



جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران

Iran National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران
۲۳۱۱۴
چاپ اول
۱۴۰۰

INSO
23114
1st Edition
2022

Identical with
IEC/TR 63258:
2021

فناوری نانو – راهنمای کاربرد بیضی سنجی
برای ارزشیابی ضخامت فیلم‌های نانومقیاس



دارای محتوای رنگی

**Nanotechnologies – A guideline for
ellipsometry application to evaluate the
thickness of nanoscale films**

ICS: 07.120

استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۱۴ (چاپ اول): سال ۱۴۰۰

سازمان ملی استاندارد ایران

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

صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۳۹ تهران - ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۱۰۳ و ۸۸۸۸۷۰۸۰

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>

Iran 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.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، به روز رسانی و نشر استانداردهای ملی را برعهده 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، به‌عنوان 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، به‌عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که براساس 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 به‌عنوان 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 به‌منظور 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 براساس 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 - راهنمای کاربرد بیضی‌سنجی برای ارزشیابی ضخامت فیلم‌های نانومقیاس »

رئیس:

یگانه، محمد
(دکتری فیزیک - اپتیک)

سمت و/یا محل اشتغال:

مسئول کنترل کیفی و طراحی سامانه‌های اپتیکی - مرکز ملی
علوم و فنون لیزر ایران

دبیر:

دارابی، عادل
(دکتری فیزیک)

عضو مستقل

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

ابوطالبی، حامد
(دکتری مهندسی فیزیک و نانومواد)

هیئت علمی - آزمایشگاه ملی ماده‌چگال - پژوهشگاه دانش‌های
بنیادی (IPM)

اسلامی‌پور، الهه
(کارشناسی ارشد زیست‌شناسی)

کارشناس - کارگروه استاندارد و ارزیابی ستاد ویژه توسعه فناوری
نانو

الیاسی، فرود
(کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

کارشناس - کارگروه استاندارد و ارزیابی ستاد ویژه توسعه فناوری
نانو

سیفی، مهوش
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

کارشناس استاندارد - نایب رئیس کمیته فنی متناظر فناوری نانو
ISIRI/TC 2299

ویراستار:

سیفی، مهوش
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

کارشناس استاندارد - نایب رئیس کمیته فنی متناظر فناوری نانو
ISIRI/TC 2299

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
و	پیش‌گفتار
ز	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۱	۳ اصطلاحات و تعاریف
۲	۱-۳ اصطلاحات کلی
۲	۲-۳ اصطلاحات ویژه این استاندارد
۴	۴ اندازه‌گیری بیضی‌سنجی
۴	۱-۴ کلیات
۵	۲-۴ روش اجرای اندازه‌گیری
۷	۵ گزارش داده‌ها
۷	۶ تحلیل داده / تفسیر نتایج
۷	۱-۶ کلیات
۹	۲-۶ ایجاد مدل تحلیل
۹	۳-۶ برآزش داده و صحت‌گذاری نتیجه تحلیل
۱۶	پیوست الف (آگاهی‌دهنده) مطالعه موردی: مقایسه بین‌آزمایشگاهی با استفاده از نمونه‌های SiO ₂ /Si
۲۰	پیوست ب (آگاهی‌دهنده) مطالعه موردی: اندازه‌گیری بیضی‌سنجی سایر مواد
۲۱	کتاب‌نامه

پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری نانو- راهنمای کاربرد بیضی‌سنجی برای ارزشیابی ضخامت فیلم‌های نانومقیاس» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی/منطقه‌ای به‌عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره‌شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی ایران شماره ۵ تهیه و تدوین شده، در یکصد و دوازدهمین اجلاس هیئت کمیته ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۴۰۰/۱۲/۱۸ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ‌شده در دی ماه ۱۳۹۶، به‌عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران براساس 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:

IEC TR 63258: 2021, Nanotechnologies – A guideline for ellipsometry application to evaluate the thickness of nanoscale films

مقدمه

بیضی‌سنجی روش اپتیکی توانمندی برای ارزشیابی خواص دی‌الکتریک فیلم‌های نازک است. بیضی‌سنجی می‌تواند برای مشخصه‌یابی ضخامت، زبری، ترکیب شیمیایی، ماهیت بلوری و دیگر خواص نانومواد به کار رود و اغلب برای تضمین کیفیت و عملکرد تجهیزات رشد فیلم نازک استفاده می‌شود. سیگنال، به تغییر پاسخ اپتیکی نور فرودی که با نانوماده مورد بررسی برهم‌کنش می‌کند، بستگی دارد.

بسیاری از دستگاه‌های الکتروتنیکی رایج و همچنین نوظهور، از نانومواد به شکل فیلم‌های نازک استفاده می‌کنند. بنابراین، تدوین یک پروتکل اندازه‌گیری برای ارزشیابی ضخامت چنین فیلم‌هایی با درستی^۱ کافی، اهمیت دارد. این استاندارد ملاحظات عملی را که لازم است هنگام استفاده از بیضی‌سنجی برای ارزشیابی ضخامت فیلم‌های نانومقیاس در نظر گرفته شوند، شرح می‌دهد.

فناوری نانو- راهنمای کاربرد بیضی‌سنجی برای ارزشیابی ضخامت فیلم‌های نانومقیاس

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تمرکز بر پروتکل عملی برای بیضی‌سنجی به منظور ارزشیابی ضخامت فیلم‌های نانومقیاس است. این استاندارد هیچ‌یک از ویژگی‌های بیضی‌سنجی‌ها را شامل نمی‌شود، اما پیشنهاداتی در مورد چگونگی کمینه‌کردن تغییرات داده برای بهبود تجدیدپذیری^۱ داده، ارائه می‌کند. این استاندارد شامل موارد زیر است:

- طرح کلی روش‌های بیضی‌سنجی؛
- روش‌های تفسیر نتایج و بحث درباره تحلیل داده؛
- مطالعات موردی.

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 الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است. استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

۱-۲ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴، فناوری نانو- واژه‌نامه- قسمت ۱: اصطلاحات اصلی

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، علاوه بر اصطلاحات و تعاریف ارائه‌شده در استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴، اصطلاحات و تعاریف زیر نیز به کار می‌رود.^۲

1- Reproducibility

۲- اصطلاحات و تعاریف به‌کاررفته در استانداردهای ISO و IEC در وبگاه‌های www.iso.org/obp و www.electropedia.org قابل‌دسترس است.

۱-۳ اصطلاحات کلی

۱-۱-۳

مقایسه بین آزمایشگاهی

interlaboratory comparison

سازمان‌دهی، اجرا و ارزشیابی اندازه‌گیری‌ها یا آزمون‌ها، بر اقلام یکسان یا مشابه، مطابق با شرایط از پیش تعیین‌شده توسط دو یا چند آزمایشگاه است.

[منبع: زیربند ۳-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو- آی‌ای‌سی شماره ۱۷۰۴۳: سال ۱۳۹۳]

۲-۳ اصطلاحات ویژه این استاندارد

۱-۲-۳

قطبش

polarization

جهت‌گیری بردار میدان الکتریکی یک باریکه نوری است.

یادآوری- صفحه قطبش، صفحه شامل بردار میدان الکتریکی و راستای انتشار باریکه است.

