بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده علوم

۹۲۱۴۷۱۷۳

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

گرایش حالت جامد تجربی

عنوان:

مطالعه‌ی نانوساختارهای یک بعدی ZnO تهیه شده به روش الکتروانباشت

استاد راهنما:

دکتر ایرج کاظمی نژاد

استاد مشاور:

دکتر منصور فربد

نگارنده:

مریم قدسی

مهر ماه ۱۳۹۲

تقدیم به

مقدسترین واژه ها در لغت نامه دلم،

مادر مهربانم

که زندگیم را مدیون مهر و عطوفت آن می دانم

پدر، مهربانی مشفق، بردبار و حامی

برادرانم همراهان همیشگی و پشتوانه های زندگیم

و

همسرم

که نشانه لطف الهی در زندگی من است

سپاس بر یکتای بی همتا

سپاس بر او که نگین کوثر مادرم و اسطوره‌ی بزرگی پدرم را بر من تقدیم کرد تا همیشه با نگاه کردن بر چشمان پر فروغ آن‌ها باز یادآور این نکته بر من باشند که زندگی در جریان است...

کاش می‌شد اما...

عمر ما آنقدر طولانی نیست که مسیر زندگی را یک بار برای کسب تجربه بپیماییم و بار دیگر برای به کار بردن تجربه ها در زندگی. یا باید دل به دریا زده و با هراس قدم در جاده ی زندگی بگذاری و یا ابتدا خود را به چراغ روشن آگاهی مجهز نمایی و سپس با ایمان و اطمینان پا در راه بگذاری.

تشکر و سپاس از استاد راهنمای ارجمند و پر مایه ام **جناب آقای دکتر ایرج کاظمی‌نژاد** که از محضر پر فیض تدریسشان، بهره ها برده‌ام .

با امتنان بیکران از مساعدت های بی شائبه ی **جناب آقای دکتر منصور فربد** که زحمت مشاوره‌ی این رساله را متقبل شدند.

با تشکر فراوان از خانواده‌ی عزیزم به‌ویژه پدر و مادر مهربانم که تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور آنهاست.

از همسر عزیزم که سایه مهربانیش سایه سار زندگیم است، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

با سپاس بی دریغ خدمت دوستان مهربانم خصوصاً خانم آذر سعداله‌خانی که مرا صمیمانه در این راه یاری داده‌اند.

همچنین از ستاد توسعه‌ی فناوری نانو به دلیل حمایت مالی این پروژه صمیمانه تشکر می‌کنم.

مریم قدسی

مهر ماه ۹۲

نام‌خانوادگی دانشجو: قدسی **نام:** مریم

عنوان پایان‌نامه: مطالعه‌ی نانوساختارهای یک بعدی ZnO تهیه شده به روش الکتروانباشت

استاد راهنما: دکتر ایرج کاظمی‌نژاد **استاد مشاور:** دکتر منصور فربد

درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** فیزیک **گرایش:** حالت جامد

محل تحصیل: دانشگاه شهید چمران **دانشکده:** علوم

تاریخ فارغ‌التحصیلی: مهر ماه ۱۳۹۲ **تعداد صفحات:** ۱۲۳

کلید واژه‌ها: الکتروانباشت، اکسید روی، نانومیله، فوتولومینسانس.

Electrodeposition, Zinc oxide, Nanorod, Photoluminescence.

چکیده:

