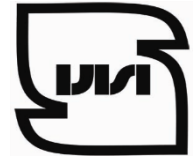




جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران
۶۵۴۱

چاپ اول

۱۳۹۹

INSO

6541

1st Edition

2021

Identical with
ISO/TR 19733:

2019

فناوری نانو - ماتریس خواص و روش‌های
اندازه‌گیری برای گرافن و مواد دوبعدی
(2D) مرتبط

**Nanotechnologies— Matrix of
properties and measurement
techniques for graphene and related
two-dimensional (2D) materials**

ICS: 07.120

استاندارد ملی ایران شماره ۶۵۴۱ (چاپ اول): سال ۱۳۹۹

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۳۹ تهران- ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۱۶۳ کرج- ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: standard@isiri.gov.ir

وبگاه: <http://www.isiri.gov.ir>

Iranian National Standardization Organization (INSO)

No. 2592 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: standard@isiri.gov.ir

Website: <http://www.isiri.gov.ir>

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی را به عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2- International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)

4- Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«فناوری نانو- ماتریس خواص و روش‌های اندازه‌گیری برای گرافن و مواد دوبعدی (2D) مرتبط»

رئیس:

اعرابی، امیرمسعود
(دکتری مهندسی مواد و متالورژی)

عضو هیئت علمی - پژوهشگاه علوم و فنون رنگ

دبیر:

میرکاظمی، سید محمد
(دکتری مهندسی مواد و متالورژی)

عضو هیئت علمی - دانشگاه علم و صنعت ایران

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

اسلامی پور، الهه
(کارشناسی ارشد زیست شناسی)

کارشناس - گروه استاندارد و ایمنی ستاد فناوری نانو

دباغ کاشانی، فاطمه
(دکتری فیزیک)

عضو هیئت علمی - دانشگاه علم و صنعت ایران

سیفی، مهوش
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

نایب رئیس - کمیته فنی متناظر فناوری نانو ISIR/TC 229

میرزاجانی، فاطمه
(دکتری فیتوشیمی)

عضو هیئت علمی - دانشگاه شهید بهشتی

نجم‌الدین، نجمه
(دکتری مهندسی مواد)

عضو هیئت علمی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

نوروزیان علم، شهاب
(دکتری مهندسی برق - الکترونیک)

عضو هیئت علمی - دانشگاه علم و صنعت ایران

ویراستار:

سیفی، مهوش
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

نایب رئیس - کمیته فنی متناظر فناوری نانو ISIR/TC 229

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ز	پیش‌گفتار
ح	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۱	۳ اصطلاحات و تعاریف، نمادها و کوتاه‌نوشت‌ها
۱	۱-۳ اصطلاحات و تعاریف
۴	۲-۳ نمادها و کوتاه‌نوشت‌ها
۴	۴ ماتریس خواص و روش‌های اندازه‌گیری برای گرافن و مواد دوبعدی مرتبط
۹	۵ خواص و اندازه‌ده‌ها
۹	۱-۵ خواص ساختاری
۹	۱-۱-۵ نقص بلوری
۱۰	۲-۱-۵ اندازه حوزه (دانه)
۱۰	۳-۱-۵ اندازه پولک
۱۰	۴-۱-۵ تعداد لایه‌ها
۱۱	۵-۱-۵ زاویه انباشت لایه‌ای
۱۱	۶-۱-۵ مساحت سطح
۱۱	۷-۱-۵ ضخامت
۱۱	۲-۵ خواص شیمیایی
۱۱	۱-۲-۵ مقادیر فلز
۱۱	۲-۲-۵ مقادیر غیر گرافن و باقی‌مانده
۱۲	۳-۲-۵ مقدار اکسیژن
۱۲	۳-۵ خواص مکانیکی، مدول کشسانی
۱۲	۴-۵ خواص گرمایی، رسانایی گرمایی
۱۲	۵-۵ خواص نوری، عبوردهی نوری
۱۲	۶-۵ خواص الکتریکی و الکترونیکی
۱۲	۱-۶-۵ غلظت حامل بار (چگالی)
۱۳	۲-۶-۵ تحرک حامل بار
۱۳	۳-۶-۵ مقاومت ورقه‌ای
۱۴	۴-۶-۵ تابع کار

صفحه	عنوان
۱۴	۶ روش‌های اندازه‌گیری
۱۴	۱-۶ میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM)
۱۵	۲-۶ روش برونر، اِمِت و تِلِر (BET)
۱۵	۳-۶ آنالیز احتراق
۱۶	۴-۶ میکروآنالیز پرتوایکس پروبی الکترونی (EPMA)
۱۷	۵-۶ تشدید اسپین الکترون (ESR)
۱۷	۶-۶ طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FT-IR)
۱۷	۷-۶ اندازه‌گیری میله هال
۱۸	۸-۶ پلاسمای جفت‌شده القائی - طیف‌سنجی جرمی (ICP-MS)
۱۸	۹-۶ میکروسکوپی نیروی پروبی کلومین (KPFM)
۱۹	۱۰-۶ میکروسکوپی الکترونی کم‌انرژی (LEEM)
۲۰	۱۱-۶ میکروسکوپی نوری
۲۰	۱۲-۶ طیف‌سنجی رامان
۲۱	۱۳-۶ میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM)
۲۱	۱۴-۶ طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه (SIMS)
۲۱	۱۵-۶ میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی (STM)
۲۲	۱۶-۶ میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM)
۲۲	۱۷-۶ آنالیز گرماوزن‌سنجی (TGA)
۲۳	۱۸-۶ عیارسنجی
۲۳	۱۹-۶ طیف‌سنجی فوتوالکترون فرابنفش (UPS)
۲۳	۲۰-۶ طیف‌سنجی فرابنفش، مرئی و فروسرخ نزدیک (UV-VIS-NIR)
۲۴	۲۱-۶ پراش پرتوایکس (XRD)
۲۴	۲۲-۶ طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتوایکس (XPS)
۲۵	۲۳-۶ پروب چهار نقطه‌ای
۲۶	کتاب‌نامه

پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری نانو- ماتریس خواص و روش‌های اندازه‌گیری برای گرافن و مواد دوبعدی (2D) مرتبط» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی/منطقه‌ای به عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی ایران شماره ۵ تهیه و تدوین شده، در نود و چهارمین اجلاس هیئت کمیته ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۳۹۹/۱۱/۱۹ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، در هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط، مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

این استاندارد ملی بر مبنای پذیرش استاندارد بین‌المللی زیر به روش «معادل یکسان» تهیه و تدوین شده و شامل ترجمه تخصصی کامل متن آن به زبان فارسی می‌باشد و معادل یکسان استاندارد بین‌المللی مزبور است:

ISO/TR 19733: 2019, Nanotechnologies- Matrix of properties and measurement techniques for grapheme and related two-dimensional (2D) materials

مقدمه

گرافن، یک تک‌لایه از اتم‌های کربن است که هر اتم در ساختار لانه زنبوری با سه همسایه پیوند دارد [1]. از زمان کشف گرافن در سال ۲۰۰۴ [2]، این ماده به دلیل خواص موادی عالی مانند استحکام مکانیکی، سفتی^۱ و کشسانی، رسانایی الکتریکی و گرمایی بالا، شفافیت نوری، تبدیل به یکی از مورد توجه‌ترین مواد در تحقیقات کاربردی و صنعت افزاره^۲ شده است. انتظار می‌رود که کاربردهای گرافن بتواند جایگزین بسیاری از فناوری‌های رایج توسعه افزاره در صفحه لمسی^۳ انعطاف‌پذیر، دیود نشر نوری آلی (OLED)^۴، سلول خورشیدی، آبرخازن^۵ و حفاظ الکترومغناطیسی^۶ بشود. برای دستیابی به درک عمیق‌تر از خواص ماده و یافتن راه‌های تولید انبوه با کیفیت خوب، تحقیقات بسیاری روی گرافن و به‌طور مشابه روی مواد دو بعدی دیگر در دانشگاه‌ها، موسسات تحقیقاتی و آزمایشگاه‌های سراسر جهان در حال انجام است. هرچند، تا سوق دادن این مواد انقلابی به سمت تجاری‌سازی کامل، به‌طور اساسی نیاز است که روش‌های اندازه‌گیری و مشخصه‌یابی خواص مهم این مواد، استانداردسازی شده و در سطح جهانی شناخته شوند. در این استاندارد، روش‌های اندازه‌گیری و مشخصه‌یابی خواص مختص گرافن و مواد دو بعدی مرتبط که نیازمند استانداردسازی هستند، به شکل یک ماتریس سامان‌دهی می‌شود. این ماتریس می‌تواند به‌عنوان یک راهنمای اولیه برای تدوین استانداردهای ضروری در مشخصه‌یابی و اندازه‌گیری گرافن و مواد دو بعدی مرتبط به‌کار گرفته شود.

-
- 1- Stiffness
 - 2- Device industry
 - 3- Touch panel
 - 4- Organic Light Emitting Diode
 - 5- Supercapacitor
 - 6- Electromagnetic shielding

فناوری نانو- ماتریس خواص و روش‌های اندازه‌گیری برای گرافن

و مواد دوبعدی (2D) مرتبط

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، ارائه ماتریسی است که خواص کلیدی گرافن و مواد دوبعدی مرتبط را به روش‌های اندازه‌گیری تجاری موجود، مرتبط کند. این ماتریس شامل روش‌های اندازه‌گیری برای مشخصه‌یابی خواص شیمیایی، فیزیکی، الکتریکی، نوری، گرمایی و مکانیکی گرافن و مواد دوبعدی مرتبط است.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

در صورتی که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام آور است. استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است.

