INSO
21559

1st.Edition
2017
Identical with
IEC/TS 62622: 2015

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran

سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۲۱۵۵۹

چاپ اول

۱۳۹۵

فناوری نانو- توصیف، اندازه‌گیری و پارامترهای کیفی ابعادی توری‌های مصنوعی

Nanotechnologies – Description, measurement and dimensional quality parameters of artificial gratings

ICS:07.030

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.org.ir

وبگاه: http://www.isiri.gov.ir

Iranian National Standardization Organization (INSO)

No.1294 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.org.ir

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

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک مادهٔ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است .

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان ، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود وکوششی 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 وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود .پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون‌های فنی 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 می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند درکمیتهٔ ملی طرح و بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود .بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)[1] ،کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می کند. 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 می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه-بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدورگواهی سامانه‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1 - International Organization for Standardization
2 - International Electrotechnical Commission
3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)
4 - Contact point
5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

« فناوری نانو- توصیف، اندازه‌گیری و پارامترهای کیفی ابعادی توری‌های مصنوعی»

رئیس:	سمت و/یا محل اشتغال:
پوی پوی، حسن (کارشناسی ارشد شیمی)	کارشناس کمیته فنی استاندارد سازی- ستاد توسعه فناوری نانو
دبیر:	
فتاح زاده، مهرداد (کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی)	کارشناس ارشد مجموعه خدمات مهندسی نیک تدبیر مهام
اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
ابریشم کار اصفهانی، آزاده (کارشناسی مهندسی کشاورزی)	مدیر عامل شرکت پارسیان توف سریرا
اسلامی‌پور، الهه (کارشناسی ارشد زیست شناسی)	کارشناس کارگروه استاندارد سازی- ستاد ویژه توسعه فناوری نانو
آقاجان، ناصر (کارشناسی مهندسی مکانیک)	کارشناس واحد کنترل پروژه شرکت پارسیان توف سریرا
ایاذی، جمیله (کارشناسی مهندسی الکترونیک)	معاون مدیر کل نظارت بر اجرای استانداردهای صنایع فلزی
جهانی، محمد سجاد (کارشناسی مهندسی صنایع)	کارشناس واحد کنترل پروژه شرکت پارسیان توف سریرا
دارابی، عادله (کارشناسی ارشد فیزیک)	دانشجوی دکتری فیزیک دانشگاه علم وصنعت
قشقایی، محمد مهدی (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	کارشناس دفتر امور تدوین پژوهشگاه استاندارد
کشاورز، محمد (کارشناسی ارشد شیمی)	معاون دفتر نظارت بر اجرای استانداردهای صنایع غیر فلزی پژوهشگاه استاندارد

محمدی، محمدرضا
(دکتری مهندسی مواد)
هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف

میرزاده، ساره
(کارشناسی مهندسی صنایع)
کارشناس واحد تدوین استاندارد شرکت پارسیان توف سریرا

نوروزی، وحید
(کارشناسی مهندسی مکانیک)
رئیس هیئت مدیره شرکت پارسیان توف سریرا

ویراستار:

سیفی، مهوش
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)
کارشناس استاندارد- بازنشسته سازمان ملی استاندارد ایران

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

پیش‌گفتار ی
مقدمه ک
۱ هدف و دامنه کاربرد ۱
۲ مراجع الزامی ۱
۳ اصطلاحات و تعاریف ۲
۳ -۱-۲ صفحه مرجع ۲
۳-۱-۳ دستگاه مختصات خصیصه‌ها ۳
۳ -۱-۴ الگوی شاخصه ۳
۳-۱-۵ مکان شاخصه X_i,Y_i,Z_i ۴
۳ -۱-۶ مسافت بین شاخصه‌ها ۵
۳-۲ واژگان توری ۵
۳-۲-۱ توری ۵
۳-۲-۲ گام ۵
۳-۲-۳ گام نامی ۶
۳-۲-۴ تعداد شاخصه‌های توری ۶
۳-۲-۵ گام میانگین ۶
۳-۲-۶ گام موضعی ۷
۳-۲-۷ طول نامی توری ۸
۳-۲-۸ طول مرز توری ۸
۳-۲-۹ طول مشخصه توری ۸
۳-۳ انواع توری ۸
۳-۳-۱ توری تک‌بعدی ۸
۳-۳-۲ توری دوبعدی ۱۰
۳ -۳-۳ توری سه‌بعدی ۱۱
۳-۳ -۴ توری زاویه‌ای ۱۱
۳-۳ -۵ توری‌های پیچیده ۱۱
۳-۳-۶ توری با گام دوگانه ۱۱
۳-۳-۷ توری‌های چیرپد ۱۱
۳-۴ اصطلاحات مربوط به کیفیت توری‌ها ۱۲
۳-۴-۱ انحراف از طول مرز ۱۲

۳-۴-۲ انحراف نسبی در طول‌مرز ۱۲
۳-۴-۳ انحراف در طول‌مشخصه ۱۲
۳-۴-۴ انحراف نسبی در طول‌مشخصه ۱۳
۳-۴-۵ انحراف مکان‌شاخصه ۱۳
۳-۴-۶ انحراف نسبی مکان شاخصه توری ۱۳
۳-۴-۷ انحراف مکان‌شاخصه از خطی‌بودن ۱۴
۳-۴-۸ انحراف نسبی مکان‌شاخصه از خطی‌بودن ۱۴
۳-۴-۹ انحراف قله-دره از خطی‌بودن ۱۴
۳-۴-۱۰ انحراف نسبی قله-دره از خطی‌بودن ۱۵
۳-۴-۱۱ انحراف rms از خطی‌بودن ۱۵
۳-۴-۱۲ انحراف نسبی rms از خطی‌بودن ۱۶
۳-۴-۱۳ انحراف از عمود بودن ۱۶
۳-۴-۱۴ اصطلاحات مربوط به انحراف توری فیلترشده ۱۶
۳-۵ روش‌های اندازه‌گیری مشخصه‌های توری ۱۷
۳-۵-۱ روش‌های کلی GM ۱۷
۳-۵-۲ روش‌های موضعی LM ۱۷
۳-۵-۳ روش‌های هیبریدی ۱۸
۴ نمادهای مورد استفاده ۱۸
۵ کالیبراسیون توری و روش‌های ارزیابی کیفیت توری ۱۹
۵-۱ بررسی اجمالی ۱۹
۵-۲ روش‌های کلی ۲۰
۵-۳روش‌های موضعی ۲۱
۵-۴ روش‌های هیبریدی ۲۲
۵-۵ مقایسه روش‌ها ۲۳
۵-۶ انحراف‌های دیگر از شاخصه‌های توری ۲۴
۵-۶-۱ کلیات ۲۲
۵-۶-۲ انحراف خارج از محور ۲۵
۵-۶-۳ انحراف‌های خارج از صفحه ۲۵
۵-۶-۴ انحراف‌های شاخصه‌های دیگر ۲۶
۵-۷ الگوریتم‌های صافی برای شناسایی کیفیت توری ۲۶
۶ گزارشی از نتایج شناسایی توری ۲۸
۶-۱ کلیات ۲۶
۶-۲ مشخصه‌های توری ۲۸

۶-۳ فرآیند کالیبرا ۲۸
۶-۴ پارامترهای کیفیت توری ۲۹

شکل۲- مثال‌هایی از الگوهای معین و مشخص ۴
شکل۳- مثال‌هایی از توری تک‌بعدی ۹
شکل۴- مثال‌هایی از توری دوبعدی ۱۰
جدول۱- مقایسه گروه‌های مختلف روش‌های ارزیابی توری‌ها ۲۳
شکل الف-۱ نتیجه کالیبراسیون دستگاه رمزگذار طولی ۳۵
شکل الف-۲ نتایج ارائه شده در شکل الف-۱ پس از فیلترکردن ۳۶
جدول الف-۱ پارامترهای کیفیت برای توری معرفی شده در شکل‌های الف-۱ و الف-۲ ۳۷
شکل الف-۳ کالیبراسیون توری یک‌بعدی به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی ۳۹
جدول الف-۲ پارامترهای کیفیت برای توری معرفی شده در شکل الف-۳ ۴۰
شکل الف-۴ کالیبراسیون انحراف گام و صافی یک توری دوبعدی ۴۱
جدول الف-۳ پارامترهای کیفیت برای توری معرفی شده در شکل الف-۴ ۴۲
شکل الف-۴ نتایج یک مقایسه بین المللی ۴۳
شکل ب-۱ شبکه براوه یک‌بعدی ۴۵
شکل ب-۲ ۵ شبکه براوه پایه در دو بعد ۴۶
شکل ب-۳، ۱۴ شبکه براوه اصلی در سه بعد ۴۷
جدول ب-۱ حجم شبکه‌های براوه ۴۸

پیش‌گفتار

استاندارد ««فناوری نانو- توصیف، اندازه‌گیری و پارامترهای کیفی ابعادی توری‌های مصنوعی» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی/منطقه‌ای به عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی شمارهٔ ۵ تهیه و تدوین شده، در چهلمین اجلاسیه کمیتهٔ ملی استانداردهای فناوری نانو مورخ ۹۵/۱۲/۱۶ 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 زمینه صنایع، علوم وخدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدید نظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، در هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط، مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

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

IEC/TS 62622: 2015 : Nanotechnologies – Description, measurement and dimensional quality parameters of artificial gratings

مقدمه

توری‌های مصنوعی نقش مهمی در فرایندهای ساخت ساختارهای کوچک در مقیاس‌نانو و همچنین در مشخصه‌یابی نانواشیاء ایفا می‌کنند.

به‌عنوان مثال، در تولید مدارهای مجتمع نیم‌رسانا به‌وسیله فنون لیتوگرافی[1] با حجم بالا، الگوی توری روی ماسک تصویری[2] و ویفر سیلیکونی[3] به‌صورت نوری مورد آزمون قرار گرفته است. علامت نوری بررسی شده برای اهداف هم‌ترازی نسبی ماسک نسبت به ویفر، در مراحل مختلف تولید لیتوگرافی در ابزارهای تولید ویفر- اسکن کننده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بحث ساخت نیم‌رساناها، مانند دیگر روش‌های تولید، دقت بالای مکان‌یابی در مقیاس‌نانو مورد نیاز می‌باشد. معمولا سامانه‌های رمزگذاری‌طولی یا زاویه‌ای که بر پایه توری مصنوعی می باشد، برای شناسایی محل محورهای متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر کاربردهای توری مصنوعی در فناوری نانو می‌توان به استانداردهای کالیبراسیون برای میکروسکوپ‌های وضوح بالا، مانند میکروسکوپ‌های کاوندروبشی[4]، میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی[5] یا میکروسکوپ الکترونی عبوری[6]، که ابزار مورد نیاز برای مشخصه‌یابی ساختار در مقیاس نانو می‌باشند، اشاره کرد.

کیفیت توری‌های مصنوعی که برای بازخورد مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولا دقت قابل دسترسی سامانه‌های همترازی یا مکان‌یابی در ابزارهای ساخت را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند. همچنین این مطلب در کاربرد توری‌های مصنوعی به عنوان استانداردهای کالیبراسیون برای بزرگنمایی تصویر میکروسکوپ با وضوح‌بالا که کیفیت توری نقش مهمی در عدم قطعیت کالیبراسیون قابل دسترسی استاندارد دارد، صادق بوده و برهمین اساس برای عدم قطعیت اندازه‌گیری قابل دستیابی میکروسکوپ نیز نقش مهمی دارد.

این استاندارد، بر مشخص کردن پارامترهای کیفی، که در قالب انحراف شاخصه‌های توری بیان می‌شوند، به‌همراه راهنمایی‌هایی درزمینه کاربرد روش‌های متفاوت اندازه‌گیری و ارزیابی مورد استفاده در کالیبراسیون و مشخصه‌یابی توری‌های مصنوعی، متمرکز شده است.

1- lithography techniques
2 -Photomask
3 -Silicon Wafer
4 -Scanning probe microscopes
5 -Scanning electron microscopes
6- Transmission electron microscopes

فناوری نانو- توصیف، اندازه‌گیری و پارامترهای کیفی ابعادی توری‌های مصنوعی

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین اصطلاحات کلی برای پارامترهای کیفی کلی و بومی برای توری‌های مصنوعی بر حسب انحراف شاخصه‌های توری است و راهنمایی‌هایی را در زمینه دسته‌بندی روش‌های اندازه‌گیری و ارزیابی فراهم می‌کند.

این استاندارد به منظور سهولت همکاری بین سازندگان، استفاده‌کنندگان و آزمایشگاه‌های کالیبراسیون که در ارتباط با مشخصه‌یابی پارامترهای کیفی ابعادی توری‌های مصنوعی مورد استفاده در فناوری‌نانو فعالیت می‌کنند، تدوین شده است.

این استاندارد در تولید و استفاده از توری‌مصنوعی در زمینه‌های مختلف کاربردی در فناوری نانو، تضمین کیفیت را تقویت می‌کند. با اینکه تعاریف و روش‌های توصیف شده کلی و قابل کاربرد برای محدوده وسیعی از توری‌های مختلف می‌باشند، در این استاندارد تمرکز بر روی توری‌های یک‌بعدی و دوبعدی است.

۲ مراجع الزامی

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

در صورتی که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدید نظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

۲-۱ استاندارد ملی ایران- ایزو آی ای سی شماره ۱۷۰۲۵، الزامات عمومی برای احراز صلاحیت آزمایشگاه-های آزمون و کالیبراسیون

۲-۲ استاندارد ملی ایران شماره ۱-۸۰۰۰۴، فناوری نانو- واژه نامه- قسمت ۱: اصطلاحات اصلی

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات با تعاریف زیر به‌کار می‌روند.

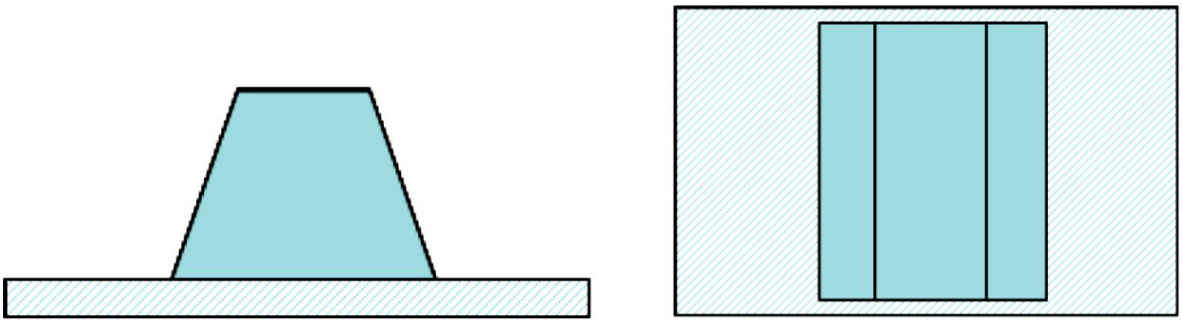
۳-۱ اصطلاحات اصلی

۳-۱-۱

شاخصه

feature

ناحیه‌ای در داخل مرزپیوسته که به یک صفحه مرجع ارجاع داده می‌شود.



تصویر از بالا **تصویر جانبی**

شکل۱- مثالی از خط ذوزنقه‌ای روی یک زیرلایه

مثال: در شکل ۱ یک شاخصه با مقطع ذوزنقه‌ای روی یک زیرلایه نشان داده شده است.

یادآوری ۱- این تعریف از صفحه ۳۵ مرجع شماره [1] (۵-۱-۵ شاخصه (لیتوگرافیک) استخراج شده است.

یادآوری ۲- درحالت‌کلی، یک شاخصه شیء سه‌بعدی می‌باشد. این شیء همچنین می‌تواند در مقیاس نانو باشد (در استاندارد ملی ۱-۸۰۰۰۴ تعریف شده است). شاخصه می‌تواند دارای اشکال مختلف باشد، می‌تواند یک نقطه، خط شیار و... باشد. شاخصه می‌تواند متقارن و یا غیرمتقارن باشد. شاخصه می‌تواند با زیرلایه هم‌جنس و یا غیرهم‌جنس باشد. شاخصه می‌تواند روی سطح زیرلایه و یا همراه با زیرلایه قرار داده شود (برخی مواقع به آن «شاخصه دفن شده[1]» اطلاق می‌شود).

یادآوری ۳- در مرجع [2] ،«شاخصه هندسی» معمولا به عنوان نقطه، خط یا سطح تعریف می‌شود.

۳-۱-۲

صفحه مرجع

reference plane

صفحه تعریف‌شده توسط کاربر که سطح بستر را تخمین زده و دارای یک سامانه هماهنگ مختصات است.

1 -Buried Feature

یادآوری ۱- این تعریف از مرجع [1] ارائه شده است.

۳-۱-۳

سامانه هماهنگ مختصات

feature coordinate system

دستگاه مختصات شاخصه

coordinate system

دستگاه مختصاتی دکارتی به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که صفحه مرجع، صفحه X-Y، جهت اصلی محور X و یک مکان مرجع مشخص مناسب، مبدا باشد.

یادآوری ۱- معمولا، مکان شاخصه مشخص به‌عنوان مرجع دستگاه مختصاتی دکارتی تعیین شده، به‌عنوان مثال، شاخصه اول در توری یک‌بعدی، یا توری پایینی رها شده در توری دوبعدی.

یادآوری ۲- در حالت‌های دیگر، مبدا را می‌توان به وسیله آنالیز مکان تمام شاخصه‌های مورد بررسی، مشخص کرد (به‌عنوان مثال مقدار میانگین تمام مکان‌ها در جهت محور Xها برای توری یک‌بعدی). در حالت توری دوبعدی، مبدا را می‌توان به‌وسیله روش رگرسیون کمترین توان‌های دوم[1] که تمامی مقادیر محور Xها را در بر می‌گیرد به همراه تمام مکان‌ها در جهت محور Yها در توری دوبعدی منتقل شده، از مبدا و چرخش کل توری دوبعدی، تعریف کرد (به‌عنوان هم‌ترازی چند نقطه‌ای شناخته می‌شود). در این حالت‌ها مرجع سامانه هماهنگ مختصات با یک شاخصه خاص مطابقت ندارد.

