



مقاله مروری پژوهشی

مواد دوبعدی؛ معرفی، انواع، ویژگی‌ها و کاربردها

زهره رعدی^۱، امیرحسین رحیمی^۲، هاجر قنبری^{۳*}، حسین سرپولکی^۴^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، تهران، ایران^۲ دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، تهران، ایران^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، تهران، ایران^۴ استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، تهران، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸

پذیرش علمی: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

انتشار: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷

کلیدواژه‌ها:

مواد دوبعدی،

نانومواد،

خواص،

کاربرد

چکیده مواد دوبعدی، گروهی از مواد هستند که تنها یک بعد آن‌ها در مقیاس نانو است. هرچقدر تعداد اتم‌های سطحی در مواد دوبعدی بیشتر باشد، واکنش‌پذیری فیزیکی و شیمیایی در آن‌ها، در مقایسه با حالت توده‌ای (bulk)، افزایش می‌یابد. ویژگی‌های مواد دوبعدی، نظیر نسبت سطح به حجم بالا، ریخت‌شناسی صفحه‌ای و ویژگی‌های مکانیکی، نوری، الکتریکی و مغناطیسی قابل تنظیم آن‌ها، باعث شده است انتخاب مؤثری در کاربردهایی مانند الکترواپتیک، قطعات الکترونیکی، انرژی، محیط زیست، زیست پزشکی و دارورسانی باشند. مواد دوبعدی به ده دسته کلی تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از مواد دوبعدی پایه کربنی (شامل گرافن، اکسید گرافن، اکسید گرافن احیاء شده، گرافین، فلوئوروگرافن، گرافین، گرافیدین و گرافون)، نیتريد بور هگزاگونال، کربونیتريد گرافیتی، مواد دوبعدی عنصری (عناصر گروه ۱۴ و ۱۵)، دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه، اکسید فلزات واسطه، مکسن، مواد پروسکایت دوبعدی، فلزات دوبعدی و رس‌های دوبعدی (مشمول بر رس‌های سیلیکاتی و هیدروکسیدهای دولایه‌ای). در این مقاله، پس از تقسیم‌بندی این مواد، هریک از آن‌ها معرفی و برخی ویژگی‌ها و کاربردهای آن‌ها بررسی شده است. اگرچه تاکنون بیشتر درباره گرافن مطالعه شده است تا سایر مواد دوبعدی، انتظار می‌رود این مواد نیز، از نظر ویژگی‌ها و کاربرد، دارای ظرفیتی مشابه گرافن باشند و در آینده، پژوهش‌های بیشتری درباره آن‌ها انجام و به تعداد این مواد اضافه شود.


<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.260205.1145> URL: https://www.jamt.ir/article_130852.html

Research Review Article

Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT): Vol. 10, No. 4, (Winter 2022), 37-75

2D Materials; Introduction, Classifications, Properties, and Applications

Zahra Raadi¹, Amirhossein Rahimi², Hajar Ghanbari^{3*}, Hossein Sarpoolaky⁴¹ M. Sc. Student, School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Tehran, Iran² B. Sc. Student, School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Tehran, Iran³ Assistant Professor, School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Tehran, Iran⁴ Professor, School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Tehran, Iran

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، تهران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، تلفن: ۰۲۱-۷۳۲۲۸۸۲۳، دورنگار: -

پیام نگار: hajar_ghanbari@iust.ac.ir

Please cite this article as: Raadi, Z., Rahimi, A. H., Ghanbari, H., Sarpoolaky, H., "2D Materials; Introduction, Classifications, Properties, and Applications", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 10, No. 4, (2022), 37-75. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.260205.1145>).



Paper History:

Received: 2020-12-07

Revised in revised form: 2021-04-28

Scientific Accepted: 2021-06-27

Published: 2022-04-06

Keywords:2D Materials,
Nano Materials,
Properties,
Application

Abstract 2D materials are a class of materials with only one dimension in nanoscale. Due to the increase in the number of surface atoms in two-dimensional materials, the physical and chemical reactivity compared to the bulk counterpart significantly increased. 2D materials characteristics such as high anisotropy, high surface area, unique morphology, and tunable mechanical, optical, electrical, and magnetic functionalities come out to be a fascinating candidate for application in electro-optical and electronic devices, energy and environmental fields, as well as biomedical and drug delivery in medicine. 2D materials are divided into ten major groups, including carbon-based 2D materials (includes graphene, graphene oxide, reduced graphene oxide, graphane, fluorographene, graphyne, graphdiyne, graphone), hexagonal boron nitride (hBN), graphitic C_3N_4 , elemental 2D materials (elements groups 14 and 15), transition metal dichalcogenides (TMDs), transition metal oxides (TMOs), MXenes, 2D perovskite materials, 2D metal materials, and 2D clay materials (silicate clays and layered double hydroxides (LDHs)). In this paper, after the classification of these materials, the introduction, application, and related properties are investigated. So far, more studies have been done on graphene than other 2D materials. These materials are expected to have a similar capacity to graphene in terms of properties and applications, while ongoing research will increase the diversities of this category and depth of knowledge on these groups of materials.

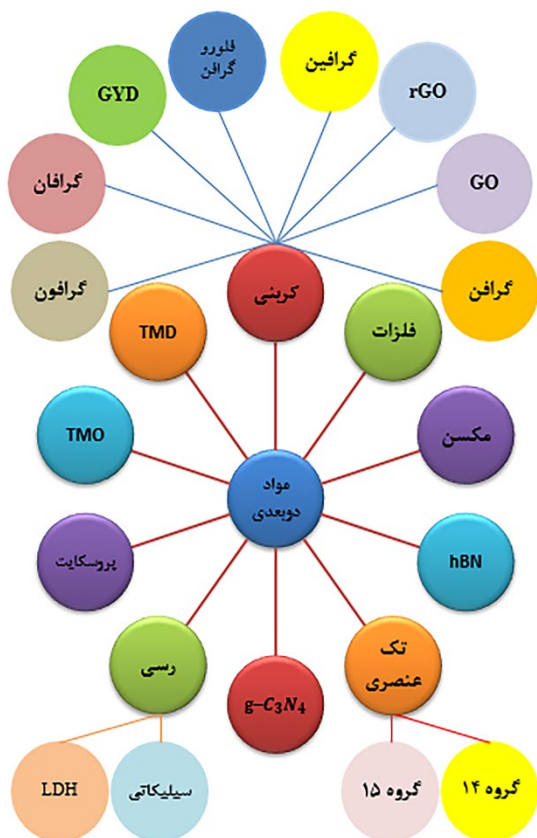

<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.260205.1145>
[URL: https://www.jamt.ir/article_130852.html](https://www.jamt.ir/article_130852.html)
۱- مقدمه**۱-۱- تاریخچه**

بعد مواد، یکی از عوامل اصلی در تعیین ویژگی‌های مواد است. مواد دوبعدی، گروهی از موادی که یک بعد ماده در آن‌ها در مقیاس نانومتر (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) است. مواد دوبعدی مانند گرافن^۱، در مقایسه با مواد صفربعدی مانند فولرن^۲، یکبعدی مانند نانولوله‌های کربنی^۳ (CNTs) و سهبعدی مانند الماس یا گرافیت، مشخصه‌های متمایزی دارند. گرافن، اولین ماده دوبعدی با کاف انرژی صفر و ماهیت نیمه‌فلزی است که الکترون‌ها در آن تحرک بالا و رسانایی استثنایی نشان داده‌اند. خواص منحصر به فرد آن به کاربرد گسترده این ماده در صنایع مختلف منجر و زمینه‌ساز دستیابی به سایر مواد دوبعدی شده است. در مواد دوبعدی، تمامی اتم‌های آن در معرض سطح قرار دارند که این ویژگی به افزایش قابل توجه واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی منجر می‌شود. خواص مواد دوبعدی مانند ناهمسانگردی، نسبت سطح به حجم بالا، شکل خاص و ویژگی‌های قابل تنظیم باعث شده گزینه‌های مؤثری در کاربردهای مختلفی مانند نوری، الکتریکی، زیستی و دارورسانی باشند. تاکنون، در مقالات مروری متعددی، مواد دوبعدی بررسی شده‌اند که در هریک از آن‌ها، فقط تعداد محدودی از این مواد معرفی و دسته‌بندی آن‌ها براساس نوع کاربرد، خواص یا روش سنتز انجام شده است [۱ و ۲]. در این مقاله، سعی شده است تمامی مواد دوبعدی به اجمال، معرفی و خواص و کاربردهای آن‌ها، بررسی شوند.

جداسازی گرافن، به صورت تک‌لایه، از گرافیت، نقطه آغاز کشف و توسعه پرشتاب این دسته از مواد بوده است. ابتدا، بنجامین کالینز^۴ [۳]، در سال ۱۸۵۹، به ساختار لایه‌ای حاصل از احیای حرارتی اکسید گرافیت دست یافت و در سال ۲۰۰۴، نووسلو^۵ و گایم^۶ و همکاران [۴]، جداسازی بلورهای با ضخامت یک اتم از گرافیت را انجام دادند که جایزه نوبل را به‌خاطر این کشف تأثیرگذار دریافت کردند. اگرچه حدود ۱۷ سال از شناسایی اولین ماده دوبعدی گذشته است، هنوز مطالعه این مواد، در علم و فناوری نانو، اهمیت ویژه‌ای دارد. در کنار گرافن، دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه، از مواد دوبعدی مهمی هستند که ماهیت نیمه‌هادی دارند. این مواد، بیشتر در ابزارهای نوری، الکتریکی و مانند این‌ها استفاده می‌شوند. دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه، در مقایسه با گرافن، تحرک‌پذیری الکتریکی بسیار کمتری دارند که این عامل، کاربرد آن‌ها را در ابزارهای الکتریکی محدود می‌کند. بنابراین، پژوهشگران به دنبال شناسایی موادی بودند که هر دو ویژگی تحرک‌پذیری و نسبت روشن/خاموش بالا را داشته باشد و در صنعت جدید، جایگزین سیلیکون شود. اگر بتوان با توجه به قانون مور^۷ که هر دو سال، تعداد ترانزیستورهای روی یک تراشه با مساحت ثابت، دو برابر می‌شود، ماده‌ای مناسب جایگزین سیلیکون کرد، تحولی بزرگ در صنعت نیمه‌هادی رخ می‌دهد. در سال ۲۰۱۴، گروه ژانگ [۵]، فسفر سیاه دوبعدی را شناسایی و ابزارهای ترانزیستور اثر میدان این ماده را

⁴ Benjamin Collins⁵ Novoselov⁶ Geim⁷ Moore¹ Graphene² Fullerene³ Carbon Nanotubes

دوبعدی رسی هستند که مشتمل بر رس‌های سیلیکاتی^{۲۱} و هیدروکسیدهای دولایه‌ای^{۲۲} (LDHs) هستند. در خصوص رس‌های سیلیکاتی، لاپونیت‌ها^{۲۳}، گسترده‌ترین انواع را در کاربردهای زیست‌پزشکی دارند. تقسیم‌بندی اولیه این مواد در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. تقسیم‌بندی مواد دوبعدی

مشخصه‌یابی کردند. نتایج نشان داد که فسفر سیاه دوبعدی، به‌علت تحرک‌پذیری و نسبت روشن/خاموش بالا، می‌تواند برای کاربرد در ترانزیستور مناسب باشد، اگرچه در هوا ناپایدارند. پژوهش‌های گسترده‌ای، به‌منظور جداسازی مواد دوبعدی دیگر، با توجه به ویژگی‌های غیرمعمول آن‌ها، انجام شده است که نشان می‌دهد هریک از آن‌ها، با توجه به ساختارشان، می‌توانند ویژگی و عملکرد بهتری (از حالت توده‌ای^۱) داشته باشند و در زمینه‌های متعددی به‌کار روند.

۱-۲- دسته‌بندی مواد دویعدی

مهم‌ترین دسته مواد دوبعدی که شامل نانومواد دوبعدی پایه کربنی هستند عبارت‌اند از گرافن، اکسید گرافن^۲ (GO)، اکسید گرافن احیاشده^۳ (RGO)، گرافین^۴، فلوئوروگرافن^۵، گرافاین^۶، گرافیدین^۷ (GYD) و گرافون^۸. دو ساختار دوبعدی که ساختار نسبتاً نزدیکی به دسته کربنی‌ها دارند، نیتريد بور هگزاگونال^۹ (hBN) و کربونیتريد گرافیتی (g-C₃N₄) هستند. مواد دوبعدی تک‌عنصری (X, Xenes) اشاره دارد به عناصر گروه ۱۴ و ۱۵)، مشتمل بر سیلیسین^{۱۰}، ژرمانن^{۱۱}، فسفر سیاه (BP) یا فسفرن^{۱۲}، آرسنن^{۱۳}، آنتیمون^{۱۴}، استانن^{۱۵}، بیسموتن^{۱۶} نیز، دسته مهمی از مواد دوبعدی را تشکیل می‌دهند. دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه^{۱۷} (TMDs) و اکسید فلزهای واسطه^{۱۸} (TMOs)، مکسن‌ها^{۱۹}، پروسکایت‌های دوبعدی^{۲۰} و فلزات دوبعدی نیز در این دسته قرار می‌گیرند. دسته آخر، مواد

۱-۳- کاربرد مواد دوبعدی

کمتر از سه بعد بودن نانوساختارها، ویژگی‌های متمایزی به آن‌ها می‌بخشد. به‌عنوان مثال، نانومواد دوبعدی، نازک‌ترین مواد شناخته‌شده هستند. در این مواد، به‌دلیل سطح ویژه بالا، بیشتر اتم‌ها در سطح قرار دارند. این ویژگی باعث می‌شود این مواد، در مواردی که نیاز به سطح ویژه بالا (نسبت سطح به حجم بالا) باشد، مانند کاربردهای زیستی، الکترونیکی و حسگری، به‌کار روند. مثلاً، نانومواد دوبعدی، در دارورسانی، برای جذب تعداد زیادی مولکول‌های دارویی و کنترل بیشتر سینتیک آزاد به‌کار می‌روند [۶]. ویژگی‌های مواد دوبعدی که به

¹ Bulk² Graphene Oxide³ Reduced Graphene Oxide

⁴ Graphane

⁵ Fluorographene⁶ Graphyne

⁷ Graphdiyne

⁸ Graphone

⁹ Hexagonal Boron Nitride¹⁰ Silicene¹¹ Germanene¹² Black Phosphorous or Phosphorene

13 Arsenene

¹⁴ Antimonene

¹⁵ Stanene¹⁶ Bismuthene¹⁷ Transition Metal Dichalcogenides¹⁸ Transition Metal Oxides

19 MXenes

20 2D Provsckites

²¹ Silicate Clays

22 Layered Double Hydroxides

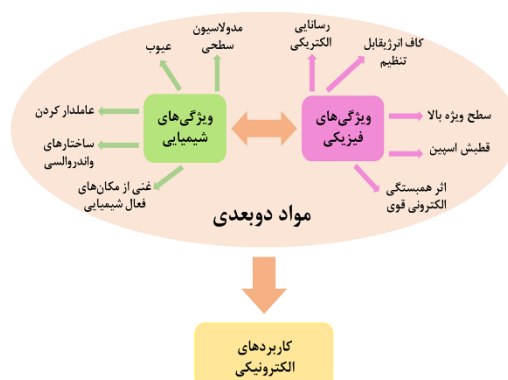
²³ Laponites

[۷]. کاربرد مواد دوبعدی، با توجه به نوع ساختار و ویژگی‌های آن‌ها، متفاوت است. در جدول ۱، کاربرد کلی مواد دوبعدی دسته‌بندی شده است که در ادامه، پس از معرفی، درباره هریک از این کاربردها مختصر توضیحی داده شده است.

جدول ۱. کاربرد مواد دوبعدی

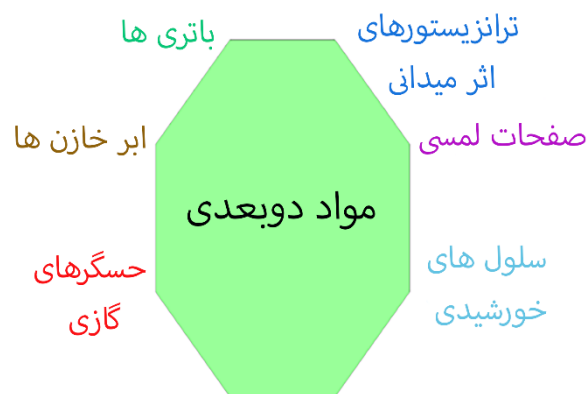
کاربرد	ماده دوبعدی
- عنصر پایه در آنتن - ترانزیستور اثر میدانی - باتری (به‌عنوان الکترود در باتری) - ابرخازن - جایگزین فیبرهای کربن - زیستی (نورگرمادرمانی، دارورسانی، تصویربرداری و ...)	گرافن
- انتقال گاز - تصفیه آب - مواد پاسخ‌گو به محرک	اکسید گرافن
- تصفیه آب - افزایش کارایی حسگر زیستی	اکسید گرافن احیاشده
- زیست‌پزشکی (داربست در مهندسی بافت) - باتری (جداکنده الکترود) - سلول خورشیدی (به‌عنوان الکترود شمارشگر)	فلوئوروگرافن
- مواد ذخیره‌کننده انرژی - مواد تبدیل‌کننده انرژی - مواد کاتالیزوری	گرافیدین
- پرکننده - ترانزیستور - حسگر - آب‌شیرین‌کن	گرافاین
- ترانزیستور - فروالکترونیک آلی - جذب‌کننده فیزیکی و مولکولی	گرافون
- ترانزیستور اثر میدانی - حسگر	دی‌کالکوژنید فلز واسطه

کاربرد وسیع این مواد در الکترونیک منجر شده، در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲. مشخصه‌های مواد دوبعدی که به کاربرد این مواد در حوزه مواد صنعت الکترونیک منجر شده است [۷]

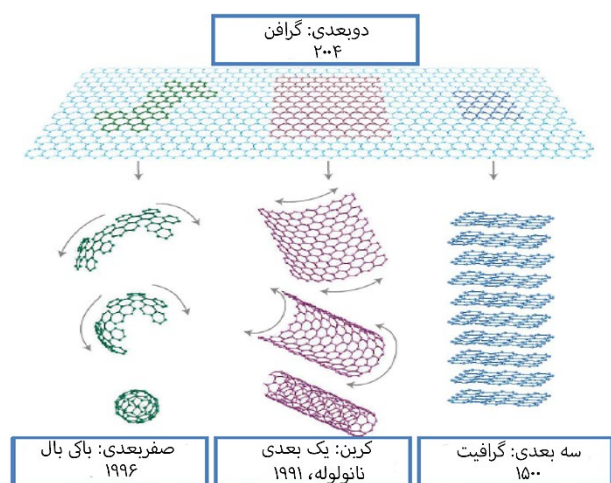
در شکل ۳، حوزه‌های کاربرد مواد دوبعدی در صنعت الکترونیک نشان داده شده است.



شکل ۳. کاربرد مواد دوبعدی در صنعت الکترونیک [۷]

از سوی دیگر، کاربرد مواد دوبعدی گازی، به‌عنوان حسگر، به شکلی گسترده بررسی شده است. عملکرد کلی این حسگرها، براساس انتقال بار الکتریکی بین گونه‌های شیمیایی توسط مواد جاذب بوده که در اینجا همان مواد دوبعدی است. از مزیت‌های برخی از مواد دوبعدی، مانند خانواده گرافن، کاف انرژی غیرصفر است. افزایش حساسیت و انتخاب‌پذیری حسگرهای گازی با تنظیم شیمی سطح، بدون تغییر خواص نوری و الکتریکی، یکی از مهم‌ترین مزایای عملیاتی این مواد است. با توجه به رسانایی بالا و نوز الکتریکی جانسون پایین، اصلاح غلظت حامل‌های القاشده در اثر تماس با گازها باعث تغییرات مهم در رسانایی الکتریکی یا مقاومت ویژه می‌شود

است. با اینکه نانولوله‌های کربنی از پیچیده شدن گرافن تشکیل شده‌اند، دارای ویژگی‌های استحکام مکانیکی و هدایت الکتریکی بسیار متفاوت هستند [۸].



شکل ۴. طرح‌واره انواع ساختارهای نانوکربن؛ گرافن، گرافیت سه‌بعدی، نانولوله کربنی یک‌بعدی و فولرن صفربعدی [۸]

۲-۱-۱-۱-۱-۲ ویژگی‌های گرافن

گرافن، ساختار بسیار مستحکمی دارد؛ دارای مدول یانگ بسیار بالای ۱ TPa، استحکام کششی ۱۳۰ GPa و استحکام شکست 42 N.M^{-1} برای یک لایه بدون عیب است [۹]. گرافن، دارای استحکام کششی بسیار بالاست، به‌طوری که ۲۰ درصد بیشتر از هر بلور دیگر قابلیت کشش الاستیک دارد [۱۰]. گرافن، در برابر شکست، مقاومت بالا (۱۲۵ GPa) [۱۱] و قابلیت خم‌شدن بسیار بالایی دارد و در کرنش‌های بالا می‌شکند [۱۰].

گرافن دارای خواص الکتریکی و نوری جذابی است. ساختار باند الکترونی آن، به‌عنوان پایه‌ای‌ترین مشخصه، عامل ایجادکننده سایر ویژگی‌های این ماده است. الکترون‌ها، با حرکت در صفحه لانه‌زنبوری گرافن، جرم مؤثر خود را از دست می‌دهند و به شبه‌ذراتی تبدیل می‌شوند که به‌جای معادله شرودینگر، از معادله دیراک تبعیت می‌کنند. گرافن، ضریب جذب نوری مستقل از طول موج دارد (۲/۳ درصد $\pi\alpha$). علاوه بر آن، وقتی انرژی نور کوچک‌تر از دو برابر سطح انرژی فرمی باشد، گرافن تک‌لایه و دولایه در مقابل امواج نور بسیار شفاف (۹۷/۷ درصد عبور) هستند. تحرک‌پذیری الکترون در دمای اتاق در گرافن بیش از $250000 \text{ Cm}^2/\text{Vs}$ و مقاومت

اکسید فلزات واسطه	• الکترونیک (ترانزیستور، به عنوان ممریستور ^۱ ، به عنوان خازن) • زیست‌پزشکی (دارورسانی و تصویربرداری)
پروسکایت	• کاربردهای انرژی (آشکارسازهای نوری، دیود نشر نوری، سلول خورشیدی و لیزر)
فسفرن	• جذب‌کننده فوتون در سلول خورشیدی • مدارهای انعطاف‌پذیر
مواد دوبعدی تک‌عنصری	• اپتوالکتریک، الکتروکاتالیست، ذخیره انرژی و درمان سرطان • باتری: آند برای ذخیره یون سدیم • لایه انتقال‌دهنده حفره در سلول خورشیدی
بیسموتن	• ذخیره انرژی به‌ویژه در باتری
کربونیتريد گرافیدی	• کاتالیست • حسگر
رس دوبعدی	• زیست‌پزشکی
نیتريد بور هگزاگونال	• زیرلایه دی‌الکتریک • زیست‌پزشکی (عکس‌برداری و حسگر زیستی)
مکسن	• تصفیه آب • باتری یون سدیم • حسگر

۲- انواع مواد دوبعدی

۱-۲- مواد دوبعدی بر پایه کربن

۱-۱-۲-۱-۲- گرافن

گرافن، ماده‌ای است دوبعدی که از لایه‌ای از اتم‌های کربن، به‌صورت حلقه‌های شش‌تایی، تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ساختار گرافن، سازنده سایر آلوتروپ‌های کربنی از جمله فولرن بدون بعد، نانولوله‌های کربنی^۲ (CNT) یک‌بعدی و گرافیت سه‌بعدی

^۱ Memristor

^۲ Carbon Nanotube

گرافن، از این مواد در تولید ترانزیستورهای اثر میدانی بر پایه گرافن استفاده می‌شود. کاف انرژی صفر گرافن، برای طراحی ترانزیستور، محدودیت ایجاد می‌کند که برای افزایش کاف انرژی، از آلاییدن الکترواستاتیک استفاده می‌شود [۲۵ و ۲۶].

باتری: گرافن، به علت انعطاف‌پذیری بالا، تحرک‌پذیری و هدایت حرارتی بالا، برای استفاده به عنوان الکترود در باتری، گزینه مناسبی است. چالش مهم، عدم چسبندگی یون‌ها به سطح گرافن است. یون‌های لیتیم می‌توانند با اضافه کردن یون‌های بور، به‌خوبی به آند گرافن بچسبند. بسیاری از شرکت‌های اتومبیل‌سازی، مانند هیوندای^۵ و کیاموتورز^۶، علاقه‌مندی خود را به استفاده از گرافن در باتری نشان داده‌اند [۲۶].

ابرخازن: ابرخازن، نوعی خازن است که ظرفیت بیشتری از انواع معمولی دارد. گرافن، به علت تحرک‌پذیری بالا و رسانایی گرمایی و الکتریکی بالا، در این کاربرد، نقش کلیدی دارد. ظرفیت نظری تک‌لایه گرافن، حدود $2 \mu\text{F.cm}^{-2}$ و با در نظر گرفتن کل سطح، معادل 550 F.g^{-1} خواهد بود [۲۷].

جایگزین فیبرهای کربن: یکی از کاربردهای گرافن، استفاده از آن‌ها به جای فیبرهای کربن در کامپوزیت‌هاست که باعث ایجاد کامپوزیت‌های سبک‌تر و مقاوم‌تر می‌شود. از این کامپوزیت‌ها در ساخت قطعات هواپیماها، ماهواره‌ها و خودروها استفاده می‌شود [۱۱].

کاربرد زیستی گرافن: در شکل ۵، کاربردهای زیستی گرافن ارائه شده است. ساختار مسطح دوبعدی گرافن، به بارگیری زیاد مولکول‌های زیستی و داروها منجر می‌شود و به علت توانایی درهم‌آمیختن رنگ‌های فلورسنت، امکان تصویربرداری پزشکی را ممکن می‌سازد. همچنین، جذب بالای مادون قرمز دارد که برای نورگرمادرمانی^۷ مناسب است. گرافن، از طریق برهم‌کنش با غشای سلولی، خاصیت ضدباکتری دارد. از گرافن برای اتصال و تکثیر سلول‌های بنیادی در مهندسی بافت نیز استفاده می‌شود [۲۸].

۲-۱-۲- اکسید گرافن

اکسید گرافن را می‌توان به عنوان ماده پیش‌ساز^۸ در سنتز

گرافن تک‌لایه ۳۰ اهم بر مربع مساحت سطح دوبعدی است که چگالی جریان الکتریکی آن میلیون‌ها برابر مس است [۱۰، ۱۲ و ۱۳]. با وجود رسانایی بسیار بالای گرافن، این رسانایی در چندلایه کاهش می‌یابد. گرافن چندلایه، خواص شبه‌فلزی دارد، به‌طوری که حتی طی پوشش‌دهی، در محدوده نیمه‌رسانا قرار می‌گیرد و با حضور ناخالصی‌ها و عیوب ساختار، حتی کمتر هم می‌شود [۱۶-۱۴]. نتایج پژوهشی درباره پوشش‌دهی گرافن چندلایه با روش لایه‌نشانی چرخشی، نشان داد که با کاهش سرعت و افزایش ضخامت لایه حاصل که همراه با افزایش اتصالات است، مقاومت این پوشش‌ها از 10^9 به 10^5 اهم کاهش می‌یابد [۱۷].

از دیگر ویژگی‌های منحصربه‌فرد گرافن، می‌توان به رسانایی گرمایی بسیار بالا (30 W.m.k^{-1}) [۱۸] و نفوذناپذیری آن در برابر تمام گازها [۱۹] اشاره کرد. ثابت شده است که گرافن باعث افزایش هدایت حرارتی مس نیز می‌شود، به‌طوری که کاربرد گرافن تک‌لایه در نانوکامپوزیت مس/گرافن، می‌تواند میزان هدایت حرارتی را به حدود $500 \text{ MW.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$ برساند [۱۱].

تاکنون، روش‌های مختلفی، برای سنتز گرافن، بررسی شده‌اند. این روش‌ها که برای دیگر مواد دوبعدی نیز استفاده می‌شوند، به دو دسته پایین به بالا و بالا به پایین تقسیم می‌شود. رشد هم‌بافته^۱، لایه‌نشانی شیمیایی از فاز بخار^۲ (CVD) و پیرولیز، در دسته اول دسته‌بندی می‌شوند [۸ و ۲۰] و لایه‌برداری مکانیکی یا شیمیایی، احیای اکسید گرافن، تورق لیزری در محیط مایع و گاز و خلأ و رسوب پالس لیزری^۳ (PLD)، در دسته دوم طبقه‌بندی می‌شوند [۱۷، ۲۳-۲۰].

۲-۱-۱- کاربرد گرافن

آنتن: از گرافن بسیار نازک، به عنوان عنصر پایه در طراحی آنتن (به‌طور خاص، آنتن شیاری یا آنتن پچ میکرو^۴)، استفاده می‌شود و تلفات آن، در مقایسه با آنتن فلزی، بسیار کمتر است و درعین حال، بازده تابشی مناسبی دارد [۲۴].

