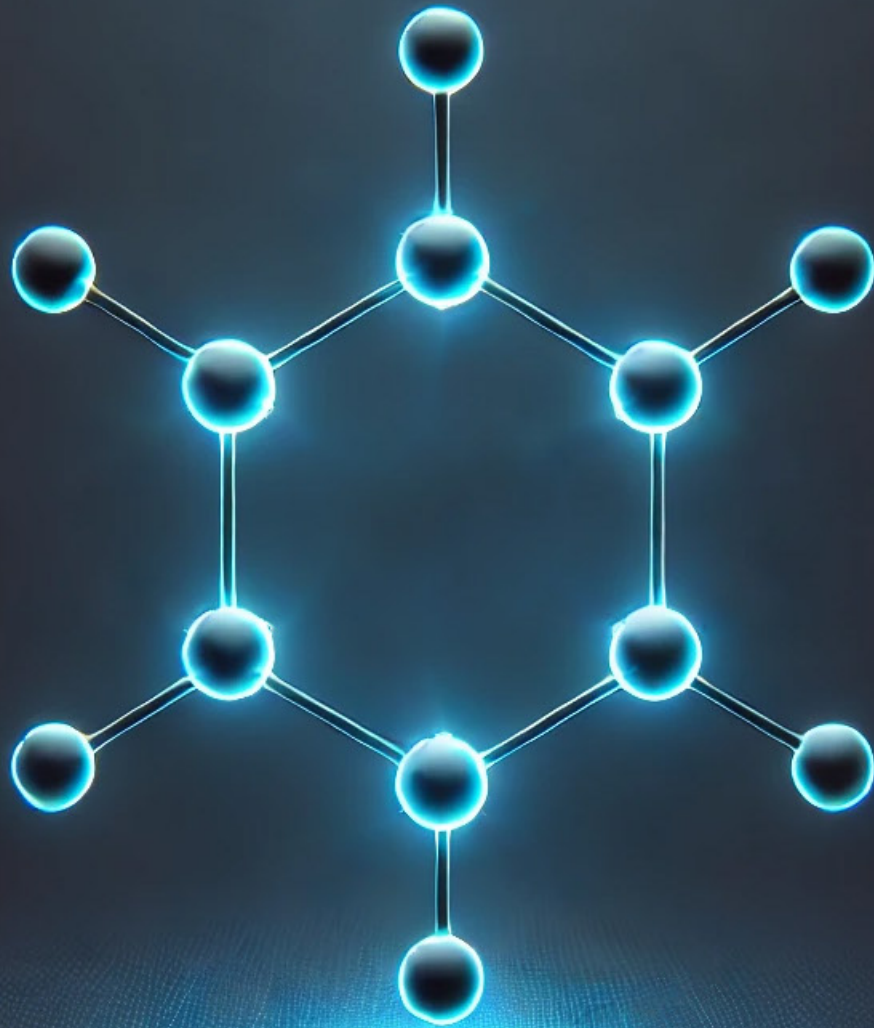


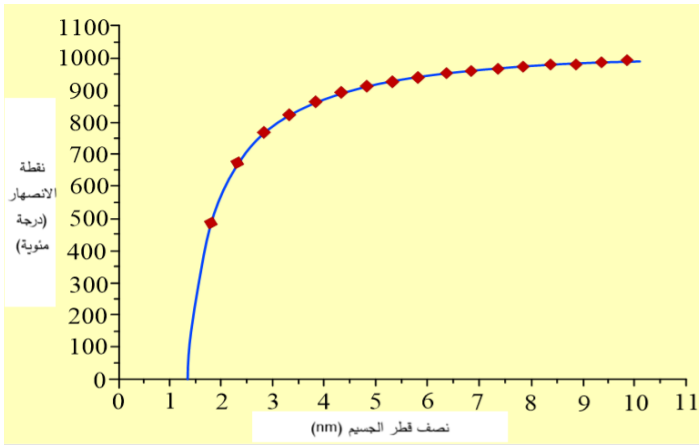
تكنولوجيا (تقانة) النانو رحلة من التنبؤات إلى التطبيقات العلمية الحديثة

هشام محمد السيد, أستاذ علوم المواد بقسم الفيزياء, كلية
العلوم, جامعة عين شمس, مصر



