بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده علوم، گروه فیزیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد**(M.Sc)**

گرایش: حالت جامد

عنوان:

تأثیر ابعاد نانوذرات بر دمای ذوب آنها

استاد راهنما:

دکتر مجید واعظ زاده

استاد مشاور:

دکتر ناصر زارع دهنوی

پژوهشگر:

آرش محمدیان

تابستان ۱۳۹۱

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی مرا یاری می‌کنند و با زحمات آنهاست که به این مرحله رسیده‌ام.

سپاسگزاری

با سپاس از خداوند متعال که به من توانایی عطا فرمود تا به این مرحله نائل آیم.
از استاد گرامی جناب آقای دکتر مجید واعظ زاده که با وجود مسئولیت‌های متعدد، زحمت راهنمایی اینجانب را به عنوان استاد راهنما عهده‌دار شدند همچنین جناب آقای دکتر ناصر زارع دهنوی به عنوان استاد مشاور کمال تشکر و قدردانی را دارم.
در اینجا جا دارد از تمامی اساتید گذشته‌ام که در طول دوران تحصیل از ابتدا تا به حال مطالب بسیاری به من آموخته‌اند تشکر نمایم.
از تمامی کسانی که من را در انجام این پروژه یاری نمودند کمال تشکر را دارم، همچنین از جناب آقای دکتر محمدرضا سعیدی، جناب آقای دکتر علی محمدیان که در این پروژه من را یاری فرمودند تشکر می‌نمایم.

بسمه تعالی

تعهدنامه اصالت پایان‌نامه کارشناسی ارشد

اینجانب آرش محمدیان دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فیزیک با شماره دانشجویی ۸۸۰۸۳۸۲۷۲۰۰ اعلام می‌نمایم که کلیه مطالب مندرج در این پایان‌نامه

با عنوان: تاثیر ابعاد نانوذرات بر دمای ذوب آنها

حاصل کار پژوهشی خود بوده و چنانچه دستاوردهای پژوهشی دیگران را مورد استفاده قرار داده باشم، طبق ضوابط و رویه‌های جاری ،آن را ارجاع داده و در فهرست منابع و مآخذ ذکر نموده‌ام . علاوه بر آن تأکید می‌نمایم که این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح ، پایین‌تر یا بالاتر ارائه نشده وچنانچه در هر زمان خلاف آن ثابت شود، بدینوسیله متعهد می‌شوم ، در صورت ابطال مدرک تحصیلی ام توسط دانشگاه، بدون کوچکترین اعتراض آن را بپذیرم.

تاریخ و امضاء

بسمه تعالی

در تاریخ:

دانشجوی کارشناسی ارشد آقای/خانم از پایان‌نامه خود دفاع

نموده و با نمره بحروف و با درجه

مورد تصویب قرار گرفت.

امضاء استاد راهنما

بسمه تعالی

دانشکده علوم پایه

(این چکیده به منظور چاپ در پژوهش نامه دانشگاه تهیه شده است)

نام واحد دانشگاهی: تهران مرکزی کد واحد:۱۰۱	کد شناسایی پایان نامه:۱۰۱۳۰۲۱۱۸۹۲۰۰۸
عنوان پایان نامه: تأثیر ابعاد نانوذرات بر دمای ذوب آنها	
نام و نام خانوادگی دانشجو: آرش محمدیان شماره دانشجویی: ۸۸۰۶۵۱۱۳۸ رشته تحصیلی: فیزیک	تاریخ شروع پایان نامه: نیم سال دوم۹۰-۸۹ تاریخ اتمام پایان نامه:۹۱/۶/۲۶
استاد / استادان راهنما: دکتر مجید واعظ زاده استاد / استادان مشاور: دکتر ناصر زارع دهنوی	
آدرس و شماره تلفن: تهران، بزرگراه شهید چمران، خیابان ولنجک، خیابان ۲۶، خیابان البرز یکم، پلاک ۹، طبقه سوم شرقی شماره تماس ۲۲۴۰۵۷۵۲	

