

بصريات النانو Nanophotonics

الجدول 1.2. الخصائص المتشابهة بين الفوتونات والالكترونات

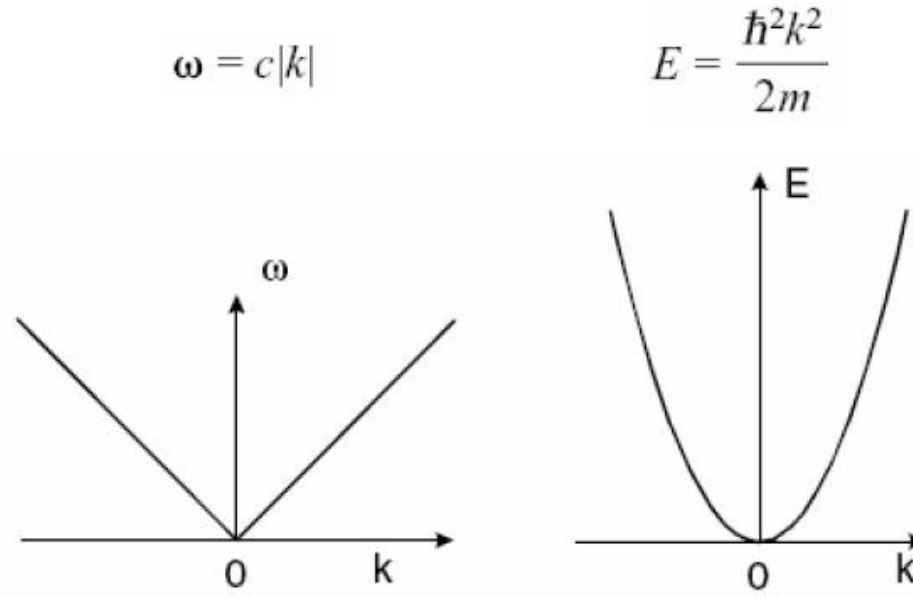
الفوتونات	الالكترونات
الطول الموجي Wavelength	
$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{c}{\nu}$	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$
المعادلة الموجية Eigenvalue (Wave) Equation	
$\left\{ \nabla \times \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times \right\} \mathbf{B}(r) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{B}(r)$	$\hat{H}\psi(r) = -\frac{\hbar^2}{2m}(\nabla \cdot \nabla + V(r))\psi(r) = E\psi$
الانتشار الحر في الفراغ Free-Space Propagation	
موجة مستوية $\mathbf{E} = \left(\frac{1}{2}\right)\mathbf{E}^0(e^{ik \cdot r - \omega t} + e^{-ik \cdot r + \omega t})$ حيث K هي متجه الموجة ولها قيمة حقيقية	موجة مستوية $\Psi = c(e^{ik \cdot r - \omega t} + e^{-ik \cdot r + \omega t})$ حيث K هي متجه الموجة ولها قيمة حقيقية
التفاعل مع المادة Interaction Potential in a Medium	
ثابت العازل (معامل الانكسار)	تفاعلات كولوم
الانتشار خلال المناطق الممنوعة كلاسيكيا Propagation Through a Classically Forbidden Zone	
فوتونات نفقية بمتجه موجة k، تخيلي وبالتالي فان السعة تضمحل بدالة اسيلة في المناطق الممنوعة	الالكترونات نفقية بسعة تضمحل بدالة اسية في المنطقة الممنوعة.
التمركز Localization	
تشنتت قوي بسبب التغيرات الكبيرة في ثابت العزل (على سبيل المثال، في البلورات الفوتونية)	تشنتت قوي بسبب التغير الكبير في تفاعلات كولوم (على سبيل المثال، في الكثرونات بلورة اشباه الموصلات)
التأثيرات التعاونية Cooperative Effects	
تفاعلات بصرية غير خطية	ترابط متعدد الاجسام زوج كووبر Cooper الفائق التوصيل تكوين اكسيتون ثنائي من الكثران وفجوة biexciton

كلا من الفوتونات والالكترونات جسيمات اولية تظهر خواص جسيمية وموجية في نفس الوقت. الفوتونات والالكترونات يمكن ان تظهر بشكل مختلف عن بعضها البعض عند وصفها في الفيزياء الكلاسيكية، والتي تعرف الفوتونات على انها امواج كهرومغناطيسية تنقل الطاقة والالكترونات على انها جسيمات اولية مشحونة (اقل كتلة في المادة).

الوصف الكمي بالمقابل يكشف ان الفوتونات والالكترونات يمكن ان تتعامل معها على انها متناظرة وتعرض الكثير من الخصائص المتشابهة.

الانتشار في الفراغ الحر للفوتونات والالكترونات

في حالة الانتشار في الفراغ الحر لا يكون هناك تبادل في الجهد او ان الجهد ثابت في الفراغ. بالنسبة للفوتونات، من السهل ان نطبق التغير المكاني الحادث على معامل الانكسار n .
متجه الموجة المعتمد على الطاقة يختلف للفوتونات (اعتماد خطي) والالكترونات (له تغير بمعادلة تربيعية).



الشكل 1.2. علاقة التشتت توضح اعتماد الطاقة على متجه الموجة لانتشار في الفراغ الحر. (a) تشتت الفوتونات. (b) تشتت الالكترونات.

لانتشار في الفراغ الحر كل قيم التردد للفوتونات والطاقة E للإلكترونات مسموحة.
هذه المجموعة المسموحة من القيم المتصلة للتردد (او الطاقة) تشكل مع بعض حزمة، وتركيب الحزم يشير إلى خصائص اعتماد التردد (او الطاقة) متجه الموجة k .

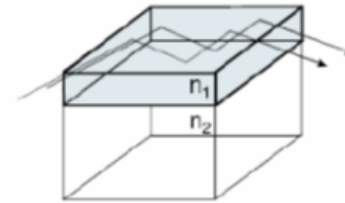
تحديد الفوتونات والالكترونات

في حالة الفوتونات، التحديد يمكن ان يكون من خلال اصطياذ الضوء في منطقة ذات معامل انكسار كبير او بواسطة سطح له عاكسية كبيرة.
في حالة الالكترونات، التحديد يؤدي الى تعديل في خواص الموجة وينتج تكميم- وبهذا قيم منفصل لأنماط الايجن الممكنة.

