INSO
22781
1st Edition
2020

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۲۲۷۸۱
چاپ اول
۱۳۹۹

فناوری نانو- ارزیابی ضخامت، چگالی و پهنای فصل‌مشترک نانوفیلم‌های تک و چندلایه به‌وسیله بازتاب‌سنجی پرتوی ایکس(XRR) -

روش آزمون

Nanotechnologies— Assessment of thickness, density and interface width of single-and multi-layer nanofilms by X-ray reflectometry (XRR)—

Test method

ICS: 35.240.70; 71.040.40

دارای محتوای رنگی

استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۲۲۷۸۱ (چاپ اول): سال ۱۳۹۹

سازمان ملی استاندارد ایران

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

صندوق‌پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران- ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ 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 مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفهٔ تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران 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 منصفانهٔ 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 پیشنهادها در کمیتهٔ 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 درکمیته ملی طرح، بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ 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)[1]، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] 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 استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ 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، گواهینامهٔ 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 for Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)
4- Contact point
5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«فناوری نانو- ارزیابی ضخامت، چگالی و پهنای فصل‌مشترک نانوفیلم‌های تک و چندلایه به‌وسیله بازتاب‌سنجی پرتوی ایکس (XRR)- روش آزمون»

رئیس:	**سمت و/یا محل اشتغال:**
نوروزیان علم، شهاب (دکتری مهندسی برق- الکترونیک)	عضو هیئت علمی- دانشگاه علم و صنعت ایران
دبیر:	
میرکاظمی، سیّد محمّد (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
بازیار، الهام (کارشناسی ارشد فیزیک)	کارشناس- آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شریف
پوی پوی، حسن (کارشناسی ارشد شیمی آلی)	دبیر- کمیته فنی متناظر فناوری نانو ISIRI/TC 229
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 ISIRI/TC 229
فعّال‌نظری، ندا سادات (کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی)	کارشناس- آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شریف
گل زردی، سمیرا (کارشناسی ارشد نانومواد)	کارشناس- گروه استاندارد و ایمنی ستاد فناوری نانو
میرزاجانی، فاطمه (دکتری فیتوشیمی)	عضو هیئت علمی- دانشگاه شهید بهشتی

ویراستار:

سیفی، مهوش
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

سمت و/یا محل اشتغال:

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

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

پیش‌گفتار ح
مقدمه ط
۱ هدف و دامنه کاربرد ۱
۲ مراجع الزامی ۱
۳ اصطلاحات، تعاریف، نمادها و کوته‌نوشت‌ها ۲
۳-۱ اصطلاحات و تعاریف ۲
۳-۲ نمادها و کوته‌نوشت‌ها ۸
۴ الزامات ابزاری، رهنمودهای هم‌محورسازی و موقعیت‌دهی ۸
۴-۱ الزامات ابزاری برای روش روبشی ۸
۴-۲ هم‌محورسازی ابزاری ۱۴
۴-۳ هم‌محورسازی آزمونه ۱۵
۵ جمع‌آوری و ذخیره داده ۱۷
۵-۱ ملاحظات مقدماتی ۱۷
۵-۲ پارامترهای روبش داده ۱۸
۵-۳ بازه دینامیک ۱۸
۵-۴ اندازه گام (تعریف پیک) ۱۸
۵-۵ زمان جمع‌آوری (شمارش‌های انباشت‌شده) ۱۹
۵-۶ جمع‌آوری داده بخش‌بخش‌شده ۲۰
۵-۷ کاهش نوفه ۲۰
۵-۸ آشکارسازها ۲۰
۵-۹ محیط ۲۱
۵-۱۰ ذخیره داده‌ها ۲۱
۶ آنالیز داده‌ها ۲۱
۶-۱ پردازش مقدماتی داده‌ها ۲۱
۶-۲ مدل‌سازی آزمونه ۲۲
۶-۳ شبیه‌سازی داده‌های XRR ۲۵
۶-۴ مثال‌های کلی ۲۵
۶-۵ برازش داده‌ها ۲۸
۷ اطلاعات موردنیاز هنگام گزارش‌دهی آنالیز XRR ۳۱

عنوان **صفحه**

۷-۱ کلیات ۳۱
۷-۲ جزئیات تجربی ۳۲
۷-۳ روش‌های اجرایی آنالیز (شبیه‌سازی و برازش) ۳۲
۷-۴ روش‌هایی برای گزارش‌دهی منحنی‌های XRR ۳۴
پیوست الف (الزامی) الزامات ایمنی و رهنمود برای تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی ۳۷
پیوست ب (آگاهی‌دهنده) نمونه گزارش برای ویفر اکسی نیترید سیلیکون ۵۰
پیوست پ (آگاهی‌دهنده) بازتاب‌سنج پرتوی ایکس آزمایشگاهی باریکه همگرا سریع هم‌زمان با استفاده از هندسه پاشش چندزاویه‌ای ۵۵
پیوست ت (آگاهی‌دهنده) مشخصه‌یابی بازتابندگی پرتوی ایکس از رسوب نانولایه اتمی Al_2O_3/TiO_2 دولایه‌های بسیار نازک تکرارشونده ۶۲
کتاب‌نامه ۶۸

پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری نانو- ارزیابی ضخامت، چگالی و پهنای فصل‌مشترک نانوفیلم‌های تک و چندلایه به‌وسیله بازتاب‌سنجی پرتوی ایکس (XRR)- روش آزمون» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط تهیه و تدوین شده است، در هشتاد و هفتمین اجلاسیه کمیتهٔ ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۳۹۹/۰۳/۰۷ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک مادهٔ 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 شمارهٔ ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوهٔ نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینهٔ صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون‌های مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

منابع و مأخذی که برای تهیه و تدوین این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

۱- استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۶۸۰: سال ۱۳۸۷، آگاه‌کننده تابش یونساز- نماد تکمیلی

2- ISO 4287-1:1984, Surface roughness- Terminology- Part 1: Surface and its parameters

3- ISO 16413:2013, Evaluation of thickness, density and interface width of thin films by X-ray reflectometry- Instrumental requirements, alignment and positioning, data collection, data analysis and reporting

4- Safety code 32: 1994, *Safety requirements and guidance for analytical X- ray equipement*, Health Canada, Published by authority of the minister of national health and welfare

مقدمه

بازتاب‌سنجی پرتو ایکس (XRR)[1] به‌طور گسترده، برای اندازه‌گیری ضخامت، چگالی و پهنای فصل‌مشترک نانوفیلم‌های تک‌لایه یا چندلایه با ضخامت پوشش بین تقریباً ۱ nm تا ۱ μm روی زیرلایه، به‌کاربرده می‌شود. در این روش ضروری است تجهیزات و طول‌موج پرتوی ایکس مناسب و سازگار با لایه مورد بررسی انتخاب شوند. نمونه باید به‌صورت کاملاً افقی در معرض تابش باریکه پرتو ایکس قرار گیرد. در روش‌های آنالیز شیمیایی سطحی معمول ضخامت نمونه به‌وسیله اطلاعات مقدار ماده و توابع تبدیل، تخمین زده می‌شود، ولی سامانه XRR قابلیت اندازه‌گیری ضخامت در محدوده نانومتر را مستقیماً فراهم می‌کند. روش XRR یک روش توانمند برای اندازه‌گیری نانوفیلم‌های نازک با قابلیت ردیابی در سامانه SI[2] است. اندازه‌گیری‌ها ممکن است با پیکربندی‌های ساده مانند ابزارهای آزمایشگاهی تا پیکربندی‌های پیچیده مانند بازتاب‌سنج‌های با خطوط باریکه تابش سنکروترونی یا سامانه‌های خودکار مورد استفاده در صنعت، انجام شود.

توصیه می‌شود حین جمع‌آوری داده‌ها، به ناپایداری فیزیکی و شیمیایی احتمالی لایه‌ها توجه ویژه‌ای شود. عدم توجه به این موضوع می‌تواند سبب کاهش قابل‌توجه دقت نتایج اندازه‌گیری شود. از آنجاکه XRR، در یک طول‌موج مشخص عمل می‌کند، اطلاعات شیمیایی در مورد لایه‌ها را فراهم نمی‌کند. با توجه به توانمندی این روش، تدوین استانداردی جهت ارائه الزامات عملکردی این روش و بررسی مطالعات موردی ضروری است. استاندارد حاضر به این مهم خواهد پرداخت.

الزامات کلیدی مربوط به تجهیزات مناسب برای جمع‌آوری داده بازتابندگی آینه‌ای[3] با کیفیت بالا، در بند ۳ توضیح داده می‌شود. الزامات مربوط به هم‌محورسازی نمونه و موقعیت‌یابی (به‌گونه‌ای که اندازه‌گیری‌های مفید و درستی حاصل شوند) نیز در این بند ارائه می‌شود. موضوعات کلیدی مربوط به جمع‌آوری داده مربوط به بازتابندگی پرتوی ایکس با کیفیت بالا و مناسب برای پردازش و مدل‌سازی داده‌های مربوط به آزمونه، در بند ۴ توضیح داده می‌شود. در روش‌های قدیمی، جمع‌آوری داده به‌صورت سنتی با انجام اندازه‌گیری‌های منفرد با ورود مستقیم داده توسط کاربر هدایت می‌شد. ولی، به‌تازگی غالباً داده‌ها به‌وسیله فرمان‌دادن به ابزارها با اجراهای چندگانه، جمع‌آوری می‌شوند. علاوه‌بر حالت کاربرمحور، می توان داده را با استفاده از دستورات خودکار به‌وسیله برنامه نرم‌افزاری کنترل‌کننده ابزار موجود، جمع‌آوری کرد. در بند ۵ این استاندارد، اصول آنالیز داده XRR با بازتاب آینه‌ای به‌منظور دستیابی به اطلاعات فیزیکی ماده در مورد آزمونه ارائه می‌شود. در حالی‌که، برازش[4] XRR با بازتاب آینه‌ای می‌تواند فرایندی پیچیده باشد، ساده کردن

1 - X-Ray Reflectometry (XRR)
2 - SI tracibility
3 - Specular reflection
4 - Fitting

پیاده‌سازی با تضمین کیفیت و حفظ شفافیت عملکرد برای کاربر، امکان‌پذیر است. بسته‌های نرم‌افزاری بسیاری وجود دارند که برای شبیه‌سازی و برازش داده XRR مناسب هستند.

توصیف جزئیات نظریه‌ها و الگوریتم‌ها هدف این استاندارد نیست. اطلاعات موردنیاز هنگام گزارش‌دهی آزمون‌های XRR در بند ۶ فهرست شده‌است. مروری اجمالی برای راه‌های ممکن جهت ارائه داده و نتایج XRR معرفی‌شده‌است و در صورت وجود چند راه، انتخاب ارجح مشخص شده‌است.

این استاندارد، روش آزمونی برای انجام اندازه‌گیری‌ها و آنالیز XRR است. توصیه می‌شود، برای توضیحات کامل روش، به منابع مناسب رجوع شود (به‌عنوان مثال منابع شماره [1][1] تا [7] کتاب‌نامه).

لازم به ذکر است که در پیوست **الف**، نکات ایمنی کار با تجهیزات پرتوی ایکس بر اساس استاندارد ارائه می‌شود. در پیوست **ب**، نمونه گزارش برای ویفر اکسی نیترید سیلیکون بررسی شده‌است.

با توجه به آنکه در سال‌های اخیر استفاده از دستگاه XRR با پرتوهای ایکس همگرا سبب کاهش زمان نمونه‌برداری شده و امکان مطالعه مایعات را نیز فراهم کرده‌است، در این استاندارد در پیوست **پ**، این موضوع بررسی می‌شود.

در پایان، مطالعه موردی راجع به مشخصه‌یابی بازتابندگی پرتوی ایکس از رسوب نانو لایه اتمی Al_2O_3/TiO_2 دولایه‌ای تکرار شونده (نانولمینیت)[2] بسیار نازک، در پیوست **ت** ارائه می‌شود.

---

۱ - اعداد داخل قلاب به شماره منبع ذکر شده در کتاب‌نامه اشاره دارد.

2 - Nanolaminate

فناوری نانو- ارزیابی ضخامت، چگالی و پهنای فصل‌مشترک نانوفیلم‌های تک و چندلایه به‌وسیله بازتاب‌سنجی پرتوی ایکس (XRR)- روش آزمون

۱ هدف و دامنهٔ کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین روشی برای ارزیابی ضخامت، چگالی و پهنای فصل مشترک نانوفیلم‌های تک‌لایه‌ای و چندلایه‌ای است. این ارزیابی در لایه‌هایی با ضخامت بین تقریباً ۱ nm تا ۱ μm، روی زیرلایه صاف، به‌وسیله دستگاه‌های بازتاب‌سنجی پرتوی ایکس (XRR) انجام می‌شود.

در این روش اغلب از باریکه موازی تکفام استفاده می‌شود که آزمونه را به‌صورت زاویه‌ای یا بردار پراکندگی روبش می‌کند. ملاحظات مشابهی برای حالت باریکه همگرا با جمع‌آوری داده به‌صورت موازی[1]، با استفاده از آشکارساز توزیع‌شده یا روبش طول‌موج به‌کار می‌رود که در این استاندارد مختصراً بررسی شده‌است.

یادآوری- به آلودگی‌ها یا واکنش‌های احتمالی روی سطح آزمونه توجه شود. دقت نتایج برای درونی‌ترین لایه، به‌شدت تحت‌تأثیر تغییرات در سطح قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه پرتوی ایکس یونیزه‌کننده و دارای مخاطرات بسیاری برای کاربر است، در این استاندارد، توصیه‌هایی در مورد ایمنی کار با دستگاه‌های آنالیز بر پایه پرتوی ایکس ارائه شده‌است.

۲ مراجع الزامی

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

درصورتی‌که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده‌باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام آور نیست، در مورد مراجعی که بدون ذکر انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده‌است. همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام آور است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است.

2-1- ISO 4287-2: 1984, Surface roughness- Terminology- Part 2: Measurement of surface roughness parameters.

2-2- ISO 11146-1, Lasers and laser- related equipment- Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratio- Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams

یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۱۷۱۰: سال ۱۳۸۷، لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای تعیین پهنا، زوایای واگرایی و نسبت انتشار پرتو لیزر- قسمت اول: پرتوهای آستیگماتیک و آستیگماتیک ساده، با استفاده از استاندارد ISO 11146-1: 2005 تدوین شده‌است.

1 - Parallel data collection

۳ اصطلاحات، تعاریف، نمادها و کوته‌نوشت‌ها

۳-۱ صطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات و تعاریف زیر به‌کار می‌رود:

۳-۱-۱

زاویه فرودی

incident angle

زاویه بین باریکه فرودی و سطح آزمونه است.

۳-۱-۲

زاویه بحرانی

critical angle

زاویه بین باریکه فرودی و سطح آزمونه، θ_c، است که در مقادیر کمتر از آن، بازتاب کلی خارجی پرتوی ایکس وجود دارد و در مقادیر بیشتر از این زاویه، باریکه پرتوی ایکس به زیر سطح آزمونه نفوذ می‌کند.

یادآوری ۱- زاویه بحرانی را می‌توان برای ماده یا ساختار آزمونه مشخص با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی پیدا کرد و یا از فرمول $\theta_c = \sqrt{2\delta}$ تقریب زد. $n = 1 - \delta - i\beta$، ضریب‌شکست مختلط آزمونه برای پرتوی ایکس، $1-\delta$ بخش حقیقی و β بخش موهومی آن است.

۳-۱-۳

طول آزمونه

specimen length

بعد آزمونه در راستای تقاطع صفحه باریکه‌های پرتوی ایکس بازتابی و فرودی و صفحه آزمونه است.

۳-۱-۴

پهنای آزمونه

specimen width

بُعد آزمونه در راستای عمود بر صفحه باریکه‌های پرتوی ایکس بازتابی و فرودی در صفحه آزمونه است.

۳-۱-۵

ارتفاع آزمونه

specimen height

Z

بُعد (ضخامت) آزمونه عمود بر صفحه آزمونه است.

۳-۱-۶

ضخامت لایه

layer thickness

ضخامت هر لایه مجزا، روی زیرلایه است.

۳-۱-۷

جاپای باریکه

beam footprint

سطح آزمونه تابش‌دهی‌شده به‌وسیله پرتوی ایکس است.

۳-۱-۸

ریزش باریکه

beam Spill-off

اثر فرود خراشان[1] که شامل کاهش شدت بازتابی اندازه‌گیری شده‌است. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که فقط بخشی از باریکه (نه تمام آن) روی سطح آزمونه فرود می‌آید.

۳-۱-۹

تابع ابزاری

instrument function

تابعی تحلیلی، توصیف‌کننده اثرات ابزار و تفکیک، روی شدت پرتوی ایکس پراکنده‌شده است.

۳-۱-۱۰

فضای معکوس

reciprocal space

نمایشی از آزمونه فیزیکی و پرتوهای ایکس که در آن فاصله متناسب با عکس فضای حقیقی و زوایا همخوان با زوایای فضای حقیقی رسم می‌شود.

۳-۱-۱۱

بُردار موج

wave vector

k

بُردار در فضای معکوس توصیف‌کننده باریکه‌های پرتوی ایکس فرودی و پراکنده‌شده است.

---

1 - Grazing incidence

۳-۱-۱۲

بُردار پراکندگی

scattering vector

q

بُردار در فضای معکوس ارائه‌دهنده اختلاف بین بردارهای موج فرودی و پراکنده‌شده است.

۳-۱-۱۳

صفحه پاشش

dispersion plate

صفحه‌ای که شامل منبع، آشکارساز و باریکه‌های پرتوی ایکس بازتابی آینه‌ای و فرودی است.

۳-۱-۱۴

بازتابندگی پرتوی ایکس آینه‌ای

specular X-ray reflectivity

سیگنال پرتو ایکس بازتابی آشکارشده در زاویه‌ای برابر با زاویه پرتوی ایکس فرودی با سطح آزمونه، $\frac{2\theta}{2} = \omega$، است.

یادآوری- شدت پرتو ایکس پراکنده‌شده و آشکارشده به‌صورت تابعی از یا ω یا 2θ یا q_z (معمولاً برحسب q_z یا ω) اندازه‌گیری می‌شوند.

۳-۱-۱۵

بازتابندگی پرتوی ایکس پخشیده

diffuse X-ray reflectivity

پراکنده شدن پرتوی ایکس به‌وجود آمده از نقص آزمونه است.

۳-۱-۱۶

فرینج

fringe

یکی از بیشینه‌های تکرارشونده در بازتاب‌سنجی که ناشی از تداخل امواج پرتوی ایکس است.

یادآوری- تناوب‌های فرینج به ضخامت یک لایه (یا چندین لایه) با چگالی الکترون متفاوت مرتبط است. لایه‌های چندگانه منجر به مجموعه‌هایی از فرینج‌های تداخلی برهم‌نهاده می‌شود.

۳-۱-۱۷

تباین فرینج

fringe contrast

توصیف کمّی ارتفاع یک فرینج یعنی اختلاف بین کمینه و بیشینه آن است.

یادآوری- اختلاف بزرگ‌تر بین کمینه و بیشینه منجر به تباین بزرگ‌تری می‌شود.

۳-۱-۱۸

چگالی الکترونی

electron density

ρ_e

تعداد الکترون در واحد حجم است.

یادآوری ۱- در روش XRR معمولاً چگالی الکترونی بر حسب الکترون بر نانومتر مکعب یا الکترون بر آنگستروم مکعب اندازه‌گیری می‌شود.

یادآوری ۲- چگالی الکترونی می‌تواند به‌وسیله چگالی جرمی محاسبه شود.

۳-۱-۱۹

چگالی جرمی

mass density

ρ

جرم بر واحد حجم است.

یادآوری- چگالی جرمی بر حسب kgm^{-3} (یا گاهی بر حسب gcm^{-3}) اندازه‌گیری می‌شود.

۳-۱-۲۰

طول جذب

absorption length

L_{abs}

فاصله‌ای که روی آن شدت عبوری به $\frac{1}{e}$ شدت فرودی کاهش می‌یابد. e عدد نپر[1] است.

یادآوری- عدد (e) یکی از ثابت‌های ریاضی و پایه لگاریتم طبیعی است. عدد نپر تقریباً برابر ۲٫۷۱۸۲ است.

1 - Napier

۳-۱-۲۱

سامانه مختصات X، Y و Z

X, Y, Z coordinate system

سامانه مختصات متعامد که در آن X، جهت در صفحه آزمونه، موازی با باریکه فرودی هنگامی‌که $\phi = 0$ است، Y جهت در صفحه آزمونه، عمود بر باریکه فرودی هنگامی‌که $\phi = 0$ است و Z جهت عمود بر صفحه آزمونه است.

۳-۱-۲۲

پهنای فصل‌مشترک

interface width

پهنای فصل‌مشترک اطلاعاتی در مورد مشخصه‌های آماری سطح فراهم می‌کند. پهنای فصل‌مشترک از سه عامل ناصافی هندسی، گرادیان چگالی یا ترکیب‌بندی در فصل مشترک تأثیر می‌پذیرد. پهنای فصل‌مشترک نمی‌تواند با یک روش یکتا توصیف شود و در متون علمی توصیفات گوناگونی برای آن ارائه شده‌است. برای اهداف بررسی‌های عددی، یکی از مناسب‌ترین توصیفات برای مربع پهنای فصل‌مشترک، ممان دوم تابع وزنی است که متناسب با گرادیان پروفایل فصل‌مشترک، m، است:

$$\sigma^2 = \frac{\int dz\, z^2 m'(z)}{\int dz\, m'(z)}$$

که در آن z ارتفاع نسبت به فصل‌مشترک میانگین است.

یادآوری ۱- ناصافی هندسی سطح، متشکل از بی‌نظمی سطح با فواصل نسبتاً کوچک که معمولاً شامل بی‌نظمی‌های حاصل از روش ساخت مورداستفاده و/ یا دیگر تأثیرات است. این بی‌نظمی‌ها در حدودی که به‌صورت مناسب تعریف شده‌اند، به‌طور مثال در حدود طول نمونه‌برداری، در نظر گرفته می‌شوند.

یادآوری ۲- بازتابندگی آینه‌ای پهنای فصل‌مشترک کل را اندازه‌گیری می‌کند و تمایزی بین ناصافی هندسی و گرادیان چگالی/ یا ترکیب‌بندی در فصل‌مشترک قائل نمی‌شود. برای تشخیص این موارد و اندازه‌گیری جداگانه آن‌ها علاوه بر بازتابندگی آینه‌ای، بازتابندگی پخشیده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یادآوری ۳- گرادیان چگالی یا ترکیب‌بندی منجر به گرادیان ضریب‌شکست نوری در فصل‌مشترک می‌شود.

۲۳-۱-۳

پهناهای باریکه

beam widths

d_σ

<ممان دوم تابع چگالی توان (انرژی)> پهنای کوچک‌ترین شکاف در دو جهت متعامد مرجع x و y عمود بر محور باریکه، z، که چنین توصیف می‌شوند:

$$d_{\sigma x}(z) = 4\sigma_x(z)$$
$$d_{\sigma y}(z) = 4\sigma_y(z)$$

که در آن مُمان دوم تابع توزیع چگالی توان $E(x,y,z)$ باریکه در موقعیت z چنین به‌دست می‌آید:

$$\sigma_x^2(z) = \frac{\int\int (x-\bar{x})^2 E(x,y,z)\,dxdy}{\int\int E(x,y,z)\,dxdy}$$
$$\sigma_y^2(z) = \frac{\int\int (y-\bar{y})^2 E(x,y,z)\,dxdy}{\int\int E(x,y,z)\,dxdy}$$

$(x-\bar{x})$ و $(y-\bar{y})$ فاصله از مرکز نوری $(\bar{x},\bar{y})$ هستند. مختصات مرکز نوری براساس ممان‌های اول چنین محاسبه می‌شود:

$$\bar{x} = \frac{\int\int xE(r,\varphi,z)\,dxdy}{\int\int E(r,\varphi,z)\,dxdy}$$

$$\bar{y} = \frac{\int\int yE(r,\varphi,z)\,dxdy}{\int\int E(r,\varphi,z)\,dxdy}$$

یادآوری ۱- اصولاً، روی کل صفحه xy انتگرال‌گیری انجام می‌شود. در عمل انتگرال‌گیری باید روی سطحی انجام شود که حداقل ٪۹۹ توان (انرژی) باریکه در آن ثبت شده‌است.

یادآوری ۲- در باریکه‌های پالسی، چگالی توان، E، با چگالی انرژی، H، جایگزین می‌شود.

۳-۲ نمادها و کوته‌نوشت‌ها

علامت	یکا	توضیح
2θ	۲تتا	زاویه باریکه پرتوی ایکس آشکارشده نسبت به باریکه پرتوی ایکس فرودی
ω	امگا	زاویه بین باریکه پرتوی ایکس فرودی و سطح آزمونه
ϕ	فی	زاویه چرخش[1] حول محور عمود بر سطح آزمونه
χ	خی	زاویه کجی[2] آزمونه حول یک محور در صفحه آزمونه و صفحه پاشش (صفحه باریکه پرتوی ایکس فرودی، منبع پرتوی ایکس و آشکارساز)
θ_c		زاویه بحرانی
λ		طول‌موج باریکه پرتوی ایکس فرودی
ρ		چگالی جرمی
ρ_e		چگالی الکترونی
$\boldsymbol{k}$		بردار موج
$\boldsymbol{q}$		بردار پراکندگی
q_z		اندازه مولفه بردار پراکندگی در فضای وارون، عمود بر سطح آزمونه (شکست پرتو اصلاح‌شده یا اصلاح‌نشده)، $q_z = \frac{4\pi}{\lambda}\sin(\theta)$
σ		ریشه میانگین مربع ارتفاع سطح محدود مقیاس (مطابق استاندارد ISO 25178-2) یا پهنای فصل‌مشترک
L_{abs}		طول جذب در آزمونه
XRR		بازتاب‌سنجی پرتوی ایکس یا بازتابندگی پرتوی ایکس
Z		ارتفاع آزمونه

۴ الزامات ابزاری، رهنمودهای هم‌محورسازی[3] و موقعیت‌دهی

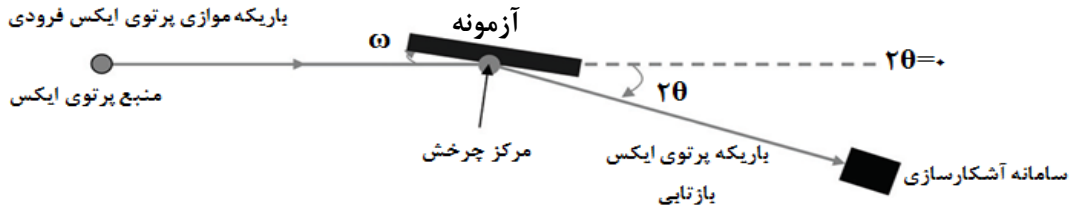
۴-۱ الزامات ابزاری برای روش روبشی

۴-۱-۱ طرحواره‌ها

1 - Rotation
2 - Tilt
3 - Alignment

الزامات اصلی، مربوط به قطر باریکه و موقعیت‌دهی آن روی مراکز هم‌محور محورهای چرخش آزمونه (ω) و آشکارساز (2θ) هستند.

شکل (۱) طرحواره یک باریکه موازی اصلی با پیکربندی روبشی برای آزمون XRR را نشان می‌دهد. حالت باریکه همگرا و آشکارساز توزیع‌شده در این شکل نشان داده نشده‌است.



