

میکروسکوپی نیروی کلوین در بررسی خواص نانومواد

نویسندگان:

سعیده تشریفی،

tasharofi@ripi.ir

صدیقه صادق حسینی^{۱،۲}

زهرا ثبات^۲

سیدعباس شاهرادی^{۲،۳}

۱. پژوهشگاه صنعت نفت - پژوهشکده

محیط زیست و بیو تکنولوژی

۲. پژوهشگاه صنعت نفت - پژوهشکده

کاتالیست و نانوفناوری

۳. شرکت آراپژوهش

۴. کارگروه تخصصی SPM - شبکه

آزمایشگاهی فناوری نانو

واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ پروبی نیروی کلوین،
نانومواد، میکروسکوپ پروبی روبشی،
پتانسیل سطحی و تابع کار، KPFM.

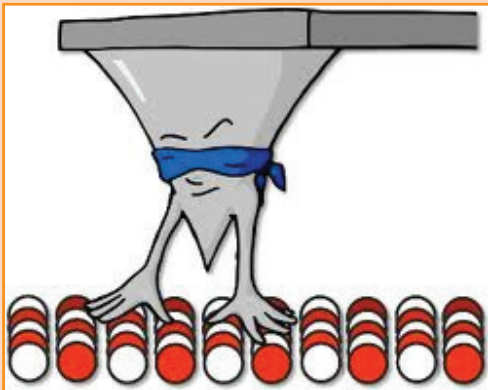
چکیده

میکروسکوپ نیروی کلوین شاخه‌ای از میکروسکوپ پروبی روبشی است که تصویربرداری پتانسیل سطحی محدوده وسیعی از مواد را در مقیاس نانومتر ممکن می‌کند.

در این روش، تفاوت پتانسیل تماسی موضعی بین سوزن هادی AFM و سطح نمونه اندازه‌گیری می‌شود. در این روش نقشه تابع کار یا پتانسیل سطح نمونه با توان تفکیک بالا ترسیم می‌شود. میکروسکوپ نیروی پروب کلوین یک روش منحصر به فرد برای تشخیص و شناسایی ویژگی‌های الکتریکی، فلزات و نیمه‌هادی‌ها می‌باشد. با این روش اطلاعات بسیار مهمی درباره توزیع پتانسیل سطحی بدست می‌آید که در توسعه عملکرد وسایل نوری و الکتریکی بسیار با اهمیت است.

مقدمه

روش میکروسکوپی پروبی نیروی کلونین^۱ KPFM ابزاری است که امکان تصویربرداری از پتانسیل سطحی طیف گسترده‌ای از مواد را در مقیاس نانومتر فراهم می‌کند. برای دستیابی به بهترین نتیجه در اندازه‌گیری‌های KPFM لازم است جزئیات دستگاه و فیزیک اندازه‌گیری این روش به خوبی درک شود. میکروسکوپ پروبی نیروی کلونین در سال ۱۹۹۱ توسط نان نماخر^۲ و همکارانش اختراع و به‌عنوان شاخه‌ای از میکروسکوپ نیروی اتمی^۳ که یکی از شناخته شده‌ترین روش‌ها در میکروسکوپ‌های پروبی روبشی است، بنا نهاده شد و به صورت یک روش منحصر به فرد برای تشخیص و شناسایی ویژگی‌های الکتریکی، الکترونیکی سطوح فلزی، نیمه‌هادی‌ها و ابزارهای نیمه‌هادی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. همچنین

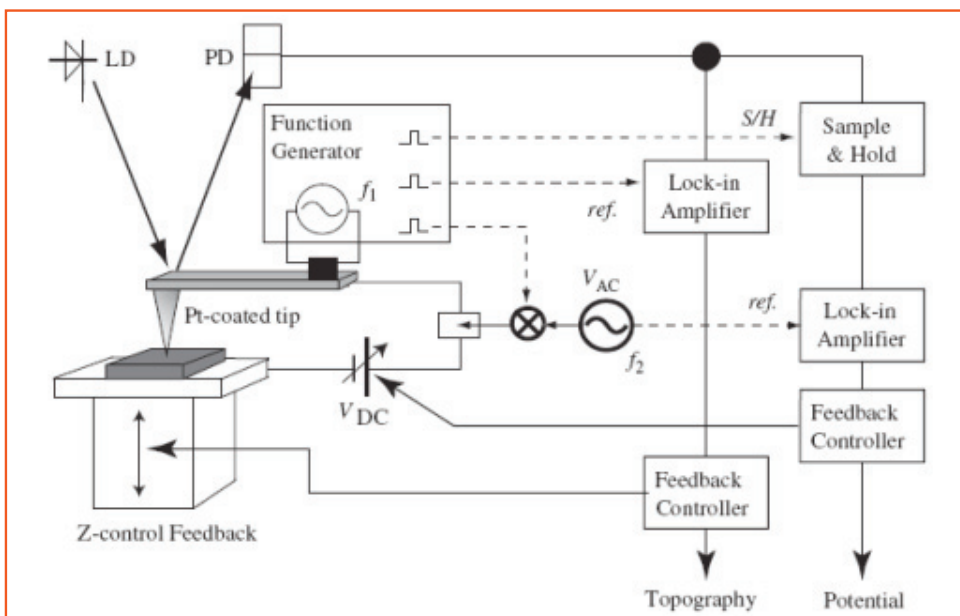


شکل ۱: شمای کلی احساس سطح نمونه به وسیله میکروسکوپ پروبی روبشی [۳]

اخیراً از این روش برای مطالعه خواص ابزارها، ترکیبات آلی و نیز ترکیبات بیولوژیکی استفاده شده است. میکروسکوپ پروبی نیروی کلونین، ابزاری است که به وسیله آن می‌توان اختلاف پتانسیل تماسی موضعی بین سوزن هادی میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و نمونه را اندازه‌گیری نموده و از این طریق نقشه تابع کار یا پتانسیل سطحی نمونه را با توان تفکیک بسیار بالا ترسیم نمود. در این روش، تابع کار در مواد هادی، عایق و نیز پتانسیل سطحی در مقیاس نانومتر مورد سنجش قرار می‌گیرد. در این میکروسکوپ، روش کلونین با اصول میکروسکوپ‌های پروبی روبشی^۴ تلفیق شده و در نهایت روش کار دستگاه بر مبنای تصویربرداری به وسیله روبش سطح و اندازه‌گیری پتانسیل آن بنا نهاده شده است. شکل ۱ شمای کلی از احساس سطح نمونه به وسیله میکروسکوپ پروبی روبشی را نشان می‌دهد [۲].

از میکروسکوپ پروبی نیروی کلونین می‌توان در کاربردهای متعددی نظیر موارد زیر بهره گرفت:

- بررسی خواص الکتریکی نانوساختارهای فلزی [۴-۶]،
 - تجزیه و تحلیل سطح نیمه‌هادی‌ها [۷-۱۷]،
 - تجزیه و تحلیل توزیع بار بر روی سطح مورد نظر [۱۸-۲۱]،
 - ارزیابی پتانسیل توزیع بار الکتریکی در ترانزیستورهای اثر میدان آلی^۵ (OFETs) [۲۲-۲۴]،
 - بررسی و تفسیر الکتروشیمیایی خوردگی سطوح [۲۵-۲۶]،
 - اندازه‌گیری پتانسیل سطح در غشاهای لیپیدی^۶ [۲۷]،
 - بررسی توزیع بار الکتریکی در نیمه‌هادی‌های بلوری [۲۸-۳۲].
- نمودار زیر شمای ساده‌ای از این دستگاه را ارائه می‌دهد.



شکل ۲: شمای کلی عملکرد میکروسکوپ پروبی نیروی کلونین [۳۲]

می‌آید. تابع کار، میزان کار مورد نیاز جهت انتقال الکترون‌های لایه ظرفیت یک اتم است.

به‌منظور درک بیشتر مطلب لازم است تا نکاتی در خصوص اربیتال‌های مولکولی و تراز فرمی عنوان شود. در تشکیل یک مولکول، الکترون‌های اتم‌های تشکیل‌دهنده آن در اربیتال‌های مولکولی قرار می‌گیرند. اربیتال مولکولی حاصل ادغام و یا تفاضل توابع موج دو یا چند اربیتال اتمی است. اربیتال‌های مولکولی را به دو نوع پیوندی و ضدپیوندی تقسیم‌بندی می‌کنند. اگر برهم‌کنش بین اربیتال‌های اتمی از نوع برهم‌کنش سازنده باشد، در این صورت توابع موج مربوط به اتم‌ها با یکدیگر جمع می‌شود و اربیتال مولکولی حاصل شده از نوع پیوندی است. اگر برهم‌کنش بین اربیتال‌های اتمی از نوع برهم‌کنش غیرسازنده یا مخرب باشد در این صورت تفاضل توابع موج مربوط به اتم‌ها از یکدیگر در نظر گرفته می‌شود و اربیتال مولکولی حاصل شده از نوع ضدپیوندی است. در شیمی بر حسب سطح انرژی اربیتال‌های مولکولی بالاترین اربیتال مولکولی دارای الکترون را HOMO^{۱۰} و پایین‌ترین اربیتال مولکولی فاقد الکترون را LUMO^{۱۱} می‌نامند. شکل ۴ شمایی از این اربیتال‌ها را به نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود در این شکل تراز فرمی حد واسط دو اربیتال مولکولی HOMO و LUMO قرار گرفته است [۳۵].

با توجه بیشتر به این شکل مشخص می‌شود که تابع کار، اختلاف بین انرژی سطح فرمی و بالاترین سطح ممکن در سیستم است. در صورتی که یک تماس خارجی بین دو فلز برقرار شود جریانی از الکترون‌ها از تراز فرمی مشابه بوجود می‌آید که این جریان الکترونی، اختلاف پتانسیل تماسی (CPD)^{۱۲} بین این دو سطح (وقتی که این دو سطح به یک میزان و در جهت خلاف یکدیگر باردار شوند) را ایجاد می‌نماید. در صورت اعمال ولتاژ بایاس^{۱۳} به این صفحات، این جریان الکترونی متوقف شده و اختلاف پتانسیل تماسی حذف می‌شود. این ولتاژ اضافی معادل میزان تابع کار (در فلزات) و یا پتانسیل نمونه (در نیمه هادی‌ها) است [۳۵].

بر این اساس اختلاف پتانسیل تماسی (V_{CPD}) بین سوزن هادی AFM و نمونه که در روش KPFM اندازه‌گیری می‌شود، به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$V_{CPD} = \frac{\Phi_{tip} - \Phi_{sample}}{-e}$$

که در آن Φ_{tip} و Φ_{sample} به ترتیب توابع کار نمونه و سوزن بوده و e بار الکتریکی است. هنگامی که سوزن به نزدیکی سطح نمونه آورده می‌شود، همان طور که گفته شد، بدلیل اختلاف بین سطوح انرژی فرمی این دو، بین سوزن و سطح نمونه نیروی الکتریکی بوجود می‌آید.

شکل ۵ دیگرام سطح انرژی سوزن و سطح نمونه را هنگامی که Φ_{tip} و Φ_{sample} متفاوت هستند، در سه حالت نشان می‌دهد. شکل ۵-a سطوح انرژی سوزن و سطح نمونه را هنگامی که با فاصله d از هم جدا هستند و به‌صورت الکتریکی به یکدیگر متصل

تاریخچه

عملکرد میکروسکوپ پروبی نیروی کلون، براساس تلفیقی از دو روش میکروسکوپی نیروی اتمی و کلون ماکروسکوپی است. بدین مفهوم که در این دستگاه اصول روش کلون در مقیاس نانو استفاده شده که با عملکرد AFM همخوانی دارد. به منظور تفهیم بیشتر اصول کارکرد میکروسکوپ پروبی نیروی کلون در ابتدا به نحوه عملکرد AFM اشاره شده و سپس به روش کلون پرداخته می‌شود [۲] و [۳۳].