الکتروانباشت از روش‌های مناسب و مقرون به‌صرفه برای تولید نانوساختارهای مختلف می‌باشد که در آن با استفاده از پارامترهای رشد، ابعاد نانوساختارها به آسانی قابل کنترل است. در این تحقیق از روش الکتروانباشت برای تولید نانومیله‌های اکسید روی استفاده شد. این بررسی در یک سلول الکتروشیمیایی حاوی محلول الکترولیت $ZnCl_2$ + KCl و سه الکترود شمارنده، مرجع و کار (زیرلایه FTO) که در یک حمام ترموستاتیک با قابلیت تنظیم دما قرار گرفته است، انجام شد. از جمله پارامترهای مؤثر در الکتروانباشت، ضخامت انباشت، ولتاژ، pH و دمای الکترولیت می‌باشند که در این تحقیق اثر این پارامترها مورد مطالعه قرار گرفت. شرایط بهینه برای رشد نانومیله‌هایی با قطر حدود ۱۸۰nm با ضخامت انباشت ۳۰۰nm، pH=۶٫۲، ولتاژ ۱V- و دمای الکترولیت $75\ ^{o}C$ تعیین گردید. سپس به بررسی اثر آب اکسیژنه با غلظت‌های مختلف بر رشد این نانومیله‌ها پرداخته شد. ساختار و ماهیت نمونه‌ها با استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD)، ریخت‌شناسی محصولات به‌وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و گاف اپتیکی و میزان نواقص موجود در آن‌ها با به‌کارگیری طیف‌سنجی فوتولومینسانس (PL) مورد ارزیابی قرار گرفت.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه‌ای بر نانوتکنولوژی ۲

۱-۲ تاریخچه و ویژگی‌های اکسید روی ٤

۱-۳ هدف از انجام این تحقیق ٦

فصل دوم: ویژگی‌ها و روش‌های ساخت نانوساختارهای اکسید روی

۲-۱ مقدمه ۹

۲-۲ دسته‌بندی نانوساختارها ۹

۲-۳ خواص نانوساختارها ۱۰

۲-٤ نانوساختارهای یک بعدی ۱۰

۲-۵ اکسید روی ۱۱

۲-٦ ساختار و پارامترهای شبکه ۱۲

۲-۷ ویژگی‌های گرمایی اکسید روی ۱۵

۲-۷-۱ ضرایب انبساط گرمایی ۱٦

۲-۸ خواص اپتیکی ۱۷

۲-۹ روش‌های مختلف ساخت نانوساختارهای یک بعدی اکسید روی ۱۸

۲-۹-۱ روش بالا-پایین ۱۸

۲-۹-۲ روش پایین-بالا ۱۹
۲-۹-۲-۱ روش سل-ژل ۱۹
۲-۹-۲-۲ هیدروترمال ۲۰
۲-۹-۲-۳ رسوب‌دهی شیمیایی بخار ۲۱
۲-۹-۲-٤ رسوب‌دهی فیزیکی بخار ۲۱
۲-۱۰ روش الکتروشیمیایی ۲۲
۲-۱۰-۱ مقایسه واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی ۲۲
۲-۱۰-۲ الکترواناباشت ۲۳
۲-۱۰-۳ انواع الکترودها ۲٤
۲-۱۰-٤ زیرلایه و خواص آن ۲۵
۲-۱۰-۵ الکترولیت ۲٦
۲-۱۰-٦ فرآیندهای انتقال جرم و مبادله‌ی الکترون ۲۷
۲-۱۰-۷ فصل مشترک الکترود-الکترولیت ۲۷
۲-۱۱ الکترواناباشت لایه ۲۹
۲-۱۲ فاکتورهای مؤثر بر الکترواناباشت ۳۰
۲-۱۳ برخی مزایا و معایب روش الکترواناباشت ۳۰
۲-۱٤ جمع‌بندی ۳۱

فصل سوم: الکترواناباشت نانوساختارهای یک بعدی اکسید روی

۳-۱ مقدمه ۳۳
۳-۲ تهیه‌ی الکترولیت ۳۳
۳-۳ آماده‌سازی الکترودها ۳۷

۳-۳-۱ آماده‌سازی زیرلایه‌ی FTO ۳۷
۳-٤ عملیات ماسک‌گذاری ۳۹
۳-٥ سلول الکتروشیمیایی ٤۰
۳-٦ الکتروانباشت نانوساختارهای ZnO ٤۱
۳-٦-۱ روش CHC ٤۲
۳-٦-۲ روش CHA ٤۲
۳-۷ مکانیسم الکتروانباشت اکسید روی ٤۳
۳-۸ آنالیزهای دستگاهی ٤٤
۳-۸-۱ دستگاه XRD ٤٤
۳-۸-۲ فوتولومینسانس (PL) ٤۷
۳-۸-۳ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ٥۰
۳-۹ جمع بندی ٥۳

