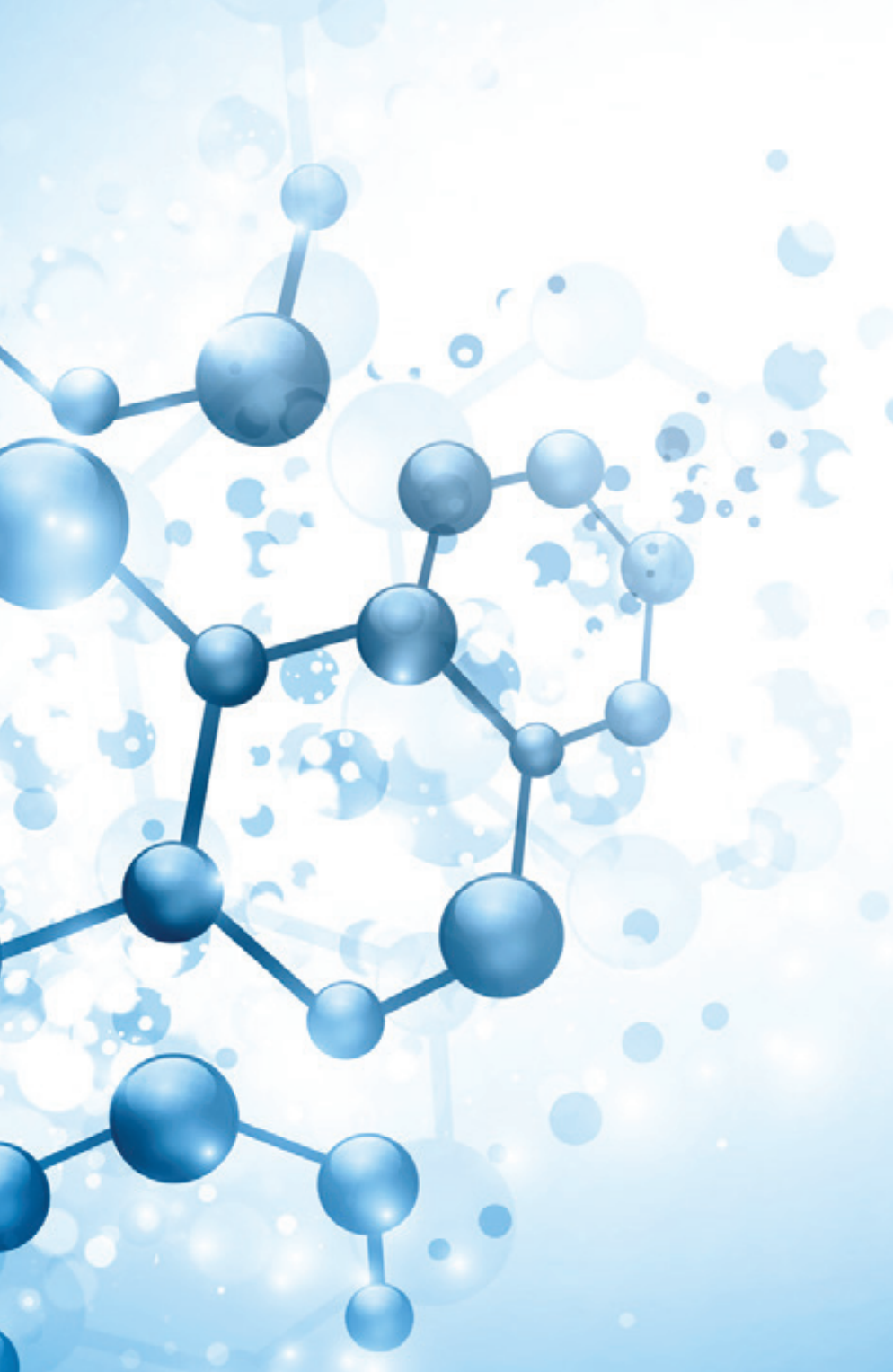


pohľady do  **NANOSVETA**



Štefan Luby

pohľady do 
NANOSVETA



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/
Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ



Štefan Luby

Pohľady do nanosveta

Táto publikácia bola spracovaná v rámci implementácie národného projektu PopVaT – Popularizácia vedy a techniky na Slovensku (26220220181, 26240220085)

Pre Centrum vedecko-technických informácií SR

www.cvtisr.sk

vydalo Vydavateľstvo Matice slovenskej, s. r. o.

www.vydavatel.sk

Prvé vydanie 2015

Text © Dr. h. c. prof. Ing. Štefan Luby, DrSc.

Fotografie © prof. Ing. Július Cirák, CSc., DrSc., RNDr. Petr Jelínek, PhD., doc. RNDr.

Peter Kopčanský, Dr. Rer. Nat. Ivan Kostič, CSc, RNDr. Eva Majková, DrSc., Ing. Voj-

tech Nádaždy, Prof. Dr. Roberto Rella, doc. Ing. Viera Skákalová, DrSc., prof. RNDr.

Pavol Šajgalík, Dr. Rer. Nat. Peter Šiffalovič, PhD., DrSc., prof. Ing. Ivan Štich, DrSc.,

Ing. Ivo Vávra, CSc., Fotky&Foto

Ilustrácie © Mgr. Kristián Petrik

Zodpovedná redaktorka: Ing. Jana Matejíčková

Jazyková redaktorka: Mgr. Mária Popovičová

Grafická úprava © Ing. Roman Krause

© Centrum vedecko-technických informácií SR, 2015

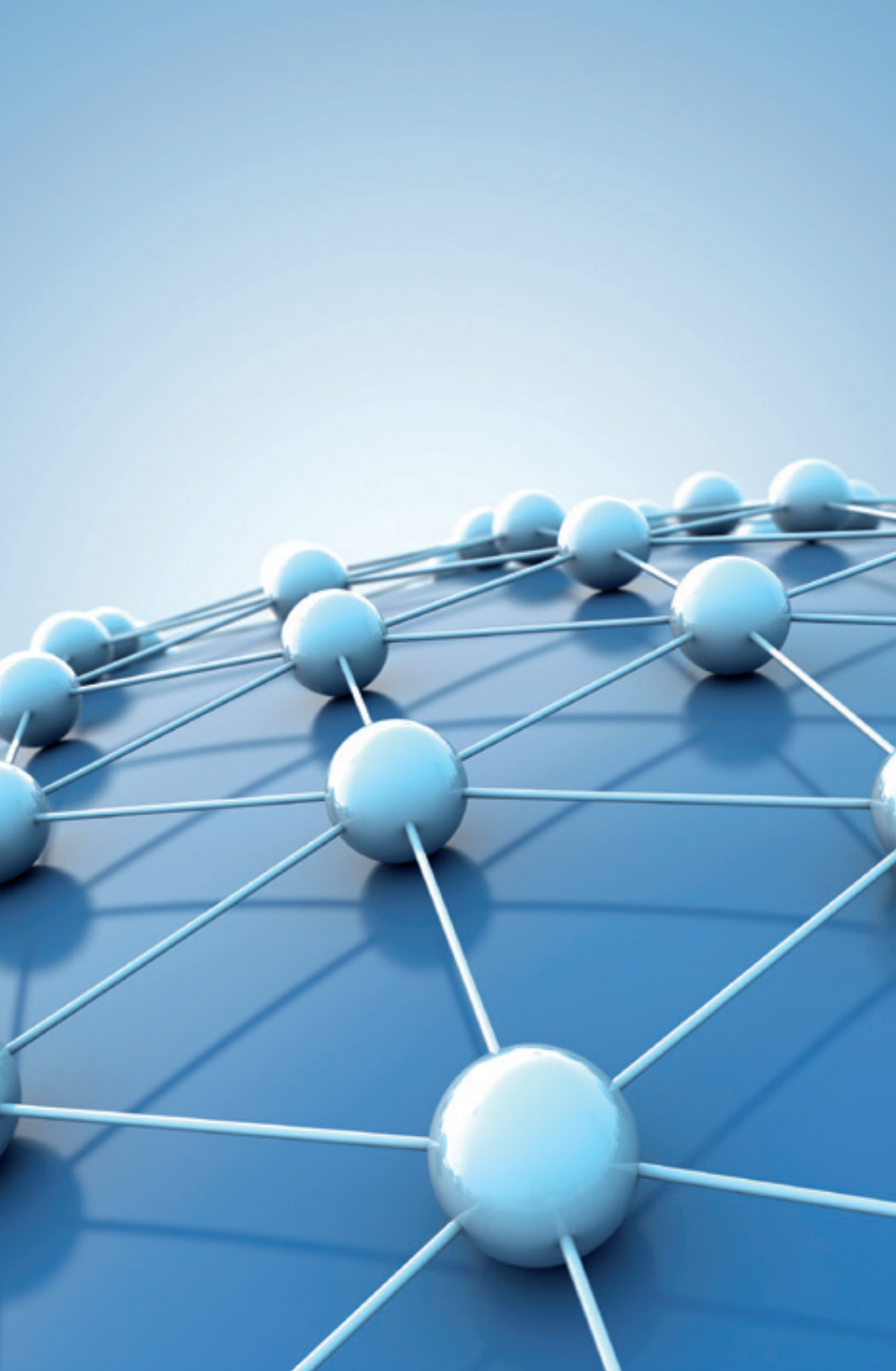
Tlač: NEOGRAFIA, a. s., Martin

Nepredajné

ISBN 978-80-8115-207-8

Obsah

1. Úvod	7
2. Čo je nanoveda a nanotechnológia	11
3. Míľníky rozvoja nanovedy a nanotechnológií	16
4. Extrapolácia mikrotechnológie do nanosveta	19
5. Rastrovací tunelový mikroskop a mikroskop atomárnych síl – prielomy v poznávaní	22
6. Feynmanov myšlienkový svet	28
7. Vytváranie štruktúr zhora nadol – litografia a leptanie	30
8. Zdroje nových kvalít v nanosvete	35
9. Čo prinesie budúcnosť?	43
10. Sú nanotechnológie škodlivé?	46
11. Grafén, uhlíkové nanorúrky, fullerény	50
12. Nezodpovedané otázky	57
12.1. Skladanie štruktúr atóm po atóme – áno či nie?	57
12.2. Budúcnosť kremíka	59
13. Spoločenské a humanitné vedy v nanovede a nanotechnológii, nanoetika – nový smer rozvoja etiky	62
13.1. Zvyšovanie ľudských schopností	62
13.2. Zdravie a bezpečnosť, nanomedicína	63
13.3. Usmernenia v nanovede a nanotechnológii	65
13.4. Vojenské použitia	65
13.5. Ochrana súkromia	66
13.6. Ekonomické súvislosti nanovedy a nanotechnológií	66
13.7. Je na mieste bezhraničné nano-nadšenie?	68
13.8. Nové pohľady na nanovedu a nanotechnológie	68
14. Základy biomimetiky	70
15. Vybrané aplikácie nanovedy a nanotechnológií vo výskume na Slovensku	72
15.1. Technológia prípravy a samousporiadania nanočastíc	72
15.2. Nanočasticové oxidové senzory plynov	76
15.3. Plazmonické fotovoltické články	82
16. Doslov	87
Pojmy, skratky, vybrané fyzikálne veličiny a konštanty	89
Portréty priekopníkov nanovedy a nanotechnológií	94
Literatúra	105



1. Úvod

Nanoveda a nanotechnológie (N&N) sú dnes významným zdrojom nových znalostí v prírodných vedách a ich tvorcovia sú oceňovaní poctami vrátane Nobelových cien. Sú aj východiskom nových technických a medicínskych riešení. Hlavnými oblasťami N&N, z ktorých vyviera nová kvalita, je výskum materiálov a elektronika. Tvorivosť nanovedy sa opiera o spoluprácu fyziky, chémie, biológie, materiálového výskumu a inžinierskych disciplín. Na ich rozhraniach je ešte veľa nepreskúmaného, čím možno vysvetliť veľkú tvorivosť N&N.

Optimistické predpovede, ktoré sprevádzajú vznik každej novej technológie, považujú nanotechnológie za všeliek na neduhy našej stále neekologicky využívanaj a preľudnenej planéty. V protiklade vystupuje vízia *armagedonu* – biblickej skazy a zániku civilizácie hlásaná odporcami tejto disciplíny, ktorí poukazujú na jej odvrátenú tvár skrývajúcu hrozby a nebezpečenstvá. Rozsúdenie sporu je popri prírodných a technických vedách v rukách lekárskech, spoločenských a humanitných vied. V tejto knižke sa preto venujem aj nanoetike, ktorá sa formuje ako objednávka riešenia tohto problému. Je to potrebné tým skôr, že na Slovensku, kde je veda a technika podporovaná slabo, sa odvrátená stránka nových technológií zo strany výskumu radšej nez dôrazňuje a zatiaľ ju nevnímajú ani médiá (hoci vo všeobecnosti rady poskytujú priestor katastrofickým scenárom). Úlohou je prezentovať N&N vyvážene.

Nanovedu a nanotechnológie nepovažujeme za východisko novej priemyselnej alebo informačnej revolúcie, ale za revolúciu v kvalite života ľudí. Pochopíme to, ak si zhrnieme oblasti, do ktorých táto nie jednotlivá technológia, ale dnes už široké hnutie, prispieva. Musím začať nanoelektronikou a fotonikou, ktoré sa rozvíjajú ďalšou miniaturizáciou, zmenšovaním súčiastok a obvodov mikroelektroniky 20. storočia, ktorá zmenila jeho tvár. Pre nanoelektroniku a fotoniku je typické vytváranie štruktúr postupom nazývaným *zhora nadol*, teda odoberaním materiálu, ktorý z hľadiska výrobku, napr. integrovaného obvodu, nebude

potrebný (podobne, ako keď sochár vytesáva z kamenného bloku sochu). V N&N sú však na čele materiálové technológie, pričom novou metódou je technika *zdola nahor*. Odvíja sa od postrehu vizionára tohto odboru, Richarda Feynmana, ktorý r. 1959 urobil známe konštatovanie, že *zákony fyziky neprotirečia manipulovaniu, teda skladaniu látok atóm po atóme*. S odstupom 55 rokov sa musíme pokloniť Feynmanovej prezieravosti, ktorý v rokoch, keď okolo Zeme krúžili prvé sovietske Sputniky a americké Explorery (1957 – 1960) a časopis Science uverejnil bombastické predpovede o rozvoji dopravy¹, obracal pozornosť od nespĺniteľných snov o kolóniách na planétach k reálnej ceste pokroku. Tou je pokračujúca miniaturizácia, súčasný zdroj nových vlastností a funkcií materiálov. Feynmanom spomínaný *priestor tam na dne* nie je geometrickým priestorom, ale priestorom pre rozvoj spoločnosti. Kto mu nedal za pravdu vtedy, musí pochopiť správnosť jeho úvah teraz, ak si uvedomí, že už pred 20 rokmi stálo vynesenie 1 kg látky na obežnú dráhu okolo Zeme takmer 10 000 US dolárov. Pritom miniaturizácia je zároveň cesta udržateľného pokroku.

Oblasť, v ktorej nanoveda a nanotechnológie pôsobia, zahŕňa teda súbor materiálových a lekárskeho odborov s presahom do spoločenských a humanitných vied. Z materiálov treba spomenúť kovy, ich zliatiny, keramiku, polyméry, kompozitné materiály, či už majú polovodičové, supravodičové, magnetické, izolačné alebo fotonické vlastnosti. Pozornosť sa venuje najmä trojici keramika – polyméry – kompozitné materiály, ktorých celková výroba prevýšila v 50-tych rokoch 20. storočia výrobu kovov, čo vyústilo do názoru, na prvý pohľad paradoxného, že doba železná sa skončila až v polovici minulého storočia. Z aplikačných a priemyselných odborov uvediem metalurgiu, protikoróziu ochranu, tribológiu, chémiu vrátane petrochémiu a katalýzy, energetiku zahrnujúcu klasické i obnoviteľné zdroje, najmä veternú a solárnu energetiku, ale aj materiály pre jadrovú fúziu a štiepenie,

1 Podľa časopisu Science z októbra 1967 mali r. 2000 vlaky jazdiť rýchlosťou 800 km/h v evakuovaných tuneloch, let zo Sydney do Londýna mal trvať 50 min a vedenie vozidiel malo byť plne automatizované.

uskladňovanie a transport energie. Patria sem aj environmentálne techniky, aplikácie v poľnohospodárstve a potravinách, v biotechnológii a medicínskych technológiách, farmácii a kozmetike. Osobitnými disciplínami prestupujúcimi N&N sú meranie, vojenské technológie a oblasť civilnej bezpečnosti.

Prehľad o členení N&N možno získať v štúdiu *Nanoveda a nanotechnológia, akčný plán pre Európu*. Márne by tu však niekto hľadal vojenské aplikácie, pričom každému musí byť zrejmé, že bez nich by sa N&N nepodporovali v takej miere, ako sa to robí dnes. Vojenskej oblasti sa na rozdiel od iných štúdií dotkli autori monografie *Čo je nanotechnológia a aký je jej význam? Od vedy k etike*.

Nanoveda a nanotechnológie zaznamenali v 20. storočí rýchly vývoj. Svedčia o ňom výroky známych osobností:

- Ernst Mach, 1900: „Atómy nemôžeme vnímať zmyslami. Existujú iba v našich predstavách.“
- Richard Feynman, 1959: „Princípy fyziky nie sú v rozpore s manipulovaním vecí atóm po atóme“ (NC za fyziku).
- Horst Störmer, 1999: „Nanotechnológia nám dala nástroje... hrať sa s konečnými hračkami prírody – atómami a molekulami. Všetko je zhotovené z nich... možnosti vytvárania nových vecí sa zdajú byť neobmedzené“ (NC za fyziku).
- Roald Hoffmann, 1999: „Nanotechnológia je cestou dômyselnej kontroly a budovania malých a veľkých štruktúr so zložitými vlastnosťami“ (NC za chémiu).
- Richard Smalley, 2000: „Nanotechnológia je umenie budovať súčasti na ďalej už neprekonateľnej úrovni atóm po atóme“ (NC za chémiu).
- M. Nakamura, fa Hitachi: „Tí, ktorí kontrolujú nanotechnológie, vedú priemysel.“
- T. Kirkpatrick, fa General Electric: „Najväčším prelomom v nanotechnológii budú nové materiály.“

- A. Maynars: „Naša schopnosť dosiahnuť v nanotechnológii dlhodobé prínosy závisí od toho, ako dokážu priemysel a vlády kontrolovať bezpečnosť prvej generácie nanotechnologických produktov.“

V priebehu sto rokov sme sa teda prepracovali od „mystického“ neviditeľného atómu k jeho využitiu ako stavebného prvku súčiastok, ktorý vidíme, vieme ho uchopiť a premiestniť. Nanoveda sa opiera o významné objavy a vynálezy, z ktorých viaceré boli ocenené Nobelovými cenami. Práve takéto poznatky sú zdrojom pozoruhodnej dynamiky N&N. Profily laureátov týchto cien, ale aj domácich priekopníkov N&N, som preto zhrnul v prílohe č. 1.

Vzhľadom na určenie knihy žiakom stredných škôl som sa opieral o spracovanie poznatkov na úrovni bežných encyklopédií, ako je Beliana, Ottova všeobecná encyklopédia a hlavne Školský lexikón, odporúčaný Ministerstvom školstva SR ako doplnková náučná literatúra.

Prvým podnetom na vznik tejto knižky bolo pozvanie na konferenciu pre mladých výskumníkov organizovanú v írskom Corku r. 2013, kde som mal prednášku *Prognóza v nanotechnológiách – výskum a perspektívy*. Jej rozširovaním v nadväznosti na výskum nášho Oddelenia materiálov a nanoštruktúr (OMN) vo Fyzikálnom ústave SAV i v rámci činnosti Centra excelentnosti SAV CESTA pri Prognostickom ústave SAV som dospel k súčasnej podobe textu. Za pomoc a podporu ďakujem spolupracovníkom z Fyzikálneho ústavu SAV, vedúcej OMN E. Majkovej, P. Šiffalovičovi, M. Jergelovi, M. Benkovičovej, J. Ivančovi a K. VEGSÖVI, vedúcej Centra excelentnosti CESTA M. Lubyovej, organizátorom konferencie v Corku T. Wagnerovi a M. Bárdošovej, spolupracovníkom zo zahraničia, najmä U. Heinzmannovi z Univerzity Bielefeld v Nemecku, A. Luchesovi, M. Martinovi a A. P. Caricatovej z Univerzity Salento v Taliansku a R. Rellovi z CNR Lecce, Taliansko. Za pripomienky k textu patrí moja vďaka doc. RNDr. Ivanovi Červeňovi, CSc., a Ing. Matejovi Jergelovi, DrSc.

