

مواد فوتونية

- 1- مقدمة : مجال الفوتونيك و المواد الفوتونية
- 2- مفاهيم أساسية في مجال الضوء : طبيعة الضوء كفوتون – طبيعة الضوء كموجة
- 3- مجال الضوء و معادلات ماكسويل
- 4- الخواص الضوئية للمواد : الحساسية الكهربائية – ثابت العزل
- 5- قرينة الانكسار و التشتت
- 6- سرعة الطور – سرعة المجموعة
- 7- قوانين Snell-Descarte و الانعكاس الكلي
- 8- معاملات الانعكاسية و النفاذية
- 9- امتصاص الضوء و قرينة الانكسار المركبة
- 10- أمثلة على مواد فوتونية
- 11- أنصاف النواقل كمواد فوتونية
- 12- الامتصاص الضوئي و المواد كاشفة للضوء
- 13- الاجهزة الفوتونية – الثنائية الباعثة للضوء (LED)
- 14- ثنائية الليزر
- 15- الخلايا الشمسية

المواد الفوتونية = المواد من أجل الفوتونيك

Photonic materials = materials for
photonics

الفوتونيك: مجال يدرس تفاعل الضوء مع المادة
عبر جسيماتها (الالكترونات) و ما ينتج عن ذلك
من ظواهر فيزيائية مثل : تولد (generation) ،
إنتشار (propagation) ، تعديل (modulation)
تضخيم (Amplification) ، أو كشف
(Detection) للضوء.

المواد الفوتونية (او الضوئية) : تتضمن مجالا لا حصر له من المواد التي تتفاعل مع الضوء (الفوتونات) من خلال إظهار خواص فيزيائية معينة و سلوكيات في أثناء تفاعلها مع الضوء و ما ينتج عن ذلك من ظواهر فيزيائية مثل : تولد (generation) ، إنتشار (propagation) ، تعديل (modulation) ، تضخيم (Amplification) ، أو كشف (Detection) للضوء .
Photonic (optical) materials

تتضمن **المواد الفوتونية** مجالا واسعا من المواد
مثل أنصاف النواقل (السياليكون Si - الجرمانيوم
Ge - الخلائط III-V - أنصاف النواقل العضوية
(...) ، العوازل (Dielectrics) - البلورات
الفوتونية (Photonic crystals) ، الزجاج
(glasses)

مفاهيم أساسية في مجال الضوء: الضوء هو اشعاع كهرو-

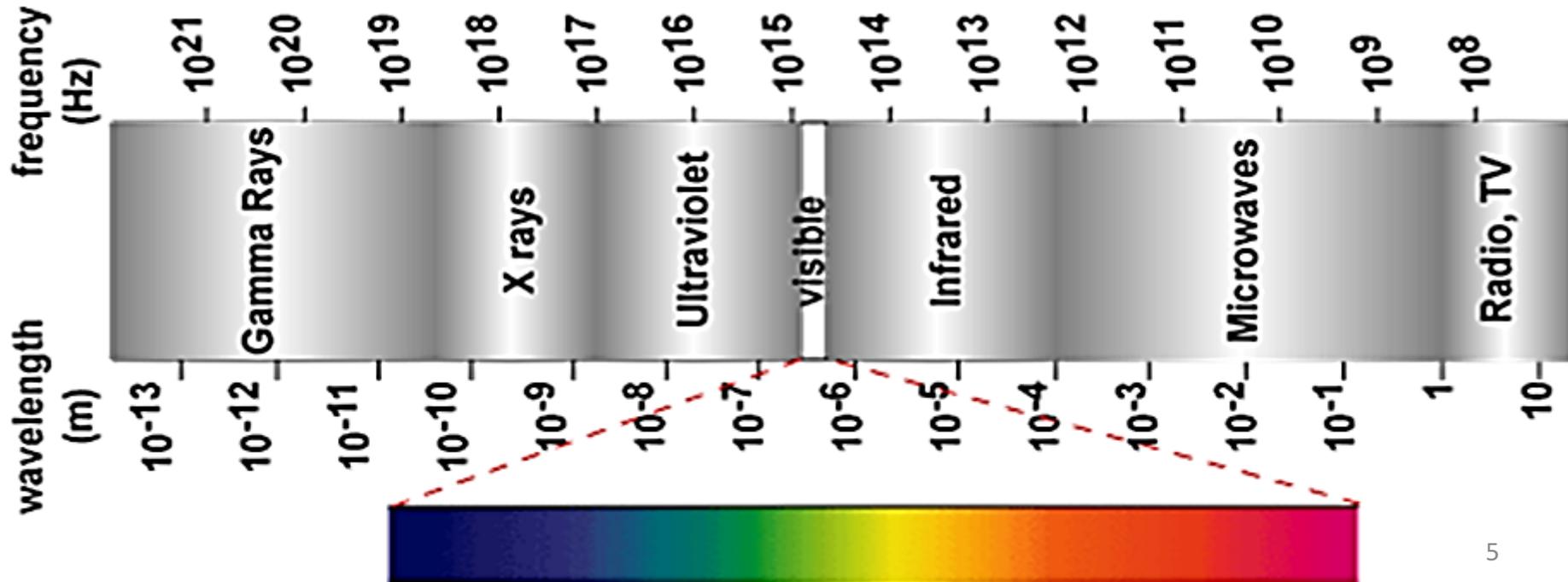
مغناطيسي ذو ترددات في المجال (من 1 TéraHertz

إلى 10^{16} Hz) (Petahertz= 10^{16} Hz) ما

يوافق طول موجة $300\mu\text{m}$ إلى حوالي 30 nm ما يعني أن

الضوء مقسم بين الأشعة ما تحت الحمراء ، المرئية و فوق

البنفسجية



في هذه المنطقة من الطيف ، الاشعاع الكهرومغناطيسي يظهر الطبيعة المزدوجة للضوء كفوتون و موجة. **طبيعة الضوء كفوتون** تتجلى في ظواهر مثل التولد، التضخيم ، كشف الضوء ، و **الطبيعة الموجية للضوء** تتجلى في أغلب الظواهر خاصة الانتشار، النفاذية التداخل، الانعراج أو تعديل الضوء.

في طبيعة الضوء كفوتون، تعرف **طاقة الفوتون** التي تحدد إما بالتردد ν أو بالتردد الزاوي $\omega = 2\pi\nu$ ، بالترافق مع طبيعة الفوتون الجسيمية، يملك هذا الأخير **اندفاع** محدد بطول الموجة λ أو بالشعاع الموجي k ، هذه الخصائص ملخصة كما يلي : **$c = \lambda\nu$ سرعة الفوتون** ، **$E = h\nu = \hbar\omega = pc$ طاقة الفوتون** ، و اندفاع الفوتون

$$p = h/\lambda = h\nu/c = \hbar k$$

طاقة الفوتون تحسب بالعبارة

$$E = h\nu = 1.2398 (\mu m. eV) / \lambda(\mu m)$$

$$E = h\nu = 1239.8 (nm. eV) / \lambda(nm)$$

تعرف كذلك الشدة الضوئية I للضوء. هذه الأخيرة ترتبط بالكثافة السطحية (cm^{-2}) **لتدفق الفوتونات** (عدد الفوتونات في وحدة المساحة

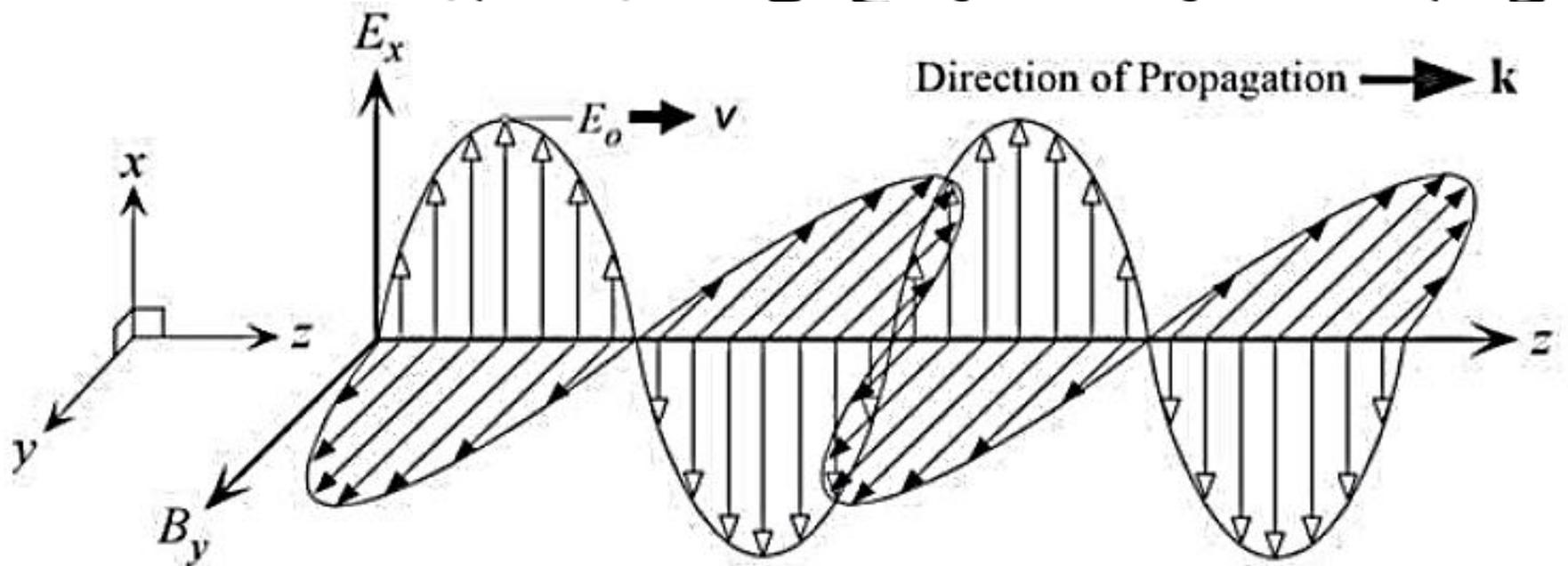
و الزمن) حسب المعادلة $\phi(cm^{-2}s^{-1}) = \frac{I}{hv} = \frac{I}{\hbar\omega}$ لضوء أحادي طول الموجة. و تدفق الفوتونات الكلي (عدد الفوتونات في وحدة الزمن) لحزمة ضوء أحادي طول الموجة مرتبط بالاستطاعة الضوئية للحزمة P (*Watt*) حسب المعادلة :

$$\Phi_{tot}(s^{-1}) = S \cdot \phi = \frac{S \cdot I}{hv} = \frac{P}{hv}$$

حيث S مساحة مقطع حزمة الضوء (cm^2)، إذن الشدة الضوئية I هي الكثافة السطحية للاستطاعة الضوئية P :

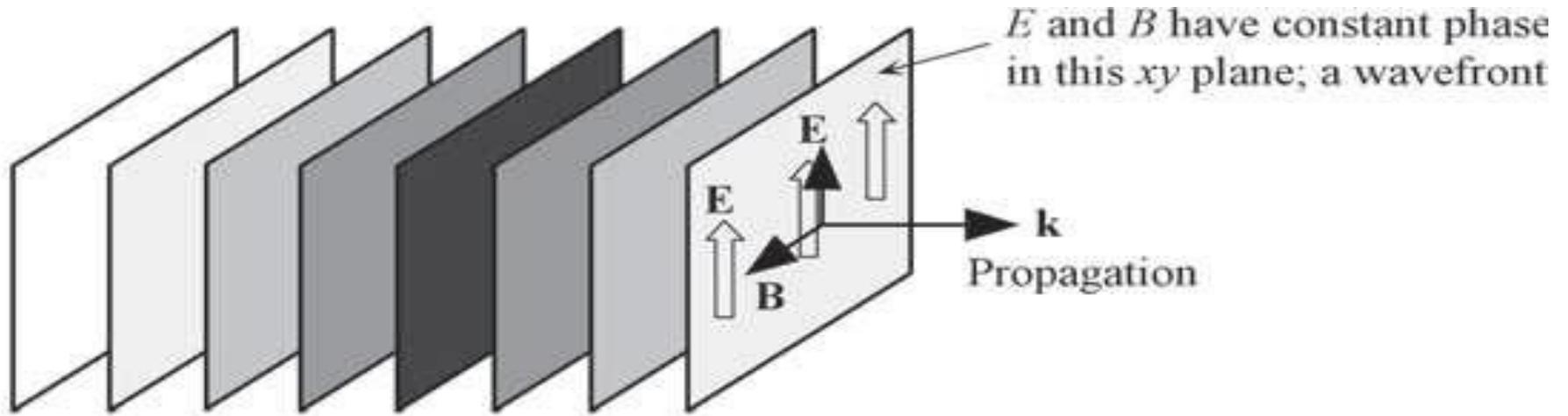
$$I(Watt/cm^2) = \frac{P}{S}$$

ينظر للضوء **حسب الطبيعة الموجية** له بأنه موجة كهرومغناطيسية أي تراكب بين حقل كهربائي E_x و حقل مغناطيسي B_y متغيران مع الزمن و منتشران عبر الفضاء بطريقة يكونان متعامدان فيما بينهما و عموديان على اتجاه الانتشار z كما موضح فى الشكل المقابل :



أبسط صيغة للموجة الكهرومغناطيسية هي لموجة جيبية منتشرة وفق الاتجاه oz : $E_x = E_0 \cos(\omega t - kz + \phi_0)$ حيث E_x الحقل الكهربائي عند الوضع z عند الزمن t , $k = 2\pi/\lambda$ ثابت الانتشار أو الشعاع الموجي. ω التردد الزاوي، E_0 سعة الموجة، ϕ_0 ثابت الطور

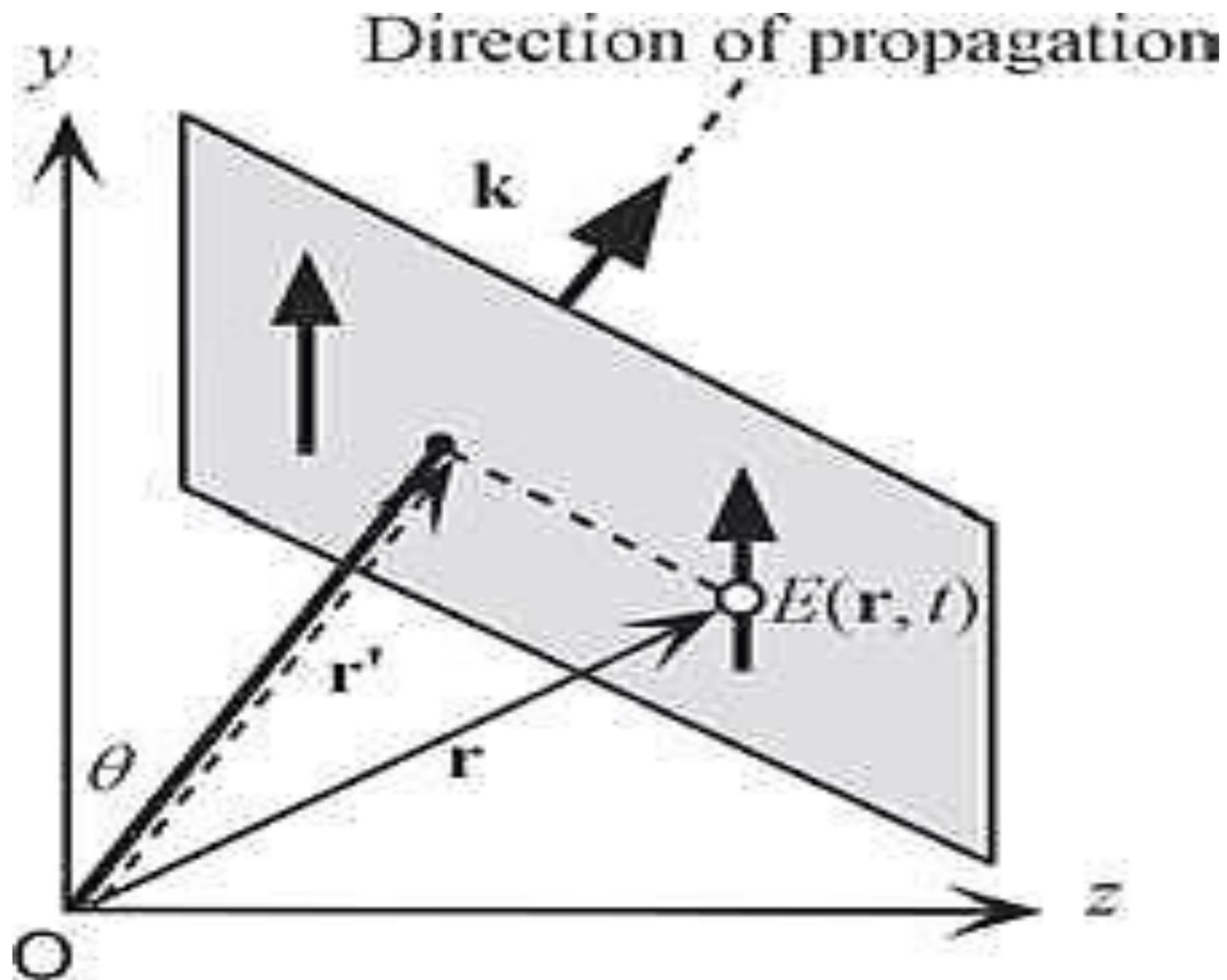
الحقل الكهربائي E_x يرافقه حقل مغناطيسي B_y بنفس التردد و ثابت الانتشار (ω, k) لكنه معامد لكل من الحقل و اتجاه انتشار الموجة.



إذا انتشرت الموجة الكهرومغناطيسية وفق اتجاه كيفي k ، الحقل الكهربائي في نقطة كيفية r هو

$$E(r, t) = E_0 \cos(\omega t - k \cdot r + \phi_0)$$

الجداء السلمي $k \cdot r = k_x \cdot x + k_y \cdot y + k_z \cdot z$ هو في اتجاه انتشار الموجة و جبهة الموجة التي تحتوي النقطة r هي عمودية على k



تعرف سرعة الطور $V = \frac{\omega}{k} = v\lambda$

من أجل موجة كهرومغناطيسية تنتشر في الفراغ فإن سرعة الطور هي سرعة الضوء في الفراغ $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

مجال الضوء و معادلات ماكسويل: في وسط مميز بعدة خواص كهرو-مغناطيسية، المجال الضوئي أو الكهرومغناطيسي مميز بالحقول التالية:

الحقل الكهربائي *electric field* $E(\mathbf{r}, t)$ V m^{-1} ,

الإزاحة أو العزل الكهربائي *electric displacement* $D(\mathbf{r}, t)$ C m^{-2} ,

الحقل المغناطيسي *magnetic field* $H(\mathbf{r}, t)$ A m^{-1} ,

الحث المغناطيسي *magnetic induction* $B(\mathbf{r}, t)$ T or Wb m^{-2} .

الازاحة D و الحقل المغناطيسي H هي حقول ماكروسكوبية تتضمن استجابة الوسط لحقل كهرومغناطيسي و هذه الاستجابة تولد كل من الاستقطابية (polarization) و التمغنط (magnetization)

polarization (electric polarization) $P(\mathbf{r}, t)$ $C m^{-2}$,
magnetization (magnetic polarization) $M(\mathbf{r}, t)$ $A m^{-1}$.

تعرف الازاحة D و الحقل المغناطيسي H كما يلي :

$$D(\mathbf{r}, t) = \epsilon_0 E(\mathbf{r}, t) + P(\mathbf{r}, t)$$

$$H(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\mu_0} B(\mathbf{r}, t) - M(\mathbf{r}, t)$$

$$\epsilon_0 \cong \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} F m^{-1} = 8.854 \times 10^{-12} F m^{-1}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H m^{-1}$$

في وسط ما ، التصرف تبعاً للتغير مع الزمن للحقل الكهرومغناطيسي،
معبّر عنه بمعادلات **ماكسويل الماكرو سكوبية** المتعلقة بالفضاء و الزمن

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Faraday's law,}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Ampere's law,}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \text{Coulomb's law,}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{absence of magnetic monopoles.}$$

التيار و كثافات الشحنة مترابطة فيما بينها بمعادلة الاستمرار:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{conservation of charge.}$$

في وسط خالي من منابع للتيار أو الشحن، $J = 0$ & $\rho = 0$ ، تصبح معادلات ماكسويل أبسط :

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t},$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t},$$

$$\nabla \cdot D = 0,$$

$$\nabla \cdot B = 0.$$

عادة ما تستخدم في مجال الضوء معادلات ماكسويل الأخيرة لأن الحقول الضوئية لا تتولد مباشرة من قبل التيارات الحرة أو الشحن الحرة

معادلة ماكسويل للموجة: ندخل الجداء الشعاعي على معادلة فارادي

$$\nabla \times \nabla \times E = \nabla \times \left(-\frac{\partial B}{\partial t} \right) = \nabla \times \left(-\frac{\partial \mu_0 H}{\partial t} \right)$$

$$\nabla \times \nabla \times E = \mu_0 \left(-\frac{\partial(\nabla \times H)}{\partial t} \right) \text{ وكذلك } \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \text{ إذن}$$

$$\nabla \times \nabla \times E = -\mu_0 \left(\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} \right) \text{ ولدينا } D(r, t) = \epsilon_0 E(r, t) + P(r, t)$$

$$\text{و منه: } \nabla \times \nabla \times E + \mu_0 \epsilon_0 \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) = -\mu_0 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \right) \text{ و حيث أن } c = \frac{1}{\sqrt{(\mu_0 \epsilon_0)}}$$

$$\text{إذن } \nabla \times \nabla \times E + \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) = -\mu_0 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \right) \text{ ، } c = \frac{1}{\sqrt{(\mu_0 \epsilon_0)}} \cong 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

هي معادلة الموجة التي تصف تغير الحقل الكهربائي للموجة الضوئية مع الزمن و الفضاء في حالة **موجة ضوئية أحادية طول الموجة تنتشر في وسط متمائل المناحي** ، لدينا

$$D(r, t) = \epsilon(\omega). E(r, t) \text{ و } P(r, t) = \epsilon_0 \chi(\omega). E(r, t)$$

كل من السماحية χ و ثابت العزل ϵ تمثلان استجابة الوسط للحقل الضوئي من خلال الاستقطابية الكهربائية P و الازاحة D ، و في وسط متمائل المناحي ، ϵ و χ قيم سلمية متغيرة فقط مع تردد ω للموجة الضوئية أحادية طول الموجة

تصبح معادلة إنتشار الموجة:

$$\nabla \times \nabla \times E + \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) = -\mu_0 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \right) = -\mu_0 \left(\frac{\partial^2 (\epsilon_0 \chi(\omega) \cdot E)}{\partial t^2} \right)$$

$$\nabla \times \nabla \times E + \mu_0 \epsilon_0 (1 + \chi(\omega)) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) = 0$$

و منه تصبح معادلة $\nabla \times \nabla \times E + \underbrace{\mu_0 \epsilon_0 (1 + \chi(\omega))}_{\epsilon(\omega)} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) = 0$

انتشار الحقل الضوئي : $\nabla \times \nabla \times E + \mu_0 \epsilon(\omega) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) = 0$

$\epsilon(\omega)$ تؤول إلى قيمة سلمية في وسط متماثل المناحي و لدينا $\nabla \cdot E = \frac{\nabla \cdot D}{\epsilon(\omega)}$

$$\nabla \times \nabla \times E = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2(E) = -\nabla^2(E)$$

في حالة $\nabla \cdot E = \frac{\nabla \cdot D}{\epsilon(\omega)} = 0$ و تصبح معادلة انتشار موجة الحقل الضوئي

$$\nabla^2 E - \mu_0 \epsilon(\omega) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) = 0$$

الخواص الضوئية للمواد: الاستقطابية $P(r, t)$ و المغنطة $M(r, t)$ تتولدان في وسط معين نتيجة استجابة هذا الأخير للحقول الكهربائية و المغناطيسية، حيث تتعلق الاستقطابية بالحقل الكهربائي من خلال **الحساسية الكهربائية χ للوسط:**

$$P(k, \omega) = \varepsilon_0 \chi(k, \omega) \cdot E(k, \omega)$$

و الازاحة تتعلق بالحقل الكهربائي من خلال **ثابت العزل ε**

$$D(k, \omega) = \varepsilon_0 [1 + \chi(k, \omega)] \cdot E(k, \omega) = \varepsilon(k, \omega) \cdot E(k, \omega)$$

كل من ε و χ تمثلان استجابة الوسط للحقل

الضوئي و هي عبارة عن موترات (Tensors) في الحالة العامة أين

يكون الوسط بلوري **غير متماثل المناحي (material anisotropy)**،

بمعنى الأشعة P و D لا تكون موازية لشعاع الحقل E ، أما في حالة وسط

متماثل المناحي (isotropic medium) تتوازي الأشعة و تؤول

كل من الحساسية و ثابت العزل إلى قيم سلمية.