چکیده پایان نامه: یکی از فناوری‌های نوظهور توسعه یافته در چند دهه اخیر، نانوفناوری است. با کم کردن اندازه و ثابت نگه داشتن نوع ماده، ویژگی‌های اساسی از قبیل نقطه ذوب ، هدایت الکتریکی، رنگ و استحکام ماده تغییر می‌کند. خواص فوق موجب می‌شود که نانوذرات در کلیه صنایع مورد استفاده قرار گیرند. خواص نانوذرات علاوه بر نوع ماده به شکل و اندازه و در واقع به روش ساخت آنها بستگی دارد. یکی از مهمترین خواص ماده، دمای ذوب آن است که با تغییر ابعاد ذره در مقیاس نانو به شدت تغییر می‌کند. در این رساله، ما به بررسی وابستگی دمای ذوب نانوذرات به ابعاد آنها، بررسی مدل‌های ارائه شده دیگر، خواصی از نانوذرات که در فرآیند ذوب مؤثرند و ... پرداخته‌ایم و با ارائه مدلی بر مبنای مدل ترمودینامیکی برای پیش‌بینی دمای ذوب نانوذرات فلزی کروی و مقایسه داده‌های حاصل از مدل با داده‌های تجربی کفایت مدل را بررسی کرده‌ایم. شبیه‌سازی نظری نشان می‌دهد آثار حجمی در دمای ذوب اهمیت ویژه‌ای دارند که با لحاظ کردن آنها می‌توان دمای دقیقتری برای ذوب ذرات پیش‌بینی کرد، هرچند این آثار عامل شکل و نوع ماده را نیز در خود جای می‌دهد. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی کاملاً با داده‌های تجربی همخوانی دارند. در انتها با استفاده از نتایج این نظریه، علت تفاوت بین داده‌های تجربی بدست آمده توسط محققان مختلف برای ذرات گوناگون مثل ایندیوم شرح داده شده است، همچنین توسط این مدل می‌توان دمای ذوب کوچکترین ذره ذوب شونده ممکن که خروجی حاصل از برون‌یابی نتایج مدل است را بدست آورد. مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی‌های نظری توافق خوبی با نتایج تجربی دارد.

نظر استاد راهنما برای چاپ در پژوهش نامه تاریخ و امضاء:

فهرست مطالب

عنوان صفحه

چکیده..... ۱
فصل اول: نانوذرات و خواص آنها..... ۳
۱-۱ مقدمه..... ۳
۱-۱-۱ نانوذرات و خوشه‌ها..... ۳
۱-۱-۲ تأثیرات قیاس پذیر..... ۵
۱-۱-۳ تأثیرات کوانتومی..... ۵
2-1 تاریخچه نانوفناوری..... ۶
3-1 روشهای تولید نانوذرات..... ۹
۱-۳-۱ روشهای تولید از بالا به پایین..... ۱۰
۱-۳-۲ روشهای تولید از پایین به بالا..... ۱۱
۱-۳-۲-۱ فرآیند حالت بخار..... ۱۱
۱-۳-۲-۲ رسوب فیزیکی بخار(PVD)..... ۱۱
۱-۳-۲-۳ چگالش گاز خنثی..... ۱۲
۱-۳-۲-۴ پاشش حرارتی..... ۱۲
۱-۳-۲-۵ رسوب شیمیایی بخار(CVD)..... ۱۳
۱-۳-۲-۶ فرآیند حالت مایع..... ۱۳
۱-۳-۲-۷ کندگی لیزری..... ۱۵
۱-۳-۲-۸ ساخت نانوذرات با کاهش شیمیایی نمک های فلزی..... ۱۵
۱-۳-۲-۹ روش الکتروشیمیایی ساخت نانوذرات..... ۱۶
۱-۳-۲-۱۰ ساخت نانوذرات از طریق تجزیهٔ نمک‌های آلی فلزها ۱۷
۱-۳-۲-۱۱ تولید نانوذرات فلزی توسط ریزسازوارها..... ۱۸
۱ - ۴ تغییر خواص نانوذرات با ابعاد..... ۲۰
۱-۴-۱ خواص آگوستیک..... ۲۰
۱-۴-۱-۱ بستگی خواص آگوستیک به ابعاد..... ۲۱
۱-۴-۲ مدل لمب..... ۲۱

