INSO
21303
1st.Edition
2017
Identical with
ISO 29301:
2010

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

استاندارد ملی ایران
۲۱۳۰۳
چاپ اول
۱۳۹۵

فناوری نانو- آنالیز با میکروباریکه– روش آنالیز با میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM– روش‌های کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر با استفاده از مواد مرجع دارای ساختارهای متناوب

Nanotechnology- Microbeam analysis — Analytical transmission electron microscopy- Methods for calibrating image magnification by using reference materials having periodic structures

ICS: 07. 30;37.020

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.org

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.org

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 صدورگواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز کالیبراسیون (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، کالیبراسیون 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- آنالیز با میکروباریکه– روش آنالیز با میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM– روش‌های کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر با استفاده از مواد مرجع دارای ساختارهای متناوب»

رئیس:	**سمت و/ یا محل اشتغال:**
سهرابی جهرمی، ابوذر (دکتری نانوفناوری)	مدیرعامل شرکت راصد توسعه فناوری‌های پیشرفته
دبیر:	
قرایلو، داود (کارشناسی ارشد فناوری نانو)	مدیر فنی آزمایشگاه TEM دانشگاه صنعتی شریف
اعضاء: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
اسلامی پور، الهه (کارشناس ارشد زیست شناسی)	کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو
چوخاچی زاده مقدم، امین (کارشناس ارشد مواد)	کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو
سیفی، مهوش (کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)	نایب رئیس کمیته فنی متناظر فناوری نانو
صادق حسنی، صدیقه (کارشناسی ارشد شیمی)	هیئت علمی پژوهشگاه صنعت نفت
فاضلی کجور، فخرالدین (کارشناسی مهندسی مواد)	کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو
نسب، مجتبی (کارشناس مهندسی مواد)	کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو و دبیر شبکه راهبردی

ویراستار:

سیفی؛ مهوش

(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

نایب رئیس کمیته فنی متناظر فناوری نانو

فهرست مندرجات

عنوان	صفحه
مقدمه	ح
۱ هدف و دامنه کاربرد	۱
۲ مراجع الزامی	۱
۳ اصطلاحات، تعاریف نمادها و کوته‌نوشت	۲
۴ بزرگنمایی تصویر	۹
۴-۱ تعریف بزرگنمایی تصویر	۹
۵ مواد مرجع	۱۱
۵-۱ کلیات	۱۱
۵-۲ الزامات CRM/RM	۱۱
۵-۳ انبارش و استفاده	۱۲
۶ روش اجرایی کالیبراسیون	۱۲
۶-۱ کلیات	۱۲
۶-۲ بارگذاری CRM/RM	۱۲
۶-۳ تنظیمات شرایط عملیاتی TEM برای کالیبراسیون	۱۳
۶-۴ ثبت تصویر رقمی	۱۵
۶-۵ رقمی کردن تصویر ثبتشده روی فیلم عکاسی	۱۶
۶-۵-۱ کلیات	۱۶
۶-۵-۲ چگونه تفکیک پذیری رقمی شدن تعیین شود	۱۷
۶-۶ اندازه‌گیری فاصله زاویه تصحیح شده Dt، از تصویر رقمی شده	۱۸
۶-۶-۱ کلیات	۱۸
۶-۶-۲ روش اجرایی اندازه‌گیری	۱۹
۶-۷ رقمی کردن مقیاس مرجع برای کالیبراسیون کردن اندازه پیکسل	۲۱

۶-۸ کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر ۲۲
۶-۸-۱ کلیات ۲۲
۶-۸-۲ کالیبراسیون واحد مقیاس (=اندازه پیکسل) S ۲۲
۶-۸-۳ محاسبه بزرگنمایی تصویر ۲۳
۶-۹-۱ اندازه مقیاس پایه منطبق به یک پیکسل روی تصویر رقمی شده ۲۴
۶-۹-۲ کالیبراسیون نشانگر مقیاس ۲۴
۶-۱۰ روش اجرایی کالیبراسیون برای اندازه‌گیری‌های طول فقط با استفاده از فیلم عکاسی ۲۵
۷ صحت بزرگنمایی تصویر ۲۵
۸ عدم‌قطعیت نتیجه اندازه‌گیری ۲۶
۹ گزارش کالیبراسیون ۲۸
۹-۱ کلیات ۲۸
۹-۲ مندرجات گزارش کالیبراسیون ۲۸
پیوست الف- عواملی که روی نتایج بزرگنمایی TEM تاثیرگذار هستند ۳۰
پیوست ب- نمودار روش اجرایی کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر ۳۱
پیوست پ- چگونه تعداد خطوط را برای میانگین‌گیری مشخص کنید ۳۲
کتاب‌نامه ۴۶

مقدمه

میکروسکوپ الکترونی عبوری، TEM[1]، به‌طور گسترده‌ای برای مطالعه نانو و میکروساختارها در موادی مانند نیم‌رساناها، فلزات، نانوذرات، پلیمرها، سرامیک‌ها، شیشه و مواد زیستی و غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این استاندارد ملی با توجه به نیاز کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر، تدوین شده است. این استاندارد به توضیح الزامات کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر در میکروسکوپ الکترونی عبوری با استفاده از یک ماده مرجع گواهی‌شده یا یک ماده مرجع دارای ساختارهای تناوبی[2] می‌پردازد.

1- Transmission Electron Microscope

2 -Periodic structures

پیش‌گفتار

استاندارد«فناوری نانو- آنالیز با میکروباریکه– روش آنالیز با میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM– روش‌های کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر با استفاده از مواد مرجع دارای ساختارهای متناوب» 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 سی و نهمین اجلاسیه کمیتهٔ ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۹۵/۱۱/۰۹ 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 براساس 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 درصورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، در هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط، موردتوجه 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:

ISO 29301:2010 Microbeam analysis — Analytical transmission electron microscopy — Methods for calibrating image magnification by using reference materials having periodic structures[1]

فناوری نانو- آنالیز با میکروباریکه– روش آنالیز با میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM– روش‌های کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر با استفاده از مواد مرجع دارای ساختارهای متناوب

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد ، تعیین مراحل کالیبراسیون است که برای تصاویر ثبت‌شده در محدوده وسیعی از بزرگنمایی به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده می‌شود. مواد مرجعی که برای این کالیبراسیون استفاده می‌شود دارای ساختار تناوبی مانند رپلیکای شبکه‌ای پراش[1]، ساختار ابرشبکه‌ای نیم‌رسانا یا بلور آنالیزی برای آنالیز پرتو ایکس، تصویر شبکه بلوری کربن، طلا یا نقره هستند. این استاندارد قابل استفاده در بزرگنمایی تصویر TEM است که روی فیلم‌های عکاسی یا صفحه تصویربرداری[2] یا روی حسگر تصویری در دوربین رقمی ثبت شده باشد. این استاندارد به کالیبراسیون نشانگر مقیاس نیز اشاره می‌کند. این استاندارد برای روش‌های CD-TEM[3] و STEM[4] کاربرد ندارد.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد ملی ایران به آن ارجاع داده شده است. بدین‌ترتیب، آن ضوابط جزیی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

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

استفاده از این مراجع برای کاربرد این استاندارد الزامی است.

۲-۱ استاندارد ملی ایران- ایزو- آی ای سی شماره، ۱۷۰۲۵: ۱۳۸۶ الزامات عمومی برای احراز صلاحیت آزمایشگاه‌های آزمون و کالیبراسیون

2-2 ISO Guide 30:1992, Terms and definitions used in connection with reference materials

2-3 ISO Guide 34:2009, General requirements for the competence of reference material – producers

2-4 ISO Guide 35:2006, Reference materials -- General and statistical principles for certification

2-5 ISO/IEC Guide 98-3: 2008, Uncertainity of measurement-Part 3: Guide to expression of uncertainaity in measurement (GUM:1995)

---

1 -Diffraction Grating replica

2 -Image plate

3- Dedicated Critical Dimension Measurement (TEM)

4- Scanning Transmission Electron Microscope (STEM)

۳ اصطلاحات، تعاریف نمادها و کوته‌نوشت

در این استاندارد، علاوه بر اصطلاحات و تعاریف تعیین‌شده در راهنمای ISO Guide 30، اصطلاحات با تعاریف زیر نیز به‌کار می‌رود:

۱-۳

انطباق محوری (هم‌ترازی)

alignment

یک سری عملیات برای هم‌ترازی مسیر حرکت باریکه الکترونی به سمت محور نوری است. برای این کار از تنظیم‌کننده‌های مکانیکی یا خم‌کننده‌ها استفاده می‌شود.

۲-۳

آسیب ناشی از باریکه الکترونی

beam damage

آسیب‌هایی که در اثر تابش باریکه الکترونی به آزمونه[1] ایجاد می‌شوند.

۳-۳

ماده مرجع گواهی شده

certified reference material
CRM

به ماده مرجع دارای گواهینامه اطلاق می‌شود که یک یا چند مقدار از خاصیت آن براساس دستورالعملی گواهی شده باشد. دستورالعملی که موجب قابلیت ردیابی[2] صحت یکای مورداستفاده می‌شود. میزان عدم‌قطعیت هر مقدار گواهی‌شده باید گزارش شود.

یادآوری- در این استاندارد، برای کالیبراسیون بزرگنمایی تصاویر از یک CRM دارای ساختار تناوبی با فاصله و صحت تناوبی در سطح بسیار مطلوب باید استفاده شود.

۴-۳

آلودگی

contamination

تشکیل یک لایه از هر ماده که در اثر برهم‌کنش باریکه الکترونی با آزمونه و یا محیط، رسوب می‌کند.

۵-۳

جهت‌یافتگی بلور

crystal orientation

جهتی از بلور که به‌وسیله شاخص صفحات بلور نشان داده می‌شود.

---

1 -Specimen
2- Traceable

یادآوری- در زمان تصویربرداری TEM، استفاده از یک آزمونه بلورین هم‌تراز شده، به‌نحوی که محور منطقه[1] ویژه (شاخص پایین[2] صفحات) موازی یا تقریبا موازی با جهت باریکه الکترون باشد، رایج است.

۶-۳

ناواضحی

defocus

شرایطی که فاصله عمودی آزمونه نسبت به فاصله عمودی عدسی شیئی، منطبق نباشد.

یادآوری- حالت فوکوس در ناحیه بالا[3] به شرایطی گفته می‌شود که در آن ارتفاع آزمونه بیش از صفحه شیئی به عدسی نزدیک بوده و حالت فوکوس در ناحیه پایین[4] به شرایطی اطلاق می‌شود که ارتفاع آزمونه نسبت به صفحه شیئی دورتر از عدسی است.

۷-۳

رپلیکای شبکه‌ای پراش

diffraction grating replica

لایه رپلیکای کربنی سایه‌دار، دارای شبکه‌ای است که در هر میلی‌متر از آن ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ شیار موازی وجود دارد یا حاوی شبکه‌ای از خطوط متقاطع با فواصل یکسان هستند.

یادآوری- رپلیکای شبکه‌ای پراش می‌تواند به‌عنوان ماده مرجع برای کالیبراسیون بزرگنمایی تصاویر در محدوده بزرگنمایی پایین تا متوسط مورداستفاده قرارگیرد.

۸-۳

دوربین رقمی

digital camera

وسیله‌ای است که با استفاده از حسگر تصویر مجهز به تراشه‌های آرایه‌شده، تصویر را آشکار می‌کند، مانند وسیله جفت‌شده با بار (CCD)[5] یا نیمه‌رساناهای مکمل اکسید فلز (CMOS)[6] که می‌تواند یک تصویر را تبدیل به سیگنال‌های الکتریکی کند.

۹-۳

محدوده پویایی

dynamic range

1- Zone axis
2 -Low index
3 - Over focus
4 -Under focus
5 -Charge-coupled device
6 -Complementary metal-oxide semiconductor

محدوده‌ای از دُز الکترون‌های قابل آشکارسازی که روی آشکارساز می‌نشیند و در آن محدوده سیگنال تصویر به‌خوبی قابل شناسایی است.

۳-۱۰

جریان برانگیختگی

excitation current

جریان الکتریکی اعمال‌شده روی سیم‌پیچ عدسی‌های مغناطیسی است.

۳-۱۱

مقیاس شیشه‌ای

glass scale

خط‌کشی که دارای درجه‌بندی بسیار ریز بوده و می‌توان از آن به‌عنوان مقیاس مرجع به‌منظور اندازه‌گیری فاصله در تصویر رقمی بعد از رقمی‌کردن تصویر با یک روبشگر[1] تصویر استفاده کرد.

یادآوری- شفافیت و پایداری حرارتی مقیاس شیشه‌ای برای دریافت تصویر رقمی مرجع با یک روبشگر تصویر عبوری و ایجاد تصویر روی صفحه تصویر مناسب است.

۳-۱۲

پایه زاویه‌سنج

goniometer stage

وسیله‌ای که آزمونه را به‌صورت جانبی و عمودی حرکت می‌دهد. با این وسیله می‌توان با چرخش نگهدارنده آزمونه حول محور طولی نگهدارنده، آزمونه را چرخاند.

۳-۱۳

پهنای میدان افقی

horizontal field width
HFW

طول اولیه متناظر با پهنای کامل در جهت افقی روی تصویر بزرگنمایی‌شده است.

۳-۱۴

تصویر

image

تابش دو بعدی از ساختار آزمونه که به‌وسیله دستگاه TEM ایجاد می‌شود.

یادآوری- فیلم عکاسی، صفحه تصویر، حسگر تصویری دوربین رقمی نمونه‌هایی از وسیله‌های آشکارساز تصویر هستند.

1- Scanner

۱۵-۳

قالب فایل تصویر

image file format

روش پردازش رمزگذاری اطلاعات تصویر برای ذخیره در فایل رایانه‌ای است.

۱۶-۳

بزرگنمایی تصویر

image magnification

نسبت خطی ابعاد ساختار/ مقیاس مشخص تصویر روی آشکارساز تصویر، مانند: فیلم عکاسی، صفحه تصویربرداری، حسگر تصویر روی دوربین رقمی به ابعاد خطی ساختار/ مقیاس آزمونه، است.

