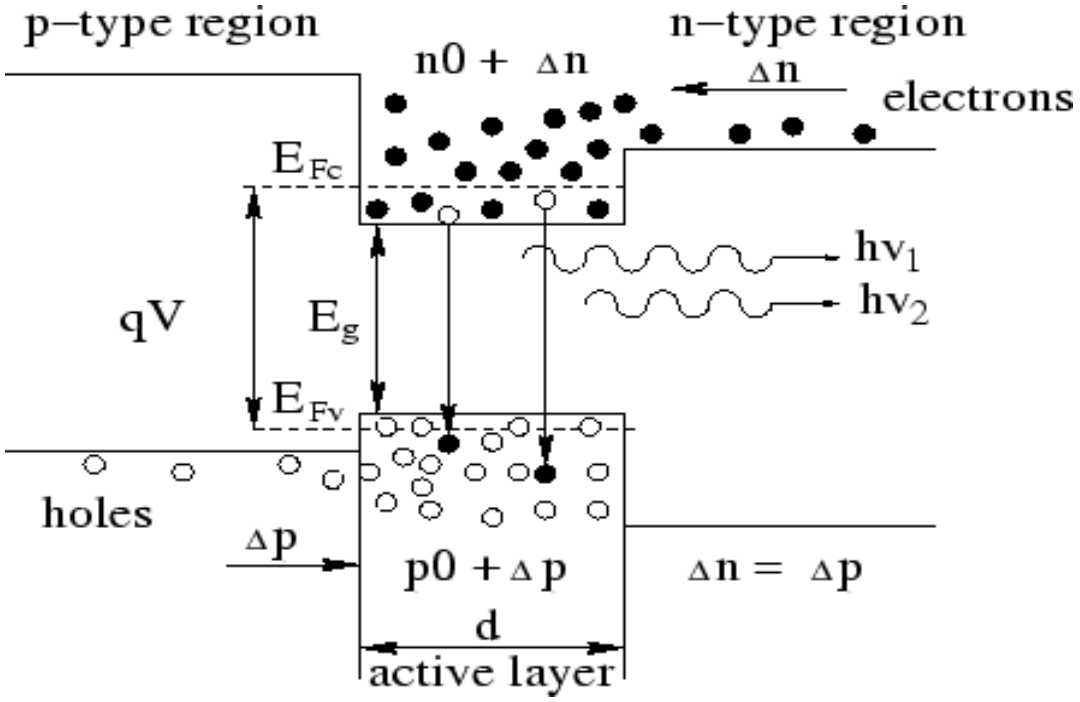
$$n = n_o + \Delta n \qquad \text{المعادلة (١ – ٢٩)}$$

$$P = p_o + \Delta p \qquad \text{المعادلة (١ – ٣٠)}$$

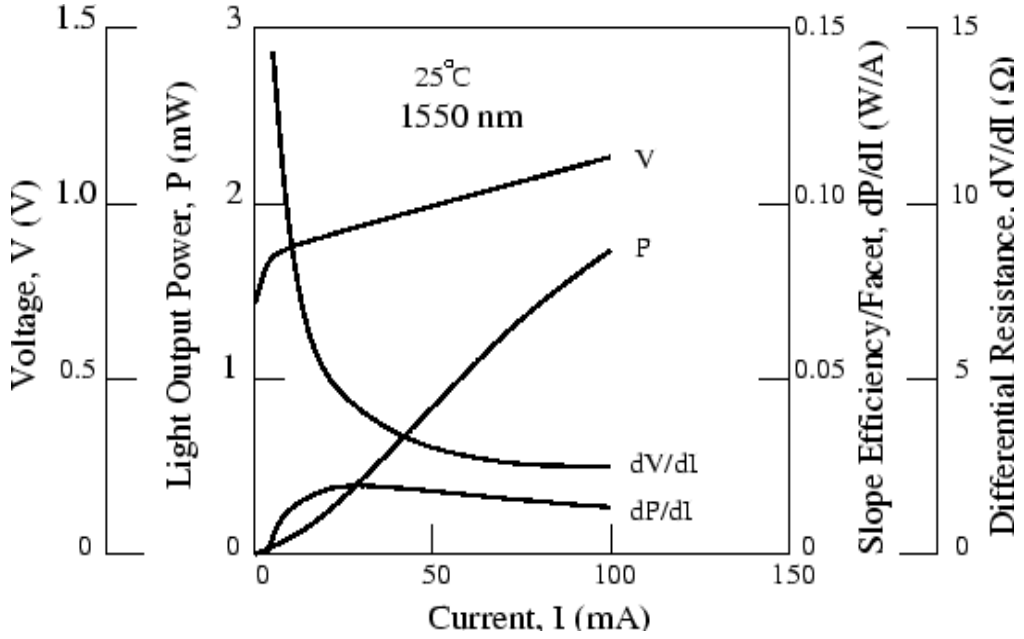
$$\Delta n = \Delta p \qquad \text{المعادلة (١ – ٣١)}$$

حيث: (Δn وΔp) كثافة الإلكترونات والثقوب المحقونة و(n وp) كثافة الإلكترونات والثقوب فى المنطقة النشطة فى حالة الإتزان الحراري حيث:

$$n_o\ p_o = n_i^2$$



الشكل (١ – ٢٨) رسم تخطيطي لمستوى الطاقة وتوزيع حوامل الشحنة المحقونة للمركبات الثنائية الغير متجانسة تحت تأثير تحيزاً أمامى

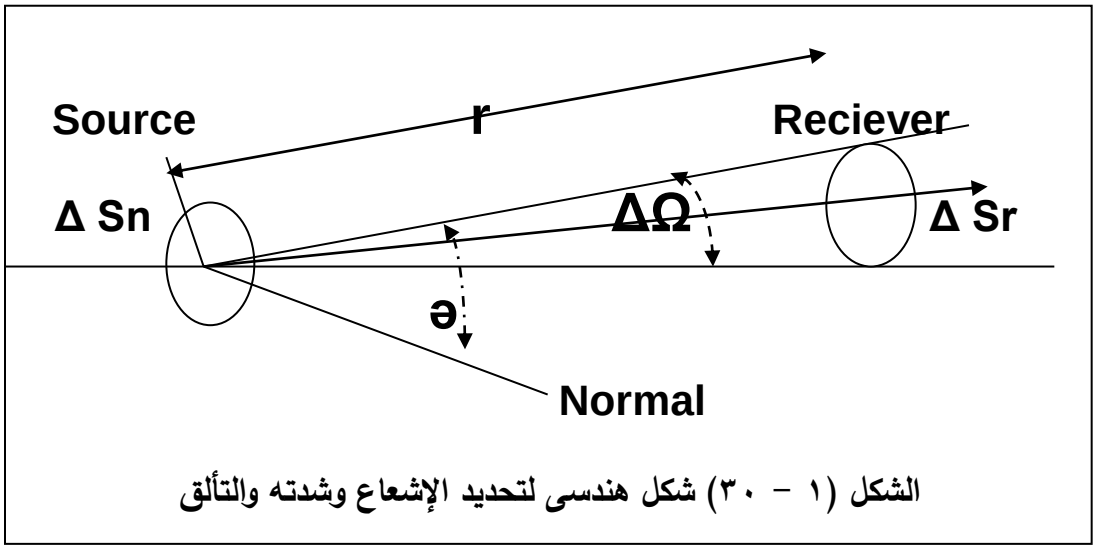


الشكل (١ – ٢٩) خصائص عنصر نموذجي لثنائي السطح الباعث للضوء فى نطاق ١٥٥٠ نانومتر لمركبات جاليوم – خراصين – فوسفور / انديوم – فوسفور

يوضح الشكل (١ – ٢٩) ميل كفاءة القدرة وخصائص التيار كدالة مع الفولت لثنائيات السطح الباعثة للضوء لنطاق طيفى ١٥٥٠ نانومتر فى مركبات إنديوم – جاليوم – خراصين – فوسفور / إنديوم – فوسفور

- كفاءة إستخراج الضوء والقدرة من ثنائي السطح الباعث للضوء

لتحديد كمية الطاقة الضوئية يتعين إستنتاج معاملين، (الشكل ١ – ٣٠)٠



الشكل (١ – ٣٠) شكل هندسى لتحديد الإشعاع وشدته والتألق

إذا رمزنا للإشعاع بالرمز H والقدرة البصرية الواردة لجهاز الإستقبال بالرمز ΔP لكل وحدة مساحة وشدة التيار بالرمز J

$$H = \frac{\Delta P}{\Delta S_r}$$ المعادلة (١ – ٣٢)

$$J = r^2 \frac{\Delta P}{\Delta S_r n} = \frac{\Delta P}{\Delta S_r n \frac{1}{r^2}} = \frac{\Delta P}{\Delta W}$$ المعادلة (١ – ٣٢)

حيث: ΔW هى الزاوية للقوة التى تؤثر على العناصر السطحية لجهاز الإستقبال

$$\Delta W = {\Delta S_r n}/{r^2}$$

يمكن تفسير أن شدة التيار (J) على أنها القدرة البصرية المرسلة لجهاز الإستقبال بالرمز ΔP والمتكونة فى نطاق الزاوية ΔW٠ نجد أن قدرة الضوء الخارج يتناسب تقريبا مع التيار المحقون في النطاق المنخفض للتيار. ويمكن إيجاد قدرة الضوء

