المحاضرة الثامنة

الكواشــف الضوئيــة

Optical Photo-detectors

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

مقدمة

- تتمثل الوظيفة الأساسية للكاشف الضوئي أو البصرية في تحويل الإشارات الضوئية القادمة من الليف البصري إلى إشارات كهربائية (تيار كهربائي تحديداً)
- حيث تتناسب قيمة هذا التيار الناتج مع شدة الضوء(القدرة الضوئية) الواصل.
- كما هو مفترض أن الكاشف الضوئية يقوم بعكس عمل المصادر الضوئية لكن المبادئ واحدة وتعتمد على نظرية عمل الوصلة PN

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

مقدمة

- يقوم الثنائي الضوئي بامتصاص الضوء الواصل إليه من الليف على شكل فوتونات ويقوم بتحويلها إلى إلكترونات تنبعث منه
- وبالتالي يتشكل تيار كهربائي من تلك الإلكترونات يسري خلال الحمل

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

المتطلبات التي يجب أن تتوفر في الكاشف الضوئي

- هنالك العديد من المتطلبات والشروط التي يجب مراعاتها وتوفرها في الكاشف الضوئي عند إختياره لتطبيق معين في أنظمة الإتصالات البصرية وذلك للحصول على أداء عالي وهي:
  - الحساسية العالية على الطول الموجي. High Sensitivity
  - الكفاءة الكمية العالية(إستجابة عالية للإشارات المستقبلة).
- زمن استجابة(زمن الصعود) قصير للحصول على عرض نطاق مناسب

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

المتطلبات التي يجب أن تتوفر في الكاشف الضوئي

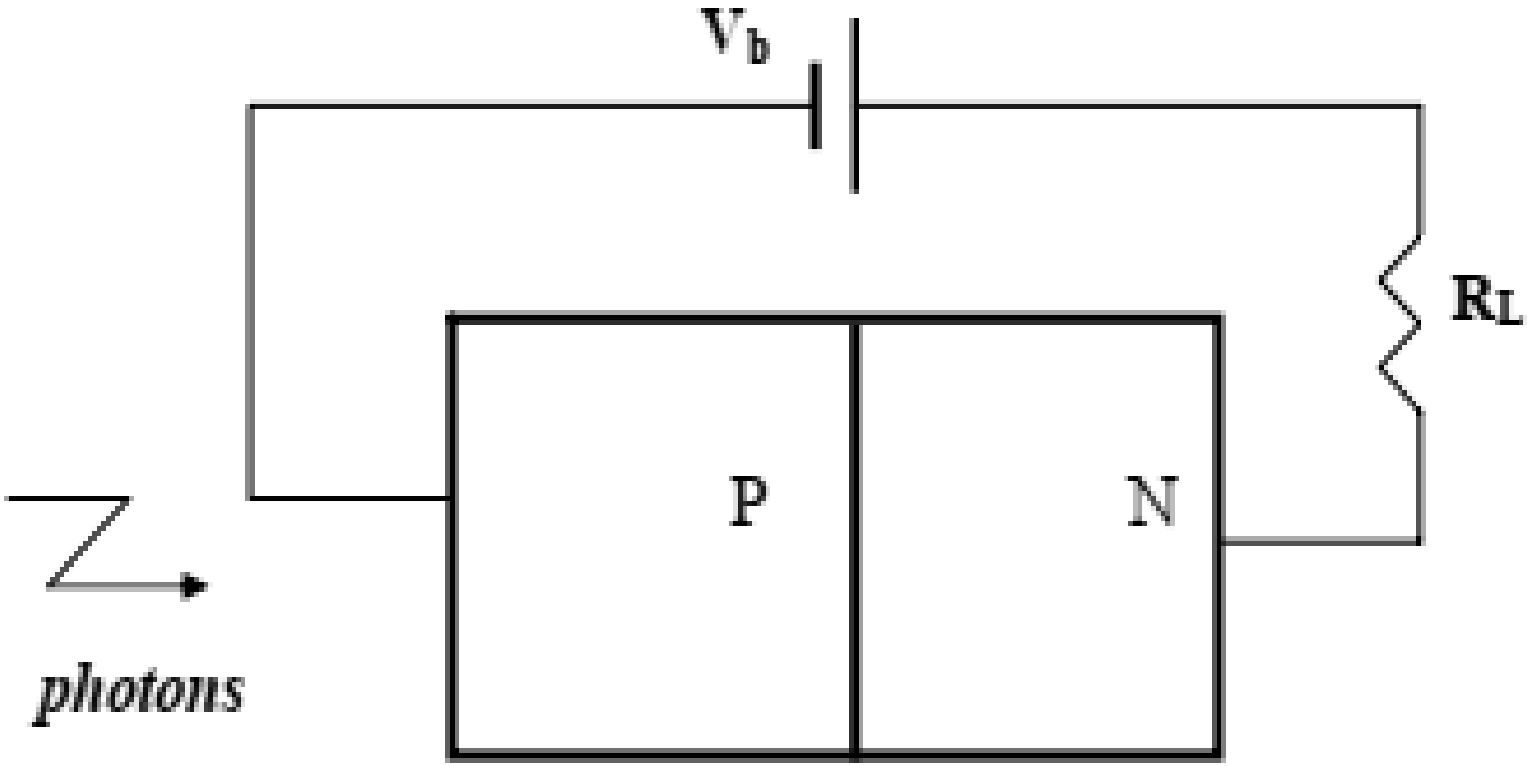
- مستوى ضوضاء أقل ما يمكن. Minimum Noise
- إستقرارية خصائص الأداء. Stability of Performance
- حجم صغير ليتناسب مع مقاسات الليف. Small Size
- فولتية إنحياز قليلة. Low Bias Voltage
- تكلفة قليلة.Low Cost