یادآوری ۳- مبدا می‌تواند به عنوان مکان شاخصه همتراز شده خاص یا شاخصه کمکی در صفحه مرجع انتخاب شود.

یادآوری ۴- در حالتی که از دستگاه زاویه‌ای استفاده شود مختصات باید در قالب دستگاه مختصات قطبی r, φ و یا در دستگاه استوانه‌ای r, φ, z تعریف شود.

۴-۱-۳

الگوی شاخصه

feature pattern

مجموعه‌ای از شاخصه‌ها که با تعداد، نوع و محل آنها مشخص می‌شود.

1-Least Squares regression

الگوی ساختاری بریکر　　تقاطع آرایه‌های خطی　　تقاطع دوتایی

شکل۲- مثال‌هایی از الگوهای شاخصه

مثال: شکل ۲ انواع مختلف الگوی شاخصه را نشان می‌دهد.

یادآوری ۱- انواع مختلف شاخصه می‌توانند به‌صورت متفاوت در قالب الگوی‌های شاخصه مختلف جانمایی شوند. این جانمایی می‌تواند به‌صورت ساده، مانند ساختار تقاطع ساده متشکل از ترکیب دو شاخصه خطی متعامد، یا به‌صورت پیچیده مانند ساختار متقاطع‌دوگانه یا آرایه‌خطی یا حتی پیچیده‌تر مانند شاخصه‌های‌خطی‌فضایی با فواصل نامنظم، باشد.

۳-۱-۵

مکان شاخصه

feature position

x_i, y_i, z_i

مختصات x_i, y_i, z_i در واقع مشخص‌کننده مکان مشخص شاخصه i از n عدد شاخصه مربوط به این مختصات تصویرشده روی صفحه مرجع نسبت به دستگاه مختصات تعیین شده، می‌باشد.

یادآوری۱ - برای توری‌های یک‌بعدی، مکان‌های X شاخصه در اولویت اول می‌باشند و جهتی که بیشترین شاخصه‌های توری در واحدطول را در آن شاهد باشیم به عنوان جهت X توری فرض می‌شود. در توری‌های دوبعدی، مکان‌های ترجیحی جهت X,Y می‌باشند. در هر دو حالت مکان Z از اهمیت کم‌تری برخوردار می‌باشد، تنها درصورتی‌که صفحه مرجع با محورهای مختصات دستگاه اندازه‌گیری کننده به خوبی همتراز شده باشد.

یادآوری۲- با توجه به محدوده مورد قبول برای بررسی مکان شاخصه (به یادآوری ۳ مراجعه شود)، مکان شاخصه اندازه‌گیری‌شده بستگی به اثر متقابل دستگاه اندازه‌گیری مورد استفاده برای مشخصه‌های شاخصه مانند شکل، اندازه و خواص مواد، دارد.

یادآوری۳- همچنین مشخص کردن مکان‌شاخصه در اغلب اوقات بر پایه آنالیز تصویر میکروسکوپی شاخصه می‌باشد. علائم آنالیز تصویر میکروسکوپی را می‌توان به روش‌های مختلفی برای مشخص کردن مکان شاخصه بررسی کرد. در اکثر موارد، مکان مرکز شاخصه موردتوجه بوده و قابل مشخص کردن می‌باشد، به‌عنوان مثال با محاسبه نقطه مرکزی میانگین مکان تمام شاخصه‌ها و با محاسبه مقدار میانگین مکان شاخصه قرار گرفته در سمت چپ و راست.

یادآوری۴- اگر فقط قسمت‌هایی از شاخصه مورد توجه باشند، به‌عنوان مثال، لبه مکان شاخصه خطی، تعیین مکان این لبه‌ها فقط بر اساس بخش‌هایی از شاخصه که موردتوجه بوده، تعیین شود.

یادآوری ۵- تعریف بالا از مکان شاخصه می‌تواند برای الگوی شاخصه نیز به‌کار رود.

یادآوری۶- درصورت بررسی توری‌های زاویه‌ای، مکان‌شاخصه بهتر است که در قالب دستگاه مختصات قطبی r, φ و یا در دستگاه استوانه ای r, φ, z تعریف شود.

۳-۱-۶
فاصله بین شاخصه‌ها

distance between features
d

فاصله بین مکان شاخصه‌های مشخص شده بر پایه ویژگی‌های همگن یا معادل در جهت مورد بررسی می-باشد.

یادآوری ۱- فاصله بین دو شاخصه i و i-1 متوالی در جهت محور X ها از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$d = abs\ (x_i - x_{i-1})$$

یادآوری ۲- فاصله بین دو شاخصه متوالی در صفحه X-Y به‌شرح زیر می‌باشد:

$$d = [(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2]^{0,5}$$

یادآوری ۳- فاصله بین دو نقطه متوالی در فضا از رابطه زیر به‌دست می‌آید که برای دو شاخصه iو i-1 متوالی می‌باشد:

$$d = [(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2]^{0,5}$$

یادآوری ۴- معمولا فاصله بین شاخصه‌ها به‌منظور مکان مرکز شاخصه موردنظر و بررسی آن می‌باشد. در برخی موارد فاصله مکان‌های قرار گرفته در گوشه‌های شاخصه می‌تواند مورد توجه باشد.

۳-۲
اصطلاحات مربوط به توری

grating terms

۳-۲-۱
توری

grating

مجموعه‌ای از شاخصه‌های همسان با فواصل دوره‌ای می‌باشد.

یادآوری ۱- در مرجع شماره[30]، که واژگان را برای پراش نوری ارائه کرده است، یک توری به عنوان«ساختار فضایی دوره‌ای برای استفاده نوری» (به بند ۳-۳-۱-۲مراجعه شود)عنوان شده است. در این استاندارد، توری‌ها فقط به مصارف نوری محدود نمی‌باشند.

یادآوری ۲- معمولا توری‌ها نسبت بین فاصله موجود بین شاخصه‌های همسان همسایه را که اندازه آنها به یک نزدیک است، نشان می‌دهند. هرچند، تعریف محدود به این موارد نبوده و توری‌هایی که به عنوان پراکنده شناخته می‌شوند و همچنین مقیاس خطی را نیز شامل می‌شود.

یادآوری ۳- اگرچه این استاندارد در اصل راجع به توری‌های دوره‌ای بحث می‌کند، تعریف پارامترهای کیفی توری باید برای توری‌های غیردوره‌ای نیز قابل استفاده باشد. مانند توری‌های چیرپد[1] در حدامکان.گاهی اوقات در مورد رویکرد صافی‌گذاری[2] رویکرد فضایی اطلاعات محدود می‌شود.

یادآوری ۴- بعضی مواقع یک توری می‌تواند به زیر توری‌های متفاوتی با شاخصه‌های مختلف تقسیم شود.

۲-۲-۳
گام

pitch
P

فاصله بین شاخصه‌های همسایه در یک توری، گام نامیده می‌شود.

یادآوری ۱- اغلب، مکان مرکز شاخصه برای مشخص کردن گام استفاده می‌شود، در برخی از موارد، از فاصله بین گوشه‌های معادل یک جفت شاخصه، برای مشخص‌کردن مقدار گام استفاده می‌شود.

یادآوری ۲- تعریف بالا هم‌سو با تعریف گام در مرجع [1] کتاب‌شناسی می‌باشد (۵-۱-۴).

۳-۲-۳
گام‌نامی

nominal pitch
p_{nom}

مقدارگام موردنظر نشان داده شده در مشخصات‌توری است.

۴-۲-۳
تعداد شاخصه‌های توری

number of grating features
N_f

جمع شاخصه‌های همسان در یک توری مصنوعی در جهت مورد نظراست.

یادآوری ۱- تعداد شاخصه‌های توری در توری‌های دوبعدی و سه‌بعدی در جهت‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد. جمع تمام شاخصه‌ها در توری دوبعدی و سه‌بعدی در نتیجه حاصل‌ضرب شاخصه‌ها در دو و یا سه جهت مختلف می‌باشد (مثلا نقطه‌ها در توری تک‌بعدی).

۵-۲-۳
گام میانگین

mean pitch

- p_m

متوسط فاصله گام‌ها که در تمام شاخصه‌های همسان یک توری است.

یادآوری ۱- گام میانگین لزوما میانگین حسابی نبوده و هر نوع میانگین آماری می‌تواند باشد.

1- Chirped Gratings
2 - Filtering

یادآوری ۲- اگر مکان تمام شاخصه‌های توری شناخته‌شده باشند، گام میانگین توری می‌تواند با روش رگرسیون کمترین توان‌های دوم خطی برای تمام مکان‌های شاخصه‌های اندازه‌گیری شده $X_{i,M}$ نسبت به مکان نامی شاخصه‌ها $X_{i,nom}$ معین شود. اگر عدم‌قطعیت مکان شاخصه‌های اندازه‌گیری‌شده برابر باشند، یک رگرسیون استاندارد خطی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در حالتی که تغییر در عدم‌قطعیت مشاهده شود، U_{Xi} برای مکان شاخصه‌های اندازه‌گیری‌شده $X_{i,M}$، رگرسیون خطی وزنی باید مورد استفاده قرار گیرد، که در این رگرسیون واریانس برعکس مانند وزن $(W_i= 1/(u_{xi})^2)$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. شیب به‌دست آمده m از رگرسیون خطی (نتایج به‌دست آمده برای شیب m و عرض از مبدا b) می‌تواند برای محاسبه میانگین اندازه گام $(p_m=m.p_{nom})$ با درنظرگرفتن اطلاعات مکانی شاخصه‌های توری، به‌کار رود.

یادآوری ۳- مقدار میانگین گام توری معمولا به عنوان طول دوره یا ثابت ۸ توری شناخته می‌شود.

یادآوری ۴- برای یک توری ایده‌ال، مقادیر میانگین گام‌ها، گام موضعی و گام برای تمام شاخصه‌های همسایه، همسان می‌باشد. برای توری‌های حقیقی، به‌هر صورت، مقادیر متفاوت می‌باشند، که با توجه به کیفیت توری و گستره‌های طولی مختلف که با آنها گام موضعی تعیین می‌شود، محاسبه خواهد شد. همچنین، قابلیت روش‌های اندازه‌گیری برای مشخص کردن مقادیر گام‌های مختلف روی توری غیرایده ال، متفاوت می‌باشد. بنابراین، روش‌های اندازه‌گیری، می‌تواند به گروه‌های مختلفی طبقه‌بندی شود (۳-۵ مشاهده شود).

یادآوری ۵- اگر طول‌مرز توری L_b (طبق زیربند ۳-۲-۸) و تعداد شاخصه‌های توری N_f (طبق زیربند۳ -۲-۴) شناخته‌شده باشد، می‌توان یک تقریب از میانگین گام‌ها با استفاده از رابطه $p_m=l_b/(N_f-1)$ که در آن N_f بزرگتر مساوی با ۲ می‌باشد، مشخص کرد. میانگین گام درصورتی‌که میانگین حسابی همه گام‌ها برای تمام شاخصه‌های همسایه محاسبه شوند، یکسان خواهد بود. قرمول جمع $\Sigma^{Nf-1}_{i=1}(x_{i+1} - x_i) / (N_f -1)$ برای محاسبه میانگین، تمام گام‌های توری مقادیر X_i تمام شاخصه-های توری به جز شاخصه‌های ابتدایی و انتهایی که حذف می‌شوند، استفاده می‌شود.(در هر دو حالت تخمین حاصل از میانیگن گام بر پایه مکان‌های شاخصه اول و آخر در توری به تنهایی گام میانگین حاصل از روش رگرسیون خطی به نسبت کل توری را بهتر توصیف می‌کند.

۶-۲-۳
گام‌موضعی

local pitch

***p_{loc}* (xc, lr)**

میانگین مقدار گام‌ها روی یک بازه طولی مشخص، L_r توری حول مکان‌شاخصه مشخص X_i را گام موضعی می‌نامند.

مثال: اگر یک گام موضعی نامی برابر با ۱ میلی‌متر در توری یک‌بعدی با گام نامی ۱۰۰ nm حول یک نقطه با x ۴۰۰ میکرونی با محدوده طول مشخص ۲۰ میکرون ارزیابی شود،گام‌موضعی باید به‌صورت زیر نشان داده شود (اگر شاخصه‌های توری به صورت عدد بیان شوند).

p_{loc} *(400 µm, 20 µm)* یا p_{loc} *(4001, 201)*

یادآوری۱- گام‌موضعی می‌تواند بر روی تعداد مشخصی از شاخصه‌های معین N_r متمرکز شده حول شاخصه ویژه‌ای با نمایه Nc تعریف شود. در این حالت نماد این گام موضعی به صورت p_{loc} *(Nc, Nr)* نوشته می‌شود.

۳-۲-۷

طول‌نامی توری

nominal length of grating

L_{nom}

طول موردنظر که در ویژگی‌های توری نشان داده شده است.

یادآوری ۱- طول توری در جهت توری بررسی می‌شود، یعنی در جهتی که شاخصه‌های توری در واحد طول بیشینه باشد.

۳-۲-۸

طول مرز توری

boundary length of grating

L_b

فاصله بین اولین و آخرین شاخصه یک توری (فاصله بین مرکز تا مرکز) طول مرز توری است.

یادآوری ۱- فاصله مرکز تا مرکز به عنوان حالت پیش فرض می‌باشد.

۳-۲-۹

طول‌مشخصه توری

characteristic length of grating

L_c

طول توری، براساس طول میانگین گام توری و تعداد شاخصه‌ها مشخص می‌شود.

$$L_c = p_m \cdot (N_f - 1)$$

یادآوری ۱- برای یک توری ایده ال، طول‌مشخصه، طول‌مرز توری و فاصله‌نامی توری یکسان می‌باشند، هرچند برای توری‌های واقعی این مقادیر متفاوت است.

۳-۳ اصطلاحات مربوط به انواع توری

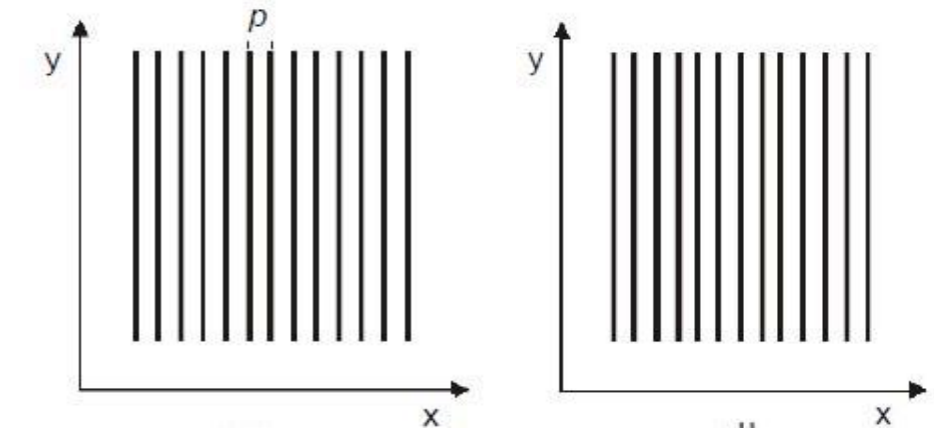
grating types

۳-۳-۱

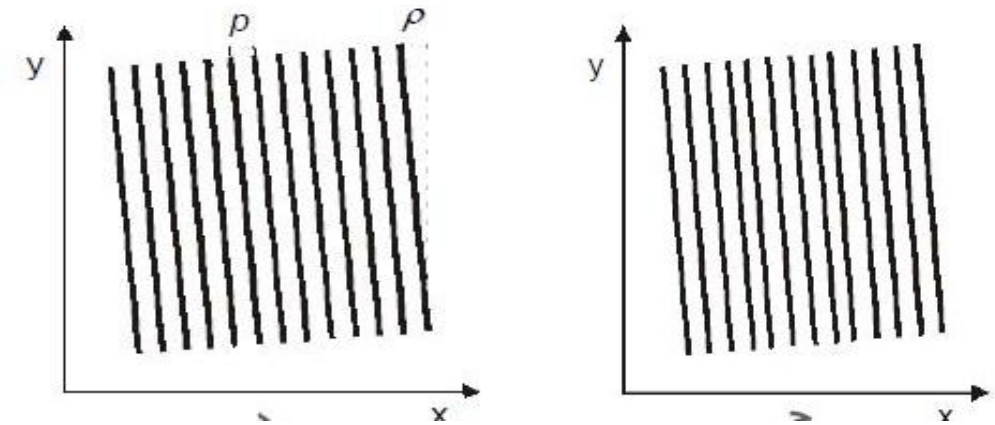
توری یک بعدی

1D grating

توری‌ای که شاخصه‌ها در صفحه مرجع تنها در یک جهت تکرار می‌شوند.



ب **الف**



ت **پ**

گام p در جهت توری مشخص می‌شود:

الف- توری ایده آل یک‌بعدی؛

ب- توری یک‌بعدی با تغییر موضعی گام؛

پ- توری ایده ال یک‌بعدی با انحراف زاویه‌ای $\mathbf{p}$ نسبت به محورهای $\boldsymbol{X,Y}$ دستگاه؛

ت- توری یک‌بعدی با تغییر موضعی گام در مکان‌های مختلف و انحراف زاویه‌ای نسبت به محورهای دستگاه.

شکل۳- مثال‌هایی از توری یک‌بعدی

مثال: شکل ۳ مثال‌هایی از توری‌های یک‌بعدی خطی را نشان می‌دهد.

یادآوری ۱- توری 1D به عنوان توری‌های یک‌بعدی مشخص می شود.

