

## المواد ثنائية الأبعاد وتطبيقاتها

### قفزة إلى المستقبل

أحمد معروف<sup>1</sup> وإيمان طه<sup>2</sup>

<sup>1</sup>أستاذ مشارك، فيزياء المواد، الجامعة الألمانية بالقاهرة، مصر

<sup>2</sup>أستاذ مشارك، فيزياء المواد، معهد بحوث البترول المصري، مصر

الفضول هو ممارسة من أقدم الممارسات الإنسانية في التاريخ وهو يهدف إلى محاولة فهم البيئة المحيطة وخصائصها ومحاولة الاستفادة منها وتوظيفها بإنتاج ما سميناه بالتقانة (التكنولوجيا). تطورت هذه الممارسة عبر تاريخ البشرية وتبلورت - فيما نعرفه حالياً باسم علم الفيزياء - إلى فهم الظواهر الطبيعية المحيطة بنا فهماً رياضياً يمكننا من تفسير هذه الظواهر والأنظمة المرتبطة بها، بل وتوقع كيفية تغيير سلوكيات هذه الأنظمة عند تغيير أي من المتغيرات المرتبطة بها. هذا الفهم الرياضي يتأسس على شقين: النمذجة الرياضية والنتائج التجريبية، وهو ما يعرف على الترتيب بالفيزياء النظرية والفيزياء العملية.

وحتى نفهم خصائص أي نظام معقد، يجب علينا تمثيله أو شرحه من خلال أنظمة أكثر بساطة أو أقل تعقيداً. فمثلاً دعنا نتخيل هذه الأنظمة الثلاثة التالية والتي تتكون من مجموعة من الأفراد يتمتعون بخصائص متقاربة تماماً:

1. عدد واحد فقط من هؤلاء الأشخاص يعيش منفرداً في بيته بعيداً عن أي شخص آخر.
2. مجموعة من هؤلاء الأفراد يعيشون في مساحة كبيرة، كلٌّ في بيته، وبمسافة حوالي كيلو متر واحد بين كل بيت وآخر.
3. مجموعة من هؤلاء الأفراد يعيشون في شقق في مبنى

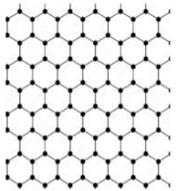
سكني كبير. ومن المنطقي بالطبع أن تكون سلوكيات هذه المجتمعات الثلاثة مختلفة تبعاً لاختلاف التفاعلات بين هؤلاء الأشخاص، والتي تنبع من قربهم من بعضهم البعض. وهكذا الحال في مختلف المواد، فخصائص الذرات المنعزلة تختلف كلية عن خصائص تجمعات هذه الذرات سواء أكانت تجمعات في بُعد واحد أم تجمعات في بُعدين أو ثلاثة أبعاد. وتعتبر ميكانيكا الكم هي النظرية التي تصف بنجاح باهر الخصائص الفيزيائية والكيميائية لمختلف المواد في كل أبعادها، وهو ما نتج عنه الثراء التكنولوجي الذي تنتعم به البشرية.

من نتائج ميكانيكا الكم أن الإلكترونات تتواجد في مستويات للطاقة (energy levels/states) في الذرة المنعزلة. تتغير هذه الصورة عندما تتجمع مجموعة من الذرات لتكوين هيكل (بنية structure) لمادة، ثلاثية الأبعاد على سبيل المثال، فتتحول مستويات الطاقة في الذرة المنعزلة إلى نطاقات من الطاقة (energy bands) تعيش فيها جميع إلكترونات المادة. هذه النطاقات هي مناطق متواصلة من الطاقة يمكن للإلكترونات الوجود فيها. قد تكون هناك فجوات (gaps) بين هذه النطاقات، فإذا كان هناك فجوة بين أكبر مستوى طاقة يسكنه إلكترون وأول مستوى طاقة شاغر، يُقال إن المادة هي عازلة (insulating) أو نصف موصلة (semiconducting)، تبعا لقيمة الفجوة، أما إذا لم تكن هناك فجوة، تكون المادة موصلة للكهرباء (conducting/metallic). السيليكون والزجاج ونيتريدات البورون هي أمثلة للمواد شبيهة الموصلة، في حين أن النحاس والحديد والفضة أمثلة على المواد الموصلة.

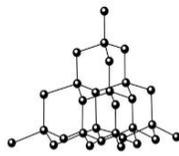
المواد ثلاثية الأبعاد والمواد ثنائية الأبعاد تمثلان فئتين مختلفتين من المواد مع اختلافات جوهرية في هيكلها وخصائصها وسلوكها. في عالم المواد ثلاثية الأبعاد، يتم ترتيب

يكون الألماس شفافاً ويُعدّ من أقوى المواد صلابة في الكون. ينشأ هذا الاختلاف الشاسع في الخصائص بين الجرافايت والألماس من طبيعة الارتباط بين جيران كل ذرة كربون في شبكات الجرافايت والألماس، والتي أساسها الطبيعة الكمومية للإلكترونات المتواجدة في المادة. أما النقاط الكمومية (quantum dots)، فهي تجمعات من الذرات بحجم يتراوح بين عدة نانومترات إلى مئات النانومترات. هذه النقاط لا تمتلك تناظراً ممتداً (extended symmetry)، وبالتالي تُعتبر أنظمة صفرية البعد. تتفاوت الخصائص الفيزيائية لهذه النقاط وفقاً لحجمها، وبشكل عام يمكن تكوين هذه الأنظمة من الكربون وغالبية العناصر والمركبات الأخرى. الكربون قادر أيضاً على تكوين مواد بتناظر أحادي البعد مثل الأنابيب النانوية الكربونية (carbon nanotubes)، فهي أنظمة كربونية تتكون من شبكة سداسية من ذرات الكربون التي تُلفّ لتشكل أنبوباً نانومترياً (نصف القطر حوالي 1 نانومتر والطول 1 ميكرومتر).