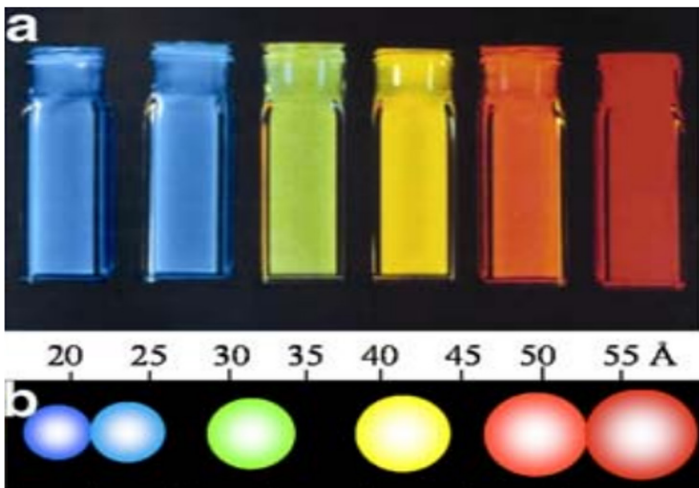
المقدمة

متناهية في الصغر (في حدود 50 نانومتر أو أقل) حيث لوحظ تغيراً دراماتيكيّاً في هذه الخواص والتي كانت تعتبر عنواً لهذه المواد. ومن أمثلة ذلك درجة انصهار المعادن، فمن المعلوم أن درجة انصهار معدن الذهب تساوي 1064 درجة مئوية، فإذا بها تصبح 900 درجة عند حجم 5 نانومتر، وتصل إلى 500 درجة عند حجم 2 نانومتر! (انظر الشكل 1)



الشكل 1: تغيّر نقطة انصهار معدن الذهب بتغير حجم جسيماته المصدر [2]

يتغيّر معامل الامتصاص الضوئي لأشياء الموصّلات بتغيّر حجم المادّة عند بلوغها الأبعاد النانومترية. من أمثلة ذلك مادّة سليينيد الكاديوم (CdSe) والتي يتغير لونها في المحاليل المعلقة تبعاً لحجمها في نطاق النانومتر (انظر الشكل 2)



شكل 2: تغير لون مركب سليينيد الكاديوم (CdSe) بتغيّر حجم جسيماته. المصدر [2]

تعتبر مصطلحات تكنولوجيا النانو والجسيمات النانومترية وعلوم النانو من المصطلحات الأكثر تداولاً - بلغة منصات التداول الاجتماعي - بين الأوساط العلمية المختلفة خلال العقدين والنصف الماضيين. ونشير هنا إلى مقولة عالم الفيزياء الفذّ ريتشارد فيمان أثناء إلقاء محاضراته الشهيرة عام 1959 أمام الجمعية الفيزيائية الأمريكية والتي تنبأ فيها بهذا الفرع من العلوم بمقولته التي غدت معروفة "هناك متسع كبير في القاع"، ولذلك يعتبره كثير من العلماء المؤسّس لتكنولوجيا النانو.

وقد أسهم هذا الفرع من العلوم في تقديم العديد من الابتكارات والتطبيقات في كثير من مناحي حياتنا اليومية التي أصبح من الصعب -أو قلّ من المستحيل- الاستغناء عنها.

وهذا المقال هو محاولة متواضعة لإلقاء الضوء على الفيزياء التي تحكم المواد النانومترية وأثر ذلك في بعض التطبيقات التكنولوجية الحديثة.

أولاً: الخواص الذاتية للمادة

من المعلوم - وعبر مئات السنين - أن للمادّة خواص ذاتية أو متأصلة (Intrinsic properties) وهي الخواص التي لا تعتمد على كمية المادّة مثل درجتي حرارة الانصهار والتجمد وكثافة المادة ومعاملات التوصيل الحراري والكهربائي ودرجة الشفافية الضوئية..... إلخ، وذلك بالطبع عند ثبات درجة الحرارة والضغط، وهذه الخواص هي ثوابت لكل مادّة كبصمة الإصبع. كان الاعتقاد السائد هو أنه لا يمكن المساس بهذه الثوابت لو ضُمَّتْ نقاء المادّة وثبات متغيرات القياس (درجة الحرارة والضغط الجوي). ظل هذا الاعتقاد سائداً إلى أن تمّ قياس هذه الخواص في أحجام