[منبع: زیربند 3.28، استاندارد ISO/IEC 30193:2020]

۲-۲-۳

ثابت اپتیکی

optical constant

ضریب شکست $n(\lambda)$ و ضریب خاموشی $k(\lambda)$ ، به صورت تابعی از طول موج λ است.

۳-۲-۳

ضریب شکست

refractive index

n

نسبت سرعت موج الکترومغناطیسی در خلأ، c ، به سرعت آن در محیطی^۱ دیگر، v ، است.

$$n = \frac{c}{v}$$

1- Medium

یادآوری - ضریب شکست نشان می‌دهد چگونه سرعت نور بسته به محیط تغییر می‌کند.

۴-۲-۳

ضریب شکست مختلط

complex refractive index

N

ضریبی که انتشار یک موج تخت الکترومغناطیسی در یک محیط همسانگرد جاذب را تعیین می‌کند و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$N(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$$

که در آن n و k به ترتیب، قسمت حقیقی و قسمت موهومی هستند.

یادآوری ۱- قسمت‌های حقیقی n و موهومی k به ترتیب، ضریب شکست و ضریب خاموشی نامیده می‌شوند.

یادآوری ۲- برای تعریف ضریب شکست مختلط، از قرارداد اپتیکی^۱ [1] استفاده شده است.

۵-۲-۳

ضریب جذب

absorption coefficient

α

ضریبی که تضعیف شدت موج الکترومغناطیسی، I_0 ، را هنگام انتشار در یک محیط جاذب توصیف می‌کند.

یادآوری ۱- شدت موج الکترومغناطیسی به صورت معادله زیر تضعیف می‌شود:

$$I = I_0 \exp(-\alpha x)$$

که در آن I_0 ، شدت اولیه موج الکترومغناطیسی و α ، طول انتشار است.

یادآوری ۲- ارتباط ضریب جذب α با ضریب خاموشی در یک طول موج معین به صورت زیر است:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

۶-۲-۳

ثابت دی‌الکتریک مختلط

complex dielectric constant

۱- قراردادی در مورد نحوه نوشتن ثابت‌های اپتیکی در بیضی‌سنجی که در دومین کنفرانس بین‌المللی بیضی‌سنجی (سال ۱۹۶۸، دانشگاه نبراسکا) پذیرفته شد و به عنوان «کنوانسیون نبراسکا» نیز شناخته می‌شود.

۲- عدد داخل براکت، شماره مرجع در کتاب‌نامه است.

ε

مقداری که نشان می‌دهد چگونه اتم‌ها در یک ماده به یک میدان الکتریکی خارجی اعمال شده بر ماده، پاسخ می‌دهند.

یادآوری ۱- ثابت دی‌الکتریک مختلط با معادله زیر تعیین می‌شود:

$$(\lambda) = \varepsilon_r(\lambda) + i\varepsilon_i(\lambda)$$

که در آن ε_r و ε_i به ترتیب، قسمت‌های حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک مختلط هستند.

یادآوری ۲- رابطه بین ثابت دی‌الکتریک مختلط و ضریب شکست مختلط که از معادله ماکسول به دست می‌آید، به صورت زیر است:

$$(\lambda) = N(\lambda)^2$$

یادآوری ۳- برای تعریف ثابت دی‌الکتریک مختلط، از قرارداد اپتیکی استفاده شده است [1].

یادآوری ۴- هنگامی که تمرکز بر وابستگی به طول موج یا بسامد زاویه‌ای باشد، برای ثابت دی‌الکتریک و ثابت دی‌الکتریک مختلط از عبارات تابع دی‌الکتریک و تابع دی‌الکتریک مختلط استفاده می‌شود.

۷-۲-۳

ضخامت فیلم

film thickness

d

فاصله بین مرزهای بالایی و پایینی فیلم لایه‌ای است؛ فصل مشترک دو ناحیه‌ای که ضریب شکست آن‌ها متفاوت است، به عنوان مرز تعیین می‌شود.

۸-۲-۳

زاویه بروستر

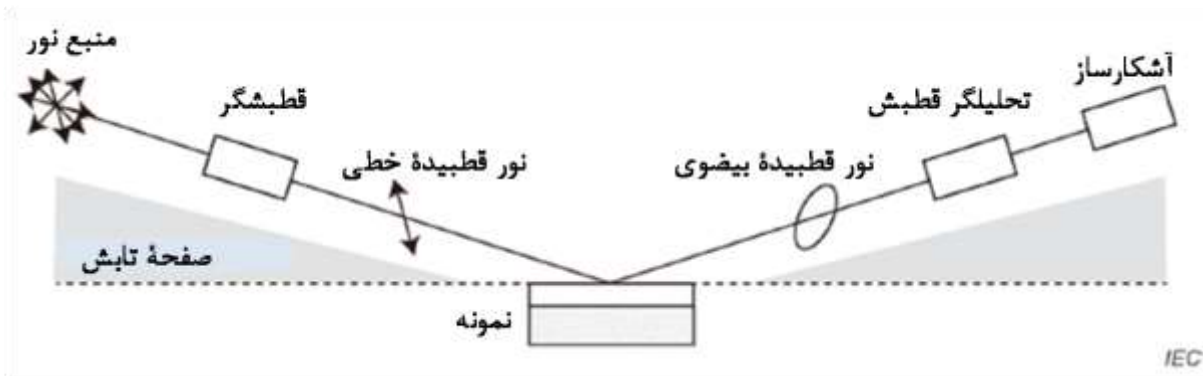
Brewster's angle

زاویه فرودی که تحت آن نور با قطبش p، از یک سطح اپتیکی پوشش‌دهی نشده^۱ هیچ بازتابی نداشته باشد.

۴ اندازه‌گیری بیضی‌سنجی

۱-۴ کلیات

پروتکل عملی بیضی‌سنجی به خوبی به رسمیت شناخته شده است.



شکل ۱ - ساختار ابتدایی اندازه‌گیری بیضی‌سنجی

در بیضی‌سنجی تغییر در قطبش نور هنگامی که از یک نمونه بازتاب می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. تغییر وضعیت قطبش به صورت نسبت دامنه Ψ و اختلاف فاز Δ ، نمایش داده می‌شود. مؤلفه‌های اصلی اندازه‌گیری بیضی‌سنجی، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، منبع نور، قطبشگر، تحلیلگر قطبش و آشکارساز هستند. برای مبانی نظری بیضی‌سنجی به مراجع [2] و [3] مراجعه شود.

۲-۴ روش اجرای اندازه‌گیری

۱-۲-۴ آماده‌سازی نمونه برای واری سامانه

پیش از آن که اندازه‌گیری نمونه اصلی انجام شود، لازم است درستی سامانه واری شود. برای این کار بهتر است از یک نمونه مرجع با ضخامت و/یا ضریب شکست معلوم استفاده شود. نمونه‌های مرجعی مانند SiO_2 با اکسایش گرمایی روی Si، در دسترس هستند.

بیضی‌سنجی به خواص فیزیکی و شیمیایی ماده فیلم نازک، خواص سطح آن و خواص فصل مشترک فیلم با زیرلایه بسیار حساس است.

۲-۲-۴ روش اجرای تجربی واری سامانه

پروتکل کلی اندازه‌گیری بیضی‌سنجی برای ارزشیابی فیلم‌های نازک، استاندارد شده‌است.

