

خطوط النقل والألياف البصرية

أجهزة توليد واستقبال الإشارات البصرية



الوحدة السابعة: أجهزة توليد واستقبال الإشارات البصرية

الجدارة: هي القدرة على دراسة الأنواع الرئيسة للمصادر والكواشف البصرية والتعرف على خصائصها العملية...

الأهداف: عندما تكتمل هذه الوحدة تكون لدى المتدرب القدرة على أن:

- يعرف الأنواع الرئيسة للمصادر الضوئية.
- يدرس الخصائص الأساسية للمصادر الضوئية.
- يدرس مشكلة توصيل الضوء من المصدر إلى الليف.
- يعرف الأنواع الرئيسة للكواشف البصرية.
- يدرس الخصائص الأساسية للكواشف البصرية.
- يدرس مشكلة توصيل الضوء من الليف إلى الكاشف البصري.

مستوى الاداء المطلوب: أن يصل المتدرب على اتقان الجدارة بنسبة ٩٠٪

الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة: ٨ ساعات.

الوسائل المساعدة:

- السبورة.
- استخدام برنامج "Power Point" لعرض محاضرات أجهزة توليد واستقبال الإشارات البصرية.

متطلبات الجدارة:- أن يكون المتدرب ملماً بمحتوى الوحدات السابقة ومحتوي مقرر الإلكترونيات.



أجهزة توليد واستقبال الإشارات البصرية

Light Sources and Optical Detectors

مقدمة

إن المعلومات المراد إرسالها سواء في الأنظمة التماثلية أو الرقمية عادة ما تكون ذات طبيعة كهربائية (Electrical Signals) لذلك وحتى نتمكن من إرسالها عبر الليف البصري لا بُد من تحويلها إلى إشارات ضوئية باستخدام المصادر الضوئية، وبعد وصولها إلى جهاز الاستقبال يتم تحويلها وإرجاعها إلى طبيعتها الكهربائية باستخدام الكواشف البصرية. نقدم في هذه الوحدة مبدأ عمل وأنواع المصادر والكواشف الضوئية المستخدمة في أنظمة الاتصالات البصرية، والتعرف على خصائصها ومواصفاتها العملية.

٧- ١ المصادر الضوئية Light Sources

تتمثل الوظيفة الأساسية للمصدر الضوئي في تحويل الإشارات الكهربائية الداخلة عليه إلى إشارات بصرية حيث يتم إرسالها عبر الليف إلى جهة الاستقبال.

هنالك نوعان رئيسيان من المصادر الضوئية هما الديود الباعث للضوء (Light Emitting Diode) ويعرف اختصاراً (LED) وديود الليزر (Laser Diode) ويختصر (LD)، وللتبسيط سوف نسميه فقط ليزر. قبل أن نقوم بدراسة هذين النوعين، نتطرق إلى الشروط والمتطلبات الواجب توفرها في المصدر الضوئي بشكل عام.

■ المتطلبات العامة للمصدر الضوئي Source Requirements

هنالك عدد من الشروط والمتطلبات الواجب مراعاتها وتوفيرها في المصدر الضوئي عند اختياره لتطبيق معين في أنظمة الاتصالات الضوئية:

- أن يكون الطول الموجي المنبعث من المصدر (الذي يعمل عليه) ملائماً للإرسال عبر الألياف البصرية.
- يجب أن تكون القدرة المنبعثة من المصدر عالية بالقدر الكافي (في مجال mW) لاستخدامها في الاتصالات بعيدة المدى.



- يجب أن يكون عرض النطاق الإشعاعي (σ_λ) أقل ما يمكن وذلك لتقليل قيمة تشتيت المادة.
- يجب أن تكون المساحة الإشعاعية (Source Emitting Area) للضوء الخارج من المصدر أقل من مساحة لب الليف (Fiber Core Area)، وذلك لتحسين توصيل الضوء إلى الليف.
- الاستقرار في قيمة القدرة المنبعثة، والطول الموجي، وعرض النطاق الإشعاعي وعدم تأثرها بدرجة الحرارة.
- يجب أن تكون هنالك إمكانية لتعديل المعلومات (Modulation Ability) ونقلها عبر الليف.
- يجب أن تتمتع بسرعة تعديل (Modulation Rate) عالية لضمان إرسال أكبر قدر ممكن من المعلومات.
- يفضل أن تكون الدوائر الإلكترونية المصاحبة للمصدر من أجل تشغيله أبسط ما يمكن.
- قلة التكلفة.

٧- ١ أطوال الموجات العاملة Operating Wavelengths

كما أشرنا سابقاً، يتوجب أن يكون الطول الموجي الذي يعمل عليه المصدر مطابقاً للأطوال الموجية التي يعمل عليها الليف بشكل فعال. حيث يؤثر الطول الموجي وبشكل مباشر على قيمة التوهين وتشتيت النبضات المرسلة عبر الليف، من هذه الناحية فإنه كما ذكر في الوحدة الثالثة فإن أنظمة الاتصالات البصرية تستخدم الأطوال الموجية التالية:

- $\lambda = 850 \text{ nm}$ وهو أول طول موجي تم استخدامه، حيث إن الأجهزة والألياف التي تعمل على هذا الطول الموجي هي الأرخص والأبسط في التصميم.
- $\lambda = 1310 \text{ nm}$ وهو أفضل طول موجي من ناحية أقل تشتيت.
- $\lambda = 1550 \text{ nm}$ وهو أفضل طول موجي من ناحية أقل توهين، إلا أن الأجهزة والمعدات التي تعمل عليه هي الأغلى في التكلفة.
- $\lambda = 650 \text{ nm}$ وهو الطول الموجي الأفضل لعمل الألياف البلاستيكية.



