

# الفصل التاسع

الكواشف الضوئية

obeikandi.com

## الفصل التاسع الكواشف الضوئية Light Detectors

نقدم في هذا الفصل مبادئ وأنواع الكواشف الضوئية الشائعة الاستخدام في أنظمة الاتصالات البصرية، نبدأها بتقدمة عن بنية الثنائي الضوئي photodiode وخصائصه. سنقدم أيضاً الأنواع المختلفة من الكواشف الضوئية ودوائرها التشغيلية وطرق تصميمها والمعلومات الأساسية الواجب معرفتها.

### ٩-١ خصائص عامة General Characteristics

تقوم الكواشف الضوئية وبصفة خاصة الثنائي الضوئي photodiode بعكس عمل الثنائيات الباعثة للضوء LED. تتولى الثنائيات الضوئية تحويل الإشارات الضوئية إلى إشارات كهربائية. إن المبادئ الأساسية لعمل الثنائي الضوئي والثنائي الباعث للضوء واحدة. هنا يتولى الكاشف الضوئي امتصاص فوتونات وبعث إلكترونات، أي أنه يقوم بإنتاج تيار كهربائي. لكي يستخدم الكاشف الضوئي في نظم الاتصالات البصرية يجب أن يحقق الصفات التالية :-

### ١ - الاستجابة ( $\rho$ ) Responsivity

تعرف الاستجابة للكاشف  $\rho$  على أنها النسبة بين تيار الخرج  $I_p$  وقدرة الدخل  $P_{in}$  ويعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$\rho = \frac{I_p}{P_{in}} \dots\dots\dots (9.1)$$

وحدات الاستجابة هي أمبير لكل وات .

حيث تولد القدرة البصرية الساقطة على سطح الثنائي تياراً في خرج الثنائي لوأخذنا، مثلاً، ثنائي ضوئي نوع PIN لوجدنا أن استجابته تتراوح بين 0.4A/w

و  $0.6A/W$  . لو فرضنا أن قدرة الضوء الساقطة على الثنائي  $50 \mu w$  فإن التيار الخارج من الثنائي يساوي  $30 \mu A$  لأن التيار :

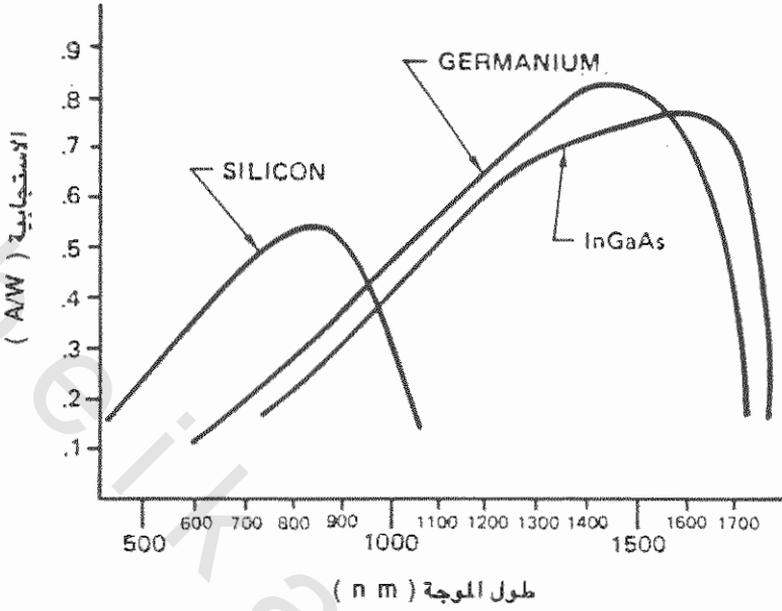
$$I_p = \rho P_{in}$$
$$= 50 \mu w * \frac{0.6 A}{w} = 30 \mu A$$

تبلغ القيمة النموذجية لاستجابة ثنائي ضوئي جرفي APD حوالي  $0.75A/W$  . هذا يعني أن قدرة مقدارها  $50 \mu w$  تولد تياراً مقداره  $3.75mA$  .

تفسير الاستجابة مع الطول الموجي ، لذا فإنها تحدد بالطول الموجي حيث تبلغ الاستجابة أقصى قيمة لها عند الطول الموجي المرغوب . كأن نقول عند  $\lambda = 820 \text{ nm}$  أو  $\lambda = 1300 \text{ nm}$  . إن أكثر المواد شيوعاً للاستخدام في الكواشف الضوئية هي مادة السليكون Si وتعمل ضمن المدى الموجي بين  $800 \text{ nm}$  و  $900 \text{ nm}$  . تبلغ أعلى استجابة للسليكون  $0.7A/W$  عند  $\lambda = 900 \text{ nm}$  . عند استخدام ألياف بلاستيكية تعمل على الطول الموجي  $650 \text{ nm}$  وهو اللون الأحمر في الطيف المرئي نجد أن الاستجابة تنخفض إلى  $0.4A/W$  .

إذا أردنا استخدام كواشف للأطوال الموجية  $1300 \text{ nm}$  أو  $1500 \text{ nm}$  لابد من البحث عن كواشف أخرى لعدم صلاحية كواشف السليكون لهذه الأطوال الموجية . نرى في الشكل (٩-١) منحنيات الإستجابة لمدى من الأطوال الموجية لثلاث مواد وهي السليكون Si والجermanium و زرنيخ جاليوم In Ga As . إن مادة الجermanium وسبيكة زرنيخ جاليوم انديوم In Ga As هي أكثر المواد ملائمة للأطوال الموجية الطويلة .

إن الثنائي الضوئي نوع PIN المصنع من In Ga As له منحنى استجابة واسع ومستوى وتتعدى استجابته  $0.5A/W$  بين الأطوال الموجية  $900 \text{ nm}$  و  $1650 \text{ nm}$  لذا فإنه ملائم للاستخدام عند الأطوال الموجية  $1300 \text{ nm}$  و  $1550 \text{ nm}$  .



