

الايكترونيات النانوية

Nanoelectronics

الفصل الدراسي: الكورس الثاني

المرحلة: رابع فيزياء

المقرر: مقدمة في علم وتقنيات النانو

جامعة المثنى/كلية العلوم/قسم الفيزياء

م. حسن طريخم بدح

الحصر الكمي: Quantum confinement

تكمُن أهمية تقنية النانو في أن الأجسام الدقيقة بأبعاد نانوية (المواد النانوية) تتمتع بخصائص عندما تكون في هذا الحجم تختلف عن خصائصها عندما تتحد لتكون أجساماً أكبر. مما يؤثر جلياً على خصائص ومواصفات المواد و الأجهزة المصنعة من تلك المواد النانوية . ويرجع هذا الاختلاف إلى سببين. السبب الأول هو أن جسيمات النانو تتميز بمساحة أسطح كبيره مقارنة بمساحة أسطح الجسيمات بالحجم العياني (Bulk) في كل جسم، لأنه كلما قل حجم الجسيم زادت مساحة سطحه نسبة إلى حجمه. فمثلاً إذا تكسرت إحدى المواد إلى جسيمات دقيقة فإن مساحة سطحها تزيد أكثر منها وهي كتله كبيرة . وبما أن التفاعلات الكيميائية تحدث على أسطح المواد فإن زيادة المساحة تعني زيادة النشاط الكيميائي. أما السبب الثاني فيعود إلى ما يسمى بالحصر (الحبس) الكمي (Quantum Confinement) ويعني ذلك أن الإلكترونات تكون محصورة في حيز ببعد نانوي (تصغير حجم المادة الى ابعاد نانوية يمكن ان نعتبر الذرات تتحرك تقريبا بجهد ثابت).

فإذا ما تم تصغير حجم المادة على شكل غشاء رقيق بحيث تحصر الإلكترونات في بعدين، فعندئذ يقال عن هذا التركيب بالبئر الكمي (Quantum Well)، فإذا ما استبعدنا أحد البعدين وتم حصر الإلكترونات في بعد واحد فقط فإننا نسمي ذلك بالسلك الكمي (Quantum Wire). وإذا تم تصغير الأبعاد الثلاثة، يسمى عندئذ التركيب بالنقطة الكمية (Quantum Dots). وترتبط كلمة الكم مع هذه الأنواع الثلاثة لأن التغيرات في الخصائص تنشأ من الطبيعة الميكانيكية الكمية للفيزياء. الشكل 1 يوضح هذه العمليات من تناقص الحجم للحالة الهندسة المستقيمة، والشكل 2 يعرض التخفيضات المقابلة في الحالة الهندسة المنحنية. في الغالب فإن جميع صفات المادة تتأثر عندما تبنى بالبعد النانوي. ومن هذه الصفات الضوئية ويتضح ذلك بتغير اللون الظاهري للمادة وحساسية تأثرها بالضوء الساقط عليها . وكذلك الصفات الحرارية والمغناطيسية والكهربائية والميكانيكية والبنائية وغيرها.

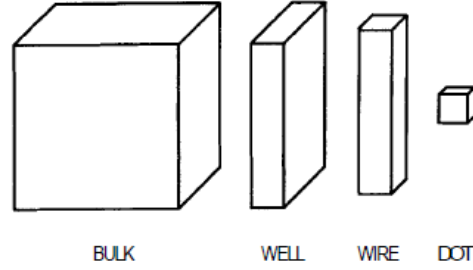


Figure 9.1. Progressive generation of rectangular nanostructures.

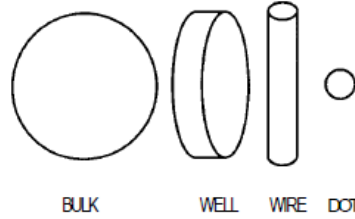


Figure 9.2. Progressive generation of curvilinear nanostructures.

اشبة الموصلات ذات التركيب الغير متجانس : Semiconductors Hetero structure

اشباه الموصلات هي مواد تتميز بتوصيليتها الكهربائية التي تقع بين توصيلية المعادن وتوصيلية العوازل. يمكن التحكم بموصليتها الكهربائية بالتحكم بتركيبها البلوري او بتغير مركباتها الكيميائية او اضافة الشوائب بنسب معينة. كذلك تتميز بتفاعلها مع الضوء و الذي يعتمد بقوة على حزم الطاقة والتي تعتمد بدورها على مكونات المادة. هذه المميزات يجعل استخدامها واسع في تصميم اجهزة اشباه الموصلات (Semiconductor devices).

اشبة الموصلات ذات التركيب الغير المتجانس (الهجينة) هي بلورات او سبائك متكونة من اتصال شبه موصلين او اكثر, يختلفان بمقدار فجوة الطاقة (Energy bandgap) لهما. هذه السبائك تمتلك ثوابت شبكية ذات قيم متساوية او متقاربة وتكون منماة بتناضيد الحزم الجزيئية. فيتكون تركيب بلوري معين او وصله فيزيائية (Physical contact) او اجهزة اشباه موصلات عالية النوعية بالتوجيه البلوري المطلوب وبدرجة حرارة اقل بكثير من نقطة انصهار الركيزة (Substrate) التي تنمى عليها السبيكة. و هناك عدة طرق للترسيب اهمها:

1-MBE (Molecular Beam Epitaxial) and

2-MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition).