إن الطول الموجي للضوء المنبعث من المصدر الضوئي يعتمد بشكل أساسي على نوع المادة التي يصنع منها ويحسب وفقاً للطريقة التالية:

ينبعث الضوء على شكل فوتونات (Photons) بطاقة للفوتون الواحد تحددها معادلة بلانك:

$$E_g = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (7.1)$$

حيث ترمز E_g إلى طاقة الثغرة (Energy Gap) للمادة المصنوع منها المصدر الضوئي،

f ترمز إلى تردد الضوء،

c ترمز إلى سرعة الضوء،

h إلى ثابت بلانك ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$).

من العلاقة السابقة نستطيع إيجاد λ :

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (7.2)$$

إذا ما قدرنا طاقة الثغرة بالإلكترون فولت (e.v)، والطول الموجي بالميكرومتر $[\mu\text{m}]$ فإن العلاقة السابقة (7.2) تصبح على الشكل المبسط التالي:

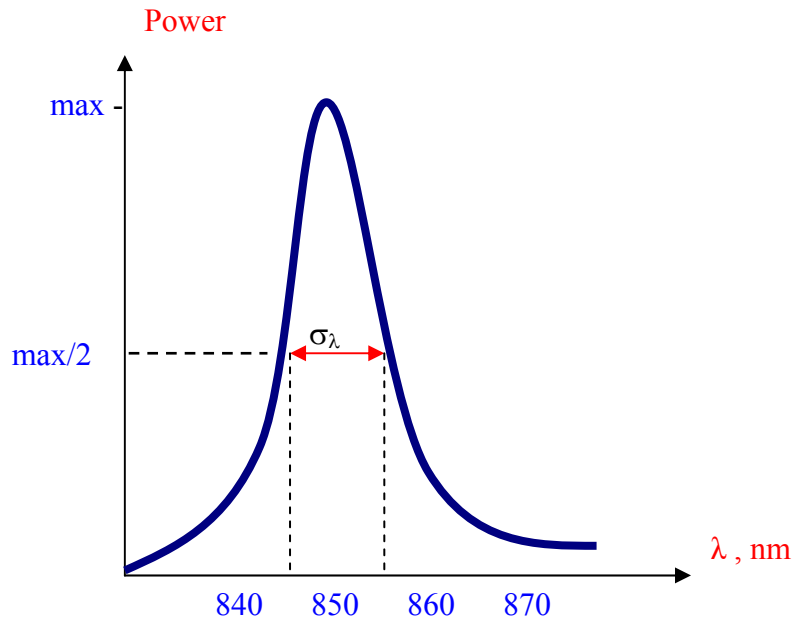
$$\lambda = \frac{1.24}{E_g} \quad (7.3)$$

وكل مادة لها طاقة ثغرة خاصة بها وبالتالي طول الموجي مقابل ومن هنا يتضح كيفية اعتماد الطول الموجي المنبعث من المصدر الضوئي على نوع مادة شبه الموصل المصنوع منها المصدر الضوئي.

هنالك معامل آخر مرتبط بالطول الموجي ويعبر عن العرض الإشعاعي للضوء المنبعث من المصدر (Spectral Width)، وفي حالات أخرى يسمى عرض الخط (Linewidth).



لتحديد قيمة العرض الإشعاعي (σ_λ) نأخذ عرض الشكل الذي يمثل الضوء المنبعث من المصدر وعلى مستوى (50%) من القيمة القصوى للقدرة الضوئية المنبعثة منه (انظر الشكل ٧ - ١). تؤثر قيمة العرض الإشعاعي للمصدر على قيمة تشتت المادة وتتراوح من (20 nm) إلى (50 nm) للديود الباعث للضوء وأقل من (1 nm) لليزر.



الشكل (٧ - ١) كيفية تحديد العرض الإشعاعي (σ_λ)

وتعتمد قيمة الطول الموجي المنبعث من المصدر والعرض الإشعاعي له على العوامل التالية:

- نوع مادة شبه الموصل المصنوع منها المصدر الضوئي.
- تركيبة وبناء المصدر الضوئي.
- ظروف التشغيل،

٧ - ١ - ٢ الديود الباعث للضوء Light Emitting Diodes

يعتبر الديود الباعث للضوء من المصادر الضوئية الواسعة الانتشار وقليلة التكاليف والتي تستخدم للاتصالات قصيرة المدى التي تعمل على سرعات إرسال ليست بالعالية (لغاية 125 Mbit/s). مثل شبكات الاتصالات المحلية (LAN). غالباً ما تصنع الديودات الباعثة للضوء وتعمل على الطول الموجي (850 nm) و (1310 nm) بالإضافة إلى (650 nm) للعمل مع الألياف البلاستيكية.