عن ذلك طاقة ترابط بالمادة أصغر من تلك التي في اللب

ولما كانت الخواص الميكانيكية وكذلك درجة حرارة الانصهار للمادة تعتمد على قوة ونوع الروابط الكيميائية، لذلك تختلف الخواص باختلاف المادة وأيضاً حجمها

في حالة المواد ذات الحجم الكبير، يكون عدد الذرات (أو الجزيئات) داخل اللب أكثر بكثير من عددها على السطح، وذلك لصغر مساحة سطح المادة، ولذلك تعتمد خواص المادة اعتماداً رئيسياً على الذرات (أو الجزيئات) داخل اللب

بتقليل حجم المادة إلى نطاق النانو، تزداد مساحة السطح زيادة مطردة وكبيرة جداً (راجع مثال المكعب) ليصبح عدد الذرات (أو الجزيئات) على السطح أكبر من مثيلتها داخل اللب، وبالتالي تتغير طبيعة الروابط المؤثرة في خواص المادة ممّا يؤدي إلى تغيير الخاصية ذاتها

لتوضيح هذه الفكرة سأعطي مثالا رقمياً. فمن المعلوم أن التركيب البلوري لعنصر الذهب هو مكعب بطول 0.41 نانومتر. لو تخيلنا مكعباً من الذهب طول ضلعه 1 ميكرومتر، وبحسبة صغيرة نجد أن عدد بلورات الذهب في هذا المكعب تكون في حدود 14.5×10^9 بلورة، بينما يساوي عدد البلورات على السطح الخارجي 35.6×10^6 بلورة، أي بنسبة تبلغ 0.24% فقط من العدد الكلي. الآن لتخيل تقسيم هذا المكعب إلى عدد من المكعبات بطول ضلع 5 نانومتر، فسنجد حينها أن عدد البلورات في المكعب الواحد مساوٍ لـ 1814 بلورة بينما عدد البلورات السطحية 815 بلورة، أي ما يشكّل نسبة 45% من عدد البلورات الكلي، وإذا كان طول المكعب

تتأثر القابلية المغناطيسية للمواد الحديدية أيضاً تأثيراً كبيراً بحجم المادة في نطاق النانومتر. فعلى سبيل المثال، تقلّ القابلية المغناطيسية لعنصر الحديد في نطاق النانومتر بنسبة تتجاوز 30% عن مثيلتها لعنصر الحديد في الأحجام الأكبر من نطاق ميكرومتر. ويوجد العديد من الأمثلة على تغيير خصائص المادة عند الأبعاد النانوية.

ثانياً: تغيير خواص المواد بتغيير حجمها

نعطي في هذا الجزء مثالاً توضيحياً على تغيير خواص المادة وفقاً لحجمها. تخيل مكعباً طول ضلعه x فإن حجمه يصبح x^3 ، ومساحة أسطحه الستة تساوي $6x^2$. الآن نقوم بتقسيم المكعب إلى ثمانية مكعبات، وحينها نلاحظ أن المساحة السطحية أصبحت $12x^2$ ، بينما بقي الحجم ثابتاً. فإذا ما قمنا بتقسيم كل مكعب إلى ثمانية أقسام أخرى فسنجد أن مساحة السطح زادت لتصبح $24x^2$ ، وهكذا كلما زاد عدد التقسيمات ازادت مساحة السطح بشكل مطرد جيّد ولكن ما علاقة ذلك بما نناقش؟

نتناول في التالي البنية الذرية أو الجزيئية للمادة، فالذرات أو الجزيئات في المادة الصلبة لها نوعان أ. ذرات (أو جزيئات) داخلية: وهي الموجودة داخل لب المادة ويتميز هذا النوع من الذرات (أو الجزيئات) بتماثل الروابط التي تربطها مع الذرات المجاورة لها في جميع الاتجاهات، وبالتالي تكون طاقة ترابطها بالمادة كبيرة.

ب. ذرات (جزيئات) سطحية: وهي الموجودة على السطح الخارجي للمادة. وهذه الذرات (أو الجزيئات) لا تتمتع بنفس ميزة ذرات اللب حيث إن الوسط المحيط بها ليس متماثلاً، وبالتالي يكون عدد الروابط التي تربطها بالمادة أقل من مثيلتها داخل اللب، وينتج

ومعناها أن طاقة الإلكترون كافية لكسر الرابطة بينه وبين نواة المادة، وبالتالي يصبح الإلكترون حرًا

يُسمّى الفرق في الطاقة بين الحزمتين بفجوة الطاقة (energy gap). يحدّد مقدار فجوة الطاقة وشكل حزم الطاقة الخواصّ الكهربائية والمغناطيسية والضوئية للمادة.

