نانومترولوژی و نقش آن در توسعه فناوری نانو

سمیرا گل‌زردی
کارشناسی ارشد مهندسی مواد- سرامیک،
کارگروه استاندارد و ایمنی فناوری‌نانو، ستاد ویژه توسعه فناوری‌نانو
golzardi@nano.ir

نانومترولوژی را می‌توان به معنای علم اندازه‌گیری در مقیاس نانو تعریف کـــرد. این علم در حوزه علم و فناوری‌نانو از اهمیت بسیاری برخوردار است و اساساً فعالیت در حوزه فناوری‌نانو بدون بهره‌مندی از خدمات نانومترولوژی امکان‌پذیر نیست. نانومترولوژی دارای نقشـــی اساســـی در تولید نانو مواد و دستگاه‌های اندازه‌گیری قابل اطمینان با عدم قطعیت‌های معین در صنعت نانو است و به دلیل اهمیت آن در استانداردسازی و تجاری محصولات نانو، از طرف کشـــورهای فعال در حوزه فناوری‌نانو، بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. در این مقالـــه به معرفی اندازه‌شناســـی در مقیاس نانو، حوزه‌های فعالیتی مختلف و ارکان اساسی هر یک از حوزه‌ها پرداخته شده است.

کلمـــات کلیـــدی: نانومترولوژی، قابلیـــت ردیابی مترولوژیکی.

۱ مقدمه

مترولوژی به معنای علم اندازه‌شناسی است. اندازه‌شناسی شاخه‌ای از علم است که به شناخت و بررسی روش‌های مختلف اندازه‌گیری[1] کمیت‌های فیزیکی و استانداردسازی[2] آن‌هـــا می‌پردازد. در جهان پرشـــتاب کنونـــی و با تحولات بزرگی کـــه در عرصه‌های اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جهان روی داده اســـت و به خصوص، با ایجاد ســـازمان جهانی تجارت و عضویت بیش از ۱۵۰ کشور در آن، شالوده رقابت در بازارهای جهانی بـــه صورت بنیادی تغییر کرده اســـت. قیمت که دیر زمانی بـــه عنوان مهم‌ترین عامل تعیین کننده سطح رقابت‌پذیری محسوب می‌شد اکنون تنها یکی از عوامل به حساب می‌آید و عوامل متعدد دیگری در ســـطح رقابت‌پذیری بنگاه‌ها و صنایع کشورها مؤثر هســـتند. کیفیت در حال تبدیل شـــدن به یکی از مهم‌ترین این عوامل و تعیین‌کننده ســـطح رقابت‌پذیری اســـت. کاربرد فن‌آوری‌های جدید در کلیه اجزای زنجیره ارزش محصولات، ارتقاء کیفیت همزمان با قیمت‌های مناسب را فراهم ساخته است و با ورود رقبای قدرتمند و با ظرفیت‌های تولیدی عملیاتی بســـیار بالا، بازارهای جهانی صحنه رقابت نفس‌گیری شـــده است. بنابراین اندازه‌گیری به بخش حیاتی زندگی بشر تبدیل شـــده و در همین راستا، اقتصادهای بزرگ دنیا رشـــد خود را وابسته به بهره‌مندی از نظام‌هـــای اندازه‌گیری معتبر می‌دانند و این خود بیانگر اهمیت علم اندازه شناســـی یا

مترولوژی است[۱].

پیشرفت روزافزون نانوتکنولوژی به عنوان صنعت پیشرو در قرن جدید موجب توسعه اندازه‌شناسی در مقیاس نانو شده است. نانومترولوژی را می‌توان به معنای علم اندازه‌گیری در مقیاس نانو تعریف کرد. این علم در حوزه علم و فناوری‌نانو از اهمیت بسیاری برخوردار است و اساساً فعالیت در حوزه فناوری‌نانو بدون نانومترولوژی امکان‌پذیر نیست؛ چرا که نانومترولوژی اساس تدوین استانداردهای محصولات فناوری‌نانو است و کشورها بدون فعالیت در این حوزه نمی‌توانند در زمینه تدوین استانداردهای ملی، مشارکت در تدوین استانداردهای بین‌المللی، تولید و صادرات محصولات در حوزه فناوری‌نانو قدم جدی بردارند[۲].