حالة وسط غير متماثل المناحي: كما ذكرنا كل من السماحية χ و ثابت العزل ϵ هي موترات من الدرجة 2 يمكن نعبر عنها في صيغة مصفوفة كما يلي

$$\chi = \begin{pmatrix} \chi_{11} & \chi_{12} & \chi_{13} \\ \chi_{21} & \chi_{22} & \chi_{23} \\ \chi_{31} & \chi_{32} & \chi_{33} \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad \epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix}$$

و كل من $P = \epsilon_0 \chi \cdot E$ و $D = \epsilon \cdot E$ تكتب كجاء موتر و شعاع:

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \epsilon_0 \begin{pmatrix} \chi_{11} & \chi_{12} & \chi_{13} \\ \chi_{21} & \chi_{22} & \chi_{23} \\ \chi_{31} & \chi_{32} & \chi_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}$$

قرينة الانكسار و التشتت: عند إنتشار موجة كهرومغناطيسية في وسط عازل، الحقل الكهربائي المهتز يستقطب جزيئات الوسط عند تردد موجته، انتشار موجة الحقل يعتبر انتشار لهذا الاستقطاب عبر الوسط، **السماحية الكهربائية النسبية** ϵ_r تعتبر **قياس لمدى سهولة استقطاب الوسط** و تشير إلى مدى امتداد التفاعل بين الحقل الكهربائي المنتشر و ثنائيات القطب الناتجة عن الاستقطاب. في حالة وسط عازل غير ممغنط و متماثل المناحي، السماحية تكون قيمة سلمية مستقلة عن اتجاه انتشار الموجة الضوئية التي تبسط معادلة انتشارها إلى

$$\nabla^2 E - \mu_0 \epsilon(\omega) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) = 0$$

معادلة الانتشار لماكسويل :

و لكن لأنها تنتشر في وسط مادي (لا الفراغ) **فسرعة طورها V** سوف تكون أقل من سرعة طورها في الفراغ ($c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \cong 3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$) نظرا

لتأثرها بالسماحية الكهربائية التي تصبح في الوسط $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ بالتالي

$$V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{n}$$

نعرف من هنا **قرينة انكسار الوسط n**

$$n = \frac{c}{V} = \sqrt{\epsilon_r}$$

كل من طول موجة الضوء المنتشر (λ) و شعاعه الموجي (k) سوف يتغيران حال انتشار الضوء في الوسط تبعاً لقرينة انكساره:

$$k_{medium} = 2\pi/\lambda_{medium} = n \cdot k \text{ و } \lambda_{medium} = \lambda/n$$

الضوء ينتشر بطيئاً السرعة في وسط كثيف ذا قرينة انكسار عالية،

السماحية النسبية ϵ_r متأثرة بطول موجة الضوء المنتشر أو تردده وكذلك

تكون قرينة الانكسار $n = \sqrt{\epsilon_r}$ بالنسبة لنفس التردد، بالتالي قيم كل من

ϵ_r و n قد تختلف بين مجال الترددات المنخفضة و المرتفعة. في مجال

الترددات المنخفضة كل آليات الاستقطاب الحاضرة في المادة تساهم في قيمة ϵ_r

أما في الترددات الضوئية، فقط الاستقطابية الكهربائية هي التي تستجيب للحقل

الضوئي المهتز. الجدول التالي يعطي قياسات لـ $\epsilon_r(LF)$ عند ترددات منخفضة

(عند 60Hz أو 1kHz) من أجل مواد مختلفة و مقارنة $\sqrt{\epsilon_r(LF)}$ مع n .

هناك تقارب جيد بين n و $\sqrt{\epsilon_r(LF)}$ من أجل السيليكون و الماس اللذان

يملكان روابط تساهمية و التي فيها الاستقطابية الكهربائية الالكترونية

(استقطابية الروابط الالكترونية) هي الوحيدة المساهمة في آلية الاستقطابية

سواءً في الترددات المنخفضة أو العالية، الاستقطابية الكهربائية الالكترونية

تتضمن انزياح الالكترونات بالضوء عن الايونات الموجبة للبلور و هذه الآلية تستجيب لاهتزازات الحقل في الترددات الضوئية و فوق البنفسجية.

من أجل SiO_2 و GaAs ، $\sqrt{\epsilon_r(LF)}$ أكبر من قرينة الانكسار n عند الترددات المنخفضة لأن هذه المواد تملك درجة من استقطاب ايوني، الروابط في هذه المواد ليست تساهمية بشكل كامل و هناك درجة من الروابط الأيونية التي تساهم في الاستقطابية عند الترددات أسفل الاطوال الموجية للأشعة تحت الحمراء البعيدة.

TABLE 1.1 Low-frequency (LF) relative permittivity $\epsilon_r(LF)$ and refractive index n

Material	$\epsilon_r(LF)$	$[\epsilon_r(LF)]^{1/2}$	n (at λ)	Comment
Si	11.9	3.44	3.45 (at 2.15 μm)	Electronic bond polarization up to optical frequencies
Diamond	5.7	2.39	2.41 (at 590 nm)	Electronic bond polarization up to UV light
GaAs	13.1	3.62	3.30 (at 5 μm)	Ionic polarization contributes to $\epsilon_r(LF)$
SiO_2	3.84	2.00	1.46 (at 600 nm)	Ionic polarization contributes to $\epsilon_r(LF)$

تغير ϵ_r و n بدلالة تردد أو طول الموجة يسمى عبارة التشتت (dispersion) و هناك عدة نماذج نظرية و تجريبية لعبارة التشتت $n(\lambda)$ نذكر منها عبارة التشتت لكوشي Cauchy dispersion equation:

حيث $n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$ ثوابت تتغير من مادة إلى أخرى

عبارة التشتت لكوشي المعممة (General Cauchy equation):

$$n(h\nu) = n_{-2}(h\nu)^{-2} + n_0 + n_2(h\nu)^2 + n_4(h\nu)^4$$

حيث $h\nu$ طاقة الفوتون و n_{-2}, n_0, n_2, n_4 ثوابت تتغير من مادة إلى أخرى
عبارة التشتت لـ Sellmeier:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{A_1\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{A_2\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{A_3\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2}$$

عدا طول الموجة ، المقادير في العبارة ثوابت تتغير من مادة إلى أخرى و مقادير هذه الثوابت موضحة في الجدول أسفله :

TABLE 1.2 Sellmeier and Cauchy coefficients

Sellmeier	A_1	A_2	A_3	λ_1 (μm)	λ_2 (μm)	λ_3 (μm)
SiO ₂ (fused silica)	0.696749	0.408218	0.890815	0.0690660	0.115662	9.900559
86.5%SiO ₂ -13.5%GeO ₂	0.711040	0.451885	0.704048	0.0642700	0.129408	9.425478
GeO ₂	0.80686642	0.71815848	0.85416831	0.068972606	0.15396605	11.841931
Sapphire	1.023798	1.058264	5.280792	0.0614482	0.110700	17.92656
Diamond	0.3306	4.3356	–	0.1750	0.1060	–

Cauchy	Range of $h\nu$ (eV)	n_{-2} (eV ²)	n_0	n_2 (eV ⁻²)	n_4 (eV ⁻⁴)
Diamond	0.05–5.47	-1.07×10^{-5}	2.378	8.01×10^{-3}	1.04×10^{-4}
Silicon	0.002–1.08	-2.04×10^{-8}	3.4189	8.15×10^{-2}	1.25×10^{-2}
Germanium	0.002–0.75	-1.0×10^{-8}	4.003	2.2×10^{-1}	1.4×10^{-1}

Source: Sellmeier coefficients combined from various sources. Cauchy coefficients from D. Y. Smith *et al.*, *J. Phys. CM*, 13, 3883, 2001.

سرعة المجموعة: هي بالتعريف $V_g = \frac{d\omega}{dk}$ ، في الفراغ $\omega = c.k$ ومنه

سرعة الطور في الفراغ $= \frac{d\omega}{dk} = c = V_g$ (الفراغ) في الفراغ سرعة

المجموعة مساوية إلى سرعة الطور،

في وسط مادي **سرعة الطور تنقص تصبح** $V = \frac{c}{n}$ و بما أن الشعاع الموجي

أيضا يتغير $k = nk_0 = n.2\pi/\lambda_0$ حيث k_0 و λ_0 هما الشعاع الموجي

و طول الموجة في الفراغ. فالتردد الزاوي في وسط مادي $\omega = V.k$ يبقى

التردد نفسه التردد في الفراغ لأن كل من سرعة الطور و الشعاع الموجي

يتغيران في الوسط عن الفراغ و منه سرعة المجموعة في وسط مادي هي

$$V_g(\text{الوسط}) = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n(\lambda_0) - \lambda_0 \cdot \left(\frac{dn}{d\lambda_0}\right)} = \frac{c}{N_g}$$

حيث $N_g = n(\lambda_0) - \lambda_0 \cdot \left(\frac{dn}{d\lambda_0}\right)$ يعرف بقريئة المجموعة للوسط، بالتالي

في الحالة العامة قريئة الانكسار تتغير مع طول الموجة $n(\lambda)$ و بالتالي

كل من سرعة الطور ، سرعة المجموعة و قرينة المجموعة للوسط سوف تتغير بدلالة طول الموجة : $V(\lambda) = \frac{c}{n(\lambda)}$ ، $V_g(\lambda) = \frac{c}{N_g(\lambda)}$ و يسمى وسط

الانتشار بالوسط المشتت (dispersive medium). كمثل يوضح الشكل أسفله قرينة الانكسار n و قرينة المجموعة N_g بدلالة طول الموجة لأوكسيد السيليكون (SiO_2) الصافي الشائع استخدامه في الالياف البصرية

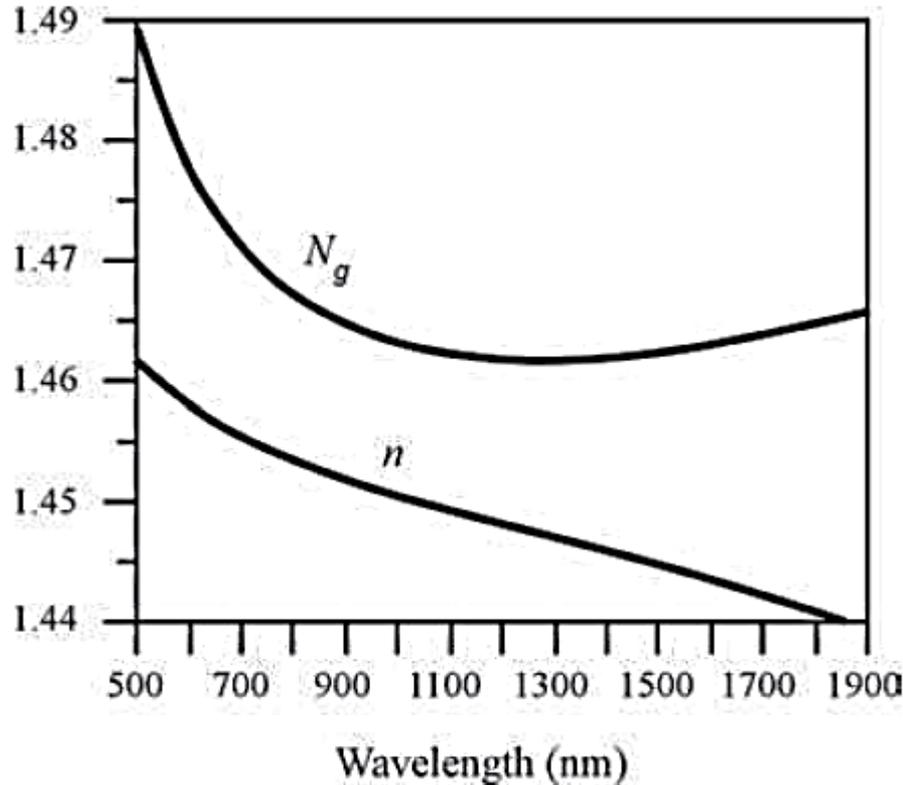


FIGURE 1.8 Refractive index n and the group index N_g of pure SiO_2 (silica) glass as a function of wavelength.

نعرف كذلك معامل تشتت سرعة المجموعة D :

$$D = c\omega \cdot \frac{d^2k}{d\omega^2} = \frac{2\pi c^2}{\lambda_0} \cdot \frac{d^2k}{d\omega^2} = \lambda_0^2 \cdot \frac{d^2n}{d\lambda_0^2}$$

إذن موجة ضوئية منتشرة في وسط مادي ، ترددتها الزاوي $\omega = ck_0$ لا يتأثر بالوسط ، في حين باقي المقادير تتأثر بالوسط و متغيرة كذلك بدلالة التردد ω ، مثل الشعاع الموجي

$$k(\omega) = k_0 \cdot n(\omega) = \frac{\omega}{c} \cdot n(\omega)$$

طول الموجة : $\lambda = \frac{\lambda_0}{n(\omega)}$ ، سرعة الطور $V(\omega) = \frac{\omega}{k(\omega)} = \frac{c}{n(\omega)}$

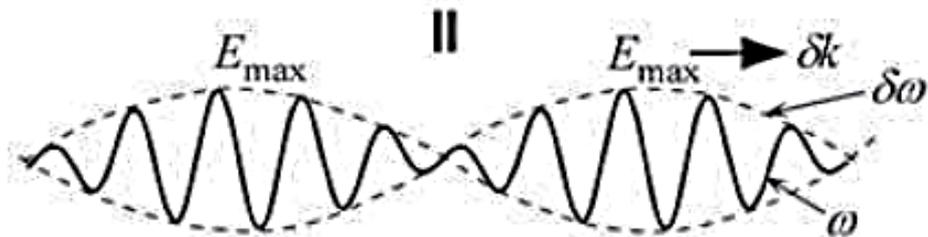
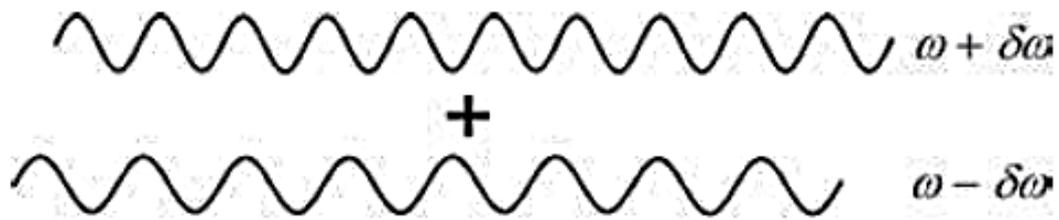
سرعة المجموعة $V_g(\omega) = \frac{c}{N_g(\omega)}$ أو $V_g(\lambda) = \frac{c}{N_g(\lambda)}$ حيث

$$N_g(\omega) = n(\omega) + \omega \cdot \left(\frac{dn}{d\omega}\right) \text{ و } N_g(\lambda_0) = n(\lambda_0) - \lambda_0 \cdot \left(\frac{dn}{d\lambda_0}\right)$$

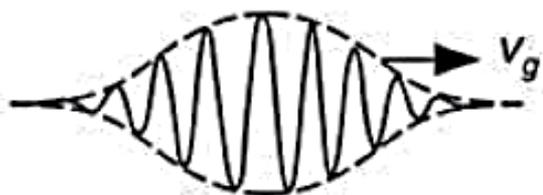
معامل تشتت سرعة المجموعة D :

$$D = \lambda_0^2 \cdot \frac{d^2n}{d\lambda_0^2} = \omega^2 \frac{d^2n}{d\omega^2}$$

المعنى الفيزيائي لسرعة المجموعة: عمليا ليس هناك أمواج أحادية طول الموجة بدقة ، تلك التي نعتبرها أمواج أحادية طول الموجة هي في الحقيقة حزمة أمواج مختلفة بشكل طفيف في أطوال موجاتها (أو تردداتها) لكنها متوافقة تنتشر في نفس الاتجاه و ما ينتج عن ذلك أن لحزمة الامواج سعة متغيرة تنتقل بما تعرف بسرعة المجموعة



A periodic wave packet



A single wave packet

FIGURE 1.7 Two waves of slightly different wavelengths traveling in the same direction result in a wave packet that has an amplitude variation which travels at the group velocity.

قوانين Descarte – Snell و الانعكاس الكلي: موجة كهرومغناطيسية تنتشر

من وسط 1 ذو قرينة انكسار n_1 نحو وسط 2 ذو قرينة انكسار n_2 سوف تعاني حسب قوانين Snell-Descarte من انكسار و انعكاس عند السطح الفاصل بين الوسطين كما موضح في الشكل

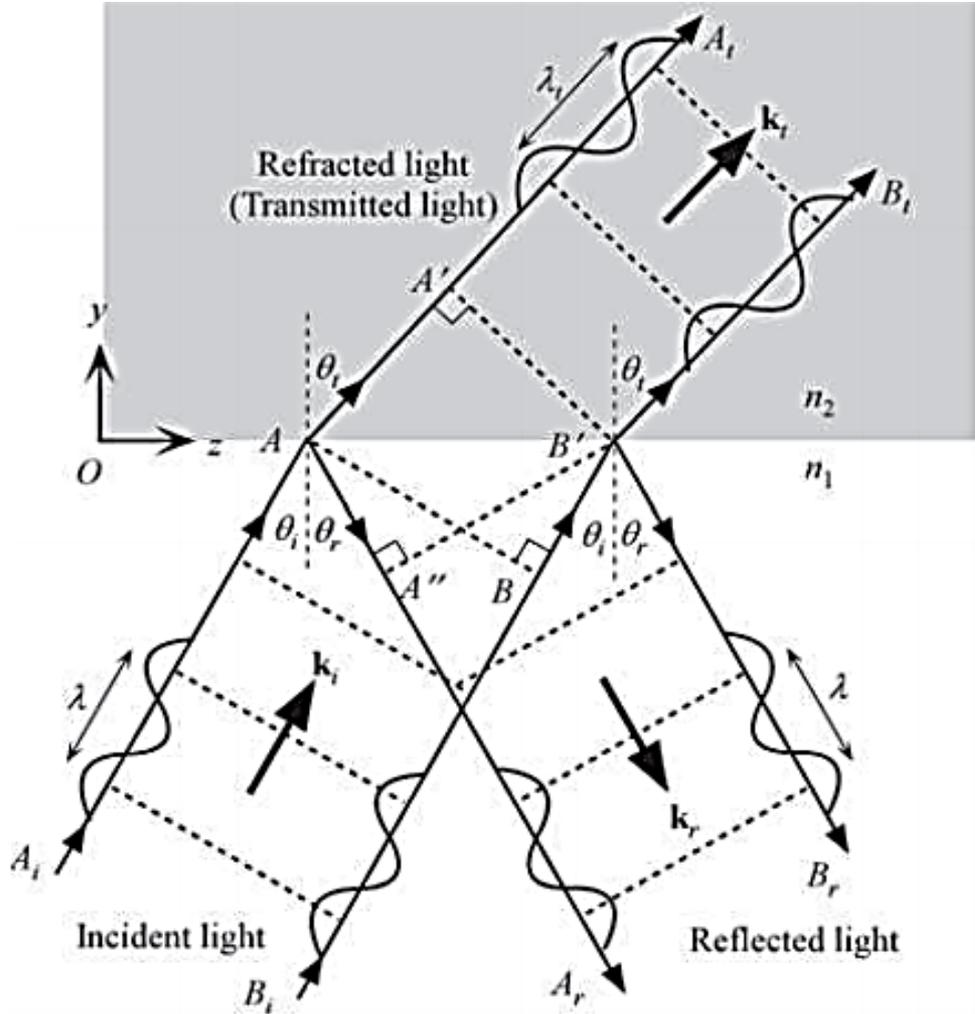
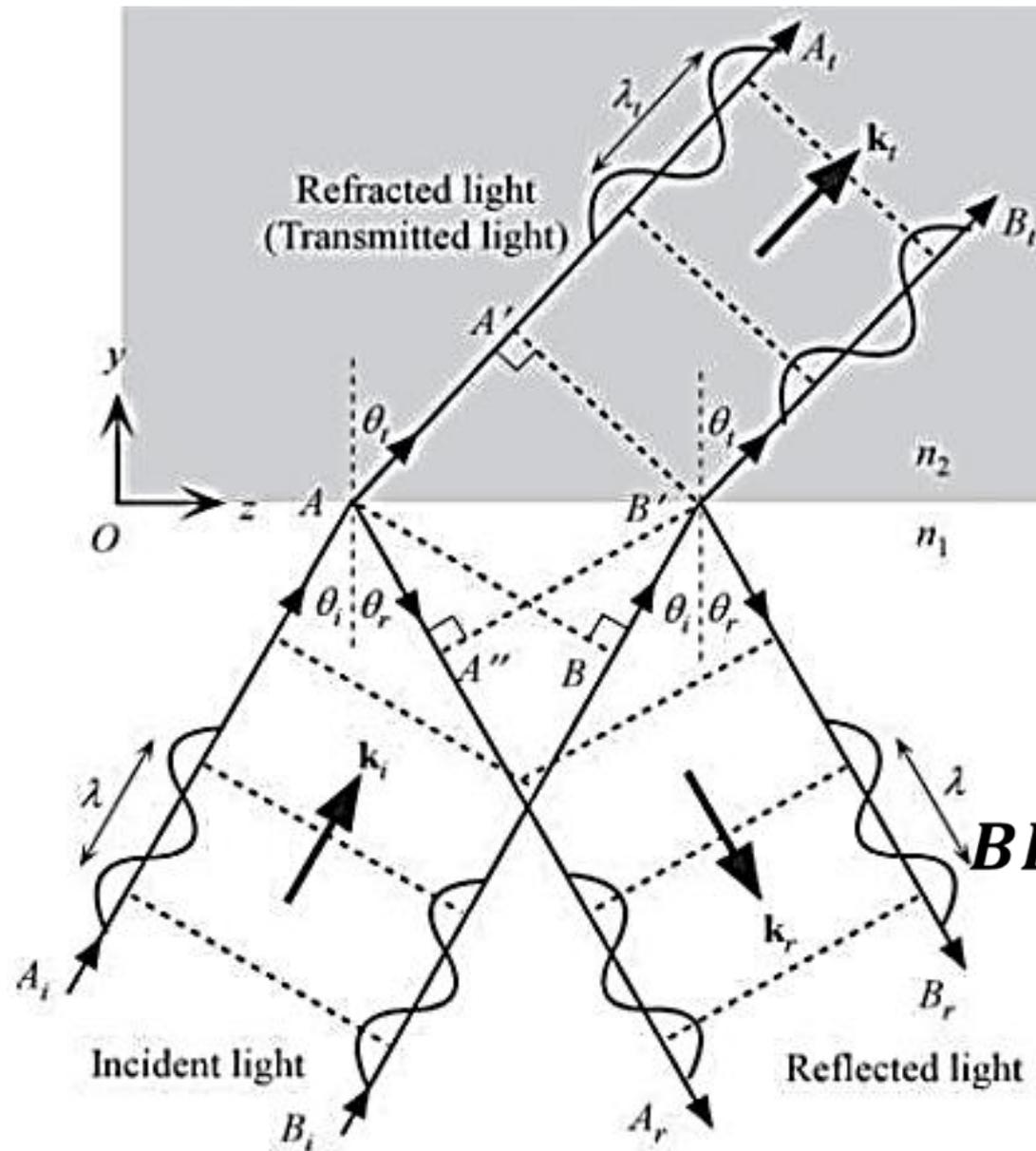


FIGURE 1.11 A light wave traveling in a medium with a greater refractive index ($n_1 > n_2$) suffers reflection and refraction at the boundary. (Notice that λ_r is slightly longer than λ .)