۱۷-۳

صفحه تصویر

imaging plate
IP

آشکارساز الکترونی تصویر که شامل یک فیلم حاوی لایه فعال نازک فسفردار است.

۱۸-۳

روبشگر تصویر

image scanner

وسیله‌ای است که تصویر آنالوگ را با تفکیک‌پذیری مناسب به تصویر رقمی تبدیل می‌کند.

یادآوری- دو نوع روبشگر متفاوت وجود دارد روبشگر تخت[۱] و روبشگر دوار[۲].

۱۹-۳

حسگر تصویر

image sensor

وسیله‌ای است مانند آرایه CCD[۳] یا حسگر CMOS[۴]، که اطلاعات تصویری را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل کرده و معمولاً روی یک دوربین رقمی یا دستگاه‌های دیگر تصویر برداری نصب می‌شود.

۲۰-۳

لرزاننده تصویر

image wobbler

سیم‌پیچ خم‌کننده که جهت باریکه الکترونی تابیده‌شده به آزمونه را تغییر می‌دهد.

یادآوری- به‌منظور یافتن محل فوکوس، این سیم‌پیچ به‌صورت تناوبی فعال می‌شود.

1- Flatbed
2- Drum
1- Charge- Coupled Device
2- Complementry – metal-Oxide Semicunductor

۳-۲۱

وضوح دقیق

just focus

شرایطی که در آن ارتفاع آزمونه منطبق با صفحه شیئی عدسی شیئی است.

۳-۲۲

تصویر شبکه

lattice image

تصویری شامل لبه‌های تداخلی است که در اثر برهم‌کنش باریکه الکترون عبوری و پرتو الکترون پراش‌یافته از یک صفحه بلوری مشخص به‌وجود می‌آیند.

یادآوری- این لبه‌های شبکه برای کالیبراسیون تصویر در آخرین حد بزرگنمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۲۳

فاصله شبکه

lattice spacing

فاصله بلوری میان دو صفحه موازی مجاور هم با شاخص میلر یکسان است که از روی مقدار بردار سلول پایه قابل محاسبه است.

۳-۲۴

پسماند مغناطیسی

magnetic hysteresis

پدیده فیزیکی مربوط به حلقه مغناطیسی‌شده است که در آن، قدرت میدان مغناطیسی بستگی به جهت تنظیم جریان برانگیختگی عدسی‌های مغناطیسی دارد.

۳-۲۵

محور نوری

optical axis

خط مستقیمی که از میان مرکز تقارن میدان مغناطیسی عدسی‌های الکترونی عبور می‌کند.

یادآوری- مسیر باریکه الکترونی در راستای این محور، بدون تغییر جهت از میان عدسی عبور می‌کند.

۳-۲۶

فیلم عکاسی

فیلم نگاتیو

photographic film
negative film

ورقه یا لوله نازک پلاستیکی که روی آن محلول عکاسی برای ثبت تصویر پوشش‌داده باشد.

۳-۲۷

پیکسل- تفکیک‌پذیری

pixel-resolution

تعداد پیکسل‌های تصویر در واحد فاصله از آشکارساز است.

یادآوری- یکای رایجی که در اینجا استفاده می‌شود به صورت نقاط در اینچ (dpi) گزارش می‌شود.

۳-۲۸

ماده مرجع

reference material
RM

ماده‌ای که یک یا چند مقدار ویژگی از آن به‌قدر کافی همگن بوده و به‌خوبی برای کالیبراسیون دستگاه، ارزیابی روش اندازه‌گیری یا نسبت دادن یک مقدار به مواد، آماده‌سازی شده است.

یادآوری- در این استاندارد، ماده مرجعی با الگوهای تناوبی که در آن فواصل در محدوده مناسبی بوده و صحت بالایی دارد برای کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر استفاده می‌شود.

۳-۲۹

منطقه مورد نظر

region of Interest
ROI

یک بخش از تصویر که از بقیه قسمت‌های آن متمایز شده باشد.

۳-۳۰
آزمونه

specimen

بخش کوچکی از نمونه که برای تصویربرداری انتخاب شده است.

یادآوری- برای TEM، آزمونه باید به‌قدر کافی نازک باشد تا باریکه الکترونی از آن عبور کند.

۳-۳۱
کارتریج آزمونه

specimen cartridge

بخشی از نگهدارنده آزمونه که آزمونه را نگه می‌دارد. این بخش روی نوک نگهدارنده قرار دارد.

۳-۳۲
رانش آزمونه

specimen drift

حرکت ناخواسته آزمونه که می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد (گرمایی، مکانیکی، الکتریکی، باردارشدن).

۳۳-۳
ارتفاع آزمونه

specimen height

موقعیت آزمونه در راستای محور نوری عدسی شیئی است.

یادآوری۱- «ارتفاع آزمونه صفر» یعنی تحت شرایط برانگیختگی استاندارد عدسی شیئی، آزمونه دقیقا روی کانون قرار دارد

یادآوری۲- به مرجع [۲] مراجعه شود

۳۴-۳
نگهدارنده آزمونه

specimen holder

وسیله‌ای است که آزمونه را نگه می‌دارد. این وسیله از طریق مجرایی که روی عدسی شیئی وجود دارد، وارد دستگاه می شود.

۳۵-۳
شرط استاندارد برانگیختگی

standard excitation condition

شرایط بهینه جریان برانگیختگی در عدسی شیئی که منجر به فوکوس شدن تصویر می‌شود.

یادآوری ۱- این شرط توسط سازنده دستگاه TEM برای هر دستگاه تأمین می‌شود.

یادآوری ۲- بزرگنمایی تصویر معمولاً تحت این شرایط اندازه‌گیری می‌شود، با این حال تا زمانی که شرایط تجدیدپذیری در دستگاه برقرار باشد می‌توان بزرگنمایی آن دستگاه را تحت تنظیمات دستگاه کالیبراسیون کرد.

۳۶-۳
اَبَرشبکه

super-lattice

ساختار تناوبی پایدار که دست‌کم از دو نوع ماده متفاوت به‌صورت لایه‌های تناوبی ساخته می‌شود.

یادآوری- اَبَرشبکه می‌تواند به عنوان ماده مرجعی برای کالیبراسیون بزرگنمایی در محدوده بزرگنمایی‌های متوسط تا بالا مورد استفاده قرار گیرد.

۳۷-۳
میکروسکوپ الکترونی عبوری

transmission electron microscope
TEM

دستگاهی که با استفاده از باریکه الکترونی که از آزمونه می‌گذرد یا با آن برهم‌کنش می‌کند، تصویر بزرگنمایی‌شده یا الگوی پراش ایجاد می‌کند.

۳۸-۳

محور منطقه

zone axis

جهت بلورشناسی که با $[u,v,w]$ نشان داده شده و از طریق برش تعدادی صفحه بلوری (h_1,k_1,l_1 .... h_i,k_i,l_i) تعریف می‌شود. این صفحات در قانون صفحات وایس[1] صدق می‌کنند: $hu+kv+lw=0$

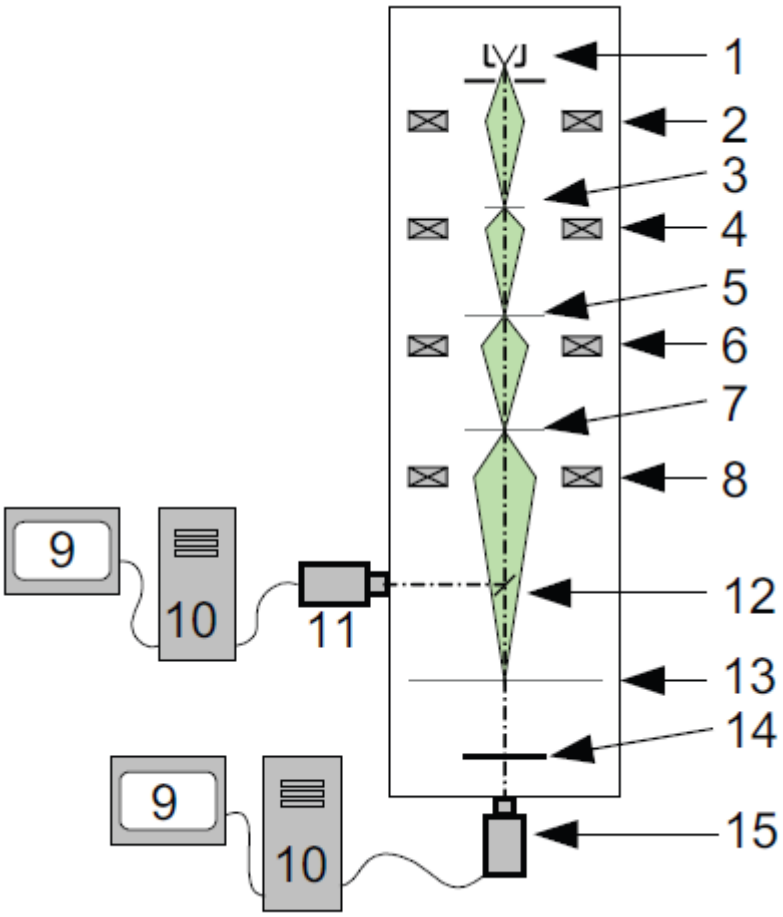
۴ بزرگنمایی تصویر

۴-۱ تعریف بزرگنمایی تصویر

بزرگنمایی تصویر (فاکتور مقیاس) دستگاه TEM به‌وسیله نسبت ابعاد خطی ساختار مشخصی از تصویر که روی فیلم عکاسی، صفحه تصویربرداری، حسگر تصویر روی دوربین رقمی ایجاد می‌شود، به عنوان ابعاد خطی آزمونه تعریف می‌شود. سه نوع آشکارساز تصویر برای این‌کار وجود دارد: فیلم عکاسی، صفحه تصویر و حسگر تصویر، مانند آرایه CCD یا حسگر CMOS که روی دوربین‌های رقمی نصب می‌شود.

عموما مقدار بزرگنمایی تصویر آشکارشده از یک حسگر تصویر از تصویری که روی فیلم عکاسی ایجاد شده و یا تصویری که روی صفحه تصویر نقش بسته، در شرایط یکسان اپتیک الکترونی برای تصویربرداری TEM، متفاوت است، زیرا محل آشکارسازی تصویر در آنها با هم متفاوت است (به شکل ۱ مراجعه شود). در این تصویر نشان داده‌شده است. محل قرارگرفتن دوربین رقمی و فیلم‌های عکاسی و صفحه تصویر از هم متفاوت است.

1- Weiss Zone Law



محل قرارگرفتن دوربین رقمی و فیلم‌های عکاسی و صفحه تصویر از هم متفاوت است.

راهنما

۱- تفنگ الکترونی
۲- عدسی‌های جمع‌کننده[1]
۳- آزمونه
۴- عدسی شیئی
۵- اولین تصویر بزرگنمایی‌شده
۶- عدسی میانی
۷- دومین تصویر بزرگنمایی‌شده
۸- عدسی تابنده[2]
۹- نمایشگر
۱۰- رایانه
۱۱- دوربین رقمی (حسگر تصویر) بزرگنمایی: $M_s \square M_g$
۱۲- صفحه نمایش یا آیینه
۱۳- صفحه مشاهده تصویر
۱۴- فیلم عکاسی یا صفحه تصویر بزرگنمایی M_f
۱۵- دوربین رقمی (حسگر تصویر) $M_{is} \square M_f$

1- Condenser lens
2-Projector

شکل۱- محل آشکارسازها در یک دستگاه TEM

۲-۴ بیان بزرگنمایی

بزرگنمایی یک تصویر که روی فیلم عکاسی، صفحه تصویر یا حسگر تصویر ثبت می‌شود، با استفاده از یک سری اعداد نمایش داده می‌شود که بیانگر تعداد دفعات بزرگ شدن یک تصویر است. برای نمایش معمولاً از نماد X استفاده می‌شود (مانند 10000X, 10Kx, 1000000X,1MX یا 10K x, X1000000, X1M) این اعداد نشانگر تعداد دفعاتی است که تصویر بزرگ شده است. علاوه‌براین می‌توان از نشانگر مقیاس که دارای واحد طول است در کنار تصویر برای نمایش بزرگنمایی استفاده کرد. توصیه می‌شود در تصویر رقمی‌شده، بزرگنمایی با جزئیات کاملی از تعداد پیکسل‌ها در واحد فاصله روی فایل خام اطلاعات گزارش شود.

یادآوری- پهنای میدان افقی (HFW) راه دیگری برای تعریف نشانگر مقیاس روی تصویر بزرگ شده است.

۵ مواد مرجع

۵-۱ کلیات

برای کالیبراسیون بزرگنمایی تصاویر، تا جایی که ممکن است، از یک CRM که مطابق راهنمای ISO Guide 34 تولید شده و مطابق راهنمای ISO Guide 35 گواهی گرفته است، استفاده کنید.
زمانی که CRM مناسب در دسترس نباشد، RM مطابق با استاندارد ISO Guide 34 نیز قابل استفاده است.

۵-۲ الزامات CRM/RM

مطمئن شوید که ماده مرجع انتخابی واجد شرایط زیر باشد:

- نسبت به خلاء و تابش مکرر باریکه الکترونی پایدار باشد؛
- اگر آن منطقه آزمونه تک‌بلور باشد، نمونه استاندارد باید هم‌تراز با محور منطقه شاخص پایین در راستای محور الکترونی اپتیکی دستگاه باشد؛
- تباین[1] خوب داشته و فصل مشترک واضحی برای ساختار دوره‌ای در تصویر TEM داشته باشد؛
- باید امکان زدودن آلودگی از آن بدون آسیب الکتریکی/ مکانیکی و اعوجاج، وجود داشته باشد؛
- سطح صافی در دو طرف آن وجود داشته و ضخامت ساختار اَبَرشبکه در آن، دست‌کم در بخشی که برای کالیبراسیون استفاده می‌شود، یکسان باشد؛
- دارای گواهینامه کالیبراسیون معتبر باشد.

یادآوری- آزمونه‌های تک‌بلور از عناصر خالص، که برای کالیبراسیون استفاده می‌شود، نیاز به گواهینامه مرجع کالیبراسیون ندارد.

