



جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران



استاندارد ملی ایران
۱۹۷۵۸-۶-۴

INSO
19758-6-4
1 st Edition

Iranian National Standardization Organization

چاپ اول

2018

Identical
IEC/TS 62607-6-4
2016

۱۳۹۷

فناوری نانو- نانو ساخت-
مشخصه‌های کنترلی کلیدی-
قسمت ۶-۴: گرافن- اندازه‌گیری هدایت
سطحی با استفاده از کاواک تشدید

Nanotechnologies –Nanomanufacturing

–
Key control characteristics –
Part 6-4: Graphene – Surface
conductance measurement using
resonant cavity

ICS 07.120

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: ۸۱۱۴۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: standard@isiri.gov.ir

وبگاه: <http://www.isiri.gov.ir>

Iranian National Standardization Organization (INSO)

No.2592Valiasr 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.org.ir>

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین ومقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین ونشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود 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، مصرف کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیردولتی حاصل می شود. پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های مربوط ارسال می شود 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 می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی بهره گیری می شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی 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 می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه بندی آن را اجباری کند. هم چنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهی نامه تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت میکند. ترویج دستگاه بین المللی 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 for Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)

4-Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

« فناوری نانو - نانو ساخت - مشخصه‌های کنترلی کلیدی - قسمت ۶-۴: گرافن - اندازه‌گیری

هدایت سطحی با استفاده از کاواک تشدیدی »

(چاپ اول)

رئیس:

کاوه وش، زهرا

(دکتری مهندسی برق)

سمت و/یا محل اشتغال

دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده برق و کامپیوتر

دبیر:

نیک فرجام، علی رضا

(دکتری مهندسی برق)

دانشگاه تهران - دانشکده علوم و فنون نوین

اعضاء: (اسامی به ترتیب حروف الفباء)

اخوان، امید

(دکتری فیزیک)

دانشگاه صنعتی شریف

اکبری صحت، علی

(دکتری شیمی تجزیه)

شرکت سرآمدان آوینا

چوخاچی زاده مقدم، امین

(کارشناسی ارشد نانو فناوری)

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

راضی آستارائی، فاطمه

(دکتری فیزیک)

دانشگاه تهران - دانشکده علوم و فنون نوین

رجبی، شیمیا

(کارشناسی ارشد مهندسی برق - الکترونیک)

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

گشتی آذر، سمانه

(کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

عسگری، مجید

(کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

شرکت توسعه نانوفناوری آوید

ویراستار

نوربخش، رویا

(کارشناسی ارشد سم شناسی)

پژوهشگاه استاندارد - پژوهشکده غذایی و کشاورزی -

گروه پژوهشی بیولوژی

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ج	پیش گفتار
ح	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۱	۳ اصطلاحات و تعاریف
۲	۱-۳ لایه‌های گرافنی
۴	۲-۳ اصطلاحات مربوط به اندازه‌گیری
۶	۴ چیدمان آزمایش کاواک میکروموج
۷	۵ نمونه آزمایشی
۸	۶ روش اندازه‌گیری
۸	۱-۶ تجهیزات
۸	۲-۶ کالیبراسیون
۸	۳-۶ اندازه‌گیری
۱۰	۷ محاسبات هدایت سطحی
۱۰	۸ گزارش
۱۱	۹ ملاحظات صحت آزمایش
۱۲	پیوست الف
۱۷	کتاب نامه

پیش گفتار

استاندارد « فناوری نانو- نانو ساخت- مشخصه‌های کنترلی کلیدی- قسمت ۶-۴: گرافن- اندازه‌گیری هدایت سطحی با استفاده از کاواک تشدیدی » 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، درشصت و نهمین اجلاس هیئت کمیته ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۳۹۷/۵/۲۲ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، 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/منطقه‌ای 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/منطقه‌ای مزبور است:

منبع و ماخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

IEC/TS 62607-6-4 2016: "Nanomanufacturing – Key Control Characteristics- Part 6-4: Graphene – Surface conductance measurement using resonant cavity".

مقدمه

روش آزمون کاواک تشدیدی میکروموج برای اندازه‌گیری هدایت سطحی، یک روش غیر تماسی، سریع، حساس و دقیق است. این روش برای استفاده در استانداردها، تحقیق و توسعه و همچنین کنترل کیفیت در ساخت نانو مواد کربنی دو بعدی (2D) مناسب است. این شکل‌های ورقه مانند و پوسته مانند کربنی می‌توانند به صورت مواد گرافنی تک لایه یا چند لایه نازک اتمی، جمع‌آوری شوند، که این مواد می‌توانند به صورت پشته شده، تاخورد، مچاله شده یا لوله شده در انواع نانو ساختارهای کربنی با ابعاد جانبی محدود به چند ده نانومتر قرار بگیرند. بسیاری از این مواد جدید هستند و ویژگی‌های فیزیکی و الکتریکی فوق‌العاده‌ای مانند شفافیت نوری، نفوذپذیری حرارتی ناهمسانگرد و انتقال بار را از خود نشان می‌دهند که در بخش‌های مختلف علمی، فناوری و کاربردهای تجاری بسیار مورد توجه هستند [۱ و ۲].

بسته به ریخت شناسی خاص، چگالی حالت‌ها و میزان بی نقصی ساختار، هدایت سطحی این مواد ممکن است از 1 S تا حدود 10^{-4} S باشد. روش‌های معمول اندازه‌گیری رسانایی سطحی جریان مستقیم (DC) جهت ایجاد اتصالات الکتریکی نیاز به دستگاه تست و اتصالات پیچیده‌ای دارد که اندازه‌گیری‌ها را تحت تأثیر قرار داده و تغییر می‌دهد، که این امر تشخیص خواص ذاتی ماده را مشکل می‌سازد. در عوض، روش اندازه‌گیری کاواک تشدیدی، سریع و غیر تماسی است. بنابراین، برای استفاده در تحقیق و توسعه و محیط‌های ساخت که در آن هدایت سطحی یک متغیر عملکردی مهم می‌باشد، مناسب است. علاوه بر این، می‌توان از آن برای اندازه‌گیری مشخصه‌های الکتریکی دیگر نانو ساختارها نیز استفاده کرد.

فناوری نانو- نانو ساخت - مشخصه‌های کنترلی کلیدی - قسمت ۶-۴: گرافن - اندازه‌گیری هدایت سطحی با استفاده از کاواک تشدید

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، ارائه یک روش برای تعیین هدایت سطحی ساختارهای نانو کربن گرافنی نازک در حد اتمی یک یا چند لایه دو بعدی (2D) می‌باشد. این مواد به وسیله رسوب گذاری شیمیایی فاز بخار (CVD)، رشد لایه رونشستی روی کاربید سیلیکون (SiC)، با استفاده از اکسید گرافن احیاء شده (rGO) و یا به صورت مکانیکی از طریق ورقه ورقه شدن گرافیت [۳] حاصل می‌شوند. اندازه‌گیری‌ها در یک ساختار موج بر مستطیلی R100 استاندارد، پر شده از هوا در یکی از مدهای بسامد تشدید، معمولاً در ۷ گیگاهرتز انجام می‌شود [۴].