الموجة المنتشرة في الوسط
 1 ذو قرينة انكسار $n_2 < n_1$
 جبهتها عند الوضع AB في
 الوسط 1 تصبح عند الوضع
 A'B' في الوسط 2 ذو قرينة
 انكسار n_2 ، خلال الزمن t
 تكون الموجة المنتشرة من
 الموضع B إلى الموضع B'
 قد قطعت المسافة $BB' = V_1 t$
 حيث V_1 سرعة طور الموجة
 في الوسط 1 ، $BB' = V_1 t = \frac{c}{n_1} t$
 خلال نفس الزمن تكون الموجة
 قطعت المسافة AA' في الوسط
 2 حيث $AA' = V_2 t = \frac{c}{n_2} t$

باعتبار زاوية ورود (θ_i)
و انكسار (θ_t) الحزمة
الضوئية يكون لدينا من جهة

$$\sin(\theta_i) = \frac{BB'}{AB'}$$

من جهة ثانية

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_t\right) =$$

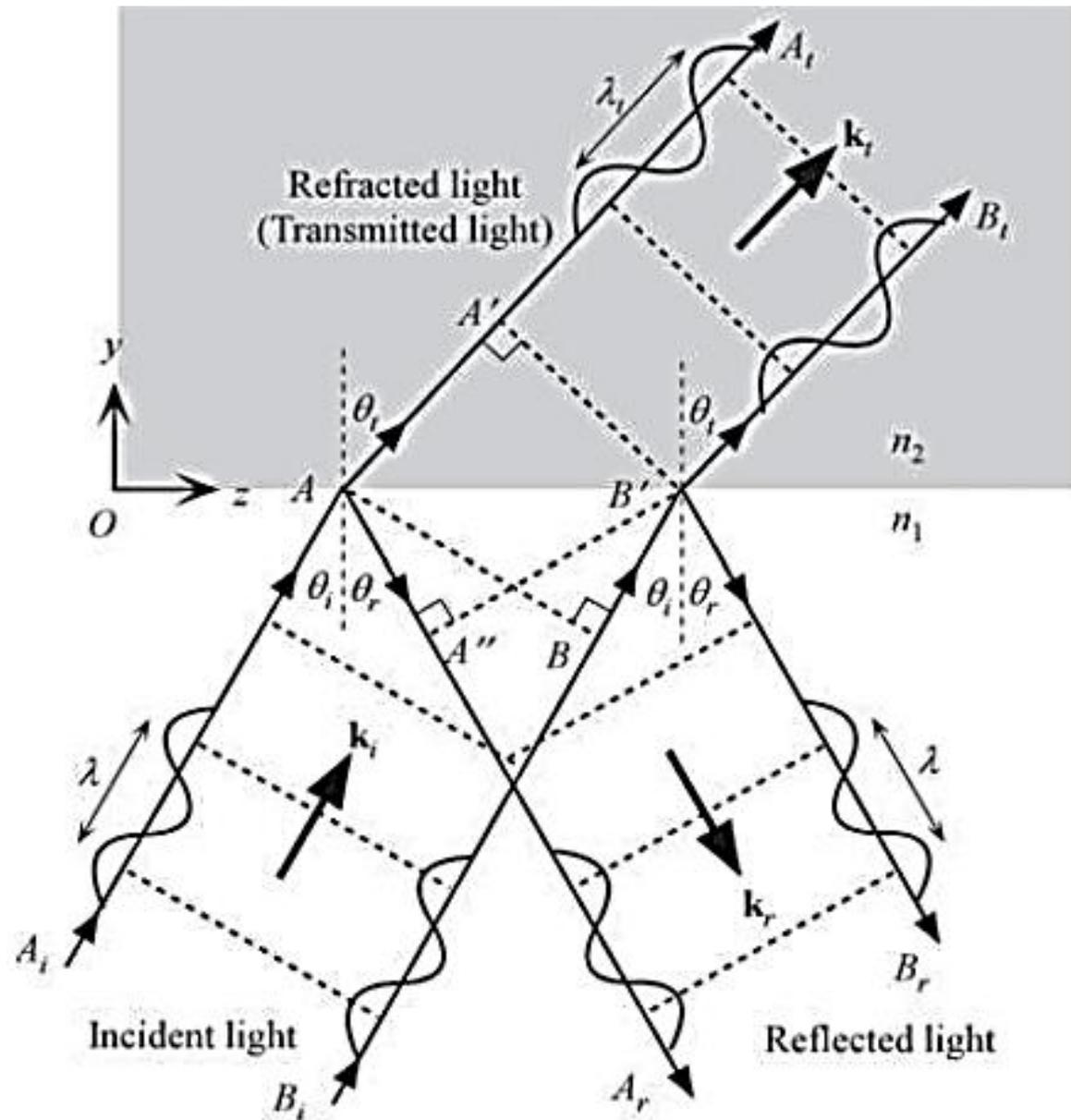
$$\sin(\theta_t) = AA' / AB'$$

$$\frac{BB'}{\sin(\theta_i)} = \text{إذن:}$$

$$AA' / \sin(\theta_t)$$

$$\frac{\frac{c}{n_1}t}{\sin(\theta_i)} = \frac{\frac{c}{n_2}t}{\sin(\theta_t)} : \text{ومنه}$$

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t)$$



الموجة المنتشرة التي كانت
 جبهتها عند الموضع AB بعد
 الانعكاس تصبح جبهة
 الموجة عند الموضع A''B'
 و خلال نفس الزمن t
 تكون قطعت المسافة AA''
 حيث

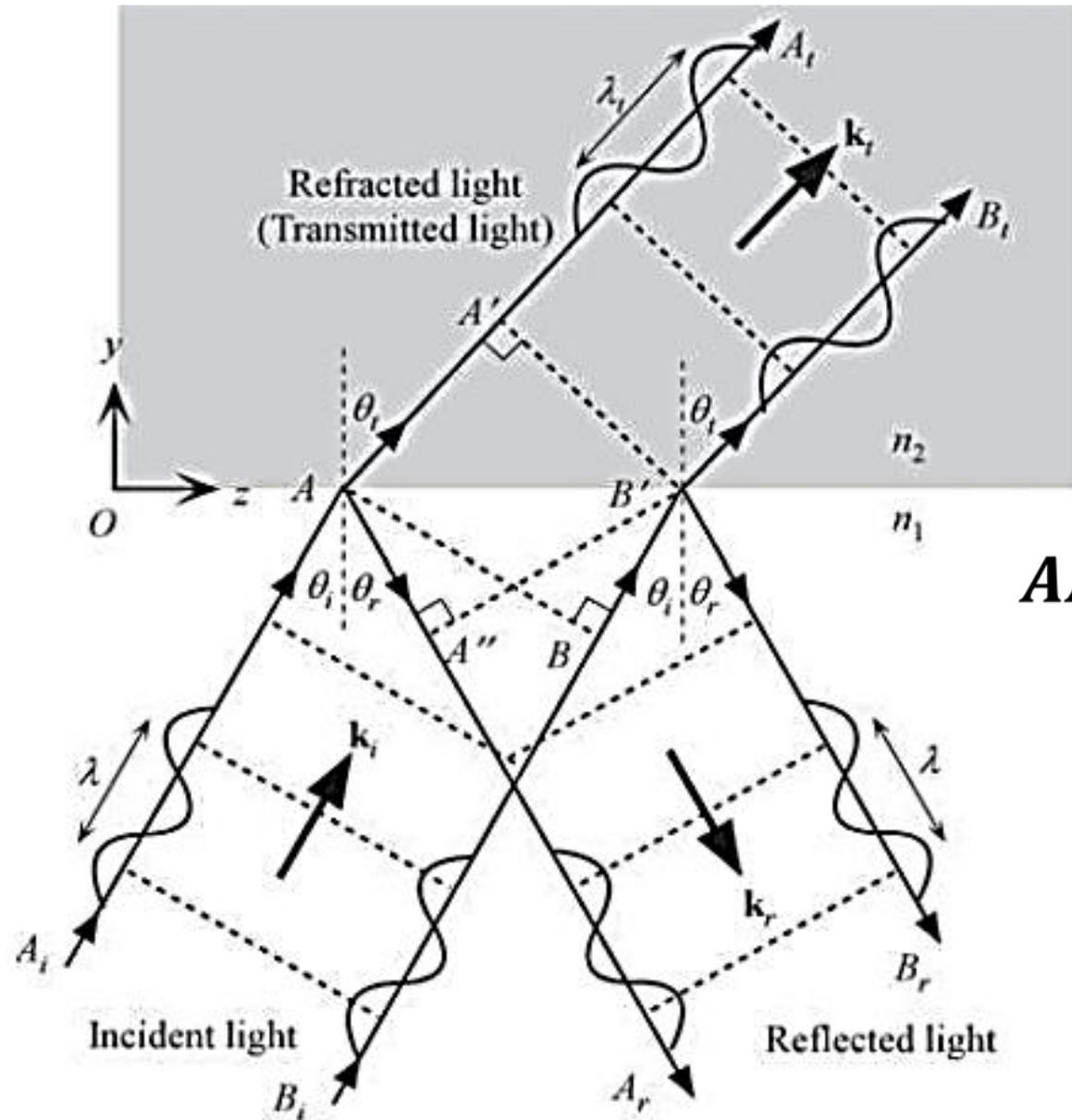
$$AA'' = V_1 t = \frac{c}{n_1} t = BB'$$

و لدينا: $\sin(\theta_i) = \frac{BB'}{AB'}$

و كذلك $\sin(\theta_r) = \frac{AA''}{AB'}$

إذن $\theta_i = \theta_r$

زاوية الورود مساوية تماما
 إلى زاوية الانعكاس



عندما تكون $n_1 > n_2$ يعني أن $\theta_t > \theta_i$ أي أنه في وسط أقل كسرا تكون زاوية الانكسار أكبر من زاوية الورود ، و عندما تكون زاوية الورود أكبر من قيمة حرجة θ_c يحدث انعكاس كلي للأشعة الواردة ، و عندما $\theta_i = \theta_c$ الشعاع المنكسر يكون مماسي لسطح الانكسار (الفاصل بين الوسطين) أي

$$\sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}$$

$\theta_t = 90^\circ$ يتبين أن

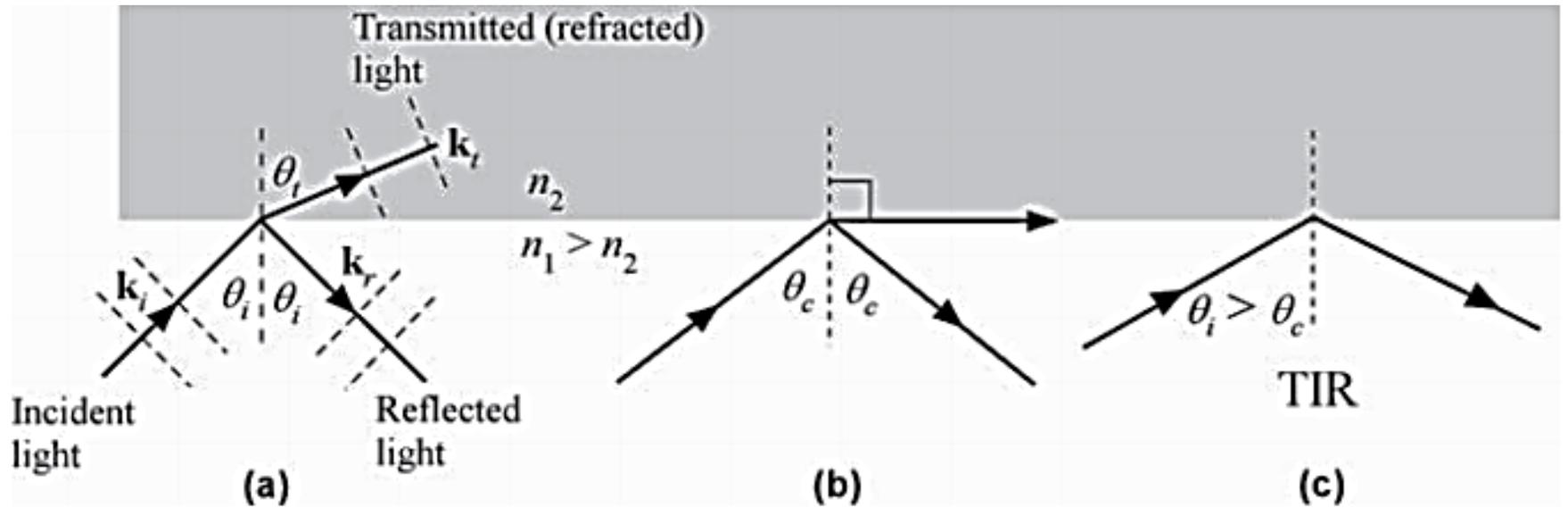


FIGURE 1.12 Light wave travelling in a more dense medium strikes a less dense medium. Depending on the incidence angle with respect to θ_c , which is determined by the ratio of the refractive indices, the wave may be transmitted (refracted) or reflected. (a) $\theta_i < \theta_c$ (b) $\theta_i = \theta_c$ (c) $\theta_i > \theta_c$ and total internal reflection. (Wavefronts are only indicated in (a).)

معاملات النفاذية و الانعكاسية (r و t)

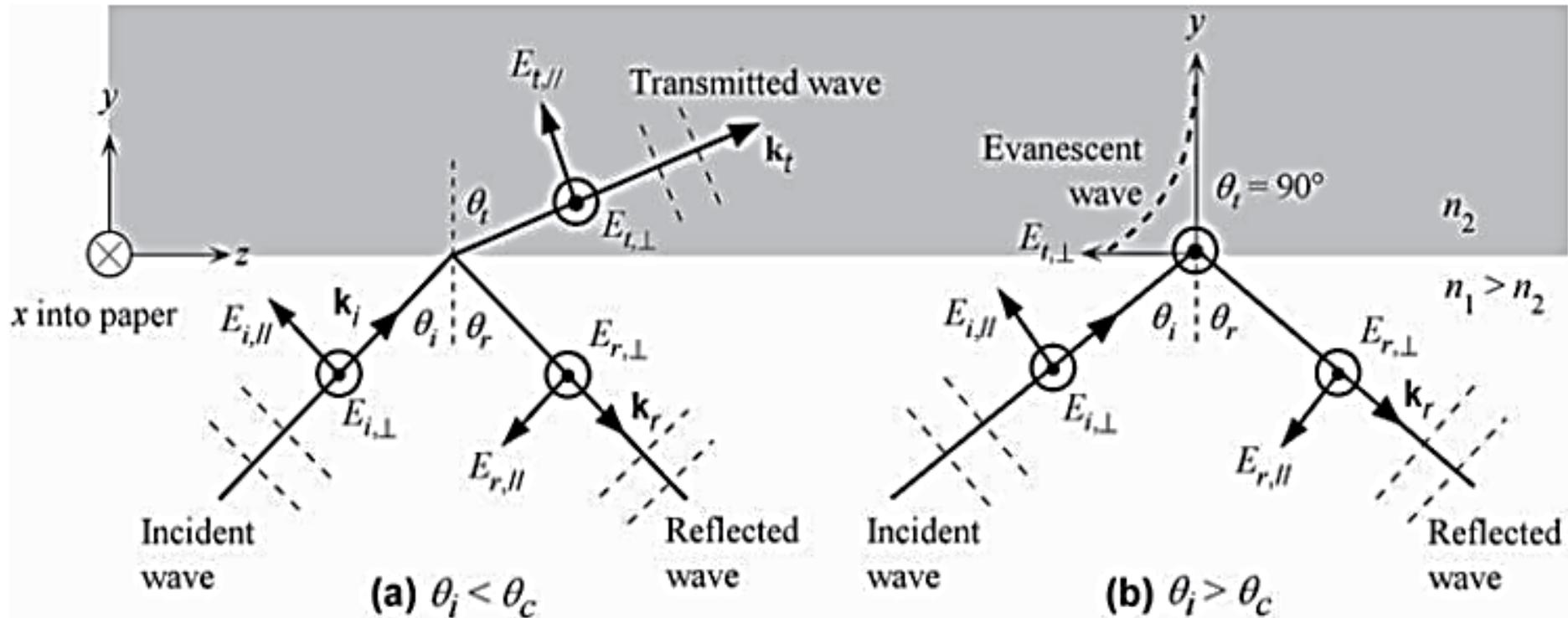


FIGURE 1.15 Light wave traveling in a more dense medium strikes a less dense medium. The plane of incidence is the plane of the paper and is perpendicular to the flat interface between the two media. The electric field is normal to the direction of propagation. It can be resolved into perpendicular (\perp) and parallel (\parallel) components. (a) $\theta_i < \theta_c$ then some of the wave is transmitted into the less dense medium. Some of the wave is reflected. (b) $\theta_i > \theta_c$ then the incident wave suffers total internal reflection. There is a decaying evanescent wave into the n_2 -medium.

مثلما يعانى الشعاع الموجى k_i للموجة الكهرومغناطيسية الواردة من انكسار و انعكاس على مستوى السطح الفاصل بين الوسطين 1 و 2 ، كذلك كل من مركبة الحقل الكهربائي E و المغناطيسي B سوف تعانيان انكسارا و انعكاسا عند ذات السطح الفاصل ، و يمكن وصف كل من الأمواج الواردة، المنكسرة و المنعكسة للحقل الكهربائي بالصيغة الأسية لموجة منتشرة:

$$E_r = E_{r0} \exp[j(\omega t - k_r r)] , E_i = E_{i0} \exp[j(\omega t - k_i r)]$$

$$E_t = E_{t0} \exp[j(\omega t - k_t r)]$$

عبارات مشابهة ترفق للحقل المغناطيسي . و يمكن فصل كل موجة واردة ، منعكسة و منكسرة إلى مركبتين: مركبة موازية لمستوى الورود (y, z) فيكون لدينا $(E_{i\parallel}, E_{r\parallel}, E_{t\parallel})$ و $(B_{i\parallel}, B_{r\parallel}, B_{t\parallel})$ و مركبة عمودية عليه فيكون لدينا $(E_{i\perp}, E_{r\perp}, E_{t\perp})$ و $(B_{i\perp}, B_{r\perp}, B_{t\perp})$ ،

من جهة ثانية ترفق مركبة الحقل الكهربائي كثافة طاقة (في وحدة الحجم) قدرها $(\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E_x^2)$ إذا كان الحقل مستقطبا مثلا في الاتجاه ox و يرافق

الحث المغناطيسي B_y لذات الموجة الكهرومغناطيسية كثافة طاقة $(\frac{1}{2\mu_0} B_y^2)$

تكون كثافة الطاقة متساوية في نفس الموجة الكهرومغناطيسية :

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E_x^2 = \frac{1}{2\mu_0} B_y^2 \text{ و منه } E_x = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} B_y = \frac{c}{n} B_y \text{ ، بنفس الطريقة}$$

بالنسبة للمركبة الموازية و العمودية للحقل الكهربائي و المغناطيسي يكون:

$$B_{\perp} = \frac{n}{c} E_{\parallel} \text{ و } B_{\parallel} = \frac{n}{c} E_{\perp} . \text{ عند السطح الفاصل بين الوسطين 1 و 2 يكون}$$

الحقل الكهربائي المماسي له مستمر و كذلك يكون الحث المغناطيسي و منه

$$E_{i\parallel} \cos\theta_i + E_{r\parallel} \cos\theta_r = E_{t\parallel} \cos\theta_t$$

$$B_{i\perp} - B_{r\perp} = B_{t\perp}$$

$$-B_{i\parallel} \cos\theta_i + B_{r\parallel} \cos\theta_r = -B_{t\parallel} \cos\theta_t$$

$$E_{i\perp} + E_{r\perp} = E_{t\perp}$$

و لدينا كذلك : $n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t)$ ، نعرف قرينة انكسار نسبية

من خلال هذه المعادلات يمكن نحسب كل من $E_{t\parallel}$ و $E_{r\parallel}$ بدلالة $E_{i\parallel}$ ، و كذلك $E_{t\perp}$ و $E_{r\perp}$ لنجد معاملات الانعكاس r و النفاذية t كما يلي

$$r_{\perp} = \frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}$$

$$t_{\perp} = \frac{E_{t\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{2\cos\theta_i}{\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}$$

$$r_{\parallel} = \frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i} - n^2\cos\theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i} + n^2\cos\theta_i}$$

$$t_{\parallel} = \frac{E_{t\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{2n\cos\theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i} + n^2\cos\theta_i}$$

$$r_{\perp} = \frac{1-n}{1+n} = r_{\parallel} = \frac{n-n^2}{n+n^2} = \frac{n_1-n_2}{n_1+n_2}$$

$$t_{\perp} = \frac{2}{1+n} = t_{\parallel} = \frac{2n}{n+n^2} = \frac{2n_1}{n_2+n_1}$$

معاملتي الانعكاسية و النفاذية
لمركبة الحقل العمودي
و من عبارتهما نستنتج

$$\text{أن: } r_{\perp} + 1 = t_{\perp}$$

معاملتي الانعكاسية و النفاذية
لمركبة الحقل الموازي
و من عبارتهما نستنتج

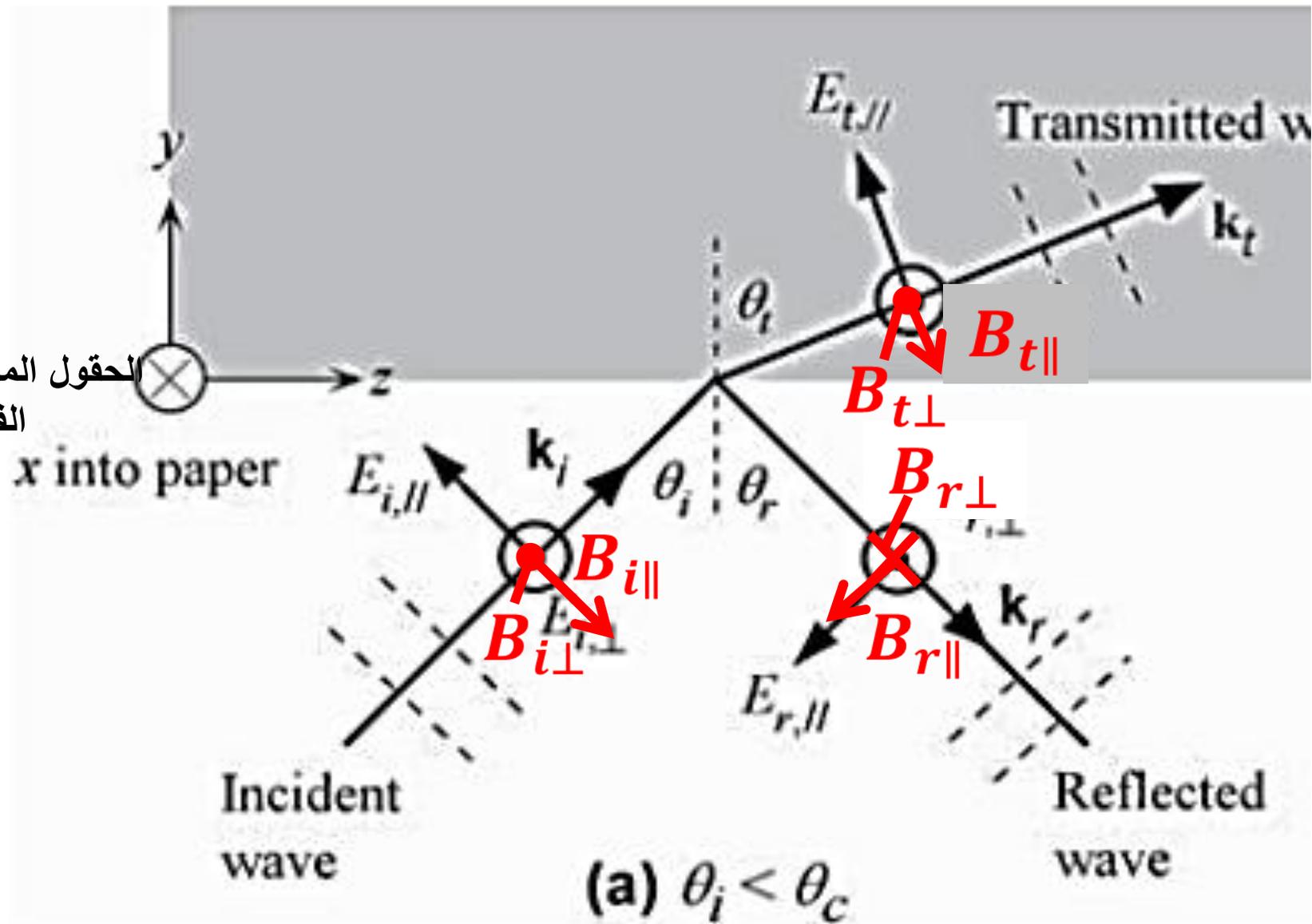
$$\text{أن: } r_{\parallel} + nt_{\parallel} = 1$$

من أجل ورود ناظمي

$$(\theta_i = 0^{\circ} \Rightarrow \cos\theta_i = 1$$

و منه :

الحقول المماسية للسطح
الفاصل مستمرة



معامل الانعكاسية r الموازي أو العمودي يعبر عن النسبة بين سعة الموجة

$$r_{\perp} = \frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{E_{r0,\perp}}{E_{i0,\perp}} \text{ و } r_{\parallel} = \frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{E_{r0,\parallel}}{E_{i0,\parallel}} : \text{المنعكسة إلى سعة الموجة الواردة}$$

قد تكون لهذه المعاملات قيم مركبة معبرة عن التغير في الطور بين الموجة الواردة و المنعكسة، كذلك معامل النفاذية t الموازي أو العمودي يعبر عن النسبة بين سعة الموجة النافذة إلى سعة الموجة الواردة :

$$t_{\perp} = \frac{E_{t\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{E_{t0,\perp}}{E_{i0,\perp}} \text{ و } t_{\parallel} = \frac{E_{t\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{E_{t0,\parallel}}{E_{i0,\parallel}}$$

من المناسب كذلك حساب كل من الانعكاسية (R) و النفاذية (T) المعبران عن نسبة الشدة الضوئية لكل من الموجة المنعكسة و النافذة إلى الشدة الضوئية

$$R_{\perp} = \frac{|E_{r0,\perp}|^2}{|E_{i0,\perp}|^2} = |r_{\perp}|^2 \text{ و } R_{\parallel} = \frac{|E_{r0,\parallel}|^2}{|E_{i0,\parallel}|^2} = |r_{\parallel}|^2 : \text{للموجة الواردة}$$

$$T_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_t |E_{t0,\parallel}|^2}{n_1 \cos \theta_i |E_{i0,\parallel}|^2} = \left(\frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \right) |t_{\parallel}|^2$$

$$T_{\perp} = \frac{n_2 \cos \theta_t |E_{t0,\perp}|^2}{n_1 \cos \theta_i |E_{i0,\perp}|^2} = \left(\frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \right) |t_{\perp}|^2 \text{ و}$$