راهنما:

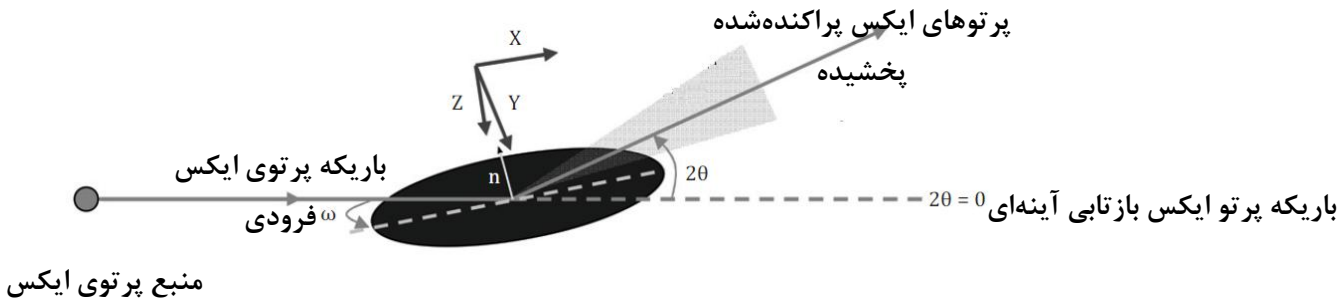
ω زاویه بین سطح آزمونه و باریکه پرتوی ایکس فرودی؛

$2\theta = 0^\circ$ زاویه بین باریکه آشکارشده و ۲ (امتداد باریکه پرتوی ایکس فرودی).

یادآوری- مرکز چرخش، جایی‌که باریکه‌های فرودی و بازتابی، سطح آزمونه و محورهای چرخش ω و 2θ با یکدیگر تلاقی می‌کنند، با دیسک برجسته نشان داده‌شده‌است.

شکل ۱- چیدمان طرحواره یک پیکربندی تجربی XRR روبشی که در آن صفحه پاشش نشان داده شده‌است

شکل (۲) طرحواره XRR با پیکربندی روبشی در نمای سه‌بعدی را نشان می‌دهد. در این شکل باریکه پرتوی ایکس پراکنده‌شده پخشیده و بازتابی آینه‌ای نشان داده شده‌است.



راهنما:

ω زاویه بین سطح آزمونه و باریکه پرتوی ایکس فرودی؛

2θ زاویه بین پرتو آشکارشده (در $2\theta = 0^\circ$) و هر بخش از باریکه بازتابی که مطلوب است (باریکه آشکارشده).

شکل ۲- طرحواره باریکه‌های پرتوی ایکس بازتابی پخشیده و آینه‌ای

۴-۱-۲ باریکه فرودی- الزامات و توصیه‌ها

۴-۱-۲-۱ باریکه فرودی- الزامات

الزامات زیر باید در روش روبش، بر باریکه موازی اعمال شود. ملاحظات مشابه برای باریکه همگرا با روش جمع‌آوری داده موازی نیز اعمال می‌شود.

الف- باریکه فرودی باید در کل زمان آزمون پایدار باشد (یا بتواند جبران شود).

ب- باریکه فرودی باید تکفام باشد. پاشش[1] طول‌موج $d\lambda$ باید شرط زیر را برآورده کند:
$d\lambda < \lambda d\theta / \tan(\theta_m)$ که در آن $d\theta$ واگرایی باریکه و θ_m معمولاً زاویه فرودی بیشینه است. این زاویه، جایی است که هنوز فرینج مشاهده می‌شود.

مثال: اگر از باریکه فرودی تابش Cu Kα (λ =۰٫۱۵۴۱ nm) با واگرایی زاویه‌ای ۵۰ قوس ثانیه[2] استفاده شود و اگر فرینج‌ها تا زاویه‌ی فرودی $3{,}5^{o}$ مشاهده شوند، نیاز است که $d\lambda$ کوچک‌تر از ۰٫۰۳۵ nm باشد.

پ- اگر باریکه به اندازه کافی موازی نباشد، واگرایی باریکه، ضخامت قابل آشکارسازی را محدود می‌سازد. عملاً، بیشینه ضخامت قابل اندازه‌گیری، کمتر از $\lambda/(6\sin(d\theta))$ است. در این رابطه $d\theta$ واگرایی باریکه برای یک نمونه مناسب است. برای تجهیزات آزمایشگاهی معمول حد ضخامت قابل‌اندازه‌گیری چند صد نانومتر است.

ت- شدت باریکه فرودی باید به‌گونه‌ای باشد که چندین مرتبه بالاتر از بیشینه پس‌زمینه باشد، زیرا شدت بازتابی به سرعت در مقادیر بیشتر از زاویه بحرانی کاهش می‌یابد. در مقادیر کمتر از زاویه بحرانی، بازتاب کلی وجود دارد. در مقادیر بیشتر از زاویه بحرانی، شدت بازتابی با نرخی متناسب با q_z^{-4} برای سطح کاملاً صاف کاهش می‌آید. نرخ کاهش برای لایه با ضریب‌شکست گرادیانی[3] و/ یا سطح ناصاف بیشتر است.

۴-۱-۲-۲ باریکه فرودی-توصیه‌ها

توصیه‌های زیر در روش روبشی در مورد باریکه موازی موردتوجه قرار می‌گیرد. ملاحظات مشابهی در روش جمع‌آوری داده موازی در مورد باریکه همگرا وجود دارد.

الف- توصیه می‌شود آزمونه تحت تابش‌دهی یکنواخت باشد و به‌وسیله آشکارساز مشاهده شود. این تابش‌دهی یکنواخت ممکن است با کنترل شکاف‌های باریکه پراکنده‌شده و فرودی و/ یا با جادادن (برای مثال) یک لبه چاقو[4] در نزدیکی آزمونه به‌دست آید.

---

1 - Dispersion
2 - Arc second
3 - Graded refrection index
4 - Knife edge

ب- توصیه می‌شود ریزش باریکه کمینه شود. این موضوع مخصوصاً هنگامی حائز اهمیت است که زاویه آزمونه نزدیک به مقدار زاویه بحرانی و یا بیشتر از آن باشد. توصیه می‌شود، پهنای باریکه در مقایسه با طول آزمونه به‌گونه‌ای انتخاب شود که هیچ ریزش باریکه‌ای برای زاویه آزمونه بالای حدود ٪ ۷۵ از زاویه بحرانی وجود نداشته باشد (به شکل ۳ مراجعه شود).

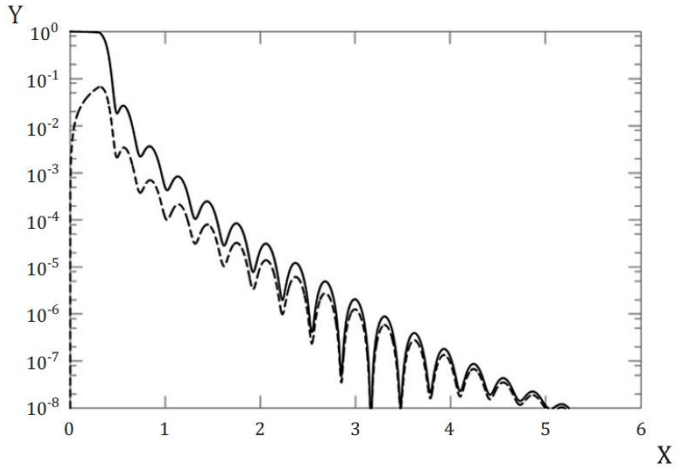
یادآوری- برای آزمونه موازی با باریکه ($\omega = ۰^\circ$)، باریکه کل آزمونه را پوشش می‌دهد. جاپای باریکه با زاویه فرودی تغییر می‌کند، مگر آنکه موقعیت شکاف‌ها یا لبه چاقو حین روبش تغییر کند.

۱- پهنای باریکه قابل‌قبول بیشینه برای اندازه آزمونه مشخص، می‌تواند به‌وسیله روابط هندسی پیدا شود.

۲ - اگر ابعاد آزمونه‌های بسیار کوچک باشد، پیاده‌سازی الزامات توصیه‌شده عملی نیست. در این شرایط دقت و صحت پهناهای فصل‌مشترک و چگالی کاهش می‌یابد.

۳- ضروری است که موقعیت زاویه بحرانی با دقت منطقی تعیین شود. اگر آنالیز داده‌ها شامل چگالی لایه و پارامترهای پهنای فصل‌مشترک باشد، این مورد می‌تواند با درستی منطقی نتیجه‌گیری شود.

۴- برخی از نرم‌افزارهای مدل‌سازی و برازش داده، اجازه می‌دهند اندازه آزمونه و اندازه باریکه، پارامتر ورودی باشند. این موضوع، در جایی‌که ریزش باریکه قابل‌توجهی وجود دارد برازش داده را مجاز می‌سازد. اما حتی با این وجود توصیه می‌شود برای آن‌که برازش این ناحیه و حصول اطلاعات چگالی قابل‌اعتماد باشد، باریکه فرودی در زوایای کمتر از زاویه بحرانی آزمونه را روبش کند.



راهنما:

X q_z بر حسب nm^{-1}؛

Y شدت بر حسب واحد دلخواه؛

— بازتابندگی آینه‌ای شبیه‌سازی‌شده از لایه نازک Si_3N_4 با ضخامت nm ۲۰ (با ناصافی سطح nm ۰٫۶) روی Si توده‌ای (با پهنای فصل‌مشترک nm ۰٫۳)، بدون تابع ابزاری؛

- - - بازتابندگی آینه‌ای شبیه‌سازی‌شده از لایه نازک Si_3N_4 با ضخامت nm ۲۰ (با ناصافی سطح nm ۰٫۶) روی Si توده‌ای (با پهنای فصل‌مشترک nm ۰٫۳)، با تابع ابزاری (پهنای شکاف‌های منبع و آشکارساز mm ۰٫۵ و اندازه آزمونه mm۱۰).

یادآوری- موقعیت زاویه بحرانی برای آزمونه کوچک، نامشخص و احتمالاً جابه‌جاشده است و نرخ کاهش شدت بازتابی با افزایش زاویه آزمون تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد. اگر تابع ابزاری به‌درستی در آنالیزها به حساب نیامده باشد، این موضوع، ناصافی و پهنای فصل‌مشترک استخراج‌شده را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. موقعیت فرینج‌ها از این موضوع تأثیر نمی‌پذیرد، بنابراین آنالیز ضخامت می‌تواند با موفقیت انجام شود.

شکل ۳- بازتابندگی آینه‌ای شبیه‌سازی‌شده از لایه نازک Si_3N_4 با ضخامت nm۲۰ روی Si توده‌ای، با و بدون تابع ابزاری

پ - درصورتی‌که ریزش باریکه پس از زاویه بحرانی ادامه نیابد، حتی اگر شرط توصیه‌شده فوق احراز نشود، فرینج‌ها در بازتاب‌سنجی همچنان اندازه درستی از ضخامت لایه را خواهند داد.

ت- در شرایطی‌که از اندازه‌گیری شدت باریکه مستقیم برای هم‌محورنمودن آزمونه به‌طورصحیح روی مرکز چرخش ω و 2θ، استفاده می‌شود، توصیه می‌شود ریزش بخش اندازه‌گیری‌شده باریکه پرتو ایکس در آشکارساز، عمود بر صفحه پاشش (صفحه پاشش عمود بر صفحه شکل (۱) است) وجود نداشته باشد.

۴-۱-۳ آزمونه- الزامات و توصیه‌ها

۴-۱-۳-۱ آزمونه- الزامات

الزامات اصلی زیر باید صحه‌گذاری شود:

- XRR یک روش حساس به سطح است. بنابراین، آزمونه باید فقط به‌گونه‌ای عمل‌آوری یا دستکاری شود که سطح تغییر نکند.
- درغیراین‌صورت، هرگونه تغییری در سطح برای تفسیر داده‌ها منظور شود. تغییرات می‌تواند شامل پرداخت[1] شیمیایی یا مکانیکی و تماس باشد.

۴-۱-۳-۲ آزمونه- توصیه‌ها

توصیه می‌شود موارد زیر رعایت شود.

الف- توصیه می‌شود آزمونه در زیر جاپای باریکه مشاهده‌شده به‌وسیله آشکارساز یکنواخت باشد.

ب- توصیه می‌شود باریکه فرودی آزمونه را در زوایای کمتر از زاویه بحرانی روبش کند. بهتر است باریکه به‌طور کامل در زاویه‌ای کمتر از ٪ ۷۵ زاویه بحرانی آزمونه را پوشش دهد.

پ- توصیه می‌شود، انحنای سطح آزمونه کم باشد، یا در صورت انحنای زیاد نمونه، دقت هم‌محوری و کیفیت داده سازگار باشند. اثر انحنا می‌تواند با کمینه‌کردن جاپای باریکه روی آزمونه کمینه شود. توصیه شده‌است که باریکه حداکثر آزمونه را تا ٪ ۷۵ زاویه بحرانی پوشش دهد. ممکن است پردازش داده‌ها از آزمونه‌های دارای انحنا امکان‌پذیر باشد. برخی از مدل‌های برازش داده، می‌تواند انحنای آزمونه را موردنظر قرار دهد. ممکن است مقادیر ضخامت با دقت کافی به‌دست آید، اما دقت اندازه‌گیری پهناهای فصل‌مشترک و چگالی کم‌تر است.

ت- توصیه می‌شود، سطح آزمونه و فصول‌مشترک (در مورد آزمونه‌هایی که قابل‌اجرا است)، صاف، با ریشه میانگین مربع (rms) ناصافی یا پهنای فصل‌مشترک کمتر یا برابر L_{abs}/θ_c، باشد. برای توصیف با جزئیات بیش‌تر ناصافی و پهنای فصل‌مشترک، به زیر بند ۵-۲-۱ مراجعه شود. معمولاً این میانگین به معنای بیشینه $\sigma < ۵\ nm$ (برای مقادیر بیشتر از این، مدل‌های ویژه‌ای برای آنالیز به‌کار می‌رود) و ترجیحاً $\sigma < ۳/۵\ nm$است. جایی‌که فصل یا فصل‌مشترک خیلی ناصاف هستند، شدت بازتابی با افزایش زاویه آزمونه به‌سرعت کاهش می‌یابد و داده‌های بازتاب‌سنجی اطلاعات ماده‌ای مفیدی به‌دست نمی‌دهد. مدل‌هایی که برای برازش داده استفاده می‌شوند نیز در پهناهای فصل‌مشترک خیلی زیاد، از اعتبارکمتری برخوردار هستند.

۴-۱-۴ زاویه‌سنج- الزامات

الزامات اصلی زیر باید صحه‌گذاری شوند:

الف- وجود یک زاویه‌سنج پرتوی ایکس پایدار و از نظر مکانیکی به‌خوبی هم‌محور الزامی است.

1 - Polish

ب- در پیکربندی روبشی، محورهای ω و 2θ باید به‌گونه‌ای قابل حرکت دادن باشند که بازه‌ها در نسبت $\Delta(2\theta) = \Delta(2\omega)$ حفظ شود. معمولاً حفظ به نسبت یک قسمت در ۱۰۰۰، کافی است.

پ- بازه‌های ω و 2θ باید به‌گونه‌ای قابل کوچک‌بودن به اندازه کافی باشند، که حداقل امکان جمع‌آوری ۵ نقطه داده روی ضخامت یک فرینج فراهم شود. برای آزمونه‌های پیچیده‌تر، نقاط داده بیش‌تر مورد نیاز است.

ت- ارتفاع نمونه (Z) باید به‌اندازه‌ای باشد که بتوان آن را روی مرکز چرخش محورهای ω و 2θ به‌درستی تنظیم کرد.

ث- کجی زاویه پایه آزمونه (χ) باید به‌گونه‌ای باشد که آزمونه با شکاف‌های باریکه فرودی به‌صورت موازی تنظیم شود.

۴-۱-۵ آشکارساز- الزامات

الزامات اصلی زیر باید صحه‌گذاری شود:

الف- پاسخ‌های آشکارساز باید در کل زمان آزمون پایدار باشد.

ب- تفکیک‌پذیری زاویه‌ای آشکارساز، برای داده بازتابندگی آینه‌ای جمع‌آوری‌شده در یک روبش منفرد، باید به‌گونه‌ای باشد که بین بازتابندگی پخشیده و آینه‌ای تمایز قائل شود. در مواردی که قابل‌اجرا است، توصیه می‌شود که شکاف‌های قابل‌استفاده در آشکارساز به‌گونه‌ای تنظیم شود تا با پهنای باریکه فرودی و واگرایی تطبیق یابد.

پ- به منظور آن‌که آشکارساز بتواند روی کل بازه شدت بازتابی خطی (یا خطی‌شده) باشد، آشکارساز باید قابلیت پاسخ‌دهی خطی (خطی‌شده) روی کل بازه شدت بازتابی (چندین مرتبه بزرگی) را داشته باشد. درغیر این‌صورت، باید سامانه‌ای از تضعیف‌کننده‌های[1] کالیبره‌شده برای محدودکردن شدت آشکارشده روی بخش‌های مناسبی از بازه داده به‌کار رود. سپس، داده در بخش‌های مختلف با استفاده از عامل‌های تضعیف نرمال می‌شود.

یادآوری- برای الزامات بازتاب‌سنجی آینه‌ای، هیچ تمایزی در صفحه عمود بر صفحه پاشش (یعنی در صفحه عمود بر نگاره شکل (۱)) وجود ندارد، شدت بازتابی در این جهت انتگرال‌گیری می‌شود.

۴-۲ هم‌محورسازی ابزاری

بازبینی‌های هم‌محورسازی ممکن است بخشی از روال‌های خودکار روی تجهیزات خاص باشد. فرض بر این است که موازی‌سازی شکاف تابش پراکنده‌شده انجام شده‌است. الزامات اصلی زیر باید صحه‌گذاری شود:

1 - Attenuators

الف- پهنای شکاف منبع پرتوی ایکس را تنظیم کنید تا ریزش باریکه کمینه شود (معمولاً ۰٫۱ *mm* تا ۰٫۲ *mm* در سامانه آزمایشگاهی).

ب- مطمئن شوید که هیچ‌چیز ناخواسته، مانع باریکه بین منبع و آشکارساز نباشد. آزمونه و پایه آزمونه باید خارج باریکه باشند.

پ- با شکاف‌های آشکارسازی شروع کنید که به‌اندازه کافی پهن‌تر (چندین مرتبه پهن‌تر) از شکاف‌های منبع باشند.

ت- باریکه پرتوی ایکس فرودی باید روی مرکز چرخش آزمونه و محورهای آشکارساز به‌درستی متمرکز شود.

یادآوری- این موضوع، با نرم‌افزار جدید کنترل که با درنظر گرفتن هم‌محوری غیرایده‌آل ابزار تصحیحات لازم را روی حرکت محورها اعمال می‌کنند، امکان‌پذیر است.

ث- پهنای آشکارساز را به‌گونه‌ای تنظیم کنید که زاویه پذیرش[1] همانند واگرایی باریکه فرودی باشد. یعنی در یک سامانه آزمایشگاهی، پهنای شکاف آشکارساز همانند پهنای شکاف منبع یا حدود ٪۲۰ پهن‌تر تنظیم شود.

ج- زاویه آشکارساز را در پهنای باریکه فرودی روبش کنید. پیک باید تقریباً تک بیشینه متقارن باشد. موقعیت مرکز بیشینه پیک (تقریباً در مرکز نوری) را موقعیت‌دهی کنید، آشکارساز را به این موقعیت حرکت دهید تا موقعیت $2\theta = 0^\circ$ را به درستی تنظیم کند.

۳-۴ هم‌محورسازی آزمونه

تجهیزات و کنترل آن ممکن است شامل هم‌محورسازی خودکار آزمونه، جمع‌آوری داده‌ها و روال‌های آنالیز باشد و ممکن است از دیگر روش‌های هم‌محورسازی، به‌طور مثال، فاصله‌یاب‌ها[2] یا پایش‌گرهای موقعیت استفاده کند. روش اجرایی زیر یک رهیافت هم‌محورسازی آزمونه نسبت به باریکه پرتوی ایکس در ابزار هم‌محورشده را توصیف می‌کند.

الف- ابزار باید به‌طور صحیح، با پهناهای شکاف مناسب، با باریکه فرودی به دقت روی مرکز چرخش هم‌محور شود و زاویه آشکارساز $2\theta = 0^\circ$ به‌درستی روی باریکه فرودی تنظیم شود.

ب- زاویه، ω، بین سطح آزمونه و باریکه فرودی باید به‌گونه‌ای کالیبره شود که در حالت $\omega = 0^\circ$، سطح نمونه تقریباً موازی با باریکه فرودی تنظیم شود.

پ- اگر از ابزار لبه چاقو استفاده شود، موقعیت آن در X، Z و کجی عمود بر جهت باریکه (در جایی‌که وجود دارد) باید به‌دقت تنظیم شود. این مورد پس از تنظیم موقعیت آزمونه انجام می‌شود. بهتر است به دستورکار توصیه‌شده توسط سازندگان دستگاه رجوع شود.

---

1 - Acceptance angle
2 - Range finders

ت- تا جایی‌که ممکن است آزمونه را روی پایه آزمونه در جهت مناسب و تکرارپذیر قرار دهید، به‌طور مثال لبه شکاف موازی یا عمود بر جهت باریکه.

ث- درجایی‌که قابل‌اجرا است، توان منبع پرتوی ایکس را روی میزان توصیه‌شده در دستورکار سازندگان دستگاه تنظیم کنید. از عملکرد پایدار منبع اطمینان حاصل کنید.

ج- χ را به‌گونه‌ای حرکت دهید که سطح آزمونه عمود بر صفحه حاوی منبع، باریکه فرودی و آشکارساز باشد.

چ- آزمونه را به موقعیت X، Y و ϕ مورد نیاز برای اندازه‌گیری حرکت دهید. مطمئن شوید که هیچ‌چیز ناخواسته‌ای (همچون وسایل پایه آزمونه) نمی‌تواند تابش باریکه‌های بازتابی و فرودی را مختل کند.

ح- در ابتدا، مطمئن شوید که Z به‌گونه‌ای است که باریکه فرودی بدون برخورد به آزمونه بدون محدودیت می‌گذرد.

خ- درصورت نیاز به تضعیف‌کننده، آن را به‌گونه‌ای در مسیر باریکه قرار دهید که شدت آشکارشده به‌خوبی در محدوده رژیم خطی یا خطی‌شده آشکارساز باشد. توجه کنید که شدت باریکه کامل، I_{full} است.

د- Z را حرکت دهید تا آزمونه را در باریکه حرکت دهد تا جایی‌که حدود یک چهارم یا یک پنجم شدت باریکه کامل مشاهده شود، یعنی Z را حرکت دهید تا $I_{full}/4 \sim$ تا $I_{full}/5 \sim$ شود.

ذ- ω را تنظیم کنید تا شدت بیشینه مشاهده شود. اگر شدت بیشینه بیش از نیمی از شدت باریکه کامل بود، به گام (د) بازگردید.

ر- ω را روبش کنید تا موقعیت دقیق‌تر شدت بیشینه را پیدا کنید. ω را در همین زاویه تنظیم کنید.

ز- حال χ را تنظیم کنید. Z را تاجایی‌که باریکه فرودی تقریباً پوشش داده‌شود (تا حدود ٪ ۲ شدت باریکه کامل)، حرکت دهید.

ژ- χ را در هر دو سمت موقعیت گام (ز) روبش کنید.

س- χ را به کمینه پروفایل روبش تنظیم کنید.

ش- Z را تاجایی حرکت دهید که $I_{observed} = I_{full}/2$ شود.

ص- ω را دوباره روبش کنید و آن را روی شدت بیشینه تنظیم کنید. توصیه می‌شود، شدت بیشینه $I_{full}/2$ باشد.

ض- در صورت نیاز، تنظیم‌های کوچکی در Z و ω انجام دهید تا جایی‌که شدت بیشینه روی روبش ω، $I_{full}/2$ باشد. حال آزمونه موازی باریکه فرودی بوده و نیمی از آزمونه داخل باریکه است، از آن‌جاکه باریکه روی مرکز چرخش ω و θ ۲ است، اکنون سطح آزمونه روی مرکز چرخش است.

ط- این یک رویه استاندارد روی برخی تجهیزات XRR است که لبه چاقو را نزدیک آزمونه قرار می‌دهند تا باریکه را توصیف کنند و پراکنده‌شدن را کاهش دهند، اگرچه برای به‌دست‌آوردن داده‌های با کیفیت بالا، این روش برای همه تجهیزات ضروری نیست. اگر لبه چاقو استفاده شود، در این نقطه تنظیم می‌شود. روش‌های اجرایی ویژه پیکربندی تجهیزات خاص استفاده می‌شود و بنابراین اینجا توضیح داده نمی‌شود.

ظ- 2θ را به زاویه‌ای به اندازه کافی بیشتر از مقدار زاویه بحرانی حرکت دهید، ولی به‌گونه‌ای باشد که شدت کافی در باریکه بازتابی آینه‌ای وجود داشته باشد. یعنی این شدت به اندازه کافی بالای تراز پس‌زمینه آشکارساز است. زاویه ω را به نصف زاویه 2θ حرکت دهید.

یادآوری- به‌طورکلی در صورت استفاده از تابش $Cu\ k\alpha$ یا تابش مشابه، حرکت دادن 2θ به ۰/۵° ~ تا ۱/۰° ~ (۱۸۰۰ ~ تا ۳۶۰۰ ~ قوس ثانیه) مناسب است.

ع- معمولاً، شدت بازتابی بسیار ضعیف‌تر از باریکه فرودی مستقیم است. برای آن‌که شدت واضح در پاسخ‌دهی خطی یا خطی‌شده آشکارساز قابل اندازه‌گیری باشد، درصورت امکان تضعیف‌کننده را تنظیم کنید یا از مسیر باریکه بازتابی خارج کنید. اگر شدت باریکه بازتابی خیلی کم است، 2θ را تا جایی کاهش دهید که سیگنال کافی ظاهر شود، اما خیلی به زاویه بحرانی نزدیک نشوید.

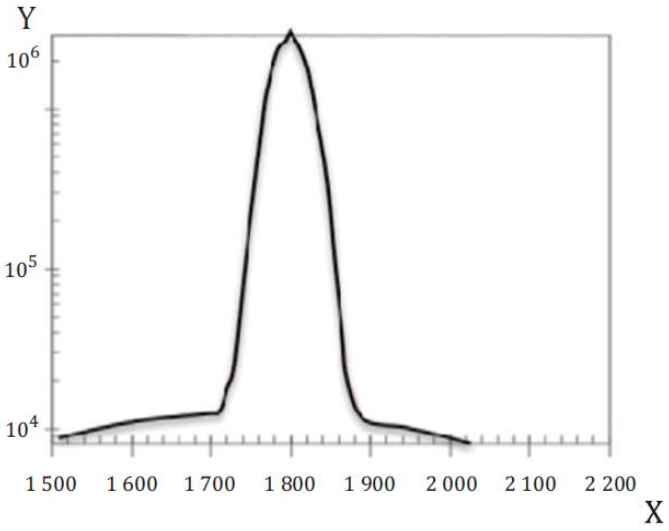
غ- محور ω را در بازه به‌اندازه کافی بزرگ روبش کنید تا هنگامی‌که آزمونه شرط بازتاب آینه‌ای را برآورده کند، پیک واضحی را مشاهده کنید. سپس، ω را روی نقطه بیشترین شدت (شکل۴) تنظیم کنید. این روش، تنظیم زاویه آزمونه روی شرایط بازتاب آینه‌ای را بهبود می‌بخشد و دقیق‌تر از اطمینان‌کردن به تنظیم سطح آزمونه موازی باریکه فرودی است.

ف- به گام (ش) برگردید و موقعیت باریکه نیمه[1] را مجدداً بازبینی کنید. اگر موقعیت باریکه نیمه تغییر کرده، لبه چاقو را عقب بکشید (درصورت استفاده) و روش کار را از گام (ض) به بعد مجدداً بازبینی کنید.