حيث هذه الطرق هي الانظف والاكثر انتاجا. هذه التراكيب مهمة في صناعة الكثير من الاجهزة منها:

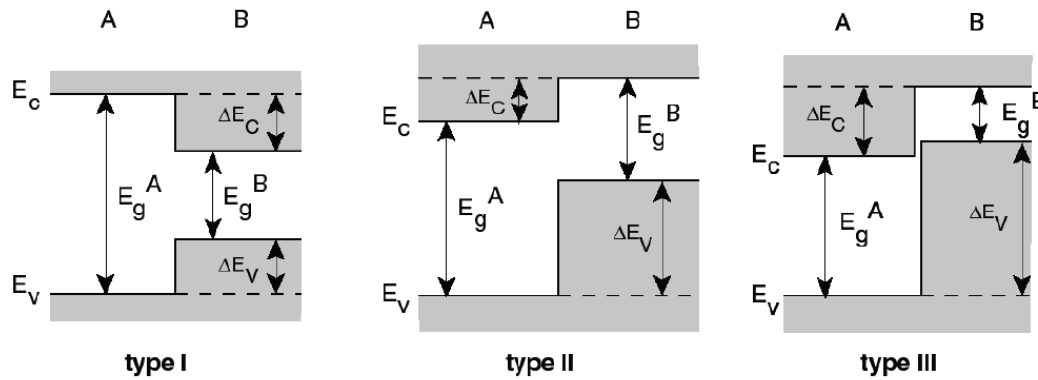
Field effect transistors, Bipolar transistors, Light emitting diodes and Laser

تصنف هذه التراكيب حسب شكل اتصال حزم الطاقة بعد تكوين الوصلة الى ثلاث انماط هي نمط التباعد (نوع-I) وهو الاكثر انتشارا ونمط بنية متبانية (نوع-II) و نمط الفجوة المكسورة (نوع-III). وكما في الاشكال 3 و 4:

Figure 3.(a) the straddled alignment or “Type I”. The GaAs / Al_xGa_{1-x}As heterostructure.

Figure 3.(b) shows the staggered lineup or “Type II”. The Ga_xIn_{1-x}As / GaAs_ySb_{1-y} material system.

Fig. 3.(c). the broken gap alignment or “Type III”. This alignment occurs in the InAs / GaSb material system .



الشكل 3- يمثل ثلاث اشكال لحزم الطاقة للتراكيب المتكونة من مشبه موصلين A و B بتميزان بفجوة الطاقة E_g^A و E_g^B على الترتيب، الوموز E_C , E_V , ΔE_C , ΔE_V تشير الى طاقات حافة حزم التوصيل وحزم التكافؤ، وارتفاع الجهد في حزم التوصيل والتكافؤ (band offsets).

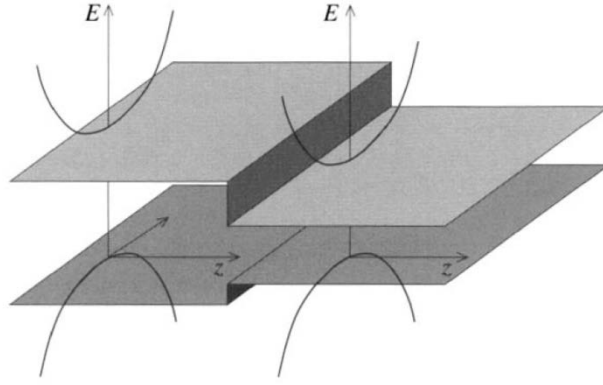


Figure 1.7 Two dissimilar semiconductors with different bandgaps joined to form a heterojunction; the curves represent the unrestricted motion parallel to the interface

الشكل 4- يبين مخططات حزم الطاقة في النوع I- ثلاثي الابعاد.

اشكال الابار الكمية : توجد اشكال مختلفة من الابار الكمية مفردة و متعددة الابار و متعددة التراكيب و متماثلة و غير متماثلة و بانواعها الثلاثة, كما يلي توضيحها.

الشكل 5 يبين تركيبين من النوع- I ابار الجهد مفردة و غير متماثلة (ant symmetric). الذي على اليمين لبئر كمي مفرد (QWs) نموذجي, ام الذي على اليسار فهو لبئر كمي مفرد درجي.

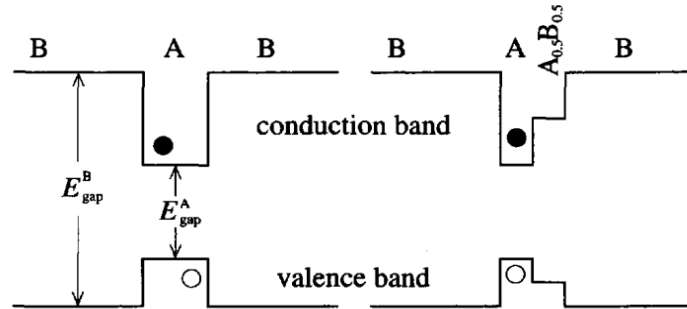


Figure 1.9 The one-dimensional potentials $V(z)$ in the conduction and valence bands for a typical single quantum well (left) and a stepped quantum well (right)

إن متعدد التراكيب (MQWs) ينشأ من متعدد الوصلات لذا فهناك عدد غير محدود من التراكيب. عند وضع طبقة رقيقة من مادة ذات فجوة طاقة صغيرة (A) بين طبقتين من مادة فجوة عريضة (B) كما في الشكل - 6 على اليمين يتكون متعدد التراكيب المزدوج و المتماثلة (symmetric) و عرض الآبار الكمية متساوية أو غير متساوية كما في شكل- 6 على اليسار.

