

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Vladimír Gregor

Nobelova cena za fyziku 1986: G. Binnig a H. Rohrer

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 32 (1987), No. 6, 316--318

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139474>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1987

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

né částice. Ve své slavné disertaci vyslovil L. de Broglie v roce 1924 hypotézu o vlně spojené s částicí a odvodil i velikost vlnové délky  $\lambda = h/m \cdot v$ , kde  $h$  je tzv. Planckova konstanta,  $m$  hmotnost částice a  $v$  její rychlost. Již v roce 1927 potvrzují Davisson s Germerem a G. P. Thomson s Reidem objevem difrakce elektronů na krystalové mříži vlnovou podstatu elektronů i velikost jejich vlnové délky předpověděné L. de Brogliem.

Po tomto objevu byla již samozřejmá snaha fyziků využít elektronových svazků, u nichž je možno dosáhnout velmi malých vlnových délek ve vysokém urychlovacím napětí (asi 4 pikometry při 100 000 V) k zobrazení detailů struktury hmoty.

Tyto práce dospěly nejrychleji k cíli na Elektrotechnickém institutu Vysoké školy technické v Berlíně. V roce 1931 uveřejňují Max Knoll a Ernest Ruska v časopise *Zeitschrift für Technische Physik* konstrukci prvního elektronového mikroskopu s magnetickými čočkami. Vývoj elektronového mikroskopu pokračoval nejen v Německu. Před druhou světovou válkou byly elektronové mikroskopy zkonstruovány i v jiných evropských zemích, ve Spojených státech amerických a v Sovětském svazu.

Byl to ovšem opět Ernest Ruska, který byl spolukonstruktérem elektronového mikroskopu s rozlišením lepším než dva nanometry. Tento mikroskop byl základem pro konstrukci nejuspěšnějšího poválečného komerčního elektronového mikroskopu Elmiskop I fy. Siemens-Halske. Ernest Ruska se též podílel na interpretaci zobrazení struktury v elektronovém mikroskopu.

Tak pionýrská práce Ernesta Rusky předznamenala a započala bouřlivý rozvoj elektronové transmisní mikroskopie, která dnes je neodmyslitelnou metodou

studia strukturních vlastností kovů, slitin, polovodičů, tenkých vrstev různých materiálů, biologických preparátů, bakterií, virů a dnes již i struktury molekul. Transmisní elektronová mikroskopie dosáhla hranice rozlišení jednotlivého atomu, nejmodernější mikroskopy mají rozlišovací schopnost 150 pikometrů.

Byla ovšem i začátkem vývoje dalších typů mikroskopů užívajících elektronový svazek k zobrazení struktury – odrazový EM, emisní EM, řádkovací (scanning) EM, zrcadlový EM, jakož i metod užívajících jevů difrakce elektronového svazku ke studiu struktury i analýzy složení. Ocenění, kterého se E. Ruskovi po 55 letech dostalo, je nejen oprávněné, ale osobně se domnívám, že k němu mělo dojít již mnohem dříve.

#### Literatura

- [1] Rudé Právo z 16. 10. 1986.
- [2] R. D. HEIDENREICH: *Fundamentals of Transmission electron microscopy*. Interscience pub., London, 1964.
- [3] E. RUSKA: *Die frühe Entwicklung der Elektronenlinsen und der Elektronenmikroskopie*. Acta Historica Leopoldina, Leipzig, 12, 1979.
- [4] G. BINNIG and H. ROHRER: *Scanning Tunnel-Microscopy*. Trends in Physics. Proc. of 6-th Gen. Conf. of EPS, Prague, 1984, p. 38.