يعتمد مبدأ عمل الديود الباعث للضوء على نظرية وصلة "PN" (PN Junction) والتي تعتبر الأساس في مبدأ عمل جميع المكونات الكهروضوئية (المصادر والكواشف الضوئية وغيرها)، تصنع الديودات الضوئية من مواد أشباه الموصلات (Semiconductor Materials) مثل: GaAsP, GaAs (InGaAsP) والتي تعتبر من المواد المركبة (Compounds) من عنصرين أو أكثر من عناصر الجدول الكيميائي للمواد، والتي تتمتع بالخصائص الكهربائية المطلوبة غير المتوفرة في العناصر الأحادية. وللمزيد من المعلومات حول هذا الموضوع يمكن الرجوع إلى مقرر الإلكترونيات. ويوضح الجدول (٧- ١) المواصفات والخصائص للديودات الباعثة للضوء ومدى تغيرها هذه الخصائص تبعاً للمادة المصنعة منها.

جدول (٧- ١) المواصفات والخصائص لبعض أنواع الديود الباعث للضوء.

المادة	نوع الديود	الطول الموجي	عرض الخط	القدرة الخارجة	التيار الأمامي
Material	Type	Wavelength [nm]	Spectral Width [nm]	Output Power [μ W]	Forward Current [mA]
AlGaAs	S-LED	660	20	190 - 1350	20
	E-LED	850	35 - 65	10 - 80	60 - 100
GaAs	S-LED	850	40	80 - 140	100
	E-LED	850	35	10 - 32	100
InGaAsP	S-LED	1300	110	10 - 50	100
	E-LED	1300	25	10 - 150	30 - 100
	E-LED	1550	40 - 70	1000 - 7500	200 - 500
S-LED: Surface Emitter Light Emitting Diode.					
E-LED: Edge-Emitter Light Emitting Diode.					

٧- ١- ٣ ديود الليزر Laser Diode

لقد بدأ ظهور الليزر المصنوع من أشباه الموصلات في العام (1970) حيث أصبح من الممكن استخدامه في أنظمة الاتصالات البصرية. ويأتي المعنى المقصود بمصطلح " Laser " اختصاراً للجملة



الإنجليزية التالية (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) والتي تعني: تضخيم الضوء عن طريق الانبعاث الإشعاعي المحفّز.

يتشابه ديود الليزر والديود الباعث للضوء من حيث مبدأ العمل لكن طريقة انبعاث الضوء تختلف، حيث يحصل تكبير (Amplification) للفوتونات المتولّدة داخل الليزر وذلك بعد تحفيزها، وحتى يتم ذلك لا بُد من تحقيق شرطين:

- وجود مصدر تحفيز.

- توفير حيز ضيق لحصر الفوتونات وذلك لزيادة فرص تصادمها.

لذلك فإن الانبعاث في الديود العادي (LED) هو تلقائي (Spontaneous Emission) بينما في الليزر يكون انبعاث محفّز (Stimulated Emission)، لذلك فإن عدد الفوتونات المتولدة في الليزر أكبر منها بكثير في حالة الديود الباعث للضوء، ومن هنا فإن القدرة الخارجة من الليزر تكون عالية نسبياً.

إن الاختلاف الأساسي في التركيب بين الليزر والديود الباعث للضوء هو وجود تغذية راجعة للفوتونات (Feedback) عن طريق المرايا الجانبية في الليزر وعدم وجودها في الديود الباعث للضوء.

يعتبر الليزر من الأجهزة الحساسة جداً لدرجة الحرارة وللضوء المنعكس من الليف، حيث تجب مراعاة ذلك عند الاستخدام. وقبل أن نقوم بدراسة الخصائص العملية لليزر هنالك عدد من التحذيرات التي يجب الانتباه لها عند التعامل مع الليزر، حيث يتسبب الليزر في إصابة شبكية العين وحروقات لجلد الإنسان. وهذه التحذيرات هي:

- تذكر دائماً أن أشعة الليزر المستخدمة في أنظمة الاتصالات ليس لها لون وبالتالي فهي ليست مرئية للعين البشرية، ومن هنا تأتي زيادة الخطورة.

- القدرة الخارجة من الليزر عالية نسبياً ويمكن أن تتسبب في إصابة العين.

- لا يجوز بتاتاً النظر إلى الليزر مباشرة أو لليف مربوط مع الليزر.

- عند التعامل، تأكد أن جميع أجهزة الليزر مفصولة (Powered Off).

- يجب توخي الحذر عند فصل الليف عن الليزر (يجب ارتداء نظارات خاصة واقية من أشعة الليزر وقفازات لحماية اليدين).



■ خصائص الليزر Laser Characteristics

سوف يكون تركيزنا على الجوانب العملية لعمل الليزر، لذلك سنقوم بالتعرف على الخصائص العملية لليزر وأهمها:

أ- الكفاءة الكمية لليزر "η" Laser Quantum Efficiency

يمكننا تعريف الكفاءة الكمية لليزر بأنها عدد الفوتونات المتولدة داخله نسبة إلى عدد الإلكترونات الداخلة عليه. وتختلف قيمة الكفاءة الكمية باختلاف نوع الليزر وتعتمد بشكل كبير على درجة الحرارة، وتتراوح قيمتها بين الصفر والواحد أو تعطى كنسبة مئوية. تعتبر القيمة ($\eta = 0.7$) جيدة لمعظم أنواع الليزر.