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل۲: نانوذرات و خاصیت کاهش دمای ذوب..... ۲۵
۲-۱ مقدمه‌ای بر فوق‌گرمایش و دمای ذوب نانوذرات..... ۲۵
۲-۲ کاهش دمای ذوب در نانوذرات و خوشه‌های اتمی..... ۲۸
۲-۳ ذوب سطحی در نانو ذرات..... ۳۰
۲-۴ بستگی دمای ذوب به اندازه نانوذرات(صدها سال از مدل ترمودینامیکی)..... ۳۴
۲-۴-۱ تاریخچه مختصری از مدل ترمودینامیکی..... ۳۴
۲-۴-۲ مدل ترمودینامیکی و فرضیات مختلف..... ۳۶
۲-۴-۳ ذوب نانوذرات غیر کروی ۴۰
۲-۴-۴ ذوب نانوذرات مقید..... ۴۳
۲-۴-۵ فوق‌گرمایش نانوذرات..... ۴۳
۲-۴-۶ ذوب شونده‌های جادویی..... ۴۵
۲-۵ خلاصه..... ۴۵

فصل۳: تأثیر ابعاد نانوذرات بر روی دمای ذوب آن..... ۴۷
۳-۱ مقدمه..... ۴۷
۳-۲ مدل های پیشین..... ۴۸
۳-۲-۱ محاسبات عددی مربوط به طیف فونون..... ۴۸
۳-۲-۲ معادلات گیبس تامسون..... ۵۴
۳-۲-۲-۱ مقدمه..... ۵۴
۳-۲-۲-۲ معادله گیبس تامسون برای ذرات..... ۵۵
۳-۲-۲-۳ گیبس تامسون برای مایعات در خلل و فرج..... ۵۵
۳-۲-۲-۴ مدل ساده‌سازی شده گیبس تامسون..... ۵۶
۳-۳ تأثیر ابعاد نانوذرات بر روی دمای ذوب آنها..... ۵۶
۳-۴ مدل..... ۵۸
۳-۴-۱ حدود مدل..... ۶۲
۳-۵ روش‌ها..... ۶۳
۳-۶ خلاصه..... ۶۵

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل۴: نتایج..... ۶۷
۴-۱ نتایج خروجی مدل..... ۶۷

۴-۱-۱ مفهوم α..... ۷۱
۴ -۲ چرا ذرات با شعاع های یکسان دمای ذوب متفاوت دارند؟..... ۷۳
۴ -۲-۱ توزیع گاوسی متقارن..... ۷۴
۴-۲-۲ توزیع گاوسی نامتقارن با مقدار بیشینه بیشتر از مقادیر چشمداشتی..... ۷۴
۴ -۲-۳ توزیع گاوسی نامتقارن با مقدار بیشینه کمتر از مقادیر چشمداشتی..... ۷۵
۴-۳ بررسی عددی تفاوت داده‌ها..... ۷۵
۴-۴ پیشبینی دمای ذوب برای کوچکترین ذره پیشبینی شده توسط مدل..... ۷۹

منابع..... ۸۱

فهرست جداول

فصل۱

جدول۱..... **۹**

فصل۴

جدول ۴-۱ ..... ۷۱

جدول ۴-۲..... ۷۶و۷۷

جدول ۴-۳ ..... ۷۷

جدول ۴-۴ ..... ۷۸

فهرست نمودارها

فصل۱

نمودار ۱-۱..... ۴

فصل۲

نمودار ۲-۱..... ۲۶
نمودار ۲-۲..... ۳۸
نمودار ۲-۳ ..... ۳۹
نمودار ۲-۴..... ۴۲
نمودار ۲-۵..... ۴۳

فصل۳

نمودار ۳-۱..... ۴۹
نمودار ۳-۲..... ۵۱
نمودار ۳-۳..... ۵۲
نمودار۳-۴..... ۵۳
نمودار۳-۵..... ۶۰