ترانزیستور: به دلیل تحرک‌پذیری بالای الکترون در

^۵ Hyundai

^۶ Kia Motors

^۷ Photothermal Therapy

^۸ Precursor

^۱ Epitaxy

^۲ Chemical Vapour Deposition

^۳ Pulsed Laser Deposition

^۴ Microstrip Patch Antenna

از معایب گروه‌های عاملی، ایجاد عیوب در ساختار، کاهش هدایت الکتریکی [۱] و کاهش تحرک‌پذیری حامل‌هاست [۳۰] و از جمله فواید آن، آب‌دوست شدن است که می‌توان، با روش‌هایی چون افشانش^۸ و چکاندن قطره^۹، فیلم نازک رسانا بر پایه اکسید گرافن ایجاد کرد که از آن به‌عنوان الکتروستفاده شود که در آخر، به کاهش هزینه الکتروستفاده منجر خواهد شد. آب‌دوست بودن اکسید گرافن به افزایش حلالیت آن می‌انجامد که در نتیجه می‌تواند گزینه مناسبی برای دارورسانی باشد [۱]، همچنین، می‌تواند ماده‌ای امیدوارکننده در کاربردهایی همچون ابزارهای الکترونیکی بر پایه گرافن، زیست‌حسگرها و حسگرهای الکتروشیمیایی باشد [۳۰]. اکسید گرافن، سطح ویژه بالا و ویژگی‌های مکانیکی مطلوبی دارد که برتر از نانولوله‌های کربنی است. برخی مطالعات نشان می‌دهد که اکسید گرافن می‌تواند مقاومت شکست مواد شکننده را بهبود بخشد [۳۱].

۲-۱-۲- کاربرد اکسید گرافن

انتقال گاز: از اکسید گرافن به‌عنوان پرکننده در نانوکامپوزیت‌های پلیمری استفاده می‌شود که می‌توان از آن‌ها، به‌عنوان مانع در برابر عبور گازها استفاده کرد. در واقع، پرکننده‌های دوبعدی می‌توانند در زمینه پلیمری جهت‌گیری کنند و راه پیچ‌درپیچ و سختی را برای عبور مولکول‌های گاز فراهم کنند. اکسید گرافن و اکسید گرافن احیاشده با جهت‌گیری، باعث ایجاد ساختار صدفی‌شکل می‌شوند که مزیت‌هایی همچون نسبت ابعادی بالا و عملکرد سطحی به‌وسیله گروه‌های اکسیژنی را در بر دارند [۳۲].

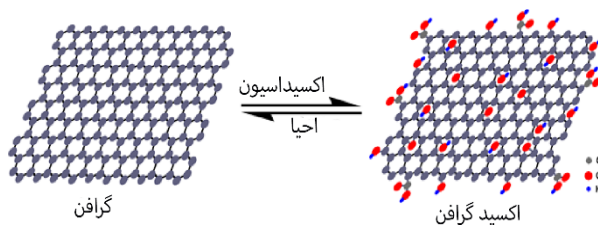
تصفیه آب: اکسید گرافن، به‌دلیل نفوذپذیری بالای آب، در تصفیه آب به‌کار می‌رود. این غشاها، در سال‌های اخیر، به‌دلیل نفوذپذیری بالا و سرعت تزریق بالا، پیشرفت زیادی داشته‌اند. غشای اکسید گرافن، در برخی جنبه‌های تصفیه آب، مانند آب‌شیرین‌سازی، با مشکلاتی روبه‌روست؛ زیرا فاصله بین صفحات اکسید گرافن، در شرایط خشک و هیدراته شدن، از ۷/۷۶ تا ۱۷/۶۳ آنگستروم متغیر است، درحالی‌که قطر یون‌های هیدراته شده و نمک‌های رایج از این مقدار کمتر است [۳۲].

گرافن درنظر گرفت. در واقع، گرافن می‌تواند از طریق فرایند کاهش شیمیایی یا حرارتی، از اکسید گرافن به‌دست آید. در شکل ۶، ساختار گرافن و اکسید گرافن نشان داده شده است. اکسید گرافن، تک‌لایه‌ای از اکسید گرافیت است که توسط روش شیمیایی با توزیع و لایه‌برداری در آب یا حلال آلی تولید می‌شود. در طول سال‌ها، مدل‌های ساختاری زیادی برای اکسید گرافن در نظر گرفته شده است که در تمامی آن‌ها، گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار، به شکل‌های مختلف، روی صفحه و لبه‌ها حضور دارند. انواع هیدروکسیل^۱ و اپوکسی^۲، به تعداد بیشتری روی سطح و گروه‌هایی شامل کربوکسی^۳، کربونیل^۴، فنول^۵، لاکتون^۶ و کوئینون^۷ به تعداد کمتری روی لبه صفحات، شناسایی شده‌اند [۲۹].



شکل ۵. کاربردهای زیستی گرافن در تصویربرداری زیستی،

مهندسی بافت، ژن‌درمانی، دارورسانی، نورگرمادرمانی، چاپ زیستی سه‌بعدی، مواد ضدباکتری و حسگر زیستی [۲۸]



شکل ۶. طرح‌واره ساختاری گرافن و اکسید گرافن [۲۹]

^۱ Hydroxyl

^۲ Epoxy

^۳ Carboxy

^۴ Carbonyl

^۵ Phenol

^۶ Lactone

^۷ Quinone

^۸ Spray

^۹ Drop Casting

آبراهام و همکاران [۳۳] توانستند با وارد کردن اپوکسی به ساختار اکسید گرافن، فاصله بین صفحات را تا محدوده ۶/۴ تا ۹/۸ آنگستروم کاهش دهند که باعث کاهش چشمگیر نرخ عبور نمک شدند.

مواد پاسخ‌گو به محرک (پاسخ‌گویی به رطوبت):

لایه‌های اکسید گرافن تمایل شدیدی به آب دارند و هنگام قرارگرفتن آب در بین لایه‌ها متورم می‌شوند. همچنین تهیه نانوکامپوزیت پلیمر/اکسید گرافن به بهبود خواص مکانیکی و پایداری ساختار در محیط مرطوب منجر می‌شود. هنگامی که لایه‌های آب‌دوست و با ضخامت مناسب در معرض آب قرار می‌گیرند، تورم نامتقارن و خمش در لایه‌ها رخ می‌دهد و به عملکرد برگشت‌پذیر آب‌گیری/آب‌دهی لایه‌ها می‌انجامد [۳۴].

۳-۱-۲- اکسید گرافن احیاشده

احیای اکسید گرافن، به دلیل تفاوت در ریخت‌شناسی و خواص الکتریکی و غیره، به سه روش حرارتی، شیمیایی و الکتروشیمیایی انجام می‌شود. با توجه به تجزیه گروه‌های اکسیژنی به گازهای CO و CO₂ در دمای بالا، احیای حرارتی یا آنیل‌شدن می‌تواند در دمای بالا به روش‌های مرسوم مثل میکروویو پودر اکسید گرافن یا جرقه^۱ لایه‌های اکسید گرافن توسط نور با شدت بالا انجام شود. در روش شیمیایی، از ترکیبات احیاکننده هیدرازین (N₂H₄)، هیدریدهای فلزی یا هیدروکالیک اسید در محلول اکسید گرافن استفاده می‌شود (شایان ذکر است که هیدرازین ترکیبی بسیار سمی است. این ترکیب و بخارات آن، برای سلامت انسان، مضر و خطرآفرین است. بنابراین، قبل از استفاده از هیدرازین حتماً در خصوص نکات ایمنی و نحوه استفاده از آن مطالعه و از تجهیزات مورد نیاز استفاده شود) [۳۵ و ۳۶]. اکسید گرافن احیاشده می‌تواند از طریق واکنش‌های کاتالیز نوری^۲ نیز سنتز شود؛ مانند احیای اکسید گرافن که با استفاده از نور فرابنفش در حضور کاتالیزور نوری^۳ TiO₂ صورت می‌گیرد [۳۷]. احیای الکتروشیمیایی به عناصر شیمیایی نیاز ندارد و توسط مبادله الکترون بین اکسید گرافن و الکتروود پیل‌های الکتروشیمیایی معمول انجام می‌شود

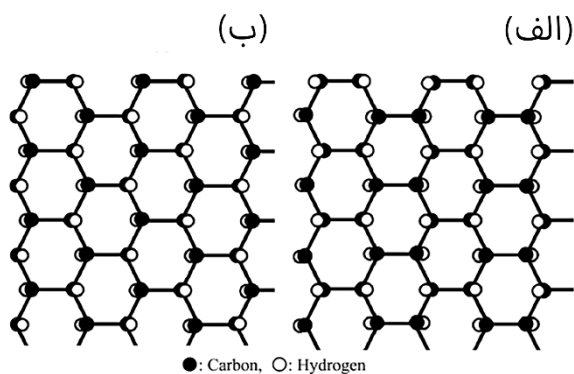
[۳۸].

۲-۱-۳- کاربرد اکسید گرافن احیاشده

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که اکسید گرافن احیاشده می‌تواند به‌عنوان ماده متخلخل، در نمک‌زدایی آب دریا و تصفیه آب به‌کار رود. در واقع، می‌تواند انواع آلودگی‌های آب مانند یون‌های فلزی، آنیون‌ها، میکروپلاستیک‌ها، نانوذرات و مواد شیمیایی آلی را حذف کند [۳۹]. همچنین، این مواد، به‌دلیل سطح ویژه بالا، انتقال راحت و سریع الکترون و جذب مولکول‌های زیستی، باعث افزایش کارایی حسگرهای زیستی مانند حسگرهای گلوکز می‌شوند [۴۰].

۲-۱-۴- گرافین

گرافین، پلیمری از کربن و هیدروژن با واحد فرمول (CH)_n است که n عدد بزرگی را نشان می‌دهد. گرافین، نوعی هیدروژنه‌شدن کامل (در هر دو طرف) گرافن است (شکل ۷). اتصال کربن گرافین، در پیکربندی sp³ رخ می‌دهد که با پیکربندی sp² گرافن متفاوت است. در نتیجه، گرافین، الگوریتمی دوبعدی از الماس مکعبی است [۴۱].



شکل ۷. ساختار گرافین: (الف) مدل قایق‌کی، (ب) مدل مبل [۴۲]

۲-۱-۴- کاربرد گرافین

گرافن ممکن است به‌عنوان گزینه مناسبی در آینده، جایگزین سیلیکون در ترانزیستور و الکترونیک شود. با وجود این، عیب اصلی گرافن در کاربردهای الکترونیکی، کاف انرژی صفر این نیمه‌رساناست. خوشبختانه، گرافن را می‌توان با قراردادن در معرض بخار اتم‌های هیدروژن، به‌آسانی

¹ Flash

² Photocatalysis Reaction

³ Photocatalyst

دارد که دلیل آن، برهم‌کنش ضعیف بین‌لایه‌ای، به دلیل دافعه الکترواستاتیک بین فلوئورهاست [۴۲].

مطالعه روند فلوئوردار شدن گرافن در فلوئور و

ترکیب گازهای فلوئور با هیدروژن: روند فلوئوردار شدن به ایجاد سطوح عیب‌دار ناشی از حفره‌های بزرگ در گرافن منجر می‌شود که علت آن، خمیدگی چشمگیر پیوندهای کربن-کربن است [۴۷]. حضور مقدار کمی هیدروژن در گاز فلوئور، به کاهش قابل توجه سرعت فلوئوردار کردن می‌انجامد. درحالی‌که در هیدروژن‌دار کردن گرافن، مقدار کمی گاز فلوئور به تسریع روند قرارگیری هیدروژن در گرافن منجر می‌شود. فلوئوروگرافن، در هر دو ناحیه فرابنفش و مرئی، تابناکی^۴ دارد [۴۲].

۲-۱-۵-۱- کاربرد فلوئوروگرافن

زیست‌پزشکی: فلوئوروگرافن، چسبندگی، تکثیر و قطبیت سلول‌های بنیادی مزانشیمی^۵ را افزایش می‌دهد، طوری که می‌تواند داربست مناسبی برای مهندسی بافت باشد [۴۸].
باتری: از فلوئوروگرافن می‌توان به عنوان جداکننده مؤثر الکتروود در باتری‌های لیتیم-گوگرد به منظور پیشگیری از مهاجرت پلی‌سولفیدها به آند لیتیم استفاده کرد [۴۸].

سلول خورشیدی: در فلوئوروگرافن، مکان‌های کاتالیزوری کاهش یخ، (فرایند مهمی که در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ رخ می‌دهد) افزایش می‌یابد. بنابراین، الکتروود فلوئوروگرافن، به عنوان الکتروود شمارشگر، در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ، عملکرد بهتری دارد [۴۸].

۲-۱-۶- گرافیدین

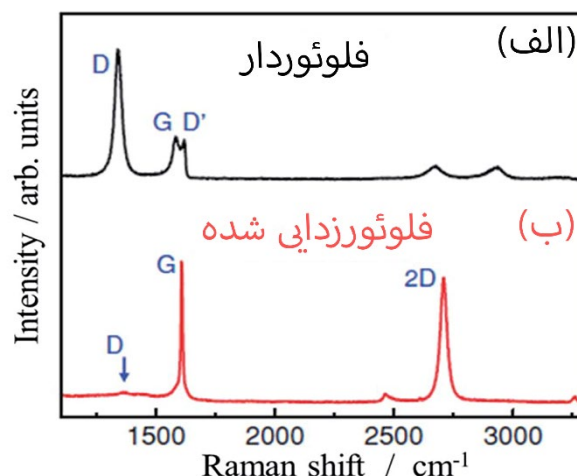
گرافیدین، یکی از مواد دوبعدی شامل اتم‌های کربن هیبریدشده با درجه بالایی از ترکیب Π است. طرح‌واره ساختاری گرافیدین در شکل ۹ نشان داده شده است. توزیع حفره‌های یکنواخت، از ویژگی‌های گرافیدین است. شبکه گرافین و گرافیدین را می‌توان هگزاگونال C_6 که توسط

هیدروژن‌دهی^۱ کرد و به گرافین تبدیل کرد. این فرایند، کاف انرژی بزرگی برابر چندین الکترون‌ولت در این ماده ایجاد می‌کند [۴۳].

۲-۱-۵- فلوئوروگرافن

فلوئوروگرافن، تک‌لایه‌ای از فلورید گرافیت با فرمول CF یا C_2F است. فلوئوروگرافن، با استفاده از XeF_2 [۴۴] یا CF_4 [۴۵]، در دمای اتاق، توسط لایه‌برداری مکانیکی یا شیمیایی از فلورید گرافیت سنتز می‌شود [۴۶]. کاف انرژی برای فلوئوروگرافن سنتز شده در حضور گاز XeF_2 که با حرارت‌دهی گرافن در دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس به دست آمده، $3/8$ الکترون‌ولت است، درحالی‌که با سنتز در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، عایقی باکیفیت با کاف انرژی ۳ الکترون‌ولت و مقاومت 10^{12} اهم پدید می‌آید [۴۴].

با توجه به طیف رامان ساختار گرافن فلوئوردار^۲ در شکل ۸ که با استفاده از قرارگرفتن آن در معرض پلاسمای CF_4 در دمای اتاق و گرافن فلوئورزدایی‌شده^۳ در دمای ۳۶۵ درجه سلسیوس در گاز $Ar+H_2$ آماده شده، تفاوت چشمگیری در باندهای D - و $2D$ - گرافن فلوئوردار و گرافن فلوئورزدایی‌شده مشاهده می‌شود [۴۵].



شکل ۸ طیف رامان: الف) گرافن فلوئوردار و ب) گرافن فلوئورزدایی‌شده [۴۵]

فلوئوروگرافن، در مقایسه با گرافن، اصطکاک کمتری

^۴ Luminescence

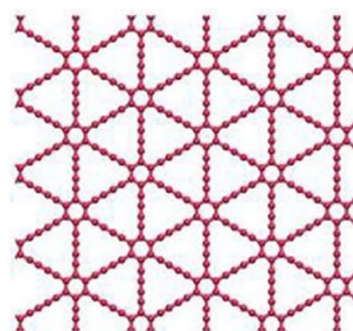
^۵ Mesenchymal

^۱ Hydrogenation

^۲ Fluorinated Graphene

^۳ De-Fluorinated

پل‌های استیلن در درون گرافن متصل شده، در نظر گرفت. خواص الکتریکی گرافیدن، در مقایسه با گرافن، قابل تغییر است. گرافیدن، در ذخیره انرژی، آند در باتری و در زمینه زیست‌پزشکی و غیره کاربرد دارد. گرافیدن می‌تواند به عنوان غشای دوبعدی ایده‌آل، برای جداسازی شیمیایی و ایزوتوپی هلیوم عمل کند. استفاده از غشای مبتنی بر گرافیدن، به عنوان غربالگری دوبعدی و کارآمد، در فناوری‌های خالص‌سازی و تصفیه آب، پیشنهاد شده است. البته تمامی کاربردهای آن در مقیاس آزمایشگاهی است [۴۹].



شکل ۹. طرح‌واره ساختاری گرافیدن [۵۰]

۲-۱-۶-۱- کاربرد گرافیدن

مواد به‌کاررفته در ذخیره انرژی: ساختار گرافیدن، به دلیل تعداد بی‌شمار حفره‌های مثلثی، مکان مناسبی برای ذخیره انرژی است و به انتقال الکترون و یون، سرعت می‌بخشد. باتری‌های یون لیتیم، با الکتروود بر پایه گرافیدن، عملکرد الکتروشیمیایی عالی‌ای (ظرفیت ۵۵۲ میلی‌آمپر ساعت بر گرم برای ۲۰۰ چرخه در چگالی جریان ۵۰ میلی‌آمپر بر گرم) را نشان دادند [۵۲].

مواد تبدیل‌کننده انرژی: گرافیدن، توانایی انتقال بار و نیمه‌رسانایی دارد. اثر گرافیدن، به عنوان دوپه^۶ در سلول خورشیدی پروسکایتی که پلی (۳-هگزایل تیوفن)^۷ (P3HT) به عنوان ماده انتقال‌دهنده حفره^۸ (HTM) در لایه فعال آن عمل می‌کند، بررسی شد. بازدهی تبدیل فوتون به جریان^۹ (IPCE) مبتنی بر P3HT/GDY در محدوده گسترده‌ای از طول موج (۵۳۰ تا ۷۵۰ نانومتر)، در مقایسه با ابزار مبتنی بر P3HT، افزایش چشمگیری یافت که دلیل آن، حضور گرافیدن در لایه مواد انتقال‌دهنده حفره است [۵۶].

مواد کاتالیزوری: گرافیدن می‌تواند برای لایه‌نشانی نانوذرات پالادیم (Pd)، از طریق واکنش مستقیم اکسایش-کاهش، بین گرافیدن و PCl_4^{2-} استفاده شود. نانوکامپوزیت گرافیدن-پالادیم، که از طریق اکسید گرافیدن و PCl_4^{2-} سنتز شده، عملکرد کاتالیزوری خوبی در ۴-نیتروفنول^{۱۰}

اجتماع خودبه‌خودی نانو ساختارهای تجمع‌یافته

گرافیدن: در سال ۲۰۱۰، گرافیدن، در مقیاسی بزرگ، با اتصال یکنواخت هگزااتیلن‌بنزن روی سطح فویل مسی و در حضور پیریدین^۱ سنتز شد [۵۱]. مس، هم به عنوان کاتالیزور و هم به عنوان ماده زمینه، در این فرایند عمل کرده است. لایه حاصل، انعطاف‌پذیر بوده و دارای ضخامت حدودی یک میکرومتر متشکل از گرافیدن چندلایه است. خاصیت نیمه‌رسانای آن، در مقایسه با سیلیکون، بسیار عالی است.

فیلم‌های گرافیدن، با ضخامت‌های مختلف، روی آرایه‌های نانومیله‌های ZnO، با استفاده از ترکیبی از فرایند رشد جامد-بخار-مایع^۲ (VLS)، احیا شده و با خودکاتالیزی^۳ سنتز شدند. فیلم‌های گرافیدن، تحرک‌پذیری اثر میدان بالایی $(100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1})$ نشان دادند [۵۲]. سایر ریخت‌شناسی‌های کشف‌شده گرافیدن، شامل نانولوله [۵۳]، نانودیوار [۵۴] و

^۵ Nanowire

^۶ Doped

^۷ Poly (3- Hexylthiophene)

^۸ Hole-Transporting Material

^۹ Photon-to-Current Conversion Efficiency

^{۱۰} 4-Nitrophenol

^۱ Pyridine

^۲ Vapor-Liquid-Solid

^۳ Self-Catalysis

^۴ Nanowall

گرافاین، اگرچه به شکلی قابل قبول سنتز نشده، می‌تواند کاربردهای موفقیت‌آمیزی داشته باشد که به اختصار در زیر ارائه می‌شود.

نانوپرکننده: گرافاین، به دلیل خواص مکانیکی خوب، ماده امیدوارکننده‌ای به عنوان پرکننده برای کامپوزیت‌هاست. پراکندگی ورقه‌های کوچک گرافاین در زمینه پلیمری، به افزایش استحکام و سختی منجر می‌شود. پیوند لبه‌های گرافاین، باعث چسبیدن مولکول‌های پرکننده به زمینه می‌شود که اثر پرکنندگی، به وسیله پیشگیری از جدایش ورقه گرافاین و زمینه افزایش می‌یابد. گرافاین، انرژی چسبندگی سطحی بالایی دارد که سازوکار ثانویه‌ای برای چسبیدن ورقه‌های گرافاین به زمینه را فراهم می‌کند، اگرچه، به دلیل رفتار ناهمسانگردی ورقه‌های گرافاین، اختلاط با زمینه، به جهت‌گیری اتفاقی ورقه‌ها و در نتیجه خاصیت ناهمسانگردی کامپوزیت منجر می‌شود. بنابراین، گرافاین می‌تواند جایگزین پرکننده‌هایی مانند الیاف کوچک گرافیت شود [۵۷ و ۶۱].

ترانزیستور: کاف انرژی گرافاین، با استفاده از ابزارهای مکانیکی قابل تنظیم است و به تولید آسان ترانزیستور با ویژگی‌های مختلف وابسته به کاف انرژی همچون نسبت خاموش-روشن می‌انجامد [۵۷].

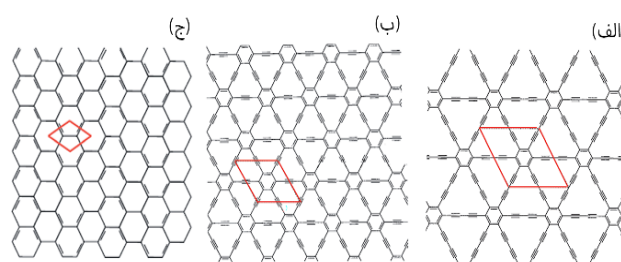
حسگرها: زوج‌شدگی^۲ گرافاین، اصلاحی مطلوب برای کاربرد در انواع ابزارهای نیمه‌رساناست که ناحیه کرنش کشسان بالایی نشان می‌دهد و به بازگشت آسان به شکل اولیه و کرنش مجدد بدون تغییر شکل دائمی منجر می‌شود. گرافاین، قادر به زوج‌شدگی الکترومکانیکی کشسان بوده و برای کاربردهای حسگر یا سنجش دما، مفید است [۵۷].

آب‌شیرین‌کن: بیشتر آب‌های کره زمین، آب‌نمک یا آب دریاست که ۹۷/۵ درصد از کل آب جهانی را تشکیل می‌دهد. آب‌شیرین‌کن، آب تمیزی از آب دریا تولید می‌کند و می‌تواند مشکل کمبود آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعت را حل کند. پیوندهای دوتایی و سه‌تایی در گرافاین، به ایجاد حفره در میان اتم‌های کربن منجر می‌شود. این مولکول‌ها به گونه‌ای هستند که می‌توانند مولکول‌های آب را از خود عبور دهند، اگرچه برای عبور یون‌های سدیم و کلر به اندازه کافی بزرگ نیستند؛ زیرا

(4-NP) از خود نشان می‌دهد. سرعت ثبت‌شده احیای 4-NP کاتالیزشده توسط پالادیم/اکسید گرافیدین، 0.321 min^{-1} است و در مقایسه با پالادیم/اکسید گرافن و و پالادیم/کربن، با مقادیری به ترتیب 0.029 min^{-1} ، و 0.058 بالاتر است [۵۴].

۲-۱-۷-۱-۲- گرافاین

گرافاین، یکی دیگر از آلوتروپ‌های کربن است. ساختار آن به صورت صفحه‌هایی به ضخامت یک اتم است که در آن اتم‌های کربن به صورت پیوندهایی با هیبریداسیون sp و sp^2 به هم متصل‌اند. گرافاین، شکل دیگری از گرافن است که در آن، حلقه‌های شش‌گوشه کربنی توسط اتصالات استیلنی به هم متصل شده‌اند [۵۷]. برای درک بهتر ساختار گرافاین، ساختار این ماده، به همراه ساختار گرافن و گرافیدین، در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۰. الف) ساختار گرافیدین، ب) ساختار گرافاین و ج) ساختار گرافن [۴۲]

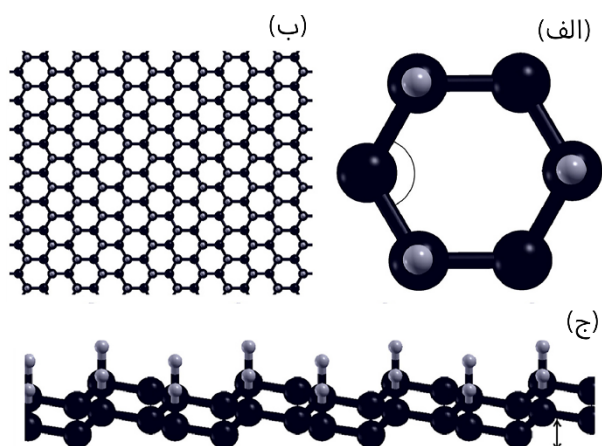
۲-۱-۷-۱-۲- ویژگی‌های گرافاین

نمونه‌های گرافاینی‌ای که تاکنون سنتز شده‌اند، نقطه ذوب ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه سلسیوس و واکنش‌پذیری کمی در واکنش‌های تجزیه با اکسیژن، گرما و نور نشان داده‌اند [۵۸]. طبق محاسبات، نانوروبان‌های^۱ گرافاین، نیمه‌هادی با محدوده کاف انرژی ۰/۵۹ تا ۱/۲۵ الکترون ولت هستند [۵۹]. خواص الکترونیکی گرافاین و کاف انرژی آن به کرنش مکانیکی پاسخ می‌دهد و با ایجاد کرنش، تغییر می‌کند. کرنش کششی به مقدار ۰/۱۵، کاف انرژی را ۱ الکترون ولت افزایش و کرنش فشاری به مقدار ۰/۱، آن را ۰/۳ الکترون ولت کاهش می‌دهد [۶۰].

۲-۱-۷-۱-۲- کاربردهای گرافاین

² Coupling

¹ Nanoribbons

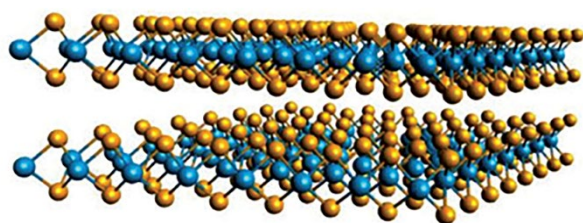


شکل ۱۱. طرح‌واره ساختار گرافون: الف) تصویر از بالا از نزدیک، (ب) تصویر کلی یک ورقه از بالا و (ج) تصویر از کنار [۵۷]

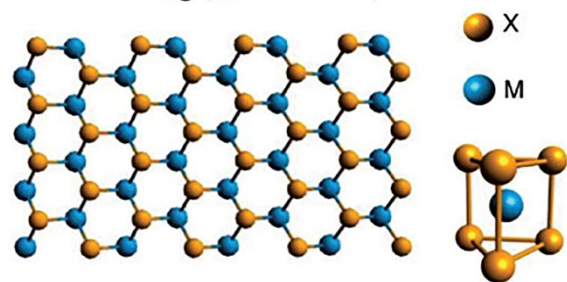
۲-۲- دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه (TMD)

تک‌لایه‌های دی‌کالکوژنید فلز واسطه (TMD)، نیمه‌رسانایی نازک از نوع MX_2 هستند که در آن، M، اتم فلز واسطه (W، Mo و ...) و X، اتم کالکوژن (S، Se یا Te) است، درحالی‌که یک لایه از اتم‌های M بین دو لایه از اتم‌های X قرار گرفته‌اند [۶۶]. شکل ۱۲، ساختار TMD را در حالت سه‌بعدی و دوبعدی نشان می‌دهد.

