النبائط الفوتو الكترونية
Photonic Devices

مقدمة عامة :

النبائط الفوتوالكترونية هي تلك التي يلعب فيها الفوتون **Photon** وهو الجسيم الاساس للضوء الدور الاساس . وسنتناول في هذا الفصل اربع مجموعات من النبائط الفوتو لكترونية :

الثنائي المشع للضوء ***light-emitting diodes*** **(LEDs)**، والثنائي الليزر ***lasers*** وهو اختصار للتعبير :

(*l*ight *a*mplification by *s*timulated *e*mission of *r*adiation)

تضخيم الضوء بالانبعاث المحفز للاشعاع .

وتقوم هذه النبيطة بتحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ضوئية . والكاشفات الضوئية ***photodetectors*** والتي تقوم بالكشف عن الاشارات الضوئية الكترونيا . والخلايا الشمسية ***solar cells*** والتي تقوم بتحويل الطاقة الضوئية الى طاقة كهربائية .

الانتقال الاشعاعي والامتصاص الضوئي
RADIATIVE TRANSITIONS AND OPTICAL ABSORPTION

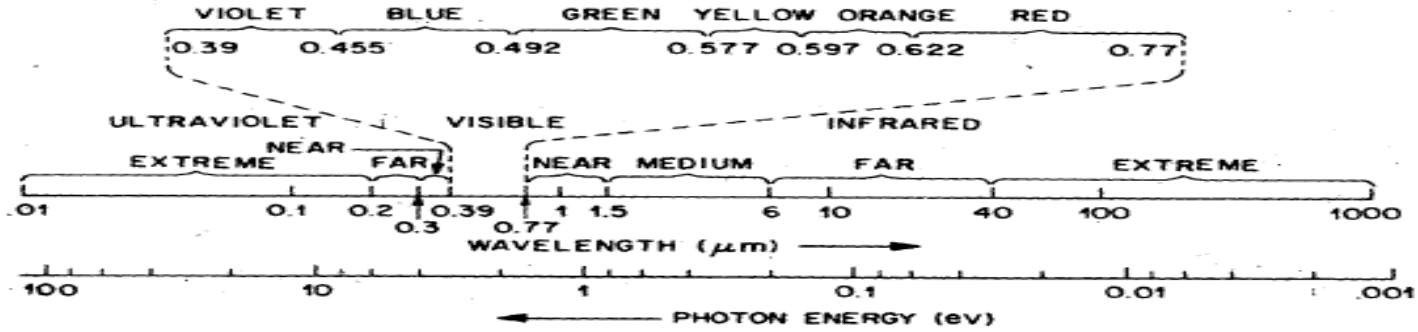
مقدمة

يبين الشكل ادناه الطيف الكهرومغناطيسي في الجزء المرئي . فالمدى الضوئي الذي يمكن تحسسه بوساطة العين البشرية يمتد تقريباً من **0.4 μm** الى **0.7 μm**

وكذلك يبين الشكل حزمة **الالوان الرئيسة** من اللون البنفسجي وحتى اللون **الاحمر** وبمقياس موسع والمنطقة فوق البنفسجية **(uv)** تتضمن اطوال الموجة من **0.01 μm** (اي **100 Å** او **10 nm**) ولغاية **0.4 μm**, في حين تمتد المنطقة دون الحمراء **(IR)** من **0.7 μm** وحتى **1000 μm**. وينصب اهتمامنا في هذا الفصل بصورة اساسية على المدى الممتد من فوق البنفسجية القريب **near uv** **(~0.3 μm)** وحتى تحت الحمراء القريب **near IR** **(~1.5 μm)** ويظهر ايضا في الشكل ادناه وعلى مقياس افقي منفصل طاقة الفوتون . والعلاقة بين طول الموجة مقيسة بالمايكرون وطاقة الفوتون **hv** مقيسة بالالكترون ـ فولت هي :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = \frac{1.24}{h\nu\ (\text{eV})}\ \mu\text{m}$$

حيث يمثل c سرعة الضوء في الفراغ ويمثل ν تردد الضوء ويمثل h ثابت بلانك ويمثل $h\nu$ طاقة الفوتون مقيسة وبوحدة الكترون ـ فولت **ev** . فعلى سبيل المثال يمثل الضوء الاخضر بطول موجة **0.5-μm** فوتون طاقته **2.48 eV**



الشكل يوضح توزيع الطيف الكهرومغناطيسي من المنطقة فوق البنفسجية وحتى المنطقة دون الحمراء .

1 الانتقال الاشعاعي Radiative Transitions

هنالك اساسا ثلاث عمليات للتفاعل مابين الفوتون والالكترون في المادة الصلبة : الامتصاص والانبعاث التلقائي والانبعاث المحفز . ولتوضيح هذه العمليات نتناول حالة مبسطة

لنأخذ مرتبتين للطاقة E_2 و E_1 لذرة . حيث يمثل E_1 المرتبة الدركية **ground state** في حين يمثل E_2 المرتبة المحفزة (الشكل ٤) وان اي انتقال بين هاتين المرتبتين يترتب عليه امتصاص او انبعاث للفوتونات وبتردد ν_{12} يتحدد من العلاقة $h\nu_{12} = E_2 - E_1$ وعند درجة حرارة الغرفة تكون معظم ذرات المادة في الحالة الدركية . ويختل هذا الوضع عندما تقصف المنظومة بفوتونات طاقتها تساوي بالضبط $h\nu_{12}$. فالذرة في المرتبة E_1 تمتص الفوتون وتنتقل بذلك الى المرتبة E_2 . والتغير في مرتبة الطاقة يمثل عملية الامتصاص . وهذا مانراه في الشكل a ان المرتبة المحفزة هي مرتبة قلقة ولذلك وبعد فترة وجيزة ومن دون وجود محفز خارجي ترجع الذرة الى المرتبة الدركية وتشع فوتونا بطاقة $h\nu_{12}$. وتدعى هذه العملية والمبينة في الشكل b بالانبعاث التلقائي واذا كانت الذرة في الوضع المحفز وسقط عليها فوتون بطاقة $h\nu_{12}$ فانها (اي الذرة) تحفز للرجوع الى الحالة الدركية وينبعث منها فوتون بطاقة $h\nu_{12}$ يكون بنفس طور الفوتون الساقط على الذرة وهذه العملية والمبينة في الشكل c تدعى بالانبعاث المحفز . ويكون الاشعاع الناجم عن الانبعاث المحفز احادي اللون **monochromatic** لان طاقة كل واحد من الفوتونات يكون بالضبط $h\nu_{12}$ ويكون الانبعاث متشاكما **coherent** لكون جميع الفوتونات المنبعثة في طور واحد .

ان عملية التشغيل الاساسية في الثنائي الباعث للضوء (LED) هي الانبعاث التلقائي . وفي الليزر هي الانبعاث المحفز . وفي كاشفات الضوء والخلايا الشمسية فهي الامتصاص .

لنفرض ان الكثافة الانية للمستويين E_2 و E_1 هي n_2 و n_1 على التوالي وفي حالة الاتزان الحراري وعندما يكون $(E_2 - E_1) > 3kT$ تتحدد الكثافة وفق توزيع بولتزمان **Boltzmann distribution:** بالعلاقة :

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-(E_2-E_1)/kT} = e^{-h\nu_{12}/kT}$$

وتشير الاشارة السالبة للأس ان n_2 اقل من n_1 في حالة الاتزان الحراري . اي ان معظم الالكترونات هي في المستوي الاوطأ للطاقة .