1- Contrast

۵-۳ انبارش و استفاده

نمونه CRM/RM باید درون دسیکاتور یا در یک مخزن خلاء نگهداری شود. برای اطمینان از کمترین جابه‌جایی مستقیم با CRM/RM، می‌توان آن را به‌طور دائمی روی نگهدارنده آزمونه یا کارتریج آزمونه قرار داد.

توصیه می‌شود CRM/RM بادقت استفاده شود، بدون این که آسیبی به آن وارد شود.

آسیب‌ها و آلودگی‌های روی CRM/RM را کنترل کنید چرا که می‌تواند بر کالیبراسیون تأثیر بگذارد. از CRM/RM که دچار آسیب یا آلودگی شدید هستند استفاده نکنید.

به‌صورت تناوبی مقادیر CRM/RM را با کالیبراسیون CRM/RMهای دیگر کنترل کنید. نتایج را ثبت کنید تناوب صحه‌گذاری CRM/RM بستگی به ماهیت و نحوه استفاده از آن دارد.

CRM/RM باید فقط برای اهداف کالیبراسیون استفاده شود.

۶ روش اجرایی کالیبراسیون

۶-۱ کلیات

پارامترهایی که روی بزرگنمایی TEM تاثیرگذار است ممکن است منجر به خطاهای نظام‌مند شود. فهرست این خطاها در پیوست الف ارائه شده است.

اصلی‌ترین عاملی که روی تجدیدپذیری کالیبراسیون تاثیر می‌گذارد، پسماند مغناطیسی عدسی‌های الکترومغناطیسی است. برای به حداقل رساندن این تاثیر باید مراحلی که در زیر توضیح داده‌شده را در بازه‌های زمانی یکسان پذیرفت، به‌ویژه برای تنظیمات بزرگنمایی (پایین به بالا یا بالا به پایین). همچنین ارتفاع آزمونه و تنظیم فوکوس روی تجدیدپذیری کالیبراسیون تاثیر خواهد داشت.

برای به‌دست آوردن مقدار عدم‌قطعیت در آزمایشگاه، لازم است روش اجرایی کالیبراسیون را به‌صورت تناوبی تکرار کرد.

انتخاب CRM/RM بستگی به محدوده بزرگنمایی مورد استفاده و صحت مورد نیاز دارد. برای تامین اهداف این استاندارد، باید اطمینان حاصل شود که عدم‌قطعیت و تکرارپذیری کالیبراسیون به ترتیب بهتر از ۵ ± و ۹۸ درصد باشد.

نمودار فرآیند کالیبراسیون در پیوست ب ارائه شده است.

۶-۲ بارگذاری CRM/RM

در هنگام بارگذاری آزمونه، مطمئن شوید که جاگذاری CRM/RM بر اساس بند ۵-۳ انجام می‌شود.

بارگذاری CRM/RM باید بر طبق دستورالعملی باشد که توسط تولید کننده CRM/RM و TEM ارائه شده باشد.

کنترل کنید که CRM/RM درون نگهدارنده آزمونه یا کارتریج آزمونه محکم قرارگرفته است به‌طوری که از جای خود حرکت نمی‌کند. با این کار هرگونه زوال تصویر که در اثر لرزش به‌وجود می‌آید، به حداقل می‌رسد.

کنترل کنید که ارتفاع آزمونه درون نگهدارنده با موقعیتی که سازنده دستگاه TEM در دستورالعمل آن توصیه کرده، مطابقت داشته باشد. این کار به‌منظور حفظ شرایط هم‌مرکزی[1] انجام می‌شود.
برای هم‌ترازکردن جهت‌یافتگی بلوری آزمونه با محور اپتیکی، بهتر است از نگهدارنده‌های دوشیبه چرخشی[2] یا نگهدارنده چرخشی-گردشی[3] استفاده شود.

۳-۶ تنظیمات شرایط عملیاتی TEM برای کالیبراسیون

تاحدامکان، شرایط عملیاتی دستگاه TEM مطابق دستورالعمل زیر تنظیم شود تا اطمینان حاصل شود که دستگاه با شرایط یکسانی کار می‌کند:
الف-کنترل کنید که مقدار خلاء ستون TEM پایین‌تر از $۱۰^{-۴}$ پاسکال و پایدار باشد.
ب- ولتاژ بالا باید اعمال شده و زمان کافی به‌منظور پایدار شدن به آن داده شود.

یادآوری- تانک پرشده از روغن در دستگاه ۱۰۰ کیلو ولت ۲.۵ ساعت و تانک گازی ۴۵ دقیقه زمان لازم دارد. دستگاه‌های ولتاژ بالا معمولاً با ولتاژهای بالایی که به‌طور مستمر اعمال می‌شوند کار می‌کنند، بنابراین دوره پایداری معمولاً برای این دستگاه‌ها لازم نیست.

پ- در صورت نیاز از یک دستگاه ضد آلودگی استفاده کنید.
ت- بخشی از منطقه موردنظر (ROI) آزمونه را برای کالیبراسیون استفاده کنید که تمیز بوده و عاری از آسیب‌دیدگی باشد، درصورت نیاز از ارتفاع هم‌مرکز ROI و تنظیم ارتفاع ROI، اطمینان حاصل کنید.
ث- به‌منظور کاهش اثر پسماند مغناطیسی عدسی‌ها، بزرگنمایی TEM روی مقدار موردنظر برای کالیبراسیون با همان توالی، قرار دهید، برای مثال ابتدا برای بزرگنمایی بالاتر و سپس بزرگنمایی موردنظر اعمال کنید.
ج- برانگیختگی عدسی‌های شیئی را به مقدار تجدیدپذیر مطلوب برسانید. شرایط استاندارد توصیه می‌شود.
چ- ارتفاع آزمونه را به‌گونه‌ای تنظیم کنید که تصویر بزرگنمایی شده روی صفحه نمایش فلورسانس، نمایشگر تلویزیون یا نمایشگر رایانه‌ای کاربر، فوکوس باشد.

یادآوری- اگر دستگاه TEM مورد استفاده، مجهز به تنظیم کننده کنترل ارتفاع آزمونه نباشد می‌توان از این بند صرفنظر کرد.

ح- آستیگماتیسم دستگاه را در بزرگنمایی بالاتر از مقدار مورد نظر اصلاح کنید و ولتاژ شتابدهی را تنظیم کنید. برای مثال اگر کالیبراسیون موردنظر ۱۰۰ هزار برابر باشد، آستیگماتیسم هم‌ترازی بزرگنمایی در محدوده ۱۵۰هزار تا ۲۰۰ هزار برابر انجام شود.
خ- حالت دستگاه TEM از حالت تصویر به پراش الکترون ناحیه انتخاب شده[1] (SAED) یا پراش الکترونی پرتوی همگرا[2] (CBED) تغییر داده شود. همچنین اطمینان حاصل شود که روزنه[3] شیئی خارج شده است.

1 -Eucentric
2 -Double-tilt
3 -Tilt-rotate

یادآوری- برای حالت SAED، باید روزنه ناحیه انتخابی[۴] را روی نقطه موردنظر روی آزمونه قرار داد تا الگو پراش الکترونی ناحیه انتخابی روی صفحه نمایش (صفحه فلورسانس/ نمایشگر رایانه/ تلویزیون) دیده شود.

د- عدسی جمع‌کننده را طوری تنظیم کنید که شرایط روشنایی تقریبا موازی اعمال شود.

ذ- اگر آزمونه تک‌بلور است، محور منطقه شاخص پایین بلور را با محور اپتیک (یعنی روشنایی محور منطقه) موازی هم‌تراز کنید. به شکل ۲ مراجعه شود.

الف- در شرایط خارج از محور منطقه **ب-در شرایط روی محور منطقه‌ای**

شکل۲- تفاوت الگوی پراش با جهت‌گیری بلوری

ر- روزنه شیئی را وارد کنید و آن را تقریبا روی محور اپتیکی متمرکز کنید. همچنین حالت مشاهده دستگاه را به حالت تصویر برگردانید.

ز- بزرگنمایی را به مقدار کالیبراسیون بازگردانید، جریان برانگیختگی عدسی شیئی را دوباره روی شرایط برانگیختگی استاندارد قرار دهید.

ژ- درصورتی‌که دستگاه TEM این امکان را داشته باشد تابع استراحت را برای فرو نشستن پسماند مغناطیسی در عدسی شیئی اعمال کنید.

س- ارتفاع آزمونه را به‌گونه‌ای تنظیم کنید که تقریبا تصویر به حالت فوکوس برسد.**یادآوری**- اگر دستگاه مجهز به سیستم تنظیم ارتفاع نیست، این مورد حذف شود.

ش- با تغییر جریان براگیختگی عدسی شیئی، فوکوس دقیق تصویر را تنظیم کنید.

یادآوری- درصورت نیاز می‌توان تابع لرزاننده تصویر[۵] برای تنظیم فوکوس استفاده کرد.

ص- تابع اصلاح فوکوس خودکار را خاموش کنید تا بتوان شرایط بهینه زیر فوکوس[۶] را با تابع لرزاننده تصویر مرتبط کرد (درصورتی که دستگاه TEM مجهز به این تابع باشد).

1 -Selected-Aarea Eelectron-Diffraction
2 -Convergent-Beam Eelectron-Diffraction
3- Aperture
4- Selected-area aperture
5 -Image Wobbler function
6- under focus

ض- شرایط سامانه عدسی جمع‌کننده (درخشانی[1] و اندازه لکه[2]) را با ارجاع به محدوده پویایی هر آشکارساز طوری تنظیم کنید که تباین تصویر در تمام محدوده پویایی به‌دست آید.
سامانه عدسی جمع‌کننده در شرایطی کار کند که به روشنایی موازی نزدیک باشد. همچنین این سامانه در شرایطی که مستندشده کار کند تا همگرایی پرتو تاثیری روی فوکوس تصویر نداشته باشد. برای این کار در درجه‌های متفاوت همگرایی باریکه الکترونی، تصاویر گرفته شود.

۶-۴ ثبت تصویر رقمی

به‌منظور کاهش خطاهای بازخوانی در اندازه‌گیری بزرگنمایی، لازم است تصاویر رقمی شوند. عمق بیت‌ها در تصویر رقمی‌شده باید بزرگتر از ۸ بیت باشد. سه روش مختلف، متناسب با هرآشکارساز تصویر، برای رقمی کردن تصاویر بزرگنمایی شده با TEM وجود دارد (به جدول ۱ مراجعه شود):

جدول۱- جدول مقایسه آشکارساز تصویر

نوع آشکارساز	ابزار رقمی کردن	اندازه پیکسل
فیلم عکاسی	روبشگر تصویری مسطح	با تفکیک‌پذیری روبشگر تعیین می شود
صفحه تصویر	رقمی‌کننده اختصاصی تصویر	با قطر پرتو لیزر بازخوانی تعیین می‌شود
حسگر تصویر (دوربین رقمی)	-	هم اندازه حسگر تصویر است

الف- فیلم عکاسی: تصویر بزرگنمایی‌شده (برای کالیبراسیون) به‌صورت مستقیم در معرض این فیلم قرار می‌گیرد. تصویر آنالوگ ثبت‌شده روی فیلم نگاتیو عکاسی باید با استفاده از یک روبشگر تبدیل به تصویر رقمی شود. این‌کار مطابق توضیح روش اجرایی بند ۶-۵ انجام شود.

یادآوری۱- بهتر است برای این کار از یک روبشگر مسطح استفاده شود، زیرا برای کالیبراسیون اندازه پیکسل، به راحتی می‌توان روی آن خط کش شیشه‌ای قرار داد.

ب- صفحه تصویر (IP): تصویر بزرگنمایی‌شده (برای کالیبراسیون) به‌صورت مستقیم در معرض این صفحه قرارگیرد. تصویر ثبت‌شده باید توسط یک رقمی‌کننده اختصاصی تصویر (باز خوان IP) ثبت شود که خود آن نیز به رایانه متصل است.

ت- حسگر تصویر: تصویر گرفته‌شده (برای کالیبراسیون) توسط حسگر تصویر (که روی دوربین رقمی نصب شده و به رایانه متصل است) رقمی شده و روی نمایشگر رایانه نمایش داده می‌شود. این تصویر باید روی حافظه سیستم رایانه به عنوان فایل تصویری با یک فرمت برگشت‌پذیر، ذخیره شود.

1 -Brightness
2 -Spot size

یادآوری۲- مطمئن شوید که روش اجرایی نرمال‌کردن[1] بهره انجام شده است تا پیش زمینه تصویر دوربین رقمی کاملا یکنواخت شود.

قبل و در طول مدت انجام فرآیند رقمی کردن، مطمئن شوید که شرایط زیر وجود دارد:

- درجه حساسیت مناسب برای فیلم عکاسی مورداستفاده قرار گیرد تا تصویر ایجادشده روی نگاتیو دارای چگالی و تباین مناسب باشد.
- زمان تابش باریکه الکترونی روی فیلم باید کوتاه باشد تا تار شدن[2] تصویر در اثر رانش دستگاه به کمترین مقدار برسد.
- در فرآیند بازخوانی تصویر بزرگنمایی شده با دوربین رقمی از عملیات دودویی شدن[3] استفاده نکنید.
- فایل‌های با فرمت فشرده نشده مانند ESP، PICT، TIFF یا Bitmap ویندوز یا فایل‌های با فرمت فشرده شده برگشت‌پذیر مانند GIF یا PING باید برای ذخیره تصاویر رقمی‌شده مورد استفاده قرار گیرند.
- از نظر اخلاقی، تصاویر اصلی فشرده نشده، باید بدون دستکاری یا انجام فرآیند پردازشی روی یک حافظه (مانند لوح فشرده) ذخیره شود. تمام عوامل تولید این فایل‌ها و همچنین مراحل پردازش آنها باید مستند شده و گزارش شوند تا بتوان آن را مجددا انجام داد.

یادآوری۳- به‌صورت کلی، عملیات تصویربرداری قابل‌قبول مشمول تنظیمات تباین، درخشانی، کشیدگی هیستوگرام و اصلاح گاما می‌باشد. عملیات‌های دیگر (مانند ماسک کردن تار تصویر[4]، محو کردن با تابع گویسین[5] و ...) باید مستقیما توسط نویسنده، به‌عنوان بخشی از روش‌شناسی تجربی، گزارش شود. باید تمام عملیات تصویربرداری را گزارش کرد تا اطلاعات پراش یا دیگر اطلاعات تصویری که مورد استفاده در ارزیابی‌های کیفی بعدی قرار می‌گیرد، حفظ شود.

