

9. Kvantové inženýrství

To, o čem chci mluvit, je otázka manipulace a řízení věcí v malém měřítku... Jedná se o závratně malý svět, který leží pod světem naším. Až se lidé v roce 2000 podívají zpět na naši epochu, budou se divit, proč se tímto směrem někdo doopravdy vydal teprve v roce 1960.

Richard Feynman

Richard Feynman a nanotechnologie

Na setkání americké fyzikální společnosti v Pasadeně roku 1959 předložil Richard Feynman při své večerní přednášce nazvané „Dole je hodně místa“, pozoruhodnou vizi budoucnosti. Jeho přednáška měla podtitulek „Pozvánka ke vstupu do nové oblasti fyziky“ a znamenala počátek toho, co je dnes známo jako „nanotechnologie“. Nanotechnologie se zabývá manipulací hmoty v měřítku nanometrů – tisícín miliontiny metru. Atomy mají typicky velikost několika desetin nanometru. Feynman zdůrazňoval, že tento úkol nevyžaduje novou fyziku:

Nevynalézám antigravitaci – což je myslitelné pouze tehdy, pokud jednoho dne zjistíme, že fyzikální zákony nejsou takové, jak si myslíme. Říkám vám, co by bylo možné dělat, pokud fyzikální zákony jsou takové, jak si myslíme – neděláme to prostě proto, že jsme se do toho zatím nepustili.

Při své přednášce vypsál Feynman dvě ceny po 1.000 dolarech – jednu „pro prvního chlapíka, který vyrobí funkční elektromotor, jenž bude mít objem pouhé čtvrtiny krychlového centimetru“ a druhou „pro prvního chlapíka, který dokáže vzít informace z jedné stránky knihy a uložit je na plochu 25.000 krát menší“. Obě tyto ceny musel vyplatit – první z nich Billu McLellanovi, absolventovi Caltechu, a to již za necelý rok. McLellan si s sebou vzal mikroskop, aby Feynmanovi ukázal miniaturní motor, který měl výkon jedné miliontiny koňské síly. Ačkoliv mu Feynman cenu vyplatil, byl pro něj tento motor zklamáním, neboť nevyžadoval žádný technologický pokrok – Feynmanova výzva nebyla dostatečně obtížná! V aktualizované verzi své přednášky, kterou přednesl o 20 let později, spekuloval o tom, že s moderní technologií bude možné masově vyrábět motory o rozměrech čtyřicetkrát menších, než měl původní McLellanův motor. Feynman také předpovídal, že takovéto mikrostroje bude vyrábět řetězec „napodobujících se“ strojů, každý z nichž by vyráběl nástroje a stroje o velikosti jedné čtvrtiny sebe sama. Feynman byl tehdy rozpačitý z toho, že si pro takovéto

maličké strojky nedokázal představit žádné využití, a jeho zájem o toto téma byl čistě akademický. Po čtyřiceti letech od Feynmanovy původní přednášky stojíme na počátku epochy, kdy, jak uvidíme (nebo spíše neuvidíme), budou mikrosystémy používány ve všech možných oblastech od lékařských čidel až po soustavy drobných optických zrcadel. Některé z těchto příkladů si popíšeme v příštím oddíle.

Obrázek 9.1: Richard Feynman si mikroskopem prohlíží drobný motorek Billa McLellana. Poté, co vypsál odměnu za mikroskopický elektromotor, zavalil Feynmana přívál lidí, kteří mu chtěli ukázat výsledky svého snažení. Feynman pochopil, že McLellan se od všech ostatních kandidátů liší, když první věc, kterou vytáhl z krabice, byl mikroskop, který mu měl umožnit motor spatřit.

Teprve 26 let po své první přednášce musel Feynman vyplatit i druhou cenu. Obtížnost tohoto úkolu byla stejná, jako byste všech dvacet čtyři svazků *Britské encyklopedie* měli zapsat na špendlíkovou hlavičku. Tom Newman byl v roce 1985 studentem na Stanfordu a pomocí techniky nazývané „elektronová litografie“ ryl do křemíku obrazce potřebné pro výrobu integrovaných obvodů. Kamarád mu ukázal kopii Feynmanovy přednášky z roku 1959 a upozornil ho na tu část, která slibovala odměnu za „malé písmo“. Newman vypočítal, že bude muset jednotlivá písmena zmenšit tak, aby byla široká pouze 50 atomů. Věřil, že by to mělo být možné, pokud svůj přístroj vysílající svazek elektronů správně naprogramuje. Poslal tedy Feynmanovi telegram, aby si ověřil, že vypsaná nabídka stále ještě platí. Byl velice překvapený, když mu do laboratoře zavolal Feynman a tuto informaci potvrdil. Newman měl ovšem správně dokončovat svou diplomovou práci, a tak musel počkat, dokud jeho vedoucí neodjel na několik dní do Washingtonu, a teprve potom se o zápis pokusil. Naprogramoval svazek tak, aby do křemíku zapsal první stránku románu *Příběh dvou měst* od Charlese Dickense. Ukázalo se, že největším problémem je tuto drobnou stránku na křemíkové ploše vůbec po zápisu najít! Newman Feynmanův šek řádně obdržel v listopadu 1985.

Obrázek 9.2: Fotografie miniaturní stránky Toma Newmana. Newman dokázal vyrýt první stránku románu *Příběh dvou měst* od Charlese Dickense v měřítku, v němž bylo každé písmeno široké pouhých 50 atomů, ale největší potíže ho čekaly, když na křemíkovém povrchu tento droboučký text hledal.