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

المتطلبات التي يجب أن تتوفر في الكاشف الضوئي

- الشكل التالي يوضح عملية امتصاص الفوتون من قبل الثنائي الضوئي وتحديدا ضمن منطقة امتصاص الضوء أو ما يسمى المنطقة الفعالة أو النشطة
- ينتج عنه زوج من الشحنات شحنة سالبة (إلكترون-Electron) وشحنة موجبة (فجوة-Hole) واللتان يفصلهما مجال كهربي ناتج عن فولتية الانحياز (bias voltage) والتي يجب توصيلها بشكل عكسي مما ينتج عن ذلك تيار كهربي يسمى التيار الضوئي (photo-current Ip).

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري



مبدأ عمل الثنائي الضوئي

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

الكفاءة الكمية: Quantum Efficiency

- يرمز لها بالرمز η وتعرف بالنسبة للثنائي الضوئي بأنها عدد الإلكترونات الخارجة منه نسبة الى عدد الفوتونات الساقطة عليه حيث تتغير قيمتها بتغير الطول الموجي ودرجة الحرارة وتكون قيمتها بين الصفر والواحد أو تعطى كنسبة مئوية

$$\eta = \frac{number\ of\ electron - hole\ pair\ generated}{number\ of\ incident\ photons}$$