الشكل ( ٩ - ١ ) استجابة بعض المواد التي تصنع منها الكواشف

## ٢ - الكفاءة الكمية ( $\eta_d$ ) Quantum Efficiency

تعرف الكفاءة الكمية ( $\eta_d$ ) هنا على أنها النسبة بين الإلكترونات الصادرة إلى الفوتونات الواردة عليه أي أن :

$$\eta_d = \frac{\text{عدد الإلكترونات الصادرة}}{\text{عدد الفوتونات الواردة}} \quad (9.2)$$

تعطي الكفاءة الكمية كنسبة مئوية . لو فرضنا أن الكفاءة الكمية هي 50% فهذا يعني أن خمسة فوتونات من كل عشرة فوتونات ساقطة على الكاشف فقط تولد إلكترونات . يمكن حساب الإستجابة  $\rho$  المذكورة في المعادلة (9.1) . حيث أن القدرة البصرية هي الطاقة الساقطة على الكاشف كل ثانية و  $hf$  هي طاقة كل فوتون عندئذ يكون عدد الفوتونات التي تصطدم بالكاشف كل ثانية هو  $\frac{P_{in}}{hf}$  . من المعادلة (9.2) نرى أن :

$$\eta_d \frac{P_{in}}{hf} = \text{عدد الإلكترونات الصادرة كل ثانية} \quad (9.3)$$

وحيث أن كل الكترون يحمل شحنة مقدارها  $q$  فإن التيار الخارج من الكاشف  $I_p$  (عدد الشحنات الصادرة كل ثانية) :

$$I_p = \frac{\eta_d q P_{in}}{hf} = \frac{\eta_d q \lambda P_{in}}{hc} \dots\dots\dots (9.4)$$

ومن المعادلة (9.1)

$$\rho = \frac{I_p}{P_{in}} = \frac{\eta_d q}{hf} = \frac{\eta_d \lambda q}{hc} \dots\dots\dots (9.5)$$

لو فرضنا أن هناك مقاومة خارجية  $R_L$  مربوطة بالكاشف كما هو في الشكل (٢-٩) فإن جهد الخرج  $V_o$  هو :

$$V_o = I_p R_L = \frac{\eta_d q P_{in} R_L}{hf} = \rho P_{in} R_L \dots\dots\dots (9.6)$$

### ٣ - تيار الظلام Dark Current

يتولد تيار الظلام نتيجة التأثير الحراري على الكاشف وهو نوع من أنواع الضوضاء الحرارية . تزداد قيمة تيار الظلام بنسبة 10% لكل ارتفاع في درجة الحرارة قيمته درجة مئوية واحدة . قيمة تيار الظلام للكاشفات الضوئية المصنعة من السليكون التي تعمل عند أطوال موجية قصيرة أقل بكثير من قيمته لكاشفات الجرمانيوم  $In Ga As$  التي تعمل عند أطوال موجية أعلى .

### ٤ - الحد الأدنى من القدرة القابلة للكشف Minimum Detectable Power

يمثل الحد الأدنى من القدرة القابلة للكشف أقل مقدار من القدرة الضوئية التي يمكن للكاشف أن يتعامل معها . تتعلق هذه الكمية بتيار الظلام لأن تيار الظلام يحدد قيمة هذا الحد . هناك عناصر ضوضاء أخرى تتعلق بعضها بالكاشف والبعض الآخر بجهاز الاستقبال والتي سبق شرحها عند مناقشة الضوضاء .

### ٥ - زمن الاستجابة Response Time

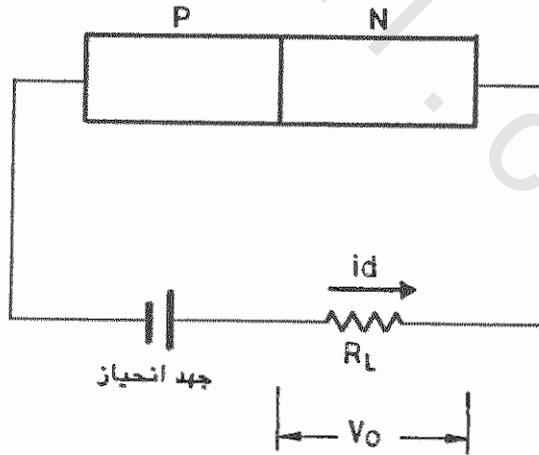
زمن الاستجابة هو الزمن اللازم للكاشف كي يستجيب للقذرة البصرية الداخلة وانتاج تيار خارجي . عادة ما يعرف زمن الاستجابة بزمن الصعود وزمن الهبوط . تتراوح أزمنة الصعود بين 0.5ns إلى 10ns أو أكثر . يحدد زمن الصعود نتيجة سرعة انتقال الشحنات عبر المنطقة الفقيرة depletion region . يتأثر زمن الصعود بجهد الانحياز حيث ترتفع قيمة زمن الصعود بارتفاع جهد الانحياز . على سبيل المثال فإن ثنائي ضوئي نوع PIN له زمن صعود مقداره 5ns عند 15V و 1ns عند 90V فولت . كما ذكرنا سابقاً فإن زمن الصعود يرتبط بعرض النطاق بالمعادلة التالية:

$$BW = \frac{0.35}{t_f} \dots\dots\dots (9.7)$$

قد تحد المقاومة والمكثف الداخليين للثنائي الضوئي من قيمة عرض النطاق . عندئذ يصبح عرض النطاق للدائرة في الشكل ( ٩ - ٢ ) :

$$BW = \frac{1}{2 \pi R_f C_d} \dots\dots\dots ( 9.8)$$

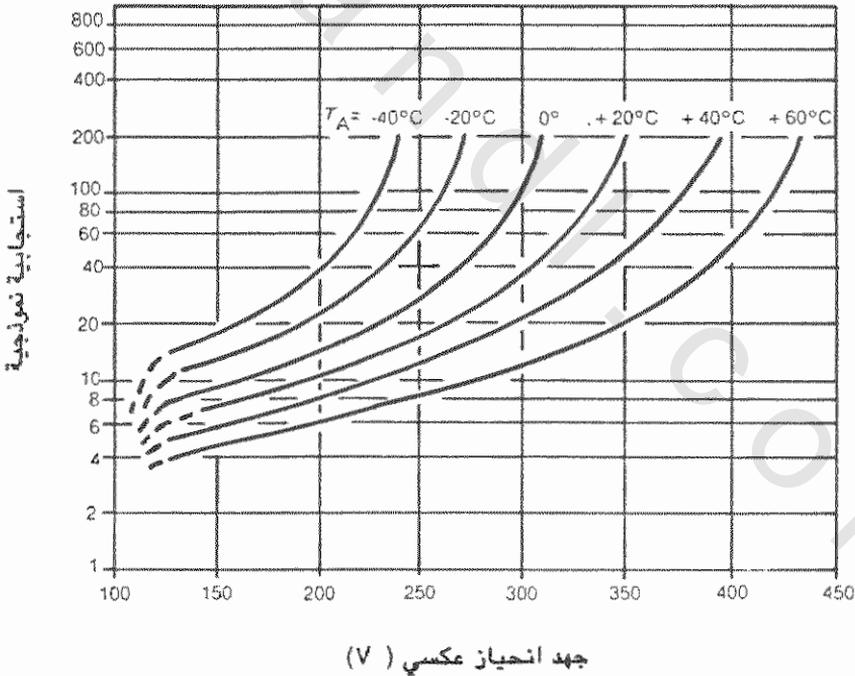
عادة ماتكون قيمة Cd للكواشف المستخدمة في أنظمة الاتصالات السريعة بضع بيكوفاراد Picofarads .