۲ نانومترولوژی

نانومترولوژی زیرمجموعه‌ای از مترولوژی و بیانگر علم اندازه‌گیری در مقیاس نانو است. نانومترولوژی دارای نقشی اساسی در تولید نانومواد و دستگاه‌های اندازه‌گیری قابل اطمینان با عدم قطعیت‌های معین در صنعت نانو است. کشورهای فعال در حوزه نانوفناوری در سال‌های اخیر، تحقیق پیرامون دستگاه‌ها، مترولوژی و استانداردها در زمینه نانوفناوری را به علت نقش اساسی آن در تجاری نمودن محصولات نانو، یکی از فعالیت‌های اصلی خود قرار داده‌اند.

مسئله مهم در این زمینه اختراع و گسترش تکنیک‌های جدید اندازه‌گیری و استانداردهای مربوط برای رسیدن به تولیدات پیشرفته در فناوری‌نانو است. بنابراین پیشرفت‌های صنایع در حال ظهور مبتنی بر فناوری‌نانو، نیازمند بهره‌مندی از خدمات مترولوژی با حد تفکیک و دقت بالای مورد نیاز در این فناوری است.

ابعاد نمونه در نانو سیستم‌ها از زیر ۱۰ نانومتر تا چند صد نانومتر متفاوت بوده و این در حالی است که ساخت سیستم‌های اندازه‌گیری تا ۰/۱ نانومتر مورد نیاز است[۲].

۳ اهمیت و ضرورت نانومترولوژی

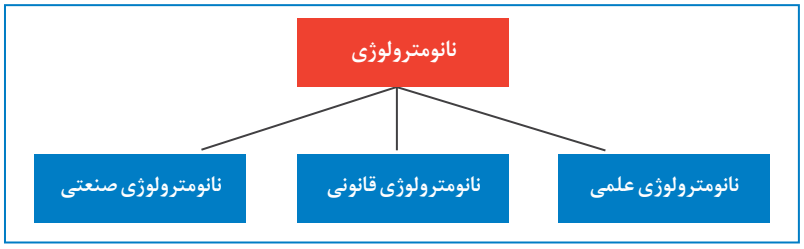
امروزه گستره تحقیقات در حوزه‌های بیولوژی، شیمی و تکنولوژی مواد با بهره‌گیری از علم فیزیک و تکنیک‌های علم مواد و کامپیوتر در مقیاس نانو، به سرعت در حال افزایش است. در همین راستا بخش قابل توجهی از صنعت دنیای امروز به نانوفناوری اختصاص یافته و نرخ رشد آن در صنایع کشورهای مختلف رو به افزایش است. تکنیک‌های اندازه‌گیری توسعه یافته برای مواد معمول پاسخگوی نیازهای اندازه‌گیری نانوساختارها نیست و باید روش‌های اندازه‌گیری خاص نانوساختارها طراحی و به کار گرفته شود. نانوساختارها بر اساس آرایش جدید و گاه عجیب اتم‌ها و ذرات تفسیر می‌شوند مانند فولرین‌ها، نانوذرات دارای مغز و پوسته، نانولوله‌های اعوجاج یافته، فلزهای نانوساختار، دندریت‌ها و غیره که چالش‌هایی را در یافتن و به کارگیری روش‌های صحیح اندازه‌گیری ایجاد می‌نماید. باید روش‌ها و تجهیزات جدید اندازه‌گیری برای حل چالش‌های موجود توسعه یابد.

کنترل دقیق ابعاد، کلید حل مسائل نانوفناوری است و علم اندازه‌گیری آن نانومترولوژی است. در حال حاضر دانشمندان و مهندسان با استفاده از اصول فیزیک به دنبال یافتن و به کارگیری روش‌های اندازه‌گیری نو هستند که در مقیاس نانو قادر به شناخت ابعاد، آرایش ساختار و خواص جدید مواد گردد . همگام با توسعه تجهیزات و روش‌های جدید اندازه‌گیری، روش‌های تولیدی نیز برای تولید قابل تکثیر نانوذرات و نانوساختارها باید توسعه یابند. به طور همزمان استانداردهای موجود نیز باید در تطابق با پیشرفت نانوفناوری و حمایت از افزایش کاربرد نانوساختارها بهبود و توسعه یابد[۳].

