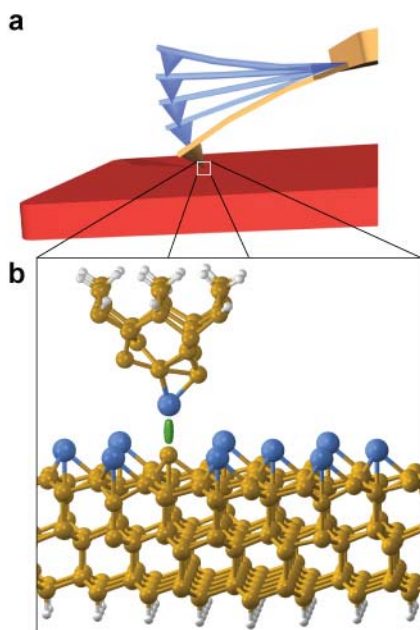


## Mikroskop atomárních sil použit jako „atomární tužka“ umožňující psaní jednotlivými atomy

V práci publikované v posledním čísle časopisu *Science*, publikovaného dne 17. října 2008, mezinárodní tým vědců z Japonska, Španělska a České republiky prezentuje novou metodu atomární manipulace, která umožňuje „psát“ na povrch pevné látky pomocí jednotlivých atomů, podobně jako psací pero. Nová metoda umožňuje nejenom zápis, ale i kontrolované vymazání již vytvořených atomárních vzorů. V článku tým autorů poprvé představil novou metodu a také detailně vysvětlil, na základě kvantových výpočtů, její mechanismus. Možnosti nové metody tým demonstroval vepsáním symbolu „Si“ (symbol „Si“ byl zvolen záměrně, neboť právě atomy křemíku byly použity jako inkoust) na povrch pevné látky. Experiment byl proveden při pokojové teplotě, což výrazně rozšiřuje možnosti využití atomární manipulace v oblasti nanotechnologií.

Mezinárodní vědecký tým publikoval v posledním čísle amerického časopisu *Science*, vol. 322, str. 413, článek o zcela nové metodě umožňující provádět cílenou manipulaci jednotlivých atomů na površích pevných látek pomocí techniky AFM (Atomic Force Microscopy) operující v dynamickém modu, známém jako dAFM (dynamic Atomic Force Microscopy). Navržená metoda byla úspěšně ověřena na vybraných polovodičových površích obsahujících různé chemické prvky a to při pokojové teplotě. Nová metoda používá hrot mikroskopu jako „atomární tužku“, kde jednotlivé atomy daného chemického druhu byly kontrolovaným přiblížením hrotu „vyryty“ na povrch pevné látky ve formě slova označujícího daný prvek. Nová metoda dovoluje vytvářet libovolně uspořádané útvary na povrchu pevné látky při libovolné teplotě. Tento objev je významným krokem k dalšímu rozvoji nanotechnologií. Práce spolu s předešlým objevem této vědecké skupiny (chemická identifikace jednotlivých atomů viz. *Nature*, vol. 466, stránka 64 (2007)) dovolí vytvářet sofistikované, přesně specifikované nanostruktury požadovaných chemických a fyzikálních vlastností.



Obr 1 Schematický obrázek funkce mikroskopu atomárních sil. Schopnost detekce jednotlivých atomů na povrchu pevné látky je možná na základě měření interakce chemické vazby mezi atomem hrotu a povrchu (viz. b)