۶-۵ رقمی کردن تصویر ثبت‌شده روی فیلم عکاسی

۶-۵-۱ کلیات

برای تبدیل تصویر آنالوگ ثبت‌شده روی فیلم عکاسی نگاتیو به تصویر رقمی‌شده، می‌توان از روبشگر تصویری مسطح، دارای واحد خطی شفاف استفاده کرد.

یادآوری۱- جهت ساختار تناوبی در تصویر روی فیلم نگاتیو را در راستای محور Y نمایشگر رایانه در چند درجه تنظیم کنید.

یادآوری۲- برای کاهش اثرات اعوجاج لبه در روبشگر، فیلم نگاتیو را نزدیک مرکز ناحیه روبش قرار دهید.

---

1 -Normalization
2 -Blurring
3- Binning treatment
4 -unsharp-masking
5- Gaussian blur

۶-۵-۲ چگونه تفکیک‌پذیری رقمی شدن تعیین شود

عموما، وقتی طول L با پراکندگی dL (انحراف اندازه‌گیری) اندازه‌گیری می‌شود، کمترین واحد مقیاس اندازه‌گیری باید کمتر از ۱/۱۰ dL باشد. زمانی این رابطه اعمال شود که اندازه پیکسل‌ها در رقمی کردن تصاویر روی نگاتیو به‌وسیله روبشگر موردتوجه است.

شکل ۳ تصویر آزمونه (CRM/RM) را در صفحه نمایش/ آشکارساز (فیلم نگاتیو، IP، نمایشگر رایانه و غیره) به‌صورت طرحواره نشان می‌دهد. توجه داشته باشید که تناوب آزمونه تقریبا در راستای محور Y نمایشگر هم‌تراز شود. θ زاویه میان محور Y و محور (جهت طولی) آزمونه است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، طول هدف (یعنی طول عرضی واقعی آزمونه) L_t، از روی مقدار θ وL_e به‌دست می‌آید، L_e در جهت موازی با محور X استخراج می‌شود. فرمول زیر برای محاسبه به‌کار رود:

$$L_t=\cos\theta\times L_e$$

واحد طول L_t وL_e ، میلی‌متر است.

$L_{e(min)}$ پراکندگی به‌دست آمده از تصاویر CRM/RM است که با مقدار کمینه طول استخراج‌شده از مجموعه تصاویر ثبت‌شده تعریف می‌شود و U که به‌صورت درصد ارائه بیان می‌شود. اندازه پیکسل‌ها یا واحد مقیاس S را می‌توان به‌گونه‌ای درنظر گرفت که در رابطه ۱ صدق کند. توجه شود که تمام تصاویر ثبت‌شده باید با مقادیر یکسان S رقمی شوند.

(۱)

$$S \leqslant \left(L_{e(min)} \times \frac{U}{100} \right) \times \frac{1}{10}$$

تفکیک پذیری Rs (dpi) روبشگر مسطح، مطابق با واحد مقیاس S، به میلی‌متر، از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

(۲)

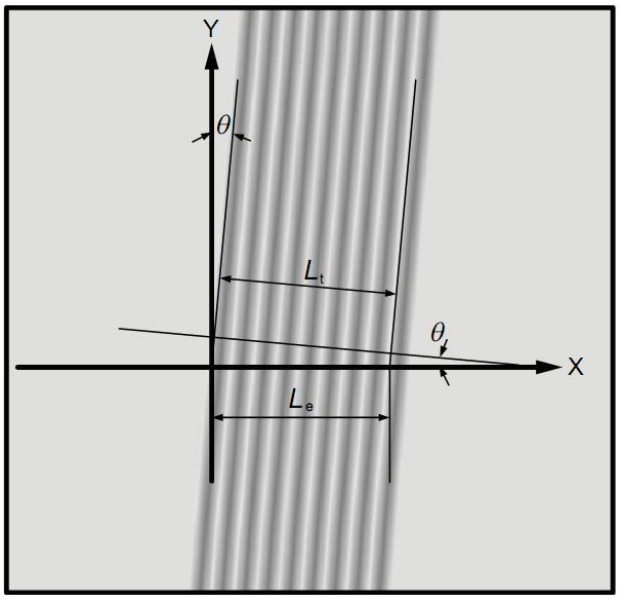
$$R_s = \frac{25{,}4}{S} = \frac{25\,400}{L_{e(min)} \times U}$$

اگر S از ۰/۰۲۵۴ میلی‌متر کمتر باشد، از تفکیک پذیری Rs که کوچکتر یا مساوی با رقم به‌دست آمده در رابطه ۲ است استفاده شود.

اگر S بزرگتر از ۰/۰۲۵۴ میلی‌متر باشد Rs محاسبه‌شده کمتر از ۱۰۰۰ dpi خواهد بود. چنین مقدار کم تفکیک پذیری برای اندازه‌گیری مناسب نیست. در چنین موردی باید از تفکیک پذیری ۱۰۰۰ dpi یا بیشتر استفاده شود.

مثال۱- اگر طول کمینه $L_{e(min)}$ و پراکندگی U به ترتیب ۵ میلی‌متر و ۲ درصد باشند، مقدار محاسبه شده $S\leq 0.01$ mm است. تفکیک پذیری مطابق با آن $Rs\geq 2540$ dpi است.

مثال۲- اگر طول کمینه $L_{e(min)}$ و عدم‌قطعیت U به ترتیب ۲۰ میلی‌متر و۲ درصد باشند مقادیر محاسبه شده S و Rs به ترتیب ۰/۰۴ میلی‌متر و ۶۳۵ dpi است. این مقدار تفکیک پذیری برای تحلیل تصویر رقمی‌شده خیلی ضعیف است. در این حالت تفکیک‌پذیری بزرگتر یا مساوی ۱۰۰۰ dpi تنظیم شود.



شکل۳- طرحواره الگوی تناوبی با ساختار لایه‌ای

۶-۶ اندازه‌گیری فاصله زاویه تصحیح شده[1] Dt، از تصویر رقمی شده

۶-۶-۱ کلیات

به‌منظور جلوگیری از اثرات ناخواسته[2] در تشخیص لبه‌های اجزاء که اندازه‌گیری می‌شود، باید نقاط شروع و پایان (لبه‌ها) در اندازه‌گیری فاصله زاویه تصحیح‌شده Dt (به شکل۵ مراجعه شود) در تصویر رقمی‌شده مربوط به طول مورد نظر Lt (رجوع شود به تصویر ۳)، تعریف شود. برای کمک به تشخیص مقدار Lt، توصیه می‌شود از روش تعیین رایانه‌ای خودکار لبه‌ها استفاده شود.

نرم افزار اندازه‌گیری مورد استفاده باید توابع زیر را تامین کند:

- اندازه‌گیری زاویه؛
- اندازه‌گیری طول واحد پیکسل؛
- تابع پروفایل خطی میانگین‌گیری‌شده برای هر تعداد خط اختیاری[3]؛

1 -Angle-corrected distance
2 -Artefact
3- Arbitrary

- تابع ROI روی پروفایل[1] خط میانگین‌گیری شده؛
- تابع تعیین لبه برای اطلاعات در ROI، مانند تعیین پیک بیشینه/کمینه و پردازش تفاضلی.

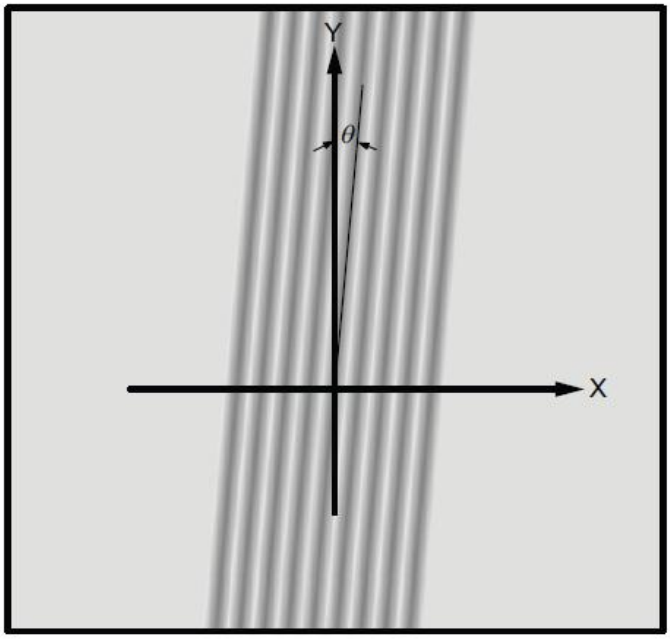
برای اجتناب از بروز خطای مصنوعی[2] ، از روگرفت (فتوکپی) تصویر رقمی‌شده یا مشابه آن استفاده نشود.

یادآوری- لازم است که فرد دیگری هم برای چک کردن این روش اجرایی با نرم‌افزار اموزش ببیند.

۶-۶-۲ روش اجرایی اندازه‌گیری

با استفاده از روش اجرایی زیر، فاصله زاویه تصحیح شده D_t در پیکسل‌های صفحه نمایش تصویر (نمایشگر رایانه) را به‌دست آورده و مقدار آن در برگه اطلاعات درج کنید.

الف- زاویه چرخش θ، با مقیاس درجه، میان جهت طولی ساختار تناوبی در تصویر رقمی شده و محور Y نمایشگر رایانه را اندازه‌گیری و ثبت کنید (به شکل ۴ مراجعه شود).



شکل۴- چرخش زاویه θ

ب- الگوی گام پیچ پایه[3] D_e را در پیکسل‌ها، از روی یک خط LA اختیاری موازی با محور X نمایشگر رایانه استخراج کنید. (به شکل ۵ مراجعه شود)

یادآوری ۱- الگوی گام پیچ پایه D_e را از مرکز تا مرکز اندازه‌گیری کنید. همین‌طور تحلیل‌گر می‌تواند این کار را از لبه سمت چپ تا لبه سمت چپ، یا از لبه سمت راست تا لبه سمت راست یک ساختار تناوبی روی CRM/RM انجام دهد.

- اندازه پیکسل را به‌عنوان واحد اندازه‌گیری استفاده کنید.
- به‌منظور کاهش اثر نوفه[1] تصویر روی پروفایل خط LA و بهبود نسبت سیگنال به نوفه، از پردازش میانگین‌گیری، آن هم در راستای ساختار تناوبی (نه در طول محور Y) برای n خط استفاده کنید.

1- Profile
2- Artificial error
3- Basic pitch distance

- (به شکل ۶ مراجعه کنید)

یادآوری۲- در پیوست پ، روش اجرایی برای انتخاب n (تعداد خطوط برای میانگین‌گیری) گزارش شده است.

نقاط P_1 و P_2 مربوط به دو انتهای D_e هستند.

پ- موقعیت‌های پیکسل دو انتهای (P_1 و P_2) الگوی گام پیچ پایهD_e روی خط اختیاری LA را تشخیص داده و ثبت کنید. برای این‌کار از یک برنامه نرم‌افزار اندازه‌گیری پروفایل خطوط میانگین‌گیری استفاده کنید.

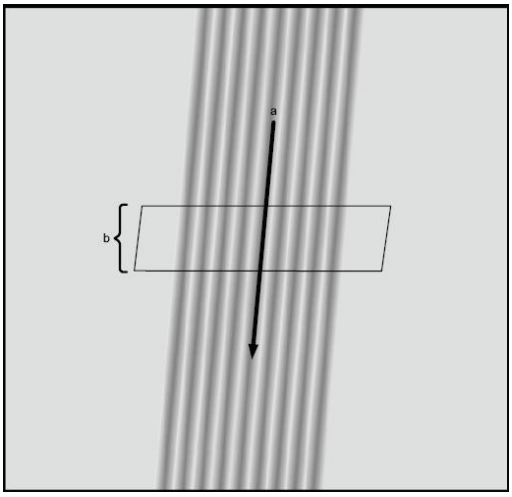
ت- الگوی گام پیچ پایه را از رابطه زیر محاسبه و ثبت کنید:

(۳)

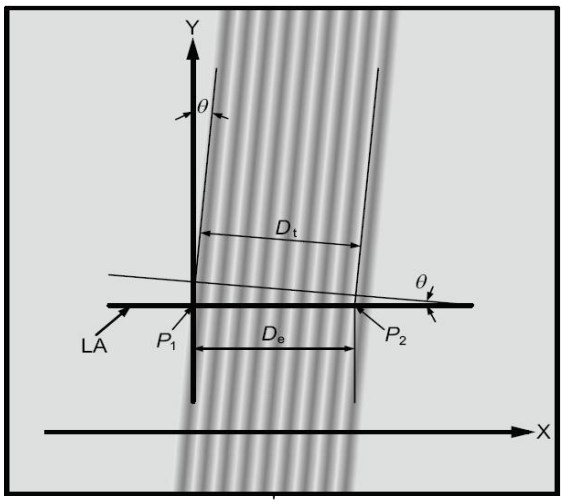
$$De=l \quad P_1 - P_2 \square$$

یادآوری- الگوی گام پیچ پایه D_e را یا از روش مرکز به مرکز یا فاصله لبه‌به‌لبه به‌دست آمده ازساختار تناوبی CRM/RM اندازه‌گیری کنید.

فاصله زاویه اصلاح‌شده D_t (به شکل ۵ مراجعه شود) مربوط به طول هدف L_t را از رابطه زیر محاسبه و ثبت کنید:



شکل۵- رابطه میان D_t و D_e و خط LA



شکل ۶- طرحواره‌ای از تعیین میانگین برای n خط در راستای ساختار دوره‌ای

1- Noise

(۴)

$$D_t = D_e \times \cos\theta$$

که در آن:

D_e الگوی گام پیچ پایه است که روی تصویر رقمی شده به واحدهای پیکسل نشان داده شده است؛

θ زاویه چرخش اندازه‌گیری‌شده میان جهت راستای ساختار تناوبی و محور Y روی نمایشگر رایانه است (به شکل ۵ مراجعه شود)؛ اندازه‌گیری را دست‌کم سه مرتبه در محل‌های جداگانه برای (p+10) پیکسل جداگانه روی تصویر رقمی‌شده محاسبه کنید.

p تعداد خطوطی است که برای میانگین‌گیری و به‌دست آوردن پروفایل خط صاف استفاده می‌شود.