ويتوجب في حالة الاستقرار ان يتساوى مجموع معدل الانبعاث المحفز (اي عدد انتقالات الانبعاث المحفز في وحدة الزمن) ومعدل الانبعاث التلقائي مع معدل الامتصاص وذلك للمحافظة على ثبات n_1 و n_2 . ويتناسب معدل الانبعاث المحفز مع كثافة طاقة مجال الفوتون $\rho(h\nu_{12})$ **photon field energy density** . والتي تمثل الطاقة الكلية لمجال الاشعاع لوحدة الحجم ولوحدة التردد . وبذلك يمكن التعبير عن معدل الانبعاث المحفز بـ $B_{21}n_2\rho(h\nu_{12})$ حيث يمثل n_2 عدد الالكترونات في المستوى الاعلى للطاقة و B_{21} هو ثابت التناسب . اما معدل الانبعاث التلقائي فيتناسب فقط مع كثافة الالكترونات في المستوى الاعلى للطاقة وبذا فانه $A_{21}n_2$ حيث يمثل A_{21} ثابت التناسب . ويتناسب معدل الامتصاص مع كثافة الالكترونات في المستوى الاوطأ للطاقة ومع $\rho(h\nu_{12})$. ويمكن كتابة هذا المعدل بالصيغة $B_{12}n_1\rho(h\nu_{12})$ حيث يمثل B_{12} ثابت التناسب . وبذلك يكون عند حالة الاستقرار :

معدل الامتصاص = معدل الانبعاث التلقائي + معدل الانبعاث المحفز

$$B_{21}n_2\rho(h\nu_{12}) + A_{21}n_2 = B_{12}n_1\rho(h\nu_{12}) . \qquad (3)$$

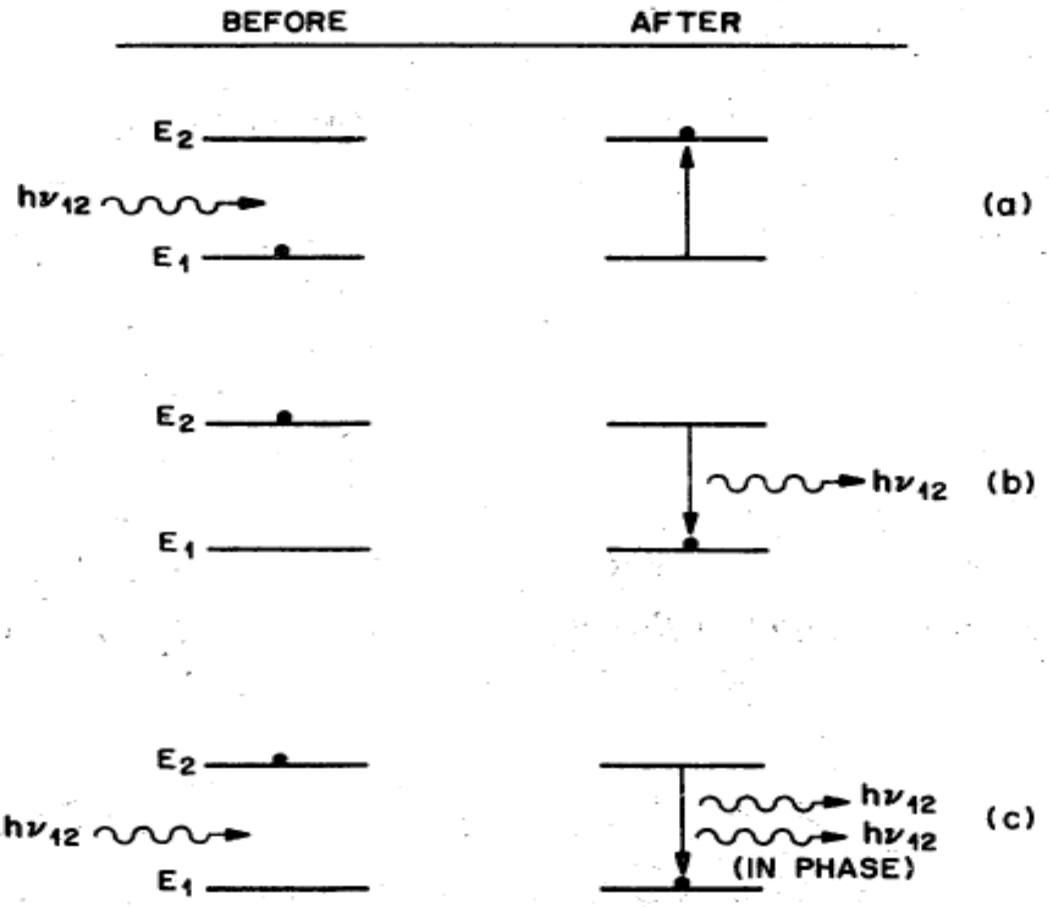
ونلاحظ من المعادلة 3 ان :

$$\frac{\text{معدل الانبعاث المحفز}}{\text{معدل الانبعاث التلقائي}} = \frac{B_{21}}{A_{21}}\rho(h\nu_{12}) . \qquad (4)$$

ومن اجل تعزيز الانبعاث المحفز على الإنبعاث التلقائي يجب ان تكون كثافة طاقة مجال الفوتون $\rho(h\nu_{12})$ عالية جداً . وللحصول على هذه الكثافة يتم استخدام تجويف الرنين البصري **optical resonant cavity** الذي يرفع مجال الفوتون . وكذلك نلاحظ من المعادلة 3 ان :

$$\frac{\text{معدل الانبعاث المحفز}}{\text{معدل الامتصاص}} = \frac{B_{21}}{B_{12}} \left[\frac{n_2}{n_1}\right] . \qquad (5)$$

واذا كان للانبعاث المحفز ان يطغى على الامتصاص فمن اللازم ان تكون كثافة الالكترونات في مستوى الطاقة الاعلى اكبر من كثافتها في المستوى الاوطأ . وتدعى هذه الحالة بالانقلاب الاستيطاني ***population inversion*** لأن عكس هذه الحالة هو مانجده عند الاتزان الحراري . وسنتناول الطرق المختلفة التي يمكن من خلالها الحصول على كثافة طاقة مجال فوتون عالية والحصول على انقلاب استيطاني . مما يجعل الانبعاث المحفز هو المهمين على الانبعاث التلقائي وعلى الامتصاص .

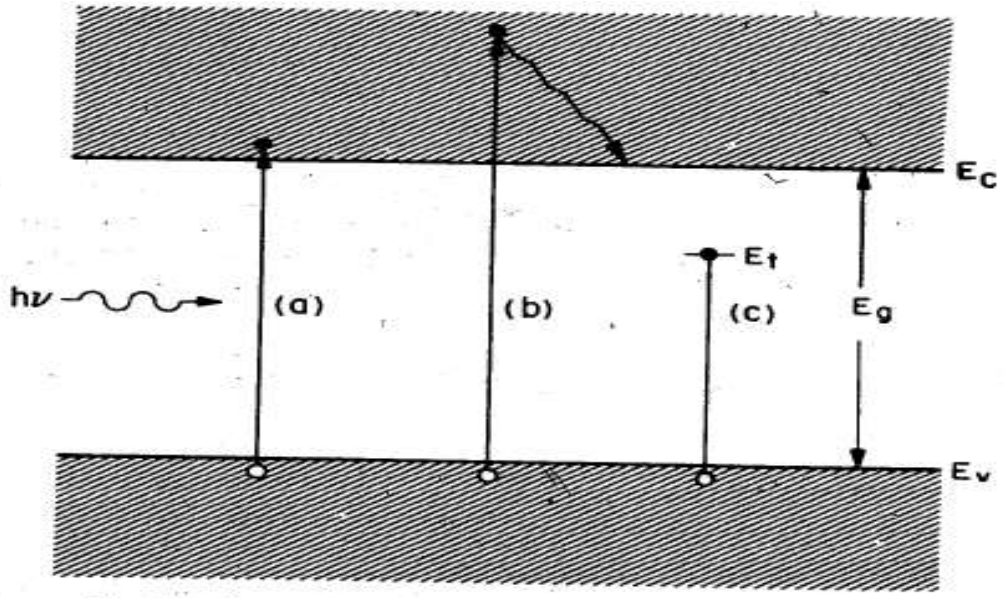


الشكل يوضح عمليات الانتقال الاساسية الثلاث بين مستوى طاقة . وتمثل النقطة السوداء حالة الذرة وتبين الاشكال على اليسار الحالة الابتدائية للذرة فيما تبين الاشكال على اليمين حالة الذرة بعد حدوث الانتقال ، الامتصاص (a) الانبعاث التلقائي (b) الانبعاث المحفز (c)