ب- تيار العتبة وتأثير درجة الحرارة Threshold Current Temperature Dependence

يمكننا تعريف تيار العتبة بأنه الحد الأدنى لقيمة التيار الذي يجب أن يدخل على الليزر حتى يشغله بالشكل الصحيح، أما في حالة كون التيار الداخل أقل من تيار العتبة فإن الليزر يعمل كديود باعث ضوئي عادي بدون أي تكبير داخلي.

زيادة درجة الحرارة تزيد قيمة تيار العتبة مما يؤدي إلى زيادة قيمة الفاقد في القدرة التي سوف يتعرض لها الليزر والتي تتسبب في تلفه إذا زادت عن الحد المسموح به. من هنا تتوضح حساسية الليزر للتغير في درجات الحرارة، وعملياً يجب توفير نظام تبريد لليزر لمقاومة الارتفاع في درجات الحرارة وبالتالي تقليل الفاقد وحمايته من التلف.

ج- زمن الصعود والهبوط Rise and Fall Time

تعتبر هذه القيم من المؤشرات الرئيسية لتحديد سرعة عمل الليزر والتي تعتمد على نوع وتصميم الليزر وتقاس بالنانوثانية (Nanosecond)، حيث تصل إلى أقل من (0.1 ns).

د- الإزاحة الترددية Frequency Chirp

تنقسم ديودات الليزر إلى:

- متعدد النمط ويقصد بذلك أن الضوء المنبعث من الليزر تكون قدرته موزعة على مجموعة من الأطوال الموجية وكل منها يقابله نمط معين.

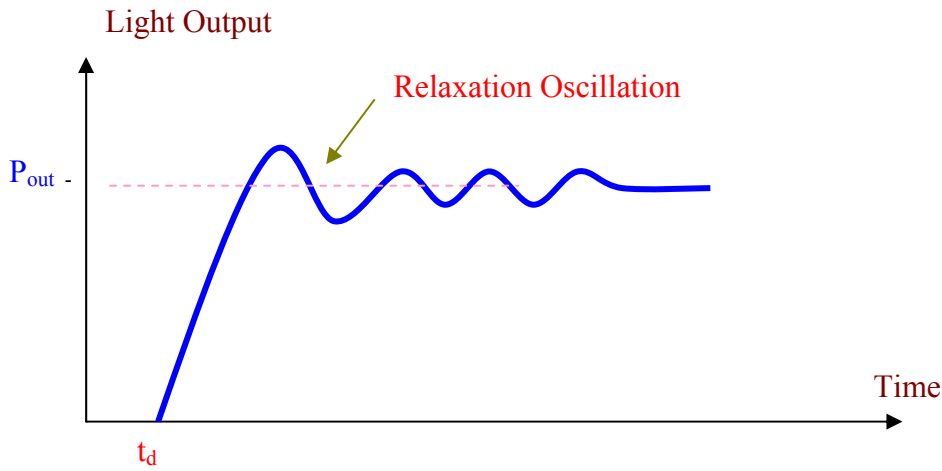


- أحادي النمط حيث إن القدرة للضوء المن Response يزر تشغل حيزاً ضيقاً جداً من الأطول الموجية.

و تتمثل مشكلة الإزاحة الترددية في أن النمط الرئيس والوحيد في حالة الليزر أحادي النمط تحصل له إزاحة ديناميكية (Dynamic Shift) بعد عمل التعديل المباشر لليزر وكنتيجة لذلك فإن العرض الإشعاعي (σ_λ) لليزر يزداد اتساعاً.

هـ- الاستجابة الديناميكية Dynamic Response

تمثل الاستجابة الديناميكية لليزر (الشكل ٧- ٢) كيفية ظهور القدرة الخارجة منه والتأخير الزمني (Delay) في لحظة بداية التشغيل (t_d)، حيث نلاحظ أن القدرة ليست مستقرة في البداية يحصل تذبذب على الشكل الموجي بتردد يصل إلى (10GHz) ويسمى التذبذب المتناقص (Relaxation Oscillation-RO) حيث يستمر لفترة زمنية قصيرة. وتؤثر هذه الظاهرة على عمل النظام وخاصة على سرعات البث العالية.



الشكل (٧- ٢) الاستجابة الديناميكية لليزر

و- قفز النمط Mode Hopping

تظهر هذه المشكلة في نوع الليزر أحادي النمط، حيث إنه في حالة زيادة قيمة تيار الحقن المشغل لليزر عن تيار العتبة، فإن النمط الرئيس يتحرك باتجاه اليمين. إن السبب الأساسي في هذه المشكلة هو الزيادة في درجة حرارة الليزر وذلك بسبب الارتفاع في قيمة التيار وما ينتج عنه من فقد في القدرة. لعلاج هذه المشكلة يجب استخدام نظام التبريد الخاص بالليزر.



ل- الاعتمادية Reliability

تعبّر الاعتمادية عن العمر التشغيلي لليزر والذي يقاس بساعات العمل. يعتبر الليزر أقل اعتمادية من الديود الباعث للضوء وذلك لكونه أكثر تعقيداً في التصميم وأكثر تأثراً بدرجات الحرارة والضوء المنعكس، ويتراوح العمر التشغيلي لليزر من (10^4) إلى (10^5) ساعة.