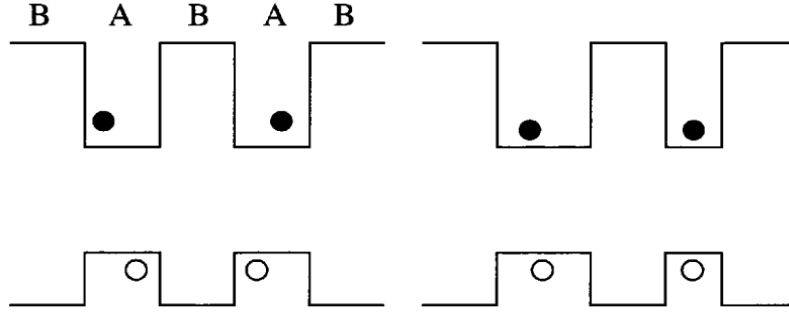


Figure 1.10 The one-dimensional potentials $V(z)$ in the conduction and valence band for typical *symmetric* (left) and *asymmetric* (right) double quantum wells

لتراكيب أكثر تعقيداً ممكن أن تنمى مثل البئر الكمي المتعدد التراكيب (MQWs) أو الشبكة الفائقة (super lattice) كما في الشكل 7- الفرق هو إن الآبار الكمية المتعددة تظهر خواص كأنها تجمع لآبار كمية منفردة بينما في الشبكة الفائقة يكون هناك تفاعل بين الآبار. الغرض من هذه التراكيب هو محاولة تحسين الخواص الإلكترونية والبصرية للمواد. حيث تستخدم بشكل واسع في صناعة أشباه الموصلات ذات الطاقات العاليه, مثل:

AlGaAs/GaAs quantum well transistor with high electronic mobility, quantum well laser (QWL) and quantum well infrared photo detector (QWIP).

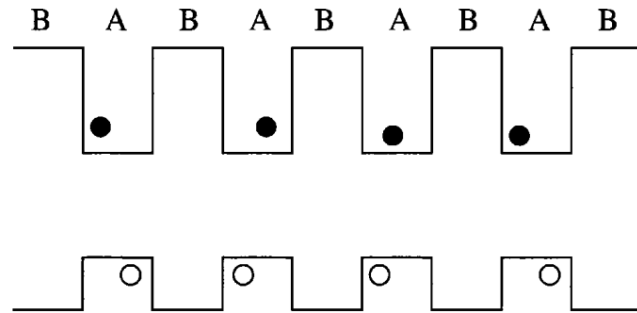
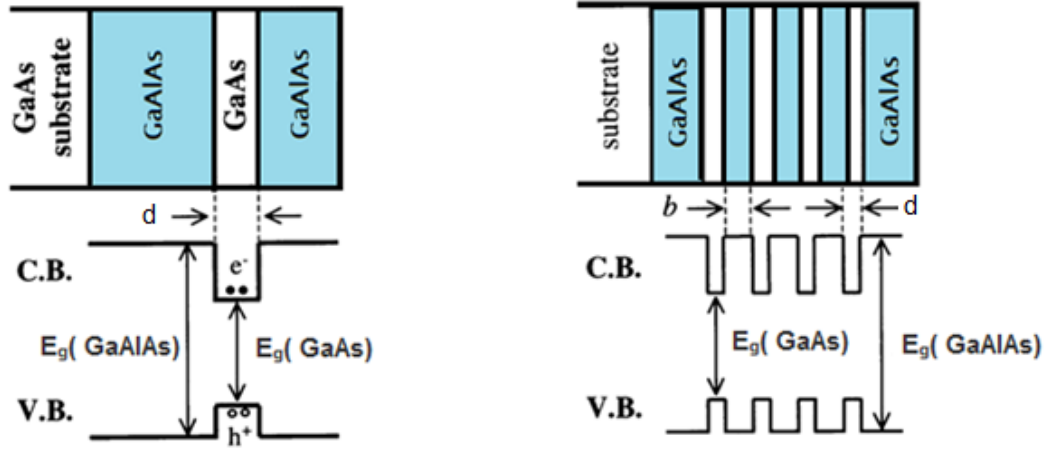
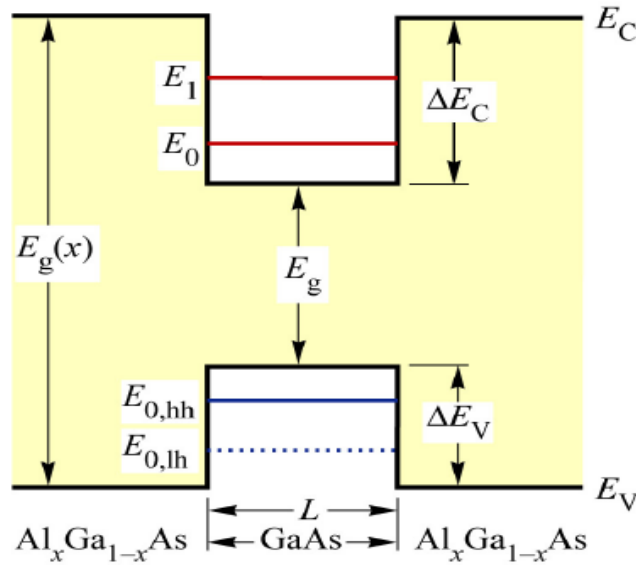


Figure 1.11 The one-dimensional potentials $V(z)$ in the conduction and valence band for a typical multiple quantum well or superlattice

الشكل 8 يمثل مخطط لبئر منفردة ولتركيب متعددة الآبار لسبيكة مصنعة من الكاليوم والزرنيخ و الالمنيوم (GaAlAs Barrier). هذه السبيكة مرسبة على GaAs Substrate . بالاضافة الى مخطط حزم الطاقة لتلك الآبار و المرسوم في الاسفل.