میکروسکوپ نیروی اتمی

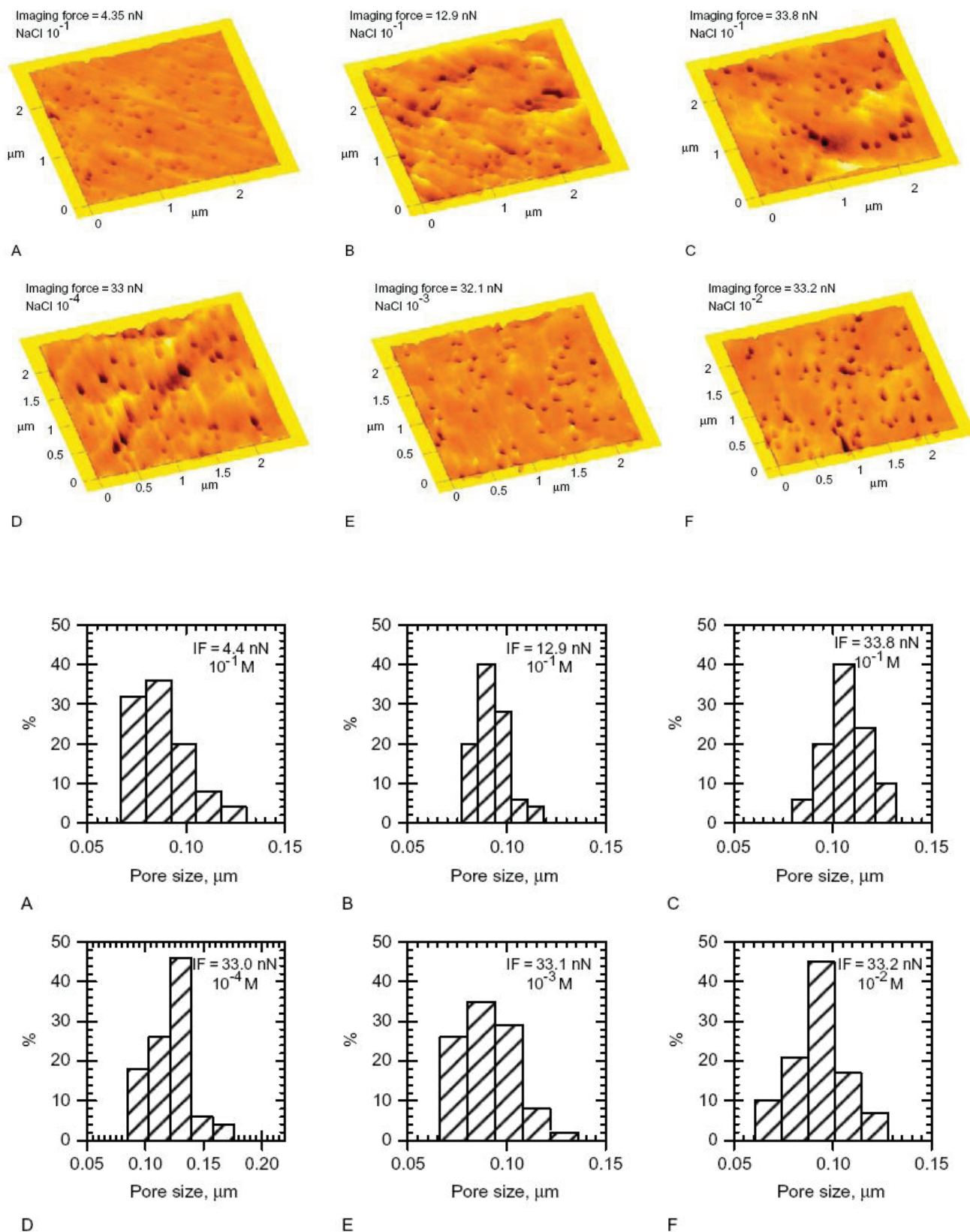
چنانچه عنوان شد، میکروسکوپ پروبی نیروی کلون بر اساس عملکرد میکروسکوپ نیروی اتمی بنا نهاده شده است. در حقیقت، با گزینش اطلاعات پتانسیل سطح یا تابع کار در نمونه، میکروسکوپ پروبی نیروی کلون اطلاعات توپولوژی میکروسکوپ نیروی اتمی را جمع‌آوری می‌نماید. در میکروسکوپ نیروی اتمی، با روبش سطح نمونه به‌وسیله سوزن میکروسکوپ، کوچکترین پستی و بلندی سطح نمونه ثبت می‌شود. بسته به طبیعت برهم‌کنش‌های موضعی، تصویری سه‌بعدی از خاصیت مورد نظر (ساختار الکترونیکی، ساختار مغناطیسی و غیره) بدست می‌آید [۳۳].

روش AFM در حالت‌های تماسی^۷، ضربه‌ای^۸ و غیرتماسی^۹ عمل می‌کند. در حالت تماسی، نیروی دافعه میان سوزن-نمونه، سوزن تیرک را منحرف می‌کند. انحراف تیرک پایش شده و به‌عنوان سیگنال بازخورد استفاده می‌شود. در حالت ضربه‌ای و غیرتماسی، تیرک با فرکانس تشدید و یا فرکانسی نزدیک به فرکانس تشدید نوسان داده می‌شود. برهم‌کنش سوزن - نمونه با تغییر فاصله بین سوزن و نمونه تغییر می‌یابد و این امر سبب می‌شود که دامنه نوسان و فرکانس تشدید تغییر یابد. تغییراتی که در دامنه و فرکانس روی می‌دهد با توجه به منبع تغییرات دامنه و فرکانس، به‌عنوان سیگنال‌های بازخورد برای بدست آوردن توپوگرافی سطح نمونه استفاده می‌شود [۳۳].

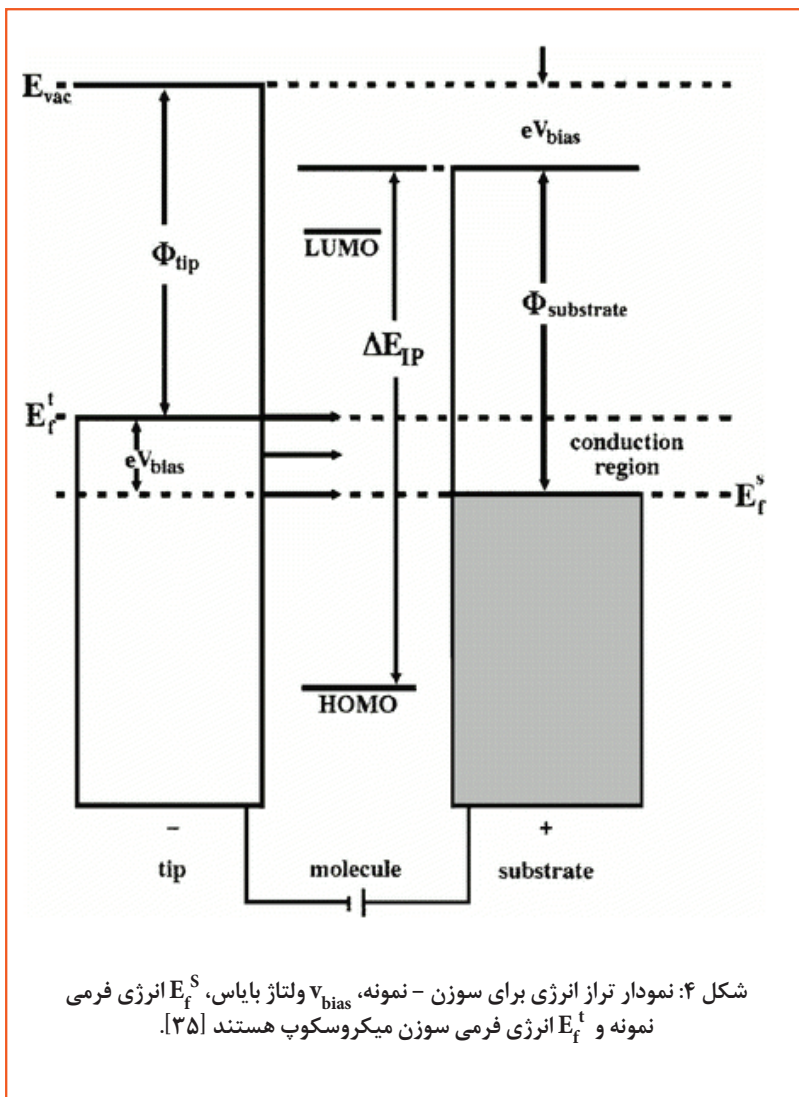
اطلاعات خام AFM نیازمند تجزیه و تحلیل بوده و بدون تفسیر فاقد ارزش هستند لذا دستگاه‌های نوین AFM با استفاده از نرم افزارهای مناسب این اطلاعات را که حاوی نقاط فراوانی در دستگاه‌های مختصات کارترین هستند به تصاویر سه بعدی (شکل ۳) تبدیل می‌نمایند که در این حالت مورد استفاده محققین قرار می‌گیرد [۳۳].

اصول روش کلون

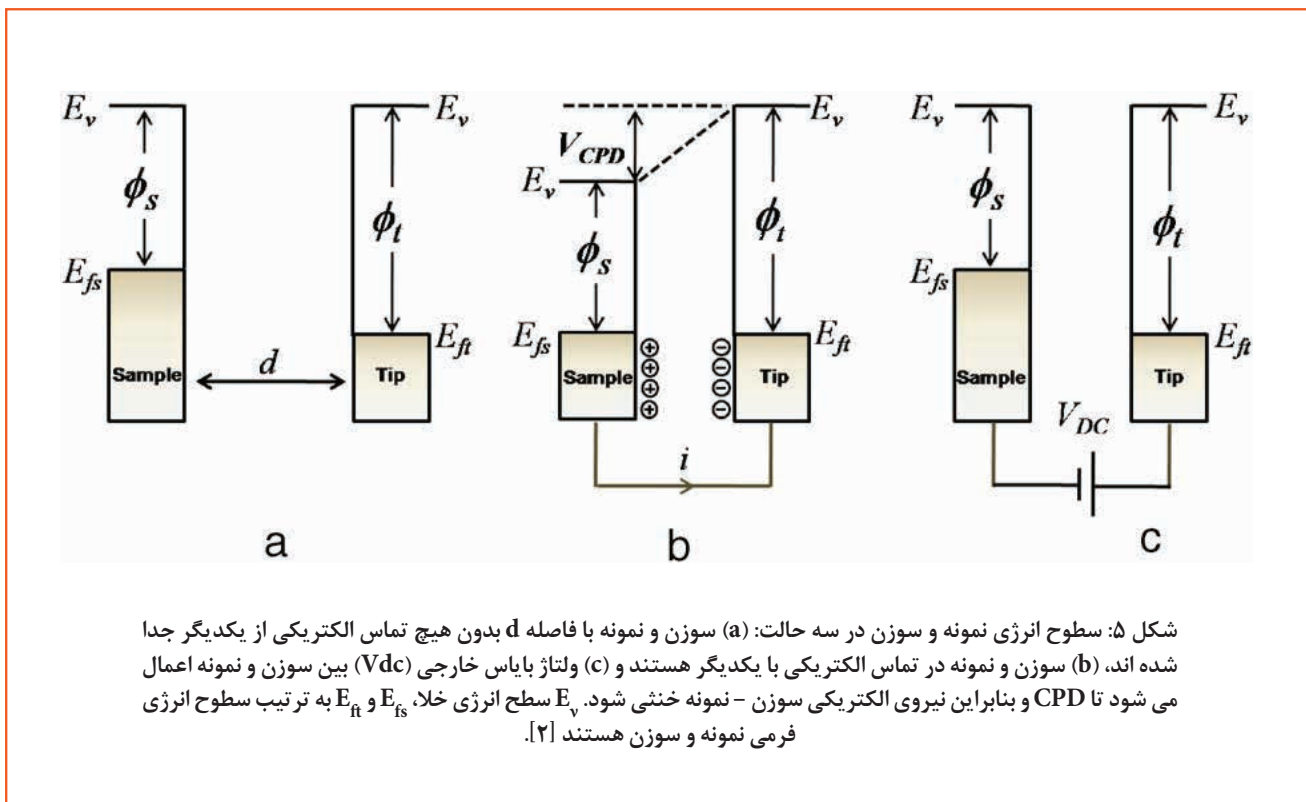
این روش حدود صد سال پیش توسط لرد کلون ارائه شد [۳۴ و ۱] که در این روش میزان تابع کار در فلزات و پتانسیل سطح در غیر فلزات با دقتی حدود ۰/۰۰۰۱ ولت اندازه‌گیری می‌شود. تابع کار در دو سطح اتمی و مولکولی مشاهده شده و بدین ترتیب نقشه تابع کار که شامل اطلاعاتی درباره ترکیب و حالات الکتریکی ساختارهای موضعی روی سطوح جامد است، بدست