ق- ابزار ممکن است محوری داشته باشد که ω-2θ یا θ-2θ نامیده می‌شود، در این حالت ممکن است کالیبراسیون مجدد این محور به نیم مقدار 2θ مفید باشد. یا ممکن است محوری داشته باشد که 2θ - θ نامیده شود، که در این حالت، ممکن است کالیبراسیون مجدد به مقدار 2θ مفید باشد. ولی کنترل‌های ابزار ممکن است این اجازه را ندهند.

حال، آزمونه هم‌محور شده و آماده است تا روبش شود.

1 - Half beam



راهنما:

X امگا، بر حسب قوس ثانیه؛

Y شدت بر حسب cps.

یادآوری- از آنجاکه اغلب داده‌های خام در واحدهای زاویه و در مقیاس شدت خام جمع‌آوری می‌شود، این شکل به‌صورت شدت نرمال‌شده بر حسب q_z نشان داده نشده‌است.

شکل ۴- روبش ω در شرط آینه‌ای، با 2θ ثابت‌شده در ۳۶۰۰ قوس ثانیه (1°)

۵ جمع‌آوری و ذخیره داده

۵-۱ ملاحظات مقدماتی

منبع پرتو ایکس باید در محیطی مناسب قرار داده شده و مطابق با مشخصات سازنده دستگاه به‌صورت پایدار عمل کند. دقت و توجه ویژه‌ای در روشن کردن منبع اشعه ایکس باید اتخاذ شود تا در یک زمان منطقی سامانه الکترونیکی و باریکه پرتوی ایکس پایدار شوند. به روش‌اجرایی روشن‌کردن دستگاه، ارائه‌شده توسط سازنده دستگاه مراجعه شود.

۵-۲ پارامترهای روبش داده

برای جمع‌آوری داده، نیاز است که زوایای ω و 2θ جابه‌جا و یا روبش شوند. شرط زاویه‌ای آینه‌ای $\omega = \theta$ باید در هر نقطه جمع‌آوری داده براورده شود.

منظور از زمان روبش، زمان موردنیاز برای دستیابی به روبش کامل است. درصورت امکان، توصیه می‌شود که زمان روبش محاسبه شده و یا حداقل تخمین زده شود. هنگامی‌که روبش‌های چندگانه و یا فایل اجرایی[1] خودکار برای جمع‌آوری داده به‌کار برده می‌شود، زمان روبش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

1 - Script

زمان جمع‌آوری در هر نقطه ممکن است ثابت یا متغیر (شمارش انباشت‌شده) باشد (به زیربند ۵-۵ مراجعه شود).

۵-۳ بازه دینامیک

توصیه می‌شود که روبش‌ها از $\omega = \theta = 0^\circ$ شروع شده و به هنگام رسیدن به سطح پس‌زمینه آشکارساز خاتمه یابد. با انجام این توصیه، بهترین آنالیز داده امکان‌پذیر خواهد شد. هرچند، کاهش زمان روبش برای الزامات خاص منجر به محدودشدن بازه روبش داده‌ها و جمع‌آوری آن‌ها می‌شود.

استفاده از روبش‌های چندگانه برای جمع‌آوری داده، یک روش جایگزین قابل‌اعتماد برای کاهش زمان روبش است. روبش‌های چندگانه، با میانگین‌گیری از داده‌های جمع‌آوری‌شده روبش‌های مختلف در شرایط یکسان، باعث بهبود آمارهای نتایج می‌شود.

۵-۴ اندازه گام (تعریف پیک)

۵-۴-۱ روبش فاصله ثابت

بازه‌های ω و 2θ باید به اندازه کافی کوچک باشند که حداقل ۵ نقطه داده روی ضخامت تک فرینج جمع‌آوری شود. برای آزمونه‌های پیچیده‌تر، نقاط داده بیشتری نیاز است.

الف- برای آنالیز سریع یک نمونه تک‌لایه به‌خوبی تعریف‌شده که تباین فرینج خوبی دارد، پنج نقطه روی یک فرینج کافی است.

ب- معمولاً توصیه می‌شود هفت نقطه روی یک تک‌فرینج درنظر گرفته شود. درصورت دلخواه ممکن است نقاط داده بیشتری جمع‌آوری شود.

پ- ساختار آزمونه دارای لایه‌های چندگانه، سبب همپوشانی و تداخل فرینج‌ها در داده‌های بازتاب‌سنجی می‌شود. در این شرایط، ممکن است به‌منظور تعریف دقیق شکل، نقاط بیشتری در هر فرینج نیاز باشد. با در نظر گرفتن نقاط بیشتر روی هر فرینج، ابزار قادر به تمایز بین چندین لایه خواهد بود.

روبش در اندازه گام، در بازه‌های ثابت نسبتاً متداول است.

۵-۴-۲ روبش پیوسته

به‌جای روبش در بازه‌های مختلف همراه با جمع‌آوری داده در هر نقطه به‌عنوان راه حل جایگزین، ω و 2θ می‌توانند به‌صورت پیوسته با سرعت ثابت حرکت داده شوند، در حالی‌که داده‌ها با یک نرخ نمونه‌برداری ثابت جمع‌آوری می‌شوند.

همچنین در رهیافت روبش پیوسته نیز شرایط یکسانی مانند زیربند ۵-۴-۱ برای نقاط روی فرینج باید براورده شود.

این رهیافت هنگامی توصیه می‌شود که یک ساختار آزمونه ساده روی یک بازه دینامیکی وسیع ($2\theta>10^\circ$) در حضور یک آشکارساز سریع دینامیکی اندازه‌گیری می‌شود، زیرا زمان جمع‌آوری و روبش را بهینه می‌کند.

۵-۵ زمان جمع‌آوری (شمارش‌های انباشت‌شده)

زمان جمع‌آوری ممکن است ثابت نگه‌داشته شده و یا متغیر باشد. زمان جمع‌آوری متغیر به‌عنوان رهیافت شمارش‌های انباشت‌شده نیز شناخته می‌شود.

در رهیافت زمان ثابت جمع‌آوری، هر نقطه داده در یک بازه زمانی یکسان جمع‌آوری می‌شود. در رهیافت شمارش‌های انباشت‌شده، زمان جمع‌آوری در هر نقطه داده هنگام دستیابی به یک عدد آستانه شمارش، متوقف می‌شود. در این حالت، به‌منظور نرمال‌سازی مجدد داده‌های جمع‌آوری‌شده، الگوریتمی استفاده می‌شود که تصحیح زمان مرده[1] آشکارساز را درنظر می‌گیرد. هر زمانی که امکان‌پذیر باشد، رهیافت ترکیبی با ثابت نگه‌داشتن بیشینه زمان جمع‌آوری و در نظر گرفتن آستانه شمارش، مدنظرقرار می‌گیرد. مقدار آستانه باید با توجه به بازه خطی‌بودن آشکارساز انتخاب شود.

به‌عنوان مثال، به‌دلیل کاهش سریع نمایی[2] شدت بازتاب آینه‌ای، هنگام شروع جمع‌آوری داده از 0°، در بخش ابتدایی روبش، نرخ شمارش زیادی ثبت می‌شود، سپس با کاهش حد آستانه شمارش‌های انباشت‌شده، زمان کل روبش کاهش می‌یابد. در مقابل، به دور از ناحیه زاویه بحرانی، برای زاویه‌های بالا یا با آزمونه‌های با سطح ناصاف، رهیافت زمان ثابت جمع‌آوری درنظر گرفته می‌شود، درغیراین‌صورت، دستیابی به حد شمارش انباشت‌شده، بدون هیچ‌گونه بهبودی در نسبت سیگنال به نوفه، به زمان بسیار طولانی‌تری نیاز خواهد داشت.

۵-۶ جمع‌آوری داده بخش‌بخش‌شده[3]

توصیه می‌شود که در صورت امکان برای جمع‌آوری داده در یک روبش منفرد با شروع از $\omega = \theta = 0^\circ$ و خاتمه هنگام رسیدن به سطح پس‌زمینه، بخش‌بخش کردن انجام شود.

یک بخش، یا روبشِ داده در بازه محدود، به‌عنوان یک روبش جزئی در یک ناحیه محدود از بازه دینامیکی درنظر گرفته می‌شود، که بازه زاویه‌ای محدود توصیف‌شده به‌وسیله شرط آینه‌ای زاویه اولیه و نهایی را پوشش می‌دهد.

توصیه می‌شود حداقل یک نقطه همپوشانی‌جمع‌آوری داده برای هر بخش روبش وجود داشته باشد تا اتصال روبش‌های بخش‌بخش‌شده و بازتولید یک روبش بازه کامل به‌طور مناسب امکان‌پذیر باشد.

۵-۷ کاهش نوفه

1 - Dead time
2 - Exponential
3 - Segmented data

در جمع‌آوری داده، تعداد شمارش‌ها از یک آمار پواسونی[1] پیروی می‌کند. کنترل زمان شمارش یک پارامتر بحرانی جهت کاهش نوفه است. با این حال، کمینه نوفه قابل‌قبول برای یک آنالیر XRR کمّی، به تعدادی از موقعیت‌های تحلیلی شامل موارد زیر مرتبط می‌شود، ولی محدود به این موارد نیست.

- هدف اصلی آزمون XRR (یعنی کنترل کیفیت یا پژوهش علمی بنیادی)؛

- پیچیدگی نمونه (یعنی، یک تک‌لایه یکنواخت ایده‌آل یا لایه نازک چندماده‌ای پیچیده)؛

- شدت منبع پرتو ایکس موجود (یعنی، لوله آب‌بندشده آزمایشگاهی پرتو ایکس یا منبع سنکروترون) و

- زمان موجود برای آزمون (یعنی، محیط با توان عملیاتی بالا یا محیط پژوهش بلند مدت).

به‌دلیل آنکه این استاندارد نمی‌تواند تمام موقعیت‌های بالقوه را دربر بگیرد، هیچ رهنمود کمّی در مورد کمینه نوفه قابل‌قبول برای یک آزمون خاص نمی‌تواند ارائه شود. بااین‌حال، کاربران باید بدانند که کاهش نوفه به‌وسیله افزایش زمان شمارش و/ یا شدت پرتو ایکس سبب افزایش قابلیت اعتماد تعیین ساختار به‌وسیله XRR می‌شود.

۵-۸ آشکارسازها

برای اکثر چیدمان‌های دستگاهی که از منابع پرتو ایکس آزمایشگاهی استفاده می‌کنند، از آشکارسازهای شمارشی (به‌عنوان مثال مبتنی بر سوسوزن‌های NaI[2]) استفاده می‌شود. برای منابعی با شدت بالا (به‌عنوان مثال تابش سنکروترون)، دیودهای حساس نسبت به نور (فوتودیودهای) نیم‌رسانا در حالت فتوولتائی مورداستفاده قرار می‌گیرند. نیاز است که جریان تاریک، کم (<pA ۱) و ثابت باشد. ملاحظات استاندارد حاضر که به نرخ شمارش اشاره دارند، در مورد این آشکارسازها صدق نمی‌کنند.

۵- ۹ محیط

باید از محیطی که جمع‌آوری داده‌ها در آن انجام می‌شود، مراقبت شود. عموماً، مهم‌ترین اصل این است که حین جمع‌آوری داده از روبش و اندازه‌گیری، هیچ منبع خارجی نباید تغییر کند. دما، رطوبت، فشار، اتمسفر (مانند گاز) و ارتعاشات، مثال‌هایی از رایج‌ترین منابع خارجی هستند. ارتعاشات باید از بین بروند. راه‌حل ممکن این است که ابزار روی یک پایه ضد لرزش قرار داده شود. راه‌حل دیگر، قرار دادن قطعات نوری، زاویه‌سنج و بازوی آشکارساز روی پایه کمکی سنگین و پایدار است.

۵-۱۰ ذخیره داده‌ها

۵-۱۰-۱ قالب برونداد (خروجی) داده

1 - Poisson statistics
2 - Scintillator

رویه‌ای که سازندگان ابزار معمولاً پیروی می‌کنند این است که داده‌های جمع‌آوری‌شده به صورت خوانش مستقیم[1] در یک حالت نمودار روی نمایشگر ارائه شده و در پایان روبش در رایانه کنترل‌کننده ابزار، ذخیره می‌شوند.

توصیه می‌شود علی‌رغم قالب اختصاصی داده‌های ارائه‌شده توسط سازندگان، درصورت امکان، داده‌ها مطابق با کد ASCII در دو ستون ذخیره شود. در یک ستون موقعیت زاویه‌ای از نقاط جمع‌آوری‌شده (ω یا معادل آن 2θ یا معادل آن مؤلفه بردار پراکندگی q_z) و ستون دیگر تعداد شمارش‌های آشکارشده در همان موقعیت زاویه‌ای گزارش شود.

۵-۱۰-۲ سرآیندها[2]

توصیه می‌شود، درصورت امکان، یک بخش سرآیند که صریحاً از قسمت داده‌های جمع‌آوری‌شده جداشده است، در پرونده ذخیره‌شده درج شود. به‌طور معمول این بخش در ابتدای پرونده ذخیره شده، بالاتر از بخش داده‌های جمع‌آوری‌شده، قرار دارد. بخش سرآیند باید شامل شرایط و پارامترهای لازم روبش‌ها برای آنالیز داده‌ها و گزارش باشد.

۶ آنالیز داده‌ها

۶-۱ پردازش مقدماتی داده‌ها

کیفیت و قابلیت اطمینان نتیجه نهایی برازش به‌شدت به کیفیت داده‌های درونداد (ورودی) وابسته است.

پیش از شروع به برازش داده‌ها، توصیه می‌شود برخی پردازش‌ها روی داده‌های خام، انجام شود.

الف- ابتدا باید پراکندگی در روش‌های تحلیل داده‌های معکوس (که مستقل از مدل نیز نامیده می‌شود) کاسته شود. در برازش داده‌های وابسته به مدل، می‌تواند قبل از برازش، پراکندگی داده‌ها کاسته شود یا می‌تواند در فرایند برازش متغیر باشد. توصیف پراکندگی می‌تواند شامل همه یا برخی از عواملِ سهیم (زمینه ثابت، پراکندگی پخشیده) باشد.

ب- نرمال‌کردن شدت: با تقسیم شدت در هر نقطه از داده‌ها بر شدت باریکه کامل، شدت را نرمال کنید.

پ- تابع ابزاری (شامل تأثیر تفکیک‌پذیری آمایش[3] باریکه روی پراکندگی از آزمونه). برای این تابع دو مورد محدودکننده وجود دارد:

۱- منحنی تجربی (مانند یک تابع گاوسی یا شبه- ویجت[4]) در هر نقطه داده با داده‌های دیگر کانولوشن[5] دارند؛

1 - Real time
2 - Header
3 - Conditioning
4 - Pseudo-Voigt
5 - Convolution

۲- توصیف تحلیلی کامل از پروفایل باریکه با داده‌های موجود در هر نقطه داده، کانولوشن دارد.

ت- تصحیح هندسی برای سطح آزمونه تابش‌دهی‌شده (جاپای باریکه، اندازه آزمونه).

ث- پیک‌های پراش براگ ناشی از ساختارهای بلورنگاشتی یا باید کاسته شود و یا از این سطح روبش، در برازش دادهXRR، اجتناب شود.

۶-۲ مدل‌سازی آزمونه

۶-۲-۱ کلیات

دو رهیافت جهت آنالیز داده‌ها XRR وجود دارد: الف- وابسته به مدل (برازش آزمون- خطا) و ب- مستقل از مدل (حل مسئله وارونگی[1] با بازیابی فاز).

الف- رهیافت وابسته به مدل با توصیف لایه‌لایه یک ساختار فیزیکی شروع می‌شود. هر لایه دارای پارامترهای فیزیکی مرتبط است (ضخامت، چگالی و پهنای فصل‌مشترک).

ب- رهیافت مستقل از مدل، به‌وسیله بازیابی فاز امواج پراکنده‌شده پرتو ایکس، پروفایل چگالی الکترونی را از شدت پرتو ایکس بازتابی آشکارشده بازیابی می‌کند. هیچ دانش و یا فرض قبلی از ساختار آزمونه وجود ندارد.

رهیافت وابسته به مدل در جایی‌که مدل، معتبر شناخته شده‌است، به‌دلیل آن‌که می‌تواند نتایج قابل اعتمادی را ارائه دهد، توصیه می‌شود. اگر مدل صحیح نباشد، نتایج به‌دست‌آمده قطعاً غیرقابل‌اطمینان هستند. رهیافت وابسته به مدل در این استاندارد مورداستفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، رهیافت مستقل از مدل بیشتر از این، مورد بحث قرار نمی‌گیرد.

مدل آغازین[2] برای آزمونه باید مدلی مبتنی بر اطلاعات فیزیکی پیشین باشد (شرایط رشد، مواد شناخته‌شده موجود، سایر روش‌ها، آلودگی و اکسایش به‌ویژه در سطح). توسعه بیشتر مدل ممکن است آن را پیچیده‌تر کند. توصیه می‌شود که مدل به ساده‌ترین حالت، از لحاظ فیزیکی مدل معنادار انجام‌پذیر برای فراهم‌نمودن برازش قابل‌قبول، نگه‌داشته شود. داده‌ها باید از کیفیت کافی برای توجیه هرگونه پیچیدگی مدل برخوردار باشند.

هنگامی‌که یک آزمونه دارای چندین لایه باشد، ممکن است ارتباط دادن برخی از پارامترهای برازش بین برخی لایه‌ها با یک رابطه تابعی، منطقی باشد. این موضوع، تعداد پارامترهای آزاد در برازش را کاهش می‌دهد.

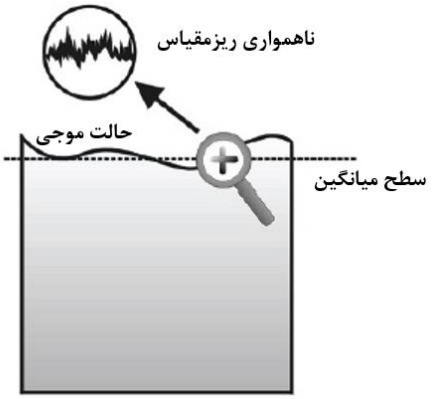
۶-۲-۲ مدل‌های پهنای فصل‌مشترک

1 - Inversion
2 - Starting model

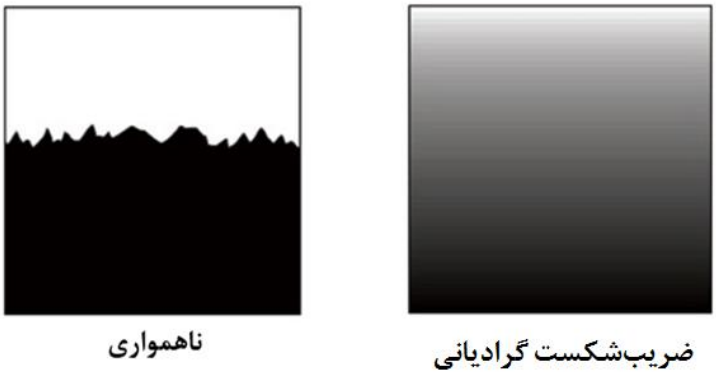
فصول‌مشترک واقعی دارای ناهمواری یعنی انحرافات عمودی مختصات فصل‌مشترک نسبت به سطح میانگین، هستند. به‌طور کلی، دو طبقه از ناهمواری سطح [8] قابل‌تشخیص است:

الف- یک حالت موجی سطحی ضعیف که در ابعاد صدها نانومتر گسترده‌شده و انحراف کوچکی نسبت به سطح میانگین دارد (شکل ۵).

ب- یک ناهمواری سطح ریزمقیاس[1] در بازه‌ای از مقیاس‌های طول اتمی تا چندین نانومتر با انحرافات بزرگ نسبت به سطح میانگین (شکل ۵). بر مبنای استاندارد ISO 25178-2، طول‌همبستگی بازتاب پرتوی ایکس به‌صورت طول‌موج قطع بین حالت موجی و ناهمواری توصیف می‌شود.



شکل ۵ – حالت موجی و ناهمواری ریزمقیاس



شکل ۶ - ناهمواری و ضریب‌شکست گرادیانی سطح

شکل ۶- تفاوت بین یک فصل‌مشترک ناهموار با پروفایل ضریب‌شکست به‌طور موضعی تیز و یک فصل‌مشترک هموار با یک پروفایل گرادیانی ضریب‌شکست را نشان می‌دهد. مورد دوم ممکن است به‌دلیل درهم‌آمیختن مواد ایجاد شود. ناهمواری و گرادیان ضریب‌شکست، هر دو منجر به تغییر در ضریب‌شکست عمود بر فصل‌مشترک می‌شوند [8].

1 - Microscopic

هر کدام از دو پارامتر ناهمواری فصل‌مشترک و گرادیان ضریب‌شکست، منجر به کاهش XRR بازتاب آینه‌ای سریع‌تر از حالت ایده‌آل می‌شوند. روش XRR بازتاب آینه‌ای نمی‌تواند بین ناهمواری فصل‌مشترک و گرادیان ضریب‌شکست تمایز قائل شود. ناهمواری فصل‌مشترک سبب می‌شود که شدت در جهت‌هایی به‌جز جهت بازتاب آینه‌ای پراکنده شود، درحالی‌که گرادیان ضریب‌شکست این‌گونه نیست. پراکندگی پخشیده (که بررسی آن جزء هدف و دامنه کاربرد این استاندارد نیست) می‌تواند برای جدا کردن سهم این دو پدیده مورد استفاده قرار گیرد.

چندین مدل ناهمواری یا پهنای فصل‌مشترک وجود دارد که در متون علمی استفاده شده‌اند. انتخاب مدل به ماهیت ناهمواری فصل‌مشترک موردانتظار برای آزمونه مورد بررسی بستگی دارد. در مدل‌سازی محتمل است که پهنای فصل‌مشترک بیشتر از ضخامت لایه محاسبه شود. این موضوع یک پروفایل چگالی معقول را به‌دست می‌دهد که ممکن است از نظر فیزیکی منطقی به نظر نرسد. در این حالت، باید در تفسیر نتیجه برازش گزارش‌شده به روش معقول فیزیکی، دقت شود. آنالیز دقیق‌تر چنین آزمونه‌هایی با اندازه‌گیری بازتابندگی پخشیده انجام می‌شود.

برای ناهمواری ناهمبسته آماری با ریشه میانگین مربع، σ، استفاده از مدل فصل‌مشترک زبر[1] توصیه می‌شود. تأثیر فصل‌مشترک زبر را می‌توان با عوامل دبای- والر[2] یا نووت- کروک[3] درنظر گرفت [8]،[9].

برای آزمونه‌هایی با ضریب‌شکست گرادیانی، توصیه می‌شود مدل لایه گذار ضرورتاً برای ناهمواری همبسته و ریشه میانگین مربع ناهمواری (تقریباً برابر با L_{abs} / θ_c، که در آن L_{abs} طول‌جذب و θ_c زاویه بحرانی بازتاب کلی خارجی است) به‌کار رود. پهنای سطح‌مشترک را می‌توان با توابع تحلیلی مانند تانژانت، خطی، تابع خطا[4]، سینوسی و نمایی مدل کرد. برای مقادیر بسیار بزرگ ریشه میانگین مربع ناهمواری (معمولاً بزرگ‌تر از ۰٫۵ nm، $L_{abs} / \theta_c << \sigma$)، باید از مدل‌های ویژه‌ای استفاده شود [10].

۶-۳ شبیه‌سازی داده‌های XRR

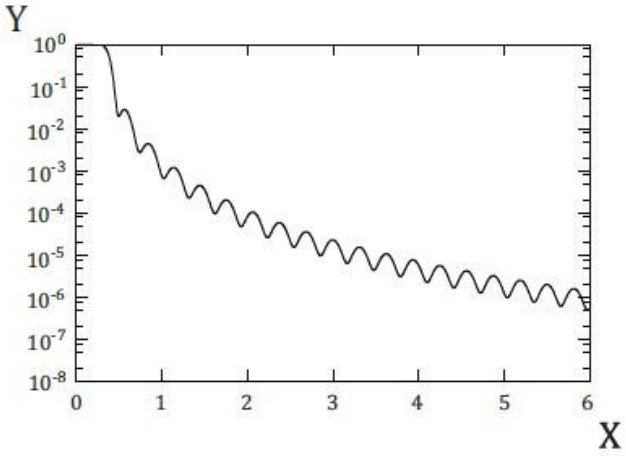
دو رهیافت اساسی برای شبیه‌سازی فرایندهای پراکندگی پرتوی ایکس از آزمونه وجود دارد: نظریه‌های حرکت‌شناسی[5] و پویا[6] [8]،[9]. نظریه پویا به‌دلیل ارائه توصیفات کامل‌تری از فرایند، توصیه می‌شود. به‌طورکلی نرم‌افزار شبیه‌سازی بازتابندگی پرتو ایکس از طریق فروشندگان تجاری تجهیزات اندازه‌گیری پرتو ایکس و همچنین از گروه‌هایی مانند جامعه کاربران سنکروترون در دسترس است. اطلاعات مربوط به نرم‌افزارها و در برخی موارد بارگیری‌های آن‌ها در وب‌گاه‌های مرتبط موجود است[7].

---

1 - Abrupt
2 - Debye-Waller
3 - Nevot-Croce
4 - Erf
5 - Kinematics
6 - Dynamics
۷ - Sourcefoge مثالی از یک منبع اینترنت پایه از نرم‌افزار با توزیع آزاد است. این اطلاعات برای راحتی استفاده‌کنندگان این استاندارد بوده و ارائه آن در این استاندارد به منزله تایید آن توسط سازمان ملی استاندارد ایران نیست.

۶-۴ مثال‌های کلی

برخی از داده‌های بازتابندگی آینه‌ای شبیه‌سازی‌شده با استفاده از نظریه پویا در زیر نمایش داده‌شده‌اند تا تاثیرات آن‌ها را بر داده‌های پارامترهای مختلف نمونه نشان دهند. یک سامانه ایده‌آل در شکل‌های ۷ تا ۱۱ درنظر گرفته شده‌است، مگر آن‌که ذکر شود.



راهنما:

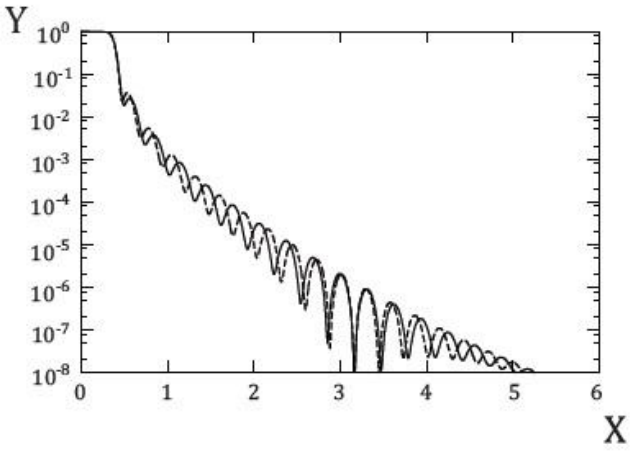
X q_Z برحسب nm^{-1}؛

Y شدت در واحد دلخواه؛

- لایه ۲۰ نانومتری از Si_3N_4 روی Si.

یادآوری- ممکن است داده‌ها برحسب q_Z، همانند بالا، یا در واحدهای زاویه‌ای ارائه شوند. همانطورکه نشان داده شده‌است، نرمال‌کردن شدت بازتابی نیز مرسوم است.