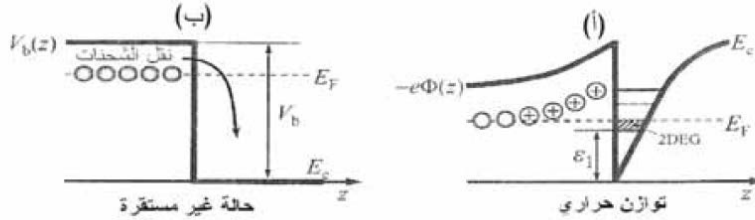


الشكل 9 يمثل بئر جهد كمي منفرد (QWs) يتكون من ترسيب طبقة من مادة (GaAs WL) ذات فجوة الطاقة الصغيرة محصورة بطبقتين من مادة (Al_xGa_{1-x}As Barrier) ذات فجوة الطاقة الكبيرة مكونة السبيكة (Al_xGa_{1-x}As / GaAs / Al_xGa_{1-x}As), نلاحظ مستويات الطاقة في كل من حزم التوصيل وحزم التكافؤ، و فجوة الطاقة في كل مركب، و ΔE_C و ΔE_V هي تمثل (band offset) في حزم الطاقة. وبالنسبة لتأثير الكم يظهر بوضوح ان هذه المواد لم تعد تخضع لقوانين الفيزياء الكلاسيكية لأبعادها الصغيرة التي تقترب من الأبعاد الذرية لذا فإنها تخضع لقوانين فيزياء الكم والذي ينعكس على خواصها الاليكترونية والبصرية.



نفترض ان شبه الموصل ذات الفجوة الطاقة الكبيرة مشابهة سلبيًا في حين المادة ذات الفجوة الطاقة الصغيرة مشابهة ايجابيا. بعد الاتصال مباشرة لتكوين الوصلة الفيزيائية، فإنه سيتكون بئر

جهد و حاملات الشحنة سوف تنتشر من المنطقة السالبة الى المنطقة الموجبة (بئر الجهد) لتتكون مستويات طاقة الكترونية منفصلة. يؤدي هذا الى تكوين حاجز جهد يمنع حدوث الانتقال كما في الشكل- 10. تستمر العملية الى ان يكون هناك توازن حراري (تستقر الحالة) ويثبت مستوى فيرمي عبر المادتين.



الشكل 1.7: أثر نقل الشحنات في بنية متباينة مفردة مشابهة انتقائياً (أ) التوزيع المشابه للدرجة غير مستقر. (ب) يسبب نقل الشحنات تشتيد المادة المشابهة، وثني الحزم، وتحاذي مستوي فيرمي عبر البنية، وتشكيل قناة إلكترونات عند التواجه

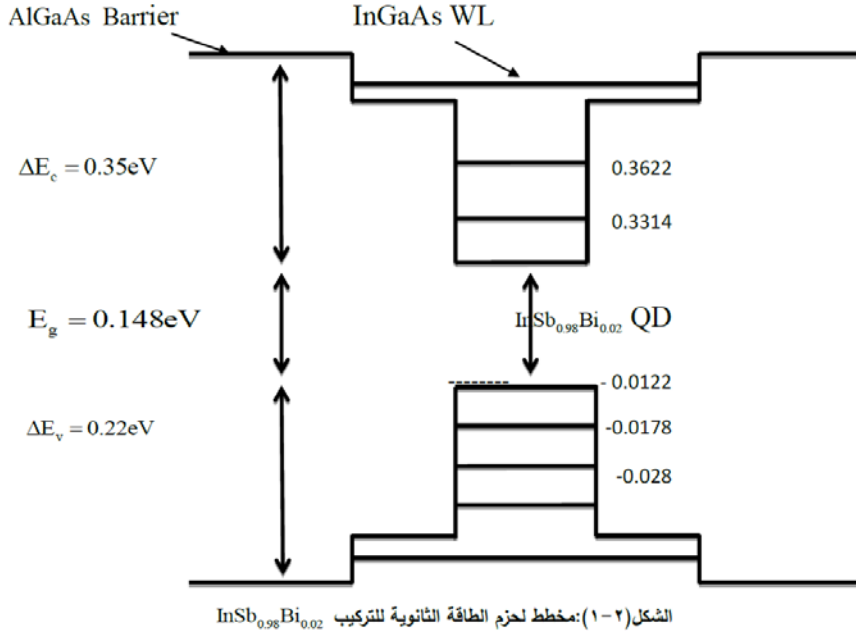
هنا يمكن التحكم بتراكيز حاملات الشحنة داخل ابار الجهد من خلال تأثير درجات الحرارة او الجهد المسلط عند درجة الصفر الكلفني . كذلك تكون حاملات الشحنة داخل البئر الكمي منفصلة عن الشوائب الام بسبب حاجز الجهد. حوامل الشحنة تتحرك باتجاه واحد اي مكمة باتجاه واحد ويصبح نشوء غاز الكتروني ثنائي البعد ممكناً جداً (2DEG). التحكم بتوصيلية هذه المواد مهم لصناعة اجهزة مفيدة مثل ليزرات اشباه الموصلات حيث تأثير الحصر يمكن الاستفادة منه لزيادة تحصيل الربح والكفاءة لتلك الاجهزة.

المادة عندما تكون محصورة في ثلاث ابعاد وبطول مقارب لطول موجة دي برولي للالكترونات فان ذلك يعطي امكانية لانفصال مستويات الطاقة الاليكترونية. مثل هذه التراكيب تكتسب خصائص الكترونية وضوئية فريدة غير موجودة في التراكيب المحصورة في اتجاه واحد او في اتجاهين , هذه التراكيب تسمى بالنقاط الكمية . يظهر تأثير الحصر الكمي على حاملات الشحنة في هذه الاجسام, بحيث تكون كل درجات الحرية لانتشار الالكترونات مقيدة. وتكون ناقلات الشحنة محصورة بثلاث ابعاد وتعديل الخصائص الاليكترونية تكون واضحة جداً وقوية, تكون المستويات الاليكترونية منفصلة.