شکل ۳: تصاویر AFM تهیه شده از یک غشا با منافذ کروی در محلول‌های الکترولیت. اشکال (a) تا (c) مربوط به محلول یک دهم مولار NaCl است و اشکال (d) تا (f) در مولاریته‌های مختلفی که در تصاویر آمده، گرفته شده است. تمامی اشکال در $\text{pH} = 6.5$ گرفته شده است. (IF=Imaging Factor) [۳۳]



نیستند را نشان می‌دهد (توجه داشته باشید که سطوح خلاء هم تراز هستند ولی سطوح انرژی فرمی متفاوت هستند). چنانچه سوزن و سطح نمونه برای تونل‌زنی الکترونی به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک شوند، برای رسیدن به وضعیت تعادل لازم است سطوح فرمی در وضعیت پایداری قرار گیرند. با برقرار شدن تماس الکتریکی، سطوح فرمی از طریق جریان الکتریکی تراز می‌شوند و سامانه به وضعیت تعادلی (شکل ۵-b) می‌رسد. سوزن و سطح نمونه بردار شده و اختلاف پتانسیل V_{CPD} به صورت واضحی به وجود می‌آید (با توجه به این که سطوح انرژی فرمی تراز می‌شوند ولی سطوح انرژی خلاء دیگر همان سطوح انرژی نمی‌باشند، بدین ترتیب V_{CPD} بین سوزن و سطح نمونه شکل می‌گیرد). در ناحیه تماس بدلیل وجود V_{CPD} ، یک نیروی الکتریکی فعال می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵-c نشان داده شده است، چنانچه یک ولتاژ بایاس خارجی (V_{DC}) به همان بزرگی و در جهت مخالف V_{CPD} اعمال شود، این نیرو می‌تواند خنثی شود. ولتاژ اعمال شده بارهای سطحی را در ناحیه تماس حذف می‌کند. مقدار ولتاژ بایاس خارجی اعمال شده (V_{DC}) که می‌تواند نیروی الکتریکی ناشی از V_{CPD} را بی‌اثر کند، برابر اختلاف تابع کار بین سوزن و نمونه است، بنابراین هنگامی که تابع کار سوزن معلوم است، تابع کار نمونه می‌تواند محاسبه شود [۲].



VDC برای هر نقطه روی سطح نمونه بدست آمده و نقشه تابع کار یا پتانسیل سطحی را برای کل مساحت سطح نمونه بوجود می‌آورد [۳۶-۳۷].

اصول کار میکروسکوپ پروبی نیروی کلونین و حالت‌های مختلف آن

چنانچه قبلاً نیز عنوان شد، اساس کار میکروسکوپ نیروی اتمی با روش کلونین تلفیق شده و منجر به ایجاد روش میکروسکوپ نیروی کلونین گردید.

میکروسکوپ نیروی اتمی طراحی شده و مورد استفاده قرار گرفت ولی به‌مرور ویژگی‌های دیگری مانند یک مولد سیگنال که سیگنال الکتریکی ولتاژ AC را به کار می‌گیرد، نیز بدان اضافه شد. این سیگنال معادل فرکانس تشدید پایه سوزن است. البته با این طراحی نمی‌توان پایه سوزن را به تشدید وادار نمود (مشابه آنچه که در ضربه‌زنی AFM روی می‌دهد). در واقع این اختلاف پتانسیل بین ولتاژ AC در پایه سوزن و ولتاژ DC در سطح (پتانسیل سطح یا تابع کار) است که موجب ارتعاش پایه سوزن می‌شود. ولتاژ بایاس AC با ایجاد اختلاف پتانسیل بین سوزن و نمونه موجب فرکانس تشدید پایه سوزن می‌شود. یک جریان خنثی در سیستم میکروسکوپ نیروی کلونین تنظیمات این ولتاژ AC را بعهده دارد تا اپراتور دستگاه متوجه این مهم گردد که ارتعاش سوزن ناشی از پتانسیل سطح است یا این که تابع کار در نمونه این ارتعاش را ایجاد نموده است. ولتاژ AC اعمال شده بر سوزن به‌عنوان تصویر ثبت و ضبط می‌شود. هر گونه انحراف در پایه سوزن تابعی از مجموع نیروهایی است که بین نمونه و سوزن دستگاه وجود دارد. رابطه بین این تراکنش‌های انرژی با معادله زیر بیان می‌شود:

$$E = \frac{1}{2} C [V_{ac} + V_{ac} \sin(\omega.t)]^2$$

$$= \frac{1}{2} C \left[2V_{dc} V_{ac} \sin(\omega.t) - \frac{1}{2} V_{ac}^2 \cos(2\omega.t) \right]$$

در معادله فوق، ارتباط بین انرژی و ولتاژ خازن بیان شده است که در آن C ظرفیت خازن، V ولتاژ AC یا DC و ω فرکانس تشدید است. در اغلب موارد به‌منظور بالا بردن حساسیت دستگاه، سیگنال AC را در حدود فرکانس تشدید ثانویه تنظیم می‌کنند [۳۶-۳۷ و ۳۳].

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، AFM می‌تواند علاوه بر حالت تماسی، در دو حالت ضربه‌ای و غیرتماسی نیز نیروهای اتمی را آشکار نماید. در KPFM نیروی الکترواستاتیک F_{ω} می‌تواند به‌وسیله این دو حالت آشکارسازی شود. حالت نوسانی در KPFM می‌تواند F_{ω} را مستقیماً از دامنه نوسان تیرک در ω که به‌وسیله V_{CPD} و V_{AC} القا می‌شود، اندازه‌گیری کند. برای این منظور، V_{DC} به سوزن اعمال می‌شود تا دامنه اندازه‌گیری شده را خنثی نموده و از این طریق V_{CPD} را اندازه‌گیری نماید. در حالت غیرتماسی روش KPFM، F_{ω} به‌وسیله جابه‌جایی فرکانس در ω آشکار می‌شود و V_{DC} به سوزن اعمال می‌شود تا جابه‌جایی فرکانس را خنثی کرده و بدین ترتیب V_{CPD} را اندازه‌گیری نماید [۳۸]. علاوه بر این، در روش KPFM می‌توان با استفاده از سوزن

با اعمال ولتاژ AC (V_{AC}) به همراه ولتاژ DC (V_{DC}) به سوزن، تابع کار نمونه می‌تواند به‌وسیله روش KPFM اندازه‌گیری شود. V_{AC} نیروهای نوسانی الکتریکی بین سوزن و سطح نمونه را بوجود می‌آورد و V_{DC} نیروهای الکتریکی نوسانی که از CPD بین سوزن و سطح نمونه سرچشمه می‌گیرد را حذف می‌کند. نیروی الکترواستاتیک (F_{es}) بین سوزن و نمونه از رابطه زیر بدست می‌آید [۳۶]:

$$F_{es}(z) = \frac{1}{2} \Delta V^2 \frac{dC(z)}{dz} \quad (1)$$

که در آن z جهت نرمال سطح نمونه، ΔV اختلاف پتانسیل بین V_{CPD} و ولتاژ اعمال شده به سوزن و dC/dz گرادیان ظرفیت بین سوزن و سطح نمونه است. هنگامی که ولتاژ $V_{AC} \sin(\omega t) + V_{DC}$ به سوزن اعمال می‌شود، اختلاف ولتاژ ΔV به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta V = V_{tip} - V_{CPD} = (V_{DC} \pm V_{CPD}) + V_{AC} \sin(\omega t) \quad (2)$$

توجه داشته باشید که علامت \pm بستگی دارد به این که آیا ولتاژ بایاس (V_{DC}) اعمال شده به نمونه (+) یا (-) است. با ادغام دو معادله بالا، عبارت زیر برای نیروی الکترواستاتیکی که به سوزن وارد می‌شود، بدست می‌آید:

$$F_{es}(z, t) = -\frac{1}{2} \frac{\partial C(z)}{\partial z} [(V_{DC} \pm V_{CPD}) + V_{ac} \sin(\omega t)]^2$$

این معادله می‌تواند به سه جزء تقسیم شود :

$$F_{DC} = -\frac{\partial C(z)}{\partial z} \left[\frac{1}{2} (V_{DC} \pm V_{CPD})^2 \right] \quad (4)$$

$$F_{\omega} = -\frac{\partial C(z)}{\partial z} (V_{DC} \pm V_{CPD}) V_{AC} \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$F_{2\omega} = \frac{\partial C(z)}{\partial z} \frac{1}{4} V_{AC}^2 [\cos(2\omega t) - 1] \quad (6)$$

در عبارت نخست، F_{DC} نتیجه انحراف ثابت سوزن است. در عبارت دوم F_{ω} با فرکانس ω برای اندازه‌گیری V_{CPD} استفاده می‌شود و در عبارت سوم، $F_{2\omega}$ می‌تواند در روش میکروسکوپی ظرفیت استفاده شود [۳۷]. هنگامی که نیروهای الکترواستاتیک از طریق V_{AC} و V_{DC} به سوزن اعمال می‌شود، (به دلیل نیروی الکتریکی) مؤلفه‌های نوسانی اضافی به نوسان مکانیکی سوزن اضافه می‌شود. از یک تقویت‌کننده قفل‌شونده برای اندازه‌گیری V_{CPD} استفاده می‌شود تا مؤلفه نیروی الکتریکی با فرکانس ω (F_{ω})، تابع V_{AC} و V_{CPD} بدست آیند. سیگنال خروجی تقویت‌کننده قفل‌شونده با اختلاف بین V_{DC} و V_{CPD} مستقیماً متناسب است. چنانچه سیگنال خروجی تقویت‌کننده قفل‌شونده خنثی شده و F_{ω} برابر صفر شود، مقدار V_{CPD} می‌تواند به‌وسیله اعمال ولتاژ V_{DC} به سوزن اندازه‌گیری شود. در نتیجه مقدار

گرادیان نیروی الکترواستاتیک با جابجائی فرکانس تیرک تشخیص داده می شود. به هر حال محدوده تشخیص گرادیان نیرو کوچکتر از خود نیرو است [۳۹].

آشکارسازی نیروی الکترواستاتیک به عنوان آشکارسازی دوربرد در نظر گرفته می شود، در حالی که آشکارسازی گرادیان نیروی الکترواستاتیک کوتاه برد است. در روش KPFM برهم کنش الکترواستاتیکی (ناشی از نوسان دامنه)، اساساً بین نوک سوزن و سطح نمونه روی می دهد و از این رو در این حالت، توان تفکیکی فضایی تقریباً معادل ابعاد نوک سوزن است. اما در حالت نوسان فرکانس، برهم کنش الکترواستاتیک سوزن و تیرک با نمونه از رویه آشکارسازی دوربرد تبعیت می نماید و توان تفکیک فضایی بر اثر تأثیر متقابل متوسط سوزن و تیرک کاهش می یابد [۳۶-۳۹].