المنبعث فى المنطقة النشطة بناتج ضرب عدد الفوتونات المنبعثة وطاقة الفوتون (hν) الناتج من كثافة حوامل الشحنة المحقونة (J/qd)، وتوضح كفاءة الكم الداخلية عدد الفوتونات التي تم توليدها بواسطة عملية الإلتحام العفوية الناتجة فى وحدة الحجوم للطبقة النشطة. الآن، يمكن حساب قوة الضوء المنبعث من وحدة الحجوم من الطبقة النشطة على النحو التالى:

$$P_{act} = h\nu \frac{\eta_i J}{q d}$$ المعادلة (١ – ٣٤)

حيث: η_i كفاءة الكم الداخلية المقابلة لعدد الفوتونات المنبعثة الناتجة من حقن الإلكترونات:

$$\eta_i = B_{sp} \tau_n (P_o + n_o + \Delta n)$$ المعادلة (١ – ٣٥)

فى حال إستبدال المعادلة (١ – ٣٥) إلى (١ – ٣٤) وإستخدام المعادلات (١٨ – ٢٩) و(١ – ٣٠)،

$$P_{act} = h\nu \frac{J}{q d} B_{sp} \tau_n \left(P_o + n_o + \tau_n \frac{J}{q d}\right)$$ المعادلة (١ – ٣٦)

حيث: τ_n زمن حياة حوامل الشحنة المحقونة

في ظل عملية الحقن المنخفض، يمكن حساب كثافة حوامل الشحنة من النوع p ومن النوع n حيث $n_o \gg \tau_n \frac{J}{q d}$ ويمكن إعادة كتابة المعادلة (١ – ٣٦) للنوع p فى الطبقة النشطة (p > n) على النحو التالى :

$$(p0 > n0) h\nu B_{sp} P_o \tau_e \frac{J}{q d}$$ المعادلة (١ – ٣٧)

ولطبقة n–type على النحو التالى:

$$P_{act-n} = h\nu B_{sp} n_o \tau_h \frac{J}{q d}$$ المعادلة (١ – ٣٨)

في ظل عملية الحقن العالى $\tau_n \frac{J}{q d} \gg P_o$ نحصل على:

$$P_{act} = h\nu B_{sp} \left[\tau_n \frac{J}{q d}\right]^2$$ المعادلة (١ – ٣٩)

يتضح فى المعادلات الثلاث الأخيرة أن زمن حياة حوامل الشحنة المحقونة (T_n) وشدة التيار (J) هما المتغيران فقط ٠ وأن قدرة الضوء الناتج من الطبقة النشطة يتناسب مع كثافة التيار المشحون في نطاق الإثارة المنخفضة ومربع كثافة التيار في نطاق الإثارة العالية.

- خصائص التيار والضوء الناتج

قدرة الضوء الكلى الناتج من ثنائى الباعث للضوء لا يساوى قدرة الضوء المنبعث من الطبقة النشطة بسبب الإشعاع الضوئى للإنبعثات العفوية فى الإتجاهات العشوائية. ولذلك، فإن الضوء المنبعث من مكان معين على السطح هو جزء فقط من إجمالي القدرة الكلية المنبعثة٠ مما يعني أن نحصل على كفاءة بميل منخفض جداً حوالى (~٠,٠٢ وات/امبير كما في الشكل (١ – ٢٩)، وهو نسبة القدرة الناتجة من سطح محدد الى كثافة التيار المحقون. ويمكن التعبير عن قدرة الضوء الناتج بطرق مختلفة تتعلق بالكفاءة. تسمى كفاءة التحويل أيضا بكفاءة الثنائى الباعث للضوء أو كفاءة القدرة (η_{cv})٠ ويمكن تحديدها كنسبة الطاقة الضوئية الناتجة من ثنائى الباعث للضوء (P_{out}) الى القدرة الكهربائية المدخلة (P_{e-in}) ٠

$$\eta_{cv} \equiv \frac{P_{out}}{P_{e-in}} \; x \; 100 \qquad \text{المعادلة (١ – ٤٠)}$$

عادة فإن كفاءة التحويل (η_{cv}) أقل من ٥% ٠ وكفاءة أخرى والتى تستخدم غالبا فى تقييم العناصر الباعثة للضوء هى كفاءة الكم الخارجية (η_{ext})٠

$$\eta_{ext} = \frac{P_{out}/h\nu}{I_F/q} = \left[\frac{P_{out}}{I_F \; E_g}\right] x \; 100 \qquad \text{المعادلة (١ – ٤١)}$$

حيث: I_F التيار المحقون ($h\nu/q$)= E_g نطاق الفجوة الطاقية للمنطقة النشطة بوحدات الإلكترون فولت٠ يمكن التعبير عن قدرة التحويل (η_{cv}) وكفاءة الكم الخارجية (η_{ext}) بالمعادلة التالية:

$$\eta_{cv} = \eta_{ext} \left(\frac{E_g}{V_J}\right) \qquad \text{المعادلة (١ – ٤٢)}$$

حيث: $P_{e-in}=I_F V_j$ and $V_j = V_b - RI_F$ جهد التغذية لوصلة شبة الموصل و (V_b) جهد التحيز التطبيقي و(R) المقاومة الكلية على التوالى فى دائرة التغذية. يمكن إستنتاج كفاءة الكم الخارجية (η_{ext},) بحاصل ضرب كفاءة الكم الداخلية (η_i) وكفاءة الإستخراج (η_{out})

$$\eta_{ext} = \eta_i \ \eta_{out} \quad \text{المعادلة (١ – ٤٣)}$$

حيث: كفاءة الإستخراج هي نسبة القدرة المنبعثة من الطبقة النشطة للقدرة المنبعثة من الثنائى الباعث للضوء (P_{out}).

$$P_{out} = \eta_{out} \ (S_{act} \ d_{act}) \ P_{act} \quad \text{المعادلة (١ – ٤٤)}$$

حيث: (S_{act}) مساحة المنطقة الباعثة للضوء و(d_{act}) سمك الطبقة النشطة

يمكن الحصول على ميل خط الكفاءة (η_s) كما فى الشكل (٢٨–١) بالمعادلة التالية:

$$\eta_s = \frac{d\,P_{out}}{d\,I_F} = \eta_{out} \ \frac{d\,P_{act}}{d\,I_F} = \eta_{out} \ \eta_i \ h\nu \ (S_{act}\, d_{act}) \ \frac{d\left(J/q\, d_{act}\right)}{d\,I_F}$$

$$= \eta_{ext} \ \frac{h\nu}{q} \quad = 1.24 \ \frac{\eta_{ext}}{\lambda\,(\mu m)} \ \left(W/A\right)(45)$$

حيث، تم إستخدام المعادلات (١ – ٤٣) و(١ – ٤٤). على سبيل المثال، في حالة الثنائى الباعث للضوء نطاق ١٥٥٠ نانومتر، تظهر خصائصها في الشكل (١ – ٢٩) والذي يحدد كفاءة الميل ٠٫٠٢ وات/أمبير.

- خصائص الجهد والتيار

توضح المعادلة (١ – ٤٦) العلاقة بين الجهد والتيار للثنائيات المشعة للضوء في نطاق تحيز التشغيل للثنائيات الباعثة للضوء، تيار الإنتشار هو الأساس ويمكن إيجاد قيمة التيار الإشعاعى كالتالى:

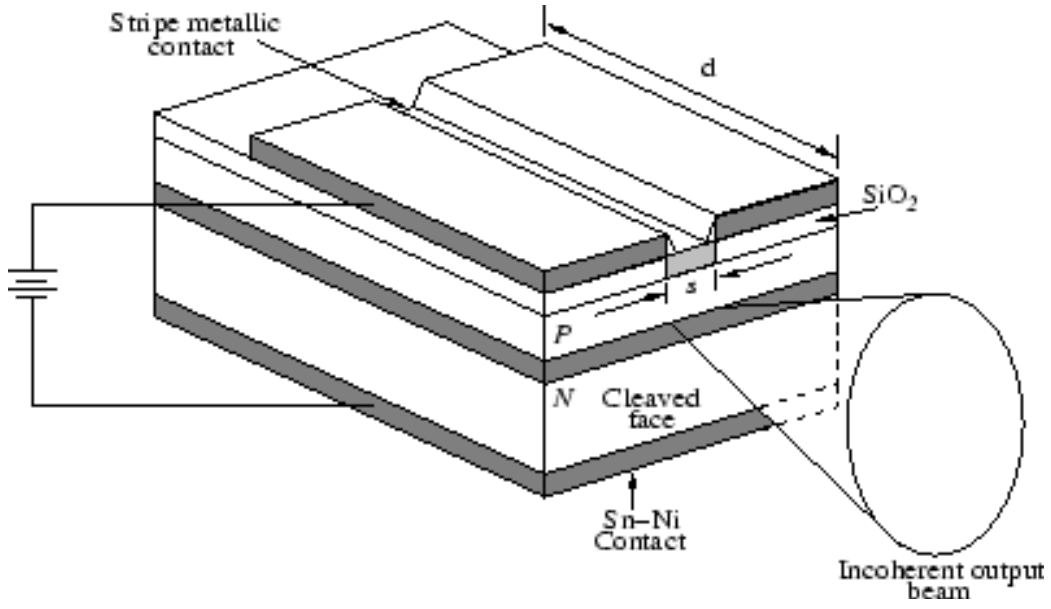
المعادلة (١ – ٤٦) $$I_F = S_{act}\, J_{s0}\, \exp\left[\frac{V_b - R_S\, I_F}{K_B\, T}\right]$$