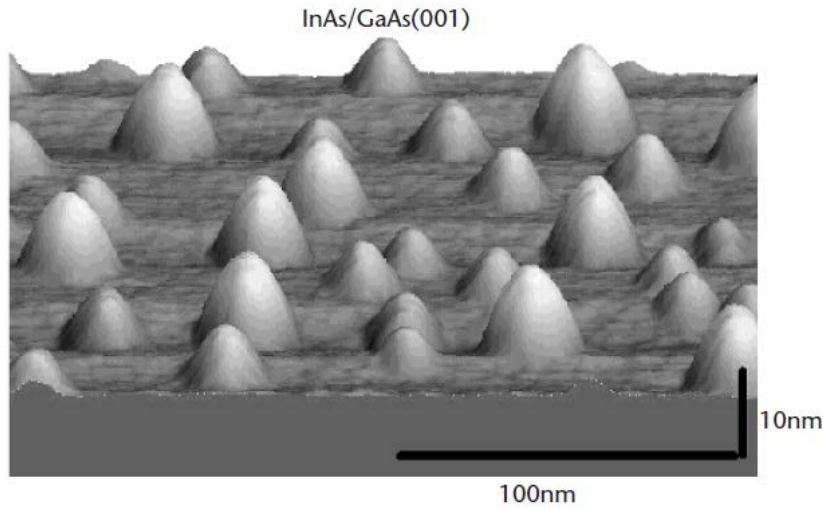
النقاط الكمية تمتلك مزايا فريدة اذا استخدمت كمواد بصرية بسبب الحصر الثلاثي الابعاد لحاملات الشحنة هو الحصول على خط واسع للربح. والمستويات الاليكترونية محددة مكانياً

والطاقة مكمنة بشكل تام كما هول الحال في النظام الذري, لذلك يكون النظام ثابت بشكل اكبر ضد اي اضطراب حراري. كثافة الحالات قرب فجوة الطاقة تكون اعلى مما هي عليه في الانظمة الاخرى والذي يقود الى احتمالية اعلى للانتقالات الضوئية.

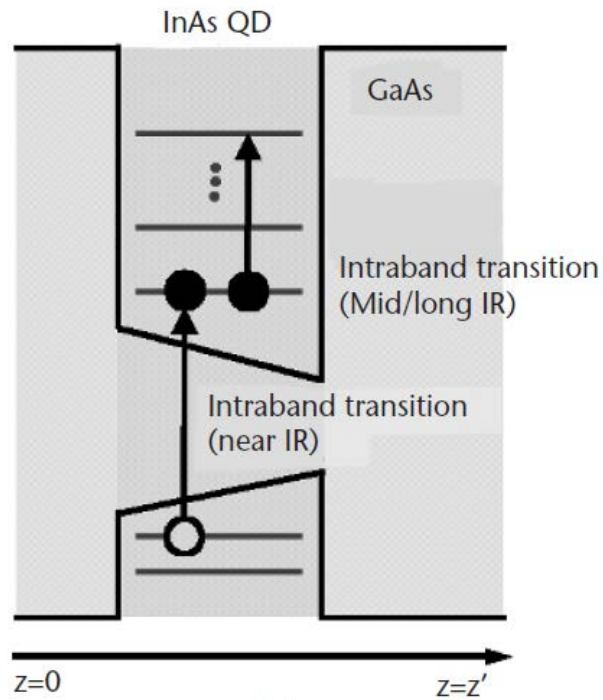
الشكل-11 يمثل مخطط الطاقة لترتيب نقطة كمية للسبيكة $\text{InSb}_{0.98}\text{Bi}_{0.02}$ QD .



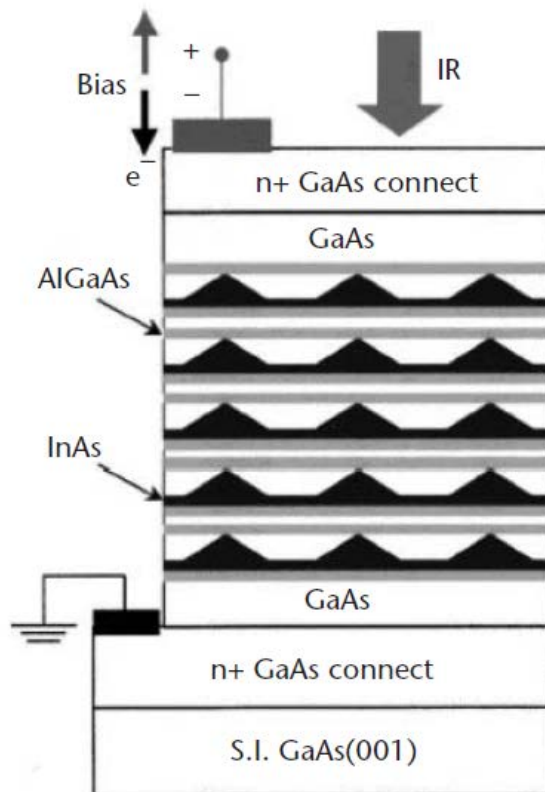
الشكل-12 صورة لنقاط كمية متعددة من مادة InAs و المنماة على GaAs باستخدام مجهر القوة الذرية. الطريقة التي انتجت بها هي طريقة من اسفل – الى اعلى.



الشكل-13 يمثل مخطط الطاقة لنقطة كمية مفردة (InAs QD).



الشكل-14 يمثل جهاز شبه موصل المادة الفعالة هي InAs MQD.



الشكل-15 يمثل الطريقة من اعلى – الى اسفل و التي تنتج بها النقاط الكمية مفردة و متعددة.