2. Čo je nanoveda a nanotechnológia

Nanoveda a nanotechnológia sa zaoberajú výskumom a využitím materiálov s geometrickými rozmermi² v rozsahu 1 – 100 nm. Rozsah 100 – 1000 nm sa z historických dôvodov nazýva submikrometrová oblasť. Označenie vzniklo vývojom v mikroelektronike potom, ako v miniaturizácii prekonala smerom nadol hranicu jedného mikrometra (1 μm), o ktorej sa dlho predpokladalo, že bude neprekonateľnou prekážkou. To potom priviedlo na scénu predponu *nano-*. Smerom k menším dĺžkam sa náš interval 1 – 100 nm dotýka kvantového sveta opísaného kvantovou mechanikou a technológie využívajúce rozmery < 1 nm sa nazývajú pikotechnológie. Vhodnejší je názov subnanometrové technológie, pretože technicky využiteľný priestor pod 1 nm má rozsah najviac jeden rád, je totiž zdola ohraničený rozmerom atómu. Názov nanotechnológia sa dá vystopovať späť do roku 1974. Zaviedol ho Taniguči ako technológiu materiálov na nanometrovej úrovni. Nezabudnime však, že o manipulovaní látok na nanostupnici hovoril už Feynman.

V **tabuľke 1** sú zhrnuté predpony používané vo fyzike odstupňované s krokom troch rádov, ktorými sa označujú násobky jednotiek menšie alebo väčšie ako 1, ich značky a vyjadrenie.

Tab. 1 Násobky jednotiek vo fyzike

Predpona	Pôvod	Význam	Značka	Číselné vyjadrenie	Slovné vyjadrenie
mili-	latinský	tisíc	m	10^{-3}	tisícina
mikro-	grécky	malý	μ	10^{-6}	milióntina
nano-	grécky	trpaslík	n	10^{-9}	miliardtina
piko-	španielsky	zobák, zlomok	p	10^{-12}	bilióntina

2 Interval 1 – 100 nm akceptovali okrem Národnej nanotechnologickej iniciatívy USA aj Európska komisia, Medzinárodná organizácia pre štandardizáciu, Americký národný normalizačný ústav a iné organizácie.

femto-	dánsky	pätnásť	f	10^{-15}	trilióntina
kilo-	grécky	tisíc	k	10^3	tisíc
mega-	grécky	veľký	M	10^6	milión
giga-	grécky	obor	G	10^9	miliarda
tera-	grécky	obluda, kolos	T	10^{12}	bilión
peta-	grécky	päť	P	10^{15}	trilión

S rozsahom v **tabuľke 1** v nanovede a klasických (nie jadrových) technológiách vystačíme. Polomer elektrónu je 2,817 fm a priemery atómov sú v ráde 0,1 nm (**tab. 2**). Atómy nemajú presné hranice, preto ak sa používa pojem priemer atómu, predpokladá sa, že až 98 % jeho elektrónov sa nachádza vo sfére uvedeného priemeru.

Treba ešte spomenúť, že v americkej literatúre sa nepoužíva názov miliarda a hodnota 10^9 sa vyjadruje ako bilión, 10^{12} ako trilión atď. Od toho je odvodené označovanie koncentrácií vyjadrených počtom častí v súbore, napr. ppm, part per million, zodpovedá 10^{-6} , teda napr. jednej molekule acetónu primiešanej medzi milión molekúl dusíka. Podobne je to v prípade ppb, part per billion (zodpovedá 10^{-9}) a ppt, part per trillion (zodpovedá 10^{-12}).

Zložky nanomateriálov, s ktorými pracujeme v intervale 1 – 100 nm, sú molekuly, atómové klastre a nanokryštality. Toto rozmedzie nazveme nanorozpätím. V **tabuľke 2** je prostredníctvom typických objektov porovnané s rozpätím mikrosвета a makrosвета na jednej strane a s kvantovým svetom na druhej strane. Za rozhranie medzi makrosvetom a mikrosvetom tu považujeme rozmer, ktorý rozlíši ľudské oko, t. j. 0,1 mm. Rozhraním mikrosвета a nanosвета je hodnota 100 nm, blízka Abbeho limitu svetelného mikroskopu, ktorý je 200 nm (**pozri kap. 5**). Príslušné objekty možno pozorovať ľudským okom (makrosvet), svetelným mikroskopom (mikrosvet) a mikroskopmi s najväčšími rozlíšeniami – fluorescenčným nanoskopom, elektrónovým mikroskopom alebo rastrovacím tunelovým mikroskopom (**kap. 5**), ktoré zasahujú až do kvantového sveta.

Tab. 2 Objekty makro-, mikro-, nano- a kvantového sveta

Oblasť	Interval dĺžok	Charakteristické objekty	Veľkosť objektu
makrosvet	> 0,1 mm (100 μm)	mravec drôtičky používané v klenotníctve ľudský vlas	3 mm 200 – 300 μm 100 μm
mikrosvet	100 μm – 100 nm	bunky cicavcov najtenšie kovové drôtičky baktéria <i>Escherichia coli</i> vlnové dĺžky viditeľného žiarenia veľkosť tranzistora v IO*	20 – 80 μm $\geq 5 \mu\text{m}$ dĺžka 2 – 3 μm šírka 0,6 μm 400 – 800 nm 200 nm
nanosvet	100 nm – 1 nm	mydlová bublina vírus najmenšie rozmery detailov v IO* proteín gén priemer DNA jednostenná nanorúrka	hrúbka 5 nm 20 – 500 nm 11 nm 2 – 50 nm šírka 2 nm dĺžka 10 – 100 nm 2 nm priemer 1 – 3 nm dĺžka 5 – 50 nm
kvantový svet	< 1 nm	hrúbka monovrstvy grafénu rozmer atómu kremíka dĺžka uhlíkovej väzby rozmer atómu vodíka polomer elektrónu (klasický, nezohľadňuje kvantovú mechaniku)	0,34 nm 0,22 nm 0,14 nm 0,05 nm 2,8179 fm

*Procesor Apple A8 s dvoma jadrami má na ploche 89 mm² 2 miliardy tranzistorov s najmenšími detailami 20 nm.

Prenikanie do mikrosвета bolo výzvou už v období rozvoja remesiel a vyústilo do jemnej mechaniky, výroby šperkov a hodinárstva. Nie je preto prekvapením, že medzi priekopníkov nanotechnológie patrí dnes Švajčiarsko. V klenotníctve je špičkovou technikou známou od staroveku filigrán. V Európe sa rozvíjala v 16. – 19. storočí (obr. 1). Používala koráliky a drôtičky s priemerom niekoľko stoviek μm . Odvtedy sa ich príprava zdokonalila a dnes sa v kontaktovaní IO a v medicíne používajú drôtičky volfrámu, molybdénu, zlata, striebra, medi a hliníka s priemerom od 5 do 100 μm (tab. 2).



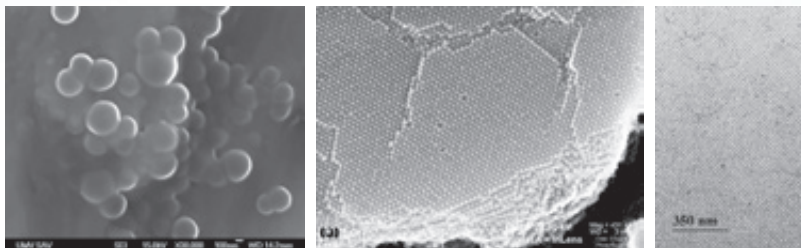
Obr. 1 Ozdoba na čiapku a spona na plášť uhorského šľachtického odevu z 19. storočia zhotovené technikou filigrán

(Zdroj – Encyklopédia Beliana)

Predpony uvedené v **tabuľke 1** sa používajú aj na označenie objektov, ako napr. mikročip alebo nanočastica. Vďaka rozvoju nanovedy sa počet nanoobjektov a nanodisciplín množí. Označujú predovšetkým nanoobjekty:

- nanobodky, nanočastice, nanodrôty, nanoklastre, nanokompozity, nanomostíky, nanoostrovčeky, nanopásky, nanopóry, nanorúrky, nanostĺpiky, nanovláčna, nanovrstvy, nanozliatiny. Sú to útvary, ktoré sa podobajú makroskopickým objektom, na ktoré sme zvyknutí z denného života, ako sú rúrky alebo vlákna. Pripravujú sa chemickými reakciami alebo depozičnými technikami, ako je naparovanie a naprašovanie. Na **obr. 2** sú objekty nanometrových a mikrometrových rozmerov – nanočastice, umelý kryštál z nanočastíc a multivrstva zhotovená striedavým nanosením dvoch vrstiev;
- súčasťou elektronických nanoštruktúr sú nanoelektrody, nanokontakty, nanomostíky, nanostupne. Zo súčastok sú to nanospínače alebo nanosenzory. V prípade senzorov nejde o to, že by mali nanorozmery, ale o to, že sú zhotovené z nanočastíc (**kap. 15.2**);

- nanoštruktúry sa zhotovujú nanopolohovaním alebo nanolitografiou v rozsahu nanostupnice, analyzujú sa nanomeraním, nanospektroskopiou a pod.



Obr. 2 Porovnanie objektov nanosveta a mikrosveta

a) polymérne častice so zabudovanou magnetickou nanočasticou a liečivom Aliskiren, ktoré znižuje tlak krvi. Častice sa magneticky zavedú do obličky, kde sa liečivo pomaly uvoľňuje a pacient nemusí denne brať tabletky.

(Obr. uverejnený s dovolením P. Kopčanského z Ústavu experimentálnej fyziky SAV, Košice. Podobné častice vyvinuli s protirakovinovým liečivom Taxol);

b) samsoporiadaný umelý kryštál zložený z kobaltových nanočastíc s priemerom 11 nm (Fyzikálny ústav SAV, Bratislava);

c) multivrstva zhotovená postupným nanosením 250 dvojvrstiev skandia a chrómu s hrúbkou (periódou) 1,75 nm (Fyzikálny ústav SAV, Bratislava)

Slová s predponou nano- prenikajú aj do hovorovej reči. Vyjadrujú niečo malé – nanonápad, nanopoznámka. Nanosny sú optimistické predstavy o rozmachu N&N. Slová s predponou nano-, či odborné alebo hovorové, sa spočiatku píšú so spojovníkom, napr. nano-pásky, ale keď sa v jazyku udomácnia, spojovník sa stratí. Postupne ich akceptujú aj jazykovedci. V Krátkom slovníku slovenského jazyka (Jazykovedný ústav Ľ. Štúra SAV, 1997) takéto slová ešte nie sú, slov s predponou mikro- je tam takmer dvadsať. Vo veľkom Slovníku súčasného slovenského jazyka, ktorý sa spracúva, takéto slová už budú. Jednak sú to slová s predponou nano- v zmysle násobku 10^{-9} , napr. nanometer, nanogram, nanosekunda alebo nanoampér. Ale budú tam aj slová, ktoré nemajú presný kvantitatívny význam, ale vyjadrujú príslušnosť k nanosvetu, napr. nanomateriál, nanoveda, nanotechnológia, nanočastica. V heslári Encyklopédie Beliana je takýchto slov zatiaľ sedem. Slov s predponou mikro- je tam však vyše sto. Vidieť, ako si rozvoj vedy a technológie vytvára svoj priestor aj v jazyku.

3. Mílniky rozvoja nanovedy a nanotechnológií

V mediálnom priestore sa nanoveda a nanotechnológie zjavili pred 10 – 15 rokmi, ale ich cesta je dlhšia. Nájdeme na nej tieto hlavné mílniky:

- 1905 A. Einstein zistil, že jedna molekula cukru má rozmer okolo 1 nm
- 1931 M. Knoll a E. Ruska vynašli elektrónový mikroskop, NC za fyziku
- 1959 R. Feynman predniesol svoju víziu „na dne je veľa priestoru“
- 1965 W. Kohn vypracoval teóriu funkcionálu hustoty, NC za chémiu
- 1968 A. Y. Cho a J. R. Arthur zaviedli depozíciu monoatomárnych vrstiev materiálov pomocou molekulových zväzkov
- 1970 A. J. Heeger, A. G. MacDiarmid a H. Širakava objavili elektricky vodivé polyméry
- 1974 N. Taniguči zaviedol termín nanotechnológia
- 1981 G. Binnig a H. Rohrer vynašli rastrovací tunelový mikroskop, NC za fyziku
- 1985 R. F. Curl, H. W. Kroto a R. E. Smalley objavili fullerény, NC za chémiu
- 1986 G. Binnig, C. F. Quate a C. Berger vynašli mikroskop atomárnych síl
- 1986 K. E. Drexler publikoval knihu *Engines of creation* (Tvoriace stroje)
- 1987 T. A. Fulton a G. J. Dolan zhotovili jedoelektrónový tranzistor
- 1988 Bol zhotovený prvý proteín podľa zadania
- 1988 A. Fert a P. Grünberg objavili obrovskú magnetorezistanciu, NC za fyziku
- 1989 D. M. Eigler vytvoril pomocou hrotu STM z atómov xenónu na povrchu niklu písmeňá IBM

- 1991 S. Iidžima opísal a spropagoval uhlíkové nanorúrky
- 1998 C. Dekker zhotovil tranzistor z uhlíkovej nanorúrky
- 1999 N. Garcia a kol. objavili balistickú magnetorezistanciu s nárastom odporu o 3 000 % vo feromagnetických nanokontaktach
- 1999 M. Schulz stanovil limit 0,7 nm hrúbky oxidu kremíka v integrovaných obvodoch, ktorý sa smerom nadol nedá prekročiť
- 2000 W. Clinton ohlásil Národnú nanotechnologickú iniciatívu USA, potvrdenú r. 2003 Zákomom o výskume a vývoji v nanotechnológiách pre 21. storočie
- 2001 Boli zhotovené logické hradlá z uhlíkových nanorúrok
- 2004 A. Geim a K. Novoselov izolovali grafén a preskúmali jeho základné vlastnosti, NC za fyziku
- 2005 Bol uverejnený Európsky akčný plán pre N&N
- 2007 G. Meyer zhotovil jednomolekulový elektrický spínač
- 2007 M. C. Lemme a kol. zhotovili grafénový FET
- 2008 V Almaden Res. Ctr. odmerali silu potrebnú na pohyb atómu po povrchu
- 2008 K. Bolotin a kol. stanovili pohyblivosť elektrónov $230\,000\text{ cm}^2/(\text{V s})$ vo voľne podopretom graféne pri 5 K
- 2013 Európska komisia otvorila vlajkový projekt Grafén, ktorého rozsah sa v r. 2014 zdvojnásobil
- 2014 E. Betzig, S. W. Hell a W. E. Moerner získali za dva typy superrozlišovacieho fluorescenčného mikroskopu (nanoskopu), ktoré sa zrodili v rozmedzí rokov 1989 – 2005, NC za chémiu.

Pri výbere mílnikov som použil širšiu koncepciu. Zahrnuje tzv. nuladimenzionálne³ (0D) objekty, ako sú atómy, molekuly, nanočastice,

3 Označovať trojrozmerné útvary ako atómy, molekuly a nanočastice ako 0D-objekty je tu vecou dohody, ktorá vychádza z praktického vnímania nanovedy a nanotechnológií.

jednodimenzionálne 1D-objekty, ako nanodrôty, nanorúrky a dvojdimenzionálne (2D) štruktúry, ako tenké vrstvy s hrúbkami v intervale 1 – 100 nm a multivrstvy z nich. Preto ako súčasť nanotechnológií chápeme aj spintroniku, kde nie je nositeľom informácie iba náboj elektrónu, ale aj jeho magnetický moment. Moment má pôvod v spine elektrónu, čo je v jednoduchšej nekvantovomechanickej predstave rotácia elektrónu okolo vlastnej osi. Spin má dve možné orientácie podľa smeru rotácie elektrónu; pri pohybe elektrónu v materiáli, napr. v kove, sa po prekonaní určitej dĺžky tento smer otočí. Dĺžku označujeme l_{sf} (z angl. *spin flip*, preklopenie spinu). Potom sa informácia viazaná na spin stratí. Kľúčové materiály spintroniky sú kobalt a meď. Uvedená dĺžka má vo vrstve kobaltu hodnoty 10 – 40 nm, vo vrstve medi 40 – 140 nm, čo zhruba zodpovedá intervalu nanosveta. Preto je medzi míľnikmi N&N aj GMR, ktorá je pilotným efektom spintroniky.

4. Extrapolácia mikrotechnológie do nanosveta

Nanoveda a nanotechnológie sú pokračovaním 50 rokov trvajúcej etapy miniaturizácie a rastu stupňa integrácie v mikroelektronike opísanej pomocou tzv. Moorovho zákona⁴ (obr. 3). Keďže počet tranzistorov je tu znázornený v logaritmicknej a čas v lineárnej stupnici, znamená to, že počet tranzistorov v mikroprocesore rastie s časom podľa mocninovej závislosti, čo možno matematicky vyjadriť ako

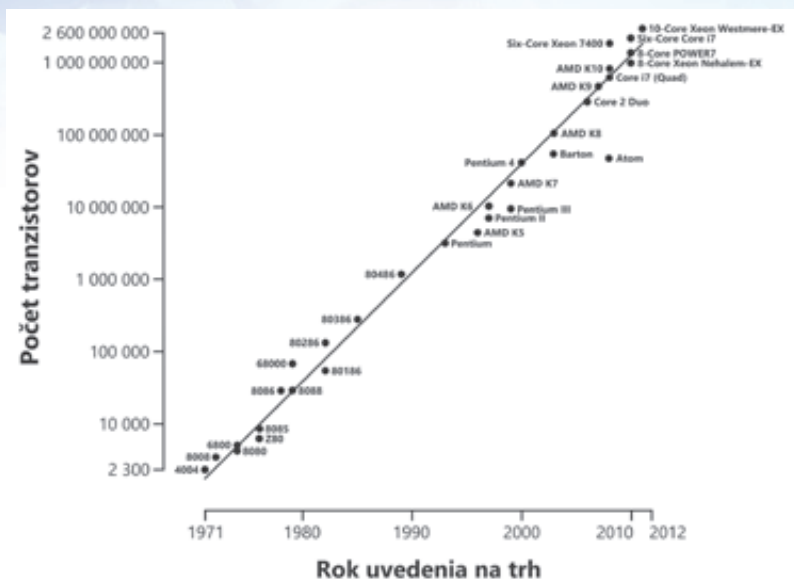
$$N = 2300 \times 2^{[(t - 1971)/2]} \quad (\text{rovnica 1}),$$

kde N je počet tranzistorov v mikroprocesore a t čas vyjadrený v rokoch. Vzťah nám hovorí, že počet tranzistorov v mikroprocesore sa každé dva roky zdvojnásobuje.

Formulácia zákona vznikla r. 1965. Vtedy Gordon E. Moore, spoluzakladateľ fa Intel (ktorá patrí medzi svetových lídrov v mikro- a nanoelektronike) skúmal, ako rástol počet tranzistorov v integrovanom obvode v období 1962 až 1965, a urobil prognózu na najbližších 10 rokov. Podľa nej mal počet tranzistorov v r. 1975 dosiahnuť 65 000. Jeho predpoveď sa splnila a odvodil sa z nej vzťah (pozri rovnicu 1), ktorý platí dodnes. Dnes už však ďalšia platnosť Moorovho zákona naráža na fyzikálne bariéry, a aj preto význam N&N rastie.