حيث: (R_s) المقاومة على التوالى– يبين الشكل (١ – ٢٩) إرتفاع التيار بسرعة عندما يتعدى جهد التغذية مستوى الفجوة الطاقية للمنطقة النشطة (٨و٠ فولت)٠

١ – ٥ – ٥ ثنائيات الإنارة المتألقة (السوبر) [٣٤]

ثنائيات الإنارة السوبر لها تكوين أو هيكل مشابه جداً للثنائيات الباعثة للضوء مع التأكيد على أن جميع عناصر الليزر تتبع هيكل المكونات الأساسية:

- وسط تكبير
- آليه تغذية مرتدة بصرية
- وسيلة الحصول على القدرة من مصادر خارجية

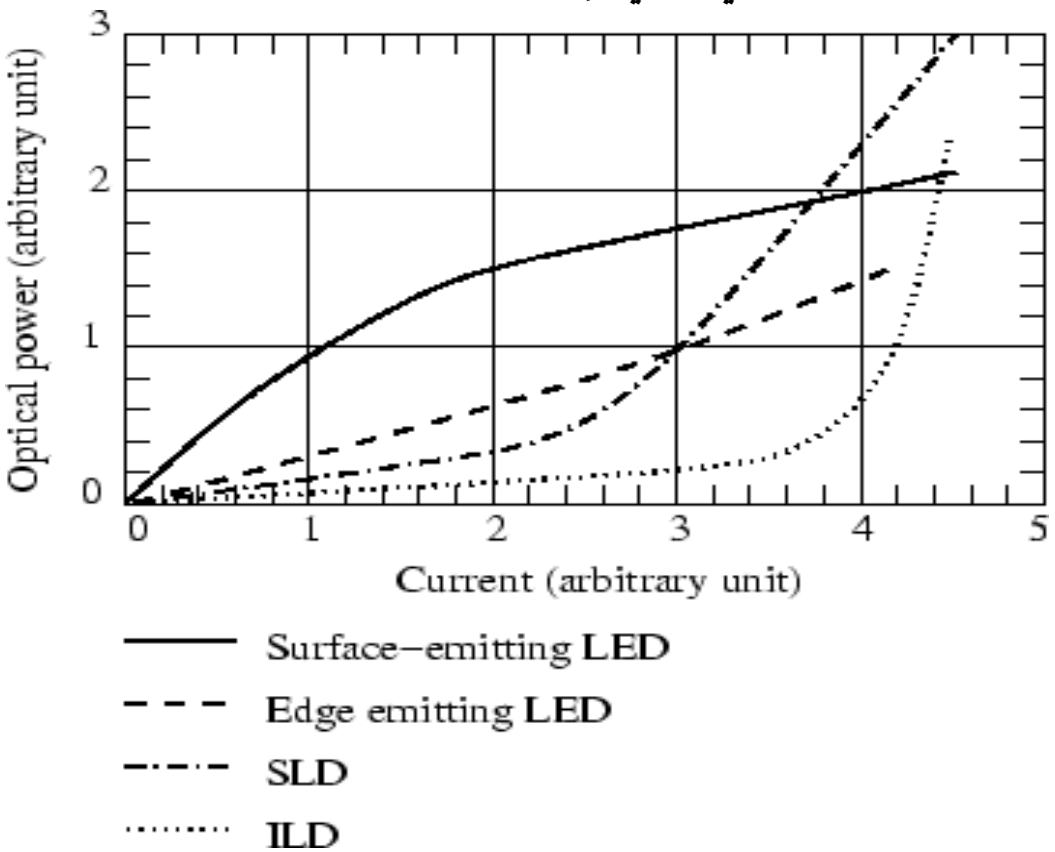


الشكل (١ – ٣٣) شكل هندسى لتكوينات ثنائيات الإنارة المتألقة

---

[٣٤] الثنائيات سوبر الإنارة والمشار لها (SUPER LUMINESCENT DIODES (SLD

ثنائيات الإنارة المتألقة ليس لها آليه تغذية مرتدة بصرية أو تجويف وهو الفرق الأساسى بينها وثنائى التباين المحدود. يغطى السطح الأمامى لثنائيات الإنارة المتألقة بمادة غير عاكسة وغالبا تتكون من عديد من الطبقات العازلة وفى بعض الأحيان يغطى ايضا السطح الخلفى (شكل ١ – ٣٣) بسبب طلاء الأوجه الخلفية و/أو الجزء الغير مطلى قرب نهاية الجزء الخلفي لثنائي الإنارة السوبر ٠



الشكل (١ – ٣٤) مقارنة بين خصائص القدرة البصرية والتيار التعسفي لثنائى الباعث للضوء السطحى وثنائى الباعث للضوء من الحواف ودايود حقن الليزر وثنائى الاضاءة السوبر ٠

يتم إعاقة التغذية المرتدة البصرية وتحفيز الانبعاثات إلى حد كبير. يمكن تكبير الإنبعاثات العفوية بالإشعاع المنبعث الخلفي لثنائي الإنارة السوبر. وحيث أن التضخيم الضوئي يحدث فقط في مسار واحد في الاتجاه الأمامى مما يحدد الكسب المقابل. وبصفة عامة، فان كثافة التيار اللازم لثنائي الإنارة السوبر أعلى بكثير مما هو مطلوب للثنائى المشع للضوء او دايود حقن الليزر، (شكل ١ – ٣٤).

- **مقارنة بين دايود (حقن الليزر – الباعث للضوء – الإضاءة السوبر)**

يوضح شكل (١ – ٣٤) مقارنة بين خصائص القدرة البصرية والتيار لثنائى الباعث للضوء من السطح وثنائى الباعث للضوء من الحواف وثنائى الإضاءة المتألقة ودايود حقن الليزر– تزداد القدرة الضوئية لثنائى الباعث للضوء خطيا مع التيار الداخل حتى منطقة التشبع ٠ ويرجع الوصول الى مرحلة التشبع الى إرتفاع درجة حرارة الوصلة٠ وفي المقابل، فإن خصائص القدرة البصرية والتيار التعسفي تصل الى منحنى حاد يمثل جهد الإعاقة لتحفيز الإنبعاثات٠ طريقة أخرى للتفريق بين المصادر المختلفة لأشباه الموصلات هى مقارنة عرض نطاقات الخرج لها٠ لثنائى الباعث للضوء من السطح وثنائى الباعث للضوء من الحواف بأطوال موجية مركزية بالقرب من ٨٥و٠ ميلى متر يصل العرض الموجى حوالى ٤٠ نانومتر و١٥ نانومتر على التوالى ومع ذلك، فإن العرض االموجى لثنائى الإضاءة السوبر فقط ٢٥ في المائة فقط من ثنائى الباعث للضوء من السطح ٠ العرض الموجى فى دايود حقن الليزر حوالى بعض نانومتر أو أقل٠ ينبعث من ثنائى الباعث للضوء المثالى إنبعاثات عفوية غير متماسكة عبر نطاق واسع النطاق الطيفي في زاوية محددة كبيرة٠ ويظهر الضوء الذى لم يتم تكبيره في إتجاه واحد على عمق محدود بإمتصاص المواد، الخرج الغير مستقطب يزيد خطيا مع التيار الداخل ويحدد عرض النطاق الترددي بعمر الإنبعثات العفوية٠

ينبعث من ثنائي ليزر مثالي إنبعاث تحفيز متماسك (وإنبعاثات عفوية لا يعتد بها) فى نطاق طيفي ضيق وزاوية محددة٠ يخرج الضوء بعد عديد من المسارات فى طول ممتد مع إنعكاسات مرآة جزئية وسيطة٠ يستقطب الخرج عادة ويزداد بحدة عند الوصول الى قيمة تيار الإعاقة الذي يوفر ما يكفي لتحفيز الكسب للتغلب على الفقد على طول الطريق ذهابا وإيابا في المرايا٠ في ثنائى الاضاءة المتألقة ، تحفز الإنبعاثات العفوية المكسب على مسار ممتد لإنعكاس مرآة واحدة دون ردود فعل٠ الخرج غير متماسك ولكن إنبعاثات التحفيز تقلل العرض الطيفي وزاوية النطاق ويزيد من عرض النطاق

الترددي. وهكذا، فإن ثنائى الإضاءة السوبر يمتاز بخواص بصرية أفضل من الثنائيات الباعثة للضوء وثنائى الليزر والتى يمكن تعديلها بواسطة تغيير قيم تيار التشغيل٠ يتناسب الخرج المستقطب خطيا مع التيار مع إنحناءه توفر مكاسب إيجابية صافية كبيرة٠ ثنائى الإضاءة السوبر الفعلي له بعض ردود الفعل لأنه ليس من الممكن تصنيع طبقة غير عاكسة مثالية٠ ثنائى الضوء المشع الفعلى له بعض المكاسب التى تحققت (لا سيما باعث الحواف) إذا كان طوله أكبر من حوالي ١ ملم، وهو طول إمتصاص نموذجي٠ ثنائى الليزر الفعلي ذو تغذية مرتدة ضعيفة نسبيا من المرايا المحفورة أو الملتصقة ، ويعتمد على تضخيم الإنبعاثات العفوية المقرونة بوضع الليزر. وهكذا، في الممارسة العملية لهذه العناصر تشكل الثلاثة سلسلة متصلة بلا حدود حادة٠