الف) ساختار لایه ای



ب) شبکه لانه زنبوری



شکل ۱۲. ساختار اتمی TMD: الف) طرح‌واره سه‌بعدی که نشان می‌دهد یک لایه از اتم‌های فلزات واسطه بین دو لایه از اتم‌های کالکوژنید ساندویچ شده‌اند و (ب) تصویر از بالای ساختار

لانه‌زنبوری [۶۷]

هنگام ورود آب، لایه‌ای از مولکول‌های آب را جذب می‌کند. در مطالعه‌ای مشخص شده است که گرافین می‌تواند صددردصد مانع ورود یون‌های Ca^{2+} ، K^+ ، Mg^{2+} ، Cl^- ، Na^+ و شود، درحالی‌که نفوذپذیری آب نیز بالا باشد [۵۷].

۲-۱-۸- گرافون

گرافون، همانند گرافین است با این تفاوت که دارای ۵۰ درصد هیدروژن و با فرمول C_2H است. برخلاف گرافین که هر کربن با هیدروژن پیوند دارد و این پیوند در هر دو طرف لایه‌ها وجود دارد، در گرافون، همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، هیدروژن‌ها در یک طرف لایه‌ها وجود دارند که در نتیجه، هیبریدشدگی^۱ مخلوط sp^2 و sp^3 در اتم‌های کربن رخ می‌دهد [۵۷ و ۶۲].

۲-۱-۸-۱- ویژگی‌های گرافون

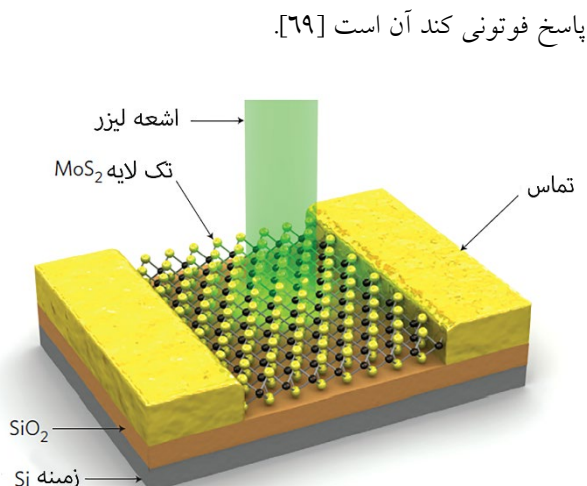
براساس شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، مشخص شد که ساختار گرافون، در دمای اتاق، پایدار است. همچنین، در شرایط پیوند نیمی از کربن‌ها با هیدروژن، یک پیوند σ قوی بین اتم‌های کربن و هیدروژن ایجاد می‌شود که نه تنها باعث ایجاد اختلال در پیوند π و خاصیت غیرمغناطیسی و فلزی می‌شود، بلکه باعث می‌شود جفت الکترون اتم کربن که با هیدروژن پیوند ندارد، جفت‌نشده باقی بماند. مشخص شد که حالت پایه، دارای خاصیت فرومغناطیس است [۵۷ و ۶۲].

۲-۱-۸-۲- کاربردهای گرافون

با وجود اینکه سنتز گرافون دشوار است و با سختی‌هایی روبه‌روست، ارزش دارد که درباره کاربردهای گرافون پژوهش‌های بیشتری انجام شود. از کاربردهای آن می‌توان به کاربرد در ترانزیستورها [۶۳]، فروالکترونیک آلی [۶۴] و جذب کننده فیزیکی مولکولی [۶۵] اشاره کرد. در بحث فروالکترونیک، وو و همکاران [۶۴]، با استفاده از شبیه‌سازی نظریه تابع چگالی^۲ (DFT)، نشان دادند که مولکول، با جایگزین کردن هیدروژن گرافون با گروه‌های OH، خاصیت فروالکترونیک و قطبش خودبه‌خودی $43/7 \mu C/cm^2$ پیدا می‌کند.

^۱ Hybridization

^۲ Density Functional Theory



شکل ۱۳. طرح‌واره بخشی از آشکارسازهای فوق‌حساس بر پایه تک‌لایه MoS₂ [۶۹]

در بحث ویژگی‌های مکانیکی، مدول یانگ ورقه‌های لایه‌برداری‌شده تک‌لایه بدون عیب MoS₂، برابر با ۲۷۰ گیگاپاسکال با بیشینه کرنش ۱۰ درصد قبل از شکست است [۷۰].

در همان پژوهش، گزارش شد که مدول یانگ MoS₂ دولایه که به‌صورت مکانیکی لایه‌برداری شده، کمتر از ۲۰۰ گیگاپاسکال است که به‌علت لغزش بین لایه‌ای و عیوب تک‌لایه است. با افزایش ضخامت پوسته، استحکام خمیدگی پوسته، نقش مهمی ایفا می‌کند و می‌توان دریافت که مدول یانگ چندلایه، با تعداد ۵ تا ۲۵ لایه در ورقه‌های MoS₂ که به‌طور مکانیکی پوسته‌پوسته شده، ۳۳۰ گیگاپاسکال است [۷۱].

بیشتر روش‌های سنتز این ماده دوبعدی، همانند سایر مواد دوبعدی، شامل لایه‌برداری مکانیکی، لایه‌برداری در فاز مایع با کمک انرژی صوتی، لایه‌نشانی شیمیایی از فاز بخار در حضور و عدم‌حضور جوانه‌زاست [۷۲ و ۷۳]. پارامترهای مؤثر بر رشد در روش CVD به‌عنوان پرکاربردترین روش، به‌صورت جامع در کاربردهای مختلف بررسی شده‌اند. مشخص شده است که تأثیرگذارترین پارامترها در این فرایند، جذب اکسیدها روی زیرلایه و وابستگی آن به دما، گوگرددار شدن^۳ وابسته به نرخ و فشار نسبی گاز گوگرد و زمان رشد به‌عنوان پارامتر حیاتی برای مقدار بهینه گوگرددار شدن است [۷۴].

بلور توده TMD، از تک‌لایه‌هایی تشکیل شده است که با نیروی جاذبه و اندروالس نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. تک‌لایه‌های TMD دارای ویژگی‌هایی هستند که آن‌ها را از گرافن نیمه‌فلزی متمایز می‌کند. در واقع، تک‌لایه‌های TMD، WS₂، MoSe₂، WSe₂ و MoTe₂، کاف انرژی مستقیم دارند و می‌توانند در الکترونیک به‌عنوان ترانزیستور و در اپتیک به‌عنوان آشکارساز استفاده شوند [۶۸].

۲-۲-۱- ویژگی‌های دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه

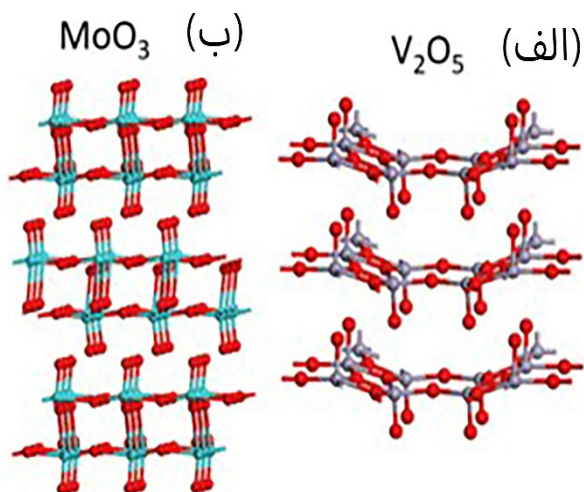
نیمه‌رساناها، در صورتی که کمینه انرژی باند هدایت آن‌ها در موقعیت فضای k^1 برابر با بیشینه باند ظرفیت باشد (یعنی دارای کاف انرژی مستقیم باشند)، معمولاً مؤلفه‌های کارآمدی هستند. کاف نواری MoS₂ توده‌ای، غیرمستقیم است، درحالی‌که در تک‌لایه، مستقیم و برابر ۱/۸ الکترون ولت می‌شود که آن‌ها را به‌دلیل ضریب جذب بالا، مناسب کاربرد ادوات الکتریکی-نوری می‌سازد [۶۹]. از لایه‌های اتمی MoS₂، به‌عنوان ترانزیستور نوری^۲ و آشکارسازهای فوق‌حساس استفاده شده است. فوتوترانزیستورها، ابزارهای مهمی هستند. طرح‌واره بخشی از آشکارسازهای فوق‌حساس بر پایه MoS₂ تک‌لایه، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. تک‌لایه MoS₂ پاسخ فوتونی ۷/۵ میلی‌آمپر بر وات را مشابه ابزارهای گرافن (۶/۱ میلی‌آمپر بر وات) نشان داده است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که در MoS₂ چندلایه، پاسخ فوتونی بالاتر، در حدود ۱۰۰ میلی‌آمپر بر وات و مشابه ابزارهای سیلیکونی است. ایجاد پوشش رسانای طلا در لبه‌های یک تک‌لایه اجازه می‌دهد تا یک آشکارساز فوق‌حساس ساخته شود. پاسخ فوتونی چنین آشکارسازی به مقدار ۸۸۰ آمپر بر وات می‌رسد و ۱۰^۶ برابر بیشتر از اولین آشکارساز گرافنی است. این حد بالای کنترل الکترواستاتیک ناشی از ناحیه نازک و فعال تک‌لایه است. واقعیت این است که این ماده تنها یک ناحیه نیمه‌رسانا دارد، درحالی‌که نسل فعلی دستگاه‌های آشکارساز نوری معمولاً یک پیوند p-n است و کاربردهای صنعتی مانند حساسیت بالا و آشکارسازهای نوری انعطاف‌پذیر را امکان‌پذیر می‌سازد. تنها محدودیتی که برای ابزارهای موجود وجود دارد، دینامیک

¹ k-Space

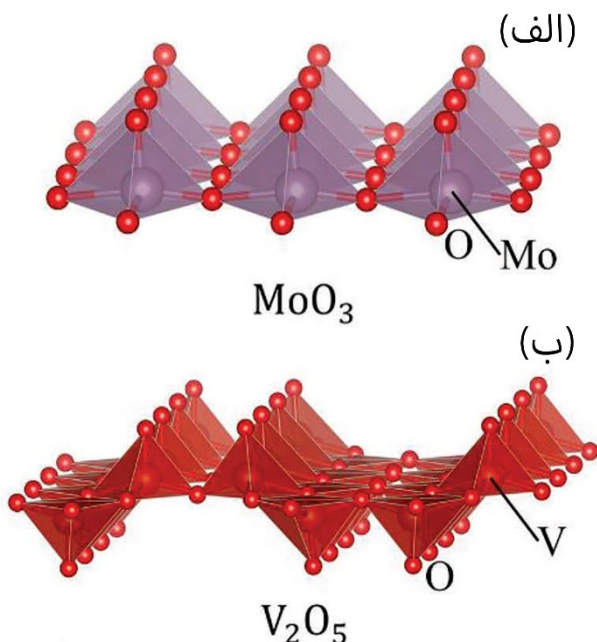
² Phototransistor

³ Sulfurization

در کنار تنوع ساختاری فراوان هستند که آن‌ها را به موادی با قابلیت بالا و مناسب برای کاربردهای نوری، الکترونیکی، حسگرها، باتری‌ها، سلول‌های خورشیدی، ابررساناها، ابرخازن‌ها، کاتالیزورها و پیزوالکتریک‌ها تبدیل کرده است [۷۷-۸۰].



شکل ۱۴. طرح‌واره ساختاری الف) V_2O_5 و ب) MoO_3 [۷۷]



شکل ۱۵. طرح‌واره ساختاری الف) MoO_3 و ب) V_2O_5 [۷۹]

پروسکایت‌های اکسیدی، دسته دیگری از مواد اکسیدی با فرمول کلی ABO_3 هستند که در آن، کاتیون B با شش آنیون محاصره شده است و تشکیل هشت‌وجهی‌های BX_6 می‌دهند

۲-۲-۲- کاربرد دی‌کالکوزنیدهای فلزات واسطه

ترانزیستور اثر میدانی: تاکنون ترانزیستورهای اثر میدانی بر پایه WS_2 ، $MoSe_2$ ، MoS_2 و WSe_2 ساخته شده‌اند که علت آن تحرک‌پذیری الکترون و کاف انرژی مستقیم در آن است. همچنین، ساختار نازک دی‌کالکوزنیدها باعث شده است که این مواد، گزینه مناسبی برای استفاده در ابزارهای الکترونیکی نازک و انعطاف‌پذیر باشند [۷۵].

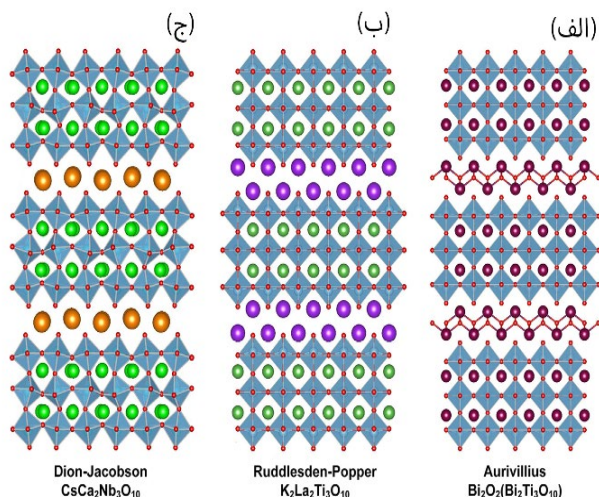
حسگر: دی‌کالکوزنیدها می‌توانند به‌عنوان حسگر اتمی نازک، جایگزین گرافن شوند. این حسگرها می‌توانند گازها، مایعات و مواد زیست‌پزشکی، مانند پروتئین یا دی.ان.ای را تشخیص دهند. اغلب این حسگرها بر پایه ترانزیستورهای اثر میدان هستند. در واقع، ترانزیستورهای اثر میدانی بر پایه زیست‌حسگرها، وابسته به گیرنده‌هایی هستند که به تک‌لایه دی‌کالکوزنید متصل‌اند. زمانی که مولکول‌های هدف به گیرنده متصل می‌شوند، در جریان عبوری از ترانزیستور تأثیر می‌گذارند [۷۶].

۳-۲- اکسید فلزات واسطه (TMO)

از انواع TMO می‌توان به MoO_3 ، WO_3 و Ga_2O_3 اشاره کرد. طرح‌واره ساختاری V_2O_5 و MoO_3 در شکل ۱۴ ارائه شده است. در واقع، می‌توان گفت که ساختار آن‌ها حاوی چندوجهی‌هایی است که گوشه‌های خود را به‌اشتراک می‌گذارند (شکل ۱۵). ترکیبات TMO، به‌صورت طبیعی به‌شکل بلورهای لایه‌ای هیدراته و غیرهیدراته یافت می‌شوند. این اکسیدها را می‌توان با استفاده از روش فاز گاز یا مایع، لایه‌برداری کرد و به نانولایه‌ای با ضخامت یک یا دولایه، با سطوح منتهی‌شده به اکسیژن رسید که در آب و هوا پایدارند. بسته به سلول واحد TMO، این مواد حاوی یک یا دولایه اصلی هستند که می‌توان ضخامت آن‌ها را به این تعداد لایه، در نازک‌ترین شکل و ساختار سطحی پایدار، کاهش داد. بسیاری دیگر از اکسیدهای واسطه مانند اکسید تیتانیوم یا اکسید روی، به‌صورت طبیعی، دارای بلورهایی به شکل لایه‌ای نیستند. در این موارد می‌توان با روش لایه‌برداری یا به‌وسیله لایه‌نشانی لایه‌به‌لایه متناوب، نانولایه‌های نازک را سنتز کرد [۷۷].

این مواد دارای خواص فیزیکی و شیمیایی چشمگیری

در ترکیبات TMOs با استوکیومتری متفاوت، کاتیون‌های فلزی می‌توانند بار و حالت اکسایش متفاوتی را نشان دهند که باعث بروز مشخصه‌های الکترونیکی متنوع، از فلزی تا نیمه‌رسانایی با کاف انرژی بالا و نارسانایی شوند.



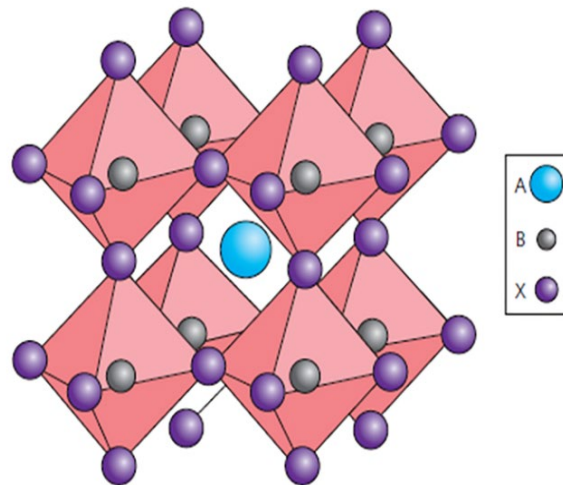
شکل ۱۷. طرح‌واره هر سه نوع پروسکایت دوبعدی اکسیدی (الف) اریویلیوس، (ب) رادلسدن-پاپر و (ج) دیون-جیکوبسون [۷۷]

قرارگرفتن اکسیدها بین فلزها و عایق‌ها، مانند آزمایش‌های انجام‌شده روی CoO_2 [۸۳] و کوپرات‌های لایه‌ای [۸۴]، غالباً به‌عنوان ترکیبات TMO شبه‌دوبعدی در نظر گرفته می‌شوند. این مواد، به‌دلیل حرکت آزادانه و انتقال الکترون داخل لایه‌های اکسیدی که به‌طور ضعیفی جفت شده‌اند، ممکن است ویژگی‌های ابررسانایی از خود نشان دهند. برای پایداری TMO شبه‌دوبعدی و همین‌طور آلایدن آن‌ها، از یون‌های لایه‌ای مانند لانتانیم و باریم استفاده می‌شود.

۲-۳-۱- کاربرد ترکیبات TMO صفحه‌ای

الکترونیک: مواد نیمه‌رسانا، برای ایجاد ترانزیستور اثر میدانی^۵ (FET) به‌عنوان گیت عایق، حافظه و اجزای ذخیره‌کننده انرژی کاربرد دارند. همچنین، مواد فروالکتریک عالی هستند و پسماند^۶ قوی نشان می‌دهند که به آن‌ها اجازه می‌دهد مانند ممریستور عمل کنند که به‌علت خواص ذاتی اکسیدها، خاصیت ابررسانایی از خود نشان می‌دهند و در

که گوشه‌های خود را در سه بعد به اشتراک می‌گذارند و کاتیون A میان آن‌ها قرار می‌گیرند و بار ساختار را خنثی می‌کنند (شکل ۱۶).



شکل ۱۶. ساختار بلوری کلی پروسکایت‌ها [۸۱]

پروسکایت‌های دوبعدی اکسیدی شامل لایه‌های ABO_3 هستند که توسط لایه نازکی از اتم‌ها جدا می‌شوند [۷۷]. پروسکایت‌های دوبعدی یا لایه‌ای به سه نوع رادلسدن-پاپر^۱ (RP)، دیون-جیکوبسون^۲ (DJ) و اریویلیوس^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. فرمول عمومی اریویلیوس عبارت است از $[\text{Bi}_2\text{O}_2] \cdot [\text{A}_{(n-1)}\text{B}_n\text{O}_{3n+1}]$ که در آن، لایه جداکننده، نمک Bi_2O_2 است. دسته دیون-جیکوبسون دارای فرمول عمومی $\text{MA}_{(n-1)}\text{B}_n\text{O}_{(3n+1)}$ است. لایه جداکننده در این شبکه (M)، لایه‌ای از فلزات قلیایی یا لانتانیدهاست. در فاز رادلسدن-پاپر، لایه جداکننده می‌تواند یون‌های فلزی باشد که بین لایه‌های تکرارشونده شبکه ABO_3 قرار می‌گیرد (شکل ۱۷) [۷۷].

خواص ویژه این ترکیبات، مانند فرومغناطیسی، فروالکتریک و پایداری گرمای بالا، به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد اکسیژن است. یون اکسیژن به‌شدت قطبش‌پذیر است که باعث می‌شود ترکیبات TMO با بار زیاد، غیرخطی و ناهمگن، در داخل شبکه باشند و حالت‌های انرژی ویژه‌ای نزدیک یا روی صفحات لایه‌ای ایجاد شوند که کاملاً با حالت سه‌بعدی و توده‌ای متفاوت است [۸۲].

^۴ Cuprate

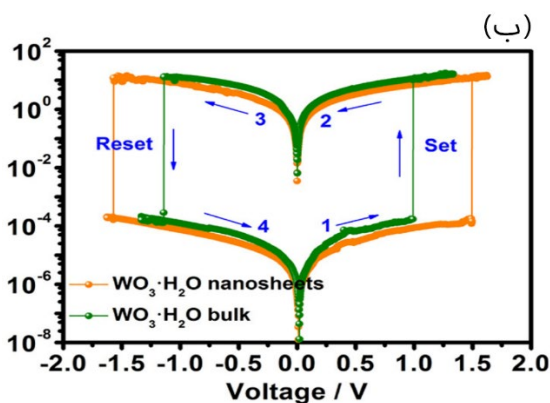
^۵ Field Effect Transistor

^۶ Hysteresis

^۱ Ruddlesden-Popper

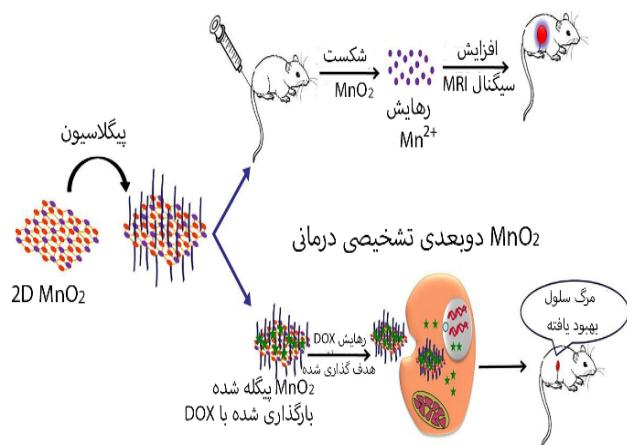
^۲ Dion-Jacobson

^۳ Aurivillius



شکل ۱۸. الف) منحنی ولتاژ-جریان $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ در حالت توده‌ای و نانولایه‌ای به ترتیب، بعد از ۱۰۰ و ۲۰۰۰ بار آزمایش خمش، ب) منحنی ولتاژ-جریان $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ در حالت توده‌ای و نانولایه‌ای دوبعدی ابزارهای حافظه‌ای مقاوم [۸۵]

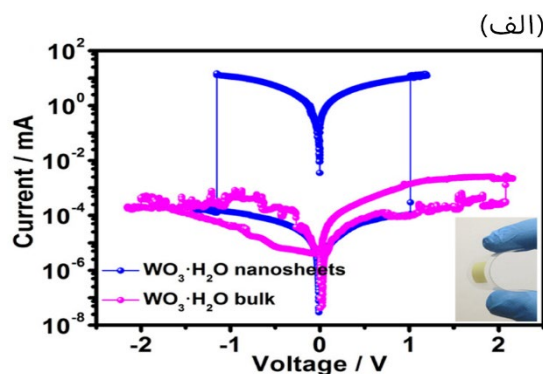
زیست‌پزشکی: MnO_2 . پایداری سطح پیگلاسیون^۲ را بهبود می‌بخشد. ثابت شده است که MnO_2 پیگله‌شده، عملکردی دوگانه دارد. این نانولایه‌ها، هنگامی که با دوکسوروبیسین^۳ (Dox) به منظور دارورسانی بارگیری می‌شوند، ظرفیت بارگیری دارویی بیشتری از خود نشان می‌دهند. سامانه MnO_2 -Dox پیگله‌شده، ۵۰/۶ درصد مرگ سلولی دارد، درحالی‌که Dox آزاد، ۲۶/۵ درصد مرگ سلولی دارد. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشخص است، سامانه PEG-MnO_2 در MRI، در اثر فروپاشی نانولایه‌های MnO_2 آزاد شدن یون Mn(II) ، افزایش سیگنال را نشان داده است [۱].



شکل ۱۹. عملکرد PEG-MnO_2 با لایه‌های MnO_2 برای کاربردهای درمانی، دارورسانی و تصویربرداری. بهبود ظرفیت بارگیری به بهبود مرگ سلولی هدفمند منجر شده است [۱].

ذخیره‌سازی انرژی، به‌عنوان خازن صفحه‌ای (ابرخازن‌های خاص) و باتری‌ها استفاده می‌شوند [۷۷].

تغییر مقاومت: پدیده تغییر مقاومت، اغلب برای تغییر پایه آنیونی در اکسیدهای ساده و پروسکایت‌ها ثابت شده است. ممریستورها با استفاده از اکسیدهایی مانند MnO_2 و ZnO ساخته شده‌اند. خواص فروالکتریک ترکیبات TMO، مزایای ویژه‌ای را در ساخت ممریستورها به همراه دارد. در این ساختارها، برگشت قطبیده^۱ در مواد فروالکتریک توسط تغییر میدان الکتریکی، انتقال مرز و در نتیجه مقاومت وسیله، القا می‌شود. در این صورت، عملکرد حافظه تغییرپذیر دارای ویژگی‌هایی نظیر ولتاژ اعمالی کم، مقاومت نسبت روشن/خاموش شدن بالا، زمان برگشت طولانی و تحمل بالاست. بسیاری از این ویژگی‌ها در خصوص هیدرات دوبعدی WO_3 ثابت شده است، به‌طوری که آب‌پوشی و کمبود اکسیژن کافی، مهاجرت آنیون‌ها را افزایش می‌دهد. شکل ۱۸، منحنی ولتاژ-جریان (I-V) ترکیب $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ را در حالت توده‌ای و نانولایه‌ای نشان می‌دهد که به ترتیب، تحت ۱۰۰ و ۲۰۰۰ بار آزمایش خمش قرار گرفته است. افزایش و کاهش ناگهانی جریان، به ترتیب، بیانگر روشن و خاموش شدن است. نسبت روشن/خاموش بسیار بالا (10^5) در ابزارهای مبتنی بر نانولایه‌های دوبعدی حاصل شده است. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، منحنی I-V و نسبت روشن/خاموش، بعد از ۲۰۰۰ بار آزمایش خمش، در حالت نانولایه‌ای، تغییری نکرده است، درحالی‌که در حالت توده‌ای، بعد از ۱۰۰ دفعه آزمایش خمش، تغییر چشمگیری داشته است. بنابراین، در کاربردهای الکتریکی که باید انعطاف‌پذیری بالایی وجود داشته باشد، این مواد، ابزارهای مناسبی هستند [۷۷ و ۸۵].



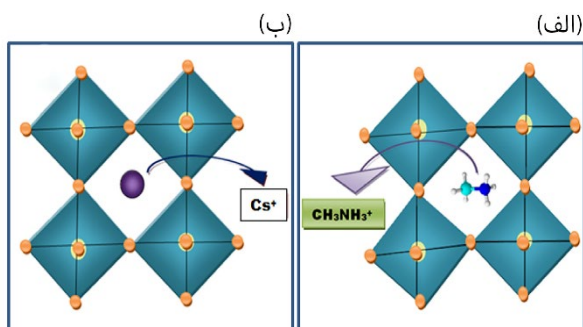
الف)

² PEGylation

³ Doxorubicin

¹ Polarized

۲-۴- پروسکایت‌های دوبعدی هالیدی



شکل ۲۰. دو نوع پروسکایت هالیدی: (الف) دسته آلی-معدنی یا

هیبریدی و (ب) دسته معدنی [۹۲]

با وجود خواص جذاب پروسکایت هالیدی، این مواد در برابر گرما، رطوبت و هوای آزاد ناپایدارند که باعث تجزیه و تخریب آن‌ها می‌شود. گزینه جایگزین، استفاده از پروسکایت‌های دوبعدی با کاتیون‌های آلی بزرگ است [۹۵-۹۳].

به دلیل قابلیت تنظیم ساختار و سازگاری بالای این مواد، انواع مختلفی از خانواده پروسکایت‌ها با ابعاد کم در ساختار اتمی وجود دارند. بدین معنی که می‌توان از ساختار سه‌بعدی اصلی پروسکایت‌ها که شامل هشت‌وجهی‌هایی هستند که در سه بعد، گوشه‌های خود را به‌اشتراک گذاشته‌اند، به پروسکایت‌های دوبعدی یا لایه‌ای که لایه‌ای از هشت‌وجهی‌ها هستند، پروسکایت‌های یک‌بعدی که شامل زنجیره‌هایی از هشت‌وجهی‌ها هستند و پروسکایت‌های صفربعدی که هشت‌وجهی‌های مجزا و تک هستند، رسید. پروسکایت‌های کم‌بعد، برخلاف پروسکایت‌های سه‌بعدی، به دلیل سازگاری با طیف گسترده‌ای از کاتیون‌های آلی با اندازه و گروه‌های عاملی متنوع، طیف وسیعی از مواد با ترکیب و خواص متنوع را دربرمی‌گیرند [۹۰ و ۹۶].