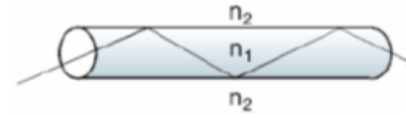
توزيع المجال وثابت الانتشار المقابل يتم الحصول عليه بواسطة حل معادلة ماكسويل وتطبيق الشروط الحدية (تعريف الحدود لموجه الموجة waveguide وتباين معامل الانكسار). حل المعادلة الموجة يبين ان التحديد ينتج مجموعات محددة منفصلة من توزيعات المجال تعرف باسم انماط الايجن eigenmodes، والتي تعرف بالأعداد الكمية (اعداد صحيحة).

معادلة الموجة المقابلة للإلكترونات هي معادلة شرودنجر Schrodinger equation. الجهد المحدد للإلكترون هو بمثابة حاجز طاقة، وهذا هي المنطقة التي تكون فيها طاقة الوضع V اكبر بكثير من طاقة E للإلكترون.

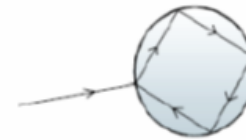
تحديد الفوتونات



موجه الموجة المستوية بصريا

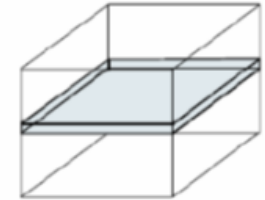


اللياف بصرية

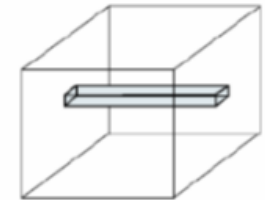


تجويف ميكروكروي بصري

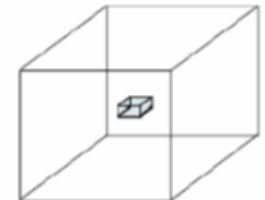
تحديد الالكترونات



البئر الكمي



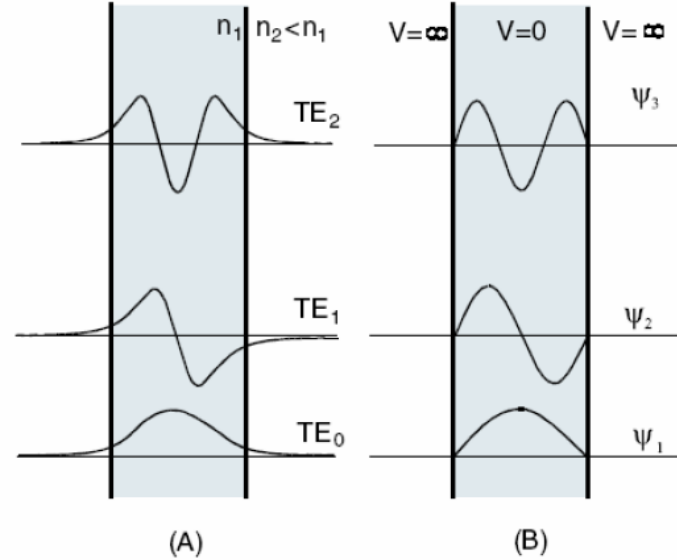
السلك الكمي



النقطة الكمية

الشكل 2.2. تحديد الفوتونات والالكترونات في العديد من الابعاد والاشكال المستخدمة لكل منهم. اتجاه الانتشار هو المحور z.

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} f(x, y) a(z) (e^{i\beta z} + e^{-i\beta z}) \quad \Psi_n(x) = \frac{1}{2i} \left(\frac{2}{l} \right)^{1/2} (e^{ikx} - e^{-ikx})$$



الشكل 3.2. (A) توزيع المجال الكهربائي لأنماط TE عند $n=0, 1, 2$ في موجة الموجة المستوي لتحديد الفوتونات في مستوى واحد. (B) الدالة الموجية Ψ لمستويات مكتمة لـ $n=1, 2, 3$ للإلكترون في صندوق ذو بعد واحد.

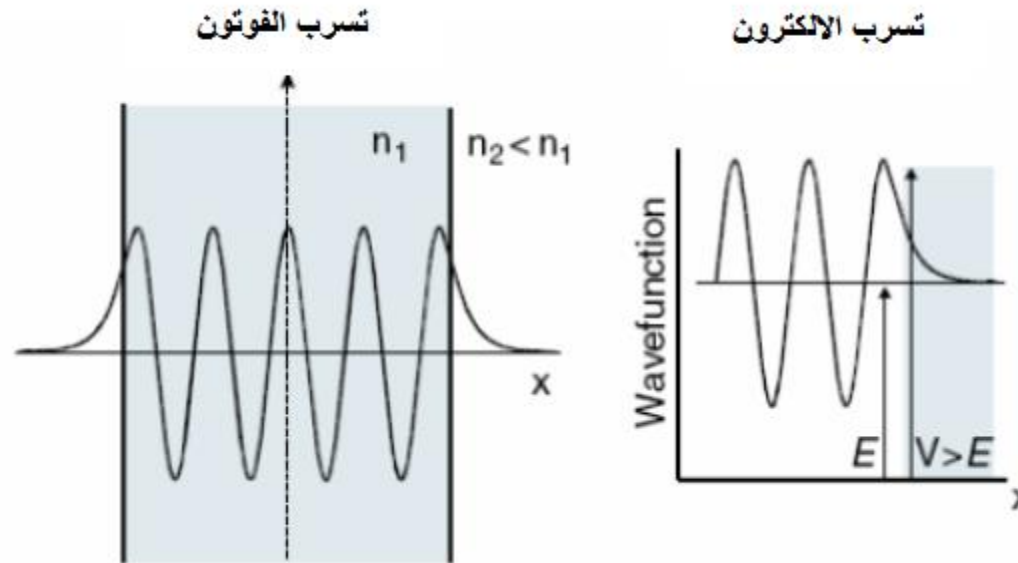
الانتشار خلال المنطقة المنوعة كلاسيكيا: ظاهرة النفق

في الصورة الكلاسيكية، الفوتونات والالكترونات محددة تماما في مناطق التحديد. للفوتونات، تمثل بواسطة الاشعة البصرية للأمواج المنتشرة كما هو موضح في الشكل 2.2.