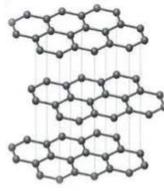
فلنعد الآن لصديقنا العزيز، الجرافايت، المادة الكربونية ثلاثية الأبعاد. كل طبقة من الجرافايت هي شبكة سداسية من الذرات، تُعرف باسم الجرافين (graphene). الجرافين هو



الجرافين



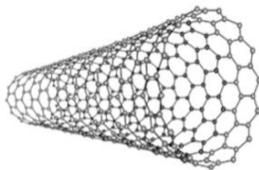
الماس



الجرافايت



جزئ C60



الأنابيب النانوية الكربونية

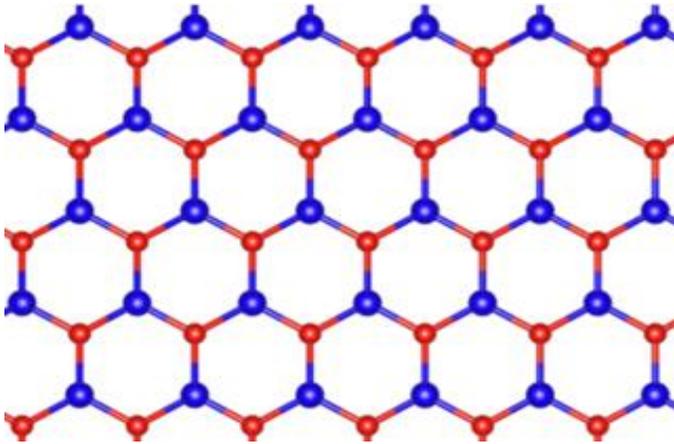


شكل 1. المواد الكربونية مختلفة الأبعاد

الذرات في شبكة (lattice) ممتدة في الفراغ، وتُظهر هذه المواد خصائص متجانسة، ممّا يعني أن خصائصها الفيزيائية والكيميائية متطابقة في جميع الاتجاهات. الأمثلة على المواد ثلاثية الأبعاد تشمل المعادن والخزفيات ومعظم البوليمرات. من ناحية أخرى، تتألف المواد ثنائية الأبعاد من طبقات ذرية محصورة في مستوى واحد. ونتيجةً لهذه الهيكلية المسطحة (planar structure)، غالباً ما تُظهر المواد ثنائية الأبعاد خصائص إلكترونية وبصرية وميكانيكية فريدة تختلف بشكل كبير عن نظيراتها ثلاثية الأبعاد. على سبيل المثال، تنشأ الحركة الإلكترونية الاستثنائية والقوة الميكانيكية العالية والتوصيلية الحرارية الاستثنائية لمادة الجرافين من طبيعتها ثنائية الأبعاد، ممّا يسمح بتطبيقات جديدة في مجالات الإلكترونيات والمستشعرات والمواد المركبة.

دعونا الآن نتكلم عن أحد العناصر الهامة، والذي كان في قلب الثقافة الإنسانية على مر العصور، وهو الكربون. المواد الكربونية معروفة على نطاق واسع لدى البشر، بدءاً من أقلام الرصاص التي طالما كتبنا بها وما زلنا، إلى خواتم الألماس، إلى تجمعات الطعام الشوائية. ذرة الكربون قادرة على تكوين عدة ترابطات، ممّا ينتج عنه عدة هياكل كربونية: الجرافايت (graphite)، الذي نستخدمه في أقلام الرصاص، هو هيكل كربوني ثلاثي الأبعاد (الشكل 1) مصنوع من طبقات من شبكة سداسية (hexagonal lattice) من ذرات الكربون بمسافة 1.4 انجستروم بين كل ذرتين متجاورتين، وتترابط هذه الطبقات معاً بواسطة قوى فان دير فال (van der Waals). الألماس (Diamond) هو هيكل كربوني آخر ثلاثي الأبعاد أيضاً، بينما الجرافايت مادة معتمدة وسهلة الكسر ويمكن فصل طبقاتها عن بعضها بسهولة، وهو ما يحدث عندما "نكتب" باستخدام قلم الرصاص، فالخط المكتوب ليس إلا عدة طبقات من طبقات الجرافايت، وعلى النقيض منه

الجرافايت. وبنفس التركيب الهيكلي للجرافين، تأتي مادة نيتريدات نيتريدات البورون السداسي (hexagonal boron nitride) - BN وهي من أشهر المواد ثنائية الأبعاد، وتتألف من ذرات البورون والنيتروجين المترادفة مرتبة في شبكة سداسية (شكل 2)، كما الحال في الجرافين. يؤدي هذا الترتيب إلى تشكيلة كورقة مسطحة ذات طبقة واحدة بروابط تساهمية (تشاركية) قوية. يُظهر h-BN استقراراً حرارياً وكيميائياً ممتازاً، وقوة ميكانيكية عالية، وخواص عزل كهربائي، ففجوة الطاقة الواسعة فيه تجعله شفافاً وعازلاً ممتازاً، بينما توصيلية الحرارة العالية تجعله مناسباً للتطبيقات في إدارة الحرارة. بالإضافة إلى ذلك، يُعتبر h-BN من المواد المتوافقة حيويًا (biocompatible)، مما يجعله مفيداً في التطبيقات الطبية مثل توصيل الأدوية والتصوير الحيوي. كما نجد لخواصه التشحيمية استخدامات في التطبيقات الصناعية مثل الطلاء والزيوت التزليقية. بشكل عام، يُعدّ h-BN واعدًا لمختلف التطبيقات التكنولوجية بفضل امتلاكه مجموعةً فريدة من الخصائص.