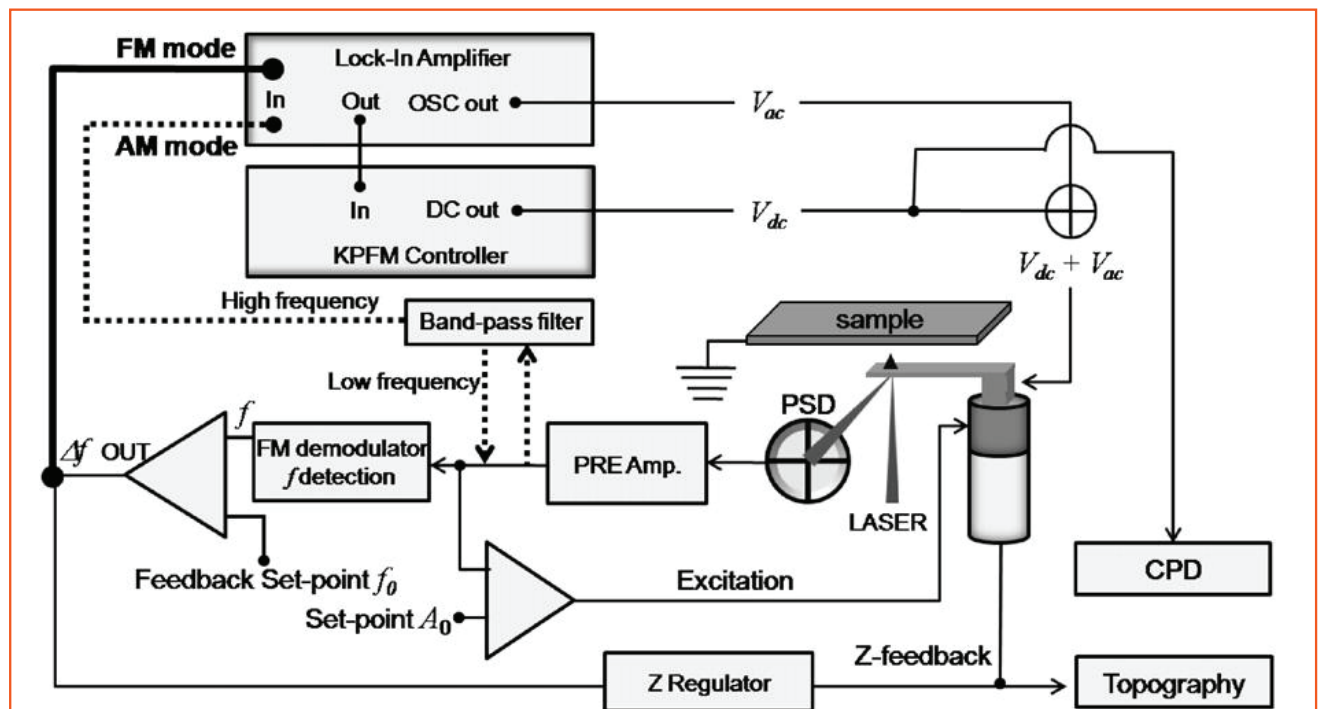
به هر حال، با اندازه گیری پتانسیل سطحی در این روش می توان اطلاعات زیر را از این دستگاه بدست آورد:

- ◆ پتانسیل سطحی موضعی به عنوان نتیجه تأثیر متقابل مولکول های دو قطبی (گروه هایی با سرهای قطبی)
- ◆ تفاوت ثابت های دی الکتریک
- ◆ میزان نازکی لایه های روکش دار شده
- ◆ نقشه خوردگی سطح فلزات
- ◆ اطلاع از تفاوت اختلاف پتانسیل سطحی در نیمه هادی ها، ترانزیستورها، LED و غیره
- ◆ آگاهی یافتن از نقشه پتانسیل سطح [۳۶ و ۳۹-۴۰]

شکل ۶ شمای دستگاه آزمایشگاهی KPFM را نشان می دهد. بخش پایینی سامانه حالت های نوسان در دامنه و فرکانس را برای اندازه گیری توپوگرافی نشان می دهد و بخش بالایی اجزای ترسیم نقشه CPD را که شامل کنترل کننده KPFM و

AFM توپوگرافی و V_{CPD} را به صورت همزمان اندازه گیری نمود. بنابراین لازم است از یک روش خاص برای جداسازی سیگنال مربوط به توپوگرافی از سیگنال مربوط به V_{CPD} اندازه گیری شده، استفاده شود. در دستگاه KPFM، معمولاً V_{AC} در فرکانسی بالاتر از پهنای باند سامانه بازخورد توپوگرافی تنظیم می شود تا از تداخل میان اندازه گیری توپوگرافی و CPD جلوگیری شود. در حالت ضربه ای روش KPFM، توپوگرافی به وسیله نوسان در نخستین فرکانس تشدید سوزن اندازه گیری می شود و V_{CPD} به وسیله دامنه نوسان در فرکانس تشدید دوم سوزن بدست می آید. تیرکی که به صورت مکانیکی ارتعاش می یابد، معمولاً دارای چندین پیک تشدید در طیف دامنه - فرکانس نوسان می باشد. معمولاً دومین پیک تشدید دارای پهنای بیشتری نسبت به پیک فرکانس تشدید اول است. دامنه پیک تشدید دوم معمولاً از یک سوم پیک فرکانس تشدید اول کمتر است و فرکانس پیک تشدید دوم معمولاً ۶ برابر فرکانس تشدید اول است. V_{AC} در فرکانس رزونانس دوم تنظیم می شود تا بتواند سوزن را با نیروی الکتریکی برانگیخته کند، در حالی که از فرکانس تشدید اول برای کنترل ارتفاع سوزن استفاده می شود. با استفاده از این روش ها، توپوگرافی و سیگنال V_{CPD} می توانند از یکدیگر جدا شوند. برعکس، در حالت غیرتماسی، سوزن به صورت مکانیکی در فرکانس تشدید اول برانگیخته می شود. V_{AC} باعث القا مدولاسیون نیروی الکترواستاتیک می شود که به وسیله افزوده شدن نوسان در تغییر فرکانس نوسان مکانیکی سوزن آشکار شده و باعث جدا شدن توپوگرافی و سیگنال V_{CPD} می شود [۳۸-۳۹].

توان تفکیک فضایی در اندازه گیری V_{CPD} در حالت نوسان فرکانس از حالت نوسان دامنه به مراتب بالاتر است. در روش KPFM نیروی الکترواستاتیک در حالت نوسان دامنه و به وسیله نوسان تیرک آشکار می شود در حالی که در نوسان فرکانس،



شکل ۶: شمای سامانه KPFM که حالت های نوسان در فرکانس و دامنه را نشان می دهد. بخش پایینی دیاگرام حالت غیرتماسی سامانه AFM برای تصویربرداری توپوگرافی است و بخش بالایی سامانه KPFM برای اندازه گیری CPD است [۴۰].

موضوعی انجام می‌شود. [۴۱]

◆ پوشش دادن تیرک‌های Si با لایه بسیار نازک Au یا Cr (معمولاً با ضخامت چند نانومتر) نیز موجب تهیه تصاویری با توان تفکیک بسیار بالایی در KPFM ایجاد می‌شود. سوزن‌های با پوشش Cr کمتر فعال بوده و بنابراین تابع کار سوزن در آنها پایدارتر است. البته باید توجه داشت برای دستیابی به توان تفکیک فضایی بهتر لازم است ضخامت لایه پوشش بهینه شود. [۱۰]

◆ تجزیه لایه‌های اکسیدی در سوزن با روش نشر میدانی تحت UHV نیز می‌تواند توان تفکیک زیرنانومتر را به‌وجود آورد. برای این منظور یک رشته سیم تنگستنی در نزدیکی تیرک قرار داده می‌شود و یک ولتاژ بالا بین سیم تنگستن و سوزن برقرار می‌شود. تونل‌زنی الکترونی از رشته تنگستن به سوزن باعث زدوده شدن اکسیدهای موضعی می‌شود [۱۱].

◆ ساده‌ترین روش برای آماده‌سازی سوزن سیلیسیمی رسانا، تماس ملایم انتهای سوزن با سطح نمونه برای زدودن اکسیدهای موضعی است [۴۲].

■ مقایسه روش KPFM با دیگر سامانه های اندازه گیری پتانسیل سطحی

پتانسیل سطحی یا تابع کار نمونه می‌تواند به‌وسیله روش‌های مختلف دیگری مانند روش پروبی کلونین (KP)^{۱۴}، طیف سنجی فتوالکترون (PES)^{۱۵} و میکروسکوپی روبشی الکترونی (SEM)^{۱۶} با جریان القایی پرتو الکترونی (EBIC)^{۱۷} مورد بررسی قرار گیرد. روش KP مشابه روش CPD، KPFM، CPD را میان پروب و سطح نمونه اندازه‌گیری می‌کند. اساس کار KP و KPFM مشابه هم است ولی KP یک روش میدانی است که در آن مقدار CPD برای کل نمونه اندازه‌گیری شده و نقشه CPD را برای سطح نمونه فراهم نمی‌کند. روش PES نیز انرژی الکترون‌های منتشر شده از سطح نمونه در اثر تحریک فتونی را اندازه‌گیری می‌کند. روش PES با تفکیک بالا و ارزیابی زاویه‌ای می‌تواند برای تعیین ساختار نوار الکترونی نمونه مورد استفاده قرار گیرد. روش SEM نیز می‌تواند ساختار الکترونی موضعی سطح نمونه‌های نیمه هادی را با استفاده از اندازه‌گیری EBIC مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد [۴۳].

در روش EBIC هنگامی که سطح نمونه نیمه‌هادی به‌وسیله الکترون‌های پر انرژی (معمولاً چند KeV) بمباران می‌شود، زوج‌های الکترون - حفره ایجاد می‌شود. الکترون‌ها و حفره‌های ایجاد شده می‌توانند آزادانه در نمونه حرکت کنند. در غیاب هرگونه میدان الکتریکی، این الکترون‌ها و حفره‌ها به‌صورت تصادفی حرکت کرده و اغلب به یکدیگر می‌پیوندند. هنگامی که یک میدان الکتریکی موضعی بر روی نمونه نیمه‌هادی برقرار می‌شود، این میدان الکتریکی محلی می‌تواند حفره‌ها و الکترون‌ها را از یکدیگر جدا کرده و می‌تواند از میان نمونه جریان پیدا کند. EBIC دارای ارتباط خطی با میدان الکتریکی محلی روی سطح نمونه است. با پایش سیگنال EBIC (به‌صورت تابعی از میدان الکتریکی

تقویت‌کننده قفل‌شونده است، نشان می‌دهد. خط نقطه چین و خط توپر در دیاگرام، نشان‌دهنده آرایش حالت‌های نوسان در دامنه وفرکانس در روش KPFM هستند. در این روش Vac از تقویت‌کننده قفل‌شونده به سوزن اعمال شده و خروجی سیگنال ولتاژ (خروجی OSC) را بازگشت می‌دهد. در حالت غیرتماسی، جابه‌جایی سیگنال فرکانس (Δf) به دو شاخه ارسال می‌شود: یکی به تنظیم‌کننده Z برای رسم توپوگرافی می‌رود و دیگری به تقویت‌کننده قفل‌شونده فرستاده شده که این تقویت‌کننده، سیگنال را با همان فرکانس Vac استخراج کرده و به کنترل‌کننده KPFM می‌فرستد. کنترل‌کننده، با اعمال Vdc به سوزن، این بازخورد را برای خنثی کردن سیگنال خروجی تقویت‌کننده قفل‌شونده نگه می‌دارد. در حالت نوسانی، Vac با همان فرکانس و به‌عنوان پیک تشدید دوم نوسان سوزن، به سوزن اعمال می‌شود تا سوزن را با نیروی الکتریکی برانگیخته کند. دامنه نوسان سوزن دارای دو مؤلفه است: فرکانس پایین (پیک تشدید اول) که به‌وسیله نوسان مکانیکی تنظیم می‌شود و فرکانس بالا (پیک تشدید دوم) که به‌وسیله Vac تنظیم می‌شود. فیلتر میانی سیگنال‌های با فرکانس بالا و پایین را از یکدیگر جدا می‌کند. سیگنال با فرکانس پایین برای تنظیم توپوگرافی استفاده می‌شود. فرکانس با تشدید بالا مستقیماً به تقویت‌کننده قفل‌شونده فرستاده می‌شود. کنترل‌کننده KPFM، با استفاده از مؤلفه فرکانس تشدید دوم، CPD را اندازه‌گیری می‌کند [۴۰].