التطبيقات المثيرة للألياف المتعددة بثنائيات الليزر بما لها قدرة خرج عالية وكفاءة إقتران لكن تماسكها العالي يمكن أن يكون مصدرا مشروط وردود فعل الضوضاء، على الجانب الآخر، فإن الثنائيات الباعثة للضوء لها طاقة خرج وكفاءة إقتران وعرض نطاق ترددي منخفض جداً٠ وفي بعض الحالات فإن نطاقها الطيفى واسع جداً وقد يسبب تشتت المواد للحد من التباعد لمحطات الإرسال. على النقيض من ذلك، يمكن تصميم ثنائيات الإضاءة السوبر لتعطى مزيج من الخصائص تصمم خصيصا لنظام معين. من وجهة النظر التطبيقية:

١ – تتميز الثنائيات الباعثة للضوء بالبساطة وكثافة وإنخفاض تيار التشغيل نسبيا ولا تتأثر كثيرا بإختلاف عمليات التصنيع حيث أنها تعمل فى نطاق واسع من درجات الحرارة ولا تتطلب إلا دائرة كهربائية بسيطة للحفاظ على ثبات وإستقرار الخرج. على النقيض من ذلك، فإن دايود حقن الليزر يتطلب دقة التصنيع حيث أن خصائص القدرة البصرية والتيار التعسفي لدايود حقن الليزر يتغير فجأة بعد مستوى الإعاقة، وتعتمد خصائصها المكانية والطيفية إعتماداً كبيرا على تيار التشغيل ودرجة الحرارة. ويتطلب دايود حقن الليزر ضرورة التدقيق للحصول على بيئة تشغيل مستقرة٠

٢ – الإنبعاثات من الثنائيات الباعثة للضوء ذات نطاق عريض، وغير مستقطب وغير متماسك ويمكن أن يتم تعديل سعة الخرج البصري لبضع مئات من الميجاهرتز. وفي المقابل، فإن الخرج من دايود حقن الليزر ضيق النطاق، مستقطب، ومتماسك الضوء. يمكن الحصول على تعديل سعوى مباشر من دايود حقن الليزر عند ٢٠ جيجاهرتز٠

٣ – الإشعاع من الثنائيات الباعثة للضوء من السطح لا يقتصر مكانياً، وجزء صغير فقط من الخرج يمكن أن يقترن داخل الألياف البصرية المتعددة. ويقتصر الإشعاع من ثنائيات الباعثة للضوء من الحواف مكانياً وطيفيا. وعلى سبيل المقارنة، فإن الخصائص الإتجاهية لدايود حقن الليزر التقليدية أفضل بكثير، ويمكن أن يتم اقترانها بكفاءة أكثر إلى داخل الألياف البصرية.

١– ٥– ٦ ثنائيات الصور [٣٥]

ثنائيات الضوء هى أحد العناصر البصرية الإلكترونية النموذجية من وصلة شبه موصل ثنائية تستخدم في إطار الإنحياز العكسي. تستند آليات تشغيلها إلى خصائص المواد الكهربائية والبصرية المصنعة منها الوصلة. من أهم إستخدمات ثنائى الصور تطبيقاته فى عمليات الإمتصاص البصري والذى يختلف تماما عن ثنائيات الباعثة للضوء وثنائيات الليزر. عملية الإمتصاص الضوئى هى عكس عملية التحفيز والإنبعاثات العفوية، ولذلك فإن الطول الموجي للتشغيل يعتمد أساسا على قيمة الفجوة الطاقية لمواد التصنيع. المواد المستخدمة لتصنيع ثنائيات الضوء في الغالب هى مواد أشباه الموصلات إبتدائية مثل السيلكون والجرمانيوم ، ومركبات مواد أشباه الموصلات من العمودين الثالث والخامس وأيضا الثانى والسادس مثل مركبات مواد الجاليوم – خراصين ومركبات مواد إنديوم – فوسفور ومركبات مواد كادميوم – تليريوم٠ تتكون ثنائيات الصورة من

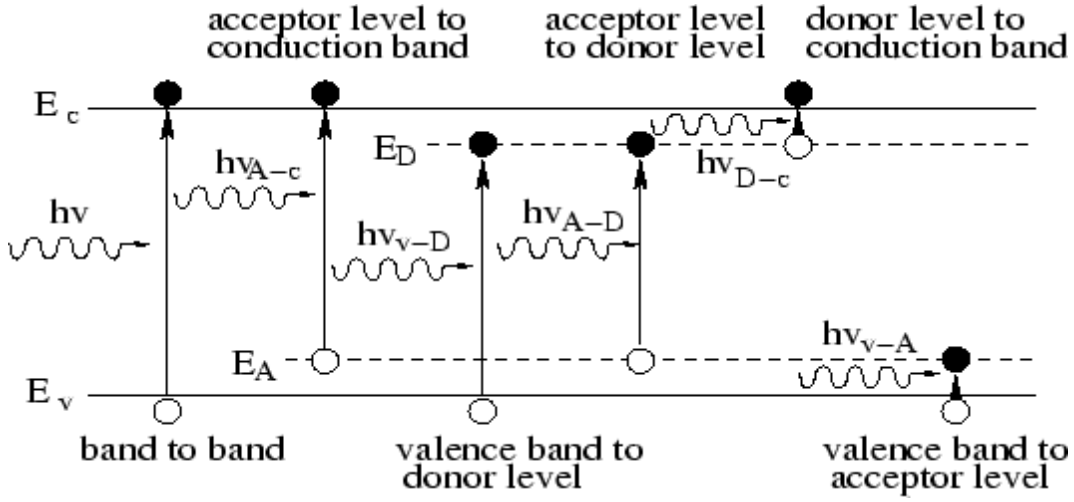
---

[٣٥] ثنائيات الصور (Photodiodes)

السيلكون الأكثر إستخداما في مجال الإلكترونيات الإستهلاكية، بينما تلك التي تتألف من مواد الجرمانيوم ومركبات انديوم – جاليوم – خراصين فوسفور/ انديوم – فوسفور فتستخدم فى نظم إتصالات الألياف الضوئية كما تستخدم مركبات المواد إنديوم – خراصين ومركبات مواد إنديوم – إنتيمون كمواد لتصنيع ثنائيات الضوء فى نطاق الطول الموجي الأطول.

- أساسيات ثنائيات الصور

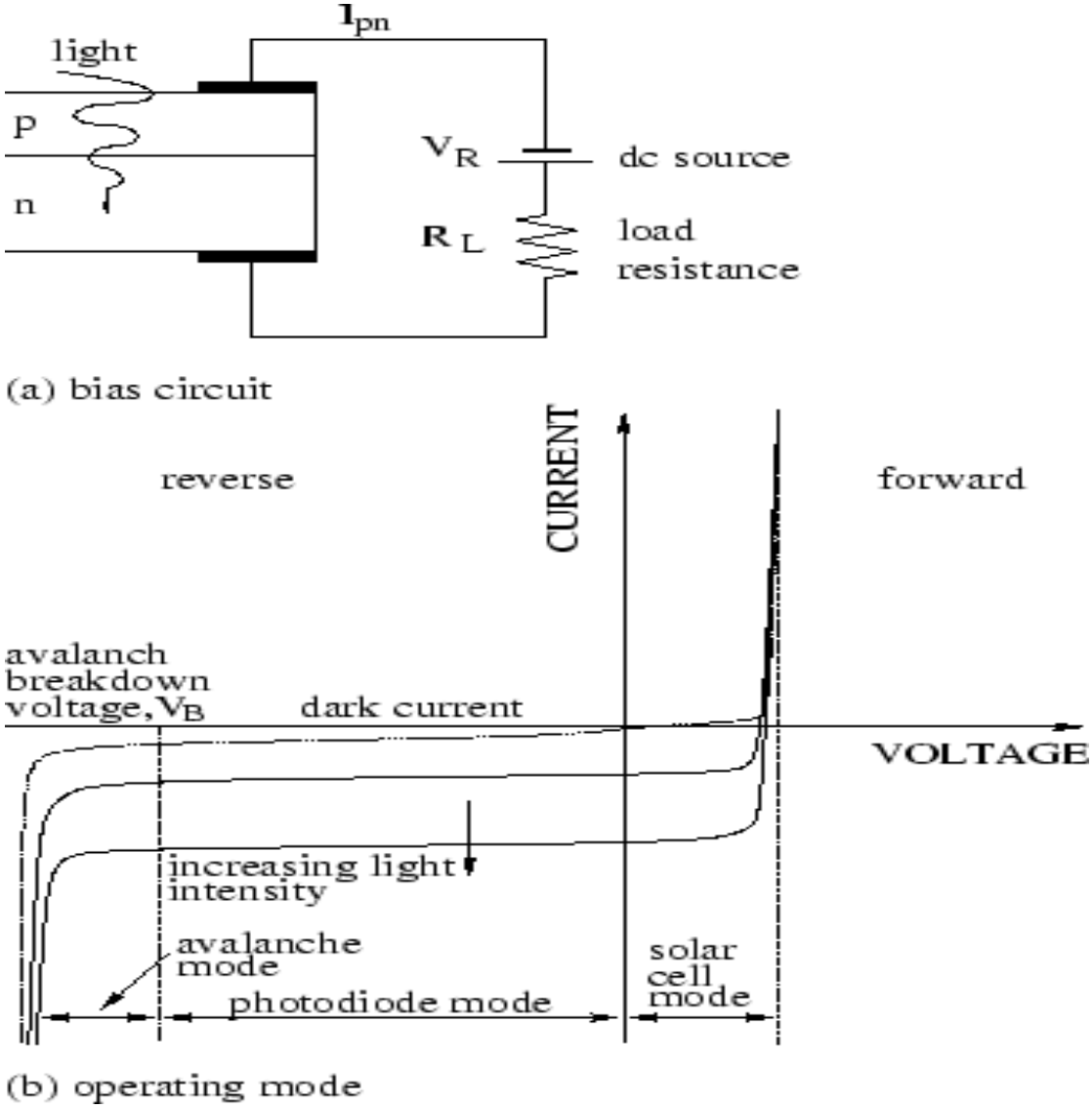
عند تسليط ضوء ذو طاقة أعلى من الفجوة الطاقية لمادة شبة الموصل. تمتص المادة الضوء ويتولد أزواج من الإلكترونات والثقوب، (الشكل ١ – ٣٥).