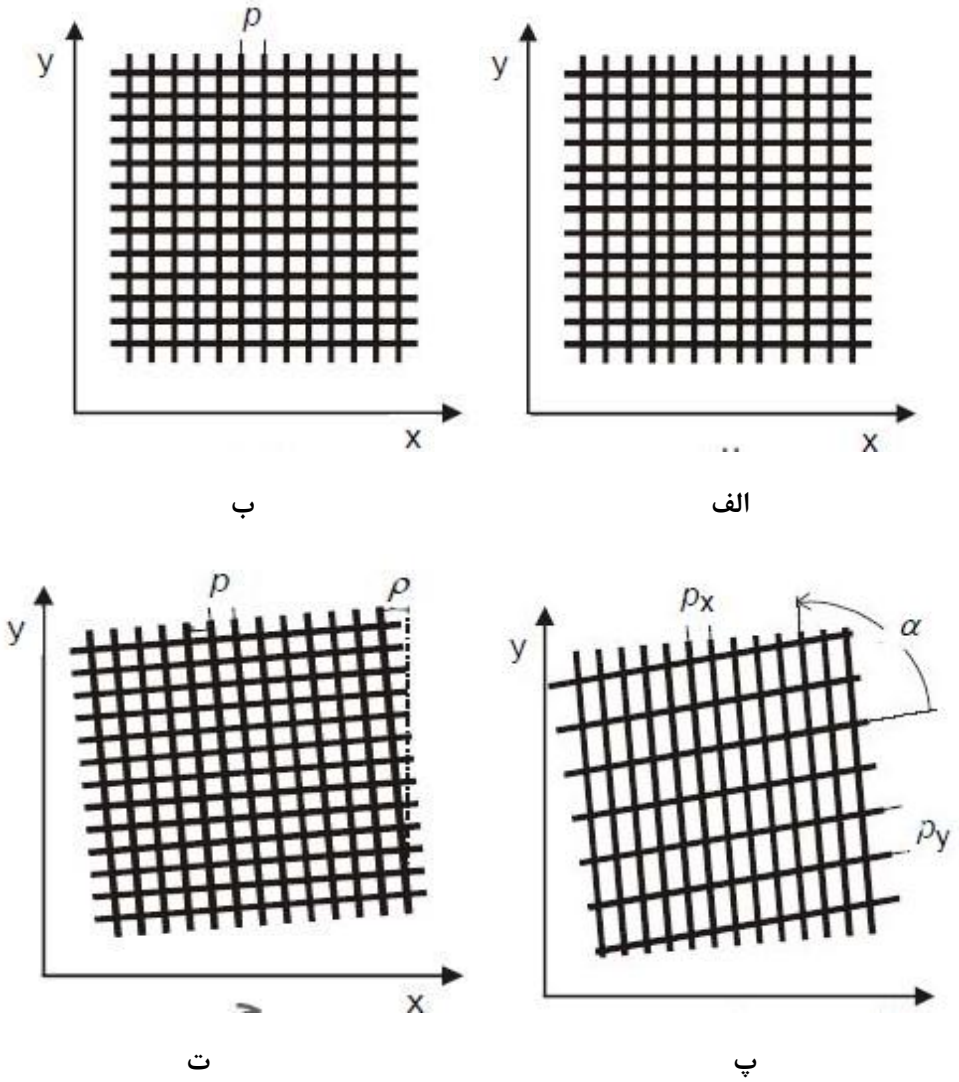
یادآوری۲- بر اساس یادآوری۲ با توجه به یادآوری ۳-۲-۱، یک مقیاس خطی می‌تواند به عنوان توری پراکنده یک‌بعدی نیز شناخته شود.

۲-۳-۳

توری دوبعدی

2D grating

توری‌هایی که شاخصه‌های آنها در دو جهت غیرموازی در صفحه مرجع تکرار می‌شوند.



ب **الف**

ت **پ**

گام‌های p_x, p_y در جهات توری مشخص شده اند:

الف- توری ایده آل دوبعدی؛

ب- توری دوبعدی با تغییر موضعی گام در هر دو جهت؛

پ- توری ایده ال دوبعدی با انحراف زاویه‌ای p نسبت به محورهای X,Y دستگاه؛

ت- توری دوبعدی با تغییر گام در مکان‌های مختلف و انحراف **زاویه‌ای** p نسبت به محورهای X,Y دستگاه.

شکل۴- مثال‌هایی از توری دوبعدی

مثال: شکل ۴ مثال‌هایی از توری‌های دو بعدی را نشان می‌دهد.

یادآوری ۱- معمولا دو جهت به صورت نامی در جهت محور x,y بر یکدیگر عمود می‌باشند.

یادآوری ۲- توری های دو بعدی به عنوان توری با دو بعد شناخته می‌شوند.

یادآوری ۳- انحراف از عمود بودن توری دو بعدی می‌تواند به صورت بند ۳-۴-۱۳ و مرجع شماره[5] توصیف شوند.

۳-۳-۳

توری سه‌بعدی

3D grating

توری‌هایی که شاخصه‌های آن در ۳ جهت غیر موازی شامل صفحه مرجع، تکرار می‌شوند.

یادآوری ۱- معمولا این ۳ جهت به صورت ۲ به ۲ بر یکدیگر به‌صورت نامی عمود می‌باشند مثلا در جهت محورهای X,Y,Z.

یادآوری ۲- توری 3 D به عنوان توری سه‌بعدی شناخته می‌شود.

یادآوری ۳- یک مثال از توری سه‌بعدی، بلور سه‌بعدی فوتونیک می‌باشد.

۴-۳-۳

توری زاویه‌ای

angular grating

توری‌ای که در مسیر دایره‌ای در داخل صفحه مرجع گسترش می‌یابد.

یادآوری ۱- در بیشتر موارد توری‌های زاویه‌ای در طول ۳۶۰ درجه یا یک دایره کامل کشیده می‌شوند، یعنی اولین و آخرین شاخصه در توری زاویه‌ای شاخصه‌های همسایه می‌باشند.

یادآوری ۲- توری‌های زاویه‌ای به عنوان توری شعاعی نیز شناخته می‌شوند.

۵-۳-۳

توری‌های پیچیده

complex grating

توری‌هایی که با بیش از یک اندازه گام نامی در جهت مورد بررسی، مشخص می‌شوند.

۶-۳-۳

توری با گام دوگانه

double pitch grating

توری‌های پیچیده‌ای که با دو گام مختلف در جهت مورد نظر مشخص می‌شوند.

۷-۳-۳

توری‌های چیرپد

Chirped grating

توری‌های پیچیده‌ای که در یک جهت مشخص، گام آنها با شیب یکنواخت موردنظر مشخص می‌شوند.

یادآوری ۱- تغییر یکنواخت[1] به این معنی است که مقدار گام‌ها در جهت مورد بررسی همواره افزایش یا کاهش یافته است.

۳-۴ اصطلاحات مربوط به پارامتر کیفیت توری‌ها [2]

۳-۴-۱
انحراف در طول مرز

deviation in boundary length
δL_b

اختلاف بین طول مرز اندازه‌گیری‌شده و طول نامی است،

$$\delta L_b = L_{b,m} - L_{nom}$$

که در آن:
$L_{b,m}$ طول مرز اندازه‌گیری شده؛
L_{nom}: طول مشخصه توری.

۳-۴-۲
انحراف نسبی در طول مرز

relative deviation in boundary length
$\delta L_{b,rel}$

انحراف در طول مرز نسبت به طول نامی است.

این پارامتر با رابطه روبه‌رو مشخص می‌شود:

$$\delta L_{b,rel} = \delta L_b / L_{nom}$$

۳-۴-۳
انحراف در طول مشخصه

deviation in characteristic length
δL_c

تفاوت بین طول مشخصه‌ی اندازه‌گیری شده و طول نامی است،

$$\delta L_c = L_{c,m} - L_{nom}$$

که در آن:
$L_{c,m}$ طول مشخصه اندازه‌گیری شده؛
L_{nom} طول نامی.

1- Monotonic Variation

۲- دو تعریف از انحراف شبکه در بند ۳-۴ پارامترهای کیفی شبکه را مشخص می‌نماید که برای هر شبکه‌ای قابل تعریف می‌باشد. اثر این پارامترهای کیفی شبکه می‌تواند اهمیت آن‌ها را در استفاده متفاوت تغییر دهد.

یادآوری ۱- انحراف پارامتر در طول مشخصه δL_c، یک پارامتر کیفی توری می‌باشد. در برخی کاربردها، طول مشخصه توری از پارامترها با اهمیت درجه دو محسوب می‌شود و پارامتر انحراف در طول نامی از اهمیت کمی برخوردار است.

۴-۴-۳

انحراف نسبی در طول مشخصه

relative deviation in characteristic length

$\delta L_{c,\,rel}$

انحراف در طول مشخصه نسبت به طول نامی است.

$$\delta L_{c,\,rel} = \delta L_c / L_{nom}$$

۵-۴-۳

انحراف مکان شاخصه

deviation in feature position

δx_i

اختلاف بین محل اندازه‌گیری مکان شاخصه و مکان نامی شاخصه، بر پایه گام نامی است،

$$\delta x_i = x_{i,\,m} - p_{nom} \cdot (i - 1)$$

که در آن:

$X_{i,m}$ عبارتست از محل اندازه‌گیری شده شاخصه i ام در توری که در جهت محور X ها می‌باشد؛

P_{nom} اندازه گام نامی توری می‌باشد.

یادآوری ۱- این رابطه برای توری با یک مقدار گام فرض‌شده است و برای توری‌های پیچیده نیز قابل کاربرد می‌باشد، مانند توری‌های چیرپد که همه مکان‌های نامی شاخصه‌ها مشخص شده است.

یادآوری۲- اگر جهت مکان‌های توری در جهت‌های دیگری باشد، تعریف طبق آن می‌تواند پذیرفته شود.

یادآوری۳- در مورد توری‌های زاویه‌ای با زاویه بیش از ۳۶۰ درجه، جمع تمام انحراف های مکان شاخصه‌های توری برابر با صفر است، چون زاویه ۳۶۰ درجه، طبیعی، غیرقابل تغییر و استاندارد زاویه بدون خطا، می‌باشد. این موضوع اساس جدا کردن روش‌های جدایش خطا بوده که برای تعیین انحراف از مکان‌های زاویه‌ای از توری زاویه‌ای با عدم‌قطعیت های کوچک در محدوده نانو رادیان، مجاز شمرده شده است.

۶-۴-۳

انحراف نسبی مکان شاخصه توری

relative deviation in feature position

$\delta x_{i,\,rel}$

انحراف مکان شاخصه مورد نظر نسبت به مکان نامی آن شاخصه است،

$$\delta x_{i,\,rel} = \delta x_i / (p_{nom} \cdot (i - 1))$$

که در آن:

δx_i انحراف شاخصه i از مقدار نامی آن می‌باشد؛

P_{nom} اندازه گام نامی توری می‌باشد.

۳-۴-۷
انحراف مکان شاخصه از خطی بودن

feature position deviation from linearity

$\delta x_{i,nl}$

انحراف مکان شاخصه مورد نظر نسبت به محل محاسبه شده آن شاخصه بر اساس گام میانگین اندازه‌گیری شده است،

$$\delta x_{i,\,nl} = x_{i,\,m} - (p_m \cdot (i-1) + b)$$

که در آن:

$X_{i,m}$ مکان اندازه‌گیری شده شاخصه i در توری می‌باشد؛

P_m میانگین اندازه گام در توری؛

b بیانگر عرض از مبدا در روش رگرسیون کمترین توان‌های دوم خطی مشخص شده مطابق با بند ۳-۲-۵.

یادآوری ۱- به عنوان نتیجه، تعریف میانگین گام، مجموع تمام انحراف‌های همه شاخصه‌ها از حالت خطی از توری، صفر می‌باشد.

۳-۴-۸
انحراف نسبی مکان شاخصه از خطی بودن

relative feature position deviation from linearity

$\delta x_{i,nl,\,rel}$

نسبت بین انحراف مکان شاخصه از خطی بودن نسبت به مکان نامی آن است.

$$\delta x_{i,\,nl,\,rel} = \delta x_{i,\,nl} / (p_{nom}\,(i-1))$$

که در آن:

$\delta x_{i,\,nl}$ انحراف مکان شاخصه i از خطی بودن در توری؛

P_{nom} اندازه گام نامی توری می‌باشد.

۳-۴-۹
انحراف قله- دره از خطی بودن

peak-to-valley deviation from linearity

$\delta L_{nl,P\text{-}V}$

اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار از انحراف های مربوط به مکان شاخصه‌ها در میان همه شاخصه‌های توری انحراف قله-دره از خطی بودن می‌باشد،

$$\delta L_{\text{nl, P-V}} = \delta x_{i,\text{nl, max}} - \delta x_{\text{i,nl, min}}$$

که در آن:

$\delta x_{\text{i,nl, max}}$ بیشینه انحراف مکان تمام شاخصه‌ها از خطی بودن؛

$\delta x_{\text{i,nl, min}}$ کمینه انحراف مکان تمام شاخصه‌ها از خطی بودن.

۳-۴-۱۰ انحراف نسبی قله- دره از خطی بودن

relative peak-to-valley deviation from linearity

$\boldsymbol{\delta L_{\text{nl,P-V, rel}}}$

میزان انحراف قله- دره از خطی بودن نسبت به طول نامی توری است،

$$\delta L_{\text{nl, P-V, rel}} = \delta L_{\text{nl, P-V}} / L_{\text{nom}}$$

که در آن:

$\delta L_{\text{nl, P-V}}$ انحراف قله-دره از خطی بودن؛

L_{nom} طول نامی توری.

۳-۴-۱۱ انحراف rms از خطی‌بودن $\delta L_{\text{nl, rms}}$

rms deviation from linearity

$\delta \boldsymbol{L_{nl,\ rms}}$

جذر توان‌های دوم میانگین حسابی توان‌های دوم انحراف مکان شاخصه‌های توری از خطی بودن روی تمام N_f شاخصه است،

$$\delta L_{\text{nl, rms}} = [\Sigma^{\text{Nf}}_{\text{i=1}} (\delta x_{\text{i,nl}})^2 / N_f]^{0,5}$$

که در آن:

$\delta x_{\text{i,nl}}$ انحراف شاخصه i از خطی بودن در توری؛

N_f تعداد شاخصه‌های توری.

۱۲-۴-۳

انحراف نسبی rms از خطی بودن $\delta L_{nl,\,rms}$

relative rms deviation from linearity
$\delta L_{nl,\,rms,\,rel}$

انحراف rms از خطی بودن نسبت به طول نامی توری است،

$$\delta L_{nl,\,rms,\,rel} = \delta L_{nl,\,rms} / L_{nom}$$

که در آن:

$\delta L_{nl,\,rms}$ انحراف rms از خطی بودن؛

L_{nom} طول نامی توری.

۱۳-۴-۳

انحراف از عمود بودن $\delta\alpha_{ortho}$

deviation from orthogonality
$\delta\alpha_{ortho}$

انحراف از ۹۰ درجه جهات در توری های دوبعدی و سه بعدی است.

یادآوری ۱- لغت مربع بودن[1] معمولا به عنوان مترادف عمود بودن استفاده می‌شود.

۱۴-۴-۳ اصطلاحات مربوط به انحراف توری فیلترشده

filtered grating deviation terms

$\delta X_Y^F (\lambda_c, P)$

هر اصطلاح مربوط به انحراف توری که در بند ۳-۴ مشاهده می‌شود، بر اساس مقادیر فیلترشده انحراف در مکان شاخصه‌ها تعیین شده‌اند،

$\delta X_Y^F(\lambda_c, \beta, P)$

که در آن:

X یک نماد عمومی می‌باشد که در فرمول‌ها طبق رابطه ۳-۴ برای یک حالت خاص به جای یکی از مقادیر مشخص شده، استفاده می‌شود؛

Yیک نماد عمومی می‌باشد که در فرمول‌ها طبق رابطه ۳-۴ برای یک حالت خاص به جای یکی از مقادیر مشخص شده، استفاده می‌شود؛

1 -Squareness

F یک نماد بالانویس کلی است که با یک اصطلاح مناسب برای توصیف واضح الگوریتم‌صافی به‌کار رفته برای بررسی انحراف مکان شاخصه توری جایگزین می‌شود؛

λ_c پارامتری است که طول بحرانی صافی استفاده‌شده را مشخص می‌کند؛

β یک پارامتر اضافه دیگری برای توصیف مشخصه‌های‌صافی است؛

P پارامتری است که بیان می‌کند کدام محدوده طیفی از اطلاعات فیلترشده باید مورد بررسی قرار گیرند. p می‌تواند ۳ مقدار LP[۱] HP[۲] و BP[۳] باشد که LP برای پایین گذر، HP برای بالا گذر و BP برای میان گذر استفاده می‌شود.

مثال ۱- اگر انحراف در مکان‌های شاخصه δx_i توری، بعد از الگوریتم صافی‌تصادفی F با طول موج λ_c و مشخصات HP بر روی داده‌های اصلی اعمال شود، انحراف‌های فیلترشده در مکان شاخصه با $\delta x_i{}^{F}(\lambda_c, , HP)$ نشان داده می‌شود.

مثال ۲ - اگر انحراف نسبی rms از خطی بودن یک توری در یک صافی‌پروفایل خطی با مشخصه‌های صافی LP گوسی و یک طول موج ۸۰ nm مشخص‌شده بر روی داده‌های اصلی، اعمال شود، انحراف نسبی rms فیلترشده باید به‌عنوان مثال به‌صورت$\delta L_{nl,\,rms,\,rel}{}^{FPLG}(80\ nm, , LP)$ نشان داده شده است.(FLPG مشخص کننده پروفیل خطی صافی گوسین می‌باشد).

یادآوری ۱ - در بند ۵، گروه‌های مختلف الگوریتم‌های فیلترکننده قابل اعمال به تعاریف انحراف توری با جزئیات بیشتر توضیح داده شده است.

۳-۵ روش‌های اندازه‌گیری مشخصه‌های توری

۳-۵-۱

روش‌های کلی[۴]

Global methods
GM

روش‌هایی که توری را به‌صورت کلی کاوش می‌کند (به این روش، روش کامل نیز اطلاق می‌شود).

یادآوری ۱- مثال‌هایی از روش‌های مشخصه‌یابی توری که به گروه روش‌های کلی تعلق دارند در بند ۵ و پیوست الف -۲ ارائه شده است.