$$\eta = \frac{I_P / e}{P_o / hf}$$

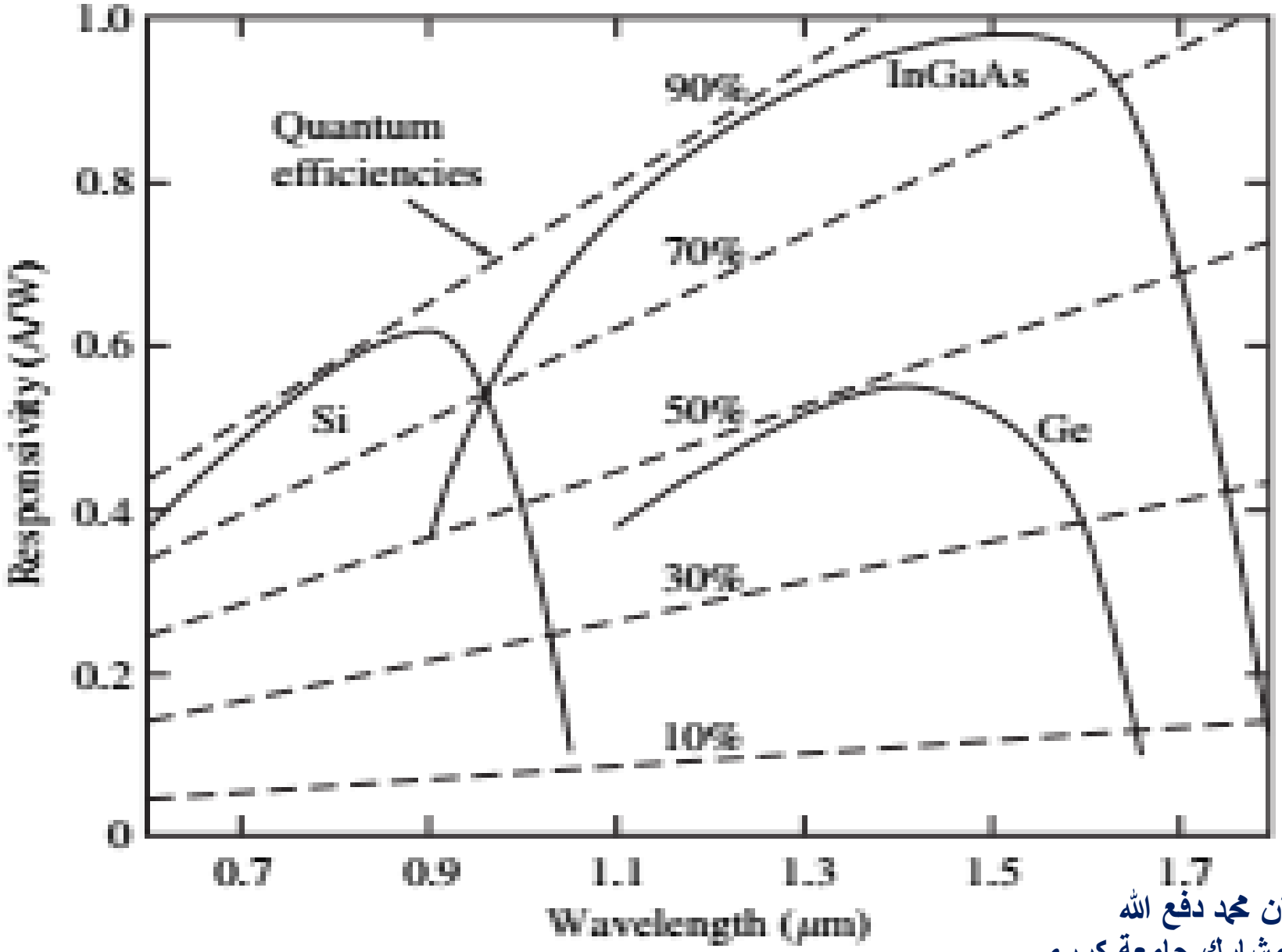
د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

الإستجابية

- عادة ما تستخدم الإستجابية (R) لمعرفة أداء وعمل الثنائي الضوئي والتي تعرف على أنها النسبة بين التيار الضوئي (Photo-current) الخارج من الثنائي (Ip) والقدرة الضوئية (Optical power) الداخلة عليه (Po) و وحدتها أمبير لكل واط (A/W).

$$R = \frac{I_P}{P_O} = \frac{\eta e}{hf} = \frac{\eta e \lambda}{hc}$$

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كردي



د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

الإستجابية

- الشكل أعلاهـ يوضح أهمية الإستجابية وعلاقتها وقيمتها تعتمد بشكل كبير على نوع المادة التي يصنع منها الثنائي الضوئي وعلى قيمة الطول الموجي λ
- وعادة ما تكون قيمتها أقل من 1 A/W للثنائي الضوئي من النوع P-I-N.