شكل (١ – ٣٥) توضيح مبسط للإستيعاب البصري في أشباه الموصلات ذات الفجوة الطاقية المباشرة

الإلكترونات والثقوب الناتجة تتلاحم إشعاعيا وغير إشعاعى. إذا تم تعريض مادة شبه الموصل الى مجال كهربائي فان بعض حوامل الشحنة المستحثة تشارك في التوصيل الكهربائي وهذا يؤدي إلى إنخفاض في المقاومة الكهربائية للمادة وهذا ما يسمى التوصيل التصويرى. إذا كان هناك وصلة شبه موصل ثنائية في المنطقة المضاءة، فإن الإلكترونات والثقوب تنفصل بواسطة المجال الكهربائي عند الوصلة بدون أي تغذية أو

تحيز كهربائى وتتولد قوة الدافعة الكهربائية بين جانبى وصلة شبه الموصل وهذا ما يسمى تأثير الفولتية الضوئية، وفيما يتعلق بالتأثير أساسا لا يوجد فرق بين وصلة شبة الموصل الأساسية ووصلة شبة الموصل الغير متجانسة استناداً إلى الظواهر التى تم شرحها، وتتحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية ٠



الشكل (١ – ٣٦) ثنائى ضوئى (أ) دائرة التغذية (ب) التحيز الضوئي وأوضاع التشغيل

يبين الشكل (١ – ٣٦) دائرة تغذية لثنائى تصويرى وخصائص الجهد والتيار تحت تأثير الإضاءة، عندما يتم إمتصاص الضوء، تتغيير خصائص الجهد والتيار كما هو

موضح في الشكل (١ – ٣٦ ب)، ويزيد التيار العكسى بسبب زيادة التيار الضوئى إعتماداً على التغذية العكسية للوصلة، ويمكن تقسيم سلوكيات التشغيل للثنائى التصوير الى ثلاث وسائط كخلية شمسية وثنائى تصويرى وثنائى ضوئى فى مود الإنهيار.

١– ٥– ٧ وصلة شبه الموصل تحت تأثير التيار والتغذية العكسية

يظهر تيار الإنتشار من الناحية المثالية تحت تأثير التحيز الأمامى والعكسى، ويسمى تيار الإنتشار تحت تأثير التغذية العكسية بتيار التشبع. وهناك عدة أنواع من التيارات تسرى خلال وصلة شبة الموصل أثناء التغذية الأمامية والعكسية هى:

- تيار التسرب السطحي – تيار التلاحم – تيار النفق
- قيمة التيار العكسى ليست ثابتةً عند تيار التشبع ولكن يزداد تدريجيا بسبب تلك التيارات الإضافية ومجموع هذه التيارات تسمى تيار الإظلام [٣٦] ويمكن تحديد قيمته:

المعادلة (١ – ٤٧) $$I_d = I_{dd} + I_{ds} + I_{dg-r} + I_{dt}$$

حيث: (I_{dd}) تيار الإنتشار فى الإتجاه العكسى ومن الناحية المثالية يناظر تيار التشبع. هذه التيارات تظهر فى تيار الإظلام والضوضاء وتؤثر بشدة على موثوقية ومرونة العنصر. من المهم أن نتذكر أن تيار الإظلام يزيد مع زيادة درجة الحرارة٠ لا يعتمد نفق الكم الميكانيكية على درجات الحرارة لكن تزداد نتيجة لإعتماد درجة الحرارة على قيم الفجوة الطاقية لمادة شبه الموصل ويمكن صياغة تيار النفق[٣٧] كالتالى:

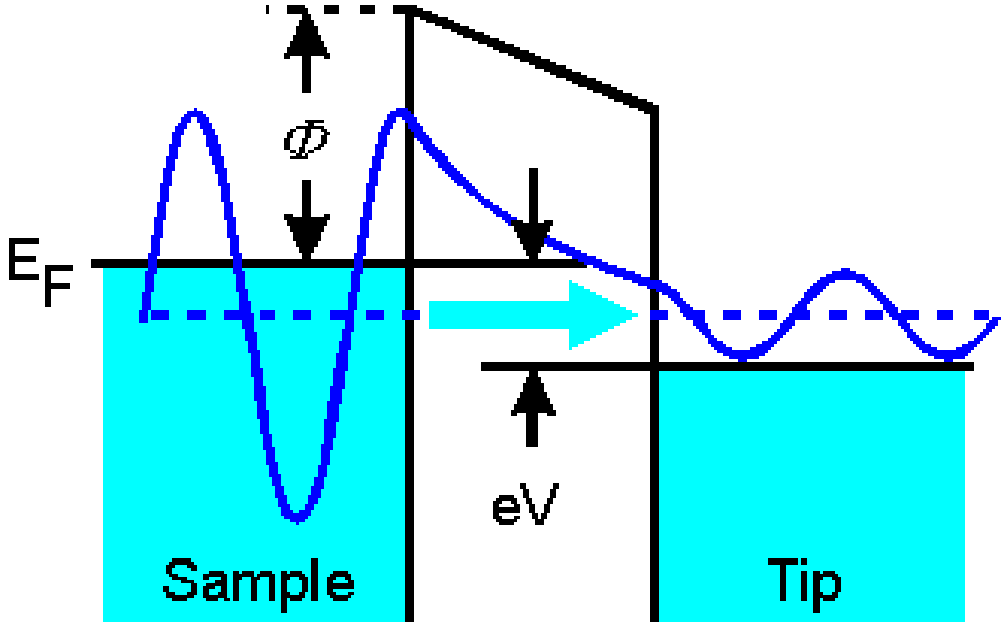
---

[٣٦] تيار الإظلام (Dark current) هو التيار الداخل المستقر مع إستجابة ثابتة تظهر بواسطة مستقبلات للإشعاع أثناء فترات عدم المواجهه بنشاط الإشعاع. قد تشير إلى: تيار كهربائي صغير نسبيا يتدفق خلال عنصر صور حساس (sensitive photo) عندما يدخلون لا توجد فوتونات داخلة الى العنصر. يحفظ تيار الإظلام الخلية بإستقطاب عند حوالي– ٤٠ ميلى فولت٠

[٣٧] قيم الجهد من ١ ميلى فولت إلى ٣ فولت٠ فى حالة قصر المسافة الى أقل من ١٠ أنجستروم، يتدفق تيار نفقى قيمته تتراوح بين بيكو أمبير ونانو أمبير٠ يتواجد التيار دون أي وصلة بين المادتين. بتقليل المسافة أو بزيادة الجهد تتزايد تداخل مهام موجه من الإلكترونات ٠ حيث يرتفع الاحتمال قفز إلكترون الى النفق إلى مواد أخرى.

$$I_{dt} = A_{pn}\left[\frac{2^{1/2}\, q^3\, F_{max}\, |V_b|}{\pi\, h^2}\right]\left(m_e/E_g\right)^{1/2} x\, \exp\left[\frac{-\pi^2\, m_e^{1/2}\, E_g^{3/2}}{2^{1/2}\, h_q\, F_{max}}\right]$$

المعادلة (١ – ٤٨)



الشكل (١ – ٣٧) ظاهرة تيار النفق

حيث: (F_{max}) أعلى مجال فى الوصلة و(m_e) كتلة الإلكترون الفعالة و(h) ثابت بلانك. في آلية ثنائى الصور يعتمد تيار التلاحم المتولد وتيار الإنتشار على درجة الحرارة لتيار الإظلام. من المهم أن نتذكر أن تيار الإظلام يؤثر على سلوك الضجيج الضوئي ويتزايد عند درجات الحرارة الأعلى.