عند تصغير المادة إلى مقياس النانو يصبح عدد الذرات المحيطة بالإلكترونات أقل بكثير من مثيلاتها في حالة الأحجام العيانية، وبالتالي تتغير أشكال حزم الطاقة وكذلك فجوة الطاقة بين الحزمتين المشار إليهما سابقًا، وتبعًا لذلك تتغير الخواص الكهربائية وكذلك الضوئية للمواد

تمّ تطوير العلاقة بين حجم المادة والفجوة الطاقيّة للإلكترونات في البلورات النانوية لأشباه الموصلات بواسطة لويس بروس (Louis Brus) من أجل الحصول على طاقة فجوة النقاط الكمومية (quantum dots) من العلاقة

$$E_{g(qd)} = E_{bulk} + \frac{h^2}{8R^2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) - \frac{1.8e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r R^2}$$

حيث $E_{g(qd)}$ طاقة الفجوة للنقطة الكمومية (quantum dot)، و E_{bulk} طاقة الفجوة للمادة، و h ثابت بلانك، و R قطر النقطة الكمية، و m_e^* الكتلة الفعالة للإلكترون المثار، و m_h^* الكتلة الفعالة للثقب المثار (excited hole)، و سماحية الفراغ، و السماحية النسبية

من هذه العلاقة، يمكن التحكم في طاقة الفجوة لكثير من أشباه الموصلات عن طريق التحكم في حجم حبيبات المادة أثناء التحضير، وهذا له أثر كبير جدًا في مجال تصنيع الخلايا الشمسية

مساويًا 2 نانومتر، فتصل نسبة البلورات على السطح في هذه الحالة إلى 84%. هذا يعني أن الخواص الفيزيائية في الأبعاد النانومترية تعتمد اعتمادًا أساسيًا على طبيعة الروابط على السطح وليس على داخل لب المادة، وهو ما يفسّر التغيّر الكبير لنقطة انصهار الذهب كلما قل حجم حبيباته في نطاق النانومتر

ثالثًا: البنية النانوية وميكانيكا الكم

ما طرحناه في المقطع السابق يمثل تفسيرًا عيانيًا (macroscopic) لما يحدث للمادة في نطاق النانومتر، ولفهم أعمق لهذه التغيرات أدعو القارئ للإبحار قليلًا في يمّ ميكانيكا الكم وعلاقتها بفهم سلوك المواد عمومًا، وفي نطاق النانو خصوصًا

كما هو معروف، تبعًا لنظرية ميكانيكا الكم فإن معرفة الدالة الموجية المصاحبة للإلكترون في الوسط المحيط به تسمح بحساب شكل مستويات الطاقة، وكذلك قيم الطاقة لهذه المستويات. ولحساب هذه الدالة يجب حل معادلة شرودنجر بعد

معرفة شكل الجهد المؤثر على هذا الإلكترون. ولحل هذه المعادلة للإلكترون داخل المادة الصلبة نحتاج لكثير من التقريبات من أجل تبسيط شكل دالة الجهد المؤثر على الإلكترون في هذه المواد.

وباستخدام الكثير من الحسابات تمّ التوصل إلى أن طاقة الإلكترونات داخل المادة تشكل حزمة (band) وليس مستويات للطاقة. وحسب حالة الإلكترون، يوجد نوعان من الحزم الإلكترونية

1. حزمة التكافؤ (valance band): ومعناه أن طاقة الإلكترون تجعله مرتبطًا بأيونات المادة، فهو غير حرّ الحركة

2. حزمة التوصيل أو النقل (conduction band):

رابعاً: ذرات صناعية

يوضح الشكل 3 ظهورَ خطِّ امتصاص جديد لمركب CdSe عند حجم 5 نانومتر والذي له إزاحة ناحية الأزرق كلما صغر حجم المادّة