فصل۴

نمودار۴-۱..... ۶۷
نمودار۴-۲..... ۶۸
نمودار۴-۳. ..... ۶۸
نمودار۴-۴..... ۶۹
نمودار۴-۵..... ۶۹
نمودار۴-۶..... ۷۰
نمودار ۴-۷ ..... ۷۲
نمودار ۴-۸ ..... ۷۴
نمودار ۴-۹..... ۷۴
نمودار ۴-۱۰..... ۷۵
نمودار ۴-۱۱..... ۷۶
نمودار ۴-۱۲..... ۷۹

فهرست اشکال

فصل۱

شکل۱-۱.....۴
شکل۱-۲.....۶
شکل۱-۳.....۷
شکل۱-۴.....۱۰
شکل۱-۵.....۱۴
شکل۱-۶.....۱۶
شکل۱-۷.....۱۹

فصل۲

شکل۲-۱.....۳۱
شکل۲-۲.....۳۶

فصل۳

شکل۳-۱.....۵۹

فصل۴

شکل۴-۱.....۷۲

چکیده:

یکی از فناوری‌های نوظهور توسعه یافته در چند دهه اخیر، نانوفناوری است. پژوهش در مورد مواد نانوساختاری به سبب خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر بفرد آنها به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. با کم کردن اندازه و ثابت نگه داشتن نوع ماده، ویژگی‌های اساسی از قبیل نقطه ذوب ، هدایت الکتریکی، رنگ و استحکام ماده تغییر می‌کند. خواص فوق موجب می‌شود که نانوذرات در کلیه صنایع مورد استفاده قرار گیرند. خواص نانوذرات علاوه بر نوع ماده به شکل و اندازه و در واقع به روش ساخت آنها بستگی دارد. یکی از مهمترین خواص ماده، دمای ذوب آن است که با تغییر ابعاد ذره در مقیاس نانو به شدت تغییر می‌کند. تا کنون مدل‌های بسیاری نظیر مدل‌های ترمودینامیکی و یا مدل گیبس- تامسون برای توصیف این تغییرات ارائه شده که تعدادی از آنها بسیار پیچیده بوده و در برخی موارد در بازه‌های ابعادی خاصی، خطاهای بزرگی در پیش‌بینی دمای ذوب دارند.

در این رساله، ما به بررسی وابستگی دمای ذوب نانوذرات به ابعاد آنها، بررسی مدل‌های ارائه شده دیگر، خواصی از نانوذرات که در فرآیند ذوب مؤثرند و ... پرداخته‌ایم و با ارائه مدلی بر مبنای مدل ترمودینامیکی برای پیش‌بینی دمای ذوب نانوذرات فلزی کروی و مقایسه داده‌های حاصل از مدل با داده‌های تجربی کفایت مدل را بررسی کرده‌ایم. شبیه‌سازی نظری نشان می‌دهد آثار حجمی در دمای ذوب اهمیت ویژه‌ای دارند که با لحاظ کردن آنها می‌توان دمای دقیقتری برای ذوب ذرات پیش‌بینی کرد، هرچند این آثار عامل شکل و نوع ماده را نیز در خود جای می‌دهد. داده‌های حاصل از شبیه-سازی کاملاً با داده‌های تجربی همخوانی دارند. در انتها با استفاده از نتایج این نظریه، علت تفاوت بین داده‌های تجربی بدست آمده توسط محققان مختلف برای ذرات گوناگون مثل ایندیوم شرح داده شده است، همچنین توسط این مدل می‌توان دمای ذوب کوچکترین ذره ذوب شونده ممکن که خروجی حاصل از برون‌یابی نتایج مدل است را بدست آورد. مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی‌های نظری توافق خوبی با نتایج تجربی دارد.