یادآوری ۲- به روش‌های کلی روش‌های کامل نیز اطلاق می‌شود.

۳-۵-۲

روش‌های موضعی[۵]

local methods

1- Low- Pass Data
2- High- Pass Data
3- Band- pass Data
4- Global methods
5 - Local methods

LM

روش‌های موضعی روش‌هایی هستند که توری را در یک منطقه کوچک مورد کاوش قرارداده و قابلیت جابه جایی اندازه‌شناسی کافی برای ارتباط اطلاعات از اندازه‌گیری بعدی فاز- پیوستگی توری، را پیشنهاد می‌کند.

یادآوری ۱ - مثال‌هایی از روش‌های مشخصه‌یابی توری که به روش‌های موضعی متعلق می‌باشند در بند ۵ و پیوست الف -۲ ارائه شده است.

۳-۵-۳
روش‌های هیبریدی

hybrid methods
HM

روش‌های هیبریدی، روش‌های اندازه‌گیری هستند که توری را در یک منطقه کوچک مورد کاوش قرار داده و امکان ارتباط بین اطلاعات اندازه‌گیری‌های متوالی انجام شده روی توری به‌صورت هم‌فاز با استفاده از یک روش اندازه‌شناسی تغییر مکان را امکان پذیر می‌سازد.

یادآوری۱- مثال‌هایی از روش‌های مشخصه‌یابی توری که به روش‌های هیبریدی متعلق می‌باشند در بند ۵ و پیوست الف-۲ ارائه شده است.

۴ نمادها و کوته نوشت‌ها

نماد	عبارت انگلیسی	فارسی
AFM	atomic force microscopy	میکروسکوپ نیروی اتمی
CCD	charge-coupled device	دستگاه بار جفت شده
DOE	diffractive optical element	عنصر متفرق شونده نوری
DUV	deep ultraviolet	فرابنفش عمیق
EUV	extreme ultraviolet	فرابنفش دور
GM	global method	روش‌های کلی
GPS	geometrical product specifications	مشخصات محصول هندسی

HM	hybrid method	روش هیبریدی
HR- OM	high resolution optical microscopy	میکروسکوپ نوری با تفکیک بالا
IR	infrared	فروسرخ
LER	line edge roughness	ناصافی لبه خط
LM	local method	روش موضعی
LWR	line width roughness	ناصافی پهنای خط
OD	optical diffraction	پراش نوری
OM	optical microscopy	میکروسکوپ نوری
SEM	scanning electron microscopy	میکروسکوپ الکترونی روبشی
SPM	scanning probe microscopy	میکروسکوپ کاوندروبشی
TEM	transmission electron microscopy	میکروسکوپ الکترونی عبوری
Vis	visible spectrum	طیف مرئی

۵ کالیبراسیون توری و روش‌های مشخصه‌یابی کیفیت

۵-۱ بررسی کلی

توری‌های مصنوعی نقش مهمی را در تولید و مشخصه‌یابی ساختارهای در مقیاس نانو ایفا می‌کنند. استفاده از واژه نانومتری مربوط به اندازه ذرات ۱ nm تا ۱۰۰ nm می‌باشد که مطابق با استاندارد ملی ۱-۸۰۰۰۴، بند ۲-۱ می‌باشد. در این استاندارد، پنج روش مختلف برای بررسی کیفیت و کالیبراسیون توری‌های مصنوعی پیشنهاد شده است. راهنمایی لازم برای گزینش دسته‌ای از روش‌های اندازه‌گیری که به بهترین شکل مجموعه ملزومات (با شرایط) را برآورده می‌کند، برای مشخصه‌یابی بر حسب پارامترهای کیفیت کلی و موضعی یک توری مشخص در دسترس است.

۵-۲ روش‌های کلی

روش‌های کلی از روش‌های اندازه‌گیری تشکیل شده اند که توری موردنظر را به‌صورت کلی مورد کاوش قرارمی‌دهند. تمام روش‌های این گروه بر پایه استفاده از تابش الکترومغناطیسی، اکثرا ولی نه انحصارا، با طول موج مشخص در ناحیه نور مرئی، برای کاوش کل توری می‌باشند. با آنالیز نتایج اندازه‌گیری نور بازتابی، پراشیده یا عبوری، اطلاعاتی درباره پارامترهای ابعادی توری به‌دست می‌آید. توضیح کوتاهی درباره برخی روش‌های کلی در ادامه مشاهده می‌شود.

در روش پراش‌سنجی[1] ، نور تک‌فام بر روی توری تابانده می‌شود، به گونه‌ای که کل توری را تحت‌تاثیر قرار دهد. نور پراشیده در ادامه با توجه به زاویه پراش اندازه‌گیری می‌شود. معمولا نور پراشیده در پیکربندی لیترو[2] اندازه‌گیری می‌شود، در این پیکربندی جهت پرتو پراشیده مرتبه اول منفی با جهت باریکه ورودی موازی می‌باشد و همچنین بیش از یک طول موج نوری استفاده می‌شود [7]. در بیشتر موارد جهت باریکه پراشیده با استفاده از یک میز چرخان اندازه‌گیری می‌شود و برای اندازه‌گیری شدت باریکه از یک آشکارساز نوری یا یک دستگاه CCD استفاده می‌شود.

پراش‌سنج معمولا فقط زاویه پراش باریکه‌های پراشیده را اندازه می‌گیرد که با استفاده از آن می‌توان گام میانگین توری را با عدم‌قطعیت بسیار کوچکی تعیین کرد. اما، این روش معمولا در مورد تغییرات موضعی گام‌های توری اطلاعاتی به دست نمی‌دهد. پهنای باند تابش و عدم وجود همدوسی فضایی و زمانی لیزرها باید در نتایج پراش‌سنجی در نظر گرفته شود.

در سنجش پراکندگی[3]، بعضی اوقات علاوه بر زاویه‌های پراش (مانند پراش‌سنجی)، شدت و قطبش تابش نوری پراشیده شده، توسط توری نیز اندازه‌گیری می‌شود و برای استخراج اطلاعاتی درباره مشخصه‌های هندسی توری و همچنین خواص ماده نوری توری استفاده می‌شود [8]. در این حوزه، انواع مختلف سنجش‌گر پراکندگی[4] وجود دارند که می‌توان به انواعی از آنها اشاره کرد که تنها دارای تغییر طول موج در تابش فرودی هستند و هیچ تغییری بین جهت‌های تابش‌های فرودی و حس‌گر وجود ندارد (سنجش‌گر پراکندگی طیفی)،مانند پراش‌سنج‌هایی که شدت پرتوهای پراشیده در زاویه‌های مختلف پراش را برای یک تابش فرودی تک‌رنگ منفرد اندازه‌گیری می‌کند، سنجشگر پراکندگی زاویه‌سنجی[5]، یا ترکیبی از این دو را اندازه‌گیری می‌کنند [9]. اندازه‌گیری‌های سنجش پراکندگی که تابش‌های پراشیده غیر- آینه‌ای را نمی-کاوند، حساسیتشان به گام توری در برابر حساسیت بالا به ابعاد شاخصه به میزان زیادی کم شده است. سنجش پراکندگی در قسمت‌های مختلف طیف طول موج، از IR، سرتاسر Vis تا DUV و EUV استفاده می‌شود و در نتیجه امکان این را فراهم می‌کند تا محدوده وسیعی از توری‌های مختلف با مقادیر گام متفاوت بررسی شوند.

1- Diffractometry
2- Littrow
3 -Scatterometry
4 -Scatterometers
5- Goniometry

برای استفاده کامل از اطلاعات اندازه‌گیری‌شده در سنجش پراکندگی، از نتایج اندازه‌گیری‌ها اغلب با شبیه‌سازی‌های مناسبی از طیف پراش، با محاسبات پیچیده پراش نوری، نسخه برداری می‌شوند. بدین ترتیب، طیف‌های اندازه‌گیری‌شده را می‌توان با طیف‌های شبیه‌سازی‌شده که برای برخی هندسه‌های مدل توپوگرافی[1] توری محاسبه شده‌اند، مقایسه کرد. با تغییر پارامترهای مدل، همبستگی نزدیک با طیف‌های اندازه‌گیری‌شده را می‌توان به دست آورد. علاوه برگام میانگین توری، تغییر مقادیر این گام روی توری را می‌توان همراه با اطلاعاتی درباره ارتفاع، عرض و زاویه دیواره کناری میانگین شاخصه‌های توری به‌دست آورد [10].

مثال دیگری از روش اندازه‌گیری کلی برای مشخصه‌یابی توری، استفاده از تداخل‌سنجی[2] فیزو[3] با توری آرایش‌یافته در پیکربندی لیترو[4] می‌باشد [11]. در این پیکربندی، تداخل سنج به اعوجاج‌های‌جبهه‌موج [5] ناشی از تغییر فاصله توری در محدوده دستگاه، حساس است. درنتیجه، تغییر فاصله موضعی روی توری را می‌توان توسط این روش به‌دست آورد.

مزیت مشترک روش‌های کلی این است که اندازه‌گیری سریع روی کل توری را ممکن می‌سازد. به‌دست آوردن عدم‌قطعیت‌های بسیار کوچک برای محاسبه گام میانگین با دستگاه‌های نوری نسبتا ساده (پراش سنجی) امکان‌پذیر است. پیکربندی‌های نوری دیگر امکان تعیین تغییرات فاصله موضعی در مواردی که این تغییرات در طول محدوده‌هایی بزرگ‌تر از تفکیک افقی دستگاه (تداخل‌سنج فیزو) را امکان‌پذیر می‌سازند. برای تعیین یک سری بزرگ‌تر از پارامترهای ابعادی یک توری (گام، تغییر گام و ارتفاع، عرض و زاویه‌ی دیواره کناری شاخصه‌ها)، از آزمایش‌های سیگنال‌های پراش اندازه‌گیری‌شده از توری در یک دستگاه اختصاص داده شده (سنجش‌گر پراکندگی) نیازمند استفاده از روش‌های مدل‌سازی نوری به شدت پیچیده است.

۳-۵ روش‌های موضعی

رده روش‌های موضعی شامل روش‌های اندازه‌گیری است که این امکان را می‌دهد تا مناطق کوچک توری کاوش شوند و قابلیت اندازه‌شناسی جابه‌جایی مناسبی برای مرتبط کردن اطلاعات فازی اندازه‌گیری‌های پی‌درپی سیگنال توری به‌صورت همدوس را ندارد. برای محاسبه اختلاف فازی سیگنال‌های دوره‌ای توری در تصاویر پی‌درپی که از دو مکان مختلف در توری تصویر برداری شده‌اند، جابه‌جایی نسبی نمونه توری نسبت به میکروسکوپ در بین دو تصویر باید با دقت بالایی محاسبه شود (ارتباط همدوس فازی).

مثال‌های روش‌های موضعی، تمام روش‌های میکروسکوپی با تفکیک بالا هستند که یک قسمت از توری را در میدان دید تعریف‌شده توسط بزرگنمایی انتخابی میکروسکوپ تصویرنگاری می‌کنند. روش‌های متداول میکروسکوپی اعمالی برای مشخصه‌یابی توری شامل SPM، AFM، SEM، TEM و OM می‌باشند.

1 -Topography
2- Interferometry
3- Fizeau
4- Littrow
5- Wavefront distortion

در محدوده دید، روش‌های موضعی قابلیت اندازه‌گیری گام موضعی توری و همچنین تغییرات احتمالی گام را دارند. برای تعیین گام میانگین توری و تخمین تغییرات موضعی گام در کل توری با استفاده از روش‌های موضعی، باید اندازه‌گیری‌های مکرر در مکان‌های مختلف توری با استفاده از میکروسکوپ انجام شود.
یک مزیت مشترک روش‌های موضعی این است که روش‌های یادشده اطلاعاتی درباره کیفیت شاخصه‌های منفرد مانند شاخصه همسانی[1]، ناصافی لبه خط و عیوب و همچنین گام موضعی در محدوده دید ارائه می‌دهند. به‌دلیل میدان دید محدود، عدم‌قطعیت اندازه‌گیری روش‌های موضعی برای گام میانگین، اغلب در مقایسه با روش‌های کلی، بزرگ‌تر است. همچنین سرعت اندازه‌گیری برای مشخصه‌یابی کامل توری، به خصوص در روش‌های SPM، نسبتا پایین است.

۵-۴ روش‌های هیبریدی[2]

رده روش‌های هیبریدی شامل روش‌های اندازه‌گیری است که توری را در ناحیه کوچک موردنظر کاوش می‌کند و علاوه بر آن، اطلاعات اندازه‌گیری‌های بعدی را در کل توری به روش همدوس فازی با استفاده از اندازه‌شناسی جابه‌جایی مناسب ارتباط می‌دهد.
مانند روش‌های موضعی، روش‌های هیبریدی با استفاده از میکروسکوپ با تفکیک بالا برای اندازه‌گیری تک تک شاخصه‌های توری مشخصه‌یابی می‌شود، اما با یک سامانه مکان‌یابی با صحت بالا همراه می‌شود که تعیین جابه‌جایی‌های توری بین مکان یابی‌های بعدی و مراحل تصویربرداری با صحتی که امکان اتصال همدوس فازی سیگنال‌های شدت برای توری را در میدان‌های دید مختلف را امکان‌پذیر می‌کند. در این حالت، روش‌های هیبریدی مزایای روش‌های موضعی (قابلیت شناسایی کیفیت شاخصه‌های منفرد) و روش-های کلی (تعیین گام میانگین در کل طول توری با عدم قطعیت کوچک) را ترکیب می‌کنند. همچنین این روش‌ها قابلیت شناسایی جهش‌های فازی در تناوب-های توری را دارند. با این وجود، روش‌های هیبریدی علاوه بر میکروسکوپ‌های با تفکیک بالا، نیازمند سامانه‌های اندازه‌شناسی جابه‌جایی و مکان‌یابی با صحت بالا می‌باشند.
یک مثال از سامانه هیبریدی بر پایه‌ی SEM و صفحه مکان‌یابی کنترل‌شونده با لیزر که برای مشخصه‌یابی یک توری دوبعدی با گام نامی ۱۰۰ nm استفاده می‌شود، در مرجع [12] و همچنین در پیوست الف-۲ ارائه شده است. در مرجع [13] کالیبراسیون گام میانگین و انحراف‌های خطی دو توری با نسبت مقادیر گام نامی برابر با ۱:۴ توسط یک روش کالیبراسیون هیبریدی و کاربرد آن برای عمل به عنوان یک استاندارد بزرگنمایی ۱:۴ برای لنزهای لیتوگرافی تشریح شده است. نتایج مقایسه دوجانبه روی استاندارد توری با گام نامی ۲۵ nm توسط روش‌های هیبریدی، که در این مورد SPM خاص‌اندازه‌شناسی نامیده می‌شود، در مرجع [14] ارائه شده است. همچنین باید ذکر شود که کالیبراسیون مقیاس‌های خطی نیز بر پایه استفاده از روش‌های هیبریدی می‌باشند.

1- Parallelism
2- Hybrid Methods

۵-۵ مقایسه روش‌ها

جدول ۱ مجموعه‌ای از مشخصه‌های روش‌های اندازه‌گیری متفاوت و رده‌های مربوط به کالیبراسیون و مشخصه‌یابی توری را نشان می‌دهد. این جدول به همراه توضیحات داده شده در زیربند ۵-۲ تا ۵-۴، اطلاعات موجود در مراجع و پیوست الف-۲ راهنمایی برای انتخاب یک روش مشخصه‌یابی مناسب یا مجموعه‌ای از روش‌های مشخصه‌یابی برای یک سری از الزامات خاص موردنیاز برای توصیف توری را ارائه می‌دهد.

جدول۱- مقایسه گروه‌های مختلف روش‌های ارزیابی توری‌ها

طبقه بندی روش‌ها	نوع روش	توانایی اندازه-گیری گام میانگین با عدم قطعیت کوچک	توانایی اندازه‌گیری تغییرات گام موضعی	توانایی اندازه‌گیری ابعاد شاخصه طبق شاخصه‌های فردی	توانایی اندازه‌گیری ابعاد شاخصه طبق شاخصه های توری	سرعت اندازه‌گیری	پیچیدگی راه اندازه‌گیری روش اندازه-گیری و خود اندازه‌گیری	پیچیدگی آنالیز اطلاعات
روش‌های کلی	پراش	++	--	--	--	++	کم	متوسط
روش‌های کلی	پراکنده-سنجی: -زاویه‌سنجی	++	+	--	++	+	زیاد	خیلی زیاد
	پراکنده-سنجی: -طیفی	o	-	--	++	++	متوسط	خیلی زیاد
روش‌های کلی	تداخل‌سنجی فیزو در	o	+	-		++	زیاد	متوسط

	پیکربندی لیترو							
روش‌های موضعی	میکروسکوپ نوری	-	+	+	+	o	کم	کم
روش‌های موضعی	میکروسکوپ کاوندروبشی	-	++	++	++	-	متوسط	متوسط
روش‌های موضعی	میکروسکوپ الکترونی روبشی	-	++	++	+	o	زیاد	متوسط
روش‌های موضعی	میکروسکوپ الکترونی عبوری	--	++	++	++	--	خیلی زیاد	زیاد
روش‌های هیبریدی	بر اساس روش‌های HR-OM, SEM SPM TEM	++	++	++	++	o - --	خیلی زیاد	زیاد

نمادها:
++ خیلی خوب
+ خوب
oراضی‌کننده
- ضعیف
--خیلی ضعیف

۵-۶ سایر انحراف‌های شاخصه‌های توری

۵-۶-۱ کلیات

در تعریف اصطلاحات انحراف توری در بند ۳ فرض بر این بود که شاخصه‌های توری تنها انحراف از مکان های نامی خود در جهت توری را نشان می‌دهند. پارامترهای دیگر که کیفیت توری را تحت‌تاثیر قرار می-

دهند و عدم‌قطعیت اندازه‌گیری توری را محدود می‌کنند، در ادامه ارائه شده است. در این استاندارد، تاثیرات افزوده فقط ذکر شده‌اند و به تفصیل مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفته‌اند.