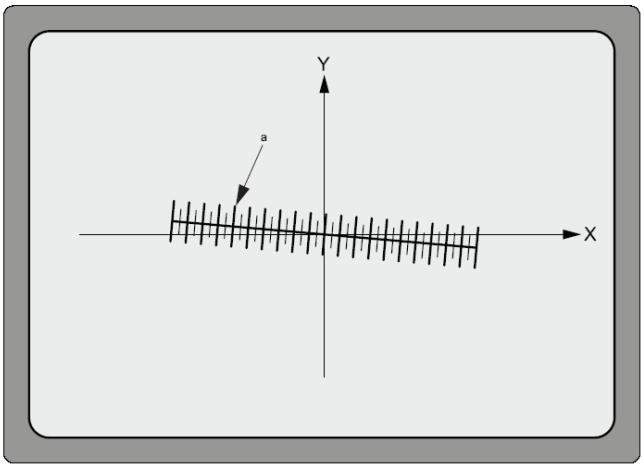
۶-۷ رقمی کردن مقیاس مرجع برای کالیبراسیون کردن اندازه پیکسل

برای به‌دست آوردن ابعاد واقعی در دستگاه بین‌المللی یکاها SI، از روی طول رقمی شده، لازم است که اندازه پیکسل S (با واحد میلی‌متر) که در رقمی کردن به‌کار می‌رود، کالیبره شود.

وقتی یک فیلم عکاسی (الف) یا صفحه تصویر (ب) به‌عنوان آشکارساز تصویر مورداستفاده قرار می‌گیرد، لازم است که اندازه پیکسل با استفاده از مقیاس مرجع رقمی‌شده با همان روشی که برای رقمی‌کردن تصویر استفاده می‌شود، کالیبره شود. به بیان دیگر، وقتی حسگر تصویر (ج) به‌عنوان آشکارساز مورداستفاده قرار می‌گیرد، مقدار اندازه حسگر تصویر منفرد رقمی‌شده را که توسط سازنده آن تضمین شده، می‌توان برای اندازه پیکسل تصویر رقمی‌شده به‌کار برد.

الف- فیلم عکاسی: از یک خط‌کش کالیبره‌شده و قابل‌ردیابی که صحت آن مشخص بوده و توانایی اندازه‌گیری آن تقریبا ۵ میلی‌متر تا ۱۰ میلی‌متر است باید به‌عنوان مقیاس مرجع استفاده کرد. این مقیاس را باید با روبشگر تصویر مسطح و با همان شرایط تفکیک‌پذیری که برای رقمی کردن فیلم نگاتیو عکاسی اعمال شده، رقمی کرد. جهت مقیاس مرجع باید در راستای محور X نمایشگر رایانه با چند درجه چرخش تنظیم کرد (شکل ۷).

یادآوری- مقیاس شیشه‌ای مرجع نوعی، در پیوست د فهرست شده است



شکل ۷- چگونگی قرار گرفتن مقیاس مرجع روی نمایشگر

ب- صفحه تصویر (IP): برای گرفتن تصویر تماسی از مقیاس مرجع روی IP، خط‌کش کالیبره‌شده با قابلیت ردیابی را که دارای صحت مشخص و توانایی اندازه‌گیری ۵۰ میلی‌متر تا ۱۰۰ میلی‌متر است، در تماس و معرض لامپ فلورسانس قرارداده و یک تصویر تماسی از آن گرفته شود. این تصویر تماسی با همان رقمی‌کننده اختصاصی (IP خوان) و با همان شرایط پرتو لیزری که برای بازخوانی تصویر استفاده شده، روبش شود. جهت مقیاس مرجع باید در راستای بخش کم‌عرض یا دیگر قسمت صفحه تصویر با چند درجه چرخش، تنظیم شود.

پ- حسگر تصویر: همان‌طور که در زیربند ۶-۴ ذکر شد، به دلیل آن که حسگر تصویر روی دوربین رقمی به دستگاه TEM متصل است، بنابراین کالیبره کردن اندازه پیکسل با استفاده از مقیاس مرجع یا دیگر مواد بسیار دشوار است. بنابراین اندازه حسگر تصویر منفرد که در بخش ویژگی‌های دستگاه نوشته‌شده و به‌وسیله تولیدکننده تضمین شده را می‌توان به‌عنوان اندازه پیکسل تصویر رقمی‌شده به‌کار برد.

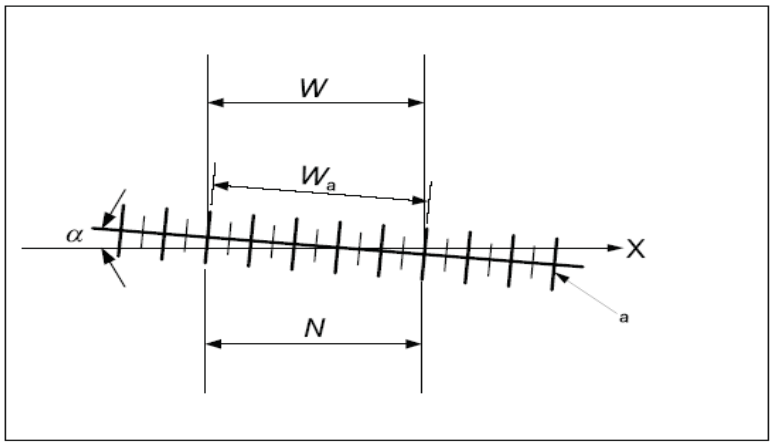
۶-۸ کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر

۶-۸-۱ کلیات

طول مورد نظر L_t، با واحد میلی‌متر، روی صفحه آشکارساز را می‌توان با ضرب فاصله زاویه تصحیح شده D_t، با واحد پیکسل، با واحد مقیاس کالیبره‌شده (=اندازه پیکسل) S به‌دست آورد. این فاصله روی تصویر رقمی‌شده اندازه‌گیری شده است. سپس بزرگنمایی تصویر M را می‌توان با تقسیم طول مورد نظر L_t به طول اولیه L_o روی آزمونه که مطابق با L_t است، محاسبه کرد.

۶-۸-۲ کالیبراسیون واحد مقیاس (=اندازه پیکسل) S

وقتی فیلم عکاسی یا صفحه تصویر استفاده می‌شود، اندازه پیکسل مقیاس مرجع رقمی‌شده کالیبره شود و



α محور مقیاس

شکل ۸-مقیاس مرجع که نسبت به محور X صفحه نمایشگر به میزان α

ابعاد واقعی فاصله رقمی‌شده را اندازه‌گیری و ثبت کنید.

تعداد پیکسل‌های N، در راستای محور X روی نمایشگر رایانه منطبق با طول خوانده شده اختیاری Wa، با واحد میلی‌متر، اندازه‌گیری و ثبت کنید و مقدار α را تعیین کنید. برای محاسبه W از رابطه ۵ و شکل ۸ استفاده کنید.

یادآوری ۱- مقدار W_a، با واحد میلی‌متر، مقداری است که از روی مقیاس مرجع رقمی‌شده به‌دست می‌آید، این مقدار از اندازه‌گیری انجام شده با استفاده از مقیاس‌های دیگر استفاده شده روی نمایشگر رایانه به‌دست نمی‌آید.

(۵)

$$W = W_a \times \cos\alpha$$

α زاویه چرخش بین محور مقیاس و محور X روی نمایشگر رایانه است.

سپس اندازه پیکسل، با واحد میلی‌متر را می‌توان از فرمول زیر به‌دست آورد. مقادیر را محاسبه و در صفحه اطلاعات نگه‌دارید.

(۶)

$$S = \frac{W}{N} = \frac{W_a \times \cos\alpha}{N}$$

یادآوری ۲- وقتی دوربین رقمی‌شده برای این روش اجرایی کالیبراسیون استفاده می‌شود، اندازه حسگر تصویر منفرد که در مشخصات دستگاه توسط سازنده تضمین شده، می‌تواند به‌عنوان اندازه پیکسل S استفاده شود. این مقادیر را در صفحه اطلاعات ثبت کنید.

۶-۸-۳ محاسبه بزرگنمایی تصویر

با استفاده از رابطه زیر، بزرگنمایی تصویر M را روی صفحه آشکارساز تصویر به‌دست آورید:

(۷)

$$M = \frac{L_t}{L_o} = \frac{D_t \times S}{L_o}$$

که در آن:

L_t طول موردنظر، برحسب میلی‌متر، روی صفحه آشکارساز، فیلم عکاسی، صفحه تصویر یا حسگر تصویر؛

L_o طول اولیه، برحسب میلی‌متر، روی صفحه آزمونه منطبق با طول هدف L_t؛

D_t فاصله زاویه اصلاح‌شده برحسب پیکسل روی تصویر رقمی شده منطبق با طول هدف L_t؛

S واحد مقیاس (اندازه پیکسل)، برحسب میلی‌متر، روی تصویر رقمی‌شده منطبق با طول هدف L_t؛

زمانی که از فیلم عکاسی یا صفحه تصویر استفاده می‌شود، رابطه ۷ را می‌توان به شکل زیر تعمیم داد.

(۸)

$$M = \left(\frac{D_t \times W_a \times \cos\alpha}{N} \right) \Big/ L_o$$

که در آن:

W_a طول اختیاری (مقداری که مستقیما مشاهده شده) ، برحسب میلی‌متر، روی مقیاس مرجع رقمی‌شده؛

α زاویه چرخش، برحسب درجه، میان محور خط‌کش و محور X نمایشگر رایانه؛

N تعداد پیکسل‌ها در راستای محور X نمایشگر، منطبق با طول W، با واحد میلی‌متر، که روی محور X طول اختیاری W_a با واحد میلی‌متر ایجاد می‌شود.

۶-۹ کالیبراسیون نشانگر مقیاس

۶-۹-۱ کلیات

نشانگر مقیاس برای اندازه‌گیری اندازه ذره، پهنای خط، فاصله در ساختار در تصاویر بزرگنمایی‌شده استفاده می‌شود. طول نشانگر مقیاس را می‌توان از روی بزرگنمایی کالیبره شده M و اندازه پیکسل کالیبراسیون شده S، برحسب میلی‌متر، محاسبه کرد.

۶-۹-۲ اندازه مقیاس پایه منطبق به یک پیکسل روی تصویر رقمی‌شده

اندازه پیکسل کالیبره‌شده S، (برحسب میلی‌متر)، می‌تواند به اندازه مقیاس پایه Sb، (برحسب میلی‌متر)، منطبق با طول آن روی صفحه نمونه منتقل شود. برای این کار اندازه پیکسل‌ها بر بزرگنمایی کالیبراسیون تقسیم می‌شود:

(۹)

$$S_b = \frac{S}{M}$$

۶-۹-۳ کالیبراسیون نشانگر مقیاس

تعداد پیکسل‌ها Nu و طول نمایش داده شده Lu، برحسب میلی‌متر، از نشانگر مقیاس منطبق با واحد طول (۱ میلی‌متر) روی صفحه آزمونه می‌تواند از فرمول زیر محاسبه شود:

(۱۰)

$$N_u = \frac{1}{S_b} = \frac{M}{S}$$

(۱۱)

$$L_u = N_u \times S = M$$

این نتایج را می‌توان برای واحدهای مقیاس مختلف برحسب میلی‌متر یا نانومتر تعمیم داد.

برای طول واحد یک نانومتر، تعداد پیکسل‌ها Nu(nm) و طول نمایش داده‌شده Lu(nm) برحسب میلی‌متر اندازه مقیاس به شکل زیر محاسبه می‌شود:

(۱۲)

$$N_{u(\mu m)} = \frac{1}{10^3}\left(\frac{M}{S}\right)$$

$$L_{u(\mu m)} = \frac{M}{10^3}$$

(۱۳)

برای طول واحد یک نانومتر، تعداد پیکسل‌ها $Nu(\mu m)$ و طول نمایش داده‌شده $Lu(\mu m)$ برحسب میلی‌متر، اندازه مقیاس از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$N_{u(nm)} = \frac{1}{10^6}\left(\frac{M}{S}\right) \quad (۱۴)$$

(۱۵)

$$L_{u(nm)} = \frac{M}{10^6}$$

۶-۱۰ روش اجرایی کالیبراسیون برای اندازه‌گیری‌های طول فقط با استفاده از فیلم عکاسی

با اندازه‌گیری طول مورد نظر L_t به‌صورت مستقیم از روی فیلم نگاتیو می توان از بروز عدم‌قطعیت رقمی کردن تصویر و کالیبراسیون پیکسل‌ها، اجتناب کرد. در این حالت، عدم‌قطعیت مقیاس شیشه‌ای باید مدنظر گرفته شود. در این اندازه‌گیری، کمینه کردن خطای اندازه‌گیری مهم است.

۷ صحت بزرگنمایی تصویر

صحت به معنی نزدیک بودن نتایج آزمون با مقدار مرجع پذیرفته شده است. (به استاندارد ISO 5725-1:1994,3.6 مراجعه شود.)

یادآوری ۱- «نتیجه آزمون» به بزرگنمایی کالیبره شده به‌دست آمده از روش اجرایی تعیین‌شده در استاندارد ملی گفته می‌شود

یادآوری ۲- واژه «مقدار مرجع پذیرفته شده» به بزرگنمایی اطلاق می‌شود که توسط سازنده دستگاه TEM ارائه می‌شود.

صحت A بزرگنمایی M_g، با واحد درصد، از طریق محاسبه تفاوت ΔM با استفاده از فرمول زیر به‌دست می‌آید.

$$\Delta M = M_g - M \quad (۱۶)$$

$$A = \left(\frac{M_g - M}{M}\right)\times 100 = \left(\frac{\Delta M}{M}\right)\times 100 \quad (۱۷)$$

که در آن:

M بزرگنمایی تصویر کالیبراسیون‌شده؛

M_g بزرگنمایی مشخص شده روی نمایشگر دستگاه TEM است؛

یادآوری ۳- لازم به ذکر است که عدم‌قطعیتی که به دلیل شرایط انجام کار با دستگاه TEM به‌وجود می‌آید و خطاهای آماری که به دلیل عدم یکنواختی اجتناب‌ناپذیر CRM/RM به‌وجود می‌آید، در نتیجه کالیبراسیون بزرگنمایی نیز دخالت داده می‌شود (به پیوست الف مراجعه شود).