۱-۲ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷- فناوری نانو- واژه‌نامه- قسمت ۱۳: گرافن و مواد دوبعدی (2D) مرتبط

۳ اصطلاحات و تعاریف، نمادها و کوتاه‌نوشت‌ها

۱-۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد علاوه بر اصطلاحات و تعاریف ارائه‌شده در استانداردهای ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷، اصطلاحات و تعاریف زیر نیز به کار می‌رود^۱:

۱-۱-۳

گرافن

graphene

۱- اصطلاحات و تعاریف به‌کار رفته در استانداردهای ISO و IEC در وبگاه‌های <http://www.iso.org/obp> و <http://www.electropedia.org> قابل دسترس است.

تک‌لایه‌ای از اتم‌های کربن که در آن، هر اتم با سه اتم همسایه در یک ساختار لانه زنبوری پیوند دارد.

یادآوری ۱- گرافن، یک واحد سازنده مهم در بسیاری از نانوآشیا کربنی است.

یادآوری ۲- از آنجا که گرافن تک‌لایه است، گاهی برای متمایز شدن از گرافن دولایه (2LG) و گرافن چندلایه (FLG)، به‌اختصار گرافن تک‌لایه یا یک‌لایه (1LG) نامیده می‌شود.

یادآوری ۳- گرافن لبه‌هایی دارد و می‌تواند نقایص و مرزهای دانه‌ای داشته باشد که در آن‌جا پیوندها از هم گسیخته می‌شود.

[منبع: زیربند ۱-۲-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو: شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

۲-۱-۳

ماده دوبعدی

two-dimensional material

2D material

ماده متشکل از یک یا چندین لایه که اتم‌ها در هر لایه با اتم‌های همسایه خود در همان لایه که یک بعد دارد، پیوند قوی دارند و ضخامت آن در نانومقیاس یا کوچکتر بوده و ابعاد دیگر به‌طور کلی دارای مقیاس بزرگ‌تر هستند.

یادآوری ۱- اینکه در چه تعداد لایه، یک ماده دوبعدی تبدیل به ماده توده‌ای بشود، بسته به ماده مورد اندازه‌گیری و خواص آن، متفاوت است. در مورد لایه‌های گرافن، برای اندازه‌گیری‌های الکتریکی تا ضخامت ۱۰ لایه، ماده دوبعدی است، بیشتر از آن (اگر تعداد لایه‌ها بیشتر از ۱۰ لایه شود)، خواص الکتریکی ماده تمایزی با خواص الکتریکی آن در شکل توده (که به‌عنوان گرافیت شناخته می‌شود) ندارد.

یادآوری ۲- پیوند بین‌لایه‌ای، متمایز و ضعیف‌تر از پیوند درون‌لایه‌ای است.

یادآوری ۳- هر لایه ممکن است شامل بیش از یک عنصر باشد.

یادآوری ۴- یک ماده دوبعدی می‌تواند یک نانوصفحه باشد.

[منبع: زیربند ۱-۱-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷، تغییر یافته]

یادآوری ۵- مقصود از مواد دوبعدی مرتبط در این استاندارد، مواد اشتقاق یافته از گرافن مانند گرافن اکسید و گرافن اکسید کاهش یافته و دیگر مواد دوبعدی با ساختار مشابه گرافن است که خواص نویدبخشی از خود نشان می‌دهند. این مواد شامل انواع تک‌لایه و کم‌لایه نیتريد بور شش‌وجهی (hBN)^۱، دی‌سولفید مولیبدن (MoS₂)^۲، دی‌سلنید تنگستن (WSe₂)^۳، سیلیسین^۴ و ژرمانین^۵ و هم‌گذاری‌های^۶ لایه‌ای از مخلوط‌های این مواد هستند، ولی محدود به آن‌ها نمی‌شوند.

- 1- Hexagonal boron nitride
- 2- Molybdenum disulphide
- 3- Tungsten diselenide
- 4- Silicene
- 5- Germanene
- 6- Assemblies

۳-۱-۳

گرافن اکسید

grapheme oxide

GO

گرافن اصلاح شده شیمیایی است که به وسیله اکسایش و لایه برداری گرافیت تهیه می شود. این فرایندها سبب اصلاح وسیع اکسایشی سطح پایه^۱ می شود.

یادآوری- گرافن اکسید یک ماده تک لایه با مقدار بالای اکسیژن است که به طور معمول به وسیله نسبت C/O مشخصه یابی می شود. این نسبت به روش سنتز و تقریباً برابر ۲/۰ بستگی دارد.

[منبع: زیربند ۳-۱-۲-۱۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷، تغییر یافته]

۴-۱-۳

گرافن اکسید کاهش یافته

reduced grapheme oxide

rGO

شکلی از گرافن اکسید با مقدار اکسیژن کاهش یافته است.

یادآوری ۱- این ماده می تواند به وسیله روش های شیمیایی، حرارتی، میکروویو، نور شیمیایی، نور حرارتی یا روش های میکروبی/باکتریایی یا با لایه برداری گرافیت اکسید کاهش یافته، تولید شود.

یادآوری ۲- اگر گرافن اکسید به طور کامل کاهش یابد، محصول گرافن خواهد بود. هرچند، در عمل برخی از گروه های عاملی حاوی اکسیژن، باقی خواهند ماند و همه پیوندهای sp^3 به پیکربندی sp^2 باز نمی گردند. عوامل کاهش دهنده مختلف موجب نسبت های گوناگون کربن به اکسیژن و ترکیب بندی های شیمیایی مختلفی در گرافن اکسید کاهش یافته می شود.

یادآوری ۳- گرافن اکسید می تواند انواع متفاوت ریخت شناسی مانند صفحات کوچک و سازه های کرم مانند^۲ داشته باشد.

[منبع: زیربند ۳-۱-۲-۱۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

1- Basal plane

2- Worm-like

۲-۳ نمادها و کوتاه‌نوشت‌ها

کوتاه‌نوشت	اصطلاح	معادل فارسی
AFM	Atomic Force Microscopy	میکروسکوپی نیروی اتمی
BET	Brunauer- Emmett and Teller method	روش برنر- اِمت- تِلر
EDX	Energy-Dispersive Spectroscopy	طیف‌سنجی تفکیک انرژی
EPMA	Electron Probe X-ray Microanalysis	میکروآنالیز پرتوایکس پروبی الکترون
ESR	Electron Spin Resonance	تشدید اسپین الکترون
FT- IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه
ICP- MS	Inductively Coupled Plasma- Mass Spectrometry	پلاسمای جفت‌شده القائی- طیف‌سنجی جرمی
KPFM	Kelvin Probe Force Microscopy	میکروسکوپی نیروی پروبی کلون
LEEM	Low Energy Electron Microscopy	میکروسکوپی الکترونی کم انرژی
SEM	Scanning Electron Microscopy	میکروسکوپی الکترونی روبشی
SIMS	Secondary-Ion Mass Spectroscopy	طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه
SKPM	Scanning Kelvin Probe Microscopy	میکروسکوپی پروبی کلون روبشی
STM	Scanning Tunnelling Microscopy	میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی
TEM	Transmission Electron Microscopy	میکروسکوپی الکترونی عبوری
TGA	Thermogravimetric Analysis	آنالیز گرم‌وزن‌سنجی
UPS	Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy	طیف‌سنجی فوتوالکترونی فرابنفش
UV- VIS- NIR SPECTROSCOPY	Ultraviolet, Visible, Near InfraRed Spectroscopy	طیف‌سنجی فرابنفش، مرئی و فروسرخ نزدیک
WDS	Wavelength- Dispersive Spectroscopy	طیف‌سنجی تفکیک طول‌موج
XRD	X-Ray Diffraction	پراش پرتو ایکس
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	طیف‌سنجی فوتوالکترونی پرتو ایکس

۴ ماتریس خواص و روش‌های اندازه‌گیری برای گرافن و مواد دوبعدی مرتبط

جدول ۱ ماتریسی را ارائه می‌دهد که خواص کلیدی گرافن و مواد دوبعدی را به روش‌های اندازه‌گیری تجاری موجود مرتبط می‌سازد. ماتریس شامل روش‌های اندازه‌گیری برای مشخصه‌یابی خواص شیمیایی، فیزیکی،

الکتریکی، نوری، گرمایی و مکانیکی گرافن و مواد دوبعدی مرتبط است. روش‌های بسیاری وجود دارد که برای مطالعه گرافن و مواد دوبعدی مرتبط مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی در این استاندارد فقط مواردی ارائه می‌شود که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و به‌صورت تجاری موجود است.

برخی از روش‌ها در این ماتریس ممکن است برای همه شکل‌های گرافن و مواد دوبعدی مرتبط مناسب نباشند ولی می‌توانند فقط برای شکل خاصی، همچون ورقه‌ها^۱، پودر یا پراکنه به‌کار روند. همچنین ممکن است با استفاده از این روش‌ها، نتایج اندازه‌گیری مختلفی به‌دست آید. نتایج اندازه‌گیری گرافن و مواد دوبعدی مرتبطی که باید مشخصه‌یابی شوند به روش‌های سنتز آن‌ها، مانند رسوب‌دهی شیمیایی فاز بخار (CVD)^۲، لایه‌برداری مکانیکی و غیره وابسته هستند. شکل‌های مناسب، روش سنتز و آماده‌سازی نمونه گرافن یا مواد دوبعدی مرتبط که در هر روش قابل به‌کارگیری است، در استانداردهای مجزایی تعیین خواهد شد که در آینده بر طبق این استاندارد تدوین خواهند شد.