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه پروسکایت‌های کم‌بعد و توجه بسیاری که به این پروسکایت‌ها شده است، همچنان لفظ پروسکایت‌های کم‌بعد در سطح اتمی و مولکولی و پروسکایت‌های کم‌بعد از نگاه ریخت‌شناسی^۴، در بعضی موارد، اشتباه گرفته یا به جای هم به کار برده می‌شوند. پروسکایت‌های با ریخت‌شناسی کم‌بعد، شامل نانوصفحه‌های دوبعدی، نانومیل‌ها و نانوسیم‌های یک‌بعدی و نقاط کوانتومی

تاریخچه پروسکایت به سال ۱۸۳۰ برمی‌گردد وقتی اولین بار تیتانات کلسیم^۱ (CaTiO₃) توسط گوستاو رز^۲ کشف شد که به افتخار بلورشناس روسی پروسکی^۳، به نام «پروسکایت» نام‌گذاری شد. بعد از آن، تعریف مواد پروسکایتی، به تمام ترکیبات با ساختار مشابه تیتانات کلسیم، گسترش یافت. جدیداً، پروسکایت‌های بر پایه هالیدهای فلزی، به دلیل خواص فوق‌العاده الکتریکی و نوری، توجه زیادی را به‌خود جلب کرده‌اند. فناوری‌های انرژی خورشیدی از میان انرژی‌های تجدیدپذیر، به دلیل دسترسی تابش خورشید در بیشتر نقاط کره زمین، بیشترین توجه را به‌خود جلب کرده‌اند [۸۶]. از کاربردهای مهم این پروسکایت‌ها می‌توان به سلول‌های خورشیدی اشاره کرد [۸۷]. سلول‌های خورشیدی، در کاربردهای فضایی یا برای تولید نیرو، استفاده می‌شوند [۸۸]. درکل، پروسکایت‌ها، در کاربردهای وسیعی همچون دیودهای نشر نوری، آشکارسازها، لیزر و غیره استفاده می‌شوند [۸۷].

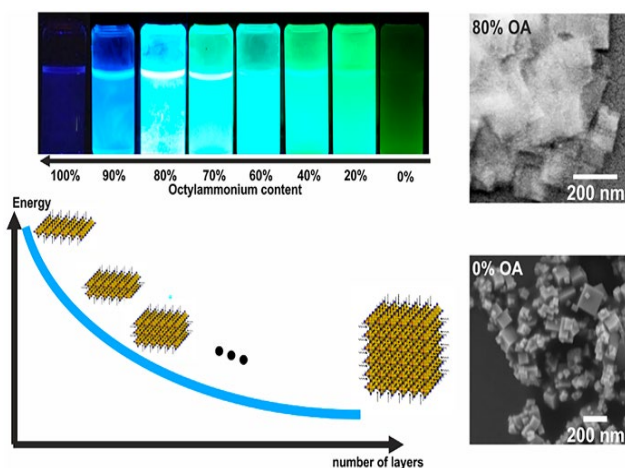
فرمول شیمیایی پروسکایت‌های هالیدی، مانند بقیه انواع پروسکایت‌ها ABX₃ است که A، کاتیون تک‌ظرفیتی، مانند کاتیون‌های آلی متیل آمونیوم (MA⁺)، فرم آمیدینیوم (FA⁺) یا کاتیون‌های عنصری، مانند سزیم (Cs⁺) یا روبیدیوم (Rb⁺) است، درحالی‌که کاتیون B، معمولاً سرب (Pb²⁺)، قلع (Sn²⁺) و ژرمانیوم (Ge²⁺) است یا در موارد دیگر، بسیاری از کاتیون‌های دیگر از جمله قلیایی‌های خاکی، مانند (Ca²⁺) و فلزات واسطه، مانند (Au²⁺) و (Cu²⁺) و آنیون X، هالوژن‌ها هستند [۸۹ و ۹۰]. همان‌طور که گفته شد، در این فرمول، کاتیون B، با شش آنیون محاصره می‌شود و تشکیل هشت‌وجهی‌های BX₆ را می‌دهند که گوشه‌های خود را در سه بعد به‌اشتراک گذاشته‌اند، درحالی‌که کاتیون A، میان آن‌ها قرار می‌گیرد (شکل ۱۶) [۹۱]. دو دسته پروسکایت‌های هالیدی، شامل پروسکایت‌های غیرآلی یا معدنی و پروسکایت‌های آلی-معدنی یا هیبریدی است. با قراردادن یک کاتیون آلی به جای کاتیون عنصری A، نوع هیبریدی به‌دست می‌آید (شکل ۲۰) [۹۲].

¹ Calcium Titanate

² Gustav Rose

³ Perovski

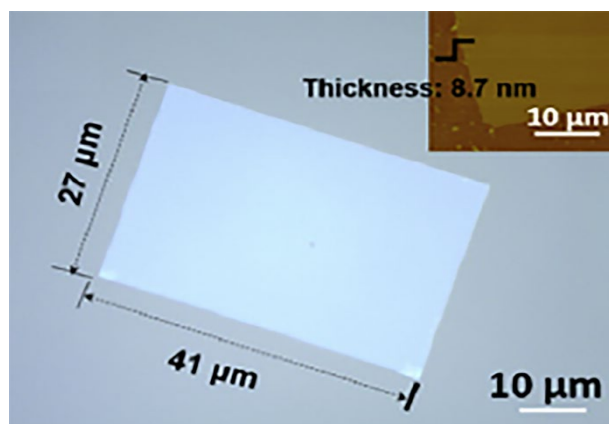
⁴ Morphological Low Dimensional Perovskite



شکل ۲۲. تأثیر کاهش ضخامت بر خواص نوری پروسکایت‌های

هالیدی [۹۷]

این مواد بازدهی کوانتومی نورتابناکی^۱ بالایی دارند و در ادوات نانو الکترونیک، نانوفوتونیک مانند سلول‌های خورشیدی، دیودهای نشر نوری، لیزرها و آشکارسازها استفاده می‌شوند. چندین روش، از جمله روش محلول و لایه‌نشانی از فاز بخار، برای سنتز پروسکایت‌های دوبعدی استفاده شده است. علاوه بر آن، از روش لایه‌برداری - مشابه گرافن - نیز در سنتز پروسکایت‌های دوبعدی استفاده شده است [۹۸ و ۹۹]. شکل ۲۳، نانوصفحه MAPbCl_3 سنتز و رشد داده‌شده به روش لایه‌نشانی شیمیایی از فاز بخار^۲ (CVD) را نشان می‌دهد که ضخامت این فیلم بسیار نازک، توسط میکروسکوپ نیروی اتمی^۳ (AFM)، اندازه‌گیری شد و ضخامت حدوداً ۸/۷ نانومتر برای آن گزارش شد [۱۰۰].

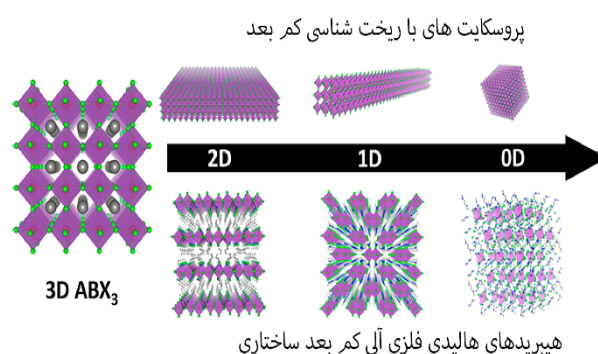


شکل ۲۳. تصویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ نیروی اتمی

از نانوصفحه MAPbCl_3 [۱۰۰]

صفربعدی هستند که در یک یا چند بعد، محدودیت کوانتومی دارند. ساختار آن‌ها همانند حالت سه‌بعدی توده‌ای آن‌هاست و فرمول شیمیایی آن‌ها نیز ABX_3 و خواص آن‌ها نیز شبیه حالت سه‌بعدی به اضافه اثر محدودیت کوانتومی است [۸۷].

خواص نوری و الکتریکی پروسکایت‌های با ریخت‌شناسی کم‌بعد، وابسته به اندازه بلوری آن‌هاست، اگرچه این ویژگی‌ها در پروسکایت‌های کم‌بعد مولکولی و اتمی، مستقل از اندازه بلورهای آن‌هاست. در داخل ساختار این نوع پروسکایت‌ها، اجزای ساختار، مانند لایه‌ها، سیم‌ها یا ردیف‌ها و یا هشت‌وجهی‌ها، توسط کاتیون‌های آلی از همدیگر جدا می‌شوند. به بیان دیگر، منظور از پروسکایت‌های کم‌بعد در ساختار اتمی، نحوه چینش متفاوت هشت‌وجهی‌هاست [۸۷]. شکل ۲۱، تفاوت این دو دسته‌بندی را نشان می‌دهد.



شکل ۲۱. پروسکایت‌های هیبریدی هالیدی کم‌بعد در سطح مولکولی یا ساختاری و کم‌بعد از نگاه ریخت‌شناسی [۸۷]

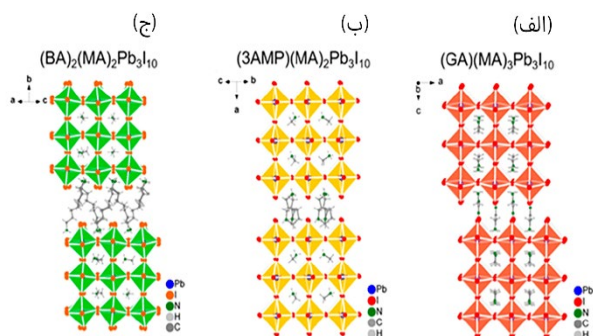
۲-۴-۱- پروسکایت‌های هالید دوبعدی از لحاظ ریخت‌شناسی ذرات

نانورقه‌ها، نانوصفحه‌ها و نانودیسک‌های پروسکایتی جزء پروسکایت‌های دوبعدی دسته‌بندی می‌شوند. نازک‌ترین حالت پروسکایت‌های هالید فلزی دوبعدی شامل یک تک‌لایه از هشت‌وجهی‌هایی است که گوشه‌های خود را به‌اشتراک گذاشته‌اند. به‌علت تأثیر محدودیت کوانتومی، با کم‌شدن ضخامت لایه‌ها، انرژی پیوند اکسایتون‌ها افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که برای ضخامت‌های کمتر از دو لایه، انرژی پیوند اکسایتون‌ها بسیار زیاد و در حد چند صد الکترون‌ولت است که باعث ایجاد تغییر قله تابناکی به‌سمت رنگ آبی می‌شود (شکل ۲۲) [۹۷].

^۱ Photoluminescence

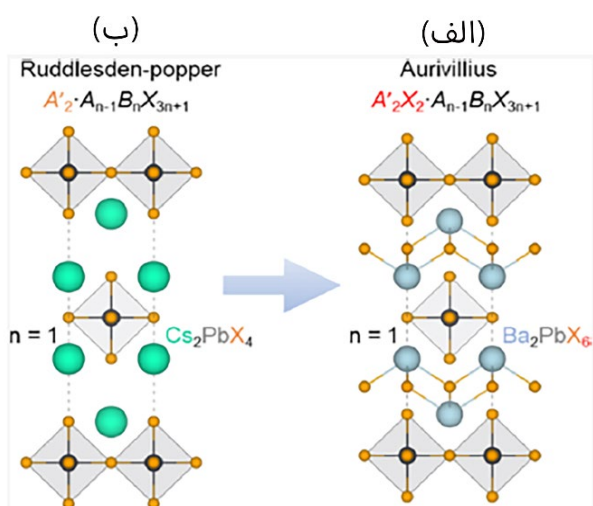
^۲ Chemical Vapor Deposition

^۳ Atomic Force Microscopy



شکل ۲۴. مقایسه بین فاز الف (ACI و ب (DJ و ج (RP

پروسکایت‌های دوبعدی. ساختار سبز فاز RP، زرد DJ و قرمز ACI است [۱۰۱].



شکل ۲۵. ساختار فاز الف (اریویلیوس در مقایسه با ساختار ب)

رادل‌سدن-پاپر [۱۰۵]

اگر از کاتیون‌های دوظرفیتی استفاده شود، پروسکایت دوبعدی با فاز دیون-جیکوبسون (DJ) حاصل می‌شود (شکل ۲۴) که شامل یک لایه کاتیون آلی بدون هیچ‌گونه شکاف و اندروالسی است و با دو سر خود، پیوند هیدروژنی با لایه‌های پروسکایت برقرار می‌کند که ساختار پایداری را ایجاد می‌کند. فرمول پروسکایت‌های دوبعدی (DJ) برابر $(A')A_{n-1}B_nX_{3n+1}$ است که از کاتیون‌های دوظرفیتی مانند ۳-آمینومتیل پپیریدینیوم^۴ (3-AMP) استفاده می‌شود [۱۰۲] و [۱۰۳].

فاز کاتیون متناوب در بین فضای بین‌لایه‌ای (شکل ۲۴) شامل وجود هر دو کاتیون بزرگ و کوچک در بین لایه‌هاست

۲-۴-۲- پروسکایت‌های دوبعدی در ساختار مولکولی و اتمی (پروسکایت‌های لایه‌ای)

پروسکایت لایه‌ای توسط یک کاتیون آلی با اندازه متفاوت شکل می‌گیرد. کاتیون‌های آلی کوچک در داخل هشت‌وجهی‌های PbX_6 قرار می‌گیرند، درحالی‌که کاتیون‌های بزرگ‌تر به راحتی داخل ساختار قرار نمی‌گیرند و باعث ایجاد ساختار لایه‌ای می‌شوند [۹۸]. پارامتر تاب‌آوری^۱ گلدشمیت، معیار اعوجاج و پایداری شبکه برابر است با:

$$t = \frac{R_A + R_X}{\sqrt{2}(R_B + R_X)} \quad (1)$$

که R_X شعاع آنیون و R_A و R_B شعاع‌های کاتیون‌ها را نشان می‌دهند. اگر t بین ۰ و ۰/۸۱ باشد، شبکه سه‌بعدی است و اگر بزرگ‌تر از یک باشد، پروسکایت دوبعدی لایه‌ای به دست می‌آید [۹۸].

پروسکایت‌های لایه‌ای هالیدی به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: فاز رادل‌سدن-پاپر (RP)، فاز دیون-جیکوبسون (DJ)، فاز اریویلیوس و فاز کاتیون متناوب در فضای بین‌لایه‌ای^۲ (ACI) سه فاز RP، DJ و ACI در شکل ۲۴ با هم مقایسه شده‌اند و ساختار فاز اریویلیوس در شکل ۲۵ نشان داده شده است. در فرمول پروسکایت‌های دوبعدی لایه‌ای هالیدی $(A')_m A_{n-1} B_n X_{3n+1}$ ، کاتیون آلی تک‌ظرفیتی ($m=2$) یا دوظرفیتی ($m=1$) است که بین لایه‌ها قرار می‌گیرد و n برابر تعداد لایه‌هاست (انواع کاتیون‌های مورد استفاده در پروسکایت‌های دوبعدی هیبریدی هالیدی در شکل ۲۶ نشان داده شده است) [۹۶].

بیشترین فاز مطالعه‌شده، فاز RP است که فرمول آن به شکل $(A')_2 A_{n-1} B_n X_{3n+1}$ نوشته می‌شود. در این فاز، لایه‌های پروسکایت توسط دو لایه کاتیون آلی تک‌ظرفیتی، مانند بوتیل آمونیوم (BA) یا فنیل اتیل آمونیوم^۳ (PEA)، جدا می‌شوند و بین کاتیون‌های آلی، شکاف و اندروالسی وجود دارد [۸۷] و [۱۰۱].

^۱ Tolerance

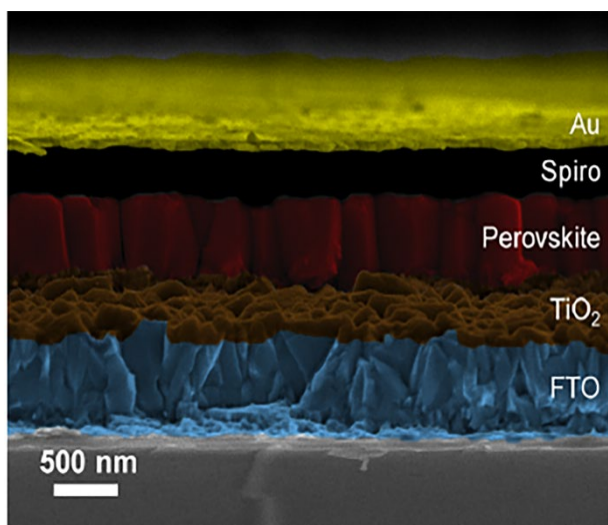
^۲ Alternative Cation in the Interlayer Space

^۳ PhenylEthylAmmonium

^۴ 3-AminoMethyl Piperidinium

تبدیل کرده است. از کاربردهای آن می‌توان به آشکارسازهای نوری، دیودهای نشر نوری (LED)، سلول‌های خورشیدی و لیزرها اشاره کرد [۱۰۶].

پروسکایت‌های دوبعدی، در مقایسه با حالت سه‌بعدی، مقاومت بیشتری به گرما و رطوبت بالاتری دارند، اما به دلیل خواص ناهمسانگردی انتقال بار، بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایتی دوبعدی، زیر ۱۴ درصد و کم باقی مانده است. یکی از راه‌های بهره‌گیری از هر دو خاصیت فوق‌العاده حالت دوبعدی و سه‌بعدی، استفاده از زمینه پروسکایت دوبعدی و سه‌بعدی است که بازده بالا و پایداری بالاتری دارد [۱۰۷]. در پژوهشی، گرتزل^۱ و همکاران [۱۰۷]، موفق شدند سلول خورشیدی پروسکایتی دوبعدی-سه‌بعدی با بازده بالای ۲۲ درصد و مقاومت به رطوبت عالی بسازند که با استفاده از لایه‌نشانی پروسکایت دوبعدی RP [(FEA)₂PbI₄] روی پروسکایت سه‌بعدی انجام شد. در این سلول خورشیدی، کاتیون (FEA⁺) نشان‌دهنده پنتاfluorوفیل اتیل آمونیوم^۲ است. شکل ۲۷، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطح مقطع سلول گزارش‌شده را نشان می‌دهد و شکل ۲۸، (سمت راست) و لایه پروسکایت دوبعدی-سه‌بعدی (سمت چپ)، در آزمایش زاویه تماس در گذر زمان نشان می‌دهد.

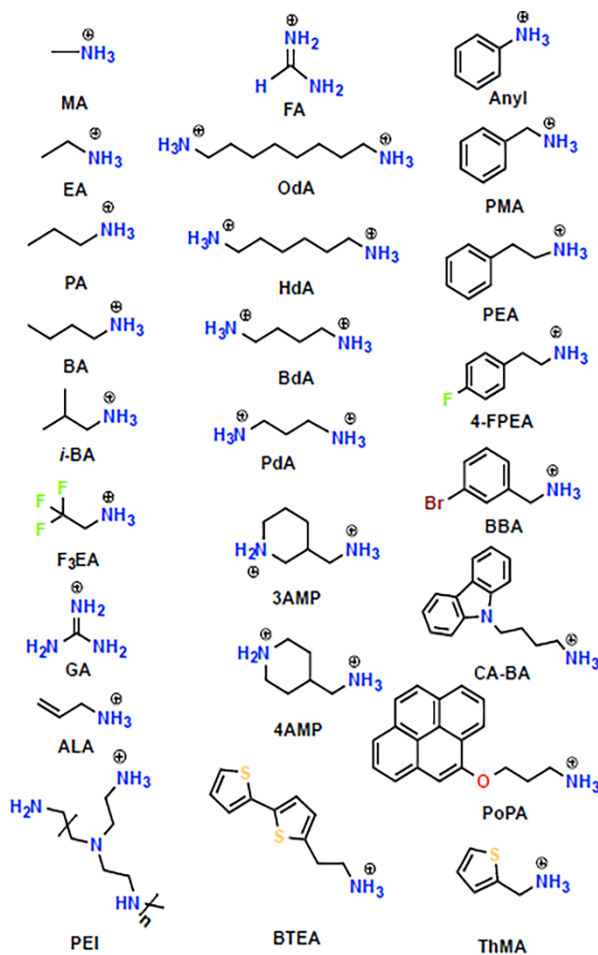


شکل ۲۷. تصویر SEM سطح مقطع سلول خورشیدی پروسکایتی

دوبعدی-سه‌بعدی گزارش‌شده در مرجع [۱۰۷]

که به طورمتناوب در بین لایه‌ها جای گرفته‌اند. این فاز شامل دو فاز RP و DJ است و فرمولی برابر $(A^+)A_nB_nX_{3n+1}$ دارد. گواندینیوم (GA^+), تنها کاتیونی است که تاکنون برای این فاز استفاده شده است [۹۵ و ۱۰۴].

فاز اریوبیلیوس تاکنون باموفقیت برای پروسکایت‌های هالیدی سنتز نشده است، اما ژائو و همکاران [۱۰۵]، در مقاله‌ای، با کمک نظریه تابع چگالی، پیش‌بینی و کاف انرژی $1/8$ الکترون ولت را برای آن گزارش کرده‌اند. این فاز دارای فرمول $A_2'X_2 \cdot A_{n-1}B_nX_{3n+1}$ است که در آن، آنیون‌های اضافی در بین لایه‌های فاز RP قرار می‌گیرد (شکل ۲۵).



شکل ۲۶. انواع کاتیون‌های گزارش‌شده در پروسکایت‌های دوبعدی

[۹۶]

در بین ویژگی‌های منحصربه‌فرد پروسکایت‌های دوبعدی یا لایه‌ای، خواص نوری-الکتریکی آن‌ها مانند ضریب جذب بالا، تحرک‌پذیری بالای حامل‌ها و عمق نفوذ بالا، آن‌ها را به یکی از مهم‌ترین مواد مورد استفاده در کاربردهای انرژی

¹ Graetzel

² Pentafluorophenylethylammonium

۲-۵- مواد دوبعدی تک‌عنصری

انواع مختلفی از مواد با ساختار لایه‌ای متشکل از دو یا سه عنصر و سامانه‌های پیچیده‌تر شامل چندین عنصر وجود دارند که می‌توان با لایه‌برداری به تک‌لایه یا چندلایه به آن‌ها دست یافت. در مقابل، مواد دوبعدی تک‌عنصری‌ای وجود دارند که راه‌های آماده‌سازی و سنتز محدودی برای آن‌ها وجود دارد. از مزایای مواد دوبعدی تک‌عنصر می‌توان به کاف انرژی مستقیم و وابستگی آن به ضخامت و شکل لایه‌ها اشاره کرد [۱۰۸]. در ادامه، چند ماده دوبعدی تک‌عنصری معرفی و ویژگی‌های آن‌ها مرور می‌شود.

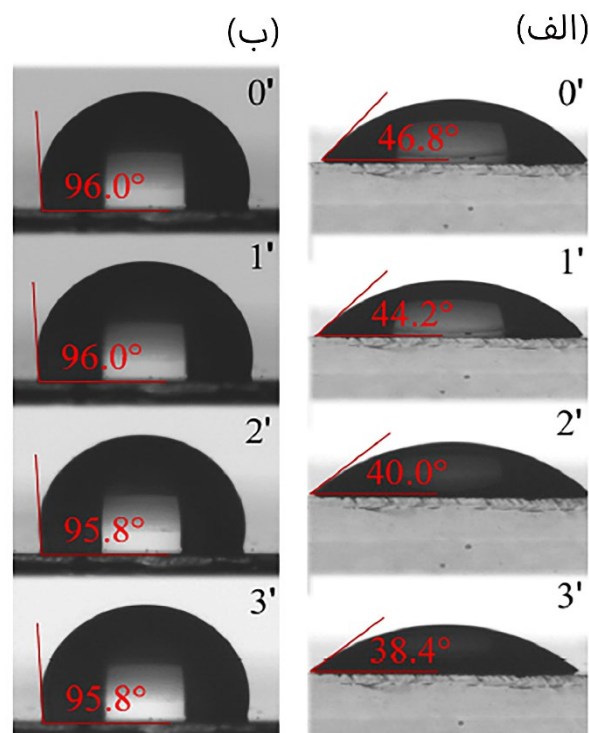
۲-۵-۱- مواد دوبعدی گروه ۱۵

اخیراً مواد دوبعدی عناصر گروه ۱۵، به دلیل خواص الکتریکی فوق‌العاده، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. کاربردهای مواد دوبعدی عناصر گروه ۱۵ در شکل ۲۹ نشان داده شده‌اند. برخلاف عناصر گروه ۱۳ و ۱۴، مواد دوبعدی بر پایه عناصر گروه ۱۵ نیمه‌رسانا هستند که آن‌ها را نامزد استفاده در دستگاه‌های بر پایه مواد نانو در آینده می‌کند [۱۰۹].

از میان انواع حالات مختلف چینش لایه‌ها و فازهای لایه‌ای، عناصر گروه ۱۵، در دو حالت α و β ، پایدارترین حالت را دارند که شامل حالت α -P، α -As، β -As، β -Sb و β -Bi توده‌ای هستند [۱۱۰]. فاز α ، به صورت ساختار بلوری لایه‌ای راست لوزی^۱ (شکل ۳۰ الف) و فاز β ، به صورت ساختار بلوری لایه‌ای لوز وجهی^۲ هستند (شکل ۳۰ ب). به طور خلاصه، فازهای پایدار و بلورهای لایه‌ای طبیعی در شکل ۳۰ ج نشان داده شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، فازهای پایدار برای عناصر P و As، فازهای α و β و برای عناصر Sb و Bi، فقط فاز α است. علاوه بر آن، بلورهای لایه‌ای طبیعی As، Sb و Bi، دارای فاز β هستند [۱۰۹].

۲-۵-۱-۱- فسفرن (فسفر سیاه)

فسفرن، تک‌لایه‌ای از فسفر سیاه است که خاصیت نیمه‌رسانا دارد و بیش از یک قرن است که توسط بریجمن^۳ کشف شده است. شکل ۳۱، نمایانگر طرح‌واره ساختاری



شکل ۲۸. تصویر قطره آب در آزمون زاویه تماس (الف) روی لایه پروسکایت سه‌بعدی و (ب) روی لایه پروسکایت دوبعدی-سه‌بعدی در گذر زمان [۱۰۷].

۲-۴-۳- کاربردهای پروسکایت‌های هالیدی دوبعدی

همانند سایر مواد دوبعدی، پروسکایت‌های دوبعدی نیز دارای انرژی پیوند اکسایتون بالایی هستند که از انرژی گرمایی در دمای اتاق، بالاتر است؛ بدان معنا که آن‌ها، در دمای اتاق، پایدارند. انرژی پیوند اکسایتون‌ها به شدت به تعداد لایه وابسته است. هرچه n بیشتر باشد، انرژی پیوند اکسایتون‌ها کاهش می‌یابد؛ زیرا تعداد چاه‌های کوانتومی کمتر است. همچنین، با افزایش n یا تعداد لایه‌ها به سمت ساختار سه‌بعدی، تغییر ساختار ایجاد می‌شود که کاف انرژی، به علت کاهش اثر محدودیت کوانتومی، کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در ترکیب $BA_2A_{n-1}Pb_nI_{3n+1}$ در حالت تک‌لایه ($n=1$)، کاف انرژی برابر $2/24$ الکترون ولت و در حالت شبه‌سه‌بعدی ($n=\infty$)، کاف انرژی برابر $1/52$ الکترون ولت است [۹۵ و ۱۰۶].

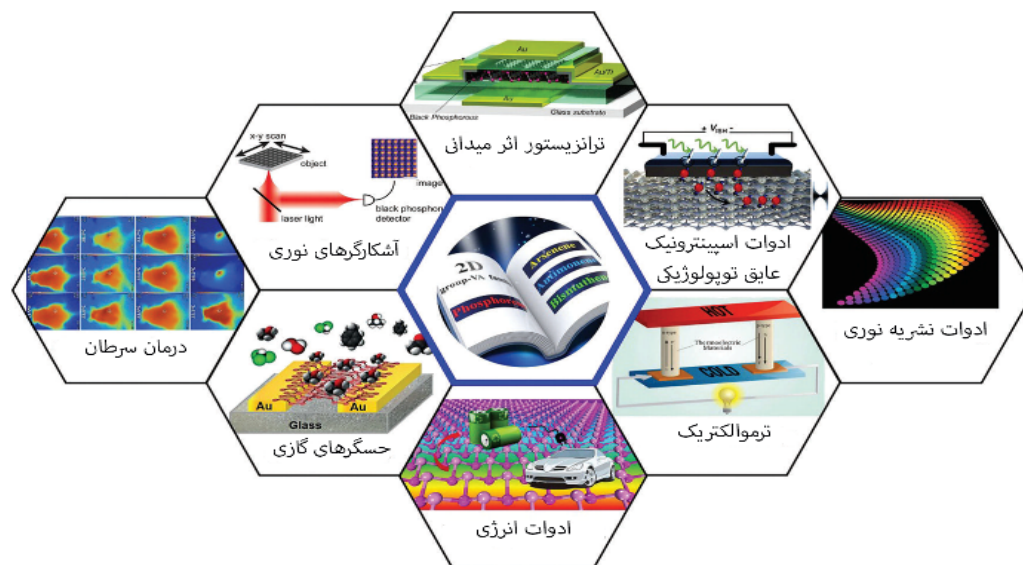
انرژی پیوند اکسایتون بالا، مواد پروسکایت دوبعدی را مناسب کاربرد در دیودهای نشر نوری کرده است؛ زیرا بازترکیب تابشی افزایش می‌یابد [۱۰۶]. کاف انرژی پروسکایت‌های دوبعدی، با افزایش تعداد لایه‌ها (n)، به دلیل کاهش اثر محدودیت کوانتومی، کاهش می‌یابد [۱۰۶].