NOBELOVA CENA ZA FYZIKU  
1986: G. BINNIG A H. ROHRER

*Vladimír Gregor, Praha*

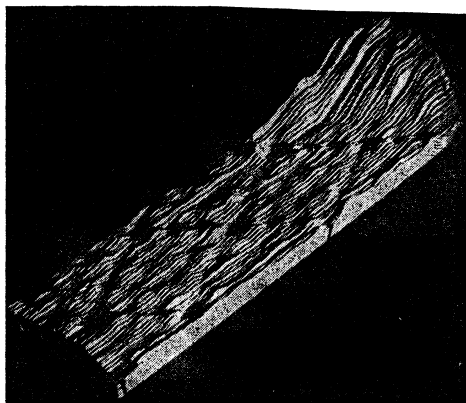
Zatímco první část Nobelovy ceny za fyziku pro r. 1986 byla udělena za objev, který v průběhu více než 50 let našel mnohostranné využití v mnoha oborech, spatřil řádkovací tunelový mikroskop

(ŘTM), za jehož konstrukci získali Gerd Binnig a Heinrich Rohrer druhou část této Nobelovy ceny, světlo světa teprve nedávno, a to v r. 1981. Tehdy se podařilo těmto dvěma pracovníkům Curyšské výzkumné laboratoře firmy IBM v Rüşchlikonu ve Švýcarsku realizovat první verzi přístroje, který na základě tunelového jevu umožňuje zobrazení povrchu pevných látek v reálném prostoru s atomovým rozlišením.

Tunelování elektronů mezi vodiči oddělenými potenciálovou bariérou bylo popsáno již v období počátků kvantové mechaniky. Elektron reprezentovaný vlnovou funkcí proniká do klasicky zakázané oblasti a tuneluje potenciálovou bariérou, pokud je dostatečně úzká. Tunelový proud je dán vztahem, který obsahuje exponenciální faktor  $\exp(-A\Phi^{1/2}s)$ , kde  $A \doteq \doteq 10 \text{ nm}^{-1} (\text{eV})^{-1/2}$ ,  $\Phi$  je efektivní výška potenciálové bariéry a  $s$  její šířka. K tomu, aby bylo možno pozorovat při vloženém napětí mezi elektrody tunelový proud, musí být  $s$  řádově jednotky nm. Tenkovrstvé tunelové přechody, v nichž jsou plošné elektrody odděleny dielektrickou nebo polovodičovou mezivrstvou právě této tloušťky, slouží při studiu elektronové struktury pevných látek již řadu let. Potenciálovou bariérou je v tomto případě zakázaný pás materiálu mezivrstvy. Naproti tomu idea tunelování vakuovou mezerou zůstávala nerealizována, přestože o ní uvažoval jistě každý, kdo se trápil se zkraty v bariérové mezivrstvě. Hlavní překážkou realizace vakuového tunelování je vliv mechanických vibrací, které je nutno potlačit natolik, aby bylo možné stabilně nastavit potřebnou mezielektrodovou vzdálenost.

A právě na tento tenký led se pustili v r. 1979 Binnig a Rohrer, když se rozhodli zkonstruovat lokální povrchovou sondu

na principu vakuového tunelování [1]. Otázku vibrací úspěšně vyřešili tím, že izolovali zařízení od vnějších mechanických vlivů důmyslným systémem pružných elementů. Vlastní uspořádání přístroje zvolili podobné hrotovému profilometru: elektroda ve tvaru ostrého hrotu se pohybuje v řádcích ve vzdálenosti kolem 1 nm nad povrchem rovinné elektrody – vzorku. Hrot, nejčastěji wolframový, je namontován na piezoelektrickém třísém nosiči, který zajišťuje jeho jemné pohyby ve směru  $z$  kolmém k povrchu vzorku i příčně (směry  $x$ ,  $y$ ), s vysokou přesností danou citlivostí piezoelementů 0,2 nm/V. Při napětí několika voltů mezi hrotem a vzorkem protéká tunelový proud, charakteristický výše uvedenou exponenciální závislostí na vzdálenosti. A právě tato strmá závislost – změna vzdálenosti  $s$  o jednu desetinu nm vede ke změně tunelového proudu o jeden řád – je základem vysoké rozlišovací schopnosti ŘTM. Pomocí zpětné vazby mezi tunelovým proudem  $I$ , a napětím  $U_z$  na  $z$ -piezoelementu lze udržovat  $I$ , a tedy i vzdálenost  $s$  konstantní. Za předpokladu plošně homogenní výstupní práce (efektivní výška tunelové bariéry) lze takto získat informace o povrchovém rozložení náboje, a tedy i o reliéfu povrchu s atomovým rozlišením. Tunelově mikroskopický graf je systém křivek  $U_z = U_z(U_x, U_y)$ , kde  $U_x$ ,  $U_y$  jsou napětí na piezoelementech v příčných směrech  $x$  a  $y$ . Současná špičková rozlišovací schopnost ŘTM je 0,01 nm pro směr kolmý ke vzorku a 0,2 nm ve směrech příčných. Pro dešifrování vlivu lokálních změn výstupní práce a lokálního energetického rozdělení elektronů slouží derivace  $I$ , podle vzdálenosti  $s$  a napětí  $U$  mezi hrotem a vzorkem. Křivky  $dI/ds$  představují profily výstupní práce, závislosti  $dI/dU$  mohou poskytnout informace o lokální hu-



