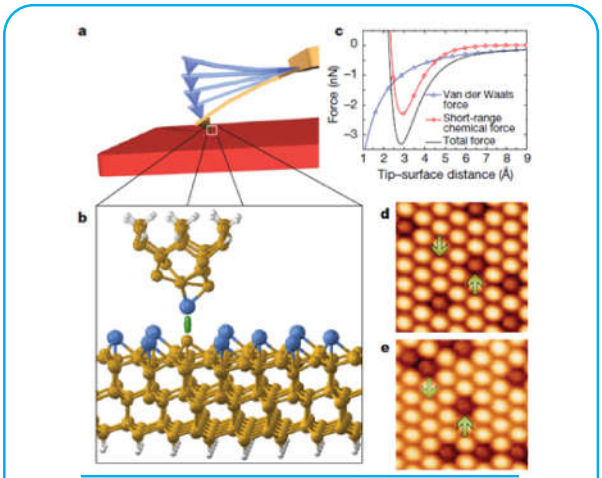
شناسایی شیمیایی اتم‌های سطحی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی

علی بیاتی / کارشناسی مهندسی مواد دانشگاه تهران

میکروسکوپ نیروی اتمی یکی از روش‌های میکروسکوپی روبشی به حساب می‌آید که در ابعاد نانو می‌تواند اطلاعات توپوگرافی (جلوه‌های سطح مواد) را در اختیار ما قرار دهد. در این مقاله به بررسی نحوه‌ی شناسایی اتم‌های سطح با استفاده از داده‌های توپوگرافی و تحلیل داده‌های آن پرداخته می‌شود.

روش میکروسکوپی روبشی یکی از روش‌های قدرتمند برای تصویربرداری و اندازه‌گیری پارامترهای مختلف سطح ماده در ابعاد اتمی می‌باشد. در دماهای پایین، این روش توانایی ایجاد طیف تونلی الکترون[1] را دارد که می‌توان با استفاده از این طیف، به شناسایی شیمیایی اتم‌ها پرداخت. اما در بسیاری از موارد و به خصوص در سیستم‌های عایق، بدست آوردن ترکیب شیمیایی دقیق سطح یا ساختارهای نانو یک چالش برای دانشمندان می‌باشد؛ قاعدتاً با استفاده از روش میکروسکوپی نیروی دینامیک[2] می‌توان به این مشکل غلبه کرد، زیرا این روش می‌تواند از نمونه‌های عایق، نیمه‌رسانا و فلزی با توجه به شناسایی و اندازه گیری نیروهایی که از پیوند شیمیایی بین اتم‌های نوک اهرم و اتم‌های سطح به وجود می آیند، تصویربرداری کند. در این مقاله به بررسی دقیق نیروهای شیمیایی و اندازه‌گیری آن‌ها پرداخته می‌شود. این عمل به ما اجازه خواهد داد که این گونه اندازه‌گیری‌های شیمیایی را به عنوان یک پایه و اساس برای شناسایی اتم‌ها حتی در دمای اتاق استفاده کنیم. همچنین در این مقاله عملکرد این روش را با استفاده از تصویربرداری سطحی از یک سیستم آلیاژی چالش‌برانگیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. این آلیاژ از اتم‌های عناصر سیلیسیم، قلع و سرب تشکیل شده است که خواص شیمیایی بسیار مشابه و همچنین چینش سطحی یکسانی دارند.

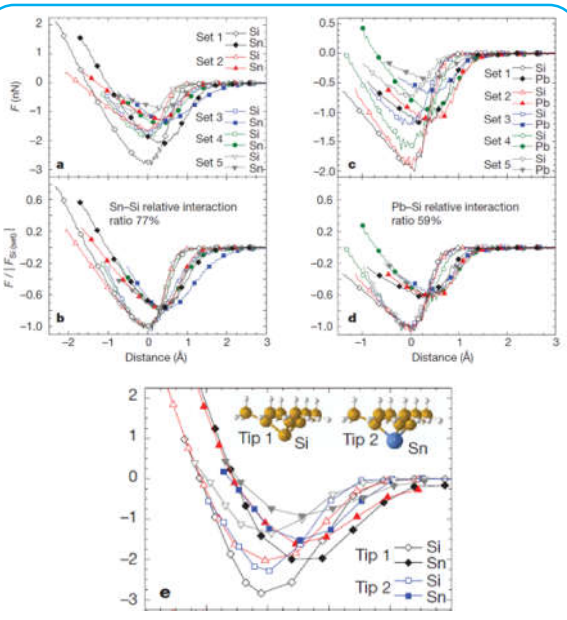
شناسایی شیمیایی تک‌اتم‌ها و مولکول‌ها از ابتدای اختراع میکروسکوپ نیروی اتمی به عنوان هدفی مهم دنبال شده است. در شکل زیر نحوه‌ی تشکیل پیوند شیمیایی بین اتم‌ها نشان داده شده است:



شکل ۱-شکل a به صورت شماتیک نحوه‌ی کارکرد این میکروسکوپ را نمایش می‌دهد. در قسمت b خط سبز رنگ بیانگر ایجاد پیوند شیمیایی بین دو اتم می‌باشد که نه تنها نیروهای کوتاه‌برد، بلکه دارای نیروهای دوربرد که از اندرکنش‌های واندروالسی ایجاد می‌شود، می‌باشد. منحنی c نشان دهنده‌ی نیروهای واندروالسی، اندرکنش‌های شیمیایی و همچنین مجموع نیروها است. تصاویر d و e نیز به ترتیب از نمونه‌های قلع و سرب گرفته شده است. ابعاد تصویر ۴/۳×۴/۳ نانومتر مربع می‌باشد.