بالنسبة للانعكاسية R يؤخذ بعين الاعتبار أن زاوية الانعكاس مساوية إلى زاوية
 الورد $\theta_r = \theta_i$ و هما في نفس الوسط (نفس قرينة الانكسار)
 بالنسبة للنفذية T يؤخذ بعين الاعتبار زاوية الورد θ_i و زاوية الانكسار θ_t
 التي تتأثر بها حزمة الضوء النافذة و كذا اختلاف قرائن الانكسار بين الوسطين
 (n_2, n_1) ، و كذلك **نسبة الضوء النافذ + نسبة الضوء المنعكس = الوحدة**

$$T + R = 1$$

وفي حالة ورود ناظمي $\cos\theta_i = \cos\theta_t = 1$ ، تتبسط عبارات T و R كما

$$T = T_{\perp} = T_{\parallel} = \frac{4n_1n_2}{(n_1+n_2)^2} \text{ و } R = R_{\perp} = R_{\parallel} = \left(\frac{n_1-n_2}{n_1+n_2}\right)^2$$

امتصاص الضوء و قرينة الانكسار المركبة:

عندما تنتشر موجة ضوئية في وسط مادي فإنها عموما تعاني من **تخامد أو تناقص في سعتها** في اتجاه انتشارها كما موضح في الشكل التالي، ضياع الطاقة أو الشدة الضوئية راجع **إلى امتصاصها من قبل الوسط** (تحولها الى شكل آخر من الطاقة كتحويل الطاقة الضوئية إلى حرارة تساهم في اهتزازات الشبكة البلورية أثناء استقطاب جزيئات الوسط أو اهتزاز الشوائب، امتصاص

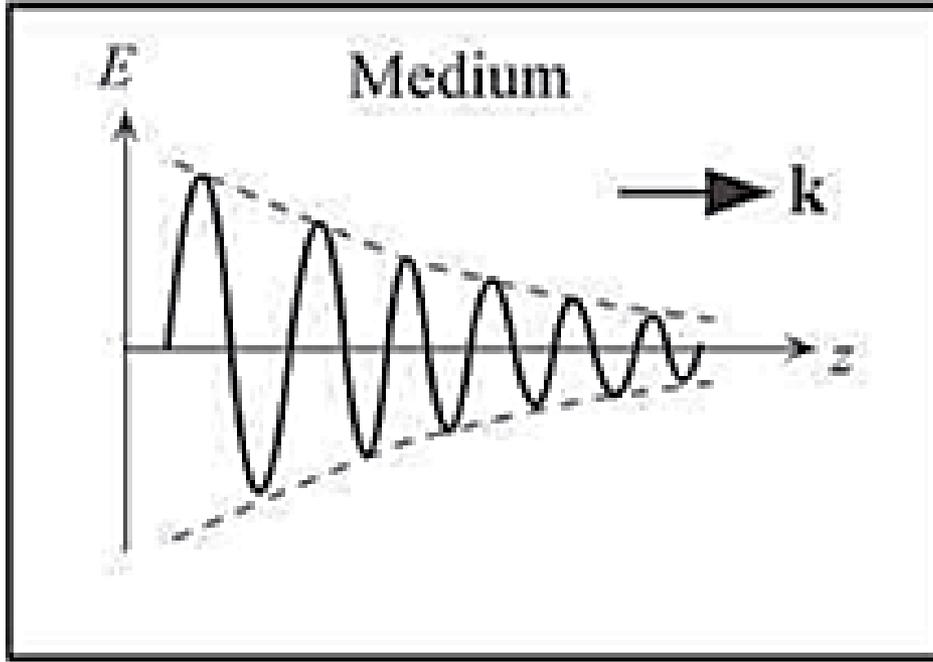


FIGURE 1.25 Attenuation of a traveling wave in a medium results in the decay of its amplitude.

طاقة ضوئية تساهم في إثارة الكثرونات من عصابة التكافؤ الى عصابة النقل أو عبر مستويات الطاقة للشوائب ، هذا الامتصاص الضوئي كذلك ينقص من الطاقة الضوئية للاشعاع المنتشر عبر الوسط، و الالكترونات الحرة تنجر تحت تأثير الحقل الكهربائي الضوئي و تتشتت باهتزاز الايونات والشوائب و تنقل لها طاقتها الحركية التي اكتسبتها من طاقة الاشعاع المنتشر عبر الوسط). كذلك تتناقص طاقة الضوء المنشر **بالتبديد أو التشتت** الذي يبدد طاقة الاشعاع في

في اتجاهات مختلفة بعيدا عن اتجاه الانتشار الرئيسي للموجة الضوئية، نعبّر عن تخامد الضوء Attenuation بسبب الوسط بما يعرف **بمعامل التخماد**

الذي هو التناقص النسبي في شدة الضوء أو الاشعاع $\alpha = -\frac{1}{I} \frac{dI}{dz}$

في وحدة المسافة وفق إتجاه انتشار الموجة الضوئية (OZ)، عندما تتناقص الشدة الضوئية يكون معامل التخماد موجب و عندما يكون التخماد فقط بسبب الامتصاص يسمى α **معامل الامتصاص**.

الضياع أو التخماد في الحقل الضوئي المنتشر يؤدي إلى ضياعات و تناقص في آليات الاستقطاب المرافقة لانتشاره و هذا يؤدي إلى أن ثابت العزل يصبح **عدد مركب** (بدل ثابت العزل بقيمة حقيقية الذي يعني أنه لا يوجد ضياع و تناقص في آليات الاستقطاب المرافقة لانتشار الحقل الضوئي) فيكون لدينا :

حيث $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ يمثل الجزء الحقيقي لثابت العزل الذي يحدد

استقطابية الوسط بإهمال أي ضياع فيها و الجزء التخيلي ϵ''_r يصف أي ضياع في استقطابية الوسط. كذلك الموجة الضوئية المنتشرة و التي تعاني من تخامد

بسبب الامتصاص سوف توصف بشعاع موجي مركب : $k = k' - jk''$

و موجة الحقل الضوئي تكون ذات سعة متخامدة و عبارتها تصبح من الشكل
 $E = E_0 \exp(-k''z) \exp[j(\omega t - k'z)]$ ، الجزء الحقيقي من الشعاع

k' الموجي يصف خصائص الانتشار كسرعة الطور و قرينة الانكسار

، الجزء التخيلي للشعاع الموجي **k''** يصف معدل التخماد **$V = \frac{\omega}{k'} = c/n$**

على طول اتجاه الانتشار z ، الشدة الضوئية متناسبة مع مربع سعة الحقل

الضوئي : **$I \propto |E|^2 \propto \exp(-2k''z)$** و منه **$\frac{dI}{dz} = -2k''I$** من الواضح

أن : **$\alpha = 2k''$** ، نعرف كذلك نتيجة التخماد الضوئي **قرينة الانكسار المركبة** :

الجزء الحقيقي منها هو **$N = n - jK = \frac{k}{k_0} = \left(\frac{1}{k_0}\right) (k' - jk'')$** ،

قرينة الانكسار **$n = k'/k_0$** ، الجزء التخيلي منها هو **معامل الانطفاء**

$K = k''/k_0$ و منه نكتب أيضا قرينة الانكسار المركبة :

$$N = n - jK = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{\epsilon'_r - j\epsilon''_r}$$

$$n^2 - K^2 = \epsilon'_r, \quad 2nK = \epsilon''_r$$

$$\alpha(\text{cm}^{-1}) = 2k'' = 2k_0K = 4\pi K/\lambda_0 \text{ و منه}$$

$$n = \left(1/2^{1/2}\right) \left[\left(\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2\right)^{1/2} + \epsilon_r' \right]^{1/2}$$

$$K = \left(1/2^{1/2}\right) \left[\left(\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2\right)^{1/2} - \epsilon_r' \right]^{1/2}$$

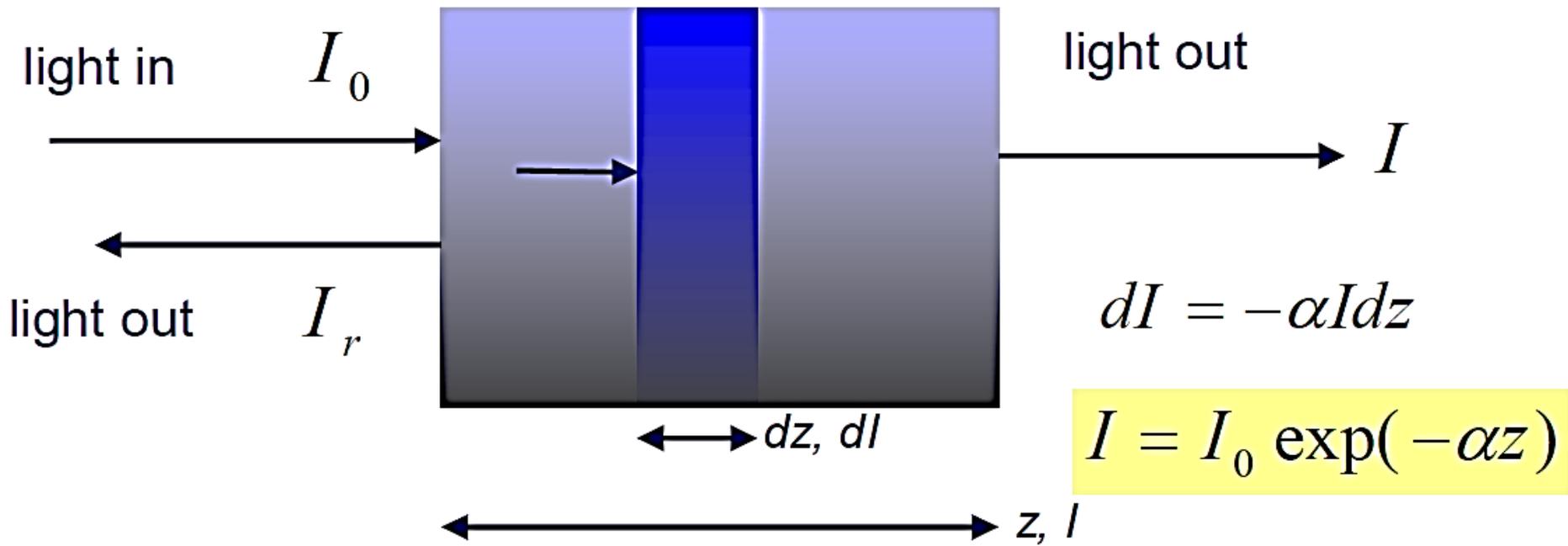
معامل الانعكاسية r و الانعكاسية R يصبحان كما يلي

$$r = \frac{1 - n + jK}{1 + n - jK}$$

$$R = \left| \frac{n - jK - 1}{n - jK + 1} \right|^2 = \frac{(n - 1)^2 + K^2}{(n + 1)^2 + K^2}$$

في حالة وجود ضياع للشدة الضوئية بالامتصاص ، نعرف الامتصاصية A Absorbance ، لتصبح الشدة الضوئية الكلية الواردة على عينة وسط مادي منقسمة بين النفاذية T و الامتصاصية A و الانعكاسية R أي :

$$A + T + R = 1$$



α = absorption coefficient (cm^{-1})

عمق امتصاص الضوء هو $\delta(\text{cm}) = 1/\alpha$

الانعكاسية R ، النفاذية T ، الامتصاصية A

Reflectance R, transmittance T, absorbance A:

the ratio of reflected, transmitted or absorbed radiant power (light intensity) to incident power

هي نسبة الشدة الضوئية المنعكسة، النافذة أو الممتصة

Conservation law: $R + T + A = 1$

إلى الشدة الضوئية الكلية التي هي محفوظة

(blackbody $A = 1, R = T = 0$, opaque surface $A + R = 1$)

مثلا الجسم الأسود ماص تماما للضوء
سطح مسط غير شفاف النفاذية منعدمة

أمثلة على مواد فوتونية

- الزجاج الفوتوني (Photonic glasses): مادة عازلة غير بلورية شفافة تتضمن عدة اصناف مثل

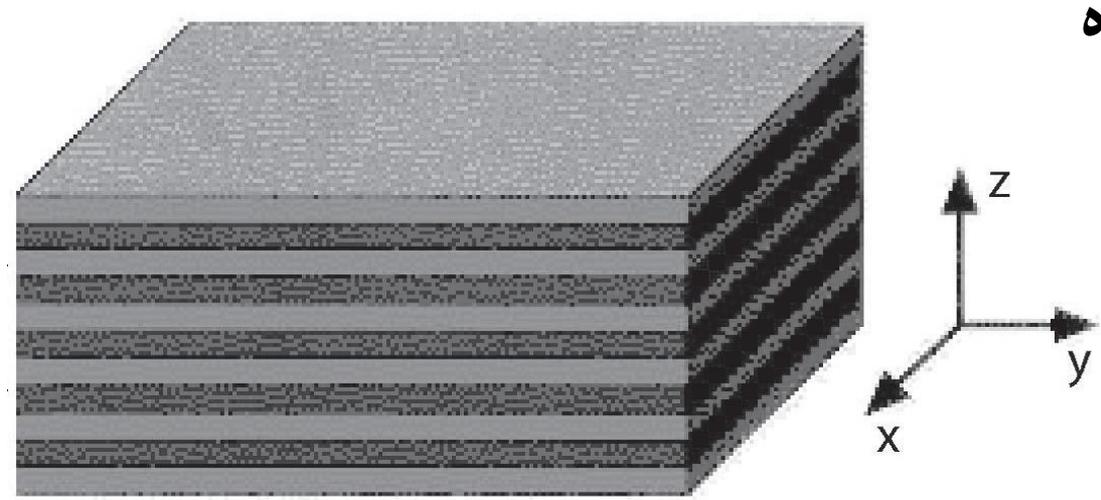
- **1- الأكاسيد:** و التي تتضمن عنصر الاكسجين و اقدم نوع في هذا التصنيف هو السيليكا أو أكسيد السيليكون (SiO_2) الذي يعتبر المكون الاساسي في الرمل و هناك أنواع اخرى مثل زجاج (Soda-lime glass) الذي يحتوي على 75% من أكسيد السيليكون و باقي النسبة مكونة من أكسيد الصوديوم (Na_2O) و أكسيد الكالسيوم (CaO) و أكاسيد أكثر حداثة تتضمن أكاسيد المعادن الترابية الالكالين **alkaline-Earth Metal oxides** مضافة إلى اكاسيد الزجاج

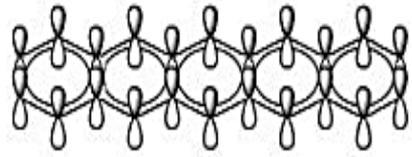
- **2- الكالكوجينيد (Chalcogenides):** و يتضمن الزجاج عناصر كالكوجين مثل (**sulfure, selenium, tellurium**) التي تنتمي إلى نفس عمود الاكسجين

- **3- الهاليد (halides):** و يتضمن الزجاج مركب هاليدي و الذي يحتوي على عنصر هالوجين (**halogen**) من الجدول الدوري مثل الكلور (Cl) و الفلور (F) و البروم (Br) و اليود (I) كأمثلة زجاج يتضمن مركب BeF_2 و مركب ZnCl_2

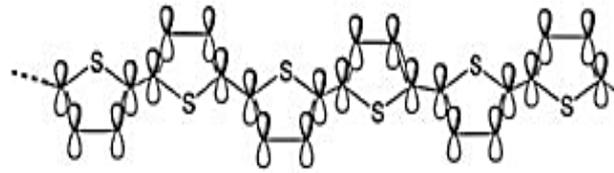
البلورات الفوتونية (Photonic crystals): هي بلورات عازلة ذات بنية دورية و مركبة من عدة طبقات (على الأقل من طبقتين) من مواد عازلة بقرائن انكسار مختلفة ما يضمن تشتت الضوء عند السطوح الفاصلة بين الطبقات ، تكون هذه الطبقات و بالتالي سطوح التشتت مرتبة ترتيبا دوريا أحادي البعد أو ثنائي البعد أو ثلاثي البعد ، و هذا الترتيب قد يمنع في شروط معينة انتشار الضوء عبر بنية البلور الفوتوني إذا كانت طول موجة الضوء من رتبة البعد الدوري للبنية ، أبسط مثال لبلور فوتوني هو أن يكون دوري وفق بعد واحد (1D) أين تترتب طبقات مواد بقرائن انكسار مختلفة وفق بعد المحور (oz) مثلا

و في شروط محددة قد تتصرف هذه البلورات كمرايا عاكسة - نجد لها تطبيقات في الاجهزة الضوئية مثل المرايا العازلة ، المرشحات و الاليف البصرية

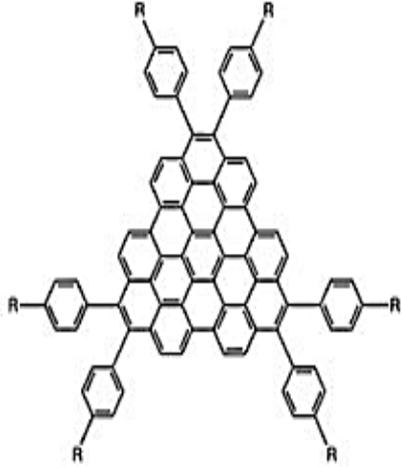




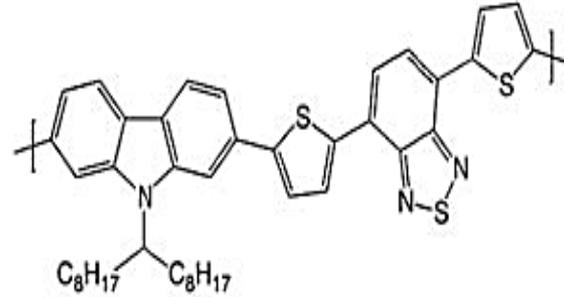
a pentacene



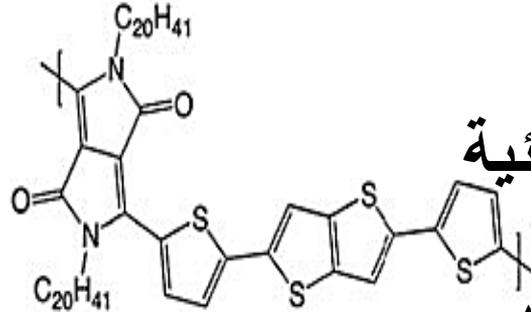
b polythiophene



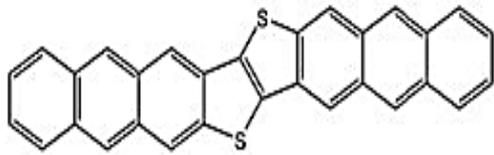
c semi-triangular discotic



d poly(1,7)carbazole derivative



f DPP-derivative



e DATT

أنصاف النواقل: تشمل مجالا واسعا

من أنصاف النواقل مثل التقليدية
(السيليكون-Si – الجرمانيوم Ge)

و الخلائط III-V مثل GaAs

و الخلائط II-VI مثل Cd-Te

أنصاف النواقل العضوية :

و هي مركبات عضوية إما ذات

بنية بلورية أو على شكل بوليميرات

تظهر خواص مشابهة لأنصاف

النواقل غير العضوية (المعدنية)

خاصة فيما يتعلق بالناقلية الكهربائية

للإلكترونات و الثقوب و وجود

فاصل طاقي و كذا امكانية تطعيمها ،

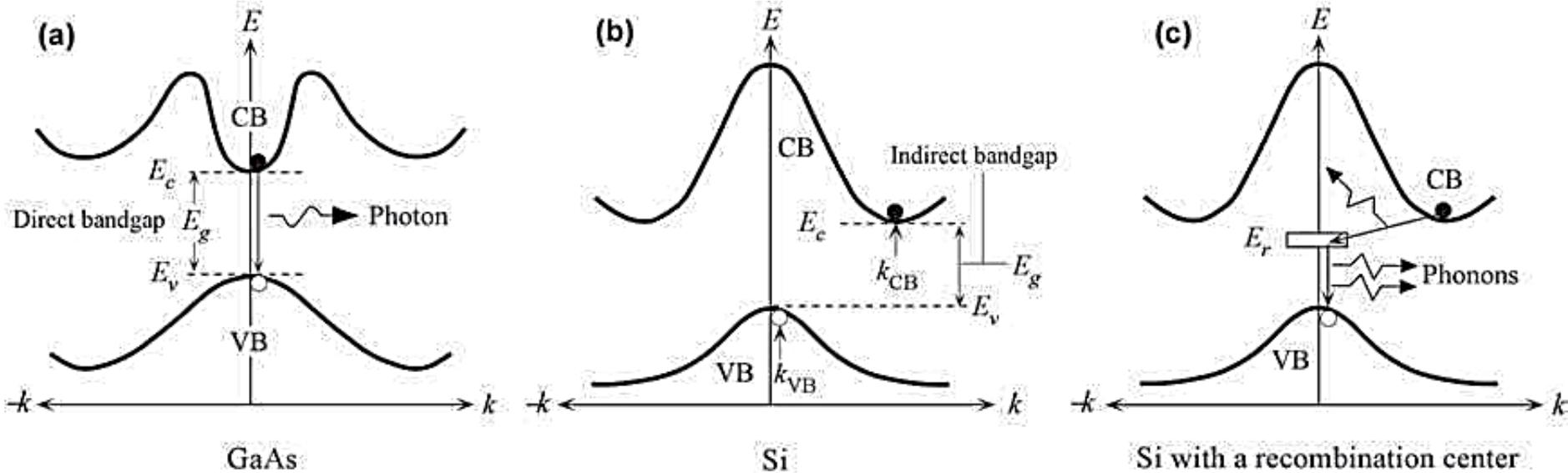
هذه المواد انتجت ما يعرف

– **أمثلة على جزيئات و بوليميرات عضوية**

بالإلكترونيك العضوية أو الكترونيك البلاستيك و هذه المواد في أساسها

قائمة⁴⁸ على جزيئات تحتوي عنصري الكربون و الهيدروجين

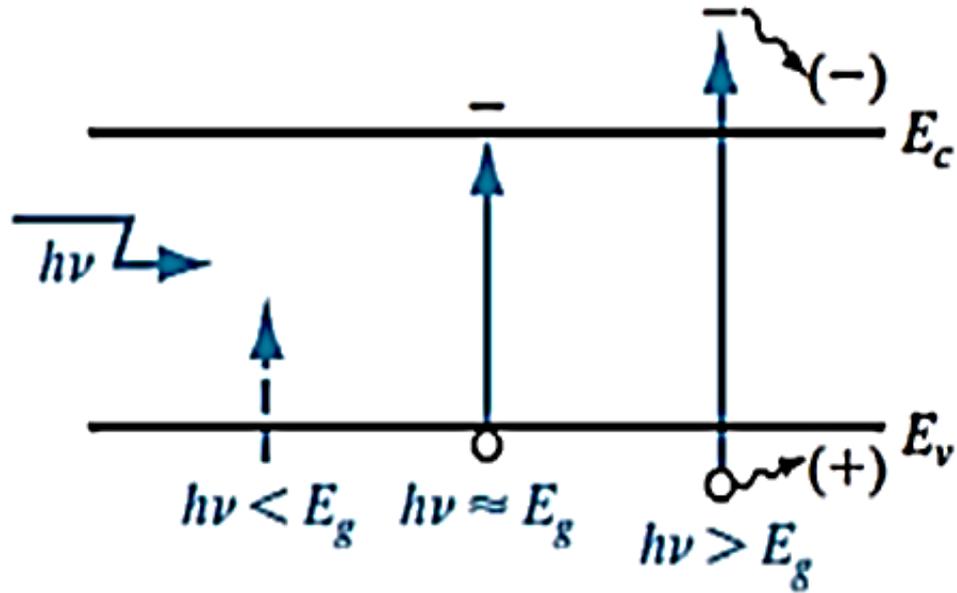
انصاف النواقل كمواد فوتونية: في تطبيقات أنصاف النواقل في مجال الفوتونيك يمكن أن نميز في أنصاف النواقل الشائعة أنصاف نواقل ذات فاصل طاقي مباشر أين الالتحامات بين الثنائيات الكترولون - ثقب مباشرة تنتج اشعاعات و انصاف نواقل ذات فواصل طاقيه غير مباشرة ترافقها التحامات غير مباشرة غير مشعة



(a) In GaAs the minimum of the CB is directly above the maximum of the VB. GaAs is therefore a direct bandgap semiconductor. (b) In Si, the minimum of the CB is displaced from the maximum of the VB and Si is an indirect bandgap semiconductor. (c) Recombination of an electron and a hole in Si involves a recombination center.