2. الامتصاص البصري Optical Absorption

يبين الشكل a الانتقالات الاساس في شبه الموصل وعند اضاءة شبه الموصل يتم امتصاص الفوتونات لتوليد ازواج من الالكترون ـ الثقب . وكما في الشكل **a** . عندما تكون طاقة الفوتونات $h\nu$ مساو لفجوة الطاقة E_g . واذا كانت طاقة الفوتون اكبر من فجوة الطاقة فان ازواج الالكترون ـ الثقب تتولد بينما تتبدد الطاقة الاضافية $(h\nu - E_g)$ على شكل حرارة . وكما يتضح ذلك من الشكل **b** . ان كلا من **(a)** و **(b)** يشار اليهما بالانتقال الجوهري ***intrinsic transitions*** او (انتقال الحزمة الى حزمة **band-to-band** . واما اذا كانت $h\nu$ اقل من E_g فلن يتم الامتصاص الا بوجود مراتب طاقة في الفجوة المحضورة ناجمة عن الشوائب الكيمياوية والعيوب الفيزياوية وكما هو مبين في الشكل **c** وتدعى العملية **(c)** بالانتقال الدخيل ***extrinsic*** . ان هذا الوصف ينطبق ايضا على الحالة المعكوسة . فعلى سبيل المثال ينجم عن اتحاد الالكترون من حزمة التوصيل مع ثقب في حزمة التكافؤ انبعاث الفوتونات بطاقة مساوية للفجوة المحضورة .

لنفرض ان مصدر ضوء يضيء شبه موصل بضوء طاقته $h\nu$ اكبر من E_g وان فيض الفوتونات يساوي Φ_o (مقيسا بوحدة فوتونات لكل سم^2 لكل ثانية **photon** **cm2 - sec**) وبمرور الفيض الفوتوني في شبه الموصل فان نسبة الفوتونات الممتصة تتناسب طرديا مع شدة الفيض . وبذلك فان عدد الفوتونات الممتصة خلال المسافة الجزئية Δx (الشكل **a**) هو $\alpha\Phi(x)\Delta x$. حيث يمثل α ثابت التناسب ويعرف بمعامل الامتصاص ***absorption coefficient.*** ومن معادلة الاستمرارية للفيض الفوتوني والموضح في الشكل **a** نحصل على :



الشكل . الامتصاص البصري (a) $h\nu = E_g$ ، (b) $h\nu > E_g$ ، (c) $h\nu < E_g$

$$\Phi(x + \Delta x) - \Phi(x) = \frac{d\Phi(x)}{dx}\,\Delta x = -\alpha\Phi(x)\,\Delta x$$

او

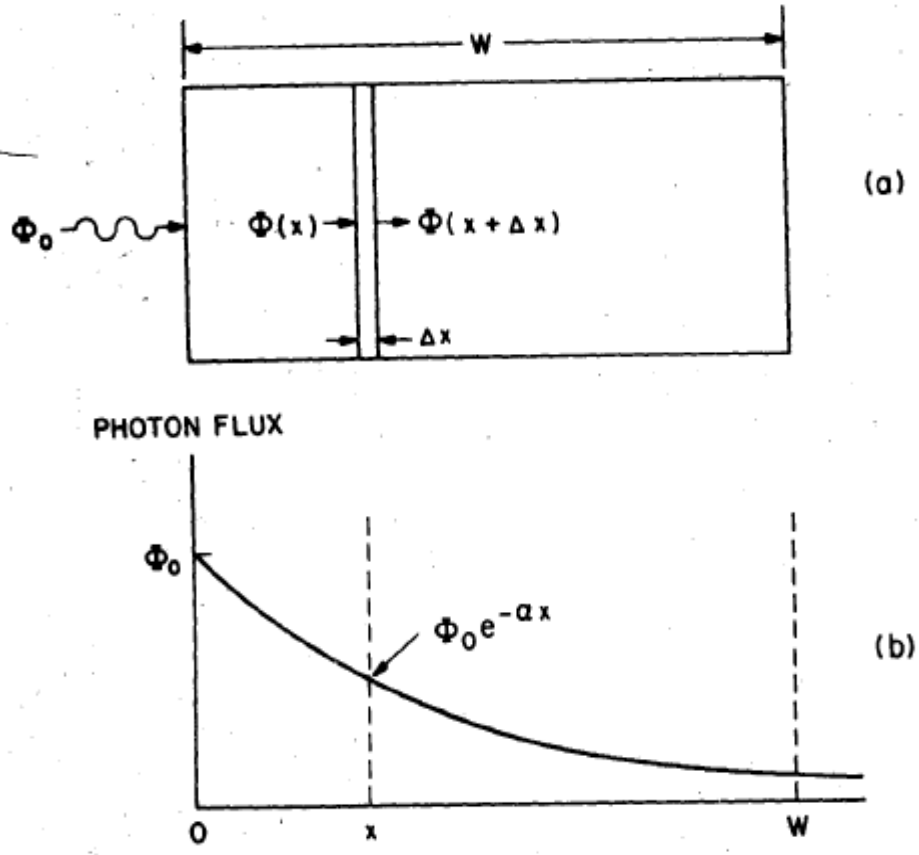
$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = -\alpha\Phi(x)\,. \qquad (6)$$

وتشير الاشارة السالبة الى تناقص كثافة الفوتون نتيجة للامتصاص . ويأتي الحل للمعادلة (6) بتطبيق الشروط الحدودية $\Phi(x) = \Phi_o$ عند $x = 0$

$$\Phi(x) = \Phi_o e^{-\alpha x}\,. \qquad (7)$$

وتكون نسبة الفوتونات التي تخرج من النهاية الثانية لشبه الموصل عند $x = W$ (الشكل b) :