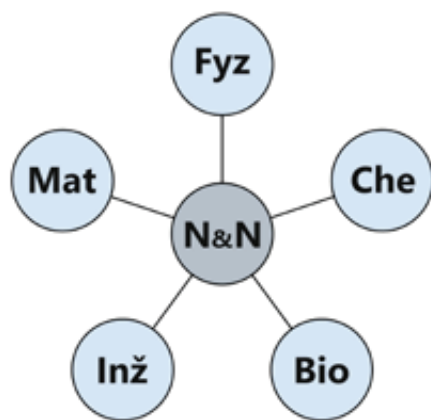
N&N sú spoločným menovateľom súčasného pokroku v biológii (nanobiológia), chémii (nanochémia) a medicíne (nanomedicína), keď tieto disciplíny preniknú na úroveň molekúl. Javy a procesy sa riadia fyzikálnymi zákonmi, ktoré platia až po úroveň elementárnych častíc, ako je elektrón. O nanofyzike preto nehovoríme. N&N sú zároveň miestom, v ktorom sa stretávajú chémia, fyzika, biológia, materiálková veda a inžinierske disciplíny (obr. 4), pričom rozdiely medzi nimi sa stierajú. Preto sú vo vzdelávaní potrebné komplexné študijné plány.

4 Nie je to prírodný zákon, ale zákonitosť vyplývajúca z rozvoja techniky a jej ekonomických súvislostí. Miniaturizácia a zväčšovanie počtu tranzistorov v integrovanom obvode zlacňuje výrobu, zväčšuje počet zaznamenaných údajov a zrýchľuje ich spracovanie.



Obr. 3 Moorov zákon, t. j. počet tranzistorov v integrovanom obvode – mikroprocesore v závislosti od roku jeho vyrobenia a uvedenia na trh

Nájďme tu prvé mikroprocesory 4004 z r. 1971, populárny mikroprocesor Pentium piatej generácie (pente – päť) uvedený v polovici 90-tych rokov aj súčasné viacjadrové procesory. Vývoj smeruje k integrácii desiatok jadier, teda mikroprocesorov do jedného čipu, čím sa dosiahne väčšia výpočtová kapacita ako pri jednom zložitom jadre. Dĺžka slova (operandu) postupne rástla od štvorbitových po súčasné 64-bitové mikroprocesory



Obr. 4 Nanoveda a nanotechnológie sa rozvíjajú v ťažisku matematiky, fyziky, chémie, biológie a inžinierskych disciplín

O všestrannom dosahu N&N svedčí skladba projektov financovaných v 7. rámcovom programe EÚ v rokoch 2007 – 2013. Keďže projekty sa dokončujú do konca roku 2015, uvedieme v **tab. 3** sumarizáciu za prvú polovicu programu. Je vidieť, že v oblasti N&N zatiaľ dominuje základný výskum, rozvoj vlastného odboru a jeho výstupy v informačných a komunikačných technológiách (IKT). Aplikovaný výskum smerujúci do energetiky, zdravia a životného prostredia sa rozbieha postupne. (Do týchto disciplín nesmerujú v 7. RP iba zdroje uvedené v **tab. 3**. Každá z nich má svoje vlastné témy a projektové výzvy.)

Tab. 3 Skladba a podpora projektov 7. rámcového programu EÚ v N&N za roky 2007 – 2011

Oblasť	Počet projektov	Podpora [mil. €]
Medzinárodná spolupráca, mobilita	570	301
Projekty Európskej výskumnej rady	296	515
Nanovedy, nanotechnológie, materiály a nové produkčné technológie	238	896
Informačné a komunikačné technológie	102	316
Malé a stredné podniky	35	42
Energia	19	55
Zdravie	18	74
Veda a spoločnosť	14	15
Životné prostredie	3	10
Ostatné	105	336
Spolu	1 400	2 560

V USA sa v rámci NNI vynaložilo v rokoch 2001 – 2010 12,5 mld. US dolárov a po roku 2010 financovanie pokračuje s rastúcim trendom. Vlajkový projekt EÚ *Grafén* venovaný „divotvornému“ materiálu – grafénu – sa v r. 2014 rozšíril a teraz zahrnuje 140 účastníckych organizácií z 23 krajín a na nasledujúcich 10 rokov je naň vyčlenená 1 mld. €. Z východnej a strednej Európy sa na projekte podieľajú Bielorusko, Bulharsko, Česká republika, Estónsko, Maďarsko a Poľsko.

5. Rastrovací tunelový mikroskop a mikroskop atomárných síl – prielomy v poznávaní

Rastrovací tunelový mikroskop (STM) bol prielomom v skúmaní látok na úrovni jednotlivých atómov. Vynašili ho G. Binnig a H. Rohrer v pobočke fa IBM v Zürichu. Neskôr vznikli ďalšie typy rastrovacích sondových mikroskopov (SPM), napr. mikroskop atomárných síl (AFM) a mikroskop magnetických síl (MFM). Tieto mikroskopy nezískavajú informácie pomocou svetelného či röntgenového žiarenia alebo elektrónov, ale mechanickým ohmatávaním povrchu látky pomocou jemného ostrého hrotu na základe síl pôsobiacich na atomárnej úrovni. (Zjednodušene sa hovorí, že hrot je zakončený jediným atómom.) Prístroje majú preto rozlíšenie v subnanometrovej oblasti (nie je limitované difrakciou žiarenia, ako pri svetelnom alebo elektrónovom mikroskope). Rastrovací tunelový mikroskop má názov odvodený od tunelovania. Jeho hrot sa pohybuje zlomok nm nad skúmaným povrchom. Pri takejto malej vzdialenosti tečie medzi hrotom a povrchom tunelový prúd elektrónov

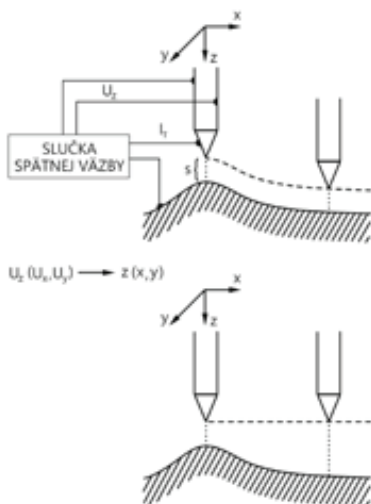
(obr. 5). Je to dôsledok kvantového efektu, prúd tečie aj bez elektrického kontaktu či dotyku

Obr. 5 Princíp rastrovacieho tunelového mikroskopu

Hrot vedený v smeroch x , y , z pomocou troch piezoelektrických elementov ovládaných napätiami U_x , U_y , U_z sleduje povrch: a) pri konštantnej vzdialenosti s od povrchu a konštantnom tunelovom prúde I_t alebo

b) v počiatočnej výške nastavenia.

V prvom prípade sa konštantná vzdialenosť udržiava a reliéf povrchu sa odčíta pomocou slučky spätnej väzby, ktorá udržiava I_t konštantný. V druhom prípade poskytuje informáciu o povrchovom reliéfe meniaci sa tunelový prúd, ktorý však pri rastúcej vzdialenosti hrotu prudko klesá.



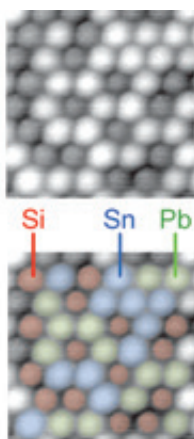
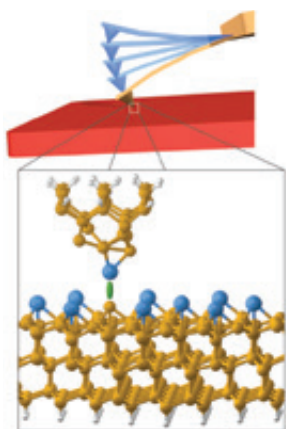
a jeho intenzita prudko klesá s rastúcou vzdialenosťou hrotu a povrchu. Hrot preto „cíti“, či je nad povrchovým atómom, alebo v údolí medzi atómami. Takto sa dá tvar (morfológia) povrchu zobrazit' na atomárnej úrovni. Prvé obrázky povrchových atómov na kremíku uverejnené Binnigom, Rohrerom a ich spolupracovníkmi vyvolali senzáciu. Zobrazovaný povrch však musí byť vodivý a tunelový mikroskop sa nehodí na skúmanie biologických objektov.

Tento problém prekonalí Binnig, Quate a Berger mikroskopom atomárnych síl. Využíva meranie sily medzi hrotom a povrchom. Môže to byť sila korešpondujúca s van der Waalsovou väzbou (kap. 8), sila elektrického alebo magnetického pôvodu (tu hovoríme o MFM) a i. Hrot je upevnený na pružnom kmitajúcom ramienku, napr. z kremíka, ktoré vyčnieva z opornej doštičky. Ramienko má mikrometrové rozmery (obr. 6). V dôsledku pôsobiacich síl sa ramienko vychýľuje a výchylka sa meria napr. odrazom laserového lúča od ramienka. AFM sa používa:

a) v kontaktnom móde, tu sa hrot ťahá po povrchu, alebo vedie tesne pri povrchu, alebo

b) v nekontaktných dynamických kmitavých módoch. Tu sa ramienko rozkmitá piezoelektrickým elementom. Keď sa hrot priblíži k povrchu, výchylka alebo frekvencia kmitania sa pôsobením

spomenutých síl stlmia. Takto možno povrch tiež mapovať na úrovni atómov.



Obr. 6 Schéma pôsobenia mikroskopu atomárnych síl a detail vzájomného pôsobenia hrotu a povrchu (vľavo)

Atomárne rozlíšenie povrchu je vpravo hore a chemické rozlíšenie atómov kremíka, cínu a olova vpravo dole

(Obr. uverejnený so súhlasom P. Jelínka z Fyzikálneho ústavu AV ČR v Prahe.)

Veľkou pomocou pre experimentátorov pracujúcich s mikroskopmi s atomárnym rozlíšením je teória funkcionálu hustoty (DFT) W. Kohna (Portréty s. 94). Využíva sa na výpočty vlastností fyzikálnych a chemických systémov. Pracuje sa tu s hustotou elektrónov namiesto riešenia zložitých sústav rovníc, ktoré opisujú správanie jednotlivých elektrónov. Bez ohľadu na to na výpočty treba vysokovýkonné počítače. Kombinovaním AFM-meraní a výpočtov sa podarilo urobiť ďalší krok – chemicky rozlíšiť prvky na povrchu (obr. 6).

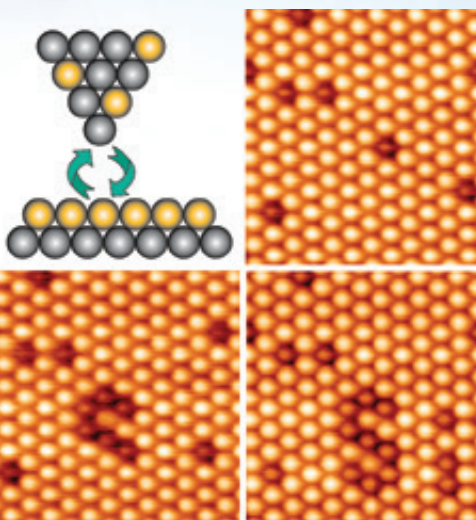
Rastrovacie sondové mikroskopy sa dajú využiť ako nástroj na manipuláciu atómov alebo molekúl pomocou hrotu. Splnila sa tak Feynmanova predstava manipulovania látky atóm po atóme, a to aspoň v laboratóriu, lebo tento postup je pomalý. Jeho priekopníkom sa stal D. Eigler (Portréty s. 94). Posúvaním atómov zostavil z 35 atómov xenónu na povrchu niklu meno firmy, v ktorej pracoval – IBM. Neskôr dokázal atómy aj zodvihnúť a preniesť do inej polohy. Na tento účel skonštruoval vákuový STM pracujúci so vzorkami pri teplote kvapalného hélia (4,2 K). Tým potlačil zrážky atómov xenónu s inými atómami a molekulami z prostredia nad povrchom a ich tepelný pohyb⁵. Manipulácie atómov sa zvládli aj pomocou AFM a metódou zámény atómov dokonca pri izbovej teplote. Na obr. 7 je výsledok takéhoto experimentu so zámenou atómov kremíka a cínu. Iný príklad s manipuláciou atómov medi na oxidovanom povrchu medi je na obr. 8.

Vzhľadom na pochopiteľnú pomalosť manipulácie na atomárnej úrovni sa robí dnes v nanotechnológiách syntéza látok a súčiastok z podstatne väčších stavebných blokov, ako sú atómy. K slovu prichádzajú nanočastice s počtom až 10 000 atómov. Dom sa teda stavia „z panelov, a nie zo zrníčok piesku a cementu“. Tejto metóde založenej na pridávaní materiálu sa hovorí *bottom-up*, zdola nahor (kap. 1). Je protikladom metódy s odoberaním materiálu *top-down*, zhora nadol, ktorá je bežná v mikroelektronike. (Tam sa vychádza z kremíkového plátku a tvaruje sa odoberaním materiálu do potrebnej štruktúry

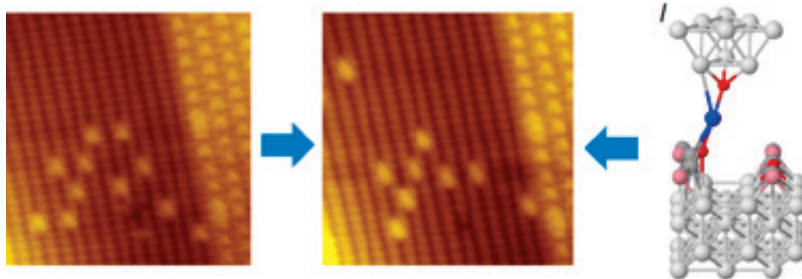
5 Energia tepelného pohybu sa dá vyjadriť ako kT , teda ako súčin Boltzmannovej konštanty a termodynamической teploty.

Obr. 7 Symbolické znázornenie a postupnosť zápisu písmen Si (kremík) zámienou atómov kremíka (tmavé guľôčky) a cínu (svetlé guľôčky)

(Obr. uverejnený so súhlasom P. Jelínka z Fyzikálneho ústavu AV ČR v Prahe.)



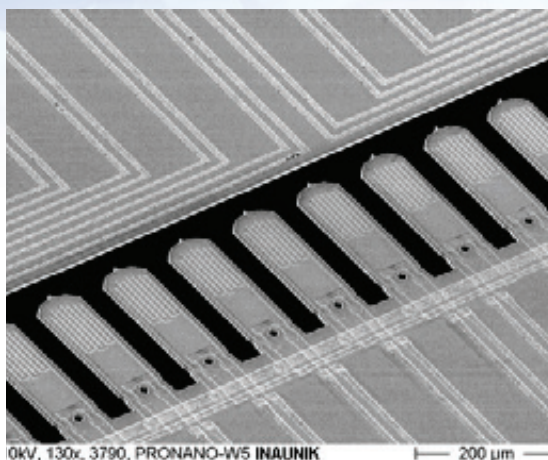
(kap. 7). Obidve metódy majú v histórii techniky svoje miesto, začínajúc od budovania príbytkov. Príkladom metódy zdola nahor je stavba amfiteátrův a palácov. Jej protipólom je tesanie do skaly, ako to môžeme vidieť v dodnes používaných obydlíach v talianskom meste Matera alebo v našich Brhlavciach.



Obr. 8 Manipulácia atómov medi (svetlé kolieska) na oxidovanom povrchu medi s kryštalografickou orientáciou (110) pomocou nekontaktného mikroskopu atomárnych síl, ktorý pracuje pri teplote 78 K (bod varu kvapalného dusíka)

Atómy medi náhodne rozložené na povrchu (vľavo) sa hrotom mikroskopu usporiadajú do tvaru písmena „X“ (v strede). Sú tu potrebné aj výpočty pôsobenia medzi hrotom a vzorkou (vpravo) a štatistický model, ktorý poskytuje pravdepodobnosti manipulácie. Polomer zakrivenia hrotu je < 10 nm.

(Obr. uverejnený so súhlasom I. Šticha z Fyzikálneho ústavu SAV, výsledky sa získali v spolupráci s univerzitami v Osake a v Londýne.)



Obr. 9 Súbor piezoodporových ramienok s hrotni na spoločnej opornej dosičke zhotovený I. W. Rangelowom, Y. Sarovom (Nemecko), I. Kostičom (Slovensko) a i.

(Obr. uverejnený so súhlasom I. Kostiča z Ústavu informatiky SAV, Bratislava.)

Urýchlenie pozorovaní a aj manipulácií materiálov pomocou sondových mikroskopov možno dosiahnuť súbežnými postupmi s použitím mnohých hrotov (pozri poznámku k profilu H. Rohrera v [Portrétoch s. 94](#)). Príklad je na [obr. 9](#).

V roku 2014 rozšíril okruh mikroskopov pre nanovedu ocenených Nobelovou cenou mikroskop označovaný ako nanoskop. Cenu dostali E. Betzig, S. W. Hell a W. E. Moerner za rozvoj fluorescenčného mikroskopu so superrozlíšením. Obišiel sa tak Abbeho difrakčný limit svetelného mikroskopu, ktorý postuluje, že najmenšia vzdialenosť dvoch bodov, ktoré rozlíšime, je okolo $0,2 \mu\text{m}$ ⁶. Cena bola udelená za dve podobné riešenia. Prvým je mikroskop typu STED S. Hella z r. 2000. Pomocou svetelného zväzku jedného

6 Podľa Abbeho teórie rozlišovacej schopnosti svetelného mikroskopu je najmenšia vzdialenosť dvoch bodov, ktoré ešte rozlíšime, približne $\lambda/2 NA$, kde λ je vlnová dĺžka použitého svetla a $NA = n_o \times \sin u$ je numerická apertúra objektívu prístroja. Tu n_o je index lomu prostredia, v ktorom pozorujeme, a u je uhol medzi osou optickej sústavy a krajným lúčom vstupujúcim z pozorovaného bodu do objektívu. Keďže $\sin u$ je nanajvýš 1, potom vo vzduchu ($n_o = 1$) je aj NA nanajvýš 1. Pri pozorovaní v tzv. imerznom, ponorenom usporiadaní v prostredí, kde $n_o > 1$ (voda, olej), dosahuje numerická apertúra hodnoty okolo 1,5. Vlnová dĺžka viditeľného žiarenia je od 400 nm (fialové svetlo) po 800 nm (červené svetlo), preto rozlišovacia schopnosť svetelného mikroskopu neprekročí pravidla 200 nm. (Táto teória platí aj pre elektrónový mikroskop.)

lasera sa vyvolá fluorescencia – sekundárne vyžarovanie osvetlenej vzorky – ktorá sa vzápätí zhasne pomocou zväzku druhého lasera okrem malej oblasti nanometrových rozmerov. Táto svietiaci oblasť sa zaznamená mikroskopom. Postupným rastrovaním po povrchu, nanometer po nanometri, sa zmapuje celá vzorka. Druhé riešenie SMM pochádza od E. Betziga z r. 2005, ktorý využil výsledky W. E. Moerneru vo fluorescencii proteínov. Tu sa slabým svetelným impulzom vyvolá fluorescencia malého počtu proteínov, ktoré sú spravidla vo vzdialenostiach väčších ako 200 nm (Abbeho limit). Optickým mikroskopom sa preto dajú zobrazovať. Potom sa postup opakuje, ďalšími impulzmi sa zobrazia iné proteíny a skladaním po sebe nasledujúcich obrazov sa získa obraz celej vzorky. Nanoskop má význam pre štúdium živých organizmov, ktoré nemožno umiestniť do vákuového systému elektrónového mikroskopu a navyše bombardovať elektrónmi.

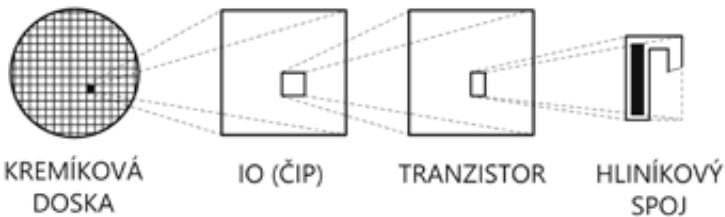
6. Feynmanov myšlienkový svet

Feynman sa pri formulovaní svojej vízie inšpiroval pokrokom v dosahovaní nízkych teplôt smerom k absolútnej nule, dlhodobým zlepšovaním vákua aj zvyšovaním tlaku v laboratórnych podmienkach. Pokrok sa mu javil „bezodný“. Svoje pozorovania zovšeobecnil na dosahovanie stále menších rozmerov. Táto koncepcia je pre nové technické riešenia veľmi plodná. Doviedlo ho to k predstavám o veľmi malých ložiskách, ktoré budú bežať bez mazadla, lebo pri malých rozmeroch sa dobre chladia, alebo k využitiu amorfných – nekrystalických materiálov, ktoré sú vnútorne rovnomeré, lebo neobsahujú kryštalické zrná, medzi ktorými sú rozhrania. Súčiastky z amorfných materiálov sa preto dajú znižovať aj pod hranicu, ktorá obmedzuje miniaturizáciu pri použití kovov alebo polovodičov zložených zo zrn rozmerov často iba niekoľko mikrometrov.