۴ لزوم سازگاری بین الزامات اندازه‌شناسی ملی با الزامات منطقه‌ای و بین‌المللی

هر کشوری در حوزه توسعه اندازه‌شناسی دارای تاریخچه مخصوص به خود است. موانع فنی بر سر راه معاهدات تجاری(TBT) که در سازمان تجارت جهانی(WTO) انجام می‌شود، کشورها را ملزم می‌کند که قوانین ملی خود را با اسناد استاندارد بین‌المللی(norms) هماهنگ کنند. این خود مستلزم مشارکت در سیستم‌های بین‌المللی ارزیابی انطباق و توافق نامه‌های به رسمیت شناسی متقابل[۳](MRAs) است.

جوامع بین‌المللی مانند کنوانسیون متر، BIPM و OIML در تنظیم معاهدات خود، از سیستم استاندارد جهانی واحدها و استانداردها و قوانین اندازه‌گیری بین‌المللی برای تجهیزات اندازه‌گیری استفاده می‌کنند. علاوه بر این سازمان‌های اندازه‌شناسی منطقه‌ای نیازمندی‌ها و قوانین خود را در بین اعضای خود هماهنگ می‌سازند. هدف این سازمان‌ها تسهیل تجارت و مبادله نتایج و تجهیزات اندازه‌گیری است. اسناد و پیشنهاداتی که توسط این سازمان‌ها منتشر شده، می‌تواند به عنوان یک منبع اصلی برای ایجاد زیرساخت‌های یک نظام اندازه‌شناسی ملی به کار رود. در خصوص توسعه فناوری‌نانو نیز به عنوان یک فناوری پیشرو، شناخت توانایی‌های اندازه‌گیری مربوطه در هر کشور و همچنین توجه به قوانین جهانی در این عرصه، نقش مهمی در روابط اقتصادی بین‌المللی و همچنین رفع موانع تکنیکی بر سر راه ورود به عرصه تجارت بین‌الملل در حوزه محصولات و خدمات بر مبنای فناوری‌نانو ایفا می‌کند. قوانین اندازه‌شناسی بین‌المللی، حوزه‌های مختلف اندازه‌شناسی مانند واحدهای قانونی، قابلیت ردیابی، تجهیزات اندازه‌گیری، حمایت از مصرف‌کننده و ارزیابی انطباق را در بر می‌گیرند[۴].



شکل ۱. تقسیم‌بندی حوزه‌های فعالیت در نانومترولوژی

۵ تقسیم‌بندی حوزه‌های فعالیت در نانومترولوژی

با نگاهی به تاریخچه مراکز مترولوژی در دنیا، می‌توان دید که این مراکز دولتی یا خصوصی، فعالیت اولیه خود را معمولاً با ارائه خدمات در حوزه‌های مورد نیاز کشور و صنعت‌شان در آن زمان آغاز نموده‌اند.

مراکز مترولوژی عموماً در ابتدا با دو نوع فعالیت شروع به کار کرده‌اند:

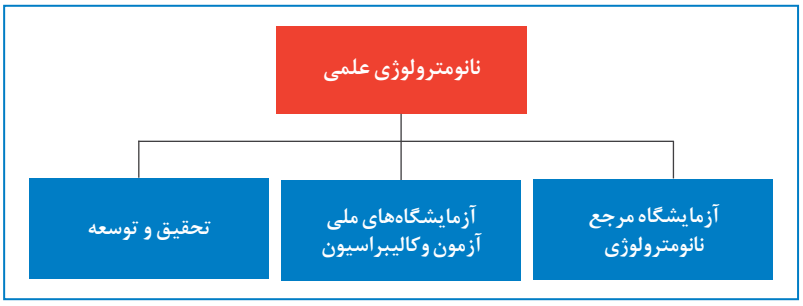
- مراکز ارائه خدمات کالیبراسیون
- مراکز آزمایشگاهی تحقیق و توسعه یا آزمون

در خصوص نانومترولوژی باید به این نکته اشاره کرد که مبحث نانومترولوژی به علت اینکه در چند سال اخیر توسعه یافته و شناخت نسبت به کل حوزه کاربردی آن در سیستم مترولوژی هنوز حاصل نشده است، مبحثی است که فعلاً در بیشتر مراکز مترولوژی به عنوان بخشی از واحدهای تحقیق و توسعه مراکز مترولوژی در حال توسعه است.