شکل ۷ – داده‌های بازتابندگی آینه‌ای شبیه‌سازی‌شده از یک لایه Si_3N_4 کاملاً هموار ۲۰٫۰ نانومتری روی یک زیرلایه توده‌ای کاملاً هموار Si



راهنما:

X q_Z برحسب nm^{-1}؛

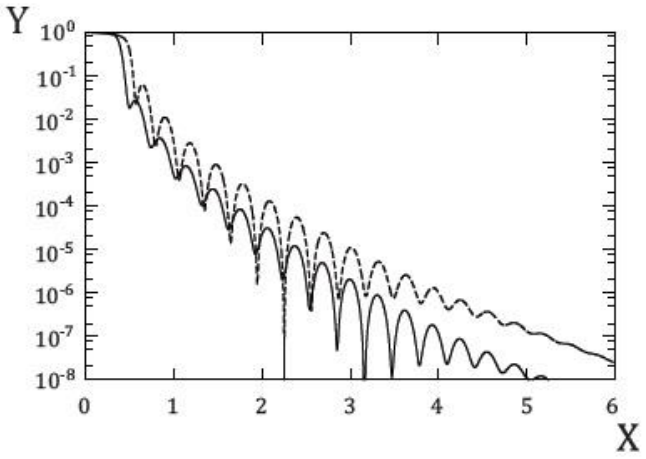
Y شدت در واحد دلخواه؛

- ضخامت= ۲۰٫۰nm؛

- - ضخامت= ۲۲٫۰nm.

یادآوری– لایه‌های ضخیم‌تر، در فضای زاویه‌ای فرینج‌های باریک‌تری به‌دست‌می‌دهند.

شکل ۸ – داده‌های بازتابندگی آینه‌ای شبیه‌سازی‌شده لایه Si_3N_4 با ضخامت‌های ۲۰٫۰ nm و ۲۲٫۰ nm (با ناهمواری سطح ۰٫۶ nm) روی توده Si (با پهنای فصل‌مشترک ۰٫۳ nm)



راهنما:

X q_Z برحسب nm^{-1}؛

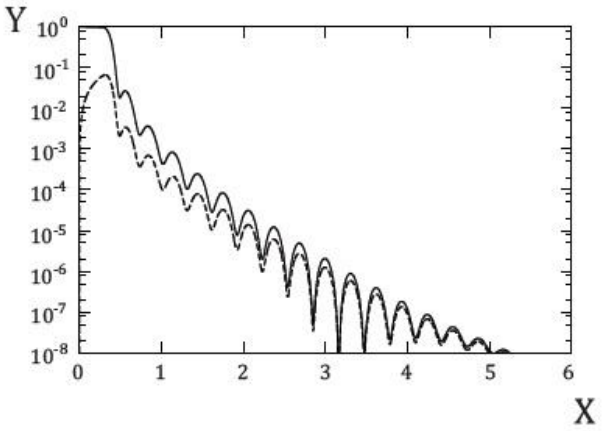
Y شدت در واحد دلخواه؛

- لایه Si_3N_4 با ضخامت ۲۰٫۰ nm؛

--- لایه TiN با ضخامت ۲۰٫۰ nm.

یادآوری- در هر دو مورد، پهنای فصل‌مشترک ۰٫۳ nm روی زیرلایه Si، و یک ناهمواری ۰٫۶ nm روی سطح بالایی. TiN بسیار چگال‌تر از Si_3N_4 است، بنابراین زاویه بحرانی بزرگ‌تر و تباین فرینج‌ها نیز بیشتر است.

شکل ۹ – مقایسه بازتابندگی آینه‌ای شبیه‌سازی‌شده لایه Si_3N_4 و لایه TiN با ضخامت‌های ۲۰٫۰ nm



راهنما:

X q_Z بر‌حسب nm^{-1}؛

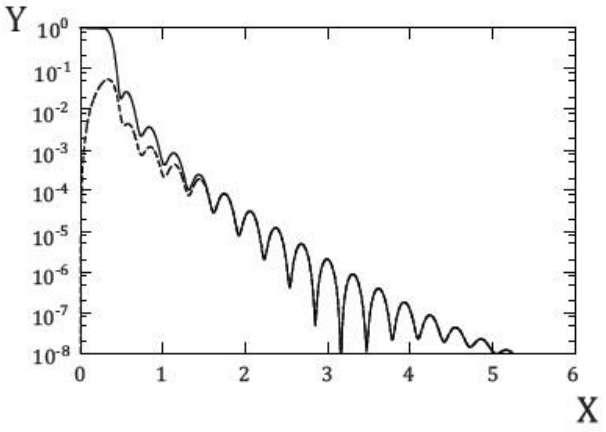
Y شدت در واحد دلخواه؛

– بازتابندگی آینه‌ای شبیه‌سازی‌شده لایه Si_3N_4 با ضخامت ۲۰٫۰ nm با ناهمواری سطح ۰٫۶ nm روی توده Si (با پهنای فصل‌مشترک ۰٫۳ nm)، بدون تابع ابزاری؛

--- بازتابندگی آینه‌ای شبیه‌سازی‌شده لایه Si_3N_4 با ضخامت ۲۰٫۰ nm با ناهمواری سطح ۰٫۶ nm روی توده Si (با پهنای فصل‌مشترک ۰٫۳ nm)، با تابع ابزاری (شکاف‌های ۰٫۵ mm منبع و آشکارساز و یک آزمونه ۱۰ mm).

یادآوری– موقعیت زاویه بحرانی برای نمونه کوچک مشخص نیست و احتمالاً به‌صورت ظاهری جابجا شده‌است و نرخ کاهش شدت بازتابی با افزایش زاویه آزمونه تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد، که اگر تابع ابزاری به‌صورت دقیق در آنالیز درنظر گرفته نشود، بر ناهمواری یا پهنای فصل‌مشترک استخراج‌شده اثر می‌گذارد. چون آنالیز از موقعیت فرینج‌ها تأثیر نمی‌پذیرد، بنابراین ممکن است آنالیز ضخامت با موفقیت انجام شود.

شکل ۱۰ – مقایسه بازتابندگی آینه‌ای شبیه‌سازی‌شده با و بدون تابع ابزاری



راهنما:

X q_Z برحسب nm^{-1}

Y شدت در واحد دلخواه؛

– آزمونه کاملاً صاف و باریکه فرودی ایده‌آل؛

--- شعاع انحنای m ۵۰ آزمونه.

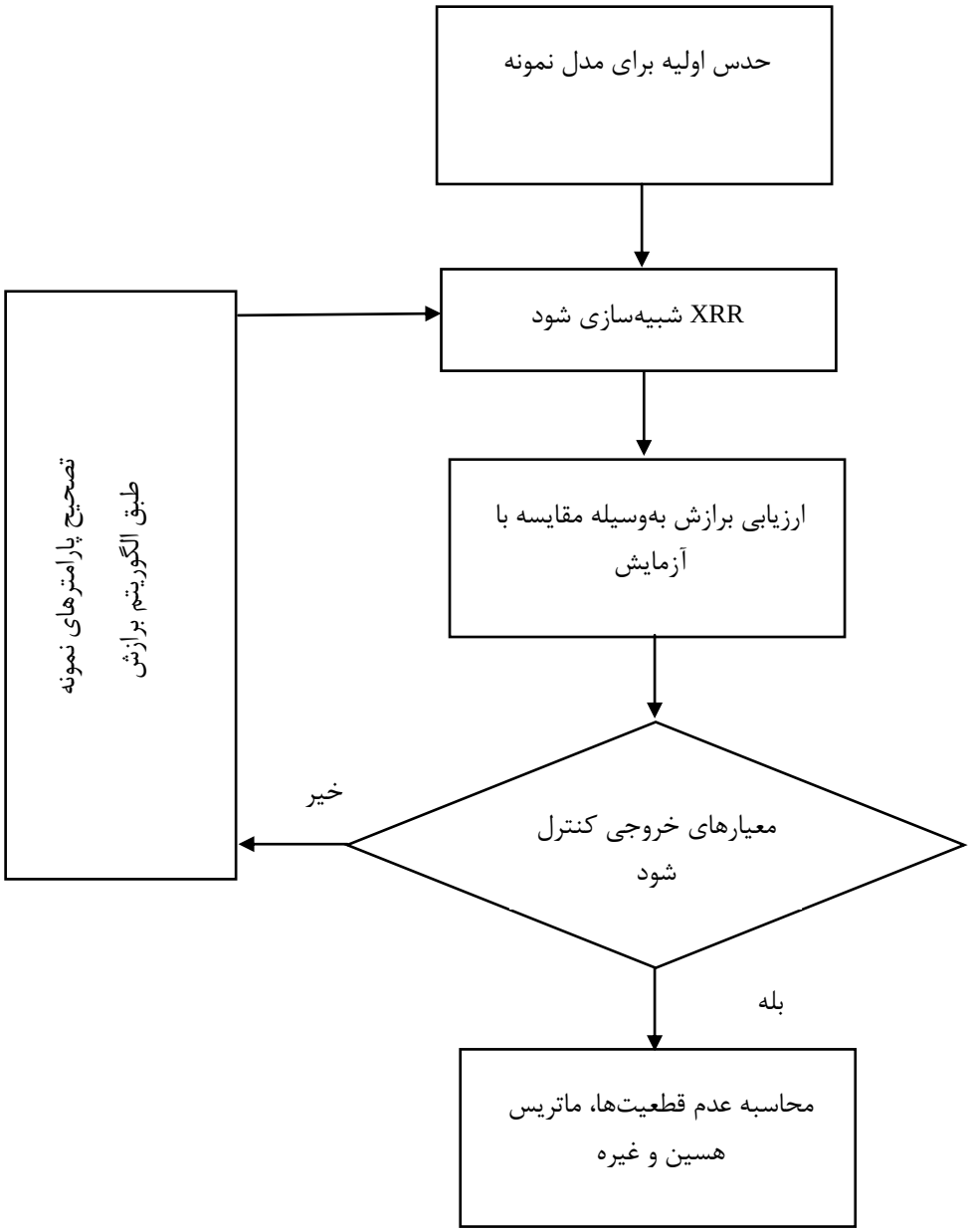
یادآوری– این تاثیر نیز به تابع ابزاری وابسته است.

شکل ۱۱ – تأثیر شعاع انحنای ۵۰ متری آزمونه روی داده‌های بازتابندگی، در مقایسه با آزمونه کاملاً مسطح و باریکه فرودی ایده‌آل

۶-۵ برازش داده‌ها

برازش داده‌ها یک روش آزمون- خطا است که به‌موجب آن، به‌منظور همگرایی در بهترین مدل برازش، شبیه‌سازی‌های پی‌درپی با داده‌ها مقایسه می‌شوند. ممکن است توابع مختلفی به‌عنوان مقیاسی از حسن برازش[1] انتخاب شود. یک مدل اولیه آزمونه جهت شبیه‌سازی منحنی XRR استفاده می‌شود (شکل ۱۲). برای محاسبه معیار اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و داده‌ها، این مدل با داده‌های تجربی مقایسه می‌شود. سپس، مدل با تغییر لایه (یا تیغه) (چگالی، پهنای فصل‌مشترک، ضخامت) و پارامترهای خارجی (شدت، پس‌زمینه) دوباره شبیه‌سازی و مقایسه می‌شود. این فرایند تا زمان براورده‌شدن معیارهای خروجی (حسن برازش قابل‌پذیرش، بیشینه تعداد مجاز تکرارها، رواداری[2] قابل‌پذیرش، بهسازی حسن برازش)، تکرار می‌شود.

1 - Goodness-of-fitting
2 - Tolerance



شکل ۱۲- نمودار گردش‌کار برازش داده‌ها

در مدل آزمونه، می‌توان برخی پارامترهای فیزیکی را به‌عنوان پارامترهای برازش انتخاب کرد و برخی از آن‌ها را نیز می‌توان ثابت درنظرگرفت. توصیه می‌شود هنگامی‌که چگالی زیرلایه یا پارامترهای دیگر مشخص باشند، این پارامترها ثابت درنظر گرفته شوند. هنگام اجرای فرایند برازش، پارامترهای برازش می‌توانند داخل محدوده مشخص تغییر کنند. کران‌های[1] پایین و بالای اولیه به‌عنوان محدوده‌های فیزیکی معقول براساس ساختار انتخاب می‌شوند. در بیشتر موارد توصیه می‌شود که کران‌های اولیه از ۱۰درصد تا ۳۰ درصد مقادیر

1 - Bounds

اسمی تنظیم شوند. درصورت دسترسی به اطلاعات دقیق‌تر، بی‌درنگ کران‌های باریک‌تری را می‌توان تعیین کرد. درصورتی‌که اطلاعات اولیه از اعتبار کمتری برخوردار باشند، ممکن است کران‌های بزرگتری موردنیاز باشد. عامل نرمال‌کردن و متغیرهای توصیف‌کننده پراکندگی ناهمدوس[1] می‌توانند پارامترهای ساختار آزمونه و همچنین پارامترهای برازش باشند.

اگر برازش مناسبی به‌دست نیاید، ممکن است تنظیم مدل آغازین و/ یا کران‌ها، و برازش مجدد ضروری باشد.

رهیافت‌های بسیاری وجود دارد که به‌موجب آن‌ها می‌توان مدل‌ها را مجدداً اصلاح کرد. توصیف کامل تمام روش‌های اجرایی پیشرفته به‌منظور دستیابی سریع‌تر به برازش‌ها و دستیابی به راه‌حل‌های قابل‌اعتماد در موارد پیچیده‌تر جزء هدف و دامنه این استاندارد نیست.

معمولاً، به‌دلیل آن‌که حساس‌ترین پارامترها در XRR ضخامت لایه‌هاست، یک رهیافت متداول، متشکل از برازش ضخامت‌های لایه اول استفاده می‌شود. تخمین‌های اولیه این رهیافت درصورت امکان از دوره تناوب نوسانات ضخامت، Δq، به‌صورت $2\pi/\Delta q$ به‌دست می‌آید. در ابتدا پارامترهای ناصافی و چگالی لایه‌ای ثابت درنظر گرفته‌می‌شوند. پس از یک توافق خوب معین، برازش ناهمواری و چگالی به‌صورت جداگانه یا ترکیبی قابل‌انجام است. این موضوع که کدام پارامتر ثابت و کدام یک آزاد درنظر گرفته شود، به‌شدت به مدل برازش استفاده‌شده بستگی دارد. معمولاً بهتر است که برازش چگالی لایه‌ها در انتها انجام شود جایی‌که ناهمواری و ضخامت‌ها به نتیجه نهایی بسیار نزدیک هستند. در بعضی موارد، هنگامی‌که چگالی‌های لایه‌ها کاملاً نامشخص است، در ابتدا برازش چگالی لایه‌ها با استفاده از برخی فصول‌مشترک از پیش‌تعریف‌شده لایه‌ها (گاهی فصول‌مشترک هم‌فاصله[2]) ترجیح داده می‌شوند. ضخامت لایه‌ها در ابتدا ثابت هستند و پس از برازش، چگالی‌ها اصلاح می‌شوند. اگر مدل برازش از ابرشبکه‌های دوره‌ای[3] تشکیل شده‌باشد، توصیه می‌شود برازش دوره تناوب ضخامت و نسبت ضخامت‌ها انجام شود. اگر سامانه دارای لایه‌های جداگانه مختلفی باشد، برازش جداگانه ضخامت‌ها معمولاً در ابتدا با در نظر گرفتن ناهمواری‌ها و چگالی‌های ثابت مناسب است.

فرایند برازش بسته به معیارهای از پیش‌تعریف‌شده خاتمه می‌یابد. بدون تجربه قبلی، توصیه می‌شود فرایند برازش تا زمانی ادامه یابد که مقدار حسن برازش پایدار شود و بهبود بیشتری با صدها بار تکرار بیشتر حاصل نشود. معیارهای محتمل دیگر شامل تعداد تعریف‌شده از تکرارهای در حال تکمیل و یا بهترین مدل برازش پایدار است.

خطاهای آماری و عدم قطعیت‌های برخواسته از پارامترهای برازش نهایی در فرایند برازش با استفاده از ماتریس هسین[4] محاسبه می‌شود. خطاهای سامانمند و ابزاری در این مورد گنجانده نشده‌است. جملات قطری این ماتریس انحراف‌های استاندارد پارامترهای برازش‌شده‌ای را ارائه می‌دهد، که نشان‌دهنده دقت

1 - Incoherent
2 - Equidistant
3 - Periodical superlattics
4 - Hessian matrix

آن‌ها است. جملات غیرقطری نشانگر همبستگی‌های احتمالی بین پارامترهای برازش‌شده است که مرتبط با قابلیت اعتماد مدل آزمونه است. به‌عنوان مثال، ناصافی یک لایه نازک ممکن است با ضخامت آن همبسته باشد. خطاها و عدم قطعیت‌ها در پارامترهای برازش نهایی اغلب به‌وسیله نرم‌افزار مورداستفاده به‌منظور برازش داده ارائه می‌شود. توصیه می‌شود خطاها و عدم‌قطعیت‌ها به‌عنوان واریانس ترکیبی شامل ضرایب همبستگی از ماتریس هسین و یک عامل پوشش[1] بیان شوند. این عامل پوشش یک بازه اطمینان مناسب برای هر مقدار برازش‌شده را ارائه می‌دهد. اکیداً توصیه می‌شود که عدم قطعیت‌ها برای هر مقدار برازش‌شده مطابق با راهنمای رابطه عدم قطعیت در اندازه‌گیری [20]، بیان شود.

خطاهای سامانمند به‌شدت به مدل مناسب انتخابی و کیفیت نمونه بستگی دارد. به هرحال، اگر مدل از نظر منطقی صحیح باشد، برای نمونه‌های خوب، خطای ضخامت معمولاً از چند درصد بیشتر نیست، به مراجع [18] و [19] مراجعه شود.

جهت بهینه‌سازی تابع حسن برازش، الگوریتم‌های زیادی وجود دارند. به‌عنوان مثال، الگوریتم‌های ژن‌شناسی، تنش‌زدایی[2] شبیه‌سازی‌شده، لونبرگ- مارکوارت[3]، سیمپلکس[4]. آن‌ها می‌توانند به دو دسته تقسیم شوند: روش‌های سیمپلکس و لونبرگ- مارکوارت کمینه‌سازهای موضعی هستند، درحالی‌که الگوریتم تنش‌زدایی شبیه‌سازی‌شده و الگوریتم ژن‌شناسی قادر به پیدا کردن کمینه کلی برای مسئله بهینه‌سازی هستند. مقدمه‌ای جامع درباره اصول روش‌های مختلف بهینه‌سازی در مراجع [11]، [12] و [13] ارائه‌شده‌است. مرور جزئیات این الگوریتم‌ها را می‌توان به‌طور مثال در مراجع [14]، [15]، [16] و [17] یافت. به‌منظور همگرایی[5] به بهترین برازش، بهتر است که بیش از یک الگوریتم به‌صورت متوالی ترکیب شود. همچنین ممکن است آزمودن بیش از یک الگوریتم به‌طور مستقل و مقایسه نتایج مناسب باشد.

درمواقعی‌که از نظریه پویا برای برازش داده استفاده می‌شود، کیفیت و قابلیت اعتماد نتیجه برازش نهایی در درجه اول به کیفیت داده ورودی بستگی دارد.

۷ اطلاعات موردنیاز هنگام گزارش‌دهی آنالیز XRR

۷-۱ کلیات

به‌عنوان یک قاعده کلی، هر گزارش علمی باید شامل تمام اطلاعات لازم جهت بازتولید آزمون باشد. بنابراین، یک گزارش کامل از آنالیز XRR باید شامل توضیحات مناسب از ابزار و جزئیات تجربی باشد. ازآنجاکه مدل‌سازی و فرایند برازش داده‌های XRR پیچیده هستند، ملاحظات یکسانی برای شبیه‌سازی و فرایند برازش به‌کارمی‌رود. نمونه‌ای از یک گزارش در پیوست **ب** ارائه شده‌است.

1 - Coverage factor
2 - Anealing
3 - Levenberg-Marquardt
4 - Simplex
5 - Converge

۷-۲ جزئیات تجربی

هنگام گزارش‌دهی آزمون‌های XRR، مهم است که جزئیات آزمایشگاهی زیر گنجانده شوند:

الف- طول‌موج تابش پرتو ایکس (معمولاً طول‌موج بر حسب واحد nm یا Å گزارش می‌شود، در حالت تابش سنکروترون انرژی فوتون بیشتر در واحد eV یا keV گزارش می‌شود)؛

ب- اندازه و شکل منبع پرتو ایکس؛

پ- عوامل تضعیف‌کننده برای تابش مورداستفاده (درصورت به‌کارگیری)؛

ت- شدت کل باریکه فرودی و پس‌زمینه آشکارساز (به‌طور مثال هر دو بر حسب واحد تعداد بر ثانیه داده شود)؛

ث- جزئیات آمایش باریکه فرودی و پراکنده‌شده (تکفام‌ساز، شکاف‌ها، موازی‌ساز و سایر قطعات نوری):

۱- شناسنامه قطعات و ادوات؛

۲- فواصل قطعات و ادوات نسبت به یکدیگر؛

۳- ابعاد شکاف؛

ج- واگرایی و سطح‌مقطع باریکه فرودی در موقعیت آزمونه؛

چ- نوع آشکارساز؛

ح- جزئیات آزمونه (همراه با شکاف‌های موازی‌ساز، طول آزمونه زاویه ریزش را تعیین می‌کند و هنگام گزارش‌دهی آزمون XRR نباید از آن صرف‌نظر کرد)؛

خ- پارامترهای روبش: زمان انتگرال‌گیری (مشخص کنید که آیا ثابت است یا خیر)، شروع، اندازه گام، توقف و واحدها. اگر از روبش بخش‌بخش‌شده استفاده شده‌باشد، این موارد باید برای هر بخش مشخص شود؛

د- سایر جزئیات مهم آزمایشگاهی [به‌عنوان مثال، شرایط محیطی (دما، فشار، رطوبت) و محفظه‌ها یا مراحل گرمایش یا سرمایش].

۷-۳ روش‌های اجرایی آنالیز (شبیه‌سازی و برازش)

تأثیر برازش داده‌های آزمایشگاهی بر تعیین خواص لایه در مقایسه با عوامل آزمایشگاهی قابل‌چشم‌پوشی نیست [18]. بنابراین توصیف کامل روش‌های اجرایی آنالیز و برازش اکیداً توصیه می‌شود. به‌ویژه، اطلاعات زیر برای رهیافت مدل- پایه مورد نیاز است:

الف- پردازش‌های احتمالی اعمال‌شده روی داده خام

ب- **مدل اولیه برای ساختار لایه‌ای.** انتخاب مدل اولیه برای ساختار لایه‌ای در تعیین ساختار نهایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. توصیه می‌شود هرگونه اطلاعاتی که راهنمایی مفید برای انتخاب مدل آغازین است، در گزارش گنجانده شود. داده‌های ورودی جهت ساخت مدل اولیه ممکن است از دانش قبلی در ساخت آزمونه، متون علمی، از آنالیز آزمونه به‌وسیله روش‌های مشخصه‌یابی مکمل از آنالیز مستقل مدل روی داده XRR مشابه حاصل شوند.

پ- **روش محاسبه و الگوریتم برازش.** توصیه می‌شود گزارش به‌طور خلاصه رهیافت مورداستفاده محاسبه را مشخص کند. همچنین بهتر است مشخص شود که چه نوع الگوریتم برازشی مورداستفاده قرار گرفته‌است. اگر یک نرم‌افزار موجود تجاری یا سفارشی مورداستفاده قرار گرفته‌است، بهتر است در متن ذکر شود.

ت- **پارامترهای ثابت و برازش‌شده.** همه پارامترهایی که یک انباشت[1] چندلایه‌ای را مشخص می‌کنند، لزوماً در زمان یکسان برازش نمی‌شوند. اگر شرایط مناسب باشد، ممکن است برخی پارامترها در مقدار اولیه ثابت نگه‌داشته شوند.

ث- **بازه داده.** توصیه می‌شود بازه داده‌ای که روی آن برازش انجام شده‌است، مشخص شود.

ج- **تعداد تکرارها.**

چ- **پارامترهای نهایی مدل.** توصیه می‌شود مقدار تمام پارامترهای تعیین‌کننده ساختار انباشت لایه گزارش شود. برای یک انباشت N لایه‌ای روی یک زیرلایه توده‌ای، $(3\ N + 1)$ پارامتر مشخص می‌شوند: ضخامت و چگالی هر لایه $(2\ N)$ و پهنای فصل‌مشترک در هر فصل‌مشترک $(N + 1)$. شایان ذکر است که پارامتر فیزیکی که در نهایت منحنی XRR را تعیین می‌کند، پروفایل چگالی الکترونی است. هنگامی‌که ترکیب‌بندی شیمیایی لایه شناخته شده‌باشد، ممکن است چگالی جرمی از چگالی الکترونی حاصل شود. توصیه می‌شود درصورت امکان، گزارش‌دهی در مورد چگالی جرمی انجام شود.

ح- **پروفایل چگالی.** توصیه می‌شود که نموداری از پروفایل چگالی برازش‌شده نهایی (چگالی برحسب عمق) در گزارش گنجانده شود.

خ- **عدم قطعیت آماری پارامترهای برازش‌شده.**

د- **حسن انجام برازش.** پارامتر مورداستفاده حین فرایند برازش است. این مقدار می‌تواند به‌عنوان شاهدی برای قابلیت اعتماد نتیجه استفاده شود.

به‌عنوان یک جایگزین برای آنالیز مبتنی بر مدل‌های ساختاری، ممکن است روش وارونگی مستقیم (مدل- آزاد) استفاده شود. در این حالت، جزئیات روش مورداستفاده و پروفایل چگالی نهایی (چگالی جرم یا چگالی الکترونی) باید گزارش شود.

---

1 - Stack

۷-۴ روش‌هایی برای گزارش‌دهی منحنی‌های XRR

۷-۴-۱ متغیرهای وابسته و مستقل

توصیه می‌شود که داده روبش XRR به‌صورت شدت نرمال‌شده برحسب بردار پراکندگی q_z (واحد ممکن است nm^{-1} باشد اما بیشتر اوقات واحد $Å^{-1}$ استفاده می‌شود) نمایش داده‌شود. شدت نرمال‌شده معمولاً با تقسیم شدت بازتابی بر شدت باریکه کامل مستقیم به‌دست می‌آید. این انتخاب امکان براورد دقیق تابع ابزاری را فراهم می‌کند. انتخاب ارائه داده XRR برحسب q_z مقایسه مستقیم داده‌های جمع‌آوری‌شده با استفاده از طول‌موج تابش فرودی مختلف را ممکن می‌سازد.

هرچند، شدت نرمال‌شده را می‌توان با تقسیم شدت بازتابی بر بیشینه مقدار شدت‌های اندازه‌گیری‌شده نیز به‌دست آورد. در این حالت، ممکن است اطلاعات مهمی درباره تابع ابزاری از دست برود. علاوه‌بر این، اگر بیشینه شدت اندازه‌گیری‌شده در زاویه‌ای بزرگتر از زاویه بحرانی رخ دهد، ممکن است اهمیت فیزیکی داده به خطر بیفتد.

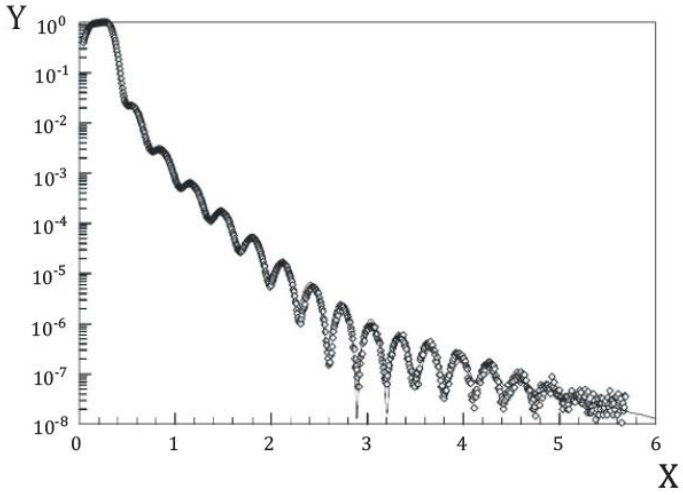
بردار پراکندگی ممکن است برای شکست پرتو اصلاح شود یا نشود، اما در هر صورت، توصیه می‌شود این موضوع در زیرنویس شکل بیان شود. توجه داشته باشید از آنجایی‌که بازه‌های بردار q_z ممکن است ثابت نباشند، هنگام تبدیل از مقادیر زاویه‌ای که به‌طور مساوی قرار دارند، باید دقت لازم به‌عمل آید.