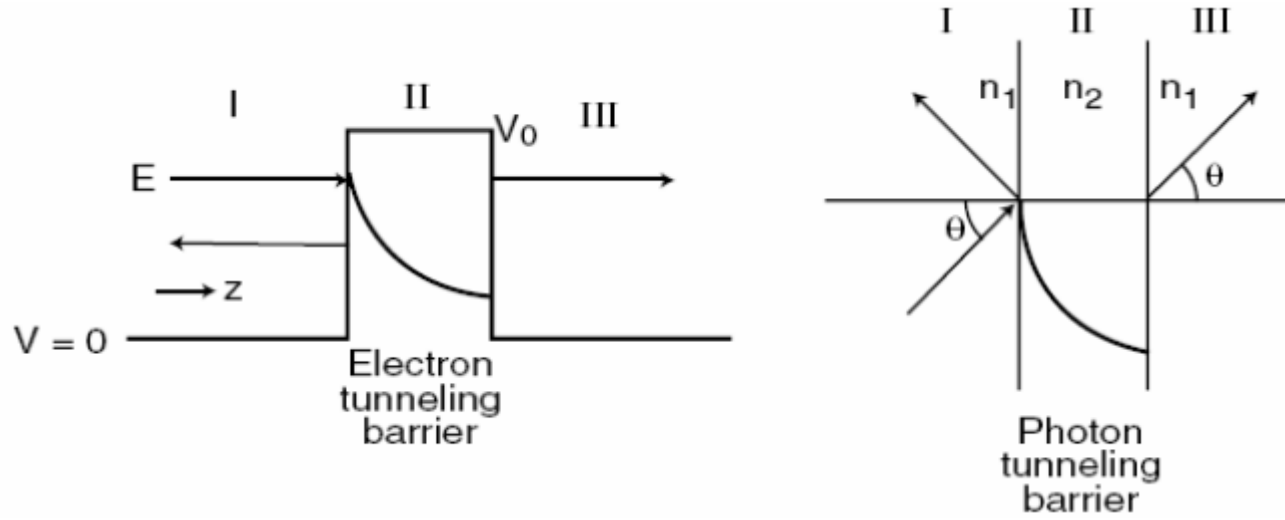
بالمثل، الفيزياء الكلاسيكية تتنبأ بهذا، بمجرد حدوث الاقتران داخل حواجز الطاقة حيث تكون الطاقة E لالكترون اقل من طاقة الجهد V نتيجة للحاجز الجهد. فان الالكترون سوف يبقى بالكامل محدد داخل جدار الجهد.

ولكن، الصورة الموجية لا تتنبأ بذلك.

توزيع المجال للضوء المحدد في مرشد الموجة waveguide يمتد بعد الحواجز لمرشد الموجة.



الشكل 5.2. مخطط يوضح تسرب الفوتونات والالكترونات مناطق الطاقة الممنوعة كلاسيكيا



الشكل 6.2 مخطط النفق للفوتون والالكترون من خلال حاجز.

هذا الضوء المتسرب يولد مجال كهرومغناطيسيا يعرف باسم الموجة الزائفة evanescent

$$\mathbf{E}_x = \mathbf{E}_0 \exp(-x/d_p)$$

في نظام المماثل، الالكترونون يظهر تسرب من خلال المناطق حيث $E < V$.

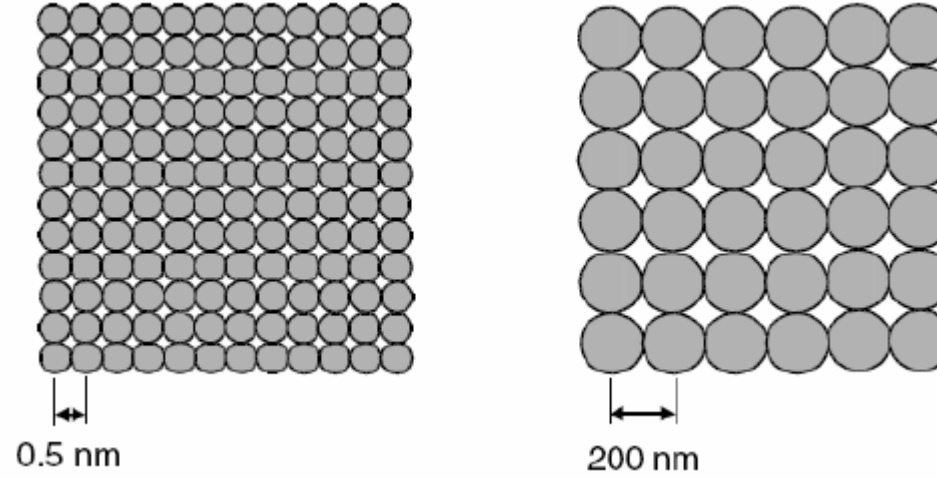
الدالة الموجية تمتد بعد حدود الصندوق في المنطقة $V > E$ يضمحل بدالة اسية، تماما مثل الموجة الزائفة للضوء المحدد.

احتمالية النفاذ تكون

$$T = ae^{-2kl} \quad k \text{ is equal to } (2mE)^{1/2}/\hbar$$

التمركز تحت الجهد الدوري: فجوة الطاقة Bandgap

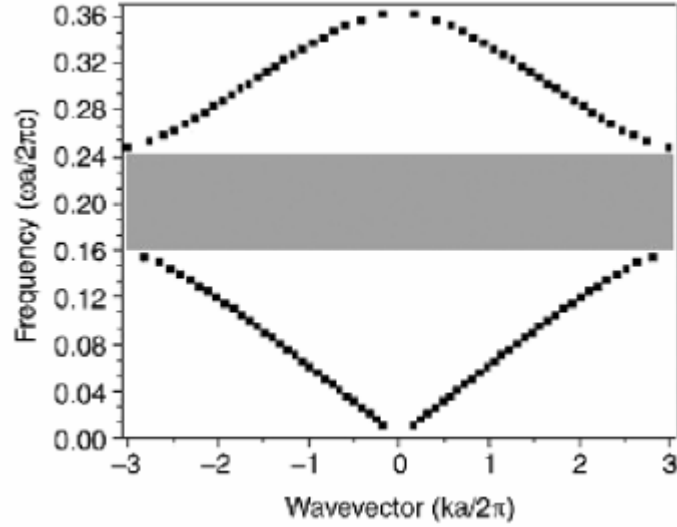
كلا من الفوتونات والالكترونات تظهر سلوك متماثل عندما تتعرض لجهد دوري.