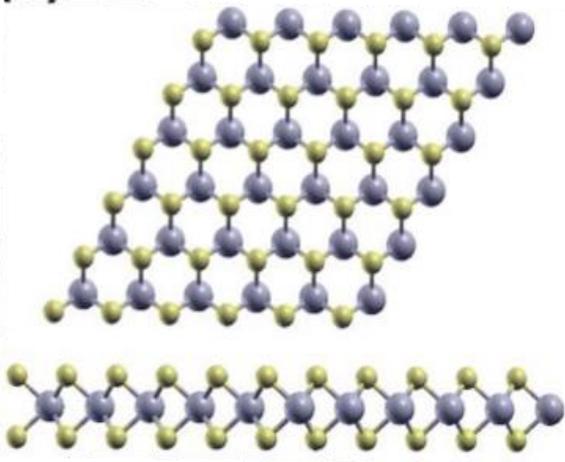
شكل 2: BN-h نيتريدات البورون السداسية

قبل زيارتنا للمادة ثنائية الأبعاد التالية، دعونا نشير إلى قضية مهمة تتعلق بالخصائص البصرية للمواد قد تساعدنا على فهم سلوكيات هذه المواد. هناك نوعان من الفجوات الطاقوية في المواد، مباشرة وغير مباشرة. في شبه الموصلات ذات الفجوة

هيكل مستقر ثنائي الأبعاد، كان دائماً حاضراً معنا (على سبيل المثال، في كتبنا المدرسية). في الواقع، درس الفيزيائيون الجرافين منذ فترة طويلة (Wallace, 1947) في واحدة من أوائل الأبحاث النظرية التي حسبت الخصائص الإلكترونية للجرافايت، وكانت هذه الخصائص مفهومة بشكل كامل منذ ذلك الوقت، مما يُظهر قوة الفيزياء النظرية في فهم الخصائص الأساسية للمواد حتى قبل تصنيعها معملياً. وعلى الرغم من أن الجرافايت هش وغير شفاف، فإن الجرافين - على العكس - قوي جداً وشفاف. لوح الجرافين له معامل يانج (Young's Modulus) بقيمة حوالي 1 تيرا باسكال (1 TPa)، ونسبة شفافية تصل إلى 98% في الطيف المرئي. بالإضافة إلى ذلك، يمنح هيكل الجرافين المسطح خصائص ميكانيكية استثنائية، مثل القوة والمرونة. كما أن المساحة السطحية الكبيرة والشفافية العالية للجرافين جعلته واعدًا لتطبيقات كثيرة في مجالات متنوعة. بشكل عام، ترتبط الخصائص الاستثنائية للجرافين ارتباطاً وثيقاً بطبيعته الثنائية الأبعاد، مما يمكن من تطبيقات وتطورات تكنولوجية جديدة واسعة النطاق.

يُظهر الجرافايت خصائص شبه المعدن، حيث يمتلك تراكباً صغيراً بين نطاقَي الطاقة الوالي (التكافؤي valence) والناقل (conduction). بالمقابل، يتصرف الجرافين، الذي يتكون من شبكة عسلية ثنائية الأبعاد من ذرات الكربون، كنصف موصل بفجوة صفرية، حيث يتلاقى نطاقا الطاقة الوالي والناقل في نقطة واحدة، تشكل مخروط ديراك. هذا الهيكل الفريد يمنح الجرافين خصائص إلكترونية استثنائية، مثل الحركة العالية للإلكترونات، مما يجعله مرشحاً ممتازاً لمختلف التطبيقات الإلكترونية. بالإضافة إلى ذلك، فإن طبيعة الجرافين ذات الطبقة الأحادية تسمح بالتفاعل الفعّال مع المحوّزات الخارجية، مما يعزز أداءه الإلكتروني بالمقارنة مع

في مواد TMDs ثنائية الأبعاد هي فجوة مباشرة مما يُمكنها من امتصاص الضوء وإصداره بكفاءة، وبالتالي يفتح الباب لاستخدامها في تطبيقات الإلكترونيات البصرية، على عكس الحال في النسخة ثلاثية الأبعاد من هذه المواد. كما هو الحال مع المواد ثنائية الأبعاد الأخرى، يمكن التحكم في قيمة فجوة الطاقة في طبقة TMD بتطبيق توتر ميكانيكي في الطبقة، والذي يمكن توظيفه في مجموعة متنوعة من التطبيقات.



شكل 3: المنظور العلوي والجانبى لثنائي كبريتيد الموليبيدينوم. الرمادي والأصفر يمثلان عناصر الموليبيدينوم والكبريت، على التوالي.

من المواد ثنائية البعد أيضا مجموعة تسمى "الإكسينات" (MXenes)، وهي فئة مكونة من كاربيدات (أو نتريدات أو كاربونيترايدات) المعادن الانتقالية (شكل 4). تُظهر هذه المواد خصائص مذهلة بسبب هيكلها وتركيبها الفريد، فلها خصائص ميكانيكية ممتازة، وهي كذلك ذات توصيلية معدنية، مما يؤهلها لمختلف التطبيقات في مجالات الإلكترونيات وتخزين الطاقة والمحفزات. بالإضافة إلى ذلك، تمتلك الإكسينات كيمياءً سطح قابلةً للتعديل، مما يسمح بتعديل خصائصها لتطبيقات محددة باستخدام مجموعات كيميائية مختلفة. علاوة على ذلك، تظهر الإكسينات استقرارًا استثنائيًا وصلابة، مما يجعلها مناسبة للاستخدام على المدى الطويل في بيئات قاسية.