اندازه‌گیری هدایت سطحی توسط کاواک تشدید شامل پایش جابجایی بسامد تشدید و تغییر فاکتور کیفیت که به صورت کمی با مساحت سطح نمونه مرتبط است قبل و بعد از قرار دادن نمونه در کاواک می‌باشد. این اندازه‌گیری به طور واضحی به ضخامت نانو لایه کربنی بستگی ندارد. نیازی نیست که ضخامت نمونه معلوم باشد، اما فرض می‌شود که ابعاد جانبی در سراسر سطح نمونه یکنواخت است.

۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی به آنها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جرئی از این استاندارد ملی ایران محسوب می‌شود. در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدید نظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آنها ارجاع شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه‌های بعدی آن مورد نظر است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد استاندارد الزامی است:

2.1 ISO/TS 80004-3:2010 , 2.11 Nanotechnologies -- Vocabulary -- Part 3: Carbon nano-objects

۲-۲ استاندارد ملی ایران - ایزو ۲-۸۰۰۴-۱۳۹۵ - فناوری نانو - واژه نامه - قسمت ۲ - نانو

اشیاء

۳ اصطلاحات و تعاریف، نمادها، سرواژه‌ها و کوتاه‌نوشت‌ها

در این استاندارد علاوه بر اصطلاحات و تعاریف به کار رفته در استاندارد IEC 60153-2، اصطلاحات و تعاریف، سرواژه‌ها و کوتاه‌نوشت‌های زیر به کار می‌رود.

۱-۳

لایه‌های گرافنی

Graphene layers

۱-۱-۳

گرافن تک لایه

single-layer graphene

1LG

یک تک لایه از اتم‌های کربن با هیبرید شدن الکترونی sp^2 که به سه اتم مجاور در ساختار لانه زنبوری متصل می‌شود.

یادآوری- این یک ساختار پایه‌ای مهم، در بسیاری از نانو مواد بر پایه کربن است.

۲-۱-۳

گرافن دو لایه

bilayer graphene

2LG

ماده دو بعدی که شامل پشته‌ای از دو لایه گرافنی بوده، که به خوبی روی هم قرار گرفته اند.

یادآوری- اگر نوع روی هم قرار گرفتگی معلوم باشد، می‌توان آن را به طور جداگانه مشخص کرد، به عنوان مثال "گرافن دو لایه انباشته برنال".

۳-۱-۳

گرافن سه گانه

trilayer graphene

3LG

ماده دو بعدی که شامل پشته‌ای از سه لایه گرافنی است، که به خوبی روی هم قرار گرفته‌اند.

یادآوری- اگر نوع روی هم قرار گرفتگی معلوم باشد، می‌توان آن را به طور جداگانه مشخص کرد، به عنوان مثال "گرافن سه لایه انباشته برنال" و یا "گرافن سه لایه‌ای پیچ خورده".

۴-۱-۳

گرافن کم لایه

few-layer graphene

FLG

ماده دو بعدی که شامل پشته‌ای از سه تا ۱۰ لایه گرافنی است، که به خوبی روی هم قرار گرفته‌اند.

۵-۱-۳

نانوصفحه

nanoplate

نانو شیء با یک بعد خارجی در مقیاس نانو و دو بعد خارجی دیگر که به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگترند.

۶-۱-۳

نانو ورقه

nanosheet

نانوصفحه‌ای است، که ابعاد جانبی آن بزرگتر از نانو صفحه می‌باشد.

۷-۱-۳

اکسید گرافن

Graphene oxide

GO

گرافن اصلاح شده به روش شیمیایی است، که از طریق اکسیداسیون و لایه برداری گرافیت همراه با اصلاح موثر اکسایشی در صفحه اصلی، تهیه شده است.

یادآوری - اکسید گرافن یک ماده منحصر به فرد با میزان اکسیژن بالا است، که معمولاً با نسبت اتمی C/O کمتر از ۳ و به طور نوعی نزدیک به ۲ مشخص می‌گردد.

۸-۱-۳

اکسید گرافن احیاء شده

Reduced graphene oxide

rGO

اکسید گرافنی که برای کاهش میزان اکسیژن آن فراوری شده است.

یادآوری ۱- این ماده را می‌توان از طریق روش‌های شیمیایی، حرارتی، میکروموج، فوتو شیمیایی، نورگرمایی یا روش‌های میکروبی/باکتریایی و یا لایه برداری اکسید گرافن احیاء شده، تهیه کرد.

یادآوری ۲- اگر اکسید گرافن به طور کامل احیاء شود، محصول حاصل گرافن خواهد بود. با این حال، در عمل برخی از گروه‌های عاملی اکسیژن دار باقی خواهد ماند و تمام پیوندهای sp^3 به ساختار sp^2 برنخواهند گشت. عوامل احیاء کننده مختلف موجب ایجاد نسبت‌های مختلف کربن به اکسیژن و ایجاد ترکیب‌های شیمیایی مختلف در اکسید گرافن احیاء شده، می‌شوند.

۹-۱-۳

مواد گرافنی

graphene material

نانوموادى بر پایه گرافن می‌باشند.

یادآوری ۱- نمونه‌هایی از مواد گرافنی، شامل گرافن چند لایه (کمتر از ۱۰ لایه)، گونه‌های اصلاح شده به روش شیمیایی (GO, rGO) و مواد ساخته شده با پیش ماده‌های دیگر یا فرایندهائی مانند رسوب بخار شیمیایی، (CVD^۱) می‌باشد [۳].

۲-۳

اصطلاحات مربوط به اندازه‌گیری

۱-۲-۳

هدایت سطحی

surface conductance

σ_s

مشخصه فیزیکی مواد دوبعدی است، که توانایی رسانایی جریان الکتریکی را بیان می‌کند.

یادآوری ۱- واحد اندازه‌گیری σ_s در دستگاه بین المللی یکاها زیمنس (S) است. با این حال، در ادبیات تجاری و صنعتی، نوعا زیمنس بر مربع (S/square) برای اشاره به هدایت سطحی به طور نوعی استفاده می‌شود. این برای جلوگیری از اشتباه میان هدایت سطحی و هدایت الکتریکی (G) است که واحد اندازه‌گیری مشترکی دارند:

$$G=I/U= \sigma_s(w/l)$$

یادآوری ۲- هدایت سطحی (σ_s) را می‌توان با بهنجار شده کردن رسانایی G با توجه به عرض (w) و طول (l) نمونه، به دست آورد.