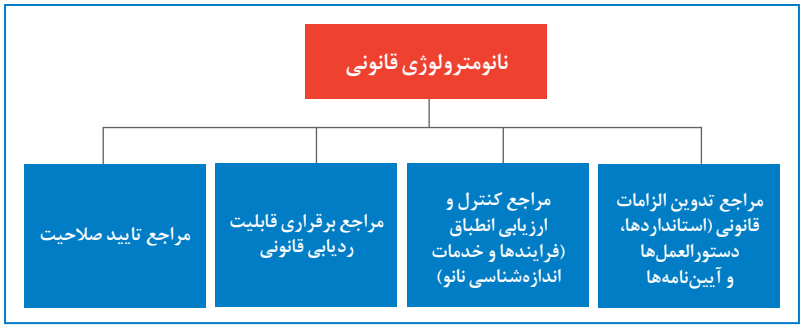
بنابراین، نانومترولوژی زیرمجموعه‌ای از مؤسسات ملی مترولوژی در سراسرجهان است و از نظر حوزه‌های فعالیت مانند مترولوژی به سه بخش کلی تقسیم می‌شود (شکل۱):

۱.۵ نانومترولوژی علمی

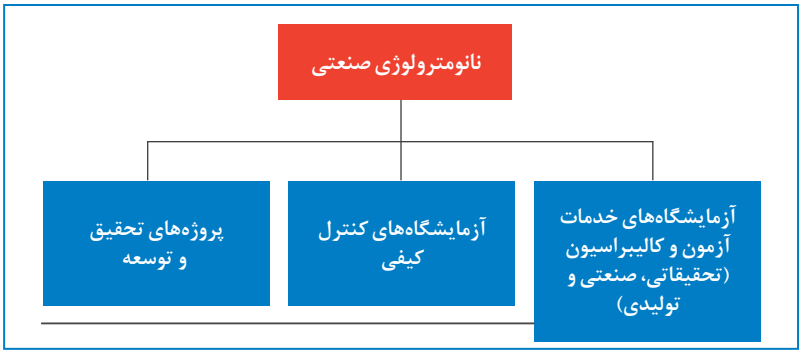
نانومترولوژی علمی عبارت است از دانش و به



شکل ۲. ارکان اصلی سیستم نانومترولوژی علمی



شکل ۳. ارکان اصلی سیستم نانومترولوژی قانونی



شکل ۴. ارکان اصلی سیستم نانومترولوژی صنعتی

کارگیری روش‌های اندازه‌گیری برای تعریف و تحقیق کمیت‌های قابل اندازه‌گیری در سطح مقیاس نانومتر.

در شکل ۲ بخش‌های اصلی در یک سیستم نانومترولوژی علمی نشان داده شده است[۵].

۲.۵ نانومترولوژی قانونی

تمام فعالیت‌هایی که در زمینه مقررات قانونی اندازه‌شناسی انجام می‌شود و حوزه‌های مختلف اندازه‌گیری مانند واحدهای اندازه‌گیری، تجهیزات و روش‌های اندازه‌گیری، قابلیت ردیابی، حمایت از مصرف‌کننده و ارزیابی انطباق را در بر می‌گیرد.

این فعالیت‌ها برای رسیدن به سطح قابل اطمینان از اعتبار اندازه‌گیری، یا مستقیماً توسط دولت انجام شده و یا به وسیله نهادی از طرف دولت انجام می‌شود. در شکل ۳ بخش‌های اصلی در سیستم اندازه‌شناسی قانونی نشان داده شده است[۴].

۳.۵ نانومترولوژی صنعتی

دانش ساخت، استفاده، نگهداری و کنترل عملکرد وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده در صنعت نانو و نیز در فرایندهای تولید و آزمایش محصولات نانو است. بخش‌های مهم در سیستم نانومترولوژی صنعتی در شکل ۴ آورده شده است[۵].

۶ قابلیت ردیابی در اندازه‌گیری‌های مقیاس نانو

ایجاد استانداردها و روش‌های مترولوژی نانومقیاس ابعادی، گامی مهم در مسیر پیاده‌سازی نانومترولوژی زیرساختی است. قابلیت رهگیری یا ردیابی از مهم‌ترین ویژگی‌های این حوزه است.

ردیابی یک اندازه‌گیری به این معناست که ویژگی اندازه‌گیری شده را بتوان با مقادیر یک ماده رفرنس مرجع ارتباط داد که این ماده مرجع می‌تواند استاندارد بین‌المللی یا ملی باشد. ردیابی باید از طریق زنجیره‌ای از مقایسه‌ها انجام شده باشد که هر یک از این مقایسه‌ها باید حاوی عدم قطعیت باشد.