٧- ١- ٤ القدرة الخارجة وإيصال الضوء إلى الليف Output Power and Light Coupling

تتراوح قيمة القدرة المنبعثة من المصادر الضوئية من عشرات الميكرو وات (μW) للديود الباعث للضوء وتصل إلى حوالي (100W) لبعض أنواع الليزر. إن نسبة الضوء الذي يدخل فعلياً إلى الليف هو نسبة قليلة من تلك القيم (تقل عن 1%) أحياناً، والتي تعتمد على:

- الزاوية التي يخرج بها الضوء من المصدر (Radiation Angle).
- المساحة الإشعاعية للضوء الخارج من المصدر (Light Emitting Area).
- درجة الموازنة بين المصدر والليف (Alignment of the Source and Fiber).
- الفتحة العددية للليف (Fiber Numerical Aperture).

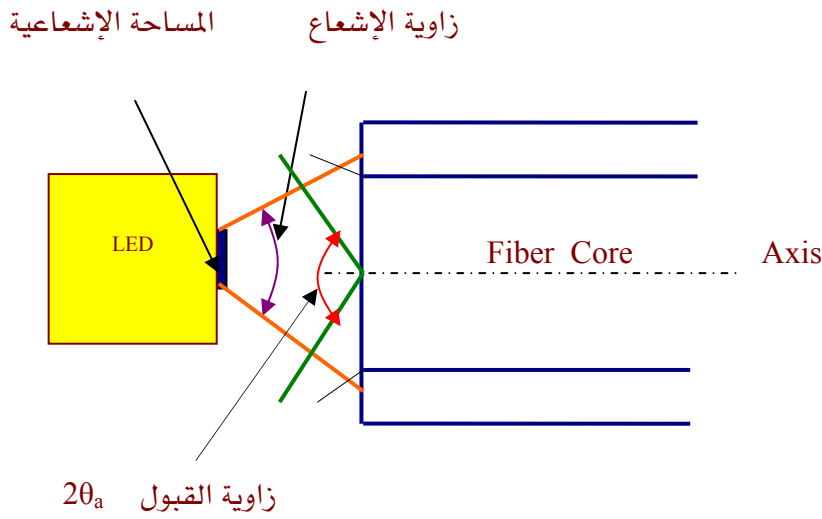
يمكننا توضيح العوامل السابقة الذكر على الشكل (٧- ٣).

عملياً لقياس نسبة الضوء الواصل فعلياً للليف البصري سوف نستخدم ما يعرف بفعالية أو كفاءة التوصيل (Coupling Efficiency) والتي سنرمز لها (η_c) حسب العلاقة التالية:

$$\eta_c = \frac{P_{in}}{P_s} \quad (7.4)$$

حيث إن P_{in} ترمز إلى القدرة الداخلة فعلياً إلى الليف.

P_s ترمز إلى القدرة الخارجة من المصدر.



الشكل (٧- ٣) انتقال الضوء من المصدر لليف

٧- ٢ الكواشف البصرية Photodetectors

إن الوظيفة الأساسية للكاشف البصري هي تحويل الإشارة الضوئية القادمة من الليف إلى إشارة كهربائية (تيار كهربائي تحديداً)، حيث تتناسب قيمة هذا التيار الناتج مع شدة الضوء الواصل. سوف نقدم في هذه الوحدة شرحاً مبسطاً ومختصراً لمبادئ وأنواع الكواشف البصرية المستخدمة في أنظمة الاتصالات البصرية وسوف يكون تركيزنا على الديود الضوئي (Photodiode).

■ متطلبات عامة للكاشف البصري Photodetector Requirements

للحصول على أداء عالٍ، هنالك العديد من الشروط والمتطلبات الواجب توفرها في الكاشف البصري:

- حساسية عالية (High Sensitivity) على الطول الموجي العامل.
- كفاءة كمية عالية (High Quantum Efficiency) (استجابة عالية للإشارات المستقبلية).
- زمن استجابة قصير (Short Response Time) للحصول على عرض نطاق مناسب.
- مستوى ضوضاء أقل ما يمكن (Minimum Noise Produced).
- استقرارية خصائص الأداء (Stability of Performance Characteristics).



- حجم صغير ليتناسب مع مقاسات الليف.

- جهد انحياز قليلة (Low Bias Voltage).

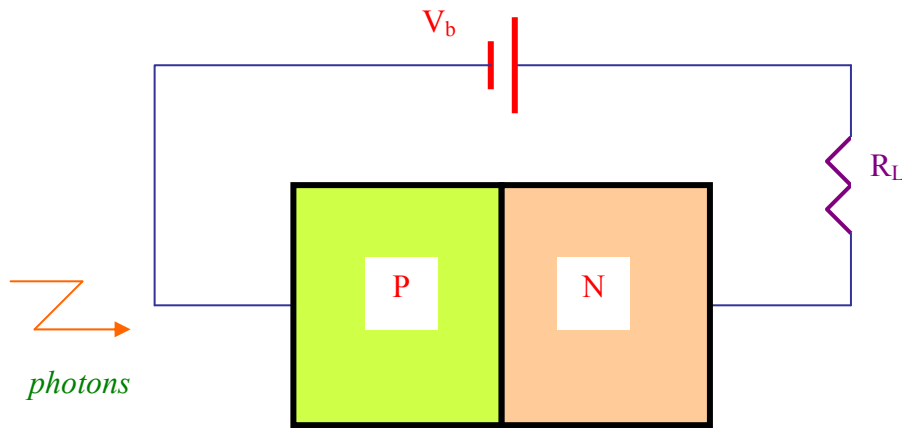
- اعتمادية عالية (High Reliability).