في معظم الكواشف الضوئية ومن الشكل أعلاهـ يتضح أن الإستجابية R عبارة عن قيمة ثابتة عند معرفة الطول الموجي

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

الإستجابية

- وبالتالي يمكننا معرفة التيار الضوئي الناتج من الكاشف الضوئي عند سقوط قيمة معينة من القدرة الضوئية

$$I_P = RP_o$$

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

أنواع الكاشف الضوئي

- يوجد هنالك الكثير من أنواع الكاشف الضوئي والتي تصنع غالبا من أشباهـ الموصلات
- ومن تطبيقات الوصلة PN باختصار سوف يتم التعرف على أهم ثلاثة أنواع منها وهي:

✓ ثنائي ضوئي من نوع PN PN Photodiode

✓ثنائي ضوئي من نوع P-I-N P-I-N Photodiode

✓الثنائي الضوئي الجرفي APD Avalanche Photodiode

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

الثنائي الضوئي PN: PN Photodiode

- يعتبر الثنائي الضوئي من النوع PN هو النوع الأبسط والأقل تكلفة من جميع أنواع الكاشف الضوئي وهو عبارة عن وصلة PN موصلة بجهد إنحياز عكسي مما يضمن توليد أزواج من الشحنات الكهربائية نتيجة سقوط الفوتونات وامتصاصها من قبل الثنائي.
- تعتبر المواصفات العملية لهذا النوع من الكاشف الضوئي متواضعة جدا ولا تصلح للاستخدام في أنظمة الاتصالات البصرية لكنها تستخدم واسعا في الإلكترونيات المنزلية.

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

الثنائي الضوئي P-I-N: P-I-N Photodiode

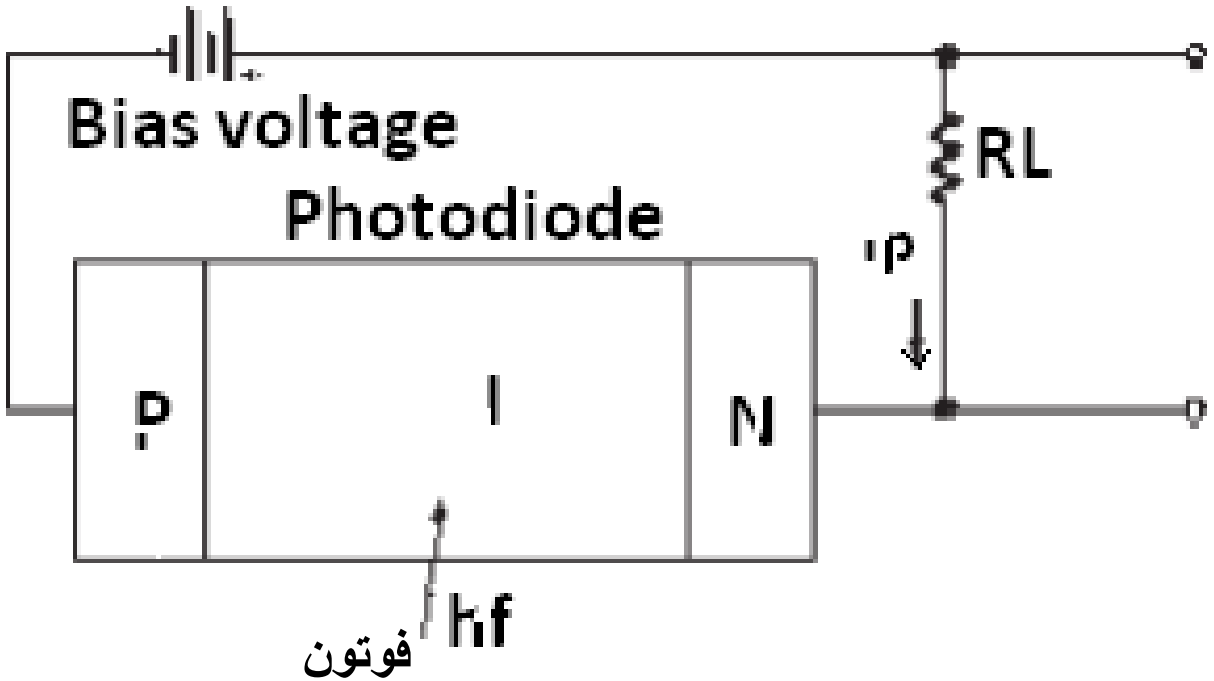
- يعتبر الثنائي من النوع P-I-N نموذج مطور للثنائي من نوع PN وهو الأكثر شيوعا واستخداما
- حيث يتكون من نفس الوصلة PN بالإضافة إلى إضافة منطقة شبه موصل عريضة بين المنطقتين P و N تكاد تكون نقية Intrinsic ومن هنا جاءت التسمية.
- تسمح هذه المنطقة العريضة بامتصاص عدد أكبر من الفوتونات وبالتالي الحصول على كفاءة وإستجابية و وسرعة أعلى مقارنة مع الثنائي من نوع PN دون الحاجة لزيادة جهد الانحياز.