1- Sheets

2- Chemical vapour deposition

میله حال	پروب چهار نقطه‌ای	عیارسنجی	احتراق	TGA	XPS	XRD	UPS	TEM	STM	SIMS	SEM	طیف‌سنجی UV-VIS-NIR	رامان	میکروسکوپی نوری	LEEM	ICP-MS	FT-IR	ESR (EPR)	EPMA	BET	KPFM	AFM	خواص	شیمیایی	مکانیکی	گرمایی	نوری
					○					○			○			○				○			مقادیر فلزی				
			○	○	○					○							○						مقادیر غیرگرافن و باقی مانده				
		○		○	○					○									○				مقادیر اکسیژن				
													○										مدول کشسانی	○			
													○										رسانایی گرمایی				
												○		○									عبوردهی ^۳				○

میله هال	پروب چهار نقطه‌ای	عیارسنجی	احتراق	TGA	XPS	XRD	UPS	TEM	STM	SIMS	SEM	طیف‌سنجی UV-VIS-NIR	رامان	میکروسکوپی نوری	LEEM	ICP-MS	FT-IR	ESR (EPR)	EPMA	BET	KPFM	AFM	خواص
																							غلظت حامل بار
																							تحرك
																							مقاومت ورقه‌ای
																							تابع کار

¹ Flake
² Stacking angle
³ Transmittance

خواص و اندازه‌دهه‌ها با جزئیات بیشتر در بند ۵ توضیح داده شده‌اند. در بند ۶، روش‌های اندازه‌گیری توضیح داده شده‌اند. متونی که برای توضیح این موارد ارائه شده، اغلب از تعاریف روش‌های ISO اخذ شده‌است. مزایا و محدودیت‌های هر روشی که برای مشخصه‌یابی گرافن و مواد دوبعدی مرتبط به کار رفته نیز، به اختصار فهرست شده‌است.

۵ خواص و اندازه‌دهها

۱-۵ خواص ساختاری

۱-۱-۵ نقص بلوری

نقص بلوری، انحراف موضعی از نظم در شبکه بلوری گرافن یا مواد دوبعدی است.

[منبع: زیربند ۳-۴-۱-۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

نقایص محتمل، نقایص نقطه‌ای، نقایص خطی یا نقایص صفحه‌ای هستند. برخی از مثال‌های نقایص بلوری در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند.

۱-۱-۱-۵ نقص نقطه‌ای

نقص نقطه‌ای، نقصی است که فقط درون یا اطراف یک تک‌نقطه از شبکه ماده دوبعدی رخ می‌دهد.

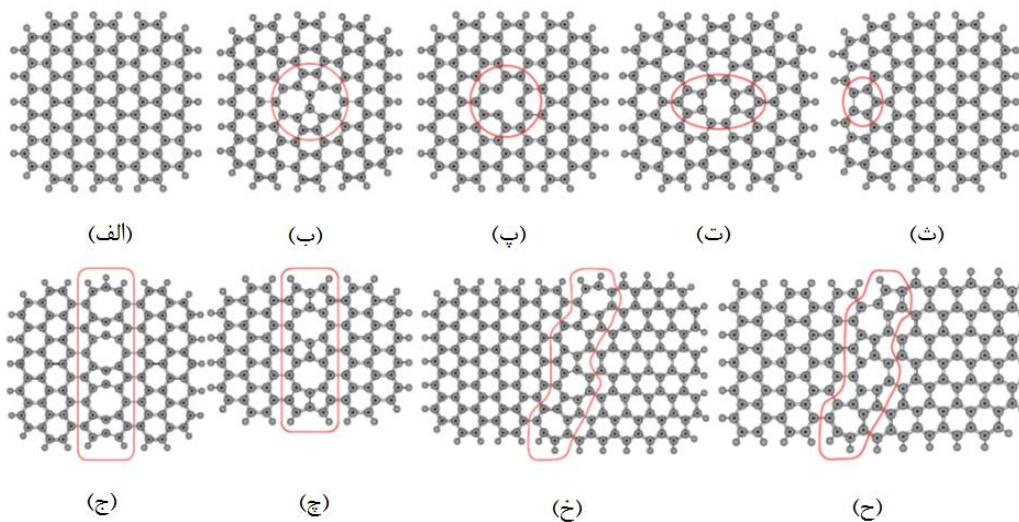
یادآوری- انواع نقایص نقطه‌ای به‌طور کلی بیشتر شامل فقدان تعداد کمی اتم، تعداد کمی اتم جابه‌جا شده یا متفاوت هستند که تهی‌جاها^۱، اتم‌های اضافی (نقایص بین‌نشینی) یا اتم‌های جایگزین را ایجاد می‌کنند.

۲-۱-۱-۵ نقص خطی

نقص خطی، نقصی است که در طول یک خط اتمی اتفاق می‌افتد و باعث ایجاد ناب‌جایی^۲ یک ردیف در ماده دوبعدی می‌شود.

۳-۱-۱-۵ نقص سطحی

نقص سطحی، نقصی است که در توالی انباشت لایه‌های یک ماده دوبعدی ایجاد می‌شود.



شکل ۱- مثال‌هایی از نقایص نقطه‌ای گوناگون، الف تا ث و نقایص خطی، ج تا ح [5]

۵-۱-۲ اندازه حوزه (دانه)

اندازه حوزه، ابعاد جانبی یک ناحیه بلورین همدوس^۱ منفرد در لایه‌ای از یک ماده دوبعدی است.

یادآوری ۱- اصطلاحات اندازه دانه و اندازه بلورک با اصطلاح اندازه حوزه مترادف هستند.

یادآوری ۲- اگر حوزه تقریباً دایره‌ای باشد، این اندازه‌گیری به‌طور معمول با استفاده از قطر دایره‌ای معادل یا در غیر این صورت، از طریق اندازه‌گیری X و Y در امتداد و عمود بر بلندترین قسمت، اندازه‌گیری می‌شود.

یادآوری ۳- اگر قطر دایره‌ای معادل استفاده شود، قطر دایره‌ای معادل مشابه قطر بلورک (L_n) است که اندازه جانبی یک ناحیه بلور یا بلورک را توصیف می‌کند، برای مثال، همان‌گونه که با پراش پرتو ایکس یا طیف‌سنجی رامان اندازه‌گیری می‌شود.

[منبع: زیربند ۳-۴-۱-۱۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

یادآوری ۴- اندازه حوزه معمول گرافن از ده‌ها میکرومتر تا صدها میکرومتر و حتی به‌تازگی تا میلی‌متر تغییر می‌کند.

۵-۱-۳ اندازه پولک

اندازه پولک، ابعاد جانبی پولک ماده دوبعدی است.

یادآوری ۱- اگر پولک تقریباً دایره‌ای باشد، این اندازه‌گیری به‌طور معمول با استفاده از قطر دایره‌ای معادل یا در غیر این صورت، از طریق اندازه‌گیری X و Y در امتداد و عمود بر بزرگ‌ترین قسمت انجام می‌شود.

[منبع: زیربند ۳-۴-۱-۱۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

یادآوری ۲- معمول‌ترین شکل گرافن که به‌صورت تجاری در دسترس است، پولک‌هایی به شکل پودر یا تعلیق است که از سازندگان گرافن خریداری می‌شوند.

۵-۱-۴ تعداد لایه‌ها

تعداد لایه‌ها در مواد دوبعدی چندلایه، یک شمار انباشت از هر تک‌لایه دوبعدی در بالای لایه قبلی است. هنگامی که تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد، وجه تمایز مشخصات گرافن کاهش می‌یابد و هنگامی که گرافن‌های چندلایه‌ای همه شاخصه‌های منحصربه‌فرد گرافن را از دست می‌دهند، به گرافیت تبدیل می‌شوند. به این دلیل توصیه می‌شود که انباشت ورقه‌های گرافن به تعداد لایه‌های کم، کمتر از ۱۰، محدود شود تا در کاربردهای بر پایه گرافن استفاده شود.

یادآوری- تعداد لایه‌ها می‌تواند به‌عنوان برآورد منطقی ضخامت ورقه‌های گرافن چندلایه‌ای استفاده شود که مقدار 0.335 nm را برای فاصله بین صفحه‌ای گرافیت ارائه می‌دهد.

۵-۱-۵ زاویه انباشت لایه‌ای

زاویه انباشت لایه‌ای، زاویه‌ای است که در صفحه افقی بین سمت‌گیری دو لایه ماده دوبعدی اندازه‌گیری می‌شود. این دولایه به‌طور عمودی روی یکدیگر انباشته شده‌اند. هنگامی که زوایای انباشت لایه‌ای خاصی در توالی مواد دوبعدی چندلایه‌ای تکرار می‌شود، اغلب اصطلاح مرتبه انباشت لایه‌ای^۱ به‌طور جایگزین استفاده می‌شود.

[منبع: زیربند ۳-۴-۱-۱۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

۵-۱-۶ مساحت سطح

مساحت سطح در ماده دوبعدی به مساحت سطح ویژه، برحسب m^2/kg یا به‌صورت عملی تر m^2/g اشاره دارد. مساحت سطح نظری گرافن $2630 m^2/g$ گزارش شده است [8]، ولی مقدار اندازه‌گیری شده به‌سبب هم‌پوشانی ورقه‌ها و محیط‌های گوناگون می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از این مقدار فرضی برای تک‌لایه باشد.

۵-۱-۷ ضخامت

ضخامت، بعد عمودی ماده دوبعدی است.

یادآوری- فاصله بین صفحه‌ای گرافیت اغلب برای برآورد ضخامت گرافن کم‌لایه استفاده می‌شود که مقدار اندازه‌گیری شده، تعداد لایه‌ها را نشان می‌دهد.