الطاقوية المباشرة (direct energy gap)، تكون الطاقة الدنيا المطلوبة للإلكترون للانتقال من الحزمة الوالية (valence band) إلى الحزمة الناقلة (conduction band) هي فرق الطاقة بين حالتين لهما نفس الزخم (momentum)، وهذا يعني أن زخم الإلكترون يظل ثابتاً أثناء الانتقال، مما يسمح بامتصاص فعال للفوتونات ذات الطاقات المطابقة للفجوة. ونتيجة لذلك، تعتبر شبه الموصلات ذات الفجوة الطاقوية المباشرة ممتصات ممتازة للضوء وغالبًا ما تستخدم في الأجهزة الإلكترونية البصرية مثل مصابيح الليد والليزر. من ناحية أخرى، في شبه الموصلات ذات الفجوة الطاقوية غير المباشرة (indirect energy gap)، تحدث الطاقة الدنيا المطلوبة لكثلة إلكترونية للانتقال من الحزمة الوالية إلى الحزمة الناقلة بين حالات زخم مختلفة، وهذا يحتاج إلى تغيير في زخم الإلكترون أثناء الانتقال، مما يجعل من غير المحتمل امتصاص الفوتونات بكفاءة من قبل شبه الموصل. وهكذا فإن أشباه الموصلات ذات الفجوة الطاقوية غير المباشرة تمتص الضوء، ولكن بشكل أقل فعالية مقارنة بأشباه الموصلات ذات الفجوة الطاقوية المباشرة.

من المواد ثنائية البعد الفضة تلك المعروفة بـ ثنائي كالكوجينات المعادن الانتقالية (Transition metal dichalcogenides, TMDs)، مثل ثنائي كبريتيد الموليبيدينوم ( $MoS_2$ ) (شكل 3)، وثنائي سيلينيد التنجستن ( $WSe_2$ )، وتُظهر خصائص مثيرة للاهتمام ناتجة عن طبيعتها ثنائية الأبعاد. تتكون هذه المواد من طبقات ذرية فردية مكدسة فوق بعضها البعض، مع وجود قوى فان دير فال ضعيفة تربط هذه الطبقات (كما هو الحال في مادة الجرافيت). نظرًا لتقليل بُعدية هذه المواد، تظهر TMDs خصائص إلكترونية، بصرية، وميكانيكية فريدة. فجوة الطاقة

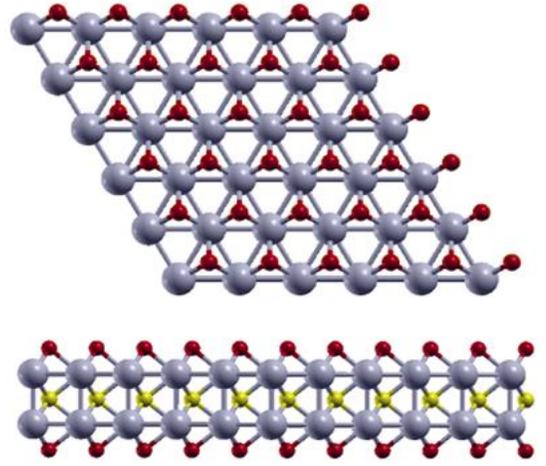
المداري، وهو أكثر وضوحًا في ذرات أثقل. وبعبارة أكثر تبسيطاً: إن ترتيب الذرات وكيفية تفاعل إلكتروناتها في المواد ثنائية الأبعاد يحددان خصائصها الإلكترونية، مثل الموصلية. من خلال تعديل هذا الترتيب، يمكننا التحكم فيما إذا كانت المادة تتصرف مثل عازل (لا يوصل الكهرباء) أو موصل (يوصل الكهرباء بسهولة)، وهو أمر بالغ الأهمية لصنع أنواع مختلفة من الأجهزة الإلكترونية.

## الحبس الكمومي وحالات الحافة

يؤدي الاختزال إلى بُعدين في المواد ثنائية الأبعاد إلى ما يسمى بالحبس الكمي (quantum confinement)، حيث يتم تقييد حركة الإلكترونات في بعد واحد، مما يعزز التأثيرات الكمومية. يؤدي هذا الحبس إلى زيادة فجوة نطاق المادة أثناء انتقالها من الكتلة ثلاثية الأبعاد إلى الطبقة الأحادية (مستوي مسطح ثنائي الأبعاد)، وهو جانب حاسم للخصائص الإلكترونية الضوئية. حيث إن هذا الضغط في الأبعاد يمكن أن يجعل المادة تتصرف بشكل مختلف عند حوافها مقارنة بالوسط، لذا يمكن أن يكون الأمر مفيداً لإنشاء أجهزة تحتاج إلى التحكم في تدفق الإلكترونات بدقة شديدة. يمكن أن تُظهر حالات الحافة (edge states) هذه في مواد مثل الجرافين خصائص إلكترونية فريدة بسبب احتجاز الإلكترونات عند حواف المادة، مما يوفّر مسارات إلكترونية.

## تأثيرات الأكسيتون

عندما تكون المواد بهذه النحافة التي ذكرناها، يمكن للإلكترونات ونظائرها الموجبة (الثقوب) أن تقترن بشكل أكثر إحكامًا بسبب تجاذبها الكهراكدي، فتتشكّل الإكسيتونات (excitons). في المواد شبه الموصلة ثنائية الأبعاد، تعمل ثنائية البعد على تعزيز التأثيرات الإكسيتونية، حيث ترتبط الإكسيتونات معًا بواسطة قوى كولومبية بقوة أكبر مما هي



شكل 4: المنظور العلوي والجانب ل (Mo<sub>2</sub>C MXene). ألوان الرمادي، الأصفر، والأحمر تمثل عناصر الموليبيدينوم، الكربون، والأكسجين، على التوالي.

وبعد استعراضنا لبعض المواد ثنائية الأبعاد، دعونا نناقش بعض تفاصيل سلوكيات الإلكترونات فيها، في محاولة لفهم الآليات التي تعمل من خلالها هذه المواد على تسهيل التقدم في مجال الإليكترونيات والإليكترونيات الضوئية. سنحاول بايجاز وتبسيط توضيح هذه الآليات مع التركيز على دور هندسة بنية النطاق، والحبس الكمي، وتأثيرات الإكسيتون (excitons)، وتفاعل الضوء مع هذه المواد.