- مرحله ۱: درست قراردادن نمونه مرجع روی پایه؛
- مرحله ۲: تنظیم ارتفاع و شیب؛
- مرحله ۳: اندازه‌گیری نمونه مرجع؛
- مرحله ۴: تحلیل داده؛

– مرحله ۵: توصیه می‌شود نتیجه به دست آمده برای ضخامت یا ضریب شکست در محدوده ۱٪ مقادیر تضمین شده باشد؛

– مرحله ۶: اگر نتیجه به دست آمده شرط مرحله ۵ را برآورده می‌کند، اندازه‌گیری نمونه آزمون را شروع کنید. در غیر این صورت، سامانه به واریسی بیشتری نیاز دارد.

توصیه می‌شود سامانه در زاویه فرود مورد نیاز، واریسی شود.

۳-۲-۴ کارکردن^۱ با نمونه

بیضی‌سنجی به خواص فیزیکی و شیمیایی سطح نمونه بسیار حساس است، بنابراین، توصیه می‌شود نمونه پس از آماده‌سازی در محل تمیز و خشکی نگهداری شود. بهتر است از لمس و خراشیدن سطح نمونه اجتناب شود، زیرا تمیزکاری غیر حرفه‌ای ممکن است وضعیت سطح را تحت تاثیر قرار داده و نتیجه را تغییر دهد.

۴-۲-۴ روش‌های تجربی

پروتکل کلی اندازه‌گیری بیضی‌سنجی به صورت زیر است:

– مرحله ۱: درست قراردادن نمونه روی پایه؛

– مرحله ۲: تنظیم زاویه فرود، ارتفاع و شیب؛

– مرحله ۳: اندازه‌گیری نمونه؛

– مرحله ۴: تحلیل داده؛

– مرحله ۵: صحت‌گذاری نتیجه تحلیل.

یادآوری – این پروتکل برای صفحات نمونه همسانگرد و غیرپراکنده‌ساز^۲ معتبر است.

توصیه‌های کاربردی زیر برای کمینه‌کردن تغییرات داده، به کار می‌آیند:

۱- توصیه می‌شود اندازه‌گیری بیضی‌سنجی در زاویه فرودی نزدیک به زاویه بروستر زیرلایه انجام شود؛

۲- توصیه می‌شود اندازه‌گیری بیضی‌سنجی در یک گستره طول موج تا حد امکان گسترده، انجام شود. برای مثال، اگر در گستره مرئی جذب وجود دارد، باید اندازه‌گیری در این گستره به‌علاوه گستره فروسرخ نزدیک انجام شود؛

۳- توصیه می‌شود تحلیل برآزش با تغییر مقدار اولیه ضخامت فیلم و نوع فرمول پاشندگی در زمان تحلیل داده، انجام شود. بهتر است برای تأیید امکان به دست آوردن نتایج معادل، مقایسه انجام شود. به پیوست الف مراجعه شود.

1- Handling

2- Non scattering

۵ گزارش داده‌ها

- مستندسازی شرایط محیط^۱ (دما، رطوبت، اتاق تمیز یا محیط عادی^۲)؛
- ابزار مورد استفاده، شامل ویژگی‌های برنامه‌های اندازه‌گیری و تنظیمات مربوطه؛
- وضعیت ظاهری نمونه‌ها (مستندسازی هر نوع غبار، ترک، رطوبت یا دیگر موارد ظاهری قابل توجه)؛
- تک تک مقادیر اندازه‌گیری؛
- در صورت امکان، مقادیر میانگین محاسبه شده.

۶ تحلیل داده / تفسیر نتایج

۱-۶ کلیات

در بیضی‌سنجی، به منظور ارزشیابی خواص ماده، از جمله ضخامت فیلم و ثابت‌های دی‌الکتریک، تغییر قطبش نور اندازه‌گیری می‌شود. در بیضی‌سنجی طیفی^۳، طیف اندازه‌گیری شده با استفاده از برازش مدل، تحلیل می‌شود. به طور کلی، در مورد نانومواد در «فصل مشترک ناجور^۴» نمونه، اکسایش سطحی، زبری و درآمیختگی وجود دارد. روش اجرای متداول برای استخراج خواص ماده از اندازه‌گیری‌های بیضی‌سنجی در شکل ۲ نشان داده شده است. ارزشیابی‌های مشخصات نانوماده با استفاده از اندازه‌گیری بیضی‌سنجی در پیوست ب نشان داده شده است.

در مورد اندازه‌گیری‌های بیضی‌سنجی، نسبت شدت یا حالت‌های قطبش (تضعیف دامنه نسبی مختلط) اندازه‌گیری شده و زاویه‌های بیضی‌سنجی، یعنی کمیت‌های انتقالی بیضی‌سنجی، Ψ و Δ محاسبه می‌شوند. هیچ دسترسی مستقیمی به پارامترهایی که معمولاً مورد نظر هستند، مانند توابع دی‌الکتریک (ϵ)، ضریب شکست‌ها (N)، ترکیب‌های شیمیایی و ضخامت فیلم‌ها (d) وجود ندارد.

در حالت کلی، اگر ضخامت‌ها و ضریب شکست‌ها معلوم باشند، Ψ و Δ را می‌توان برای هر ساختار مسطح روی زیرلایه محاسبه کرد. از سوی دیگر، در حالت برعکس، حتی اگر Ψ و Δ معلوم باشند، نمی‌توان d و N را مستقیماً محاسبه کرد. برای به دست آوردن d و N برای هر لایه، مدل‌سازی الزامی است. رهیافت مدل‌سازی مبتنی بر این فرض است که $\Psi(\lambda)$ و $\Delta(\lambda)$ اندازه‌گیری شده در هر طول موج، براساس قانون پاشندگی تغییر می‌کنند.

1- Environment
 2- Normal ambient
 3- Spectroscopic ellipsometry
 4- Heterointerface

خواص ماده را می‌توان با توصیف پاسخ بنیادی ماده به میدان الکترومغناطیسی اعمالی، تعیین کرد. وابستگی تابع دی‌الکتریک ϵ به انرژی در هر ماده منحصربه‌فرد است. در گستره مرئی-فرابنفش نزدیک، پاسخ دی‌الکتریک تقریباً به‌طور کامل با خواص الکترونی ماده تعیین می‌شود.

توصیف ریاضی خواص دی‌الکتریک یک ماده، همچنین خواص اپتیکی آن، به‌صورت تابعی از انرژی (طول‌موج) با قانون (فرمول‌های) پاشندگی میسر می‌شود و می‌توان آن را به چهار رده تقسیم کرد:

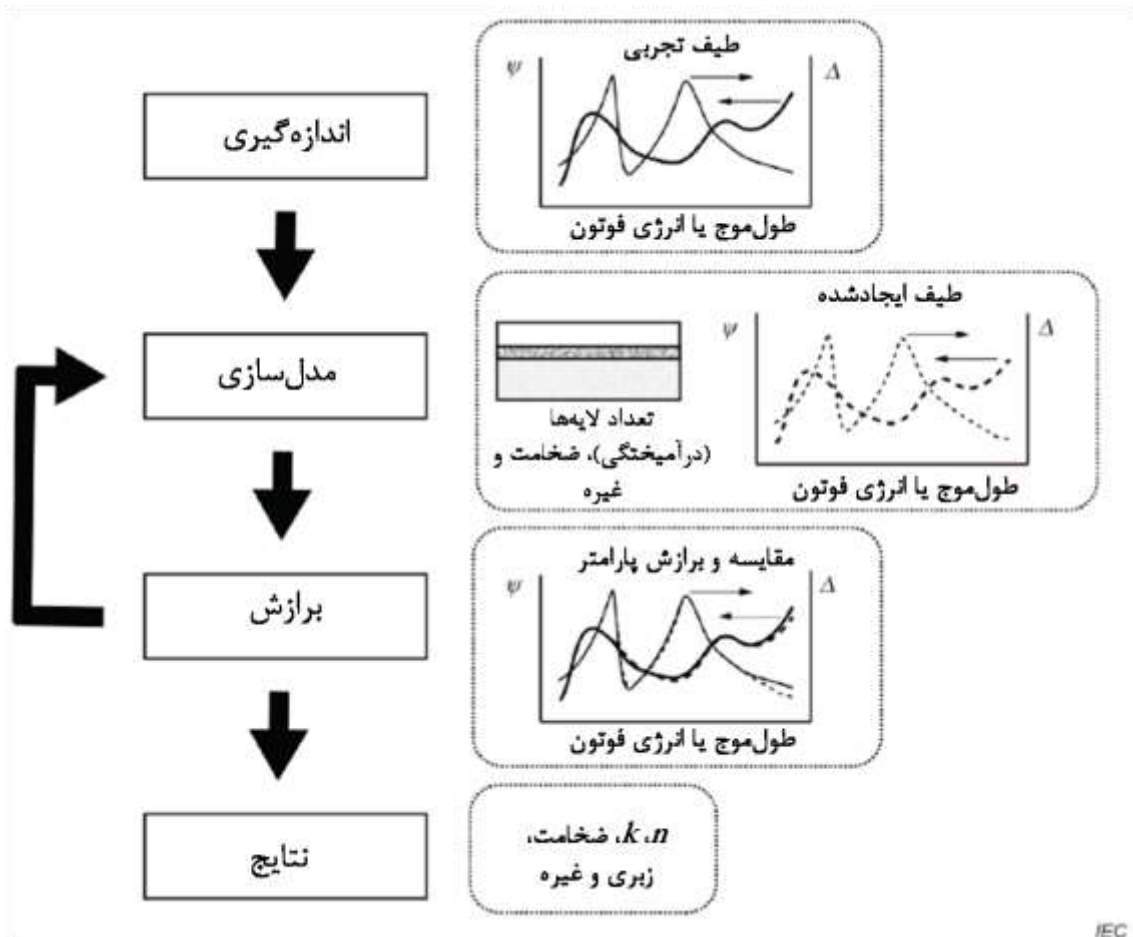
۱- فرمول‌های تجربی؛

۲- مدل‌های کلاسیک پاشندگی (روش نوسانگر هماهنگ)؛

۳- مدل‌هایی بر اساس محاسبات مکانیک کوانتومی؛

۴- محاسبات نقطه‌به‌نقطه.

روند روش اجرای تحلیل داده بیضی‌سنجی طیفی در شکل ۲ نشان داده شده‌است.



شکل ۲- روندنمای تحلیل داده بیضی‌سنجی

۲-۶ ایجاد مدل تحلیل

مدل سازی بیضی سنجی را می توان به چهار مرحله اصلی تقسیم کرد:

- ۱- تعریف ساختار نمونه؛
 - ۲- شبیه سازی نمونه؛
 - ۳- انتخاب متغیرها و برازش؛
 - ۴- واری اطمینان پذیری مدل.
- در بیشتر موارد کلی، برای ساخت مدل نمونه باید مجهولات زیر را تعریف کرد:

الف- تابع دی الکتریک زیرلایه؛

ب- ضخامت هر لایه؛

پ- تابع دی الکتریک و/یا ترکیب شیمیایی هر لایه؛

ت- ضخامت رولایه؛

ث- تابع دی الکتریک و/یا ترکیب شیمیایی رولایه.

توجه شود که رابطه توابع دی الکتریک مختلط و ثابت های اپتیکی مختلط به صورت معادله (۱) است:

$$\varepsilon(\lambda) = N(\lambda)^2 \quad (1)$$

با استفاده از مدل اپتیکی ساخته شده، نقاط داده محاسبه شده $\Delta(\lambda)$ و $\Psi(\lambda)$ به دست می آیند.

برای مثال، هنگام تحلیل یک فیلم SiO_2 (برای مثال، با ضخامت ۵۰ nm به عنوان مقدار برآورد شده) روی زیرلایه ای از Si، فایل داده ماده Si (تابع دی الکتریک مختلط Si از داده های کتابخانه ای) را در قسمت زیرلایه SiO_2 (مدل کلاسیکی) را در قسمت اولین لایه فیلم، مشخص کنید. ضخامت مورد انتظار فیلم SiO_2 روی ۵۰ nm، تنظیم می شود. تمامی پارامترهای تنظیم شده در این مدل، در حین برازش (تحلیل) به عنوان مقادیر اولیه به کار می روند.

۳-۶ برازش داده و صحت گذاری نتیجه تحلیل

۱-۳-۶ کلیات

دو مجموعه نقطه داده $\Psi_{\text{Mes}}(\lambda)$ و $\Delta_{\text{Mes}}(\lambda)$ اندازه گیری شده و $\Psi_{\text{Cal}}(\lambda)$ و $\Delta_{\text{Cal}}(\lambda)$ محاسبه شده [از لحاظ عددی با یکدیگر مقایسه می شوند و برای کمینه کردن خطای میانگین مربعات (MSE) χ^2 ، برازش پارامترها انجام می شود.

پس از این که شبیه‌سازی نمونه به شکل مطلوبی کامل شد، برای بهبود مدل نامی، نیاز است از داده‌های اندازه‌گیری شده بیضی‌سنجی استفاده کنید. به بیان دیگر، لازم است مجموعه‌ای از پارامترهای مدل $(d_1, N_1(\lambda), d_2, N_2(\lambda), \dots, d_j, N_j(\lambda), \dots)$ را پیدا کنید که در آن، زیراندیس‌ها، لایه ز-ام فیلم را نشان می‌دهند و مقادیر محاسبه شده Ψ و Δ تا حد امکان نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده، حاصل می‌شود. در این مجموعه، برای برازش مدل به داده‌ها، تخمینی از خطای بین نقاط داده اندازه‌گیری شده و محاسبه شده موردنیاز است. برای مثال، خطای میانگین مربعات داده را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [4]:

$$\chi^2 = \frac{1}{2M - P} \sum_{i=1}^M \left\{ \frac{(\Psi_{Mes}(\lambda_i) - \Psi_{Cal}(\lambda_i))^2}{\sigma_{\Psi}(\lambda_i)^2} + \frac{(\Delta_{Mes}(\lambda_i) - \Delta_{Cal}(\lambda_i))^2}{\sigma_{\Delta}(\lambda_i)^2} \right\} \quad (2)$$

که در آن:

M تعداد نقاط داده اندازه‌گیری شده است؛

P تعداد پارامترهای برازش است؛

$\sigma_{\Psi}(\lambda_i)$ و $\sigma_{\Delta}(\lambda_i)$ به ترتیب، خطای تجربی $\Psi_{Mes}(\lambda)$ و $\Delta_{Mes}(\lambda)$ هستند.