با این حال، گاهی اوقات منحنی‌های XRR با ترسیم شدت بازتابی (نرمال‌شده یا نرمال‌نشده) بر حسب ω یا 2θ نمایش داده می‌شوند. شایان ذکر است، به‌دلیل تقارن موقعیت منبع پرتو ایکس و آشکارساز نسبت به راستای عمود بر آزمونه، این دو گزینه کاملاً معادل هستند. توصیه می‌شود زوایه‌های ω و 2θ بر حسب یکاهای سیستم بین‌المللی یکاها SI، رادیان یا زیرمضرب‌های آن (به‌عنوان مثال، میلی‌رادیان) بیان شود. زاویه‌ها همچنین بر حسب درجه یا زیرمضرب‌های آن (به‌عنوان مثال، قوس ثانیه) نمایش داده می‌شوند.

۷-۴-۲ ترسیم نموداری (نگاشتاری) داده XRR

ازآنجاکه بازه دینامیکی یک منحنی XRR معمولی چندین مرتبه بزرگی را در بر می‌گیرد، معمولاً مقیاس لگاریتمی برای نمایش شدت بازتابی به‌کار می‌رود (به شکل ۱۳ مراجعه شود). گاهی اوقات مفید است که توان بازتابی اندازه‌گیری‌شده در عامل q_z^4 ضرب شود. به این ترتیب، قسمت نوسانی منحنی، بهسازی شده و تفاوت بین منحنی‌های مشابه واضح‌تر می‌شود (به شکل ۱۴ مراجعه شود). رسم منحنی‌های XRR چندگانه در یک نمودار (گراف) معمولاً منجر به همپوشانی منحنی‌ها می‌شود که از نمایش واضح جلوگیری می‌کند. منحنی‌های چندگانه را می‌توان با جابجایی هر یک از منحنی‌ها به مقدار ثابت روی محور عمودی ترسیم کرد. از آنجا که نمایش در مقیاس لگاریتمی است، این بدان معنی است که مقادیر بازتاب باید در عوامل ثابتی، به‌طور کلی توانی از ۱۰، ضرب شوند (به شکل ۱۵ مراجعه شود).

توصیه می‌شود منحنی برازش‌شده به‌صورت یک خط پر که با داده‌های تجربی (که معمولاً به‌وسیله نمادها نشان داده می‌شوند) همپوشانی دارد، نمایش داده شود.



راهنما:

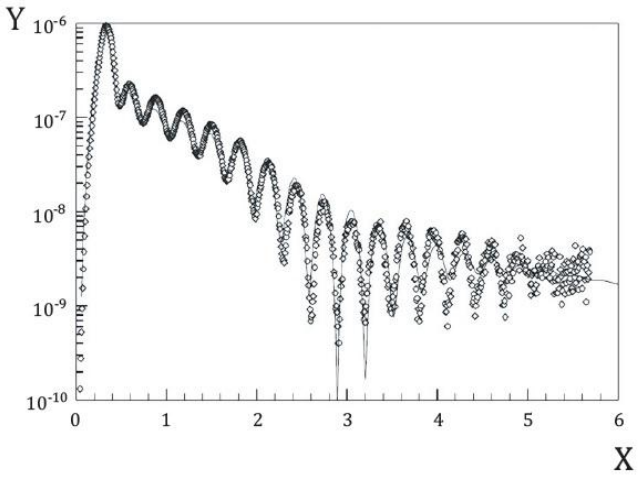
X q_Z برحسب nm^{-1}؛

Y شدت بر حسب واحد دلخواه؛

- برازش؛

◊ داده‌های آزمایشگاهی.

شکل ۱۳- مثالی از داده‌های بازتابندگی آینه‌ای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌شده از یک لایه Si_3N_4 ۲۰ nm روی یک زیرلایه Si(100)- داده‌ها برحسب بردار q_z ارائه شده‌اند



راهنما:

X q_Z برحسب nm^{-1}؛

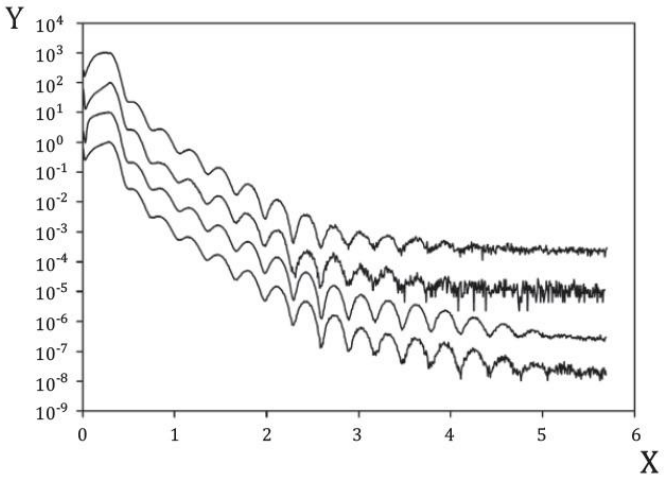
Y $I\times q_Z^4$ بر حسب واحد دلخواه؛

– بهترین برازش؛

◊ داده‌های آزمایشگاهی.

یادآوری– در این نمایش، اختلافات ناچیز بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و آزمایشگاهی که در نمایش شکل ۱۴ قابل تشخیص نیستند، قابل مشاهده است.

شکل ۱۴– داده‌های بازتابندگی آینه‌ای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌شده از یک لایه ۲۰ نانومتری Si_3N_4 روی یک زیرلایه Si(100)– شدت ضربدر q_z^4 برحسب بردار q_z رسم شده‌است



راهنما:

X q_Z برحسب nm^{-1}؛

Y شدت بر حسب واحد دلخواه.

یادآوری چهار منحنی به چهار آزمون مختلف اشاره دارد و برای بهبود خوانایی نمودار هر یک با یک مرتبه بزرگی در راستای عمودی جابه‌جا شده‌اند.

شکل ۱۵- داده‌های بازتابندگی آینه‌ای آزمایشگاهی از یک لایه ۲۰ نانومتری Si_3N_4 روی یک زیرلایه Si(100)

پیوست الف
(الزامی)
الزامات ایمنی و رهنمود برای تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی

الف-۱ مقدمه

در این بخش، الزامات مربوط به تنظیمات دستگاه و رهنمودهای ضروری برای تضمین کاهش ریسک تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی بیان شده‌است. پیروی از موارد ارائه‌شده در این پیوست تضمین می‌کند که مقدار تابش به مقدار تابش پس‌زمینه طبیعی غیرقابل‌اجتناب، کاهش یابد (به منبع شماره ۴ در پیش‌گفتار مراجعه شود).

پرتوهای ایکس پرتوهای یونیزه‌کننده هستند که می‌توانند عوارض جانبی ناخواسته زیستی مانند سرطان بافت مغز استخوان ایجاد کنند. درحالی‌که مواجهه کوتاه‌مدت با پرتو اولیه تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی، ممکن است در برخی از افراد اثرات قابل‌ملاحظه بالینی را در طی یک دوره کوتاه‌مدت یا بلندمدت نداشته باشد، این اثر در افراد دیگر ممکن است منجر به تغییر ملایم رنگ پوست شود، که متعاقباً ممکن است به سوختگی، درماتیت (آماس پوست) و احتمالاً به سرطان منجر شود. مواجهه با تابش ممکن است حاد یا مزمن درنظر گرفته شود. مواجهه‌های حاد مواردی هستند که دُزهای تابشی نسبتاً زیاد در مدت زمان کوتاه منتقل می‌شوند. در این مواجهه، عوارض جانبی ناخواسته زیستی تقریباً در یک بازه زمانی که با دُز دریافتی توسط شخص رابطه معکوس دارد، آشکار می‌شوند. مواجهه‌های مزمن به مواردی اطلاق می‌شوند که در آن دُزهای کوچک به‌طور کم‌وبیش یکنواخت و در دوره‌های زمانی طولانی منتقل می‌شوند. در این نوع مواجهه، عوارض جانبی ناخواسته زیستی ناشی از آن نامحسوس‌تر بوده و ممکن است در طی سال‌ها یا دهه‌ها افزایش یابد. بهبودی از آسیب تابش به عوامل زیادی از قبیل میزان حساسیت بافت(ها) یا اندام(های) تحت تابش پرتو، اثربخشی نسبی زیستی تابش[1]، سن و جنس فرد، دُز دریافتی توسط شخص و مدت زمان مواجهه آن بستگی دارد، ولی محدود به این موارد نیست.

مواجهه با پرتو می‌تواند تأثیرات فوری و یا دیرهنگامی روی سلامتی فرد داشته باشد. به‌طور مشترک با سایر انواع منابع تابشی مصنوعی یونیزه‌کننده که در پزشکی، صنعت، تحقیقات و محصولات مصرفی مورد استفاده قرار می‌گیرند، خطرات بالقوه تابشی مرتبط با تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی نیز وجود دارد.

حدود معادل دُز توصیه‌شده (بند الف-۷) توسط هیئت بین‌المللی حفاظت پرتویی (رادیولوژیکی)[2] بر اساس پیشگیری از اثرات تعیین‌کننده، با نگه‌داشتن دُزهای تابش در زیر آستانه مربوطه بنا نهاده شده‌اند. درصورت تقاضا با انجام کلیه اقدامات منطقی، میزان بروز اثرات تصادفی به‌میزان قابل‌قبول کاهش می‌یابد.

1 - Relative biological effectiveness (RBE)
2 - International Commission on Radiological Protection (ICRP)

الف-۲- الزامات حفاظت از امکانات دستگاه

منابع بالقوه تابش سرگردان[1] در بین تجهیزات تولیدشده پیش از کنترل نظارتی، شناسایی می‌شوند. شناسایی منابع تابش‌های سرگردان از طریق بررسی و براورد معیوب‌بودن قطعات، اتصال نامناسب لوازم جانبی که سبب ایجاد شکاف‌های محافظت‌نشده می‌شوند و همچنین یکسوسازهای[2] لوله‌ای در دستگاه‌های پراش پرتوی ایکس انجام می‌شود. سطوح تابش، اغلب تا چندین مرتبه بزرگی بیش از حد مجاز هستند. در بعضی از موارد، تجهیزات ارائه‌شده با چنین مشکلاتی، نامناسب ایمن و/ یا شناسایی شده‌اند و این به‌طور بالقوه سبب افزایش ریسک مواجهه غیرضروری با تابش خواهد شد.

به‌منظور دستیابی به یک استاندارد حفاظت قابل قبول، امکانات دستگاه باید شامل موارد حفاظتی زیر باشند:

۱- جداسازی (عایق‌کاری)[3] و طراحی مناسب تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی؛

الف- اختصاص یک اتاق یا بخشی از آن برای تجهیزات؛

ب- چسباندن دائمی علامت هشدار پرتو ایکس (که در شکل (ب-۱) نشان داده شده‌است) در قسمت بیرونی اتاق روی دربی که امکان دسترسی به تجهیزات را فراهم می‌کند. علامت باید از فاصله ۲ متری پدیدار و قابل‌خواندن باشد.

شکل الف-۱- نمونه‌ای از برچسب هشدار تابش پرتوی ایکس

یادآوری- طبق بند ۲ استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۶۸۰: سال ۱۳۸۷، این نماد به رنگ قرمز و شکل های آن به رنگ مشکی با حاشیه سفید رنگ است. نماد بدون رنگ برای مواقعی است که استفاده از رنگ امکان‌پذیر نیست، مانند وقتی که نماد روی خود چشمه حک می‌شود، قابل‌قبول است. نماد نباید کوچک‌تر از سه سانتی‌متر طراحی شود تا اطمینان حاصل شود که به‌وضوح قابل رویت است.

1 - Stray
2 - Rectifiers
3 - Isolation

۲- دسترسی محدود

دسترسی به اتاق‌هایی که در آن‌ها تجهیزات پرتوی ایکس مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید فقط محدود به کاربران تجهیزات و سایر کارکنان مجاز باشد.

الف-۲-۱ اقدامات پیش از بهره‌برداری و نگهداری

قابلیت اعتماد و ایمنی هر سامانه فیزیکی با افزایش زمان به‌کارگیری و یا به مرور زمان به‌دلیل اثرات ساییدگی و یا خوردگی قطعات کاهش می‌یابد. به‌منظور تضمین ایمنی و اطمینان از عملکرد تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی در هر مرکز، کاربر باید به‌طور منظم برخی اقدامات بازرسی ایمنی معین قبل از بهره‌برداری روی اجزایی که برای ایمنی پرتو ایکس حیاتی هستند را انجام دهد و صاحب تجهیزات و یا متصدی آن‌ها باید یک برنامه نگهداری پیشگیرانه مناسب را تدوین و پیاده‌سازی کند. این اقدامات باید سن تجهیزات ویژه و فراوانی استفاده از آن‌ها را موردنظر قرار دهد.

الف-۲-۱-۱ بازرسی‌های ایمنی پیش از بهره‌برداری

هنگامی‌که تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی نصب می‌شوند و هر زمان که عملیات نگهداری روی آن یا روی اجزای لوازم جانبی آن انجام می‌شود، کاربر باید به زیربند الف-۳-۳ این پیوست مراجعه کند و آزمون‌هایی را انجام دهد تا موارد زیر تضمین شوند:

۱- عملکرد مناسب کلیه ابزارهای محافظ و ایمنی؛

۲- مونتاژ و عملکرد مناسب کلیه حفاظ‌های[1] تابشی درگاه‌های باریکه، لوازم جانبی و ابزارهای اتصال؛

۳- میزان تابش محیط در حد مقررات مجاز (۰/۵ mR [۴/۳۹ μGy air Kerma]) در ساعت در فاصله ۵ سانتی‌متری از تمام سطوح خارجی تجهیزات) است. این مقدار با استفاده از یک ابزار تعیین‌کننده میزان تابش[2] مناسب (برای راهنمایی بیشتر به زیربند الف-۸ مراجعه شود) ارائه‌شده توسط صاحب تجهیزات یا متصدی آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود؛

۴- صرف‌نظر کردن از روش اجرایی ایمنی فقط یک بار امکان‌پذیر است و در زمان راه‌اندازی منبع پرتوی ایکس به شرایط غیرایمن[3] برگردانده می‌شود.

الف-۲-۱-۲ اقدامات نگهداری

هنگامی‌که روش‌های اجرایی نگهداری مطابق با دستورالعمل‌های ارائه‌شده توسط سازندگان در دفترچه راهنمای خدمات باشد، خطرات مواجهه با پرتو ایکس می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یابد و یا از بین

1 - Shielding
2 - Survey meter
3 - Fail-safe

برود. هنگام خدمات‌دهی، کارکنان نگهداری، ضمن رعایت روش‌های اجرایی زیر باید از عدم حضور افراد غیرمجاز در نزدیکی تجهیزات پرتوی ایکس اطمینان حاصل کنند:

۱- همه ابزارهای محافظ و ایمنی را آزموده و از عملکرد صحیح آن‌ها اطمینان حاصل کنید. اگر صرف‌نظر کردن از یک ابراز ایمنی برای تسهیل یک فرایند نگهداری خاص ضروری تلقی شود، رعایت الزامات زیر اجباری است:

الف- یک چراغ قرمز چشمک‌زن یا سیگنال صوتی متناوب در نزدیکی بخشی از تجهیزات که دستگاه ایمنی آن تغییر یافته‌است، نصب شود. این هشدار باید توسط یک شخص دارای دید یا شنوایی طبیعی یا تصحیح‌شده، به‌وضوح قابل مشاهده یا شنیدن باشد؛

ب- نصب یک یادداشت کتبی در نزدیکی چراغ قرمز چشمک‌زن یا سیگنال صوتی متناوب که صراحتاً بیان می‌کند که چه ابزار ایمنی تغییر یافته‌است؛

پ- اگر نشر تابش به‌طور بالقوه با کار درنظر گرفته‌شده مرتبط باشد، از یک تعیین‌کننده میزان تابش مناسب استفاده کنید و اطمینان حاصل کنید که از حدود مجاز تخطی نمی‌کند (برای راهنمایی سطوح مرجع اندام‌های بدن به زیربند الف-۳-۳ مراجعه شود)؛ و

ت- اطمینان حاصل شود که ابزار ایمنی مجدداً برقرار شده‌است و یا هرگونه حفاظ‌گذاری برداشته‌شده و اصلاح‌شده به‌منظور تسهیل کار موردنظر، پس از اتمام کار جایگزین شده باشد.

۲- تمام حفاظ‌های تابش، درگاه‌های باریکه، نوربندها، لوازم جانبی و ابزارهای اتصال برای نصب و عملکرد مناسب بازرسی شوند؛

۳- سطوح تابش نزدیک‌ترین بخش به تجهیزات که عملکردهای نگهداری روی آن‌ها انجام خواهد شد، قبل و بعد از عملکرد (های) نگهداری، پایش شود. از یک تعیین‌کننده تابش مناسب استفاده شود و حدود مرجع راهنمای پیشنهادی در زیربند الف-۳-۳ برای اندام بدن و سطوح مجاز تدوین‌شده برای عملکرد تجهیزات رعایت شود (به زیربند الف-۲-۱-۱ (ت) مراجعه شود).

الف-۳ ملاحظات انسانی

اگر ریسک‌های تابش مطابق با اهداف ICRP کم باقی بمانند، کارکنان هر مرکزی که تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی برای استفاده در آن‌ها نصب شده‌است، باید کاملاً به همه مسئولیت‌های محول‌شده به آن‌ها عمل کنند. مسئولیت‌های مرتبط که بر مالکیت تجهیزات، استفاده و نگهداری آن تأثیر می‌گذارد، در زیر ارائه شده‌است:

الف-۳-۱ مسئولیت‌های مالک تجهیزات

مسئولیت نهایی در مورد ایمنی در برابر تابش تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی بر عهده مالک تجهیزات است. مالک تجهیزات به‌عنوان یک شخص، سازمان یا مؤسسه‌ای که دارای عنوان یا نظارت اجرایی بر یک یا چند

مرکز دارای منبع (های) تابش یونیزه‌کننده است، تعریف می‌شود. مالک تجهیزات باید اطمینان حاصل کند که تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی، همه استانداردهای ایمنی تابش کاربردی را رعایت می‌کند. برای برخی از کاربردها، این مسئولیت ممکن است به کارکنان واگذار شود (به‌عنوان مثال، یک کاربر ارشد یا مسئول بهداشت و مامور ایمنی، که از این پس، مالک انتصابی (متصدی) تجهیزات نامیده می‌شود). در هر مرکزی که در آن از تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی استفاده می‌شود، مالک یا متصدی تجهیزات مسئولیت این کار را دارند که:

۱- از نصب تجهیزات مطابق با الزامات مندرج در زیربند الف-۲ پیوست حاضر، اطمینان حاصل کنند؛

۲- اطمینان حاصل کنند که همه کاربران آموزش‌های لازم در مورد عملکرد مناسب و خطرات پرتوی ایکس مرتبط با تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی نصب‌شده را، دریافت کرده‌اند؛

۳- قوانین ایمنی تابش تجهیزات پرتوی ایکس، روش‌های ایمنی در هنگام کار و در شرایط اضطراری تعیین و به‌طور واضح اعلام شود. این اطلاعات باید شامل اطلاعات دقیق آدرس و جزئیات تماس بیمارستان یا درمانگاهی باشد که می‌تواند درمان پزشکی را انجام دهد؛

۴- رونوشتی از این آئین‌نامه ایمنی تهیه و در دسترس کاربران و کارکنان نگهداری؛ برای ارجاع قرار گیرد؛

۵- اجرای یک سامانه تأیید، نظارت و وارسی دوره‌ای جهت حصول اطمینان از این که کلیه کاربران و کارکنان نگهداری آموزش لازم و کافی را دریافت کرده‌اند و بخش‌های مربوط به این آئین‌نامه ایمنی، قوانین کاربردی ایمنی تابش، اقدامات ایمنی و روش‌های اجرایی اظطراری پیش از به‌کارگیری و سرویس (تعمیر) تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی را مطالعه و درک کرده‌اند؛

۶- تدوین یک برنامه نگهداری با در نظرگرفتن زمان و دفعات استفاده که تضمین می‌کند کلیه دستگاه‌های ایمنی و اجزای مهم برای تولید و محافظت از پرتوی ایکس به‌طور معمول بررسی شده و قطعات معیوب آن‌ها جایگزین یا تعمیر می‌شوند؛

۷- تهیه یک تعیین‌کننده تابش مناسب و حصول اطمینان از وجود آن در شرایط کاری و عملکردی در همه زمان‌ها برای استفاده همه کاربران و کارکنان نگهداری؛

۸- انجام تحقیقات سریع در موارد مواجهه بیش از حد مجاز و سوانح تابش و ارائه گزارش‌های مناسب به مالک یا متصدی دستگاه و همچنین به مقامات نظارتی محافظت در برابر تابش در طی ۵ روز کاری؛

۹- حصول اطمینان از اینکه قربانیانی که در مواجهه بیش از حد مجاز با تابش قرار گرفته‌اند، از مراقبت‌های ویژه پزشکی برخوردار شوند (به‌عنوان مثال، مشورت با آنکولوژیست (تودینه‌شناس) مرتبط با تابش یا پزشکی که از تاثیرات زیستی انسانی تابش یونیزه‌کننده آگاهی داشته باشد)؛

۱۰ - تعیین اقدامات اصلاحی مناسب به دنبال موارد ناشی از مواجهه بیش از حد با تابش، حوادث و رخدادهای ناایمن و حصول اطمینان از اجرای مؤثر این اقدامات؛

۱۱- حصول اطمینان از اینکه، در طی یک وارسی محافظت در برابر تابش، رونوشتی از جدیدترین گزارش وارسی شامل خلاصه اقدامات اصلاحی توصیه‌شده و نصب‌شده روی تجهیزات، به‌آسانی در اختیار بازرس برنامه محافظت از تابش قرار گیرد.

الف- ۳-۲ مسئولیت‌های کاربر

توصیه می‌شود که کلیه کاربران تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی موارد زیر را رعایت کنند:

۱- در مورد عملکرد و خطرات پرتوی ایکس مرتبط با تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی خاص مورد استفاده آموزش دیده و توسط صاحب تجهیزات یا متخصصان تعیین‌شده مجوز یا تأییدیه بگیرند؛

۲- قبل از بهره‌برداری از تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی، کلیه قوانین ایمنی در برابر تابش و روش‌های اجرایی اضطراری که توسط مالک یا متصدی تجهیزات و مقامات نظارتی محافظت در برابر تابش تجویز شده‌است، مطالعه و درک کرده و از آن‌ها پیروی کنند؛

۳- به پایشگرهای شخصی تابش سازگار با طراحی و عملکرد تجهیزات (به بند الف-۶ پیوست حاضر مراجعه شود) و توصیه‌شده توسط مقامات نظارتی محافظت در برابر تابش مجهز شوند؛

۴- وارسی‌های منظمی از داده‌های دُزیمتری شخصی خود را انجام داده و مواجهه با تابش غیرمترقبه را شناسایی کنند، در مورد علل اصلی آن‌ها تحقیق کرده و اقدامات اصلاحی مناسب را انجام دهند؛

۵- از یک تعیین‌کننده تابش مناسب برای شناسایی و پایش میزان تابش در مناطق بحرانی تجهیزات (محفظه لوله، درگاه‌های باریکه، نوربندها، لوازم جانبی آنالیز و غیره) که حین مراحل راه‌اندازی و هم‌محوری‌سازی باریکه و متعاقب آن در اصلاحات و تغییرات دستگاه یا لوازم جانبی آن استفاده کرده، اطمینان حاصل کنند. همچنین اطمینان حاصل کنند که میزان تابش با حد نظارتی (۰/۵ mR [~ ۴٫۳۹ μGy air Kerma) در هر ساعت در فاصله ۵/۰ سانتی‌متری از تمام سطوح خارجی تجهیزات) انطباق دارد و در شرایط معمول عملیاتی تجهیزات، سطوح راهنما (نشان داده‌شده در زیربند الف-۵) که شامل حدود دُزهای مجاز (زیربند الف-۷) است از حد مجاز افزونتر نمی‌شود؛

۶- وارسی‌های ایمنی پیش از بهره‌برداری، ذکرشده در زیربند ب-۲-۱-۱، را انجام دهند؛

۷- درصورت بروز شرایط عملیاتی ناایمن، عملکرد تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی را متوقف کرده و بلافاصله در مورد چنین شرایطی به مالک یا متصدی تجهیزات اطلاع دهند.

الف-۳-۳ مسئولیت‌های کارکنان نگهداری

توصیه می‌شود کلیه کارکنان مسئول نگهداری تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی موارد زیر را رعایت کنند:

۱- به اندازه کافی در مورد نگهداری و تعمیر مناسب تجهیزات مختلف پرتوی ایکس آنالیزی که مسئولیت آن‌ها را بر عهده دارند، آموزش ببینند. بهتر است این آموزش با تأکید بر عملیات نگهداری که ممکن است به تولید پرتوی ایکس نیاز داشته باشد، انجام شود؛

۲- کلیه قوانین، الزامات و روش‌های اجرایی اضطراری مربوط به ایمنی در برابر تابش از جمله زیربندهای الف-۵ و الف-۶ که برای تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی و مرکز موردنظر مناسب می‌باشد را مطالعه و درک کرده باشند و از آنها پیروی کنند؛

۳- برای پایش جداگانه سرتاسر بدن و بیشینه دُزهایی که برای عملکرد موردنظر مناسب فرض می‌شوند، به دُزیمترهای تابشی شخصی مجهز شوند؛

۴- از یک دستگاه تعیین‌کننده تابش با عملکرد مناسب (تهیه‌شده توسط مالک تجهیزات یا خود) به‌منظور شناسایی و پایش میزان تابش در مناطق بحرانی تجهیزات (محفظه لوله، درگاه‌های باریکه، نوربندها، لوازم جانبی آنالیز و غیره) استفاده کنند. این دستگاه در هنگام راه‌اندازی و هم‌محورسازی باریکه، روش‌های اجرایی نگهداری و متعاقب آن در اصلاحات و تغییرات دستگاه یا لوازم جانبی آن همراه آن‌ها باشد؛

۵- اقدامات احتیاطی را برای از بین بردن یا کاهش میزان تابش انجام دهند (مطابق زیربند الف-۳-۳ ردیف ۴) تا اطمینان حاصل شود که حد نظارتی (۰/۵ mR [~۴/۳۹ μGy air Kerma]) در هر ساعت در فاصله ۵ سانتی‌متری از تمام سطوح خارجی تجهیزات) رعایت شده و همچنین در شرایط معمول عملیاتی تجهیزات، سطوح راهنما (نشان داده‌شده در زیربند الف-۵) که شامل حدود دُزهای مجاز (زیربند الف-۷) است از حد مجاز افزونتر نمی‌شود؛

۶- وارسی‌های منظمی از داده‌های دُزیمتری شخصی خود انجام داده و مواجهه با تابش غیرمترقبه را شناسایی کنند، در مورد علل اصلی آن‌ها تحقیق کرده و اقدامات اصلاحی مناسبی که ممکن است ضروری باشد را انجام دهند؛

۷- برای کاربر و مالک یا متصدی تجهیزات گزارش مکتوبی را تهیه کند که به‌صراحت هر نوع روش اجرایی یا عمل کاربر که می‌تواند منجر به مخاطره ایمنی در برابر تابش پرتو ایکس شود را به محض شناسایی آن عمل و روش اجرایی، مشخص کند؛

۸- روش‌های اجرایی نگهداری مندرج در زیربند الف-۲-۱-۲ رعایت شود؛

۹- بر کار کارکنان نگهداری حین آموزش، نظارت داشته باشند؛

۱۰- درصورت بروز شرایط عملیاتی ناایمن، از فعالیت تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی جلوگیری کرده و بلافاصله در مورد چنین شرایطی به مالک یا متصدی تجهیزات اطلاع دهند.