۸ عدم‌قطعیت نتیجه اندازه‌گیری

عوامل مختلفی در نتایج اندازه‌گیری کالیبراسیون بزرگنمایی دخالت دارند. فهرست این عوامل در پیوست الف ارائه شده‌است. با این که عدم‌قطعیت کل را می‌توان از روی عدم‌قطعیت‌های به‌دست آمده برای هر عامل محاسبه کرد، اما اندازه‌گیری عدم‌قطعیت هر فاکتور به تنهایی کار بسیار دشواری است.
در این استاندارد، عدم‌قطعیت کل باید از روی ۷ عامل ذیل جمع‌بندی‌شود.

σ_{rm}عدم‌قطعیت مواد مرجع (RM) برای بزرگنمایی؛
σgعدم‌قطعیت مقیاس شیشه‌ای مرجع؛
σ_{IS} عدم‌قطعیت اندازه حسگر تصویر دوربین رقمی؛
σ_{De}عدم‌قطعیت الگوی گام پیچ پایه De؛
σ_{θ}عدم‌قطعیت زاویه θ چرخش در رقمی کردن تصویر؛
σ_{N}عدم‌قطعیت تعداد پیکسل‌ها N؛
σ_{α}عدم‌قطعیت زاویه چرخش α در رقمی کردن مقیاس؛

مطابق با GUM[1]، این عدم‌قطعیت‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: عدم‌قطعیت نوع A (U_A) شامل σ_{De} σ_{θ} σ_{α} σ_{N}و عدم‌قطعیت نوع B (U_B) شامل σ_{rm} σ_{IS} σg. مقدار هر عامل در عدم‌قطعیت که درU_B قید شده باید از روی سند فنی گواهینامه C(RM) که توسط سازنده ارائه می‌شود، به‌دست آید.
عدم‌قطعیت σ_{De} σ_{θ} σ_{α} σ_{N} باید از روی نتایج اندازه‌گیری تکرار آزمون m وn محاسبه شود. برای به‌دست آوردن σ_{De} و σ_{θ} روش اجرایی زیربندهای۶-۲ تا ۶-۶ باید m بار تکرار شود و برای به‌دست آوردن σ_{N}و σ_{α} روش اجرایی مندرج درزیربندهای ۶-۸-۲ تا ۶-۷ باید n بار تکرار شود (به شکل ۹ مراجعه شود). تناوب تکرارها (یعنی m و n) باید ۳ بار یا بیشتر باشد.
یادآوری۱ - اگر σ_{rm} σ_{IS} σgوجود نداشته باشند، هر عدم‌قطعیت σمی‌تواند از روی روش اجرایی عملیات توزیع یکنواخت به‌دست آید.
انحراف استاندارد σeاز بزرگنمایی کالیبراسیون‌شده برای اندازه‌گیری‌های مستقل m وn می‌تواند از روی رابطه ۱۸ و ۱۹ به‌دست آید.
اگر از فیلم عکاسی یا صفحه تصویر استفاده شود، از فرمول زیر استفاده کنید:
(۱۸)

$$\sigma_{\mathrm{e}}=\sqrt{\left(\frac{\sigma_{\mathrm{De}}}{\sqrt{m}}\right)^{2}+\left(\frac{\sigma_{\theta}}{\sqrt{m}}\right)^{2}+\left(\frac{\sigma_{N}}{\sqrt{n}}\right)^{2}+\left(\frac{\sigma_{\alpha}}{\sqrt{n}}\right)^{2}+\sigma_{\mathrm{rm}}{}^{2}+\sigma_{\mathrm{g}}{}^{2}}$$

اگر از دوربین CCD رقمی استفاده شده از این رابطه استفاده کنید:

1 -Experssion of uncertainty in measurment

(۱۹)

$$\sigma_e = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{De}}{\sqrt{m}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\theta}{\sqrt{m}}\right)^2 + {\sigma_{rm}}^2 + {\sigma_{IS}}^2}$$

عدم‌قطعیت σبزرگنمایی کالیبره‌شده برای یک سری اندازه‌گیری‌ها می‌تواند به‌وسیله رابطه زیر تعریف شود:

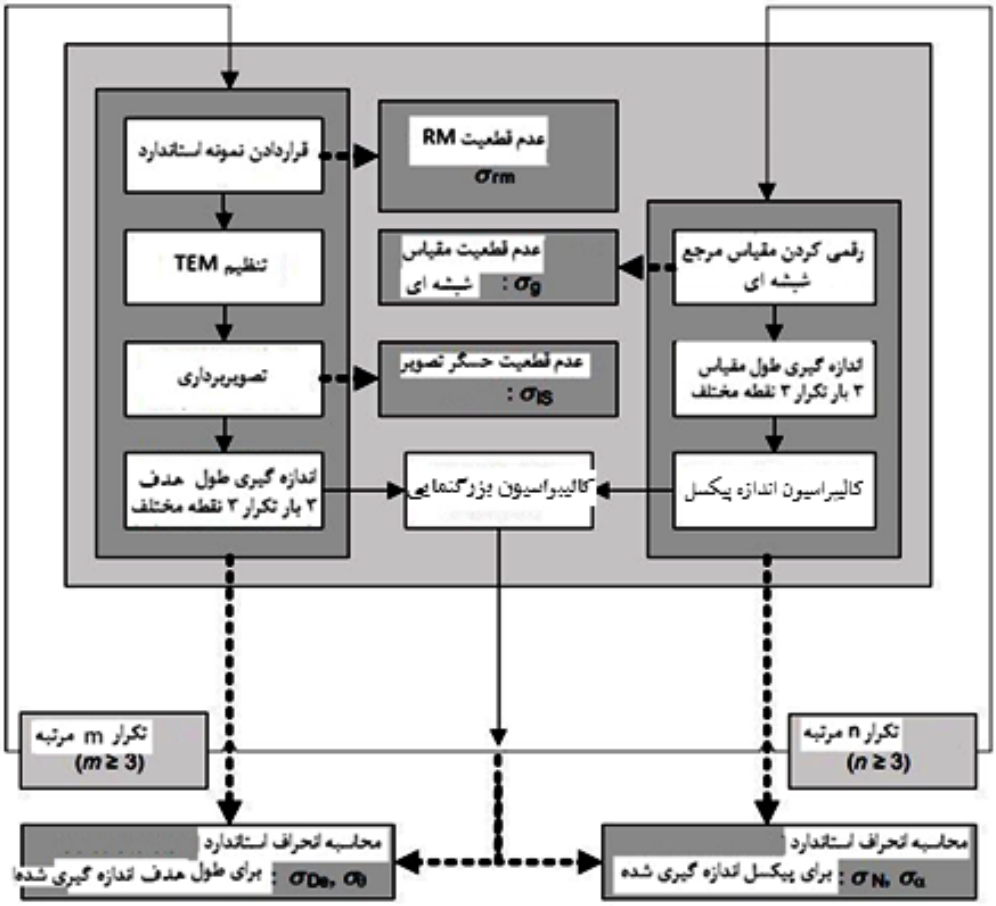
(۲۰)

$$\sigma = k \times \sigma_e$$

که در آن :

k فاکتور پوشش است.

یادآوری ۲- برای یک محدوده اطمینان تقریبا ۹۵ درصد، k را ۲ و برای محدوده اطمینان ۹۹ درصد، k را ۳ در نظر بگیرید.



شکل۹- پنج فاکتور مربوط به عدم قطعیت

۹ گزارش کالیبراسیون

۹-۱ کلیات

گزارش کالیبراسیون باید توسط آزمایشگاه به‌صورت دقیق، شفاف و واضح، مطابق با دستورالعمل ویژه روش اجرایی کالیبراسیون درج شده در بند ۶ تا ۸ گزارش شود.

نتایج اندازه‌گیری باید در یک قالب گزارش آزمون[1] فهرست شود. علاوه‌بر اطلاعات مورد درخواست مشتری، این گزارش باید شامل همه اطلاعات مورد نیاز برای تفسیر نتایج کالیبراسیون و الزامات زیربند ۵-۱۰-۲ استاندارد ملی ایران- ایزو- آی ای سی شماره، ۱۳۸۶:۱۷۰۲۵ الزامات عمومی برای احراز صلاحیت آزمایشگاه‌های آزمون و کالیبراسیون، باشد.

اگر کالیبراسیون برای مشتری درون مجموعه‌ای است یا برای مشتری است که قبلا با او تفاهم‌نامه امضاء شده است، دراین‌صورت می‌توان گزارش را ساده‌سازی کرد. اطلاعات فهرست شده در زیربند ۵-۱۰-۲ استاندارد ملی ایران- ایزو-آی ای سی شماره،۱۳۸۶:۱۷۰۲۵ الزامات عمومی برای احراز صلاحیت آزمایشگاه‌های آزمون و کالیبراسیون، که برای مشتری گزارش نمی‌شود، باید در آزمایشگاهی که کالیبراسیون را انجام داده، به آسانی در دسترس باشد.

۹-۲ مندرجات گزارش کالیبراسیون

در هر گزارش کالیبراسیون باید اطلاعات زیر و هرگونه اطلاعات مرتبط دیگری که می‌تواند روی نتایج کالیبراسیون اثر گذارد، درج شود. نمونه‌ای از یک گزارش در پیوست ج آمده است.

الف- عنوان (برای مثال گزارش‌های آزمون یا گواهی‌های کالیبراسیون)؛

ب-نام و آدرس آزمایشگاه؛

پ-شماره مرجع گزارش کالیبراسیون؛

ت-اسم و آدرس مشتری در صورت ارتباط؛

ث-مشخصات روش به کار رفته (برای مثال: ISO 29301:2010) ؛

ج- نام تولیدکننده، مدل و شماره سریال دستگاه TEM مورد استفاده؛

چ-میزان ولتاژ مورد استفاده بر حسب کیلوولت (kV) ؛

ح- نوع حالت تشکیل تصویر: Low Mag mode، Mag mode، SAMag mode، Mag zoom mode؛

خ- جریان عدسی‌هایی که برای بزرگنمایی کالیبره شده؛

د- نوع نگهدارنده مورد استفاده؛

ذ- روش اجرایی برای رسیدن به بزرگنمایی موردنظر برای کالیبراسیون؛

ر- نام سازنده، مدل و شماره سریال دوربین رقمی که برای آشکارسازی تصویر استفاده شده است؛

ز- مشخصات حسگر تصویر روی دوربین رقمی به همراه تعداد پیکسل‌های جهت X و Y و همچنین اندازه پیکسل حسگر تصویر منفرد؛

---

1 -Test report

ژ- نام، مدل و شماره سریال روبشگر فیلم مورد استفاده در رقمی کردن تصویر؛

س- نام و مشخصات مقیاس شیشه‌ای مورد استفاده به‌عنوان مقیاس مرجع؛

ش- نام و مشخصات نرم‌افزار مورد استفاده؛

ص- تعداد اندازه‌گیری‌های انجام‌شده (n و m) و نتایج کالیبراسیون: بزرگنمایی‌ها با صحت و عدم‌قطعیت؛

ض- نام شخصی که کالیبراسیون را انجام داده است؛

ط- تاریخ و زمان کالیبراسیون؛

ظ- نام، نقش، امضاء و رده شغلی افرادی که گواهینامه کالیبراسیون را تایید کردند؛

ع- درصورت نیاز، بیانیه‌ای که نشان دهد نتایج فقط مربوط به موارد آزمون شده و کالیبره شده است؛

برای نسخه چاپی گزارش آزمون و گواهینامه کالیبراسیون، توصیه می‌شود که شماره صفحه، تعداد صفحات و تعداد گزارشات کالیبراسیون در آن درج شود.

توصیه می‌شود آزمایشگاه‌ها بیانه‌ای آماده کنند که در آن قید شود گزارش کالیبراسیون نباید مجددا نسخه‌برداری شود مگر این که به‌صورت کامل و با تایید کتبی آزمایشگاه انجام شود.

غ- در صورت درخواست مشتری، الگوریتم مورد استفاده برای برنامه کالیبراسیون باید تشریح شود.

پیوست الف
(آگاهی‌دهنده)
عواملی که روی نتایج بزرگنمایی TEM تاثیرگذار هستند

عوامل فهرست‌شده زیر ممکن است باهم برهم‌کنش داشته باشند. این عوامل به‌ترتیب محل‌شان در دستگاه موردنظر قرار می‌گیرد:

الف-۱ ناپایداری یا رانش ولتاژ بالای تفنگ الکترونی می‌تواند انرژی الکترون را تغییر دهد بنابراین فوکوس نهایی که روی بزرگنمایی کالیبراسیون اثرگذار است، تغییر می‌کند.

الف-۲ حتی اگر بزرگنمایی هدف برای کالیبراسیون مشابه باشد، بزرگنمایی کالیبره‌شده در هر ولتاژ شتاب‌دهنده ممکن است متفاوت باشد برای مثال ولتاژ ۱۰۰ kV و ۲۰۰ kV
آستیگماتیسم اصلاح‌نشده عدسی شیئی می‌تواند منجر به فوکوس ناصحیح شود.

الف-۳ همگرایی باریکه الکترونی می‌تواند روی فوکوس تأثیر گذارد، به‌ویژه در بزرگنمایی‌های بسیار بالا. سیستم عدسی جمع‌کننده باید تحت شرایطی کار کند که روشنایی به‌صورت موازی باشد. به‌همین ترتیب توصیه می‌شود این سیستم تحت شرایط مستندشده به‌گونه‌ای کار کند که همگرایی پرتو روی فوکوس تصویر تاثیری نداشته باشد. این کار با ثبت تصاویر چندگانه در درجه‌های مختلف از همگرایی باریکه الکترون قابل انجام است.

الف-۴ پسماند مغناطیسی باقی‌مانده، به ویژه در عدسی شیئی، می‌تواند شرایط کانونی (فوکوس) را تغییر دهد.

الف-۵ تغییر یا ناپایداری جریان برانگیختگی عدسی‌های شیئی می‌تواند شرایط کانونی (فوکوس) را تغییر دهد.