الشكل (٩-٢) دائرة كاشف PN

## ٦ - جهد الانحياز Bias Voltage

يتراوح جهد الانحياز العكسي بين 5V لبعض كاشفات PIN الى بضع مئات من الفولتات للكاشفات الضوئية الجرفية APDs. يؤثر جهد الانحياز على تشغيل الكاشف لأن تيار الظلام والاستجابة وزمن الاستجابة ترتفع مع ازدياد جهد الانحياز. نرى في الشكل (٩-٣) منحنيات العلاقة بين الاستجابة والجهد العكسي لثنائي ضوئي جرفي APD. يتضح من الشكل حساسية هذا النوع من الثنائيات لتغيرات درجة الحرارة. لذا فإن الدوائر المستخدمة في هذه الثنائيات عادة ماتكون معقدة نظراً لارتفاع جهد الانحياز وحساسيتها لدرجة الحرارة. لذا يقتصر استخدامها في الأنظمة التي تحتاج إلى استجابة عالية وكسب مرتفع.



الشكل ( ٩ - ٣ ) تأثير جهد الانحياز ودرجة الحرارة على ثنائي APD

## ٢-٩ الكواشف الضوئية Photodetectors

تستخدم نظم الألياف البصرية كواشف مصنعة من مواد شبه موصلة لأنها صغيرة الحجم وخفيفة الوزن وحساسة وسريعة ويمكن أن تعمل بجهد انحياز يبلغ بضعة فولتات . سنقدم في هذا البند خمسة أنواع من هذه النماط وهي : APD, PIN, PN والترانزستور الضوئي و PIN-FET .

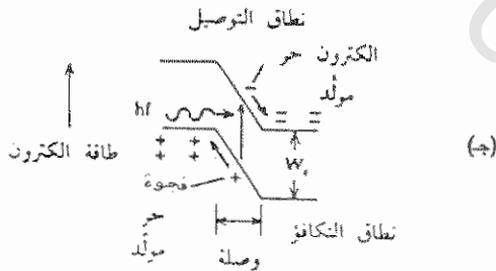
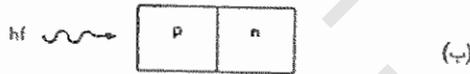
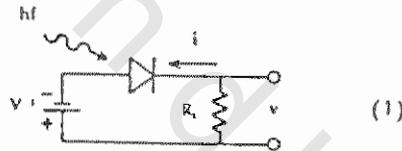
### ١-٢-٩ ثنائي ضوئي نوع PN Photodiode

قدمنا في البند ٨-٢ فكرة موجزة عن أشباه الموصلات وتكوين وصلة PN . يبين الشكل (٩-٤) ثنائياً ضوئياً نوع PN . عند استخدام انحياز عكسي ، كما هو الحال في الكاشفات الضوئية ، يتزايد حاجز الطاقة الكموني potential energy barrier بين المنطقتين P و N ولاستطيع الإلكترونات الطليقة في طبقة N أو الفجوات الطليقة في طبقة P اختراق حاجز الطاقة وبذلك لايتدفق أي تيار . نظراً لعدم وجود شحنات طليقة حول وصلة PN فقد سميت بالمنطقة الفقيرة depletion region وحيث أنها لا تملك شحنات طليقة تكون مقاومتها عالية وينتج عن ذلك أن يظهر الجهد عبر الثنائي تقريباً على طرفي وصلة PN . فتكون القوى الكهربائية كبيرة في المنطقة الفقيرة وصغيرة خارجها .

تؤدي زيادة قيمة جهد الانحياز العكسي إلى توسع المنطقة الفقيرة مما يتيح لها استقبال كمية أكبر من الطاقة الضوئية . يؤدي سقوط الفوتونات على المنطقة الفقيرة إلى تحرير أزواج من الإلكترونات والفجوات (الحاملات المتحركة Mobile Carriers) . لأن طاقة الفوتون تمتص في الوصلة فيؤدي ذلك إلى إعطاء الإلكترون طاقة تعادل طاقة الشفرة  $E_g$  فينتقل من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل فيصبح لدينا إلكترون طليق في نطاق التوصيل وفجوة طليقة في نطاق التكافؤ فتتولد لدينا نوعين من الشحنات الطليقة لكل فوتون يُمتص . تتحرك الحاملات الطليقة في المنطقة الفقيرة نتيجة جهد الانحياز المطبق على الثنائي .

تتسبب الحاملات المتحركة في تدفق التيار خلال الدائرة الخارجية للثنائي وقد تمتص بعض الفوتونات خارج المنطقة الفقيرة في منطقتي P و N وتولد حاملات متحركة في هذه المناطق تتحرك بسرعة بطيئة وقد تتحد بعيداً عن المنطقة الفقيرة ولكن تأثيرها لا يذكر .

كما سبق شرحه في البند (٨-٢) وفي هذا البند نجد أن وصله PN استخدمت كباعث ضوئي عند استخدام جهد انحياز أمامي حيث يؤدي اتحاد الشحنات المحقونة إلى إصدار فوتونات . عند استخدام جهد انحياز عكسي تؤدي الفوتونات الساقطة على الوصلة إلى توليد أزواج إلكترون - فجوة فينتج تياراً كهربائياً . يتضح من ذلك إمكانية تصميم نبيطة PN كي تستخدم كباعث وكاشف .