فصل ۱

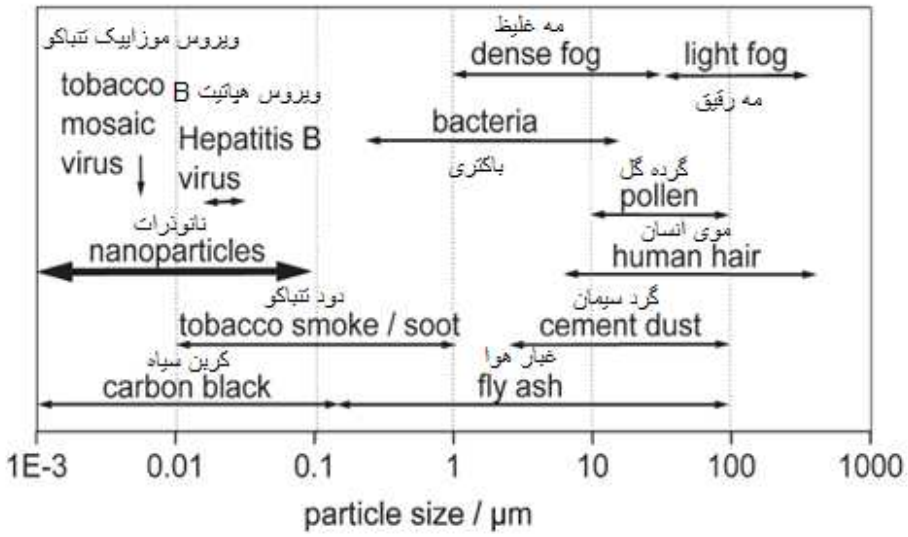
نانوذرات و خواص آنها

۱-۱ مقدمه

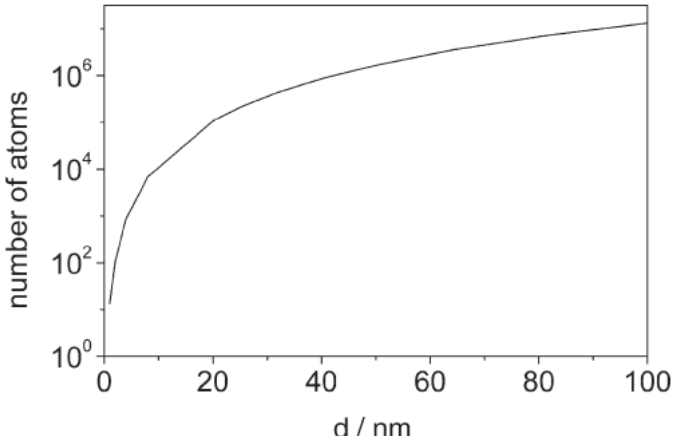
۱-۱-۱ نانوذرات و خوشه‌ها

ذرات با ابعاد بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر را معمولاً نانومواد می‌نامند. شکل شماره ۱-۱ ابعاد نانوذرات[۱] را در مقایسه با ذرات کوچک دیگر نشان می‌دهد. نانومواد ممکن است اشکال کروی، شبه‌صفحه‌ای، شبه‌میله‌ای یا هندسه‌های پیچیده‌تر داشته باشند. ذرات تقریباً کروی که کوچکتر از ۱۰ نانومتر هستند بطور کلی خوشه یا کلاستر[۲] نامیده می‌شوند. تعداد اتمها در یک خوشه با افزایش قطر خوشه به شدت افزایش می‌یابد، نمودار ۱-۱ این پدیده را برای خوشه‌های سدیم نشان می‌دهد. در قطر ۱ نانومتر ۱۳ اتم در یک خوشه جای دارند حال آنکه در قطر ۱۰۰ نانومتر، خوشه می‌تواند بیش از $۱۰^۷$ اتم را در خود جای دهد. خوشه ممکن است ساختاری متقارن که اغلب با تقارن توده ماده متفاوت است داشته باشد، همچنین ممکن است خوشه‌ها اشکالی غیرعادی یا بی‌نظم داشته باشند. در حین اینکه تعداد اتمها در خوشه افزایش می‌یابد، ابعادی بحرانی وجود دارد که در ابعاد بزرگتر از آن پیوندهای هندسی خاصی که از خاصیت توده جامد ناشی می‌شود از نظر انرژی ترجیح داده می‌شوند و بنابراین ساختار ماده به حالت توده جامد تغییر می‌یابد.