۵-۲ خواص شیمیایی

۵-۲-۱ مقادیر فلز

مقادیر فلز، میزان فلزات موجود روی گرافن و گرافن اکسید یا داخل آن‌ها است. برای کارکرد بهتر، می‌توان فلزات را به‌عنوان باقی‌مانده فرایند کاتالیزی^۲ یا به‌وسیله دوپ‌کردن عمدی ناخالصی وارد کرد. فلزات معمول که در گرافن یافت می‌شوند، شامل طلا (Au)، نقره (Ag)، پلاتین (Pt)، تیتانیوم (Ti)، کروم (Cr)، مس (Cu)، آهن (Fe) و غیره [10] هستند. مقادیر فلز به‌طور معمول بر حسب کسر جرمی به‌صورت mg/kg یا $\mu g/g$ اندازه‌گیری می‌شوند.

۵-۲-۲ مقادیر غیرگرافن و باقی‌مانده

مقادیر غیرگرافن و باقی‌مانده موادی غیر از گرافن شامل بقایای^۳ کربن در ساختارهای بلوری مختلف مانند دوده‌های کربنی، نانولوله‌های کربنی (CNT)^۴ و فولرن، لیگاندها و جانشین‌های غیرکربنی، مشتقات اکسیدی

1- Stacking order
2- Catalytic
3- Debris
4- Carbon nanotube

و لیگاندها و جانشین‌های بسپاری و دیگر بقایایی که از فراوری در سنتز، خالص‌سازی، پراکنش و جدایش گرافن باقی می‌ماند. به‌طور معمول به‌دلیل روش‌های متفاوتی که در ارزشیابی مقادیر فلز اتخاذ می‌شوند، این مقادیر از رده مقادیر غیرگرافن و باقی‌مانده مستثنی می‌شوند.

۳-۲-۵ مقدار اکسیژن

مقدار اکسیژن، میزان اکسیژن کل در مواد دوبعدی است. این کمیت درجه اکسایش در گرافن اکسید (GO) و گرافن اکسید کاهش‌یافته (rGO) را که شکل‌های معمول مواد دوبعدی در استفاده عملی هستند، بیان می‌کند. مقدار اکسیژن GO یا rGO به‌طور معمول به‌عنوان نسبت کربن به اکسیژن (C/O) بیان می‌شود. افزایش نسبت در rGO از طریق فرایند کاهش GO (اکسیژن‌زدایی) است.

۳-۵ خواص مکانیکی و مدول کشسانی

مدول کشسانی مقیاسی از مقاومت گرافن یا مواد دوبعدی مرتبط در تغییر شکل به‌صورت کشسان، تحت‌تأثیر نیروی مکانیکی است و به‌صورت نسبت تنش به کرنش تعریف می‌شود. یکای مدول $\text{Pa [N/m}^2\text{]}$ است. مدول کشسانی در صفحه گرافن تک‌لایه به بزرگی 1.02 TPa گزارش شده است [11].

یادآوری - مدول یانگ برای کشش^۱ و فشار، مدول برشی برای برش، مدول توده برای فشار هیدرولیکی^۲ است.

۴-۵ خواص گرمایی، رسانایی گرمایی

رسانایی گرمایی نرخ شارش حرارتی در واحد سطح تقسیم بر گرادیان دما است.

[منبع: جدول ۱، استاندارد ملی ایران شماره ۵-۹۸۱۹: سال ۱۳۹۲]

یادآوری - رسانایی گرمایی گرافن به‌طور معمول برحسب W/m.K اندازه‌گیری شده و در بازه حدود 3000 W/m.K تا 5000 W/m.K است [12].

۵-۵ خواص نوری، عبوردهی نوری

عبوردهی نوری نسبت نور عبوری به نور ورودی از طریق یک تک‌لایه یا چندلایه مواد دوبعدی است. علی‌رغم داشتن فقط یک ضخامت تک اتمی، یک لایه تک از گرافن، جذب غیرمعمول بالایی را نشان می‌دهد که باعث افت عبوردهی^۳ بیش از ۲٪ می‌شود. گزارش شده‌است که هر لایه گرافن در گرافن کم‌لایه عبوردهی نور را به مقدار ۲۳٪ در نور قرمز [13] و ۲۶٪ در نور سبز [14] کاهش می‌دهد.

1- Tension
2- Hydraulic compression
3- Transmittance drop

۵-۶ خواص الکتریکی و الکترونیکی

۵-۶-۱ غلظت حامل بار (چگالی)

حامل‌های بار در گرافن و مواد دوبعدی مرتبط، الکترون‌ها (بار منفی) و حفره‌ها (بار مثبت) هستند. غلظت حامل بار برای گرافن و مواد دوبعدی مرتبط چگالی عددی حامل‌های بار بر سطح است. یکای $[m^{-2}]$ یا معمول تر $[cm^{-2}]$ استفاده می‌شود.

گاهی به صورت جایگزین از اصطلاح «چگالی حامل» استفاده می‌شود.

یادآوری - غلظت حامل بار در نیم‌رسانا، چگالی عددی بر حجم $[cm^{-3}]$ است.

۵-۶-۲ تحرک حامل بار

تحرک حامل بار در گرافن و مواد دوبعدی مرتبط این موضوع را کمی‌سازی می‌کند که حامل‌های بار، مانند الکترون‌ها یا حفره‌ها، با چه سرعتی می‌توانند تحت تأثیر میدان الکتریکی خارجی حرکت کنند. این کمیّت به صورت زیر به رسانایی الکتریکی (σ) مربوط می‌شود:

$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h)$$

که در آن

n و p به ترتیب غلظت‌های الکترون و حفره در سطح واحد برای گرافن و مواد دوبعدی مرتبط هستند؛

μ_e و μ_h به ترتیب تحرک الکترون و حفره هستند.

مشخص شده است که تحرک الکترون گرافن معلق^۱ به بزرگی $cm^2V^{-1}s^{-1}$ ۲۰۰۰۰۰ است [15] که ۱۰ برابر بزرگ‌تر از مس است. تحرک الکترون در گرافن و مواد دوبعدی مرتبط به شدت وابسته به غلظت بار و دما است. به طور معمول، تحرک با دما تا 2540 K افزایش می‌یابد ولی وابستگی به دما به طور گسترده با گروه‌های عاملی مختلف تغییر می‌کند.

۵-۶-۳ مقاومت ورقه‌ای

مقاومت ورقه‌ای $[\Omega]$ که مقاومت ویژه در صفحه، تقسیم بر ضخامت است، اغلب برای لایه‌های نازک همچون گرافن اندازه‌گیری می‌شود. در مواد توده سه‌بعدی، رسانایی الکتریکی $[S/m]$ یک خاصیت ذاتی و مقیاسی از توانایی ماده برای هدایت جریان الکتریکی و عکس مقاومت ویژه الکتریکی بوده و یکای آن $[\Omega.m]$ است. هرچند، استفاده از مقاومت ورقه‌ای در گرافن معمول‌تر از مقاومت ویژه توده است. در زیربند ۵-۶-۲ یکای $[S]$ برای رسانایی گرافن و مواد دوبعدی مرتبط استفاده شده است.

یادآوری - نحوه نگارش یکای متعارف مقاومت ورقه‌ای به‌طور معمول $[\Omega/\square]$ یا $[\Omega]$ در نظر گرفته شده تا با مقاومت توده اشتباه گرفته نشود. در چنین موردی، یکا به‌صورت ابعادی معادل $[\Omega]$ است و به مقاومت یک ورقه مربعی صرف‌نظر از اندازه، اشاره دارد.

۵-۶-۴ تابع کار

تابع کار اختلاف پتانسیل برای الکترون‌ها بین تراز فرمی^۱ و پتانسیل بیشینه، دقیقاً خارج یک سطح معین است.

یادآوری ۱- توابع کار و جوه بلوری یک تک‌بلور با یکدیگر متفاوت خواهد بود. این توابع کار همچنین با حالت تمیزی^۲ سطوح بلوری تغییر می‌کند.

یادآوری ۲- سطح بس‌بلورین^۳ تابع کار، میانگین را نمایش خواهد داد که به انواع جوه در معرض دید تک‌بلور جزء سازنده و مساحت‌های آن‌ها وابسته خواهد بود.

[منبع: زیربند 4.487، استاندارد ISO 18115-1: 2013]

یادآوری ۳- تابع کار به‌طور معمول برحسب [eV] اندازه‌گیری می‌شود.

۶ روش‌های اندازه‌گیری

۶-۱ میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM)

روش AFM، روش تصویربرداری سطح با روبش مکانیکی کران‌نماهای^۴ سطح آن‌ها است که در آن انحراف یک نوک تیز که نیروی سطح را حس می‌کند و روی یک تیرک تک‌سویه قرار دارد، پایش می‌شود.

یادآوری ۱- دستگاه AFM می‌تواند یک تصویر کمی از ارتفاع سطوح عایق و رسانا را فراهم کند.

یادآوری ۲- برخی از دستگاه‌های AFM، نمونه را درحالی‌که موقعیت سوزن ثابت است، در جهات x، y و z جابه‌جا می‌کند و برخی دیگر سوزن را حرکت می‌دهند در حالی‌که موقعیت نمونه ثابت است.

یادآوری ۳- آنالیز AFM را می‌توان در خلاء، مایع، اتمسفر کنترل‌شده یا هوا انجام داد. تفکیک‌پذیری اتمی می‌تواند با نمونه‌های مناسب، سوزن‌های تیز و استفاده از حالت تصویربرداری مناسب قابل‌دستیابی باشد.

یادآوری ۴- انواع زیادی از نیروها مانند نیروهای عمودی، جانبی، اصطکاکی یا برشی را می‌توان اندازه‌گیری کرد. هنگامی‌که نیروی برشی اندازه‌گیری شود، روش به میکروسکوپی نیروی جانبی، اصطکاکی یا برشی اشاره دارد. این اصطلاح کلی شامل همه انواع میکروسکوپی‌های نیرو می‌شود.