الشكل (٩ - ٤) ثنائي ضوئي شبه موصل

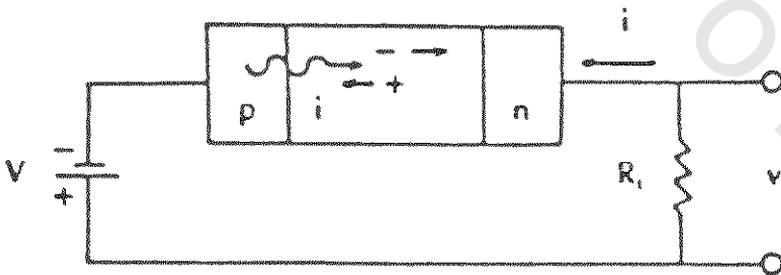
(أ) ثنائي بانحياز عكسي (ب) وصلة PN

(ج) مخطط مستوى الطاقة

### PIN Photodiode

### ٩-٢-٢ ثنائي ضوئي نوع PIN

لاحظنا أن زيادة جهد الانحياز العكسي تؤدي إلى توسيع المنطقة الفقيرة وأدت بالتالي إلى زيادة المساحة المستقبلة للفوتونات وبالتالي زيادة تيار خرج الثنائي الضوئي . للحصول على مساحة أكبر لا تعتمد كلياً على استخدام جهد عكسي ، فقد تم تصنيع ثنائي ضوئي نوع PIN . يتكون هذا الثنائي من طبقة شبه موصل ضمنية عريضة بين المنطقتين P و N كما هو في الشكل (٩-٥) . تحتوي الطبقة الضمنية على عدد قليل من الشحنات الطليقة . تشبه هذه الطبقة المنطقة الفقيرة . بتعبير آخر يمكن النظر إلى ثنائي PIN على أنه ثنائي مجهز بطبقة فقيرة عريضة وهي الطبقة الضمنية دون الحاجة لاستخدام جهد انحياز عكسي . نظراً لأن الطبقة الضمنية عريضة جداً فإن احتمال امتصاص الفوتونات فيها قوي جداً وليس في المنطقتين P و N الرقيقتين . يؤدي ذلك إلى تحسين الكفاءة والسرعة مقارنة بالثنائي الضوئي نوع PN . إن السرعة العالية وقلة الجهد المستخدم في ثنائيات PIN أديا إلى شيوع استخدام هذه الثنائيات في أنظمة الاتصالات البصرية . على سبيل المثال نجد أن الجهد المستخدم في ثنائيات PN يتراوح بين 20V و 40V أو أكثر بينما يتراوح الجهد المستخدم في ثنائيات PIN بين 8V و 10V . كذلك بالإمكان تشغيل ثنائي PIN دون استخدام أي جهد ولكن ذلك يقلل من سرعة الاستجابة حيث أن زيادة الجهد العكسي تؤدي إلى زيادة سرعة الاستجابة .



الشكل ( ٩ - ٥ ) ثنائي ضوئي PIN

### ٣-٢-٩ Avalanche Photodiode ثنائي ضوئي جرفي

تشابه البنى الأساسية للثنائيات الضوئية الجرفية والثنائيات نوع PIN . لذا فإن المواد المستخدمة والمجالات الطبيفية لكلا النوعين واحده . يبين الشكل (٩-٦) أحد بنى الثنائي الضوئي الجرفي ، إذ يتكون من أربعة طبقات . الطبقتين  $P^+$  و  $N^+$  هما طبقتان لهما تطعيم عالٍ ومقاومة منخفضة ولهما هبوط جهد منخفض جداً أما الطبقة P فهي منطقة ذات تطعيم متوسط . أما المنطقة  $\Pi$  فهي ضعيفة التطعيم وتكاد تكون منطقة ضمنية . إن معظم الفوتونات تمتص في هذه المنطقة منتجة أزواج ( إلكترون - فجوة ) . لتشغيل هذا الثنائي نطبق جهداً عكسياً عالياً قد يصل إلى عدة مئات من الفولتات . عند سقوط الفوتونات على الثنائي تمتص في المنطقة الفقيرة وتتولد الكترونات من جراء ذلك . تتحرك الإلكترونات المولدة إلى المنطقة P التي أصبحت تفتقر إلى الشحنات الطليقة نتيجة الجهد العكسي الكبير حيث يؤدي الجهد العكسي الكبير إلى توسع الطبقة الفقيرة عند الوصلة  $(P-N^+)$  إلى أن تبلغ الطبقة  $\Pi$  . لهذا السبب فإن هذا النوع من الثنائي الضوئي الجرفي APD يسمى بالثنائي المنشور reach through إن هبوط الجهد العكسي المطبق على الثنائي يكون بشكل أساسي عبر الوصلة  $(P-N^+)$  حيث تؤدي القوى الكهربائية الكبيرة إلى حدوث تضاعف جرفي avalanche multiplication إذ تقوم القوى الكهربائية الكبيرة بتعجيل الإلكترونات المولدة نتيجة الضوء الساقط على الثنائي فتنتقل بطاقات حركية كبيرة . تصطدم الإلكترونات المعجلة بالذرات فتولد الكترونات طليقة جديدة والتي تصطدم بدورها بذرات أخرى مولدة إلكترونات طليقة جديدة أخرى ، وهكذا دواليك . قد يتسبب الإلكترون المولد ضوئياً في توليد ١٠٠ إلكترون طليق وهذا ما يسمى بالتضاعف الجرفي . تعتمد قيمة التضاعف الجرفي على قيمة الجهد العكسي المطبق على ثنائي APD حيث ترتفع قيمة الكسب M بارتفاع الجهد العكسي  $V_B$  حسب المعادلة التالية :

$$M = \frac{1}{1 - (V_B/V_{BR})^\xi} \dots\dots\dots (9.10)$$

حيث أن  $V_{BR}$  هو جهد الانهيار العكسي reverse breakdown voltage و  $\xi$  هي

معلّمة تحدد تجريبيا وقيمتها أكبر من واحد ، تتراوح جهود الانهيار بين 20V و 500V .  
من المعادلة (9.4) وجدنا أن التيار :

$$I_p = \frac{\eta_d q P_{in}}{hf}$$

حيث تمثل  $\eta_d$  الكفاءة الكمية عندما تكون قيمة الكسب  $M$  تساوي واحد . تبلغ قيمة التيار  $I_p$  عندما يكون كسب ثنائي APD هو  $M$  كالتالي .

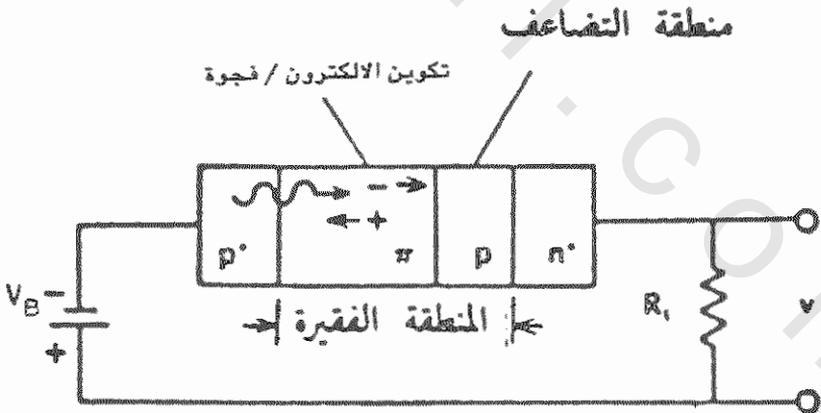
$$I_p (APD) = \frac{M \eta_d q P_{in}}{hf} = \frac{M \eta_d q \lambda P_{in}}{hc} \dots\dots\dots ( 9.11)$$

وحيث أن الاستجابة ترتبط بالتيار حسب ما جاء في المعادلة (9.1) فإن :

$$\rho (APD) = \frac{M \eta_d q}{hf} = \frac{M \eta_d q \lambda}{hc} \dots\dots\dots ( 9.12)$$

تتراوح قيم  $\rho (APD)$  بين 20 A/w و 80 A/w

تتصف ثنائيات APD بارتفاع مستوى الضوضاء الداخلية مقارنة بثنائيات PN و PIN كما أنها حساسة لتغير درجة الحرارة مقارنة بثنائيات PN و PIN . يتناقص كسب ثنائي APD مع إرتفاع درجة الحرارة .