۵-۶-۲ انحراف خارج از محور[1]

۵-۶-۲-۱ کلیات

این انحرافات، انحرافاتی هستند که عمود بر جهت توری قرار دارند. اگر، برای مثال، جهت انتخابی برای یک توری یک‌بعدی جهت x باشد، انحراف خارج از محور در جهت y می‌باشد.

۵-۶-۲-۲ شاخصه‌های خط غیر[2]موازی

اگر شاخصه‌های خط در طول کل توری موازی نباشند، برای انحرافات در موقعیت شاخصه، نتایج اندازه‌گیری مکان شاخصه‌ها در طول خطوط به ناحیه اندازه‌گیری بستگی خواهد داشت. درصورتی‌که انحرافات از جهت موازی شاخصه‌های خط در یک توری تغییر پیدا کند، این انحرافات منجر به افزایش تغییرات مقادیر گام محلی می‌شود.

۵-۶-۲-۳ شاخصه‌های خط منحنی[3]

درصورتی‌که شاخصه‌های خط در کل توری انحنا داشته باشند، برای انحرافات در موقعیت شاخصه، نتایج اندازه‌گیری شده به ناحیه‌ی اندازه‌گیری انتخاب شده در طول خطوط بستگی خواهد داشت. اگر انحراف‌ها از شکل ایده‌آل شاخصه‌های خط در توری تغییر کند، این انحرافات منجر به افزایش تغییرات مقادیر گام محلی می‌شود.

۵-۶-۳ انحراف‌های خارج از صفحه[4]

۵-۶-۳-۱ کلیات

انحراف‌هایی وجود دارند که به صورت عمود بر صفحه توری گسترده می‌شوند. اگر، برای‌مثال، جهت مورد نظر توری یک‌بعدی یا دوبعدی در صفحه x-y باشد، انحراف‌های خارج از صفحه در جهت *z*، عمود بر صفحه *x-y* هستند.

۵-۶-۳-۲ توپوگرافی شاخصه‌ها

تغییر در ارتفاع شاخصه‌ها در طول توری تنها تاثیر کوچکی روی پارامترهای کیفی توری توضیح داده شده در بند ۳ خواهد داشت. اگرچه، تاثیر تغییرات ارتفاع باید به صورت جداگانه برای روش‌های اندازه‌گیری مختلف اعمال شده برای شناسایی توری، تحلیل شوند.

1- Out of axis deviations
2- Non-parallel line features
2- Curved line features
4- Out of plane deviations

۵-۶-۳-۳ توپوگرافی زیرلایه

اثرات تغییرات توپوگرافی $z(x,y)$ بر روی انحراف‌های اندازه‌گیری‌شده در موقعیت شاخصه، برای مثال، به دلیل خم شدن زیرلایه متحرک نصب شده توسط نیروهای جاذبه، در اندازه‌شناسی مقیاس خطی شناخته شده، به مرجع [15] مراجعه شود، تاثیرات خم‌شدن زیرلایه به درستی برای تحلیل نتایج اندازه‌گیری رمزگذارهای خطی و زاویه‌ای، باید درنظرگرفته شوند.

۵-۶-۴ سایر انحرافات شاخصه‌ها

۵-۶-۴-۱ کلیات

در این زیربند، سایر تاثیرات بر روی کیفیت توری و عدم‌قطعیت اندازه‌گیری پارامترهای توری به دلیل تغییرات اندازه، شکل و ماده شاخصه‌ها بحث شده است.

۵-۶-۴-۲ ناصافی لبه‌خط و ناصافی پهنای خط[1]

ناصافی لبه خط (LER) انحراف‌های حاشیه شاخصه خط را از یک خط مستقیم ایده‌آل توضیح می‌دهد. ناصافی پهنای خط (LWR) انحراف‌های پهنای موضعی یک شاخصه خط را از یک مقدار ثابت ایده‌آل توضیح می‌دهد. برای کاهش عرض‌های شاخصه‌های خطی، اهمیت نسبی LER و LWR در حال افزایش است و در حال تبدیل به مساله مهمی برای پیشرفت‌های بیشتر در لیتوگرافی می‌باشد [16]. هر دو اثر، منجر به وابستگی نتایج اندازه‌گیری به انحراف‌ها در موقعیت شاخصه در ناحیه اندازه‌گیری انتخاب‌شده در طول خطوط و همچنین منجر به افزایش انحراف مقادیر گام بین خطوط محلی می‌شوند.

۵-۶-۴-۳ تغییر خواص مواد

تغییر خواص مواد شاخصه‌های توری یا زیرلایه نتایج اندازه‌گیری‌های موقعیت شاخصه و گام میانگین را تحت‌تاثیر قرار خواهد داد. اما، مقدار این تاثیر به روش اندازه‌گیری استفاده‌شده برای مشخصه‌یابی توری وابسته بوده و در نتیجه نمی‌توان آن را با یک روش کلی تخمین زد.

۵-۷ الگوریتم‌های فیلتر برای مشخصه‌یابی کیفیت توری[2]

برای مشخصه‌یابی کیفیت توری‌ها، اغلب اعمال الگوریتم‌های فیلتر مناسب به داده‌های اندازه‌گیری اصلی انحراف‌های موقعیت شاخصه لازم است. برای مثال، ممکن است در ابتدا انحراف‌های بسامد بالای (طول‌موج فضایی کوچک) انحراف‌های موقعیت شاخصه برای یک کاربرد مورد توجه واقع شود، درحالی‌که در کاربرد دیگری انحراف‌های موقعیتی با طول‌موج‌های فضایی بزرگ‌تر ممکن است جالب‌توجه باشد، در صورتی‌که انحراف‌های بسامدی بالا می‌توانند به طور موثری توسط فیلترهای پایین‌گذر[3]، فیلتر شوند.

الگوریتم‌های فیلتر استاندارد شده برای ارزیابی انحراف‌ها در موقعیت‌های شاخصه توری‌های مصنوعی فعلا موجود نیستند. ارزیابی داده‌های اندازه‌گیری انحراف‌های موقعیت شاخصه، مشابهت‌هایی با تحلیل داده‌های

1- Line edge roughness and line width roughness

2- Filter algorithms for grating quality characterization

پروفایل بافت سطح نشان می‌دهند. در اندازه‌شناسی بافت‌سطحی[1]، مجموعه‌ای از اسناد در فیلترکردن فضایی سه‌بعدی همچنین پروفایل دوبعدی داده‌های بافت سطح موجود هستند و در آینده بیش‌تر توسعه داده خواهند شد. استاندارد ملی ۱۳۲۰۷-۱در مرجع [17] راهنمایی برای گروهی از اسناد در رابطه با فیلتر و طبقه‌بندی کردن الگوریتم‌های فیلتر مختلف ارائه می‌دهد. در مرجع [18] مرور اجمالی بر تاریخچه پیشرفت‌های قبلی همچنین روش‌های اخیر فیلترکردن با چارچوب کاری GPS استانداردهای ISO ارائه شده است. اگر پروفایل الگوریتم‌های‌فیلتر از زمینه بافت سطح به تحلیل انحراف‌های موقعیت شاخصه اعمال شوند، نام‌گذاری آن‌ها باید از مشخصات استاندارد ملی ۱۳۲۰۷-۱ پیروی کند.

تاکنون به‌طور کامل مشخص نشده است که کدام فیلترهای پروفایل استانداردشده سنجش‌شناسی بافت سطح (فیلترهای خطی(گوسین،اسپلاین و موجک اسپلاین[2]) فیلترهای ریخت شناسی[3] و فیلترهای قوی) می‌توانند برای تحلیل انحراف‌ها در موقعیت‌های شاخصه توری مصنوعی به شیوه‌ای معقول، اعمال شوند. همچنین، الگوریتم‌های فیلتر، پروفایل توسعه داده‌شده برای اهدافی علاوه بر اندازه‌گیری بافت سطحی می‌توانند به‌طور ویژه برای تحلیل موقعیت‌های شاخصه توری‌های مصنوعی اعمال شود.

مثالی از فیلتر متحرک تصحیح فاز میانگین برای حذف موجی بودن در پروفایلی از داده‌های انحراف موقعیت در مرجع [4] ارائه شده است. در مرجع [19] طرحی از جبران خطای خطی چند نقطه‌ای توضیح داده شده است، که باعث می‌شود تاثیر خطاهای رمزگذاری در برنامه‌های کنترل موقعیت کاهش پیدا کند. در پیوست الف-۲ مثال‌های انحراف‌های اندازه‌گیری شده از موقعیت شاخصه توری نشان داده شده‌اند، که با به‌کارگیری یک فیلتر اسپلاین ارزیابی شده‌اند.

برای ارزیابی داده‌های موقعیت‌های شاخصه توری‌های مصنوعی، الگوریتم‌های فیلتر اعمال‌شده بهتر است توانایی‌های زیر را داشته باشند: هیچ حساسیتی به تاثیرات نهایی نداشته باشند (در مواردی که تمام توری باید تحلیل شود)، تعیین محتوای طیفی داده‌ها بر حسب طول‌موج‌های مشخصه یا نوارهای طول‌موج (فیلتر بالاگذر، گذرنواری، پایین‌گذر)، فیلترکردن صحیح فاز، حساسیت به مشخصه‌یابی پرش‌های فازی در داده‌های موقعیت، قابلیت دست‌یابی به نقاط دورافتاده، قابل‌استفاده برای انحراف‌های موقعیت شاخصه در مقیاس نانو، قابلیت اعمال بر روی توری‌های پیچیده.

یادآوری-۱ اگر توری به وسیله یک روش مرحله‌ای تولید شده است، پرش‌های فازی می‌توانند رخ دهند، که مبتنی بر موقعیت‌یابی مجدد زیرلایه و اتصال متوالی مناطق نوشتن بر روی زیرلایه باشد. مشخصه‌یابی پرش‌های فازی دشوار هستند، اما به هنگام استفاده از توری بسیار تاثیر گذار هستند.

1 -Surface Texture Metrology
2- Gaussian, spline, spline wavelet
3- Morphological filters

۶ گزارش نتایج مشخصه‌یابی توری

۶-۱ کلیات

گزارش نتایج مشخصه‌یابی توری‌های مصنوعی باید با استاندارد استانداردملی‌ایران-ایزو-آی ای سی ۱۷۰۲۵ انطباق داشته باشند. همچنین این استاندارد الزامات کلی را برای مستند سازی مناسب نتایج یک کالیبراسیون تعریف می‌کند.

علاوه‌بر اطلاعات ضروری در رابطه با اسم و نشانی آزمایشگاه کالیبراسیون و مشتری، تاریخ دریافت نمونه، تاریخ(های) کالیبراسیون و موضوع گزارش، گزارش کالیبراسیون باید اطلاعات کافی را در رابطه با جزئیات نمونه، روند کالیبراسیون (جزئیات ابزار، شرایط انجام کار، نرم‌افزار استفاده شده، اعتبارسنجی)، و نتایج اندازه‌گیری به همراه عدم قطعیت‌های آن‌ها، مهیا کند. در ادامه، الزامات نهایی توسط مشخصه‌یابی توری-های مصنوعی و تعیین پارامترهای کیفی آن‌ها با مثال توضیح داده شده است.

۶-۲ ویژگی‌های توری

توصیه می‌شود گزارش کالیبراسیون شامل اطلاعات لازم درباره‌ی توری مورد مشخصه‌یابی باشد:

- سازنده‌ی‌توری (در صورت دسترسی)؛
- نوع توری (یک‌بعدی، دوبعدی، سه بعدی، زاویه‌ای، پیچیده)؛
- گام(های) نامی توری p_{nom}؛
- طول(های) نامی توری L_{nom}؛
- نوع (خط، مربع، نقطه، غیره)، ماده، عرض و ارتفاع نامی شاخصه‌های توری؛
- ماده زیرلایه توری؛
- هر شاخصه تنظیم کننده مورد استفاده برای تعیین جهت توری.

۶-۳ فرآیند کالیبراسیون

توصیه می‌شود گزارش کالیبراسیون شامل اطلاعات ضروری درباره وسایل اندازه‌گیری و فرآیند استفاده شده برای مشخصه‌یابی توری باشد:

- نوع اندازه‌گیری (GM، LM، HM)؛
- شرحی از ابزار اندازه‌گیری مورد استفاده برای کالیبراسیون؛
- قابلیت ردیابی اندازه‌گیری؛
- فرآیند کالیبراسیون (تشریح، تعداد تکرار اندازه‌گیری‌ها، و غیره)؛
- شرایط کاری.

۶-۴ پارامترهای کیفیت توری

توصیه می‌شود گزارش کالیبراسیون شامل اطلاعات ضروری درباره نتایج اندازه‌گیری پارامترهای کیفیت توری و عدم‌قطعیت آن باشد. قبل از هر عملی، بین مشتری و آزمایشگاه کالیبراسیون باید روشن شود که

کدام یک از پارامترهای کیفیت توری تعریف شده در بند ۳-۴ برای استفاده توری توسط مشتری اهمیت دارد و پس از آن باید این پارامترها تعیین شوند. فهرست زیر مجموعه‌ای از بعضی پارامترهای کیفیت توری می-باشد:

- گام میانگین اندازه‌گیری‌شده p_m (اختیاری: مقادیر گام موضعی اندازه‌گیری‌شده p_{loc})؛
- انحراف در طول مرز δL_b؛
- انحراف در طول مشخصه δL_c؛
- انحراف دره تا قله از حالت خطی $\delta L_{nl,P-V}$؛
- انحراف rms از حالت خطی $\delta L_{nl,\ rms}$؛
- انحراف نسبت به پارامترهای کیفی، یعنی انحراف نسبت به طول نامی L_{nom}؛
- پارامترهای کیفی صاف‌شده.

پیوست الف
(آگاهی دهنده)
اطلاعات زمینه‌ای و مثال‌ها

الف-۱ اطلاعات زمینه‌ای در مورد قابلیت ردیابی طول در مقیاس نانو

فناوری نانو طیف گسترده‌ای از کاربردهای مختلف در مقیاس‌نانو را پوشش می‌دهد. اصطلاح مقیاس‌نانو در استاندارد ملی‌ایران-ایزو ۸۰۰۰۴-۱ بند ۲-۱ به صورت «محدوده اندازه از حدود ۱ nm تا ۱۰۰ nm» تعریف شده است، یعنی به واحد طول دستگاه‌بین‌المللی‌یکاها اشاره می کند.

از سال ۱۹۸۳، واحد طول دستگاه‌بین‌المللی‌یکاها ، متر، به‌صورت طول مسیر طی‌شده با سرعت نور در خلاء در بازه زمانی ۱/۲۹۹۷۹۲۴۵۸ از ثانیه تعریف شده است. نتیجه می‌شود که سرعت نور دقیقا ۲۹۹۷۹۲۴۵۸ متر بر ثانیه است و واحد طول به واحد زمان، ثانیه، بستگی دارد.

احتمالات مختلفی برای تحقق واحد طول براساس این تعریف وجود دارند. دو روش بدین منظور بکار برده می‌شوند:

الف – اندازه‌گیری زمان طی‌کردن مسیر توسط نور یا انواع دیگر تابش الکترومغناطیسی، روشی است که عمدتا برای اندازه‌گیری مسافت‌های طولانی‌تری اعمال می‌شود، به‌عنوان مثال، در علم نقشه‌برداری، نجوم یا سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای؛ و ...

ب – استفاده از روش‌های تداخل‌سنجی با پرتو لیزر شناخته شده (به عنوان مثال، لیزر HeNe با طول موج نامی۶۳۳ nm)، که براساس تجزیه و تحلیل مدولاسیون شدت سیگنال‌های تداخل سنج، اندازه‌گیری طول را تحقق می‌بخشد و در نوبه خود به طول موج نور در محیط انتخاب شده تداخل‌سنج بستگی دارد.

در نتیجه روش اخیر یک راه بسیار مستقیم از قابلیت ردیابی برای تعریف واحد طول، با عدم‌قطعیت‌های کوچک ارائه می‌دهد و بنابراین به طور گسترده‌ای در دستگاه‌های مختلف اندازه‌گیری و تولید استفاده می‌شود. پرتوهای مختلف لیزر برای تحقق مقیاس متر توصیه می‌شوند، Mise en pratique [20] شرح داده شده‌اند.

هرچند، اگر کم‌ترین عدم‌قطعیت برای اندازه‌گیری طول تحت شرایط محیط مورد نیاز باشد، تغییر طول‌موج لیزر با پارامترهای هوا، مانند دما، فشار، رطوبت و ترکیب گاز باقیمانده می‌تواند دارای‌معایبی باشد. علاوه‌بر این، هزینه تجهیزات تداخل‌سنج لیزری نیز در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب می‌توان توضیح داد که روش‌های جایگزین برای اندازه‌گیری دقیق طول نیز دنبال می‌شوند، و این‌ها اغلب بر اساس استفاده از توری‌های مصنوعی یا طبیعی می‌باشند، که اگر کالیبره‌شده باشند، به‌عنوان استانداردهای طول یا مقیاس‌های طول مواد به‌کار می‌روند.

در مرجع [3]، توری به صورت یک «ساختار فضایی متناوب برای استفاده نوری» تعریف شده و به عنوان یک جزءاساسی از انواع مختلف عناصر پراش نوری (DOE) به‌کار می‌رود، که از پراش پرتونوری به‌عنوان اصول کارکرد استفاده می‌کند. مفاهیم مختلف DOE توسط تعاریف دامنه DOE، فاز DOE، انتقال DOE، انعکاس DOE و DOE فعال تعیین می‌شوند. نمونه‌ای از درک‌فنی DOE فعال، مدوله‌ساز[1] صوتی- نوری است که در آن امواج ساکن صوتی شاخصه‌هایی در داخل ماده تولید می‌نمایند و نور ورودی را به صورت مشخصی پراش می‌دهد. هر چند در این استاندارد، توری‌ها تنها به استفاده نوری محدود نمی‌شوند.