## هندسة بنية النطاق

ترتبط الخصائص الإلكترونية للمواد ثنائية الأبعاد بطبيعة هياكل النطاق الخاصة بها، والتي يتم تحديدها من خلال الترتيب الذري للمادة والتداخل المداري الإلكتروني. على سبيل المثال، ينتج التشكّل الخطي (linear dispersion) عند نقاط ديراك (Dirac points) في بنية نطاق الجرافين عن تهجين  $sp^2$  لذرات الكربون، مما يؤدي إلى فجوة نطاق صفرية وحركة حاملة عالية. في المقابل، يتم تحقيق إدخال فجوة نطاق في المواد الشبيهة بالجرافين (على سبيل المثال، السيليسين (Silicene) والجرمانين (Germanene)) وTMDs من خلال التعديلات الهيكلية (مثل كسر التماثل الهيكلية أو المجالات الكهربائية الخارجية) والاقتران

ظواهر ونماذج جديدة للأجهزة، مما يَعد بإحداث ثورة في التقنيات الإلكترونية والإلكترونية الضوئية في المستقبل. وهكذا، بينما نجوب معاً أروقة المواد ثنائية الأبعاد ونتأمل عجائب خصائصها الفيزيائية، نقف على أعتاب فصل جديد يأخذنا إلى عالم مذهل وغير مألوف، عالم المواد ثنائية الأبعاد. تمثل هذه المواد نقلة نوعية في عالم العلوم والتكنولوجيا، حيث تفتح الأبواب أمام تطبيقات لم يكن لنا أن نحلم بها قبل عقود. من خلال دراسة خصائص هذه المواد ذات البعد الجديد، نستكشف كيف يمكن لطبقة واحدة من الذرات أن تغير مفهومنا للقوة والتوصيلية والشفافية، وتقدم تطبيقات واعدة تُعدّ جسراً يربط بين الماضي والمستقبل، فاستعدوا للإبحار في بعض تطبيقات المواد ثنائية الأبعاد، حيث كل تطبيق يروي قصة ملهمة تحمل في طياتها وعوداً بمستقبل مفعم بالإبداع والابتكار.

## بعض تطبيقات المواد ثنائية الأبعاد

### 1- تطبيقات الإلكترونيات والإلكترونيات الضوئية

إن الموصلية الكهربائية الاستثنائية والخصائص الإلكترونية والضوئية للمواد ثنائية الأبعاد التي ذكرناها بالتفصيل أنفأ جعلتها في مقدمة المرشحين للجيل القادم من الأجهزة الإلكترونية والإلكترونية الضوئية. على سبيل المثال، إن قدرة الجرافين العالية على الحركة والمرونة تجعله مرشحاً مثالياً لشاشات العرض المرنة والجلود الإلكترونية (e-skins)، والتي يمكن أن تحدث ثورة في التكنولوجيا القابلة للارتداء والروبوتات. بينما تعتبر TMDs مع فجوات نطاقاتها المتغيرة، مثالية لبناء الترانزستورات والكاشفات الضوئية ومصابيح الليد مما يتيح أجهزة إلكترونية أكثر كفاءة وأرق وأكثر مرونة.

### 2- تطبيقات تخزين وتحويل الطاقة

(أ) تطبيقات تخزين الطاقة للمواد ثنائية الأبعاد: يؤدي دمج المواد ثنائية الأبعاد في أنظمة تخزين الطاقة، مثل

عليه في المواد ثلاثية الأبعاد. يؤدي هذا إلى طاقات ربط عالية للإكسيتون، مما يجعل ملاحظة الظواهر الإكسيتونية ممكنة في درجة حرارة الغرفة. تؤدي هذه التأثيرات الإكسيتونية القوية إلى تفاعلات مُحسنة بين الضوء والمادة، وهو أمر بالغ الأهمية لتشغيل مصابيح الليد والليزر والكواشف الضوئية والخلايا الشمسية، لأنها تسمح بامتصاص الضوء وعمليات الانبعاث (الإصدار) بكفاءة.

## تفاعل الضوء مع المواد ثنائية الأبعاد

يتأثر تفاعل الضوء مع المواد ثنائية الأبعاد بشكل أساسي بسمكها الذري وخصائصها الإلكترونية. فعلى سبيل المثال، في الـ TMDs، تُسهّل فجوة النطاق المباشرة توليد زوج الإلكترون/ ثقب بكفاءة عند امتصاص الضوء، وهو مفتاح الأجهزة الإلكترونية الضوئية. يتم تعزيز التفاعل القوي بين الضوء والمادة بشكل أكبر من خلال الحبس ثنائي الأبعاد، مما يؤدي إلى تلالؤ ضوئي واضح وإمكانية وجود أجهزة كهروضوئية رقيقة جداً. وفي الجرافين، على الرغم من فجوة نطاقه الصفرية، تسمح الموصلية الضوئية العالمية (universal) له بامتصاص جزء ثابت من الضوء الساقط عبر طيف واسع، مما يجعله مناسباً لأجهزة الكشف الضوئي ذات النطاق العريض. علاوة على ذلك، فإن قدرة الجرافين على دعم الموجات البلازمونية (plasmonic waves) عند ترددات متوسطة من الأشعة تحت الحمراء إلى تيراهيرتز تفتح آفاقاً أمام الأجهزة وأجهزة الاستشعار البلازمونية.