الشكل ( ٩ - ٦ ) ثنائي ضوئي جرفي APD

### ٩-٢-٤ الترانزستورات الضوئية Phototransistors

تستخدم الترانزستورات الضوئية عندما يكون مستوى شدة الإضاءة منخفضاً ويوجد

نوعان منها الأول وهو ترانزستور الوصلة ثنائية القطبية Bipolar Junction

Transistor (BJT) والآخر يستخدم تركيبه مكونة من ترانزستور تأثير الحقل Field

Effect Transistor (FET) وثنائي ضوئي PIN ضمن دائرة متكاملة تدعى PIN-FET.

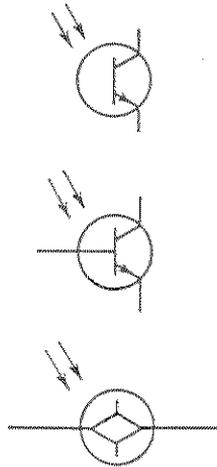
يمكن النظر إلى الترانزستور الضوئي نوع BJT على أنه ترانزستور يتم التحكم

بتياره بواسطة الضوء الساقط عليه أو كأنما هناك ثنائي ضوئي وضع في دائرة القاعدة. نرى

في الشكل (٩-٧) رموز متعددة للترانزستور الضوئي وفي الشكل (٩-٨) الرمز الشائع

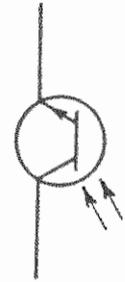
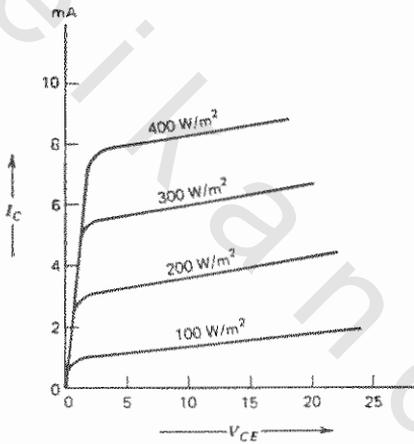
للترانزستور الضوئي ونموذج لخصائص الخرج الخاصة به وتأثير شدة الإضاءة. عادة ما يكون

الترانزستور الضوئي BJT بطيئاً ويصلح للسرعات المنخفضة لأن زمن الصعود  $t_r = 10\mu s$ .



الشكل (٩ - ٧) رموز الترانزستور الضوئي

يصنع الترانزستور الضوئي PIN-FET على شكل دائرة متكاملة تتكون من كاشف PIN ومضخم FET والهدف من وضعها ضمن دائرة متكاملة هو الإقلال من الضوضاء الداخلية وتحسين الحساسية ، وقد تم تصنيع هذه الدائرة لتعمل بعرض نطاق يتعدى 100MHz .



(ب)

(١)

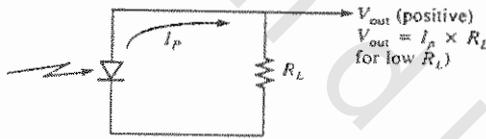
الشكل (٩ - ٨) ( أ ) رمز شائع للترانزستور الضوئي  
(ب) خصائص خرج الترانزستور الضوئي

### ٩-٣ دوائر الكواشف Detector Circuits

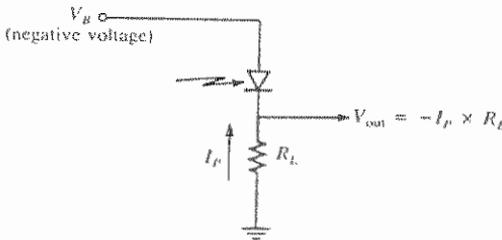
يمكن تشغيل الثنائيات الضوئية بأسلوبين : الأول هو أسلوب الفولت ضوئي Photovoltaic حيث لا يستخدم جهد انحياز للثنائي والثاني هو أسلوب الموصل الضوئي Photoconductive في حالة الفولت ضوئي تكون سرعة التشغيل بطيئة والحساسية منخفضة غير أن الدائرة في هذه الحالة غير معقدة . إذ لا تحتاج إلى جهد انحياز . تستخدم الترانزستورات الضوئية في أجهزة التحكم وأنظمة الانذار وأجهزة الترحيل الضوئية Photorelays لأنها لا تحتاج إلى سرعة عالية .

### ٩-٣-١ دوائر PN و PIN Circuits

تتكون أبسط دائرة كاشف من ثنائي ضوئي ومقاومة حمل load resistor كما هو مبين بالشكل (٩-٩) . نرى في الشكل (٩-٩ أ) أن اتجاه التيار الضوئي بعكس اتجاه استقطاب الثنائي . مما يجعل الثنائي يتصرف وكأنه بطارية . أو بصورة أدق كمنبع تيار يمثل المصدر anode طرفه الموجب . وهذا هو اتجاه التيار المستقطب عكسياً . يصبح الثنائي مستقطب للأمام بجهده كموه potential المراد . هذا الأسلوب من التشغيل يطيء كما أن الضوضاء الداخلية قليلة لأن تيار الظلام  $I_D$  قليل وترتفع قيمة التيار الضوئي  $I_P$  للحصول على دوائر أكثر عملية نستخدم مضخمات التشغيل كما هي في الشكل (٩-١٠) . إن التيار الداخل إلى مضخم التشغيل هو التيار الضوئي . في كلتا الدائرتين يكون الجهد عبر الثنائي ثابتاً لأن النقطة A قتل أرضي مجازي virtual ground بجهده صفري .



( أ )



( ب )

الشكل رقم (٩-٩) دوائر الثنائي الضوئي

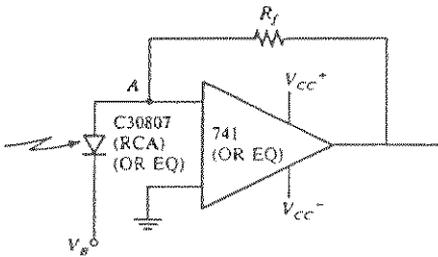
( أ ) فولت ضوئي Photovoltaic ( ب ) ذي موصلة ضوئية

يعمل الثنائي في الدائرة بالشكل ( ٩ - ١٠ أ ) بجهد انحياز مقداره صفر . يتكون التيار الضوئي من التيار الضوئي لدائرة القصر بمقاومة حمل مقدارها صفر ، تعطي هذه الدائرة تشغيلاً مستقراً مقارنة بالدائرة في الشكل ( ٩ - ٩ أ ) . وهي أيضاً أبسطاً من الدائرة المذكورة في الشكل ( ٩ - ١٠ ب ) . يعطى جهد الخرج لكلتا الدائرتين في الشكل ( ٩ - ١٠ ) بالمعادلة التالية :