[۱]-Nanoparticles
[۲]-Cluster



شکل ۱-۱. ابعاد ذرات کوچک. سایزهای کوچکتر از ۰.۱ میکرومتر مشابه ابعاد نانو هستند.



نمودار۱-۱ . تعداد اتمهای سدیم در خوشه کروی با قطر d.

در ابعاد کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر، برخلاف گذشته که خواصی از قبیل دمای ذوب، رنگ (اندازه گاف انرژی و طول موج گذارهای اپتیکی)، پتانسیل یونیزه شدن، سختی، فعالیت شیمیایی (برای مثال تجزیه و گزینندگی)، یا خواص مغناطیسی مثل دافعه مغناطیسی، ترولیی یا اشباع مغناطیسی ثابت در نظر گرفته می‌شد، این خواص ثابت نبوده بلکه با ابعاد تغییر می‌کنند. ما بطور بنیادی دو نوع تأثیر را به عنوان تابع اندازه در نظر می‌گیریم:

۱-۱-۲ تأثیرات قیاس پذیر[۱]

اتمهای سطح با اتمهای توده ماده متفاوت هستند. در حین اینکه ابعاد ذره افزایش می‌یابد، نسبت سطح به حجم متناسب با عکس اندازه ذره کاهش می‌یابد. بنابراین تمامی خواص مربوط به نسبت سطح به حجم بطور پیوسته و تقریباً به آرامی به مقادیر خواص در توده جامد تبدیل می‌شوند.

۱-۱-۳ تأثیرات کوانتومی[۲]

هنگامی که یک تابع موج الکترونیکی مولکولی کاملاً بر روی تمامی ذره جایگزیده می‌شود، خوشه کوچک مولکول شکل سطوح انرژی مشخصی خواهد داشت، بنابراین می‌توان آن را یک مولکول در نظر گرفت(گاهی آن را فرا اتم می‌نامند). ساده‌ترین مدل برای درک این مطلب مدل ذره در جعبه است. اضافه کردن اتمهای بیشتر به خوشه اندازه جعبه را پیوسته تغییر می‌دهد بطوری که سطوح انرژی تا حدی به هم نزدیک می‌شوند. مهمتر از این، اضافه کردن تعداد بیشتری اتم به معنی اضافه کردن تعداد بیشتری از الکترون‌های والانس به سیستم است. بنابراین، هرگاه پوششی از ترازهای انرژی تبهگن چندگانه از الکترونها پر شود، الکترون بعدی باید در پوسته بعدی با انرژی بالاتر قرار داده شود. این وضعیت مشابه تکامل و تغییر خواص با افزایش عدد اتمی در جدول تناوبی است. پوسته‌های پرشده پیکربندی پایدار بخصوصی را نشان می‌دهند. با پیشرفتن در جدول تناوبی خواصی از قبیل پتانسیل یونیزه شدن و وابستگی الکترون به وضوح رفتار نامتناوب از خود نشان می‌دهند. برای خوشه‌هایی که دارای اتم‌هایی با همپوشانی اوربیتالی قوی هستند مثل فلزات و نیمرساناها وضعیت مشابه است.

تأثیرات کوانتومی بیشتر برای خوشه‌های کوچک با قطعیت بیان می‌شود و اغلب بر تغییرات اندک حاصل از تأثیرات قیاس‌پذیر غالبند. خوشه‌ها حد واسط جالبی بین تک اتمها و توده ماده هستند و بررسی آنها نتایج جالبی را آشکار می کند[۱].