$$\Phi(W) = \Phi_o e^{-\alpha W}\,. \qquad (8)$$

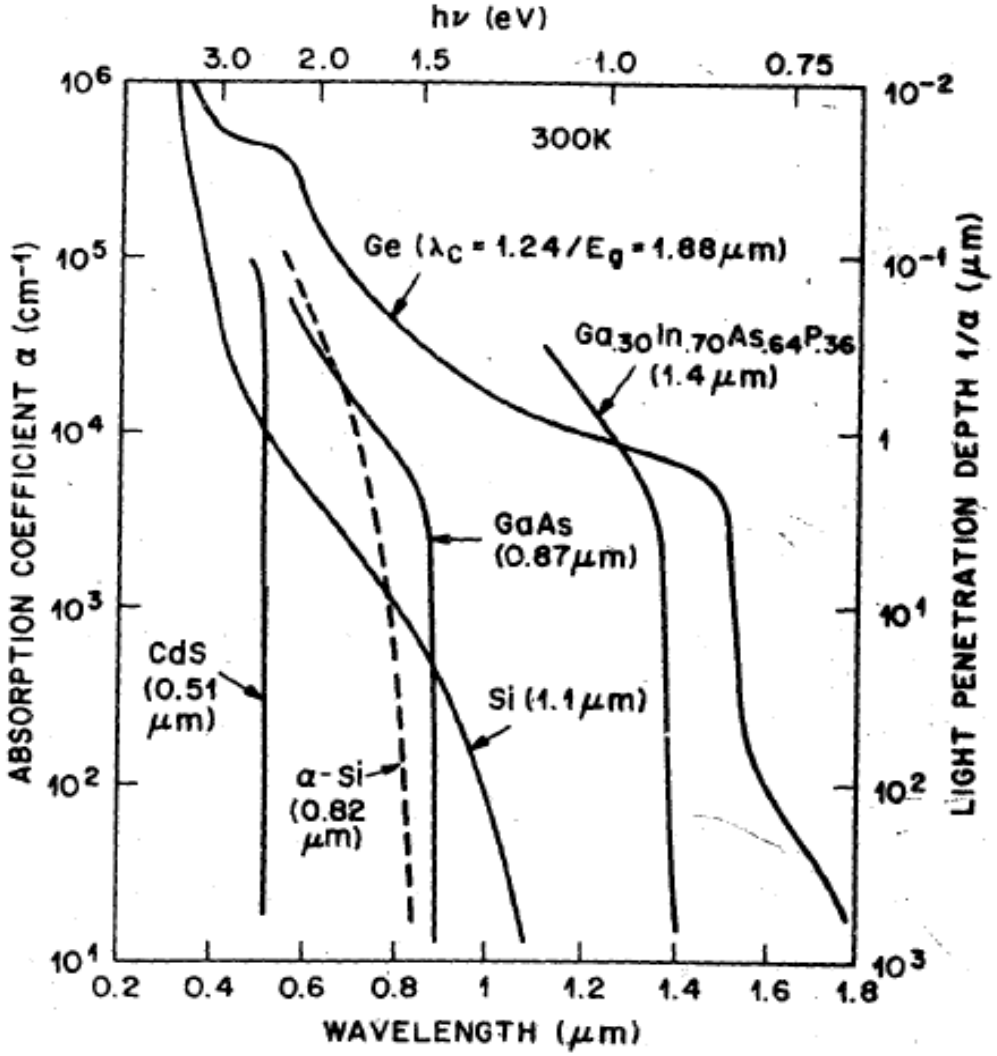


الشكل ، الامتصاص البصري . (a) عند اضاءة شبه الموصل . (b) الاضمحلال الأسي للفيض الفوتوني .

ويعتمد معامل الامتصاص α على الطاقة $h\nu$. ويبين الشكل ادناه معامل الامتصاص لعدد من شبه الموصلات المهمة والمستخدمة في النبائط الفوتوالكترونية[2] . كما يظهر في الشكل (المنحني المتقطع) معامل الامتصاص للسليكون غير البلوري **amorphous silicon** وهو مادة مهمة مستخدمة في الخلايا الشمسية . ويتناقص معامل الامتصاص بسرعة عند طول موجة القطع λ_c . حيث ان :

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} \ \mu m \qquad (9)$$

وذلك لأن الامتصاص حزمة ـ الى ـ حزمة يصبح مهملا عندما تكون $h\nu < E_g$ او تكون $\lambda > \lambda_c$



الشكل ، معاملات الامتصاص البصري لمواد شبه موصلة مختلفة .

مسألة :

سليكون احادي البلورة سمكه $0.25\ \mu m$ مضاء بضوء احادي اللون (بتردد ثابت) طاقته $h\nu$ $3\ eV$. والقدرة الساقطة تساوي $10\ mW$. اوجد الطاقة الكلية الممتصة من قبل شبه الموصل في ثانية واحدة . مامعدل الطاقة الفائضة المبددة كحرارة في المشبك وما عدد الفوتونات المنبعثة في الثانية الواحدة نتيجة اعادة الاتحاد بعملية الانتقال الجوهري ؟

الحل :

نرى من الشكل اعلاه ان معامل الامتصاص هو $4\times10^{4}\ cm^{-1}$ والطاقة الممتصة في الثانية هي :

$$\Phi_o(1 - e^{-\alpha W}) = 10^{-2}[1 - \exp(-4\times10^{4}\times0.25\times10^{-4})]$$
$$= 0.0063\ J/s = 6.3\ mW .$$

فنسبة الطاقة المبددة كحرارة من كل فوتون هي :

$$\frac{h\nu - E_g}{h\nu} = \frac{3 - 1.12}{3} = 62\% .$$

وبذلك فان كمية الطاقة المبددة في الثانية في المشبك هي :

$$62\%\times6.3 = 3.9\ mW .$$

وبما ان الاشعاع الناجم عن اعادة الاتحاد يمثل $2.4\ mW$ أي $6.3\ mW - 3.9\ mW$ عند فوتون $1.12\ eV$ فان عدد الفوتونات الناجمة عن اعادة الاتحاد في كل ثانية هو :

$$\frac{2.4\times10^{-3}}{1.6\times10^{-19}\times1.12} = 1.3\times10^{16}\ \text{photons/s}$$

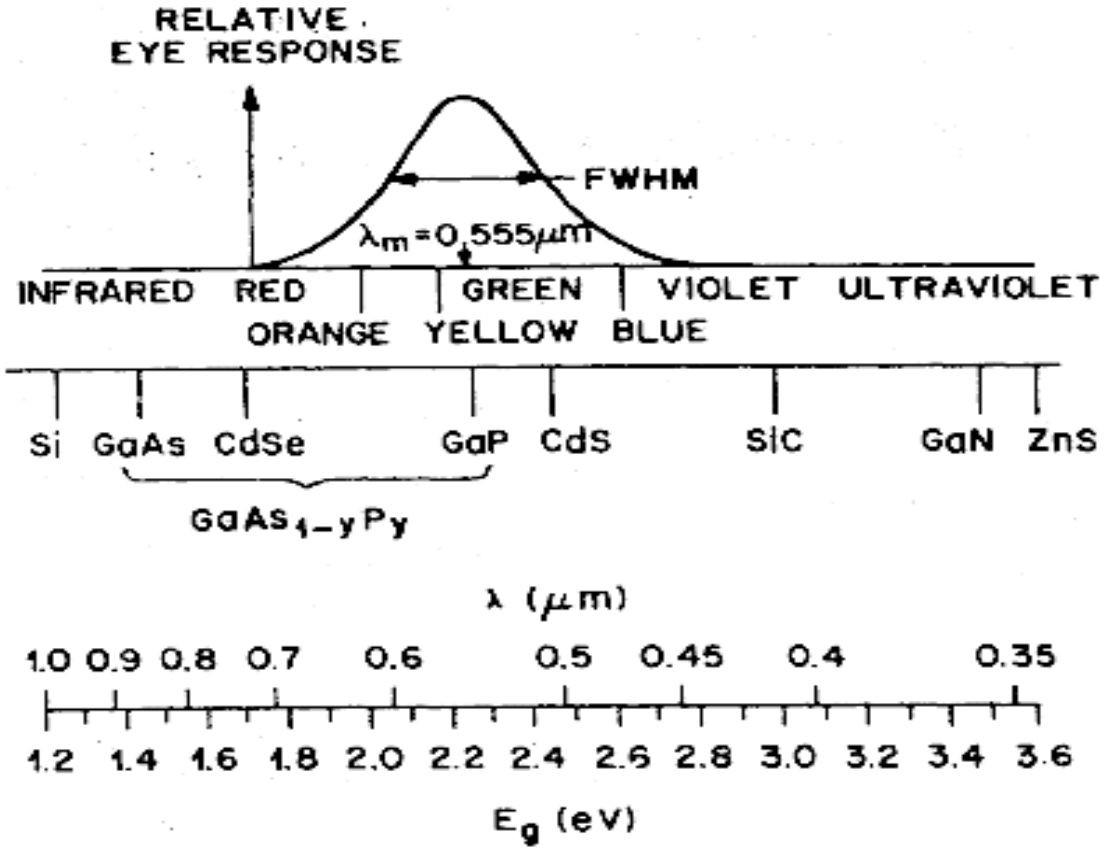
الثنائي المشع للضوء LIGHT-EMITTING DIODE