فصل چهارم: خواص ساختاری و اپتیکی نانوساختارهای یک بعدی اکسید روی تهیه شده به روش الکتروانباشت

٤-۱ مقدمه ٥٥
٤-۲ بررسی شرایط بهینه‌ی رشد ٥٦
٤-۲-۱ بررسی اثر ضخامت انباشت ٥٦
٤-۲-۱-۱ نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس ٥۷
٤-۲-۱-۲ نتایج حاصل از طیف PL ٥۹
٤-۲-۱-۳ نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی ٦۰
٤-۲-۲ بررسی اثر pH الکترولیت ٦٦

٤-٢-٢-١ نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس ٦٨
٤-٢-٢-٢ نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی ٦٩
٤-٢-٣ بررسی اثر تغییر ولتاژ ٧١
٤-٢-٣-١ نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس ٧٣
٤-٢-٣-٢ نتایج حاصل از طیف PL ٧٣
٤-٢-٣-٣ نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی ٧٥
٤-٢-٤ بررسی اثر تغییر دمای الکترولیت ٧٩
٤-٢-٤-١ نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس ٨٠
٤-٢-٤-٢ نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی ٨١
٤-٣ بررسی اثر آب اکسیژنه ٨٥
٤-٣-١ بررسی غلظت آب اکسیژنه ٨٥
٤-٣-١-١ نتایج حاصل از پراش‌سنج پرتو ایکس ٨٧
٤-٣-١-٢ نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی ٨٩
٤-٣-٢ بررسی اثر غلظت آب اکسیژنه در یک زمان ثابت ٩٠
٤-٣-٢-١ نتایج حاصل از پراش‌سنج پرتو ایکس ٩١
٤-٣-٢-٢ نتایج حاصل از طیف PL ٩٣
٤-٣-٢-٣ نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی ٩٥
٤-٤ بحث و نتیجه‌گیری ٩٨
پیشنهادات ١٠٠
منابع و مراجع ١٠١
چکیده انگلیسی ١٠٧

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

فصل اول: کلیات

شکل (۱-۱): شاخه‌های متمایز نانوتکنولوژی ٤

شکل (۱-۲): الف) بلور زینکات نارنجی، ب) یک بلور اکسید روی مصنوعی ٥

فصل دوم: ویژگی‌ها و روش‌های ساخت نانوساختارهای اکسید روی

شکل (۲-۱): ساختارهای بلوری اکسید روی (الف) سنگ نمک (ب) بلند-روی (ج) ورتسایت هگزاگونال ۱۲

شکل(۲-۲): ساختار بلوری ZnO ورتسایت الف) در امتداد جهت <۰۰۰۱>، ب) صفحه‌ی $\{10\bar{1}0\}$ ۱۳