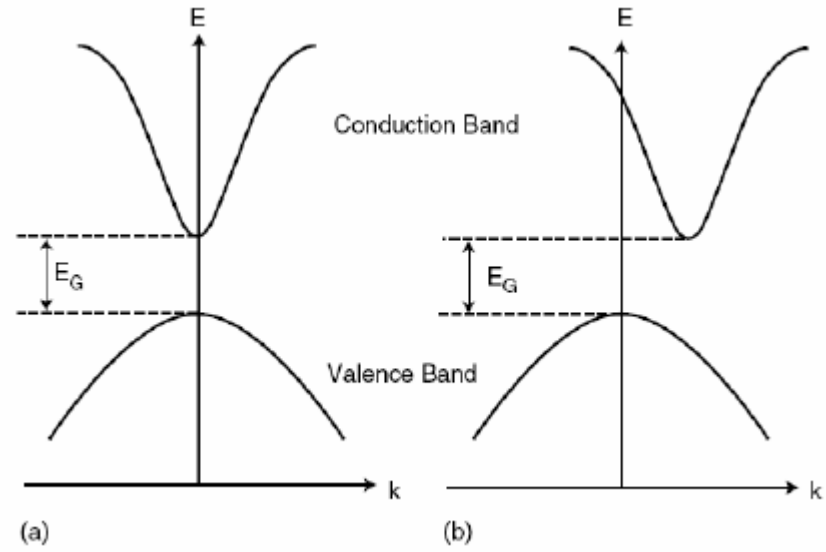
الشكل 7.2. يمثل مخطط لبلورة الكترونية على اليسار وبلورة فوتونية على اليمين.

حل معادلة شرودنجر لطاقة الالكترونات، وهي تحت جهد دوري V ، تنتج فصل في الحزم الالكترونية: حزمة الطاقة الدنيا تعرف باسم حزمة التكافؤ، وحزمة الطاقة العلوية تعرف باسم حزمة التوصيل. هاتين الحزمتين مفصولتين بمنطقة ممنوعة تعرف باسم فجوة الطاقة energy gap، واتساع هذه الفجوة يعرف باسم حزمة الفجوة band gap او الفجوة.

في حالة البلورة الفوتونية، معادلة قيم الايجن eigenvalue للفوتونات يمكن ان تستخدم لحساب علاقة التشتت ω مع k . ونوع مشابه لانفصال الحزم يلاحظ في بلورة الفوتونيك، والتي تعرف عادة باسم حزمة الفجوة الفوتونية photonic bandgap.



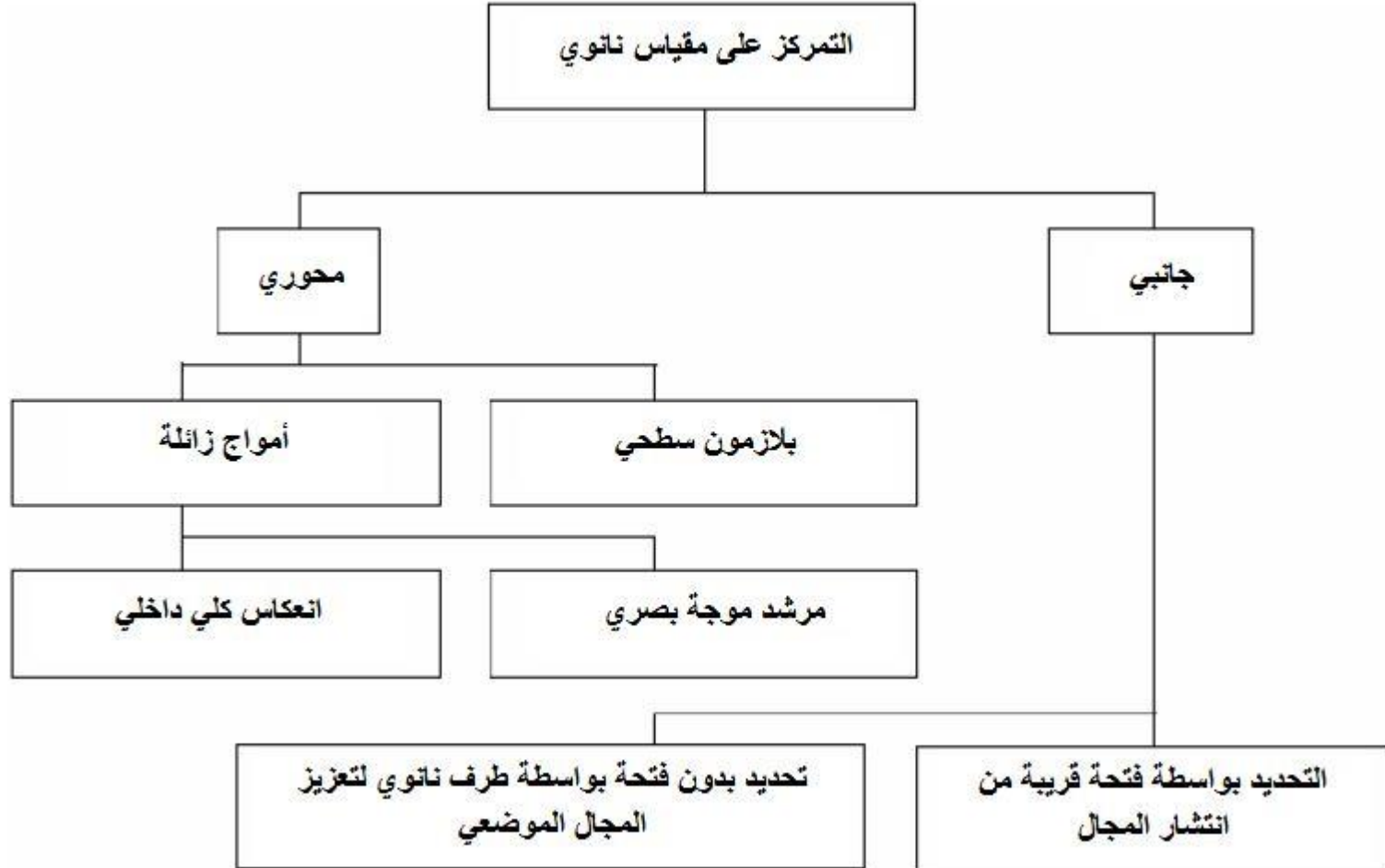
الشكل 9.2 منحنى التشتت في بلورة فوتونية ذات بعد واحد تظهر ادنى مستوى فجوة طاقة.