¹ Orthorhombic

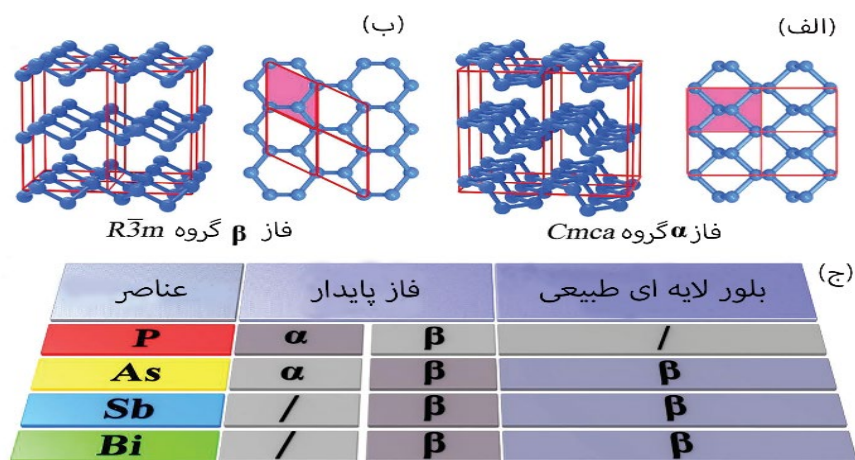
² Rhombohedral

³ Bridgman

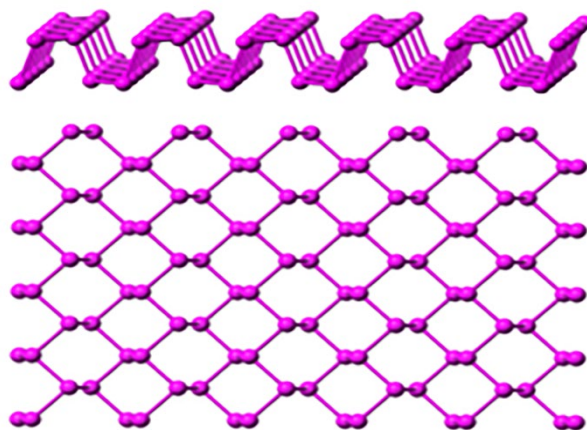
فسفرن کم‌لایه است. فسفر سیاه، مشابه سایر مواد دوبعدی، متشکل از ورقه‌های دوبعدی و برخلاف گرافیت، پیوند بین لایه‌های آن ناشی از هیبریداسیون sp^3 است [۱۱۱]. فسفر سیاه، پایدارترین حالت بلوری با فاز α است.



شکل ۲۹. کاربردهای مواد دوبعدی عناصر گروه ۱۵ شامل ترانزیستور اثر میدانی، ابزار اسپینترونیک، آشکارسازهای نوری، ابزار ترموالکترونیک، ادوات حوزه انرژی، حسگرهای گازی، درمان سرطان هستند [۱۰۹]

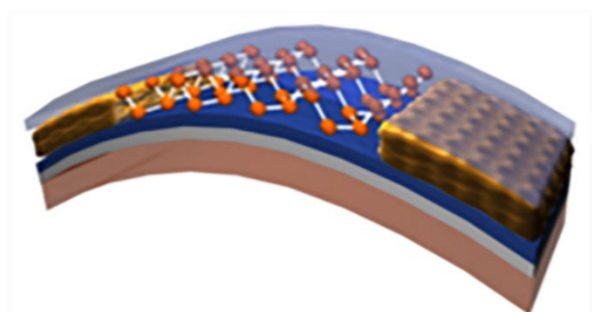


شکل ۳۰. ساختار بلوری لایه‌ای عناصر گروه ۱۵؛ (الف) فاز α ، (ب) فاز β و (ج) فاز پایدار و بلور لایه‌ای طبیعی بلورهای P، As، Sb و Bi [۱۰۹]



شکل ۳۱. طرح‌واره ساختاری فسفرن کم‌لایه [۱۱۱]

ساخت ترانزیستورهای انعطاف‌پذیر بر پایه فسفرن کم‌لایه (شکل ۳۳)، امکان‌پذیر است و این ترانزیستورها دارای تحرک‌پذیری بالایی (۳۱۰ سانتی‌مترمربع بر ولتاژ ثانیه) در دمای اتاق هستند. در واقع، فسفرن گزینه‌ای امیدوارکننده برای سامانه‌های نانومقیاس انعطاف‌پذیر است؛ زیرا دارای ماهیت فوق‌العاده نازکی است و قابلیت کنترل ویژگی الکترواستاتیک ایدئال و انعطاف‌پذیری مکانیکی بالایی دارد. واحدهای اساسی مدار، شامل مبدل دیجیتال، تقویت‌کننده ولتاژ و دوبرابرکننده فرکانس است. ترانزیستورهای فرکانس رادیویی (RF)، با بیشترین فرکانس قطع ذاتی ۲۰ گیگاهرتز، برای کاربردهای بالقوه در سیستم‌های نانومقیاس انعطاف‌پذیر با فرکانس بالا شناخته شده‌اند [۱۱۳].



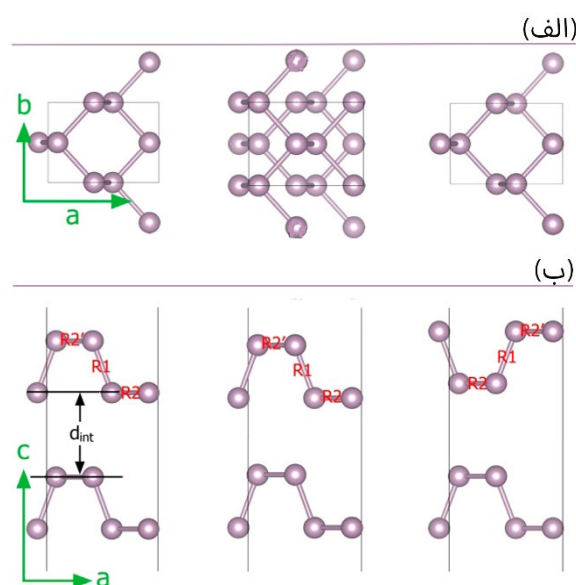
شکل ۳۳. طرح‌واره‌ای از ترانزیستور فسفرن کم‌لایه انعطاف‌پذیر با پوشش دی‌الکتریک آب‌گریز [۱۱۳]

۲-۵-۱-۲- آرسنن

آرسنیک سه دگرشکل^۱ فلزی خاکستری، زرد و مشکی دارد. آرسنیک خاکستری، رایج‌ترین و پایدارترین حالت آرسنیک است که ساختار β دارد و شامل لایه‌هایی با ساختار لوز وجهی است. وقتی آرسنیک تا دمای ۳۷۰ درجه کلوین حرارت ببیند، ساختار α به‌دست می‌آید که مشابه فسفر سیاه است. ممکن است آرسنن تک‌لایه، هم به‌صورت α و هم به‌صورت β ، پایدار باشد؛ اما ساختار β ، انرژی پیوند کمتری دارد و پایدارتر است. ساختار اتمی آرسنیک و آرسنن، در شکل ۳۴ نشان داده شده است [۱۰۹].

کاف انرژی آرسنن، همانند فسفرن، به ضخامت بستگی دارد و برای آرسنن توده‌ای، برابر ۰/۱۷۵ الکترون ولت و برای تک‌لایه، برابر ۲/۴۹ الکترون ولت است. همچنین، کاف انرژی

همان‌طور که در شکل ۳۲ نشان داده شده است، سه حالت ممکن برای چینش لایه‌های فسفرن روی هم وجود دارد که شامل AA-، AB- و AC- است. در حالت AA-، لایه بالایی مستقیماً روی لایه پایینی قرار می‌گیرد. در حالت AB-، لایه پایینی به‌اندازه نصف سلول واحد در جهت محور a یا b جابه‌جا می‌شود و در حالت AC-، لایه بالایی و پایینی، نسبت به هم، تقارن آینه‌ای دارند و تصویر آینه‌ای همدیگر هستند [۱۱۲].



شکل ۳۲. انواع چینش لایه‌های فسفرن روی یکدیگر: (الف) دید از بالا و (ب) دید جانبی چینش‌های مختلف [۱۱۲]

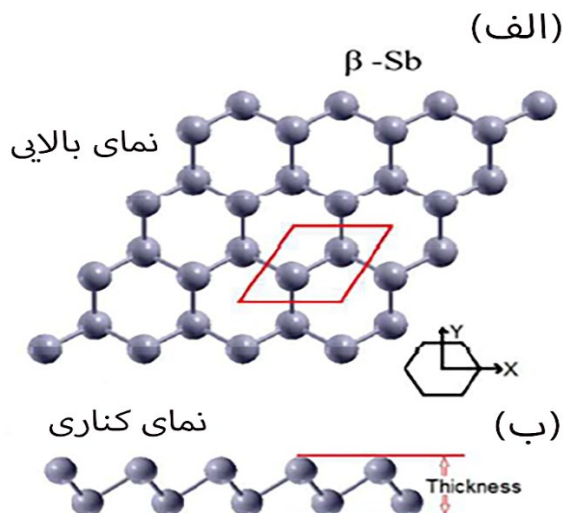
ضخامت فسفرن، به کاف انرژی مستقیم آن وابسته است که از ۰/۳ الکترون ولت در ماده توده‌ای تا ۱/۸۸ الکترون ولت در تک‌لایه تغییر می‌کند. پیش‌بینی می‌شود تغییر در مقدار کاف انرژی در فسفرن تک‌لایه، ناشی از نبود هیبریداسیون بین‌لایه‌ای است [۱۱۱].

مواد جذب‌کننده فوتون در سلول خورشیدی: کاربرد
بالموه فسفرن دولایه در مواد سلول خورشیدی، نیز بررسی شد. بازده پیش‌بینی شده برای تک‌لایه MoS_2/AA چسبیده به فسفرن دولایه و MoS_2/AB چسبیده به فسفرن دولایه می‌تواند به ترتیب برابر ۱۸ درصد و ۱۶ درصد باشد. نتایج نشان می‌دهد که فسفرن MoS_2 سه‌لایه، گزینه امیدوارکننده‌ای در دستگاه‌های اپتوالکترونیک انعطاف‌پذیر است [۱۱۲].

مدارهای انعطاف‌پذیر: پژوهشگران اثبات کردند که

^۱ Allotrope

شوند؛ زیرا ظرفیت نظری ذخیره سدیم بالایی، معادل ۶۶۰ میلی‌آمپر ساعت بر گرم و پتانسیل تخلیه کم، حدود ۰/۵ ولت را از خود نشان می‌دهند [۱۱۳].



شکل ۳۵. ساختار تک‌لایه فاز β آنتیمون: (الف) تصویر از بالا، (ب) تصویر از کنار [۱۱۵]

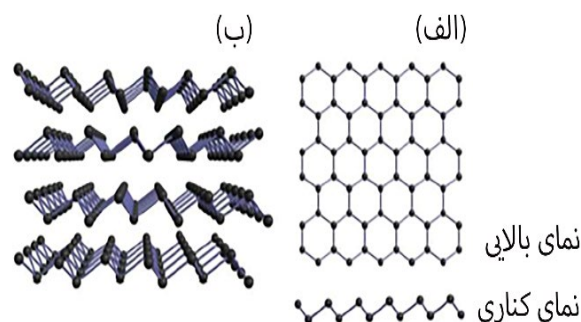
اولین گزارش‌های ارائه‌شده از کاربرد عملی آنتیمون، توسط وانگ و همکاران [۱۱۷] بود. آن‌ها از آنتیمون، به‌عنوان لایه انتقال‌دهنده حفره در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی استفاده کردند که در مقایسه با سلول بدون لایه انتقال‌دهنده حفره، ۳۰ درصد افزایش انتقال حفره و جریان نشان داد.

۲-۵-۱-۴- بیسموتن

بیسموت، به‌صورت توده‌ای، تنها یک فاز پایدار β لوز وجهی دارد که به‌صورت طبیعی لایه‌لایه است و خاصیت فلزی از خود نشان می‌دهد. تک‌لایه بیسموتن، در حالت β ، پایدارترین حالت را داراست [۱۰۹].

همچنین، فاز α نیز در بیسموتن وجود دارد. کاف انرژی بیسموتن دولایه در حالت β ، حدود ۰/۲۳ الکترون ولت است و با رسیدن به حالت تک‌لایه، افزایش می‌یابد و به حدود ۰/۳۲ الکترون ولت می‌رسد. کاف انرژی بیسموتن در حالت α ، برای ساختار دولایه، ۰/۱۸ الکترون ولت و برای تک‌لایه، ۰/۳۰ الکترون ولت است [۱۰۸]. ساختار فازهای بیسموتن در شکل ۳۶ آورده شده است.

غیرمستقیم آرسن می‌تواند توسط مقدار کوچکی کرنش به کاف انرژی مستقیم تبدیل شود [۱۱۴].



شکل ۳۶. (الف) تک‌لایه آرسن، (ب) ساختار اتمی آرسنیک خاکستری [۱۱۴]

مطالعاتی در خصوص آرسنیک انجام شده که نشان می‌دهد این ماده می‌تواند، با استفاده از روش‌هایی مثل نیروی مکانیکی و ایزومره‌شدن، به تک‌لایه آرسن تبدیل شود. آرسن کم‌لایه، با استفاده از اعمال امواج فراصوت به آرسنیک تحت اتمسفر نیتروژن در ان-متیل-۲-پیرولیدون^۱ (NMP)، سنتز شده است [۱۱۴].

۲-۵-۱-۳- آنتیمون

در شرایط عادی، سه فاز برای آنتیمون توده‌ای شناخته شده است: آنتیمون خاکستری، آنتیمون مشکی و آنتیمون منفجرشونده^۲. از بین آن‌ها، پایدارترین حالت، آنتیمون خاکستری است که ساختار آن، مشابه آرسنیک خاکستری است و ساختار لوز وجهی دارد و فاز آن، β است و همچنین، پایدارترین حالت آنتیمون تک‌لایه، حالت β است (شکل ۳۵) [۱۰۹].

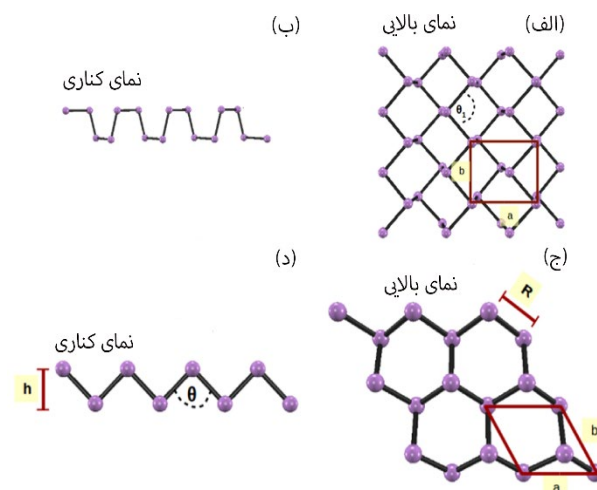
بنابر پیش‌بینی‌های پژوهش‌های نظری، آنتیمون‌ها در زمینه‌های اپتوالکترونیک، الکتروکاتالیست، ذخیره انرژی و درمان سرطان کاربرد دارند [۱۱۶]. باتری‌های یون سدیم، به‌علت هزینه کم، فراوانی و دوستدار محیط زیست بودن، برای ذخیره انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این کاربرد، آنتیمون‌ها می‌توانند به‌عنوان آند، برای ذخیره سدیم استفاده

^۱ N-methyl-2-Pyrrolidone

^۲ Explosive

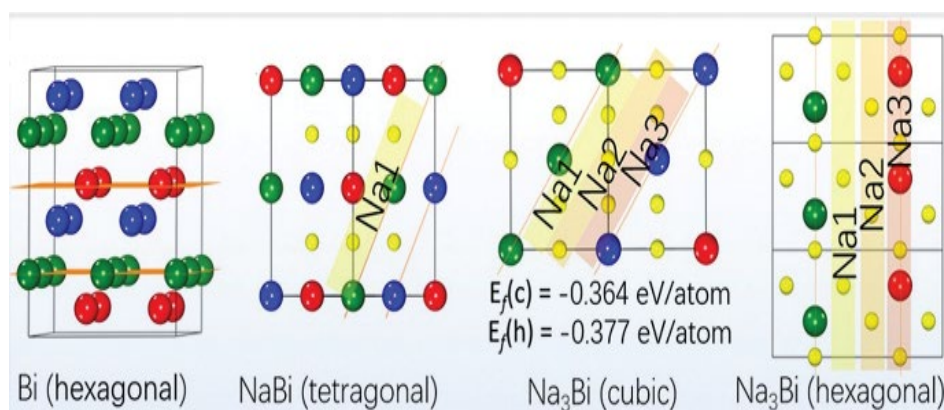
به‌علت سنگینی بیسموتن و عدد اتمی بالا، اثر جفت‌شدگی اسپین-اوربیتال، در کاف انرژی تأثیر می‌گذارد و مقدار آن، بدون در نظر گرفتن اثر جفت‌شدگی اسپین-اوربیتال، حدود 0.80 الکترون ولت است و با در نظر گرفتن این اثر، مقدار آن، 0.32 الکترون ولت است که روندی کاهشی را نشان می‌دهد [۱۱۸].

از کاربردهای بیسموتن می‌توان به ذخیره انرژی به‌ویژه در باتری‌ها اشاره کرد. یکی از این موارد، الکترودهای باتری‌های سدیمی هستند که اهمیت ویژه‌ای در این حیطه دارند. گنجایش بالا با قابلیت بارگیری بالای جرم، یکی از عوامل مهم در الکترودهای باتری است. یکی از مواد مورد توجه برای آند، بیسموتن با گنجایش حجمی نظری 3800 میلی‌آمپر ساعت بر سانتی‌مترمکعب و قابلیت آلیاژسازی دلخواه با سدیم است. یکی از چالش‌های اساسی، افزایش حجم ناشی از بارگذاری سدیم در ساختار است. بیسموتن، به‌دلیل فاصله مناسب بین لایه‌ها، قابلیت بیشتری برای جای‌دادن سدیم در ساختار دارد (شکل ۳۷) [۱۱۸].



شکل ۳۶. طرح‌واره ساختاری بیسموتن؛ (الف) حالت α بیسموتن از بالا، (ب) حالت α بیسموتن از کنار، (ج) حالت β بیسموتن از بالا، (د) حالت β بیسموتن از کنار [۱۰۸]

بیسموتن در بین عناصر گروه ۱۵، پایدارترین ماده دوبعدی در هوای آزاد است. این ادعا، با استفاده از طیف‌نگاری رامان از یک بیسموتن تازه سنتز شده و ثابت بودن پیک‌ها در مدت ۳۵ روز و عدم تغییر ناهمواری سطحی که به‌کمک آنالیز AFM مشخص شد، اثبات شده است [۱۱۸].



شکل ۳۷. طرح‌واره مراحل جای‌گیری سدیم در ساختار و تشکیل آلیاژ در باتری‌های سدیمی؛ گلوله‌های قرمز، سبز و آبی، نشانگر اتم‌های Bi در لایه‌های مختلف و گلوله‌های زرد، نشانگر یون‌های Na هستند [۱۱۸]

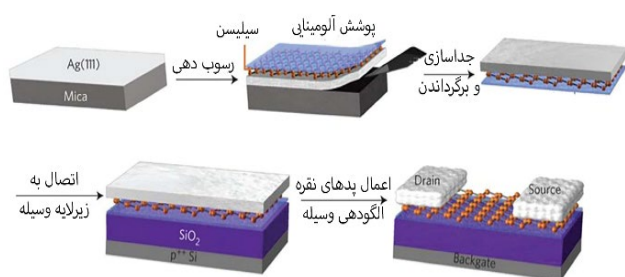
کاربری آن‌ها را برای استفاده در ادوات الکترونیکی، محدود و لایه‌برداری آن‌ها را با مشکل مواجه می‌کند [۱۰۸]. اتم‌های گروه ۱۴ در ساختارهای لانه‌زنوری، مانند گرافن، در صفحات وجود دارند. همان‌طور که در شکل ۳۸ نشان داده شده است، مواد دوبعدی عناصر گروه ۱۴، برخلاف ساختار صفحه‌ای گرافن، سیلیسن و ژرمان و استانت، به‌واسطه هیبریداسیون متفاوت، ساختار هگزاگونال خمیده دارند.

۲-۵-۲- مواد دوبعدی عناصر گروه ۱۴

مواد دوبعدی عناصر گروه ۱۴، به‌دلیل آرایش الکترونی یکسان با اتم کربن، توجه زیادی را به‌خود جلب کرده‌اند [۱۱۹]. حالت دوبعدی آن‌ها شامل سیلیسن، ژرمان و استانت است. مسئله اصلی در این مواد، این است که در طبیعت، در حالت عادی به‌صورت لایه‌ای وجود ندارند و برای سنتز، به زیرلایه مناسب نیاز دارند. این وابستگی به زیرلایه مناسب،

تمرکز و رشد، روی $\text{Ag}(111)$ انجام شده است [۱۱۹ و ۱۲۳]. نقره و سیلیسیم، الکترونگاتیویته نزدیکی دارند که باعث می‌شود بار کمتری بین لایه سیلیسیم و لایه نقره جابه‌جا شود. همچنین، این دو، تمایل کمی به تشکیل آلیاژ دارند [۱۰۸].

کاف انرژی سیلیسن با ساختار موجی و خمیده، با استفاده از یک میدان الکتریکی خارجی، قابل تنظیم است که این ویژگی باعث شده تا استفاده از آن در ترانزیستورهای اثر میدانی مناسب باشد (شکل ۴۰) [۱۲۱ و ۱۲۴].



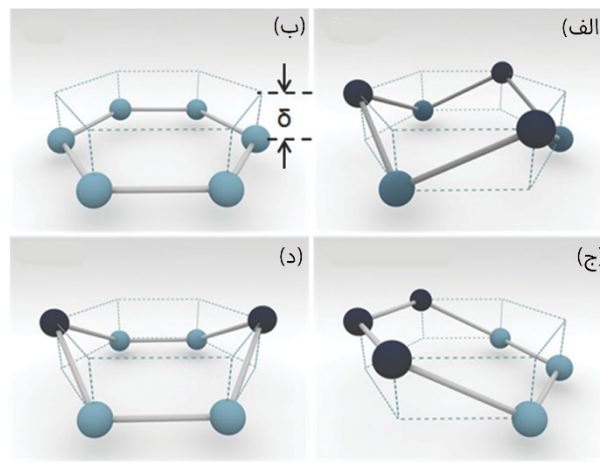
شکل ۴۰. طرح‌واره ساخت ترانزیستور اثر میدان بر پایه سیلیسن

[۱۲۴]

۲-۲-۵-۲- ژرمانن

ژرمانن، یک تک‌لایه موجی‌شکل و خمیده ژرمانیومی است که از لحاظ ساختاری شبیه سیلیسن است [۱۲۱]. آن‌ها در ساختار نواری خود دارای مخروط دیراک هستند و جفت‌شدگی اسپین-اوربیتال بیشتری (۲۳ میلی‌الکترون‌ولت) از سیلیسن و گرافن دارند [۱۰۸ و ۱۲۵]. تک‌لایه ژرمانن، دارای کاف انرژی مستقیم $1/59$ الکترون‌ولت است [۱۲۶] و به دلیل تحرک‌پذیری بالای حامل‌ها و توانایی ذخیره یون لیتیم، در مواردی مانند باتری، ترانزیستور و کاتالیز نوری کاربرد دارند [۱۲۱ و ۱۲۷]. طرح‌واره ساختاری و تصویر STM ژرمانن روی زمینه $\text{Ag}(111)$ در شکل ۴۱ نشان داده شده است. محاسبات اولیه نشان داده است که ژرمانن، از طریق برهم‌کنش الکترواستاتیک، می‌تواند روی $\text{Ag}(111)$ اتصال یابد. پراش الکترون‌های کم‌انرژی^۵ (LEED) از رشد ژرمانن روی $\text{Ag}(111)$ ساختار $(9\sqrt{3} \times 9\sqrt{3})R30^\circ$ را نشان داده که مشابه الگوی تشکیل گرافن روی $(6\sqrt{3} \times 6\sqrt{3})R30^\circ$ ، $\text{SiC}(0001)$ است. برای ایجاد این ماده، از خلأ و برای قراردادن یک لایه از اتم‌های ژرمانیوم روی بستری مانند $\text{Ag}(111)$ یا $\text{Au}(111)$ ، از

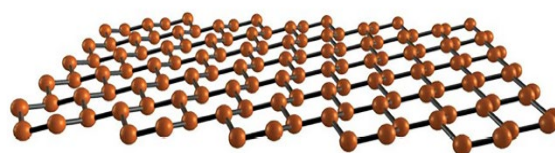
هیبریداسیون در گرافن، sp^2 و در مابقی عناصر، sp^3 است. بسته به این‌که خمیدگی در کدام نقطه رخ دهد، ساختار این عناصر، شامل سه حالت صندلی، قایق و موج‌شکن است [۱۰۸ و ۱۲۰].



شکل ۳۸. انواع ساختارهای هگزگونال خمیده: الف) صندلی^۱، ب) مسطح، ج) تخته شست‌وشو^۲ و د) قایقی^۳ [۱۰۸]

۲-۲-۵-۲- سیلیسن

سیلیسن، یک لایه خمیده سیلیسمی با اعوجاج حدود 0.44 نانومتر نسبت به صفحه صاف است و بعضی از خواص آن، نظیر شبه‌فلزبودن بدون کاف انرژی و فرمیون دیراک^۴ بدون جرم، شبیه گرافن است، اما جفت‌شوندگی اسپین-اوربیتال قوی و کاف انرژی قابل‌تنظیم، آن را از گرافن متمایز می‌سازد [۱۲۱]. واکنش هیدروژنه‌شدن سیلیسن، بیشتر از گرافن، گرم‌از است [۱۲۲]. شکل ۳۹، ساختار تک‌لایه سیلیسن را نشان می‌دهد.



شکل ۳۹. تک‌لایه سیلیسن که به‌صورت خمیده است [۱۲۱]

رشد سیلیسن، روی زیرلایه‌های مختلفی همچون MoS_2 ، ZrBr_2 و $\text{Au}(110)$ گزارش شده است، اما بیشترین

^۱ Chair

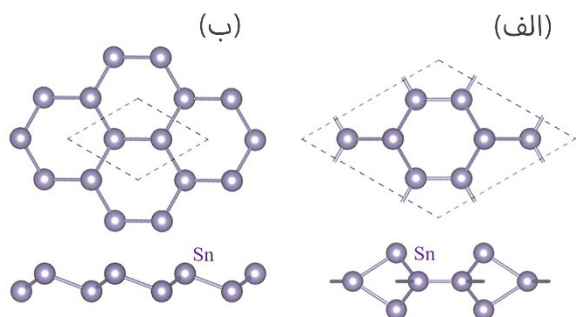
^۲ Washboard

^۳ Boat

^۴ Dirac Fermion

^۵ Low-Energy Electron Diffraction

حساس است [۱۳۲]. شکل ۴۳، ساختار استاتن را نشان می‌دهد. با افزودن اتم‌های اضافی قلع، ساختار دمبلی، شکل می‌گیرد [۱۳۳].



شکل ۴۳. (الف) ساختار دمبلی استاتن و (ب) ساختار استاتن با

خمیدگی و موج کم [۱۳۳]

پیش‌بینی شده است که قلع نیز، مانند سیلیسن، دارای فرمیون دیراک بدون جرم است و در سایر خواص الکترونیکی نیز با آن یکسان است [۱۳۳].

۲-۶- کربونیتريد گرافیتی

یک نیمه‌رسانای آلی متشکل از ساختار تک‌لایه با اتم‌های متناوب کربن و نیتروژن است که به علت شباهت‌های ساختاری و الکترونیکی با گرافن، اهمیت زیادی دارد. پیوند کووالانسی کربن-نیتروژن و برهم‌کنش واندروالسی لایه‌ها به پایداری ساختار آن منجر می‌شود. محاسبات اولیه نشان می‌دهد که کربونیتريد گرافیتی دارای هفت فاز است [۱۳۴].