- كفاءة الإمتصاص والكم الضوئي

يتم توليد حوامل الشحنة المستحثة بالضوء ذاتيا فى مواد شبه الموصل النقية وكذلك فى المواد الغير نقية (تثار الإلكترونات من المستوى الأدنى فى نطاق التوصيل ثم تسهم في الحصول على تيار ضوئى)٠ يتحول الضوء ذو النطاق الطاقى الأقل من طاقة الفجوة الطاقية الى طاقة كهربائية. (مثال: تتكون موصلات الضوء من مركبات مواد كاديوم – كبريت ومركبات مواد رصاص– كبريت، مواد الجرمانيوم – الجاليوم –

الإنتيمون المخدرة في نطاق الطول الموجي أعلى من ٥ ميكرومترات ولكن بإستجابة منخفضة جداً وسرعة التشغيل). يتبين ظهور الضوء بواسطة رصد التغيير في المقاومة النوعية لأشباه الموصلات. يستخدم كاشف الضوء الشائع الإستخدام والمكون من مواد الشبه الموصل النقية للكشف عن الضوء عند أطوال موجية قريبة وأقصر لقيمة الفجوة الطاقية لمادة شبة الموصل، كفاءة الكم (ηph) للثنائى الضوئى تساوى:

$$= \frac{number\ of\ electron - hole\ pairs\ ontributing\ to\ photo\ induced\ current}{number\ of\ incident\ photons}$$

$$\eta_{ph} = \left[\frac{I_{photo}/q}{P_{inc}/h\nu}\right] \text{x } 100 \qquad \text{المعادلة (١ – ٤٩)}$$

حيث: (I_{photo}) التيار الناجم عن الصورة أو الضوء و(P_{inc}) الطاقة الضوئية الحادثة، في كثير من الأحيان تستخدم كفاءة الكم بدلاً من معامل الاستجابة (S) أمبير/وات،

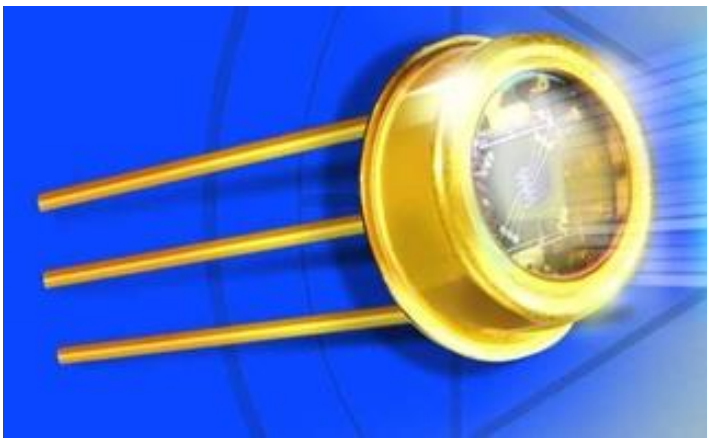
$$S = \frac{I_{photo}}{P_{inc}} = \frac{q\ \eta_{pn}}{h\nu} = \frac{\eta_{ph}\ \lambda\,(\mu m)}{1.24} \qquad \text{المعادلة (١ – ٥٠)}$$

تتأثر كفاءة الكم بعدة عوامل:

- إنعكاس الضوء المسلط على سطح الثنائى الضوئى
- إلتحام حوامل الشحنة المستحثة بالضوء على السطح في الطبقة العازلة للوصلة
- الإستيعاب البصري خارج الطبقة العازلة.
- من المهم أن نعرف أن حوالي ٣٠% من الضوء المسلط ينعكس على السطح لأن معامل الإنكسار لمواد أشباه الموصلات هو حوالي ٥و٣ – ولهذا السبب يتم ترسيب طبقة من مواد عازلة غير عاكسة على السطح لقمع الإنعكاس الذي يمكن خفضه إلى أقل من ١%.

١– ٥– ٨ الكاشف الضوئي [٣٨]

يستخدم الكاشف الضوئي فى تحويل إشارات الضوء إلى إشارات كهربائية، التي يمكن تضخيمها ومعالجتها. كما يستخدم كعنصر أساسي فى أي نظام مثل الألياف الضوئية أو مصدر الضوء. يمكن للكاشفات الضوئية أن تكشف أداء إرتباط محطات إتصالات الألياف الضوئية وهي الكاشفات الأكثر إستخداماً في نظم الألياف الضوئية نظراً لأنها توفر أداء جيدا، وصغيرة الحجم، وذات تكلفة منخفضة مصنوعة من السليكون، الجرمانيوم، جاليوم–خراصين، إنديوم – جاليوم – خراصين، إلخ.



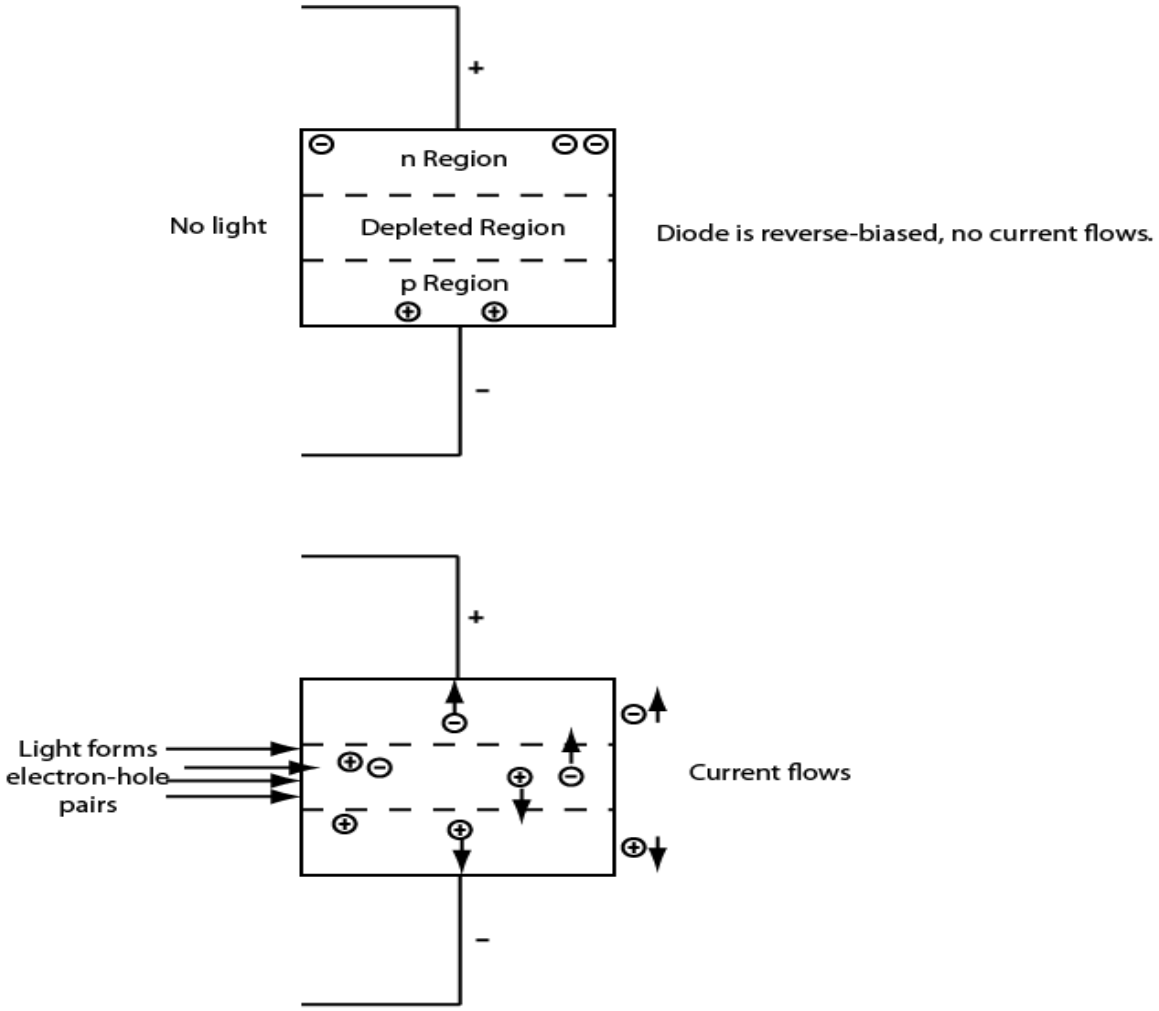
الشكل (١ – ٣٨) نموذج لكاشف ضوئى

- كيف يعمل الكاشف الضوئى؟

يبين الرسم التوضيحي التالي كيفية عمل الكاشف الضوئى. الكاشف عنصر ذو تغذية عكسية كهربائياً (عكس الثنائيات الباعثة للضوء والليزر ذات تغذية أمامية حتى تنبعث منها الضوء)٠ في الرسم التوضيحي الأول عندما لا يكون هناك أي ضوء، التغذية العكسية تسحب التيار الحامل للإلكترونات والثقوب خارج منطقة الوصلة، تنشأ منطقة مفرغة، التى توقف التيار من المرور خلال الدايود.