Osobitne tvorivá bola Feynmanova idea miniaturizácie prvkov záznamových médií, a tým zvyšovania hustoty záznamu informácií. Predpokladal, že na záznam jedného informačného bitu budeme potrebovať čiastočku látky pozostávajúcu aspoň zo 100 atómov, aby sa obmedzila strata informácie rozptýlením tejto čiastočky difúziou atómov, z ktorých pozostáva. Vypočítal, ako sa dajú zaznamenať informácie z 24 mil. zväzkov zaradených vo fondoch Knižnice amerického kongresu, Britského múzea a Národnej knižnice Francúzska. Vyšlo mu, že informačný obsah týchto knižníc je 10^{15} bitov. (Dostaneme sa k tomu napr. tak, že počet strán priemerného zväzku predpokladáme 800, počet písmen na strane 5 000, počet bitov na záznam písmena 10. Potom $24 \times 10^6 \times 800 \times 5000 \times 10 = 10^{15}$.) Na záznam potrebujeme teda 10^{17} atómov. Hustota atómov v kremíku je $5,1 \times 10^{22}/\text{cm}^3$. Potom na záznam uvedených informácií treba kocku kremíka so stranou trochu väčšou ako 0,1 mm.

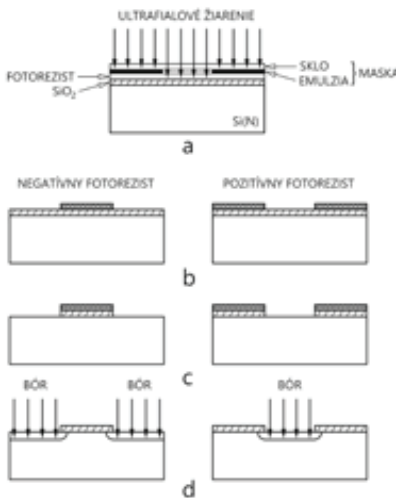
Áká je dnešná hustota záznamu dosiahnutá počas 50 rokov nasledujúcich po Feynmanovej úvahe? Počet tranzistorov v integrovanom obvode výrobcov ako AMD, IBM, Motorola, Intel, je asi $5 \times 10^6/\text{mm}^2$, čo je viac ako 1 mld. informácií na čip pri zázname jedného bitu jedným tranzistorom. (To zodpovedá použitiu tzv. dynamických obvodov,

v ktorých sa však informácia musí periodicky obnovovať. V statických obvodoch s trvalým záznamom je potrebný počet tranzistorov na jeden bit asi štvornásobne väčší.) Objem čipu odhadneme na $1,5 \times 1,5 \times 0,2 \text{ cm}^3 = 0,5 \text{ cm}^3$. Na záznam 10^{15} bitov potrebujeme 10^6 čipov, čo zodpovedá objemu kremíka $0,5 \times 10^6 \text{ cm}^3$. Voči kocke s hrnou 0,1 mm je to ešte rozdiel skoro 10^{12} -krát. Keďže ďalšia miniaturizácia speje pomaly ku koncu a Moorov zákon v priebehu cca 10 – 15 rokov prestane platiť, Feynmanova vízia bola príliš optimistická, ale kvalitatívne správna a mobilizačná.



Obr. 10 Úrovne kremíkovej technológie v mikro- a nanoelektronike

Vychádza sa z kremíkovej dosky s priemerom až desiatky centimetrov a hrúbkou do 0,5 mm, na ktorej sa zhotovia integrované obvody a doska sa nakoniec rozreže na čipy. Obvody sa skladajú z tranzistorov a tie z detailov, ako sú spoje, prechody PN alebo hradlá.



Obr. 11 Fotolitografické tvarovanie v mikroelektronike

- expozícia fotorezistu cez masku UV žiarením;
- vyvolaný rezist;
- otvory v SiO₂-vrstve vytvorené leptaním;
- difúzia bóru do kremíkovej podložky cez otvory v SiO₂

7. Vytváranie štruktúr zhora nadol – litografia a leptanie

Ústrednou témou tejto knižky je vytváranie štruktúr zdola nahor, je však užitočné vysvetliť si, ako sa v mikroelektronike a nanoelektronike uplatňuje technika zhora nadol. Spočíva vo vymedzení tvarovaných štruktúr litografiou a v odstránení nepotrebných oblastí či plôch leptaním.

Litografická technika odvodzuje svoj názov od gréckeho *lithos* – kameň. Pôvodne to bola tlačiarenská technika, pri ktorej sa na povrch hladkého kameňa – vápenca urobila kresba, napr. voskom. Nepokrytá časť povrchu sa potom chemicky naleptala. Po odstránení vosku sa kameň navlhčil, pričom voda prilipla iba na naleptaných plochách. Na kameň sa aplikovala olejová farba, ktorú vlhké plochy odpudzovali, prilipla iba v miestach pôvodnej voskovej kresby. Kresba sa potom tlačením preniesla na papier.

Princíp dnešnej fotolitografie používanej v kremíkovej technológii mikro- a nanoelektroniky je podobný. Úvodom je však užitočné objasniť si jednotlivé úrovne tejto technológie, ktoré sú znázornené na obr. 10. Zhotovenie prechodu PN ukazuje obr. 11. Na Si-podložke typu N je vrstva, ktorá sa bude tvarovať. (Môže to byť polovodičová vrstva líšiaca sa od materiálu podložky, izolačná alebo kovová vrstva. V kremíkovej technológii sú to najčastejšie izolujúci oxid SiO_2 a Au, Al, Ti a iné kovové vrstvy spojov a kontaktov.) V tomto prípade to bude izolujúca a zároveň maskujúca vrstva SiO_2 . Nanesie sa na ňu svetlocitlivá vrstva fotorezistu (fotolaku). Lokálne sa osvetlí UV žiarením cez otvory v expozičnej maske vytvorenej v tenkej Cr-vrstve na skle. Rezist sa tým exponuje. Proces sa v ďalšej etape líši podľa toho, či sa použije tzv. negatívny, alebo pozitívny rezist. Pri negatívnom reziste osvetlené časti polymerizujú a neosvetlené sa odstránia vo vývojke. Pri pozitívnom reziste sa naopak odstránia časti narušené osvetlením. Potom sa cez otvory v reziste chemicky odleptajú odhalené plochy SiO_2 a zvyšok rezistu sa odstráni v chemikálii alebo spálením, napr. v kyslíkovej

plazme. Nasleduje difúzia bóru cez otvory v SiO_2 , čím sa v dotovaných oblastiach polovodič typu N zmení na typ P a vzniknú prechody PN.

Rozlišovacia schopnosť fotolitografie sa tiež riadi už spomenutou Abbeho teóriou (kap. 5) a možno ju vyjadriť ako

$$\Delta y = \lambda / 2 NA \quad (\text{rovnica 2}),$$

kde λ je vlnová dĺžka UV žiarenia a NA je numerická apertúra objektívu. Hodnota Δy je rozmer najmenšieho detailu, ktorý vieme touto technikou vytvoriť. Sprievodným javom technického pokroku je preto používanie žiarenia s postupne kratšími vlnovými dĺžkami. V praxi to znamená posun do hlbšej UV-oblasti, pričom sa prešlo od žiarenia ortuťovej výbojky s vlnovou dĺžkou $\lambda = 365$ nm k vlnovej dĺžke $\lambda = 248$ nm žiarenia KrF a neskôr k $\lambda = 193$ nm ArF excimerových laserov, a to aj v kombinácii s vodou ako imerzným médiom. Vývoj smeruje k F_2 -laseru, kde $\lambda = 157$ nm, alebo Ar_2 -laseru, kde $\lambda = 126$ nm, a k imerzným prostrediam s vyšším indexom lomu. Perspektívou je extrémne UV žiarenie (EUV-litografia) s vlnovou dĺžkou žiarenia 13,5 nm, ktoré sa už nespracúva šošovkami, ale zrkadlovou optikou na báze kovových multivrstiev (obr. 2c). Litografické masky sa najprv robili fotografickými technikami, potom pomocou optických generátorov obrazcov.

Okrem fotolitografie sa používa elektrónová litografia, v ktorej sa rezist exponuje elektrónovým zväzkom. V tomto prípade sa môžu difrakčné a interferenčné efekty, ktorých dôsledkom je vzťah (viď rovnica 2), zanedbať. Pre elektróny síce v zmysle kvantovej mechaniky platí vlnovo-korpuskulárny dualizmus (spomenutý v kap. 8), ale príslušná vlnová dĺžka je veľmi malá. Z de Broglieovej rovnice sa dá jednoducho vypočítať ako:

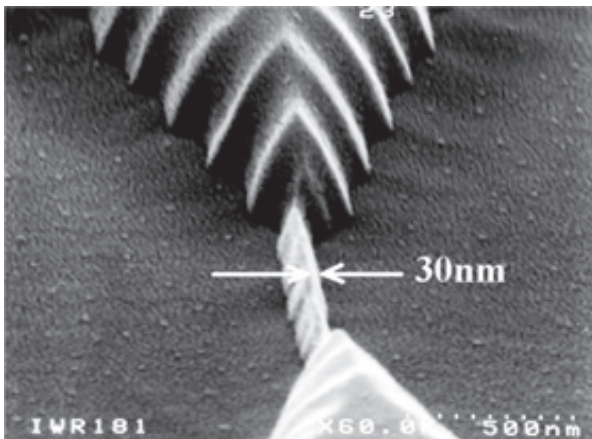
$$\lambda [\text{nm}] = 1,2 / (U [\text{V}])^{1/2} \quad (\text{rovnica 3}),$$

kde U je urýchľujúce napätie elektrónov vyjadrené vo voltoch. Pri bežnom napätí 10 kV dostaneme vlnovú dĺžku okolo 0,01 nm.

Elektrónová litografia má však z hľadiska rozlišovacej schopnosti iné obmedzenia. Je to rozptyl elektrónov v reziste aj v kremíku, v dôsledku čoho sú exponované plochy rezistu väčšie, ako je rozmer zväzku, ktorý je spravidla niekoľko nm. Označuje sa ako *efekt blízkosti*. Okrem toho má táto litografia dlhé expozičné časy, lebo rezist sa zväzkom exponuje bod po bode alebo štvorček po štvorčeku. Elektrónové litografy (ale aj špičkové fotolitografické zariadenia) sú nákladné a patria do kategórie prístrojov v hodnote medzi 1 a 10 mil. €. Veľa prostriedkov sa vkladá aj do vývoja nových fotooporov a elektrónových odporov. Vzhľadom na uvedené skutočnosti, a pokiaľ má fotolitografia ešte potrebné rezervy, uplatní sa elektrónová litografia predovšetkým pri výrobe masiek pre UV, hlbokú a extrémnu UV litografiu a pri výrobe lisovacích šablón pre tzv. litografiu lisovaním (nanoimprint), ako aj na špeciálne, napr. výskumné použitia. Príklad je na **obr. 12**.

V litografickej oblasti je v zálohe ešte nemenej nákladná rtg litografia, ktorá využíva expozíciu rtg žiarením, a iónová litografia, pri ktorej sa exponuje iónovým zväzkom. Vývoj zaznamenali aj techniky leptania, kde sa prešlo od chemického leptania k leptaniu v plazme alebo zväzkami iónov.

Miniaturizácia sa charakterizuje na dĺžkovej stupnici uzlami (nódmí), ktorých postupnosť v trojročnom cykle od roku 1999 (1999, 2002,



Obr. 12 Kremíkový mostík široký 30 nm vytvarovaný ako ukážka rozlišovacej schopnosti elektrónovej litografie (okolo r. 2000) pomocou zväzku prierezu $50 \times 50 \text{ nm}^2$

V dôsledku toho vznikli na kontaktných plochách stupne. (Obr. uverejnený so súhlasom I. Kostiča, Ústav informatiky SAV, Bratislava.)

2005 atď.) je 180 nm, 130 nm, 90 nm, 65 nm, 45 nm, 32 nm, 22 nm so súčasným prechodom na 15 nm a 11 nm. Tieto dĺžky charakterizujú rozmery najmenších detailov v IO. Vývoj veľkých polovodičových firiem pritom predbieha výrobné technológie. Z postupnosti uzlov môžeme urobiť záver, že mikroelektronika prekonala hranicu 100 nm a prešla teda do oblasti nanoelektroniky okolo r. 2005. Uzol 11 nm sa ešte dá dosiahnuť stále sa zlepšujúcou fotolitografiou, elektrónová litografia túto rozlišovaciu schopnosť garantuje bez problémov. Najnovší pokrok litografických techník na výrobu obvodov pre uzly 22 nm a 11 nm sa opiera o vývoj zložitých zariadení na paralelnú synchronizovanú expozíciu čipov tisícmi elektrónových lúčov, ich počet prekračuje 260 000.

Obr. 13 V čistých priestoroch laboratória elektrónovej litografie Ústavu informatiky SAV
(Obr. uverejnený so súhlasom I. Kostiča, Ústav informatiky SAV, Bratislava.)



Nákladnosť technológií umocňuje fakt, že vyžadujú čisté priestory, pretože prachové častice prítomné vo vzduchu znemožňujú litografické procesy. Stačí, ak si uvedomíme, že častice s rozmermi niekoľko μm sú až tisíckrát väčšie ako najmenšie detaily v elektronických súčiastkach. Čisté priestory sa zaraďujú do tried. Napríklad v triede 100 nesmie byť v kubickej stope vzduchu viac ako 100 častíc s rozmerom viac ako $0,5 \mu\text{m}$ a 10 častíc s rozmerom viac ako $5 \mu\text{m}$. V prepočte na litre používané u nás to zodpovedá 3 – 4 časticami do $0,5 \mu\text{m}$ v litri. Aj to je priveľa a kritické operácie sa robia v priestoroch, kde je počet častíc ešte desať- až stokrát menší. Personál sa tu pohybuje v špeciálnych odevoch (obr. 13). Čistota týchto priestorov podstatne prevyšuje nároky kladené na nemocničné priestory.

Nanoelektronika dnes produkuje špičkové výrobky, a ako vidieť, vyznačuje sa miliardovými investíciami. Požiadavka návratnosti týchto investícií určuje tempo ďalšieho rozvoja a spomaľuje ho v porovnaní s výskumom, ktorý je v predstihu.

Zmyslom tejto časti je zdôrazniť aj to, že nanoelektronika vychádza z iných prístupov ako materiálové nanotechnológie, ktoré sa v nej síce už v niektorých prípadoch uplatňujú, no napriek tomu predstavujú značne odlišné odvetvie.

8. Zdroje nových kvalít v nanosvete

Z Feynmanovej vízie vyplynuli príklady toho, ako prechodom do nanosveta možno odhaliť a využiť nové vlastnosti materiálov v rozmerovej oblasti 1 – 100 nm. Súvisí to s novými javmi, ktoré sa dajú vysvetliť na základe klasickej fyziky, ktorej základy sformuloval už I. Newton, a kvantovej fyziky, ktorá sa opiera o učenie, ktoré nám zanechali M. Planck, E. Schrödinger, W. von Heisenberg a ďalší. Základné náuky, z ktorých nanoveda a nanotechnológie vychádzajú, sú:

- kvantová mechanika,
- náuka o chemických väzbách,
- náuka o kryštálovej štruktúre.

Kvantovú fyziku potrebujeme pri vysvetľovaní javov v nanoobjektoch s rozmermi niekoľko nm alebo ešte menšími, kde Newtonova fyzika stráca svoju platnosť. (Bez kvantovej teórie nemožno vysvetliť ani stabilitu atómov, pretože podľa klasickej fyziky by boli elektróny z ich obalov pritiažené kladným jadrom.)

Základné kvantovomechanické princípy sú tieto:

- objekty nanosveta, napr. častice ako elektrón a väčšie, sú opísané tzv. vlnovou funkciou. Zmysel tejto funkcie vysvetlil M. Born. Vyjadruje pravdepodobnosť toho, že objekt sa v určitom čase nachádza na určitom mieste. Opis objektu nie je jednoznačný, ako sme zvyknutí v makrosvete, v ktorom žijeme, ale iba pravdepodobnostný;
- platí vlnovo-korpuskulárny dualizmus, t. j. objekty sa za určitých podmienok prejavujú ako častice, za iných podmienok ako elektromagnetické vlnenie. Napríklad svetlo sa pôvodne považovalo za elektromagnetické vlnenie, A. Einstein však ukázal, že pohlcovanie alebo vyžarovanie elektromagnetických vln sa deje v určitých kvantách – množstvách, ktoré sa neskôr nazvali fotóny, a radíme ich medzi elementárne častice. V elektrónovej litografii (kap. 7) sme zase počítali vlnovú dĺžku elektrónu, ktorý bežne považujeme za časticu;

- platia Heisenbergove vzťahy neurčitosti, ktoré hovoria, že správanie sa objektu nemôžeme poznať a opísať s ľubovoľnou presnosťou. Ak by sme chceli súčasne odmerať jeho polohu aj hybnosť, čo je súčin jeho hmotnosti a rýchlosti, zistíme, že to dokážeme iba s určitou presnosťou. Pritom pre neurčitosť polohy Δx a neurčitosť hybnosti Δp platí vzťah $\Delta x \times \Delta p \geq h/4\pi$, kde h je Planckova konštanta;
- kvantovomechanický opis väčších objektov sa približuje k ich opisu v klasickej fyzike.

Chemické väzby, t. j. pôsobenia medzi atómami alebo molekulami, sa delia na silnejšie a slabšie. Silnejšie sú kovalentná väzba a iónová väzba, slabšie sú van der Waalsova a vodíková väzba.

Kovalentná väzba je spôsobená spoločnou dvojicou elektrónov, teda elektrónovým párom, medzi atómami. Atómy sa totiž „usilujú“ o úplné zaplnenie vonkajšej, tzv. valenčnej elektrónovej sféry elektrónmi tak, ako je to vo vzácnych plynch, napr. v argóne. Zdieľanie páru elektrónov vedie k takémuto stavu v obidvoch viažucich sa atómoch. Takto je z atómov vodíka a chlóru vytvorená molekula chlorovodíka HCl.

Iónová väzba je založená na elektrickom priťahovaní sa iónov. Takto sa viažu napr. kladný ión (katión) sodíka a záporný ión (anión) chlóru a vytvárajú molekulu chloridu sodného – známej kuchynskej soli, NaCl.

V nanosvete sa často stretávame so slabou van der Waalsovou väzbou, ktorá súvisí s polarizáciou atómov alebo molekúl. Je to stav, keď sa kladné a záporné náboje v atóme, teda atómové jadro a oblak elektrónov vzájomne posunú a ich ťažiská nie sú totožné. Vytvoria sa tzv. dipóly a tie sa môžu vzájomne priťahovať. Rozlišuje sa:

- priťahovanie medzi stálymi dipólmi súvisiacimi s kryštalickou štruktúrou látky – Keesomova sila,
- priťahovanie medzi stálym dipólom a dočasným dipólom vytvoreným (indukovaným) vonkajším elektrickým poľom – Debyeova sila,
- priťahovanie medzi dvoma indukovanými dipólmi – Londonova sila.

Nakoniec spomenieme ešte vodíkovú väzbu, ktorá je tiež slabou väzbou, ale je silnejšia ako van der Waalsova väzba. Je sprostredkovaná atómom vodíka, ktorý je zlúčený s elektronegatívnym atómom, ako napr. kyslík (teda atómom, ktorý má značnú schopnosť priťahovať k sebe elektrón alebo elektrónový pár) v molekule vody (H_2O). Vodíkový atóm je zároveň priťahovaný kyslíkovým atómom inej molekuly vody. Vodík je tu potom mostíkom medzi dvoma molekulami vody, ktoré sú ním viazané. Väzba sa uplatňuje aj v organických molekulách, ako je DNA.