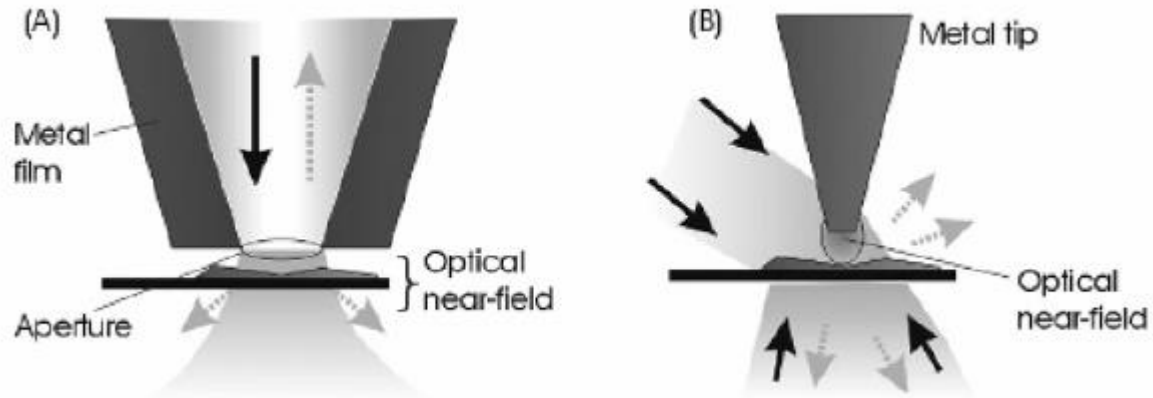
الشكل 8.2. مخطط لطاقة الالكترن في (a) فجوة مباشرة (مثل GaAs، و (b) فجوة غير مباشرة (مثل Si، Ge، GaP) في اشباه الموصلات. (CdS، InP)

التفاعلات البصرية على مقياس نانوي

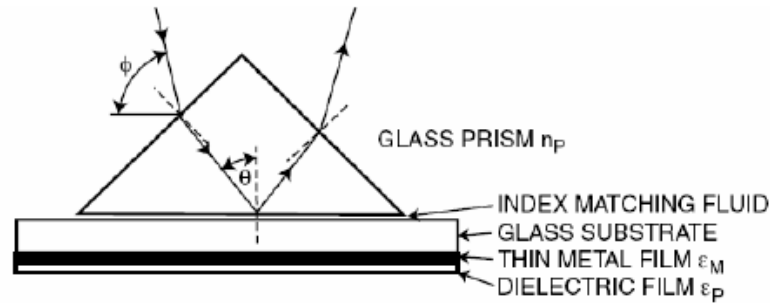
الجدول 2.2 طرق تمرکز المجال الكهرومغناطيسي على مقياس نانوي



التمركز الجانبي بالمقياس النانوي – NSOM, SNOM

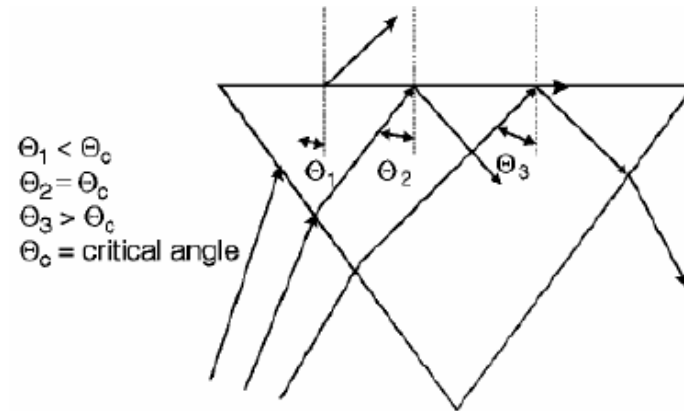


التمركز المحوري على المقياس النانوي – رنين البلازمون السطحي



$$k_{sp} = (\omega/c) [(\epsilon_m \epsilon_d)/(\epsilon_m + \epsilon_d)]^{1/2}$$

التمرکز المحوري على المقياس النانوي – الموجة الزائلة



عمق الاختراق dp للضوء المرئي هو 50 إلى 100nm.

$$d_p = \lambda [4\pi n_1 \{ \sin^2 \theta - (n_2/n_1)^2 \}^{1/2}]$$

التحديد على المقياس النانوي للتفاعلات الالكترونية

الجدول 3.2 عدة تفاعلات الكترونية بمقياس نانوي تنتج نتائج مهمة في الخواص البصرية للمواد



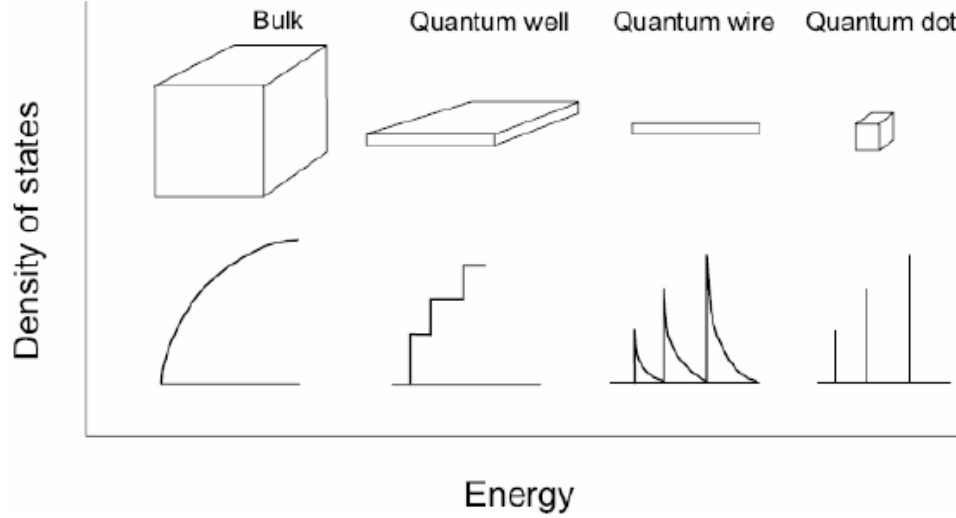
التحديد الكوانتمي للمواد – اشباه الموصلات الغير عضوية