الثنائيات المشعة للضوء (LEDs) تتكون من مفارق p–n يمكنها ان تبعث اشعاعا تلقائيا في المنطقة فوق البنفسجية او المنطقة المرئية او المنطقة تحت الحمراء من الطيف[3]. ولـ LED المشع للضوء المرئي العديد من التطبيقات كحلقة للمعلومات بين الاجهزة الالكترونية ومستخدميها ويستخدم LED المشع للاشعة تحت الحمراء كعوازل بصرية opto-isolators وفي الاتصالات المستخدمة للالياف البصرية.

1. ثنائي LED المرئي

يبين الشكل ادناه الاستجابة النسبية للعين كدالة لطول الموجة (او مايقابله من طاقة فوتون). والحساسية القصوى للعين هي عند 0.555 μm وتتلاشى حساسية العين الى الصفر عند طرفي الطيف المرئي عند حوالي 0.4μm و 0.7 μm. وللابصار الطبيعي وعند الحساسية القصوى للعين فأن الواط الواحد من الطاقة الاشعاعية يكافيء 683 ليومن lumen.

ولما كانت العين حساسة للضوء الذي طاقته $h\nu$ تساوي او اكبر من 1.8 eV (أي $\lambda \leq 0.7\ \mu m$) فان المواد شبه الموصلة التي تهمنا يجب ان تكون فجوة طاقتها اكبر من هذه القيمة. ويرينا ايضا الشكل 6 فجوة الطاقة لمواد مختلفة. ومن بين المواد شبه الموصلة المعروضة نجد ان اهمها بالنسبة للثنائي المرئي هي المركب $GaAs_{1-y}P_y$ من مركبات العناصر III–V من الجدول الدوري.



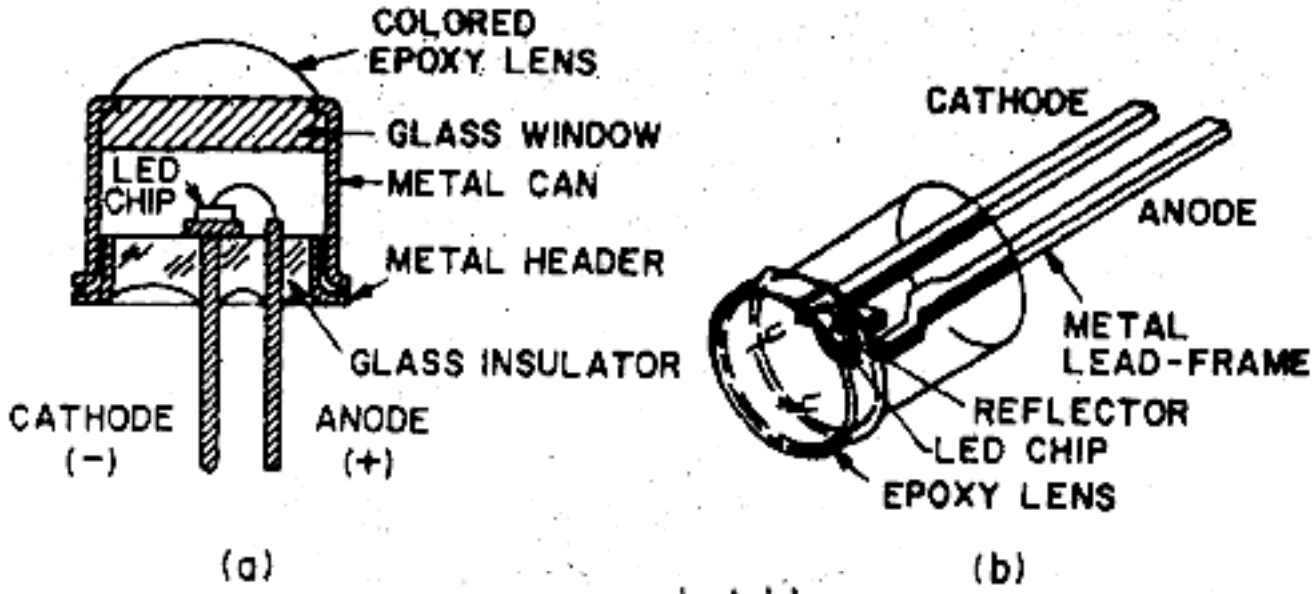
الشكل اشباه الموصل ذات العلاقة بالثنائيات المرئية . ويتضمن الشكل ايضا الاستجابة النسبية للعين البشرية .

هنالك ثلاث اليات مسؤولة عن تقليل عدد الفوتونات المنبعثة ،
(1) الامتصاص ضمن مادة الثنائي . (2) فقد الانعكاس عند السطح البيني ما بين شبه الموصل والهواء بسبب اختلاف معامل الانكسار في الوسطين . و (3) الانعكاس الكلي الداخلي للضوء لزوايا اكبر من الزاوية الحرجة θ_c والتي تحددها علاقة اسنل **Snell's law** حيث :

$$\sin \theta_c = \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2} \qquad (10)$$

ان طيف الانبعاث لثنائيات **LED** شبيهة بمنحني استجابة العين المبين في الشكل السابق ويتحدد عرض الطيف **spectral width** بالعرض الكامل عند منتصف الشدة القصوى **full width at half maximum (FWHM)** وبعامة فان عرض الطيف يتغير وفق λ_m^2 . حيث يمثل λ_m طول الموجة عند الشدة القصوى[7] . وبذلك تزداد **FWHM** مع ازدياد طول الموجة من الجزء المرئي الى المنطقة تحت الحمراء . فعلى سبيل المثال نجد عند اللون الاخضر $\lambda_m = 0.55\,\mu m$ ان **FWHM** يساوى **200 Å** في حين عند $\lambda m = 1.3\,\mu m$ حيث المنطقة تحت الحمراء يكون **FWHM** مساوياً لـ **1200 Å** .

يمكن استخدام LEDs المرئية مصابيح تأشير indicator lamps وعارضات displays ويبين الشكل التالي مخططاً لمصباحين من LED[3]. ويحتوى مصباح LED على قطعة LED وعدسة بلاستيكية تكون ملونة عادة لتقوم بدور مرشح بصري وتؤدي الى تحسين التباين البصري contrast . ونرى ان بنية المصباح في الشكل a مشابهة لتركيب الثنائي التقليدي اما في الشكل b فان اسلوب التعليب المناسب لشبه الموصل الشفاف . كفوسفيد الكاليوم مثلاً . والذي يشع الضوء خلال الاوجه الخمسة (الجوانب الاربعة والقمة) من قطعة الثنائي .