Na posúdenie toho, aké silné sú jednotlivé väzby, slúži ich väzbová energia. Je to energia potrebná na roztrhnutie väzby. Je uvedená v **tabuľke 4**.

Tab. 4 Energia chemických väzieb

Väzba	Typické hodnoty väzbovej energie	
	kJ/mol	eV
kovalentná	347; 614 ¹	3,6; 6,4
iónová	756 ²	6,3
van der Waalsova	2 – 4	0,02 – 0,04
vodíková	5 – 30	0,05 – 0,31

¹ hodnoty platia pre jednoduchú C – C a dvojitzú C = C väzbu atómov uhlíka

² hodnota platí pre NaCl

Kryštalovú štruktúru látok študuje kryštalografia. Opisuje usporiadania atómov v materiáloch, t. j. ich kryštalové mriežky. Opakovaním základných buniek kryštalových mriežok vo všetkých troch smeroch možno vyplniť celý priestor. Francúzsky fyzik A. Bravais ukázal, že existuje 14 typov mriežok (základných buniek), ktoré patria do 7 kryštalografických sústav: triklinickej, monoklinickej, rombickej, tetragonálnej, trigonálnej, hexagonálnej a kubickej. Mriežky sa delia na primitívne mriežky (P) s atómami iba v rohoch mriežky, priestorovo centrované mriežky (I) s atómami aj uprostred jej objemu, plošne centrované mriežky (F) s atómami v strede každej steny a bázicky

centrované mriežky (C) s atómami v strede dvoch protiľahlých stien.

V obr. 14a sú zľava doprava a zhora nadol usporiadané takto:

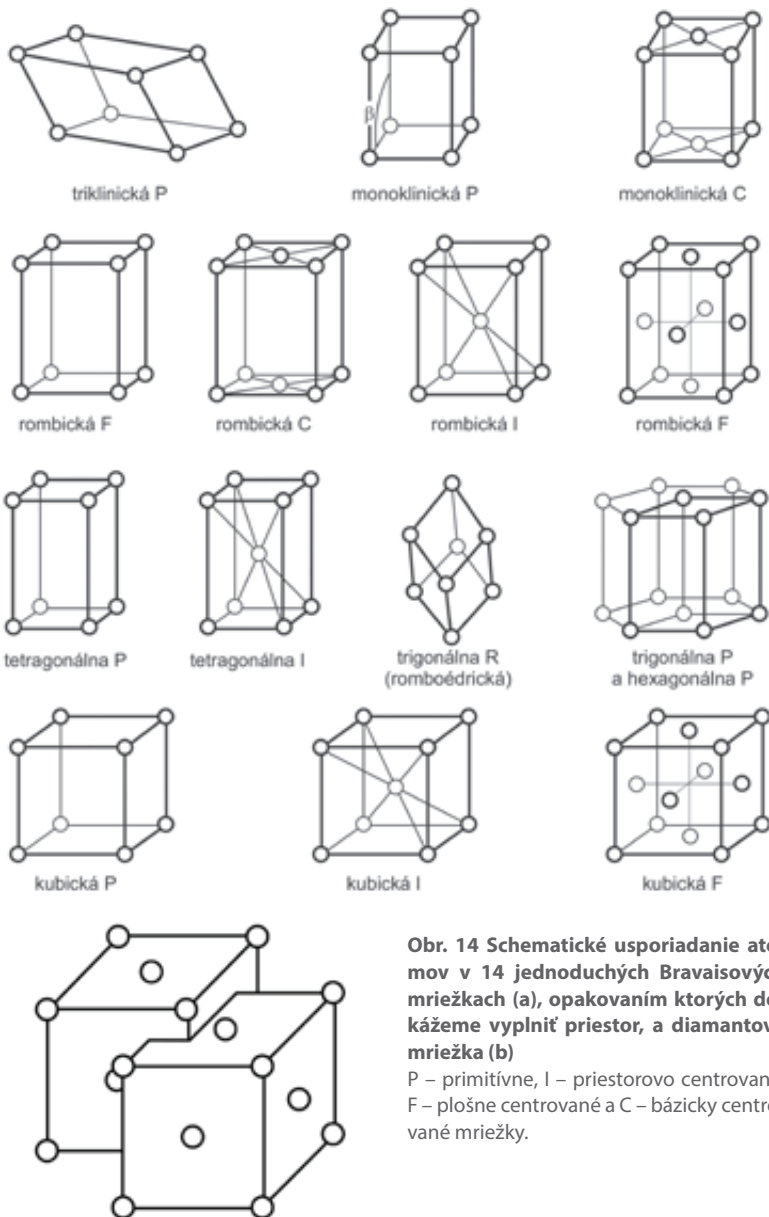
- jednoduchá triklinická,
- jednoduchá monoklinická,
- bázicky centrovaná monoklinická,
- jednoduchá rombická,
- bázicky centrovaná rombická,
- objemovo centrovaná rombická,
- plošne centrovaná rombická,
- jednoduchá tetragonálna,
- objemovo centrovaná tetragonálna,
- trigonálna (romboedrická),
- hexagonálna,
- jednoduchá kubická,
- objemovo centrovaná kubická,
- plošne centrovaná kubická.

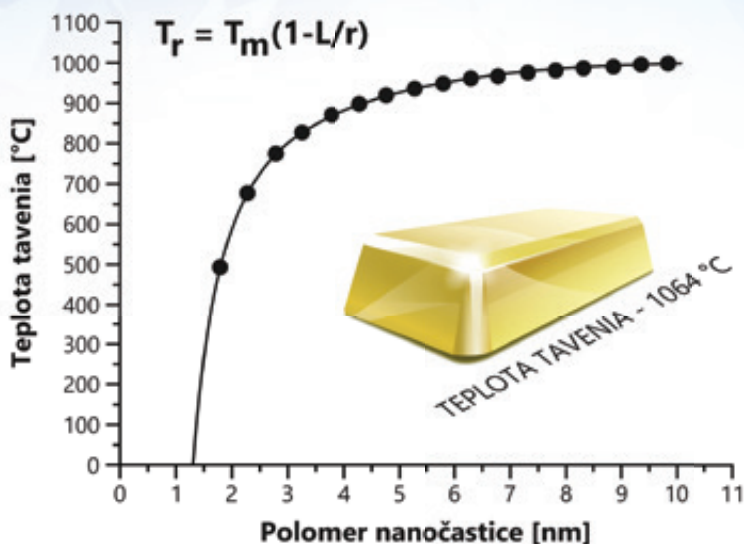
Okrem jednoduchých existujú aj zložitejšie mriežky. V diamantovej mriežke kryštalizujú technicky významné materiály – diamant a polovodiče, napr. germánium a kremík. Mriežka vznikne z dvoch kubických plošne centrovaných mriežok, ak ich posunieme v smere telesovej uhlopriečky o jednu štvrtinu jej dĺžky (obr. 14b).

Vo svete klasickej fyziky nové vlastnosti vyplývajú:

- a) z veľkého pomeru povrch/objem (aspect ratio) objektov nanosveta;
- b) z malých rozmerov nanoobjektov;
- c) zo samousporiadania nanočastíc.

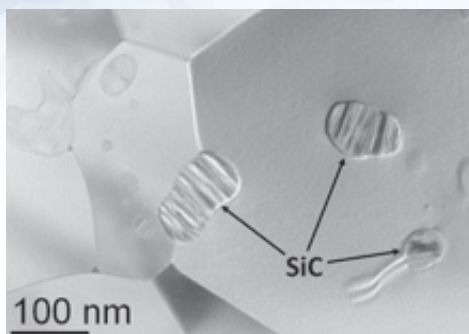
Ad a) Častica s rozmerom 10 nm má prevahu atómov v objeme, kým pri častici s rozmerom 1 nm sú takmer všetky atómy na povrchu.





Obr. 15 Teplota tavenia zlata v závislosti od polomeru častíc

To sa prejavuje poklesom teploty tavenia materiálu, napr. častice Au (obr. 15) s polomerom 2 nm sa tavia už pri 500 °C, kým bod tavenia masívnych zlatých predmetov je 1 064 °C. Súvisí to s menšou súdržnosťou mriežky materiálu, lebo atómy na povrchu majú menšie koordinačné číslo, t. j. menší počet s nimi viazaných susedov. Platí tu závislosť: $T_r = T_m(1 - L/r)$, kde T_r , T_m sú teploty tavenia zlatých nanočastíc s polomerom r a masívneho zlata a L je charakteristická dĺžka. Z rovnakých dôvodov obvykle nerozpustné látky sa v nanorozmeroch stávajú rozpustnými, nehorľavé horľavými a chemicky nereagujúce látky, ako je zlato, majú katalytické účinky, čo znamená, že urýchľujú chemické reakcie. Z rovnakých hľadísk musíme posudzovať jedovatosť, čiže toxickosť. Z pohľadu chemika sú jedovaté tie látky, ktoré sú jedovaté v masívnom stave, sú to napr. arzén, kadmium, kobalt. V nanosvete sa hovorí o „fyzikálnej“ toxickosti. Veľký efektívny povrch nanoobjektov vyvoláva vznik tzv. radikálov, teda skupín atómov, ktoré netvoria celú zlúčeninu. Ich reakčná



Obr. 16 Častice karbidu kremíka (SiC) v štruktúre keramiky nitrid kremíka (Si_3N_4)

Častice zlepšujú jej pevnosť pri izbovej teplote z 870 MPa na 1,2 GPa. Deformácia materiálu nepresiahne pri náročnom namáhaní tlakom 100 MPa pri 1 200 °C hodnotu 1 % za rok.

(Obr. uverejnený so súhlasom P. Šajgalíka, Ústav anorganickej chémie SAV, Bratislava.)

schopnosť vyvoláva zápaly, napr. pľúc, fibrózu – zjazvenie po zápaloch, ale aj rast nádorov. Takto vznikla predstava, že všetky nanočastice sú toxické. V lekárskejších aplikáciách sú však rozšírené nanočastice oxidov železa, ktoré sa považujú za neškodné – biokompatibilné, zlučiteľné so životnými procesmi. Takéto častice podliehajú navyše v živom organizme látkovej premene – metabolizujú.

Ad b) Druhá skupina efektov súvisí s malými rozmermi objektov nanosveta. Malé nanočastice prestupujú ľahko cez membrány, teda blany, napr. obaly buniek. Tenké vrstvy bežne nepriehľadných materiálov sú priezračné. Roztoky nanočastíc sú sfarbené v závislosti od rozmerov nanočastíc. V sklárstve sa to využívalo už v období antiky. Napr. *Cassiov purpur* je vytvorený zlatými nanočasticami v skle. Iným príkladom je použitie malých prímiesok v štruktúre materiálu – keramiky, na zlepšenie jej mechanických vlastností (obr. 16). Takéto materiály sa využívajú na obrábacie a rezné nástroje ako sústružnícke nože.

Ad c) Ďalším javom je samsoporiadanie: nanočastice sú schopné vplyvom pomerne slabých síl pôsobiacich medzi nimi, ako je van der Waalsovo priťahovanie, priestorové odpudzovanie – odtlačanie a vzájomné magnetické pôsobenie (ak sú častice magnetické), usporiadať sa do pravidelných súborov. Príkladom je umelý kryštál na obr. 2b, ktorý vznikol kvapnutím koloidného roztoku kobaltových nanočastíc na podložku. Takéto súbory majú aplikácie v súčiastkách, napr. v senzoch v kap. 15.2.

Osobitne zaujímavé javy sa objavujú pri vstupe do kvantového sveta. Niektoré z nich sa časom využijú v tzv. kvantovom počítaní, prípadne v kvantovej kryptografii – bezpečnom zašifrovaní textov. Na druhej strane treba mať na pamäti kvantové obmedzenia klasických súčiastok. Tu sa transport, napr. elektrická, ale aj tepelná vodivosť neriadia spojitémi klasickými zákonmi, ale prejavujú kvantovanie. Kvantové efekty limitujú aj hustotu široko využívaného magnetického záznamu, napr. na pamäťových diskoch počítačov. Aj v prípade špeciálne zvolených magnetických nanočastíc, ako je zliatina FePt, neprekročí hustota záznamu $6 - 7 \text{ Tbit/cm}^2$, čo je na prvý pohľad obrovská hodnota, ale nové požiadavky na spracovanie informácií si budú vyžadovať ešte vyššie plošné hustoty.

Nástup kvantových efektov v prípade veľmi malých nanočastíc si ozrejmieme tak, že častice sa na myslenej spojnici atóm – masívna látka posúvajú smerom k atómu, pri ktorých sa už prejavujú kvantové efekty. Teória je komplikovaná, uspokojíme sa s tým, že napr. nanočastice Au sa správajú kvantovo, ak ich rozmery sú $< 2 \text{ nm}$, čo zodpovedá asi 400 atómom v častici. V prípade polovodičových častíc musíme v takýchto prípadoch už počítať s tým, že sa im rozširuje energetická medzera (oddeľuje pásy vodivosti pomocou elektrónov a kladných nábojov – dier), čo mení správanie polovodiča. Preto sa v nanočasticových senzoroch plynov používajú radšej častice s rozmermi $> 4 \text{ nm}$.

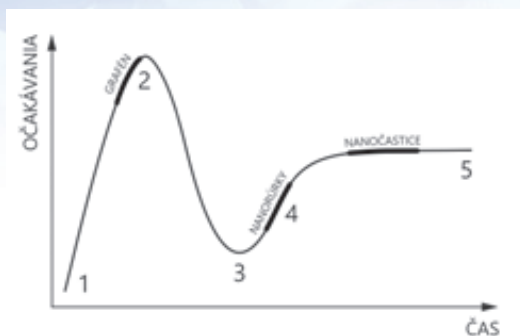
Kvantové efekty sa prejavujú aj v 2D-štruktúrach spintroniky alebo v graféne, ktorý je zaradený do [kap. 11](#).

9. Čo prinesie budúcnosť?

Nové technológie prechádzajú tzv. hype-cyklom, názov ktorého je odvodený od hyperbolizácie – zveličovania. Cykly skúma fa Gartner (Londýn) a ich poznanie je z hľadiska využitia technológie a investovania do nej užitočné. Cyklus má päť fáz (obr. 17):

- Štart technológie: jej potenciál a predpokladané inovácie priťahnu pozornosť médií, hoci ešte nie sú k dispozícii použiteľné výrobky a rozboru.
- Vrchol prehnanych očakávaní: publicistika produkuje „úspešné príbehy“, niektoré firmy začínajú podnikať, iné nie.
- Prechod údolím rozčarovania: záujem o technológiu klesá, niektoré pokusy o jej zavedenie zlyhajú. Investovanie pokračuje, ak výrobcovia zlepšujú kvalitu výrobkov k spokojnosti spotrebiteľov.
- Etapa poučenia a vzostupu využitia: podnikanie kryštalizuje, zjavuje sa experimentálna výroba. Konzervatívne firmy naďalej vyčkávajú.
- Produkcia dosahuje konštantnú hladinu, technológia je prijatá, hľadiská životnosti a zisku sú stanovené, výrobky prenikajú na trh.

Pre jednotlivé technológie, ako sú informačné technológie alebo biotechnológie, nadobúda cyklus rozličné konkrétne podoby. Nanotechnológie zahrnujú množinu rozličných procesov, ktoré sa na krivke cyklu nachádzajú v rozličných fázach. Na obr. 17 je znázornená súčasná poloha technických aplikácií grafénu, uhlíkových nanorúrok a nanočastíc. Za obdobie štartu bloku nanotechnológií možno pokladať druhú polovicu 90-tych rokov 20. storočia, kedy vznikli prvé veľké koncepcie, ktoré vyústili do prehnanych očakávaní vyhlásením Národnej nanotechnologickej iniciatívy USA. Jazyk tejto iniciatívy je poznačený prehánaním – dozvedeli sme sa, že do roku 2020 budeme mať materiály 10-krát pevnejšie ako oceľ so zlomkom jej hmotnosti, informácie obsiahnuté v Knižnici amerického



Obr. 17 Zovšeobecnený priebeh hype-cyklu, ktorý sa dá kvalitatívne aplikovať na vývoj nanotechnológií

1 – štart technológie, 2 – vrchol očakávaní, 3 – údolie rozčarovania, 4 – vzostup využitia, 5 – hladina produkcie. Na krivke je vyznačená súčasná poloha grafénu, uhlíkových nanorúrok a nanočastíc.

kongresu sa zместia do objemu, ako má kocka cukru, a onkologické ochorenia a nádory sa zistia, keď budú obsahovať ešte iba niekoľko buniek. Elektronické zariadenia budú prekladať cudzojazyčné prejavy simultánne tak rýchlo, ako dokáže človek hovoriť, molekulárne počítače budú mať rozmer ľudskej slzy a výkon ako dnešné najrýchlejšie superpočítače. Odvtedy uplynulo 14 rokov, nanotechnológia prešla etapou zrealnenia. Ako vyplynulo z [kap. 6](#), objem, do ktorého sme schopní zaznamenať informácie Knihnice amerického kongresu, zodpovedá aspoň 100 000 kockám cukru, čo je asi 150 kg tohto nie práve zdravého produktu, a do roku 2020 môžeme očakávať zvýšenie hustoty záznamu nanajvýš o jeden rád. Ale preháňanie je v politike bežné a do istej miery aj mobilizačné.

Optimistické očakávania vytvárajúce v spoločnosti nadšenie hraničiace s hystériou sa môžu prejaviť aj negatívne. Tu možno spomenúť škandál v špičkových Bellových laboratóriách v USA, kde vedecká hviezda⁷ sfaľšovala výsledky zahrnuté do 17 publikácií, pričom niektoré boli uverejnené dokonca v prestížnych časopisoch Nature a Science. Išlo o výskum elektrických vlastností organických polovodičov,

7 Jan H. Schön, označovaný ako Tiger Woods fyziky, „vyrábal“ a falšoval vedecké výsledky ako 32-ročný v r. 2002. Dovtedy vyprodukoval 90 publikácií, v priebehu roka 2001 publikoval novú prácu každých osem dní. Deň po Mikulášovi, 7. 12. 2001 potešil ľudstvo spínaním na princípe jedinej molekuly. Uvažovalo sa s ním na post riaditeľa Ústavu výskumu tuhých látok Spoločnosti Maxa Plancka v Stuttgarte, ktorý viedol laureát NC Klaus von Klitzing. Na jeho podvody sa prišlo až vďaka školáckej chybe, ktorej sa dopustil.

v ktorých sa „podarilo“ zopakovať najväčšie objavy fyziky tuhých látok 20. storočia – supravodivosť, laserovú funkciu aj zlomkový kvantový Hallov jav. Tento výbuch tvorivosti sa chápal ako triumf nanovedy. Previnilec bol prepustený zo zamestnania, ale nepríjemnosti mali aj spoluautori, redaktori, vedúci výskumu.

Súčasný stav v nanovede a nanotechnológiách nasvedčuje tomu, že približne po 15 rokoch sa odbor dostáva na úroveň produkcie. Štúdia známa ako Nano 2 ukazuje, že N&N dozreli v oblasti nanoelektroniky aj v oblasti nanomateriálov. Objaviteľská fáza nie je však uzvretá a základný výskum pokračuje. Reálne očakávania sa dajú kvalitatívne vyjadriť takto:

- pevnejšie materiály,
- trvanlivejšie kompozitné materiály,
- nové povrchové pokrytia,
- zlepšené lieky,
- umelé kosti, koža, srdcové tkanivá,
- plazmonické fotovoltické články so zvýšenou účinnosťou,
- tranzistory a káble s malými energetickými stratami z uhlíkových nanorúrok,
- citlivejšie nanosenzory,
- filtre na dekontamináciu vody,
- náhrada plastov petrochemického pôvodu rastlinnými produktmi,
- termochromické samočistiace a protihmlové sklá a pod.

Na dosiahnutie týchto cieľov sa vynakladajú veľké prostriedky. Odhad v rokoch 2000 – 2015 vo svete je 250 mld. US dolárov. (Pozri tiež [kap. 4.](#))

10. Sú nanotechnológie škodlivé?

Na otázku, či sú nanotechnológie škodlivé, možno odpovedať protitázkou: sú nôž, dynamit alebo alkohol škodlivé? Všetko je vecou použitia a zneužitia. Je tu však jeden významný rozdiel: nôž, alkohol a dynamit vidíme, ale nanočastice voľným okom nevidíme.