■ پروب‌های مورد استفاده در روش KPFM و آماده‌سازی آنها

به منظور تهیه تصویری با توان تفکیک بسیار بالا، آماده‌سازی سوزن‌های رسانای AFM با نوک حساس در مقیاس اتم، نکته اساسی در تصویربرداری به روش KPFM محسوب می‌شود. روش‌های مختلفی برای آماده‌سازی این نوع سوزن‌ها وجود دارد که در زیر به برخی از آنها پرداخته می‌شود:

◆ رایج‌ترین روش، استفاده از تیرک سیلیسیمی آلابیده است که با استفاده از بمباران Ar^+ روی این تیرک عملیات حرارتی انجام شده و به‌دنبال آن لایه اکسید موضعی و دیگر ناخالصی‌ها از روی سطح سوزن زدوده می‌شود. این سوزن به‌طور معمول، تصویری با توان تفکیک بالا تولید می‌کند ولی این احتمال نیز وجود دارد که اتم‌های سطحی کنده شده و در نتیجه تابع کار سوزن تغییر یابد [۸-۹].

◆ برخی از سوزن‌های تجاری مانند سوزن تیرک‌های Si با پوشش Pt/Ir نیز می‌توانند تصاویر KPFM را با توان تفکیک زیرنانومتر فراهم آورند. سوزن‌های پوشش‌دار Pt/Ir به آماده‌سازی قابل توجهی نیاز ندارند ولی توان تفکیک فضایی پایین‌تری را فراهم می‌کنند. [۷]

◆ حکاکی مرطوب سوزن‌های Si با HF و بدنبال آن حرارت دادن سوزن در دمای بالا نیز روش موفقی برای دستیابی به تصاویر KPFM با توان تفکیک بسیار بالا است. این روش، جایگزین مناسبی برای بمباران یونی است که به منظور زدودن اکسیدهای

اندازه‌گیری پتانسیل سطحی یا ظرفیت سطح نمونه، نیازی به کالیبراسیون پروب ندارند [۴۶].

دوم، در مواردی که سطح نمونه نیمه‌هادی، به‌وسیله مواد جاذب پوشیده شده باشد، در این حالت روش KPFM تنها می‌تواند متوسط تغییرات پتانسیل سطحی را در مقیاس مولکولی اندازه‌گیری نماید و قادر به تشخیص میزان خمش سطحی جاذب و دو قطبی‌های سطحی که به‌وسیله جاذب بر روی سطح نیمه‌هادی بوجود آمده است نمی‌باشد.

روش‌های PES می‌توانند طیف کلی توزیع پتانسیل سطحی را تهیه نموده و امکان تعیین ساختار کامل نوار الکترونی سطح نمونه را فراهم نماید. با مقایسه ساختار نوار الکترونی سطح تمیز با سطح دارای جذب شده که به‌وسیله روش PES اندازه‌گیری شده‌اند، سهم خمیدگی نوار و دو قطبی سطحی می‌تواند به‌صورت مستقل تعیین شود [۴۶-۴۸].

سوم، تغییر ناگهانی در ارتفاع سطح نمونه و توپوگرافی می‌تواند

در طول روبش پرتو الکترونی در سطح نمونه، نقشه پتانسیل سطحی نمونه ترسیم می‌شود. توان تفکیک فضایی KPFM از روش‌های PES و EBIC بیشتر است. حساسیت روش KPFM در اندازه‌گیری پتانسیل سطحی یا تابع کار با روش PES قابل مقایسه است ولی از روش KP کمتر است. معمولاً از مقیاس آزمایشگاهی PES برای اندازه‌گیری ساختار نوار الکترونی سطح کل نمونه استفاده می‌شود. توان تفکیک فضایی با بهبود منبع الکترون و آنالیزکننده انرژی الکترون تا $3\mu\text{m}$ افزایش می‌یابد. هنگامی که از یک منبع تابش سینکروترون برای PES استفاده می‌شود، دستیابی به توان تفکیک فضایی بالاتر از 100nm امکان‌پذیر می‌شود [۴۴]. توان تفکیک فضایی روش EBIC می‌تواند تا 70nm باشد. به هر حال، روش EBIC دارای معایبی در اندازه‌گیری پتانسیل سطحی نمونه‌هاست. این روش تنها برای نمونه‌های نیمه‌هادی قابل اجراست، زیرا EBIC جریانی را که از زوج‌های الکترون - حفره بوجود می‌آید، اندازه‌گیری می‌کند. علاوه بر این، تعیین کمی

جدول ۱: مقایسه روش میکروسکوپی پروبی نیروی کلون، روش پروبی کلون، طیف‌سنجی نشر نوری و میکروسکوپی روبشی الکترونی برای اندازه‌گیری پتانسیل سطحی [۴۳-۴۵].

روش	توضیح	توان تفکیک انرژی	توان تفکیک فضایی
KPFM	اندازه‌گیری CPD موضعی در سطح نمونه	$5-20\text{meV}$	بالاتر از 10nm
KP	اندازه‌گیری CPD موضعی برای کل سطح نمونه	1meV	متوسط کل سطح نمونه
PES	اندازه‌گیری طیف سنجی انرژی برای کل سطح نمونه	20meV	بالاتر از 100nm
SEM	اندازه‌گیری پرتو الکترونی القا کننده جریان برای تهیه نقشه پتانسیل سطحی	یک روش کمی نیست	بالاتر از 70nm

باعث از هم گسیختگی دقت اندازه‌گیری در روش KPFM شود. در روش KPFM لازم است فاصله سوزن - نمونه در طول اندازه‌گیری ثابت نگه داشته شود تا از تداخل گرادیان ظرفیت (معادله F_{es} رابطه ۱) در پتانسیل سطحی (معادله F_{ω} رابطه ۵) جلوگیری به‌عمل آید. هنگامی که در طول اندازه‌گیری KPFM یک تغییر ناگهانی در ارتفاع و توپوگرافی روی می‌دهد، عبارت مربوط به گرادیان ظرفیت در معادله مربوط به F_{ω} می‌تواند تغییر کند. تغییر در گرادیان ظرفیت می‌تواند در نیروی الکتریکی بین سوزن و نمونه تداخل کند. بنابراین، مقدار پتانسیل سطحی اندازه‌گیری شده، همیشه معرف پتانسیل سطحی بین سوزن و نمونه نیست. در مقابل، پتانسیل سطحی اندازه‌گیری شده به‌وسیله روش‌های PES، KP، و SEM به فاصله سوزن - نمونه وابسته نیستند [۳۸ و ۴۹]. چهارم، روش KPFM برای تهیه تصویر از پتانسیل سطحی نمونه، به زمان نسبتاً طولانی نیاز دارد (حدوداً بین یک تا دو ساعت).

پتانسیل سطحی مطلق دشوار است و ارتباط بین EBIC و مقدار پتانسیل سطحی به‌صورت فیزیکی تعیین نمی‌شود. در جدول ۱، توان تفکیک فضایی و توان تفکیک انرژی روش‌های KPFM، KP، PES و SEM ارائه شده است [۴۵].

روش KPFM در مقایسه با سایر روش‌ها دارای توان تفکیک فضایی بالاتر همراه با حساسیت انرژی نسبتاً بهتری است، ولی دارای معایبی در اندازه‌گیری پتانسیل سطحی مطلق یا تابع کار نمونه است. نخست این که اندازه‌گیری پتانسیل سطحی مطلق با روش KPFM به اندازه‌گیری تابع کار پروب نیاز دارد. برای این موضوع نیز لازم است پروب KPFM بر روی نمونه‌ای که تابع کارش به خوبی تعیین شده است، کالیبره شود. بنابراین لازم است دو اندازه‌گیری انجام شود، یکی بر روی سطح نمونه مرجع و دیگری روی سطح نمونه. نیاز به تبادل دو نمونه زیر پروب KPFM، دقت اندازه‌گیری را کاهش می‌دهد. روش‌های PES و SEM به هنگام

بررسی لایه‌های بلاگت- لانگ مویر^{۱۸} به وسیله میکروسکوپ پروبی روبشی سطح^{۱۹}

یاگی و همکارانش^{۲۰} در این تحقیق نحوه تفکیک فاز و جهت گیری مولکول‌ها را در مخلوطی از هیدروکربن‌ها و فلوروکربن‌ها مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور از توانمندی‌های دو دستگاه AFM و KPFM بهره گرفتند. در این مطالعه از یون‌های متفاوتی در محلول‌های بافر استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که هنگام استفاده از کاتیون‌های Ca، حوزه‌های تشکیل شده با زمانی که از کاتیون‌های پلیمری استفاده می‌شود، متفاوت است. در این تحقیق مشخص شد، وقتی مخلوط فقط از هیدروکربن تشکیل شده است، پتانسیل سطح به مراتب بالاتر از زمانی است که مخلوط حاوی فلوروکربن‌ها باشد. میزان پتانسیل به نسبت HC:FC کاملاً وابسته است و هرگونه نوسان در این نسبت بر میزان پتانسیل سطح مؤثر است [۵۰].

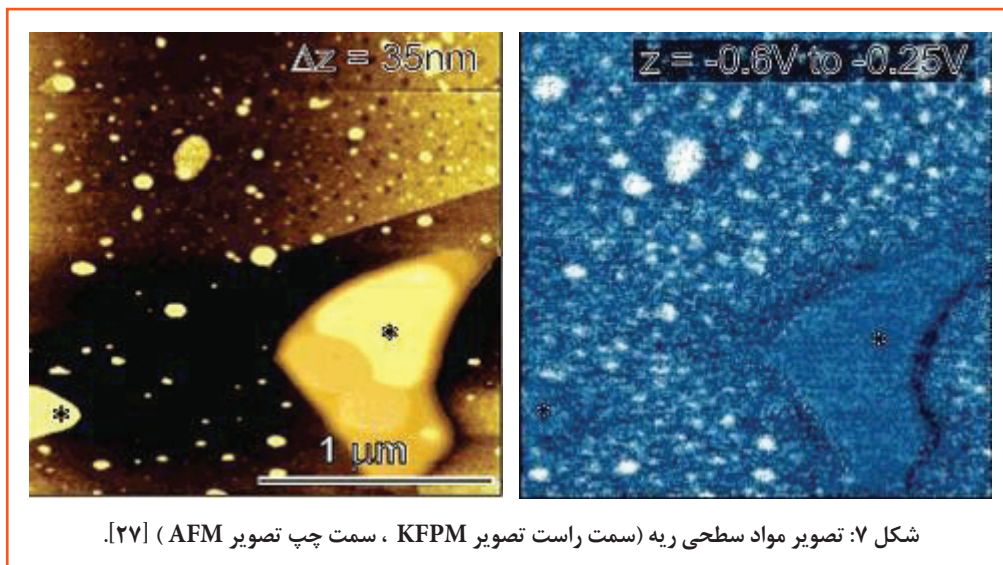
ارزیابی قابلیت امتزاج چربی در دو تک‌لایه دو جزئی با استفاده از EFM

گود من^{۲۱} و همکارانش قابلیت امتزاج و رفتار فازی تک لایه‌های دو جزئی L-B را بررسی نمودند. در این آزمایش، میزان پتانسیل سطحی تجربی متیل استئارات با میزان تئوری آن متفاوت بود. دلیل این اختلاف آن است که انتهای اسیدهای چرب بر روی متیل استئارات به صورت شیب‌دار قرار می‌گیرند و با توجه به این مهم که دستگاه KPFM فقط دوقطبی‌های راست گوشه را اندازه‌گیری می‌کند، بنابراین بین مقادیر تئوری و عملی اختلاف به وجود می‌آید [۵۱].