۲-۲-۳

هدایت الکتریکی

electric conductance

G

اندازه‌گیری سهولت عبور جریان الکتریسیته در طول مسیری خاص می‌باشد.

یادآوری- واحد هدایت الکتریکی در سیستم SI، زیمنس (S) است.

۳-۲-۳

هدایت حجمی

volume conductivity

¹ Chemical Vapor Deposition

σ_v

مشخصه فیزیکی مواد سه بعدی که توانایی رسانایی جریان الکتریکی را بیان می‌کند.
یادآوری - هدایت حجمی را می‌توان با تقسیم هدایت سطحی به ضخامت هدایت کننده به دست آورد (t):

$$\sigma_v = \sigma_s / t$$

واحد اندازه‌گیری σ_v زیمنس بر متر (S/m) است.

۴-۲-۳

مقاومت سطحی

مقاومت ورقه ای

surface resistance

sheet resistance

ρ_s

معکوس σ_s

یادآوری - ρ_s مشخصه‌ای از مواد دو بعدی است. واحد اندازه‌گیری ρ_s در سیستم SI، اهم (Ω) است. با این وجود در ادبیات تجاری و صنعتی، برای بیان مقاومت سطحی یا مقاومت ورقه ای، معمولاً از واحد اهم بر مربع (Ω/square) استفاده می‌کنند.

۵-۲-۳

کاواک میکروموج

کاواک بسامد رادیویی

کاواک RF

microwave cavity

radio frequency cavity

RF cavity

نوسانگری متشکل از یک ساختار فلزی بسته است، که میدان‌های الکترومغناطیسی را در ناحیه میکروموج طیف بسامدی، محدود می‌کند.

یادآوری - ساختار را می‌توان با هوا یا سایر مواد دی الکتریک پر کرد. کاواک عملکردی مشابه با یک مدار نوسان ساز با افت بسیار کم در بسامد عملیاتی آن رفتار می‌کند. کاواک‌های میکروموج معمولاً از بخش‌های بسته (یا اتصال کوتاه) یک موج بر ساخته می‌شوند. هر کاواک، دارای بسامدهای تشدید بیشماری (f_r) است، که متناظر با مدهای میدان الکترومغناطیسی است. برای برآورده شدن شرایط مرزی لازم طول کاواک، باید مضرب صحیح از نیم طول موج تشدید باشد.

۶-۲-۳

ضریب کیفیت

quality factor

Q

متغیر بدون بعد که نسبت انرژی ذخیره شده در مدار تشدید را به میانگین زمانی توان تلف شده در کاواک یا به طور معادل پهنای باند نیمه توان تشدید، (Δf) ، نسبت به بسامد تشدید (f_r) را نشان می‌دهد.

$$Q = f_r / \Delta f$$

۷-۲-۳

متغیرهای پراکندگی میکروموج

متغیرهای S

microwave scattering parameters

S-parameters (S_{ij})

عواملی که چگونگی انتشار انرژی RF از طریق یک شبکه چند درگاهی میکروویو را مقدارسنجی می‌کنند. یادآوری - شاخص (i) نشان دهنده درگاه دریافت - گیرنده است. اندیس (j) به درگاه ارسال (فرستندها) اشاره دارد. بر این اساس، S_{21} مقدار انرژی میکروویو را که از درگاه ۱ به ۲ منتقل می‌شود، مشخص می‌کند. در مقایسه، S_{11} میزان انرژی میکروموجی را که در درگاه ۱ ارسال و دریافت می‌شود و اغلب به عنوان ضریب انعکاسی شناخته می‌شود را مشخص می‌کند.

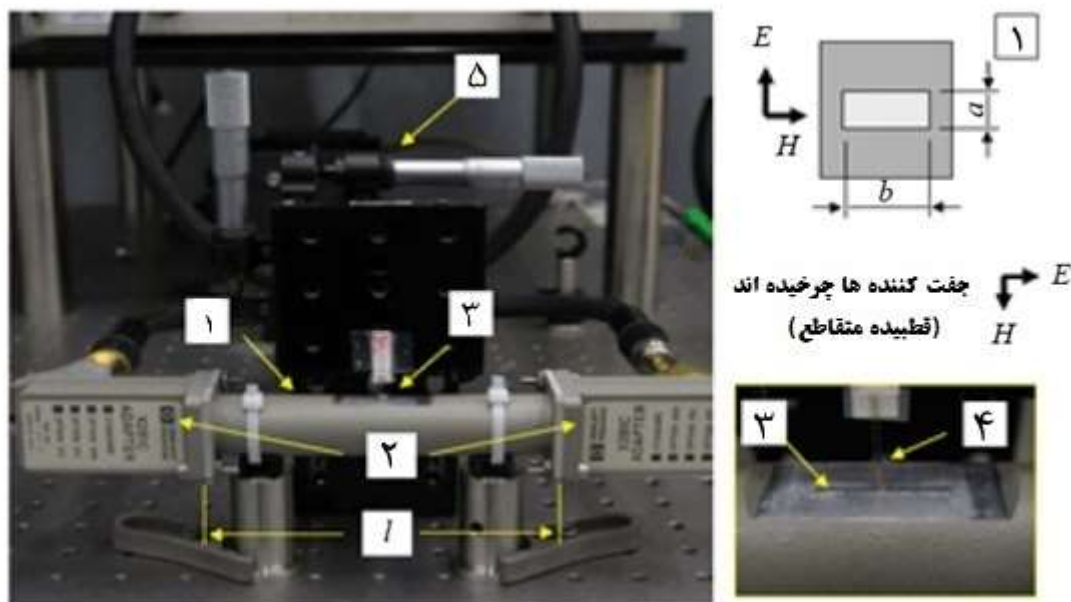
۴ چیدمان آزمون کاواک میکروموج

چیدمان آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار شامل یک موج بر R100 (WR-902) (۱) است که امپدانس بار نامی 50Ω دارد، به طوری که نسبت موج ایستای انعکاسی ولتاژ (VRSW) $1:1/0.4$ یا کمتر، و افت ورودی 0.5 dB/m یا کمتر است. موج بر در محدوده بسامد میکروموج 6.6 گیگاهرتز تا $13/0$ گیگاهرتز کار می‌کند. ابعاد موج بر: $a = 10/16 \text{ mm}$ ، $b = 24/6 \text{ mm}$ و طول آن $l = 134 \text{ mm}$ است. هر دو انتهای موج بر بسته است. دیواره‌های کاواک به صوت هم محور به جفت‌کننده‌های موج بر-R100 (WR-90) متصل می‌شود^۱ که نسبت به قطبش میدان الکترومغناطیسی موج بر، E و H، به صورت متقاطع قطبیده ($\theta = 87^\circ$) می‌شوند. بسامد نوسان حالت‌های پایه که در طول مسیر انتشار تحریک شده است، توسط طول الکتریکی کاواک (l_e) تعیین می‌شود. برای موج بر پر از هوا با ضریب گذردهی نسبی $\epsilon_r = 1$ ، $l_e \approx l$ می‌باشد.