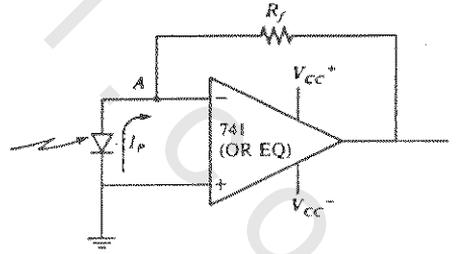
$$V_{out} = - I_p \times R_f \dots\dots\dots ( 9.13)$$

حيث أن  $R_f$  هي مقاومة التغذية الراجعة feedback resistor . يمكن الحصول على  $I_p$  من استجابة الثنائي إذا كانت القدرة البصرية الساقطة على الثنائي معروفة وذلك باستخدام المعادلة (9.1) وهي أن :

$$I_p = \rho P_{in}$$



( ب )



( ١ )

الشكل ( ٩ - ١٠ ) كواشف ضوئية مع مضخمات تشغيلية

( أ ) فولت ضوئي Photovoltaic ( ب ) ذي موصلة ضوئية

PIN-FET Circuits

٢-٣-٩ دوائر PIN-FET

تمثل الدائرة في الشكل (٩-١١) أبسط الدوائر المستخدمة في المستقبلات

الضوئية التي تستخدم ثنائي PIN للكشف تليها دائرة مضخم يستخدم ترانزستور FET.

يصنع ترانزستور FET من سبيكة زرنيخ الجاليوم Ga As والذي يمتاز بقلّة الضوضاء.

لايجاد قيمة  $V_{out}$  في الدائرة بالشكل (٩-١١) يجب أولاً حساب قيمة  $V_{in}$ .

$$V_{in} = I_p \times R_L // R_G \dots\dots\dots (9.14)$$

ومن تحليل دائرة ترانزستور FET المكافئة نجد أن كسب الجهد للترانزستور هو:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_m \times R_D \dots\dots\dots (9.15)$$

حيث أن  $g_m$  هي الموصلية العابرة التشغيلية operating transconductance

لترانزستور FET وتقاس بالسيمنز Siemens و  $R_D$  هي مقاومة المصب drain

resistance .

مثال : أوجد قيمة  $V_{out\ p-p}$  (قيمة جهد الخرج من الذروة إلى الذروة Peak - to - peak

output voltage) للدائرة المبينة في الشكل (٩-١١) إذا كانت

$g_m = 2.5ms$  ،  $\rho = .6A/w$  . تتراوح القدرة الضوئية الداخلة بين  $0.5\mu w$  و  $1.5\mu w$  . وقيمة

الذروة للقدرة البصرية هي  $1\mu w$  .

الحل :

قيمة التيار الضوئي من الذروة للذروة  $I_{pp-p}$  :

$$I_{pp-p} = \rho \times P_{in\ p-p} = 0.6 \times 1 \times 10^{-6} = 0.6\mu A$$

من المعادلة (9.14) نجد أن :

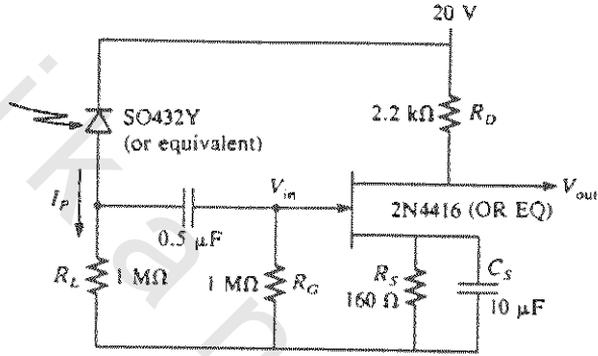
$$V_{in\ p-p} = I_p \times R_L // R_G = 0.6 \times 10^{-6} \times 1M\Omega // 1M\Omega$$

$$= 0.3V$$

من المعادلة (9.15)

$$V_{out\ p-p} = -g_m R_D V_{in\ p-p}$$

$$= -2.5 \times 10^{-3} \times 2.2 \times 10^3 \times 0.3 = -1.65\ V$$



$$\text{Values for } V_p = -2.8\ V$$

$$I_{DSS} = 9\ mA$$

$$R_S = 0.95 \left| \frac{V_p}{2I_{DSS}} \right|$$

$$R_D = \frac{V_{DD}}{I_{DSS}}$$

الشكل ( ٩-١١ ) دائرة مضخم ضوئي نوع FET

تستخدم الدائرة المبينة بالشكل (٩-١١) للإشارات التماثلية ولاتصلح للإشارات الرقمية لاحتوائها على تيار مستمر. حيث أن هذه الدائرة لاتستجيب جيداً للتيار المستمر. لذا تستخدم الدائرة المبينة في الشكل (٩-١٢) للإشارات الرقمية . عندما تكون قدرة الدخل صفر أو حالة غلق OFF فإن ترانزستور FET يكون في حالة قطع cut off . أي أن الجهد Vgs عبر الثنائي وهو الجهد المتردد بين البوابة Gate والمنبع Source يجب أن يكون سالباً أكثر من جهد البتر Pinch off Voltage .

يعتمد ذلك على قيمة  $R_G$  و تيار الظلام  $I_d$  لأن التيار الضوئي  $I_p$  يساوي صفر.

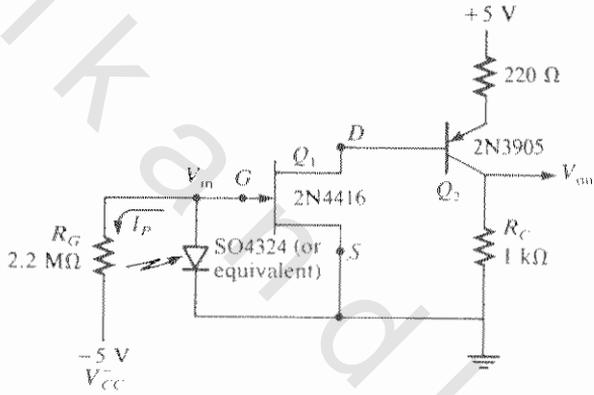
لذا فإن :

$$V_{gs} = -5 + (I_p + I_d) R_G \dots\dots\dots (9.16)$$

عند هذه الشروط تكون قيمة  $V_{out}$  صفراً . ( ترانزستور  $Q_2$  مقلل) . عندما يكون دخل

المنطق 1 يصبح مستوى القدرة البصرية كافياً لجعل  $V_{gs}$  قادرة على تشغيل ترانزستور FET

عندها تكون قيمة  $V_{out}$  حوالي +5V .



$$R_G = \frac{|V_{CC}| \times R_{dark}}{0.9V_p} - R_{dark}$$

$R_{dark}$  is dark resistance of photodiode.