الف-۴ بررسی‌های حفاظت در برابر تابش

بررسی حفاظت در برابر تابش تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی به تعیین این مسئله که آیا تجهیزات مطابق با استانداردهای کاربردی طراحی و عملکرد، عمل می‌کنند یا نه، اختصاص دارد و به‌گونه‌ای انجام می‌شود و

ادامه می‌یابد که بیشینه ایمنی در برابر پرتوی ایکس را برای همه افراد فراهم کند. توصیه می‌شود به‌منظور دستیابی به این اهداف، کلیه الزامات زیر برای همه مراکز اعمال شود:

۱- توصیه می‌شود تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی هنگام نصب و هنگامی‌که تعمیر و نگهداری، اصلاح، آسیب و حوادث مواجهه بیش از حد با تابش در آن رخ داده‌است، مورد بررسی قرار گیرند.

۲- توصیه می‌شود بررسی‌ها توسط کارگزار نظارتی حفاظت در برابر تابش انجام شود. هرچند ممکن است اشخاصی مشروط بر اینکه تأیید قبلی از مرجع نظارتی مناسب کسب کرده باشند، مجاز به انجام این بررسی باشند.

۳- توصیه می‌شود بررسی‌های معمول از تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی به‌صورت دوره‌ای انجام شود. دوره انجام این بررسی‌ها به طراحی خاص تجهیزات، شرایط استفاده و سابقه عملکرد بستگی دارد. فراوانی بررسی ممکن است با مشورت مقامات نظارتی حفاظت در برابر تابش باشد.

۴- توصیه می‌شود بررسی تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی شامل موارد زیر باشد:

الف- بازرسی کامل همه ابزارهای ایمنی و حفاظ‌های تابش؛

ب- اندازه‌گیری تابش سرگردان تحت بدترین شرایط کاربر (درصورت امکان) در اطراف سامانه انجام می‌شود؛

پ- کمّی‌سازی مناسب از سطوح تابش‌های سرگردان بیش از حد نظارتی و مشخصات دقیق فاصله‌شان از سطح یا محلی که تجهیزات تابش ایکس در آن قرار دارد؛

ت- ارزیابی میزان مواجهه شغلی و عمومی تابش هنگامی‌که میزان تابش از حد نظارتی فراتر رفته باشد.

ث- انجام بازرسی در مورد:

۱- در دسترس بودن نسخه‌ای از این آیین‌نامه ایمنی، قوانین ایمنی قابل‌اجرا در برابر تابش، روش‌های ایمن عملیاتی و اضطراری درون و یا در نزدیکی تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی؛

۲- تدوین و پیروی از برنامه نگهداری توسط مالک یا متصدی تجهیزات؛

۳-گزارش‌هایی از شرایط عملیاتی ناایمن، واقعه و حوادث ناشی از مواجهه بیش از حد با تابش.

ج- وارسی و ارزیابی پرونده سوابق شخصی دُزیمتری.

۵- توصیه می‌شود گزارشات بررسی، موارد زیر را بیان کنند:

الف- شناسایی تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی که سازندگان، نام تجاری (نمانام)، شماره مدل، شماره سریال (مجموعه) و تاریخ ساخت را تعیین می‌کند؛

ب- ارزیابی ابزارهای ایمنی، حفاظ‌های تابش، مواجهه‌ها با تابش به‌واسطه شغل و پرونده سوابق شخصی دُزیمتری و نواقص مشاهده‌شده؛

پ- اقدامات اصلاحی خاص ضروری جهت مطابقت با این آیین‌نامه ایمنی و مقررات RED[1]، از جمله مهلت‌های اتمام؛

ت- توصیه‌های ایمنی (در صورت وجود).

۶- پس از توقف بهره‌برداری از تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی، تمامی گزارش‌های بررسی مربوط به آن تجهیزات باید توسط آخرین کاربر مسئول به مدت ۵ سال نگهداری شود.

الف-۵ رهنمود ایمنی کاربری

تجهیزات پرتو ایکس بدون نظارت خطر بالقوه‌ای محسوب نمی‌شوند مگر اینکه مداخله انسانی وجود داشته باشد. به‌منظور کاهش احتمال و شدت حوادث تابش و مواجهه بیش از حد با تابش، ضروری است علاوه بر موارد مندرج در این پیوست، به روش‌های اجرایی عملیاتی و نگهداری پیشنهادشده توسط سازنده تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی نیز پایبندی وجود داشته باشد. توصیه می‌شود رهنمود عمومی زیر نیز در صورت امکان رعایت شده و به ثبت برسد:

۱- اگر تجهیزات پرتو ایکس آنالیزی به‌طور کافی محفوظ باشند تا از دسترسی افراد غیرمجاز جلوگیری شود، عملکرد آن‌ها نیازی به نظارت و مراقبت مداوم کاربر ندارد؛

۲- توصیه می‌شود کارکنان، هیچ بخشی از بدن را در مواجهه با باریکه اصلی قرار ندهند. هرگاه هم‌محورسازی لوازم جانبی آنالیز نیازمند به‌کارگیری باریکه پرتوی ایکس به‌صورت باز (بدون حفاظ) باشد، ضروری است اقدامات احتیاطی ویژه‌ای برای کاهش یا از بین بردن مواجهه با تابش در دست‌ها و پاها و سایر قسمت‌های بدن انجام شود. توصیه می‌شود، انبرک‌های دسته بلند یا ابزارهای کنترل از راه دور، جریان کم لوله پرتو ایکس، و آشکارسازهای باریکه فلورسان با میزان حساسیت بالا به تابش مورد استفاده قرار گیرند؛

۳- درحالی‌که ممکن است تحت برخی شرایط لازم باشد عملیات نگهداری با میدان‌های تابش غیرمترقبه بالاتر از حد مجاز انجام شود (۰/۵ mR [~4.39μGy air Kerma]) در هر ساعت)، باید تلاش شود تا مواجهه اندام‌ها یا بخش‌هایی از بدن که ممکن است تحت‌تأثیر قرار بگیرند،کاهش یابد تا احتمال ریسک‌های طولانی مدت نیز کاسته شود. ICRP توصیه می‌کند که هیچکدام از پرسنل نگهداری از بیشینه حدود معادل دُزی مجاز زیربند الف-۷ فراتر نروند.

بر اساس عملکرد یک کارگر پرمشغله نگهداری که به‌طور متوسط در یک هفته کاری در شرایطی مشخص کار می‌کند، یک راهنمای عملی این خواهد بود که یک پنجاهم حد مجاز سالانه دُز برای هر کارگر نگهداری در هفته فرض شود. این مقدار به‌صورت یک سطح مرجع کار هفتگی (۱۰۰۰ mrem) ۱۰ mSv برای دست و سایر اندام‌ها در ناحیه قفسه سینه و قسمت فوقانی صورت، به جز عدسی چشم که حد آن

1 - Radiation Emitting Devices (RED)

(۳۰۰ mrem) ۳ mSv خواهد بود، تعبیر می‌شود. با این وجود، باید تلاش‌های بیشتری جهت کاهش مواجهه با تابش انجام شود.

۴- کلیه لباس‌های حفاظتی و حفاظ‌ها، از جمله تعیین‌کننده میزان تابش، باید به‌طور مرتب آزموده شوند تا از قرارگیری آن‌ها در شرایط مناسب کاری و کارکرد ایمن آن‌ها اطمینان حاصل شود و عاری از هر عیب و نقصی باشند. توصیه می‌شود مستندات مناسبی مبنی بر انجام چنین آزمون‌هایی نیز نگهداری شود.

الف- ۶ پایش مواجهه کارکنان با تابش

دُزیمترهای کارکنان جهت پایش دُزهای شغلی در نظر گرفته شده‌است، بدین ترتیب سازوکاری برای محدود کردن مواجهه آتی با تابش را برای هر فردی فراهم می‌کند، به نحوی که از بیشینه حد مجاز مشخص‌شده در زیربند الف-۷ فراتر نرود. برای کاربردهای عمومی از این آیین‌نامه ایمنی، کاربران و کارکنان نگهداری به‌عنوان کارکنان تابش محسوب می‌شوند و حدود مجاز (کاربردی) در جدول ب-۱، ستون ۲، زیربند الف-۷ ذکر شده‌است.

با توجه به طراحی سامانه پرتو ایکس آنالیزی، ممکن است پایش دُزهای دست‌ها نیز همانند دُزهای کل بدن نیاز باشد. توصیه می‌شود برای سنجش تابش به دست‌ها حداقل دو پایشگر انگشت روی نزدیکترین دست به باریکه پوشیده و تجهیز شود. یک پایشگر روی سطح فوقانی انگشت و دیگری روی سطح کف دست پوشیده شود، تا مواجهه با باریکه‌های باریک شناسایی شود. این مواجهه به‌طور معمول برای روش‌های اجرایی هم‌محورسازی که شامل پرتوی ایکس به‌صورت باز (بدون حفاظ) و سامانه‌هایی که به‌طور بالقوه قادر به تابش به دست‌ها هستند، اتفاق می‌افتد. توصیه می‌شود جهت پایش کل بدن در شرایط کاری بالاتر از سطح میز، سطح قفسه سینه با یک پایشگر پوشیده شود تا توانایی تخمین‌های لازم در مورد میزان دُز تابشی به قفسه سینه و احتمالاً اندام‌های صورت را فراهم کند. درغیراین‌صورت، پوشیدن پایشگر در سطح کمر کافی است. توصیه می‌شود درصورت لزوم و به‌منظور تسهیل در کنترل بهتر دُزهای نزدیک به حد مجاز مربوطه، پرونده سوابق دُزیمتری، دُز دست‌ها و دُز انباشته کل بدن را به‌صورت جداگانه ثبت کند.

توصیه می‌شود نیاز به دُزیمترهای کارکنان براساس نتایج بررسی‌ها و تجهیزات خاص پرتونگاری آنالیزی مورداستفاده توسط مقامات نظارتی حفاظت در برابر تابش تعیین شود. با توجه به جراحت‌های مهم، استفاده از حفاظ و کاربرد مناسب تعیین‌کننده میزان تابش در محوطه کاری تجهیزات حین روش‌های اجرایی هم‌محورسازی باریکه همچنین اصلاحات و تغییرات متعاقب در تجهیزات یا لوازم جانبی آن به‌عنوان خطوط مؤثر دفاعی در مقابل مواجهه بدن با تابش می‌باشند. توصیه می‌شود پایشگرهای کارکنان به جای نظارت به‌عنوان تأیید استفاده شود. پرونده سوابق دُزیمتری باید حداقل ۵ سال پس از اتمام کار کاربر با چنین تجهیزاتی، در این مرکز نگهداری شود.

الف-۷ بیشینه حدود معادل دُز مجاز توصیه‌شده برای تابش یونیزه‌کننده

به‌منظور حفاظت در برابر تابش، افراد ممکن است در یکی از دو گروه زیر طبقه‌بندی شوند: کارکنان تابش[۱] یا اعضای عمومی. گروه اول به افرادی اطلاق می‌شود که در طول کار خود در مواجهه با تابش یونیزه‌کننده قرار دارند، شامل افرادی که در مواجهه با تابش یونیزه‌کننده پس‌زمینه طبیعی یا پزشکی قرار می‌گیرند. گروه دوم به افرادی گفته می‌شود که جزء گروه کارکنان تابش نیستند. جدول زیر حدود معادل دُز توصیه‌شده توسط ICRP 1990 برای تابش یونیزه‌کننده را جمع‌بندی کرده‌است.

جدول ب-۱- بیشینه حدود معادل دُز مجاز در یک سال [الف]

اندام یا بافت بدن	کارکنان تابش[ب]	اعضای عمومی
سرتاسر بدن	۲۰ mSv[پ]	۱ mSv
عدسی چشم	۱۵۰ mSv	۱۵ mSv
پوست ($1\ cm^2$)	۵۰۰ mSv	۵۰ mSv
همه اندام‌ها	۵۰۰ mSv	

الف- این حدود به‌منظور جلوگیری از اثرات قطعی با نگه‌داشتن میزان دُزها در زیر آستانه مربوطه تعیین شده‌است. همچنین منجر به کاهش میزان بروز اثرات تصادفی به میزان قابل‌قبول می‌شود. این عمل با انجام کلیه اقدامات منطقی برای کاهش دُزهای مواجهه در مقدار پایین‌تر از حدمجاز انجام می‌شود. برای اطلاعات بیشتر، به منبع ICRP 1991 رجوع شود.

ب- برای زنانی که باردار هستند یا ممکن است باردار باشند، جنین باید پس از تشخیص بارداری از مواجهه با تابش محافظت شود. برای باقی‌مانده دوران بارداری، حد معادل دُز از منابع تابش خارجی به بدن که روی سطح شکم اعمال می‌شود، ۲ mSv است و میزان حد برای نوکلئیدهای پرتوزا که توسط بدن به‌صورت داخلی گرفته می‌شود، یک بیستم میزان مصرف سالانه مجاز است. اگر زنان با هر دو منبع داخلی و خارجی مواجهه شوند، هر دو حد به‌طور جداگانه اعمال می‌شود و حد مجاز کل نباید از ۱ mSv بیشتر باشد (از آنجا که جنین به‌عنوان یک عضو عمومی درنظر گرفته می‌شود).

پ - درحالی‌که ممکن است حداکثر معادل دُز ۵۰ mSv در یک سال برای شرایط خاص مجاز باشد، اما در طی یک دوره ۵ ساله، حد کل ۱۰۰ mSv توسط ICRP توصیه می‌شود. این یعنی حد متوسط سالانه $20\ mSv\ y^{-1}$ خواهد بود.

الف-۸ رهنمود درباره به‌کارگیری ابزار بررسی

تعیین‌کننده‌های میزان تابش که از یونش در یک گاز استفاده می‌کنند، یکی از متداول‌ترین ابزارهای مورداستفاده برای تعیین میزان تابش در اطراف تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی هستند. در زیر اطلاعات رهنمودهای عمومی ارائه شده‌است و هدف از آن کمک به انتخاب ابزارها و تفسیر اندازه‌گیری‌های آن‌ها می‌باشد.

---

۱ - برای اهداف این آیین‌نامه ایمنی، کاربران و کارکنان نگهداری تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی به‌عنوان کارکنان تابش محسوب می‌شوند.

۱- به‌منظور آشکارسازی یا اندازه‌گیری، تابش یونیزه‌کننده باید وارد حجم حساس آشکارساز شود. پرتوهای آلفا، بتا، گاما، ایکس و نوترون‌ها، تابش‌های یونیزه‌کننده با مشخصه‌های نفوذ متفاوت هستند. این بدان معنی است که به‌عنوان مثال، ابزاری که برای آشکارسازی و اندازه‌گیری ذرات آلفا طراحی شده‌است، برای پرتوهای گاما و ایکس مناسب نخواهند بود. برای ابزارهایی که مخصوص اندازه‌گیری پرتوی ایکس طراحی نشده‌اند اما برای اندازه‌گیری پرتوهای آلفا، بتا و گاما طراحی شده‌اند، کاربر باید مشخصات سازنده ابزار را مشاهده کند تا ببیند آیا این ابزار پرتوی ایکس مورداستفاده در تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی را اندازه‌گیری می‌کند یا خیر.

۲ - ابزارهای معینی که به قصد انجام اندازه‌گیری‌های کمّی درنظر گرفته شده‌اند، به انرژی‌های مختلف تابش، پاسخ‌های متفاوتی خواهند داد. یعنی وابستگی انرژی ابزار باید شناخته شده و درنظر گرفته شود تا اندازه‌گیری‌های کمّی دقیق حاصل شود. دو ابزار با مدل همسان لزوماً نتایج یکسانی را حاصل نمی‌کنند (به‌دلیل تغییرات داخلی در الکترودها، میدان‌های الکتریکی، نویز، اجزای داخلی و غیره)؛ درصورت داشتن طراحی‌های مختلف، این تفاوت نیز بسیار بیشتر خواهد بود. بنابراین، برای مقایسه نرخ‌های مواجهه اندازه‌گیری‌شده در یک نقطه خاص با استفاده از آشکارسازها با طراحی‌های متفاوت، هر دو آشکارساز باید در انرژی تابشی که در آن اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شوند، کالیبره شوند.

۳- توصیه می‌شود درصورتی‌که اندازه‌گیری‌ها به خوانش متکی باشند، ابزارها باید برای یک بازه انرژی کالیبره شوند. این بدان معناست که اگر کمّی‌سازی تابش مدنظر باشد، باید ابزار خوانش برای عامل کالیبراسیون انرژی مربوطه اصلاح شود.

۴- بازه ابزارها باید با بازه مواجهه‌های با تابش مورد سنجش سازگار باشد. این بدان معناست که ابزار باید قادر به اندازه‌گیری میزان به اندازه کافی کم تابش باشد تا مشخص کند آیا تابش تجهیزات پرتوی ایکس آنالیزی با حد نظارتی مطابقت دارد یا خیر (۰/۵ mR [~۴/۳۹ μGy air Kerma] در هر ساعت در فاصله ۵ سانتی‌متری از تمام سطوح خارجی تجهیزات).

۵- هنگامی‌که کالیبراسیون ابزار تحت شرایط به‌خوبی تعریف‌شده و کاملاً تجدیدپذیر در آزمایشگاه استانداردسازی یا یکی از آزمایشگاه‌های معتبر یا قابل‌ارجاع انجام می‌شود، ممکن است تابش در میدان از جهات مختلف و اغلب ناشناخته وارد شود. بنابراین باید از ابزاری با وابستگی جهتی کم استفاده شود.

۶- توصیه می‌شود درصورت استفاده از یک آشکارساز بزرگ برای اندازه‌گیری باریکه‌های باریک تابش، به‌دلیل تفاوت در پاسخ فضایی[1] آشکارسازها، در آزمون دقت بسیار شود. یک رهیافت کاربردی برای تعیین فاصله‌ای از منبع (در آن میدان به‌اندازه کافی برای دربرگرفتن حجم آشکارسازی پهن است)، تخمین نرخ مواجهه تابش در آنجا و سپس استفاده از قانون مربع معکوس است (این مقدار بالاتر است). نتیجه به‌دست آمده می‌تواند برای مقایسه نسبی جهت اعلام هشدار یا آگاهی از وجود خطر تابش به‌طور

1 - Areal response

رضایت‌بخشی استفاده شود، بدین معنا که ابزار برای آشکارسازی کمّی استفاده می‌شود. از طرف دیگر، یک آشکارساز به‌اندازه کافی کوچک که تغییرات میدانی در مقایسه با ابعاد آن قابل‌اغماض است، ممکن است به‌منظور کمّی‌سازی میزان مواجهه با تابش مورداستفاده قرار گیرد، به‌شرط آن‌که عامل کالیبراسیون مناسب، متناظر با انرژی تابش اندازه‌گیری، به‌کارگرفته شود.

۷- تعیین‌کننده میزان تابش گایگر مولر[1] (GM) ممکن است نسبت به روشنی روز، تابش فرابنفش، میدان‌های فرکانس رادیویی حساس باشند و ممکن است در حالت مواجهه یا میزان شمارش بالا قادر به پاسخ‌دهی نباشند (صفر خواندن). بنابراین، هنگامی که یک خوانش به‌دست می‌آید، باید اطمینان حاصل شود که تحت‌تأثیر این عوامل قرار نگرفته‌است. توصیه می‌شود درصورتی‌که میدان تابش آنقدر زیاد باشد که باعث شود آشکارساز دچار نقصان شده و در نتیجه مقدار صفر را بخواند (یعنی یک نشانه نادرست از یک میدان تابش)، تعیین‌کننده میزان تابش GM استفاده‌شده در بررسی‌ها، قبل از ورود به ناحیه موردبررسی روشن شوند. تعیین‌کننده میزان تابش GM استفاده‌شده برای پرتوهای ایکس و تابش گامای ۱۰۰ keV>، بسیار وابسته به انرژی هستند و بهتر است استفاده از آن‌ها فقط به آشکارسازی تابش محدود شود مگر این‌که برای طیف انرژی موجود، کالیبراسیون وجود داشته باشد. یک آشکارساز GM پنجره آخر[2]، به‌دلیل کوچک بودنش و میزان حساسیت افزایش‌یافته پرتوی ایکس آن نسبت به یک محفظه یونی، در آشکارسازی مناطق با تابش زیاد در مجاورت یا روی تجهیزات بسیار مفید است. یک پروب GM از نوع تابه‌ای[3] این مزیت را دارد که به کاربر اجازه می‌دهد هنگام قرار دادن سر پروب در باریکه پرتوی ایکس، دست‌های خود را از باریکه دور نگه دارد. علاوه بر این، توصیه می‌شود از آشکارسازهای GM برای اندازه‌گیری تابش‌های پالسی با شدت بالا استفاده نشود زیرا میزان تابش حین پالس ممکن است به‌اندازه کافی بالا باشد تا باعث پاسخ‌دهی آشکارساز در ناحیه غیرخطی خود شود که درنتیجه باعث خوانش‌هایی خیلی کم می‌شود.

۸- ابزار(ها) باید در شرایط کار مناسبی قرار داشته باشند و توصیه می‌شود آزمون‌های پایداری کارایی و عملکردی آن‌ها به‌صورت دوره‌ای انجام شود.

1- Geiger Mueller (GM)
2 - Endwindow
3 - Pancake

پیوست ب

(آگاهی‌دهنده)

نمونه گزارش برای یک ویفر اکسی‌نیترید سیلیکون

در سوم اکتبر سال ۲۰۰۷ آزمایشگاه پرتو ایکس، اندازه‌گیری XRR را روی نمونه‌های Si_3N_4 شامل یک دولایه‌ای Si_3N_4/SiO_2 بر زیرلایه ویفر Si انجام داد. ساختار نمونه اسمی، یک لایه ۲۰ نانومتری Si_3N_4 و یک لایه ۱ نانومتری SiO_2 روی Si بود (به استاندارد ISO 16413:2013 مراجعه شود).

ب- ۱ جزئیات آزمایشگاهی

دستگاه آزمایشگاهی پرتو ایکس شامل یک لوله پرتو ایکس مس با یک کانون ظریف طولانی ۰/۰۴×۸ mm^2 با توان عملکرد ۴۰kV و ۳۰ mA بود. سایر الزامات آزمایشگاهی به شرح زیر بود:

الف- طول‌موج مورداستفاده به‌وسیله خط $CuK\alpha_1$ داده شد (λ=۰/۱۵۴۰۶ nm).

ب- فیلترهای آلومینیومی اضافی بین شکاف آشکارساز و پنجره آن قرار گرفتند. عوامل تضعیف فیلترها به‌صورت متوالی برابر [۱۴۸ – ۲۷/۸ – ۵/۳۱ – ۱/۰۰] بودند. این عوامل با استفاده از حد پایین = ۱۱۰۰۰ cps و حد بالا = ۸۰۰۰۰ cps از شدت آشکارساز، انتخاب شده‌بود.

پ- شدت باریکه اولیه ۹۹۸۰۰۰ cps و شدت پس‌زمینه ۱/۰ cps بود.

ت- باریکه پرتوی ایکس به‌وسیله آینه چندلایه‌ای سهموی و پس از آن به‌وسیله دو بلور Ge(۲۲۰) دوتایی (تکفام‌ساز بارتلز[1]) تکفام و موازی شد. این سامانه واگرایی باریکه خروجی را به °۰/۰۰۳ رساند.

باریکه اولیه به‌وسیله شکاف‌های ۰/۴×۸ mm^2 (تعیین‌کننده سطح‌مقطع مستطیلی باریکه) محدود شد. قبل از آشکارساز و بعد از نمونه، از یک شکاف آشکارساز ۰/۶×۱۰ mm^2 استفاده شد.

فاصله شکاف باریکه اولیه- نمونه، ۱۴ cm و فاصله نمونه- شکاف آشکارساز، ۹ cm بود.

ث- به‌دلیل واگرایی[2] کم باریکه °۰/۰۰۳، عرض باریکه در موقعیت نمونه در ۰/۴ mm حفظ شد و ارتفاع ۹ mm بود؛

ج- شدت بازتابی به‌وسیله آشکارساز سوسوزن با فیلترهای آلومینیومی که روی چرخ چرخان خودکار بین شکاف آشکارساز و پنجره آن قرار گرفته‌است، ثبت شد.

اندازه آزمونه ۴۰ mm^2×۴۱ mm^2 بود که از طرف بلندتر به موازات باریکه قرار گرفت. طول نمونه ۴۱ mm و عرض باریکه ۰/۴ mm، ریزش باریکه را در موقعیت °۰/۵۸ تعیین می‌کند.

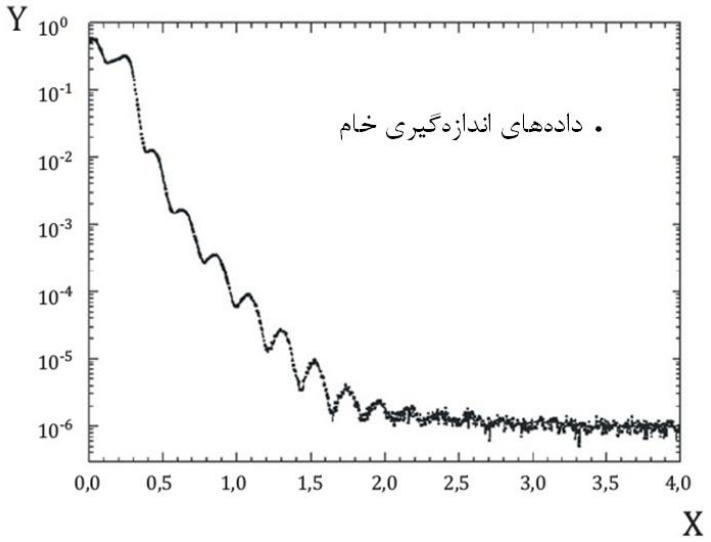
1 - Barlets
2 - Divergence

آزمونه به‌صورت عمودی در زاویه‌سنج قرار داده شده‌بود. صفحه پراکندگی دستگاه آزمایشگاهی در جهت افقی قرار داشت.

چ- روبش ω-2θ در بازه ω از 0° تا 4° با اندازه گام $0{,}005^\circ$ انجام شد و زمان انتگرال‌گیری در هر نقطه، ۴۰ s در کل (فرایند) جمع‌آوری داده ثابت نگه داشته شد. حین اندازه‌گیری، داده‌های اندازه‌گیری‌شده نسبت به شدت باریکه اولیه نرمال شدند.

ب-۲ روش اجرایی آنالیز (شبیه‌سازی و برازش)

داده‌های اندازه‌گیری خام حاصل نرمال‌شده به شدت باریکه اولیه در شکل (الف-۱) نشان داده شده‌اند.



راهنما:

X ω بر حسب درجه؛

Y بازتابندگی.

شکل الف-۱- داده‌های خام نرمال‌شده برای نمونه Si_3N_4

ب-۳ پردازش داده‌های خام

داده‌های خام به‌صورت نرمال‌شده نسبت به باریکه اولیه به‌دست آمد و به‌منظور تصحیح خطای کوچک در ناهم‌محوری، امگا به‌میزان $-0{,}042^\circ$ جابه‌جا شد.