GaAs ذو فاصل طاقي مباشر، **Si** ذو فاصل طاقي غير مباشر و مع ذلك يمكن تحفيز التحامات مباشرة مشعة في **Si** إذا احتوى او تم تطعيمه بمراكز التحام يتوافق شعاعها الموجي مع سقف عصابة التكافؤ

الامتصاص الضوئي و المواد كاشفة للضوء: امتصاص فوتون يؤدي عادة إلى تولد ثنائيات إلكترون-ثقب إذا كانت طاقة الفوتون مساوية على الأقل أو أكبر من عرض الفاصل الطاقى E_g لنصف الناقل لكي تثير إلكترون من عصابة التكافؤ إلى عصابة النقل. إذا كانت طاقة الفوتون أقل من E_g ، الفوتونات لا تمتص و الضوء ينتقل عبر نصف الناقل الذي يبدو شفافا. عندما $h\nu > E_g$ تتكون الثنائيات الحرة إلكترون - ثقب و الفائض من الطاقة الممتصة يمكن أن يمنح الإلكترون أو الثقب طاقة حركية إضافية التي يمكن أن تتبدد في شكل حرارة في نصف الناقل



توليد الثنائيات الكترول-ثقب في نصف ناقل بواسطة الامتصاص الضوئي

أكبر قيمة لطول الموجة أو طول موجة العتبة (λ_g) اللازمة لامتصاص الضوء و تولد الثنائيات (e-t) يحدد من خلال عرض الفاصل الطاقي E_g لنصف الناقل

$$\lambda_g(\mu m) = 1.2398 (\mu m \cdot eV) / E_g(eV) \text{ أو } h\nu_g = \frac{hc}{\lambda_g} = E_g$$

في Si : $\lambda_g = 1.11 \mu m$ & $E_g = 1.12 eV$ ، في Ge :

$E_g = 0.66 eV$ و $\lambda_g = 1.87 \mu m$ ، من الواضح أن وصلة ضوئية

من Ge هي الانسب في نقل الاشارات الضوئية من رتبة $1.3 \mu m - 1.55 \mu m$

Bandgap energy E_g at 300 K, cutoff wavelength λ_g , and type of bandgap (D = Direct and I = Indirect) for some photodetector materials

Semiconductor	E_g (eV)	λ_g (μm)	Type
InP	1.35	0.91	D
GaAs _{0.88} Sb _{0.12}	1.15	1.08	D
Si	1.12	1.11	I
In _{0.7} Ga _{0.3} As _{0.64} P _{0.36}	0.89	1.4	D
In _{0.53} Ga _{0.47} As	0.75	1.65	D
Ge	0.66	1.87	I
InAs	0.35	3.5	D
InSb	0.18	7	D

الفوتونات الواردة بطول موجة أقل من λ_g سوف تمتص داخل نصف ناقل ذو فاصل طاقي E_g و شدة الضوء النافذة عبر نصف الناقل سوف تتناقص بشكل

أسي انطلاقا من سطح نصف الناقل: بإهمال انعكاسية السطح

الامامي ($R \cong 0$)

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha \cdot x)$$

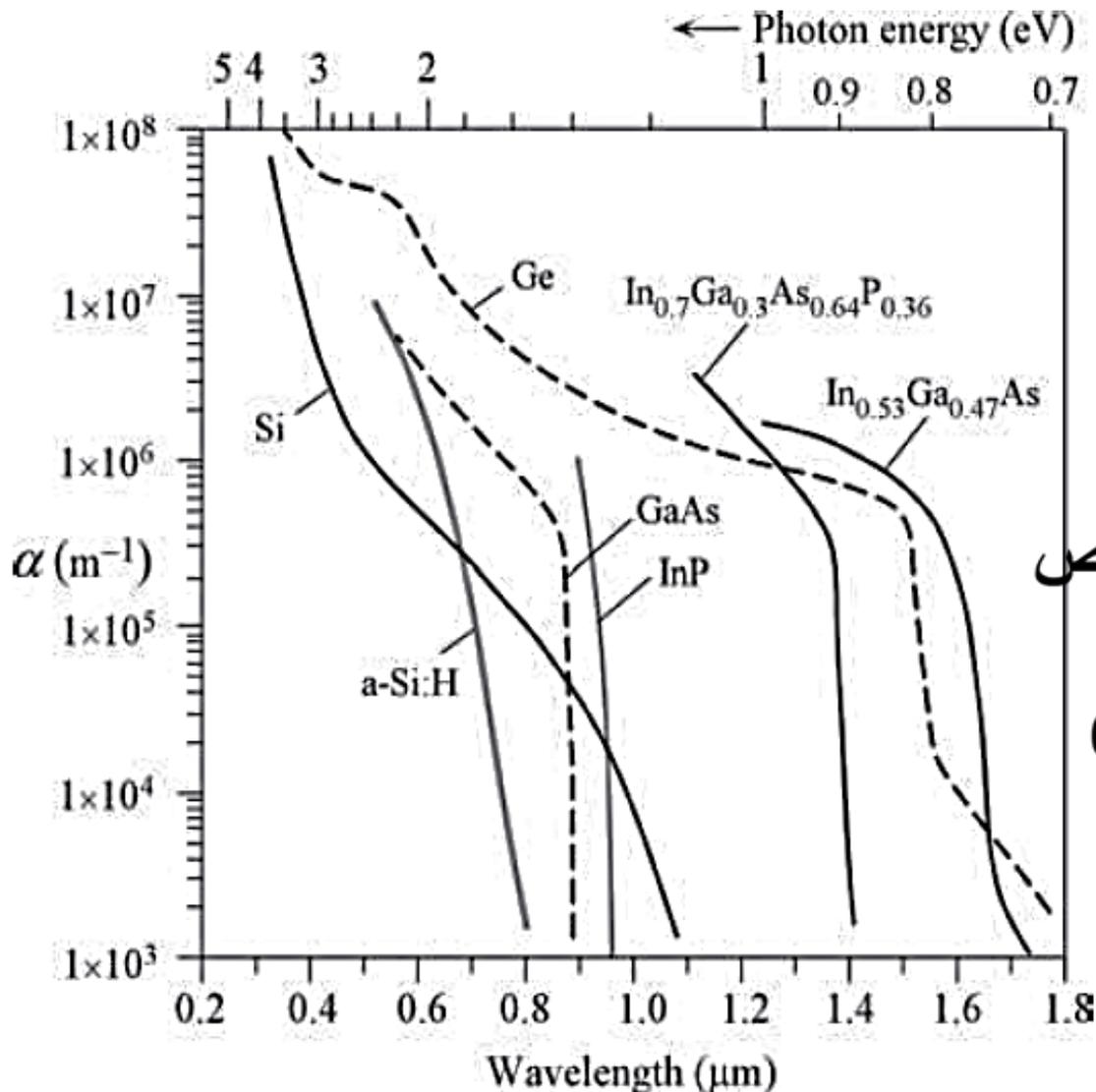
I_0 شدة الضوء الوارد

α معامل الامتصاص

عمق امتصاص $\delta(cm) = 1/\alpha$

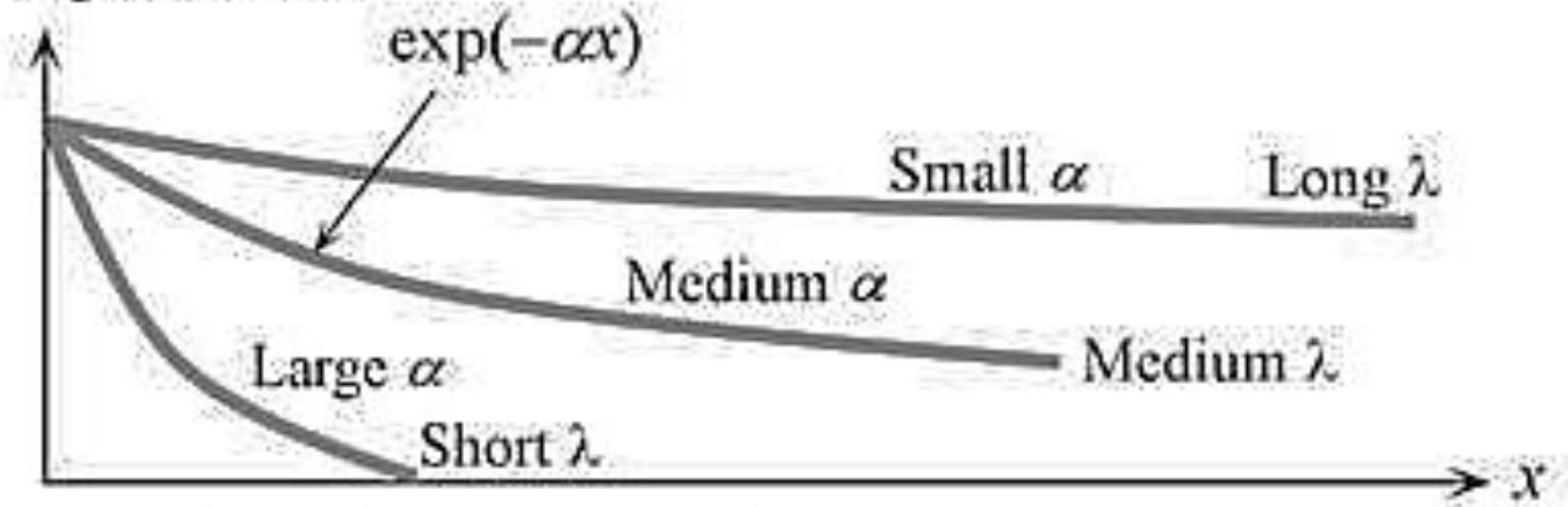
الضوء الذي على امتداده نسبة

امتصاص الفوتونات تقدر بـ 63%



Absorption coefficient (α) vs. wavelength (λ) for various semiconductors. (Data selectively collected and combined from various sources.)

Photogeneration



معامل الإمتصاص **يزداد** بسرعة من أجل $h\nu > E_g$ أو من أجل

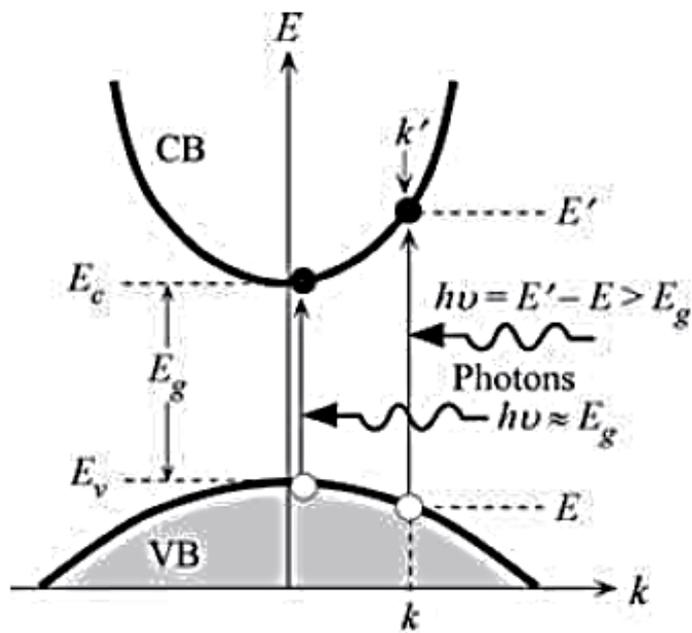
معاملات الامتصاص **صغيرة** من أجل $\lambda < \lambda_g = \frac{1.24}{E_g}$

أو $h\nu < E_g$ أو $\lambda > \lambda_g = \frac{1.24}{E_g}$ لذلك يبدو نصف الناقل شفاف

للفوتونات في هذا المجال من الطاقة.

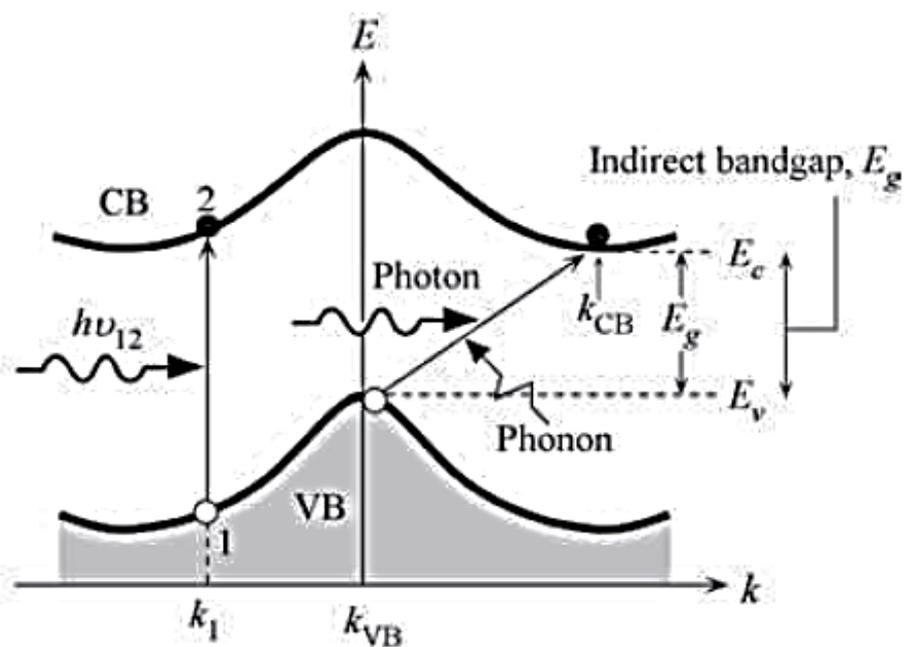
إذا نعرض أن كل فوتون ممتص عند طاقة $h\nu$ يكون ثنائية إلكترون - ثقب ، معدل تولد

الثنائيات إلكترون - ثقب هو $g(x) = \frac{\alpha I(x)}{h\nu}$ ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$) حيث $\frac{I(x)}{h\nu} = \phi(x)$ تدفق الفوتونات ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$).



GaAs (Direct bandgap)

(a)



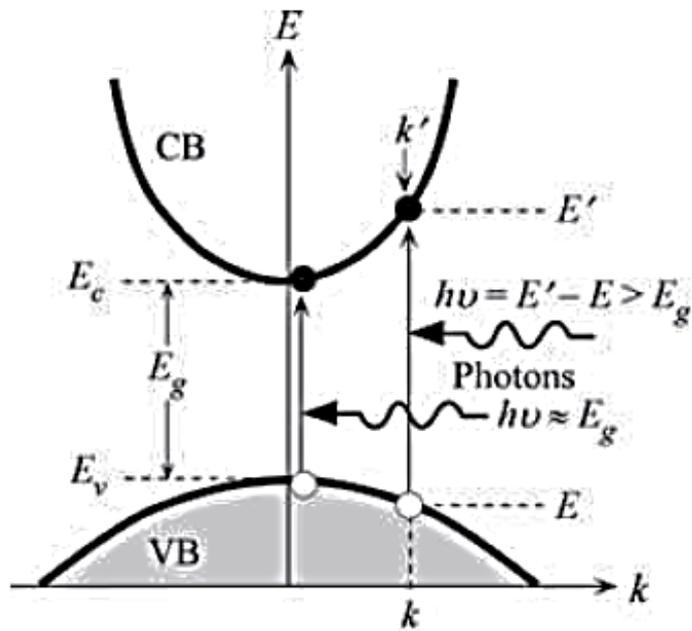
Si (Indirect bandgap)

(b)

(a) Photon absorption in a direct bandgap semiconductor. (b) Photon absorption in an indirect

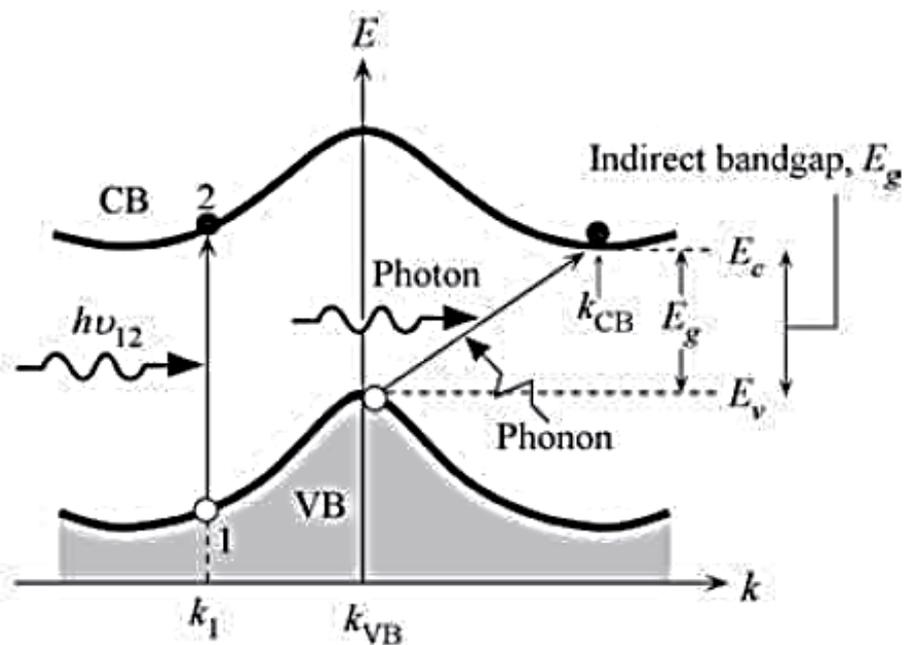
bandgap semiconductor (VB, valence band; CB, conduction band).

في نصف ناقل ذو فاصل طاقي غير مباشر، امتصاص فوتون ذو طاقة قريبة من E_g غير كاف لنقل إلكترون من سقف عصابة التكافؤ إلى قعر عصابة النقل، لأن هذه العملية يرافقها تغير في الشعاع الموجي للإلكترون، وهذا ما يتطلب كذلك امتصاص فونون (طاقة حرارية من اهتزازات الشبكة) ذو شعاع موجي مساوي تماما لمقدار الفرق في الشعاع الموجي للإلكترون بين عصابتي التكافؤ والنقل.



GaAs (Direct bandgap)

(a)



Si (Indirect bandgap)

(b)

(a) Photon absorption in a direct bandgap semiconductor. (b) Photon absorption in an indirect

bandgap semiconductor (VB, valence band; CB, conduction band).

هذا النوع من الامتصاص في الشكل (b) يسمى امتصاص غير مباشر يحدث في أنصاف النواقل غير المباشرة و يرتبط باهتزازات الشبكة المعتمدة على الحرارة، و تفاعل الفوتون هنا مع عصابة التكافؤ يعتمد على جسيم ثالث الفونون، بالتالي احتمالية امتصاص الفوتونات المولدة للثنائيات (e-t) ليست عالية كما في الحالة (a) لأنصاف النواقل ذات فاصل طاقي مباشر التي لا تحتاج مساهمة فونون

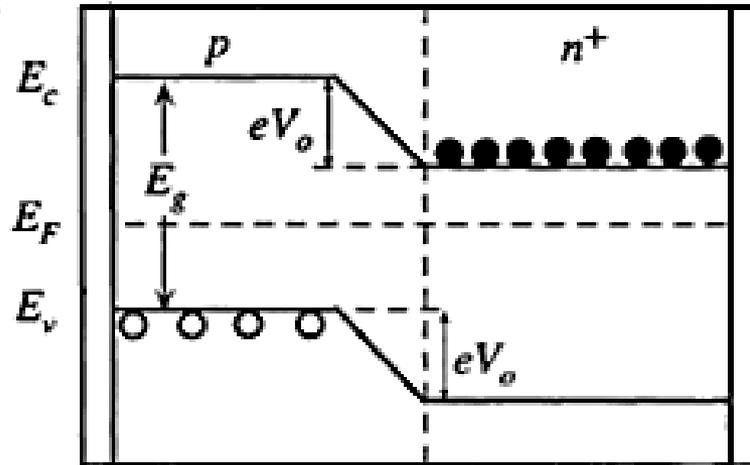
الاجهزة الفوتونية: الثنائية الباعثة للضوء (LIGHT EMITTING DIODES (LED))

الثنائية الباعثة للضوء (LED) هي أساسا ثنائية ذات وصلة pn من نصف ناقل ذو فاصل طاقي مباشر مثل GaAs و الذي فيه التحام الثنائيات إلكترون - ثقب مشع يصدر فوتون. طاقة

الفوتون الصادر $h\nu$ تقريبا مساوية إلى عرض الفاصل الطاقي E_g . يظهر الشق (a) مخطط الطاقة لوصلة pn+ غير مستقطبة و التي تطعم فيها المنطقة n بشدة مقارنة مع المنطقة p. مستوى فارمي E_F مستوي على طول الوصلة ، و هذا ما يتطلبه الاتزان دون استقطاب (اتزان ترموديناميكي). منطقة شحنات الفضاء تمتد أساسا في

المنطقة p . يتأسس حاجز كمون eV_0 من E_c في المنطقة n إلى E_c في المنطقة p .

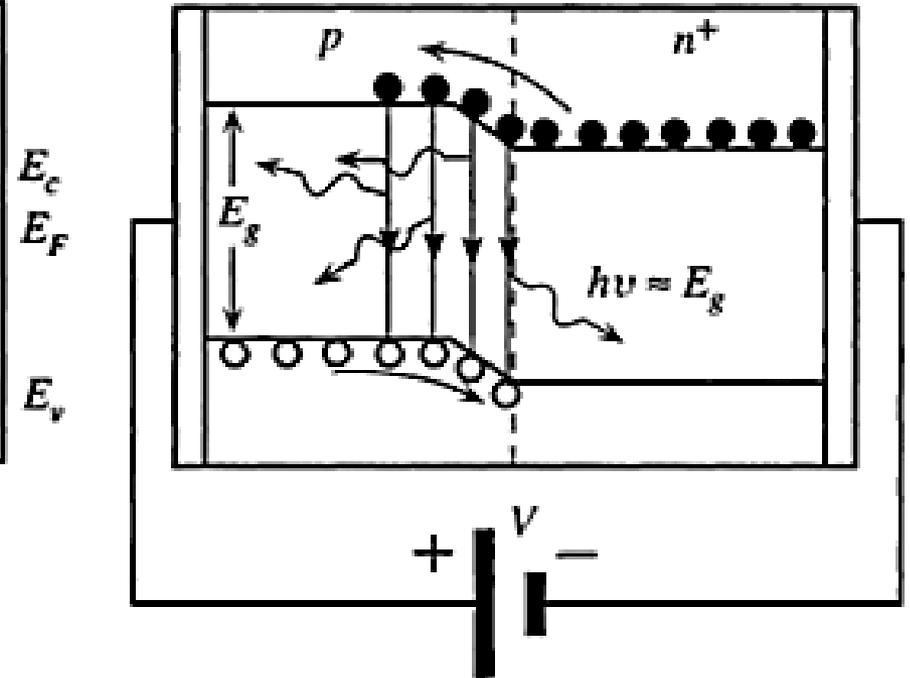
Electron energy



→ Distance into device

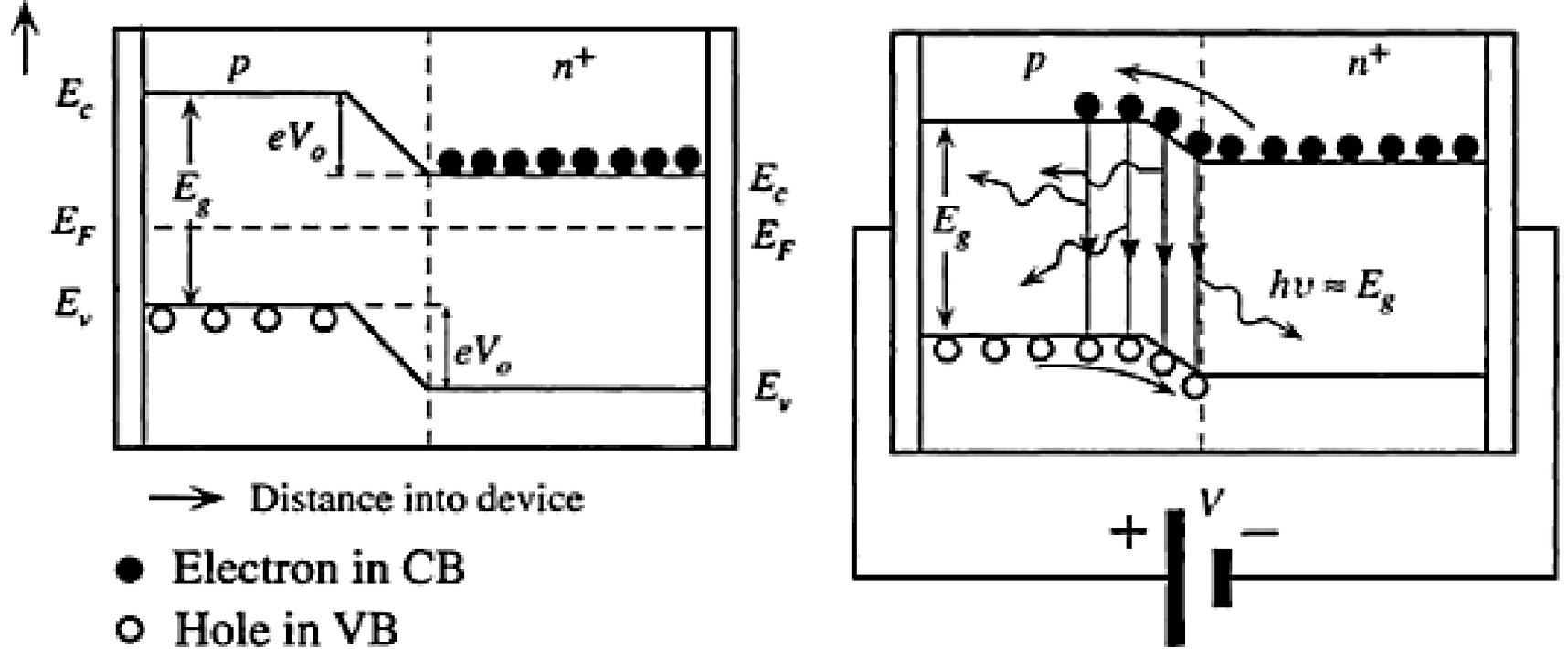
● Electron in CB

○ Hole in VB



عندما يطبق استقطاب مباشر بجهد V ، الكمون الداخلي V_0 ينقص إلى $V_0 - V$ ، هذا ما يسمح للإلكترونات من المنطقة n^+ بالانتشار ما يعني حقنها داخل المنطقة p كما يظهره الشق (b) من الشكل. مركبة الثقوب المحقونة من المنطقة p إلى داخل المنطقة n^+ هي أقل من مركبة الإلكترونات المحقونة من المنطقة n^+ إلى المنطقة p .