الشكل ( ٩ - ١٢ ) دائرة مضخم ضوئي نوع FET للإشارات الرقمية

### ٣-٣-٩ دوائر APD APD Circuits

إن الدوائر المستخدمة في تشغيل الشائيات الضوئية الجرفية APD أكثر تعقيداً

من تلك المستخدمة مع الكواشف الأخرى للأسباب التالية:

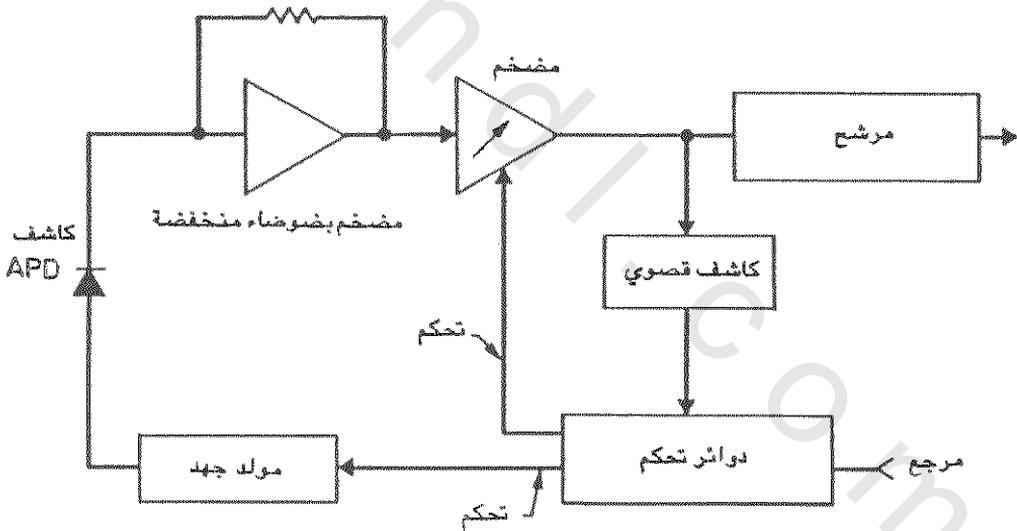
(١) تأثر الاستجابية بجهد الانحياز ودرجة الحرارة كما في الشكل (٩-٣) مما يؤثر على

قيمة الكشف .

(٢) يحتاج إلى جهد مرتفع لتشغيله يتراوح بين 20V و 500V .

(٣) زيادة الضوضاء نتيجة الطبيعة العشوائية لآلية الكسب .

يبين الشكل (٩-١٣) مخططاً صندوقياً للدوائر التحكم في كسب ثنائي APD . عند سقوط الضوء على ثنائي APD يتولد تيار عند خرج الثنائي ويمثل هذا التيار دخل المضخم منخفض الضوضاء . يتبع ذلك مضخمات أخرى ودوائر تغذية راجعة تتولى التحكم بجهد الانحياز المطبق على الثنائي والاقبال من تأثير تغير درجة الحرارة على كسب الثنائي والحصول على تيار ثابت ضمن عرض نطاق محدد .



الشكل (٩-١٣) دائرة تغذية راجعة للتحكم في كسب ثنائي APD

## ٩-٤ الخلاصة Summary

قدمنا في هذا الفصل الخصائص العامة للكاشف المستخدمة في نظم الاتصالات البصرية. تمثل العلاقة بين القدرة البصرية الواردة والتيار الكهربائي المتولد في الكاشف، والتي تسمى بالاستجابة، أهم خصيصة من الخصائص الآنف ذكرها.

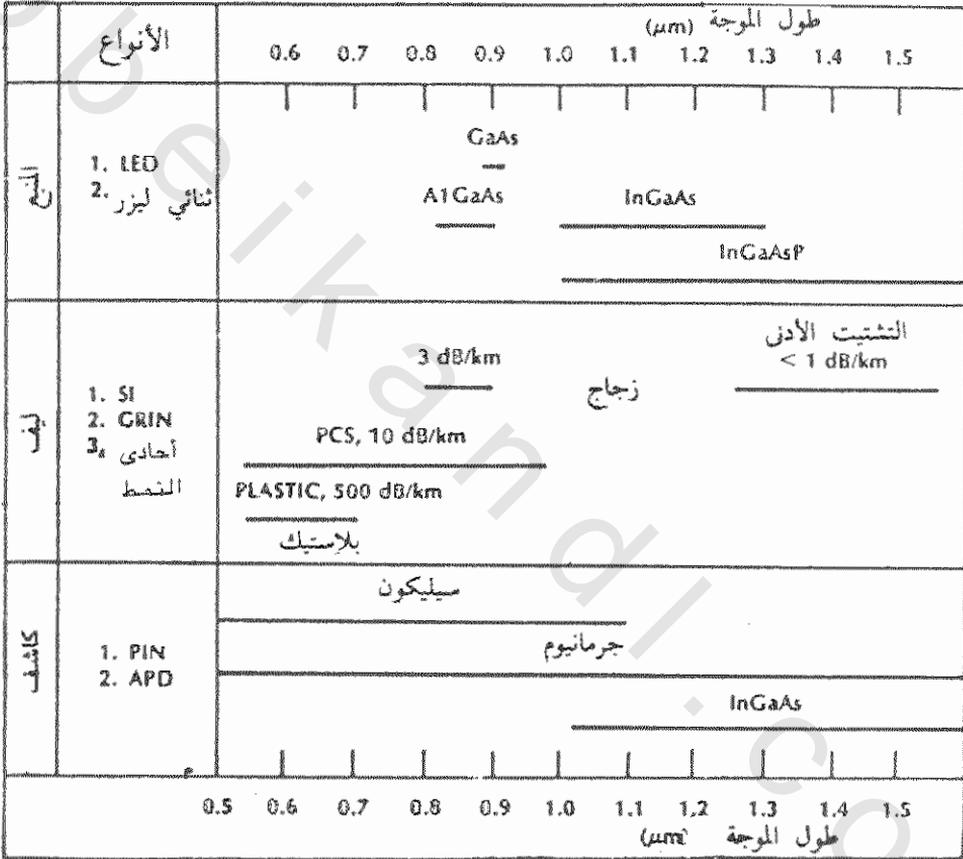
يمثل الثنائيان الضوئيان PIN و APD أكثر الأنواع استخداماً في نظم الاتصالات الليفية البصرية. غير أن ثنائي PIN يتناز برخص ثمنه وقلة حساسيته لدرجة الحرارة ويتطلب جهد انحياز عكسي أقل مما يتطلبه ثنائي APD. إن سرعة الثنائيين متقاربة لذلك يفضل استخدام ثنائي PIN في معظم الأنظمة. يقتصر استخدام ثنائي APD عندما يكون فقد النظام اليفي البصري مرتفعاً. لذا فإن كسب هذا الثنائي يجعله قادراً على كشف مستويات قدرة تقل عن تلك التي يستطيع ثنائي PIN كشفها. تمكن هذه الخاصية من زيادة المسافات بين المكررات. لرفع كسب PIN استخدمت دوائر متكاملة تحتوي على ثنائي PIN ملحق به مضخم ترانزستور FET. كما أدت المشاكل التي واجهت استخدام APD في منطقة الأطوال الموجية الطويلة إلى الرجوع للترانزستورات الضوئية نوع BJT. تصنع الثنائيات الضوئية من مواد شبه موصلة مثل السليكون والجرمانيوم وسبائك زرنيخ الجاليوم. يعتمد نوع المادة على الطول الموجي لاختلاف استجابة المواد لمدى الأطوال الموجية المختلفة.