- تكلفة قليلة (Low Cost).

٧-٢-١ أنواع الكواشف البصرية Photodetector Types

الكواشف البصرية تقوم بعكس عمل المصادر الضوئية، لكن المبادئ واحدة وتعتمد على نظرية وصلة PN (انظر الشكل ٧-٤).

يقوم الديود الضوئي بامتصاص الضوء الواصل إليه من الليف على شكل فوتونات وتحويلها إلى إلكترونات تتبع منه، وبالتالي يتشكل تيار كهربائي من تلك الإلكترونات يسمى التيار الضوئي (Photocurrent) يسري خلال الحمل (Load) R_L ، وللمزيد من المعلومات حول هذا الموضوع يمكن الرجوع إلى مقرر الإلكترونيات.



الشكل (٧-٤) مبدأ عمل الديود الضوئي نوع PN

وهناك الكثير من الأنواع للكواشف البصرية والتي تصنع من أشباه الموصلات، وسوف نتعرف على أهمها:

أ- ديود ضوئي من نوع PN Photodiode

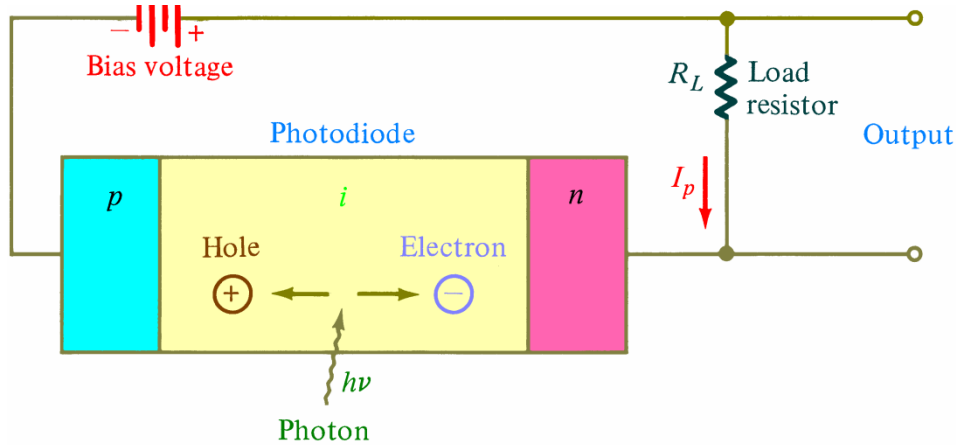
يعتبر هذا النوع الأبسط والأقل تكلفة من جميع أنواع الكواشف البصرية وهو عبارة عن وصلة PN موصولة بجهد انحياز عكسي مما يضمن توليد أزواج من الشحنات الكهربائية نتيجة سقوط



الفوتونات وامتصاصها من قبل الدايود. تعتبر المواصفات العملية لهذا النوع من الكواشف البصرية متواضعة جداً ولا تصلح للاستخدام في أنظمة الاتصالات البصرية، لكنها تستخدم واسعاً في الإلكترونيات المنزلية.

ب- دايود ضوئي من نوع P-I-N Photodiode

يعتبر الدايود من نوع (P-I-N) نموذج مطور للدايود من نوع (PN)، حيث يتكون من منطقة شبه موصل نقية (Intrinsic) عريضة بين المنطقتين (P و N)، الشكل (٥-٧) ومن هنا جاءت التسمية (I). تسمح هذه المنطقة العريضة بامتصاص عدد أكبر من الفوتونات وبالتالي الحصول على كفاءة، واستجابة، وسرعة أعلى مقارنة مع الدايود من نوع (PN) دون الحاجة لزيادة جهد الانحياز.



الشكل (٥-٧) تركيب الدايود الضوئي من نوع P-I-N

ج- دايود ضوئي جريفي "APD" Avalanche Photodiode

يتميز الدايود الضوئي الجريفي والذي يعرف اختصاراً (APD photodiode) بتكبير داخلي يزيد من حساسيته (Sensitivity) بشكل كبير. يتشابه الدايود من نوع (APD) مع الدايود من نوع (P-I-N) من ناحية البنية الأساسية ونوع المواد المستخدمة. ويعتبر مستوى الضوء المرتفع نسبياً السلبية الرئيسة للدايودات من نوع (APD) مقارنة مع الأنواع الأخرى، كما أنها حساسة لتغير درجة الحرارة حيث يتناقص معدل التكبير بزيادة درجة الحرارة.



د- الترانزستورات الضوئية Phototransistors

يمكننا اعتبار الترانزستور الضوئي بأنه ترانزستور يتم التحكم بتياره عن طريق الضوء الساقط عليه من الليف. تصنع الترانزستورات الضوئية على شكل دوائر متكاملة صغيرة الحجم وذلك لتقليل مستوى الضوضاء الداخلية ولرفع الحساسية، حيث تستخدم عندما تكون قدرة الضوء منخفضة.