Electron energy



التحام الإلكترونات المحقونة في منطقة شحنات الفضاء و على حجم مداه طول انتشار الإلكترونات L_e في المنطقة p يؤدي إلى إصدار الفوتونات حسب آليات الإصدار التلقائي. ظاهرة إصدار الضوء انطلاقاً من التحام الثنائيات (إلكترون - ثقب) نتيجة حقن الحاملات الأقلية تسمى التآلق الكهربائي بالحقن. نتيجة الطبيعة الإحصائية لعملية الالتحام بين الإلكترونات و الثقوب ، الفوتونات المنبعثة تكون في اتجاهات عشوائية. بنية الثنائية الباعثة للضوء يجب أن تكون بشكل يسمح للفوتونات المنبعثة أن تصدر إلى خارج الجهاز دون أن تتم إعادة امتصاصها من المادة نصف الناقل. هذا ما يعني أنه يجب أن تكون المنطقة p ضيقة بما يكفي أو يجب استعمال وصلات متغايرة المادة

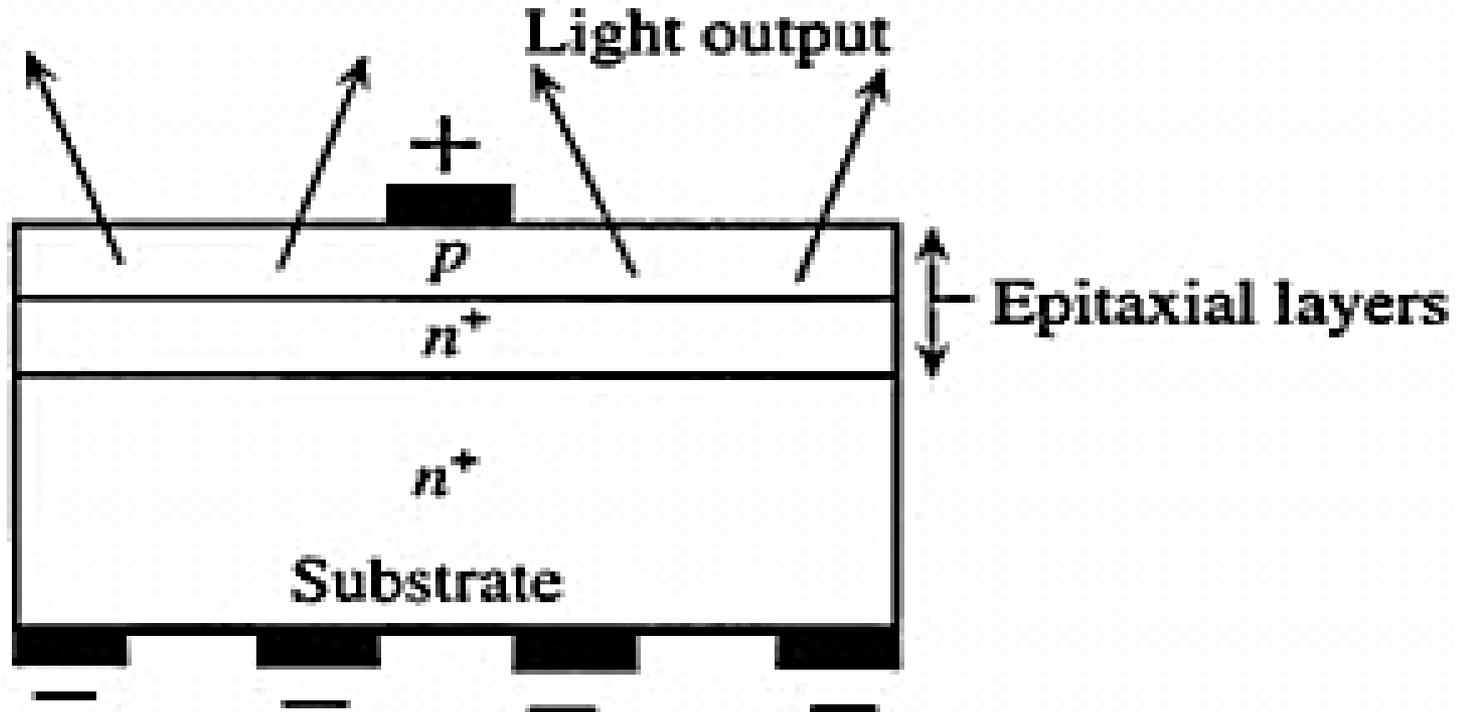


Table 6.2 Selected LED semiconductor materials

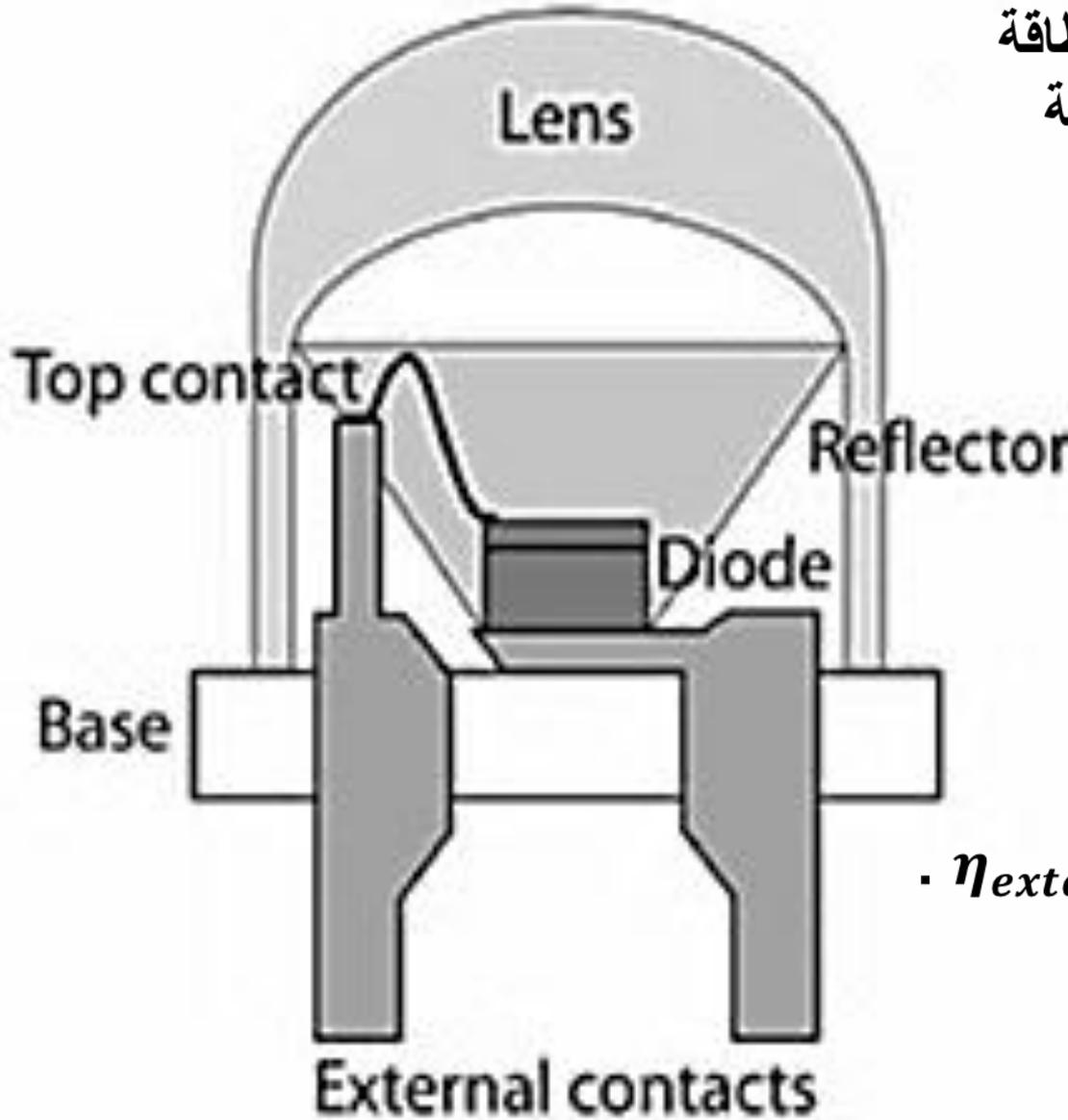
Semiconductor Active Layer	Structure	D or I	λ (nm)	η_{external} (%)	Comments
GaAs	DH	D	870–900	10	Infrared (IR)
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 < x < 0.4$)	DH	D	640–870	3–20	Red to IR
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($y \approx 2.20x$, $0 < x < 0.47$)	DH	D	1–1.6 μm	>10	LEDs in communications
$\text{In}_{0.49}\text{Al}_x\text{Ga}_{0.51-x}\text{P}$	DH	D	590–630	>10	Amber, green, red; high luminous intensity
InGaN/GaN quantum well	QW	D	450–530	5–20	Blue to green
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($y < 0.45$)	HJ	D	630–870	< 1	Red to IR
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($y > 0.45$) (N or Zn, O doping)	HJ	I	560–700	< 1	Red, orange, yellow
SiC	HJ	I	460–470	0.02	Blue, low efficiency
GaP (Zn)	HJ	I	700	2–3	Red
GaP (N)	HJ	I	565	< 1	Green

NOTE: Optical communication channels are at 850 nm (local network) and at 1.3 and 1.55 μm (long distance). D = direct bandgap, I = indirect bandgap. η_{external} is typical and may vary substantially depending on the device structure. DH = double heterostructure, HJ = homojunction, QW = quantum well.

$\eta_{external}$: المردود الخارجي لثنائية LED

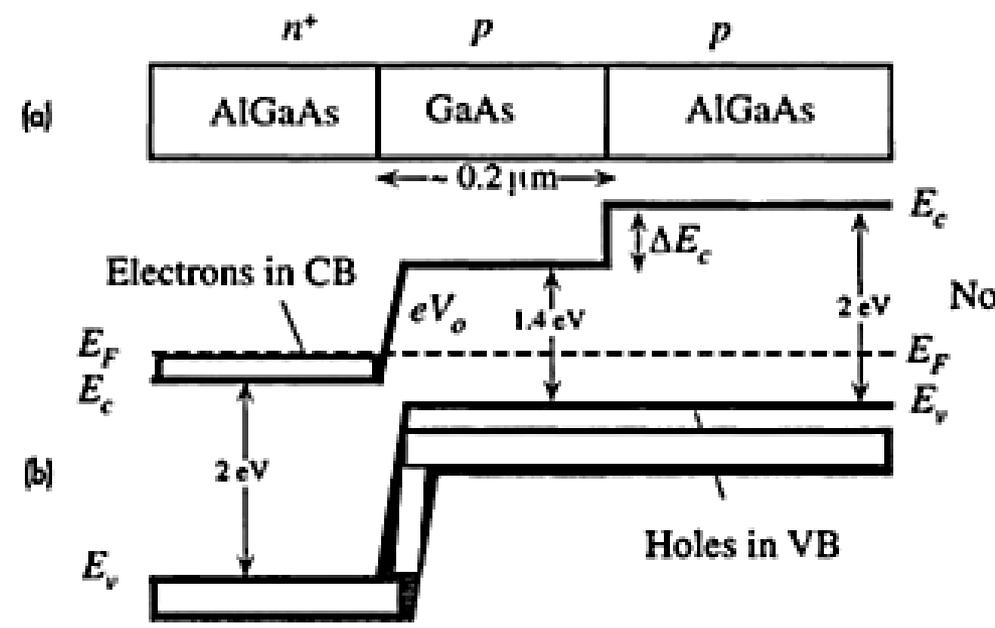
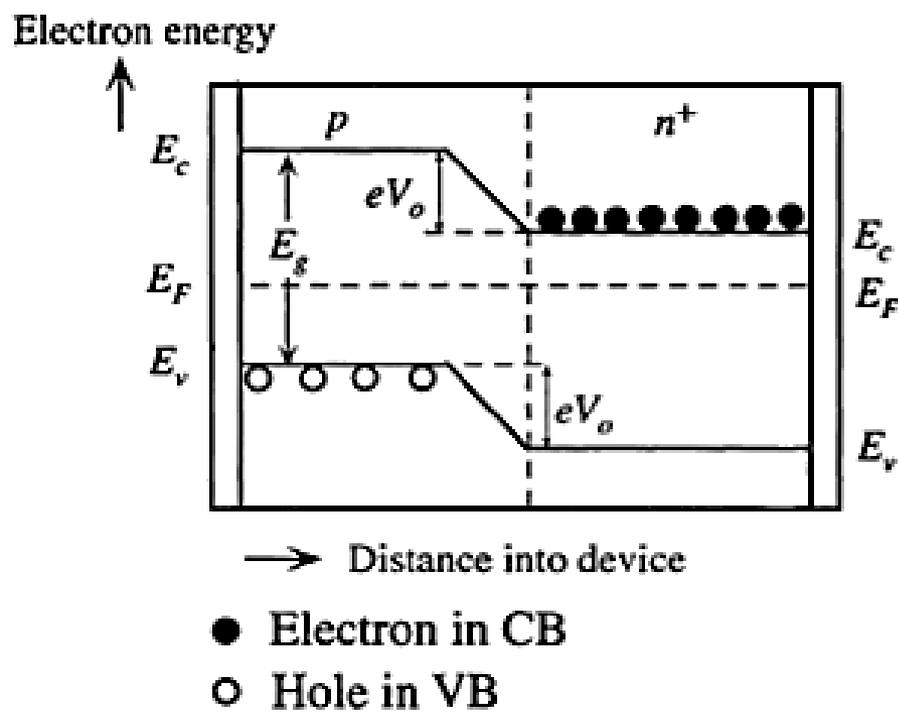
يكمم مردود تحويل طاقة كهربائية إلى طاقة ضوئية صادرة إلى الخارج (طاقة ضوئية خارجية صادرة). إنه يتضمن المردود الداخلي لعملية الالتحام المشع و المردود التالي لاستخراج الفوتونات من الجهاز. الاستطاعة الكهربائية المزودة لثنائية LED هي فقط جداء تيار الثنائية و جهد الثنائية: $I \times V$. إذا كانت P_{out} هي الاستطاعة الضوئية الصادرة من قبل الجهاز، إذن:

$$\eta_{external} = \frac{P_{out} (optical)}{I \times V} \times 100 \%$$



ثنائيات LED عالية الشدة الضوئية غير متجانسة الوصلة (Heterojunction)

High-Intensity LEDs): وصلة pn بين نصفي ناقل مطعمان بتطعيم n و p و هما من نفس نصف الناقل أي لهما نفس الفاصل الطاقي E_g تسمى وصلة متجانسة (homojunction). وصلة بين نصفي ناقلين مطعمان من نوع n و P و لكنهما من نصفي ناقل مختلفان أي يختلفان في الفاصل الطاقي ($E_{g1} \neq E_{g2}$) تسمى وصلة غير متجانسة (hétérojonction). بينة جهاز من نصف ناقل حيث تكون فيه الوصلات بين مواد مختلفة الفاصل الطاقي تسمى جهاز غير متجانس البنية (heterostructure device)



ثنائيات LED عالية الشدة الضوئية

غير متجانسة الوصلة (Heterojunction)

(High-Intensity LEDs

صناعة ثنائيات LED من أجل رفع

شدة الضوء الصادر تستعمل بنى

غير متجانسة مزدوجة الوصلة

(double heterostructure).

مخطط جهاز غير متجانس البنية

مزدوج الوصلة (double-heterostructure)

(DH) device (DH) مكون من وصلتين

بين مواد نصف ناقلة بفواصل طاقة

مختلفة. في هذه الحالة أنصاف النواقل

هي (AlGaAs ($E_g=2eV$) مع GaAs (1.42eV).

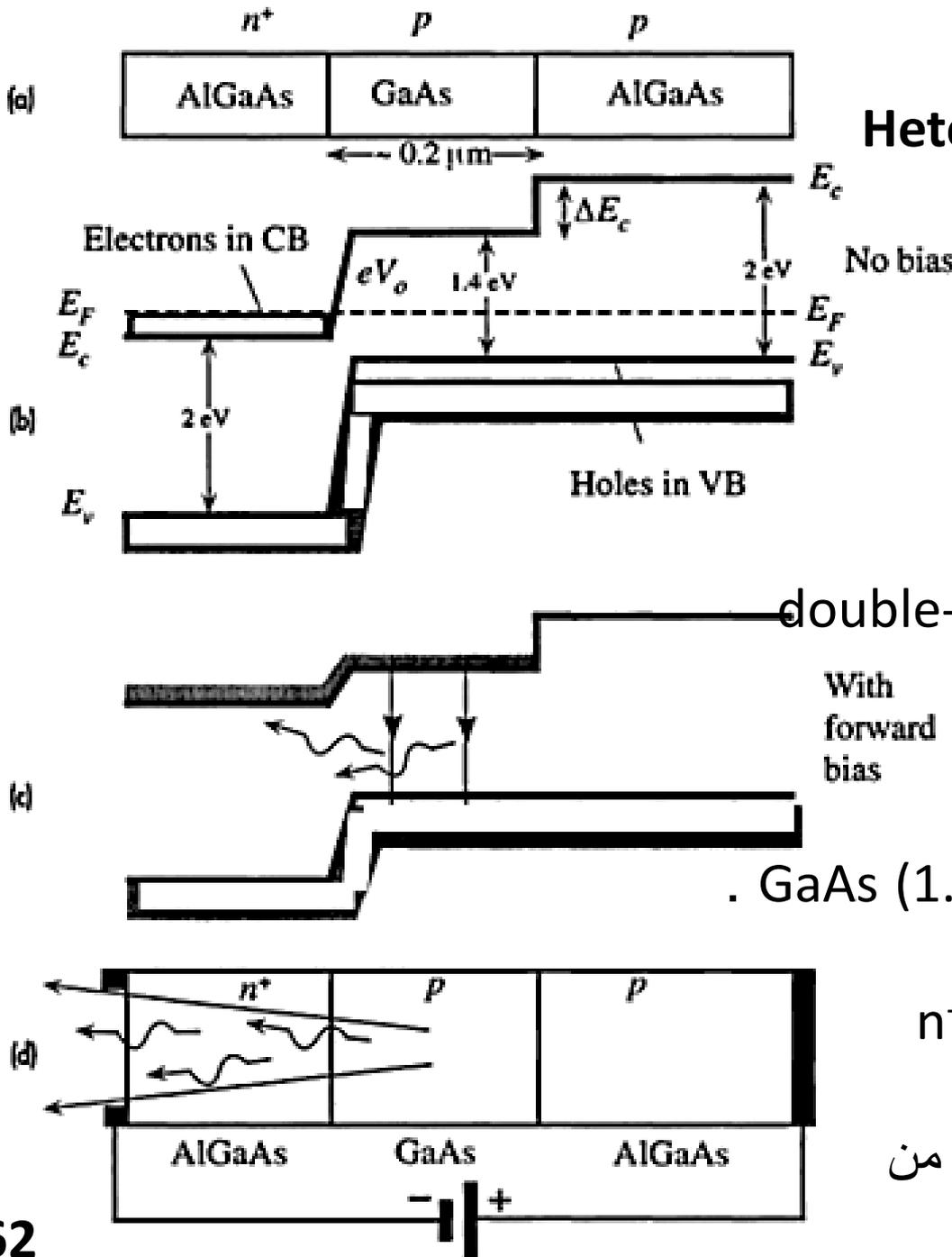
البنية غير المتجانسة مزدوجة الوصلة

في الشكل لها وصلة غير متجانسة n^+p

بين AlGaAs و GaAs.

المنطقة P هي منطقة رقيقة سمكها جزء من

الميكرومتر و ليست مطعمة بشدة.

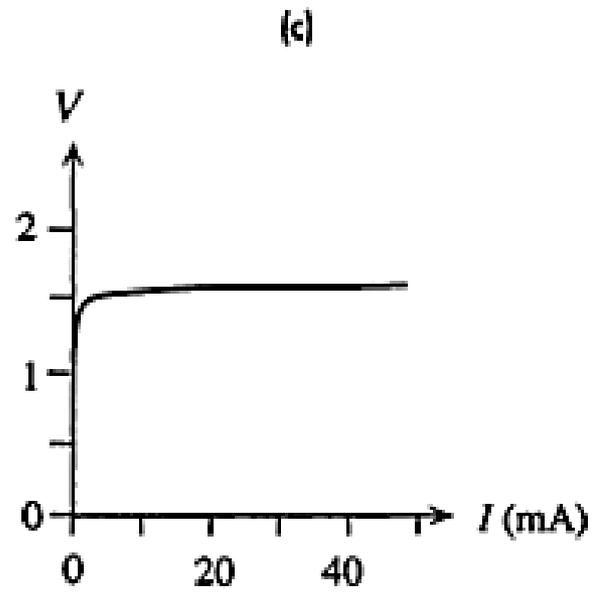
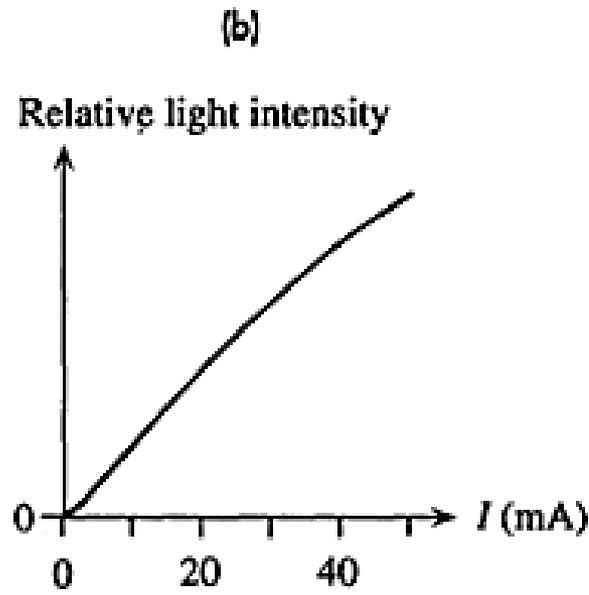
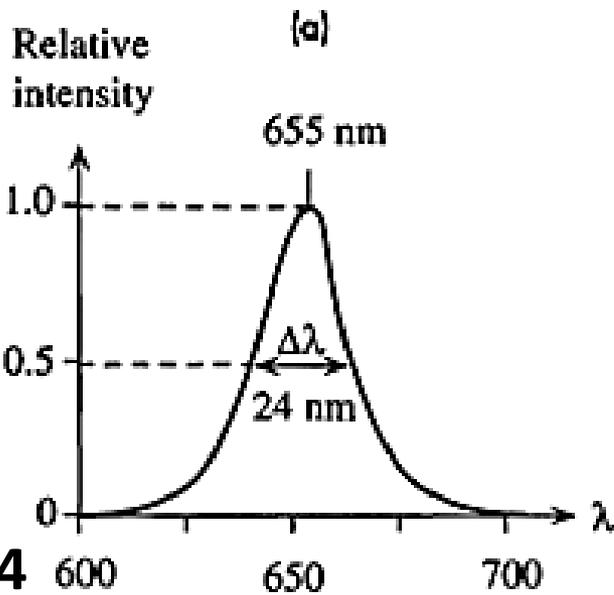
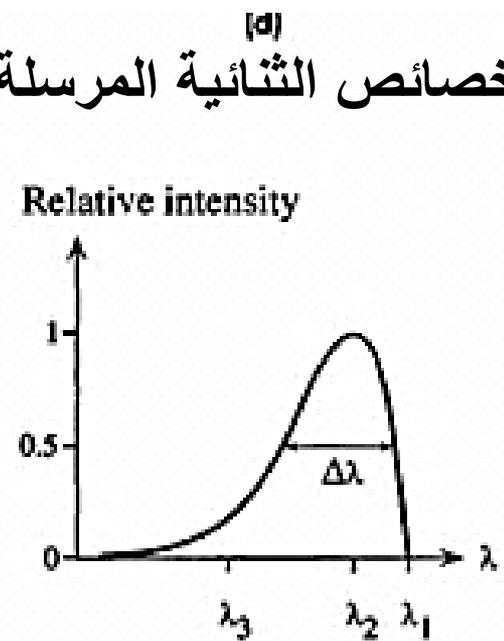
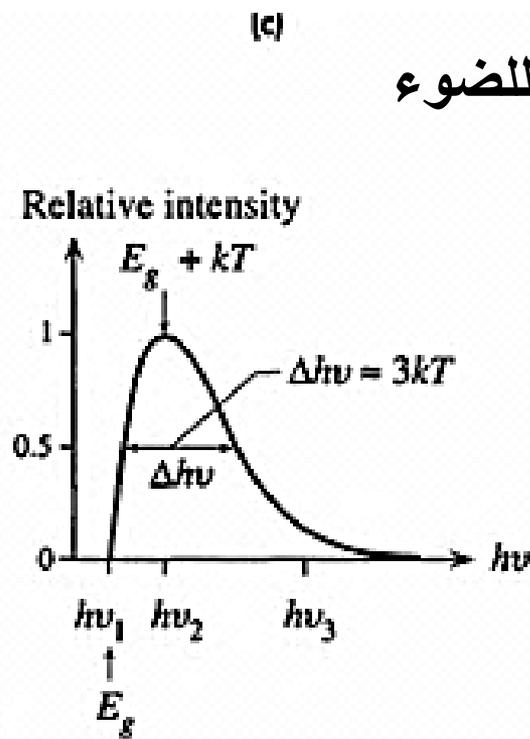
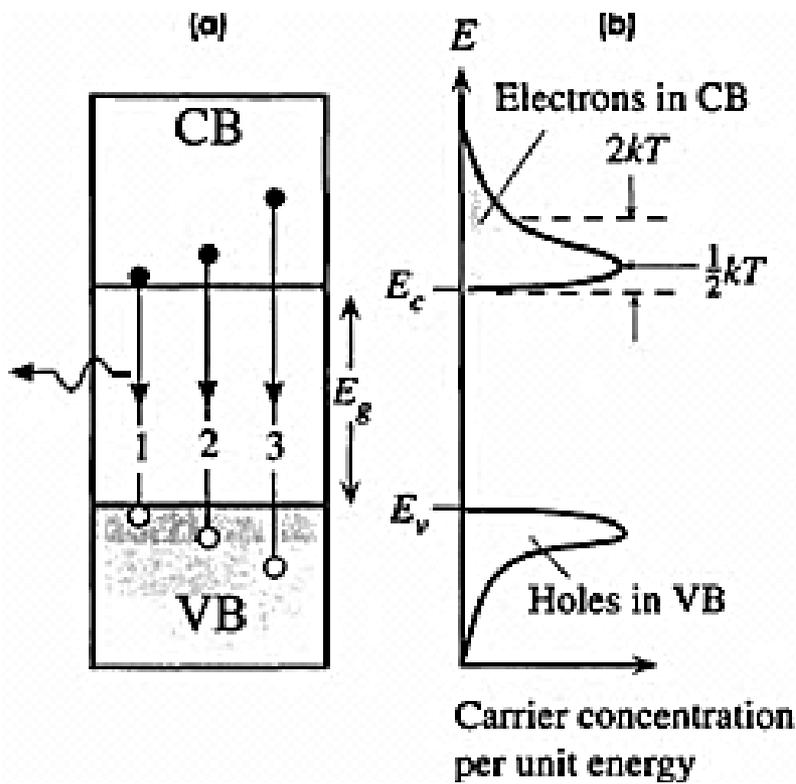