خامساً: علم تصميم المواد الجديدة

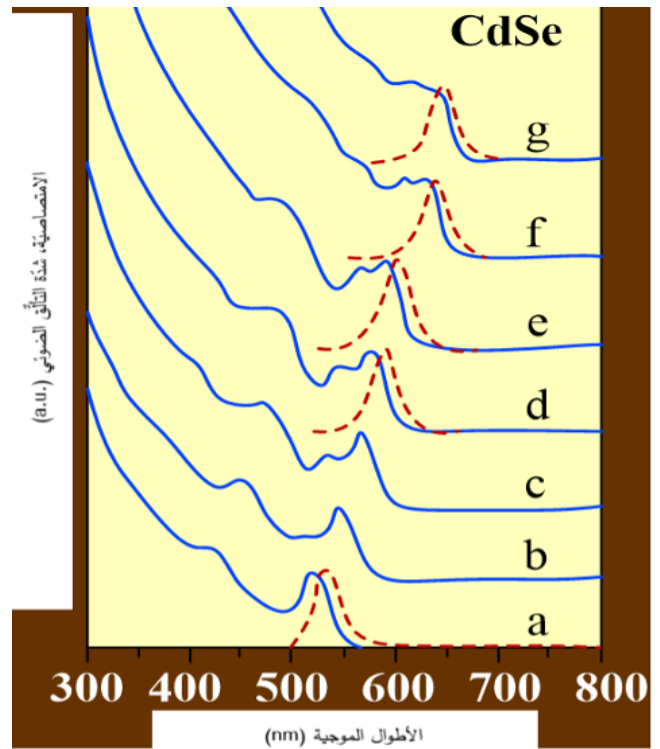
لقد أسفرت جهود العلماء في دراسة فيزياء المواد النانومترية إلى فهم سلوك الإلكترون في المادّة نتيجة تغير شكل المواد وحجمها ممّا فتح مجالاً جديداً في التقانة، وهو تصميم مواد نانومترية بمواصفات يتم تحديدها من قبل مصممين للمواد ودراسة خواصها ببرامج المحاكاة عن طريق الحاسوب قبل تحضيرها بالمعمل ممّا وفر الكثير من الجهد والوقت والمال. وأمثلة تلك المواد أكثر من أن يُحصيها هذا المقال، وسأعطي أمثلة عن ذلك

1. المواد النانوية المعتمدة على الكربون

المكون الرئيسي في هذا النوع من المواد النانوية هو الكربون. وهي إمّا أن تكون على شكل أنابيب نانوية من الكربون، ويتم تضمين الأنابيب النانوية الكربونية مع صفائح الجرافين ولفها في أنبوب. هذه المواد أقوى بكثير من الفولاذ ويمكن أن تستخدم لتعزيز هياكل السيارات وغيرها من التطبيقات. الأنابيب النانوية الكربونية لها نوعان: النوع أحادي الجدار والنوع متعدد الجدران

الشكل الآخر هو الفوليرينات، وتشمل ترتيب ذرات الكربون بحيث تشكل هيكلاً قفصياً مجوّفاً يحوي ستين أو المزيد من ذرات الكربون. وهيكّل هذه المواد يشبه كرة القدم المجوفة ذات الكربون الخماسي والسداسي حيث يتم تنظيم الوحدات في نمط منتظم. يتميز هذا التصميم لذرات الكربون بقدرتها العالية على التوصيل الكهربائي وبقوة متانة عالية

نعم، كما قرأت عزيزي القارئ! يمكن إنتاج مستويات طاقة جديدة تماثل مثيلاتها في ذرة الهيدروجين ولكن بقيم مختلفة، وهو ما يسمى بالنقاط الكمومية (Quantum Dots). يحدث ذلك في أشباه الموصلات عندما تصبح أبعاد الحبيبة في حدود ما يسمى نصف قطر بور (Bohr radius) أو أقل. في هذه الحالة، عندما ينتقل الإلكترون من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل يترك خلفه ثقباً موجباً في حزمة التكافؤ، ونتيجةً لصغر حجم المادّة يحدث تفاعل كهربائي (جهد كولون) بين الإلكترون والثقب الموجب، مماثل التفاعل بين الإلكترون والبروتون في ذرة الهيدروجين. تُنتج حالة الاقتران بين الإلكترون والثقب مستويات طاقةً جديدةً لم تكن موجودة في أصل المادّة، وبالتالي تعطى خواصّ ضوئية جديدة يمكن التحكم فيها عن طريق التحكم في حجم حبيبات المادّة وشكلها