(۱) $a\text{-C}_3\text{N}_4$ (کاف انرژی ۵/۵ الکترون ولت)؛

(۲) $b\text{-C}_3\text{N}_4$ (کاف انرژی ۴/۸۵ الکترون ولت)؛

(۳) C_3N_4 مکعبی (کاف انرژی ۴/۳ الکترون ولت)؛

(۴) C_3N_4 شبه‌مکعبی (کاف انرژی ۴/۱۳ الکترون ولت)؛

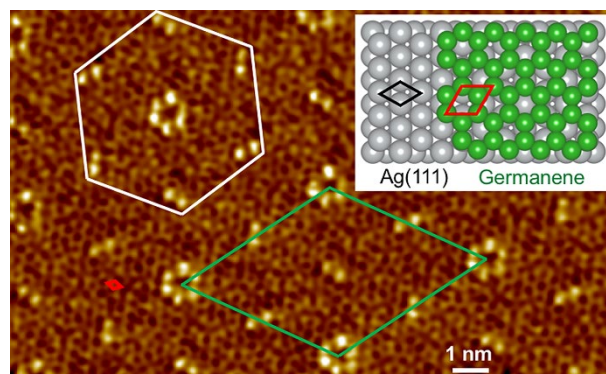
(۵) $h\text{-g}$ -تریازین^۱ (کاف انرژی ۲/۹۷ الکترون ولت)؛

(۶) $g\text{-t}$ تریازین^۲ (کاف انرژی ۰/۹۳ الکترون ولت) و

(۷) $gh\text{-}$ هپتازین^۳ (کاف انرژی ۲/۸۸ الکترون ولت).

شکل ۴۴، ساختار حلقه‌ای واحدهای اولیه تکنیک^۴،

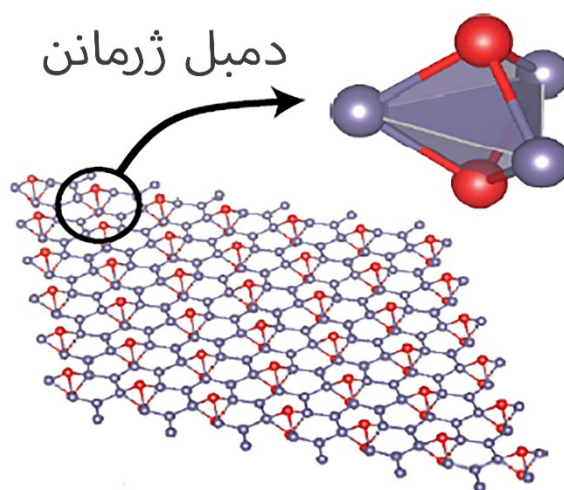
درجه حرارت بالا استفاده شده است [۱۳۰-۱۲۸].



شکل ۴۱. طرح‌واره ساختاری و تصویر STM ژرمانن روی زمینه

$\text{Ag}(111)$ [۱۲۸]

در پژوهش انجام‌شده توسط اونگون و همکاران [۱۳۱]، نشان داده شد که جذب ژرمانیوم اضافی روی ورقه ژرمانن، باعث تشکیل واحدهای دمبلی می‌شود که هرکدام، با دو اتم ژرمانیوم، خارج از صفحه (یکی در هر دو جهت صفحه) قرار دارند (شکل ۴۲). دمبل‌ها یکدیگر را جذب می‌کنند. نظم در تکرار ساختارهای دمبلی می‌تواند به فازهای پایدار اضافی ژرمانن با خواص الکترونیکی و مغناطیسی و کاف انرژی غیرمستقیم منجر شود.



شکل ۴۲. طرح‌واره ژرمانن با واحدهای دمبلی [۱۳۱]

۲-۵-۳- استاتن

استاتن، یک تک‌لایه موجی و خمیده از قلع است. اولین بار، در سال ۲۰۱۵، استاتن روی Be_2Te_3 رشد داده شد. استاتن به کرنش، عیوب، آلودگی و میدان الکتریکی بسیار

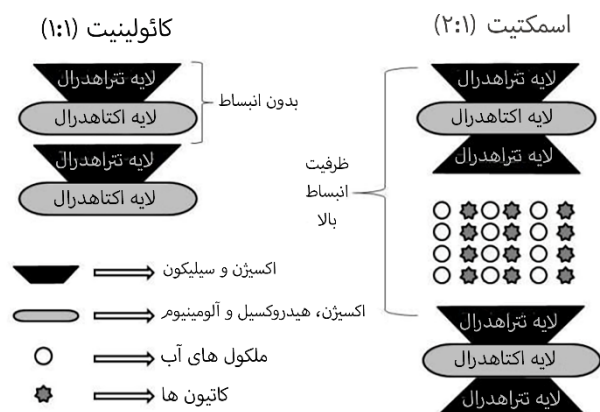
¹ G-h-Triazine

² G-Otriazine

³ Gh-Heptazine (or Gh-tri-s-Triazine)

⁴ Tectonic

۱۸۴۲، هیدروتالسیت^۱ با فرمول مولکولی $Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$ بود. مواد معدنی رسی، براساس لایه‌بندی ورقه‌های چهارضلعی و هشت‌ضلعی، طبقه‌بندی می‌شوند. در نوع ۱:۱ مواد معدنی رسی، هر لایه ورقه هشت‌ضلعی، با لایه‌ای از ورقه چهارضلعی مرتبط است و هر لایه، روی دیگری قرار دارد. در نوع ۲:۲ ترکیبات رسی، یک لایه تک‌صفحه‌ای هشت‌ضلعی بین دو لایه چهارضلعی قرار گرفته است (شکل ۴۵). در رس‌های نوع ۱:۱، لایه‌ها توسط نیروهای واندروالس و پیوند هیدروژنی ضعیف حفظ می‌شوند. یکی از مواد معدنی رسی مهم در خانواده رس‌های ۱:۱، کائولینیت است که یک رس خشتی با واکنش‌پذیری کم و بدون تورم است [۱ و ۱۴۰].

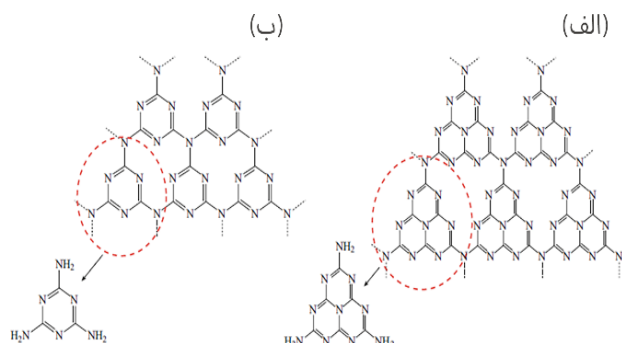


شکل ۴۵. طرح‌واره ساختاری رس‌های ۱:۱ و ۲:۱ [۱۴۱]

۲-۷-۱- رس سیلیکاتی؛ نانوماده زیست‌فعال در کاربردهای پزشکی

چند دهه است که رس‌های سیلیکاتی، به‌عنوان آنتی‌اسیدها و کرم‌های موضعی، به‌طور گسترده در پزشکی مدرن استفاده می‌شوند، اما کاربرد آن‌ها، به‌عنوان مواد زیست‌فعال، به‌تازگی آغاز شده است. نانوذرات رسی دوبعدی مورد استفاده در مهندسی زیست‌پزشکی، معمولاً سیلیکات‌های لایه‌ای هستند که قطر آن‌ها بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر است و ضخامتی معادل ۱ نانومتر دارند. مفیدترین نانوذرات رسی برای کاربردهای پزشکی، نانوذرات با ساختار لایه‌ای متمایز است که روی سطح هر ذره، بار منفی دائمی و در امتداد لبه‌ها، بار مثبت

تریازین و هپتازین را برای تشکیل آلوتروپ‌های کربونیتريد گرافیتی نشان می‌دهد که اتم‌های نیتروژن تقریباً جایگزین اتم‌های کربن می‌شوند [۱۳۴ و ۱۳۵].



شکل ۴۴. ساختار کربونیتريد گرافیتی: (الف) هپتازین و (ب) تریازین [۱۳۶]

ویژگی‌ها: از جمله خواص این ماده می‌توان به کاف انرژی قابل تنظیم، پایداری حرارتی، پایداری در برابر اسید و توزیع نسبتاً آسان به‌علت دافعه بین لایه‌ها اشاره کرد [۱۳۴].

۲-۶-۱- کاربرد کربونیتريد گرافیتی

کاتالیزور: از نیمه‌رسانای کربونیتريد گرافیتی، به‌دلیل پایداری شیمیایی بالا، به‌صورت گسترده به‌عنوان کاتالیزور استفاده می‌شود که کاتالیزور ویژه $Pd/g-C_3N_4$ ، نمونه‌ای از آن است [۱۳۷].

حسگر: کربونیتريد گرافیتی، خاصیت نورتابناکی مشابه مواد نیمه‌رسانا از خود نشان می‌دهد. این ماده، زمانی که در حلال، تحت تابش فرابنفش (UV) حل می‌شود، به‌علت کاف انرژی مستقیم (۲/۷ الکترون ولت) در محدوده ۴۵۰ نانومتر، نورتابناکی آبی منتشر می‌کند [۱۳۸]. نانولایه‌های کربونیتريد گرافیتی، در کنار خاصیت نورتابناکی، به یون‌های مس، به عنوان حسگر شیمیایی خاموش‌شونده، پاسخ قوی می‌دهند [۱۳۴ و ۱۳۹].

۲-۷- رس‌های دوبعدی

اولین ماده در خانواده رس‌های آنیونی طبیعی در سال

^۱ Hydrotalcite

در آب افزایش می‌یابد [۱، ۱۴۴ و ۱۴۵].

۲-۷-۳- هیدروکسیدهای دولایه‌ای

هیدروکسیدهای دولایه‌ای (LDH) که به‌عنوان رس آنیونی نیز شناخته می‌شوند، در طبقه مواد رسی دوبعدی قرار می‌گیرند. هیدروکسیدهای دولایه‌ای دارای فرمول کلی $M^{2+}_{1-x} M^{3+}_x (OH)_2 [A^{p-}_{x/p}]^{x+} \cdot mH_2O$ هستند که M^{2+} و M^{3+} ، به ترتیب، کاتیون‌های فلز دوظرفیتی و سه‌ظرفیتی هستند. ساختار LDH، متشکل از لایه فلز دوظرفیتی Fe^{2+} ، Zn^{2+} ، Ca^{2+} و غیره است که گاهی کاتیون‌های فلز سه‌ظرفیتی Al^{3+} و Fe^{3+} جایگزین لایه فوق می‌شوند و ساختاری کاتیونی مانند ساختار بروسیت^۵ را ایجاد می‌کنند. بار مثبت روی لایه‌ها، توسط آنیون‌ها و مولکول‌های آب موجود در فضای بین لایه‌ها، متعادل می‌شود. ترکیبات LDH، به‌عنوان نانوکاتالیزور، مبدل یونی، پرکننده در کامپوزیت‌های پلیمری و جاذب، کاربرد گسترده‌ای دارند. مواد رسی دوبعدی، به‌دلیل سطح ویژه وسیع، فضای بین شبکه زیاد، حساسیت به pH و زیست‌سازگاری مناسب، به گزینه فوق‌العاده‌ای برای تحویل دارو یا انتقال ژن تبدیل شده‌اند. درواقع، ترکیبات LDH می‌توانند مانند انتقال‌دهنده‌های مواد معدنی بالقوه برای دی.ان.ای، ژن‌ها و سایر زیست‌مولکول‌های آنیونی با مزیت اضافی حلالیت در محیط اسیدی عمل کنند [۱].

۲-۷-۳-۱- کاربردهای ترکیبات LDH

مهندسی زیست‌پزشکی: در مقایسه با رس‌های سیلیکاتی، نانوذرات LDH، چگالی بار لایه‌ای بالاتری دارند و برای تک‌لایه‌کردن نانولایه‌ها، به اصلاح‌کننده‌های شیمیایی یا ترکیبات بین‌لایه‌ای بیشتری نیاز است. ترکیبات LDH، به‌دلیل مشکلات روش‌های لایه‌برداری، کمتر از رس‌ها گسترش یافته‌اند. چگالی بار بیشتر، به اتصال قوی‌تر نانوذرات LDH به قسمت‌های غیریونی می‌انجامد. نانوذرات LDH، به‌علت سمیت کم و توانایی برقراری پیوند غیرکوالانسی غیریونی با مولکول‌های دارویی و مواد ژنتیکی، در کاربرد دارورسانی بررسی شده و توجه زیادی را جلب کرده‌اند.

ایجاد می‌شود که به این نانوذرات، ظرفیت بارگذاری بالای دارویی، پایداری آبی و ویژگی‌های رقیق‌شوندگی برشی می‌دهد و همین‌طور واکنش‌پذیری بین نانومواد سلولی را افزایش می‌دهد. در میان سیلیکات‌های موجود در این ساختار، لاپونیت^۱، گسترده‌ترین گروه موادی است که برای کاربردهای زیست‌پزشکی بررسی شده‌اند [۸۲]. بررسی نظام‌مندی دربارهٔ زیست‌سازگاری نانوذرات رسی انجام نشده است، اما در مقایسه با سایر نانومواد دوبعدی بیشتر شناخته شده‌اند. در آزمایش‌های انجام‌شده در داخل بافت زنده و خارج آن^۲، یکی از رس‌ها، به‌عنوان مثال، رس اسمکتیتی^۳ (لاپونیت)، سمیت سلولی و زیست‌سازگاری مطلوبی را نشان داده و در داخل بدن، تخریب نانوذرات اسمکتیتی مشاهده شده است. تجزیه نانوذرات رس، در بین نانومواد دوبعدی نیز تقریباً بی‌نظیر است. نانوذرات سیلیکاتی، نه‌تنها از نظر سمیت، با سلول‌های انسانی سازگاری کوتاه‌مدت دارند، بلکه مشخص شده که چسبندگی سلول و بقا روی سطوح هیدروژل^۴ را هم افزایش می‌دهند [۸۲]. نانوبتونیت، به‌عنوان یکی از ارزان‌ترین و مشهورترین نانورس‌ها، در تولید انواع نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانورس‌ها، بیشترین توجه را به خود جلب کرده است که در کاربردهای مختلفی در صنایع مختلف تا کاربردهای پزشکی قابل استفاده است [۱۴۲ و ۱۴۳].

۲-۷-۲- لاپونیت

لاپونیت، گروه مواد معدنی رسی از نوع ۱:۲ است و شامل لایه‌های هشت‌ضلعی اتم منیزیم است که این لایه‌ها، بین لایه‌های چهارضلعی اتم‌های سیلیکون مرتبط با اتم‌های سدیم، قرار گرفته‌اند. لاپونیت، مواد رسی دوبعدی به‌شکل دیسک با فرمول تجربی $Na^{+0.7} [(Si_8-Mg_{5.5}Li_{0.3}) O_{20} (OH)_4]$ است. لاپونیت معمولاً دارای اندازه ذرات ۲۵ تا ۳۰ نانومتر و ضخامت ۱ نانومتر است که سطح ویژه بالا و ظرفیت تبادل کاتیونی خوبی فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها باعث شده از آن‌ها در انتقال دارو و مبادله یون استفاده شود. برخلاف کائولینیت، به‌دلیل آب‌پوشی کاتیون‌های موجود در لایه‌ها، حجم لاپونیت

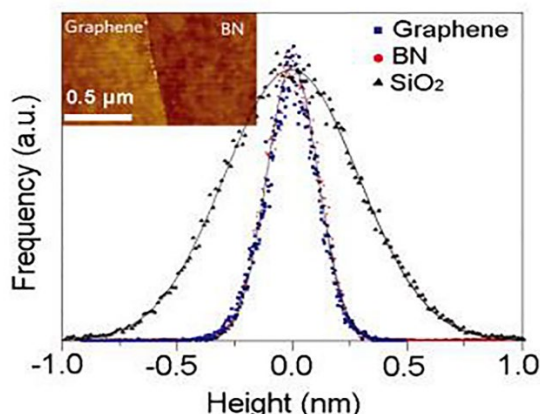
^۱ Laponite

^۲ In vitro & In vivo

^۳ Smectite Clay

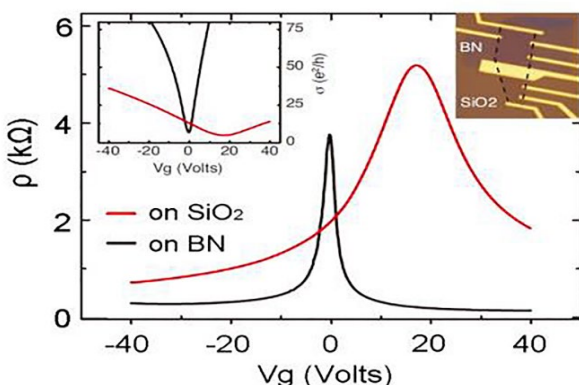
^۴ Hydrogel

عارضه‌نگاری^۱ TMDCs/h-BN و Gr/h-BN، صافی سطح نیتريد بور هگزاگونال بسیار بیشتر از SiO₂ است. همچنین، زبری گرافن روی h-BN از h-BN ایزوله قابل تشخیص نیست و زبری آن حدود سه برابر کمتر از SiO₂ است [۱۴۶، ۱۴۹ و ۱۵۰].



شکل ۴۷. بافت‌نگاشت^۲ توزیع ارتفاع که توسط AFM اندازه‌گیری شده است [۱۴۶]

شکل ۴۸، نشانگر مقاومت الکتریکی تک‌لایه گرافن روی دو نمونه h-BN و SiO₂ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقاومت الکتریکی گرافن روی BN، کمتر از SiO₂ است. همچنین، ثابت شده که ترانزیستورهای اثر میدانی Gr/h-BN، عملکرد بالا با تحرک الکتریکی ۶۰۰۰ سانتی‌مترمربع بر ولت ثانیه را از خود نشان داده‌اند که سه برابر بیشتر از SiO₂ است [۱۴۶].

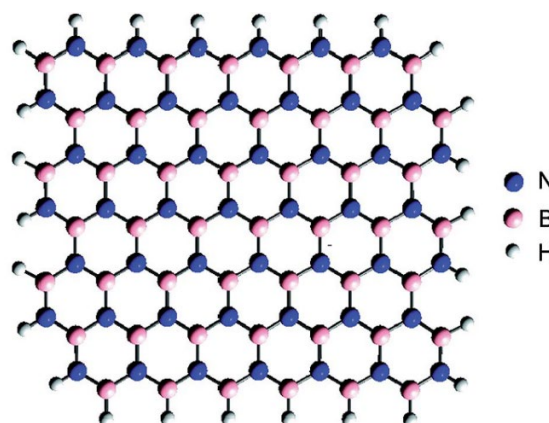


شکل ۴۸. مقاومت اندازه‌گیری‌شده پوشش تک‌لایه گرافن بر زیرلایه‌های h-BN و SiO₂ نشان داده شده است. سمت راست، تصویر نوری نمونه است [۱۴۶]

نانوکامپوزیت‌های LDH، در مقایسه با داربست‌های پلیمری، خواص مکانیکی و حرارتی بهتری دارند. اضافه کردن نانوذرات LDH به لایه پلیمری منجر به افزایش سختی مکانیکی می‌شود. ترکیبات LDH، زیست‌سازگاری عالی، چگالی بار زیاد و توانایی تبادل یونی دارند و امکان کنترل رهایش دارو در مقادیر مختلف pH دارند و همین‌طور جذب سلولی بالایی دارند. این ویژگی‌ها موجب شده است که ترکیبات LDH برای دارورسانی گزینه مناسبی باشند. از دیگر مزایای نانولایه‌های LDH در دارورسانی، امکان استفاده برای انواع سلول‌های خاص (مانند بافت سرطانی) و محبوس شدن آن‌ها در سلول است. این مواد، توانایی ممانعت از آزاد شدن زودهنگام دارو را دارند که این ویژگی برای داروهای سمی، اهمیت فراوانی دارد [۸۲].

۸-۲- نیتريد بور هگزاگونال

این ماده نیز مانند گرافن دارای ساختاری متشکل از اتم‌های بور و نیتروژن است که در یک شبکه لانه‌زنبوری آرایش یافته‌اند. طرح‌واره ساختاری نیتريد بور هگزاگونال در شکل ۴۶ نشان داده شده است. نیتريد بور هگزاگونال، عایقی ویژه با کاف انرژی بزرگ (۵/۷ الکترون ولت)، پایداری دی‌الکتریک پایین، هدایت حرارتی بالا و استحکام مکانیکی عالی است [۱۴۶ و ۱۴۷].



شکل ۴۶. طرح‌واره ساختاری نیتريد بور هگزاگونال [۱۴۸]

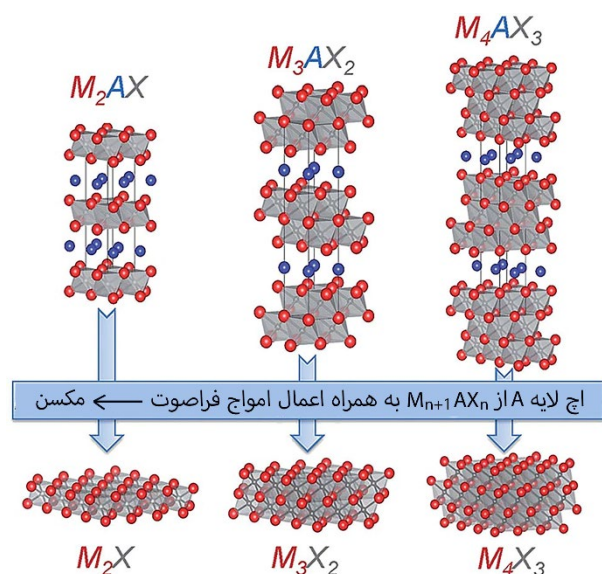
کاربرد نیتريد بور هگزاگونال به‌عنوان زیرلایه یا

دی‌الکتریک: مزیت h-BN، به‌عنوان بستر و زمینه، در مقایسه با SiO₂، عدم تحرک شیمیایی و صافی سطح بدون پیوندهای آزاد و تله‌های بار الکتریکی است. مطابق شکل ۴۷، در بررسی

^۱ Topography

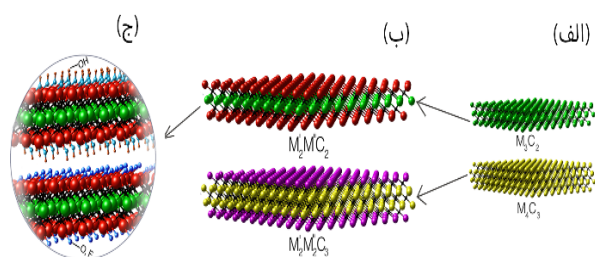
^۲ Histogram

از دو فلز واسطه است. مکسن در این خانواده جدید دارای فرمول عمومی $M_2M''M'$ هستند که M' و M'' ، فلزات واسطه متفاوتی هستند. شکل ۵۰، ساختار مکسن و مکسن با دو فلز واسطه را نشان می‌دهد. کاربردهای سنتز شده با دو فلز واسطه عبارت‌اند از Mo_2TiC_2 ، $Mo_2Ti_2C_3$ و Cr_2TiC_2 . در این مکسن‌های خاص، اتم‌های Mo یا Cr، در لبه‌های بیرونی مکسن قرار دارند و این اتم‌ها، خواص الکتروشیمیایی مکسن را کنترل می‌کنند [۱۵۵].



شکل ۴۹. طرح‌واره ساختاری مکس‌فازها با فرمول عمومی

$M_{n+1}AX_n$ و مکسین‌ها یا فرمول عمومی $M_{n+1}X_n$ [۱۵۴]



شکل ۵۰. الف) طرحواره ساختاری مکسن، ب) ساختار مکسن با

دو فلز واسطه، ج) هر مکسن می تواند دست کم سه گروه منتهی به

سطح مختلف (OH، O و F) داشته باشد [۱۵۵]

رس مکسن: اگر سطح لایه مکسن $M_{n+1}X_n$ پس از

خروج Al، به O، OH و F منتهی شود، فرمول ممکن به صورت $M_{n+1}X_nT_x$ تعریف می شود که T، بیانگر O، OH و F است. برای موارد Ti_2CT_x و $Ti_3C_2T_x$ ، حاکام کردن با

کاربرد زیست‌پزشکی نیتريد بور هگزاگونال: به علت

حلالیت کم، کاربرد آن در دارورسانی (مانند گرافن)، محدود است. ساختاری از h-BN که نقاط کوانتومی گرافن^۱ (GQD) در آن گنجانده شده، فلئوئورسانس سبز، حلالیت بیشتر، پایداری و سمیت کمتری را روی سلول‌های HeLa نشان داده‌اند. اثر نفوذ سلولی و فلئوئورسانس قوی موجب شده است که از آن به‌عنوان حسگر زیستی استفاده شود. علاوه بر آن، کاربرد h-BN که نقاط کوانتومی گرافن در آن گنجانده شده، به‌عنوان نانولوله فلئوئورسنت سبز در تصویربرداری سلولی، ثابت شده است [۱، ۱۵۱ و ۱۵۲]. همچنین، نقاط کوانتومی نیتريد بور، در موارد مختلفی مانند عکس‌برداری و حسگرهای زیستی، به‌کار می‌روند که در بسیاری از روش‌ها، از طریق دوبعدی‌سازی و سپس کاهش ابعاد به‌دست می‌آیند. برای مثال، در گزارشی، از نقاط کوانتومی نیتريد بور دوبعدی که توسط لایه‌برداری مکانیکی-شیمیایی سنتز شده بودند، برای ساخت حسگر ویتامین C استفاده شد [۱۵۳].

۲-۹- مکسن

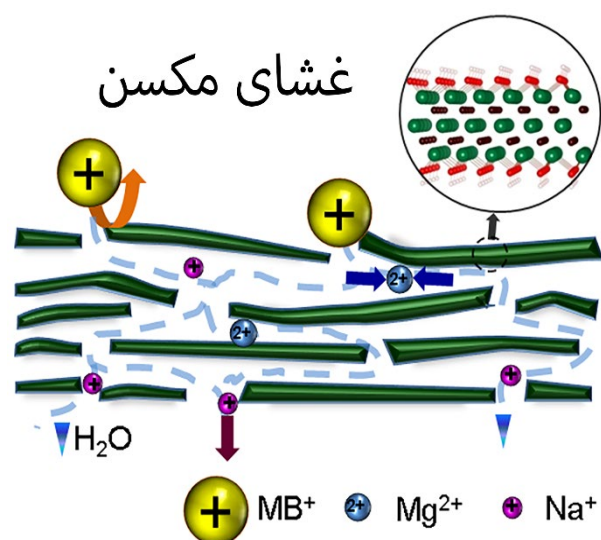
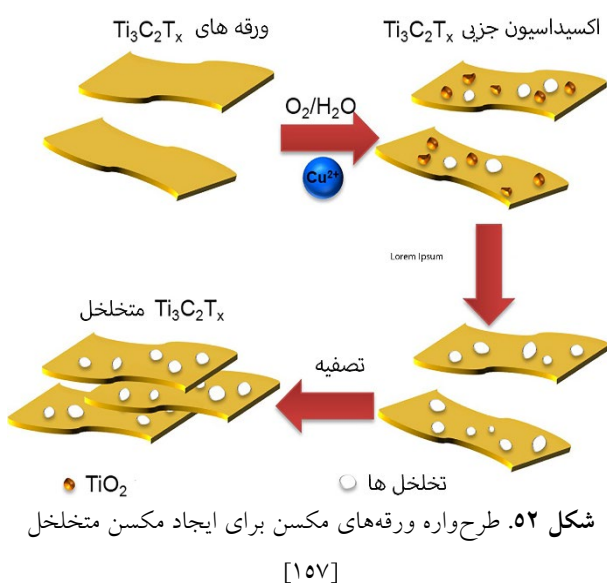
مکسن، گروه جدیدی از کاربیدها یا نیتریدهای فلز واسطه دویعدی هستند که با حذف فلز انتخابی عنصر A از یک مکسن فاز به وسیله فرایند حکاکی کردن، تولید می‌شوند. فرمول عمومی مکسن فازها، $M_{n+1}AX_n$ است که M، فلز واسطه، A، عنصری از گروه ۱۳ یا ۱۴ جدول تناوبی، X، کربن یا نیتروژن و n، برابر با یک، دو یا سه است. طرح‌واره ساختاری مکسن فازها در شکل ۴۹ نشان داده شده است. مکسن فازها دارای ساختار هگزاگونال لایه‌ای هستند، به طوری که لایه‌های M تقریباً فشرده هستند و اتم‌های X، محل‌های هشت‌وجهی را پر می‌کنند. بنابراین، عنصر A، بین لایه‌های $M_{n+1}X_n$ قرار می‌گیرد که به صورت فلزی به عنصر M متصل می‌شود. مکسن‌ها در محلول آبی، به دلیل سطوح منتهی شده به هیدروکسیل یا اکسیژن، آب دوست هستند [۱۵۴].