توری‌های مصنوعی نقش مهمی در ساخت و همچنین فرآیندهای مشخصه‌یابی ساختارها در مقیاس نانو بازی می‌کنند. به‌عنوان مثال، در ساخت با حجم بالای مدارهای مجتمع نیم‌رسانا با استفاده از فنون لیتو-گرافی، ساختارهای توری به‌منظور هم‌راستایی نقاب نوری ویفر سیلیکون[2] در ابزار تولید روبشگر ویفر[3] در مراحل مختلف تولید لیتوگرافی استفاده می‌شوند. در اینجا الگودهی لیتوگرافی دوگانه، الزامات جدیدی را در روش‌های مشخصه‌یابی جاگذاری شاخصه و توری قرار می‌دهد. در حال حاضر کوچک‌ترین اندازه ساختار در ویفرهای امروزی کمتر از۳۰ nm است و رواداری پوشش‌ها در محدوده چند نانومتر، بهتر است درضمن ساخت مدارهای مجتمع حاصل شود.

یکی دیگر از زمینه‌های کاربرد توری‌های مصنوعی در فناوری نانو استفاده از آنها به‌عنوان استانداردهای کالیبراسیون روش‌های میکروسکوپی با وضوح‌بالا، از ابزارهای لازم برای مشخصه‌یابی ساختارها در مقیاس‌نانو می‌باشند. هم‌اکنون ساخت و مشخصه‌یابی استانداردهای کیفیت بالا کالیبراسیون توری با گام زیر ۱۰۰ nmاز چالش‌های جاری می‌باشد. در حال حاضر چندین مدرک الزامی منتشرشده یا در حال تدوین وجود دارد که استفاده از توری بر اساس استانداردهای فیزیکی برای کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر از انواع مختلف میکروسکوپ‌های با وضوح بالا مانند TEM [21]، SEM [22]، SPM [23] یا میکروسکوپ نوری [24] را توصیف می‌نماید.

1 -Modulator
2- Photomask to silicon wafer
3- Wafer-scanner production tools

هرچند، در تمام مدارک ذکر شده در بالا [21-24] استانداردهای توری ایده‌آل فرض می‌شوند، از این لحاظ که انحرافات احتمالی ساختارهای توری از مقادیر نامی آنها در نظرگرفته نمی‌شود. در بند ۵، انواع مختلف ابزارها برای کالیبراسیون توری و تعیین انحرافات در موقعیت شاخصه‌ها طبقه‌بندی و توصیف شده‌اند. علاوه‌بر این، راهنمایی لازم برای فرآیند انتخاب گروه اندازه‌گیری در هم‌راستایی با مجموعه الزامات کیفیت توری برای یک کاربرد خاص از توری‌گذاری ارائه شده است.

علاوه بر توری‌های مصنوعی، شبکه بلور طبیعی نیز می‌تواند به عنوان استانداردهای طول در فناوری نانو استفاده شوند به این شرط که روش اندازه‌گیری بتواند ساختار توری را مشخص کنند، برای مثال میکروسکوپ الکترونی عبوری یا پراش پرتو ایکس. با توجه به دسترسی خوب و خلوص بالا، ماده تک بلور سیلیکون نقش مهمی در اندازه‌شناسی در مقیاس نانو ایفا می‌کند. فاصله بین صفحات شبکه اتمی Si در محدوده زیر نانومتر ($d_{220} \approx 0.192$ nm) [25] است و در نتیجه، شبکه اتمی Si یک مرجع ذاتی جالب برای اندازه‌شناسی‌طول در مقیاس نانو است. از این ماده برای مثال به عنوان استاندارد بزرگنمایی برای تصاویر TEM با وضوح بالا استفاده می‌شود.

توری‌های بلورین طبیعی سطحی و حجمی، ساختارهایی هستند که به‌خوبی تعریف و در بلورشناسی، فیزیک حالت جامد و علم سطح در دهه‌های بسیاری پرداخته شده است، به پیوست ب برای یک مرور کلی در شبکه‌های براوه دوبعدی و سه‌بعدی مراجعه شود. در این استاندارد، توری‌های بلوری ممکن است به عنوان توری طبیعی در مقابل توری‌مصنوعی در نظر گرفته شوند. علاوه بر این، توری‌های مصنوعی که در آنها موقعیت شاخصه‌ها هیچ گونه انحرافی از مقادیر نامی ندارند را می‌توان با اصطلاحات مربوط به شبکه-های بلوری توصیف کرد.

در سامانه‌های کدگذاری افزایشی اندازه‌گیری طول یا زاویه[1]، توری‌های خطی یا زاویه‌ای مصنوعی به‌عنوان منبع حرکات نسبی انتقالی یا چرخشی، استفاده می‌شوند. باز-خوانی سامانه‌های کدگذاری به جزئیات طراحی نوری بستگی دارد، اما به‌طور کلی اطلاعات طول از سیگنال‌های هدهای خواننده دریافت می‌شود، که بر اساس طول تناوب ساختارهای توری مصنوعی است. این نوع سامانه‌های اندازه‌گیری گاهی اوقات نیز «تداخل‌سنج‌توری» نامیده می‌شوند. نمونه‌ای از یک «تداخل‌سنج‌توری» که از توری‌های طبیعی استفاده می‌کند، به اصطلاح تداخل‌سنجی پرتو ایکس می‌باشد، که تغییرات سیگنال‌های شدت پرتو ایکس پراشیده از سامانه‌ای شامل دو لایه نازک ثابت و یکی با قابلیت حرکت را در یک نوع خاص از تداخل‌سنج ساخته شده از ماده تک‌بلور، مانند سیلیکون آنالیز می‌کند [26].

مقایسه ساختارهای توری از استانداردهای بزرگنمایی و سامانه‌های کدگذاری طولی با استانداردهای طولی کلاسیک مبتنی بر مقیاس‌های درجه‌ای، یعنی مقیاس‌های خط، آموزنده می‌باشد. مقیاس‌های خط به‌طور سنتی به‌عنوان استانداردهای طول استفاده می‌شود و آنها هنوز هم نقش مهمی در زیرساخت‌های اندازه-شناسی دارند. امروزه اسناد الزامی منسوخ برای مقیاس‌های خطی وجود دارند که انحرافات موقعیت‌های خطوط مقیاس درجه‌ای به صراحت در آن‌ها ذکر شده است [27].

1- Angle encoder measurement systems

در سازمان بین‌المللی‌اندازه‌شناسی‌قانونی[1] توصیه R 98 وجود دارد که با ویژگی‌ها و طبقه‌بندی اندازه‌های خطی طول با دقت بالا سروکار دارد [28]. برای صحت درجات ۰ تا ۳ حداکثر مقدار مجاز خطاهای ساخت برای فواصل بین هر دو نشانه اندازه_گیری خطی در مقیاس میکرومتر بین (۰/۵ + L ۰/۵) ± و (۵ + ۵ L) ± مشخص شده است، که در آن L مقدار نامی طول نامی از فاصله بین این دو علامت در مقیاس متر است. اندازه‌گیری‌های خطی طبقه M (طبقه اندازه‌گیری)، اندازه‌گیری پایداری بالا است که در آن خطاهای ساخت مشخص نشده‌اند، اما در یک گواهی، اندازه‌گیری و ذکر شده‌اند.

در سال‌های اخیر تحت نظارت کمیته بین‌المللی اوزان و مقیاس‌ها CIPM[2] (International Committee for Weights and Measure) کمیته مشورتی مقیاس طول (CCL[3]) روی توری‌های یک‌بعدی [29] و همچنین توری‌های دوبعدی[5] و مقیاس خطی با دقت بالا به طول ۲۸۰mm [30]، مقایسات بین‌المللی خوبی انجام شده است. اولین سری‌های مقایسات بین‌المللی در زمینه ابعاد در مقادیر نانو اطلاعات ارزشمندی درمورد قابلیت‌های اندازه‌گیری موجود در سازمان‌های ملی اندازه‌شناسی (NMIs[4]) را فراهم کرد تا زمینه پدیدار شدن فناوری نانو را پشتیبانی کند.

الف-۲ مثال‌هایی از کاربرد و مشخصه‌یابی توری‌های مصنوعی در فناوری‌نانو

توری‌های مصنوعی در چندین کاربرد در زمینه فناوری‌نانو استفاده شده‌اند. در برخی از این کاربردها، طول کلی توری‌ها باید نزدیک به مقدار طول نامی کل باشد، به‌خصوص زمانی که این توری‌ها به‌عنوان استانداردهای مرجع طول در کاربردهایی مانند سامانه‌های رمزگذاری طولی یا استانداردهای بزرگنمایی برای روش‌های میکروسکوپی با قدرت تفکیک بالا عمل می‌کند. در سایر زمینه‌های این کاربرد، طول کل در درجه دوم اهمیت است، اما انحراف غیرخطی بهتر است تا حد امکان با توجه به طول مورد نظر، کوچک باشد.

مثال۱:

توری بر پایه سامانه کدگذاری طولی (L_{nom}=280 nm)

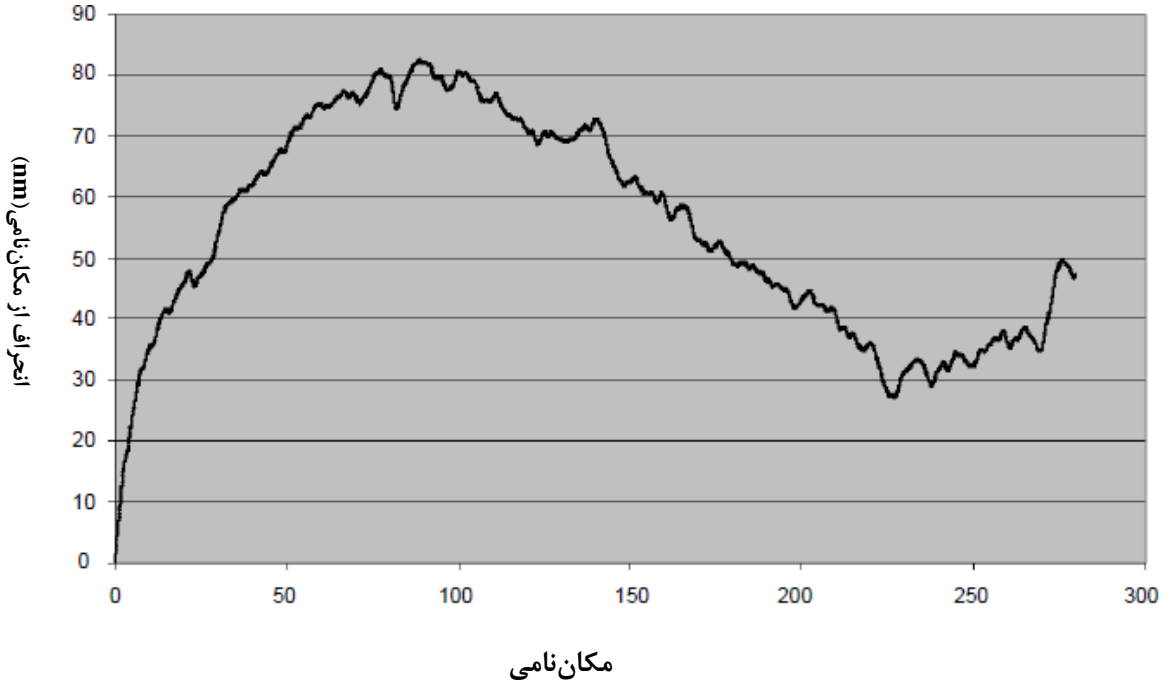
یک مثال از توری مصنوعی استفاده‌شده به عنوان یک استاندارد مرجع طول در زیر نشان داده شده است. در شکل الف-۱ نتیجه یک اندازه‌گیری از مقایسه اندازه‌گیری سه شرکت‌کننده که از دستگاه مقایسه‌کننده خلاء روی یک سامانه کدگذاری طولی استفاده می‌کنند که به‌عنوان یک استاندارد انتقال استفاده شده است را، نشان می‌دهد [31]. استاندارد انتقال شامل یک توری یک‌بعدی(فازی) با عدد گام نامی ۵۱۲ nm و عرض خط شاخصه ۲۵۶ nm است که تا بیش از ۲۸۰ nm روی یک زیرلایه زیرودور[5] گسترش می‌یابد. سر حسگر تداخل‌سنجی بالای توری حرکت می‌کند و یک قدرت تفکیک نوری از اندازه‌گیری جابه‌جایی

1- International Organization Of Legal Metrology
2- Comité international de poids et mesures,
3- Consultative *Committee* for Length
4- National Metrology Institutes
5- Zerodur

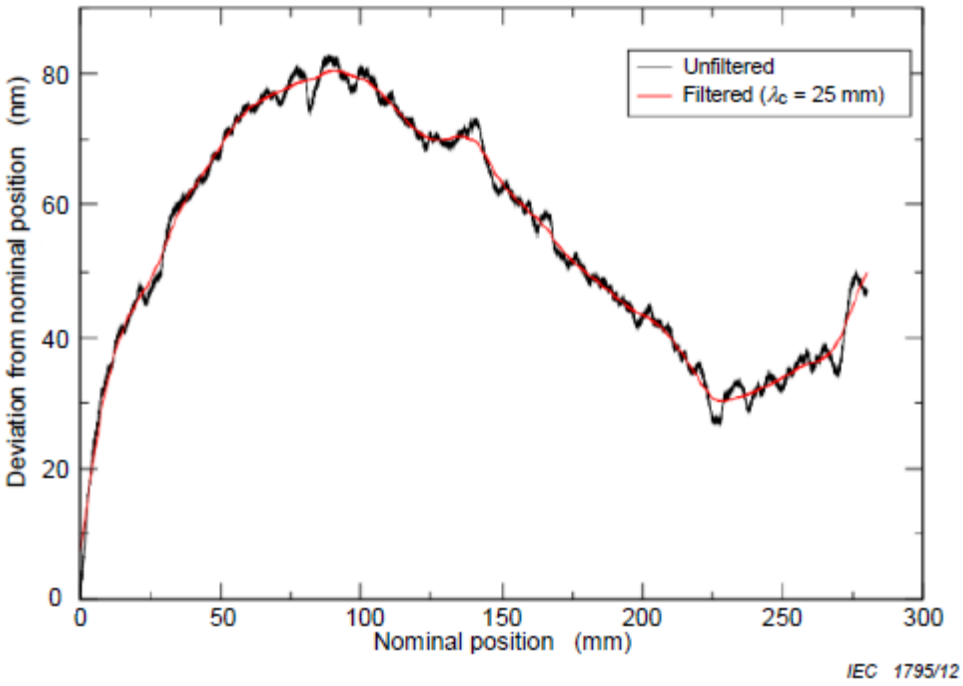
nm ۱۲۸ فراهم می‌کند که پس از درون‌یابی الکترونیکی [1] با یک فاکتور ۴۰۹۶، دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی حدود ۳۰pm را تامین می‌کند. این نوع از سامانه‌های رمزگذاری طولی با تفکیک بالا به طور گسترده در

1- Interpolation

فرآیندهای مختلف ساخت با دقت بالا برای بازخورد موقعیت محورها، شامل کاربردهایی در ساخت در مقیاس نانو استفاده می‌شوند.



شکل الف-۱ نتیجه کالیبراسیون سامانه رمزگذار طولی ۲۸۰mm که به‌عنوان یک استاندارد انتقال در یک مقایسه بین‌المللی استفاده شده است[۳۱].



شکل الف-۲ نتایج ارائه شده در شکل الف-۱ پس از فیلترکردن (استفاده از فیلتر اسپلاین[1] پروفایل خطی با λ_c=۲۵ mm)

تجزیه و تحلیل داده‌های شکل‌های الف-۱ و الف-۲ نسبت به پارامترهای کیفی تعیین‌شده از توری در جدول الف-۱ ارائه شده است. داده‌های فیلترشده به صورت بالاگذر (یعنی اعمال فیلتر بر روی داده‌های فیلترنشده یا فیلترشده به صورت پایین‌گذر) فقط برای پارامترهای کیفی انحراف خطی تجزیه و تحلیل می‌شود.