Vzhľadom na obavy verejnosti z N&N vydala Európska komisia *Kódex správania pre zodpovedný výskum v nanovedách a nanotechnológiách*. Dokument je významný pre rozvoj, využitie a bezpečnosť N&N. Dodržiavanie kódexu je dobrovoľné, ale dôrazne odporúčané. Vztahuje sa na všetky výskumné aktivity, ktoré sa zaoberajú látkou v rozmedzí 1 až 100 nm. Pokrýva však iba nanoobjekty zámerne alebo neúmyselne vytvorené človekom. Prírodné nanoobjekty sú z rámca kódexu vylúčené. Stanovuje sa, že výskum v N&N má byť pre verejnosť zrozumiteľný, bezpečný, etický, udržateľný, musí predvídať ohrozenia, výsledky sa musia uverejňovať jasne a vyvážené, treba vytvoriť štandardnú terminológiu a i.

Obavy verejnosti vyvolávajú na jednej strane samostatne sa množiace nanosystémy, roboty vymykajúce sa kontrole, odludštené bytosti, na druhej strane sú to biologické zbrane, jedovaté nanomateriály, výrobky nanoelektroniky – všadeprítomné senzory a kamery prepojené na „smädné“ počítače⁸, v biológii „molekulárne nahí“ pacienti, v kriminalistike utajené odtlačky prstov a pod. Prvá skupina patrí (zatiaľ) do kategórie *science fiction*. Popularizoval ju Drexler vydaním knihy o *assembleroch* – zariadeniach, ktoré dokážu zhotovovať svoje vlastné kópie. (Námet pripomína román K. Čapka *Vojna s mlakmi*). Na druhej strane sú to reálne hrozby, ktoré môžu využívať tajné služby, teroristi, môžu vyústiť do epidémií alebo ohrozenia súkromia (kap. 13).

Regulačné opatrenia v N&N vychádzajú z manažmentu rizika, ktorý má v rozličných etapách hype-cyklu rozličné formy:

- prvotné opatrenia – zber informácií, pozorovanie,

8 Na základe podobnosti s románom G. Orwella *Tisícdeväťstoosemdesiatštyri sa hovorí o technológiách „veľkého brata“*.

- krátkodobé opatrenia – normy, samoregulácia,
- strednodobé opatrenia – zosilnená samoreguácia,
- dlhodobé opatrenia – normy a zákony.

V N&N sa používa široký sortiment nanočastíc (tab. 5). Niektoré z nich sú aj chemicky jedovaté. O fyzikálnej toxickosti som sa zmienil v kap. 8. Do organizmu sa častice dostávajú vdychovaním, potravou, kontaktom s kožou. Podstatné je, že platí vzťah:

$$\text{hazard} = \text{riziko} \times \text{expozičia} \quad (\text{rovnica 4})$$

Prvoradým opatrením je vylúčiť expoziciu. Vo výskume sa častice často udržujú v koloidnom roztoku. V tomto prípade sú podstatne menej nebezpečné, ako keď sú rozptýlené vo vzduchu alebo inom plyne (aerosól). Hrozby spočívajú v mutagenite – schopnosti látky vyvolať zmenu genetickej informácie, genotoxickosti – poškodení tejto informácie s vyústením do karcinogenity – schopnosti vyvolať rast nádorov.

Riziko vo vzťahu (4) je pravdepodobnosť, že vznikne škoda na zdraví alebo majetku. Posudzuje sa podľa pomeru škody a zisku. Úplné vyúčenie rizika by ohrozovalo rozvoj. Rozhodujúca je preto prevencia.

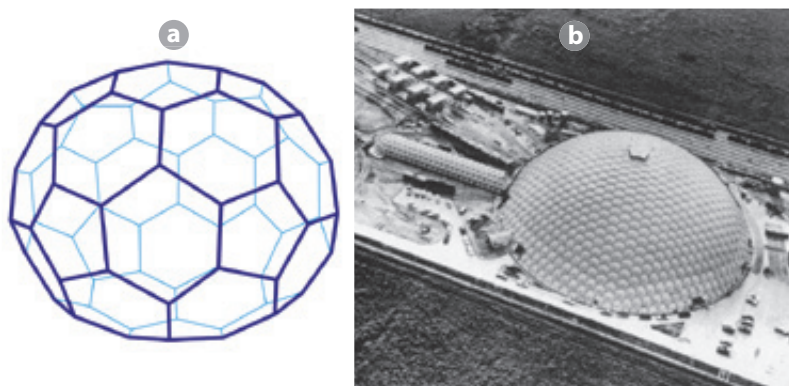
Tab. 5 Základný výber nanočastíc používaných v N&N

Kovy	Ag, Al, Au, Co, Cu, Ni, Pd, Pt, Zn
Oxidy	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , TiO ₂ , WO ₃ , ZnO
Zlúčeniny	AgCu, BaTiO ₃ , CuNi, MoS ₂
Polovodiče	CdS, CdTe, Si, GaAs, InP

Nanočastice uvedené v **tab. 5** a iné nanoobjekty prenikajú do technických aj netechnických oblastí, ako sú nové materiály, energetika, doprava, chémia a petrochémia, poľnohospodárstvo a bezpečnosť, ale aj elektronika, komunikácie, zdravotná starostlivosť vrátane liečiv, životné prostredie a samozrejme obrana. Zlepšovanie vlastností materiálov sa dosahuje kontrolou a ovplyvňovaním ich štruktúry. V energetike sú stredobodom pozornosti obnoviteľné zdroje energie, ku ktorým patrí okrem iného biomasa, vietor, slnko, geotermálne teplo, príliv a odliv. Významné sú tu nanopórové materiály na uskladnenie vodíka ako nového typu paliva po jeho vyrobení. Veľké pole majú nanotechnológie vo fotovoltaike, kde sa úpravou povrchu dosiahne lepšia absorpcia slnečného žiarenia. Dôležitou úlohou je zmenšenie úniku tzv. skleníkových plynov, najmä CO_2 , do atmosféry. Tieto plyny spôsobujú globálny ohrev. Uplatnenie nájdú uhlíkové nanorúrky ako súčasť filtračných membrán, pomocou ktorých sa CO_2 oddelí od výfukových plynov, ktoré pokračujú do komína. CO_2 sa zachytí napr. pomocou nanopórovitých metaloorganických zlúčenín a nakoniec sa napumpuje do ropných ložísk, do prístupných hornín a pod. Tomuto procesu sa hovorí *sekvestrovanie* CO_2 . V motoroch lietadiel nájdú nové materiály až 20 aplikácií s dosahom aj na kozmické technológie, automobilizmus i vodnú dopravu. Výstupmi chémie budú membrány pre techniky oddeľovania, povrchy odpudzujúce znečistenie, napr. trupu plavidiel morskými živočíchmi, pracuje sa na samočistiacich povrchoch. V etape klimatickej zmeny a straty poľnohospodárskej pôdy, ktorá sa mení na púšte, je hlavnou výzvou produkcia potravín. Riešenia, ktorými môžu nanotechnológie prispieť k zvýšeniu úrodnosti pôdy a kvality produktov, sú: pomalé uvoľňovanie hnojív, výživových látok a ochranných prostriedkov rastlín z nanoštrukturovaných nosičov v programovanom časovom režime, nanosenzory monitorovania vývoja rastlín a hospodárskych zvierat, využitie magnetických nanočastíc na odstránenie znečistenia a infekčných látok z pôdy. Bezpečnosť je prirodzeným ihriskom nanotechnológií, pretože zariadenia musia byť malé a všadeprítomné. Nanočastice sa už

dnes uplatňujú v senzoroch, analyzátoroch, v špeciálnom prípade v tzv. elektronických nosoch, ktoré rozlišujú zloženie plynov prostredia. O nanotechnológiách v obrane sa bude hovoriť v **kap. 13**.

Neskreslené odovzdávanie informácií v N&N vyžaduje zjednotenú terminológiu a štandardizáciu základných pojmov a definícií. Východiskovú štúdiu spracovalo JRC EC. Definíciou kľúčových pojmov prispelo do normy ISO/TS80004-1:2010. Štandardizácia sa však týka aj výroby, nasadenia a bezpečnosti produktov. Nezanedbateľný je ekonomický dopad štandardizácie. Jej príspevok k HDP v Európe je asi 1 %.



Obr. 18 Štruktúra molekuly fullerénu C_{70} (a) a kupola v Baton Rouge v USA od architekta Fullera podobná štruktúre fullerénu (b)

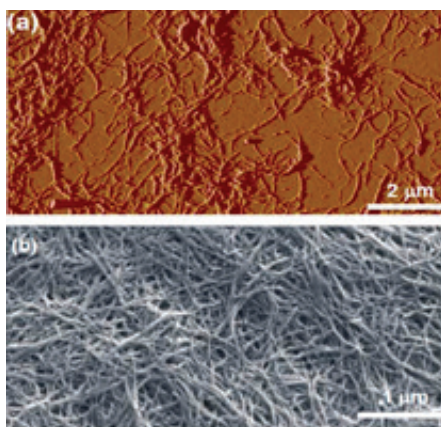
Chodba vychádzajúca doľava pripomína nanorúrku.
(Zdroj – Encyklopédia Beliana)

11. Grafén, uhlíkové nanorúrky, fullerény

Uhlík, prvok s atómovým číslom 6, sa stal v posledných desaťročiach najskúmanejším materiálom v N&N. Vyznačuje sa alotropiou – má rozmanité tvarové formy: kubický diamant, hexagonálny grafit, amorfný uhlík, fullerény, uhlíkové nanorúrky a grafén. Pozornosť sa venuje najmä posledným trom formám. Patria medzi míľniky N&N (kap. 3) v rokoch 1985 (fullerény), 1991 (nanorúrky) a 2004 (grafén). Za výskum fullerénov a grafénu boli udelené Nobelove ceny.

Fullerény sa podobajú guľatej futbalovej lopte alebo elipsoidickej rugbyovej lopte, ktoré sú pozošívane z päťuholníkov a šesťuholníkov. Bežné fullerény sú guľatý C_{60} a elipsoidický C_{70} (obr. 18a) s počtom atómov uhlíka 60 a 70. Pozorovali sa aj fullerény C_{90} , C_{36} a i. Fullerény „cibuľového“ typu pozostávajú z viacerých vrstiev. Ak je vnútornou škrupinou C_{60} , nasledujúca je C_{240} , tretia C_{540} atď. Fullerény dostali meno podľa architekta R. B. Fullera, ktorý konštruoval kupoly podobného tvaru (obr. 18b).

Uhlíkové nanorúrky sú valčeky, ktoré môžu byť jednostenné alebo mnohostenné. Mnohostenné pozostávajú z rúrok s väčším priemerom, do ktorých sú zasunuté rúrky s menším priemerom ako v ruskej matrioške. Rozdiel medzi polomeri väčšej a menšej rúrky je vždy 0,34 nm,

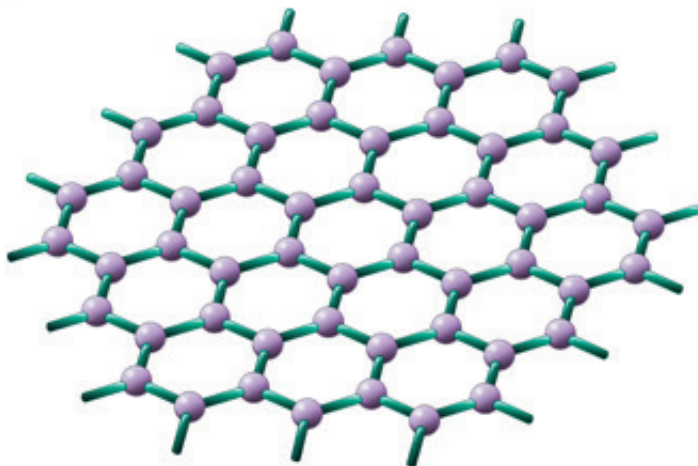


čo je hrúbka mononovrstvy grafénu (tab. 2 a 7). Priemer najtenšej jednostennej nanorúrky je 0,7 nm, mnohostenné nanorúrky dosahujú priemery

Obr. 19 Tenká, opticky priehľadná sieť jednostenných uhlíkových nanorúrok zobrazená pomocou AFM (a) a povrch samonosného „papiera“ z jednostenných uhlíkových nanorúrok zobrazený pomocou SEM (b)

(Obr. uverejnený so súhlasom V. Skákalovej z Viedenskej univerzity.)

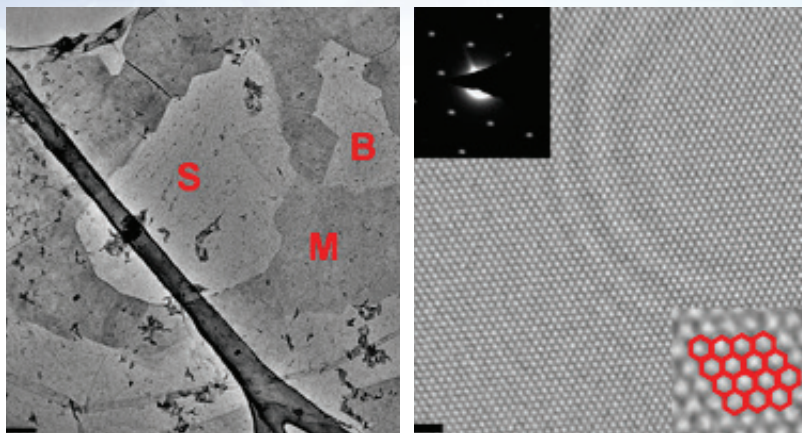
120 – 150 nm a dĺžky stovky μm . Nanorúrky sú zvinuté z monoatomárnych vrstiev grafitu pripomínajúcich včelí plást. (Na obr. 18b chodba vychádzajúca z kupoly pripomína nanorúrku.) Jednostenné uhlíkové nanorúrky sú na obr. 19.



Obr. 20 Schematické zobrazenie grafénu

Monoatomárna vrstva grafitu sa nazýva grafén (v angl. *graphene*). Podľa definície A. Geima má byť vrstva voľná a dostatočne izolovaná od okolia. Koncovka -én (v angličtine -ene) sa zavádza vo výrazoch označujúcich aj iné monoatomárne alebo monomolekulárne vrstvy, napr. kremíka – silicén (silicene). Zaviedli ju Boehm et al. r. 1994. Na obr. 20 je grafén znázornený schematicky a na obr. 21 sú monovrstva, dvojvrstva a multivrstva grafénu zobrazená pomocou TEM.

Fullerény, nanorúrky a grafén som uviedol v poradí, ako boli objavené alebo zhotovené. To, že najprv prišli na scénu najkomplikovanejšie fullerény, potom nanorúrky a najjednoduchší grafén až nakoniec, súvisí s tým, že do seba uzavreté útvary fullerénov a nanorúrok sú stabilnejšie. Význam prác Geima a Novoselova bol tiež v tom, že ukázali, že aj grafén ako rovinný útvar je stabilný a nezvinie sa do rúrok, alebo nevytvorí štruktúru fullerénov, čo by sa dalo očakávať, lebo uzavreté útvary sú z energetického hľadiska výhodnejšie.



Obr. 21 Grafén pripravený chemickou depozíciou z metánu, prenesený na mikroskopickú sieťku s otvormi $3,5\ \mu\text{m}$, študovaný pomocou TEM

a) S – monovrstva, B – dvojvrstva, M – multivrstva grafénu, mierka – 250 nm;

b) dokonalá monokryštalická štruktúra monovrstvy grafénu z obr. a v atomárnom rozlíšení bez defektov, vpravo dole detail, vľavo hore záznam z difrakcie elektrónov, mierka 1 nm (Obr. uverejnený so súhlasom V. Skákalovej z Viedenskej univerzity.)

Fullerény boli pôvodne pripravené odparovaním grafitu pomocou impulzov výkonných laserov v prostredí argónu, ktorého tlak bol asi dve tretiny atmosférického tlaku. Neskôr (1995) sa takto pripravili aj uhlíkové nanorúrky. Ale iba pomocou elektrického oblúka medzi grafitovými elektródami (podobného oblúku, ktorý sa používa na zváranie) a v prostredí vzácných plynov, ako je hélium, prípadne argón, sa podarilo v rokoch 1990 – 1991 pripraviť fullerény a nanorúrky v množstvách dostatočných na využitie. Rôznorodé využitie majú najmä nanorúrky napr. v separácii plynov (kap. 10), v transporte liečiv, liečení nádorov prehrievaním, v uskladnení vodíka alebo ako emitory elektrónov.

Spomeniem ešte využitie nanorúrok v kozmických výťahoch, aj keď táto téma je zatiaľ iba ideovým projektom. Uvažuje sa o nej od r. 1960, keď ideu publikoval J. Artsunov. Do úvahy prichádza spojenie povrchu Zeme a jej družice na tzv. stacionárnej orbite. Je vo výške 36 000 km, kde sa zemská príťažlivosť a odstredivá sila obiehajúcej družice kompenzujú tak, že družica sa otáča zároveň so Zemou a je

stále na tom istom mieste nad jej povrchom. V prípade Mesiaca by podobný lunárny výťah spojil jeho povrch so stacionárnou družicou, ktorá je v tomto prípade vo výške 56 000 km nad Mesiacom. Horné stanice výťahov by boli miestom štartu a pristávania kozmických raket, ktoré by mali podstatne menšiu spotrebu paliva, lebo stanice by boli v prostredí menšej gravitácie (ktorá nad povrchom telesa klesá s druhou mocninou výšky). Horné stanice potrebujú ešte protizávažia na tej strane stanice, ktorá je odvrátená od povrchu Zeme alebo Mesiaca. Ak by sa dobývanie kozmu znova rozbehlo, nosný kábel lunárneho výťahu by sa dal zhotoviť z dnes existujúcich materiálov, ktoré sú dostatočne pevné, aby odolali gravitácii Mesiaca. Pre výťah zo Zeme sa počíta s pevnejšími uhlíkovými nanorúrkami (tab. 6).

Tab. 6 Materiály na zhotovenie nosných káblov kozmických výťahov

Vláknó	Hustota [kg/m ³]	Pevnosť [N/m ²]	Dĺžka pretrhnutia* [km]
Spectra 200, fa Honeywell	970	3×10^9	316
Kevlar 49, fa DuPont	1 440	$3,6 \times 10^9$	255
Jednostenné uhlíkové nanorúrky	2 266	5×10^{10}	2 200

*Dĺžka, pri ktorej sa vlákno v prostredí zemskej gravitácie odtrhne v mieste uchytania vlastnou tiažou.

V ďalšom texte sa budem venovať grafénu ako t. č. najskúmanejšiemu materiálu v nanovede. Z toho, že označenie *grafén* pochádza z r. 1994, je zrejmé, že výskum sa ním zaoberá dávnejšie. Prvé mikroskopické pozorovania niekoľkovrstvových šupín z grafitových monoatomárných vrstiev sa datujú do polovice 20. storočia a monovrstvy grafitu sa deponovali na podložky z rozličných materiálov v 70-tych rokoch 20. storočia. Boli to však ojedinelé pokusy. Až keď Geim a Novoselov r. 2004 oddelili monovrstvu grafitu z jeho povrchu metódou, ktorej sa hovorí mikromechanické štiepenie alebo ľudovo „metóda lepiacej pásy“, preniesli ju na povrch oxidovaného kremíka (Si/SiO₂) a poukázali na jej mimoriadne vlastnosti, vypukla vo výskume „grafénová zlatá horúčka“. Ak skúmame elektrické vlastnosti grafénu, najmä jeho vodivosť,

je umiestnenie na povrchu elektricky izolujúceho SiO_2 dobrým priblížením k požiadavke, že grafén musí byť voľný a izolovaný od okolia.