شکل(۲-۳): نمودار تغییرات ضریب انبساط گرمایی به صورت تابعی از دما ۱٦

شکل(۲-٤): مقایسه‌ی روش‌های بالا- پایین و پایین- بالا ۱۹

شکل(۲-٥): شمای یک الکترود جیوه ۲٥

شکل(۲-٦): لایه دوگانه هلمهولتز ۲۸

شکل(۲-۷): تغییرات پتانسیل نسبت به فاصله از سطح الکترود ۲۹

فصل سوم: الکتروانباشت نانوساختارهای **یک بعدی** اکسید روی

شکل(۳-۱): الکترولیت حاوی نمک‌های KCl و $ZnCl_2$ ۳٥

شکل(۳-۲): الگوی پراش پرتو ایکس زیرلایه‌ی FTO ۳۸

شکل(۳-۳): تصویر SEM زیرلایه‌ی FTO ۳۸

شکل(۳-٤): الف) زیرلایه ب) چسب ضد اسید پانچ‌شده ج) زیرلایه‌ی ماسک زده شده همراه با اتصال الکتریکی ۳۹
شکل(۳-۵): تصویر واقعی از زیرلایه‌ی FTO ماسک زده شده ٤۰
شکل(۳-٦): نمایی از سلول الکتروشیمیایی به‌کار رفته در این تحقیق، درون یک حمام ترموستاتیک ٤۱
شکل(۳-۷): سیستم الکترواناباشت به‌کار رفته در این تحقیق ٤۲
شکل(۳-۸): بازتاب براگ از صفحات شبکه با فاصله‌ی d از هم ٤۵
شکل(۳-۹): نمایی از دستگاه XRD مورد استفاده در این تحقیق ٤٦
شکل(۳-۱۰): الگوی استاندارد پراش پرتو ایکس اکسید روی ٤٦
شکل(۳-۱۱): نمای شماتیک فرآیند کلی PL ٤۸
شکل(۳-۱۲): اجزای اصلی دستگاه اسپکتروفوتومتر ٤۹
شکل(۳-۱۳): نمایی از دستگاه اسپکتروفلوریمتر استفاده شده در این تحقیق ۵۰
شکل(۳-۱٤): اجزای اصلی دستگاه SEM به صورت شماتیک ۵۱
شکل(۳-۱۵): اثرات ناشی از برخورد پرتو ایکس با نمونه ۵۲
شکل(۳-۱٦): نمایی از دستگاه SEM مورد استفاده در این تحقیق ۵۳

فصل چهارم: خواص ساختاری و اپتیکی نانوساختارهای یک بعدی اکسید روی تهیه شده به روش الکترواناباشت

شکل(٤-۱): الگوهای حاصل از پراش پرتو ایکس نمونه‌ها ۵۸
شکل(٤-۲): نتایج طیف PL برای نمونه‌های با ضخامت مختلف ۵۹
شکل(٤-۳): تصویر SEM نمونه‌ی D_1 ..... ٦۱
شکل(٤-٤): تصویر SEM نمونه‌ی D_2 ..... ٦۱
شکل(٤-۵): تصویر SEM نمونه‌ی D_3 ..... ٦۲
شکل(٤-٦): تصویر SEM نمونه‌ی D_4 ..... ٦۲

شکل(٤-٧): تصویر SEM نمونه‌ی $D_٥$ ٦٣
شکل(٤- ٨): تصویر SEM نمونه‌ی $D_٦$ ٦٣
شکل(٤-٩): تصویر SEM نمونه‌ی $D_٧$ ٦٤
شکل(٤-١٠): نمودار جریان-زمان نمونه‌های $D_١$، $D_٢$، $D_٣$ و $D_٤$ ٦٦
شکل(٤-١١): نمودار جریان-زمان نمونه‌ها با pHهای مختلف ٦٧
شکل(٤-١٢): الگوهای پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌های $pH_١$، $pH_٢$ و $pH_٣$ ٦٨
شکل(٤-١٣): تصویر SEM نمونه‌ی $pH_١$..... ٦٩
شکل(٤-١٤): تصویر SEM نمونه‌ی $pH_٢$..... ٧٠
شکل(٤-١٥): تصویر SEM نمونه‌ی $pH_٣$..... ٧٠
شکل(٤-١٦): تصویر SEM نمونه‌ی $pH_٤$..... ٧١
شکل(٤-١٧): نمودار جریان-زمان نمونه‌ها با ولتاژ مختلف ٧٢
شکل(٤-١٨): الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های تحت ولتاژهای مختلف ٧٣
شکل(٤-١٩): نتایج طیف PL برای نمونه‌های با ولتاژ مختلف ٧٤
شکل(٤-٢٠): تصویر SEM نمونه‌ی $V_١$ ٧٥
شکل(٤-٢١): تصویر SEM نمونه‌ی $V_٢$ ٧٦
شکل(٤-٢٢): تصویر SEM نمونه‌ی $V_٣$ ٧٦
شکل(٤-٢٣): تصویر SEM نمونه‌ی $V_٤$ ٧٧
شکل(٤-٢٤): تصویر SEM نمونه‌ی $V_٥$ ٧٧
شکل(٤-٢٥): تصویر SEM نمونه‌ی $V_٦$ ٧٨
شکل(٤-٢٦): تصویر SEM نمونه‌ی $V_٧$ ٧٨
شکل(٤-٢٧): نمودار جریان-زمان نمونه‌ها با دماهای مختلف ٨٠
شکل(٤-٢٨): الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌ها با دمای مختلف ٨١