۲-۹-۱- مکسن یا دو فلز واسطه

مکسن با دو فلز واسطه، کاربید مکسن سنتز شده متشکل

¹ Graphene Quantum Dot

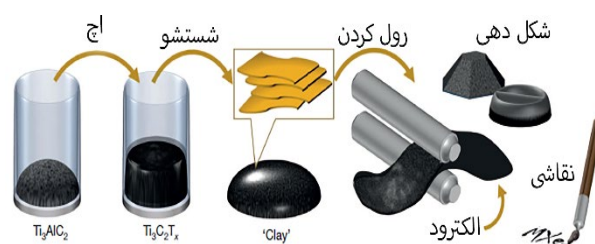
میکرون، جریان آب، شتاب بالایی (تقریباً ۳۸ لیتر بر (بار ساعت مترمربع)) دارد و غربالگری نمک‌ها، وابسته به هر دو شعاع آب‌پوشی و بار یون‌هاست. در شکل ۵۳، طرح‌واره نفوذ کاتیون‌های مختلف از غشای مکسن نشان داده شده است. کاتیون بزرگ‌تر، از فاصله بین‌لایه‌ای مکسن، از طریق غشاهای Ti_3C_2 نفوذ نمی‌کند. ثابت شده است که کاتیون‌ها، با بار بیشتر و شعاع آب‌پوشی کوچک‌تر از فاصله بین‌لایه‌ای مکسن، در مقایسه با کاتیون‌های تک‌ظرفیتی، نفوذ کندتری دارند [۱۵۸].



شکل ۵۳. طرح‌واره نفوذ کاتیون‌های مختلف از غشای مکسن [۱۵۸]

باتری یون سدیم: مکسن‌ها برای ابزارهای ذخیره‌سازی انرژی بر پایه سدیم نیز عملکرد امیدوارکننده‌ای را نشان داده‌اند. Na^+ باید به سرعت روی سطوح مکسن نفوذ کند که در

هیدروفلوریک اسید غلیظ، موجب بازشدن ساختار لایه‌ای (که برای سایر ترکیبات مکسن رایج است) می‌شود. مواد برای پراکنده‌سازی در تعلیق^۱، باید با پیش‌سازنده‌هایی از قبیل دی‌متیل سولفواکسید گنجانده شوند. با این حال، هنگامی که حکاکی کردن با هیدروکلریک اسید و لیتیوم فلوراید، به عنوان منبع فلوراید، انجام می‌شود، ساختار با فاصله بین لایه‌های بزرگ‌تر، احتمالاً به دلیل مقادیر آب بینابینی، فشرده‌تر می‌شود. هنگام هیدراته شدن، رس مکسن قابل انعطاف است و می‌تواند به شکل موردنظر قالب‌گیری شود (شکل ۵۱) و پس از خشک‌شدن، سخت شود. با این حال، برخلاف بسیاری از رس‌ها، مکسن، هنگام خشک شدن، هدایت الکتریکی بالایی از خود نشان می‌دهد و همین‌طور دارای طبیعت آب‌دوستی است، به گونه‌ای که ورقه‌های دوبعدی تک‌لایه در آب بدون عامل سطح‌فعال^۲، پراکنده می‌شوند [۱۵۶].



شکل ۵۱. مکس فاز حکاکی شده در محلول اسید و نمک فلورید، محصول حاصل پس از شست‌وشو، مانند رس رفتار می‌کند و انعطاف‌پذیر و شکل‌پذیر است یا می‌تواند روی زمینه‌ای کشیده شود و به صورت پوشش رسانا باشد [۱۵۶]

مکسن‌های متخلخل: مکسن‌های متخلخل (Ti_3C_2)

از طریق حکاکی کردن شیمیایی در دمای اتاق تولید می‌شوند (شکل ۵۲). Ti_3C_2 متخلخل دارای سطح ویژه بزرگ‌تر و ساختار بازتر است و می‌تواند به عنوان فیلم انعطاف‌پذیر، با افزودن نانولوله‌های کربنی (CNT) یا بدون آن فیلتر شود. ساخت فیلم‌های P- Ti_3C_2 /CNT، توانایی ذخیره‌سازی یون‌های لیتیوم را بهبود می‌بخشد [۱۵۷].

۲-۹-۲- کاربرد مکسن

تصفیه آب: در غشای مکسن Ti_3C_2 با ضخامت یک

^۱ Suspension

^۲ Surfactants

۲-۱۰- فلزات و آلیاژهای دوبعدی

اتم‌های فلزی تمایل فراوانی به تشکیل ساختار سه‌بعدی بسته دارند. بنابراین، تهیه ساختار دوبعدی بسیار نازک و پایدار از آن‌ها دشوار خواهد بود. اخیراً آماده‌سازی نانوصفحه‌های Pd، Rh و Ru با ضخامت فلزی، به ترتیب، ۱/۸، ۱/۳ و ۱/۵ نانومتر گزارش شده است [۱۶۱].

همچنین، در مطالعه‌ای، سیستمی دوبعدی از تک‌لایه Pb-Sn، روی Rh(111) مشاهده شد و برآورد شد زمینه مناسبی برای برهم‌کنش اتمی سرب و قلع باشد [۱۶۲].

در پژوهشی، رشد تک‌لایه پلاتین روی گرافیت بررسی شد. این حالت، تأثیر گسترده‌ای بر علم و فناوری سطوح و خواص مرزی خواهد گذاشت. برای نمونه، کاهش پراکندگی الکترون/فونون و افزایش سطح می‌تواند تا حدی به صورت نظری بررسی شوند. همچنین، گرافن، در مقابل انتقال اکثر اتم‌ها و مولکول‌های استاندارد کوچک، به صورت تجربی غیرقابل نفوذ است. به این معنا که مرز گرافن-فلز هم‌بافته می‌تواند ماده امیدبخشی در مقاومت به خوردگی باشد. اگر فلز بتواند روی گرافن، به صورت لایه‌های نازک اتمی، رسوب کند، می‌تواند به عنوان کاتالیزور به کار رود. ثابت شده است که ستنز لایه‌به‌لایه پلاتین چندلایه/گرافن/طلا امکان‌پذیر است و در این شرایط، تنش فشاری قابل اندازه‌گیری، از گرافن به پلاتین منتقل می‌شود و با توجه به ساختار الکترونیکی هیبریدی، امکان انتقال بار از طلا به سطح پلاتین، از طریق گرافن، وجود دارد. گرافن، در این شرایط، دو وظیفه را ایفا می‌کند؛ هم می‌تواند زمینه‌ای برای رشد فلز باشد و هم محافظی در برابر ازدست‌رفتن کاتالیزور. این ماده، در حالت اول، تعداد اتم‌های سطحی‌شده را افزایش می‌دهد و در حالت دوم، از فعالیت کاتالیزوری، مانند واکنش احیای کاتالیزوری، جلوگیری می‌کند [۱۶۳].

همان‌طور که گفته شد، کشف گرافن (اولین ماده دوبعدی)، به علت خواص غیرمعمول، زمینه‌ساز دستیابی به سایر مواد دوبعدی با ظرفیت‌های ویژگی و کاربردی مشابه گرافن شد. در آینده، با انجام پژوهش‌های بیشتر، نه تنها مواد دوبعدی دیگری شناسایی خواهد شد، بلکه تنوع بسیار زیادی از این مواد، با مشخصه‌های مختلف، با استفاده از شبیه‌سازی‌های گسترده، علم داده‌ها و یادگیری ماشین،

این صورت، برای شارژ/تخلیه سریع مناسب است. دو لایه Na^+ می‌تواند بین لایه‌های مکسن قرار گیرد. به عنوان مثال، برای یک نمونه معمول، مکسن Ti_2CT_x چندلایه، به عنوان ماده الکتروود منفی، ظرفیت ۱۷۵ میلی‌آمپر ساعت بر گرم و توانایی مناسب برای ذخیره‌سازی یون الکتروشیمیایی سدیم را نشان داده است. می‌توان با تغییر فلز واسطه و گروه‌های عملکردی سطح، پتانسیل قرارگیری یون‌های سدیم مکسن‌ها را تنظیم کرد. مکسن V_2CT_x ، به عنوان الکتروود مثبت، با موفقیت برای ذخیره‌سازی یون سدیم استفاده شده است. گزارش شده است که الکتروودهای ورقه‌ای بر پایه مکسن متخلخل نیز دارای ظرفیت‌های حجمی بالا و عملکرد چرخه‌ای ثابت هستند که این امر نشان می‌دهد مکسن‌ها، برای ابزارهای ذخیره‌سازی انرژی بر پایه سدیم، در مواردی که اندازه اهمیت دارد، مناسب هستند [۱۵۹].

حسگر: عملکرد شیمیایی سطوح مکسن، به وسیله

گروه‌های روی آن، مانند O، F و OH انجام می‌شود و از این طریق می‌توان به کاربردهای شیمیایی مکسن، از جمله حسگر، دست یافت. حسگرهای مبتنی بر مکسن، به عنوان طرحی پیشرفته و مفید برای تشخیص در زمینه‌های بهداشت، محیط زیست و دارو در نظر گرفته شده‌اند. به منظور تشخیص مولکول‌های زیستی، الکتروودهای اصلاح‌شده با مکسن، مبدل مؤثری برای بی‌حرکت‌سازی دریافت‌کننده‌های زیست‌پزشکی (مانند آنزیم‌ها) روی سطح آن هستند. برای مثال، نانوکامپوزیت نانوذرات طلا-مکسن ((Au-NP)-MXene)، سطحی مناسب برای بی‌حرکتی گلوکز اکسیداز^۱ (GOx) است. مکسن‌ها در کاربرد زیست‌محیطی نیز، به دلیل تشخیص آلودگی‌ها، مواد امیدوارکننده‌ای هستند. برای مثال، زیست‌حسگر Ti_3C_2 -تیروزیناز^۲، می‌تواند برای تشخیص فنل^۳ استفاده شود. مکسن‌ها، در تشخیص گازهای سمی نیز مفیدند و می‌توانند مانند حسگر گازی عمل کنند. مکسن می‌تواند استون $(\text{CH}_3\text{COOCH}_3)$ و آمونیا (NH_3) را تشخیص دهد که به ترتیب، در تشخیص بیماری‌هایی مانند دیابت و زخم معده مؤثرند [۱۶۰].

^۱ Glucose Oxidase

^۲ Ti_3C_2 -Tyrosinase

^۳ Phenol

6. Goenka, S., Sant, V., Sant, S., "Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering", *Journal of Controlled Release*, Vol. 173, (2014), 75-88. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2013.10.017>
7. Vargas-Bernal, R., "Electrical properties of two-dimensional materials used in gas sensors", *Sensors (Switzerland)*, Vol. 19, No. 6, (2019). <https://doi.org/10.3390/s19061295>
8. Bhuyan, M. S. A., Uddin, M. N., Islam, M. M., Bipasha, F. A., Hossain, S. S., "Synthesis of graphene", *International Nano Letters*, Vol. 6, No. 2, (2016), 65-83. <https://doi.org/10.1007/s40089-015-0176-1>
9. Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., Hone, J., "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene", *Science*, Vol. 321, No. 5887, (2008), 385. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>
10. Geim, A. K., "Graphene: Status and prospects", *Science*, Vol. 324, No. 5934, (2009), 1530. <https://doi.org/10.1126/science.1158877>
11. Daneshmand, S. H., Zakeri, M., Shojaei, T., Mohammadbeigy, A., Nazari, A., "The effect of graphene percent on mechanical properties of Cu/graphene nanocomposites", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 3, No. 1, (2014), 37-43. (In Farsi). <https://doi.org/10.30501/jamt.2635.70250>
12. Novoselov, K. S., Fal'k, V. I., Colombo, L., Gellert, P. R., Schwab, M. G., Kim, K., "A roadmap for graphene", *Nature*, Vol. 490, No. 7419, (2012), 192-200. <https://doi.org/10.1038/nature11458>
13. Castro Neto, A. H., Guinea, F., Peres, N. M. R., Novoselov, K. S., Geim, A. K., "The electronic properties of graphene", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 81, No. 1, (2009), 109-162. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.109>
14. Ghosh, S., Bao, W., Nika, D. L., Subrina, S., Pokatilov, E. P., Lau, C. N., Balandin, A. A., "Dimensional crossover of thermal transport in few-layer graphene", *Nature Materials*, Vol. 9, No. 7, (2010), 555-558. <https://doi.org/10.1038/NMAT2753>
15. Lee, W., Kihm, K. D., Ko, S. H., "Thermal conductivity reduction of multilayer graphene with fine grain sizes", *JMST Advances*, Vol. 1, No. 1-2, (2019), 191-195. <https://doi.org/10.1007/s42791-019-0008-y>
16. Tang, K., Zhu, F., Li, Y., Duan, K., Liu, S., Chen, Y., "Effect of defects on thermal conductivity of graphene", *Proceedings of 15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, Chengdu, China, IEEE, (2014), 592-595. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2014.6922725>
17. Ghanbari, H., Sarraf-Mamoori, R., Sabaghzadeh, J., Malekfar, R., "Semiconducting coating based on laser-synthesized graphene nanosheets", *Iranian Journal of Ceramic Science & Technology*, Vol. 2, No. 2, (2013), 85-96. (In Farsi). <http://ijcse.ir/article-1-121-fa.html>
18. Balandin, A. A., "Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials", *Nature Materials*, Vol. 10, No. 8, (2011), 569-581. <https://doi.org/10.1038/nmat3064>
19. Bunch, J. S., Verbridge, S. S., Alden, J. S., van der Zande, A. M., Parpia, J. M., Craighead, H. G., McEuen, P. L., "Impermeable atomic membranes from graphene sheets", *Nano Letters*, Vol. 8, No. 8, (2008), 2458-2462. <https://doi.org/10.1021/nl801457b>
20. Jalili, M., Ghanbari, H., Moemen Bellah, S., Malekfar, R., "High-quality liquid phase-pulsed laser ablation graphene synthesis by flexible graphite exfoliation", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 35, No. 3, (2019), 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.048>
21. Ghanbari, H., Sarraf-Mamoori, R., Sabbagh Zadeh, J., Chehrghani, A., Malekfar, R., "Nonlinear optical absorption of carbon nanostructures synthesized by laser ablation of highly oriented pyrolytic graphite in organic solvents", *International Journal of Optics and Photonics (IJOP)*, Vol. 7, No. 2, (2013), 113-124. <http://ijop.ir/article-1-161-en.html>
22. Ghanbari, H., "LP-PLA of graphite for the graphene nanosheets synthesis in different solvents and by diverse lasers", *Proceedings of 5th International Conference on Nanoscience and Nanotechnology*, Tehran, Iran, (2014).
23. Ghanbari, H., Shafikhani, M. A., Daryalaal, M., "Graphene nanosheets production using liquid-phase exfoliation of pre-milled graphite in dimethylformamide and structural defects

پیش‌بینی، طراحی و بر حسب کاربرد، سنتز و در زمینه‌های مختلف، به‌صورت گزینشی به‌کارگرفته خواهد شد. این مواد در زمینه مواد دوبعدی اولیه نیز تولید و در صنایع مختلف، استفاده خواهند شد. تنوع ساختار و مشخصه‌های این مواد و پتانسیل‌های صنعتی آن‌ها موجب افزایش انگیزه پژوهشگران برای کار در این حوزه شده است و پیش‌بینی می‌شود تعداد پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص این مواد افزایش یابد و خواص و کاربردهای بیشتری از آن‌ها معرفی شود و در آینده، به‌صورت تجاری، تولید و جایگزین بسیاری از مواد مورد استفاده فعلی شوند.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تلاش شده است مواد دوبعدی، با رویکرد مهندسان مواد، به‌طور کامل دسته‌بندی شوند. سطح ویژه بالای این مواد و تنظیم ویژگی‌های بسیاری از آن‌ها با استفاده از مولکول‌ها و گروه‌های مهمان، باعث شده است که مواد دوبعدی، پتانسیل کاربری گسترده‌ای بیابند. با توجه به کاربرد و ویژگی مدنظر می‌توان مواد دوبعدی جدیدی را در آینده به این فهرست اضافه کرد که در حوزه‌های مختلف به‌کار روند.

۴- سپاسگزاری

از همکاری سرکار خانم مهندس ریحانه گودرزی در بازبینی و ویرایش متن بسیار سپاسگزاریم.

مراجع

1. Jayakumar, A., Surendranath, A., Pv, M., "2D materials for next generation healthcare applications", *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 551, No. 1-2, (2018), 309-321. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.09.041>
2. Mohamadnezhad, M., "Ultrathin two-dimensional nanomaterial introduction and application", *Donyaye Nano*, Vol. 15, No. 54, (2019), 70-80. (In Farsi). http://donyayenano.ir/article_46116.html
3. Kim, F., Cote, L., Huang, J., "Graphene oxide: Surface activity and two-dimensional assembly", *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, Vol. 22, (2010), 1954-1958. <https://doi.org/10.1002/adma.200903932>
4. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Firsov, A. A., "Electric field in atomically thin carbon films", *Science*, Vol. 306, No. 5696, (2004), 666-669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
5. Huo, C., Huo, C., Yan, Z., Song, X., Zeng, H., "2D materials via liquid exfoliation: A review on fabrication and applications", *Science Bulletin*, Vol. 60, No. 23, (2015), 1994-2008. <https://doi.org/10.1007/s11434-015-0936-302896>

- submicrorods for non-enzymatic electrochemical biosensing: Application to amperometric glucose detection", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 167, No. 8, (2020), 087513. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab91c5>
41. Vanzo, D., Bratko, D., Luzar, A., "Wettability of pristine and alkyl-functionalized graphane", *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 137, No. 3, (2012), 034707. <https://doi.org/10.1063/1.4732520>
 42. Inagaki, M., Kang, F., "Graphene derivatives: Graphane, fluorographene, graphene oxide, graphyne and graphdiyne", *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 2, No. 33, (2014), 13193-13206. <https://doi.org/10.1039/C4TA01183J>
 43. Son, J., Lee, S., Kim, S. J., Park, B. C., Lee, H. -K., Kim, S., Kim, J. H., Hong, B. H., Hong, J., "Hydrogenated monolayer graphene with reversible and tunable wide band gap and its field-effect transistor", *Nature Communications*, Vol. 7, No. 1, (2016), 13261. <https://doi.org/10.1038/ncomms13261>
 44. Nair, R. R., Ren, W., Jalil, R., Riaz, I., Kravets, V. G., Britnell, L., Blake, P., Schedin, F., Mayorov, A. S., Yuan, S., Katsnelson, M. I., Cheng, H. -M., Strupinski, W., Bulusheva, L. G., Okotrub, A. V., Grigorieva, I. V., Grigorenko, A. N., Novoselov, K. S., Geim, A. K., "Fluorographene: A two-dimensional counterpart of teflon", *Small*, Vol. 6, No. 24, (2010), 2877-2884. <https://doi.org/10.1002/smll.201001555>
 45. Hong, X., Cheng, S. H., Herding, C., Zhu, J., "Colossal negative magnetoresistance in dilute fluorinated graphene", *Physical Review B*, Vol. 83, No. 8, (2011), 085410. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.83.085410>
 46. Chang, H., Cheng, J., Liu, X., Gao, J., Li, M., Li, J., Tao, X., Ding, F., Zheng, Z., "Facile synthesis of wide-bandgap fluorinated graphene semiconductors", *Chemistry – A European Journal*, Vol. 17, No. 32, (2011), 8896-8903. <https://doi.org/10.1002/chem.201100699>
 47. Paupitz, R., Autreto, P. A. S., Legoas, S. B., Srinivasan, S. G., van Duin, A. C. T., Galvão, D. S., "Graphene to fluorographene and fluorographane: A theoretical study", *Nanotechnology*, Vol. 24, No. 3, (2012), 035706. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/3/035706>
 48. Chronopoulos, D. D., Bakandritsos, A., Pykal, M., Zbořil, R., Otyepka, M., "Chemistry, properties, and applications of fluorographene", *Applied Materials Today*, Vol. 9, (2017), 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.05.004>
 49. Jia, Z., Li, Y., Zuo, Z., Liu, H., Huang, C., Li, Y., "Synthesis and properties of 2D carbon-graphdiyne", *Accounts of Chemical Research*, Vol. 50, No. 10, (2017), 2470-2478. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.7b00205>
 50. Li, J., Gao, X., Zhu, L., Ghazzal, M. N., Zhang, J., Tung, C. H., Wu, L. Z., "Graphdiyne for crucial gas involved catalytic reactions in energy conversion applications", *Energy & Environmental Science*, Vol. 13, No. 5, (2020), 1326-1346. <https://doi.org/10.1039/C9EE03558C>
 51. Li, G., Li, Y., Liu, H., Guo, Y., Li, Y., Zhu, D., "Architecture of graphdiyne nanoscale films", *Chemical Communications*, Vol. 46, No. 19, (2010), 3256-3258. <https://doi.org/10.1039/B922733D>
 52. Qian, X., Liu, H., Huang, C., Chen, S., Zhang, L., Li, Y., Wang, J., Li, Y., "Self-catalyzed growth of large-area nanofilms of two-dimensional carbon", *Scientific Reports*, Vol. 5, No. 1, (2015), 7756. <https://doi.org/10.1038/srep07756>
 53. Pari, S., Cuéllar, A., Wong, B. M., "Structural and electronic properties of graphdiyne carbon nanotubes from large-scale DFT calculations", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 120, No. 33, (2016), 18871-18877. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b05265>
 54. Zhou, J., Gao, X., Liu, R., Xie, Z., Yang, J., Zhang, S., Zhang, G., Liu, H., Li, Y., Zhang, J., Liu, Z., "Synthesis of graphdiyne nanowalls using acetylenic coupling reaction", *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 137, No. 24, (2015), 7596-7599. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b04057>
 55. Qian, X., Ning, Z., Li, Y., Liu, H., Ouyang, C., Chen, Q., Li, Y., "Construction of graphdiyne nanowires with high-conductivity and mobility", *Dalton Transactions*, Vol. 41, No. 3, (2012), 730-733. <https://doi.org/10.1039/C1DT11641J>
 56. Xiao, J., Shi, J., Liu, H., Xu, Y., Lv, S., Luo, Y., Li, D., Meng, Q., Li, Y., "Efficient CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells based on graphdiyne (GD)-modified P3HT hole-transporting material", evaluation", *Ceramics International*, Vol. 45, No. 16, (2019), 20051-20057. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.267>
 24. Perruisseau-Carrier, J., Tamagnone, M., Gomez-Diaz, J. S., Carrasco, E., "Graphene antennas: can integration and reconfigurability compensate for the loss?", *Proceedings of 2013 European Microwave Conference*, Nuremberg, Germany, IEEE, (2013), 369-372. <http://doi.org/10.23919/EuMC.2013.6686668>
 25. Han, S. -J., Jenkins, K. A., Valdes Garcia, A., Franklin, A. D., Bol, A. A., Haensch, W., "High-frequency graphene voltage amplifier", *Nano Letters*, Vol. 11, No. 9, (2011), 3690-3693. <https://doi.org/10.1021/nl2016637>
 26. Dubey, A., Dave, S., Lakhani, M., Sharma, A., "Applications of graphene for communication, electronics and medical fields: A review", *Proceedings of 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, India, IEEE, (2016), 2435-2439. <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755131>
 27. Ke, Q., Wang, J., "Graphene-based materials for supercapacitor electrodes – A review", *Journal of Materiomics*, Vol. 2, No. 1, (2016), 37-54. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2016.01.001>
 28. Syama, S., Mohanan, P. V., "Comprehensive application of graphene: Emphasis on biomedical concerns", *Nano-Micro Letters*, Vol. 11, No. 1, (2019), 6. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0237-5>
 29. Chen, D., Feng, H., Li, J., "Graphene oxide: Preparation, functionalization, and electrochemical applications", *Chemical Reviews*, Vol. 112, No. 11, (2012), 6027-6053. <https://doi.org/10.1021/cr300115g>
 30. Abadi, Z., Sangpour, P., Tajabadi, F., "Fabrication of graphene oxide thin films on transparent substrate via a low-voltage electrodeposition technique", *Advanced Ceramics Progress*, Vol. 1, No. 2, (2015), 6-10. <https://doi.org/10.30501/acp.2015.70004>
 31. Eshghinejad, P., Farnoush, H., "Mechanical properties of electrophoretically deposited 45S5 bioglass-graphene oxide composite coatings", *Advanced Ceramics Progress*, Vol. 5, No. 4, (2019), 17-23. <https://doi.org/10.30501/acp.2019.103586>
 32. Smith, A. T., LaChance, A. M., Zeng, S., Liu, B., Sun, L., "Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites", *Nano Materials Science*, Vol. 1, No. 1, (2019), 31-47. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.004>
 33. Abraham, J., Vasu, K. S., Williams, C. D., Gopinadhan, K., Su, Y., Cherian, C. T., Dix, J., Prestat, E., Haigh, S. J., Grigorieva, I. V., Carbone, P., Geim, A. K., Nair, R. R., "Tunable sieving of ions using graphene oxide membranes", *Nature Nanotechnology*, Vol. 12, No. 6, (2017), 546-550. <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.21>
 34. Ma, M., Guo, L., Anderson, D. G., Langer, R., "Bio-inspired polymer composite actuator and generator driven by water gradients", *Science*, Vol. 339, No. 6116, (2013), 186. <https://doi.org/10.1126/science.1230262>
 35. Pei, S., Cheng, H. -M., "The reduction of graphene oxide", *Carbon*, Vol. 50, No. 9, (2012), 3210-3228. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.11.010>
 36. Stankovich, S., Dikin, D. A., Piner, R. D., Kohlhaas, K. A., Kleinhammes, A., Jia, Y., Wu, Y., Nguyen, S. T., Ruoff, R. S., "Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide", *Carbon*, Vol. 45, No. 7, (2007), 1558-1565. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.02.034>
 37. Williams, G., Seger, B., Kamat, P. V., "TiO₂-graphene nanocomposites. UV-assisted photocatalytic reduction of graphene oxide", *ACS Nano*, Vol. 2, No. 7, (2008), 1487-1491. <https://doi.org/10.1021/nn800251f>
 38. Yang, S., Lohe, M. R., Müllen, K., Feng, X., "New-generation graphene from electrochemical approaches: production and applications", *Advanced Materials*, Vol. 28, No. 29, (2016), 6213-6221. <https://doi.org/10.1002/adma.201505326>
 39. Munasir, N., Kusumawati, R. P., Kusumawati, D. H., Supardi, Z. A. I., Taufiq, A., Darminto, D., "Characterization of Fe₃O₄/rGO composites from natural sources: application for dyes color degradation in aqueous solution", *International Journal of Engineering*, Vol. 33, No. 1, (2020), 18-27. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.01a.03>
 40. Mohammadzadeh, A., Mazaheri, M., Sedighian, A., Ghanbari, H., Simchi, A., "Composites of reduced graphene oxide/nickel