یادآوری ۵- دستگاه AFM را می‌توان برای اندازه‌گیری نیروی‌های عمودی سطحی در نقاط مجزای موجود در آرایه پیکسلی استفاده‌شده برای تصویربرداری به‌کار برد.

1- Fermi level
2- State of cleanness
3- Polycrystalline
4- Contour

برای انواع رایج سوزن‌های AFM با شعاع کمتر از ۱۰۰ nm، بهتر است نیروی عمودی کمتر از $0.1 \mu\text{N}$ ، وابسته به ماده نمونه باشد تا تغییر شکل سطحی بازگشت‌ناپذیر و فرسایش بیش از حد سوزن، رخ ندهد.

[منبع: زیربند 3.2، استاندارد ISO 18115-2: 2015، زیربند ۳-۵-۲ استاندارد ملی ایران-ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶ و زیربند ۳-۳-۱-۲، استاندارد ملی ایران-ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

یادآوری ۶- خواص گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که AFM می‌تواند اندازه‌گیری کند، ضخامت، اندازه پولک، مدول و غیره است. مؤثرترین روش برای اندازه‌گیری مدول گرافن، آزمودن تورانش آزاد^۱ بر پایه آنالیز AFM است.

مزیت: تصویربرداری توپوگرافی با تفکیک‌پذیری بالا، تا کمتر از زیرنانومتر^۲ امکان‌پذیر است [18]؛ نیازی به پیش‌فرآوری^۳ نمونه‌ها ندارد.

محدودیت: تفکیک‌پذیری جانبی حساس به تیزی سوزن است؛ رویش آهسته است.

۲-۶ روش بروئر، اِمِت و تِلِر (BET)^۴

روش BET، روش تعیین مساحت سطح خارجی و داخلی ویژه کل پودرهای پراکنده‌شده و/یا جامدات متخلخل به‌وسیله اندازه‌گیری مقدار گاز جذب سطحی شده به‌طور فیزیکی است. این روش با استفاده از مدل توسعه‌یافته توسط بروئر، اِمِت و تِلِر برای تفسیر هم‌دماهای جذب سطحی گاز انجام می‌شود.

یادآوری ۱- این روش بر اساس مدل جذب سطحی گاز BET در لابه‌های چند مولکولی است.

یادآوری ۲- روش BET، فقط برای هم‌دماهای جذب سطحی نوع دوم (پراکنه، جامدات بدون تخلخل یا ماکرومتخلخل^۵ و نوع چهارم (جامدات مزومتخلخل^۶، قطر تخلخل بین ۲ nm و ۵۰ nm) کاربردی است. حفره‌های خارج از دسترس آشکار نمی‌شوند. روش BET نمی‌تواند به‌طور قابل‌اعتماد برای جامداتی به‌کار رود که گاز مورد اندازه‌گیری را جذب می‌کند.

[منبع: زیربند ۳-۶-۳، استاندارد ملی ایران-ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶]

مزیت: ارزان و سریع است.

محدودیت: برای همه انواع هم‌دمها کاربردی نیست و تغییراتی را بین اندازه‌گیری آن‌ها نشان می‌دهد.

۳-۶ آنالیز احتراق

آنالیز احتراق، روش تعیین ترکیب‌بندی عنصری ترکیب آلی به‌وسیله احتراق نمونه است که در آن محصولات حاصل از احتراق - کربن (C)، هیدروژن (H)، نیتروژن (N)، سولفور (S) - می‌تواند به‌طور کمی آنالیز شوند.

-
- 1- Free standing indentation
 - 2- Sub-nm
 - 3- Pre-process
 - 4- Brunauer, Emmett and Teller method
 - 5- Macroporous
 - 6- Mesoporous

مزیت: ارزان و عملکرد آن آسان است.

محدودیت: عناصر محدودی را می‌تواند آنالیز کند.

۴-۶ میکروآنالیز پرتو ایکس پروبی الکترونی (EPMA)

روش EPMA، روشی است که در آن آنالیز عنصری با تفکیک فضایی انجام می‌شود. روش مذکور بر پایه طیف‌سنجی پرتو ایکس ناشی از الکترون برانگیخته است، به طوری که یک باریکه الکترون برانگیخته به صورت متمرکز با نمونه برهم‌کنش داشته و پرتو ایکس انتشار یافته از حجم برهم‌کنش در ابعاد میکرومتری و زیر میکرومتری، طیف‌سنجی شده و آنالیز عنصری انجام می‌شود.

[منبع: زیربند 3.1، استاندارد SO 23833: 2013 و زیربند ۳-۲-۹، استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۹۵: سال ۱۳۹۰]

روش EPMA به صورت بنیادی، مشابه روش SEM با افزودن توانمندی آنالیز شیمیایی کمی است. خواص گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که EPMA می‌تواند برای اندازه‌گیری آن استفاده شود، آنالیز شیمیایی کمی مانند مقادیر فلز است.

یادآوری ۱- طیف‌سنجی پرتو ایکس تفکیک انرژی (EDS یا EDX) T، طیف‌سنجی پرتو ایکس است که در آن انرژی فوتون‌های مجزا با یک آشکارساز موازی اندازه‌گیری می‌شود و برای نشان دادن بافت‌نگاشت^۱ (هیستوگرام) نمایشگر توزیع پرتوی ایکس با انرژی استفاده می‌شود.

[منبع: زیربند ۴-۲۱، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶ و زیربند ۳-۲-۳-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

یادآوری ۲- EDS (EDX یا XEDS) گاهی آنالیز پرتو ایکس تفکیک انرژی (EDXA)^۲ یا میکروآنالیز پرتو ایکس تفکیک انرژی (EDXMA)^۳ نامیده می‌شود.

یادآوری ۳- هنگامی که طیف‌سنج تفکیک طول‌موج برای تعیین شدت پرتو ایکس به صورت تابعی از طول‌موج تابش [19] استفاده می‌شود، روش طیف‌سنجی تفکیک طول‌موج (WDS)^۴ نامیده می‌شود. در روش WDS، پراش پرتو ایکس روی نمونه‌های بلوری استفاده می‌شود و تفکیک‌پذیری طیفی بهتری نسبت به EDS دارد ولی یک عنصر (در یک طول‌موج خاص) را در یک زمان آشکار می‌کند، در حالی که EDS یک طیف از همه عناصر نمونه را اندازه‌گیری می‌کند.

مزیت: تفکیک‌پذیری بالا مانند SEM (زیربند ۶-۱۳)؛ حساسیت بالا؛ آنالیز ترکیب‌بندی سریع؛ کمی برای نمونه‌های دوبعدی است.

1- Histogram
2- Energy Dispersive X-ray Analysis
3- Energy Dispersive X-ray Micro -Analysis
4- Wavelength- Dispersive Spectroscopy

محدودیت: آماده‌سازی نمونه دشوار است؛ برای نمونه در خلاء قابل اجراء است؛ آشکارسازها در دمای بسیار پایین^۱ کار می‌کنند.

۵-۶ تشدید اسپین الکترون (ESR)

روش ESR برای مطالعه گونه‌های شیمیایی است که در هنگام برانگیزش تشدید اسپین الکترون، دارای یک یا چند الکترون جفت‌نشده هستند.

یادآوری ۱- این روش شبیه NMR^۲ است اما اسپین الکترون را نیز اندازه‌گیری می‌کند.

[منبع: زیربند ۴-۲۷، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶]

خاصیت گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که می‌توان از ESR برای اندازه‌گیری آن استفاده کرد، نقص بلوری به‌ویژه نقص بلوری‌ای است که به‌وسیله ناخالصی مغناطیسی ایجاد شده‌است.

یادآوری ۲- تشدید اسپین الکترونی (ESR) گاهی تشدید پارامغناطیسی الکترونی (EPR) نامیده می‌شود.

مزیت: یک روش مؤثر در آشکار کردن نقایص به‌وسیله تهی‌جا یا برجذب اتم^۳ است.

محدودیت: به دما حساس است.

۶-۶ طیف‌سنجی فروسرخ- تبدیل فوریه (FT-IR)

یک روش شیمیایی آنالیزی برپایه جذب تابش فروسرخ به‌وسیله تکه‌هایی از مولکول‌های شیمیایی^۴ در آزمون است که برای شناسایی و تعیین مقدار جذب تکه‌هایی از مولکول‌های شیمیایی استفاده می‌شود.

[منبع: زیربند ۳-۱-۳ استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۳۲۸: سال ۱۳۹۵]

خاصیت گرافن، به‌خصوص GO، و مواد دو بعدی مرتبط که FT-IR برای اندازه‌گیری آن می‌تواند استفاده شود، مقادیر غیرگرافن و باقی‌مانده است.

مزیت: ساده، آسان و سریع است.

محدودیت: توصیه می‌شود طیف پهن واریسی شود؛ هم‌پوشانی طیفی دارند.

۷-۶ اندازه‌گیری میله‌ها

روشی است که از نیروی لورنتسی^۵ روی حامل‌های بار در نمونه با اتصالات مناسب تثبیت‌شده استفاده می‌کند تا اثر هال را اندازه‌گیری کند [20].

1- Cryostat
2- Nuclear Magnetic Resonance
3- Adatom
4- Chemical moieties
5- Lorentz force

از روش اندازه‌گیری اثر هال می‌توان برای اندازه‌گیری خاصیت تحرک الکترونی گرافن و مواد دوبعدی مرتبط استفاده کرد.

مزیت: آسان و نسبتاً ارزان است.