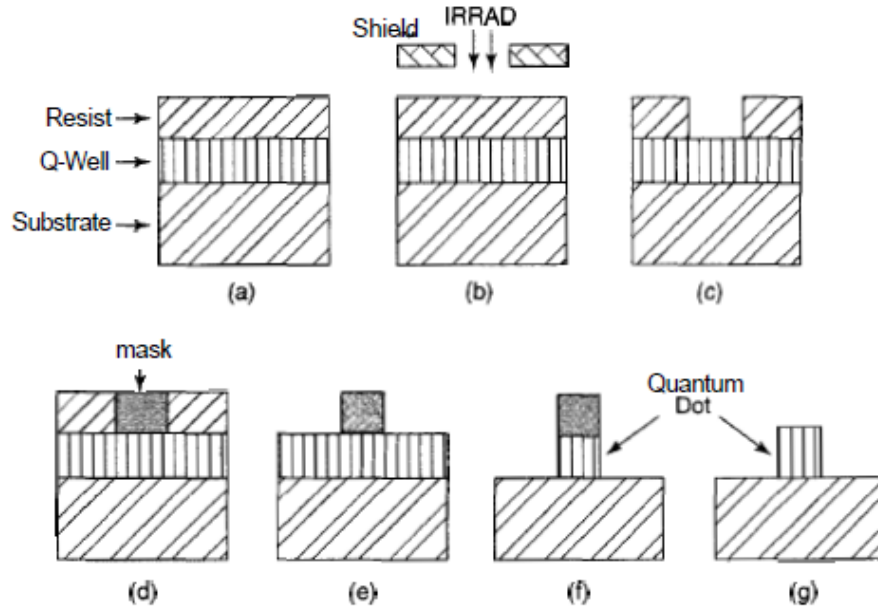


Figure 9.4. Steps in the formation of a quantum wire or quantum dot by electron-beam lithography: (a) initial quantum well on a substrate, and covered by a resist; (b) radiation with sample shielded by template; (c) configuration after dissolving irradiated portion of resist by developer; (d) disposition after addition of etching mask; (e) arrangement after removal of remainder of resist; (f) configuration after etching away the unwanted quantum-well material; (g) final nanostructure on substrate after removal of etching mask. [See also T. P. Sidiki and C. M. S. Torres, in Nalwa (2000), Vol. 3, Chapter 5, p. 250.1]

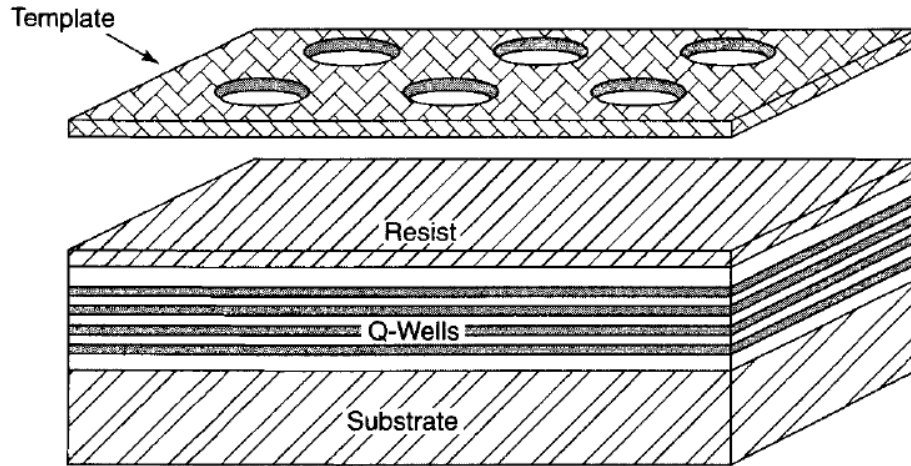


Figure 9.5. Four-cycle multiple-quantum-well arrangement mounted on a substrate and covered by a resist. A radiation shielding template for lithography is shown at the top.

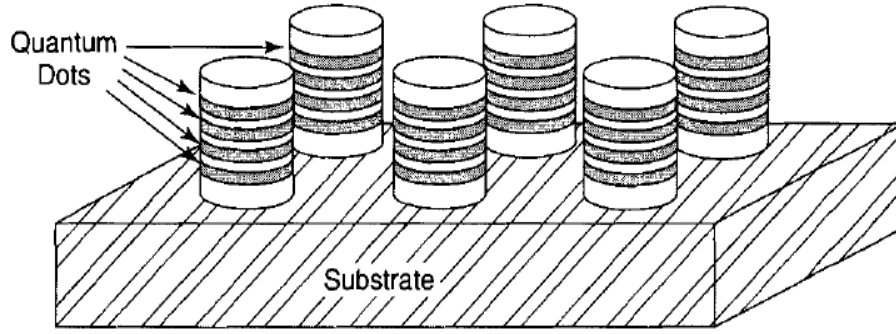


Figure 9.6. Quantum-dot array formed by lithography from the initial configuration of Fig. 9.5. This 24-fold quantum-dot array consists of six columns of four stacked quantum dots.

بعض خواص هذه التراكيب:

1- مستويات الطاقة: Electron Levels

عند تصغير المادة او تجميع عدد من الذرات في صف لتكوين جسيم في الابعاد النانوية فان الذرات تتحرك قريبا بجهد ثابت ذو حافات حادة مكونة بئر جهد ذو جدران صلبة مثل: **Finite potential wells** و **Infinity square well potential**. هذه المسائل تم حلها بالتفصيل في الميكانيك الكمي, و تم الحصول على قيم طاقات المستويات و الدوال الموجية المرافقة للاليكترونات, من خلال حل معادلة شرودنكر:

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2ma^2}$$

$n=1,2,3,\dots$ و a عرض بئر الجهد.

هذه المعادلة تمثل حالات الكترونية مقيدة في بئر جهد لانهائي. مستويات الطاقة هي مستويات منفصلة غير مستمرة كما في مادة Bulk, والانتقالات الاليكترونية المسموحة تقع بين هذه المستويات المتميزة.