منحنی a۲ پنج طیف نیروی دینامیک اندازه‌گیری شده بر روی یک زمینه‌ی Si را نشان می‌دهد که در نوک اهرم یک لایه‌ی اتمی Sn وجود دارد. با این وجود، این آزمایش با استفاده از اتم‌های مختلف بر روی نوک اهرم، چندین بار انجام شده است. این نوک‌ها ساختار و ترکیبات مختلفی دارند (قلع یا سیلیسیم) و بعضی از مواقع تماس بین این نوک و سطح نمونه تعمداً قبل از به دست آوردن منحنی نیرو انجام شده است. این منحنی‌ها بیانگر یک ویژگی مهم می‌باشند: منحنی بدست آمده توسط اتم‌های Si نیروی اندرکنش بیشتری دارد. همچنین یک مقایسه‌ی معنادار بین نیروهای کوتاه‌برد اندازه‌گیری شده نیازمند تحلیل داده‌ها می باشد تا متغیرهای به وجود آمده توسط نوک‌های مختلف کاهش پیدا کند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که نسبت اندرکنش‌ها (نسبت بیشترین نیروی جذب کوتاه‌برد دو منحنی در اندازه‌گیری‌های نمونه‌های سیلیسیم و قلع) تقریباً ثابت مانده است. نسبت اندرکنش در این زمینه ۰/۷۷ می‌باشد. این قضیه در منحنی b۲ نشان داده شده است. این روش بر روی دیگر عناصر مانند سرب یا ایندیم نیز جواب داده است. داده‌ها نشان می‌دهند که این نسبت اندرکنش برای سرب و سیلیسیم ۰/۵۹ می‌باشد. (منحنی c۲ و d۲) میانگین نسبت اندرکنش برای ایندیم و سیلیسیم نیز ۰/۷۲ است.

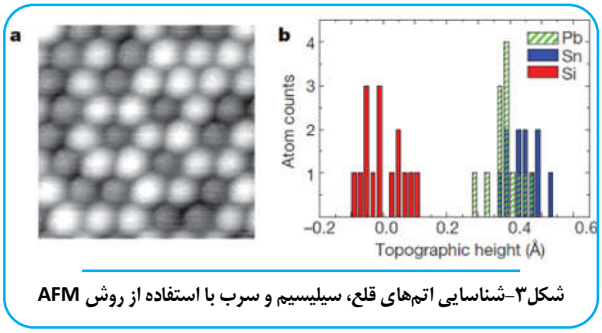
برای تایید مشاهدات تجربی، محاسبات در مقیاس بزرگ اتمی با استفاده از مدل‌های نوک-سطح انجام شده است. در این محاسبات، نوک همگنی که دارای ساختار مختلف برای روبش اتم‌های Sn و Si بر روی مدل دارای لایه ی سطحی Sn/Si، منحنی‌های نیروی کوتاه‌برد مختلفی را به وجود آورده است. (شکل e۲) اگر این نوک‌ها دارای ساختار یکسان اما با اتم متفاوتی در قسمت انتهایی باشد، نیروی کوتاه‌برد برای نوک قلع در برابر نوک سیلیسیم ضعیف‌تر بدست می‌آید. در تمامی این محاسبات، همانند آزمایش‌ها، اندرکنش نوک-سطح برای سطح Si قوی‌تر از Sn می‌باشد.



شکل۲-آزمایش‌ها و محاسبات نمونه‌های مختلف

1 Electron tunneling spectra
2 Dynamic force microscopy

طبـق آزمایشـات صـورت گرفتـه و مدل‌هـای بدسـت آمـده، می‌تـوان ایـن طـور نتیجـه گرفـت کـه اگرچـه شـکل منحنی‌هـای نیرو-جابجایـی بـه اندرکنـش الاسـتیک بسـتگی دارد امـا انـدازه‌ی حداکثـر نیـروی جذبـی کوتاه‌بـرد تنهـا بـا اسـتفاده از اندرکنش‌هـای شـیمیایی کوتاه‌بـرد مشـخص می‌شـود. بنابرایـن بـا اندازه‌گیـری نسـبت نیروهـای کوتاه‌بـرد حداکثـری امـکان شناسـایی اتم‌هـا در سیسـتم‌های چندعنصـری وجـود دارد. ایـن ظرفیـت از AFM در شـکل ۳ نشـان داده شـده اسـت، بـه طـوری کـه در یـک سیسـتم دارای سیلیسـیم، قلـع و سـرب، تک‌تـک اتم‌هـا بـه طـور مجـزا شناسـایی شـده‌اند. بـا اندازه‌گیـری نیـروی جذبـی کوتاه‌بـرد ایـن آلیـاژ، نیروهـا بـه سـه دسـته‌ی مجـزا تقسـیم می‌شـوند کـه هـر دسـته مربـوط بـه اتـم مرتبـط اسـت.



شکل۳-شناسایی اتم‌های قلع، سیلیسیم و سرب با استفاده از روش AFM

منبع

[1] Y. Sugimoto, P. Pou, 2007, 'Chemical identification of individual surface atoms by atomic force microscopy', Nature, vol 446