شکل(٤-٢٩): تصویر SEM نمونه‌ی T_1 ..... ٨٢
شکل(٤-٣٠): تصویر SEM نمونه‌ی T_2 ..... ٨٢
شکل(٤-٣١): تصویرSEM نمونه‌ی T_3 ..... ٨٣
شکل(٤-٣٢): تصویر SEM نمونه‌ی T_4 ..... ٨٣
شکل(٤-٣٣): تصویر SEM نمونه‌ی T_5 ..... ٨٤
شکل(٤-٣٤): نمودار جریان-زمان نمونه‌ها در حضور آب اکسیژنه با غلظت‌های مختلف ٨٦
شکل(٤-٣٥): الگوهای پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌های C_1، C_2 و C_3 ..... ٨٧
شکل(٤-٣٦): تصویر SEM نمونه‌ی C_1 ..... ٨٨
شکل(٤-٣٧): تصویر SEM نمونه‌ی C_2 ..... ٨٩
شکل(٤-٣٨): تصویر SEM نمونه‌ی C_3 ..... ٨٩
شکل(٤-٣٩): تصویر SEM نمونه‌ی C_4 ..... ٩٠
شکل(٤-٤٠): نمودار جریان-زمان نمونه‌ها با غلظت‌های مختلف آب اکسیژنه در زمان ثابت ٩١
شکل(٤-٤١): الگوهای پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌ها با غلظت مختلف و زمان یکسان ٩٢
شکل(٤-٤٢): کارت استاندارد KCl ٩٣
شکل(٤-٤٣): کارت استاندارد $ZnCl_2$ ٩٣
شکل(٤-٤٤): نتایج طیف PL برای نمونه‌های با غلظت‌های مختلف آب اکسیژنه ٩٤
شکل(٤-٤٥): تصویرSEM نمونه‌ی C_{11} ٩٥
شکل(٤-٤٦): تصویرSEM نمونه‌ی C_{12} ٩٦
شکل(٤-٤٧): تصویرSEM نمونه‌ی C_{13} ٩٦
شکل(٤-٤٨): تصویرSEM نمونه‌ی C_{14} ٩٧

فهرست جداول

عنوان صفحه

فصل دوم: ویژگی‌ها و روش‌های ساخت نانوساختارهای اکسید روی

جدول(۲-۱): خواص فیزیکی ZnO توده ۱۵

فصل سوم: الکتروانباشت نانوساختارهای یک بعدی اکسید روی

جدول(۳-۱): مواد مورد نیاز جهت تهیه‌ی الکترولیت ۳٤

جدول(۳-۲): حجم مورد نیاز از آب‌اکسیژنه برای غلظت‌های مورد نظر ۳٦

فصل چهارم: خواص ساختاری و اپتیکی نانوساختارهای یک بعدی اکسید روی تهیه شده به روش الکتروانباشت

جدول(٤-۱): مشخصات ناحیه و عنصر انباشتی ٥٦

جدول(٤-۲): مقدار بار مورد نیاز برای انباشت در ضخامت‌های مختلف تحت پتانسیل ۱V- و دمای الکترولیت ۷٥°C .. ٥۷

جدول(٤-۳): گاف نواری نمونه‌های اکسید روی رشدیافته با ضخامت‌های مختلف ٦۰

جدول(٤-٤): اطلاعات مربوط به نمونه‌های تولید شده با ضخامت‌های مختلف ٦٥

جدول(٤-٥): pHهای مختلف برای نمونه‌های با ضخامت ۳۰۰nm ٦٦

جدول(٤-٦): اطلاعات مربوط به تغییرات ولتاژ برای نمونه ۳۰۰nm ۷۲

جدول(٤-۷): گاف نواری نمونه‌های با ولتاژ مختلف ۷٤

جدول(٤-٨): شکل هندسی و اندازه‌ی قطر نانومیله‌های رشدیافته با ولتاژ مختلف ٧٩

جدول(٤-٩): اطلاعات مربوط به بررسی تغییر دمای الکترولیت ٨٠

جدول(٤-١٠): شکل هندسی و اندازه‌ی قطر نانومیله‌های رشدیافته تحت دماهای مختلف ٨٥

جدول(٤-١١): جریان و زمان نمونه‌های رشدیافته با غلظت‌های مختلف آب اکسیژنه ٨٦

جدول(٤-١٢): اطلاعات مربوط به زمان و جریان انباشت نمونه‌ها با غلظت‌های مختلف آب اکسیژنه ٩٠