الشكل 3: تغير معامل الامتصاص للنقاط الكمومية بتغير حجمها. المصدر [4]

2. المواد النانوية المعدنية

تشمل المواد النانوية المعدنية الأساسية الأيونات المعدنية ثنائية وثلاثية التكافؤ. هناك طرق مختلفة لتحضير جسيمات المعادن النانوية مثل الطرق الكيميائية أو الضوئية أو الكيميائية، وباستخدام عوامل الاختزال، يتم اختزال الأيونات المعدنية إلى جسيمات نانوية معدنية. تتميز هذه الجسيمات بمساحة سطحية عالية وقدرة امتصاص جيدة للجزيئات الصغيرة، وتستخدم على نطاق واسع في مجالات مختلفة مثل المجال الطبي لتشخيص وعلاج بعض الأورام السرطانية، وذلك باستخدام جزيئات الذهب النانومترية، كما يمكن توظيفها في مجال التعقيم من البكتيريا باستخدام جزيئات الفضة النانومترية. يمكن تصميم المواد ليس فقط من جزيء نانوي واحد ولكن أيضاً بخلط جزيئين أو أكثر مع التحكم في الحجم. من خلال تطعيم معادن مختلفة، يمكن تغيير خواص حتى العناصر الأرضية النادرة، كما يمكن تغيير خواص بعض العناصر عن طريق تطعيمها بعناصر أو بتراكيبات مختلفة

3. المواد النانوية من أشباه الموصلات

كما أوضحنا من قبل، تمتلك المواد النانوية المكونة من أشباه الموصلات خصائص معدنية وغير معدنية. ولهذه المواد فجوات طاقة واسعة، وتظهر خصائص مختلفة عند تعديلها. تُستخدم هذه المواد على نطاق واسع في التحفيز الضوئي والأجهزة الإلكترونية. في الآونة الأخيرة، اجتذبت المواد النانوية المركبة من الجرافين وأشباه الموصلات اهتمام الباحثين، حيث يمكن للجرافين تحسين الخصائص الفيزيائية والكيميائية لأشباه الموصلات، كما يمكن استخدام مواد الجرافين المركبة في زيادة حساسية

استشعار الغازات وتحسين الخصائص الكهروضغطية وأكتفي هنا بهذه الأمثلة والتي لا يمكن حصرها في مقال واحد

سادساً: آفاق جديدة

فتح فهم فيزياء المواد النانومترية وكذلك التطور الكبير في طرق تحضيرها والتحكم الدقيق بأحجامها وشكلها -بل وطرق ترتيبها مع بعضها البعض- آفاقاً لا حدود لها لصناعة مواد كانت تعتبر من الخيال العلمي في وقت ليس ببعيد. ومن أمثلة ذلك

1. المصعد الفضائي

تخيل كابلاً طوله 36000 كيلومتر يمتد من خط الاستواء على الأرض ويُثبت في قمر صناعي عند الطرف البعيد. يدور النظام مع دوران الأرض، ويمكن للمتسلقين أن يصعدوا الكابل حاملين الحمولات ثم يطلقونها في الفضاء. هل هذا ممكن؟ لبنائه نحتاج لمادة أقوى من الفولاذ بعشرات المرات وفي نفس الوقت تكون كثافتها أقل منه بكثير. فمن أين لنا بهذه المادة؟

يعطي علم المواد النانومترية إجابةً على هذا السؤال: إنها أنابيب الكربون النانوية، حيث أوضحت الدراسات أن مقاومة الشد لأنابيب الكربون النانوية تتفوق على قوة مواد مثل الفولاذ - الذي يعتبر بالفعل من أقوى المواد المعروفة للبشرية - حيث تزيد بمئات المرات وفي نفس الوقت هي أخف بكثير من ست مرات. هذه القوة الاستثنائية ناتجة عن هيكل أنابيب الكربون النانوية الفريد والمتميز إلى جانب غياب العيوب الهيكلية والذي يسمح للأنابيب بتحمل أحمال هائلة دون أن تنكسر. بالإضافة إلى ذلك، تساهم أبعاد الأنابيب النانوية في قوتها الكبيرة، حيث إن أي عيوب على المستوى الذري