روش KPFM می‌تواند توپوگرافی سطح و پتانسیل سطحی را با استفاده از سوزن AFM به صورت همزمان اندازه‌گیری کند. هنگامی که سوزن سطح نمونه را با سرعت بالا روبش می‌کند، ممکن است تداخل شدیدی بین سیگنال‌های توپوگرافی و پتانسیل سطحی بوجود آید. در نتیجه، برای پرهیز از این تداخل، تنظیمات پهنای نوار توپوگرافی و پتانسیل سطحی محدود می‌شود. همچنین PES با توان تفکیک بالا بسیار آهسته است. به هر حال، مهمترین مزیت روش KPFM، ارائه نقشه پتانسیل سطح نمونه در ابعاد کوچک است. به وسیله این میکروسکوپ تصویرهای زیبایی با توان تفکیک بالا از نمونه ارائه می‌شود که در مقایسه با سایر روش‌های طیف سنجی کیفیت بالاتری دارند [۳۸].

نتایج بدست آمده از میکروسکوپ روبشی کلونین

خروجی میکروسکوپ نیروی اتمی به کامپیوتر متصل به این دستگاه یک مجموعه از مشخصات کارتریزین (x, y, z) است. در میکروسکوپ نیروی کلونین به این مجموعه از اطلاعات پارامتر (V) نیز اضافه می‌شود و اطلاعات هر نقطه با مؤلفه (x, y, z, V) بیان می‌شود. کامپیوتر متصل به دستگاه این مجموعه اطلاعات را پردازش نموده و توپولوژی سطح که تابعی از پتانسیل سطح است، ارائه می‌شود. شکل ۷ نقشه‌ای از سطح مواد را در ساختار سطحی ریه نشان می‌دهد. تصویر سمت چپ تصویر AFM و تصویر سمت راست KPFM ریه است که در آن اختلاف رنگ تصاویر ناشی از اختلاف پتانسیل سطوح است [۲۷].



شکل ۷: تصویر مواد سطحی ریه (سمت راست تصویر KPFM، سمت چپ تصویر AFM) [۲۷].

تعیین میزان پتانسیل سطح در مواد سطحی ریه

لئونکو^{۲۲} در سال ۲۰۰۶ میزان پتانسیل سطح مواد سطحی ریه را تعیین نمود. در هنگام انقباض ریه مواد فعال سطحی ریه به صورت دولایه‌ای و چندلایه‌ای، مواد مازاد را آزاد می‌کنند. در برخی از موارد مشاهده شده است که در برخی از مناطق ریه این لایه‌های چربی پتانسیل متفاوتی نسبت به لایه اولیه خود دارند. دلیل این اختلاف می‌تواند ناشی از حضور پروتئین‌هایی باشد که با انتهای

نمونه‌هایی از کاربرد میکروسکوپ روبشی کلونین

از آنجایی که تابع کار و پتانسیل سطحی، به شدت از پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی که در سطح ماده روی می‌دهند، تأثیر می‌پذیرند، روش KPFM اطلاعات مهمی را درباره تغییرات فیزیکی و شیمیایی سطح ماده که در درک پدیده‌های شیمیایی و فیزیکی سطح فلز - نیمه هادی و ابزارهای مربوطه ضروری است، فراهم می‌کند.

می‌شوند، به کمک سیگنال تابع کار قابل تشخیص هستند. در شکل ۸(a) و (b)، اشکال کوچک میان نانوساختارهای طلا به وسیله پیکان نشان داده شده‌اند. تابع کار این شکل‌های کوچک همانند نانوساختارهای طلا هستند که نشان می‌دهد ترکیب شیمیایی این طرح‌های کوچک همانند نانوساختارهای طلاست. روش KPFM می‌تواند اطلاعاتی را درباره ترکیب شیمیایی طرح‌هایی با مقیاس نانو در اختیار قرار دهد. گراهام^{۲۴} تابع کار اندازه‌گیری شده برای سامانه $(0.01)Au/W$ را که با پوشش تک‌لایه با ضخامت تقریبی ۳ نانومتر طلا اشباع شده است، را گزارش نموده که این مقدار به میزان تابع کار توده طلا نزدیک است. واکنش‌های ماده جذب شده - زیرلایه نیز قابل مشاهده هستند. کنتراست بین نانوساختارهای طلا و زیرلایه بعد از عمل حرارتی در دمای بسیار بالا معکوس می‌شود، زیرا نانوساختارهای طلا بعد از حرارت در دمای بالا، که در پی فرایند ترسیب در 650K به مدت $h2$ انجام می‌شود، دارای تابع کار پایین‌تری نسبت به زیرلایه است. این امر نشان می‌دهد که نانوساختار طلا ممکن است با زیرلایه $InSb$ واکنش داده و با اتم‌های In آلیاژ تشکیل دهد که در نتیجه باعث کاهش تابع کار نانوساختار می‌شود. توجه داشته باشید که پتانسیل سطحی زیرلایه $InSb$ بعد از عمل حرارت دادن، تغییر نمی‌کند [۵۳و۲].

■ بررسی انتقال بار در کاتالیست‌های نانوساختار فلزی

نانوساختارهای فلزی که بر روی لایه نازکی از TiO_2 یا MgO نشاندن می‌شود، در واکنش‌های اکسیداسیون خواص کاتالیستی

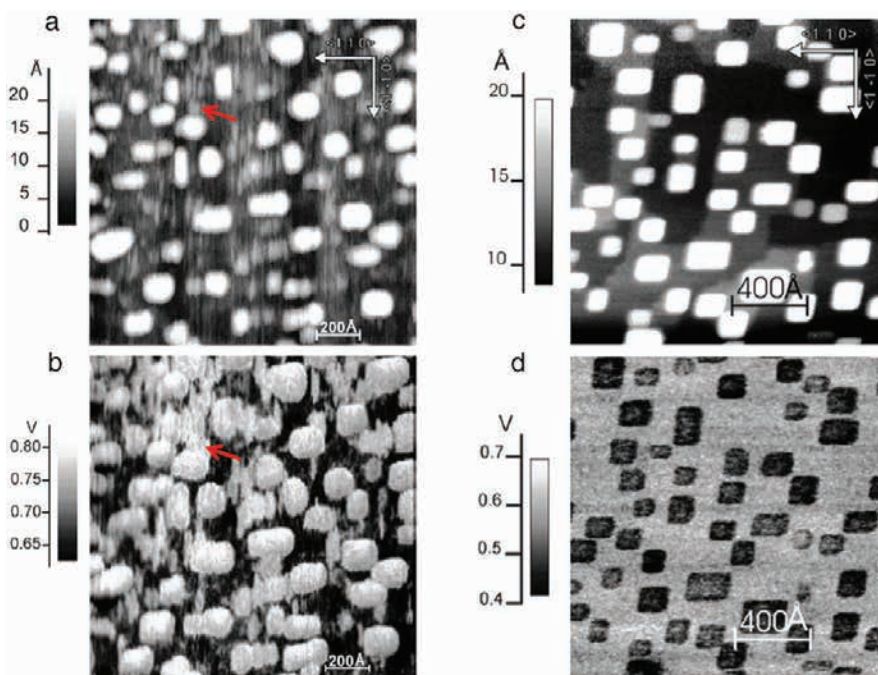
اسیدهای چرب دوقطبی‌های مولکولی ایجاد کرده‌اند [۲۷].

■ بررسی خواص الکتریکی نانوساختارهای فلزی

در سال‌های اخیر، نانوساختارهای فلزی در ابزارهای جدیدی مانند کاتالیست‌های ناهمگن با کارایی بالا و حسگرهای شیمیایی/ بیولوژیک با حساسیت بالا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این کاربردها، درک انتقال بار میان نانوساختارهای فلزی و زیرلایه‌ها (در کاتالیست‌های ناهمگن) و بین نانوساختارهای فلزی و لایه میانی مولکول‌های شیمیایی/بیولوژیک (در حسگرهای شیمیایی/ بیولوژیک) بسیار مهم است. انتقال بار به‌طور ذاتی پتانسیل‌های نانوساختارهای فلزی را تنظیم می‌کند. بنابراین، روش KPFM درک و بینش کلی نسبت به فیزیک نانوساختارهای فلزی و کاربرد آنها در ابزارها فراهم می‌آورد [۵۲و۲].

در یک مطالعه گرین^{۲۳} و همکارانش تابع کار نانوساختارهای طلا و وابستگی آن به اندازه نانوساختار را بررسی کردند. در شکل ۸(a) و (b) توپوگرافی و نقشه تابع کار نانوساختارهای طلا که بر روی سطح $InSb(001)$ در 400K رشد یافته‌اند، نشان داده شده است. طلا عمدتاً در جزایری به شکل مستطیل رشد می‌یابد. ارتفاع نوعی نانوساختار طلا در حد تک لایه (با ضخامت تقریبی $2/0\text{ nm}$) است [۵۳و۴۱و۲].

رسم نقشه تابع کار، جزئیات بیشتری درباره توپوگرافی سطح در اختیار قرار می‌دهد. اجزاء کوچکی که در تصویر توپوگرافی بدلیل بزرگ بودن تغییرات در توپوگرافی به سختی مشاهده



شکل ۸: نمایش توپوگرافی و تابع کار نانوساختارهای طلا بر روی سطح $InSb(001)$ در دو حالت بدون عملیات حرارتی و همراه با حرارت دادن بعد از مرحله ترسیب. (a) توپوگرافی در حالت غیرتماسی روش KPFM و (b) نقشه تابع کار مربوطه برای تک لایه طلا با ضخامت تقریبی 0.2 نانومتر که بر روی سطح $InSb(001)$ در دمای 400K رشد یافته است. (c) توپوگرافی در حالت غیرتماسی روش KPFM و (d) نقشه تابع کار مربوط به طلای ترسیب شده بر روی سطح $InSb$ در دمای 400K رشد یافته و سپس در دمای 650K به مدت $h2$ حرارت دیده است. طرح‌های کوچک میان نانوساختارهای طلا در شکل‌های ۸(a) و (b) به وسیله پیکان‌هایی مشخص شده‌اند [۵۳و۲].