الجدول 1.4 دلالات مادة اشباه الموصلات في الحالة الصلبة

Material	Periodic Table Classification	Bandgap Energy (eV)	Bandgap Wavelength (μm)	Exciton Bohr Radius (nm)	Exciton Binding Energy (meV)
CuCl	I-VII	3.395	0.36	0.7	190
CdS	II-VI	2.583	0.48	2.8	29
CdSe	II-VI	1.89	0.67	4.9	16
GaN	III-V	3.42	0.36	2.8	
GaP	III-V	2.26	0.55	10-6.5	13-20
InP	III-V	1.35	0.92	11.3	5.1
GaAs	III-V	1.42	0.87	12.5	5
AlAs	III-V	2.16	0.57	4.2	17
Si	IV	1.11	1.15	4.3	15
Ge	IV	0.66	1.88	25	3.6
$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$	IV	$1.15-0.874x + 0.376x^2$	$1.08-1.42x + 3.3x^2$	$0.85-0.54x + 0.6x^2$	$14.5-22x + 20x^2$
PbS	IV-VI	0.41	3	18	4.7
AlN	III-V	6.026	0.2	1.96	80

فجوة الطاقة يمكن ايضا ان يتم التحكم بها من خلال التغير في التركيب الثلاثي لمواد شبه موصلة مثل $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ، حيث ان $x=0.3$ لها فجوة تساوي 1.89 eV بالمقارنة مع فجوة تساوي 1.42 eV في GaAs نقي.

التحديد الكوانتمي للمواد – كثافة الحالات



$$\text{well } E_{n,k_x,k_y} = E_C + \frac{n^2 \hbar^2}{8m_e^* l^2} + \frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2)}{2m_e^*}$$

$$D(E) = m_e^* / \pi^2 \quad \text{for } E > E_1$$

$$\text{wire } E_{n_1,n_2,k_y} = E_C + \frac{n_1^2 \hbar^2}{8m_e^* l_x^2} + \frac{n_2^2 \hbar^2}{8m_e^* l_z^2} + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m_e^*}$$

$$D(E) \propto (E - E_{n_1,n_2})^{-1/2}$$

$$\text{dot } E_n = \frac{\hbar^2}{8m_e} \left[\left(\frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z} \right)^2 \right]$$

$$D(E) \propto \sum_{E_n} \delta(E - E_n)$$

الشكل 3.4 كثافة الحالات للإلكترونات في حزمة التوصيل للمادة صلبة مع بعض في العديد من تشكيلات التحديد.

العامل الاساسي في المعادلة لشدة الانتقال الضوئي (غالبا ما يعرف باسم شدة المذبذب oscillator strength) هو كثافة الحالات.

كثافة الحالات $D(E)$ تعرف بعدد حالات الطاقة بين الطاقة E والطاقة $E+dE$ ، وتحدد من خلال اشتقاق $dn(E)/dE$.

كثافة الحالات بجوار الفجوة تكون كبيرة نسبيا بالمقارنة مع أشباه الموصلات عندما تتلاشي $D(E)$. وعليه فان شدة المذبذب بجوار الفجوة يعزز بشكل كبير للجدار الكمي بالمقارنة مع شبه الموصل.

مظاهر التحديد الكمي

الاعتماد على الحجم للخواص البصرية. التحديد الكمم ينتج ازاحة ناحية الازرق في حزم الفجوة كذلك ظهور حزم فرعية منفصلة تقابل التكميم على امتداد اتجاه التحديد.

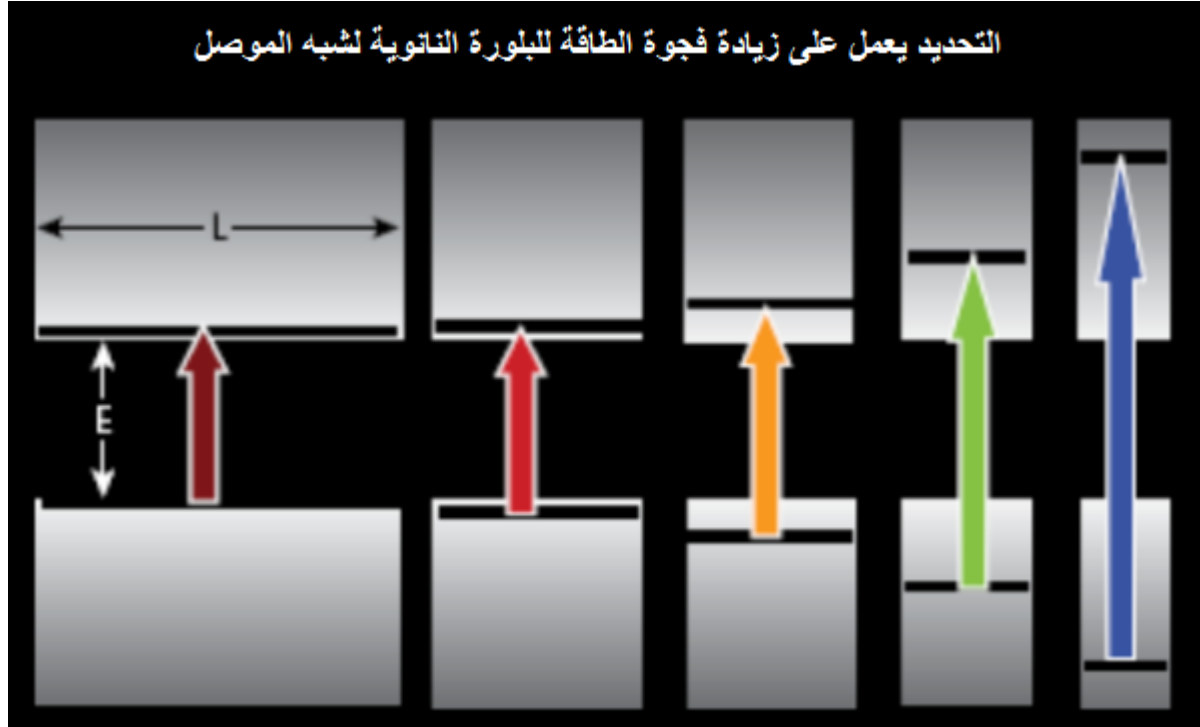
وكلما زادت ابعاد التحديد، تنقص فجوة الحزم وبهذا الانتقالات في داخل الحزمة ينزاح تجاه الاطوال الموجية الاطول، وفي النهاية تؤول إلى القيمة الكلية لاتساع الكبير.