قابلیت ردیابی نانومترولوژی ابعادی شامل فرآیندی است که در آن از یک نمونه مرجع با ویژگی‌های ابعادی استاندارد در مقیاس نانو استفاده می‌شود. کیفیت این فرآیند با استفاده از مقایسه‌های بین‌المللی قابل پیگیری است.

تعریف SI از متر مبتنی بر طولی است که پرتو نور در خلاء در مدت زمان ۱ بر ۲۹۹۷۹۲۴۵۸ ثانیه طی می‌کند. این طول استاندارد از طریق طول موج نوری که از منبع لیزر هلیم پایدار شده باید ایجاد می‌شود، پیاده‌سازی می‌گردد.

قابلیت ردیابی اندازه‌گیری طول با استفاده از این لیزرها انجام شده و همچنین فرکانس‌های لیزر مورد استفاده در تجهیزات مختلف با این لیزر کالیبره می‌شود.

ایجاد قابلیت ردیابی در اندازه‌گیری‌های مقیاس نانو نیازمند به تصویر کشیدن نانوساختارها بوده و همچنین لازم است سیستم اندازه‌گیری طولی به این سیستم تصویربرداری اضافه شده و سپس خود این طول نیز دوباره کالیبره شود. در شکل ۵ قابلیت ردیابی نانومترولوژی ابعادی در مرکز ملی اندازه‌شناسی استرالیا نشان داده شده است. شکل ۶ نیز زنجیره قابلیت ردیابی به استاندارد بین‌المللی متر را نشان می‌دهد. نظام‌مند کردن فعالیت‌های اندازه‌گیری مقیاس نانو و بهره‌مندی از خدمات نانومترولوژی با هدف برقراری قابلیت ردیابی اندازه‌گیری‌ها در مقیاس نانو به سیستم اندازه‌گیری بین‌المللی SI و برآورد قابل اطمینان از عدم قطعیت اندازه‌گیری، انجام می‌گیرد[۶].

۷ چالش‌های پیش‌روی استانداردسازی و اندازه‌شناسی در مقیاس نانو

در این بخش به برخی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در فرایند استانداردسازی و اندازه‌شناسی در مقیاس‌نانو اشاره می‌شود.

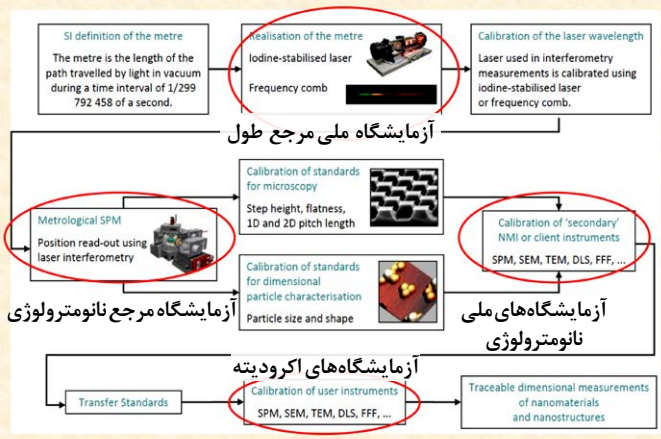
- ایجاد توافقات جهانی برای ادبیات نانو تکنولوژی و نانومترولوژی
- رشد روز افزون نانوتکنولوژی و ورود سریع مقیاس نانو به بسیاری از محصولات صنعتی
- انعقاد معاهدات بین‌المللی در زمینه پاسخ‌گویی به محیط‌زیست، بهداشت و سلامت
- ایجاد توافق‌های استانداردشده برای ارزیابی نانو ذرات موجود در محیط‌زیست
- تنوع زیاد روش‌های اندازه‌گیری و آنالیز و تعریف روش‌های استاندارد آزمایش برای ابزارآلات مقیاس‌نانو
- نیاز به بهبود تکنیک‌های اندازه‌گیری و ابزارهای استاندارد شده

- تدوین روش‌های جدید کالیبراسیون برای تجهیزات و استفاده از مواد مرجع کالیبره در زمان آزمایش با ابزارآلات نانو مقیاس
- نیاز به تدوین استانداردهای جدید در سیستم‌های اندازه‌گیری نانومقیاس و ابزارآلات آن‌ها
- نیاز شدید به تدوین آیین‌نامه‌ها و مقررات ملی، منطقه‌ایی و بین‌المللی