Geim a Novoselov obdržali r. 2010 Nobelovu cenu za fyziku „za prelomové experimenty týkajúce sa dvojdimenzionálneho materiálu grafénu“. Laureáti teda grafén neobjavili, ale upozornili na sériu prác v popredných časopisoch. Pre využitie grafénu je dôležité, či je viditeľný v optickom mikroskope. Je na prvý pohľad prekvapujúce, že táto monoatomárna vrstva sa dá pozorovať napr. na SiO_2 hrubom 90 nm, kde sa pri vlnovej dĺžke svetla 530 nm (zelená oblasť) dosiahol postačujúci 12 % kontrast oproti podložke. (Na druhej strane mydlové bubliny hrúbky 5 nm vnímame aj okom.)

Mikromechanické štiepenie je technika, ktorá nie je využiteľná vo výrobnom meradle a nehodí sa do kremíkovej elektroniky. Rozpracovávajú sa praktickejšie metódy, ako je napr. nanášanie grafénu na podložky, grafitizácia SiC vyparením Si z povrchu vo vákuu alebo rovnaký proces pod tlakom argónu blízky atmosférickému tlaku.

Grafén je dvojdimenzionálny (2D) kov s dierovou vodivosťou a hustotou nosičov náboja $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Vybrané rekordné vlastnosti grafénu sú v **tab. 7**.

Tab. 7 Vybrané vlastnosti grafénu a jeho porovnanie s materiálmi, ktoré majú vzhľadom na uvedenú vlastnosť široké využitie

Vlastnosť	Hodnota	Porovnanie
hrúbka monovrstvy	0,34 nm	neporovnáva sa
vzdialenosť atómov uhlíka v hexagonálnej štruktúre	0,142 nm	neporovnáva sa
plošná hustota	0,77 mg/m ²	neporovnáva sa
špecifická plocha obojstranne	2 600 m ² /g	Fe ₂ O ₃ nanočastice s priemerom 6,4 nm: 180 m ² /g uhlíkové nanorúrky: 1 500 m ² /g
plošná hustota nosičov náboja	10 ¹² /cm ²	neporovnáva sa
pohyblivosť nosičov náboja pri RT	20 000 cm ² /(V s)	GaAs: 8 500 cm ² /(V s)
max. pohyblivosť nosičov náboja vo voľne visiacom graféne pri 5 K	230 000 cm ² /(V s)	GaAs: 110 000 cm ² /(V s)
merný odpor	1 μΩcm	striebro: 1,6 μΩcm

tepelná vodivosť	5 000 W/(K m)	meď: 390 W/(K m) diamant: 2 200 W/(K m)
modul pružnosti v ťahu *	2,4 TPa	ocel: 0,2 TPa uhlíkové nanorúrky: 1,2 TPa
pevnosť	42 N/m**	ocel: do 9×10^8 N/m ²
povrchová energia	46,7 mJ/m ²	neporovnáva sa

*tzv. Youngov modul udáva odolnosť materiálu proti deformácii

**pevnosť monovrstvy grafénu hrúbky 0,34 nm je po prepočítaní $1,2 \times 10^{11}$ N/m²

Iné vlastnosti grafénu vhodné pre elektroniku, osobitne pre senzory plynov a chemické aplikácie, sú stabilita kryštalografickej štruktúry, nízky šum, využitie na ohybných podložkách, rovinná štruktúra vhodná na rozdiel od nanorúrok pre integráciu súčastok i schopnosť prekryvať stupne v podložke (kobercový efekt). Grafénový senzor, ktorý zaznamenal prítomnosť jedinej molekuly NO₂ alebo čpavku NH₃ (v prostredí nosného plynu – dusíka alebo hélia) uverejnili už r. 2007 laureáti NC. Adsorbovaná molekula plynu spôsobila dodanie alebo odobratie jediného elektrónu v aktívnej oblasti senzora s plochou $1 \times 1 \mu\text{m}^2$, čo spôsobilo merateľnú zmenu jeho odporu, lebo základná hustota elektrónov bola malá a senzor mal malý šum.

K nevýhodám materiálu patria pevné väzby v rovine grafénu, ktoré spôsobujú nízku chemickú reaktivitu, preto grafén treba niekedy chemicky aktivovať. (Naopak, medzi rovinami grafitu pôsobia slabé van der Waalove sily, preto materiál možno štiepať.) Nevýhodou je, že uhlíkové materiály v biologickom prostredí nedegradujú, vyznačujú sa dlhodobou toxickosťou s možnosťou vyvolávať zápaly.

V roku 2008 bola publikovaná ďalšia unikátna vlastnosť grafénu – jeho nepriepustnosť. Grafénové membrány neprepúšťajú nielen plyny, ako je dusík, kyslík, ale ani plyny s najmenšími molekulami, ako je He alebo H₂ (0,074 nm). Benzenové jadro grafénu s väzbami medzi uhlíkmi dlhými 0,142 nm (obr. 20) má síce otvor široký 0,246 nm, čo priepustnosť plynov zdanlivo neblokuje, ale otvory sú efektívne zmenšené na 0,064 nm silovým poľom väzieb v mriežke. Grafén

v dôsledku svojej pevnosti⁹ odolá pretlaku 6×10^5 Pa, čo je viac ako tlak v pneumatike kamióna. Otvory v graféne možno však kontrolované zväčšovať, napr. UV žiarením alebo zväzkom iónov, a vyrobiť tak membrány na filtrovanie vody a iné použitia.

Intenzívny výskum odhaľuje nové využitia tohto pozoruhodného materiálu. Treba však pamätať na to, že lacná technológia získavania veľkoplošných grafénových plátok je stále nevyriešenou výzvou.

Silicén

Grafénu je podobný silicén, monoatomárna vrstva kremíka. Jej príprava nanosením v ultravysokom vákuu na povrch striebra sa zvládla r. 2010. Mriežka silicénu je komplikovanejšia ako v prípade grafénu, pretože kremík rovnako ako diamant a polovodič germánium má diamantovú štruktúru (obr. 14b). Preto monoatomárna vrstva silicénu pozostáva vlastne z dvoch kremíkových podmriežok vzdialených od seba 0,02 nm. Zo silicénu sa dajú zhotoviť aj nanorúrky. Jeho výhodou v porovnaní s grafénom je lepšia zlučiteľnosť s kremíkovou technológiou elektronických súčiastok. Výskum silicénu sa rozbieha v druhom slede za grafénom.

9 Šesťuholníkové štruktúry sú najpevnejšie, využívajú sa v stavebníctve, včely pomocou nich budujú pevné pláсты pri najmenšej možnej spotrebe vosku.

12. Nezodpovedané otázky

Do úvah o budúcnosti nanovedy, nanotechnológií a nanoelektroniky možno pojať viacero tém. Spomeniem dve z nich.

12.1. Skladanie štruktúr atóm po atóme – áno či nie?

Feynmanova idea manipulovania vecí atóm po atóme prenikla do N&N ako „romantický variant“, ktorý dostával a ešte aj dostáva naivné a prehnané rozmery, napr. úvahami o „zložení automobilu atóm po atóme“. Pri manipulácii atómov rýchlosťou svetla by to trvalo takmer tolko, koľko uplynulo od vzniku vesmíru pred 13 mld. rokov.

Dnes sa v N&N využíva chémia, ktorá neumožňuje kontrolu reakcií na úrovni jediného atómu. Do chemických reakcií nevstupujú atómy, ale zhľuky aspoň 5 až 15 atómov naraz. Preto sa proti skladaniu štruktúr atóm po atóme postavil nakoniec sám „otec nanotechnológie“ R. Smalley. Oponoval predstavám E. Drexlera, autora idey molekulárnych assemblerov (kap. 10). Uviedol námietky známe ako problém lepivých prstov (*sticky fingers problem*) a problém hrubých prstov (*fat fingers problem*). V prvom prípade ide o to, že nie je jednoduché uchopiť, preniesť a na iný atóm umiestniť manipulovaný atóm, lebo medzi atómami pôsobia sily príľnavosti. Podobný problém máme, keď manipulujeme s lepiacou páskou, ktorá sa nám lepí na prsty. Určitým východiskom je znehybniť atómy alebo molekuly chladením (obr. 8), ale možnosti to zužuje. V druhom prípade je problémom umiestniť v nanometrovom priestore potrebné manipulátory s ich prstami – hrotmi. Podobný problém máme, keď pri písaní na klávesnici počítača stlačíme naraz dve klapky, alebo sa na displeji telefónu dotkneme dvoch ikon. Narážame aj na difúziu atómov tepelným pohybom, ktorá rozrušuje usporiadania atómov a dalo by sa tomu znova čeliť iba chladením, a aj na pomalosť atómovej manipulácie. Námietky nie sú vždy prijímané súhlasne a hľadajú sa nové východiská.

Jednou z možností, ako obísť pomalosť, je paralelná manipulácia mnohých atómov naraz pomocou mnohohrotového SPM. Uviedol som ju v **kap. 5 (obr. 9)**. Táto idea vyústila zatiaľ do urýchlenia mikroskopovania alebo litografických metód. Sú však aj iné techniky na úrovni jedného atómu alebo dokonca elektrónu. Mám na mysli jednočasticové súčiastky uvedené v nasledujúcom odseku.

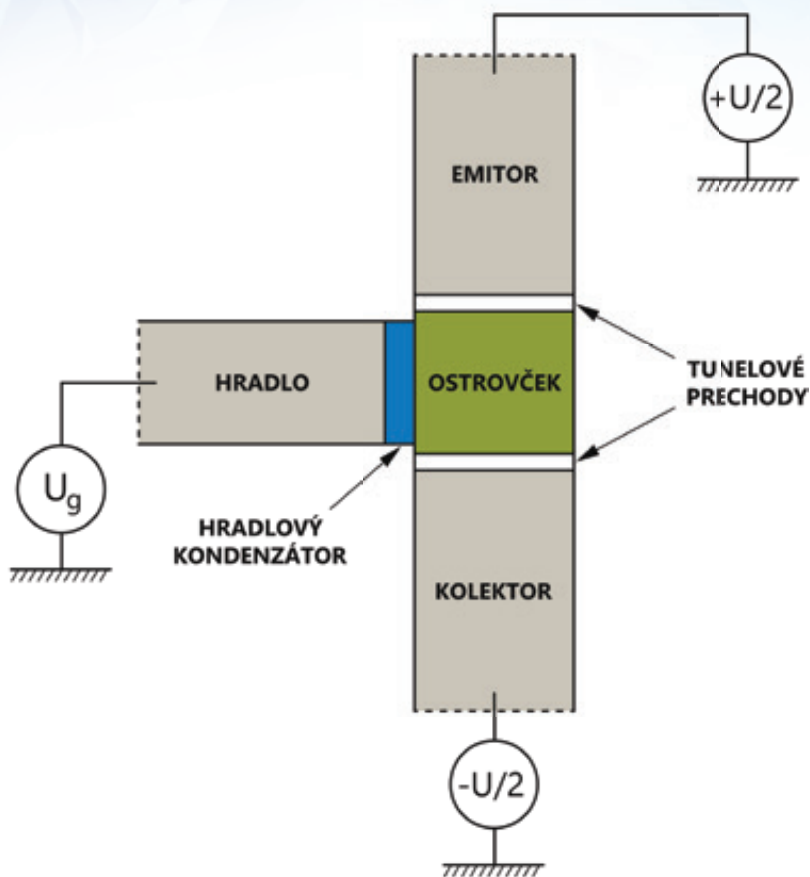
Záverom možno konštatovať, že idea manipulovania látky atóm po atóme neprotirečí fyzike, ale vytváranie súčiastok nie je prakticky schodné a nateraz nemá využitie. V tomto zmysle bola táto otázka uzavretá pred asi desiatimi rokmi, nemusí však byť uzavretá navždy. To zároveň nespochybňuje víziu Feynmana o N&N.

Jednočasticové súčiastky

Predošlý záver neznamena, že nanotechnológia sa vzdala využitia jednotlivých atómov, molekúl alebo iných častíc v iných oblastiach. Príkladom je jedoelektrónový tranzistor (**obr. 22**), ktorý reaguje na tunelovanie jediného elektrónu do ostrovčeka s rozmerom 5 nm, elektricky izolovaného od substrátu. (Zaradil som ho medzi míľniky N&N v **kap. 3**). Je to FET-tranzistor, v ktorom sa prítok prúdu medzi emitorom a kolektorom ovláda napätím hradla U_g cez hradlový kondenzátor. Ostrovček je od elektród oddelený tunelovými prechodmi. Hradlom sa nastavujú pomery tak, aby došlo k tunelovaniu.

Inými príkladmi jednočasticových súčiastok sú:

- jednoatómový tranzistor, v ktorom sa veľmi úzka medzera medzi dvoma striebornými elektródami uzavrie, alebo naopak otvorí mechanickým posunom jediného atómu Ag, čím sa zopne, alebo preruší elektrický prúd;
- grafénový senzor schopný zaznamenať prítomnosť jedinej molekuly plynu (**kap. 11**);
- supravodivý detektor z nanodrôtu s prierezom $5 \times 100 \text{ nm}^2$, ktorý zaznamená jediný fotón.



Obr. 22 Štruktúra jednoelektrónového tranzistora

U_g a U sú ovládacie elektrické napätia

12.2. Budúcnosť kremíka

Kremík kraluje v mikroelektronike už 60 rokov a kraluje aj v nanoelektronike. V uvedenom období mal niekoľkých vyzývateľov usilujúcich sa nahradiť ho, alebo aspoň mu konkurovať.

- V 80-tych rokoch 20. storočia sa objavili magnetické bubliny v magnetických zliatinách nazývaných permalloye, zložených spravidla z niklu a železa, na riešenie magnetických pamätí. Výhodou bolo, že zaznamenanú informáciu udržia aj po vypnutí elektrického napájania. (Sú to tzv. nevolatilné pamäti.) Neboli však konkurencieschopné vzhľadom na rýchly vývoj Si-pamätí typu RAM, v tomto prípade *flash* RAM.
- Podobný záujem vyvolali supravodičové procesory a pamäti zo supravodičových spojov s tunelovaním (pomenovaných podľa B. Josephsona ako Josephsonove spoje), ktoré až do štádia prototypov vyvinula firma IBM. Prednosťou bolo rýchle spínanie súčiastok v čase okolo 1 ps a malý šum, pretože súčiastky pracovali pri ochladení na nízkej teplote. To však bola zároveň komplikácia a kremík odrazil aj túto výzvu.
- GaAs je polovodič, ktorý je korunným princom v rodine polovodičov a zrejme ním aj zostane. Našiel špeciálne použitia v obvodoch pracujúcich s veľkými frekvenciami signálu a vo fotonike, ale kremíkom tiež neotriasol.

Postavenie kremíka súvisí s jeho neobmedzenou surovinovou dostupnosťou, (kremičitý piesok je k dispozícii kdekoľvek) a kvalitným oxidom SiO_2 využívaným na povrchovú ochranu súčiastok, tzv. pasiváciu, na izolačné účely a aj v tvarovaní (obr. 11). Kremík možno využívať aj v dostatočnom rozsahu teplôt. Treba brať do úvahy tiež ekonomickú zotrvačnosť výrobcov. Nové riešenia vyžadujú technické prezbavenie. Pred 12 rokmi bola cena jednej linky na výrobu kremíkových čipov okolo 1 mld. US dolárov, dnes je to podstatne viac.

Moorov zákon však smeruje ku svojmu historickému koncu (kap. 4) a znova sa otvára otázka ďalšieho smerovania nanoelektroniky. Zvyšovanie objemu a rýchlosti spracovania informácií sa bude riešiť súbežnosťou tak, ako sa zhotovujú veľké superpočítače pozostávajúce z tisícov jadier; nanotechnológie však ponúkajú aj čiastkové zlepšenia kremíkovej technológie, ktorá si tak udrží svoju pozíciu. Mohli by to byť uhlíkové nanorúrky ako elektrické vodiče v IO alebo lepšie chladenie obvodov pomocou

grafénu (tab. 7) potrebné preto, lebo hustota súčiastok na čipe rastie. Neočakáva sa zásadne nová prelomová technológia. V Európe je sledovanie tejto línie prvoradé, lebo polovodičový sektor zamestnáva vyše 100 000 osôb priamo a mnoho ďalších nepriamo.

Nové princípy, ktoré obohatia nanoelektroniku, predstavuje už spomenutá spintronika a jej využitie v magnetických pamätiach typu RAM a tiež pamäti typu PC RAM, ktoré zaznamenajú informáciu prechodom materiálu z kryštalického do amorfného stavu a naopak.

13. Spoločenské a humanitné vedy v nanovede a nanotechnológii, nanoetika – nový smer rozvoja etiky

Výrok Maynarsa (kap. 1) poukazuje na to, že k rozvoju nanovedy a nanotechnológií majú čo povedať aj spoločenské a humanitné vedy. Treba riešiť problémy etiky, ochranu súkromia, ekonomické súvislosti N&N, ich udržateľnosť a i. Rozhodujúca je tu však etika ako náuka o mravnosti a sústave noriem spoločensky vhodného správania, čo vyústilo do založenia časopisu vydavateľstva Springer *Nanoethics* (Nanoetika) v roku 2007, časopisu *Nanotechnology, Law&Business* (Nanotechnológia, právo a obchod) a rozšírenia priestoru v iných médiách. Na etické súvislosti technológií poukázal aj pápež Benedikt XVI. V ďalšom texte sa dotknem týchto problémov s dôrazom na etiku.

13.1. Zvyšovanie ľudských schopností

Zvyšovanie fyzických a poznávacích schopností človeka technickými alebo biologickými prostriedkami, vyvorení *homo superior* – nadčloveka – naráža na etické, právne aj náboženské námietky. Takáto možnosť je v súčasnosti dostupná iba úzkemu okruhu ľudí. Potrebné zákroky nepatria medzi liečebné postupy a nie sú hrazené poisťovňami. (Dokonca ani jednoduchý prostriedok – Viagra nepatrí do kategórie hrazených liekov.) Týka sa to aj predlžovania života. Vo vedeckej literatúre sa zdôrazňuje spoločenská nespravodlivosť takýchto postupov. Ich podporovatelia hovoria o spoločenských ziskoch vďaka činnosti vyvolených jedincov, čo však vyvoláva pochybnosti. N&N sa takto dostávajú aj do zorného uhla veriacich obávajúcich sa zmeny chápania náboženskej podstaty človeka. Upokojuje ich konštatovanie, že vedci nedokážu v dohľadnej dobe napodobniť prírodu a odhaliť tajomstvá života, ktorý sa zdokonaľoval milióny rokov. Existujú aj zásadné rozdiely medzi

technologickými operáciami používajúcimi vákuum, vysoké teploty, zdraviu škodlivé chemikálie, kým príroda pôsobí vo vodnom prostredí a spravidla okolo izbových teplôt.

Prvoradá je otázka, ako tieto aktivity regulovať. Hranica sa vytvorí medzi primeranými a neprimeranými zákrokmi. V prvom prípade sú to kontaktné šošovky alebo ochranné očkovanie, v druhom prípade uvažované zavádzanie elektronických čipov priamo do mozgu.

Existujú však aj prípady znižovania schopností živých organizmov, ako je oslepenie sliepok, ktoré potom lepšie znášajú kruté podmienky chovu v malých klietkach s cieľom vysokej produkcie vajec. Odporcovia oprávnenne hovoria o zbavení živého stvorenia jeho dôstojnosti. Rozporuplný je aj výber ľudských zárodokov. Asi trojdňový zárodok pozostávajúci približne zo šiestich buniek sa testuje, či obsahuje stopy genetického ochorenia. Ak nie, implantuje sa do maternice. Takto sa počínajúc rokom 1990 umožnilo mnohým rodičovským párom vylúčiť u detí slepotu alebo duševné poruchy. Takéto zákroky podporuje až 75 % opýtaných. Technika sa však dá použiť aj na výber pohlavia, farby očí, fyzických predností alebo dokonca intelektu. A tu sa už dostávame na pole porušovania princípov rovnosti. Voľba pohlavia, ktorá je v mnohých krajinách zakázaná, sa v USA praktizuje. Neľudská je však požiadavka znižovania schopností dieťaťa, napr. požiadavka hluchých rodičov, aby im *vypestovali* hluché dieťa, ktoré sa lepšie prispôsobí kultúrnemu prostrediu rodiny. (Oficiálne takúto prax žiadna klinika nepriznala.)