الف-۶ تغییر ارتفاع آزمونه می‌تواند شرایط کانونی را تغییر دهد.

الف-۷ کنترل زوم بزرگنمایی می‌تواند غیرخطی باشد

الف-۸ خطای درصد در بزرگنمایی ممکن است برای هر محدوده بزرگنمایی متفاوت باشد.

الف-۹ تغییر جهت بلور (آزمونه) نسبت به محور نوری، می‌تواند موجب تغییر در بزرگنمایی شود.

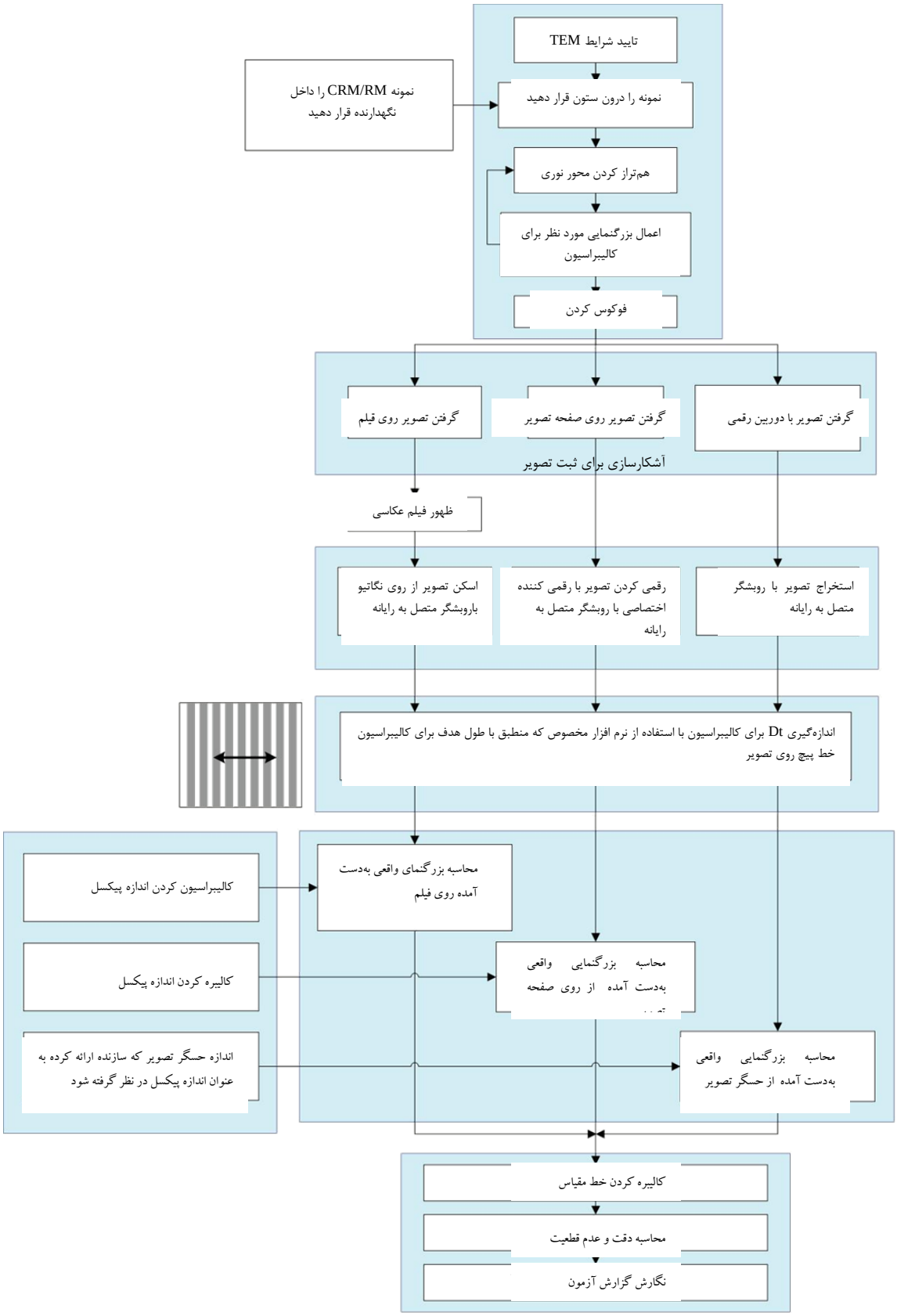
الف-۱۰ رانش گرمایی و الکتریکی قطعات مدار در عدسی‌ها می‌تواند با گذشت زمان روی بزرگنمایی اثر گذار باشد.

الف-۱۱ انبساط یا انقباض مواد عکاسی و ادوات چاپ رقمی می‌تواند روی بزرگنمایی نهایی تاثیر مهمی بگذارد.

الف-۱۲ در تصاویر ثبت شده رقمی، خطای بزرگنمایی ممکن است به موجب اعوجاج یا دقیق نبودن ادوات رقمی (مثل روبشگر تصویر) اتفاق بیفتد. نسبت منظر (X و Y بزرگنمایی) ممکن است با ابعاد تصویر اولیه متفاوت باشد.

الف-۱۳ تعیین موقعیت لبه خطها یا ساختار تناوبی می‌تواند روی نتیجه بزرگنمایی تأثیر گذارد.

پیوست ب
(الزامی)
نمودار روش اجرایی کالیبراسیون بزرگنمایی تصویر



پیوست پ

(الزامی)
چگونه تعداد خطوط را برای میانگین گیری مشخص کنید

پ-۱-روش اجرایی برای تعیین تعداد خطوط به منظور رسیدن به پروفایل خط صاف

به‌منظور به‌دست آوردن پروفایل خط صاف، تعداد خطوطی که برای فرآیند میانگین‌گیری درنظر گرفته می‌شود باید با روش اجرایی ذیل مشخص شود:

الف- باریکه الکترونی را بدون قرار دادن نمونه داخل دستگاه TEM ایجاد کنید.

ب- سامانه عدسی روشنایی را به‌گونه‌ای تنظیم کنید که تابش الکترون یکنواخت را روی صفحه فلورسانس در بزرگنمایی حوالی ۳۰ هزار برابر داشته باشید.

پ- تصویر (نه آزمونه) را در معرض دُز مناسبی از الکترون، متناسب با حساسیت آشکارساز، قرار دهید؛

ت- تصویر آشکارسازی‌شده را به تصویر رقمی تبدیل کنید (۶-۴).

ث- پروفایل خطی از« ۵۰۰ پیکسل (یا بیشتر)× n خط» در راستای محور x روی نمایشگر رایانه به‌دست آورید.

ج- برای خطوط ۱ تا ۵۰۰ n را با فاصله مناسب اعمال کنید تا یک منحنی صاف روی گراف ترسیم شده در بند «د» به‌دست آید. انحراف استاندارد از پروفایل خط برای هر n را محاسبه کنید.

چ- مراحل بند ج و ح را برای سه محل مختلف روی تصویر رقمی‌شده، تکرار کنید.

ح- انحراف استاندارد میانگین را برای هر n به‌دست آورید. برای این کار از اطلاعات محاسبه شده برای سه محل مختلف استفاده کنید.

خ- انحراف استاندارد به‌دست آمده را به‌گونه‌ای نرمال کنید که برای n=1 عدد یک اعمال شود.

د- منحنی مربوط به انحراف استاندارد نرمال‌شده برحسب تعداد خطوط n ترسیم شود.

ذ- تعداد خطوط n_0 را به‌گونه‌ای به‌دست آورید که نسبت متغیر انحراف استاندارد $[\Delta SD / \Delta n = (SD - SD_{i-1}) / (n_i - n_{i-1})]$ ۰/۰۰۱ یا کمتر شود.

ر- تعداد خطوط n_a به کار رفته در فرآیند میانگین‌گیری با استفاده از (n_0 ×۲) به‌دست آید.

پ-۲ مثالی از نتایج عملی

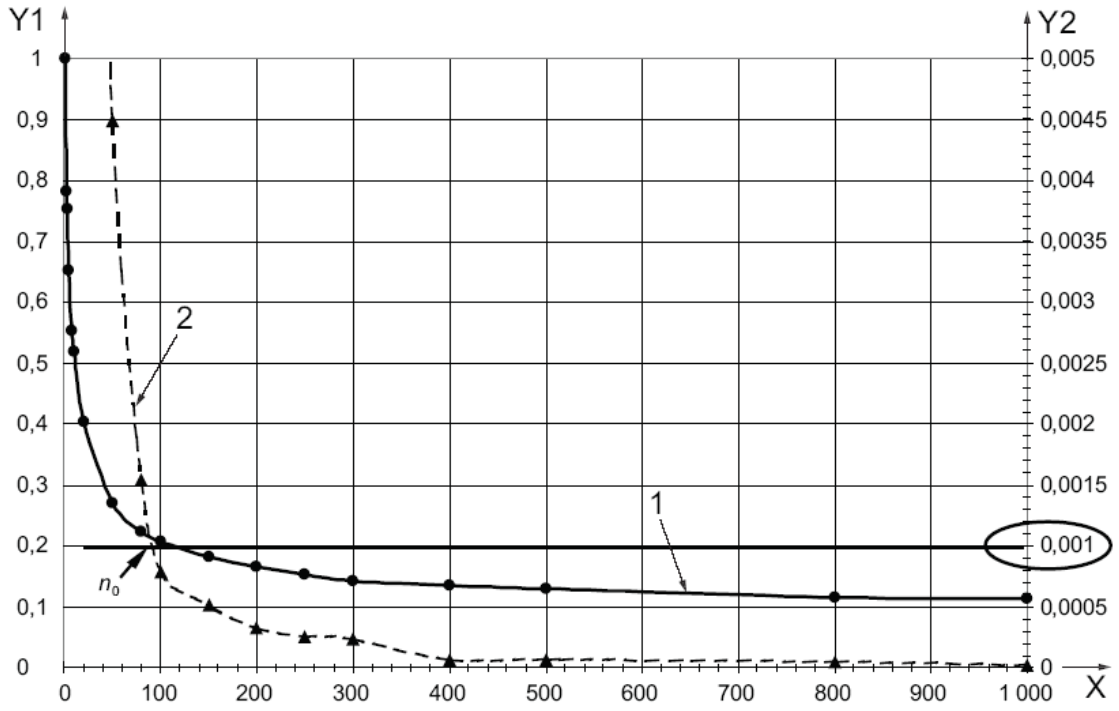
مثالی از نتایج در جدول ب-۱ و شکل ب-۱ آمده است:

.

جدول ب-۱- اطلاعات مربوط به میانگین‌گیری از انحراف استاندارد

شماره خط	SD میانگین	SD نرمال شده	نسبت متغیر
1	101,640	1,000	
2	79,460	0,782	0,218 2
3	76,490	0,753	0,029 2
5	66,230	0,652	0,050 5
8	56,270	0,554	0,032 7
10	52,700	0,518	0,017 6
20	41,090	0,404	0,011 4
50	27,420	0,270	0,004 5
80	22,730	0,224	0,001 5
100	21,130	0,208	0,000 8
150	18,500	0,182	0,000 5
200	16,870	0,166	0,000 3
250	15,590	0,153	0,000 3
300	14,410	0,142	0,000 2
400	13,770	0,135	0,000 1
500	13,130	0,129	0,000 1
800	11,800	0,116	0,000 0
1 000	11,520	0,113	0,000 0

زمانی که تعداد خطوط بیش از ۹۰ باشد، نسبت متغیر کمتر از ۰/۰۰۱ می‌شود، تعداد خطوط لازم برای میانگین‌گیری n_a برابر ۱۸۰ = ۹۰ × ۲ = n_a ×۲ است.



راهنما:

۱ تعداد خطوط برحسب انحراف استاندارد

۲ نسبت متغییر

X تعداد خطوط

Y1 انحراف استاندارد نرمال شده (SD)

$\Delta SD / \Delta n$ Y2

شکل ب-۱ - انحراف استاندارد نرمال‌شده برحسب تعداد خطوط n

پیوست ت
(آگاهی‌دهنده)
مواد مرجع برای کالیبراسیون بزرگنمایی

ت-۱ مقدار فاصله d برای برخی عناصر خالص

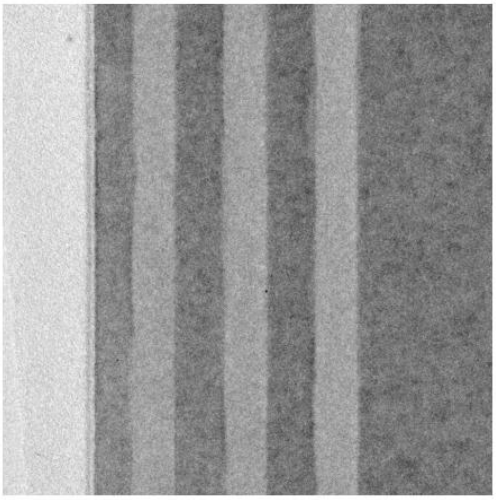
جدول ت-۱ فاصله d رابرای چند ماده مناسب برای کالیبراسیون نشان می‌دهد.