2- فجوة الطاقة: Energy gap(E_g)

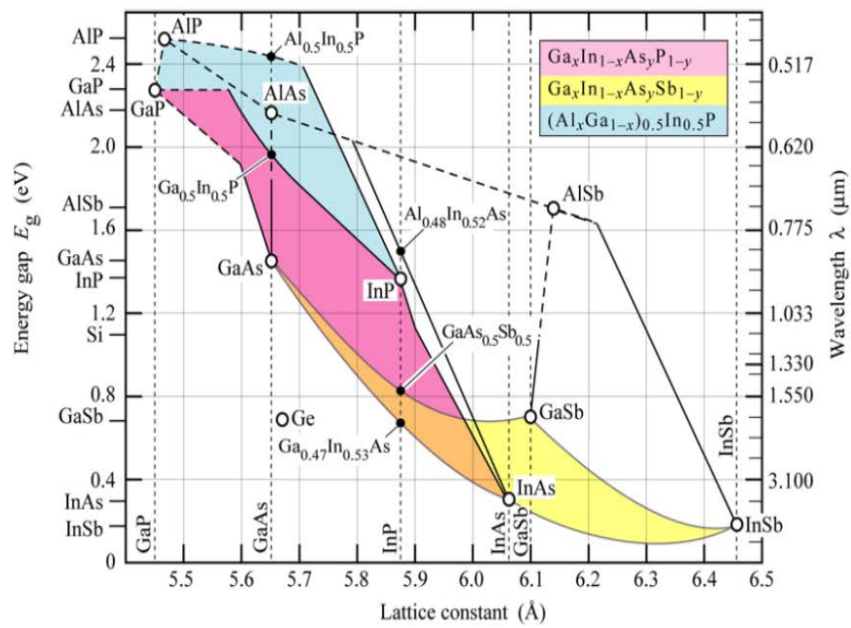
طاقة الفجوة لسبائك اشباه الموصلات والتي تمتلك الصيغة A_xB_{1-x} هي:

$$E_g^{AB} = xE_g^A + (1-x)E_g^B + x(1-x)E_b \quad \dots 1$$

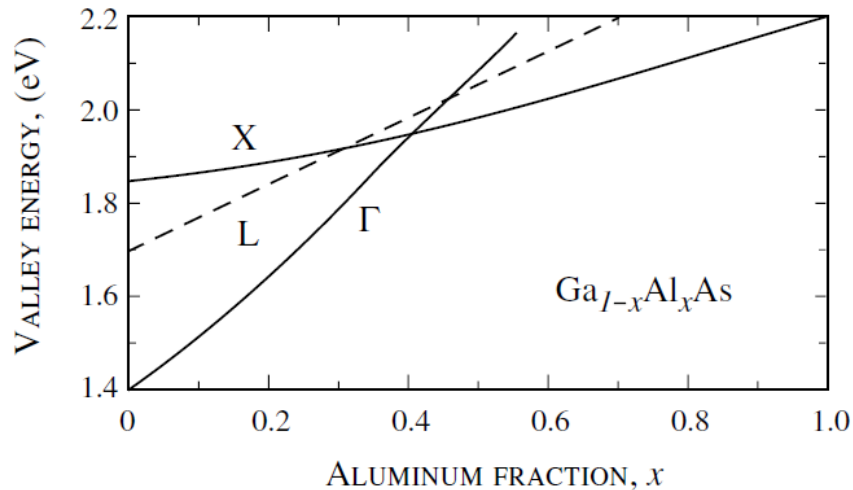
حيث A و B هي العناصر المكونة للسبيكة، x يسمى الكسر المولي. الكسر المولي يمثل تركيز مركب اخر يضاف بنسب معينة للسبيكة، يزيد من عدد مكوناتها، و يكسبها صفات فيزيائية غير موجودة في السبيكة الاصلية. المادة المضافة تمتلك ثابت شبكية مقارب لثوابت الشبكية الاخرى المكونة للسبيكة، والذي يعطى بقانون فيكارد (Vegard's law). وكذلك تمتلك مامتصاصية للضوء عند اطوال موجية متقاربة. و كما في الشكل 15.

$$a_0^{AB} = a_0^A x + a_0^B (1 - x) \quad \dots 2$$

الشكل-16 يمثل علاقة طاقة الفجوة بثابت الشبكية لبعض السبائك.



الشكل-17 يبين علاقة الكسر المولي بفجوة الطاقة.



ومن علاقة فيرشن (Varshni equation) والتي تبين علاقة فجوة الطاقة بدرجات الحرارة حيث يمكن حساب قيمة طاقة الفجوة عند اية درجة حرارة مطلقة للسبائك الثنائية, مثل GaAs و InP و غيرها:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad \dots 3$$

حيث α و β ثوابت فيرشن, و $E_g(0)$ طاقة الفجوة عند الصفر المطلق. ومن المعادلتين (1,3) يمكن حساب طاقة الفجوة للسبائك الثلاثية و الرباعية كما في سبيكة $(\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As})$ و $(\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As})$ التي تعتمد على كل من درجات الحرارة و الكسر المولي x , كالآتي :

$$E_g(x, T) = E_g^{\text{InAs}}(0) - \frac{\alpha^{\text{InAs}} T^2}{T + \beta^{\text{InAs}}} + \left[E_g^{\text{GaAs}}(0) - \frac{\alpha^{\text{GaAs}} T^2}{T + \beta^{\text{GaAs}}} - E_g^{\text{InAs}}(0) + \frac{\alpha^{\text{InAs}} T^2}{T + \beta^{\text{InAs}}} \right] x - 0.475x(1-x) \quad \dots 4$$

بالتعويض عن الثوابت بقيم مناسبة , نحصل على المعادلة:

$$E_g(x, T) = 0.42 + 0.625 - \left[\left(\frac{5.8}{T+300} \right) - \left(\frac{4.19}{T+271} \right) \right] * 10^{-4} T^2 x - \left(\frac{4.19 * 10^{-4}}{T+271} \right) + 0.475 * x^2 \quad \dots 5$$

نلاحظ ان طاقة الفجوة تميل للانخفاض بزيادة درجة الحرارة, وتزداد بزيادة قيم الكسر المولي.