چون برازش و اندازه‌گیری واقعی به روش‌های مختلفی انجام می‌شوند، می‌توان گزینه‌های جایگزین دیگری برای خطای میانگین مربعات برای $\Psi(\lambda)$ و $\Delta(\lambda)$ یا هر نمایش دیگری از داده‌های داده‌شده، تعریف کرد [5].

زمانی که تعیین هر یک از $\sigma_{\Psi}(\lambda_i)$ و $\sigma_{\Delta}(\lambda_i)$ به صورت تجربی واقع‌گرایانه نباشد، می‌توان آن‌ها را برای تمامی نقاط داده ثابت در نظر گرفت. با کمینه کردن χ^2 ، داده‌های محاسبه شده به مقادیر اندازه‌گیری شده برازش می‌شوند؛ در نتیجه با کوچک تر شدن χ^2 ، برازش مدل بهبود می‌یابد. در این حالت، بزرگی مقدار χ^2 فقط معیاری از حسن برازش نیست. اگر $\chi^2 \leq 1$ باشد، $\sigma_{\Psi}(\lambda_i)$ و $\sigma_{\Delta}(\lambda_i)$ خیلی بزرگ تنظیم شده‌اند. اگر $\chi^2 > 1$ باشد، ممکن است $\sigma_{\Psi}(\lambda_i)$ و $\sigma_{\Delta}(\lambda_i)$ خیلی کوچک تنظیم شده باشند. اگر $\chi^2 \gg 1$ باشد، مدل محاسبه شده به داده‌ها برازش نمی‌شود. به دلیل محاسبه ساده شده χ^2 (یعنی استفاده از $\sigma_{\Psi}(\lambda_i)$ و $\sigma_{\Delta}(\lambda_i)$ ثابت)، برای تعیین حسن برازش باید «ظاهر» برازش و مقدار محاسبه شده χ^2 نیز در نظر گرفته شوند.

در پایان کار برازش، باید اطمینان‌پذیری نتایج مدل‌سازی واریسی شوند.

- مقدار نهایی MSE را واریسی کنید. مقادیر بزرگ MSE نهایی، معمولاً نشان‌دهنده برازش ضعیف به داده‌های اندازه‌گیری شده هستند؛

- به صورت بصری داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های محاسبه شده بهترین برازش نهایی را مقایسه کنید؛

- واریسی کنید که آیا نتیجه شما فیزیکی است و با اطلاعاتی که دارید مطابق است یا خیر. می‌توانید با روش‌های دیگری نیز مقایسه کنید؛

- خطای پارامترهای برازش را واریسی کنید: مقادیر بزرگ معمولاً نشان‌دهنده برازش ضعیف به داده‌های اندازه‌گیری شده هستند.

یادآوری ۱- در برخی موارد، به جای نقطه داده محاسبه شده، از مقدار تجربی نمونه مرجع استفاده می شود.

یادآوری ۲- برای بهبود حسن برازش می توان مقدار پارامتر را در مقداری که از لحاظ فیزیکی معقول باشد، ثابت کرد.

۲-۳-۶ روش شماره ۱ تحلیل داده- قانون پاشندگی (مدل کوشی^۱) [6]

پیکربندی تحلیل نمونه را ایجاد کنید (مدل اپتیکی). برای مثال، هنگام تحلیل یک فیلم SiO_2 (برای مثال، با ضخامت 50 nm به عنوان مقدار برآورد شده) روی زیرلایه ای از Si ، در قسمت زیرلایه، فایل داده ماده Si و در قسمت اولین لایه فیلم، SiO_2 (مدل کلاسیکی کوشی) را مشخص کنید. ضخامت مورد انتظار فیلم SiO_2 روی 50 nm تنظیم می شود. هنگام تحلیل، از مدل تحلیل ایجاد شده، به عنوان مقدار اولیه استفاده می شود. مدل کوشی، پاشندگی رنگی^۲ ثابت های اپتیکی مواد شفاف را با فرمول کوشی به صورت زیر تقریب می زند.

$$n(\lambda) = C_0 + C_1/\lambda^2 + C_2/\lambda^4 + \dots \quad (3)$$

در این فرمول، C_0 ، C_1 و C_2 ضریب های بهینه سازی هستند و معمولاً حداکثر تا جمله سوم استفاده می شوند. این فرمول تقریبی در ناحیه پاشندگی نرمال ماده شفاف اعمال می شود؛ به عنوان یک فایل داده برای ماده به کار می رود و پاشندگی وابسته به طول موج برای یک فیلم شفاف مانند SiO_2 را، نشان می دهد.

۳-۳-۶ روش شماره ۲ تحلیل داده- مدل معادله سل مایر^۳ (ماده شفاف) [7]

مدل معادله سل مایر، رابطه ای تجربی بین ضریب شکست و طول موج برای یک محیط ویژه شفاف است. شکل معمول معادله برای شیشه ها به صورت زیر است:

$$n(\lambda)^2 = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (4)$$

که در آن، $B_{1,2,3}$ و $C_{1,2,3}$ ثابت هایی هستند که باید با فرایند برازش، تعیین شوند.

اگر تمامی جملات برای یک ماده مشخص شوند، در طول موج های بلند، دور از قله های جذب، مقدار n به $n \approx \sqrt{1 + \sum_i B_i} \approx \sqrt{\epsilon_r}$ میل می کند که در آن، ϵ_r ثابت دی الکتریک نسبی محیط است.

معادله سل مایر به شکل دیگری نیز ارائه می شود:

$$n(\lambda)^2 = A + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} \quad (5)$$

1- Cauchy model
2- Chromatic
3- Sellmeier

در این جا، ضریب A تقریبی از سهم‌های جذب طول‌موج کوتاه (فرابنفش) در ضریب شکست در طول‌موج‌های بلندتر است. گونه‌های دیگری از معادله سل‌مایر وجود دارند که می‌توانند تغییر ضریب شکست ماده ناشی از دما، فشار و دیگر پارامترها را توضیح دهند.

۴-۳-۶ روش شماره ۳ تحلیل داده- مدل پاشندگی دروده^۱ (ماده رسانا) [8]، [9]

مدل دروده (۱۹۰۰) بر پایه نظریه جنبشی الکترون‌ها در فلز است که در آن فرض می‌شود ماده، یون‌های مثبت نامتحرک و یک گاز الکترونی بدون برهم‌کنش دارد. در این مدل ساده از نظریه مکانیک کلاسیکی الکترون آزاد استفاده می‌شود. این مدل به‌منظور توضیح خواص تراپردی الکترون‌های رسانش در فلزات (ناشی از گذارهای درون‌نواری^۲ در توصیف مکانیک کوانتومی)، اکسیدهای رسانا و نیم‌رساناهای به‌شدت آلاینده ساخته شد. قسمت‌های حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک به‌صورت زیر هستند:

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma^2} \quad (6)$$

و

$$\varepsilon_i(\omega) = \frac{\omega_p^2 \cdot \Gamma}{\omega \cdot (\omega^2 + \Gamma^2)} \quad (7)$$

که در آن، Γ فاکتور میرایی و ω_p بسامد پلاسما است.

رفتار تابع دی‌الکتریک دروده را می‌توان به‌صورت زیر شرح داد.

اگر ω به‌اندازه کافی کوچک‌تر از ω_p باشد، قسمت حقیقی ε منفی می‌شود: هیچ میدان الکتریکی نمی‌تواند درون فلز که کاملاً بازتابنده^۳ است، نفوذ کند. ثابت‌های اپتیکی ماده، مختلط هستند.