محدودیت: به دما حساس است

۸-۶ پلاسمای جفت‌شده القائی - طیف‌سنجی جرمی (ICP-MS)

روشی است که در آن تخلیه الکتریکی دمای بالا به وسیله یک میدان مغناطیسی متناوب ناشی از یک سیم‌پیچ بار^۱ بسامد رادیویی (RF)^۲ و با استفاده از یک طیف‌سنج جرمی آشکار می‌شود. این سیم‌پیچ اطراف لوله انتقال گاز آرگون شارشی را احاطه کرده است.

[منبع: زیربند ۴-۲۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶]

خاصیتی از گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که ICP-MS می‌تواند برای اندازه‌گیری آن استفاده شود، مقادیر فلز است.

مزیت: سریع است؛ آنالیز چند عنصری و آشکارسازی در بازه زیر $\mu\text{g}/\text{kg}$ امکان‌پذیر است؛ حساسیت بالا به کسر جرمی عنصری دارد.

محدودیت: اندازه‌گیری کسر جرمی کل به حل‌پذیرسازی نمونه، به‌طور معمول به هضم اسیدی نیاز دارد.

۹-۶ میکروسکوپی نیروی پروبی کلوین (KPFM)

روش KPFM، حالت پویای روش AFM (زیربند ۶-۱) با استفاده از سوزن پروب رسانا است که برای اندازه‌گیری تغییرات فضایی یا زمانی در پتانسیل‌های الکتریکی نسبی سوزن و سطح به‌کار می‌رود.

[منبع: زیربند 3.12، استاندارد ISO 18115-2:2013]

یادآوری ۱- تغییرات در پتانسیل‌های نسبی، منعکس‌کننده تغییرات در تابع کار سطح است.

یادآوری ۲- میکروسکوپی نیروی پروبی کلوین (KPFM) [21] اغلب به‌عنوان مترادف اصطلاح SKPM^۳ استفاده می‌شود.

SKPM و KPFM حالت‌های پویای AFM (زیربند ۶-۱) هستند.

یادآوری ۳- میکروسکوپی پروبی کلوین روبشی (SKPM) که به‌عنوان میکروسکوپی پتانسیل سطح نیز شناخته می‌شود، تغییرات غیرتماسی AFM است و اختلاف پتانسیل تماسی (CPD)^۴ را بین سوزن رسانا و نمونه در شیوه غیرتماسی که یک خازن را شکل می‌دهد (نیروی ایستابرقی) اندازه‌گیری می‌کند، درحالی‌که AFM نیروی اتمی (نیروی واندروالس) [22] را اندازه‌گیری می‌کند.

1- Load coil
2- Radio Frequency
3- Scanning Kelvin Probe Microscopy
4- Contact Potential Difference

میکروسکوپی پروبی کلوبین غیرروشی ممکن است گاهی به عنوان روش درست و سریع برای اندازه‌گیری تابع کار در نقاط موضعی استفاده شود.

خاصیتی از گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که KPFM می‌تواند برای اندازه‌گیری آن استفاده شود، تابع کار و تعداد لایه‌ها است.

یادآوری ۴- اگر تابع کار در نقطه دیراک^۱ شناخته شده باشد، غلظت حامل‌ها می‌تواند از تابع کار برآورد شود. اختلاف بین نقطه دیراک و تابع کار (تراز فرمی) می‌تواند برای محاسبه غلظت حامل‌ها استفاده شود. هرچند این روش فقط برای گرافن تک‌لایه، یا جدا کردن^۲ بیش از یک لایه گرافن معتبر است. شاخصه‌های گرافن دولایه انباشت-AB رابطه E-k سهموی است، بنابراین نیاز است که جرم مؤثر شناخته شود.

یادآوری ۵- آلودگی سطح موجود از روش‌های اجرایی رشد یا انتقال، تأثیر قابل توجهی روی اندازه‌گیری تابع کار به وسیله SKPM دارد. علاوه بر آن، اغلب اندازه‌گیری کیفی به وسیله دستگاه‌های تجاری است که فقط پتانسیل سطحی را اندازه‌گیری می‌کند و برای اندازه‌گیری تابع کار کمی کالیبراسیون پروب با یک ماده مرجع، مورد نیاز است.

مزیت: تفکیک پذیری فضایی بالا مشابه AFM (زیربند ۶-۱) دارد؛ غیرتماسی است.

محدودیت: سرعت آنالیز پایین است.

۶-۱۰ میکروسکوپی الکترون کم انرژی (LEEM)

روش LEEM، روشی است که در آن سطوح با تصاویر و/یا الگوهای پراش سطوح تشکیل شده به وسیله الکترون‌های کم انرژی پس‌پراکنده^۳ به صورت کشسان، حاصل از یک باریکه الکترونی غیرروشی، بررسی می‌شوند.

یادآوری ۱- از این روش به طور معمول برای آنالیز و تصویربرداری از سطوح تمیز بسیار صاف استفاده می‌شود.

یادآوری ۲- الکترون‌های کم انرژی به طور معمول انرژی‌ای در بازه ۱ eV تا ۱۰۰ eV دارند.

[منبع: زیربند ۳-۵-۸، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶]

خواصی از گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که LEEM می‌تواند برای اندازه‌گیری آن‌ها استفاده شود، ضخامت و تعداد لایه‌ها هستند.

مزیت: تخریب کمینه به وسیله باریکه الکترونی دارد؛ قابلیت تصویربرداری آنی^۴ دارد.

محدودیت: تفکیک پذیری نسبتاً کم در مقایسه با SEM (زیربند ۶-۱۳)، به طور معمول چندین nm دارد؛ خلاء بسیار بالا (10^{-6} torr) نیاز است.

1- Dirac

2- Decoupled

3- Back-scattered

4- Real-time

۱۱-۶ میکروسکوپی نوری

میکروسکوپی نوری، روشی است که تصویر بزرگنمایی شده از نمونه را به وسیله نور مرئی تولید می کند. این روش شیوه‌ای سریع برای مشاهده مرزهای حوزه مواد دوبعدی است. به تازگی مشاهده مرزهای حوزه گرافن به وسیله میکروسکوپی نوری عادی حتی روی یک صفحه مس، هنگامی که مس به طور هدفمند اکسید می شود، ممکن شده است.

مزیت: ارزان و سریع است.

محدودیت: تفکیک پذیری به طور معمول محدود به حد پراش است.

یادآوری- روش‌های ابرتفکیک‌پذیری^۱ بیش از حد پراش، همچون تهی‌سازی نشر برانگیخته^۲ یا میکروسکوپی نوری روبشی میدان نزدیک (NSOM)^۳ برای گرافن به کار گرفته شده است ولی این دو روش نسبتاً تخصصی هستند.

۱۲-۶ طیف‌سنجی رامان

طیف‌سنجی رامان، روشی است که در آن اثر رامان برای بررسی ترازهای انرژی مولکولی استفاده می شود.

[منبع: زیربند 5.129، استاندارد ISO 18115-2: 2013 و زیربند ۹-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۸۰۰۰۴-۶: سال ۱۳۹۶]

در اثر رامان، نشر تابشی حاصل از مولکول‌های تابش‌دهی شده با تابش تک‌فام مشخصه‌یابی می شود که با کاهش یا افزایش انرژی ناشی از برانگیختگی چرخشی یا ارتعاشی همراه است.

[منبع: زیربند 5.128، استاندارد ISO 18115-2: 2013]

خواص گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که طیف‌سنجی رامان می تواند برای اندازه‌گیری آن‌ها استفاده شود، تعداد لایه‌ها، اندازه حوزه، نقایص بلوری، رسانایی گرمایی، غلظت بار (سطح دوپ کردن) و غیره هستند.

مزیت: نمونه‌های جامد، مایع یا تعلیق می توانند آنالیز شوند.

محدودیت: سیگنال‌های کوچک ایجاد می شوند؛ گاهی برانگیزش لیزری با بیش از یک طول موج نیاز است.

یادآوری ۱- سیگنال رامان به طور معمول خیلی ضعیف است و طیف‌سنجی رامان با سطح بهبودیافته (SERS)^۴ یا طیف‌سنجی رامان سوزن بهبودیافته (TERS)^۵، اغلب برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه (S/N)^۶ استفاده می شود.

یادآوری ۲- اندازه‌گیری طیف‌سنجی رامان می تواند اطلاعات زاویه انباشت لایه‌ای را فقط برای گرافن دولایه‌ای انباشت شده-AB یا با سمت‌گیری تصادفی^۱ فراهم کند. به منظور اندازه‌گیری زاویه انباشت لایه‌ای، به طور معمول، رامان قطبیده (وابسته به زاویه) به برخی از اندازه‌گیری‌های اضافی مانند TEM (زیربند ۶-۱۶) نیاز است [24].

- 1- Super-resolution
- 2- Stimulated Emission Depletion (STED)
- 3- Near- Field Scanning Optical Microscopy
- 4- Surface Enhanced Raman Spectroscopy
- 5- Tip Enhanced Raman Spectroscopy
- 6- Signal to Noise ratio

۱۳-۶ میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM)

روش SEM، روشی است که اطلاعات فیزیکی (مانند الکترون‌های ثانویه، پس‌پراکنده، جذب‌شده و نیز تابش پرتو ایکس) حاصل از تولید باریکه الکترونی را بررسی و آنالیز می‌کند و سطح نمونه را برای تعیین ساختار، ترکیب‌بندی و توپوگرافی نمونه روبش می‌کند.

[منبع: زیربند ۳-۵-۵ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶]

خواصی از گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که SEM می‌تواند برای اندازه‌گیری آن‌ها استفاده شود، اندازه پولک، نقایص بلوری و غیره هستند.

مزیت: آماده‌سازی نمونه نسبتاً آسان است؛ تفکیک‌پذیری بالا به‌طور معمول چند nm، قابل‌دستیابی است.