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

آلية عمل الثنائي الضوئي P-I-N

- الشكل التالي يوضح بنية والية عمل الثنائي الضوئي P-I-N والتي تعتمد على كمية الفوتونات الساقطة على المنطقة الفعالة بقدرة تساوي أو أكبر من قدرة الفجوة Band gap Energy لشبه الموصل
- هذا الفوتون يقوم بتوليد(يحفز) إلكترون من حزمة التكافؤ ليقفز إلى حزمة التوصيل .
- هذه العملية والتي تحدث في المنطقة الفعالة (Intrinsic) تولد أو تحرر أزواج من الإلكترونات والثقوب وبالتالي تولد التيار الضوئي Photocurrent Ip

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري



دائرة ثنائي ضوئي P-I-N

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

الثنائى الضوئى الجرفى: (APD)

- يتميز الثنائي الضوئي الجرفي بتكبير داخلي يزيد من حساسيته بشكل كبير.
- حيث يتشابه الثنائي الضوئي الجرفي APD مع الثنائي من النوع P-I-N من ناحية البنية الأساسية ونوع المواد المستخدمة.
- أما الاختلاف بينهما فيتلخص في مبدأ عمل الثنائي الجرفي وهو زيادة جهد الانحياز العكسي

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

الثنائى الضوئى الجرفى: (APD)

- وبالتالي زيادة في المجال الكهربائي في المنطقة الفعالة وذلك يكسب أزواج الشحنات الكهربائية (الإلكترونات والثقوب) طاقة كافية لتوليد أزواج جديدة من الشحنات
- حيث تتكرر هذه العملية مما ينتج عنها تكبير غير ثابت يسمى التكبير الجرفي Avalanche Gain ويرمز له بالرمز (M) والذي تصل قيمته إلى أكثر من 200.

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كردي

الثنائى الضوئى الجرفى: (APD)

- يتراوح جهد الانحياز العكسي اللازم لتشغيل الثنائي الجرفي APD من (50V ~ 400V)
- بينما في الثنائي الضوئي P-I-N يتطلب جهد انحياز عكسي يتراوح بين (5V ~ 20V).
- ولكن يعتبر مستوى الضوضاء المرتفع نسبيا والناتج عن ارتفاع جهد الانحياز العكسي السلبية الرئيسية بالنسبة للثنائيات الجرفية APD مقارنة مع الأنواع الأخرى
- كما أنها حساسة للتغير في درجة الحرارة حيث يتناقص معدل التكبير بزيادة درجة الحرارة.