تتوفر الترانزستورات الضوئية بنوعين ترانزستور الوصلة ثنائية القطبية (Bipolar Junction Transistor) ويرمز له اختصاراً (BJT) والنوع الثاني ترانزستور تأثير الحقل (Field Effect Transistor) ويعرف اختصاراً (FET). وتستخدم الترانزستورات الضوئية في دوائر وأجهزة التحكم وأنظمة الإنذار والتطبيقات التي لا تحتاج إلى سرعات عالية.

٧-٢ -٢ خصائص الديود الضوئي Photodiode Characteristics

أ- الكفاءة الكمية (η) Quantum Efficiency

تعرف الكفاءة الكمية للديود الضوئي بأنها عدد الإلكترونات الخارجة منه نسبة إلى عدد الفوتونات الساقطة عليه، حيث تتغير قيمتها بتغير الطول الموجي ودرجة الحرارة وتكون ما بين الصفر والواحد (عادة حوالي 0.7) أو تعطى كنسبة مئوية.

ب- الاستجابية "R" Responsivity

عند الحديث عن أداء وعمل الثنائي الضوئي عادة ما تستخدم الاستجابية (R) والتي تعرف على أنها النسبة بين التيار الضوئي (Photocurrent I_p) الخارج من الديود والقدرة الضوئية (Optical Power) الداخلة عليه (P_o) ووحدتها أمبير على وات [A/W]. وتعتمد (R) بشكل كبير على نوع المادة التي يصنع منها الديود الضوئي وعلى الطول الموجي (λ).

ج- زمن الاستجابة Response Time

زمن الاستجابة هو الزمن اللازم للديود الضوئي حتى يستقبل القدرة البصرية الواصلة له ويحولها إلى تيار كهربائي، وفي بعض الحالات يسمى بزمن الصعود (Rise Time) ويرمز له (t_r) وهناك أيضاً زمن الهبوط (Fall Time) ويرمز له (t_f). تعتمد قيمة زمن الاستجابة على تركيبة وتصميم الديود، نوع المادة المصنوع منها، وجهد الانحياز وتصل إلى أقل من 0.1 ns.



د- جهد الانحياز Bias Voltage

كما أشرنا سابقاً يجب أن توصيل الديود الضوئي بانحياز عكسي (توصيل الموجب مع N والسالب مع P) وذلك لضمان عمل الديود الضوئي. وتعتمد قيمة الجهد على نوع الديود وتؤثر على تشغيله و أدائه، حيث تتراوح من (5 V) وتصل إلى أكثر من (200 V) للديود من نوع (APD).

٧- ٢- ٣ الضوضاء في الديود الضوئي Photodiode Noise

هنالك العديد من أشكال الضوضاء التي تتواجد في الديودات الضوئية وتكون مصاحبة لها أثناء التشغيل، حيث سنتطرق لفهم ماهيتها وكيفية حسابها.

أ- ضوضاء تيار الظلام Dark Current Noise

يعرّف تيار الظلام (Dark Current) والذي سنرمز له (I_d) بأنه التيار الذي يسري خلال الديود الضوئي بالرغم من عدم وصول الضوء له، ولذلك لو وضعنا الديود في مكان مظلم وأبعدناه عن الضوء فسوف يسري تيار خلاله، من هنا جاءت تسميته بهذا الاسم. يؤثر هذا التيار سلباً على عمل وأداء الديود والمستقبل ككل، عادة ما تُعطى قيمة التيار المظلم في مواصفات الديود الضوئي العملية وتعتمد قيمته على العوامل التالية:

- نوع المادة المصنوع منها الديود.

- جهد الانحياز العكسي.

- درجة الحرارة.

تعتبر الشائيات الضوئية المصنوعة من الجرمانيوم الأسوأ من حيث التيار المظلم، لذلك لا يتم استخدامها في أنظمة الاتصالات البصرية.

ب- ضوضاء الطلقة Shot Noise

تعرف ضوضاء الطلقة بالتذبذب العشوائي للتيار الضوئي (I_p) الناتج على مخرج الديود الضوئي حول قيمته المتوسطة.

ج- القدرة المكافئة للضوضاء "NEP" Noise Equivalent Power



تعرف القدرة المكافئة للضوضاء (NEP) بأنها قيمة القدرة الداخلة بطول موجي معين على ديود ضوئي لينتج عنها تيار ضوئي مساوٍ للقيمة الفعالة لتيار الضوضاء ($I_{p,rms}$) ، ضمن عرض نطاق ترددي قيمته (1 Hz).

د- الكشفية Detectivity

تعرف الكشفية للديود الضوئي حسب العلاقة التالية:

$$D = \frac{1}{NEP} \quad (7.5)$$

بعض الأحيان تعطى قيمة تسمى الكشفية المميزة (Specific Detectivity) ويرمز لها (D^*) والتي تأخذ بعين الاعتبار مساحة الديود الضوئي وتعرف على الشكل التالي:

$$D^* = D\sqrt{A} \quad (7.6)$$

مثال (٧ - ٤):-

لديك ديود ضوئي من نوع (P-I-N) مصنوع من الجرمانيوم بمقاس ($100 \times 50 \mu m$) والقدرة المكافئة للضوضاء ($10^{-14} W \times NEP = 8.78$) أوجد الكشفية المميزة لهذا الديود.