محدودیت: به‌طور معمول تفکیک‌پذیری آن کمتر از TEM (زیربند ۶-۱۶) است.

۱۴-۶ طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه (SIMS)

روش SIMS، روشی است که در آن از طیف‌سنجی جرمی برای اندازه‌گیری نسبت جرم به بار و فراوانی یون‌های ثانویه‌ای استفاده می‌شود. یون‌های ثانویه در اثر بمباران به‌وسیله یون‌های پر انرژی از یک نمونه نشر شده‌اند.

یادآوری- به‌طور کلی، به‌صورت قراردادی، روش SIMS به دو حالت پویا و ایستا طبقه‌بندی می‌شود. در روش SIMS پویا، لایه‌های سطحی ماده به‌طور پیوسته حین اندازه‌گیری برداشته می‌شوند. در روش SIMS ایستا، دُز واحد سطح یون حین اندازه‌گیری محدود به کمتر از 10^{16} یون/متر مربع است تا سطح ضرورتاً در حالت غیرتخریبی باقی بماند.

[منبع: زیربند ۴-۲۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶]

مزیت: حساسیت آن بالا است، شناسایی گروه‌های عاملی امکان‌پذیر است.

محدودیت: کیفی است، در خلاء انجام می‌شود و تخریبی است.

۱۵-۶ میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی (STM)

روش STM، حالت SPM برای تصویربرداری سطوح رسانا به‌وسیله روبش مکانیکی یک سوزن پروب تیز رسانا با ولتاژ سوگیری‌شده روی سطح آن‌ها است که در آن، داده‌های جریان تونل‌زنی و جدایش سطح-سوزن برای تولید تصویر استفاده می‌شود.

یادآوری ۱- آنالیز STM در خلاء، مایع یا هوا می‌تواند انجام شود. تفکیک‌پذیری اتمی می‌تواند با نمونه‌های مناسب و پروب‌های تیز حاصل شود و با نمونه‌های ایده‌آل می‌تواند اطلاعات پیوندهای موضعی حول اتم‌های سطحی را ارائه کند.

یادآوری ۲- تصاویر می‌توانند از داده‌های ارتفاع در جریان تونل‌زنی ثابت یا از جریان تونل‌زنی در ارتفاع ثابت یا حالات دیگر در پتانسیل‌های نسبی تعریف‌شده سوزن و نمونه شکل گیرند.

یادآوری ۳- آنالیز STM می‌تواند برای نقشه‌برداری چگالی حالات در سطوح یا در حالات ایده‌آل، حول اتم‌های مجزا استفاده شود. حتی برای توپوگرافی یکسان وابسته به سوگیری سوزن می‌تواند تصاویر سطح به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متفاوت باشد.

[منبع: زیربند 3.34، استاندارد ISO 18115-2: 2013 و زیربند ۳-۵-۳، استاندارد ملی ایران-ایزو ۸۰۰۰۴-۶: سال ۱۳۹۶]

خواصی از گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که STM می‌تواند برای اندازه‌گیری آن‌ها استفاده شود، زاویه انباشت لایه‌ای، نقایص و اندازه حوزه (دانه) هستند.

مزیت: تفکیک‌پذیری آن بالا (جانبی nm ۰٫۱، عمودی nm ۰٫۱)، به‌طور معمول بهتر از AFM (زیربند ۶-۱) است، می‌تواند در خلاء، مایع یا هوا انجام شود.

محدودیت: سرعت آنالیز پایین است.

۱۶-۶ میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM)

روش TEM روشی است که با استفاده از یک باریکه الکترونی که از نمونه عبور کرده و با آن برهم‌کنش می‌کند، تصاویر بزرگنمایی‌شده یا الگوی پراش نمونه را تولید می‌کند.

[منبع: زیربند ۳-۵-۶، استاندارد ملی ایران-ایزو شماره ۸۰۰۰۴-۶: سال ۱۳۹۶]

خواصی از گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که TEM می‌تواند برای اندازه‌گیری آن‌ها استفاده شود، تعداد لایه‌ها، ضخامت، زاویه انباشت لایه‌ای، اندازه پولک، اندازه حوزه، نقایص بلوری و غیره است.

مزیت: تفکیک‌پذیری آن بالا تا کمتر از nm ۰٫۰۵ [25]، معمولاً بهتر از SEM (زیربند ۶-۱۳) است.

محدودیت: سرعت آنالیز پایین است.

۱۷-۶ آنالیز گرماوزن‌سنجی (TGA)

روش TGA روشی است که در آن تغییر در جرم نمونه به‌عنوان تابعی از دما اندازه‌گیری می‌شود، درحالی‌که نمونه با یک برنامه دمایی تحت کنترل قرار دارد.

[منبع: زیربند ۵-۱-۲، استاندارد ملی ایران-ایزو شماره ۸۰۰۰۴-۶: سال ۱۳۹۶]

خاصیت گرافن که TGA می‌تواند برای اندازه‌گیری آن استفاده شود، مقادیر غیرگرافن و باقی‌مانده است.

مزیت: بازه دمایی آن گسترده تا °C ۲۰۰۰ است؛ آماده‌سازی نمونه آسان است.

محدودیت: تخریبی است؛ به تهویه نیاز دارد؛ سرعت آنالیز پایین است.

۱۸-۶ عیارسنجی^۱

عیارسنجی که سنجش عیار^۲ نیز نامیده می‌شود، روش آنالیز شیمیایی کمی برای تعیین غلظت‌های نامعلوم آنالیت شناسایی شده است. این آنالیز به وسیله واکنش با محلول استاندارد از یک غلظت و حجم معلوم انجام می‌شود که عیارسنج^۳ نامیده می‌شود، است.

مزیت: عملکرد آن آسان است.

محدودیت: فقط فاز مایع آنالیز می‌شود.

۱۹-۶ طیف‌سنجی فوتوالکترون فرابنفش (UPS)

روش UPS، روشی است که در آن از یک طیف‌سنج الکترونی برای اندازه‌گیری توزیع انرژی فوتوالکترون‌های انتشاریافته از یک سطح تابش‌دهی شده به وسیله فوتون‌های فرابنفش استفاده می‌شود.

یادآوری- منابع فرابنفش در استفاده رایج، شامل انواع مختلفی از تخلیه‌کننده‌ها هستند که می‌تواند خطوط تشدید گازهای گوناگون (به‌عنوان مثال خطوط نشر He I و He II به ترتیب با انرژی ۲۱٫۲ eV و ۴۰٫۸ eV را تولید کنند. برای انرژی‌های متغیر، تابش سنکروترونی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[منبع: زیربند ۴-۱۷ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶ و زیربند 4.22، استاندارد ISO 18115-1: 2013]

خاصیت گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که UPS می‌تواند برای اندازه‌گیری آن استفاده شود، تابع کار است.

مزیت: ساختار نواری قابل مشاهده است؛ سریع و آسان است.

محدودیت: انرژی آن در مقایسه با XPS (زیربند ۶-۲۲) پایین‌تر است.

۲۰-۶ طیف‌سنجی فرابنفش، مرئی، فروسرخ نزدیک (UV-VIS-NIR)

طیف‌سنجی UV-VIS-NIR، طیف‌سنجی نوری است که در آن تابش شامل تابش الکترومغناطیسی در طول موج‌های مرئی، فرابنفش و فروسرخ است.

[منبع: زیربند ۴-۱، استاندارد ملی ایران- ایزو ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶]

طیف‌های عبوردهی، جذب، بازتاب یا نشر در نواحی طول‌موجی UV-VIS-IR اندازه‌گیری می‌شود. خواصی از گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که طیف‌سنجی UV-VIS-IR می‌تواند برای اندازه‌گیری آن استفاده شود، تعداد لایه‌ها، اندازه حوزه، پایداری پراکنه، عبوردهی نوری و غیره است.

1- Titration
2- Titrimetry
3- Titrant or titrator

یادآوری ۱- در روش‌های متنوع طیف‌سنجی نوری، تعداد لایه‌های گرافن می‌تواند اندازه‌گیری شود. برای مثال، تعداد لایه‌های گرافن تک‌لایه، دولایه و کم‌لایه روی زیرلایه Si می‌تواند با استفاده از طیف‌های تباین^۱ نور بازتابی از یک منبع نور سفید اندازه‌گیری شود.

مزیت: ساختار نواری قابل‌مشاهده است؛ مطالعه زمانی (تفکیک‌شده زمانی) با استفاده از لیزر پالس کوتاه امکان‌پذیر است؛ آماده‌سازی نمونه آسان است.

محدودیت: اندازه‌گیری اندازه درشت^۲ (توده) امکان‌پذیر است؛ منابع نور قابل‌اطمینان موردنیاز است.

۲۱-۶ پراش پرتو ایکس (XRD)

روشی برای به‌دست آوردن اطلاعات بلورشناسی در مورد یک نمونه با مشاهده الگوی پراش حاصل از برخورد باریکه پرتو ایکس با آن است.

یادآوری- این روش می‌تواند برای برآورد اندازه نواحی پراکندگی همدوس استفاده شود.

[منبع: زیربند ۵-۲-۱، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶ و زیربند ۳-۳-۱-۸، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

خاصیتی از گرافن و مواد دوبعدی که XRD می‌تواند برای اندازه‌گیری آن استفاده شود، نقص بلوری است. **مزیت:** غیرتهاجمی و سریع است.

محدودیت: آنالیز کمی قابل‌اطمینان نیست؛ آنالیز نمونه با بلورینگی بالا امکان‌پذیر است.

۲۲-۶ طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس (XPS)

روش XPS، روشی است که در آن طیف‌سنج الکترونی برای اندازه‌گیری توزیع انرژی فوتوالکترون‌ها و الکترون‌های اوژه نشرشده از یک سطح تابش‌دهی شده به‌وسیله فوتون‌های پرتوایکس استفاده می‌شود.