- semiconductor layers: Application to transition metal dichalcogenides", *Ceramics International*, Vol. 44, No. 13, (2018), 15795-15803. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.256>
75. Barua, S., Dutta, H. S., Gogoi, S., Devi, R., Khan, R., "Nanostructured MoS₂-based advanced biosensors: A review", *ACS Applied Nano Materials*, Vol. 1, No. 1, (2018), 2-25. <https://doi.org/10.1021/acsanm.7b00157>
 76. Syu, Y. -C., Hsu, W. -E., Lin, C. -T., "Review—Field-effect transistor biosensing: Devices and clinical applications", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, Vol. 7, No. 7, (2018), 3196-3207. <https://doi.org/10.1149/2.0291807jss>
 77. Kalantar-zadeh, K., Ou, J. Z., Daeneke, T., Mitchell, A., Sasaki, T., Fuhrer, M. S., "Two dimensional and layered transition metal oxides", *Applied Materials Today*, Vol. 5, (2016), 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.09.012>
 78. Osada, M., Sasaki, T., "Exfoliated oxide nanosheets: New solution to nanoelectronics", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 19, No. 17, (2009), 2503-2511. <https://doi.org/10.1039/B820160A>
 79. Yang, T., Song, T. T., Callsen, M., Zhou, J., Chai, J. W., Feng, Y. P., Wang, S. J., Yang, M., "Atomically thin 2D transition metal oxides: Structural reconstruction, interaction with substrates, and potential applications", *Advanced Materials Interfaces*, Vol. 6, No. 1, (2019). <https://doi.org/10.1002/admi.201801160>
 80. Osada, M., Sasaki, T., "Two-dimensional dielectric nanosheets: Novel nanoelectronics from nanocrystal building blocks", *Advanced Materials*, Vol. 24, No. 2, (2012), 210-228. <https://doi.org/10.1002/adma.201103241>
 81. Green, M. A., Ho-Baillie, A., Snaith, H. J., "The emergence of perovskite solar cells", *Nature Photonics*, Vol. 8, No. 7, (2014), 506-514. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.134>
 82. Chimene, D., Alge, D.L., Gaharwar, A. K., "Two-dimensional nanomaterials for biomedical applications: Emerging trends and future prospects", *Advanced Materials*, Vol. 27, No. 45, (2015), 7261-7284. <https://doi.org/10.1002/adma.201502422>
 83. Takada, K., Sakurai, H., Takayama-Muromachi, E., Izumi, F., Dilanian, R. A., Sasaki, T., "Superconductivity in two-dimensional CoO₂ layers", *Nature*, Vol. 422, No. 6927, (2003), 53-55. <https://doi.org/10.1038/nature01450>
 84. Damascelli, A., Hussain, Z., Shen, Z. -X., "Angle-resolved photoemission studies of the cuprate superconductors", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 75, No. 2, (2003), 473-541. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.473>
 85. Liang, L., Li, K., Xiao, C., Fan, S., Liu, J., Zhang, W., Xu, W., Tong, W., Liao, J., Zhou, Y. Ye, B., "Vacancy associates-rich ultrathin nanosheets for high performance and flexible nonvolatile memory device", *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 137, No. 8, (2015), 3102-3108. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b00021>
 86. Ameri, M., Yoosefi, M., "Power and fresh water production by solar energy, fuel cell, and reverse osmosis desalination", Vol. 3, No. 1, (2016), 25-34. <https://doi.org/10.30501/jree.2016.70075>
 87. Zhou, C., Lin, H., He, Q., Xu, L., Worku, M., Chaaban, M., Lee, S., Shi, X., Du, M. -H., Ma, B., "Low dimensional metal halide perovskites and hybrids", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 137, No. (2019), 38-65. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.12.001>
 88. Azimi-Nam, S., Farhani, F., "Effect of temperature on electrical parameters of phosphorous spin-on diffusion of polysilicon solar cells", *Journal of Renewable Energy and Environment (JREE)*, Vol. 4, No. 1, (2017), 41-45. <https://doi.org/10.30501/jree.2017.70105>
 89. Grätzel, M., "The rise of highly efficient and stable perovskite solar cells", *Accounts of Chemical Research*, Vol. 50, No. 3, (2017), 487-491. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00492>
 90. Saparov, B., Mitzi, D. B., "Organic-inorganic perovskites: Structural versatility for functional materials design", *Chemical Reviews*, Vol. 116, No. 7, (2016), 4558-4596. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00715>
 91. Dunlap-Shohl, W. A., Zhou, Y., Padture, N. P., Mitzi, D. B., "Synthetic approaches for halide perovskite thin films", *Chemical Reviews*, Vol. 119, No. 5, (2019), 3193-3295. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00318>
 - Advanced Energy Materials*, Vol. 5, No. 8, (2015), 1401943. <https://doi.org/10.1002/aenm.201401943>
 57. Peng, Q., Dearden, A. K., Crean, J., Han, L., Liu, S., Wen, X., De, S., "New materials graphyne, graphdiyne, graphone, and graphane: Review of properties, synthesis, and application in nanotechnology", *Nanotechnology, Science and Applications*, Vol. 7, No. 2, (2014), 1-29. <https://doi.org/10.2147/NSA.S40324>
 58. Kim, B. G., Choi, H. J., "Graphyne: Hexagonal network of carbon with versatile Dirac cones", *Physical Review B*, Vol. 86, No. 11, (2012), 115435. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.115435>
 59. Pan, L. D., Zhang, L. Z., Song, B. Q., Du, S. X., Gao, H. -J., "Graphyne- and graphdiyne-based nanoribbons: Density functional theory calculations of electronic structures", *Applied Physics Letters*, Vol. 98, No. 17, (2011), 173102. <https://doi.org/10.1063/1.3583507>
 60. Kang, J., Li, J., Wu, F., Li, S. -S., Xia, J. -B., "Elastic, electronic, and optical properties of two-dimensional graphyne sheet", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 115, No. 42, (2011), 20466-20470. <https://doi.org/10.1021/jp206751m>
 61. Zhang, Y. Y., Pei, Q. X., Wang, C. M., "Mechanical properties of graphynes under tension: A molecular dynamics study", *Applied Physics Letters*, Vol. 101, No. 8, (2012), 081909. <https://doi.org/10.1063/1.4747719>
 62. Zhou, J., Sun, Q., "How to fabricate a semihydrogenated graphene sheet? A promising strategy explored", *Applied Physics Letters*, Vol. 101, No. 7, (2012), 073114. <https://doi.org/10.1063/1.4746756>
 63. Fiori, G., Lebègue, S., Betti, A., Michetti, P., Klintonberg, M., Eriksson, O., Iannaccone, G., "Simulation of hydrogenated graphene field-effect transistors through a multiscale approach", *Physical Review B*, Vol. 82, No. 15, (2010), 153404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.153404>
 64. Wu, M., Burton, J. D., Tsymbal, E. Y., Zeng, X. C., Jena, P., "Hydroxyl-decorated graphene systems as candidates for organic metal-free ferroelectrics, multiferroics, and high-performance proton battery cathode materials", *Physical Review B*, Vol. 87, No. 8, (2013), 081406. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.081406>
 65. Reddy, C. D., Zhang, Y. W., Shenoy, V. B., "Patterned graphone—A novel template for molecular packing", *Nanotechnology*, Vol. 23, No. 16, (2012), 165303. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/16/165303>
 66. Zeng, H., Cui, X., "An optical spectroscopic study on two-dimensional group-VI transition metal dichalcogenides", *Chemical Society Reviews*, Vol. 44, No. 9, (2015), 2629-2642. <https://doi.org/10.1039/C4CS00265B>
 67. Cotrufo, M., Sun, L., Choi, J., Alù, A., Li, X., "Enhancing functionalities of atomically thin semiconductors with plasmonic nanostructures", *Nanophotonics*, Vol. 8, No. 4, (2019), 577-598. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0185>
 68. Splendiani, A., Sun, L., Zhang, Y., Li, T., Kim, J., Chim, C. -Y., Galli, G., Wang, F., "Emerging photoluminescence in monolayer MoS₂", *Nano Letters*, Vol. 10, No. 4, (2010), 1271-1275. <https://doi.org/10.1021/nl903868w>
 69. Lopez-Sanchez, O., Lembke, D., Kayci, M., Radenovic, A., Kis, A., "Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS₂", *Nature Nanotechnology*, Vol. 8, No. 7, (2013), 497-501. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.100>
 70. Bertolazzi, S., Brivio, J., Kis, A., "Stretching and breaking of ultrathin MoS₂", *ACS Nano*, Vol. 5, No. 12, (2011), 9703-9709. <https://doi.org/10.1021/nn203879f>
 71. Castellanos-Gomez, A., Poot, M., Steele, G. A., van der Zant, H. S. J., Agraït, N., Rubio-Bollinger, G., "Elastic properties of freely suspended MoS₂ nanosheets", *Advanced Materials*, Vol. 24, No. 6, (2012), 772-775. <https://doi.org/10.1002/adma.201103965>
 72. Xu, M., Liang, T., Shi, M., Chen, H., "Graphene-like two-dimensional materials", *Chemical Reviews*, Vol. 113, No. 5, (2013), 3766-3798. <https://doi.org/10.1021/cr300263a>
 73. Rahmani Taji Boyuk, M. R., Ghanbari, H., Simchi, A., Maghsoumi, A., "Seedless growth of two-dimensional disc-shaped WS₂ layers by chemical vapor deposition", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 257, (2021), 123837. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123837>
 74. Rahmani Taji Boyuk, M. R., Sovizi, S., Ghanbari, H., Simchi, A., Aboudzadeh, N., "Developing seedless growth of atomically thin

- with efficiencies exceeding 22 %", *Science Advances*, Vol. 5, No. 6, (2019), 2543. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2543>
108. Antonatos, N., Ghodrati, H., Sofer, Z., "Elements beyond graphene: Current state and perspectives of elemental monolayer deposition by bottom-up approach", *Applied Materials Today*, Vol. 18, (2020). <https://doi.org/10.1002/sml.201402041>
 109. Zhang, S., Guo, S., Chen, Z., Wang, Y., Gao, H., Gómez-Herrero, J., Ares, P., Zamora, F., Zhu, Z., Zeng, H., "Recent progress in 2D group-VA semiconductors: from theory to experiment", *Chemical Society Reviews*, Vol. 47, No. 3, (2018), 982-1021. <https://doi.org/10.1039/C7CS00125H>
 110. Zhang, S., Xie, M., Li, F., Yan, Z., Li, Y., Kan, E., Liu, W., Chen, Z., Zeng, H., "Semiconducting group 15 monolayers: A broad range of band gaps and high carrier mobilities", *Angewandte Chemie*, Vol. 128, No. 5, (2016), 1698-1701. <https://doi.org/10.1002/ange.201507568>
 111. Akhtar, M., Anderson, G., Zhao, R., Alruqi, A., Mroczkowska, J. E., Sumanasekera, G., Jasinski, J. B., "Recent advances in synthesis, properties, and applications of phosphorene", *npj 2D Materials and Applications*, Vol. 1, No. 1, (2017), 5. <https://doi.org/10.1038/s41699-017-0007-5>
 112. Dai, J., Zeng, X. C., "Bilayer phosphorene: Effect of stacking order on bandgap and its potential applications in thin-film solar cells", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 5, No. 7, (2014), 1289-1293. <https://doi.org/10.1021/jz500409m>
 113. Zhu, W., Yogeesh, M. N., Yang, S., Aldave, S. H., Kim, J. -S., Sonde, S., Tao, L., Lu, N., Akinwande, D., "Flexible black phosphorus ambipolar transistors, circuits and AM demodulator", *Nano Letters*, Vol. 15, No. 3, (2015), 1883-1890. <https://doi.org/10.1021/nl5047329>
 114. Vishnoi, P., Mazumder, M., Pati, S. K., Rao, C. N. R., "Arsenene nanosheets and nanodots", *New Journal of Chemistry*, Vol. 42, No. 17, (2018), 14091-14095. <https://doi.org/10.1039/c8nj03186j>
 115. Singh, D., Gupta, S. K., Sonvane, Y., Lukačević, I., "Antimonene: A monolayer material for ultraviolet optical nanodevices", *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 4, No. 26, (2016), 6386-6390. <https://doi.org/10.1039/c6tc01913g>
 116. Wang, X., Song, J., Qu, J., "Antimonene: From experimental preparation to practical application", *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 58, No. 6, (2019), 1574-1584. <https://doi.org/10.1002/anie.201808302>
 117. Wang, X., He, J., Zhou, B., Zhang, Y., Wu, J., Hu, R., Liu, L., Song, J., Qu, J., "Bandgap-tunable preparation of smooth and large two-dimensional antimonene", *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 57, No. 28, (2018), 8668-8686. <https://doi.org/10.1002/anie.201804886>
 118. Liu, X., Zhang, S., Guo, S., Cai, B., Yang, S. A., Shan, F., Pumera, M., Zeng, H., "Advances of 2D bismuth in energy sciences", *Chemical Society Reviews*, Vol. 49, No. 1, (2020), 263-285. <https://doi.org/10.1039/c9cs00551j>
 119. Takagi, N., Lin, C. -L., Kawahara, K., Minamitani, E., Tsukahara, N., Kawai, M., Arafune, R., "Silicene on Ag(111): Geometric and electronic structures of a new honeycomb material of Si", *Progress in Surface Science*, Vol. 90, No. 1, (2015), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2014.10.001>
 120. Ding, Y., Wang, Y., "Density functional theory study of the silicene-like SiX and XS₂ (X = B, C, N, Al, P) honeycomb lattices: the various Buckled structures and versatile electronic properties", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 117, No. 35, (2013), 18266-18278. <https://doi.org/10.1021/jp407666m>
 121. Vishnoi, P., Pramoda, K., Rao, C. N. R., "2D elemental nanomaterials beyond graphene", *ChemNanoMat*, Vol. 5, No. 9, (2019), 1062-1091. <https://doi.org/10.1002/cnma.201900176>
 122. Jose, D., Datta, A., "Structures and chemical properties of silicene: Unlike graphene", *Accounts of Chemical Research*, Vol. 47, No. 2, (2014), 593-602. <https://doi.org/10.1021/ar400180e>
 123. Kawahara, K., Shirasawa, T., Arafune, R., Lin, C. L., Takahashi, T., Kawai, M., Takagi, N., "Determination of atomic positions in silicene on Ag(111) by low-energy electron diffraction", *Surface Science*, Vol. 623, (2014), 25-28. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2013.12.013>
 124. Tao, L., Cinquanta, E., Chiappe, D., Grazianetti, C., Fanciulli, M., Dubey, M., Molle, A., Akinwande, D., "Silicene field-effect transistors operating at room temperature", *Nature* 92. Akhtar, J., Aamir, M., Sher, M., "Chapter 2-Organometal lead halide perovskite", In Thomas, S., Thankappan, A. (ed.), *Perovskite Photovoltaics: Basic to Advanced Concepts and Implementation*, Academic Press, (2018), 25-42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812915-9.00002-2>
 93. Zhang, W., Liu, X., He, B., Zhu, J., Li, X., Shen, K., Chen, H., Duan, Y., Tang, Q., "Enhanced efficiency of air-stable CsPbBr₃ perovskite solar cells by defect dual-passivation and grain size enlargement with multifunctional additive", *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 12, No. 32, (2020), 36092-36101. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c08827>
 94. Zhang, F., Zhu, K., "Additive engineering for efficient and stable perovskite solar cells", *Advanced Energy Materials*, Vol. 10, No. 13, (2020), 1902579. <https://doi.org/10.1002/aenm.201902579>
 95. Zhang, F., Lu, H., Tong, J., Berry, J. J., Beard, M. C., Zhu, K., "Advances in two-dimensional organic-inorganic hybrid perovskites", *Energy & Environmental Science*, Vol. 13, No. 4, (2020), 1154-1186. <https://doi.org/10.1039/C9EE03757H>
 96. Ortiz-Cervantes, C., Carmona-Monroy, P., Solis-Ibarra, D., "Two-dimensional halide perovskites in solar cells: 2D or not 2D?", *ChemSusChem*, Vol. 12, No. 8, (2019), 1560-1575. <https://doi.org/10.1002/cssc.201802992>
 97. Sichert, J. A., Tong, Y., Mutz, N., Vollmer, M., Fischer, S., Milowska, K. Z., Garcia Cortadella, R., Nickel, B., Cardenas-Daw, C., Stolarczyk, J. K., Urban, A. S., Feldmann, J., "Quantum size effect in organometal halide perovskite nanoplatelets", *Nano Letters*, Vol. 15, No. 10, (2015), 6521-6527. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02985>
 98. Reshmi Varma, P. C., "Chapter 7-Low-dimensional perovskites", In Thomas, S., Thankappan, A. (ed.), *Perovskite Photovoltaics*, Academic Press, (2018), 197-229. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03790-7>
 99. Niu, W., Eiden, A., Prakash, G. V., Baumberg, J. J., "Exfoliation of self-assembled 2D organic-inorganic perovskite semiconductors", *Applied Physics Letters*, Vol. 104, No. 17, (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4874846>
 100. Wang, Y., Shi, Y., Xin, G., Lian, J., Shi, J., "Two-dimensional van der Waals epitaxy kinetics in a three-dimensional perovskite halide", *Crystal Growth & Design*, Vol. 15, No. 10, (2015), 4741-4749. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5b00949>
 101. Mao, L., Stoumpos, C. C., Kanatzidis, M. G., "Two-dimensional hybrid halide perovskites: Principles and promises", *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 141, No. 3, (2019), 1171-1190. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b10851>
 102. Mao, L., Kennard, R. M., Traore, B., Ke, W., Katan, C., Even, J., Chabiny, M. L., Stoumpos, C. C., Kanatzidis, M. G., "Seven-layered 2D hybrid lead iodide perovskites", *Chem*, Vol. 5, No. 10, (2019), 2593-2604. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2019.07.024>
 103. Mao, L., Ke, W., Pedesseau, L., Wu, Y., Katan, C., Even, J., Wasielewski, M. R., Stoumpos, C. C., Kanatzidis, M. G., "Hybrid Dion-Jacobson 2D lead iodide perovskites", *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 140, No. 10, (2018), 3775-3783. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b00542>
 104. Soe, C. M. M., Stoumpos, C. C., Kepenekian, M., Traoré, B., Tsai, H., Nie, W., Wang, B., Katan, C., Seshadri, R., Mohite, A. D., Even, J., Marks, T. J., Kanatzidis, M. G., "New type of 2D perovskites with alternating cations in the interlayer space, (C(NH₂)₃)(CH₃NH₃)_nPb_nI_{3n+1}: structure, properties, and photovoltaic performance", *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 139, No. 45, (2017), 16297-16309. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b09096>
 105. Lan, C., Zhou, Z., Wei, R., Ho, J. C., "Two-dimensional perovskite materials: From synthesis to energy-related applications", *Materials Today Energy*, Vol. 11, (2019), 61-82. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.10.008>
 106. Zhao, S., Lan, C., Li, H., Zhang, C., Ma, T., "Aurivillius halide perovskite: A new family of two-dimensional materials for optoelectronic applications", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 124, No. 3, (2020), 1788-1793. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b08450>
 107. Liu, Y., Akin, S., Pan, L., Uchida, R., Arora, N., Milić, J. V., Hinderhofer, A., Schreiber, F., Uhl, A. R., Zakeeruddin, S. M., Hagfeldt, A., Dar, M. I., Grätzel, M., "Ultrahydrophobic 3D/2D fluoroarene bilayer-based water-resistant perovskite solar cells

141. Moraes, J. D. D., Bertolino, S. R. A., Cuffini, S. L., Ducart, D. F., Bretzke, P. E., Leonardi, G. R., "Clay minerals: Properties and applications to dermocosmetic products and perspectives of natural raw materials for therapeutic purposes—A review", *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 534, No. 1, (2017), 213-219. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.10.031>
142. Zeaiean Firouzabadi, P., Ghanbari, H., Mahmoudi, N., Haramshahi, S. M. A., Javadpour, J., "Synthesis of nanobentonite-poly(vinyl alcohol)-bacterial cellulose nanocomposite by electrospinning for wound healing applications", *Physica Status Solidi (a)*, Vol. 217, No. 6, (2020), 1900536. <https://doi.org/10.1002/pssa.201900536>
143. Awasthi, A., Jadhao, P., Kumari, K., "Clay nano-adsorbent: structures, applications and mechanism for water treatment", *SN Applied Sciences*, Vol. 1, No. 9, (2019), 1076. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0858-9>
144. Ruzicka, B., Zulian, L., Ruocco, G., "More on the phase diagram of laponite", *Langmuir*, Vol. 22, No. 3, (2006), 1106-1111. <https://doi.org/10.1021/la0524418>
145. Fripiat, J., Cases, J., Francois, M., Letellier, M., "Thermodynamic and microdynamic behavior of water in clay suspensions and gels", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 89, No. 2, (1982), 378-400. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(82\)90191-6](https://doi.org/10.1016/0021-9797(82)90191-6)
146. Li, Y., Liang, M., Dou, X., Feng, C., Pang, J., Cheng, X., Liu, H., Liu, T., Wang, Y., Chen, X., "Development of alginate hydrogel/gum Arabic/gelatin based composite capsules and their application as oral delivery carriers for antioxidant", *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 132, (2019), 1090-1097. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.103>
147. Ghanbari, H., Shahmohamadi, N., Sarpoolaky, H., "Different roles of carbonate additives on hexagonal boron nitride microstructure prepared from urea and boric acid", *Proceedings of 15th Annual Congress on Materials Research and Technology*, France, Paris, (2018). <https://www.hilarispublisher.com/proceedings/different-roles-of-carbonate-additives-on-hexagonal-boron-nitride-microstructure-prepared-from-urea-and-boric-acid-10087.html>
148. Wang, J., Ma, F., Sun, M., "Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications", *RSC Advances*, Vol. 7, No. 27, (2017), 16801-16822. <https://doi.org/10.1039/C7RA00260B>
149. Lee, G. -H., Yu, Y. -J., Cui, X., Petrone, N., Lee, C. -H., Choi, M. S., Lee, D. -Y., Lee, C., Yoo, W. J., Watanabe, K., Taniguchi, T., Nuckolls, C., Kim, P., Hone, J., "Flexible and transparent MoS₂ field-effect transistors on hexagonal boron nitride-graphene heterostructures", *ACS Nano*, Vol. 7, No. 9, (2013), 7931-7936. <https://doi.org/10.1021/nn402954e>
150. Decker, R., Wang, Y., Brar, V. W., Regan, W., Tsai, H. -Z., Wu, Q., Gannett, W., Zettl, A., Crommie, M. F., "Local electronic properties of graphene on a BN substrate via scanning tunneling microscopy", *Nano Letters*, Vol. 11, No. 6, (2011), 2291-2295. <https://doi.org/10.1021/nl2005115>
151. Peng, J., Wang, S., Zhang, P. -H., Jiang, L. -P., Shi, J. -J., Zhu, J. -J., "Fabrication of graphene quantum dots and hexagonal boron nitride nanocomposites for fluorescent cell imaging", *Journal of Biomedical Nanotechnology*, Vol. 9, No. 10, (2013), 1679-1685. <https://doi.org/10.1166/jbn.2013.1663>
152. Weng, Q., Wang, B., Wang, X., Hanagata, N., Li, X., Liu, D., Wang, X., Jiang, X., Bando, Y., Golberg, D., "Highly water-soluble, porous, and biocompatible boron nitrides for anticancer drug delivery", *ACS Nano*, Vol. 8, No. 6, (2014), 6123-6130. <https://doi.org/10.1021/nn5014808>
153. Angizi, S., Hatamie, A., Ghanbari, H., Simchi, A., "Mechanochemical green synthesis of exfoliated edge-functionalized boron nitride quantum dots: Application to vitamin C sensing through hybridization with gold electrodes", *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 10, No. 34, (2018), 28819-28827. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b07332>
154. Azadmanjiri, J., Berndt, C. C., Wang, J., Kapoor, A., Srivastava, V. K., "Nanolaminated composite materials: Structure, interface role and applications", *RSC Advances*, Vol. 6, No. 111, (2016), 109361-109385. <https://doi.org/10.1039/c6ra20050h>
155. Anasori, B., Xie, Y., Beidaghi, M., Lu, J., Hosler, B. C., Hultman, L., Kent, P. R. C., Gogotsi, Y., Barsoum, M. W., "Two-dimensional, ordered, double transition metals carbides *Nanotechnology*, Vol. 10, No. 3, (2015), 227-231. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.325>
125. Wang, M., Liu, L., Liu, C. -C., Yao, Y., "van der Waals heterostructures of germanene, stanene, and silicene with hexagonal boron nitride and their topological domain walls", *Physical Review B*, Vol. 93, No. 15, (2016), 155412. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.155412>
126. Bianco, E., Butler, S., Jiang, S., Restrepo, O. D., Windl, W., Goldberger, J. E., "Stability and exfoliation of germanene: A germanium graphane analogue", *ACS Nano*, Vol. 7, No. 5, (2013), 4414-4421. <https://doi.org/10.1021/nn4009406>
127. Madhushankar, B. N., Kaverzin, A., Giousis, T., Potsi, G., Gournis, D., Rudolf, P., Blake, G. R., van der Wal, C. H., van Wees, B. J., "Electronic properties of germanene field-effect transistors", *2D Materials*, Vol. 4, No. 2, (2017), 021009. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/aa57fd>
128. Yuhara, J., Shimazu, H., Ito, K., Ohta, A., Araidai, M., Kurosawa, M., Nakatake, M., Le Lay, G., "Germanene epitaxial growth by segregation through Ag(111) thin films on Ge(111)", *ACS Nano*, Vol. 12, No. 11, (2018), 11632-11637. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b07006>
129. Dávila, M. E., Xian, L., Cahangirov, S., Rubio, A., Le Lay, G., "Germanene: A novel two-dimensional germanium allotrope akin to graphene and silicene", *New Journal of Physics*, Vol. 16, No. 9, (2014), 095002. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/9/095002>
130. Rahman, M. S., Nakagawa, T., Mizuno, S., "Germanene: Experimental study for graphene like two dimensional germanium", *Evergreen*, Vol. 1, No. 2, (2014), 25-29. <https://doi.org/10.5109/1495160>
131. Özçelik, V. O., Durgun, E., Ciraci, S., "New phases of germanene", *Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 5, No. 15, (2014), 2694-2699. <https://doi.org/10.1021/jz500977v>
132. Sahoo, S. K., Wei, K. H., "A perspective on recent advances in 2D stanene nanosheets", *Advanced Materials Interfaces*, Vol. 6, No. 18, (2019). <https://doi.org/10.1002/admi.201900752>
133. Lyu, J. K., Zhang, S. F., Zhang, C. W., Wang, P. J., "Stanene: A promising material for new electronic and spintronic applications", *Annalen der Physik*, Vol. 531, No. 10, (2019). <https://doi.org/10.1002/andp.201900017>
134. Wang, A., Wang, C., Fu, L., Wong-Ng, W., Lan, Y., "Recent advances of graphitic carbon nitride-based structures and applications in catalyst, sensing, imaging, and LEDs", *Nano-Micro Letters*, Vol. 9, No. 4, (2017), 47. <https://doi.org/10.1007/s40820-017-0148-2>
135. Kroke, E., Schwarz, M., Horath-Bordon, E., Kroll, P., Noll, B., Norman, A. D., "Tri-s-triazine derivatives. Part I. From trichloro-tri-s-triazine to graphitic C₃N₄ structures", *New Journal of Chemistry*, Vol. 26, No. 5, (2002), 508-512. <https://doi.org/10.1039/B111062B>
136. Ong, W. -J., Tan, L. -L., Ng, Y. H., Yong, S. -T., Chai, S. -P., "Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)-based photocatalysts for artificial photosynthesis and environmental remediation: are we a step closer to achieving sustainability?", *Chemical Reviews*, Vol. 116, No. 12, (2016), 7159-7329. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00075>
137. Sun, J., Fu, Y., He, G., Sun, X., Wang, X., "Green Suzuki-Miyaura coupling reaction catalyzed by palladium nanoparticles supported on graphitic carbon nitride", *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 165, (2015), 661-667. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.10.072>
138. Thomas, A., Fischer, A., Goettmann, F., Antonietti, M., Müller, J. -O., Schlögl, R., Carlsson, J. M., "Graphitic carbon nitride materials: Variation of structure and morphology and their use as metal-free catalysts", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 18, No. 41, (2008), 4893-4908. <https://doi.org/10.1039/B800274F>
139. Cheng, N., Jiang, P., Liu, Q., Tian, J., Asiri, A. M., Sun, X., "Graphitic carbon nitride nanosheets: One-step, high-yield synthesis and application for Cu²⁺ detection", *Analyst*, Vol. 139, No. 20, (2014), 5065-5068. <https://doi.org/10.1039/C4AN00914B>
140. Cavani, F., Trifirò, F., Vaccari, A., "Hydrotalcite-type anionic clays: Preparation, properties and applications", *Catalysis Today*, Vol. 11, No. 2, (1991), 173-301. [https://doi.org/10.1016/0920-5861\(91\)80068-K](https://doi.org/10.1016/0920-5861(91)80068-K)

160. Sinha, A., Mugo, S. M., Chen, J., Lokesh, K. S., "MXene-based sensors and biosensors: Next-generation detection platforms, In Handbook of nanomaterials in analytical chemistry", In Mustansar Hussain, C. (ed.), *Nanomaterials in Analytical Chemistry*, Elsevier, (2020), 361-372.
161. Duan, H., Yan, N., Yu, R., Chang, C. -R., Zhou, G., Hu, H. -S., Rong, H., Niu, Z., Mao, J., Asakura, H., Tanaka, T., Dyson, P. J., Li, J., Li, Y., "Ultrathin rhodium nanosheets", *Nature Communications*, Vol. 5, No. 1, (2014), 3093. <https://doi.org/10.1038/ncomms4093>
162. Yuhara, J., Schmid, M., Varga, P., "Two-dimensional alloy of immiscible metals: Single and binary monolayer films of Pb and Sn on Rh(111)", *Physical Review B*, Vol. 67, No. 19, (2003), 195407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.195407>
163. Abdelhafiz, A., Vitale, A., Buntin, P., deGlee, B., Joiner, C., Robertson, A., Vogel, E. M., Warner, J., Alamgir, F. M., "Epitaxial and atomically thin graphene-metal hybrid catalyst films: the dual role of graphene as the support and the chemically-transparent protective cap", *Energy & Environmental Science*, Vol. 11, No. 6, (2018), 1610-1616. <https://doi.org/10.1039/C8EE00539G>
- (MXenes)", *ACS Nano*, Vol. 9, No. 10, (2015), 9507-9516. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b03591>
156. Ghidui, M., Lukatskaya, M. R., Zhao, M. -Q., Gogotsi, Y., Barsoum, M. W., "Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay' with high volumetric capacitance", *Nature*, Vol. 516, No. 7529, (2014), 78-81. <https://doi.org/10.1038/nature13970>
157. Ren, C. E., Zhao, M. Q., Makaryan, T., Halim, J., Boota, M., Kota, S., Anasori, B., Barsoum, M. W., Gogotsi, Y., "Porous two-dimensional transition metal carbide (MXene) flakes for high-performance Li-Ion storage", *ChemElectroChem*, Vol. 3, No. 5, (2016), 689-693. <https://doi.org/10.1002/celec.201600059>
158. Ren, C. E., Hatzell, K. B., Alhabeb, M., Ling, Z., Mahmoud, K. A., Gogotsi, Y., "Charge- and size-selective ion sieving through $Ti_3C_2T_x$ MXene membranes", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 6, No. 20, (2015), 4026-4031. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.5b01895>
159. Xie, X., Zhao, M. -Q., Anasori, B., Maleski, K., Ren, C. E., Li, J., Byles, B. W., Pomerantseva, E., Wang, G., Gogotsi, Y., "Porous heterostructured mxene/carbon nanotube composite paper with high volumetric capacity for sodium-based energy storage devices", *Nano Energy*, Vol. 26, (2016), 513-523. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.06.005>