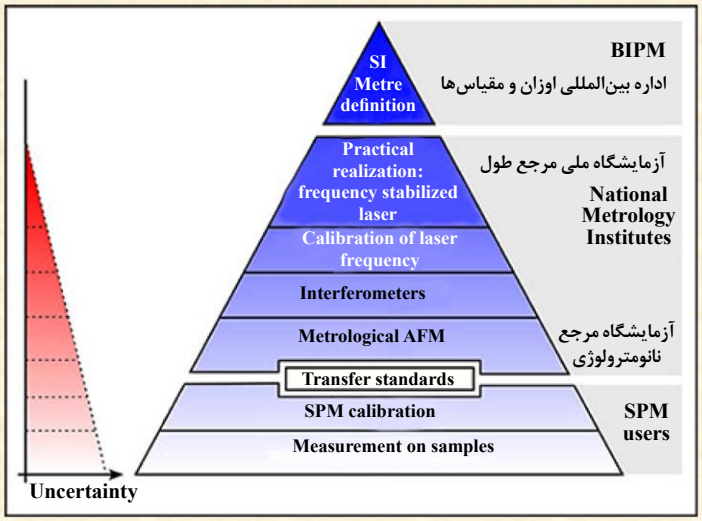
۸ جمع‌بندی

ساخت تجهیزات و استانداردسازی روش‌های اندازه‌گیری و کالیبراسیون شامل مجموعه‌ای از فناوری‌ها و شیوه‌های توانمند است که استفاده مفید از نانوفناوری بستگی به برخورداری از این توانمندی‌ها خواهد داشت. موضوع نانومترولوژی در علوم مختلف پایه، مهندسی و پزشکی از اهمیت خاصی برخوردار است و محققان را در انجام اندازه‌گیری‌ها و تعیین ویژگی‌های مواد یاری می‌رساند. به عنوان مثال ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محصولات به مواد اولیه آن و ساختار میکروسکوپی به دست آمده از فرایند تولید بستگی دارد و برای شناسایی مواد اولیه و ساختار نهایی، نیازمند دستگاه‌های اندازه‌گیری و تعیین مشخصات مواد در مقیاس نانو هستیم. در واقع بهره‌برداری موفقیت‌آمیز از فناوری‌نانو به کاربرد این تجهیزات بستگی دارد؛ زیرا چنین ابزارهایی چشم را برای دیدن و انگشتان را برای کنترل ساختارهایی در مقیاس نانو توانمند می‌سازد.

از آنجا که توسعه تجهیزات آزمایشگاهی فناوری‌نانو جزء تفکیک‌ناپذیر نانومترولوژی بوده و در واقع مقدمه و سنگ‌بنای نانومترولوژی به حساب می‌آید، ضرورت فعالیت در زمینه نانومترولوژی و توسعه تجهیزات آزمایشگاهی فناوری‌نانو احساس می‌شود. امید است که با انجام برنامه‌ریزی‌های دقیق در ایجاد نظام ملی نانومترولوژی شاهد پیشرفت‌های روزافزون صنعت نانوفناوری در کشورمان باشیم.



شکل ۵. قابلیت ردیابی نانومترولوژی فیزیکی در مؤسسه اندازه‌شناسی ملی استرالیا[۶].



شکل ۶. زنجیره قابلیت ردیابی به استاندارد بین‌المللی متر[۷].

پی‌نوشت‌ها:

1. Measurement
2. Standardization
3. Mutual Recognition Agreements or Arrangements(MRAs)

مراجع:

1. F. Hengstberger, ECONOMIC IMPACT OF METROLOGY, International Committee of Weights and Measures.
2. D. J. Miles, Nanometrology: The Critical Role of Measurement in Supporting Australian Nanotechnology, N. M. Institute, Editor. 2006, Australian Government.
3.W. Lojkowski, A. Daniszewska, and M. Chmielecka, Nanometrology report. 2006.
4. OIML, D1. (2004), Elements for a law on metrology. Paris, OIML, 2004. 24.
5. Co-nanomet (co-ordination of nanometrology in Europe) documents.
6. NMI TR 12: Nanometrology: The Critical Role of Measurement in Supporting Australian Nanotechnology, Dr John Miles, First edition — November 2006.
7.http://www.lne.eu/en/r_and_d/nanometrology/nanometrology-nanomaterials.asp