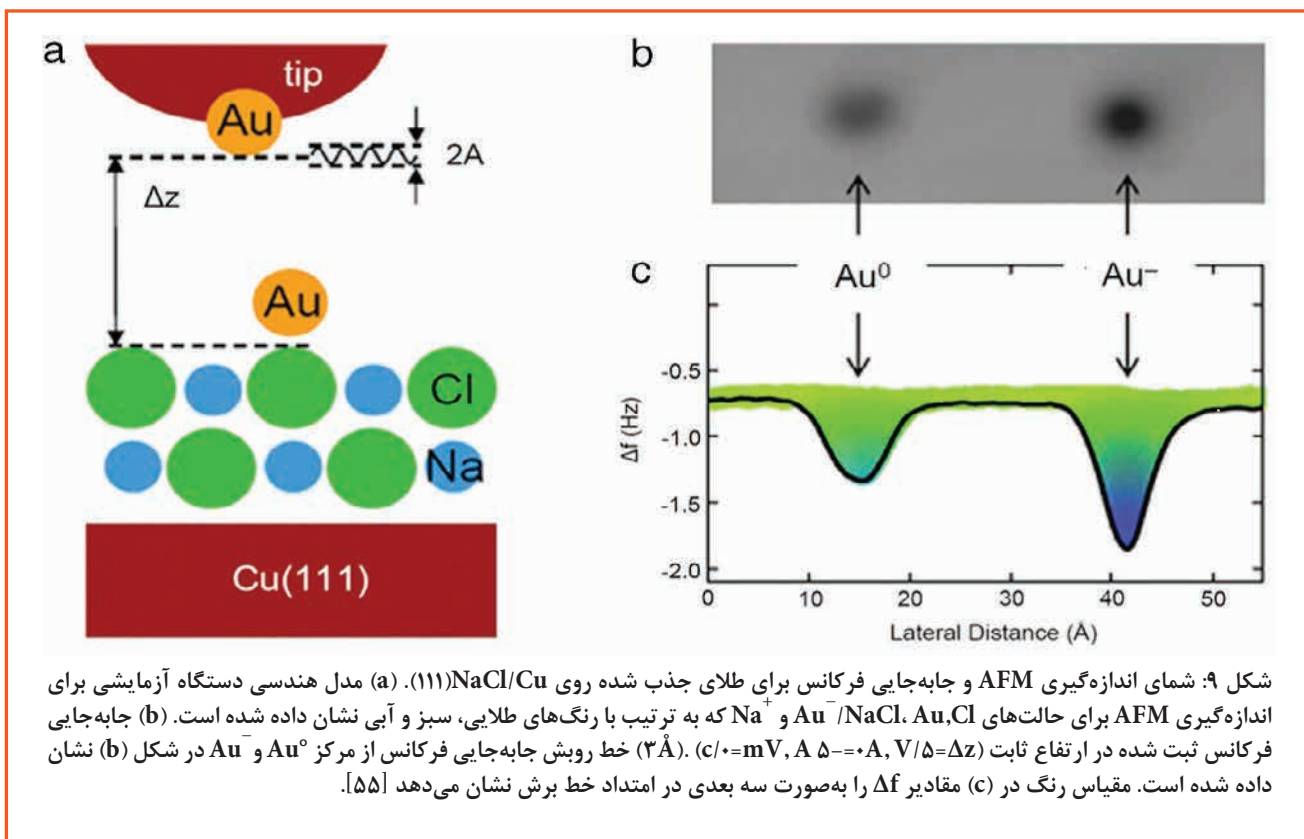
در شکل ۱۰ (a,b) تصاویر توپوگرافی و پتانسیل سطح نمونه KC 1 که در محیط فوق خلاء تمیز شده است را به نمایش می‌گذارد. مشخصه های روشن در تصویر پتانسیل تابع کار به میزان ۰/۷ الکترون ولت بیشتر از بقیه سطح را نشان می‌دهد که به نقایص بار نسبت داده می‌شود. انتقال بار ناشی از نقایص نانو ساختار طلا باعث افزایش تابع کار می‌شود [۵۶].

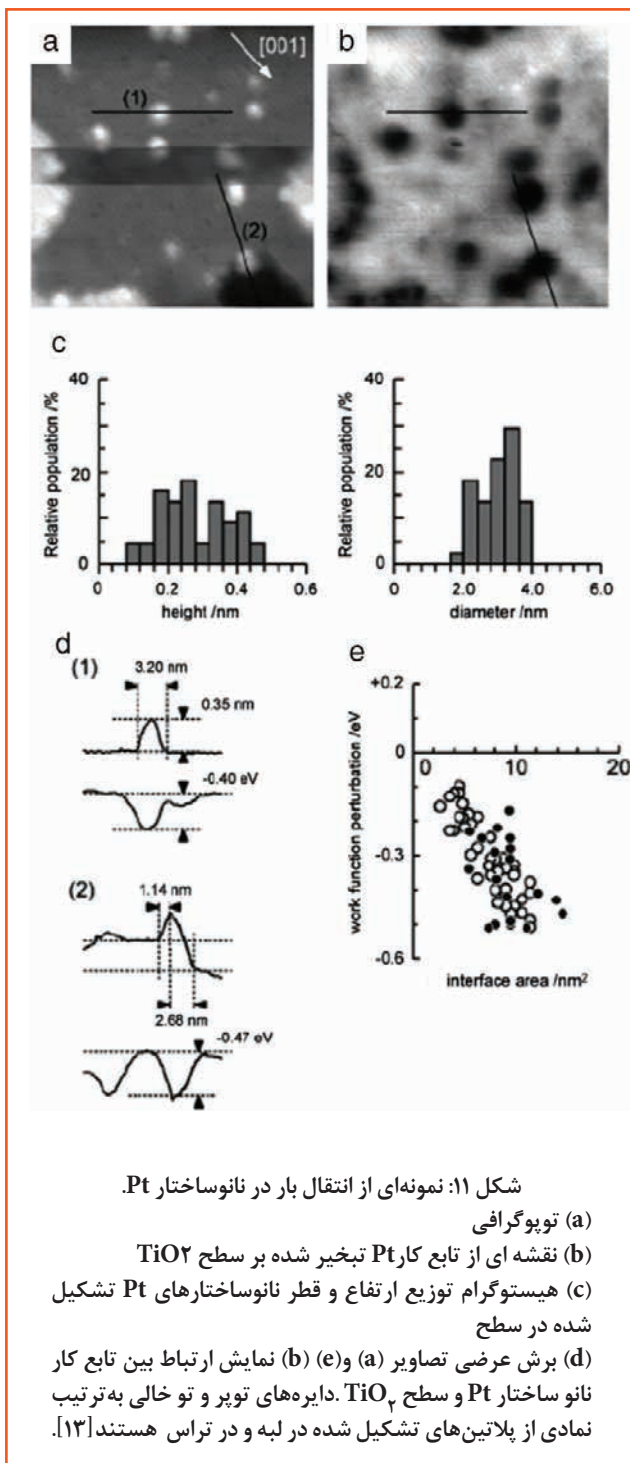
Pt/TiO₂ کاربردهای فراوانی در خالص سازی آب و تشخیص گاز (حسگرهای گازی) دارد. با تابش نور uv الکترون‌های تهییج شده از TiO₂ به درون Pt نانو ساختار نفوذ کرده [۵۶ و ۵۷] در نتیجه نحوه توزیع بار ترکیب Pt/TiO₂ تغییر می‌نماید [۱۳ و ۵۹].

با استفاده از نگاشت (نقشه برداری) تابع کار با تفکیک بالا می‌توان به تفاوت‌های ساختاری ماده جذب شده بر روی سطوح پی برد به عنوان مثال در مورد Pt جذب شده بر سطح TiO₂، تابع کار بین ۰/۲۴ تا ۰/۲۸ الکترون ولت در نوسان است. در شکل ۱۱) نگاشت تابع کار Pt جذب شده بر سطح TiO₂ آورده شده است. شکل ۱۱ a- b به ترتیب نشان‌دهنده تصویر توپوگرافی و نقشه تابع کار Pt بر سطح TiO₂ هستند. خطوط مبین نفوذ حرارتی ماده جذب بر روی سطح هستند. با ملاحظه هیستوگرام (c) و توپوگرافی (a) مشخص می‌شود که نقاط روشن نمایانگر Pt نانوساختار هستند که ارتفاع آنها بین ۰/۱۲ تا ۰/۴۸ نانومتر (میانگین ارتفاع ۰/۳ نانومتر) و قطر این نانو ذرات بین ۲ تا ۴ نانومتر (میانگین ۳/۲ نانومتر) می‌باشد. مناطق روشن‌تر در (b) مربوط به توابع کار بزرگ‌تر است. تابع کار نانوساختار Pt نسبت به TiO₂ کوچکتر است. به نظر می‌رسد که تشکیل دوقطبی‌های الکتریکی ناشی از انتقال بار الکترونی بین نانو ساختار Pt و سطح TiO₂ است و باعث تفاوت تابع کار بین نانوساختار Pt و سطح

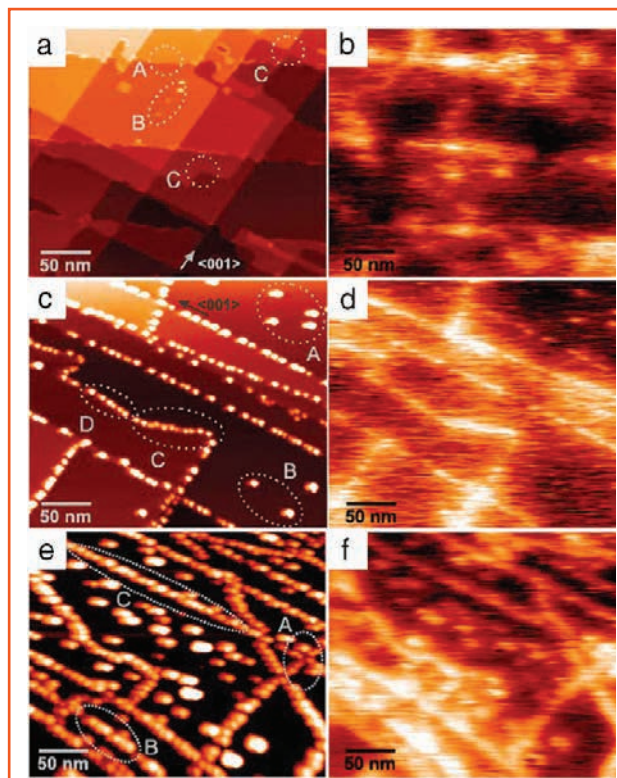
فوق‌العاده‌ای نشان می‌دهند. در واکنش‌های کاتالیستی، بررسی انتقال بار میان نانوساختار فلزی و لایه‌های اکسیدی پایه بسیار با اهمیت است، زیرا انتقال بار از نانوساختار فلزی به پایه می‌تواند واکنش‌های کاتالیستی را در سطح فلز تحت تأثیر قرار دهد. اخیراً گراس و همکارانش از سامانه AFM/KPFM در حالت غیر تماسی برای بررسی اتم‌های منفرد روی سطح استفاده نموده‌اند. آنها نشان دادند، روش KPFM نه تنها امکان به تصویر کشیده شدن اتم‌های منفرد را فراهم می‌آورد، بلکه می‌تواند برای تشخیص وضعیت بار اتم منفرد در لایه‌های نازک عایق نیز استفاده شود [۲ و ۵۴ و ۵۵].

شکل ۹-a اتم‌های طلائی نشاندهنده شده بر روی لایه فوق‌العاده نازک NaCl روی Cu(111) (۱۱۱) نشان داده شده است. در شکل ۹-b، جابه‌جایی سیگنال‌های فرکانس در حالت تصویربرداری ارتفاع ثابت ثبت شده است. باردار شدن یک اتم طلا به وسیله یک بار الکترون، باعث افزایش نیرو به میزان چند پیکونیوتن در سوزن می‌شود که نشان می‌دهد در اتم طلا با بار منفی (Au⁻) نیروی جذبی از اتم خنثی (Au⁰) بیشتر است. تئوری تابع دانسیته نشان می‌دهد که لایه NaCl با قابلیت پلاریزه شدن یونی بالا مسعول پایداری دو حالت بار مختلف می‌باشد. الکترون اضافی روی اتم طلا به یون Cl⁻ در زیر اتم طلا نیرو وارد کرده و آن را به طرف پایین می‌راند، در حالی که یون‌های Na⁺ مجاور به طرف بالا حرکت می‌کنند. این الگو یک پتانسیل جذبی برای بار اضافی روی اتم طلا بوجود می‌آورد که با افزایش میزان جابه‌جایی مطلق فرکانس مطابقت دارد. این کار حساسیت بسیار بالای آشکارسازی الکترون بار منفرد را نشان می‌دهد. با تصویربرداری در دامنه نوسان بسیار کوچک (معمولاً ۴۰ pm) و دمای پایین (K۵) می‌توان به این حساسیت فوق‌العاده بالا دست یافت [۵۵].





TiO_2 باشد. قسمت (e) شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش حد فاصل بین نانوساختار Pt و سطح TiO_2 ، تابع کار نانوساختار Pt کاهش می‌یابد. ارتباط خطی تابع کار با منطقه حدفاصل، برای نواحی مختلف تراس و لبه پله‌ها مشابه است. اتم‌های اضافه شده Pt و Na باعث انتقال الکترون به سطح TiO_2 شده و اتم کلر، الکترون را از سطح TiO_2 به سمت خود جمع می‌کند [۱۳].