مخطط الطاقة المبسط لكل الجهاز في غياب استقطاب مابين في الشق (b) من الشكل ، مستوى فارمي EF مستمر عبر كل البنية هناك حاجز كمون qV_0 علي الإلكترونات في عصابة النقل في المنطقة $n^+ - AlGaAs$ ضد انتشارها داخل المنطقة $p - GaAs$ هناك تغير في عرض الفاصل الطاقى على مستوى الوصلة بين $p - GaAs$ و $p - AlGaAs$ الذي ينتج عنه تغير مفاجئ ΔE_C في E_C بين عصابتي النقل في المنطقة $p - GaAs$ و المنطقة $p - AlGaAs$ هذا ΔE_C هو فعليا حاجز كمون يمنع مرور أي إلكترون في عصابة النقل في المنطقة $p - GaAs$ إلى عصابة النقل في المنطقة $p - AlGaAs$ هناك أيضا تغير ΔE_V في E_V لكنه صغير و غير موضح في الشكل .

عند تطبيق استقطاب مباشر V ، أغلب هذا الجهد يتأسس بين $n^+ - AlGaAs$ و $p - GaAs$ و يخفض من حاجز الكمون qV_0 إلى $q(V_0 - V)$ ، كما هو الحال في وصلة pn عادية . هذا يسمح لإلكترونات عصابة النقل في المنطقة $n^+ - AlGaAs$ أن تحقق أو تدخل في المنطقة $p - GaAs$ كما يظهره الشق (c) للشكل . هذه الإلكترونات تنحصر في عصابة النقل في المنطقة $p - GaAs$ لأنه هناك حاجز كمون ΔE_C بين $p - GaAs$ و $p - AlGaAs$ يعيق مرور الإلكترونات إلى $p - AlGaAs$. المناطق $p - AlGaAs$ و $n^+ - AlGaAs$ ذات الفاصل الطاقى العريض تنصرف إذن كمناطق حصر تنحصر الإلكترونات المحقونة في المنطقة $p - GaAs$. التحام الإلكترونات المحقونة مع الثقوب المتواجدة سلفا في المنطقة $p - GaAs$ تنتج إصدار تلقائي للفوتونات ، بما أن عرض الفاصل الطاقى E_g لـ $AlGaAs$ هو أكبر من $GaAs$ ، الفوتونات الصادرة لا يمكن إعادة امتصاصها عندما تغادر المنطقة الفعالة و تستطيع الوصول إلى سطح الجهاز كما موضح في الشق (d) للشكل . كذلك لا يمتص الضوء في المنطقة $p - AlGaAs$ ، يمكنه أن ينعكس ليرفع من شدة الضوء الصادر . أنصاف النواقل ذات الفاصل الطاقى العريض تملك عموما قرائن انكسار منخفضة ، أي أن المنطقة $AlGaAs$ لها قرينة انكسار أقل من المنطقة $GaAs$. التغير في

قرائن الانكسار يحصر الفوتونات الصادرة بحيث تصدر فقط من المنطقة الفعالة $p - GaAs$

خصائص الثنائية المرسله للضوء



إن طاقة الفوتون الصادر من ثنائية LED ليست بكل بساطة مساوية إلى عرض الفاصل الطاقى Eg لأن الإلكترونات في عصابة النقل طاقاتها متوزعة ضمن العصابة وذلك هو الحال بالنسبة للثقوب في عصابة التكافؤ الشكل أسفله (a) و (b) يوضح مخطط الطاقة وتوزيع الإلكترونات و الثقوب الطاقية في عصابتي النقل و التكافؤ على التوالي . تركيز الإلكترونات كدالة في الطاقة عبر عصابة النقل معطاة بـ : $n_E(E) = g(E) \cdot f(E)$ أين تمثل $g(E)$ كثافة الحالات و $f(E)$ دالة فارمي ديراك . احتمال تواجد إلكترون في مستوى الطاقة E الجداء $g(E) \cdot f(E)$ يمثل تركيز الإلكترونات في وحدة الطاقة أو التركيز كدالة في الطاقة وهو مرسوم وفق المحور الأفقي في الشكل (b) . هناك توزيع مماثلة للثقوب في عصابة التكافؤ تركيز الإلكترونات في عصابة النقل كدالة في الطاقة ليس متناظر و يمر بقيمة عظمى عند $\frac{1}{2} kT$ فوق E_C . امتداد الطاقة لهذه الإلكترونات هو إلى حد ما $2kT$ انطلاقاً من E_C كما يظهره الشكل (b) تركيز الثقوب يمتد بشكل مماثل انطلاقاً من E_V في عصابة التكافؤ نذكر أن معدل الالتحام المباشر متناسب مع تركيزي الإلكترونات و الثقوب عند الطاقات المعنية الانتقال المشار إليه بـ 1 في الشكل (a) يعني الالتحام المباشر بين إلكترون عند E_C و ثقب عند E_V لكن تركيز حاملات الشحنة قريب حدود العصابات صغيرة جداً و بالتالي هذا النوع من الالتحام لا يحدث كثيراً . الشدة النسبية للضوء عند طاقة الفوتون $h\nu_1$ صغيرة كما يظهره الشكل (c) . الانتقالات التي تتضمن أكبر تراكيز للإلكترونات و الثقوب هي التي تحدث بكثرة . مثلاً ، الانتقال 2 في الشكل (a) يملك أكبر احتمال لأنه سواء تركيز الإلكترونات أو الثقوب يمر بقيمة كبرى عند هذه الطاقات كما يظهره الشكل (b) . شدة الضوء النسبية الموافقة لطاقة الانتقال $h\nu_2$ هي إذن القصوى أو قريبة من القيمة القصوى كما يظهره الشكل (c) . الانتقال المشار إليها بـ 3 في الشكل (a) و التي تصدر فوتونات ذات طاقة $h\nu_3$ نسبياً عالية تتضمن الإلكترونات و الثقوب الطاقية و التي تراكيزها صغيرة كما يظهر في الشكل (b) و بالتالي شدة الضوء النسبية صغيرة عند طاقات الفوتونات العالية .

تتأقص . الشدة . الضوئية . مع . طاقة . الفوتون . موضح . في . الشكل . (c) . خصائص . الشدة . الضوئية . النسبية .
مقابل . طاقة . الفوتون . للطيف . الصادر . مبين . في . الشكل . (c) . و . تمثل . خصائص . مهمة . للثنائية . LED .
بإعطاء . الطيف . في . الشكل . (c) . يمكن . أيضا . أن . نتحصل . على . خصائص . شدة . الضوء . النسبية . بدلالة . طول .
الموجة . كما . مبين . في . الشكل . (d) . $(\lambda = c/\nu)$. عرض . الطيف . الصادر . $\Delta\nu$. أو . $\Delta\lambda$. معرف . بالعرض .
بين . نقطتي . نقصان . الشدة . الضوئية . النسبية . إلى . نصف . قيمتها . العظمى . كما . موضح . في . الشكل . (c) . و . (d) .
. طول . الموجة . الموافق . للقيمة . الأعظمية . للشدة . الضوئية . و . العرض . $\Delta\lambda$. للطيف . الصادر . متعلقان .
بوضوح . بالتوزيعات . الطاقية . للإلكترونات . و . الثقوب . في . عصابتي . النقل . و . التكافؤ . و . بالتالي . بكثافة . حالات .
الطاقة . في . هذه . العصابات . طاقة . الفوتون . عند . قمة . الإصدار . هي . بالتقريب . $E_g + kT$. و . هي . توافق .
الانتقالات . بين . قمة . توزيع . الإلكترونات . طاقيا . و . قمة . توزيع . الثقوب . في . الشكل . (b) . العرض . $\Delta(h\nu)$.
للإشعاع . الصادر . بين . نقطتي . نقصان . الشدة . الضوئية . إلى . النصف . هو . بالتقريب . $3 kT$. كما . موضح . في .
الشكل . (c) . من . الواضح . نسبيا . حساب . العرض . الطيفي . $\Delta\lambda$. الموافق . لـ : $\Delta(h\nu) \cong 3 kT$.

الطيف الصادر أو خصائص الشدة الضوئية النسبية، مقابل طول الموجة، من ثنائية LED لا يتعلق فقط بالمادة نصف الناقله و لكن أيضا ببنية الثنائية ذات الوصلة pn، بما في ذلك مستويات تركيز التطعيم. الطيف في الشكل (6.47.d) يمثل طيف مثالي دون إدخال تأثيرات التطعيم المرتفع على عصابات الطاقة و إعادة امتصاص بعض الفوتونات. الخصائص المميزة لـ LED مرسله للضوء الأحمر (655 nm) كمثال موضحة في الشكل 6.48.a إلى c. الطيف الصادر في الشكل 6.48.a يظهر تناظر أكثر من الملاحظ. في الطيف المثالي في الشكل 6.47.d عرض الطيف هو حوالي 24 nm ما يوافق عرض قدره حوالي 2.7 kT في التوزيع الطاقة للفوتونات الصادرة. كما يزداد التيار في LED كذلك يزداد تركيز حاملات الشحنة الأقلية المحقونة و كذلك معدل الالتحام المشع و بالتالي شدة الضوء الصادر. الزيادة في الاستطاعة الضوئية الصادرة ليست بأي حال خطية مع تيار LED. كما يظهر في الشكل 6.48.b عند مستويات عالية للتيار، فإن حقن معتبر لحاملات الشحنة الأقلية يؤدي إلى جعل زمن الالتحام مرتبط بتركيز الحاملات المحقونة و بالتالي مرتبط بالتيار نفسه. هذا يؤدي إلى معدل التحام غير خطي مع التيار. الخصائص تيار جهد موضحة في الشكل 6.48.c أين يمكن ملاحظة أن جهد العتبة هو حوالي 1.5 V انطلاقا منه يزداد التيار بحددة مع الجهد. جهد العتبة يعتمد على طبيعة نصف الناقل و عموما يزداد مع الفاصل الطاقي Eg. مثلا بالنسبة لثنائية LED مرسله للون الأزرق جهد العتبة هو حوالي 3.5-4.5 V. من أجل LED مرسله للون الأصفر جهد العتبة 2 V و من أجل LED-GaAs مرسله للإشعاع ما تحت الحمراء جهد العتبة 1 V.

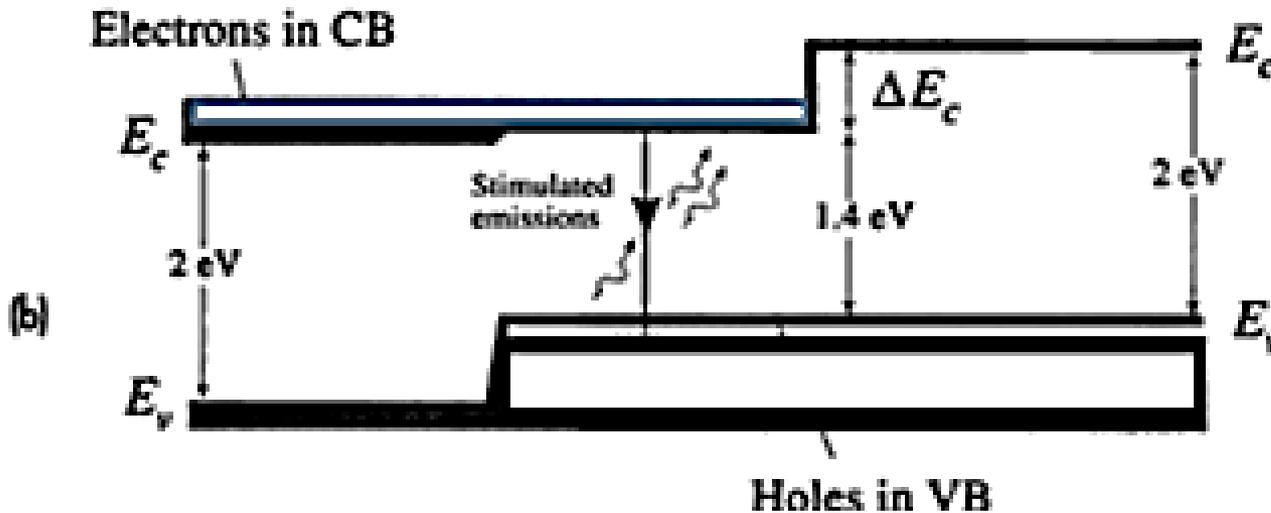
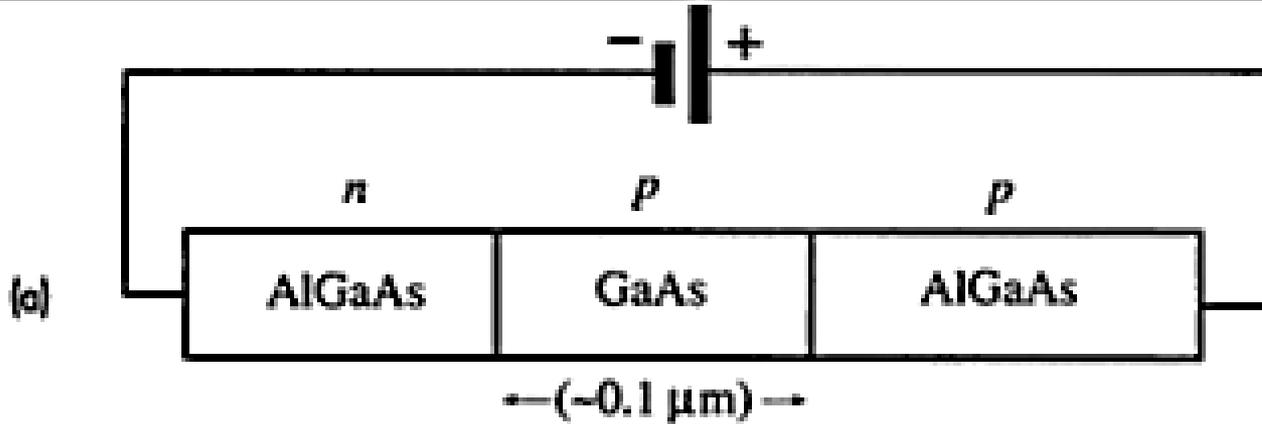
ثنائية الليزر : Diode laser

كل ثنائيات الليزر بأنصاف النواقل هي غالباً بنيات غير متجانسة (*hétérostructures*)

مزدوجة الوصلة (*double jonction*) (*DH: Double hétérostructures*) حيث

مخطط الطاقة مشابه لمخطط ثنائية LED مخطط الطاقة لثنائية الليزر DH مستقطبة استقطاب

مباشر موضح في الشكل.



كل ثنائيات الليزر بأنصاف النواقل هي غالباً بنيات غير متجانسة (*hétérostructures*) مزدوجة الوصلة (*double jonction*) (*DH: Double hétérostructures*) حيث مخطط الطاقة مشابه لمخطط ثنائية LED مخطط الطاقة لثنائية الليزر DH مستقطبة استقطاب مباشر موضح في الشكل.

في هذه الحالة أيضاً أنصاف النواقل هي $AlGaAs$ $E_g \sim 2 \text{ eV}$ و $GaAs$ $E_g \sim 1.4 \text{ eV}$. المنطقة $p-GaAs$ هي منطقة رقيقة سمكها حوالي $0.1 - 0.2 \mu m$ و تكون المنطقة الفعالة التي فيها تحدث الإصدارات المحرّضة (*stimulated emissions*). كل من المنطقتين $p-GaAs$ و $p-AlGaAs$ هما مطعمتان بشدة من نوع p و هما بذلك منحطتان (*dégénérées*) مع مستوى فارمي E_{fp} في عصابة التكافؤ. عندما يطبق جهد استقطاب مباشر معتبر ، E_c في المنطقة

$n-AlGaAs$ تصبح قريبة جداً من E_c في المنطقة $p-GaAs$ ما يسمح بحقن معتبر للإلكترونات في عصابة النقل من المنطقة $n-AlGaAs$ إلى داخل المنطقة $p-GaAs$

Holes in VB

باستقطاب مباشر معتبر، حاجز الكمون بين E_c للمنطقة $n-AlGaAs$ و E_c للمنطقة $p-GaAs$ ، يختفي

ما يسبب حقن كبير للإلكترونات من المنطقة

$n-AlGaAs$ داخل عصابة النقل للمنطقة $p-GaAs$

. الإلكترونات المحقونة تنحصر في عصابة النقل

للمنطقة $p-GaAs$ بما أنه هناك حاجز كمون

بين $p-AlGaAs$ و $p-GaAs$ بسبب

التغير في عرض الفاصل الطافي .

المنطقة $p-GaAs$ مطعمة بشدة و منحطة.

أي أن سقف عصابة التكافؤ مملوء

بالثقوب، أو أن كل الحالات الإلكترونية

فوق مستوى فارمي E_{fp} فارغة في هذه

المنطقة. الاستقطاب المباشر الكبير يحقن

تركيز كبير للإلكترونات من المنطقة $n-AlGaAs$

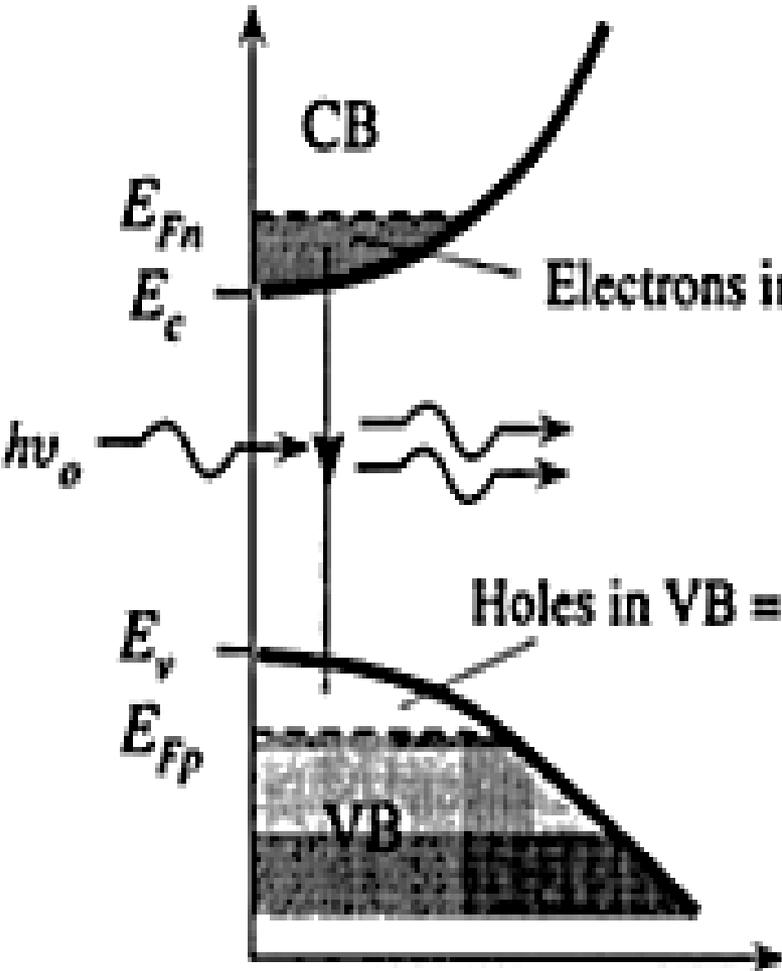
إلى عصابة النقل للمنطقة $p-GaAs$. بالتالي ،

هناك تركيز كبير للإلكترونات في عصابة النقل

و حالات طاقة فارغة كلية في سقف عصابة التكافؤ

، ما يعني أنه هناك انقلاب في الإسكان (*inversion de population*)