1- Spline

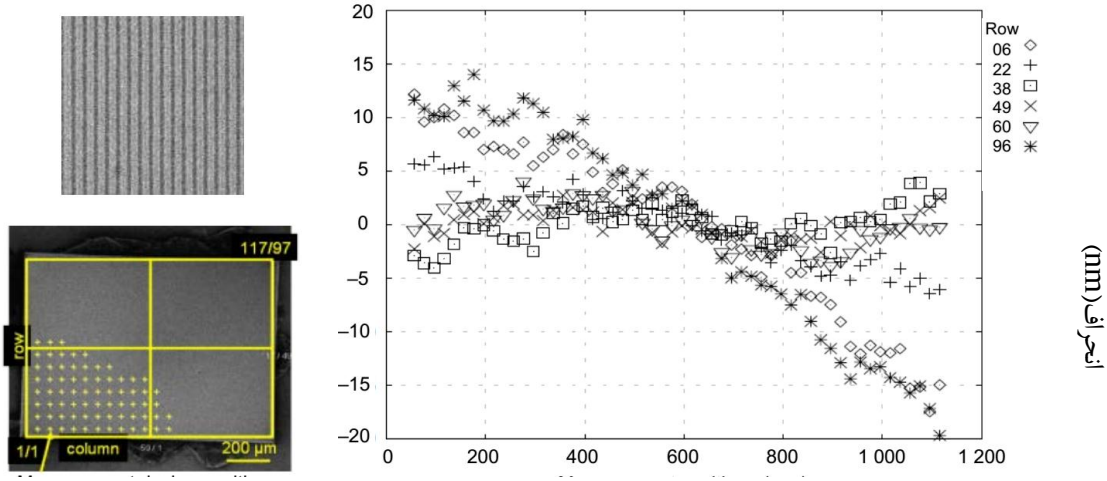
جدول الف-۱ پارامترهای کیفیت برای توری معرفی شده در شکل‌های الف-۱ و الف-۲

پارامترهای کیفی توری، توری شکل الف-۱ با $L_{nom} = 280mm$ $p_{nom} = 512\ nm$	نتایج اندازه‌گیری (فیلتر نشده)	عدم قطعیت اندازه‌گیری $(K=2)$	نتایج اندازه‌گیری (فیلتر شده: اسپلاین ۲۵ میلیمتر، $LP, \beta=0$	عدم قطعیت اندازه‌گیری $(K=2)$	نتایج اندازه‌گیری (فیلتر شده:اسپلاین ۲۵ میلیمتر، HP	عدم قطعیت اندازه‌گیری (K=2)
گام میانگین اندازه‌گیری شده $p_m(nm)$	۵۱۱/۹۹۹۹۵	۰/۰۰۰۰۱	۵۱۱/۹۹۹۹۵	۰/۰۰۰۰۱		
انحراف در طول مرز $\delta L_b\ (in\ nm)$	۴۷	۵	۴۳	۵		
انحراف نسبی در طول مرز $\delta L_{b,\ rel}$	$۱/۷\times۱۰^{-۷}$	$۱/۸\times۱۰^{-۸}$	$۱/۵\times۱۰^{-۷}$	$۱/۸\times۱۰^{-۸}$		
انحراف در طول مشخصه $\delta L_c\ (in\ nm)$	-۲۸	۵	-۲۸	۵		
انحراف نسبی در طول مشخصه $\delta L_{c,\ rel}$	-۱×۱۰^{-۷}	$۱/۸\times۱۰^{-۸}$	-۱×۱۰^{-۷}	$۱/۸\times۱۰^{-۸}$		
انحراف قله نسبت به دره از حالت خطی $\delta L_{nl,P\text{-}V}\ (in\ nm)$	۹۱	۴	۸۲	۴	۴	۴

انحراف نسبی قله نسبت به دره از حالت خطی $\delta Ln_{l,P\text{-}V,\ rel}$	$۳/۳\times۱۰^{-۷}$	$۱/۴\times۱۰^{-۸}$	$۲/۹\times۱۰^{-۷}$	$۱/۴\times۱۰^{-۸}$	$۱/۴\times۱۰^{-۸}$	$۱/۴\times۱۰^{-۸}$
انحراف rms از حالت خطی $\delta Ln_{l,\ rms}(in\ nm)$	۱۶	۴	۱۶	۴	۰/۴	۴
انحراف نسبی rms از حالت خطی $\delta Ln_{l,\ rms,\ rel}$	$۵/۶\times۱۰^{-۸}$	$۱/۴\times۱۰^{-۸}$	$۵/۶\times۱۰^{-۸}$	$۱/۴\times۱۰^{-۸}$	$۱/۴\times۱۰^{-۹}$	$۱/۴\times۱۰^{-۸}$

مثال۲: توری یک‌بعدی بزرگ تر از ۱ میلی متر (p_{nom}=۱۰۰ mm)

دو مثال زیر، مشخصه‌یابی و کاربرد توری ریز یک و دوبعدی به‌عنوان استانداردهای بزرگنمایی در میکروسکوپ‌های با قدرت تفکیک‌بالا، پوشش می‌دهد. شکل الف-۳ اصول روش رویکرد اندازه‌گیری و همچنین نتایج اندازه‌گیری برای یک توری یک‌بعدی با اندازه گام نامی ۱۰۰ nm را که بر روی ناحیه‌ای به اندازه ۱ میلی‌متر در یک تراشه‌سیلیسیمی ایجاد شده است، نشان می‌دهد. کالیبراسیون این نمونه به وسیله یک SEM اندازه‌شناسی مجهز به یک صفحه دوبعدی کنترل‌شده با لیزر انجام گرفته است [12]. راهبرد اندازه‌گیری به این صورت بود که بخش‌هایی از توری تحت میدان دید حدود ۱/۶ میکرومتر تصویر شده تا فاز موضعی توری به وسیله سیگنال تصویر به‌دست آمده از SEM تعیین گردد؛ در ادامه، نمونه به اندازه گام‌های مشخص‌شده (کنترل حرکت به وسیله تداخل‌سنج لیزری) به موقعیت بعدی جابه‌جا شده و مجدداً فاز موضعی از روی سیگنال توری از تصویر SEM ثبت شده، تجزیه و تحلیل می‌شود. با ترکیب سیگنال تداخل‌سنج لیزری و اطلاعات فازموضعی مشخص‌شده برای توری، می‌توان تمام توری را روی مساحت ۱ میلی‌مترمربع از نمونه با این روش اندازه‌گیری هیبریدی مشخصه‌یابی کرد؛ به بند ۵-۴ مراجعه شود.



مکان طراحی اندازه‌گیری: تصویر ۱/۶ میکرونی روبش شده در سطح ۱۰ در ۱۰ میکرون

یادآوری: نتایج کالیبراسیون یک توری یک‌بعدی به اندازه ۱ میلی‌متر با اندازه گام‌نامی ۱۰۰ nm که به‌وسیله یک SEM اندازه‌شناسی و به روش ترکیب اطلاعات تداخل‌سنج لیزری از صفحه نگه‌دارنده نمونه میکروسکوپ و اطلاعات فازموضعی توری تعیین شده از روی تصاویر SEM، به دست آمده است. مقادیر نشان داده شده در واقع انحرافات اندازه‌گیری‌شده از گام میانگین (۹۹.۹۴۷ nm) برحسب موقعیت برای ردیف‌های اندازه‌گیری افقی مختلف می‌باشند. برای جزییات بیشتر به مرجع [12] مراجعه شود.

شکل الف-۳ کالیبراسیون یک توری یک‌بعدی به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی خاص اندازه‌شناسی[1]

1- Metrological

داده‌های شکل الف-۳ بررسی شده و پارامترهای کیفیت توری که طی تحلیل این داده‌ها تعیین گردیده‌اند، در جدول الف-۲ گزارش شده‌اند.

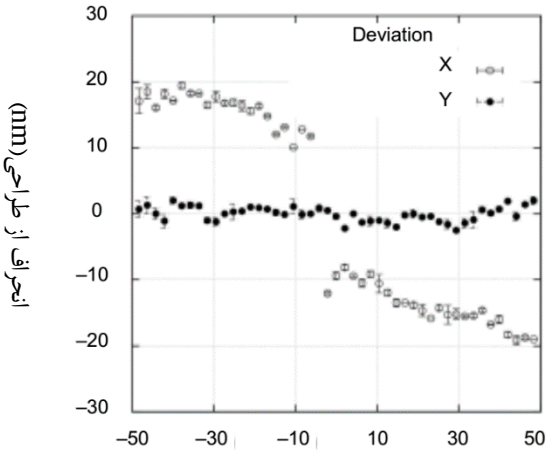
جدول الف-۲ پارامترهای کیفیت برای توری معرفی شده در شکل الف-۳

پارامترهای کیفی توری: توری شکل الف-۳(ردیف ۳۸) با L_{nom} = 1,16 mm and p_{nom} = 100 nm	**نتایج اندازه‌گیری شده (صاف نشده)**	**عدم قطعیت اندازه‌گیری (K=2)**
گام میانگین اندازه‌گیری شده p_m(nm)	۹۹/۹۴۷	۰/۰۰۱
انحراف در طول مرز δLb (in nm)	-۶۰۹	۱۰
انحراف نسبی در طول مرز $\delta L_{b, rel}$	۵/۲×۱۰$^{-۴}$	۸/۹×۱۰$^{-۶}$
انحراف در طول مشخصه δL_c (in nm)	-۶۱۲	۱۰
انحراف نسبی در طول‌مشخصه $\delta L_{c, rel}$	۵/۲۷×۱۰$^{-۴}$	۸/۹×۱۰$^{-۶}$
انحراف قله نسبت به دره از حالت خطی δLn$_{l,P-V}$ (in nm)	۸	۲
انحراف نسبی قله نسبت به دره از حالت‌خطی δLn$_{l,P-V, rel}$	۶/۹×۱۰$^{-۵}$	۱/۷×۱۰$^{-۶}$
انحراف rms از حالت خطی δLn$_{l, rms}$(in nm)	۱/۸	۲
انحراف نسبی rms از حالت خطی δLn$_{l, rms, rel}$	۱/۶×۱۰$^{-۶}$	۱/۷×۱۰$^{-۶}$

در مراجع [4] و [32] برای ردیابی موقعیت‌مکانی ساختار توری‌ها از رویکرد مشابهی برای مشخصه‌یابی توری که شامل ترکیبی از تداخل‌سنج لیزری کنترل‌کننده صفحه نمونه و یک SPM با قدرت تفکیک بالا است، توضیح داده شده است. ابزار استفاده شده در این مورد تحت عنوان SPM اندازه‌شناسی بلند برد شناخته می‌شود زیرا محدوده قابل اندازه‌گیری با آن برابر ۲۵ mm×۲۵ mm×۵ mm بوده و به خاطر همین محدوده اندازه‌گیری وسیع، امکان مشخصه‌یابی توری‌های بزرگ‌تری را فراهم می‌آورد.

مثال۳: توری‌های دوبعدی کوچک تر از ۱۰۰ میکرومتر (p_{nom}=۳۰۰ mm)

شکل الف-۴ نمونه‌ای از یک استاندارد توری را نشان می‌دهد که مشکل متاثر از به «پرش‌فاز» در میانه ناحیه ۱۰۰ میکرومتری نشان می‌دهد. وقوع مشکل پرش‌فاز در فرآیندهای تولیدی نوشتن متوالی[1] و دوخت میدانی[2] بسیار محتمل می‌باشد. اگرچه این انحرافات در برخی زمینه‌های کاری قابل قبول هستند اما در بعضی موارد بسیار بحرانی و حائز اهمیت بوده و باید از آن‌ها اجتناب شود.



یادآوری: نتایج کالیبراسیون انحراف گام (X) و انحراف از مستقیم بودن(Y) بر روی یک توری دوبعدی با اندازه گام‌نامی ۳۰۰ nmکه به وسیله یک SEM اندازه‌شناسی و با استفاده از اطلاعات ترکیبی تداخل‌سنج لیزری صفحه نمونه و فازموضعی توری که از تصاویر SEM به دست آمده، انجام شده است. برای جزییات بیشتر به مرجع [33] مراجعه شود.

شکل الف-۴ کالیبراسیون انحراف‌گام و مستقیم‌بودن یک توری دوبعدی انجام‌شده به وسیله یک SEM خاص اندازه‌شناسی

به‌عنوان مثال، استانداردهای دوبعدی نشان داده شده در شکل الف-۴ را می‌توان به عنوان استانداردهای کالیبراسیون برای بزرگنمایی تصویر در میکروسکوپ‌های با قدرت تفکیک بالا، مورد استفاده قرار داد. تشخیص یا عدم‌تشخیص ناحیه پرش‌فاز به رویکرد و روش اتخاذ شده برای کالیبراسیون وابسته بوده و همین امر می‌تواند خطاهای اندازه‌گیری متفاوتی را در مقادیر به دست آمده برای مقدار گام میانگین استاندارد به وجود آورد. به طریق مشابه، تشخیص یا عدم تشخیص ناحیه پرش فاز تا حدودی تصادفی بوده و به روش کالیبراسیون کاربر بستگی دارد.

تجزیه و تحلیل داده‌های شکل الف-۴ با توجه به پارامتر-های کیفی توری برای انحرافات اندازه‌گیری شده در جهت X (گام) در جدول الف-۳ نشان داده شده اند.

1- Sequential writing
2- Field stitching

جدول الف-۳پارامترهای کیفی توری معرفی شده در شکل الف-۴

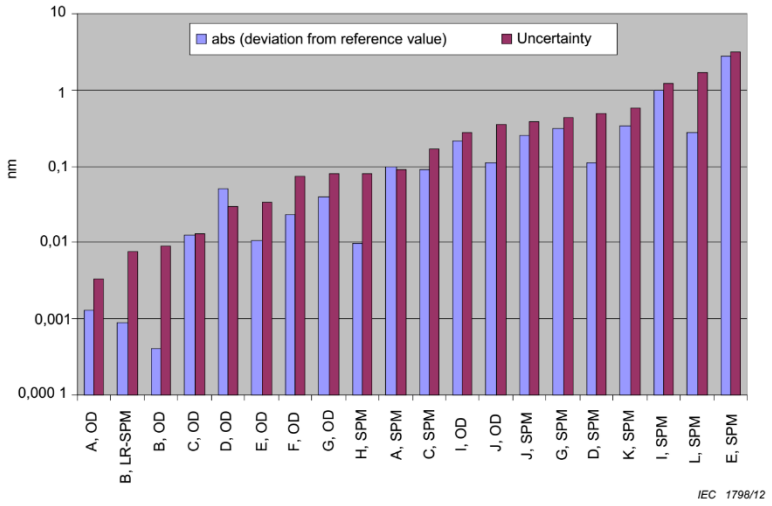
پارامترهای کیفی توری: توری شکل الف-۴(انحراف x) با L_{nom} = 1,16 mm and p_{nom} = 100 nm	نتایج اندازه‌گیری شده (صاف نشده)	عدم قطعیت اندازه‌گیری (K=2)
گام میانگین اندازه‌گیری شده p_m(nm)	۲۹۹/۸۶	۰/۰۲
گام‌موضعی p_{loc} (-25,3 µm, 48,4 µm) = p_{loc} (12, 23) (in nm)	۲۹۹/۸۹	۰/۰۴
گام موضعی p_{loc} (25,3 µm, 48,4 µm) = p_{loc} (35, 23) (in nm)	۲۹۹/۴۰	۰/۰۴
انحراف در طول مرز δL_b (in nm)	-۳۶	۷
انحراف نسبی در طول مرز $\delta L_{b, rel}$	$-۳/۶\times۱۰^{-۴}$	۷×۱۰^{-۵}
انحراف در طول‌مشخصه δL_c (in nm)	-۴۷	۷
انحراف نسبی در طول‌مشخصه $\delta L_{c, rel}$	$۴/۷\times۱۰^{-۴}$	۷×۱۰^{-۵}
انحراف قله نسبت به دره از حالت خطی $\delta Ln_{l,P-V}$ (in nm)	۲۳	۲
انحراف نسبی قله نسبت به دره از حالت‌خطی $\delta Ln_{l,P-V, rel}$	$۲/۳\times۱۰^{-۴}$	۲×۱۰^{-۵}
انحراف rms از حالت خطی $\delta Ln_{l, rms}$(in nm)	۵/۵	۲
انحراف نسبی rms از حالت خطی $\delta Ln_{l, rms, rel}$	$۵/۶\times۱۰^{-۵}$	۲×۱۰^{-۵}

در سه مثال مطرح‌شده در مورد مشخصه‌یابی توری، پارامترهای کیفیت مهم توری مانند انحراف‌نسبی طول کل و انحراف‌نسبی از حالت‌خطی در حدود ۳ تا ۴ مرتبه بزرگی متغیر هستند. در هنگام بررسی و انتخاب روش‌های اندازه‌گیری مناسب برای کالیبراسیون و مشخصه‌یابی کیفیت‌توری براساس راهنمایی ارائه شده در بند ۵، توصیه می‌شود این محدوده تغییر در نظر گرفته شود. در به کارگیری استانداردهای کالیبره‌شده توری که در سه مثال پیشین کاربرد آنها برای انتشار واحد طول شرح داده‌شد، لازم به ذکر است برای آن

که خطاهای اندازه‌گیری به کمی مقادیر نشان داده شده در جداول الف-۱ تا الف-۳ باشد، کاربر لازم است استانداردها را دقیقاً بر روی مقاطع مشابه از توری و همچنین تحت شرایط نگهدارنده یکسان حین کالیبراسیون، اندازه‌گیری نماید.

مثال ۴- مقایسه بین‌المللی بر روی یک توری دوبعدی (p_{nom}=۱۰۰۰ nm)

شکل الف-۵ نتایج یکی از مقایسه‌های بین‌المللی که اخیراً بر روی توری‌های دوبعدی انجام شده است را نشان می‌دهد [5]. در این نمودار، انحرافات از مقدار مرجع و همچنین خطاهای اندازه‌گیری تخمینی برای مشارکت کننده‌ها در این مقایسه و ابزارهای مختلف مورد استفاده در کالیبراسیون توری با گام نامی ۱۰۰۰ nm و مساحت نامی ۲/۵mm×۲/۵ mm، نمایش داده شده است.



یادآوری- نتایج یک مقایسه بین‌المللی طراحی‌شده توسط موسسه‌های ملی اندازه‌شناسی بر روی یک توری دوبعدی با گام نامی ۱۰۰۰ nm که در مشارکت کننده‌های متفاوت و به وسیله دستگاه‌های مختلف انجام شده است: پراش نوری (OD)، میکروسکوپ‌های کاوندروبشی (SPM) خاص‌اندازه‌شناسی با محدوده پویش استاندارد (معمولاً کمتر از ۱۰۰ میکرومتر) و SPM اندازه‌شناسی‌خاص بلند برد. نتایج ارائه شده در این شکل، در واقع انحراف از مقدار مرجع متوسط وزنی بوده و عدم قطعیت‌های استاندارد مرکب u_c تخمین زده شده، با علائم A تا L مشخص گردیده‌اند. برای جزییات بیشتر به مرجع [6] مراجعه شود.

شکل الف-۵ نتایج یک مقایسه بین‌المللی بر روی یک توری دوبعدی که توسط مشارکت کننده‌ها و دستگاه‌های مختلف انجام شده است.

روش‌های پراش نوری [7] و [34] ، به کمترین عدم‌قطعیت، کمتر از ۰/۰۱ nm ، دست می‌یابند زیرا این توانایی را دارند که تمام سطح توری را به‌صورت نوری کاوش نمایند درحالی‌که SPM اندازه‌شناسی‌خاص با مراحل روبش استاندارد در تعیین گام متوسط دارای محدودیت بوده و عدم قطعیت آن در حدود۰/۱ nm می باشد. هرچند، SPM اندازه‌شناسی بلندبرد نه تنها مشابه روش‌های پراش‌نوری می‌تواند تمام مساحت

توری را اندازه‌گیری کند، بلکه اطلاعات قابل مقایسه از اختلاف[1] گام‌موضعی مانند سایر دستگاه‌های SPM با قدرت تفکیک بالا فراهم می‌کند. از این رو، این مثال نشان می‌دهد که روش‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری هیبریدی، وسیله‌های مهمی برای ارزیابی کامل کیفی توری‌های ساخته شده هستند.