نمونه از طریق یک شکاف باریک (۳) (۱ میلی متر \times ۱۰ میلی متر) در کاواک وارد شده و دقیقاً بین دو دیواره موج بر در مرکز کاواک، که در آن میدان الکتریکی (E) به حداکثر مقدار خود می‌رسد، قرار می‌گیرد.

^۱ در بعضی از کشورها به موجبر استاندارد R100 به عنوان WR-90 اشاره شده است.

نمونه (۴) به صفحه (۵) متصل می‌شود. این صفحه برای کنترل و اندازه‌گیری سطح نمونه در داخل کاواک استفاده می‌شود. در مورد نمونه‌های مایع، کل دستگاه آزمایش در شکل ۱ برای انجام اندازه‌گیری نمونه در موقعیت افقی می‌تواند دوباره جهت دهی شود.



راهنما

۱ موج بر

۲ جفت کننده

۳ شکاف برای قرار دادن نمونه

۴ نمونه

۵ نگهدارنده نمونه

شکل ۱- چیدمان آزمون کاواک میکروموج

۵ نمونه آزمونی

نمونه آزمایشی، شامل یک لایه گرافنی است، که روی یک زیر لایه نارسانا پوشش دهی یا پیوند داده شده است. این زیر لایه، نگه دارنده مکانیکی لازم به منظور کار و قرار دادن مواد گرافنی در داخل چیدمان آزمون را فراهم می‌کند. به منظور به حداقل رساندن اثرات زیر لایه بر روی اندازه‌گیری، مواد زیر لایه باید هدایت کم و ضریب دی الکتریک پایینی داشته باشند. زیر لایه پیشنهادی برای گرافن به دست آمده از روش CVD، لایه برداری یا سایر روش‌های مصنوعی، ویفر سیلیکونی جوش خورده با کاربرد الکترونیکی (با خلوص مناسب برای کاربردهای الکترونیکی) با ضخامت ۲۰۰ تا ۲۵۰ میکرومتر است. مواد گرافنی مورد آزمایش باید با

استفاده از فرآیندی که یکپارچگی و خلوص لایه گرافنی را حفظ و در عین حال احتمال آلودگی را به حداقل می‌رساند، بر روی سطح زیرلایه منتقل شوند. این روش به هر دو نوع زیر لایه پوشش داده شده و بدون پوشش نیاز دارد. اندازه توصیه شده نمونه آزمایشی ۳ میلی متر × ۲۰ میلی متر است. گرافن رشد داده شده به روش رونشستی بر روی سیلیکون کاربید (SiC)، می‌تواند به طور مستقیم بر روی زیر ساخت اصلی پس از برداشتن آن از وجوه Si یا C ویفر، مورد آزمایش قرار گیرد.

یادآوری- گرافن رونشستی به راحتی می‌تواند با گرم کردن کریستال تک لایه SiC در محیطی با خلاء بالا یا در یک فضای گاز بی اثر رشد کند. سطوح SiC مورد استفاده برای رشد گرافن شامل سطوح Si و C است. در وجه Si، گرافن همگن و خالص می‌تواند با تعداد لایه‌های قابل کنترلی رشد داده شود. تحرک حامل‌ها به چندین $m^2V^{-1}s^{-1}$ می‌رسد، هرچند این مقدار در حضور پله‌های اتمی زیر لایه کاهش می‌یابد. در وجه C، اگر چه تعداد لایه‌ها همگن نیست، گرافن دولایه‌ای پیچ خورده می‌تواند رشد کند، که انتظار می‌رود با انتخاب یک روش بتوان ساختار الکترونیکی گرافن را اصلاح کرد. از نقطه نظر کاربردی، گرافن بر روی SiC، زیر ساخت مورد استفاده برای ساخت افزارهای الکترونیکی با سرعت بالا و آرایه‌های نانو نوار گرافنی متراکم خواهد بود. این ساختارها می‌توانند شکاف باند خاصی را ارائه نمایند [۵].

۶ روش اندازه‌گیری

۱-۶ تجهیزات

اندازه‌گیری نیاز به تحلیل گر شبکه برداری دو درگاهی خودکار (VNA^1) دارد که محدوده بسامدی (۶/۶) گیگاهرتز تا ۱۳ گیگاهرتز) را پوشش دهد و قابلیت اندازه‌گیری متغیرهای پراکندگی موج S_{21} یا S_{12} که بین درگاه‌های VNA_1 و VNA_2 ارسال می‌شوند را دارا باشد. اتصالات بین چیدمان آزمایش (طبق بند ۴) و تحلیل گر شبکه باید با استفاده از کابل‌های هم محور با کیفیت بالا و تطبیق دهنده‌های مناسب انجام شود. محدوده دینامیکی اندازه‌گیری‌ها باید در حدود ۷۰ dB یا بیشتر باشد. این وسیله باید به یک واسط IEEE 488 I/O یا مشابه آن، برای انتقال داده بین تحلیلگر شبکه و واحد جمع‌آوری داده مجهز شود.

۲-۶ واسنجی

واسنجی فقط در انتهای کابل‌های هم محور مورد نیاز است. واسنجی کامل دو درگاهی^۲ برای S_{21} و S_{12} باید مطابق با مشخصات ارائه شده توسط سازنده تحلیل گر شبکه و با استفاده از کیت واسنجی مناسب، در شرایط مدار باز-اتصال کوتاه-متصل به بار انجام شود.

۳-۶ اندازه‌گیری‌ها

۱-۳-۶ کلیات

چیدمان آزمون بدون نمونه را به تحلیل گر شبکه برداری دو درگاهی خودکار تحلیلگر (VNA) وصل کنید. VNA را برای اندازه‌گیری دامنه S_{21} با ۸۰۰ نمونه داده یا بیشتر تنظیم کنید. محدوده بسامدی را تا ۲

¹ Vector Network Analyser

² Port

گیگاهرتز و بسامد مرکزی را تا ۸/۵ گیگاهرتز انتخاب کنید. چندین قله تشدید باید روی صفحه VNA ظاهر شوند، که هر کدام مقدار قله S_{21} آن حدود ۲۰-دسی بل و حداقل مقدار S_{21} (سطح نوفه) آن در محدوده ۶۰-دسی بل یا کمتر باشد. بسامد تشدید (f_0) سومین قله تشدید TE_{103} ، را که در آن میدان الکتریکی موج ایستا، حداکثر مقدار خود را در وسط کاواک دارد، تشخیص دهید.