اگر ω به ω_p نزدیک باشد، قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک صفر می‌شود؛ به‌این معنی که تمام الکترون‌ها در سرتاسر طول انتشار ماده، به‌صورت هم‌فاز نوسان می‌کنند.

اگر ω به‌اندازه کافی بزرگ‌تر از ω_p باشد، بازتابندگی^۴ کاهش پیدا می‌کند و فلز شفاف می‌شود. ضریب شکست ماده تقریباً حقیقی می‌شود.

1- Drude
2- Intra-band
3- Reflective
4- Reflectivity

۵-۳-۶ روش شماره ۴ تحلیل داده- قانون پاشندگی (مدل کلاسیک / مدل لورنتس)^۱ [8]، [9]

فرمول لورنتس برای پاشندگی از حل معادله یک الکترون مقید به هسته که با یک میدان الکتریکی نوسانی به حرکت درآمده، به دست می‌آید. پاسخ آن، معادل یک جرم و فنر کلاسیکی است که میرایی و یک نیروی پیشران خارجی دارد. بدین ترتیب، نوسانگرهای هماهنگ میرا را تولید می‌کند.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \cdot \omega_t^2}{\omega_t^2 - \omega^2 + i \cdot \Gamma_0 \cdot \omega} + \sum_{j=1}^2 \frac{f_j \cdot \omega_{0j}^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i \cdot \gamma_j \cdot \omega} \quad (8)$$

مدل نوسانگر لورنتس برای نارساناها مانند SiO_2 و نیم‌رساناها، بالای کاف (گاف) نواری^۲ به‌خوبی جواب می‌دهد.

در صورت وجود الکترون‌های آزاد، باید مولفه دروده را به معادله (۸) اضافه کرد.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \cdot \omega_t^2}{\omega_t^2 - \omega^2 + i \cdot \Gamma_0 \cdot \omega} + \frac{\omega_p^2}{-\omega^2 + i \cdot \Gamma_D \cdot \omega} + \sum_{j=1}^2 \frac{f_j \cdot \omega_{0j}^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i \cdot \gamma_j \cdot \omega} \quad (9)$$

که در آن:

$\varepsilon_s, \varepsilon_{\infty}$ به ترتیب، ثابت‌های دی‌الکتریک بسامد بالا و حالت ایستا هستند؛

$\Gamma_0, \Gamma_D, \gamma_j$ فاکتورهای میرایی هستند ($\Gamma_0, \Gamma_D, \gamma_j > 0$);

f_j پارامتر قدرت نوسانگر است؛

$\omega_p, \omega_t, \omega_{0j}$ به ترتیب، بسامد نوسانگر، بسامد عرضی و بسامد پلاسما هستند.

۶-۳-۶ روش شماره ۵ تحلیل داده- مدل پاشندگی فروهی- بلومر^۳ [10]، [11]

مدل پاشندگی فروهی- بلومر بر دی‌الکتریک‌ها و نیم‌رساناهای بی‌شکل^۴ قابل‌اعمال و بر مبنای نظریه مکانیک کوانتومی جذب است. این مدل، کاف نواری اپتیکی در ناحیه بین‌نواری^۵ را در نظر می‌گیرد. فرض بر این است که نوارهای ظرفیت و رسانش سهموی هستند و با یک نوار ممنوعه به پهنای E_g از یکدیگر جدا شده‌اند. قله‌هایی که در طیف اپتیکی می‌توانند دیده‌شوند، متناظر با گذار الکترون‌ها بین دو حالت هستند. برای یک ماده بی‌شکل، یک تک‌قله در طیف اپتیکی به گذار بین حالت پیوندی^۶ در نوار ظرفیت و حالت پادپیوندی^۱ در نوار رسانش اشاره دارد.

- 1- Lorentz
- 2- Band gap
- 3- Forouhi-Bloomer
- 4- Amorphous
- 5- Inter-band
- 6- Bonding

برای فلزات، دی‌الکتریک‌ها و نیم‌رساناهای بلورین، قله‌های زیادی را می‌توان مشاهده کرد که نشان‌دهنده گذارهای بین نقطه بحرانی در نوارهای ظرفیت و رسانش است.

خواص اپتیکی به گذارهای بین‌نواری الکترون‌ها که به جذب فونونی مربوطند، بستگی دارند. معادله (۱۰) از عبارت کوانتومی زیر به دست می‌آید:

$$\alpha(\omega) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[-\frac{1}{I} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta x} \right] = \frac{\theta(\omega) \cdot \Phi(\omega)}{I_0} = \frac{2 \cdot \omega \cdot k}{c} \quad (10)$$

که در آن:

$\theta(\omega)$ تعداد کل شیوه‌های ممکن است که یک فوتون از شدت نور فرودی در واحد حجم و در یک لایه با طول انتشار بی‌نهایت کوچک Δx حذف می‌شود؛

$\Phi(\omega)$ میزان احتمال گذاری است که در آن یک فوتون از شدت فرودی در گستره بسامدی $[\omega; \omega + d\omega]$ جذب می‌شود؛

I_0 شدت فوتون فرودی است.

۶-۳-۷ روش شماره ۶ تحلیل داده-مدل پاشندگی تاک-لورنتس^۲ (مواد بی‌شکل) [12]، [13]

جلیسون و مادین این مدل را در سال ۱۹۹۶ با استفاده از «چگالی حالات توأم»^۳ تاک و نوسانگر لورنتس گسترش دادند. در این جا، قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک با حاصل ضرب قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک تاک (۱۹۶۶) در قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک لورنتس داده می‌شود.

$$\varepsilon_{i,TL}(E) = \varepsilon_{i,L} \times \varepsilon_{i,T} = \begin{cases} \frac{1}{E} \frac{AE_0C(E - E_g)^2}{(E^2 - E_0^2)^2 + C^2E^2} & \text{for } E > E_g \\ 0 & \text{for } E \leq E_g \end{cases} \quad (11)$$

که در آن:

E انرژی فوتون است؛

E_0 انرژی گذار قله است؛

E_g کاف نواری اپتیکی است؛

A پارامتری است که یکای انرژی دارد؛

C جمله پهن‌کننده است.

قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک با استفاده از انتگرال کرامرز-کرونیگ^۱ از عبارت قسمت موهومی مشتق می‌شود.

1- Anti-bonding
2- Tauc-Lorentz
3- Joint density of states

$$\varepsilon_r(E) = \varepsilon_r(\infty) + \frac{2}{\pi} \cdot P \cdot \int_{E_g}^{\infty} \frac{\xi \cdot \varepsilon_i(\xi)}{\xi^2 - E^2} d\xi \quad (12)$$

که در آن، P ، مقدار اصلی کوشی است و شامل مانده‌های انتگرال در قطب‌هایی است که در نیمه پایینی صفحه مختلط و در طول محور حقیقی قرار دارند. مدل تاک-لورنتس به‌ویژه برای مواد بی‌شکلی که از خود جذب نشان می‌دهند (برای مثال، پلیمرها، نیم‌رساناها و دی‌الکتریک‌های جاذب) به‌خوبی جواب می‌دهد. از سوی دیگر، مدل تاک-لورنتس مستلزم این است که قسمت موهومی برای انرژی‌های کوچک‌تر از کاف نواری، صفر باشد. در نتیجه، مدل تاک-لورنتس جذب درون‌نواری را در نظر نمی‌گیرد: هرگونه نقص یا جذب درون‌نواری، قسمت موهومی را در زیر کاف نواری افزایش می‌دهد و برآزش‌های نامطلوبی را در آن ناحیه ایجاد می‌کند.