خلاصة الأمر، تؤثر الطبيعة الرقيقة للغاية للمواد ثنائية الأبعاد على كيفية امتصاصها للضوء وانبعاثه وتفاعله معها، وهذا يجعلها متعددة الاستخدامات لمختلف التطبيقات المتعلقة بالضوء. ومع ذلك، لا تزال هناك تحديات في استخدام المواد ثنائية الأبعاد ولا يزال البحث والتطوير مستمرين للكشف عن

للانعكاس للأيونات في البنية الطبقيّة لهذه المواد أثناء عمليات الشحن والتفريغ. تعمل المساحة السطحية المحسنة والتوصيل الفائق للمواد ثنائية الأبعاد على تسهيل حركة الأيونات هذه، مما يؤدي إلى زيادة قدرات تخزين الطاقة وكفاءتها.

### المواد ثنائية الأبعاد في المكثفات الفائقة:

تقوم المكثفات الفائقة (Supercapacitors) بتخزين الطاقة من خلال فصل الشحنة في طبقة كهربائية مزدوجة (electric double layer) عند السطح البيني بين مادة الإلكتروليت والإلكتروليت، وتتميز بقدرتها على توصيل الطاقة واستيعابها بسرعة. تعتبر المواد ثنائية الأبعاد مناسبة بشكل خاص للمكثفات الفائقة نظرًا لمساحات سطحها الكبيرة وموصليتها الكهربائية العالية.

في المكثفات الكهربائية مزدوجة الطبقة (EDLCs)، يحدث تخزين الطاقة عند واجهة القطب الكهربائي/الإلكتروليت، حيث يشكّل فصلُ الشحنة طبقة كهربائية مزدوجة. يعمل الجرافين والمواد ثنائية الأبعاد الأخرى، بمساحة سطحها الواسعة، على زيادة مساحة الواجهة المتاحة لتراكم الشحنة هذه، وبالتالي تعزيز السعة التخزينية. بالإضافة إلى ذلك، تدعم موصليتها الفائقة دورات الشحن والتفريغ السريعة، مما يجعلها مثالية لتطبيقات المكثفات الفائقة.

### ب) تطبيقات تحويل الطاقة في المواد ثنائية الأبعاد:

تشتمل تطبيقات تحويل الطاقة التي تتضمن مواد ثنائية الأبعاد على نطاق واسع من التقنيات التي تحول شكلاً من أشكال الطاقة إلى شكل آخر، مع الاستفادة من الخصائص الفريدة لهذه المواد. تشمل المجالات الرئيسية التي أظهرت فيها المواد ثنائية الأبعاد وعدًا كبيرًا الأجهزة الكهروضوئية لتحويل الطاقة الشمسية، والأجهزة الكهروكيميائية لتحويل الطاقة الكيميائية، والأجهزة الحرارية لتحويل الحرارة إلى كهرباء.

البطاريات والمكثفات الفائقة، إلى تحسين أدائها بشكل كبير. ويعود هذا التحسن في المقام الأول إلى الخصائص الفيزيائية الاستثنائية للمواد ثنائية الأبعاد التي ذكرنا، والتي تلعب دورًا محوريًا في آليات هذه الأجهزة.

### المواد ثنائية الأبعاد في البطاريات:

تقوم البطاريات بتخزين الطاقة على شكل طاقة كيميائية تتحول إلى طاقة كهربائية عند تفريغها. تشتمل المكونات الأساسية للبطارية على الأنود (المصعد) والكاثود (المهبط) والإلكتروليت (الكهرل) والفاصل. تمّ استخدام المواد ثنائية الأبعاد، نظرًا لمساحة سطحها العالية، وموصليتها الكهربائية، وثباتها الكيميائي، على نطاق واسع كمواد إلكتروليتات في البطاريات، وخاصة بطاريات أيون الليثيوم.

مواد الأنود: يتم استخدام الجرافين كمادة أنود في بطاريات أيون الليثيوم حيث توفر مساحة السطح العالية للجرافين مواقع واسعة لامتناس أيونات الليثيوم، وبالتالي زيادة سعة شحن البطارية. علاوة على ذلك، فإن موصليتها الكهربائية الممتازة تسهّل النقل السريع للإلكترونات، مما يؤدي إلى معدلات شحن وتفريغ أسرع. كما تساهم مرونة الجرافين وقوته الميكانيكية أيضًا في متانة البطارية ودورة حياتها.

مواد الكاثود: بالإضافة إلى الجرافين، فإن بعض المواد الأخرى ثنائية الأبعاد مثل ثنائي كالكوجينيدات المعادن الانتقالية (TMDs) تُستخدم كمواد كاثودية. تقدّم الـ TMDs، مثل ثاني كبريتيد الموليبدنوم  $MoS_2$ ، بنية طبقات فريدة تتيح سهولة عملية الإقحام/الإقحام البيني لأيونات الليثيوم، على غرار الآلية الموجودة في الأنودات. تعمل هذه الخاصية على تحسين كثافة الطاقة واستقرار دورة البطاريات. في العموم تدور آلية تخزين الطاقة في البطاريات ذات المواد ثنائية الأبعاد حول عملية الإقحام/الإقحام البيني القابل (intercalation/deintercalation)

للمواد ثنائية الأبعاد نقل الأيونات، وهو أمر بالغ الأهمية للتفاعلات الكهروكيميائية. هذه الخاصية مهمة بشكل خاص في أجهزة مثل خلايا وقود الأكسيد الصلب (solid oxide fuel cells)، حيث يُعد الانتشار السريع للأيونات عبر مادة الإلكتروليت أمرًا ضروريًا للأداء العالي.

الأجهزة الحرارية (تحويل الحرارة إلى كهرباء):

يستفيد تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية في الأجهزة الكهروحرارية من الخصائص الحرارية الفريدة للمواد ثنائية الأبعاد، وهي:

معامل سيببك عالٍ (Seebeck Coefficient) والموصلية الكهربائية عالية: تتطلب المادة الحرارية الجيدة معامل سيببك مرتفعًا (لتوليد الجهد من اختلاف درجة الحرارة)، وموصلية كهربائية عالية (لتقليل تسخين جول)، وموصلية حرارية منخفضة (لحفاظ على التدرج في درجة الحرارة). يمكن للمواد ثنائية الأبعاد، مثل بعض ال-TMDs، أن تُظهر هذه الخصائص في وقت واحد، مما يجعلها مرشحة ممتازة للتطبيقات الكهروحرارية.