یادآوری - میدان الکتریکی در وسط کاواک در صورتی حداکثر مقدار خود را دارد که نمونه تحت مدهای $TE_{1,0,n}$ پایه فرد به ازای ... $n=1, 3, 5, 7$ قرار گیرد. اگر کاواک از نظر الکتریکی بیش از حد طولانی باشد، اولین مد تشدید، $TE_{1,0,1}$ ، ممکن است داخل بسامد قطع موج بر، یعنی زیر ۶/۵ گیگاهرتز بیفتد. بنابراین، روش آزمون توصیه می‌کند تا از مدهای ۳، ۵، ۷، ... استفاده شود. این مدها می‌توانند به راحتی شناسایی شوند. قرار دادن نمونه در کاواک موجب موجب می‌شود، که دامنه تمام قله‌های تشدید متناظر با مدهای فرد کاهش یافته و به سمت بسامدهای پایین تر جابجا شوند (شیفت یابند)، در حالی که قله تشدید مطابق با مدهای زوج (...، ۲، ۴، ۶، ...) بدون تغییر باقی می‌ماند.

۲-۳-۶ کاواک خالی

بسامد مرکزی را در f_0 تنظیم کنید و محدوده بسامد را در حدود $2\Delta f$ (۲ مگاهرتز یا کمتر) تنظیم کنید، به طوری که ارتفاع قله $|S_{21}|$ حدود ۵ دسی بل شود. پهنای باند نیمه توان را از رابطه $\Delta f = |f_2 - f_1|$ تعیین کنید، که در آن f_1 و f_2 بسامدهای قله تشدید و ۳ دسیبل کمتر از بیشترین $|S_{21}|$ هستند. ضریب کیفیت Q_0 کاواک بدون نمونه را از فرمول (۱) تعیین کنید.

$$Q_0 = f_0 / \Delta f \quad (1)$$

۳-۳-۶ آزمون

نمونه را در طول‌های (x) در کاواک قرار دهید، ضمن اینکه طول ورود از مبدا (h_x) که در حجم کاواک اختلال ایجاد می‌کند، اندازه‌گیری می‌شود (به نکات ۱ تا ۳-۳-۶ مراجعه کنید). سطح نمونه داخل کاواک (A_x) را در هر طول (h_x) ثبت کنید.

$$A_x = w \cdot h_x \quad (2)$$

که در آن w عرض نمونه تحت آزمایش است. هنگامی که کاواک توسط نمونه مختل می‌شود، موقعیت (f_x) قله تشدید باید به سمت بسامدهای پایین جا بجا شود و مقدار $|S_{21}|_{\max}$ با افزایش A_x کاهش می‌یابد. در صورت لزوم، بسامد مرکزی و محدوده بسامد را همانند حالت ۲-۳-۶ تنظیم کنید. بسامد تشدید f_x ، پهنای باند نیمه توان Δf و ضریب کیفیت مربوطه Q_x (فرمول (۱)) را ثبت کنید. (نکات ۲ تا ۳-۳-۶ را ببینید).

یادآوری ۱ - طول فعال (h_x) مختل کننده حجم کاواک مربوط به بخشی از نمونه است که درون کاواک قرار دارد (شکل ۱ را ببینید). مقدار نوعی Q_0 حدود ۳۰۰۰ است که می‌تواند با عدم قطعیت ۱۰٪ ΔQ اندازه‌گیری شود [۶ و ۴]. بنابراین، حداقل طول ورود h_{x0} که موجب می‌شود ضریب کیفیت از مقدار اولیه Q_0 خود تغییر کند، می‌تواند به صورت تجربی بر اساس ΔQ به دست آید.

یادآوری ۲ - موارد عملیاتی یک تحلیل گر شبکه خودکار نوعی، شامل توابعی برای یافتن حداکثر قله (بسامد تشدید)، محاسبه پهنای باند نیمه توان، ضریب کیفیت و برای تنظیم بسامد مرکزی و محدوده بسامد است. این توابعی می‌توانند به صورت دستی اجرا شوند یا از یک برنامه نرم افزاری ذخیره شده برای محاسبه خودکار Q پس از هر مرحله وارد شدن نمونه، اجرا شود.

۴-۳-۶ تکرار روش

مراحل ذکر شده (طبق زیر بند ۶-۳-۲) برای ثبت Q_x و A_x را تا زمانی تکرار کنید، که $h_x \geq 10$ میلی متر شود یا ارتفاع قله تشدید به حدود ۱۰ دسی بل بالاتر از سطح نوفه کاهش یابد.

۶-۳-۵ بستره

در صورت تمایل مراحل طبق زیر بند ۶-۳-۲ و ۶-۳-۳ را برای زیر لایه بدون پوشش انجام دهید.

۷ محاسبات هدایت سطحی

فرمول (۳) هدایت سطحی نمونه را با ضریب کیفیت اندازه‌گیری شده و مساحت سطح نمونه، مرتبط می‌کند [۴]:

$$\frac{1}{Q_x} - \frac{1}{Q_0} = \sigma_s (2 w h_x) / (\pi \epsilon_0 f_0 V_0) \quad (۳)$$

که در آن :

σ_s هدایت سطحی نمونه است؛

$w h_x$ مساحت سطح نمونه در داخل کاواک است؛

Q_x ضریب کیفیت نمونه است؛

f_0 و Q_0 ضریب کیفیت و بسامد تشدید کاواک خالی هستند؛

V_0 حجم کاواک خالی است، $V_0 = a b l$ (به شکل ۱ نگاه کنید)؛

ϵ_0 گذردهی فضای آزاد است.

از آنجا که برای یک کاواک داده شده V_0 ، Q_0 و f_0 متغیرهای ثابتی هستند، فرمول (۳) را می‌توان به فرمول (۴) تبدیل کرد، که می‌تواند بر روی یک خط مستقیم برازش شود.

$$\frac{1}{Q_x} - \frac{1}{Q_0} = \sigma_s k (w h_x) \quad (۴)$$

که در آن:

$$k = 2 / (\pi \epsilon_0 f_0 V_0)$$

بنابراین، σ_s را می‌توان از شیب بخش خطی نمودار $(\frac{1}{Q_x} - \frac{1}{Q_0})$ بر حسب $(k w h_x)$ به دست آورد (شکل الف-۲ را ببینید).

۸ گزارش

گزارش آزمون باید دارای آگاهی‌های زیر باشد:

- روش آماده سازی و ابعاد نمونه.

- مقادیر V_0 ، Q_0 و f_0

- جدول f_x ، Q_x و h_x برای نمونه با لایه گرافنی.

- نمودار $1/Q_x - 1/Q_0$ بر حسب $(k w h_x)$ برای نمونه حاوی لایه گرافن بر روی زیر لایه.

- جدول f_x ، Q_x و h_x برای نمونه زیر لایه بدون پوشش با عرض اسمی w به اندازه نمونه حاوی لایه گراف.