---

[۱]-Scalable effects
[۲]-Quantum effects

۱-۲ تاریخچه نانوفناوری

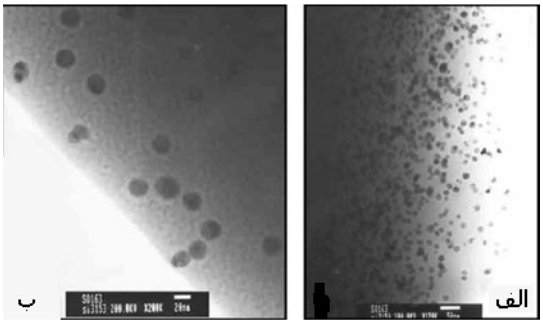
شاید بتوان دموکریتوس[۱]، فیلسوف شهیر یونانی، را که در حدود ۴۰۰ سال قبل از میلاد مسیح واژه اتم را (که به معنی تقسیم ناشدنی است) برای توصیف ذرات سازندهٔ مواد به کار برد پدرعلم نانو دانست. اما نخستین نانو فناوران، احتمالاً، شیشه‌گران رومی بوده‌اند که از قالب‌هایی حاوی نقره و طلا برای شکل دادن به شیشه‌ها استفاده کرده و ناآگاهانه در شیشه‌های ساخته شده، ذرات نانومتری این فلزات را تولید می‌کردند. یکی از قدیمی‌ترین نمونه‌های موجود از این شیشه‌ها، جام مشهور لیکرگوس[۲] (مربوط به قرن چهارم بعد از میلاد) می‌باشد که بسته به جهت نور تابیده به آن رنگهای متفاوتی دارد. نور انعکاس یافته از آن سبز است ولی اگر نوری از درون آن بتابد، جام به رنگ قرمز دیده می‌شود. مقادیر بسیار اندکی از بلورهای ۷۰۰ نانومتری فلزی نقره و طلا سبب رنگ ویژه این جام گشته است[۲].

شکل۱-۲. الف) جام لیکرگوس در روشنایی روز ب) همان جام که منبع نور درون آن قرار داده شده است.

ایرانیان هم در قرن‌های چهارم تا هفتم هجری از نانوذرات نقره و مس برای تزیین سفال‌های خود استفاده می‌کرده‌اند. سفال‌هایی در کاوشهای باستانی نیشابور، ری وکاشان یافت شده‌اند که رنگ لعاب آنها بدلیل حضور نانوذرات ۲۰ نانومتری نقره و مس می‌باشد [۳].

۱- Democritus

۲- Lycurgus



شکل۱-۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری الف) نانوذرات مس و ب) نانوذرات نقره حاضر در لعاب قرمز سفالهای ایرانی.

رنگهای جذاب پدید آمده در اثر حضور نانوذرات، توجه عدهٔ زیادی را به خود جلب نموده بود تا آنجا که فارادی[۱] در سال ۱۸۵۷ مقاله‌ای با عنوان : "ارتباط تجربی طلا و دیگر فلزات با نور" به چاپ رساند که هم اکنون نخستین مطالعهٔ علمی در مورد محلولهای تعلیقی به شمار می‌رود [۴]. درسال ۱۹۰۸، مای[۲] و دبای[۳] نخستین مدل بر همکنش خطی ذرات فلزی کوچک با میدان الکترومغناطیسی را بر حسب ویژگی‌های فلز ارائه دادند [۵]. در این مدل، جذب وپخش نور توسط ذرات کروی و کوچک فلزی بر پایهٔ حل معادلات ماکسول و با توجه به شرایط مرزی حاکم بر ذرات فلزی واقع در محیط دی الکتریک بیان می‌شود. با استفاده از این تئوری رنگ نانوذرات طلا و نقره توجیه می‌شود.

پس از دوره‌ای رکود، و در سال ۱۹۵۹، ریچارد فایمن[۴] مقاله‌ای دربارهٔ قابلیت‌های فناوری نانو در آینده به چاپ رساند. او که بعدها جایزهٔ نوبل را در فیزیک دریافت کرد در همان سال در مهمانی شام انجمن فیزیک آمریکا نیز سخنرانی ای با عنوان "فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد" ایراد کرد و ایدهٔ فناوری نانو را برای عموم مردم آشکار ساخت. به همین دلیل اکنون وی را به عنوان پایه گذار این علم می‌شناسند. سخنرانی او شامل این مطلب بود که می‌توان تمام دایره المعارف بریتانیکا[۵] را بر روی یک سنجاق نگارش کرد و ابعاد آن را تا ۲۵۰۰۰ برابر کاهش داد. او همچنین به امکان چیدن

۱- Michael Faraday
۲- Mie
۳- Debye
۴- Ricard Feynman
۵- Britannica