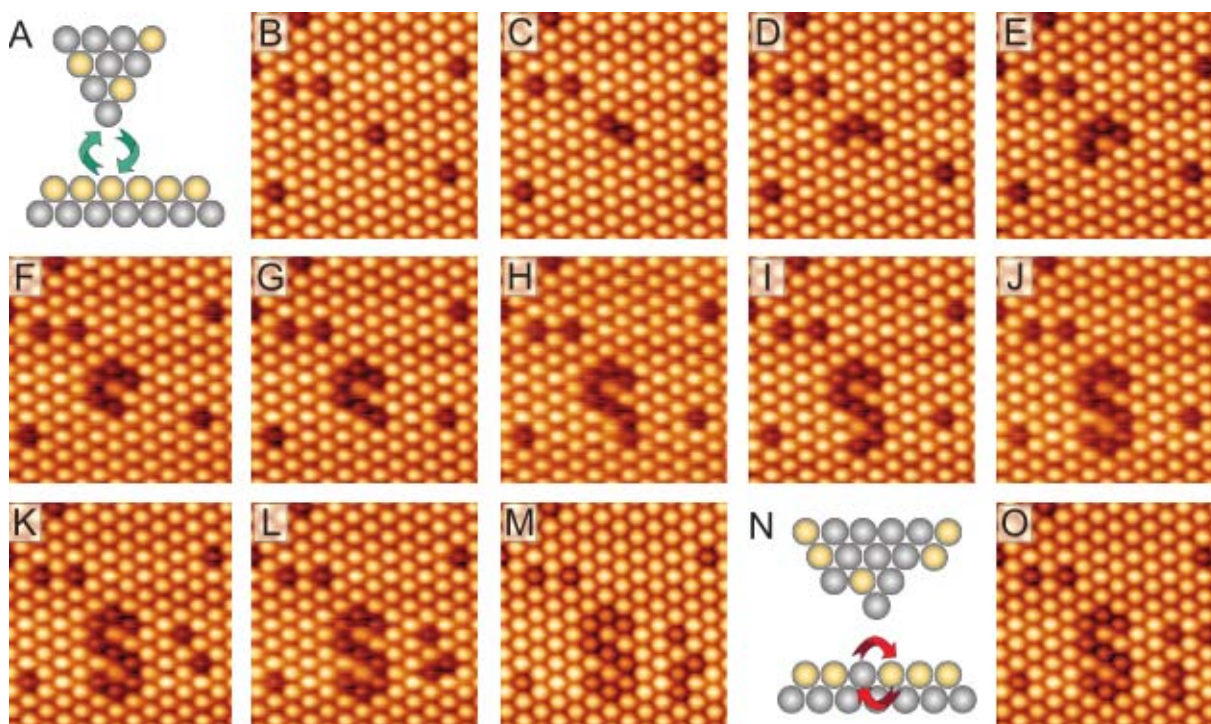
První úspěšná kontrolovaná manipulace jednotlivých atomů pomocí rastrovacího tunelovacího mikroskopu, známého pod označením STM (Scanning Tunneling Microscope), byla provedena v roce 1989 Donem Eiglerem a jeho spolupracovníky z laboratoře IBM. V daném případě byl z atomů Xenonu na povrchu kovu zkonstruován nápis IBM při velmi nízké teplotě, jmenovitě 4 stupně Kelvin (tj.  $-265\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Od té doby byly vyvinuty další metody umožňující kontrolovanou manipulaci jednotlivých atomů nebo molekul na povrchu pevné látky. Přes nesporný pokrok v oblasti atomárních manipulací existuje hned několik významných limitujících faktorů pro jejich další technologické využití: (i) nutnost specifických vlastností daného povrchu (mikroskop STM umožňuje pracovat pouze s vodivými materiály); (ii) nutnost velmi nízkých teplot, blízkých absolutní nule, které jsou dosažitelné jen za speciálních laboratorních podmínek; navíc takto získané atomární struktury se vyznačují velmi krátkou dobou životnosti (řádově sekundy); (iii) zejména je to ale fakt, že stávající metody neumožňují současně provádět „zápis“ a „mazání“ jednotlivých atomů, ale většinou pouze přesun stávajících atomů na povrchu pevné látky.

Omezení na elektricky vodivé povrchy překonává mikroskop atomárních sil umožňující charakterizaci povrchu jak vodičů, polovodičů či izolátorů v různém prostředí (od vysokého vakua po běžnou atmosféru, tekutiny včetně). Díky těmto vlastnostem se metoda AFM stala nejen základním nástrojem charakterizace povrchů a nanosystémů, studium mechanických vlastností (tření, adheze a tvrdost), ale také nástrojem pro studium biologických systémů, například pro charakterizaci

mechanických vlastností proteinů nebo určení lokální struktury buněčných membrán. Princip mikroskopu atomárních sil je založen na změně oscilační frekvence ostrého hrotu (o velikosti několika mikronů) upevněného na konci flexibilního rámenka, která je přímo úměrná velikosti interakce se zkoumaným povrchem. Pokud se hrot nachází, při maximální výchylce oscilačního cyklu, dostatečně blízko zkoumaného povrchu (cca 0,5 Å nanometrů, tj. ve vzdálenosti miliontin milimetru) pak změna oscilační frekvence udává sílu chemické vazby mezi jednotlivými atomy na povrchu a atomem na špičce hrotu (viz. obr. 1.).