نقدم في الجدول (٩-١) المعلمات المهمة للكاشفات الضوئية PIN و APD.

جدول (٩-١) معلمات الكاشفات الضوئية PIN و APD

المادة البنية	الطول الموجي	الاستجابة	زمن الصعود	الكسب	تيار الظلام
	nm	A/W	ns		na
السليكون PIN	300-1100	0.5	.5	1	1
الجرمانيوم PIN	500-1800	07	0.1	1	200
PIN In Ga As	1000-1700	0.6	0.3	1	10
سليكون APD	400-1000	77	0.5	150	15
جرمانيوم APD	1000-1600	30	1	50	700

بتقديم الكواشف الضوئية ودوائرها في هذا الفصل نكون قد قدمنا العنصر الرئيسي الثالث من عناصر وصلة الاتصالات الليفية البصرية التي تتكون من جهاز الارسال وهي المنبع ودوائره وقناة الاتصال ممثلة في الليف البصري وجهاز الاستقبال وتشمل الكاشف الضوئي ودوائره . يستطيع المصمم للنظام اليفي البصري في هذه المرحلة من تحديد متطلبات العناصر المختلفة لذلك النظام . من هذه العناصر (١) الطول الموجي (٢) نوع المنبع (٣) مادة الليف (سليكا أو بلاستيك) (٤) نوع الليف ( عتبي ، متدرج ، متعدد النمط ، أحادي النمط ) (٥) الكاشف الضوئي (PIN أو APD) . نلخص في الشكل (٩-١٤) العناصر الرئيسية لنظام اتصالات ليفي بصري ، بالإضافة لذلك لابد من اعتبار ميزانية القدرة للنظام واحتساب الفقد الناتج عند المقارن Couplers والموصلات Connectors والوصلات الدائمة Splices .



الشكل ( ٩ - ١٤ ) المكونات الرئيسية لنظام اتصالات بالألياف البصرية

## الفصل التاسع

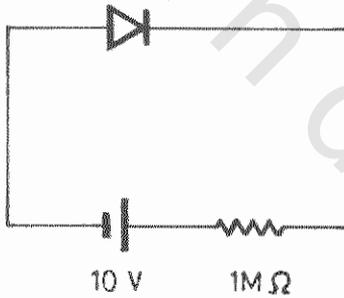
### أسئلة

- ١ - ماهي خصائص الكواشف الضوئية ؟
- ٢ - ماهي الاستجابية وما أهميتها للكاشف الضوئي؟
- ٣ - عرف الكفاءة الكمية للكاشف وكيف تقارنها بالكفاءة الكمية للمنبع؟
- ٤ - كيف يولد تيار الظلام وما علاقته بتغير درجة الحرارة ؟
- ٥ - على أي شيء يعتمد عرض النطاق للكاشف؟
- ٦ - ماهي أنواع الكواشف الضوئية ؟ قارن بينها .
- ٧ - هل تعمل الكواشف بانحياز أمامي أو انحياز عكسي ؟
- ٨ - هل تتأثر الاستجابية بزيادة أو نقص المساحة الفعالة للكاشف ؟ أوض ذلك .
- ٩ - ما سبب الضوضاء في الكاشف ؟
- ١٠ - إشرح طريقة تشغيل الثنائي الفولت ضوئي؟

### مسائل

- ١ - أوجد قيمة تيار الخرج لكاشف ضوئي له استجابية مقدارها  $0.6A/w$  وقدرة الدخل  $-30dBm$  ؟
- ٢ - أوجد قيمة تيار الخرج لكاشف ضوئي كفاءته الكمية تساوي 60% وقدرة الدخل  $-30dBm$  عند  $\lambda = 1.3 \mu m$  ؟
- ٣ - أوجد قيمة جهد الخرج للمسألة رقم ٢ إذا كانت مقاومة الحمل  $R_3 = 1 K\Omega$  ؟
- ٤ - ماهو أقصى طول موجي يمكن لثنائي ضوئي أن يكشفه إذا كانت طاقة الثغرة تساوي  $1.4eV$  .
- ٥ - إرسم الاستجابية مقابل أطوال موجية تتراوح بين  $\lambda = 0.5 \mu m$  و  $\lambda = 1.6 \mu m$  .  
(أفرض أن الكفاءة الكمية 80% ) .

- ٦ - إذا كان تيار الظلام لكاشف ضوئي نوع PIN هو  $0.05 \text{ nA}$  عند درجة حرارة  $20^\circ \text{C}$  ويتضاعف كل  $10^\circ \text{C}$  إحسب تيار الظلام وارسمه بيانياً لدرجات حرارة تتراوح بين  $20^\circ \text{C}$  و  $100^\circ \text{C}$ .
- ٧ - ماهي القدرة الدنيا التي يمكن كشفها من قبل ثنائي PIN له استجابة مقدارها  $0.6 \text{ A/W}$  وتيار ظلام  $1 \text{ nA}$ .
- ٨ - في الدائرة التالية تبلغ الاستجابة  $0.5 \text{ A/W}$  وتيار الظلام  $0.5 \text{ nA}$  وجهد الانحياز  $10 \text{ V}$  ومقاومة الحمل  $1 \text{ M}\Omega$ .
- أ - إرسم بيانياً التيار مقابل الجهد للثنائي في منطقة التوصيل الضوئي لقيم قدرة تتراوح بين  $10 \mu\text{W}$  و  $100 \mu\text{W}$  ويفارق  $10 \mu\text{W}$ .
- ب - ارسم منحنى جهد الخرج بدلالة قدرة الدخل البصرية.



### دائرة المسألة رقم ٨

- ٩ - احسب إستجابة ثنائي ضوئي جرفي (APD) يعمل عند  $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$  وكفاءة كمية تساوي  $0.75$  وكسب يساوي  $90$ .
- مامقدار القدرة البصرية المطلوبة لهذا الكاشف كي ينتج  $20 \text{ nA}$  ؟
- ١٠ - احسب استجابة ثنائي ضوئي جرفي (APD) يعمل عند  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$  وكفاءة كمية تساوي  $0.7$  وكسب يساوي  $20$ . مامقدار القدرة البصرية لهذا الكاشف لكي ينتج  $20 \text{ nA}$  ؟