زيادة شدة المذبذب. التحديد الكمم ينتج تعديل رئيسي في كثافة الحالات في كلا من حزم التكافؤ وحزم التوصيل. شدة المذبذب للانتقال البصري للانتقال في داخل الحزمة يعتمد على اتصال كثافة الحالات للمستويات في حزمة التكافؤ ومستويات حزمة التوصيل، حيث يحدث الانتقال البصري.

انتقالات جديدة داخل الحزم. في التراكيب المحددة بشكل كمي هناك حزم فرعية مميزة بأعداد كم مختلفة ($n = 1, 2, \dots$) هذه الانتقالات الجديدة هي في الطيف تحت الاحمر IR واستخدمت لإنتاج كواشف للحزم الفرعية الداخلية والليزر، ومن اهم هذه التطبيقات في الليزر ذات التتابع الكمم.

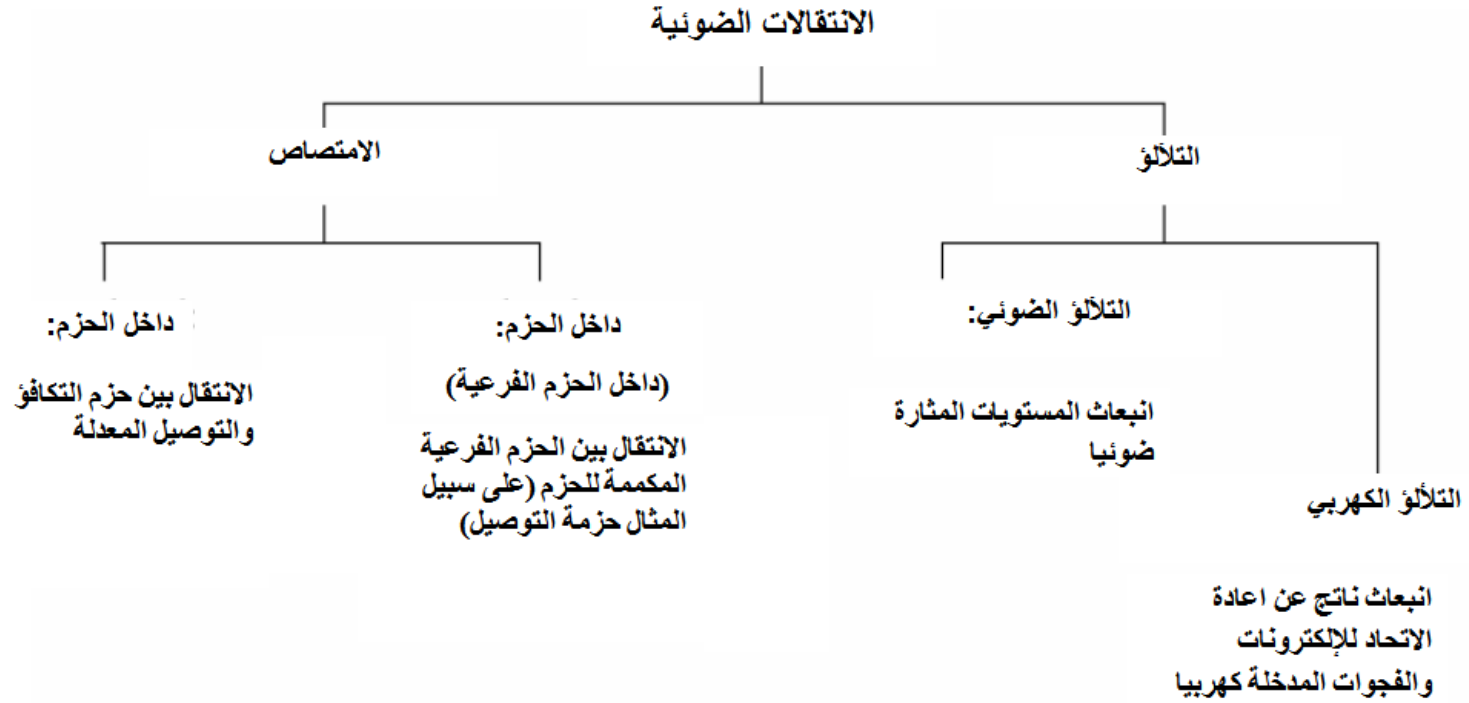
زيادة رابطة الاكسيتون. التحديد الكمم للإلكترونات والفجوات يؤدي أيضا إلى تعزيزي الرابطة بينهم وبالتالي ينتج زيادة في طاقة ربط الاكسيتون. ولهذا الرنين الاكسيتوني يصبح واضحا في التراكيب ذات التحديد الكمم وفي ظروف التحديد القوي يمكن ان يلاحظ حتى في درجة حرارة الغرفة.

زيادة احتمالية الانتقال في الفجوة الغير مباشرة في اشباه الموصلات. في تراكيب التحديد الكمم، يحدد او يحصر الالكترونات الناتجة ويقلل الشك Δx في موضعها وبالتالي ينتج شك كبير في Δk في كمية حركتها المحددة، ولهذا فان قاعدة الاختيار لاسترخاء كمية الحركة Δk ، وهذا يسمح بتعزيز الانبعاث لان يصبح ملحوظ في السليكون المسامي وجسيمات السليكون النانوية.