در طی چندین دهه گذشته، مدل‌های پاشندگی زیادی معرفی شده‌اند که بیشتر آن‌ها بر پایه رابطه کرامرز-کرونیک و به‌شدت مرتبط با ساختار نوار انرژی الکترونی ماده بوده‌اند. در مورد نیم‌رساناهای ترکیبی، فرمول‌های مفیدی منتشر شده‌اند [14]، [15].

پیوست الف

(آگاهی‌دهنده)

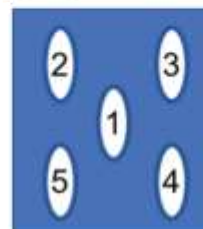
مطالعه موردی: مقایسه بین‌آزمایشگاهی با استفاده از نمونه‌های SiO_2/Si

برای مقایسه بین‌آزمایشگاهی، به‌طور مطلوب، بهتر است چندین نمونه SiO_2 در یک گستره ضخامت وجود داشته باشند. بهتر است ۵ تا ۱۰ نمونه وجود داشته باشند که بیشترین ضخامت آن‌ها در حدود یک فاکتور ۱۰ (در حدود ۱۰ برابر) بزرگ‌تر از کمترین ضخامت باشد. برای یک مقایسه بین‌آزمایشگاهی نوعی از نمونه‌های SiO_2/Si بین سازمان‌های مختلف از جمله مؤسسات ملی اندازه‌شناسی، به مراجع [16] و [17] مراجعه شود. در مورد مقایسه بین‌آزمایشگاهی، می‌توان نمودارهای همبستگی دوسویه بین شرکت‌کنندگان رسم کرد. ضریب همبستگی، شیب و عرض از مبدأ نمودارها در تحلیل رگرسیون خطی، شاخصی خوب و با پشتوانه آماری از کیفیت هر مجموعه اندازه‌گیری و همچنین نکاتی در مورد عوامل بالقوه انحرافات و اصلاحات ارائه خواهند کرد. برای کمینه‌کردن تغییرات داده، روش‌اجراهای تجربی با توصیه‌های عملی نشان داده‌شده در زیربند ۴-۲-۴ مؤثر و مفید هستند. با این حال، باید توجه داشت که به‌طور کلی وقتی ضخامت فیلم خیلی نازک شود، درستی اندازه‌گیری به‌میزان زیادی پایین می‌آید [16]، [17].

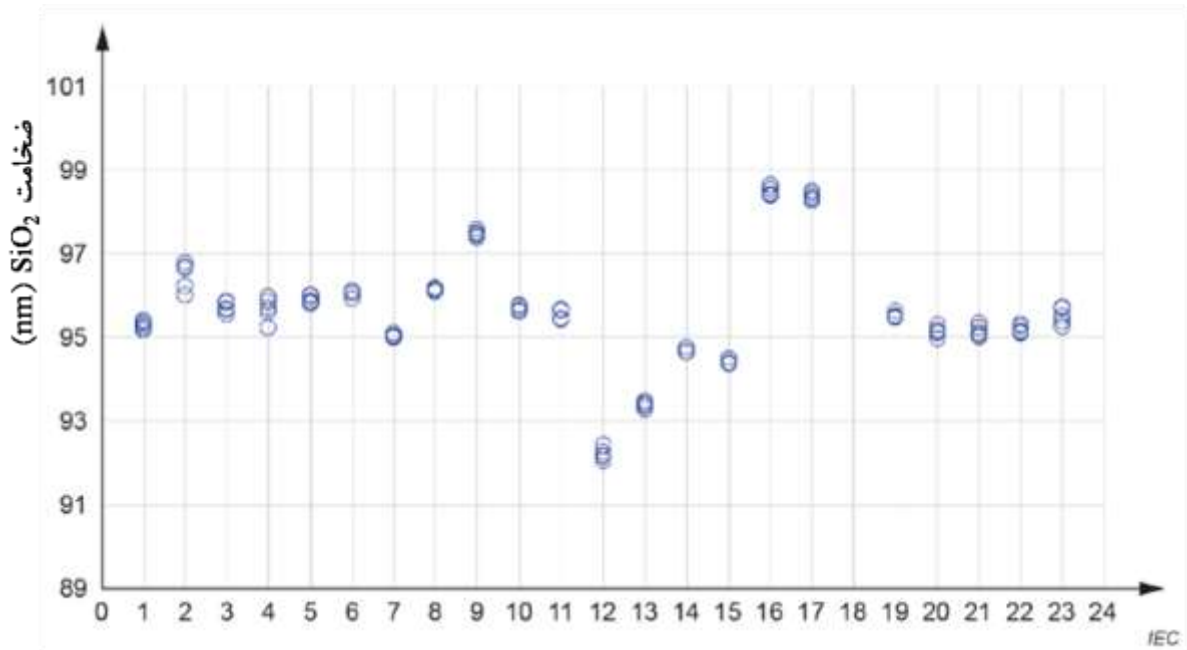
مثالی از فرم گزارش در شکل الف-۱ و مثالی از نتایج نیز در شکل الف-۲ نشان داده شده‌است. نمونه مورد استفاده در مقایسه بین‌آزمایشگاهی در شکل الف-۳ نشان داده شده‌است.

محل اندازه‌گیری:					تاریخ اندازه‌گیری: سال ماه روز زمان				
نام کاربر:					نام دستگاه اندازه‌گیری (ساخت، مدل):				
دمای: XX.X °C					رطوبت: YY.Y درصد				
نمونه: SiO ₂ با اکسایش گرمایی									
پارامتر مورد ارزشیابی	ضخامت فیلم (nm)	N	k	χ ²	زاویه اندازه‌گیری (θ)				
نقطه اندازه‌گیری ۱									
نقطه اندازه‌گیری ۲									
نقطه اندازه‌گیری ۳									
نقطه اندازه‌گیری ۴									
نقطه اندازه‌گیری ۵									
روش برآزش									

یادآوری - مثالی از انتخاب نقطه اندازه‌گیری (بیضی سفید) در مرکز (۱۵ میلی‌متر مربع) ویفر.