جدول ت-۱ فاصله d رابرای چند ماده مناسب برای کالیبراسیون

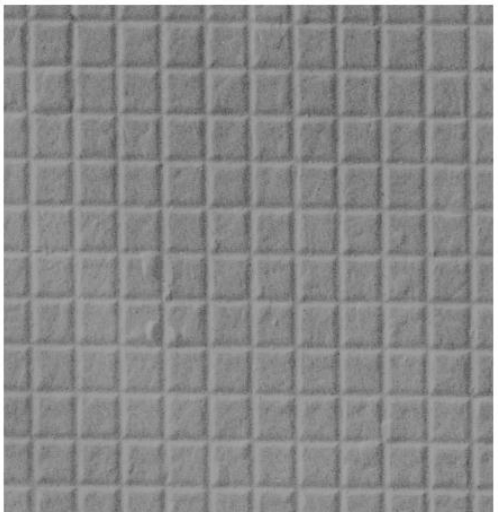
عنصر	شاخص	فاصله d nm
Gold(Au)	۱۱۱	۰/۲۳۵
	۲۰۰	۰/۲۰۴
	۲۲۰	۰/۱۴۴
Silver(Ag)	۱۱۱	۰/۳۱۴
	۲۰۰	۰/۲۷۲
	۲۲۰	۰/۱۹۲

مثال‌هایی از تصاویری که دارای ساختار تناوبی هستند

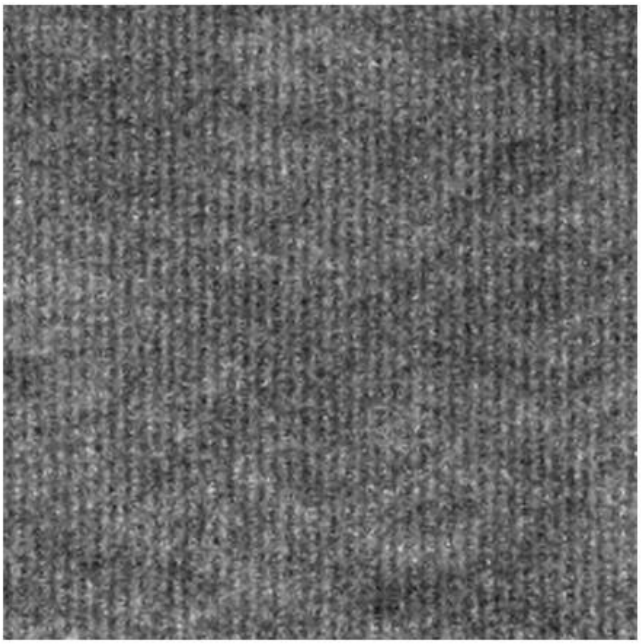
شکل ت-۱ آزمونه‌ای از مواد مرجع که دارای ساختار تناوبی بوده و برای کالیبراسیون در یک محدوده بزرگنمایی خاص استفاده می‌شود را نشان می‌دهد.



الف- ساختار اَبـَرشبکه برای برای محدوده بزرگنمایی‌های متوسط GaAs(9.5nm)/AlAs(9.5nm)



ب- شبکه رپلیکا (۲۰۰۰ خط بر میلی‌متر) برای محدوده بزرگنمایی‌های پایین



ج- تصویر شبکه بلوری برای بزرگنمایی‌های بالا، طلا (۲۰۰) با فاصله ۰/۲۰۴ نانومتر

شکل ت- ۱ نمونه‌ای از مواد مرجع دارای ساختار دوره‌ای برای کالیبراسیون در یک محدوده بزرگنمایی خاص

پیوست ث
(آگاهی دهنده)

نمونه‌ای از گزارش آزمون برای کالیبراسیون بزرگنمایی TEM

در این پیوست مثالی از یک ماتریس و شرایط مهم برای پیگیری بزرگنمایی‌های کالیبراسیون‌شده، به‌عنوان بخشی از برنامه کنترل کیفیت، درج شده است.

به مثال گزارش آزمون جدول زیر مراجعه شود.

یادآوری ۱- بزرگنمایی واقعی اندازه‌گیری شده را برحسب استاندارد کالیبراسیون وارد کنید.

یادآوری۲ - تعداد دفعات تکرار مستقل اندازه‌گیری‌های m وn، ولتاژ دستگاه، حالت بزرگنمایی، بزرگنمایی و تفکیک‌پذیری روبشگر فقط به‌عنوان مثال قید شده است. این مقادیر می‌تواند براساس تنظیمات مورد استفاده در کالیبراسیون تنظیم شوند. برخی تفاوت از تنظیمات قیدشده در این مثال ممکن است مورداستفاده قرار گیرد.

نتایج باید به شکل نمودار کنترل ترسیم شود تا تغییرپذیری در طول زمان به‌دست آید.

گزارش آزمون برای کالیبراسیون بزرگنمایی TEM

شماره گزارش کالیبراسیون : ----------

نام آزمایشگاه : ----------

آدرس آزمایشگاه:----------

مرجع استاندارد بین‌المللی: ISO 29301:2010

نام مشتری: ----------

آدرس مشتری: ----------

نام سازنده دستگاه TEM: ----------

آدرس سازنده دستگاه TEM: ----------

مدل دستگاه TEM: ---------- شماره سریال:----------

مدل نگهدارنده آزمونه: ---------- شماره سریال: ----------

نام و مشخصات مواد مرجع: ----------

ولتاژ کار (برحسب kV): ----------

حالت تشکیل تصویر:

Low MAG ☐ MAG ☐ SAMAG ☐ MAG zoom ☐

روش اجرایی تنظیم بزرگنمایی موردنظر برای کالیبراسیون:

نام تولیدکننده دوربین رقمی:----------

آدرس تولیدکننده دوربین رقمی: ----------

مشخصات حسگر تصویر که روی دوربین رقمی نصب شده:

۱- تعداد پیکسل‌ها در جهت‌های X و Y : ----------

۲- اندازه پیکسل‌ها روی حسگر تصویر منفرد: ----------

نام تولیدکننده روبشگر فیلم: ----------

آدرس تولیدکننده روبشگر فیلم: ----------

نام و مشخصات مقیاس مرجع برای تصویر رقمی شده:----------

نام و مشخصات نرم‌افزار مورد استفاده:----------

نام کاربر:----------

تاریخ انجام آزمون:----------

نام تاییدکننده:----------

امضاء تاییدکننده:

برگه اطلاعات برای D_t و σ_{rm} و σ_a

تعداد دفعات تکرار اندازه‌گیری‌های مستقل: m= سه مرتبه

نام RM(C): ---------- σ_{rm}

ولتاژ کار: KV۲۰۰

زاویه θ را با چرخش بین جهت راستای ساختار تناوبی و محور Y روی نمایشگر رایانه تنظیم کنید

σ_θ	میانگین θ	θ (درجه)	دفعه تکرار
			۱
			۲
			۳

σ_{De}	میانگین De	اندازه‌گیری Dt(pix)	De(pix)	تکرار	موقعیت	دفعه تکرار	بزرگنمایی Mg	مود
				۱	۱	اولین دور از سه بار	× ۱۰۰K	□MAG zoom □ SAMAG □ MAG □ Low MAG
				۲				
				۳				
				۱	۲			
				۲				
				۳				
				۱	۳			
				۲				
				۳				
				۱	۱	دومین دور از سه بار		
				۲				
				۳				
				۱	۲			
				۲				
				۳				
				۱	۳			
				۲				

				۳				
			۱	۱			سومین دور از سه بار	
				۲				
				۳				
			۲	۱				
				۲				
				۳				
			۳	۱				
				۲				
				۳				
میانگین کل De $D_{e(AV)}=$						$D_{t(AV)}=$		

σrm عدم‌قطعیت (C)RM؛

M_g بزرگنمایی درج شده روی صفحه نمایشگر TEM؛

D_e الگوی گام پیچ پایه (pix) تصویر رقمی شده ساختار مرجع بزرگنمایی‌شده؛

D_t فاصله پیچ زاویه تصحیح شده (pix) در تصویر رقمی شده ساختار مرجع بزرگنمایی‌شده؛

σ_θ انحراف استاندارد محاسبه شده از یک سری θ

نظرات/ملاحظات:

برگه اطلاعات برای S و σ_b و σ_g

تعداد تکرار اندازه‌گیری مستقل: m= سه مرتبه؛

نام مقیاس شیشه‌ای: ---------- σ_g =----------

ولتاژ کار: kV ۲۰۰؛

زاویه α را با چرخاندن بین جهت راستای ساختار تناوبی و محور X روی نمایشگر رایانه تنظیم کنید.

σ_α	میانگین α	α (درجه)	دفعه تکرار
			۱
			۲
			۳

σ_N	میانگین N	اندازه‌گیری					دفعه تکرار	تفکیک پذیری روبشگر
		S=W/N	N (Pix)	Wa (mm)	تکرار	موقعیت		
					۱	۱	اولین دور از سه بار	2400 dpi
					۲			
					۳			
					۱	۲		
					۲			
					۳			
					۱	۳		
					۲			
					۳			
					۱	۱	دومین دور از سه بار	
					۲			
					۳			
					۱	۲		
					۲			

			۳				
		۳	۱				
			۲				
			۳				
		۱	۱			سومین دور از سه بار	
			۲				
			۳				
		۲	۱				
			۲				
			۳				
		۳	۱				
			۲				
			۳				
میانگین کل $N_{(AV)}$		= $S_{(AV)}$ =					

σ_g عدم‌قطعیت مقیاس شیشه‌ای؛

Wa مقدار طول اختیاری بازخوانی شده روی مقیاس شیشه‌ای رقمی‌شده؛

W پهنای در راستای محور x نمایشگر رایانه مربوط به W_a ؛

N تعداد پیکسل‌ها در W؛

S اندازه پیکسل محاسبه شده از W وN؛

σa انحراف استاندارد محاسبه‌شده از یک سری a؛

σN انحراف استاندارد محاسبه‌شده از یک سری N میانگیری‌شده؛

نظرات/ملاحظات:

نتایج کالیبراسیون

(برای فیلم عکاسی یا صفحه فیلم)

بزرگنمایی کالیبره‌شده: M_g؛ ---------- =M_g

بزرگنمایی کالیبره‌شده $M = [D_{t(AV)} \times S_{(AV)}] / L_0$ ؛ ----------= M

صحت: $A = \{(M_g - M) / M\} \times 100$ ؛ ----------=A

عدم‌قطعیت: ---------- $=\sigma$

$$\sigma = k \times \sigma_e = k \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_{De}}{\sqrt{m}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\theta}{\sqrt{m}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_N}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\alpha}{\sqrt{n}}\right)^2 + {\sigma_{rm}}^2 + {\sigma_g}^2}$$

نشانگر مقیاس کالیبره‌شده برای یک میکرومتر=$M/10^3$ $L_{U(\mu m)}$ = ---------- mm

نشانگر مقیاس کالیبره‌شده برای یک نانومتر=$M/10^6$ $L_{U(nm)}$ = ---------- nm

M_g بزرگنمایی نمایش داده شده روی دستگاه TEM؛

$D_{t(AV)}$ میانگین مقدار الگوی پیچ (pix) در تصویر رقمی شده ساختار مرجع بزرگنمایی‌شده؛

L_0 طول واقعی ساختار مرجع روی RM (C) مربوط به $(D_t \times S)$؛

$S_{(AV)}$ مقدار میانگیری شده کلی اندازه پیکسل؛

σ_e کل انحراف استاندارد محاسبه شده بزرگنمایی کالیبره‌شده؛

σ_{De} انحراف استاندارد محاسبه شده از یک سری از D_e میانگیری‌شده؛

σ_θ انحراف استاندارد محاسبه شده از یک سری از θ؛

σ_N انحراف استاندارد محاسبه شده یک سری از N میانگیری‌شده؛

σ_α انحراف استاندارد محاسبه شده یک سری از α میانگیری‌شده؛

σ_{rm}عدم‌قطعیت RM(C) ؛

σ_gعدم‌قطعیت مقیاس شیشه‌ای مرجع؛

m تعداد دفعات تکرار اندازه‌گیری‌های مستقل فاصله پیچ RM(C) ؛

n تعداد دفعات تکرار اندازه‌گیری‌های اندازه پیکسل در رقمی کردن تصویر؛

k فاکتور پوشش، فاصله اطمینان در حدود ۹۵ یا ۹۹ درصد، این فاکتور می‌تواند به ترتیب ۲ یا ۳ در نظر گرفته شود؛

$L_{U(\mu m)}$ طول نشانگر مقیاس مربوط به یک میکرون؛

$L_{U(nm)}$ طول نشانگر مقیاس مربوط به یک نانومتر؛

نتایج کالیبراسیون

(برای دوربین رقمی)

بزرگنمایی که کالیبراسیون شده: M_g ---------- =M_g

تعداد پیکسل: S ---------- =S

بزرگنمایی کالبیره شده $M = [D_{t(AV)} \times S_{(AV)}] / L_0$ ---------- = M

صحت: $A = \{(M_g - M) / M\} \times 100$ ---------- =A

عدم‌قطعیت: ----------$=\sigma$

$$\sigma = k \times \sigma_e = k \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_{De}}{\sqrt{m}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\alpha}}{\sqrt{m}}\right)^2 + {\sigma_{rm}}^2 + {\sigma_{IS}}^2}$$

نشانگر مقیاس کالیبراسیون شده برای یک میکرومتر=$M/10^3$ $L_{U(\mu m)}$ = ---------- mm

نشانگر مقیاس کالیبراسیون شده برای یک نانومتر=$M/10^6$ $L_{U(nm)}$ = ---------- nm

M_g بزرگنمایی نمایش داده‌شده روی دستگاه TEM؛

S اندازه پیکسل حسگر تصویر که توسط سازنده تضمین شده است؛

$D_{t(AV)}$ الگوی گام پیچ پایه (pix) در تصویر رقمی شده ساختار مرجع بزرگنمایی‌شده؛

L_0 طول واقعی ساختار مرجع روی RM(C) مربوط به $(D_t \times S)$؛

σ_e انحراف استاندارد محاسبه شده بزرگنمایی کالیبره شده؛

σ_{De} انحراف استاندارد محاسبه شده از یک سری از De میانگیری شده؛

σ_θ انحراف استاندارد محاسبه شده از یک سری از θ؛

σ_{rm}عدم‌قطعیت RM(C)؛

σ_{IS}عدم‌قطعیت اندازه پیکسل حسگر تصویر؛

m تعداد دفعات تکرار اندازه‌گیری‌های مستقل فاصله شیار RM(C) ؛

k فاکتور پوشش، فاصله اطمینان در حدود ۹۵ یا ۹۹ درصد، این فاکتور می‌تواند به ترتیب ۲ یا ۳ در نظر گرفته شود؛

$L_{U(\mu m)}$ طول نشانگر مقیاس مربوط به یک میکرون؛

$L_{U(nm)}$ طول نشانگر مقیاس مربوط به یک نانومتر؛

کتاب‌نامه

[1] ISO 5725-1:1994, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1:General principles and definitions*

[2] JOHN, C.H. SPENCE, *Experimental high-resolution electron microscopy* (Second Edition), Oxford University Press, 1988

[3] WILLIAMS, David B. and BARRY CARTER, C. *Transmission Electron Microscopy*, Vol. 1 Basic, Plenum Press, New York, 1996