---

[٣٨] كاشف الصور (Photodetector) هو دايود ب أى ن (PIN diode) ذو منطقة واسعة، غير مطعمة من أشباه الموصلات بين منطقة نوع (ن) وأخرى (ب) – المنطقتين نوع (ن) و (ب) عادة بكثافة ذرات تطعيم بشكل كبير لأنهما تستخدمان كأطراف توصيل٠

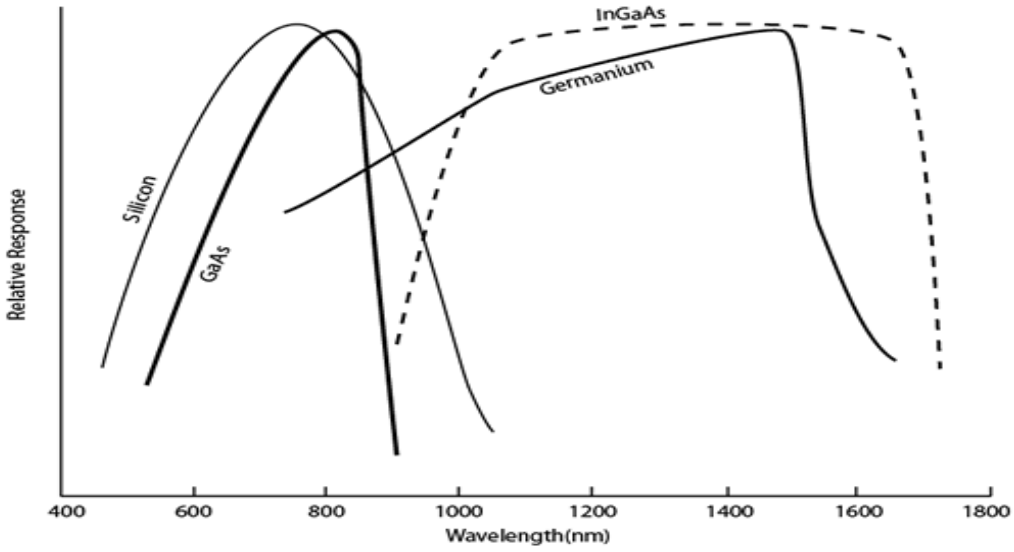


الشكل (١ – ٣٩) كيفية عمل الكاشف الضوئى

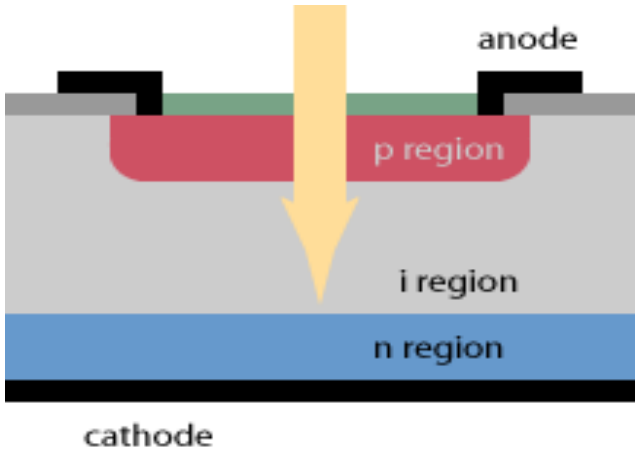
في الرسم التوضيحي الثاني عندما يكون هناك أضواء على الكاشف، تنشأ الفوتونات بالطاقة المناسبة (الطول الموجي) أزواج من الإلكترونات – والثقوب في هذه المنطقة ترتفع طاقة الإلكترون من نطاق التكافئ إلى مستوى التوصيل، وترك ثقب فى مستوى التكافئ. يحدث جهد التغذية إنجراف سريع لحاملات شحنة التيار بعيداً عن منطقة الوصلة، وعلى هذا يمر تيار يتناسب مع الضوء المسلط على الكاشف. الأطوال الموجية للضوء التى يستجيب لها الكاشف تعتمد على خلطة المواد المصنع منها الكاشف.

- **منحنيات الإستجابة للكاشف الضوئى**

كما أوضحنا أعلاه، أن الطول الموجي الذي يستجيب له الكاشف الضوئى يعتمد على المواد المكونة للكاشف. ويبين الشكل التالي منحنى إستجابة الكاشف لمواد شبة موصلة مختلفة. الكاشف الضوئى الأكثر شيوعاً هو ثنائى الدبوس الضوئي [٣٨] ويتكون من شريحة شبة موصل ذات تخدير بسيط جدا محصورة بين منطقتين أحدهما من النوع المحفز بالإلكترونات (ن$^{+}$) والثانى من النوع المحفز بالثقوب (ب$^{+}$) كما هو مبين بالشكل (١ – ٤١)



الشكل (١ – ٤٠) منحنى إستجابة الكاشف لمواد شبة موصلة مختلفة



الشكل (١ – ٤١) ثنائى الدبوس الضوئي

ثنائى الدبوس الضوئي ذو تغذية عكسية وحيث أن الطبقة النقية لا يوجد بها حوامل شحنة حرة، فإن المقاومة النوعية لها عالية، وبالتالى تستقطب معظم جهد التغذية العكسية. عادة فإن المنطقة ذات الطبقة النقية كبيرة ولها إحتمالية أكبر لإمتصاص الفوتونات الواردة اليها بدلاً من المنطقة (ب) أو المنطقة (ن). ونظراً لإرتفاع قيمة المجال الكهربائي في المنطقة النقية، مما يجرف أو يزيح أي أزواج من الإلكترونات – والثقوب التى تتولد في هذه المنطقة فورا. أزواج الإلكترونات – والثقوب المتولدة فى المنطقة (ب) والمنطقة (ن) تنتشر أولا فى المنطقة العازلة قبل جرفها. أيضا، فإن هذه الأزواج من الإلكترونات – والثقوب قد تعاني من التلاحم الذي ينتج عنه إنخفاض التيار.

- خصائص كاشف الدبوس الضوئى
- حساسية العنصر تعطى مؤشر لمقدار الإستجابة لإشارة الدخل الضوئية كدالة لشدة إشارة الدخل. يمكن قياس حساسية الكاشفات الضوئية بأسلوبين هما:
  - كفاءة الكم ومقدار الإستجابة.

١. كفاءة الكم (η)

تقيس كفاءة الكم (η) مقدار الفوتونات الواردة القادرة على توليد عدد من الإلكترونات في الكاشف ويمكن تعريفها على النحو التالى:

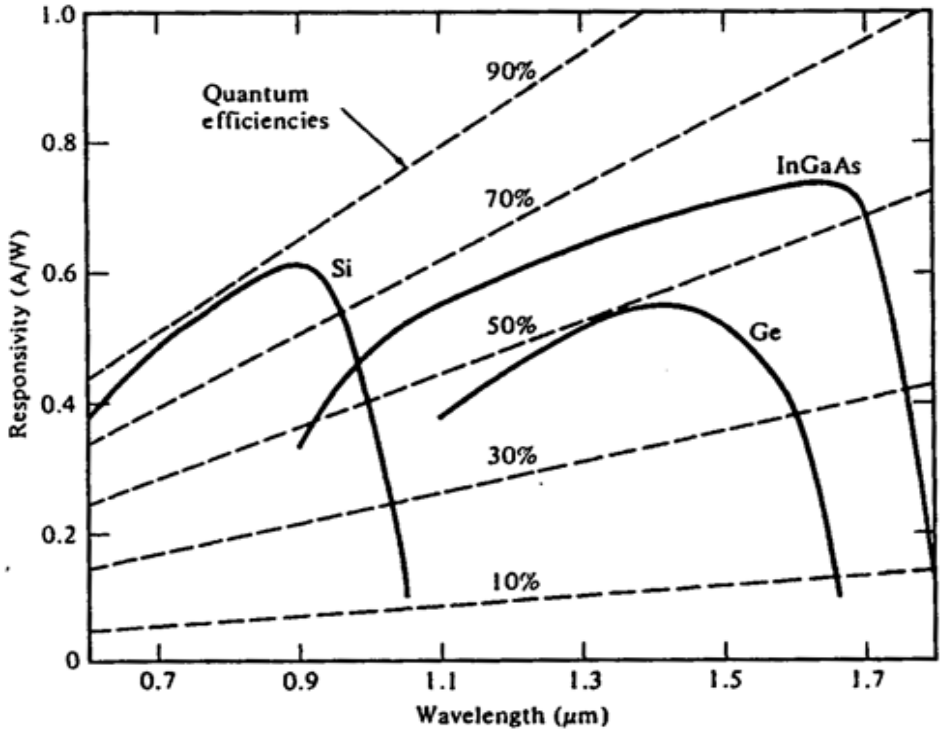
$$Quantum\ Efficiency = \frac{Electrons\ Out}{Photons\ input}$$

كفاءة الكم (η) هى نسبة عدد أزواج الإلكترونات – والثقوب المتولدة لعدد الفوتونات المسلطة. ويمكن حسابها على النحو التالى:

$$\eta = (1-R)\,\xi\,(1-e^{-\alpha\omega}) \qquad \text{المعادلة (١ – ٥١)}$$

حيث: (R) ثابت الإنعكاس على سطح شبة الموصل و(ξ) نسبة أزواج الإلكترونات – والثقوب المكونة تيار الاضاءة و(α) ثابت الإمتصاص و(ω) المسافة حيث يتم إمتصاص الطاقة الضوئية.

٢. _مقدار الاستجابة



الشكل (١ – ٤٢) إعتماد الطيف الموجى لإستجابة كفاءة الكم لمواد مختلفة من أشباه الموصلات.