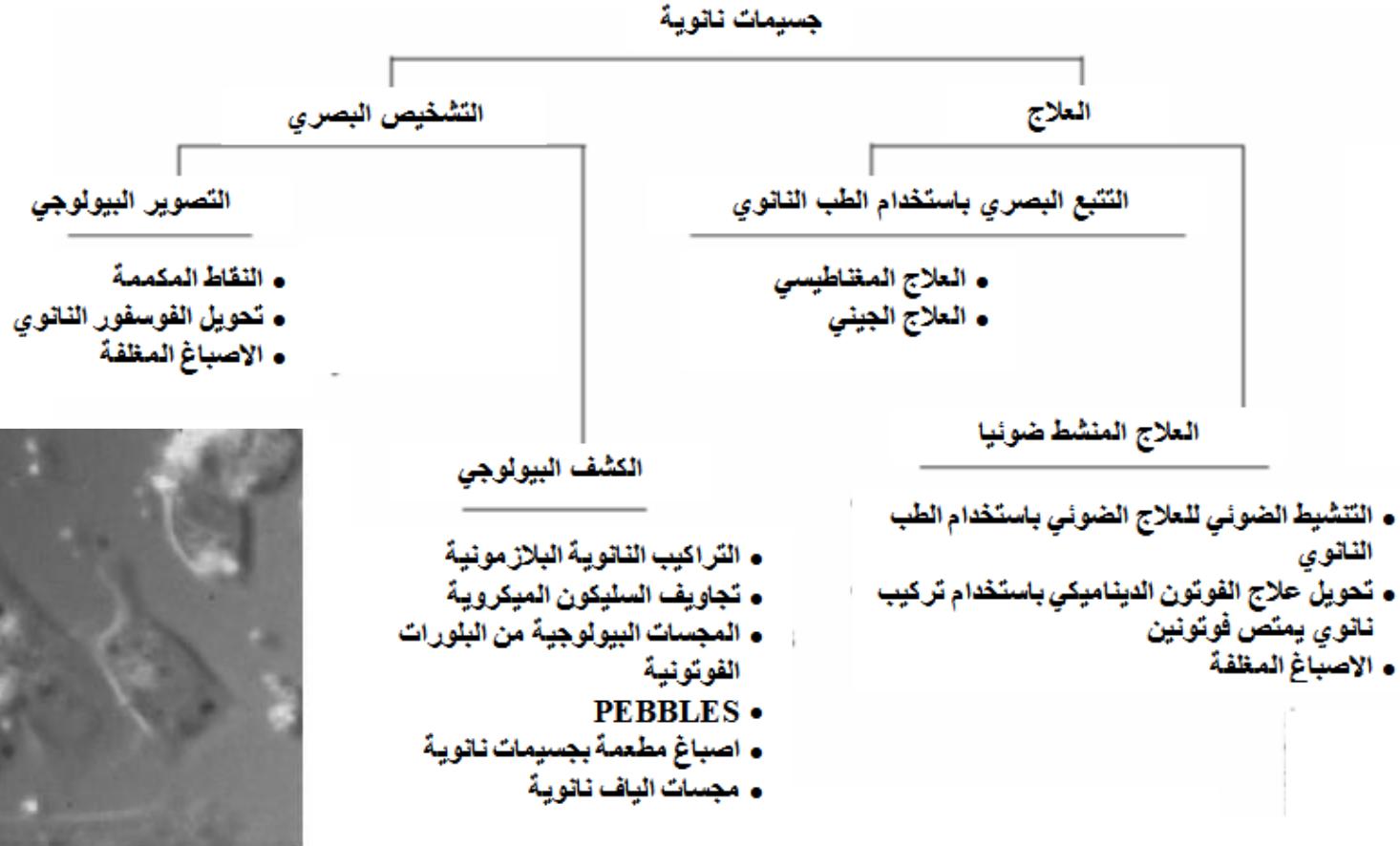
الشكل 2. مخطط لتأثير نقصان حجم الصندوق على زيادة فجوة الطاقة في النقطة الكمومية quantum dot من شبه الموصل، نتيجة تغير لون الانبعاث من جسم المادة على اليسار إلى بلورة نانوية على اليمين.

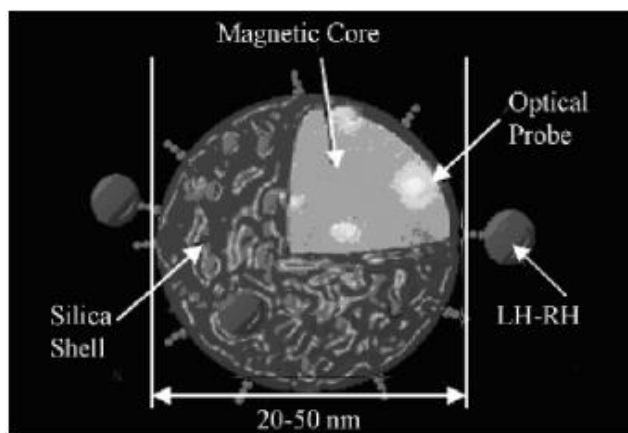
الجدول 4.2. البصريات لأشباه الموصلات المحددة المكتملة



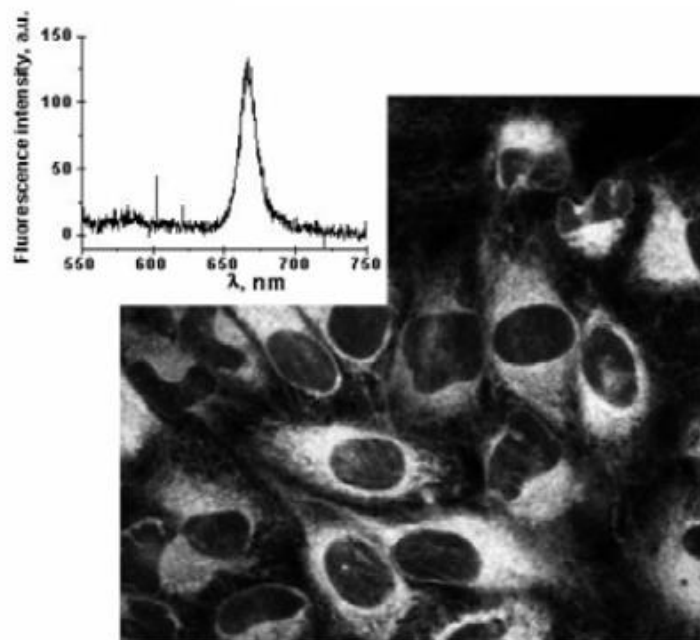
بصريات النانو للتكنولوجيا البيولوجية والتطبيقات النانوية الطبية

الجدول 1.13 تطبيقات العديد من جسيمات النانو في التشخيص البصري والعلاج





الشكل 6.13 شرح يمثل الطب النانوي



الشكل 12.13 صورة فلوريسنت لخلايا سرطانية عولجت بواسطة HPPH مطعمة بجسيمات نانوية (والشكل العلوي) يوضح طيف الفلوريسنت لـ HPPH اخذت من سيتوبلازما خلية

