



## Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

**APVV-0207-11**

**Nanotip- Hrotom indukované procesy: zobrazovanie a nanomanipulácia**

Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Ivan Štich, DrSc.**

Príjemca **FÚ SAV**

### Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

1. Fyzikálny ústav SAV
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

### Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

1. Dept. of Applied Physics, Osaka University, Japan
2. Dept. of Physics, King's College London, U.K.
3. Institut für Angewandte Physik, Justus-Liebig-Universität Giessen, Germany

### Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

- 1.
- 2.
- 3.

### Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

1. J. Bamidele, S.H. Lee, Y. Kinoshita, R. Turanský, Y. Naitoh, Y.J. Li, Y. Sugawara, I. Štich, L. Kantorovich, Vertical atomic manipulation with dynamic atomic-force microscopy without tip Change via a multi-step mechanism, Nature Commun. 5, 4476 (2014).
2. J. Bamidele, Y. Kinoshita, R. Turanský, S. H. Lee, Y. Naitoh, Y. J. Li, Y. Sugawara, I. Štich, and L. Kantorovich, Chemical tip fingerprinting in scanning probe microscopy of an oxidized Cu(110) surface, Phys. Rev. B 86, 155422 (2012).
3. L. Horváthová, M. Dubecký, L. Mitas, I. Štich, Quantum Monte Carlo Study of  $\pi$ -bonded Transition-metal Organometallics: Neutral and Cationic Vanadium-benzene and Cobalt-benzene Half-sandwiches, J. Chem. Theor. Comput. 9, 390 (2013).
4. J. Bamidele, J. Brndiar, A. Gulans, L. Kantorovich, and I. Štich, Critical Importance of

van der Waals Stabilization in Strongly Chemically Bonded Surfaces: Cu(110):O, J. Chem. Theor. Comput. 9, 5578 (2013).

5. Y.-J. Li, J. Brndiar, Y. Naitoh, Y. Sugawara, and I. Štich, Atomic force microscopy identification of Al-sites on ultrathin aluminum oxide film on NiAl(110), Nanotechnology 26, 505704 (2015).

### **Uplatnenie výsledkov projektu**

Jedná sa o projekt základného výskumu, a tak hlavným uplatnením sú výsledky vo vysoko-impaktovaných časopisoch (9 a 2 v štádiu recenzovania) a pozvané prednášky na medzinárodných konferenciách (8). Projekt mal aj výraznú edukačnú a propagačnú dimenziu (práca a motivácia stredoškolskej mládeže (dokopy 6 akcií), články v dennej tlači (1x) aj cez výsledky dosiahnuté v projekte NANOTIP.

### **CHARAKTERISTIKA VÝSLEDKOV**

#### **Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku** (max. 20 riadkov)

Ťažisko projektu NANOTIP bolo v počítačových simuláciách SPM zobrazovania a nanomanipulácie, najmä NC AFM. Menšia časť projektu sa venovala kvantovému transportu cez nanoprechod hrot-vzorka a nanotribológii. Simulovali sme najmä experimenty našich partnerov v Osake a Giessene. Niekoľko našich výsledkov pokladáme za unikátne: 1) nájdenie etalónu na determinovanie a "vnútenie" atomárnej terminácie hrotu AFM mikroskopu, 2) unikátne obrazy a spresnenie modelu štruktúry ultra-tenkej vrstvy oxidu hliníka na NiAl(110), 3) vypracovanie metódy na kvantitatívnu analýzu manipulačných procesov, ktorej výsledkom sú spočítané manipulačné pravdepodobnosti a jej aplikácia na systém vertikálnej manipulácie atómov Cu na zoxidovanom povrchu Cu(110):O, 4) manipulácia magnetických atómov (Co) na zoxidovanom povrchu medi Cu(110):O a pochopenie mechanizmu ich delokalizácie/lokalizácie manipuláciou. Posledný výsledok je najvýraznejší, nakoľko sme ukázali, že a) pri manipulácii dochádza súčasne k zmene magnetického stavu/spinu atómu, b) manipulácia aktivuje okrem obvyklých krátko-dosahových interakcií hrot-vzorka aj dlho-dosahové interakcie, ktoré indukujú okolité atómy Co prostredníctvom tzv. Friedlových oscilácií nábojovej hustoty, c) výsledok týchto dlho-dosahových interakcií a tiež výslednej manipulácie je možné aktívne ovplyvniť laterálnou manipuláciou týchto atómov, d) model predpovedá existenciu Friedelovej "klietky", v ktorej je možné dlhodobo lokalizovať magneticky modifikovaný atóm, čo môže mať význam pre spintroniku.

#### **Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku** (max. 20 riadkov)

The focus of the NANOTIP project was computer modeling of SPM imaging and nanomanipulation, primarily NC-AFM. Smaller part of the project dealt with quantum transport through tip-sample nanojunction. We have simulated primarily experiments of our project partners in Osaka and Giessen. We believe some of our results to be unique: 1) finding a system for chemical tip fingerprinting and enforcement of a desired tip termination, 2) unique image quality and improvement of the structure of ultrathin alumina on NiAl(110), 3) design of a method for quantitative analysis of manipulation processes giving a direct access to computed manipulation probabilities and its application to vertical manipulation of Cu atoms on oxidized Cu(110):O surface, 4) manipulation of magnetic atoms (Co) on oxidized Cu(110):O surface, elucidation of the delocalization/localization manipulation. The last result is perhaps the most impressive as we have shown that, a) the manipulation is accompanied by a modification of magnetic state/spin of the atom, b) the manipulation uses, in addition to the ubiquitous short-range tip-sample interactions, also long-range interactions generated by surrounding Co atoms via Friedel oscillations of electronic charge density, c) the result of the long-range interaction and hence also of the manipulation can be affected by repositioning of the Co atoms by lateral manipulation, d) the model predicts existence of a Friedel "cage" where magnetic atom can be localized over macroscopic times in magnetically modified state.

Svojím podpisom potvrdzujem, že údaje uvedené v záverečnej karte sú pravdivé a úplné a súhlasím s ich zverejnením.

**Zodpovedný riešiteľ**

prof. ing. Ivan Štich, DrSc.

V Bratislave 29. 01. 2016

**Štatutárny zástupca príjemcu**

RNDr. Stanislav Hlaváč, CSc.

V Bratislave 29. 01. 2016

.....  
podpis zodpovedného riešiteľa

.....  
podpis štatutárneho zástupcu príjemcu