الحبس الكمي: تؤدي الطبيعة ثنائية الأبعاد لهذه المواد إلى تأثيرات الحبس الكمي، والتي يمكن أن تعزز بشكل كبير من أدائها الحراري. من خلال تقليل أبعاد المادة إلى مستوى ثنائي الأبعاد، يمكن ضبط خصائص النقل الإلكتروني والحرارية بدقة من خلال التعديلات الهيكلية، مثل سمك الطبقة والتركيب الكيميائي.

### 3- التطبيقات البيئية والطبية الحيوية:

لم تقتصر تطبيقات المواد ثنائية الأبعاد على مجالات الإلكترونيات والبصريات والطاقة بل تعدتها إلى التطبيقات البيئية والحوية مثل معالجة التلوث والاستشعار البيئي وأنظمة توصيل الأدوية والإلكترونيات الحيوية، فعبت هذه المواد دورًا محوريًا في معالجة بعض أهم التحديات التي تواجه البشرية.

تستغل الآليات الأساسية لهذه التطبيقات الخصائص الإلكترونية والبصرية والحرارية المميزة للمواد ثنائية الأبعاد. الأجهزة الكهروضوئية (تحويل الطاقة الشمسية):

تساهم المواد ثنائية الأبعاد في تعزيز الأجهزة الكهروضوئية من خلال عدة آليات. امتصاص الضوء وفصل الشحنة: تحتوي المواد ثنائية الأبعاد مثل ثنائي كالكوجينيدات المعادن الانتقالية (TMDs) على فجوات مباشرة في نطاق طيف الضوء المرئي، مما يسمح بامتصاص الضوء بكفاءة. عند الامتصاص، يمكن لهذه المواد توليد أزواج ثقب-إلكترون (الإكسيتونات) بكفاءة عالية. يسهل الهيكل الرقيق ذو الطبقات فصل الشحنات وجمعها بشكل فعال، وهو أمر بالغ الأهمية لتحويل الضوء إلى طاقة كهربائية. كما تتيح مرونة وشفافية المواد ثنائية الأبعاد تطوير ألواح شمسية مرنة وخفيفة الوزن، ما يمكن تطبيقه على الأسطح المختلفة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن لمواد مثل الجرافين أن تكون بمثابة أقطاب كهربائية شفافة، وهي ضرورية لالتقاط الضوء أثناء توصيل الكهرباء أيضًا.

الأجهزة الكهروكيميائية (تحويل الطاقة الكيميائية إلى كهربائية):

تعمل المواد ثنائية الأبعاد على تحسين الأجهزة الكهروكيميائية مثل خلايا الوقود والمحللات الكهربائية من خلال:

التحفيز (Catalysis): يوفر العديد من المواد ثنائية الأبعاد خصائص تحفيزية ممتازة للتفاعلات مثل تقليل الأكسجين (في خلايا الوقود) وتقسيم الماء (في المحللات الكهربائية electrolyzers). على سبيل المثال، يوفر الجرافين وال-TMDs مساحات سطحية عالية ومواقع نشطة للحفز الكيميائي، مما يحسن الكفاءة ويقلل متطلبات الطاقة لهذه التفاعلات.

النقل الأيوني (Ion Transport): يسهل الهيكل الطبقي

## معالجة التلوث

واسعة من المواد، بدءًا من الغازات في مراقبة تلوث الهواء وحتى الأيونات والجزيئات في تقييم جودة المياه.

أنظمة توصيل الأدوية

في الطب، تشبه هذه المواد حقائب البريد السريع التي تحمل الأدوية مباشرة إلى الأماكن المحتاجة داخل الجسم، حيث يمكنها، بفضل مساحتها السطحية الكبيرة، حمل كميات وفيرة من الدواء. والأكثر من ذلك، يمكن تعديلها لتستهدف خلايا أو أنسجة محددة في الجسم، مما يجعل العلاج أكثر فعالية ويقلل من الآثار الجانبية.

في ختام رحلتنا الاستكشافية في عالم المواد ثنائية الأبعاد وتطبيقاتها، نرى أن البشرية تقف على عتبة فجر جديد يعد بإحداث ثورة في مجالات العلوم والهندسة والتكنولوجيا. هذه المواد، التي يقاس سمكها بذرات مفردة، لم تعد مجرد مفهوم نظري بل أصبحت حجر الزاوية في تطوير تقنيات المستقبل.

نحن الآن نشهد بدايات استخدام هذه المواد في صناعة الإلكترونيات المرنة، البطاريات عالية الكثافة، المكثفات فائقة السعة، وأجهزة الاستشعار فائقة الحساسية. ولكن، الرؤية المستقبلية للمواد ثنائية الأبعاد تتجاوز ذلك بكثير، حيث يُتوقع أن تلعب دوراً حاسماً في الحوسبة الكمومية، تحلية المياه، وحتى في الطب من خلال تطوير تقنيات جديدة لتوصيل الأدوية والعلاجات الجينية.

لا يكمن التحدي الأكبر الذي يواجهنا الآن في تصنيع هذه المواد على نطاق واسع وبكفاءة عالية فحسب، بل أيضاً في فهم وتسخير خصائصها الفريدة بطرق لم نكن نتخيلها من قبل. البحث والتطوير المستمران سيكونان مفتاحاً لتحقيق هذه الإمكانيات، مع التركيز على التجارب العملية التي تتجاوز النظريات والمحاكاة.