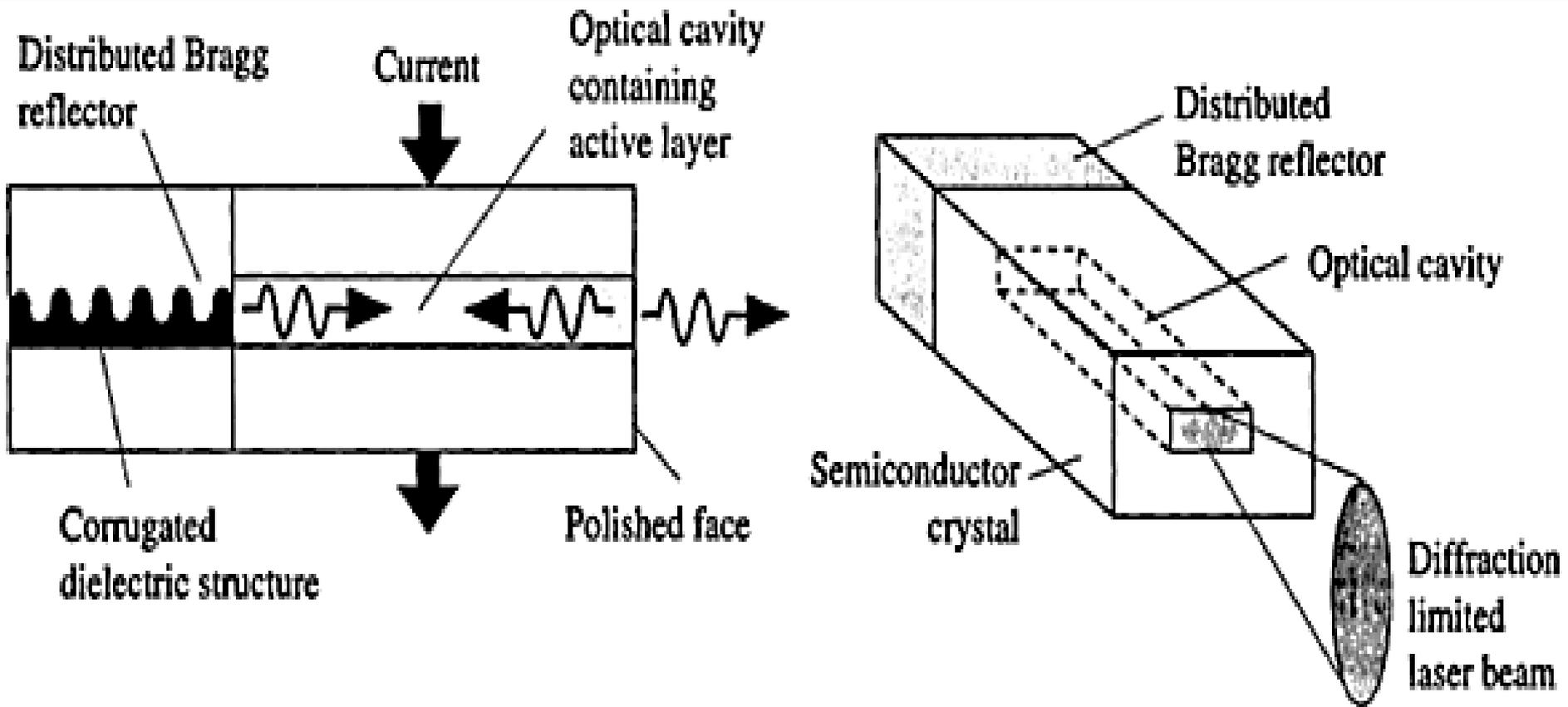
Energy



Density of states

فوتون وارد بطاقة $h\nu_0$ أعلى من E_g يمكن أن يحرض إلكترون نقل في المنطقة $p\text{-GaAs}$ إلى النزول من عصابة النقل إلى عصابة التكافؤ و إصدار فوتون بالإصدار المحرض (*émission stimulée*). هذا الانتقال هو التحام إلكترون مع ثقب محرض بفوتون ، أو الالتحام المشع لليزر. بالتالي سلسلة إصدارات محرصة في المنطقة الفعالة تنتج تضخم ضوئي من الفوتونات بطاقة $h\nu_0$ في هذه المنطقة (إنتاج الليزر). تضخم الضوء مرتبط بمدى انقلاب الإسكان و بالتالي مرتبط بتيار الاستقطاب المباشر للثنائية. الجهاز يعمل كنصف ناقل مضخم للضوء الذي يضخم إشارة ضوئية تمر عبر المنطقة الفعالة . هناك تيار عتبة (*threshold current*) أقل منه لا يحدث إصدار محرض و لا تضخيم للضوء. من أجل صناعة نصف ناقل مصدر لليزر بصفة مستمرة يجب دمج المنطقة الفعالة في تجويف بصري (*optical cavity*) . التجويف له نهايتين عاكستين للضوء ، تعكس الفوتونات المتناسقة إلى الخلف و إلى الأمام و تشجع تداخلها البناء داخل التجويف كما موضح في الشكل

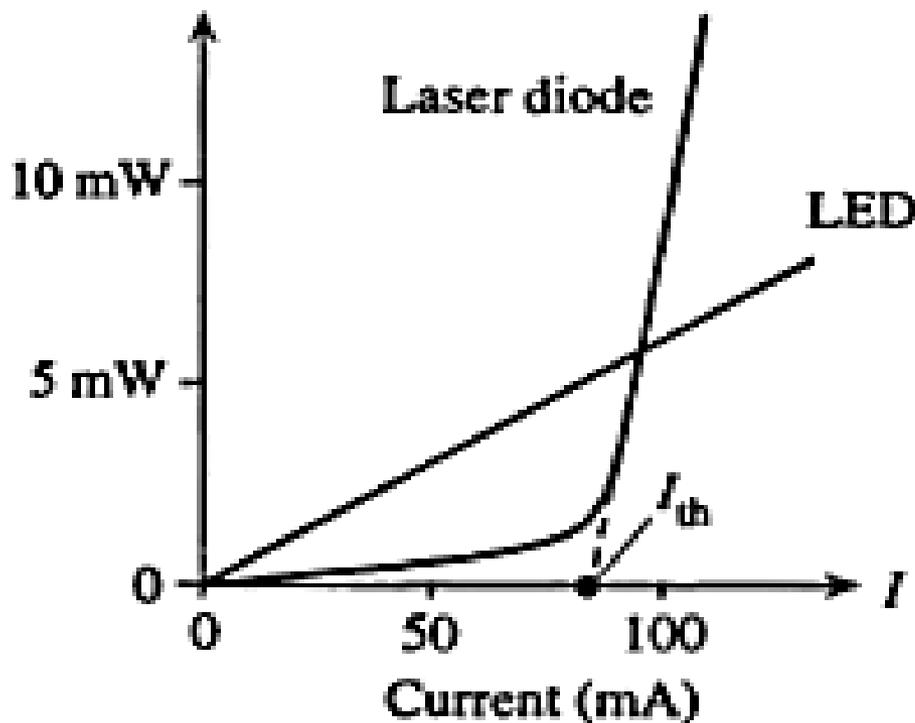
البنية غير المتجانسة مزدوجة الوصلة لها عدة ميزات. أنصاف النواقل ذات الفاصل الطاقي العريض تملك عموماً قرائن انكسار منخفضة ، ما يعني أن المنطقة AlGaAs لها قرينة انكسار أقل من المنطقة GaAs . التغير في قرائن الانكسار يكون موجه موجي ضوئي (*optical waveguide*) الذي يحصر الفوتونات في المنطقة الفعالة من التجويف البصري و بالتالي يخفض الضياع في الفوتونات و يزيد من تركيز الفوتونات. هذه الزيادة في تركيز الفوتونات ترفع من الإصدارات المحرصة و بالتالي من مردود الليزر.



لتحقيق الإصدارات المحرصة اللازمة من ثنائية الليزر (أي للتغلب على الضياع في الضوء) تيار الاستقطاب يجب أن يفوق تيار العتبة I_{th} هناك استطاعة ضوئية صادرة ضعيفة تحت تيار العتبة (I_{th}) لكنها فقط بسبب الالتحافات التلقائية للإلكترونات المحقونة مع الثقوب في المنطقة الفعالة ، ثنائية الليزر تتصرف كثنائية LED ضعيفة الشدة تحت التيار I_{th} .

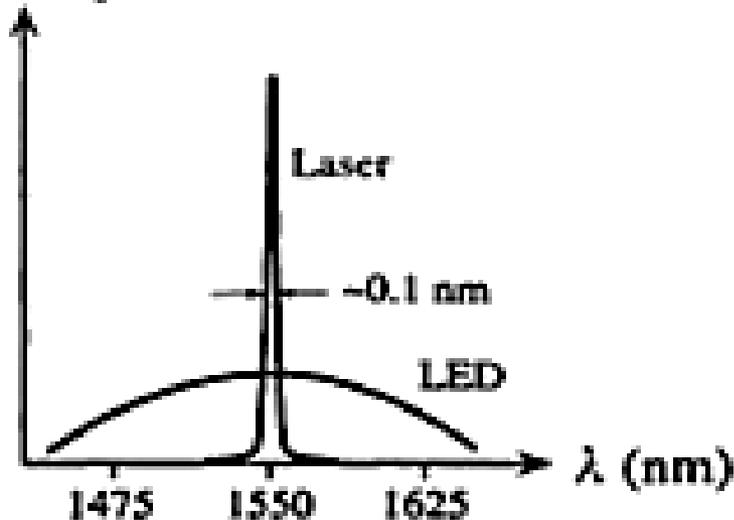
الضوء الصادر من LED يتزايد تقريبا بشكل متناسب مع تيار الثنائية . الشكل b يقارن الطيف الصادر من LED و ثنائية ليزر. يذكر أن الضوء الصادر من ثنائية الليزر هو إشعاع متناسق ، في حين من ثنائية LED هو تدفق فوتونات غير متناسقة .

Optical output power



(a)

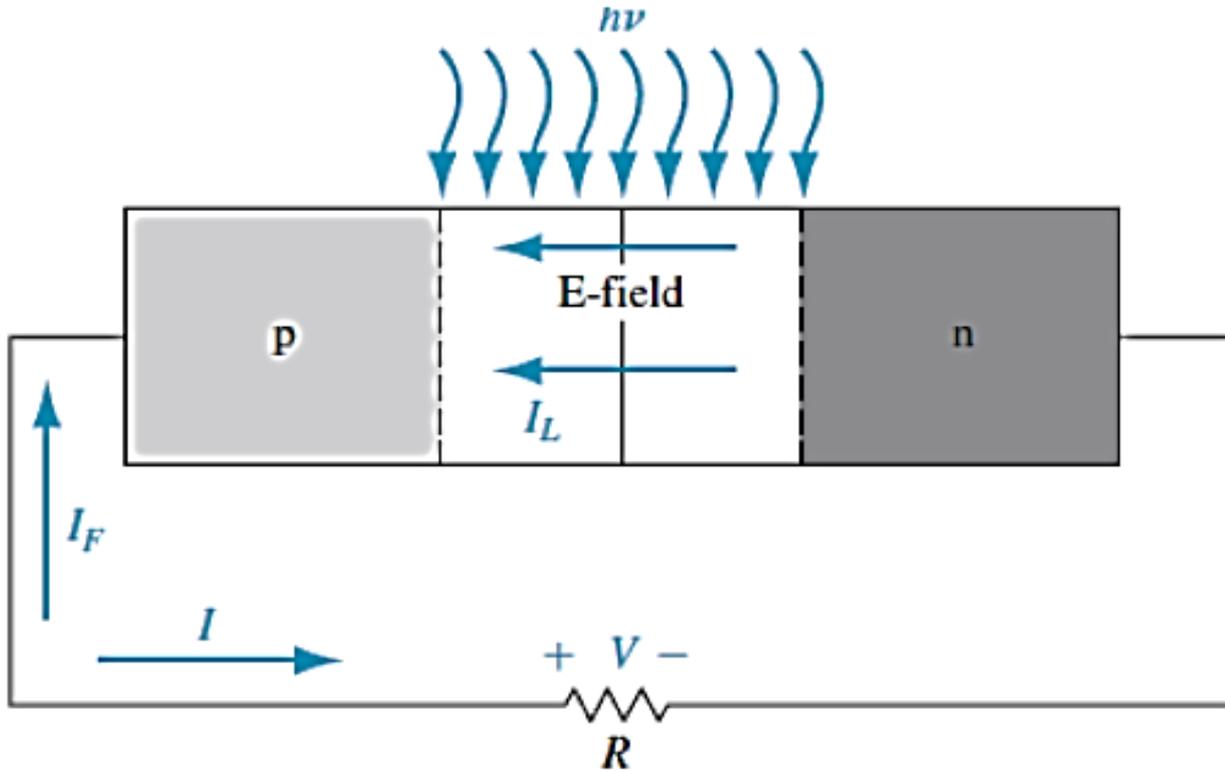
Optical power



(b)

في حالة إصدار أحادي النمط (*single - mode output*) في طيف الإصدار لا توجد إلا قمة واحدة كما مبين في الشكل *b*. أعلاه . ليزر أنصاف النواقل الذي يعمل بنمط واحد في إصدار الإشعاع يسمى ليزر أحادي النمط ، أو أحادي التردد . عرض الخط الطيفي لليزر أحادي النمط الصادر هو حوالي 0.1 nm ، و الذي يمكن مقارنته مع العرض الطيفي لثنائية LED قدره 150 nm عند قمة إصدار عند 1550 nm .

الخلايا الشمسية : الخلية الشمسية هي جهاز ذو وصلة pn دون جهد مطبق مباشرة بين طرفيها (غير مستقطبة كهربائياً). الخلية الشمسية تحول استطاعة الفوتونات (الضوء) إلى استطاعة كهربائية تحررها في شحنة . استعملت هذه الأجهزة طويلاً في منح الطاقة للأقمار الصناعية و مركبات الفضاء .
 نعتبر وصلة pn كما موضحة في الشكل مع حمولة (شحنة) مقاومة



الشكل 1- خلية شمسية من نوع pn مع مقاومة حمل

مع إضاءة موزعة بانتظام و بالتالي تولد منتظم لحاملات الشحنة الإضافية . حتى مع عدم وجود استقطاب كهربائي للوصلة ، يوجد حقل داخلي في منطقة شحنات الفضاء كما يوضح الشكل . الضوء الوارد يستطيع ينتج ثنائيات إلكترون - ثقب في منطقة شحنات الفضاء التي تنفصل عن بعضها و ينتج عنها التيار الضوئي I_L له إتجاه التيار العكسي . التيار الضوئي I_L ينتج انخفاض في الجهد عبر مقاومة الحمل و الذي بدوره يستقطب الوصلة pn استقطاب مباشر . و جهد الاستقطاب المباشر ينتج بدوره تيار استقطاب مباشر I_F كما مبين في الشكل ، التيار الصافي للوصلة pn هو محصلة كلا التياران المتعاكسان و يأخذ في حالة خلية شمسية نفس اتجاه التيار العكسي

$$I = I_L - I_F = I_L - I_S \cdot \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

التيار الضوئي هو دائما في اتجاه التيار العكسي و كذلك محصلة التيار أو التيار الكلي هو أيضا في إتجاه التيار العكسي . هناك حالتان حديتان. الحالة الأولى هي حالة دارة قصيرة عندما مقاومة الحمل $R=0$ و بالتالي $V=0$ التيار في هذه الحالة هو تيار الدارة القصيرة أي $I = I_{SC} = I_L$.

الحالة الثانية هي حالة الدارة المفتوحة عندما $R \rightarrow +\infty$. التيار الكلي $= 0$ و الجهد الناتج هو جهد الدارة المفتوحة. التيار الضوئي يعاكس تماما بالتيار المباشر :

$$I = 0 = I_L - I_S \cdot \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{kT} \right) - 1 \right]$$

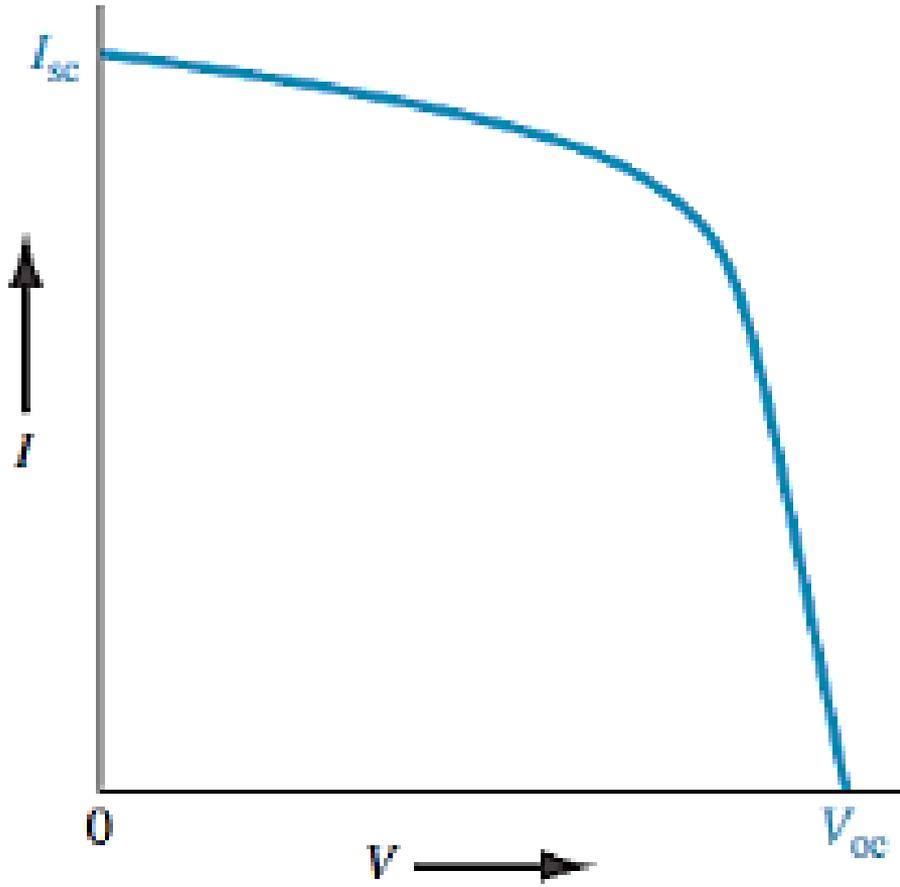


Figure 14.7 | I - V characteristics of a pn junction solar cell.

الاستطاعة الأعظمية المحررة من قبل الخلية
 $P_{max} = I_m \times V_m$

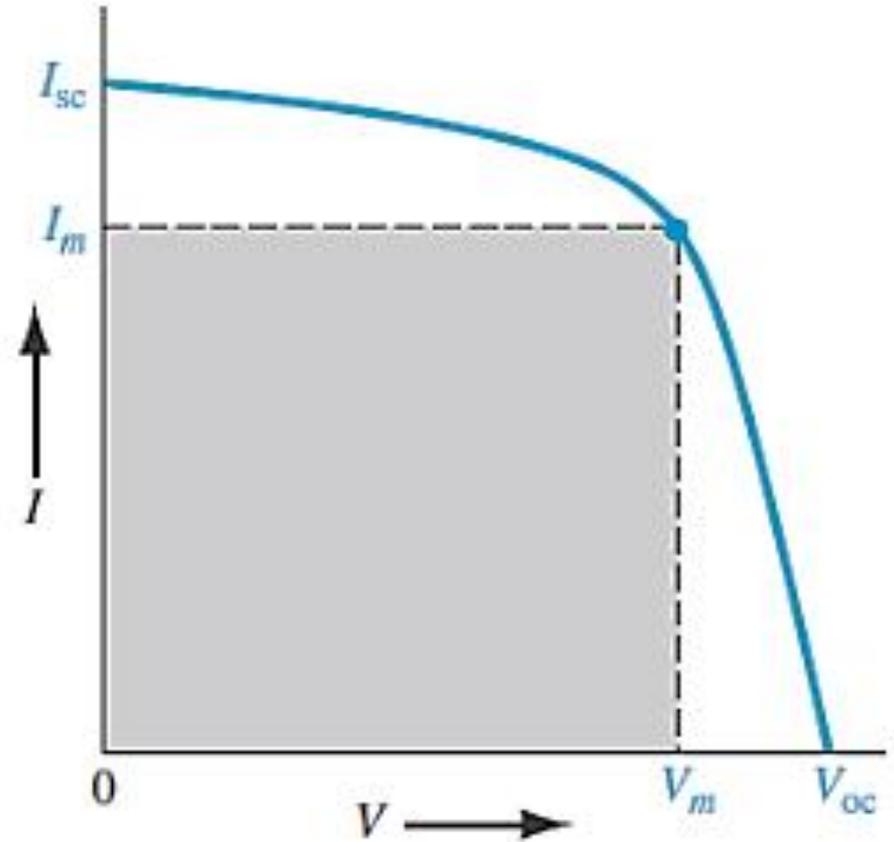


Figure 14.8 | Maximum power rectangle of the solar cell I - V characteristics.

$$V_{CO} = V_t \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_S}\right) \quad V_t = \frac{kT}{q}, \quad n=1$$

$$V_{oc} = n \cdot V_t \cdot \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_S}\right), \quad n > 1$$

$$I_F = S \cdot J_F = S \cdot \left(\frac{eD_h}{L_h N_d} + \frac{eD_e}{L_e N_a} \right) n_i^2 \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

معامل التعبئة (FF (fill factor) لخلية شمسية الذي يعكس كفاءتها يعرف بـ :

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

من الجيد أن يكون FF أقرب ما يمكن من الوحدة. لكن التزايد الأسّي لخصائص الوصلة pn يمنع هذا. عادة قيم FF هي في المجال (0.7 - 0.85) أو بالنسب المئوية (70% - 80%) و ترتبط بمادة الجهاز و البنية .

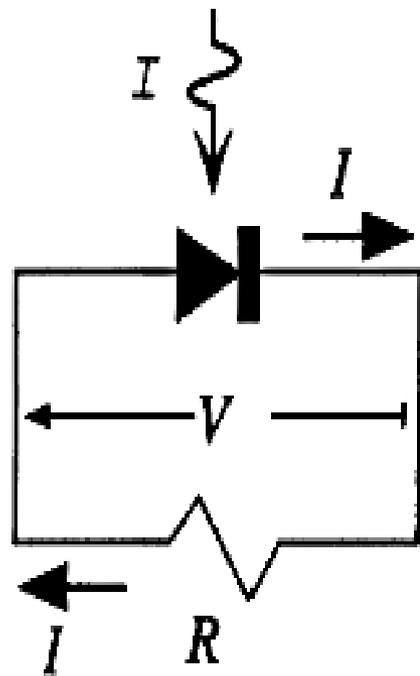
$$\eta_{photovoltaic} = (100\%) \times \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

P_{out} تمثل استطاعة الخروج أي الاستطاعة الكهربائية الاعظمية المحررة من قبل الخلية

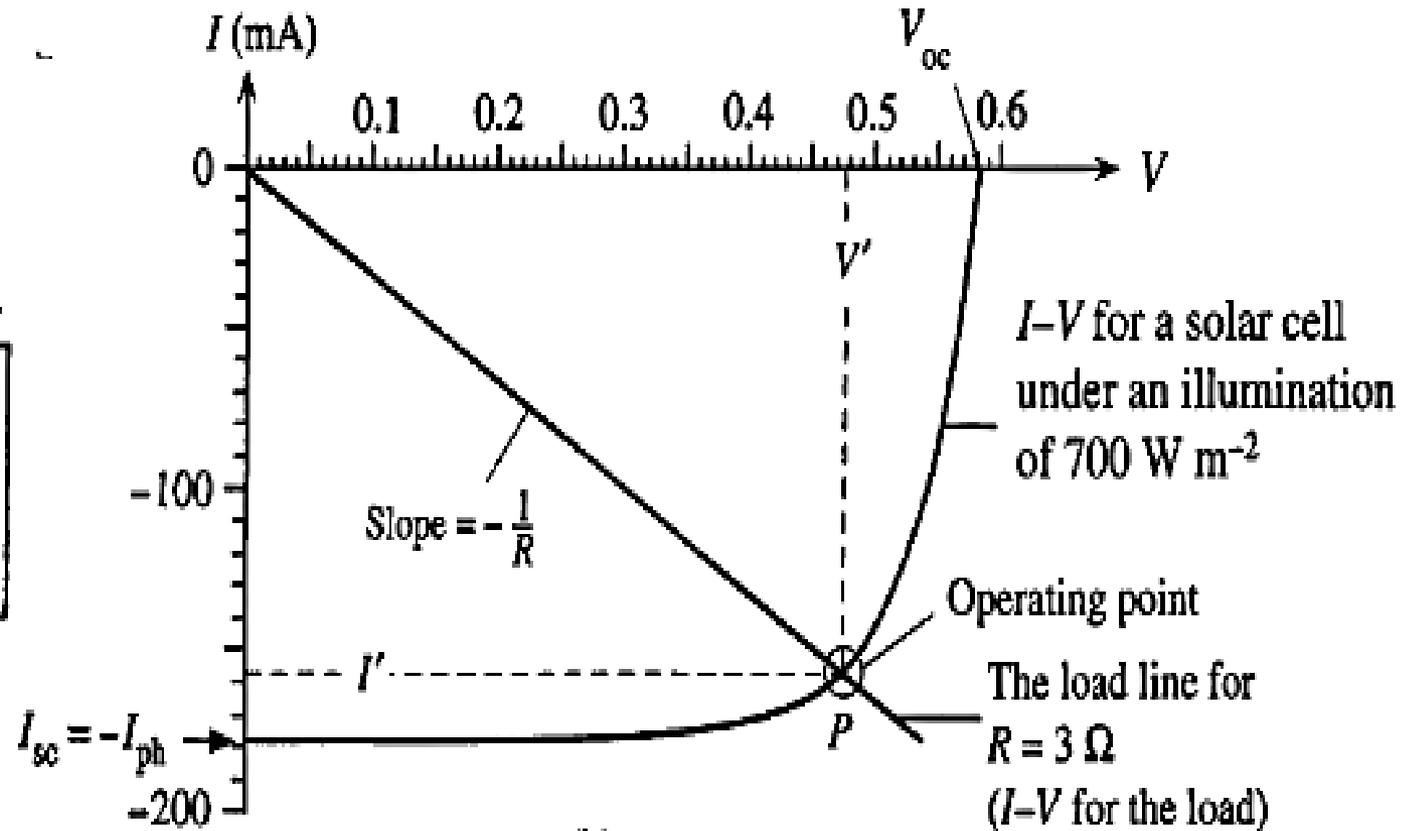
$$P_{out} = P_{max} = I_m \times V_m \quad \text{في الدارة}$$

P_{in} تمثل استطاعة الدخول أي الاستطاعة الضوئية الواردة على الخلية :

$$P_{in} = (\text{شدة الضوء}) \times (\text{المساحة المضاءة}) \quad \text{هنا } P_{in/out} = \text{Watt}$$



(a)



(b)

(a) مخطط توضيحي لدارة خلية شمسية. (b) الخاصية (I-V) مع توضيح: خط الحمل والتيار الفعلي I'