الحل

لحساب الكشفية المميزة، نستخدم العلاقة (7.6)

$$D^* = D \sqrt{A}$$

ونستخدم العلاقة (7.5) لحساب قيمة الكشفية

$$10^{-14} \times D = 1 / NEP = 1 / 8.78$$

$$D = 1.139 \times 10^{13} \quad 1/W$$



$$D^* = 1.139 \times 10^{13} \sqrt{100 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^{-6}} \quad \text{m/W}$$

$$D^* = 8.1 \times 10^8 \quad \text{m/W}$$

هـ- القدرة الصغرى القابلة للكشف Minimum Detectable Power "MDP"

تمثل هذه القيمة الحد الأدنى من القدرة الضوئية القابلة للكشف والتي يمكن للكاشف الضوئي أن يتعامل معها حتى يعمل بشكل صحيح (يعمل ضمن نسبة الإشارة إلى الضوضاء المسموح بها في الأنظمة التماثلية أو معدل الخطأ المسموح به في الأنظمة الرقمية).

و- معامل الضوضاء الإضافية الجري Excess Avalanche Noise Factor

في الديودات الضوئية من النوع الجري، هنالك ضوضاء إضافية تعتمد بشكل رئيس على نوع المادة المصنوع منها الديود. تحدد قيمة هذه الضوضاء وفقاً للعلاقة التالية:

$$F(M) = M^x \quad (7.7)$$

حيث ترمز M إلى معامل التكبير للديود الجري (تعطى كقيمة متوسطة)،

x معامل ثابت تعتمد قيمته على نوع المادة.

كمثال على ذلك (x) تتراوح من (0.3) إلى (0.5) للسليكون ومن (0.7) إلى (1) للجرمانيوم.

٧- ٢- ٤ كفاءة حساب لفقد الناتج عن توصيل الضوء من الليف البصري للكاشف

هنالك مشكلة أساسية عند توصيل الضوء من الليف إلى الديود الضوئي. ويمكننا حساب الفقد المصاحب لعملية إيصال الضوء من الليف البصري للكاشف من خلال مقارنة مساحة الضوء الخارج من الليف (A) مع المساحة الحساسة للكاشف (S) (التي يمتص الضوء من خلالها). تبعا للآتي:

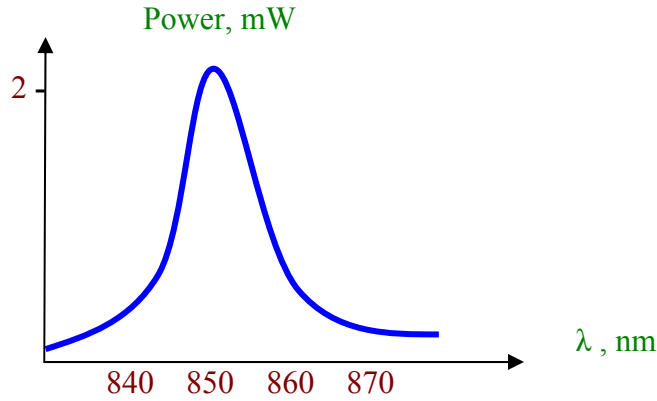
إذا كانت (S > A) فلن يكون هنالك فقد.

أما إذا كانت (S < A) فسوف يكون هنالك فقد.



تدريبات على الوحدة السابعة

تمرين ١: لديك مصدر ضوئي ينبعث منه الضوء حسب الرسم الموضح أدناه



(ب) العرض (أ) أفضل طول موجي يعمل عليه هذا المصدر.

(ب) العرض الإشعاعي لهذا المصدر (σ_λ).

تمرين ٢: لديك ديود ضوئي (LED) مصنوع من مادة مركبة (InGaAsP) حيث إن قيمة ($E_g = 0.939 \text{ eV}$) أوجد:

(أ) قيمة الطول الموجي المنبعث من الديود بالنانومتر [nm].

(ب) طاقة الفوتون الواحد للضوء المنبعث.

تمرين ٣: إذا علمت أن عدداً من الفوتونات يساوي (2×10^9) على الطول الموجي ($1.3 \mu\text{m}$) قد سقطت على كاشف بصري، وبعد القياس تبين أن عدد الإلكترونات المتولدة من الكاشف يساوي (1.5×10^{10}). أوجد الكفاءة الكمية (η) للكاشف الضوئي.

تمرين ٤: اذكر أهم الشروط الواجب توافرها في المصدر الضوئي المستخدم في أنظمة الاتصالات البصرية؟

تمرين ٥: وضح سبب اختيار الأطوال الموجية التالية للاستخدام في نظم الاتصالات البصرية:

$$\lambda = 1.55 \mu\text{m}, \quad \lambda = 1.31 \mu\text{m}, \quad \lambda = 0.85 \mu\text{m},$$



تمرين ٦: عدد العوامل التي يعتمد عليها إيصال الضوء من المصدر لليف البصري موضحاً طبيعة تأثيرها؟

تمرين ٧: اذكر الشروط الواجب توافرها في الكاشف البصري؟

تمرين ٨: وضح المقصود بتيار الظلام وتأثير درجة الحرارة عليه؟