لها معامل انكسار سالب لبعض الأطوال الموجية مما يتيح للضوء الانحناء حول الأجسام بطرق غير طبيعية، وهو ما يجعلها غير مرئية في هذا النطاق من الأطوال الموجية

في العام 2006، قامت مجموعة من الباحثين بجامعة ديوك بتصميم هذه المواد في إخفاء الأجسام ولكن في نطاق الموجات الدقيقة (microwave region)، ولا تزال الدراسات النظرية والمعملية تحاول تصميم هذه المواد لتعمل في نطاق الضوء المرئي، وأعتقد أن ما خفي عنا من هذه الدراسات كان أعظم

سابقاً: كلمة أخيرة

هذه الكلمة أتقدم بها لزملائي من الباحثين العرب في هذا المجال. يُعتبر علمُ النانو من المواضيع المتعددة التخصصات ولن يتأتى تقدّم في هذا المجال إلا بتعاون التخصصات العلمية المختلفة مع بعضها البعض وليس بأبحاث الغرف المغلقة على نفسها.

المراجع

1. V. H. Grassian. When size really matters: Size-dependent properties and surface chemistry of metal and metal oxide nanoparticles in gas and liquid phase environments. *Journal of Physical Chemistry C*, 112(47):18303–18313, 2008.
2. Dabbousi BO, RodriguezViejo J, Mikulec FV, Heine JR, Mattoussi H, Ober R, Jensen KF, Bawendi MG, (CdSe)ZnS Core-Shell Quantum Dots: Synthesis and Characterization of a Size Series of Highly Luminescent Nanocrystallites, (1997) *J. Phys Chem B* 101:9463–9475.
3. G. Schmid, *Nanoparticles: From theory to application*, Wiley-VCH, 2004, 21–24.
4. Talapin DV, Rogach AL, Kornowski A, Haase M, Weller H, Highly Luminescent Monodisperse CdSe and CdSe/ZnS Nanocrystals Synthesized in a Hexadecylamine-Trioctylphosphine Oxide-Trioctylphosphine Mixture. *Nano Lett* 1:207–211, (2001).
5. Saiful Saad, Newly developed 'invisibility cloak' can protect soldiers from thermal imagery, *Textile Today*, November 11, 2023.

نادرة جدًا. تجعل هذه الخصائص، إلى جانب المرونة العالية والقدرة على التحمل، أنابيب الكربون النانوية بمثابة "الأبطال الخارقين" في علم المواد، ممّا يمهد الطريق لابتكارات ثورية مثل مصاعد الفضاء

2. طاقة الإخفاء

كان ذلك عنوانًا لفيلم سينمائي كوميدي في أواخر الخمسينات من القرن الماضي، وكان يتحدث عن شيءٍ يمكن أن يُخفي الأشخاص عن الأنظار إذا تمّ ارتداؤه! تأتي المواد النانوية لتجعل هذه الشيء أمرًا يمكن أن يكون واقعًا فعليًا

أتاحت تكنولوجيا النانو تحضير ما يسمى بالمواد الخارقة (Metamaterials)، وهي نوع من المواد يتمّ تصميمه بحيث تمتلك خصائص نادرة الوجود في المواد الطبيعية. كلمة "Metamaterial" مشتقة من الكلمة اليونانية "meta" التي تعني "ما وراء" أو "بعد"، والكلمة اللاتينية "material" التي تعني "مادة" أو "مادة خام". تتكون هذه المواد من مصفوفات لعناصر متعددة مصنوعة من مواد مركبة مثل المعادن والبوليمرات، وعادة ما يتم ترتيب هذه المواد في أنماط متكررة على مقاييس أصغر من الأطوال الموجية للموجات الكهرومغناطيسية التي تؤثر عليها. تستمدّ الموادُ الخارقةُ خصائصها ليس من المواد الأساسية المكونة لها، بل من تصميمها الهيكلية النانومترية الجديد، حيث يمنحها شكلها الدقيق، وهندستها، وحجمها، وتوجّهها، وترتيبها خصائص ذكية قادرة على التلاعب بالموجات الكهرومغناطيسية: عن طريق حجبها أو امتصاصها أو تعزيزها أو ثنيها، من أجل تحقيق فوائد تتجاوز ما هو ممكن مع المواد التقليدية

عند تصميم هذه المواد بشكل مناسب، يكون