نتیجه‌گیری

در دهه گذشته، روش KPFM به منظور برقراری ارتباط بین علوم سطح / مواد و صنعت نیمه‌هادی‌ها توسعه و گسترش یافت. روش KPFM نسبت به ویژگی‌های سطح بسیار حساس است. همچنین این روش می‌تواند اطلاعات بسیار مهمی را درباره توزیع پتانسیل سطحی در اختیار بگذارد که در ارتقاء کارایی دستگاه‌های الکترونیکی و نوری کارساز است. به دلیل تطبیق پذیری روش KPFM در شناسایی خواص الکتریکی - الکترونیکی سطح و ابزارهای در حال کار، به نظر می‌رسد این روش در آینده توسط محققین مورد استفاده قرار گیرد. به هر حال برای کاربرد وسیع‌تر این روش با توان تفکیک اتمی، لازم است اصول فیزیک و به‌ویژه برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک بین سوزن و نمونه در مقیاس اتمی بیشتر روشن شده و مورد بررسی قرار گیرد [۲].

پی نوشت

1. Kelvin Probe Force Microscopy
2. Nonnenmacher
3. Atomic Force Microscope (AFM)
4. Scanning probe microscopy (SPM)
5. organic field-effect transistors
6. Lipid membranes
7. Contact mode
8. tapping mode
9. Non contact mode
10. Highest occupied molecular orbital
11. Lowest unoccupied molecular orbital
12. Contact potential difference
13. biasing voltage
14. Kelvin Probe
15. photoelectron spectroscopy
16. scanning electron microscopy
17. electron beam induced current
18. Langmuir Blodgett
19. Scanning Surface Probe Microscopy
20. Yagi
21. Goodman
22. Leonenko
23. Goryl
24. Graham

مراجع

- [۱] M. Nonnenmacher, M.P. Oboyle, H.K. Wickramasinghe, Appl. Phys. Lett. ۲۹۲۱ (۱۹۹۱) ۵۸.
- [۲] W. Melitz, J. Shen, A. C. Kummel, S.b Lee, Surface Science Reports ۲۷-۱ (۲۰۱۱) ۶۶.
- [۳] www.tut.fi.
- [۴] C. Sommerhalter, T. Glatzel, T.W. Matthes, A. Jager-Waldau, M.C. Lux-Steiner, Appl. Surf. Sci. ۲۶۳ (۲۰۰۰) ۱۵۷.
- [۵] C.Barth, C.R. Henry, Nanotechnology ۲۰۰۶ (۱۷) S۱۵۵.
- [۶] T. Glatzel, S. Sadewasser, R. Shikler, Y. Rosenwaks, M.C. Lux-Steiner, Mat. Sci.Eng. B ۱۳۸ (۲۰۰۳) ۱۰۲.
- [۷] G.H. Enevoldsen, T. Glatzel, M.C. Christensen, J.V. Lauritsen, F. Besenbacher, Phys. Rev. Lett. (۲۰۰۸) ۱۰۰ ۲۳۶۱۰۴.
- [۸] T. Arai, M. Tomitori, Phys. Rev. Lett. ۲۵۶۱۰۱ (۲۰۰۴) ۹۳.
- [۹] K. Okamoto, K. Yoshimoto, Y. Sugawara, S. Morita, Appl. Surf. Sci. ۱۲۸.(۲۰۰۳) ۲۱۰.
- [۱۰] S. Kitamura, M. Iwatsuki, Appl. Phys. Lett. ۳۱۵۴ (۱۹۹۸) ۷۲.
- [۱۱] S. Kitamura, K. Suzuki, M. Iwatsuki, C.B. Mooney, Appl. Surf. Sci. ۲۲۲ (۲۰۰۰) ۱۵۷.
- [۱۲] K. Okamoto, Y. Sugawara, S. Morita, Appl. Surf.Sci.۳۸۱ (۲۰۰۲) ۱۸۸.
- [۱۳] A. Sasahara, C.L. Pang, H. Onishi, J. Phys. Chem. B ۱۷۵۸۴ (۲۰۰۶) ۱۱۰.
- [۱۴] S. Sadewasser, P. Jelinek, C.K. Fang, O. Culance, Y. Yamada, Y. Sugimoto, M. Abe, S. Morita, Phys. Rev. Lett. ۲۶۶۱۰۳ (۲۰۰۹) ۱۰۳.
- [۱۵] K. Nakayama, T. Shiota, Surf. Interface Anal. ۸۸۵ (۲۰۰۸) ۴۰.
- [۱۶] Y. Sugawara, T. Uchihashi, M. Abe, S. Morita, Appl. Surf. Sci. ۳۷۱ (۱۹۹۹) ۱۴۰.
- [۱۷] A. Huijser, J. Vanlaar, T.L. Vanrooy, Surf. Sci. ۴۷۲ (۱۹۷۷) ۶۲.
- [۱۸] T. Miyazaki, K. Kobayashi, K. Ishida, S. Hotta, T. Horiuchi, K. Matsushige and H. Yamada; J.Appl.Phys., ۱۲۴۵۰۳, ۹۷, ۲۰۰۵
- [۱۹] L. Burgi, H. Sirringhaus and R. H. Friend, Appl.Phys. Lett., ۲۹۱۳, ۸۰, ۲۰۰۲.
- [۲۰] K. P. Puntambekar, P. V. Pesavento, and C. D. Frisbie, Appl. Phys.Lett., ۵۵۳۹, ۸۳, ۲۰۰۳.
- [۲۱] V. Palermo, M. Palma, P. Samori, Adv. Mater. ۱۴۵, ۱۸, ۲۰۰۶.
- [۲۲] D. Fichou, J. Mater. Chem. ۵۷۱, ۱۰, ۲۰۰۰.
- [۲۳] D. Byron, A. Mataharu, R. Wilson, G. Wright, Mol. Cryst. Liq. Cryst. ۶۱, ۲۶۵, ۱۹۹۵.
- [۲۴] V. de Cupere, J. Tant, P. Viville, R. Lazzaroni, W. Osikowicz, W. R. Salaneck, Y. H. Geerts, Langmuir, ۲۰۰۶ ۷۷۹۸, ۲۲.

- [۲۵] A. Abbadie, G. Hamaide, D. Mariolle, M. Chaupin, F. Brunier, E. Martinez, and J. Mähliß .J. Appl. Phys. ,۱۱۱ (۲۰۱۲) ۰۶۴۹۱۲)
- [۲۶] Patrick Mesquida, Andreas Stemmer; Microelectronic Engineering ۶۷۴-۶۷۱ (۲۰۰۲) ۶۲-۶۱
- [۲۷] Z. Leonenko .Langmuir ۱۰۱۳۹-۲۲:۱۰۱۳۵
- [۲۸] UMUT BOSTANCI;DEVELOPMENT OF ATOMIC FORCE MICROSCOPY SYSTEM AND KELVIN PROBE MICROSCOPY SYSTEM FOR USE IN SEMICONDUCTOR NANOCRYSTAL CHARACTERIZATION, THESIS, AUGUST ۲۰۰۷
- [۲۹] Y. Rosenwaks, R. Shikler, T. Glatzel, S. Sadewasser, Phys. Rev. B ۰۸۵۳۲۰ (۲۰۰۴) ۷۰
- [۳۰] S. Saraf, Y. Rosenwaks ; Surface Science ۲۰۰۵) ۵۷۴) L۳۵-L۳۹
- [۳۱] S. Belaidi, P. Girard, G. Leveque, J. Appl. Phys. ۱۰۲۳ (۱۹۹۷) ۸۱
- [۳۲] T.Takahashi , T. Matsumoto, S. Ono ; Ultramicroscopy ۹۶۷-۹۶۳(۲۰۰۹)۱۰۹
- [۳۳] W.Richard Bowen,N.Hilal, Atomic Force Microscopy ,Elsevier ۱st edition ۲۰۰۹
- [۳۴] Principles of the Kelvin Probe Force Microscopy, I.R. Jankov, I.D. Goldman, R.N. Szente, Revista Brasileira de Ensino de Fsica, vol. ۲۲, no. ۴, Dezembro, ۲۰۰۰.
- [۳۵] Leanna C. Giancarlo and and George W. Flynn ,Annual Review of Physical Chemistry Vol. ,۳۳۶-۲۹۷ :۴۹ ۱۹۹۸.
- [۳۶] R. Shikler, T. Meoded, N. Fried, B. Mishori, Y. Rosenwaks, J. Appl. Phys. ۱۰۷ (۱۹۹۹) ۸۶.
- [۳۷] S.V. Kalinin, A. Gruverman (Eds.), Scanning Probe Microscopy, Springer, New York, ۲۰۰۷.
- [۳۸] T. Glatzel, S. Sadewasser, M.C. Lux-Steiner, Appl. Surf. Sci. ۸۴ (۲۰۰۳) ۲۱۰.
- [۳۹] U. Zerweck, C. Loppacher, T. Otto, S. Grafstrom, L.M. Eng, Phys. Rev. B ۱۲۵۴۲۴ (۲۰۰۵) ۷۱.
- [۴۰] L. Nony, F. Bocquet, C. Loppacher, T. Glatzel, Nanotechnology ۲۶۴۰۱۴ (۲۰۰۹) ۲۰.
- [۴۱] F. Krok, K. Sajewicz, J. Konior, M. Goryl, P. Piatkowski, M. Szymonski, Phys. Rev. B ۲۳۵۴۲۷ (۲۰۰۸) ۷۷.
- [۴۲] C. Barth, C.R. Henry, J. Phys. Chem. C ۲۴۷ (۲۰۰۹) ۱۱۳.
- [۴۳] H.J. Leamy, J. Appl. Phys. ۱۹۸۲) ۵۳) R۵۱.
- [۴۴] S. Gunther, B. Kaulich, L. Gregoratti, M. Kiskinova, Prog. Surf. Sci. ۱۸۷ (۲۰۰۲) ۷۰.
- [۴۵] J.C. Gonzalez, K.L. Bunker, P.E. Russell, Appl. Phys. Lett. ۱۵۶۷ (۲۰۰۱) ۷۹.
- [۴۶] H. Luth, Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films, ۴th ed., Springer, Berlin, ۲۰۰۱.
- [۴۷] W. Monch, Semiconductor Surfaces and Interfaces, ۲nd ed., Springer, Berlin, ۱۹۹۵.
- [۴۸] D.P. Woodruff, T.A. Delchar, Modern Techniques of Surface Science, Cambridge University Press, Cambridge, ۱۹۸۶.
- [۴۹] S. Sadewasser, C. Leendertz, F. Streicher, M.C. Lux-Steiner, Nanotechnology ۲۰۰۹) ۲۰).
- [۵۰] K.Yagi, M. Fujihira , Applied Surface Science ۴۱۱-۱۵۷:۴۰۵
- [۵۱] T.Goodman .Langmuir ۲۰:۳۶۸۴:۳۶۸۹.
- [۵۲] C.R. Henry, Appl. Surf. Sci. ۲۵۲ (۲۰۰۰) ۱۶۴.
- [۵۳] M. Goryl, J.J. Kolodziej, F. Krok, P. Piatkowski, B. Such, M. Szymonski, Microelectron. Eng.۳۹۴ (۲۰۰۵) ۸۱.
- [۵۴] H.G. Boyen, et al., Science ۱۵۳۳ (۲۰۰۲) ۲۹۷.
- [۵۵] L. Gross, F. Mohn, P. Liljeroth, J. Repp, F.J. Giessibl, G. Meyer, Science ۳۲۴
- [۵۶] C. Barth, C.R. Henry, Appl. Phys. Lett. ۲۵۲۱۱۹ (۲۰۰۶) ۸۹.
- [۵۷] M.R. Hoffmann, S.T. Martin, W.Y. Choi, D.W. Bahnemann, Chem. Rev. ۶۹ (۱۹۹۵) ۹۵.
- [۵۸] A. L. Linsebigler, G.Q. Lu, J.T. Yates, Chem. Rev. ۷۳۵ (۱۹۹۵) ۹۵.
- [۵۹] A. Sasahara, K.Hiehata, H. Onishi, Catal. Surv. Asia ۹ (۲۰۰۹) ۱۳.