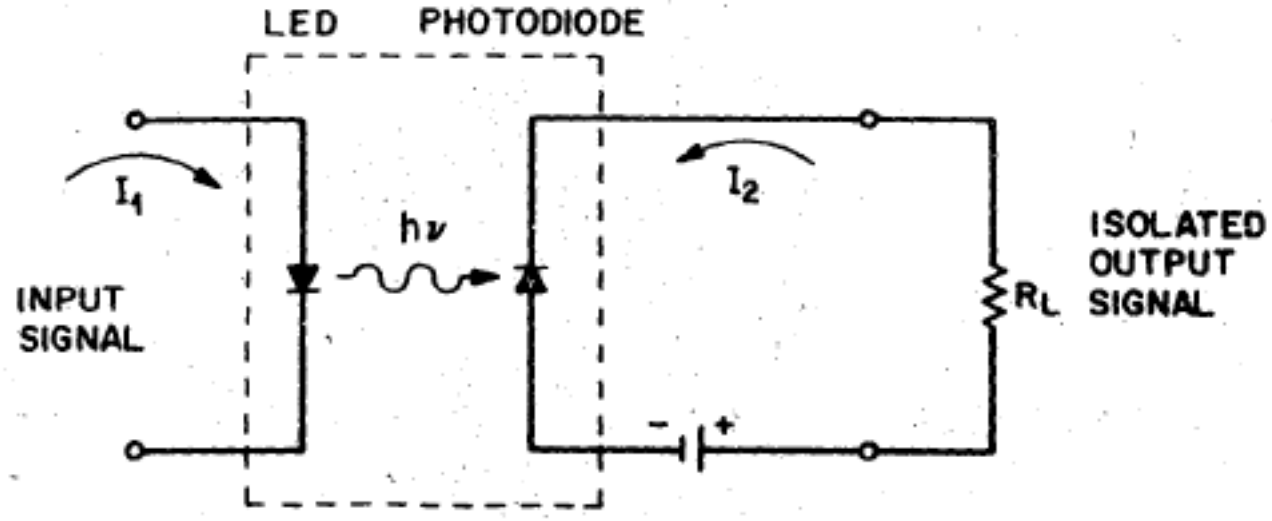
مخطط لمصباحين نوع LED

2. ثنائيات LED تحت الحمراء Infrared LEDs

تتضمن ثنائيات LEDs تحت الحمراء ثنائيات ارسنيد الكاليوم الباعثة للضوء بالقرب من 0.9 μm وللعديد من المركبات III–V . كالمركب الرباعي $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ والذي يبعث الضوء بطول موجة ما بين 1.1 μm و 1.6 μm .

ان من التطبيقات المهمة للثنائيات تحت الحمراء استخدامها عوازل بصرية حيث يتم فك التقارن بين اشارة الادخال او اشارة التحكم واشارة الأخراج . ويبين الشكل ادناه عازل بصري يتضمن LED تحت الحمراء مصدراً للضوء وثنائي ضوئي بوصفه

كاشفاً فعند تسليط اشارة ادخال على LED يتولد الضوء ثم يتم كشفه بوساطة الثنائي الضوئي . حيث يتم اعادة تحويل الضوء الى اشارة كهربائية حيث يسري تيار خلال حمل مقاومي . تقوم العوازل البصرية بنقل الاشارة بسرعة الضوء وتكون معزولة كهربائياً لعدم وجود تغذية عكسية كهربائية بين الاخراج والادخال .



عازل بصرى حيث الاشارة الداخلة غير متقارنة مع الاشارة الخارجة

واستخدام مهم اخر للثنائي LEDs تحت الحمراء هو في نقل الاشارة البصرية خلال الالياف البصرية في منظومة الاتصالات . والالياف البصرية هي موجهات موجة wave guide تعمل في الترددات البصرية . والليف البصري يصنع عادة بسحبه من زجاج جاهز ويكون تقريبا بقطر 100 μm . ويكون الليف مرنا ويمكنه ان يوجه الموجه البصرية لمسافة عدة كيلومترات الى جهاز المستقبل بنفس الاسلوب الذي تنقل فيه الاشارة الكهربائية فى القابلو المحورى coaxial cable

الليزرات شبه الموصلة : SEMICONDUCTOR LASER

تشبه الليزرات شبه الموصلة ليزر الياقوت الصلد **ruby laser** وليزر هيليوم – نيون الغازي **helium– neon gas laser** في كون الاشعاع المنبعث منها احادي اللون شديد الصفاء محدد الاتجاه . الا ان الليزرات شبه الموصلة تختلف عن بقية الليزرات بصغر حجمها (فطولها بحدود **0.1 mm**) وبسهولة تضمينها عند الترددات العالية بمجرد تضمين تيار الانحياز. ونتيجة لهذه المزايا الفريدة يعد الليزر شبه الموصل من اهم المصادر الضوئية للاتصال عبر الالياف البصرية . كما انها تستخدم في التسجيل الفيديوي **video recording** وبالقراءة البصرية **optical reading** وبالطباعة الليزرية العالية السرعة . وفضلاً عن ذلك فان لليزر شبه الموصل تطبيقات مهمة في العديد من مجالات البحوث الاساسية والتكنولوجية كالتحليل الطيفي الغازي الدقيق وفي مراقبة تلوث الجو .

الكاشف الضوئي : PHOTODETECTOR

الكاشفات الضوئية هي نبائط مصنعة من شبه الموصل تقوم بتحويل الاشارات البصرية الى اشارات كهربائية . ويدخل في عمل الكاشف الضوئي ثلاث مراحل :

(1) توليد الحامل بوساطة الضوء الساقط .

(2) نقل و (او) مضاعفة الحاملات باي من الآليات المسؤولة عن كسب التيار و ..

(د) تفاعل التيار مع الدائرة الخارجية لتجهيز اشارة الاخراج الكهربائية .

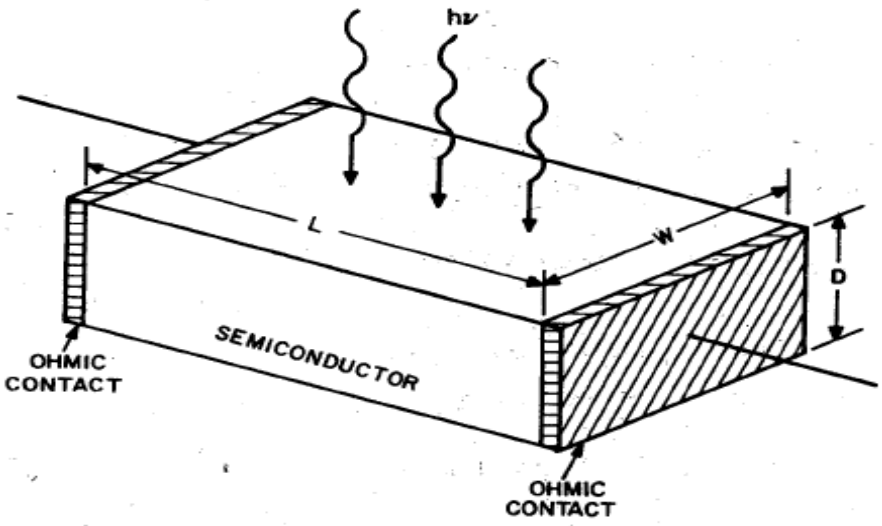
هنالك مدى واسع من التطبيقات للكاشفات الضوئية منها استخدامها كمجسات (متحسسات) **sensors** للموجة تحت الحمراء في الفواصل البصرية وككاشفات في الاتصالات عبر الالياف البصرية . وفي مثل هذه التطبيقات يجب ان تكون حساسية الكاشفات عالية عند موجات التشغيل وان تكون استجابتها سريعة وضبة الضوضاء واطئة . وفضلاً عن ذلك يجب ان يكون الكاشف مكتنزاً ويتطلب تيار او فولتية انحياز واطئة ويكون ذو موثوقية عمل عالية عند ظروف التشغيل .