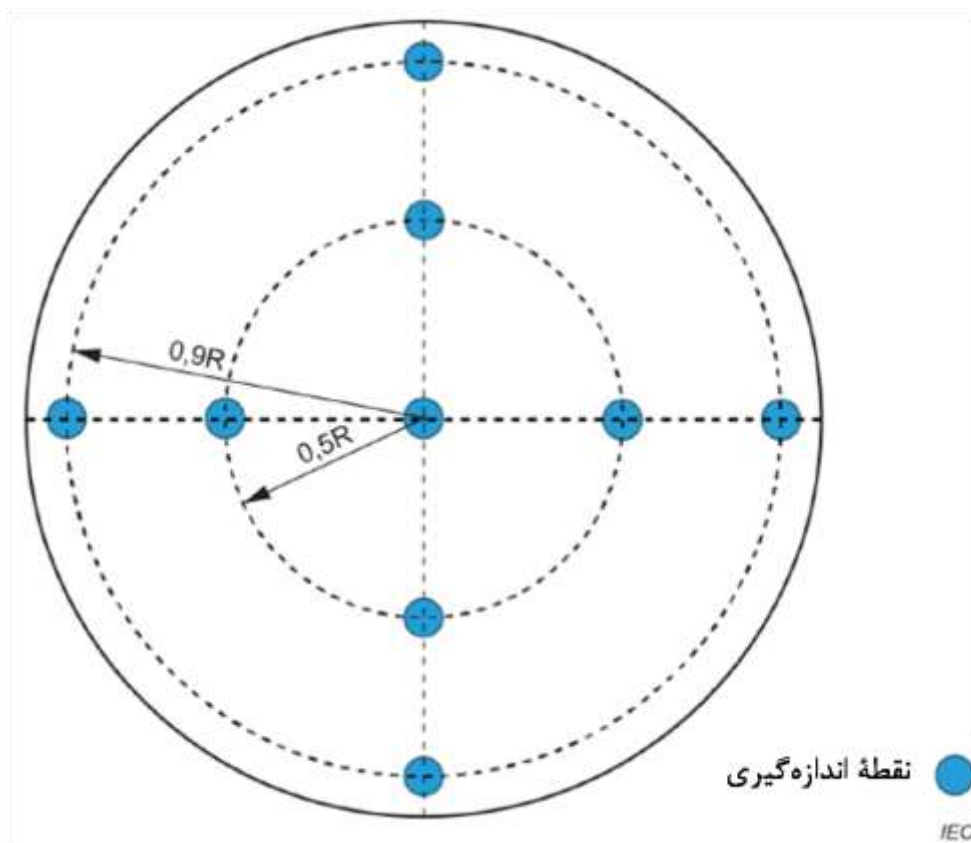


شکل الف-۱- مثالی از فرم گزارش اندازه‌گیری‌های بیضی‌سنجی



نمونه، فیلم نازک SiO₂ با اکسایش گرمایی روی زیرلایه Si بوده است. اکسایش گرمایی خشک در کوره نمونه، در ۱۱۰۰ °C به مدت ۴۰ دقیقه انجام شده است. ضخامت (۹۵٫۱ ± ۳٫۹) نانومتر بوده که با بازتابندگی پرتوی ایکس تأیید شده است (NMIJ Certificate No. 163065). محور افقی شماره آزمایشگاه شرکت کننده را نشان می دهد.

شکل الف-۲- مثالی از نتایج مقایسه بین آزمایشگاهی



نقطه‌های اندازه‌گیری نشان داده شده‌اند. اندازه قطر ویفر تقریباً ۱۰ سانتی‌متر بوده است.

شکل الف-۳- نمونه ویفر شکل استفاده شده برای مقایسه بین آزمایشگاهی

پیوست ب

(آگاهی دهنده)

مطالعه موردی: اندازه‌گیری بیضی‌سنجی سایر مواد

هنگامی که موادی به جز SiO_2 روی سیلیکون مشخصه‌یابی می‌شوند، باید مجموعه‌ای از چند نمونه SiO_2 نیز به‌عنوان نمونه‌های مرجع ثابت اندازه‌گیری شوند. فایده این کار آن است که می‌توان تشخیص داد که انحرافات موجود برای ماده جدید، ناشی از عدم قطعیت‌ها و انحرافات سیستماتیکی هستند که نوع جدید ماده ایجاد کرده یا به مشکلاتی در دستگاه مربوطند.

مثال‌های گزارش‌شده در مجلات علمی در مراجع [18]، [19] و [20] نشان داده شده‌اند. این مثال‌ها ثابت می‌کنند که اندازه‌گیری بیضی‌سنجی در ارزشیابی نانومواد مختلف نقش دارد.

کتابنامه

- [1] H. Fujiwara, "Spectroscopic Ellipsometry Principles and Applications, Appendix 2", John Wiley & Sons, Ltd. (2007)
- [2] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, "Ellipsometry and Polarized Light", p. 6, North-Holland (1987)
- [3] ISO 23131:2021, Ellipsometry – Principles
- [4] S. A. Alterovitz and B. Johs, "Multiple minima in the ellipsometric error function", Thin Solid Films 313-314(2) 124 (1998). DOI: 10.1016/S0040-6090(97)00784-0
- [5] G. E. Jellison Jr., "Data analysis for spectroscopic ellipsometry", Thin Solid Films 234 (1-2), 416 (1993). DOI: 10.1016/S0040-6090(93)90298-4
- [6] F. A. Jenkins and H. E. White, "Fundamentals of Optics, 4th ed.", McGraw-Hill, Inc. (1981)
- [7] J. W. Gooch, "Sellmeier Equation", Encyclopedia Dictionary of Polymers (Eds. J. W. Gooch), Springer, New York, NY (2011)
- [8] F. Wooten, "Optical Properties of Solids", Academic Press (1972)
- [9] H. M. Rosenberg, "The Solid State", Oxford University Press (1975)
- [10] A. R. Forouhi, and I. Bloomer, "Optical dispersion relations for amorphous semiconductors and amorphous dielectrics", Phys. Rev. B. 34 (10), 7018 (1986). DOI: 10.1103/PhysRevB.34.7018
- [11] A. R. Forouhi, and I. Bloomer, "Optical properties of crystalline semiconductors and dielectrics", Phys. Rev. B. 38 (3), 1865 (1988). DOI: 10.1103/Phys.Rev.B.38.1865
- [12] G. E. Jellison Jr and F. A. Modine, "Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region", Appl. Phys. Lett. 69 (3), 371 (1996). DOI: 10.1063/1.118064
- [13] C. Kittel, "Introduction to Solid State Physics", p.292
- [14] D. W. Jenkins, "Optical constants of $Al_xGa_{1-x}As$ ", J. Appl. Phys. 68 (4), 1848 (1990). DOI: 10.1063/1.346621
- [15] K. Sato and S. Adachi, "Optical properties of ZnTe", J. Appl. Phys. 73 (2), 926 (1993). DOI: 10.1063/1/353305
- [16] M. P. Seah, "CCQM-K32 key comparison and P84 pilot study: amount of Silicon oxide as a thickness of SiO_2 on Si", Metrologia 45, 08013 (2008). DOI: 10.1088/00261394/45/1A/08013. See also <https://www.bipm.org/kcdb/comparison/quick-search>
- [17] M. P. Seah et al., "Critical review of the current status of thickness measurements for ultrathin SiO_2 on Si Part V: Results of a CCQM pilot study", Surf. Interface Anal. 36, 1269 (2004). DOI: 10.1002/sia.1909
- [18] S. Chugh, R. Mehta, M. Man, and Z. Chen, "Optical Relaxation Time Enhancement in Graphene-Passivated Metal Films", Scientific Reports 6, 30519 (2016). DOI: 10.1038/srep30519

- [19] Y. Yu et al., “Exciton-dominated Dielectric Function of Atomically Thin MoS₂ Films”, Scientific Reports 5, 16996 (2015). DOI: 10.1038/srep16996
- [20] S. Sanzaro et al., “Multi-Scale-Porosity TiO₂ scaffolds grown by innovative sputtering methods for high throughput hybrid photovoltaics”, Scientific Reports 6, 39509 (2016). DOI: 10.1038/srep39509