هیچ تفریق سیگنال ناهمدوس به دلیل ناصافی یا پهنای کم فصل‌مشترک لازم نبود. همچنین، ازآنجاکه عرض زاویه‌ای تابع تفکیک‌پذیری برابر با واگرایی $0{,}003^\circ$، بسیار کوچک‌تر از ضخامت دوره نوسانات است، شکل تابع تفکیک‌پذیری در آنالیز وارد نشده‌است.

تأثیرات پس‌زمینه، باریکه اولیه و ریزش نمونه برای زاویه‌های فرودی کوچک در مدل شبیه‌سازی گنجانده شده بود.

ب-۳-۱ مدل اولیه

برای شبیه‌سازی و برازش، از مدلی استفاده شده‌است که شامل یک لایه Si_3N_4 در بالا و یک لایه SiO_2 روی زیرلایه Si است. ضخامت اولیه لایه‌های Si_3N_4 و SiO_2 به‌ترتیب ۱۹٫۵ nm و ۱ nm انتخاب شد. ناصافی‌های اولیه یا پهناهای فصل‌مشترک در بالای لایه‌های Si_3N_4 و SiO_2 به‌ترتیب ۰٫۷۷ nm و ۰٫۴۱ nm انتخاب شدند.

ناصافی یا پهنای فصل‌مشترک زیرلایه Si در ۰٫۲۵ nm ثابت شد. چگالی اولیه لایه‌های Si_3N_4 و SiO_2 به‌ترتیب ۲٫۸۰ g/cm^3 و ۲٫۲۰ g/cm^3 انتخاب شد و چگالی زیرلایه Si، ۲٫۳۳ g/cm^3 بود.

ب-۳-۲ روش محاسبه و الگوریتم برازش

محاسبه داده‌های آینه‌ای XRR به‌وسیله فرمول‌های نوری ماتریس استاندارد انجام شد [1]. ناصافی یا پهنای فصل‌مشترک با استفاده از عامل واپاشی مطابق با نووت- کروک در مدل گنجانده شد [1]. برازش و آنالیز آماری با استفاده از الگوریتم برازش حداقل مربع[1] مارکوارت- لونبرگ انجام شد.

برای آنالیز، از نرم‌افزار برازش توسعه‌یافته در آزمایشگاه استفاده شد.

ب-۳-۳ پارامترهای ثابت و برازش‌شده

هر دو ضخامت دو لایه و دو ناصافی یا پهناهای فصل‌مشترک بالا در حین برازش آزاد قرار داده‌شده و اصلاح شدند. چگالی لایه Si_3N_4 نیز برازش شده بود. چگالی SiO_2 و زیرلایه Si ثابت نگه داشته شده‌بود.

ب-۳-۴ بازه داده‌ها

برازش روی بازه ناصافی یا پهنای فصل‌مشترک از ۰٫۲ nm تا ۰٫۹ nm، بازه ضخامت لایه Si_3N_4 از ۱۰ nm تا ۳۰ nm، بازه ضخامت لایه SiO_2 از ۰٫۵ nm تا ۲٫۰ nm و بازه چگالی لایه Si_3N_4 از ۲٫۷۰ g/cm^3 تا ۳٫۲۹ g/cm^3 انجام شد. به‌منظور غلبه بر ریزش نمونه، فقط داده‌های اندازه‌گیری‌شده در بازه °۰٫۳ تا °۳٫۵ مورداستفاده قرار گرفتند و هر نقطه داده با استفاده از وزن $^{1/5}$(بازتابندگی/۱) برازش شد. تعداد کل نقاط داده برازش‌شده ۶۴۱ بود.

ب-۳-۵ تعداد تکرارها و پارامترهای نهایی

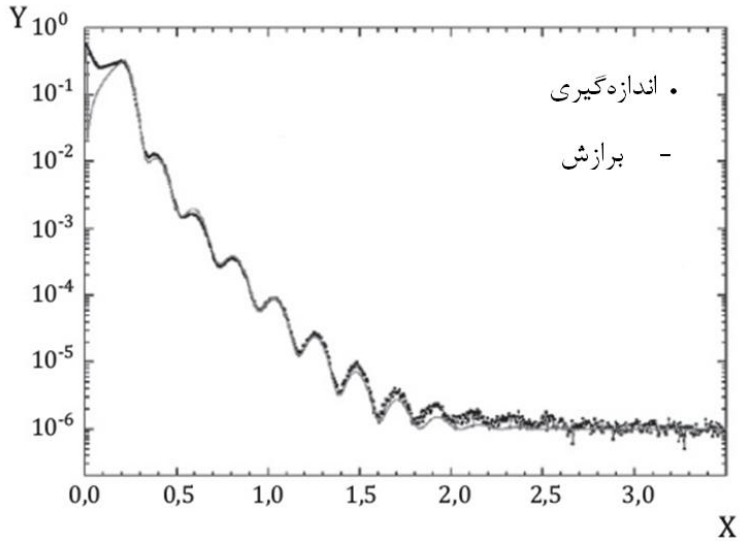
پس از ۱۷ تکرار، پارامترهای نهایی نشان داده‌شده در جدول (ب-۱) به‌دست آمد.

1 - Least square fitting algorithm

جدول ب-۱- داده‌های نهایی حاصله از برازش

	ناصافی یا پهنای فصل‌مشترک (nm)		ضخامت (nm)		چگالی (g/cm^3)	
	میانگین	s.dev.m	میانگین	s.dev.m	میانگین	s.dev.m
Si_3N_4	۰٫۸۰	±۰٫۰۲	۱۹٫۷۶	±۰٫۰۵	۲٫۸۷	±۰٫۱۴
SiO_2	۰٫۶۵	±۰٫۰۷	۰٫۸۹	±۰٫۱۲	۲٫۲۰	-
Si	۰٫۲۵	-	∞		۲٫۳۲	-

باقی‌مانده مجموع مربعات نهایی ۲۶٫۵ بود. بازتابندگی شبیه‌سازی‌شده حاصل از پارامترهای نهایی در شکل (ب-۲) رسم شده‌است.



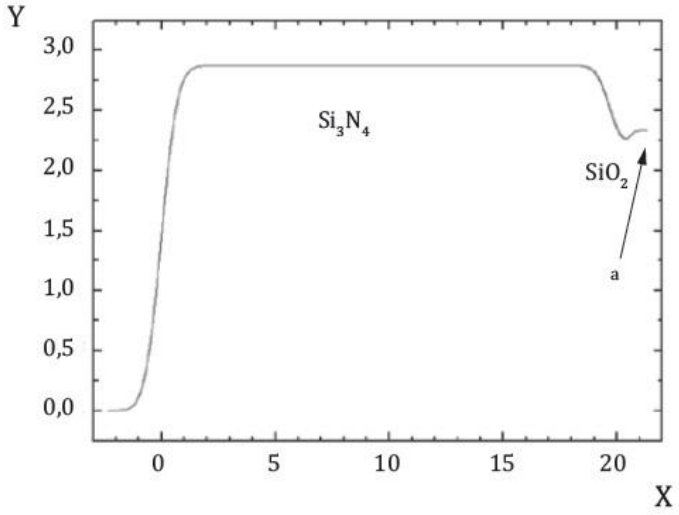
X ω، بر حسب درجه؛

Y بازتابندگی.

شکل ب-۲- بازتابندگی شبیه‌سازی‌شده نهایی برای نمونه Si_3N_4

ب- ۳-۶ پروفایل چگالی

پروفایل چگالی شبیه‌سازی‌شده مطابق با پارامترهای برازش‌شده در شکل (ب-۳) نشان داده شده‌است.



راهنما:

X عمق از سطح، برحسب nm؛

Y چگالی، برحسب g/cm^3؛

[a] زیرلایه Si؛

- پروفایل چگالی شبیه‌سازی‌شده از پارامترهای برازش نهایی.

شکل ب-۳- پروفایل چگالی شبیه‌سازی‌شده

پیوست پ

(آگاهی‌دهنده)

بازتاب‌سنج پرتوی ایکس آزمایشگاهی باریکه همگرا سریع هم‌زمان[1] با استفاده از هندسه پاشش چندزاویه‌ای [22]

بازتاب‌سنج آینه‌ای پرتوی ایکس، یک ابزار مدون برای مشخصه‌یابی ساختاری سطوح و فصول‌مشترک مواد است. معمول‌ترین روش برای اندازه‌گیری منحنی‌های بازتابندگی پرتوی ایکس آینه‌ای، روش روبش زاویه‌ای است، که در آن یک باریکه پرتوی ایکس تکفام همگرا روی سطح نمونه تابیده و شدت بازتابی نقطه به نقطه، در هر زمان با تغییر زاویه گرایش[2] پرتوهای ایکس به‌وسیله چرخاندن نمونه و آشکارساز، اندازه‌گیری می‌شود. این روش اجرایی روبش زاویه نمونه و آشکارساز، تفکیک‌پذیری زمانی در دسترس را محدود می‌کند.

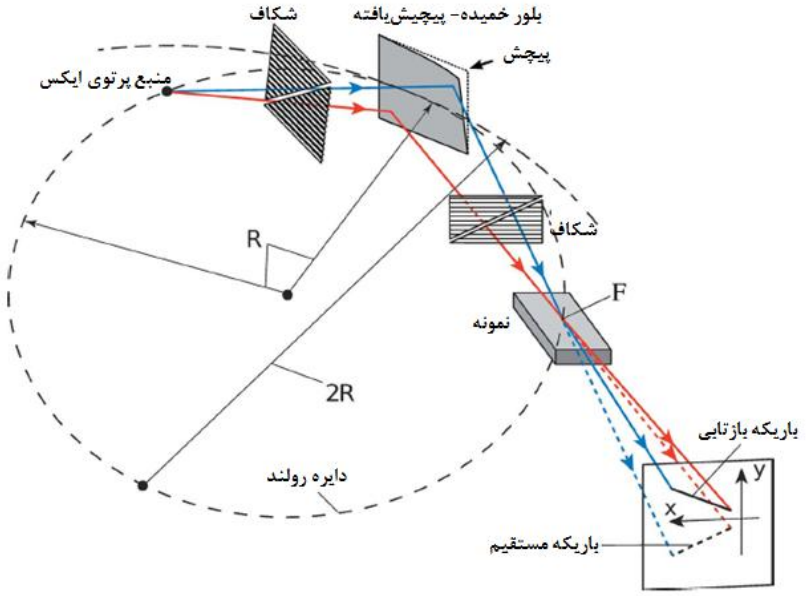
روش پاشش- انرژی[3] به‌وسیله یک آشکارساز حالت جامد و تابش برم‌اشترلانگ[4] حاصل از منبع پرتوی ایکس آزمایشگاهی می‌تواند برای به‌دست آوردن منحنی بازتابندگی روی بازه انتقال تکانه عمودی[5] وسیعی به‌صورت همزمان استفاده شود و مطالعات تفکیک- زمانی به‌وسیله این رهیافت انجام شده‌است. ولی، تفکیک‌پذیری زمانی، به‌دلیل شدت ضعیف تابش برم‌اشترالانگ حاصل از منبع پرتوی ایکس آزمایشگاهی، به چند تا چند صد دقیقه محدود می‌شده‌است. با استفاده از تابش سنکروترون، تفکیک‌پذیری چند ثانیه یا کمتر حاصل شده‌است، اگرچه بازه تکانه اندازه‌گیری‌شده، نسبتاً باریک است.

در این بخش، روش بهینه‌سازی‌شده به‌وسیله پرتوی ایکس مشخصه از منبع آزمایشگاهی ارائه می‌شود. این روش، روش بازتابندگی پرتوی ایکس باریکه- همگرا[6] در هندسه پاشش چند- زاویه‌ای همزمان نامیده می‌شود. در این روش، یک باریکه پرتوی ایکس تکفام همگرا روی نمونه تابیده شده و انتقال تکانه عمودی به‌صورت پیوسته برای هر مولفه (جزء) از پرتوی همگرا تغییر می‌کند [22]. پروفایل منحنی بازتابندگی در بازه انتقال تکانه از $۰٫۰۲\ Å^{-1}$ تا $۰٫۴۲\ Å^{-1}$ به‌وسیله یک آشکارساز دوبعدی به‌صورت همزمان در ۱۰ s ثبت می‌شود. شدت سیگنال از شدت پراکندگی پخشیده جدا می‌شود که منجر به توافق با روش روبش زاویه‌ای مرسوم تا بازتابندگی از مرتبه $۱۰^{-۶}$ با زمان اندازه‌گیری ۱۰۰ s و تا $۱۰^{-۵}$ با زمان اندازه‌گیری ۱۰ s می‌شود. منحنی‌های بازتابندگی از یک ویفر سیلیکون و سطح اتیلن‌گلیکول مایع نشان داده شده‌است. نتایج اندازه‌گیری‌های تفکیک زمانی با تفکیک‌پذیری زمانی ۱۰ s نیز گزارش شده‌است.

1 - Simultaneous
2 - Glancing
3 - Energy-dispersive method
4 - Bremsstrahlung
5 - Vertical momentum transfer
6 - Convergent-beam X- ray reflectivity (CBXR) method

پ-۱ اساس روش و تنظیم آزمایشگاهی

شکل (پ-۱) چیدمان روش CBXR را نشان می‌دهد. یک منبع پرتوی ایکس متمرکز-نقطه‌ای آزمایشگاهی، بلور تکفام‌ساز و نمونه روی شعاع دایره رولند[1]، R (R=۳۷۳ mm) واقع شده‌اند. از تابش $Cu\ K\alpha_1$ حاصل از یک منبع پرتوی ایکس آند چرخان[2] استفاده شده‌است. بلور تکفام‌ساز، یک بلور سیلیکون (۱۱۰) تخت مستطیلی (شرکت شاران[3]، ۰٫۵ mm×۳۰×۶۰)، به‌صورت افقی با شعاع انحنای R ۲ خمیده شده و در جهت عمودی با ساندویچ کردن آن بین دو سطح کاو و کوژ یک خم‌کن بلور خمیده می‌شود. بازتاب (۲۲۰) سیلیکون از تابش $Cu\ K\alpha_1$، استفاده شده‌است که زاویه براگ ۲۳٫۶۵° را به‌دست می‌دهد.



شکل پ-۱- چیدمان بازتاب‌سنج پرتوی ایکس

پرتوی ایکس بازتاب‌شده به‌وسیله بلور به‌صورت افقی روی نقطه F به‌صورت کانونی متمرکز می‌شود. در جهت عمودی، پرتوی ایکس گذرنده از میان شکاف‌های شیب‌دار پس از بازتاب به‌وسیله بلور به سمت نقطه F هدایت می‌شود. این بدان دلیل است که محور عمود بر بلور در جاپای باریکه پرتوی ایکس به مقداری که وابسته به موقعیت سطح بلور تکفام‌ساز است، به سمت پایین کج شده‌است. فاصله بلور- منبع پرتوی ایکس و فاصله کانون- بلور، ۳۰۰ mm هستند.

نمونه به‌صورت افقی در نقطه F قرار داده شده‌است، به‌گونه‌ای که باریکه پرتوی ایکس همگرا روی سطح آن فرود می‌آید. زاویه گرایش باریکه پرتوی ایکس به‌صورت پیوسته وابسته به جهت هر پرتو تغییر کرده و منجر به تغییر پیوسته انتقال تکانه عمودی می‌شود. باریکه پرتوی ایکس به‌صورت آینه‌ای به‌وسیله نمونه بازتاب می‌شود.

1 - Rowland
2 - Rigaku FR-D, 60 mA, 50 kV
3 - Sharan Inc.

مختصه عمودی موقعیت پرتوی ایکس روی آشکارساز به‌وسیله روابط زیر به انتقال تکانه عمودی، q، مرتبط می‌شود:

$$\tan\delta = \left[y(I) - y(I_0)\right] / (2L_d), \qquad (پ-۱)$$

$$q = 4\pi \sin(\delta)/\lambda, \qquad (پ-۲)$$

که در آن:

$y(I)$ و $y(I_0)$ موقعیت‌های عمودی باریکه پرتوی ایکس روی سطح آشکارساز به‌ترتیب با یا بدون نمونه است؛

δ زاویه گرایش پرتوهای ایکس به سطح نمونه، L_d، فاصله بین نمونه و آشکارساز؛

λ طول‌موج پرتوی ایکس است.

از آنجاکه انتقال تکانه عمودی از باریکه بازتابی به‌صورت پیوسته روی سطح آشکارساز تغییر می‌کند، توزیع I نرمال‌شده در هر نقطه به‌وسیله مقدار متناظر I_0 در امتداد باریکه بازتابی، منحنی بازتابندگی را به‌دست می‌دهد. توجه کنید که بازتابندگی آینه‌ای می‌تواند بدون حرکت دادن نمونه یا آشکارساز حین اندازه‌گیری، اندازه‌گیری شود.

زاویه δ بین باریکه بازتاب‌شده به سمت پایین به‌وسیله تکفام‌ساز و جهت افقی با رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\gamma = 2\alpha \sin\theta - \beta \qquad (پ-۳)$$

که در آن:

α زاویه پیچش بلور تکفام‌ساز،

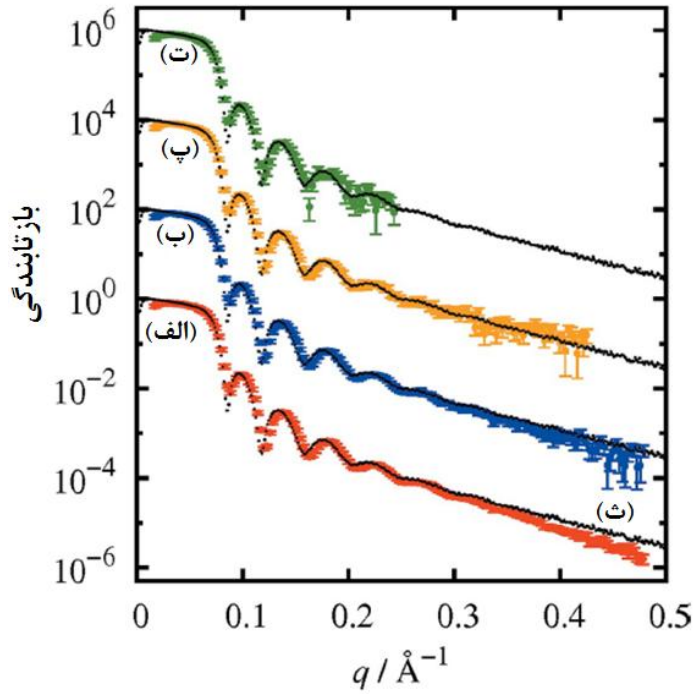
θ زاویه براگ صفحه پراش بلور تکفام‌ساز،

β زاویه بین پرتوی فرودی روی بلور تکفام‌ساز و جهت افقی است.

به‌منظور پوشش بازه q از $۰٫۰$ Å^{-1} تا $۰٫۵$ Å^{-1}، توصیه می‌شود γ بازه ۰ تا $۳٫۵۲^\circ$ را پوشش دهد. بیشینه زاویه پیچش $\alpha_{max} = ۸٫۹۹^\circ$ است. برای شناسایی این مقدار پوشش، اتصال دقیق بلور به خم‌کن به‌منظور جلوگیری از شکست بلور ضروری است.

پ-۲ منحنی‌های بازتابندگی نمونه‌های آزمون

شکل (پ-۲)، منحنی‌های بازتابندگی اندازه‌گیری‌شده برای یک لایه نازک طلا روی یک زیرلایه SiO_2/Si را نشان می‌دهد. منحنی (الف) با زمان اندازه‌گیری ۱۰۰۰ s به‌دست آمد. بازه انتقال تکانه $۰٫۰۲$ Å^{-1} تا $۰٫۴۷$ Å^{-1} از یک تابش‌دهی آشکارساز به‌دست آمد. منحنی (ث) منحنی بازتابندگی اندازه‌گیری‌شده با روش روبش زاویه با زمان اندازه‌گیری تقریباً ۳۰ min است (دوایر سیاه کوچک توپر). ضخامت لایه طلا از منحنی (ث) $۱۳٫۰$ nm و از منحنی (الف) $۱۲٫۵$ nm تخمین زده‌شد. منحنی‌های (ب)- (ت) به‌ترتیب در زمان ۱۰۰ s، ۱۰ s و ۱ s با روش حاضر اندازه‌گیری شد. سهم پراکندگی پخشیده در اندازه‌گیری حالت روبش زاویه‌ای کاسته نمی‌شود، درحالی‌که در اندازه‌گیری‌های با روش فوق کاسته می‌شود.



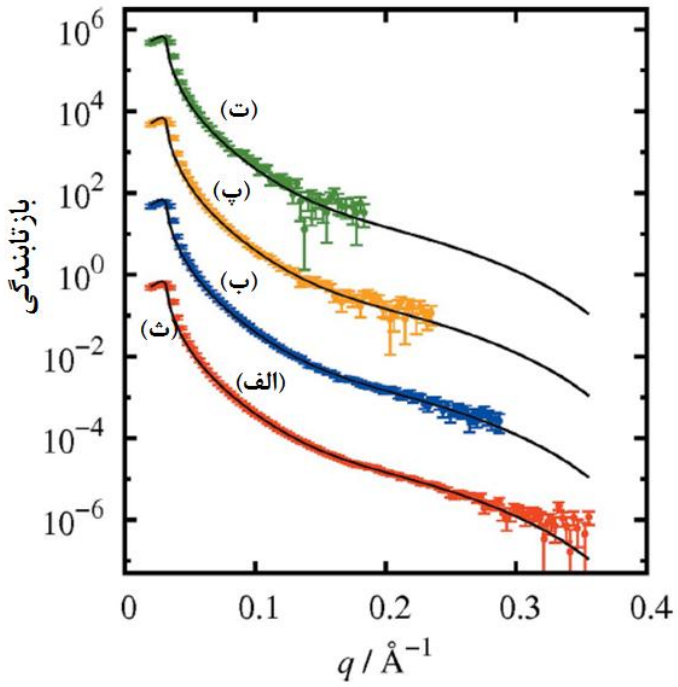
شکل ت-۲- منحنی‌های بازتابندگی اندازه‌گیری‌شده برای یک لایه نازک طلا روی یک زیرلایه SiO_2/Si. زمان تابش‌دهی برای منحنی (الف) ۱۰۰۰ s ، برای منحنی (ب) ۱۰۰ s، برای منحنی (پ) ۱۰ s و برای منحنی (ت) ۱ s بود. منحنی‌های (ب)- (ت)، هر کدام دو مرتبه بزرگی به‌صورت عمودی به‌منظور دستیابی به وضوح بیشتر، انتقال یافته‌است. منحنی (ث) با روش روبش زاویه‌ای اندازه‌گیری شد. بقیه منحنی‌های نشان‌داده‌شده با دایره‌های توپر سیاه‌رنگ همانند منحنی (ث) هستند و درتوافق با منحنی‌های (ب)- (ت) انتقال یافته‌اند

حتی با زمان تابش‌دهی ۱ s، منحنی بازتابندگی به میزان بازتابندگی اندازه‌گیری‌شده 10^{-4} کاهش یافت. کمینه بازتابندگی قابل‌اندازه‌گیری از مرتبه 10^{-5} و 10^{-6} برای زمان تابش‌دهی ۱۰s و ۱۰۰ s بود. توافق بین منحنی‌های اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله روش حاضر و روش مرسوم روبش زاویه‌ای تا بازتابندگی 10^{-5} رضایت‌بخش است. در بازتابندگی‌های کم، بازتابندگی اندازه‌گیری‌شده با روش حاضر کمتر از منحنی‌هایی است که با روش روبش زاویه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. این موضوع بدان دلیل است که در روش روبش زاویه‌ای پس‌زمینه کاسته نمی‌شود، درحالی‌که در روش حاضر پس‌زمینه کاسته می‌شود.

منحنی‌های بازتابندگی حاصل از نمونه لایه نازک طلای یکسان اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله تابش سنکروترون قوی از یک آندولاتور مخروطی قبلا گزارش شده‌است. در این حالت، بازتابندگی تا 5×10^{-7} در ۱ s اندازه‌گیری شده‌است و به‌صورت همزمان بازه انتقال تکانه اندازه‌گیری‌شده ۰٫۴ Å^{-1} بود.

منحنی‌های بازتابندگی از یک ویفر سیلیکونی (۰۰۱) نیز اندازه‌گیری شد (شکل (پ-۳). برای ویفر سیلیکون، منحنی‌های بازتابندگی تا 10^{-5} و 10^{-6}، به ترتیب با زمان تابش‌دهی ۱۰ s و ۱۰۰ s، اندازه‌گیری شد. بازه اندازه‌گیری‌شده q کوچک‌تر از لایه طلا است که به‌دلیل بازتابندگی پایین‌تر در q بالا است.

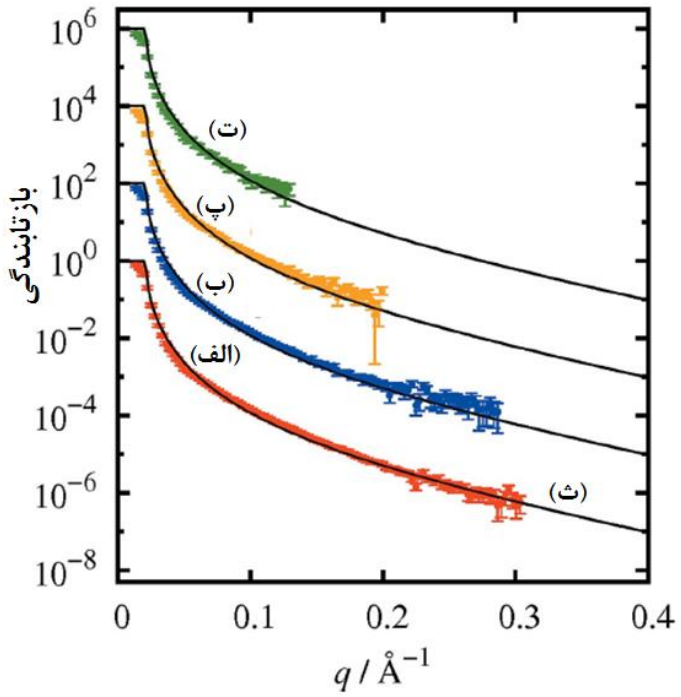
برازش منحنی بازتابندگی (الف) شکل (پ- ۳) به مدلی با لایه SiO_2 روی زیرلایه سیلیکون به‌وسیله نرم‌افزار GenX، چگالی $2{,}11\ g/cm^3$ ، ضخامت $24/8\ \text{Å}$ و ناصافی $4{,}7\ \text{Å}$ برای لایه SiO_2، را به‌دست می‌دهد. مقادیر برای یک ویفر سیلیکون منطقی است. بازتابندگی از مدل بهترین برازش با خطوط توپر در شکل (پ-۳) نشان داده شده‌است.



شکل پ- ۳- منحنی‌های بازتابندگی ویفر سیلیکون (۰۰۱). زمان اندازه‌گیری برای منحنی (الف) ۱۰۰۰ s، برای منحنی (ب) ۱۰۰ s، برای منحنی (پ) ۱۰ s و برای منحنی (ت) ۱ s بود. منحنی‌های (ب)- (ت)، هر کدام دو مرتبه بزرگی به‌صورت عمودی به‌منظور دستیابی به وضوح بیشتر، انتقال یافته‌است. منحنی (ث) بازتابندگی محاسبه‌شده از مدل بهترین برازش را نشان می‌دهد. بقیه خطوط توپر همانند منحنی (ث) هستند و درتوافق با منحنی‌های (ب)- (ت) انتقال یافته‌اند

علاوه‌برآن، بازتابندگی از سطح اتیلن گلیکول مایع اندازه‌گیری شده تا نشان دهد که روش حاضر برای نمونه‌های مایع نیز مناسب است. شرط این موضوع آن است که سطح نمونه حین اندازه‌گیری افقی نگه‌داشته شود (شکل (پ-۴). خطوط توپر در شکل (پ-۴) بازتابندگی محاسبه‌شده با روش مشابه روش گزارش‌شده توسط یانو[1] و همکارانش را نشان می‌دهد. مغایرت بین منحنی‌های اندازه‌گیری و محاسبه‌شده در زوایه‌های کوچک ($q \sqcup 0{,}04\text{Å}^{-1}$) ناشی از براورد اضافی پس‌زمینه در ناحیه‌ای است که با پراکندگی پخشیده همپوشانی می‌کند.