الإستجابة هي نسبة المخرجات الكهربائية من الكاشف لمدخلات الطاقة الضوئية. فى حالة تناسب تغير التيار الخارج مع التيار الداخل (أمبير/وات) عادة في نظم إتصالات الألياف البصرية، تكون القدرة الداخلة صغيرة فى مستوى الميكروووات، غالباً يتم التعبير على مقدار الإستجابة بالوحدات ميكروأمبير/ مايكروووات. يعبر عن مقدار الإستجابة (ρ) بأنها مقدار التيار الضوئى المتولد لكل وحدة قدرة بصرية. المعادلة التالية توضح كيفية حساب مقدار الإستجابة (ρ).

$$\rho = \frac{\lambda_o}{1.24}\,\eta \qquad \text{المعادلة (١ – ٥٢)}$$

حيث: (λ_0) الطول الموجى (ميكرومتر) و(η) كفاءة الكم

ويبين الشكل (١ – ٤٢) إعتماد الطيف الموجى للإستجابة على كفاءة الكم لمواد مختلفة من أشباه الموصلات.

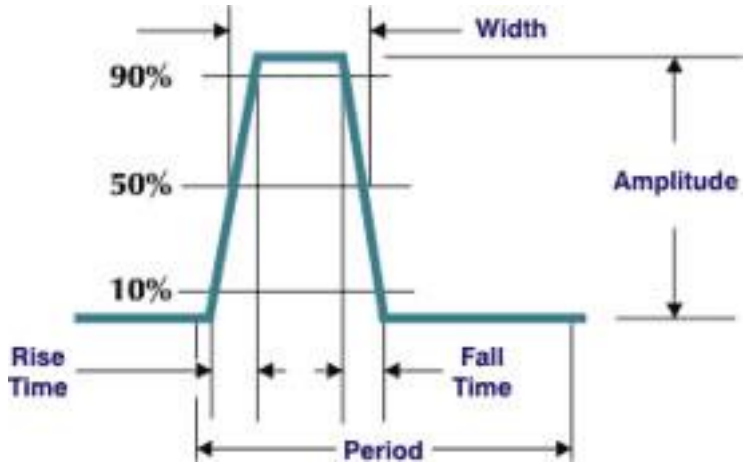
- **سرعة الاستجابة وعرض النطاق الترددي**

سرعة الإستجابة وعرض النطاق الترددي للكاشف الضوئى تعتمد على ثلاثة عوامل.

- **زمن عبور حوامل الشحنة الضوئية خلال المنطقة العازلة**
- **إستجابة التردد الكهربائي كما يحددها ثابت زمن الدائرة الذي يعتمد على سعة الديود**
- **بطأ إنتشار حاملات الشحنة المتولدة خارج المنطقة العازلة**

زمن الارتفاع: هو زمن إرتفاع إشارة الخرج من ١٠% إلى ٩٠% من القيمة القصوى بعد الإدخال قيد التشغيل على الفور.

زمن الهبوط: هو الزمن الى تحتاجه إشارة الخرج لتهبط من ٩٠% إلى ١٠% من القيمة القصوى بعد ايقاف الإدخال فجأة.

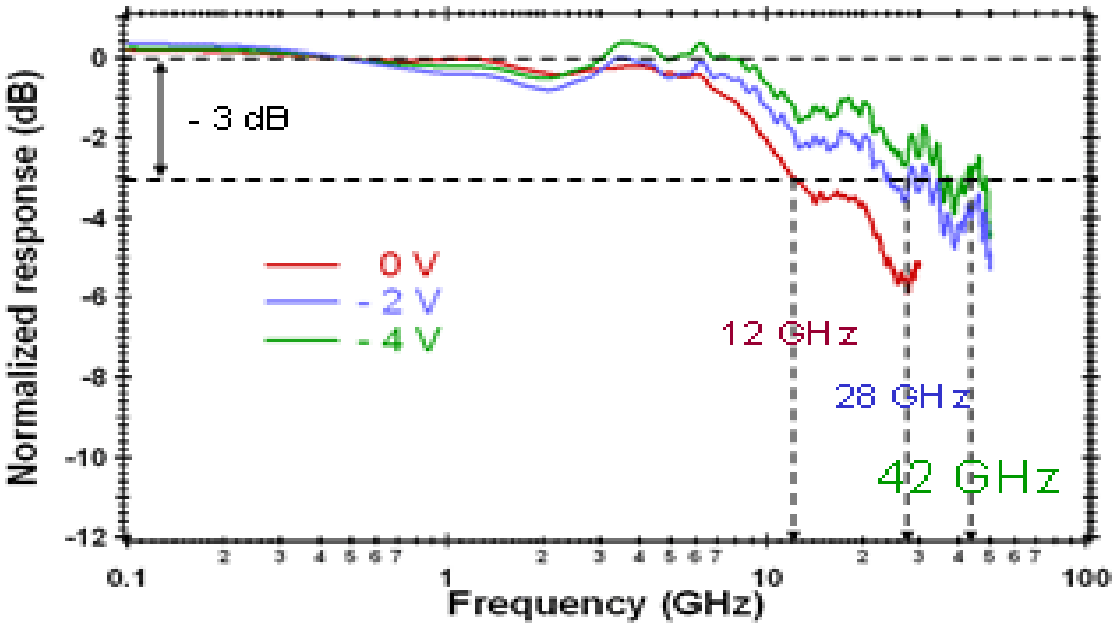


الشكل (١ – ٤٣) زمن عبور حوامل الشحنة الضوئية خلال المنطقة العازلة

يحددعرض النطاق الترددي للكاشف الضوئى بالتردد الذي تنخفض عنده إشارة الخرج إلى ٣ ديسبل (٥٠%) والتى تعتبر أقل قدرة عند تردد منخفض. وهذا يعني فقط أن نصف الإشارة الممكن الحصول عليها من خلال الكاشف في التردد العالي. في دالة الموجه المربعة، فان الترددات الأعلى هى المسؤولة عن الحواف الحادة. تصبح النبضات أكثر تنوعاً فى الترددات الأعلى من عرض النطاق الترددي عندما تنخفض الى (٥٠ ٪) أو أكثر كلما يقل عرض النطاق الترددي.

- تيار الإظلام

هو التيار المار فى الثنائى الضوئى في غياب الضوء عند تشغيله في وضع التوصيل. ويشمل تيار الإظلام كل من التيار الضوئى المتولد عن الإشعاع الخلفي وتيار التشبع خلال وصلة أشباه الموصلات ويعتبر إشارة لإكتشاف الحد الأدنى من الإشارات، حيث أن الإشارة تنتج مجموعة من التيارات غير تيار الإظلام بغرض الكشف عنها ٠



الشكل (١ – ٤٤) عرض النطاق الترددي للكاشف الضوئى

ويراعى أن تيار الإظلام يعتمد على درجة حرارة التشغيل، وجهد التغذية، ونوع الكاشف كما يعتبر تيار الإظلام وسيلة هامة للمعايرة فى حالة إستخدام الثنائى الضوئى لقياس طاقة ضوئية دقيقة، وأيضا لإكتشاف مصدر الضوضاء في نظم الإتصالات البصرية. الطاقة المعادلة للضوضاء [٣٩] هى الحد الأدنى لمدخلات الطاقة الضوئية لتوليد تيار ضوئى، يساوي ٧و٠ من تيار الضوضاء الداخلة في عرض النطاق ترددي ١ هرتز. يعتبر هذا المقياس المباشر لأقل إشارة قابلة للإكتشاف نظراً لأنه يقارن بين الضجيج

---

[٣٩] الطاقة المكافأة للضوضاء (Noise–equivalent power (NEP)) مقياس لحساسية الكاشف أو نظم الكشف (photodetector or detector system) وهى قوة الإشارات التي تعطي نسبة الإشارة إلى الضوضاء في خرج النطاق ترددي عرضة ذبذبة واحدة٠ خرج النطاق الترددي لذبذبة واحدة يعادل نصف ثانية من زمن التكامل٠

مباشرة كنسبة للطاقة الضوئية وتعتمد الطاقة المعادلة للضوضاء على تردد إشارة التضمين، وعرض النطاق الترددي الذي من خلاله تقاس الضوضاء، ومنطقة تواجد الكاشف، ودرجة حرارة التشغيل.

References:

1 - Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation Joachim Piprek , 2003, Springer

2 - Advanced Optoelectronic Devices , Daniela Dragoman, Mircea Dragoman , 1998, Springer

3 - Optoelectronic Devices: Design, Modeling, and Simulation, Xun Li – 2009, Springer

4- Optoelectronic Devices: Advanced Simulation and Analysis , Joachim Piprek- 2010, Springer

5- Opetelectronic Semiconductor Devices, Irina Stateikina, Report, department of Electrical Engineering, Concordia University

6- Electronics, FEE, Menofia University, I.M. El-Dokany, the book had been deposited with Egyptian Dar Al kotob under no. 2230 of 1983-Cairo

7- Semiconductor Technology, FEE, Menofia University, I.M. El-Dokany, the book had been deposited with Egyptian Dar Al kotob under no. 3368 of 1977-Cairo

8- Semiconductor Devices, FEE, Menofia University, I.M. El-Dokany, the book had been deposited with Egyptian Dar Al kotob under no. 3369 of 1977-Cairo