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

الثنائى الضوئى الجرفى: (APD)

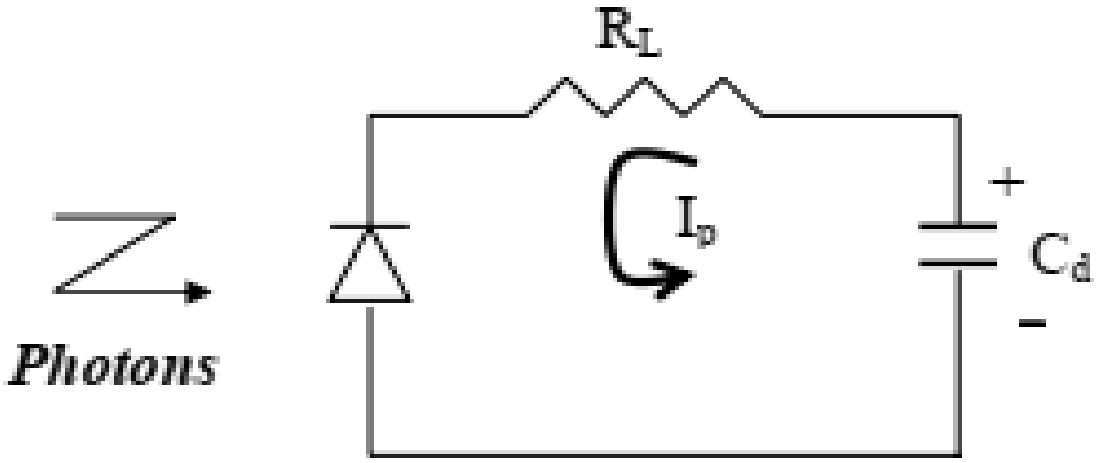
- يمكننا معرفة أداء الثنائي الجرفي من خلال إستجابيته ومنها يمكننا حساب قيمة التيار الضوئي الناتج من الثنائي الجرفي وذلك بدلالة قيمة الكسب الجرفي M الناتج من التكبير
- حيث يرمز له بالرمز I_M والذي يعطى بالعلاقة التالية:

$$I_M = R_{APD} P_o = MRP_o$$

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

عرض النطاق وزمن الصعود: Bandwidth & Rise Time

- تعتمد حساسية سرعة الكاشف الضوئي على قيمة الترددات التي يعمل خلالها الثنائي الضوئي والتي تعرف بعرض النطاق
- وهي عبارة عن مدى الترددات التي يستطيع خلالها الكاشف الضوئي استخلاص الإشارة



د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

عرض النطاق وزمن الصعود: Bandwidth & Rise Time

- الشكل أعلاهـ يوضح تمثيل الدائرة الكهربائية المكافئة للثنائي الضوئي حيث ترمز C_d إلى السعة الكهربائية للثنائي حيث تحدد المكونات الإلكترونية لدائرة الثنائي قيمة عرض النطاق:

$$BW = \frac{1}{2\pi R_L C_d}$$

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري

عرض النطاق وزمن الصعود: Bandwidth & Rise Time

- أما بالنسبة لزمن الصعود أو ما يعرف بزمن الإستجابة فهو عبارة عن الزمن اللازم للثنائي الضوئي حتى يستقبل القدرة الضوئية الواصلة له ويحولها إلى تيار كهربائي
- حيث تعتمد قيمة زمن الإستجابة على تركيبة وتصميم الثنائي، نوع المادة المصنوع منها وجهد الانحياز وتصل إلى أقل من 0.1ns مقارنة بالميقاهيرتز بالنسبة لعرض النطاق

$$t_r\,(ns) = \frac{0.35}{BW\ (MHz)}$$

د عثمان محمد دفع الله
أستاذ مشارك جامعة كرري