1 - Yano

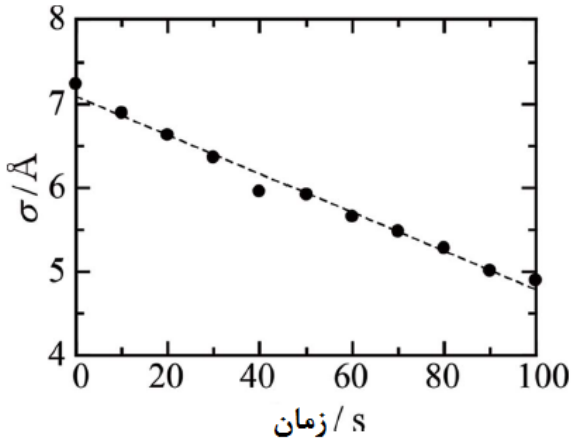


شکل پ-۴- منحنی‌های بازتابندگی اتیلن گلیکول مایع. زمان اندازه‌گیری برای منحنی (الف) ۱۰۰۰ s، برای منحنی (ب) ۱۰۰ s، برای منحنی (پ) ۱۰ s و برای منحنی (ت) ۱ s بود. منحنی‌های (ب)- (ت)، هر کدام دو مرتبه بزرگی به‌صورت عمودی به‌منظور دستیابی به‌وضوح بیشتر، انتقال یافته‌است. خطوط توپر (ث) بازتابندگی محاسبه‌شده را نشان می‌دهد. بقیه خطوط توپر همانند منحنی (ث) هستند و درتوافق با منحنی‌های (ب)- (ت) انتقال یافته‌اند

پ-۳ اندازه‌گیری تفکیک زمانی

اندازه‌گیری تفکیک زمانی نیز انجام شد. نمونه، تک بلور (TiO_2) روتایل با سطح (۰۰۱) است. این مشخص است که تحت تابش نور فرابنفش، آلودگی آلی روی سطح تجزیه شده و سطح تمیز و آب‌گریز می‌شود. سطح بلور با سونیک‌کردن به‌وسیله استون تمیز می‌شود و در ادامه با آب فراخالص آب‌کشی شده، و سپس به اسید اولئیک آغشته می‌شود. روی بازتاب‌سنج، سطح نمونه به‌وسیله نور UV (فیلتر پایین- گذر ۳۸۵ nm، ۴۷۰ $mW\,cm^{-2}$) تابش‌دهی می‌شود.

اندازه‌گیری‌های بازتاب‌سنجی پرتوی ایکس حین تابش‌دهی نور UV با زمان تابش‌دهی ۱۰ s انجام شد. شکل (پ-۵) داده‌های بازتابندگی اندازه‌گیری‌شده نرمال‌شده به بازتابندگی فرنل فصل‌مشترک TiO_2 را نشان می‌دهد. افزایش قابل‌توجهی در بازتابندگی حین تابش‌دهی UV مشاهده شد.



شکل پ-۵- وابستگی زمانی ناصافی سطح، سطح (۰۰۱) TiO_2 آغشته‌شده با اسید اولئیک تحت تابش نور UV

بازتابندگی از فصل‌مشترک ضریب‌شکست گرادیانی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$R(q) = R_F(q)\exp\left(-q^2\sigma^2\right) \qquad (پ-۴)$$

که در آن $R_F(q)$ بازتابندگی فرنل و ناصافی σ مقیاس پهنای ناحیه با ضریب‌شکست گرادیانی هستند. وابستگی زمانی ناصافی فصل‌مشترک تخمین‌زده شده با استفاده از معادله (پ-۴) در شکل (پ-۵) نشان داده شده‌است. ناصافی سطح TiO_2 وابسته به خودتمیزشوندگی سطح تحت تابش نور UV کاهش یافت.

پیوست ت

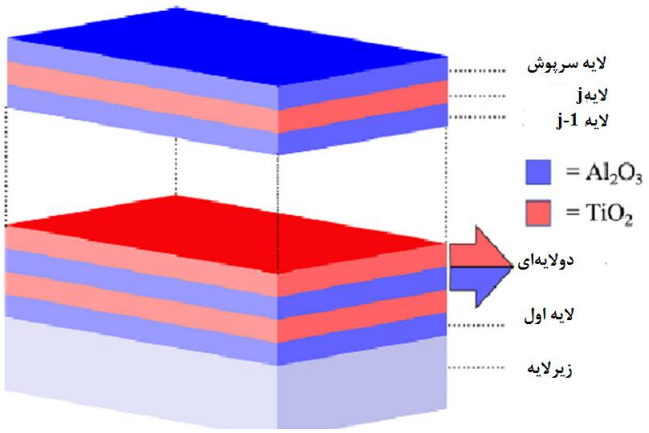
(آگاهی‌دهنده)

مشخصه‌یابی بازتابندگی پرتوی ایکس از رسوب نانو لایه اتمی Al_2O_3/TiO_2 دولایه‌های بسیارنازک تکرارشونده [23]

خواص ساختاری نانولایه اتمی Al_2O_3/TiO_2 دولایه‌ای تکرارشونده به‌وسیله بازتابندگی پرتوی ایکس XRR مطالعه شده‌است. روش XRR روشی غیرتخریبی و قدرتمند است که برای مطالعه ضخامت، چگالی و ناصافی نانولایه نازک استفاده می‌شود. نانولایه‌های دولایه‌ای تکرارشونده (نانولمینیت) بسیار نازک با ضخامت‌های لایه متغیر مشخصه‌یابی می‌شوند تا ضخامت لایه مشاهده‌پذیر کمینه تعیین شود [23].

ت- ۱ آزمون‌ها

در این بند، یک دولایه‌ای متشکل از یک لایه Al_2O_3 و یک لایه TiO_2 بررسی می‌شود. نمونه‌ها روی زیرلایه‌های Si شش اینچی در یک واکنشگاه[1] Picosun™ R-150 ALD از پیش‌سازهای Me_3Al، $TiCl_4$ و H_2O رسوب‌نشانی شده‌است. دمای رسوب‌نشانی برای همه نمونه‌ها ۲۰۰°C بود. نمایش طرحواره ساختار نانولمینیت‌ها در شکل (ت-۱) نشان داده شده‌است. توالی لایه متناوب با لایه Al_2O_3 شروع شده و زوج لایه‌ها رسوب‌نشانی‌شده تا ضخامت کل نانولمینیت‌ها، ۱۰۰ nm شکل می‌گیرد. نانولمینیت‌ها با یک سرپوش از لایه ۲ nm نانومتری Al_2O_3 پوشانده می‌شود. نمونه‌ها از دو لایه‌ای‌هایی با ضخامت ۰٫۱ nm تا ۵۰ nm ساخته شده‌است.



شکل ت-۱- نمای طرحواره یک ساختار نانولمینیت

اندازه‌گیری‌ها به‌وسیله شرایط باریکه موازی، طول‌موج پرتوی ایکس Cu Kα، با ولتاژ شتاب ۴۰ kV و جریان آند ۴۰mA انجام شده است. منحنی‌های بازتابندگی اندازه‌گیری‌شده که با استفاده از نرم‌افزار

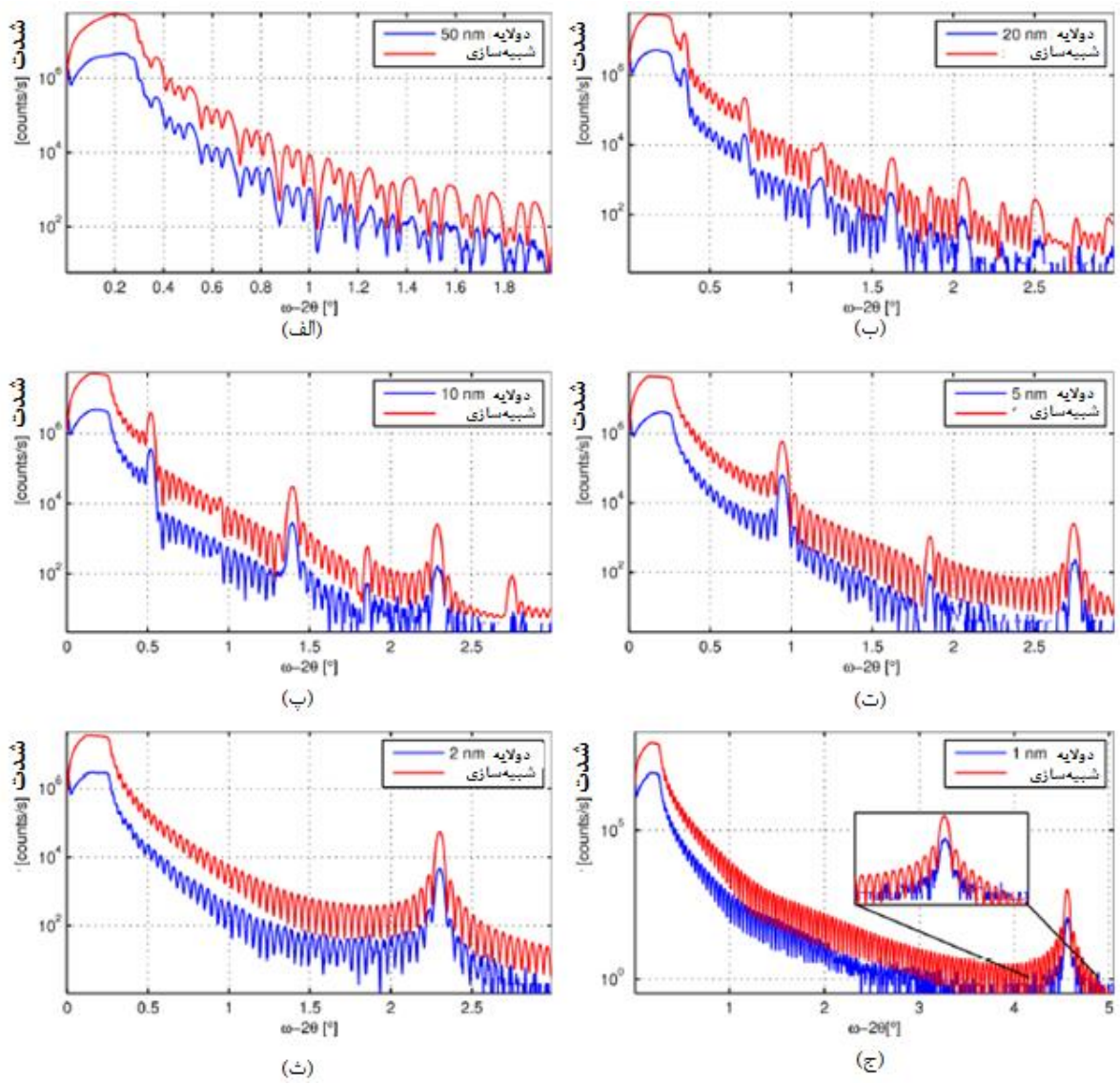
1 - Reactor

X' pert Reflectivity شبیه‌سازی شده‌است تا ضخامت، چگالی و ناصافی نانولمینیت‌های دولایه‌ای را تعیین کند.

چگالی TiO2 با فرض چگالی ثابت Al_2O_3، $\rho = ۳/۰۵\ g/cm^3$، شبیه‌سازی شده‌است.

ت-۲ نتایج

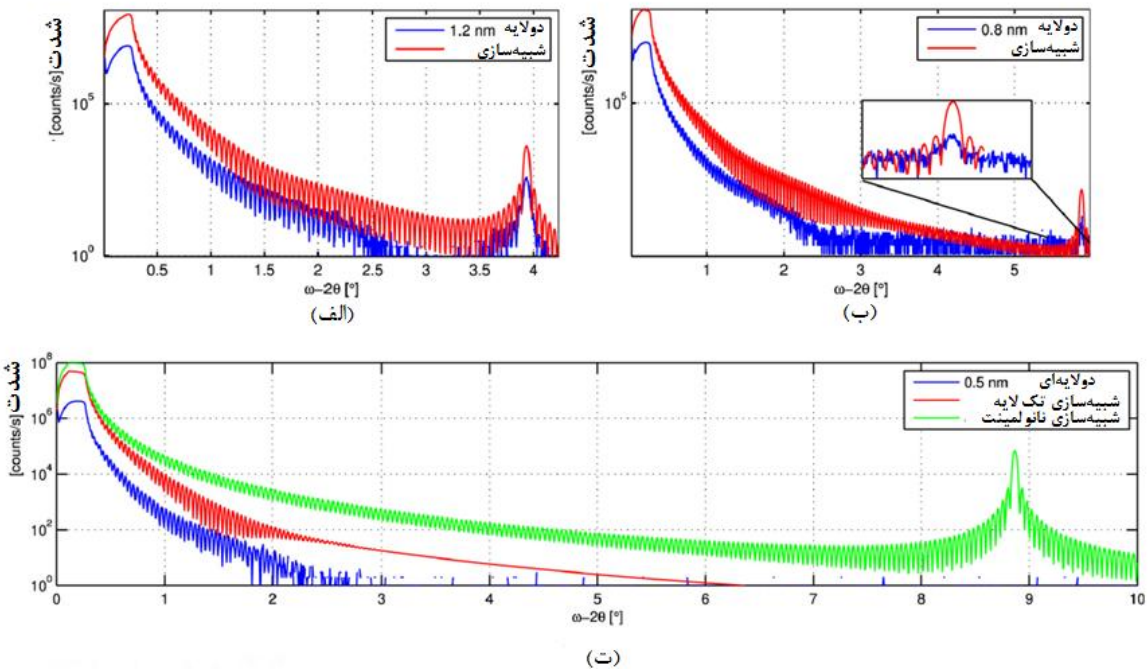
منحنی‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌شده نمونه‌ها با ضخامت‌های دولایه‌ای موردنظر در بازه ۱nm تا ۵۰ nm در شکل (ت-۲) نشان داده شده‌است. شبیه‌سازی‌ها به‌صورت عمودی جابه‌جا شده‌اند تا وضوح بهتری حاصل شود.



شکل ت-۲- منحنی‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری XRR نمونه‌هایی با ضخامت‌های دولایه‌ای موردنظر در بازه ۱ nm تا ۵۰nm. منحنی‌های شبیه‌سازی برای دستیابی به وضوح بیشتر به‌صورت عمودی جابه‌جا شده‌اند. موقعیت‌های بیشینه‌ها مرتبط با ضخامت دولایه‌ای‌ها و تیزی آن‌ها وابسته به یکنواختی ضخامت است

شکل ت-۲ نشان می‌دهد که چگونه منحنی‌های XRR به‌تدریج با کاهش ضخامت دولایه‌ای‌ها و افزایش تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد. بیشینه‌های تیز که در ابتدا در نمونه دو لایه‌ای ۲۰ nm مشاهده می‌شوند (شکل ت-۲-ب) مشخصه ساختارهای ابرشبکه هستند و دلالت بر آن دارند که دولایه‌ای‌ها بسیار یکنواخت و دارای فصل‌مشترک تیز هستند. در شکل (ت-۲-ج) مشاهده می‌شود که اندازه‌گیری دولایه‌ای ۱ nm به سطح نویز می‌رسد اما بیشینه متناظر با تکرار لایه ۰/۵ nm≈ هرگز در ۴/۶°≈ مشاهده نمی‌شود. این نتیجه مشخص می‌کند که لایه‌های TiO_2 و Al_2O_3 رسوب‌نشانی‌شده حتی در چنین ضخامت تک‌لایه‌ای کوچکی در ساختار لایه‌ای مجزا، باقی می‌مانند.

اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌های XRR از نمونه‌های دولایه‌ای با ضخامت ۱٫۲، ۰٫۸ و ۰٫۵ nm در شکل (ث-۳) نشان داده شده‌است. به‌وضوح مشاهده می‌شود که ساختار ۱٫۲ nm (شکل (ت-۳- الف) بیشینه ابرشبکه‌ای را نمایش می‌دهد. بیشینه متناظر دولایه‌ای ۰٫۸ nm (شکل (ت-۳- ب) به‌سختی قابل تمایز است. داده‌های XRR ساختار دولایه‌ای ضخیم ۰٫۵ nm فاقد بیشینه ابرشبکه بوده و فقط نوساناتی با تناوب کوچک مرتبط با ضخامت کل نشان می‌دهند.



شکل ت-۳- منحنی‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نمونه‌ها با ضخامت‌های دولایه‌ای موردنظر در بازه ۱٫۲ تا ۰٫۵nm. منحنی‌های شبیه‌سازی به‌منظور دستیابی به وضوح بهتر به‌صورت عمودی جابه‌جا شده‌است. موقعیت‌های بیشینه‌ها به ضخامت دولایه‌ای و تیزی بیشینه‌ها به یکنواختی ضخامت لایه مرتبط است

تعداد دوره رشد و نتایج بر پایه شبیه‌سازی اندازه‌گیری‌های XRR در جدول (ت-۱) خلاصه شده‌است، که در آن t_{BL}، ضخامت دولایه‌ای، ρ، چگالی جرمی، و σ، ناصافی فصل‌مشترک هستند. میزان TiO_2 به‌صورت ضخامت وزن‌دهی‌شده با میانگین چگالی TiO_2 محاسبه شده‌است. ضخامت‌های شبیه‌سازی‌شده در توافق خوبی با ضخامت موردنظر هستند، اگرچه مقادیر شبیه‌سازی‌شده به‌صورت سامانمند ٪۳≈ کوچک‌تر از مقادیر موردنظر است. این عدم تطابق نسبتاً کوچکی است و نتیجه تعداد دوره مقیاس‌شده خطی از مقادیر مورداستفاده برای فیلم‌های ضخیم‌تر با عدم قطعیت در مقدار ضخامت است.

جدول ت-۱- تعداد دوره ALD برای لایه‌های منفرد و یک خلاصه از نتایج XRR برای نمونه‌ها با مقادیر ضخامت دولایه‌ای در بازه ۰/۱ تا ۵۰ nm. میزان TiO_2 به‌صورت میانگین چگالی TiO_2 وزن‌دهی‌شده ضخامت محاسبه شده‌است

	$\sigma(nm)$		$\rho(gcm^{-3})$		$t(nm)$				لایه/دوره	
میزان TiO_2 (٪)	$Al_2O_3 \mid TiO_2$		$Al_2O_3 \mid TiO_2$		$Al_2O_3 \mid TiO_2$		$t_{BL}(nm)$ اندازه‌گیری‌شده	دوره نسبت TiO_2/Al_2O_3	TiO_2	Al_2O_3	$t_{BL}(nm)$ موردنظر
	۰/۹		۳/۳۵		۱۳۸/۵		تک‌لایه	۱	۱	۱	**۰/۱۰**
	۰/۹		۳/۷۰		۹۴/۰		تک‌لایه	۳	۳	۱	**۰/۲۵**
	۰/۹		۳/۰۵	۳/۹۰	۱۱۰/۵		تک‌لایه	۲	۶	۳	**۰/۵۰**
۵۶	۰/۳	۰/۳	۳/۰۵	۴/۰۰	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۷۶	۲/۵	۹	۴	**۰/۸۰**
۵۶	۰/۳	۰/۴	۳/۰۵	۳/۹۰	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۹۷	۲/۴	۱۲	۵	**۱/۰۰**
۵۶	۰/۲	۰/۴	۳/۰۵	۳/۷۰	۰/۵۶	۰/۵۶	۱/۱۲	۲/۵	۱۵	۶	**۱/۲۰**
۵۳	۰/۳	۰/۲	۳/۰۵	۳/۷۵	۰/۹۳	۱/۰۰	۱/۹۳	۲/۵	۲۵	۱۰	**۲/۰۰**
۵۸	۰/۳	۰/۳	۳/۰۵	۳/۷۵	۲/۵۵	۲/۳۰	۴/۸۵	۲/۴	۶۲	۲۶	**۵/۰۰**
۵۷	۰/۳	۰/۳	۳/۰۵	۳/۷۵	۵/۰۰	۴/۷۰	۹/۷۰	۲/۴	۱۲۳	۵۲	**۱۰/۰**
۵۶	۰/۳	۰/۳	۳/۰۵	۳/۷۵	۹/۹۰	۹/۵۰	۱۹/۴۰	۲/۴	۲۴۷	۱۰۴	**۲۰/۰**
۵۶	۰/۳	۰/۳	۳/۰۵	۳/۸۰	/۵۰ ۲۴	۲۳/۷۰	۴۸/۲۰	۲/۴	۶۱۷	۲۵۹	**۵۰/۰**

نتایج XRR دولایه‌ای‌های نازک‌تر از ۲ nm چگالی میانگین بالاتر، را که دلالت بر افزایش مشارکت TiO_2 دارد، حاصل می‌کند. مقادیر چگالی افزایش‌یافته با اندازه‌گیری‌های پیاپی اعتباردهی نمی‌شوند. از آنجاکه XRR یک روش میانگین‌گیری است، چگالی اندازه‌گیری‌شده لایه‌های بسیار نازک، به‌وسیله چگالی‌ها و ضخامت‌های موادسازنده آن‌ها تحت‌تأثیر قرار می‌گیرند. بنابراین، محتمل است که ضخامت لایه‌های TiO_2 نسبت به لایه‌های Al_2O_3 در دولایه‌ای‌های ضخیم‌تر از ۲ nm بیشتر باشد. ضخامت‌های منفرد دولایه‌ای‌های ۲ nm≥ به‌دلیل فقدان بیشینه‌های چندگانه ابرشبکه نمی‌تواند به‌درستی برازش شود. آن‌ها با فرض ضخامت‌های برابر یا نزدیک برابر برازش شدند.

جدول (ت-۱) نشان می‌دهد که چگالی‌ها و ضخامت‌های فیلم به‌شدت در نمونه‌هایی با تجزیه لایه‌های $Ti_xAl_yO_z$ تغییر می‌کند. مقادیر چگالی نتیجه تغییر در نسبت‌های دوره TiO_2/Al_2O_3 ناشی از تعداد دوره کوچک است. ضخامت در توافق خوبی با عدد کل دوره‌ها است که در جدول (ث- ۱) نشان داده نشده‌است.

ت-۳ نتیجه‌گیری

نانولمینیت‌ها، ساختار لایه‌ای تناوبی را تا ضخامت لایه منفرد ۰٫۳۸ nm حفظ می‌کنند و پس از آن به لایه‌های تک $Ti_xAl_yO_z$ تجزیه می‌شوند. اندازه‌گیری‌های XRR نشان می‌دهد که لایه‌ها با فصل‌مشترک تیز یکنواخت هستند. نشان داده شده‌است که XRR روشی ارزشمند برای مشخصه‌یابی نانولمینیت دولایه‌ای با لایه‌های بسیار نازک هستند.

کتاب‌نامه

[1] D. Keitch Bowen and Brian K. Tanner, *X- Ray Metrology in Semiconductor Manufacturing*, Taylor and Francis, London, 2006.

[2] M. Tolen, X- Ray Reflectivity from Soft Matter Thin Film, *Springer Tracts in Modern Physics*, Vol. 148, 1999.

[3] U. Pietsch, V. Holy and T. Baumbach, *High Resolutior X- Ray Scattering from Thin Films to Lateral Nanostructures*, Springer, 2004.

[4] J. Dianlant and A. Gilbaud, *X- Ray and Neutron reflectivity; principles and applications*, Springer, 2009.

[5] Gibaud A., Chebil M.S., Beuvier T. X-Ray Reflectivity. In: Bracco G., Holst B. (eds) Surface Science Techniques. Springer Series in Surface Sciences, vol 51. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.

[6] Windover, D. A., & Gil, D. L. Limitations of X-ray reflectometry in the presenceof surface contamination, *Journal of Physics D-Applied Physics*, 45, 2012.

[7] Martin K. Advanced analysis techniques for X-ray reflectivities. Theory and application, Zimmermann, Dortmund Univ. (Germany). Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultaet

[8] Pietsch U., Holy V., Baumbach T. *High-resolution X-ray scattering*. Springer, 2004

[9] Daillant J., & Gibaud A.eds. *X-ray and Neutron Reflectivity*. Springer, 2009.

[10] Feranchuk I.D., Minkevich A.A., Ulyanenkov A.P. About non-Gaussian behaviour of the Debye-Waller factor at large scattering vectors. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2003, **24** p. 21.

[11] Ulyanenkov A., Omote K., Harada J. The genetic algorithm: refinement of X-ray reflectivity data from multilayers and thin films. *Physica B*. 2000, **283** p. 237.

[12] Ulyanenkov A., & Sobolewski S. Extended genetic algorithm: application to x-ray analysis. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2005, **38** p. 235.

[13] Wormington M., Panaccione C., Matney K.M., Bowen D.K. Characterization of structures from X-ray scattering data using genetic algorithms. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A.* 1999, **357** pp. 2827–2848.

[14] Nelder J.A., & Mead R. A simplex method for function minimization. *Comput. J.* 1965, **7** p. 308.

[15] Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Q. Appl.Math.* 1944, **2** p. 164.

[16] Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. Optimization by simulated annealing. *Science*. 1983, **220** p. 671.

[17] Goldberg D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addis on-Wesley Longman, Bonn, **Vol. 1**, 1989.

[18] Colombi P. et al. Reproducibility in X-ray Reflectometry: results from the first world-wide round robin experiment. *J. Appl. Cryst.* 2008, **41** pp. 143–152.

[19] Matyi R.J. et al. The International VAMAS Project on X-Ray Reflectivity Measurements for Evaluation of Thin Films and Multilayers – Preliminary Results from the Second Round-Robin. *Thin Solid Films*. 2008, **516** pp. 7962–7966.

[20] ISO/IEC Guide 98-3, Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).

[21] ISO 25178-2, Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.

[22] Voegeli, W., Kamezawa, C., Arakawa, E., Yano, Y. F., Shirasawa, T., Takahashi, T., & Matsushita, T. A quick convergent-beam laboratory X-ray reflectometer using a simultaneous multiple-angle dispersive geometry. Journal of applied crystallography, 50(2), 570-575, 2017;

[23] Sintonen, S., Ali, S., Ylivaara, O. M., Puurunen, R. L., & Lipsanen, H. X-ray reflectivity characterization of atomic layer deposition Al2O3/TiO2 nanolaminates with ultrathin bilayers. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 32(1), 01A111. 2014.

[24] D. Keith Bown, Brian K- Tanner, X- ray metrology in semiconductor manufacturing, Taylor & Francis, 2006.

[25] ISO 11145:2018, Optics and photonics- Lasers and laser- related equipment- Vocabulary and symbols.

یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۷۳۶: سال ۱۳۹۶، اپتیک و فوتونیک- لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر- واژگان و نمادها، با استفاده از استاندارد ISO 11145:2016 تدوین شده‌است.

[26] ISO 11146-1, Lasers and laser- related equipment- Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratio- Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams;

یادآوری- استاندارد ملی ایران ۱-۱۱۷۱۰: سال ۱۳۸۷، لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای تعیین پهنا، زوایای واگرایی و نسبت انتشار پرتو لیزر- قسمت اول: پرتوهای آستیگماتیک و آستیگماتیک ساده، با استفاده از استاندارد ISO 11146-1:2005 تدوین شده‌است.