- نمودار $1/Q_x - 1/Q_0$ به صورت تابعی از $(k w h_x)$ برای زیر لایه بدون پوشش.
- ۸- هدایت سطحی اندازه‌گیری شده برای نمونه حاوی لایه گرافن بر روی زیر لایه
- هدایت سطحی اندازه‌گیری شده برای نمونه با زیر لایه بدون پوشش، σ_{s-sub} .
- هدایت سطحی، σ_G ، خود لایه گرافن: $\sigma_G = \sigma_s - \sigma_{s-sub}$.

مقدار هدایت سطحی مواد گرافنی می‌تواند بین $S=1$ (برای FLG) و یا گرافن آلایش شده) و $S=10^{-5}$ (برای SLG) باشد. چنین مقادیر هدایتی بسیار بزرگ تر از هدایت سطحی نوعی زیر لایه‌های سیلیکای جوش خورده است و بنابراین در بسیاری از موارد می‌توان اثر زیر لایه را نادیده گرفت، یعنی $\sigma_G \approx \sigma_s$. اگر مقدار σ_s قابل مقایسه با σ_{s-sub} باشد، اما σ_s حداقل به اندازه یک مرتبه از σ_{s-sub} بزرگ تر باشد، σ_{s-sub} را از σ_s کم کنید تا σ_G به دست آید. هنگامی که لایه شامل یک شبکه نیمه پیوسته از نانوصفحه‌های گرافنی است، σ_s می‌تواند بسیار کوچکتر از 10^{-5} باشد. به طور مشابه، σ_s می‌تواند به سرعت با افزایش تراکم نقص‌های sp^3 کربن، به عنوان مثال، پس از عامل دار کردن شیمیایی یا احیاء ناکامل rGO، کاهش یابد. در صورتی که هدایت سطحی اندازه‌گیری شده با قابلیت هدایت سطحی زیر لایه قابل مقایسه باشد، نتیجه حاصل از فرمول تفریق ساده می‌تواند غیر قابل اعتماد باشد.

یادآوری- در چنین مواردی توصیه می‌شود از مدل اصلاح داده، که در مرجع [۶] تشریح شده، استفاده گردد.

۹ ملاحظات صحت آزمایش

عوامل عدم قطعیت متعددی مانند خطاهای دستگاهی، عدم قطعیت ابعاد هندسه نمونه مورد آزمایش، زبری و ناخالصی‌های وارد شده، در عدم قطعیت ترکیبی اندازه‌گیری‌ها دخیل هستند. با این حال، با استفاده از تکنیک مشتق نسبی، در فرمول (۳) یا فرمول (۴) و با در نظر گرفتن خطاهای تجهیزات و آزمایش‌های تجربی، می‌توان تجزیه و تحلیل مناسب را انجام داد. می‌توان فرض کرد که عدم قطعیت استاندارد S_{21} در محدوده مشخصات ذکر شده توسط سازنده برای تحلیل گر شبکه، می‌تواند حدود ± 0.01 dB برای دامنه و ± 0.5 درجه برای فاز باشد. بسامد تشدید را می‌توان با دقت چند کیلو هرتز در صورت جمع آوری 800 نقطه داده در طول محدوده بسامد $2\Delta f$ تعیین کرد. در این صورت، عدم قطعیت نسبی ضریب Q_x به طور نوعی کمتر از 0.5% است. عدم قطعیت استاندارد نسبی ترکیبی اندازه‌گیری‌ها به طور نوعی بهتر از 0.6% است. با قرار دادن داده‌های قله تشدید در یک مدل نوسان ساز میرا می‌توان به دقت بیشتری دست یافت، که این مدل از هر دو متغیر اندازه و فاز متغیر پراکندگی مختلط اندازه‌گیری شده S_{21} استفاده می‌کند [۶]. مقایسه روش‌های محاسباتی ضریب کیفیت تأثیر یافته از عدم قطعیت اندازه‌گیری‌های تحلیل گر شبکه، در [۷] ارائه شده است.

محدودیت‌های دیگر ممکن است ناشی از عدم قطعیت سامانه‌ای خاص مربوط به دستگاه‌ها، استانداردهای واسنجی و نواقص ساختاری و ابعادی نمونه آزمایشی استفاده شده باشد.

پیوست الف
(آگاهی دهنده)

مطالعه موردی اندازه‌گیری هدایت سطحی گرافن تک لایه و کم لایه

الف-۱ کلیات

در این مطالعه موردی، هدایت سطحی گرافن تک لایه و کم لایه قابل دسترس تجاری شده، تهیه شده از فرآیند CVD با استفاده از کاواک تشدید غیر تماسی، اندازه‌گیری شد. قرار دادن بخشی از نمونه، امکان کنترل دقیق سطح نمونه در کاواک را فراهم می‌کند و داده‌های بیشتری برای برآزش و دستیابی به صحت بیشتر به دست می‌آید. اندازه‌گیری‌ها نسبت به بسامد تشدید در هوا سنجیده می‌شود.

الف-۲ روش اختلال کاواک

اختلال ایجاد شده در کاواک توسط یک نمونه با قابلیت گذردهی نسبی مختلط $\epsilon_r' - j\epsilon_r''$ با فرمول (الف-۱) تا (الف-۳) نشان داده شده است، که الف-۳ برای میدان‌های غیر یکنواخت استفاده می‌شود [۴، ۶].

$$\frac{f_0 - f_r}{f_0} = (\epsilon_r' - 1) \cdot 2 \frac{V_r}{V_0} - b_r \quad (\text{الف-۱})$$

$$\frac{1}{Q_r} - \frac{1}{Q_0} = \epsilon_r'' \cdot 4 \frac{V_r}{V_0} - 2b_q \quad (\text{الف-۲})$$

$$C_V = \frac{2 \int_{V_r} E_r E_0 dV}{\int_{V_0} E_0^2 dV} = b_r + b_q \quad (\text{الف-۳})$$