طیف گسترده‌ای از انواع مختلف استانداردهای کالیبراسیون توری موجود می‌باشد. در مرجع [35]، کلیات استانداردهای کالیبراسیون موجود، که مرتباً بروزرسانی می‌شوند، مطرح گردیده‌اند. روش‌های کالیبراسیون مبتنی بر SPM در استانداردهای گام که با به‌کارگیری الگوریتم‌های پردازش تصویر انجام می‌گیرند، در مرجع [36] مطرح شده‌اند.

در کشورهای متعدد، مدارک، راهنماها و استانداردهای ملی وجود دارد که استانداردها و روش‌های مشخصه یابی توری را پوشش داده و همچنین استفاده از آن‌ها به عنوان طول در کاربردهای مختلف عمدتا نظیر استانداردهای بزرگنمایی تصویر در میکروسکوپ‌ها با قدرت تفکیک بالا، را شرح می‌دهد. برخی از این اسناد در فهرست مراجع ذکر شده اند [45-39].

1- Variation

پیوست ب
(آگاهی دهنده)
شبکه‌های براوه

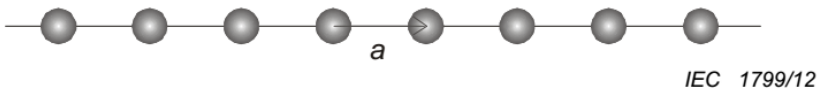
ب-۱ شبکه‌های براوه[1]

در علم هندسه و بلورشناسی، یک شبکه براوه آرایه‌ای نامتناهی از نقاط مجزا است که به وسیله مجموعه‌ای از عملگرهای انتقالی مجزا تعریف می‌شوند:

$$\vec{r} = k \times \vec{a} + l \times \vec{b} + m \times \vec{c}$$

که k، l و m اعداد صحیح بوده و $\vec{a}$، $\vec{b}$ و $\vec{c}$ بردارهای اولیه هستند که در جهات مختلف واقع شده و شبکه را گسترش می‌دهند. به ازای هر انتخابی از بردار مکان $\vec{r}$، شبکه به صورت یکسانی مشاهده می‌شود. با تکرار چیدمان تناوبی یک یا چند اتم (پایه) در هر نقطه شبکه، یک بلور پدید می‌آید.

در یک بعد، تنها یک شبکه براوه ممکن وجود دارد (به شکل ب-۱ مراجعه شود)، درحالی‌که در دو بعد، ۵ شبکه براوه مختلف قابل تمایز هستند. تعداد شبکه‌های متمایز در سه بعد به ۱۴ عدد می‌رسد. جزییات بیشتر در رابطه با شبکه‌های براوه در کتاب‌های درسی استاندارد در مورد بلورشناسی یا فیزیک حالت جامد قابل دسترسی است؛ به عنوان مثال به مرجع [37] رجوع شود.



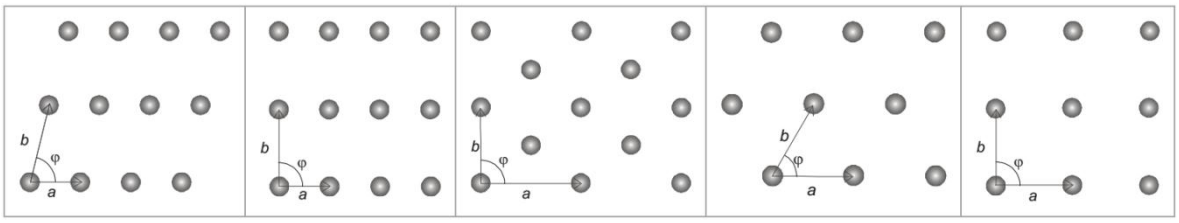
شکل ب-۱ شبکه براوه یک‌بعدی

قدر مطلق بردار اولیه ثابت شبکه در حالت یک‌بعدی نیز نامیده می‌شود؛ بند ۳-۲-۵ مشاهده شود

ب-۲ شبکه های براوه دوبعدی[2]

در دو بعد، ۵ شبکه براوه وجود دارد؛ شکل ب-۲ مشاهده شود. این شبکه‌ها به صورت شیب‌دار، راست-گوشه، راست‌گوشه مرکزدار، شش‌گوش و مربع هستند.

1- Bravais lattices
2- Bravais lattices in 2D



کلید (چپ به راست)

مایل**($\phi \neq 90°$)**

چهارگوشه**($\phi = 90°$)**

چهاگوشه مرکزدار**($\phi = 90°$)**

شش‌ضلعی**($\phi = 60°$)**

مربع**($\phi = 90°$)**

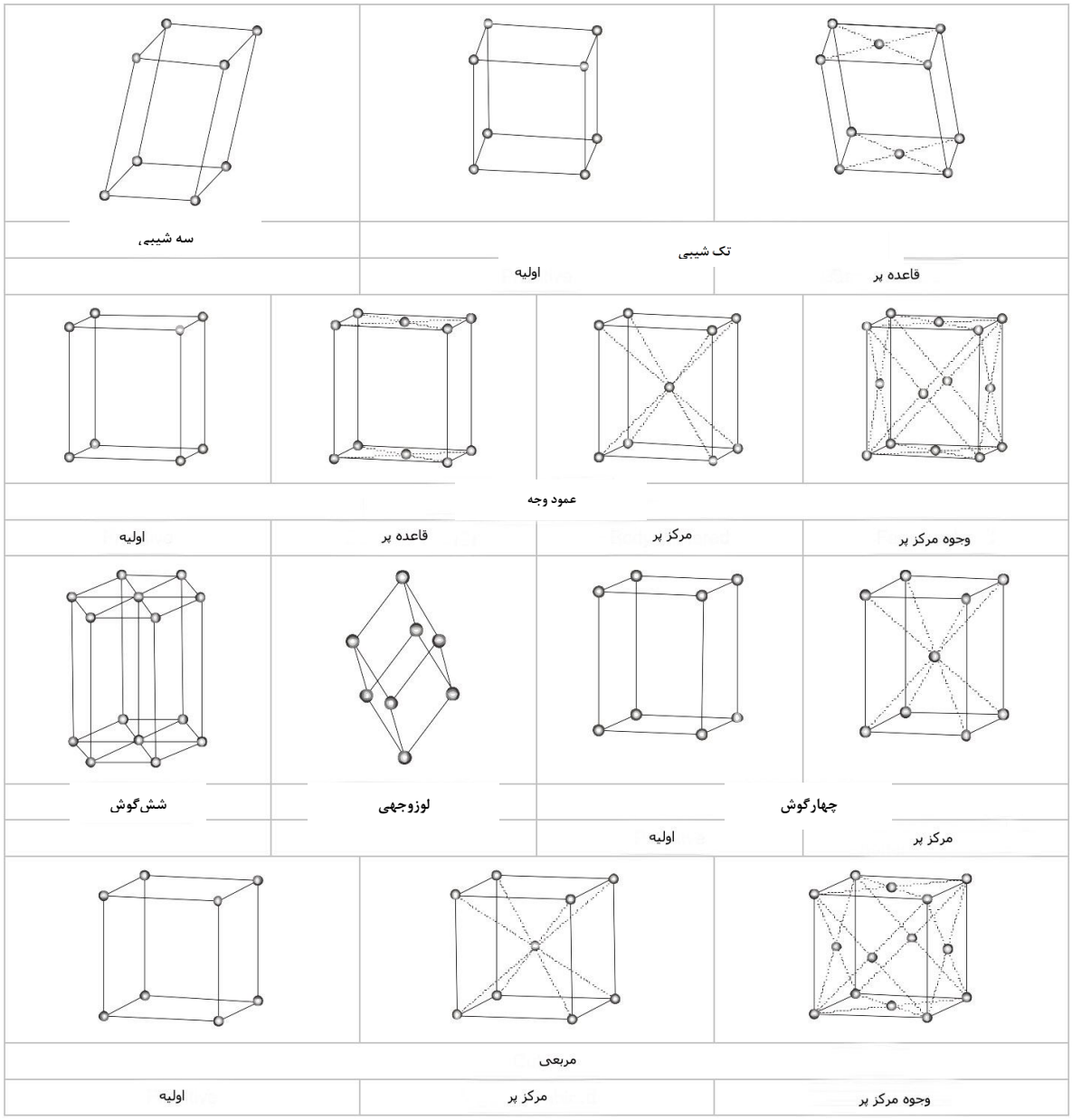
شکل ب-۲- ۵ شبکه براوه پایه در دو بعد که بردارهای اولیه $\vec{a}$ و $\vec{b}$ و زاویه φ میان آن‌ها مشخص شده است.

ب-۳ شبکه‌های براوه سه‌بعدی[1]

چهارده شبکه براوه در سه بعد وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به صورت زیر دسته‌بندی نمود (شکل ب-۳):

- ساده (P): نقاط شبکه تنها بر روی گوشه‌های سلول قرار گرفته‌اند؛
- مرکز پر (I): یک نقطه شبکه‌اضافی در مرکز سلول قرار گرفته است؛
- مرکز وجه‌پر (F): یک نقطه شبکه اضافی در مرکز تمامی وجوه سلول قرار گرفته است؛
- مرکز بر روی یک وجه (قاعده مرکزپر): یک نقطه شبکه‌اضافی در مرکز یکی از وجوه سلول قرار گرفته است.

1- Bravais lattices in 3D



شکل ب-۳، ۱۴ شبکه براوه اصلی در سه بعد

حجم سلول واحد را می‌توان با محاسبه $\vec{a}.(\vec{b}\times\vec{c})$ به‌دست آورد که در آن $\vec{a}$، $\vec{b}$ و $\vec{c}$ بردارهای شبکه هستند. حجم شبکه‌های براوه مختلف در جدول ب-۱ نشان داده شده است.

جدول ب-۱ حجم شبکه‌های براوه

سیستم بلوری	حجم
سه‌شیبی $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$	$abc\sqrt{1-\cos^2\alpha-\cos^2\beta-\cos^2\gamma+2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma}$
تک شیبی $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90°; \beta \neq 90°$	$abc\sin\alpha$
عمودوجه $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	abc
چهارگوش $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	a^2c
لوزوجهی $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$	$-a^3\sqrt{1-3\cos^2\alpha+2\cos^3\alpha}$
شش‌گوش $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90°; \gamma = 120°$	$\frac{3\sqrt{3}a^2c}{2}$
مربعی $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	a^3

ب-۴ شبه بلورها[1]

لازم به ذکر است برخی ساختارها اگرچه غیرتناوبی هستند اما دارای ساختاربلوری طبیعی منظم بوده ولی تقارن‌انتقالی کامل، مشابه آن چه برای شبکه براوه گفته شد، در آن‌ها مشاهده نمی‌گردد. این ساختارهای بلوری غیرتناوبی به بلور شبه‌تناوبی یا شبه‌بلور معروف هستند [38]. دو نوع شبه‌بلور طبیعی شناخته شده وجود دارد:

الف- شبه‌بلورهای چندضلعی که دارای یک محور تقارن درجه ۸، ۱۰ یا ۱۲ هستند (این بلورها در راستای این محور تناوبی بوده و در صفحات عمود بر آن، شبه تناوبی می‌باشند)؛
ب- شبه‌بلورهای بیست‌وجهی، که در تمامی جهات غیرتناوبی هستند.

1- Quasicrystals

کتاب‌نامه

:

[1] SEMI P35, *Terminology for microlithography metrology*

[2] ISO 14660-1:1999, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical features – Part 1: General terms and definitions*

[3] ISO 15902:2004, *Optics and photonics – Diffractive optics – Vocabulary*

[4] G. Dai et al. *Accurate and traceable calibration of one-dimensional gratings*; Meas. Sci. Technol., **16,** 1241-1249 (2004)

[5] J. Garnaes. *Nano5 comparison on 2D gratings, Final report*, 2008, CCL-S4 supplementary
comparison, Metrologia, 2008, **45**, Tech. Suppl., 04003

[6] Just, A.; Krause, M.; Probst, R.; Bosse, H.; Haunerdinger, H.; Spaeth, C.; Metz, G.; Israel, W. *Comparison of angle standards with the aid of a high-resolution angle encoder;* Precision Engineering: **33** (2009), 4, 530 – 533

[7] E. Buhr, W. Michaelis, A. Diener and W. Mirande. *Multi-wavelength VIS/UV optical diffractometer*
for high-accuracy calibration of nano-scale pitch standards; Meas. Sci.
Technol. **18** (2007) 667–674

[8] C.J. Raymond. *Scatterometry for Semiconductor Metrology*, in *Handbook of Silicon Semiconductor Metrology*, A.C. Diebold, Ed. (Dekker, 2001)

[9] M. Wurm, F. Pilarski, B. Bodermann: *A new flexible scatterometer for critical dimension metrology*, Rev. Sci. Instrum. **81**(2010) 023701

[10] H. Gross, A. Rathsfeld, F. Scholze, and M. Bär. *Profile reconstruction in extreme ultraviolet*
(EUV) scatterometry: modeling and uncertainty estimates, Meas. Sci. Technol. **20**
(2009) 105102 (11pp)

[11] W. Gao, A. Kimura. *A fast evaluation method for pitch deviation and out-of-flatness of a*
planar scale grating; CIRP Annals – Manufacturing Technology **59** (2010) 505–508

[12] W. Häßler-Grohne et al. *Characterization of a 100 nm 1D pitch standard by metrological*
SEM and SFM, Proc. SPIE Microlithography, **5375**, p. 426-436, 2004

[13] M. Arnz et al. *Calibration of test masks used for lithography lens systems*; Proc EMLC 2006, p. 103-116

[14] Ichiko Misumi et al. *Bilateral comparison of 25 nm pitch nanometric lateral scales for metrological scanning probe microscopes*; 2010 Meas. Sci. Technol. **21** 035105

[15] R Köning et al. *A revised treatment of the influence of the sample support on the measurement*
of line scales and the consequences for its use to disseminate the unit of
length, Metrologia **46** 187, 2009

[16] Villarrubia, J. S. *Issues in Line Edge and Linewidth Roughness Metrology*, Proceedings of American Institute of Physics International Conference on Characterization and Metrology
for ULSI Technology 2005, Vol. 788, pp. 386 – 393

[17] ISO/TS 16610-1:2006, *Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 1: Overview and basic concept*

[18] Michael P. Krystek. *ISO Filters in Precision Engineering and Production Measurement*;
submitted to MST

[19] HEIDENHAIN Technical Information: *Resulting Linear Error after Multipoint Linear Error*
Compensation with the LIDA 400. Available at <www.heidenhain.de>

[20] List of recommended radiations of the Working Group on the *Mise en Pratique* (MeP) of
the CCL. Available at <http://www.bipm.org/en/publications/mep.html>

[21] ISO 29301:2010, *Microbeam analysis – Analytical transmission electron microscopy – Methods for calibrating image magnification by using reference materials having periodic structures*

[22] ISO 16700:2004, *Microbeam analysis – Scanning electron microscopy – Guidelines for calibrating image magnification*

[23] ISO/CD 11952, *Guideline for the determination of geometrical quantities using Scanning*
Probe Microscopes – Calibration of measuring systems

[24] ISO/CD 25178-70, *Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal – Part 70: Material measures*

[25] Peter J. Mohr, Barry N. Taylor, and David B. Newell. *CODATA recommended values of*
the fundamental physical constants: 2006, Rev. Mod. Phys. 80, 633 (2008) – Published June 6, 2008 (see page 676)
[26] P. Becker et al. *Absolute measurements of the (220) lattice plane spacing in a silicon crystal*, Phys. Rev. Lett. **46** (1981) 1540-1543
[27] DIN 2268 (Oct. 1975, now outdated): *Längenmaße mit Teilungen, Kenngrößen, Tolerierung*
– Measures of length with graduation, parameters, tolerancing
[28] OIML R 98, edition 1991 (E), *High-precision line measures of length;* available from: Bureau International de Métrologie Légale,11, rue Turgot – 75009 Paris – France
[29] F. Meli. *Nano4 comparison on 1D gratings, Final report, 2000, CCL-S1 supplementary comparison,* available at <http://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbresults/ccl-s1/ccls1_ final_report.pdf>
[30] H. Bosse et al. *Nano3 comparison on line scales, Final report*, 2003, CCL-S3 supplementary
comparison: Metrologia, 2003, **40**, Tech. Suppl., 04002
[31] I. Tiemann et al. *An international length comparison using vacuum comparators and a photoelectric incremental encoder as transfer standard*, Prec. Eng., **32**, (2008) 1-6
[32] G. Dai et al. *Accurate and traceable calibration of two-dimensional gratings*; Meas. Sci.
Technol. **18,** 2007, S. 415–421
[33] Th. Dziomba et al. *Influence of nanostandard properties on calibration procedures of SPMs*, Proc. Euspen Intl. Topical Conf., Aachen, **2**, 491-494, 2003
[34] Jennifer E Decker et al. *Report on an international comparison of one-dimensional (1D)*
grating pitch; 2009 Metrologia **46** 04001
[35] http://www.nanoscale.de/standards.htm
[36] J. F. Jørgensen, C.P. Jensen, J. Garnaes. *Lateral metrology using scanning probe microscopes*
– 2D pitch standards and image processing; Applied Physics A **66** 1998, S. 847–852
[37] H. Ibach, H. Lüth. *Solid State Physics*, 4th ed., Springer, Berlin, Heidelberg, 2009

[38] Ron Lifshitz, Dan Shechtman, Shelomo I. Ben-Abraham (editors). *Quasicrystals: The Silver Jubilee*, Philosophical Magazine Special Issue 88/13-15 (2008)

Existing national standards and guidelines for grating characterization and use:

[39] GOST R 8.628-2007. *Single crystal silicon nanometer range relief measure. Geometrical*
shapes, linear size and manufacturing material requirements.

[40] GOST R 8.629-2007. *Nanometer range relief measure with trapezoidal profile of elements.*
Method for verification.

[41] GOST R 8.630-2007. *Atomic force scanning probe measuring microscopes. Method for verification.*

[42] GOST R 8.631-2007. *Scanning electron measuring microscopes. Method for verification.*