في المستقبل القريب، قد ننظر إلى الوراء على هذه اللحظة كنقطة تحوّل حيث بدأت المواد ثنائية الأبعاد تشكيل

تخيل أن لدينا قوة خاصة تمكننا من التقاط الأشياء السيئة من الماء، الهواء، والتربة مثل كيف يلتقط المغناطيس الحديد. المواد ثنائية الأبعاد تقوم بشيء مشابه، حيث تساعد في إزالة الأشياء الضارة من البيئة باستخدام عمليات تسمى الامتزاز (adsorption)، التحلل الحفزي (catalytic degradation)، والتحلل الضوئي (photodegradation).

أحد الأمثلة البارزة في هذا المجال هو استخدام أكسيد الجرافين GO لامتصاص المعادن الثقيلة مثل الرصاص والزرنيخ من الماء. ترتبط الأيونات المعدنية بمجموعات GO المحتوية على الأكسجين، مما يسهّل إزالتها. وأيضاً يتم استخدام مواد ثنائية الأبعاد مثل ثاني كبريتيد الموليبيدينوم ( $MoS_2$ ) وكربيد التيتانيوم (MXenes) في التحلل الضوئي للملوثات. وتحت إشعاع الضوء، تولّد هذه المواد أنواع الأكسجين التفاعلية (reactive oxygen species) التي يمكنها تحليل الملوثات العضوية إلى مركبات أقل ضرراً.

الاستشعار والكشف

تشبه هذه المواد أيضاً المستشعرات التي تستطيع اكتشاف الأشياء الصغيرة جداً التي لا يمكننا عادةً رؤيتها أو الشعور بها، إذ يمكن عبر هذه المواد التعرف على جزيئات معينة في الهواء أو الماء وإعطاء إشارة، مثل تغيير في التيار الكهربائي، للإخبار بوجودها. هذا مفيد جداً في مراقبة تلوث الهواء أو جودة الماء.

تعدّ ترانزستورات مفعول الحقل (Field-effect transistors, FETs) المستندة إلى مواد ثنائية الأبعاد نوعاً شائعاً من أجهزة الاستشعار هذه. يقوم امتزاز الجزيئات الموجودة على سطح المستشعر بتعديل موصلية قناة ال-FET، والتي يمكن قياسها كإشارة كهربائية مرتبطة بتركيز العينة المستهدفة. يمكن لهذه المستشعرات اكتشاف مجموعة

العادية، مما سمح بتحديد سرعة إلكترونات ديراك وتبيان اعتمادها على الموضع والمنحى داخل المادة. يفتح هذا الاكتشاف الأبواب أمام استخدام إلكترونات ديراك في تطوير أجهزة إلكترونية متطورة بكفاءة استثنائية واستهلاكٍ منخفض للطاقة.



مرجع

## تطوير دارات إلكترونية حيوية قابلة للحقن في الأنسجة الحية

في تطور علمي ملفت، نجح فريق من الباحثين من جامعات لينكولنغ ولوند وغوتنبرغ السويدية في تركيب دارات إلكترونية صغرى مباشرة ضمن الأنسجة الحية، مما يمثل خطوة كبيرة في مجال الإلكترونيات الحيوية. استخدم الباحثون جلاً (هلامية) قابلاً للحقن يتحول داخل الجسم إلى أقطاب كهربائية ناعمة ومرنة، بفضل تفاعل كيميائي يحدث بواسطة إنزيمات موجودة في الجل. يفتح هذا الابتكار آفاقاً جديدة لدراسة الإشارات الكهربائية للجهاز العصبي وتطوير علاجات تعتمد على تعديل الدارات العصبية مباشرة داخل الأنسجة الحية.

مرجع

مستقبلنا بطرق لم نكن نجرؤ حتى على الحلم بها. الوعد الذي تحمله هذه المواد لا يقتصر فقط على تحسين جودة حياتنا ولكن أيضاً على تقديم حلول لبعض أكبر التحديات التي تواجه البشرية. مع كل اكتشاف جديد، نحن لا نقرب فقط من فهم العالم من حولنا بشكل أفضل، بل نقرب أيضاً من إمكانية إعادة تصوّره وتشكيله.

## المراجع

1. Avouris, P. et al. 2D Materials: Properties and Devices. (Cambridge University Press, 2017).
2. Lin, Y.-C. et al. Recent Advances in 2D Material Theory, Synthesis, Properties, and Applications. ACS Nano 17. 9694–9747

## سلوك جديد للإلكترونات داخل المواد

أعلن المكتب الإعلامي في جامعة **Ehime** اليابانية خبر اكتشاف الباحثين طريقة لرصد إلكترونات ديراك في المواد بانتقائية فعالة من خلال استخدام رنين سبين الإلكترون (electron spin resonance (ESR).

سُميت هذه الإلكترونات باسم العالم بول ديراك (جائزة نوبل عام 1933) الذي توصّف معادلته سلوكها، وتمّ رصدها بواسطة العالم أندريه جايم (جائزة نوبل عام 2010). تسلك إلكترونات ديراك في المادة سلوك الفوتونات بدلاً من الإلكترونات العادية، حيث يُعتقد أنها تتحرك بسرعة كبيرة أقلّ بمرتين من سرعة الضوء في المادة كما لو كانت عديمة الكتلة.

تمثّلت الدراسة الأخيرة التي نُشرت في مجلة **Material Advances**، والتي أجراها ريوهي نايتو وزملاؤه، باعتماد طريقة رصد جديدة تستخدم أربع بارامترات لتميز إلكترونات ديراك: بارامترات الموضع **x, y, z** وبارامتر الطاقة **E**، وبالتالي كما لو كنّا في فضاء بارامترات رباعي الأبعاد. تمكّن الفريق البحثي من التمييز بين إلكترونات ديراك والإلكترونات