یادآوری ۱- منابع پرتو ایکس در استفاده مرسوم، پرتوهای ایکس Al K α و Mg K α غیرتک‌فام به ترتیب در ۱۴۸۶/۶ eV و ۱۲۵۳/۶ eV هستند. دستگاه‌های جدید از پرتوهای تک‌فام Al K α نیز استفاده می‌کنند. برخی از دستگاه‌ها منابع پرتو ایکس گوناگونی را با آندهای دیگر یا تابش سنکروترونی استفاده می‌کنند.

[منبع: زیربند ۴-۱۸ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۶ و زیربند 3.23، استاندارد ISO 18115-1: 2013]

به‌طور معمول ارزشیابی مقدار اکسیژن با استفاده از XPS به‌گونه‌ای انجام می‌شود که مقدار اکسیژن از نسبت شدت‌های انتگرال‌گیری‌شده پیک‌های اکسیژن ۱s به کربن ۱s استنتاج شود. اطلاعات در مورد طبیعت پیوندهای شیمیایی موجود در نمونه به‌وسیله آنالیز ساختاری پیک‌ها (یعنی جابه‌جایی‌های تراز هسته) در دسترس است.

1- Contrast
2- Macro size

خواصی از گرافن و مواد دوبعدی مرتبط که XPS می‌تواند برای اندازه‌گیری آن‌ها استفاده شود، میزان اکسیژن و تابع کار است.

یادآوری ۲- این روش به‌عنوان طیف‌سنجی الکترونی برای آنالیز شیمیایی نیز شناخته می‌شود [28].

مزیت: آنالیز عنصری حساس در سطح و فصل مشترک امکان‌پذیر است؛ سریع و آسان است.

محدودیت: خلاء بسیار بالا (10^{-10} torr) و تمیز کردن سطح موردنیاز است.

۲۳-۶ پروب چهارنقطه‌ای

پروب چهارنقطه‌ای روشی برای اندازه‌گیری مقاومت ورقه‌ای، امپدانس (ره‌بندی) یا رسانایی الکتریکی فیلم نازک است که از جفت الکترودهای جداگانه حامل جریان و حسگر ولتاژ استفاده می‌کند.

[منبع: زیربند ۳-۳-۳-۱ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۳-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

اگر ضخامت نمونه معلوم باشد، رسانایی می‌تواند از مقاومت ورقه‌ای استنتاج شود.

یادآوری- روش پروب چهارنقطه‌ای به‌عنوان حسگری^۱ کلوین، حسگری ۴ سیم یا حسگری چهار اتصال نیز شناخته می‌شود.

مزیت: درستی قابل اطمینان در کسری از درصد قابل‌دستیابی است؛ سریع، آسان و ساده است؛ قابلیت تغییر موقعیت وجود دارد و موضعی است.

محدودیت: اثر حرارتی وجود دارد؛ تخریب به‌وسیله اتصال^۲ ایجاد می‌شود؛ گاهی فاکتور تصحیح استفاده می‌شود.

کتابنامه

- [۱] استاندارد ملی ایران شماره ۳-۱۸۳۹۲: سال ۱۳۹۴، فناوری نانو- واژه‌نامه- قسمت ۳: نانوشیای کربنی
- [2] Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science* **306**, 666, 2004
- [3] Partoens B., & Peeters F. M. From graphene to graphite: Electronic structure around the Kpoint, *Physical Review B* **74**, 075404, 2006
- [4] Ferrari A. C., Meyer J. C., Scardaci V., Casiraghi C., Lazzeri M., Mauri F., Piscanec S., Jiang D., Novoselov K. S., Roth S., Geim A. K. Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers, *Physical Review Letters* **97**, 187401, 2006
- [5] Zhang L., Xu Q., Niu Jianbing, Xia Z. Role of lattice defects in catalytic activities of grapheme clusters for fuel cells, *Physical Chemistry Chemical Physics* **17**, 16733, 2015
- [6] Wang C., Chen W., Han C., Wang G., Tang B., Tang C., Wang Y., Zou W., Chen W. X, Zhang, S. Qin, S. Chang, and L. Wang, Growth of Millimeter-Size Single Crystal Graphene on Cu Foils by Circumfluence Chemical Vapor Deposition, *Scientific Reports* **4**, 4537, 2014
- [7] Kelly B. T. *Physics of Graphite* (Applied Science, London) 1981
- [8] Peigney A., Laurent Ch., Flahaut E., Bacsá R., Rousset A. Geometrical calculations on t hespecific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes, *Carbon* **39**, 507, 2001
- [9] McAllister M. J., Li J.-L., Adamson D. H., Schniepp H. C., Abdala A. A., Liu J., HerreraAlonso M., David L. Milius, R. Car, R. K. Prud'homme, and I. A. Aksay, Single Sheet Functionalized Graphene by Oxidation and Thermal Expansion of Graphite, *Chemistry of Materials* **19**, 4396, 2007
- [10] Liu X., Wang C.-Z., Hupalo M., Lin H.-Q., Ho K.-M., Tringides M. C. Metals on Graphene: Interactions, Growth Morphology, and Thermal Stability, *Crystals* **3**, 79, 2013
- [11] Lee C., Wei X. D., Kysar J. W., Hone J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science* **321**, 385, 2008
- [12] Balandin A. A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C. N. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene, *Nano Letters* **8**, 902, 2008
- [13] Zhu S.-E., Yuan S., Janssen G. C. A. M. Optical transmittance of multilayer graphene, *Europhysics Letters* **108** (1), 17007, 2014
- [14] Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Booth T. J., Stauber T., Peres N. M. R., Geim A. K. Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene, *Science* **320**, 1308, 2008

- [15] Bolotin K. I., Sikes K. J., Jiang Z., Klima M., Fudenberg G., Hone J., Kim P., Stormer H. L. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene, *Solid State Communications* **146**, 51, 2008
- [16] Bolotin K. I., Sikes K. J., Hone J., Stormer H. L., Kim P. Temperature-Dependent Transport in Suspended Graphene, *Physical Review Letters* **101**, 096802, 2008
- [17] Cao G. Atomistic Studies of Mechanical Properties of Graphene, *Polymers* **6**, 2404, 014
- [18] Giessibl F. J. AFM's path to atomic resolution, *Materialstoday* May, 32, 2005
- [19] ISO 23833:2013, Microbeam analysis — Electron probe microanalysis (EPMA) — Vocabulary
- [20] Hall E. H. On a new action of the magnet on electric currents, *American Journal of Mathematics* **2**(3), 287, 1879
- [21] ISO 18115-2:2013, Surface chemical analysis — Vocabulary — Part 2: Terms used in scanningprobe microscopy
- [22] Nonnenmacher M., O'Boyle M. P., Wickramasinghe H. K. Kelvin probe force microscopy, *Applied Physics Letters* **58**, 2921, 1991
- [23] Duong D. L., Han G. H., Lee S. M., Gunes F., Kim E. S., Kim S. T., Kim H., Ta Q. H., So K. P., Yoon S. J., Chae S. J., Jo Y. W., Park M. H., Chae S. H., Lim S. C., Choi J. Y., Lee Y. H. Probing grapheme grain boundaries with optical microscopy, *Nature* **490**, 235, 2012
- [24] Ramnani P., Neupane M. R., Ge S., Balandin A. A., Lake R. K., Mulchandani A. Raman spectra of twisted CVD bilayer graphene, *Carbon* **123**, 302, 2017
- [25] Kisielowski C., Freitag B., Bischoff M., van Lin H., Lazar S., Knippels G., Tiemeijer P., van der Stam M., von Harrach S., Stekelenburg M., Haider M., Uhlemann S., Müller H., Hartel P., Kabius B., Miller D., Petrov I., Olson E. A., Donchev T., Kenik E. A., Lupini A.R., Bentley J., Pennycook S.J., Anderson I.M., Minor A.M., Schmid A. K., Duden T., Radmilovic V., Ramasse Q.M., Watanabe M., Erni R., Stach E.A., Denes P., Dahmen U. Detection of Single Atoms and Buried Defects in Three Dimensions by Aberration-Corrected Electron Microscopy with 0.5-Å Information Limit, *Microscopy and Microanalysis* **14**, 469, 2008
- [26] Whitney W.D., & Smith B.E. "titrimetry", *The Century Dictionary and Cyclopedia*. (The Century co., New York) p.6504, 1911
- [27] Ni Z. H., Wang H. M., Kasim J., Fan H. M., Yu T., Wu Y. H., Feng Y. P., Shen Z. X. Graphene Thickness Determination Using Reflection and Contrast Spectroscopy, *Nano Letters* **7**, 2758, 2007
- [28] Siegbahn K., Nordling C., Fahlman A., Nordberg R., Hamrin K., Hedman J., Johansson G., Bergmark T., Karlsson S.-E., Lindgren I., Lindberg B. ESCA. Atomic, molecular and solid state structure studied by means of electron spectroscopy (Almqvist-Wiksells, Uppsala) 1967
- [29] IEC/TS 62607-2-1, Nanomanufacturing - key control characteristics for CNT film applications -Resistivity — Part 2-1

یادآوری: استاندارد ملی ایران شماره ۱-۲-۱۹۷۵۸: سال ۱۳۹۴، فناوری نانو- نانوساخت- مشخصات کلیدی- قسمت ۱-۲: مواد نانولوله کربنی- مقاومت الکتریکی فیلم، با استفاده از استاندارد IEC/TS 62607-2-1: 2012 تدوین شده است.

[30] Smits F. M. Measurement of sheet resistivities with the four point probe, The Bell System Technical Journal **37**, 711, 1958