Ve své přednášce Feynman také tyto úvahy rozšířil až na atomární úroveň. Předvídal dobu, kdy bude možné atomy přeskupovat na zakázku. Už nebude nutné syntetizovat chemikálie tradičním způsobem:

...v podstatě bude (myslím) fyzik schopen syntetizovat jakoukoliv chemickou látku, kterou mu chemik napíše. Dejte mu pokyny a fyzik látku syntetizuje. Jak? Položte atomy tam, kam říká chemik, a takto danou látku vyrobíte.

Tento sen se dnes začíná realizovat. Don Eigler a jeho kolegové ve výzkumném centru společnosti IBM v Almadenu manipulují s jednotlivými atomy pomocí skenovacího tunelového mikroskopu, který vynalezli jejich kolegové z IBM v Curychu. Kromě toho, že vytvořili nejmenší logo IBM na světě (obrázek 5.13) a sestrojili působivé kvantové „ohrádky“ (obrázek 9.3, viz též obrázek 4.13), vyrobili Eigler a jeho skupina také „umělé“ molekuly a to jeden atom po druhém (obrázek 9.4). Také výzkumná skupina Wilsona Ho na Cornellově univerzitě takto dokáže vytvářet molekuly: spojili jednu molekulu oxidu uhelnatého s atomem železa a studovali vibrační vlastnosti výsledné molekuly (obrázek 9.5). I když je takovéto konstruování molekul působivé, pravděpodobně budeme muset nejprve vynalézt odlišnou technologii a teprve pak dokážeme vytvářet alespoň trochu složitější organické molekuly.

Obrázek 9.3: Kvantová ohrádka, kde jsou vidět povrchové vlny zachycených elektronů.

Obrázek 9.4: Umělá molekula vytvořená přesunováním jednotlivých atomů. Tato molekula se skládá z 8 atomů cesia a 8 atomů jódu.

Obrázek 9.5: Další ručně vyrobená molekula obsahující monokarbonyl železa ($\text{Fe}(\text{CO})$).

V této kapitole se podíváme na některé další kroky, které míří k uskutečnění Feynmanovy vize. Při tomto vývoji je klíčové to, že jsme si uvědomili, že život ve světě pod námi je v podstatě kvantově mechanický. Právě tento poznatek podnítl fascinující rozvoj v oblasti kvantové teorie informací a kvantových počítačů. Než se pustíme do rozboru těchto aplikací kvantové mechaniky, bude užitečné znovu se podívat na budoucnost polovodičového průmyslu. Právě úsilí techniků v této oblasti během druhé poloviny 20. století změnilo radikálně naši společnost. Copak nám asi přinese následujících 50 let?

Gordon Moore, spoluzakladatel společnosti Intel a průkopník polovodičové technologie již od jejího nejranějšího období. Moorea, který promoval z chemie na Caltechu, zaměstnal roku 1956 William Shockley v první rozjíždějící se společnosti v Křemíkovém údolí. V článku pro časopis *Electronics* poznamenal Moore, že mezi lety 1962 a 1965 se počet součástek v integrovaném obvodu každý rok zdvojnásoboval a roku 1965 dosáhl hodnoty 50 součástek na čip. Odvážně prohlásil, že toto každoroční zdvojnásobování bude pokračovat po následujících deset let, až budou nakonec v roce 1975 čipy obsahovat okolo 65 000 součástek. V roce 1977 napsal jeho kolega Robert Noyce v časopise *Scientific American*, že nebyla zaznamenána žádná významná odchylka od „Mooreova zákona“. I když se dnes má obecně za to, že ono zdvojnásobení každých 12 měsíců se odehrává spíše každých 18 měsíců, pokračuje tento trend narůstající complexity dodnes.

Od Mooreova zákona ke kvantovým tečkám

V 6. kapitole jsme se setkali s Robertem Noycem, fyzikem z MIT, který si jako první patentoval technologii umožňující masovou výrobu integrovaných obvodů. V roce 1957 patřili Noyce a Gordon Moore, fyzikální chemik z Caltechu, mezi první zaměstnance Shockley Semiconductor Laboratory – úplně první „high-tech“ společnosti, která byla založena v Křemíkovém údolí dávno před tím, než se tato oblast pod tímto jménem proslavila. Protože Noyce a Moore byli nespokojeni se stylem řízení a strategickými rozhodnutími zakladatele společnosti, nositele Nobelovy ceny Williama Shockleyho, opustili ji a spolu s dalšími šesti zaměstnanci (Shockley je údajně označoval za „zrádcovskou osmičku“) založili novou společnost, kterou pojmenovali Fairchild Semiconductor. V roce 1961 představila společnost Fairchild díky Noyceově planárnímu procesu výroby integrovaných obvodů první komerční křemíkové integrované obvody. Jak o mnoho let později Noyce řekl:

Když jsme tento [planární proces] dokončili, měli jsme křemíkový povrch pokrytý jedním z nejlepších izolátorů, které lidstvo znalo, takže jste do něj mohli leptat díry, aby došlo ke kontaktu s podložním křemíkem. Potom jste samozřejmě měli řadu tranzistorů zapuštěných do izolujícího povrchu, no a místo toho, abyste je odřízli fyzicky, jste je potom odřízli elektricky, přidali jste další součástky, které jste v obvodech potřebovali, a nakonec propojovací vedení.