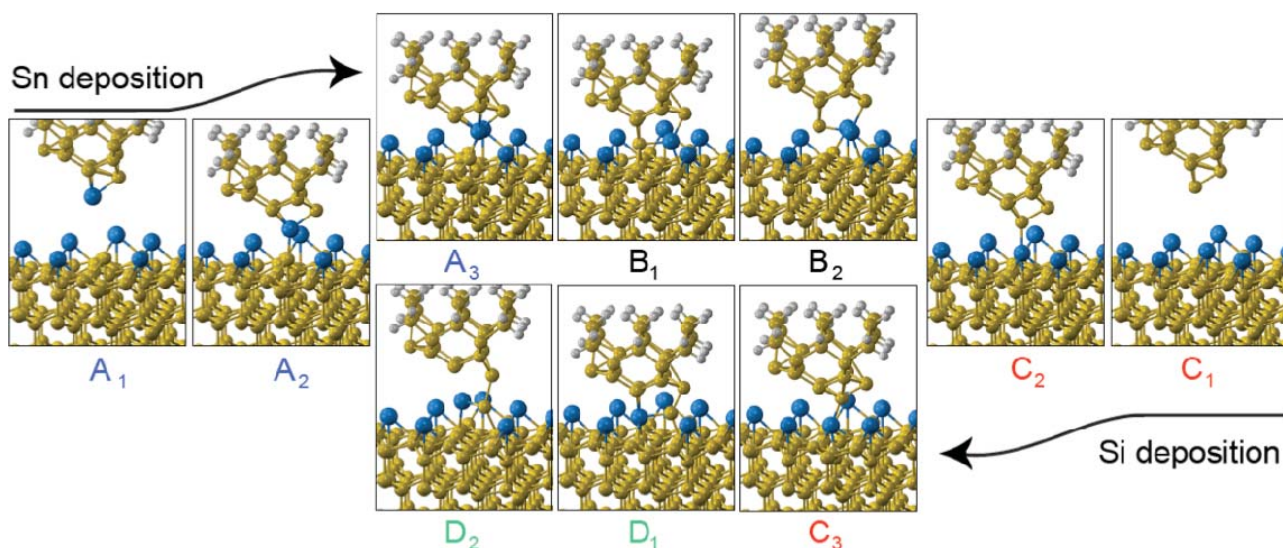
Nová metoda umožňuje na základě interakce hrotu mikroskopu s povrchem pevné látky v slabě repulsivním režimu, tj. v situaci kdy mezi hrotem a povrchem působí odpudivá síla při maximální výchylce oscilačního hrotu, provádět cílenou záměnu jednotlivých atomů mezi hrotem a povrchem vzorku. Přítomnost různých chemických prvků na hrotu mikroskopu a povrchu pevné látky dává možnost provádět „zápis“ pomocí jejich cíleného přesunu na povrchu (viz. obr. 2). V daném případě bylo úspěšně vytvořeno slovo „Si“ (viz. obr. 2) pomocí cílené záměny atomů cínu (světlá kolečka) za atomy na povrchu křemíku (tmavá kolečka) při pokojové teplotě. Metoda byla úspěšně uplatněna i na jiné povrchy. Celý proces manipulace je velmi dobře reprodukovatelný. Rozsáhlé počítačové simulace (viz. obr. 3) umožnily detailně pochopit celý proces záměny jednotlivých atomů mezi hrotem a povrchem a významně přispěly k optimalizaci celého procesu zápisu jednotlivých atomů na povrch vzorku.

Nová metoda komplexní atomární manipulace řeší všechny závažné problémy, neboť umožňuje provádět kontrolovaným způsobem atomární manipulaci na libovolném povrchu pevné látky při pokojových teplotách substitucí jednotlivých atomů (viz obr. 2).



Obr 2 Průběh atomárního zápisu jednotlivých atomů křemíku (tmavá kolečka) na povrchu cínu (světlá kolečka) při vytváření předem definovaného vzoru, v tomto případě nápisu „Si“.

V této práci mezinárodní tým (Osaka University, Universidad Autónoma de Madrid a Fyzikální ústav AV ČR) prokázal možnost cílené manipulace jednotlivými atomy. Rozsáhlé kvantově mechanické výpočty ukázaly charakteristický průběh chemických vazebných sil mezi hrotem mikroskopu a atomem na povrchu, které jsou klíčem k pochopení experimentů metodou dAFM.



Obr 3 Výsledek počítačových simulací znázorňující vývoj atomové struktury během depozice křemíku (vpravo) nebo cínu (vlevo) na povrch pevné látky.

Tato nová metoda atomární manipulace pomocí mikroskopu atomárních sil znásobí již tak velké možnosti uplatnění AFM v oblasti studia katalýzy povrchů pevných látek, v oblasti nanotechnologií či biologických systémů. Spojení chemické identifikace s možností manipulovat jednotlivými atomy pomocí AFM na povrchu umožňuje konstrukci nanostruktur požadovaného chemického složení na mikroskopické úrovni. Například přesné umístění specifických dopantů na polovodičovém povrchu může výrazně zvýšit výkonnost nanometrických tranzistorů.

Kontakt

P. Jelínek  
 Fyzikální ústav AV ČR  
 Cukrovarnická 10, Praha 6  
 e-mail: [jelinekp@fzu.cz](mailto:jelinekp@fzu.cz)

toho času pobývajícím v rámci Fulbrightova stipendia :  
 Arizona State University  
 Department of Physics and Astronomy  
 Tempe, AZ 85287-1504  
 Office Phone: ++1 480 727 8897  
 Cell Phone: ++1 480 246 2310  
 e-mail: [pavel.jelinek@asu.edu](mailto:pavel.jelinek@asu.edu)