Obr. 1. Tunelově-mikroskopický graf rekonstrukce typu  $7 \times 7$  povrchu (111) monokrystalu křemíku. Jsou patrné dvě úplné romboedrické elementární buňky.

stotě elektronových stavů (ŘTS – řádkovací tunelová spektroskopie).

Metoda řádkovací tunelové mikroskopie se setkala se živým zájmem na dalších pracovištích a od počátku 80. let se rychle rozvíjí [2]. První mezinárodní konference o ŘTM se konala v loňském roce ve španělském Santiagu de Compostello. Nová metoda umožnila řešit celou řadu otázek fyziky a chemie povrchů, např. některé otázky rekonstrukce monokrystalických povrchů a analýzy adsorbovaných vrstev. Obrázek rekonstrukce povrchu (111) monokrystalu Si na stránkách populárně vědeckých časopisů doslova obletěl svět. Aplikace lze očekávat i při studiu neperiodických povrchů, kde je tunelová mikroskopie jako metoda zobrazení v reálném prostoru velmi slibná. V mnoha případech poskytuje princip vakuového tunelování možnost obejít nesnáze spojené s tenkovrstvými bariérami a získat navíc lokálně definované spektroskopické údaje. Perspektivní je rovněž zobrazení v nanometrové oblasti, tzn. s rozlišením několika

nm, např. při studiu růstu tenkých vrstev, různých technologických procesů (leptání) a hrubosti povrchů. Vzhledem k možnosti přizpůsobení ŘTM různým prostředím (vzduch, voda, olej) nabízí se možnost studia některých biologických objektů v přirozených podmínkách. Hrot ŘTM si lze představit i jako aktivní nástroj a detektor různých záměrně navozených lokálních změn (mechanických, elektrických, tepelných) na povrchu pevných látek – nanoobrábění, nanášení a odebrání materiálu, chemické a litografické procesy, zejména v mikroelektronice. Není sporu o tom, že ŘTM – tento „malý elektro-mechanický zázrak“ má před sebou ve fyzice a chemii povrchů velkou budoucnost.

S oběma lauréaty jsme měli možnost se seznámit v Praze v srpnu r. 1984, kdy se zúčastnili 6. generální konference Evropské fyzikální společnosti, na níž převzali za konstrukci ŘTM cenu společnosti dotovanou firmou Hewlett-Packard, jednu z poct, jež předcházela Nobelově ceně. Heinrich Rohrer se narodil v r. 1933 v Buchsu ve Švýcarsku, promoval na Eidgenössische Technische Hochschule v Curychu, v laboratořích IBM pracuje od r. 1963. Mladší z dvojice, Gerd Binnig (nar. r. 1947), pochází z Frankfurtu nad Mohanem v NSR, v r. 1978 promoval na tamní Univerzitě W. Goetheho. V témže roce nastoupil do výzkumné laboratoře IBM v Curychu.

#### Literatura

- [1] BINNIG G., ROHRER H.: Čs. čas. fyz. A 36 (1986), 209.
- [2] BINNIG G., ROHRER H.: IBM J. Res. Develop. 30 (1986), 355.