3- تراكيز الحاملات : The carrier concentrations (ni)

تراكيز الحاملات النقية تكون دالة لفجوة الطاقة و درجات الحرارة كما في المعادلة:

$$n_i = (N_C * N_V)^{1/2} e^{-E_g/2K_B T} \quad \dots 6$$

حيث N_C, N_V هي كثافة الحالات الفعالة في كل من حزم التكافؤ وحزم التوصيل, على التوالي و التي بدورها دالة لدرجة الحرارة, و K_B ثابت بولتزمان. كما يمكن كتابة المعادلة (5) بدلالة كل من درجات الحرارة و الكسر المولي :

$$n_i(x, T) = 4.8327 \times 10^{15} \left[(0.41 + 0.09x)^{3/2} + (0.027 + 0.047x)^{3/2} \right]^{1/2} \times (0.0250.043x)^{3/4} \times \left[T^{3/2} e^{-\epsilon/2} \left(1 + \frac{3.75}{\epsilon} + \frac{3.2812}{\epsilon^2} - \frac{2.4609}{\epsilon^3} \right)^{1/2} \right] \quad \dots 7$$

حيث $\epsilon = E_g/k_B T$

4- التوصيلية الكهربائية: (σ_i) The conductivity

بدورها التوصيلية الكهربائية دالة لدرجة الحرارة ولفجوة الطاقة كما في المعادلة:

$$\sigma_i = 2e(\mu_e + \mu_h)(m_e^* \cdot m_h^*)^{3/4} \left(\frac{2\pi K_B T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-E_g/2K_B T} \quad \dots 8$$

حيث m_e^*, m_h^* هي الكتل الفعالة للالكترونات في حزم التوصيل و للفجوات في حزم التكافؤ، على الترتيب. و μ_e, μ_h هي تحركية الالكترونات و الفجوات، على الترتيب. وللتراكيب التي تعتمد على درجة الحرارة و الكسر المولي يكمن اعادة كتابة المعادلة لتصبح كما يلي:

$$\sigma_i(x, T) = e (\mu_e + \mu_h)$$

$$(4.8327 \times 10^{15} [(0.4 + 0.09x)^{3/2} + (0.027 + 0.047x)^{3/2}]^{1/2} \times (0.025 + 0.043x)^{3/4} \times [T^{3/2} e^{-\epsilon/2} (1 + \frac{3.75}{\epsilon} + \frac{3.2812}{\epsilon^2} - \frac{2.4609}{\epsilon^3})^{1/2}]) \quad \dots 9$$

5- كثافة الحالات: Density of states

تعطي كثافة الحالات او عدد الحالات الكمية والتي يمكن احتمالية اشغالها من قبل حاملات الشحنة في مجال صغير من الطاقة. مثلما تم اشتقاق كثافة الحالات في المواد الصلبة التقليدية اي في ثلاث درجات حرية (Bulk) يمكن ان نجد كثافة الحالات في درجتين حرية (Q.Well) ودرجة حرية واحدة (Q.Wire) وصفر درجة حرية (Q.Dot)، و التي تقابل درجات حصر 0 و 1 و 2 و 3 على التوالي. الجدول ادناه يبين كل من كثافة الحالات وكثافة الحالات الفعالة في حزم التوصيل و قويم الطاقة المقابلة لها في التراكيب الاربعة.

Degrees of freedom	Dispersion (kinetic energy)	Density of states	Effective density of states
3 (bulk)	$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$	$\rho_{DOS}^{3D} = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_C}$	$N_c^{3D} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$
2 (slab)	$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2)$	$\rho_{DOS}^{2D} = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} \sigma(E - E_C)$	$N_c^{2D} = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} kT$
1 (wire)	$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2)$	$\rho_{DOS}^{1D} = \frac{m^*}{\pi \hbar} \sqrt{\frac{m^*}{2(E - E_C)}}$	$N_c^{1D} = \sqrt{\frac{m^* kT}{2\pi \hbar^2}}$
0 (box)	—	$\rho_{DOS}^{0D} = 2\delta(E - E_C)$	$N_c^{0D} = 2$

الشكل-18 يبين علاقة كثافة الحالات مع الطاقة لاشبابة الموصلات في درجات حرية 3 و 2 و 1 و 0. في المواد التقليدية كثافة الحالات تتناسب مع الجذر التربيعي للطاقة،

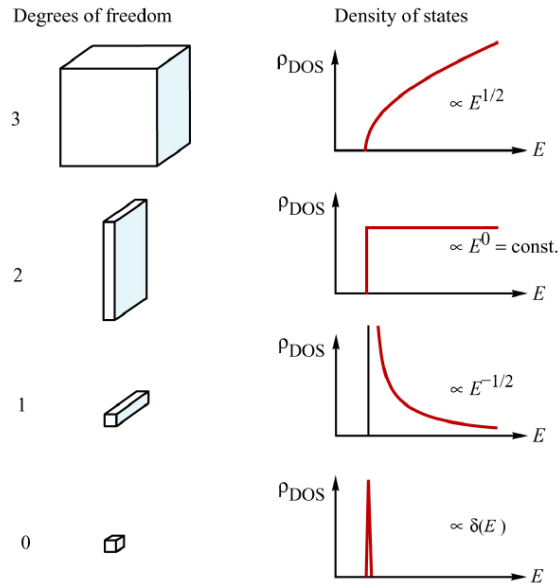


Fig. 12.7. Electronic density of states of semiconductors with 3, 2, 1, and 0 degrees of freedom for electron propagation. Systems with 2, 1, and 0 degrees of freedom are referred to as quantum wells, quantum wires, and quantum boxes, respectively.

References:

1. MARK FOX, 2001. Optical Properties of Solids.
2. Charles P. Poole, Jr. Frank J. Owens, 2003. Introduction To Nanotechnology.
3. E. F. Schubert, 2009. physical foundations of solid-state devices.
4. Todd Steiner, 2004. Semiconductor Nanostructures for Optoelectronic Applications.