نرم افزار شبیه ساز ساختار بسامد بالا (HFSS) برای حل فرمول‌ها الف-۱ تا الف-۳ به صورت عددی، با این فرض که حجم نمونه V_r در مقایسه با حجم کاواک، V_0 کوچکتر است، $V_r \leq V_0$ و اینکه قابلیت گذردهی نمونه به V_r بستگی ندارد، استفاده می‌شود. در محدوده‌ای از مقادیر Q_r و V_r که $(b_r + b_q)$ ثابت هستند، فرمول الف-۱ و الف-۲ خطی بوده و می‌توانند برای به دست آوردن ϵ_r با اندازه‌گیری Q_0 ، Q_s ، f_0 و f_r به عنوان تابعی از V_r حل شوند [۴]. قرار دادن نمونه در کاواک، تنظیم شده در بسامد تشدید f_0 ، با یک زیر لایه کم تلفات، با قابلیت گذردهی $\epsilon_{sub}' - j\epsilon_{sub}''$ ، ضخامت t_{sub} و حجم $V_{sub} = w t_{sub} h$ موجب می‌شود بسامد تشدید به سمت بسامدهای پایین تر، از f_0 به f_{sub} ، که متناسب با ϵ_{sub}' است، جابجا شود. ضریب کیفیت مربوطه از Q_0 به Q_{sub} کاهش می‌یابد، که بستگی به ϵ_{sub}'' دارد. آزمایش‌های مشابه با بسترهای یکسان پوشیده شده با یک لایه هادی از مواد گرافنی، با ضخامت t_G و حجم $V_G = w t_G h$ موجب کاهش ضریب کیفیت از Q_0 به Q_{G-sub} می‌شود، که این امر به علت تلفات ترکیبی زیر لایه و لایه گرافنی، $\epsilon_{sub}'' + \epsilon_{sub}''$ می‌باشد. تلفات دی الکتریک و هدایت سطحی توسط فرمول (الف-۴) به هم مرتبط می‌شوند:

$$\varepsilon_G'' = \frac{\sigma_G}{2\pi\varepsilon_0 f_0 t_G} \quad (\text{الف-۴})$$

با فرض اینکه تلفات دی الکتریک گرافن بسیار بیشتر از زیر لایه $\varepsilon_G'' + \varepsilon_{\text{sub}}'' \approx \varepsilon_G''$ است، فرمول الف-۲ می‌تواند ساده شده و به فرمول الف-۵ تبدیل شود که در مرجع [۴] نشان داده شده است:

$$\frac{1}{Q_x} - \frac{1}{Q_0} = \frac{\sigma_G}{\pi\varepsilon_0 f_0} \frac{2wh_x}{V_0} - 2b_q \quad (\text{الف-۵})$$

که

σ_G هدایت سطحی لایه گرافنی است؛

ε_0 قابلیت گذردهی فضای آزاد است؛

$w h_x$ سطح نمونه لایه گرافنی وارد شده در کاواک است.

Q_x ضریب کیفیت در طول ورود از مبداء h_x است.

f_0 ، Q_0 و V_0 به ترتیب، بسامد تشدید، ضریب کیفیت و حجم کاواک خالی است.

یادآوری - فرمول الف-۵، که در آن σ_G مشخص می‌شود، به ضخامت لایه گرافن بستگی ندارد اما به سطح آن، $w h_x$ ، بستگی دارد که می‌تواند با دقتی بسیار بالاتر از t_G مشخص شود [۴].

الف-۳ روش تجربی

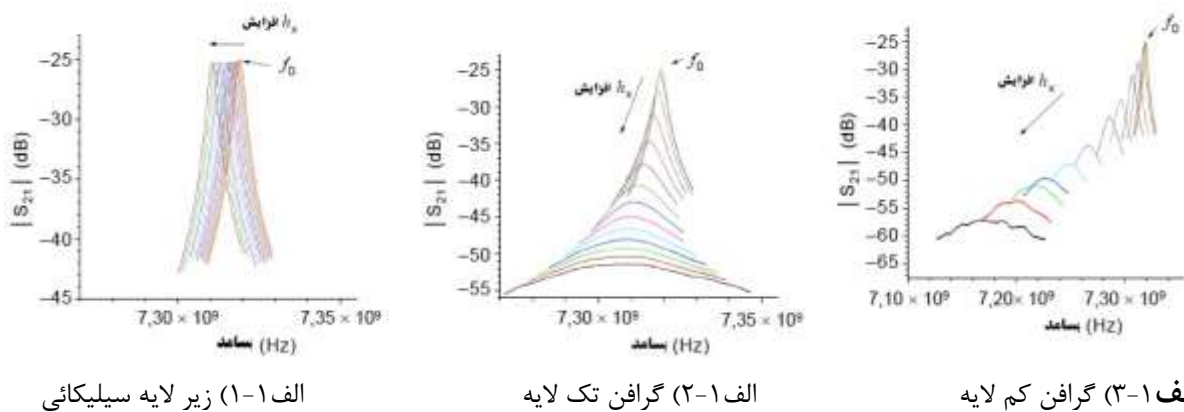
گرافن تک لایه (1LG) و گرافن کم لایه (FLG) حاصل از فرآیند CVD از یک منبع تجاری تهیه شده و بر روی ورقه‌های سیلیکای جوش خورده به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر انتقال داده شدند [۸]، که از آن، نمونه‌های ۳ میلیمتر \times ۲۰ میلی متر بریده شدند.

طراحی چیدمان آزمایش کاواک در شکل ۱ از یک موج بر ۱۳۴ میلیمتری R100، استفاده می‌کند که در محدوده بسامدی ۶/۶ گیگاهرتز تا ۱۳ گیگاهرتز عمل می‌کند [۴]. مساحت نمونه داخل کاواک با قرار دادن بخشی از نمونه در آن کنترل می‌شود. این چیدمان توسط کابل‌های هم محور نیمه سخت و تطبیق دهنده‌های هم محور به R100 به یک تحلیل گر شبکه^۱ (مدل Agilent 8720D3)، متصل شده است. دیواره‌های کاواک از طریق جفت کننده‌های R100، که به صورت متقاطع با توجه به قطبش موج بر قطبیده شده‌اند ($\varphi = 87^\circ$)، کار گذاشته می‌شود. سیستم با استفاده از یک کیت واسنجی مدار باز-اتصال کوتاه-تحت بار در دو انتهای هم محور، کالیبره می‌شود. بسامد تشدید f_x و پهنای باند نیمه توان Δf_x برای مدهای تشدید فرد TE103 تا TE109 از قله‌های متغیر پراکندگی اندازه‌گیری شده بین ۶ گیگاهرتز و ۱۳ گیگاهرتز تعیین می‌شوند. چیدمان تست، تجهیزات و روش اندازه‌گیری در بندهای ۴ تا ۸ توضیح داده شده‌اند. در اینجا، f_0 قله TE103 = ۷۳۱۹۱۱۲۵ GHz است، $Q_0 = 3000$ ، $V_0 = 33,491 \text{ cm}^3$ است.

^۱ Agilent 8720D نمونه‌ای از یک محصول مناسب تجاری است. این اطلاعات برای راحتی کاربران در این سند ارائه شده است و IEC از این محصول پشتیبانی نمی‌کند.