جدول(٤-١٣): گاف نواری نمونه‌های تهیه شده در حضور آب اکسیژنه ٩٤

فصل اول

کلیات

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه‌ای بر فناوری نانو

نقطه شروع و توسعه اولیه فناوری نانو به‌طور دقیق مشخص نیست. شاید بتوان شیشه‌گران قرون وسطی را اولین نانوتکنولوژیست‌ها نامید، که شیشه‌هایی حاوی فلزات نانومقیاس می‌ساختند. در آن زمان برای ساخت شیشه‌های کلیساهای قرون وسطایی از نانو ذرات فلزی استفاده می‌کردند و با این‌کار شیشه‌های رنگی بسیار جذابی به‌دست می‌آمد. رنگدانه‌های تزیینی جام مشهور لیکورگوس[1] در روم باستان نیز مثالی برای استفاده از نانو ذرات فلزی می‌باشد. این جام بسته به‌جهت نور تابیده به آن رنگ‌های متفاوتی دارد. نور انعکاس یافته از آن سبز است، ولی اگر نوری از درون آن بتابد، به‌رنگ قرمز دیده می‌شود. این جام از شیشه‌ی آهکی کربنات سدیم ساخته شده است و حاوی نانوذرات طلا و نقره می‌باشد که حضور این نانوبلورها باعث رنگ ویژه جام لیکورگوس شده است [۱].

[1] Lycurgus

درسال ۱۸۵۷ مایکل فارادی[1] مقاله‌ای منتشر کرد که چگـونگی تـأثیر ذرات فلـزی بـر رنـگ پنجره‌های کلیساها را توضیح داد. سپس گستاو مای[2] در سال ۱۹۰۸ مقالـه‌ای دربـاره‌ی وابسـتگی رنگ شیشه‌ها به اندازه و نوع ذرات فلزی منتشر نمود [۱].

ریچارد فاینمن[3]، دانشمند فیزیک نظری و دارنده جـایزه نوبـل، در کنفرانسـی تحـت عنـوان "فضای زیادی در پایین وجود دارد"[4] درسال ۱۹۵۹ به بحث در مورد قابلیت‌ها و امکان تولید مواد نانوساختار پرداخت [۲].

با این وجود، واژه فناوری نانو اولین بار توسط نوریوتاینگوچی[5] استاد دانشگاه علـوم توکیـو در سال ۱۹۷٤ بر زبان‌ها جاری شد. او این واژه را برای توصیف ساخت وسایل دقیقی که دامنه‌ی تغییرات ابعادی آنها در حد نانومتر می‌باشد، به کار برد [۳].

در سال ۱۹۸٦ این واژه توسط کی اریک درکسلر[6]، دانشجوی رشته کامپیوتر، در کتابی تحت عنوان "موتور آفرینش: آغاز دوران فناوری نانو" بازآفرینی و تعریف مجدد شد. وی این واژه را به شکل عمیق‌تری در رساله دکتری خود مورد بررسی قرار داده و بعدها آن را در کتابی تحت عنوان "نانوسیستم‌ها ماشین‌های مولکولی، چگونگی ساخت و محاسبات آنها" توسعه داد [٤].

سه جنبه‌ی متمایز فناوری نانو عبارتند از مفهوم مهندسی نانو، نانومواد و نانوابزارها و کوچک کردن تدریجی. این سه جنبه در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

[1] Michel Faraday
[2] Gustav Mie
[3] Richard Feynman
[4] There is plenty of room in the bottom
[5] Norio Taniguchi
[6] K. Eric Drexler