1 الموصل الضوئي : Photoconductor

الموصل الضوئي ماهو الا قطعة من شبه موصل ذات تماس اومي عند النهايتين وكما مبين ذلك في الشكل التالي . فعند سقوط الضوء على السطح الموصل الضوئي تتولد ازواج من الالكترون – الثقب اما نتيجة انتقاله من حزمة – الى حزمة (انتقالة جوهرية – **intrinsic**) او بانتقالة تشترك فيها مراتب الطاقة في الفجوة المحظورة (انتقالية خارجية **extrinsic**) مؤدية بذلك الى زيادة في التوصيلية .

في الموصل الضوئي الجوهري تتحدد التوصيلية بالمعادلة :

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$$



مخطط توضيحي لموصل ضوئي مكون من قطعة من شبه موصل له تماس اومي عند النهايتين

2. الثنائي الضوئي : Photodiode

الثنائي الضوئي ماهو في الاساس الا مفرق p–n يعمل تحت انحياز عكسي . وعندما تسقط الاشارة البصرية على الثنائي الضوئي فان منطقة النضوب تقوم بفصل ازواج الالكترون ـ الثقب المتولدة ويسرى التيار في الدائرة الخارجية . ويتطلب التشغيل عند الترددات العالية بان تكون منطقة النضوب ضيقة وذلك للتقليل من زمن العبور . ومن جهة اخرى يتطلب رفع الكفاءة الكم ان تكون طبقة النضوب سميكة بالدرجة التي تسمح بامتصاص نسبة كبيرة من الضوء الساقط . وبذلك يجب ان يكون هنالك موازنة بين سرعة الاستجابة وكفاءة الكم .

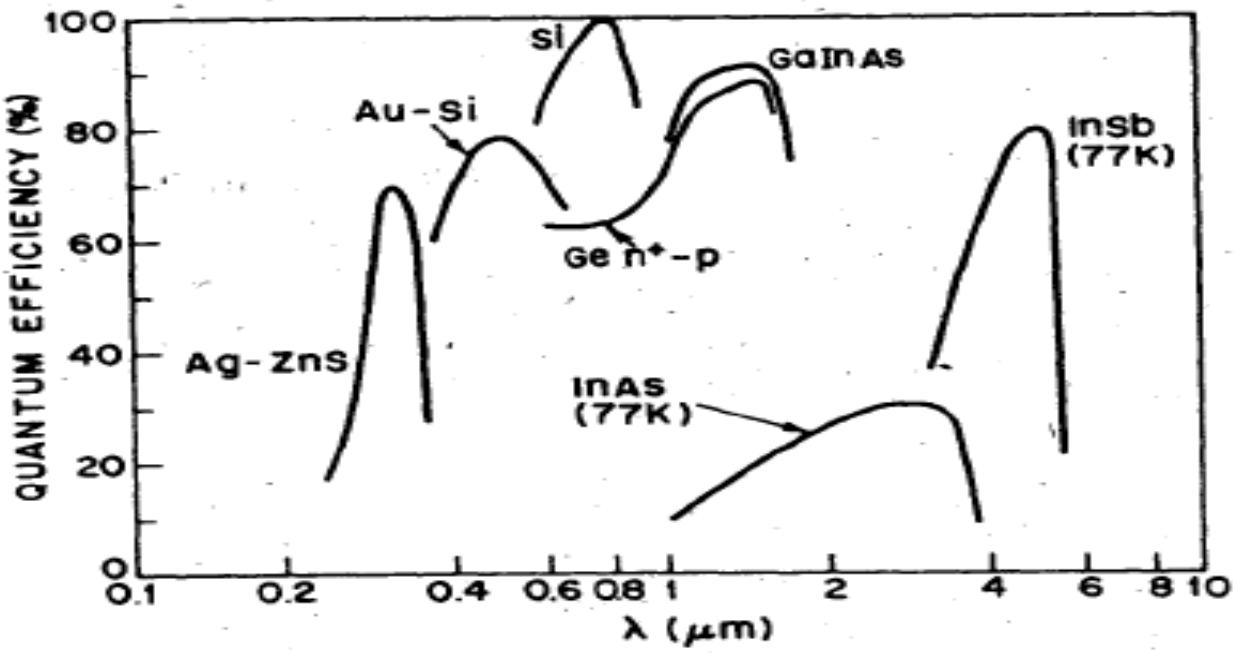
كفاءة الكم : Quantum Efficiency

ذكرنا سابقاً ان كفاءة الكم هي عدد ازواج الالكترون ـ الثقب المتولدة عن كل

$$\eta = \left[\frac{I_p}{q}\right]\left[\frac{P_{opt}}{h\nu}\right]^{-1}$$

فوتون حيث ان I_p هو التيار المتولد عن الضوء نتيجة امتصاص القدرة البصرية P_{opt} عند الطول الموجي λ (الموافق لطاقة الفوتون $h\nu$. ان من العوامل الاساس التي تحدد η هو عامل الامتصاص α

يبين الشكل التالي منحنيات نموذجية لتغير كفاءة الكم مع الطول المَوجي لثنائيات ضوئية ذات سرعة عالية[17,18] . ويلاحظ ان للثنائيات الضوئية المؤلفة من معدن ـ شبه موصل كفاءة كم عالية في المنطقة فوق البنفسجية والمرئية .



كفاءة الكم بدلالة الطول الموجي لكاشفات ضوئية مختلفة

كفاءة كم تصل الى 10 % في المنطقة تحت الحمراء القريبة **0.8 – 0.9-μm** . واما في منطقة **1.0 – 1.6-μm** تظهر ثنائيات الجيرمانيوم وثنائيات المركب **III–V** (مثلاً **GaInAs**) كفاءات عالية . وحتى عند الموجات الاطول يمكن الحصول على كفاءة تشغيل عالية بتبريد الثنائيات الضوئية (مثلاً الى درجة **77 K**).

سرعة الاستجابة : Response Speed

تتحدد سرعة الاستجابة بثلاثة عوامل :

(1) انتشار الحاملات .

(2) زمن الانجراف في منطقة النضوب

(3) متسعة منطقة النضوب . فالحاملات المتولدة خارج منطقة النضوب يجب ان تنتشر نحو المفرق مسببة بذلك تأخيراً ملحوظاً . ولاجل تقليل التأخير بسبب الانتشار يجب ان يكون المفرق قريباً من السطح . ويتم امتصاص اكبر مقدار من الضوء عندما تكون منطقة النضوب ذات عرض كاف . الاّ ان عرض طبقة النضوب يجب ان لاتكون عريضة جداً والاّ فان تأثيرات زمن العبور تحدد الاستجابة الترددية . وكذلك يجب ان لاتكون طبقة النضوب رقيقة والاّ فان السعة C المتزايدة تزيد ثابت الزمن RC حيث R هو مقاومة الحمل .