الف-۴ نتایج

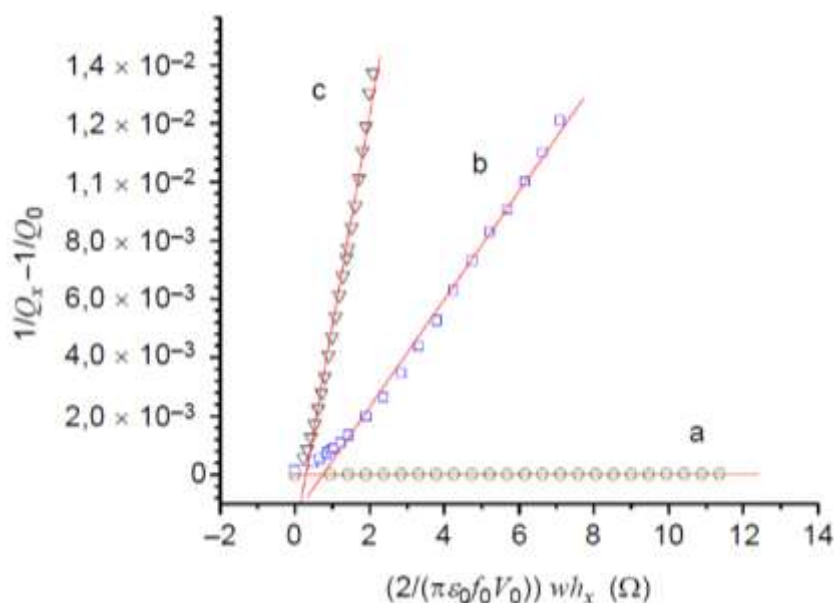
شکل الف-۱، دامنه S_{21} در قله تشدید TE103 اندازه‌گیری شده برای 1LG و FLG را به صورت تابعی از میزان ورود نمونه به داخل کاواک نشان می‌دهد. شکل الف-۱-۱ نشان می‌دهد که با افزایش ورود، ارتفاع قله تشدید زیر لایه سیلیکای جوش خورده، نسبتاً بدون تغییر باقی می‌ماند که این امر نشان دهنده هدایت کم زیر لایه است، که اعتبار فرض ساده سازی فرمول (الف-۵) را تایید می‌کند. در مقایسه، شکل الف-۱-۲ نشان می‌دهد که ارتفاع قله تشدید 1LG با افزایش میزان ورود نمونه به علت هدایت بسیار بالاتر لایه گرافنی کاهش می‌یابد. همان گونه که کاهش سریع ارتفاع قله تشدید در شکل الف-۱-۳ نشان می‌دهد، هدایت FLG از 1LG بیشتر است. علاوه بر کاهش دامنه، این قله تشدید به طور قابل توجهی به سمت بسامدهای پایین‌تر جابجا می‌شود، که نشان دهنده قطبش زیاد دی الکتریک احتمالاً در مرز بین دانه‌ها در نمونه FLG است.



شکل الف-۱-۱- دامنه S_{21} قله تشدید TE103 به عنوان تابعی از بسامد در چندین طول ورود مختلف نمونه (h_x)

الف-۵ هدایت سطحی گرافن تک لایه و گرافن کم لایه

شکل الف-۲ نمایش ترسیمی فرمول (الف-۵) با استفاده از داده‌های تجربی Q_x و h_x برای 1LG و FLG. نشان داده شده در شکل الف-۱ است. خطوط توپر، برازش‌های خطی نقاط داده فرمول (الف-۵) است.



راهنما

a زیر لایه سیلیکائی

b گرافن تک لایه

c گرافن کم لایه

خطوط، برازش‌های خطی نقاط داده شده در فرمول (الف-۵) هستند.

شکل الف-۲- نمودار $1/Q_x - 1/Q_0$ به عنوان تابعی از مساحت بهنجار شده نمونه ($w h_x$)

هدایت سطحی، σ_G ، از شیب بخش خطی نمودارها که در آن بخش متغیر b_q در فرمول الف-۵ قابل صرفنظر کردن است، به دست می‌آید.

برای گرافن تک لایه، σ_G برابر است با $1/84 \times 10^{-3} S$ ($\rho_G = 543 \Omega$)
 در مورد گرافن کم لایه، σ_G برابر است با $7/19 \times 10^{-3} S$ ($\rho_G = 139 \Omega$)
 هدایت سطحی زیر لایه سیلیکائی حدود $5/1 \times 10^{-7} S$ است.
 عدم قطعیت نسبی ترکیبی در σ_G ، حدود ۱/۵٪ است.

الف-۶ خلاصه

نتایج هدایت سطحی ارائه شده، به طور کیفی با داده‌های منتشر شده برای مواد گرافنی مشابه، انطباق دارد [۹،۱۰]، گرچه ممکن است نشان دهنده ریخت شناسی‌های خاص، چگالی حالات و نواقص ساختاری ناشی از فرایند خاص CVD باشد. ماده گرافنی (تا ۱۰ لایه) به عنوان یک هادی دو بعدی در نظر گرفته می‌شود، که در آن هدایت سطحی σ_s معیار مناسبی برای هدایت الکتریکی است. هدایت حجمی (σ_V) لایه‌های ضخیم تر را می‌توان از تقسیم σ_s به ضخامت لایه به دست آورد.

اثر هدایت زیر لایه بر اندازه‌گیری هدایت گرافن، می‌تواند با استفاده از روش توضیح داده شده در بند ۸ و در مرجع [۶] در نظر گرفته شود.

کتاب نامه

- [1] H. Alcalde, J. de la Fuente, B. Kamp, A. Zurutuza, Market Uptake Potential of Graphene as a Disruptive Material, *Proceedings of the IEEE* Vol. 101, No. 7 (July 2013)
- [2] J. Obrzut, Graphene: a New Horizon for Modern Technology, *NEMA Electroindustry Magazine*, p. 9, September (2011)
- [3] A. Bianco et al, All in the graphene family – A recommended nomenclature for twodimensional carbon materials, *Carbon*, vol. 65, pp. 1-6 (2013)
- [4] J. Obrzut et al, Surface conductance of graphene from non-contact resonant cavity, *Measurement*, vol. 87, pp. 146-151 (2016)
- [5] W. Norimatsu and M. Kusunoki, Epitaxial graphene on SiC{0001}: advances and perspectives, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 16, pp. 3501-3511 (2014)
- [6] N. Orloff, et al, *IEEE Trans. Microw. Theory and Techniques*, vol. 62, pp. 2149-2159 (2014)
- [7] Y. Kato and M. Horibe, Comparison of Calculation Techniques for Q-Factor Determination of Resonant Structures Based on Influence of VNA Measurement Uncertainty, *IEICE Trans. Electron.*, vol. E97-C, no.6, pp. 575-582 (June 2014)
- [8] T. Takami, R. Seino, K. Yamazaki and T. Ogino, Graphene film formation on insulating substrates using polymer films as carbon source, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 47, p. 094015 (2014)
- [9] J. Krupka and W. Strupinski, Measurements of the sheet resistance and conductivity of thin epitaxial graphene and SiC films, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, p. 082101 (2010)
- [10] L. Hao et al, Non-contact method for measurement of the microwave conductivity of graphene, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, p.103-123 (2013)