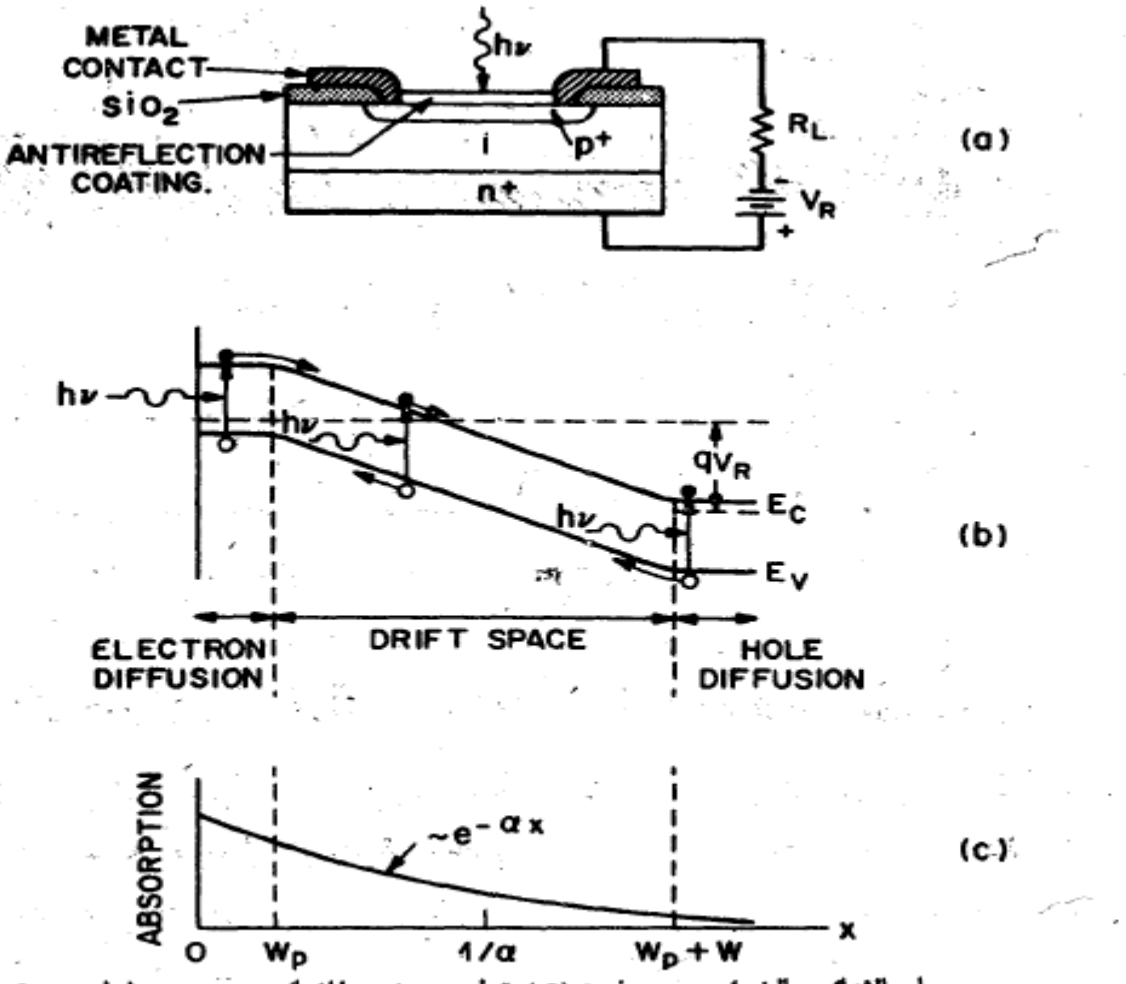
والحل الامثل يكمن في جعل عرض طبقة النضوب بحيث يكون زمن عبور الطبقة مساوياً لنصف زمن التضمين . فمثلاً اذا كان تردد التضمين **2 GHz** فان السمك المثالي لطبقة النضوب في السليكون (حيث سرعة الاشباع تساوي **10^7 cm/s** هو **25 μm**

أنواع الثنائي الضوئي :

أ- **الثنائي الضوئي نوع p–i–n**

الثنائي الضوئي *p–i–n* هو من اكثر الكاشفات الضوئية شيوعاً وذلك لامكان تغيير سمك منطقة النضوب (الطبقة الجوهرية i) للحصول على كفاءة الكم والاستجابة الترددية المثلى ويبين الشكل (*a*) مقطعاً عرضياً لثنائي ضوئي نوع *p–i–n* ويشمل على طبقة مانعة للانعكاس لرفع كفاءة الكم .

. يبين الشكلان *b* و *c* مخطط حزمة الطاقة لثنائي *p–i–n* تحت انحياز عكسي ومميزات الامتصاص البصري. ان امتصاص الضوء من قبل شبه الموصل يؤدي الى توليد ازواج من الكترون – ثقب . ويقوم المجال الكهربائي بفصل الازواج المتولدة في منطقة النضوب والمنطقة الواقعة في مدى طول الانتشار . وكما هو مبين في الشكل *b* مسبباً بذلك سريان التيار في الدائرة الخارجية مع انسياق الحاملات عبر منطقة النضوب .



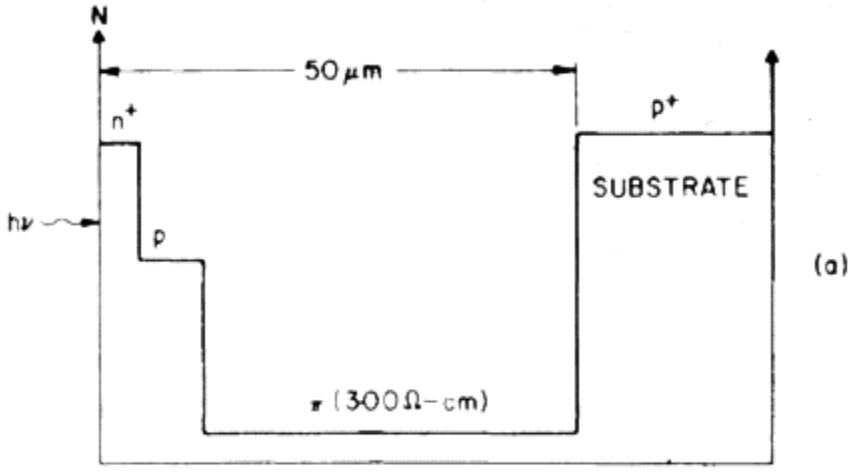
عمل الثنائي الضوئي *p–i–n* (a) مقطع عرضي للثنائي (b) مخطط حزمة الطاقة تحت انحياز عكسي (c) مميزات امتصاص الحاملات .

ب – **ثنائي ضوئي معدن – شبه موصل** : وهو مفيد بخاصة في منطقتي فوق البنفسجي والمرئية التي يكون فيها عامل الامتصاص α في اشباه الموصلات الأكثر شيوعا عاليا جدا بحدود $10^4\ cm^{-1}$ او اكثر.

ج- **الثنائي الضوئي متباين المفرق** : وهو مهم للنبائط الفوتوالكترونية التي تعمل للموجات الطولية بمدى 0.65 μm الى 0.85μm .

3 الثنائي الضوئي التيهوري : Avalanche Photodiode

يعمل الثنائي الضوئي التيهوري (APD) بانحياز عكسي بفولتية تكفي لحدوث تضاعف تيهوري . ويؤدي التضاعف الى كسب تيار داخلي ويمكن للنبيطة ان تستجيب لضوء مضمن بترددات عالية تصل الى ترددات الموجات الدقيقة .



الشكل الثنائي الضوئي التيهوري السليكوني

5 الخلية الشمسية : SOLAR CELL

يستفاد من الخلايا الشمسية في التطبيقات الارضية والفضائية : فالخلايا الشمسية تقوم بتجهيز قدرة للتوابع الارضية لفترة طويلة . وتعد الخلية الشمسية بديلاً محتملاً قوياً لمصدر الطاقة للاستخدامات الارضية لانها تستطيع ان تحول الطاقة الشمسية مباشرة الى طاقة كهربائية بكفاءة تحويل جيدة ولانها تستطيع تجهيز قدرة تكاد تكون دائمية بتكاليف تشغيل واطئة كما انها لاتسبب التلوث[23] .