13.2. Zdravie a bezpečnosť, nanomedicína

Bezpečnosť nanotechnológií stavia do popredia zdravie, zdravé prostredie a bezpečné potraviny. Venovať sa treba jedovatosti nanoobjektov (kap. 8). Nanoobjekty prenikajú cez bunkové steny a reagujú s bunkami cez hematoencefalickú membránu, ktorá oddeľuje krvné riečisko od mozgu, poškadzujú DNA. Nanotoxikológia nie je napriek

podpore N&N primerane financovaná. Pôsobí tu konflikt záujmov – firmy brzdia šírenie informácií, výrobky nie sú primerane označované a priznané ohrozenia sa odvodzujú z objemovej formy materiálov, neberúc ohľad na malé rozmery. Ako príklad možno uviesť kritiku zavedenia na trh ochrannej kozmetiky proti UV žiareniu s TiO_2 nanočasticami, ktorý nezabezpečil trvalé hodnotenie vplyvov. Nanočastice sú dnes bežné aj vo farbivách, náplniach do tlačiarň, v oblečení i v potravinách. Priemysel vydáva správy, ktoré mapujú ohrozenia, ale za ich poskytnutie sa účtujú veľké čiastky. Niektoré toxické vplyvy vybraných nanomateriálov sú v **tab. 8**.

O problémoch sa však musí hovoriť vyvážené a musia sa zdôrazňovať aj veľké prednosti nanomedicíny, medzi ktoré patria metódy vyšetrenia, liečenia a osobitne cielený transport liečiva na určité miesto v organizme, kde ničí iba zhubné bunky a nezaťažuje organizmus ako celok. Zväčšený povrch k objemu liečiva vyvoláva zároveň jeho rýchlu rozpustnosť a účinok, inou prednosťou je postupné uvoľňovanie (**obr. 2a**) alebo podávanie lieku cez kožu. Liečivá a prípravky vyvíjané v nanotechnológii narážajú často na právne problémy a práve nanomedicína je príkladom toho, ako veľmi zaostáva legislatíva za vedou. Otázka je, ako podávať nové prípravky, ktoré ešte nie sú zaradené medzi štandardné, ale zavedené metódy nezaberajú. Situácia vo Švajčiarsku je spomenutá v knihe Nanomedicína, interdisciplinárne úvahy. Lekár v rámci slobody liečenia môže navrhnúť pacientovi liečbu nového typu a s ním ju posúdiť. Postupy závisia od úprav jednotlivých krajín.

Tab. 8 Toxické mechanizmy vybraných materiálov, spravidla nanočastíc a nanorúrok
(Thomas 2011)

Materiál	Mechanizmus
Uhlíkové nanorúrky Al_2O_3 Au CdSe SiO_2	zápaly, poškodenie DNA vznik reaktívnych kyslíkových produktov poškodenie proteínov uvoľňovanie jedovatých iónov Cd a Se vznik reaktívnych kyslíkových produktov, rozklad proteínov, narušenie membrán

13.3. Usmernenia v nanovede a nanotechnológii

V Európskej únii máme etický kódex, ktorý je rozpracovaný do konkrétnych opatrení. Aké je však využitie týchto opatrení? Usmernenia a rozhodnutia sa prijímajú na úrovni vlád členských krajín a na úrovni EK nekoordinovane. Kódex nie je dostatočne rozširovaný. Uspokojujeme sa tým, že v Európe nebola do r. 2014 zaznamenaná katastrofa takého typu, ako v Číne, kde došlo v r. 2007 v továrni na farbivá v zle vetraných priestoroch k dvom úmrtiam a ďalším piatim ochoreniam. V pľúcach robotníčok sa našli 30 nm častice, nie je však jasné, či nešlo iba o zanedbanie základnej bezpečnosti práce. To však neznamená, že na našom kontinente nedochádza k zdravotným ohrozeniam ľudí nanočasticami, ako na to poukázala Medzinárodná konferencia Nano-medicína v roku 2012 (Univerzita Zürich).

13.4. Vojenské použitia

Nanotechnológie ovplyvnia rozloženie síl na bojiskách. Píše sa však o tom málo. Na druhej strane bez takýchto aplikácií by sa ťažko zdôvodnili veľké prostriedky, ktoré do N&N plynú. Využitia sa delia na útočné a obranné. Útočné prostriedky zahŕňujú ľahké a pevné materiály, ktoré zabezpečia zvýšený dosah pôsobenia a odolnosť bojovníka. Patria sem ľahké batérie, panciere, stabilizátory poranených končatín. Skúmajú sa metódy potlačenia spánku na dobu niekoľkých týždňov, čo dáva voči protivníkovi veľkú výhodu. Je to však na hrane humánosti, lebo návrat do pôvodného stavu nie je dostatočne preskúmaný. Obrana využíva senzory, pozorovania, zariadenia na čistenie vody a pod. Treba však povedať, že akýkoľvek pokrok v obrane spúšťa kroky v útočných technológiách a naopak, ako o tom svedčí história raketovej a antiraketovej techniky.

13.5. Ochrana súkromia

Ochrana súkromia je významnou témou etického spolunažívania. Tu sa ňou podrobne nezaobráame, lebo patrí v prvom rade do mikroelektroniky a nanoelektroniky, a v tejto knižke sa zameriavame na nanotechnológiu materiálov. Hlavné témy sú však známe: odpočúvanie, pozorovanie, monitorovanie, a to z dôvodov politických aj ekonomických. Hrubé narušovanie súkromia sa udomáčuje v obchode.

13.6. Ekonomické súvislosti nanovedy a nanotechnológií

Pri uvádzaní nových technológií sa spravidla tvrdí, že pomôžu preklenúť medzeru medzi bohatým, rozvinutým a chudobným, rozvíjajúcim sa svetom. Počuli sme to v súvislosti s IKT, kde sa však dosiahol opak a A. Penzias, laureát NC za objav reliktového žiarenia, bol blízko pravde, keď povedal, že informačné technológie medzeru medzi bohatými a chudobnými rozširujú. Medzera bola pomenovaná *digital divide*. Dnes sa takéto úvahy zjavujú v súvislosti s N&N. Snaha nevytvoriť *nano-divide* je oprávnená a vychádza z princípov spravodlivého rozdeľovania, ktorými sa ľudstvo zaoberá od čias antiky. Ide o to, aby na jednej strane nedošlo k sociálnym výbuchom a na druhej k ohrozeniu podnetov k pokroku. Základná otázka je, čo z nanotechnológií pomôže zaostalým krajinám najviac. Podľa autorov publikácie *Čo je nanotechnológia a aký je jej význam? Od vedy k etike (Wiley-Blackwell)* sú to:

a) technológie čistenia vody na potlačenie ochorení a veľkých epidémií. Účinné je filtrovanie vody pomocou uhlíkových nanorúrok, je však zatiaľ drahé a počíta sa s ním iba pre vojenské aplikácie. Dostupnejšie prostriedky sú magnetické nanočastice, ktoré na seba naviažu škodlivé chemikálie a odseparujú sa spolu s nimi magnetickým pólom. Nanočastice TiO_2 viažu zase ťažké kovy. Významné sú nanosenzory na monitorovanie znečistenia vody.



Obr. 23 Pri umiestnení magnetu pod tanier s magnetickou kvapalinou vznikne útvar nazývaný magnetický ježko, pretože častice sa usporiadajú v smere magnetických siločiar (Obr. uverejnený so súhlasom P. Kopčanského, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Košice.)

Z magnetických nanočastíc sa vyrábajú magnetické kvapaliny. Sú zložené z 5 – 10 % nanočastíc, 80 – 85 % kvapaliny, ako je voda alebo olej, a 10 % surfaktantu. Materiálom nanočastíc býva magnetit Fe_3O_4 a maghemit $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Surfaktantom môže byť kyselina olejová, oleát sodný a pod. Magnetická kvapalina v magnetickom poli je na **obr. 23**. Využíva sa na čistenie vody, ako tesniace médium a pod.;

b) lacná slnečná energia, ktorú by si mohli zadovážiť krajiny s HDP okolo 1 000 US dolárov na obyvateľa a rok. Takéto fotovoltaické články sa vyvíjajú postupne (**kap. 15.3**).

Zložité a nákladné nanotechnológie budú medzeru rozširovať. Nanovýrobky z obchodných dôvodov dorazia do tretieho sveta, ale vyspelý svet si bude svoj náskok udržiavať. Neplatí ani tvrdenie, že N&N si nevyžadujú nákladné zariadenia a sú dostupné každému. Dnes sa už výskum nanočastíc nezaobíde bez zložitých zariadení vrátane synchrotrónu a aparátúr umiestnených v čistých priestoroch. Poukázať treba aj na teóriu závislosti ekonomického vývoja, ktorá hovorí, že zisky jednej oblasti sú vyvážené stratami druhej a že západný svet bude dominovať ďalej. Takéto usporiadanie začína narúšať Čína a India, kde sa vývoj opiera o iné kultúrne i náboženské tradície.

13.7. Je na mieste bezhraničné nano-nadšenie?

Nové vlastnosti nanoobjektov vytvárajú šance, ale aj ohrozenia, napr. vo forme toxickosti. Nadmerné nadšenie podporovateľov nanotechnológií je v rozpore s jeho neúnavnými kritikmi. Pre ďalší rozvoj je dôležité brať do úvahy postoje vedcov, novinárov aj verejnosti. V rozvíjajúcich sa krajinách, ktoré vidia v N&N urýchľovač ekonomického rozvoja, sú postoje pozitívne. Ako príklad možno uviesť jednostranné názory z prác vedcov v Brazílii. Vo vyspelých krajinách sa vo verejnosti prejavuje aj nedôvera, najmä ak sa už „povedalo veľa nepravdy“ (napr. o biotechnológiách).

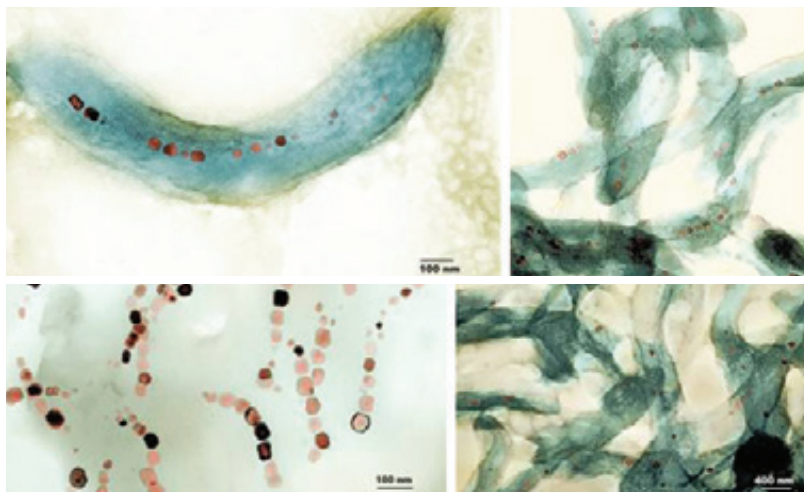
Vieme, že nateraz hlavné prínosy nanomedicíny, až 75 %, sa očakávajú od cieľeného zavádzania liečiv. To znamená, že do organizmu sa zavedie (väčšinou injekčne) liečivo, ktoré na určené choré miesto dopravia nanočastice. Túto oblasť opanovali v médiách bombastické vyjadrenia opierajúce sa o vojenskú terminológiu. Častice sa nazývajú terapeutické strely, nanonáboje, inteligentné bomby a pod., ktoré cieľenými útokmi nahradia kobercové nálety na rozľahlé ciele. Je to prílišné zjednodušenie, ktoré zveličovaním zneužíva dôveru ľudí.

13.8. Nové pohľady na nanovedu a nanotechnológie

N&N už dávno prekročili etapu vytvárania základných štruktúr, napr. nanorúrok, a vyúsťujú do výrobkov, ktoré dobývajú trhy. Odbor si vyžaduje systemizáciu, šandardizáciu. Rýchly je rozvoj nanomeraní. Z predošlých úvah možno urobiť záver, že N&N sú jedným z odborov, kde sa prehodnocuje obvyklý postoj, že vedecká práca aj technológia sú nestranné a iba ich použitie, za ktoré zodpovedá spoločnosť a politici, podliehajú kontrole z hľadiska morálky. Dnes sa priamo technológia stáva objektom etiky. Na druhej strane je málo pravdepodobné, že vedec sa dokáže vo svojej vzrušujúcej práci zastaviť, aby vylúčil jej možné nežiaduce dôsledky. Okrem toho je známe, že objavy vznikajú v štádiu dozretia problematiky nezávisle od rozličných miest. Nebezpečenstvá vyplývajúce

z technológií tak musia riešiť ďalšie nové technológie. To neznamená, že zodpovednosť vedcov nerastie. Napriek všetkému nemožno však urobiť záver, že N&N vytvárajú novú skupinu etických problémov. Sú to len nové výskyty problémov, ktoré sú už známe.

Nové kvality v N&N sú výzvou aj pre filozofiu. Uvedme komplementaritu – dopĺňovanie ako základný fyzikálny princíp. Dnes pozorujeme, že čím menšie sú štruktúry, s ktorými pracujeme, tým väčšie a nákladnejšie sú zariadenia, ktoré na to potrebujeme. Prestupovaniu do nanosveta zodpovedá zároveň pokrok v pochopení makrosveta. Materiály poskytované nanotechnológiami otvárajú človeku dvere do kozmu. Komplementaritu a symetriu vnímame aj v manipulácii s látkou na úrovni 10^{-9} m a vo vylodení človeka na Mesiaci, ktorý je od Zeme vzdialený 4×10^8 m. My sme práve v strede tohto rozpätia. To zvyrazňuje zodpovednosť človeka za etický rozvoj nanovedy, nanotechnológií a ďalších oblastí výskumu a poznávania.



Obr. 24 Magnetotaktické baktérie obsahujú vo svojom vnútri retiazky magnetických nanokryštálov magnetitu (Fe_3O_4)

Slúžia ako kompas, ktorý im pomáha orientovať sa v magnetickom poli Zeme. Baktérie sa vyskytujú v jazerných a riečnych usadeninách.

(Mikrosnímky pri rozličných zväčšeniach získané pomocou TEM uverejnené so súhlasom I. Vávru, Elektrotechnický ústav SAV, spolupráca s TU Ostrava.)

14. Základy biomimetiky

Zdrojom nových podnetov v N&N je biomimetika. Skúma javy v prírode, vlastnosti rastlín, živočíchov, ale aj človeka, a napodobňuje ich v tvorbe nových materiálov a súčiastok. Názov odboru pochádza z gréčtiny, kde *bios* je život a *mimesis* je napodobňovanie. Zaviedol ho americký biofyzik Schmitt.

Človek sa inšpiroval prírodou oddávna. Z historického hľadiska sa spomína štúdium anatómie vtákov s cieľom splniť veľkú ľudskú túžbu lietať. Snažil sa o to už Leonardo da Vinci (1452 – 1519), letom holubov sa zaoberali bratia Wrightovci, ktorí skonštruovali r. 1903 prvé lietadlo ťažšie ako vzduch. Napodobňovanie prírody umožňuje ťažiť z evolúcie trvajúcej milióny rokov. Hovoríme potom aj o prírodnej nanotechnológii, napr. o technológii *Velcro* suchých zipsov, ktorú vyvinul r. 1941 G. de Mestral. Všimol si, že kvety lopúcha (*arctium* – viacero druhov tejto rastliny máme aj na Slovensku) ulpeli na srsti jeho psa. Príčinou boli jemné vlákna zakončené háčikmi na listeňoch kvetov. Zvieratá takto roznášajú semená rastliny. V tejto súvislosti sa hovorí aj o zipsoch typu háčik – slučka. Používajú sa od odevného priemyslu až po kozmickú techniku.

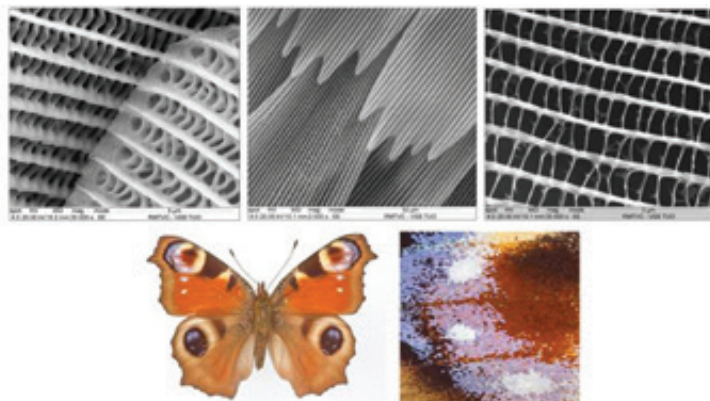
Iným príkladom sú magnetotaktické baktérie (obr. 24). Orientujú sa pozdĺž magnetických siločiar zemského magnetického poľa podobne ako kompas. Vnútri ich buniek sa našiel magnetit (Fe_3O_4). Nadväznosť na manipulovanie magnetických nanočastíc nesúcich liečivá magnetickým poľom v živom organizme, aj v ľudskom tele, je tu zrejmá.

Spomína sa aj jašterica gekon, ktorá sa dokáže šplhať po hladkých vertikálnych povrchoch. Využíva suchú fyzikálnu príľnavosť, nie chemické pôsobenie. Vyvolala pozornosť aj spoluobjaviteľa grafénu A. Geima, ktorý jej tajomstvo objasnil vo svojej nobelovskej prednáške nasledovne: „Labky jašterice sú pokryté jemnými vláskami. Každý vlas sa zachytí na opačnom povrchu slabou van der Waalsovou silou (veľkosti nN), ale miliardy vláskov pôsobia spolu a vytvárajú mocnú príľnavosť, ktorou sa gekon udrží na ľubovoľnom povrchu, dokonca

na sklenenom strope¹⁰.“ Mechanizmus príľnavosti bol publikovaný vo svetoznámom časopise Nature. Z aspektu nanotechnológie je tu podstatné sčítavanie veľkého množstva malých účinkov.

Známe je zlepšovanie keramiky kopírovaním vlastností morských mušlí alebo vlákno produkované pavúkom, ktoré je 6-krát pevnejšie ako oceľ. Sfarbenie krídel babočky pávie oko inšpiruje zase optikov (obr. 25).

Biomimetika má paralelu v bionike, ktorá vyúsťuje do techniky, o čom svedčí názov (bionika – *bio-technika*). Poznatky z biologických systémov využíva v kybernetike, robotike, v regulátoroch a regulačných obvodoch. Snímanie biopotenciálov sa dá aplikovať pri ovládaní umelých končatín. Z prírodných foriem, napr. ľudského tela, vychádza v dizajne štýl nazývaný biomorfizmus.



Obr. 25 Na krídlach babočky

Na obr. dole vľavo pozorujeme rozmanité premenlivé farby. Hnedé a čierne farby sú výsledkom obsahu melanínu, ale za žiarivé opaleskujúce reflexy zodpovedá znázornená mikroštruktúra povrchu krídel. Na nej sa svetlo láme a odráža. Jemné šupinky motýľích krídel inšpirujú optikov aj nanotechnológov. Tí sa snažia vytvoriť podobné štruktúry, ktoré by sa dali využiť na optické šifrovanie alebo bezpečnostné prvky na bankovkách a osobných dokladoch (Obr. získaný pomocou TEM uverejnený so súhlasom I. Vávru, Elektrotechnický ústav SAV, spolupráca s TU Ostrava.)

10 S týmito jaštericami som sa stretol vo Vietname. V noci mi v hotelovej izbe lozili nad hlavou po strope a predstava, že mi niektorá z nich padne na tvár, mi nedala spať. Nevedel som vtedy ešte, aká silná je ich príľnavosť, čo svedčí o tom, že poznatky vedy sú dôležité pre každodenný život. Nakoniec som našiel riešenie – zapálil som lampu na verande hotelovej izby a jašterice sa pobrali za svetlom.

15. Vybrané aplikácie nanovedy a nanotechnológií vo výskume na Slovensku

15.1. Technológia prípravy a samousporiadania nanočastíc

Vzhľadom na pomalosť manipulácie na atomárnej úrovni (kap. 5) sa dnes robí v nanotechnológiách syntéza látok a súčiastok z podstatne väčších stavebných blokov, spravidla z nanočastíc s počtom až 10 000 atómov. Nanočastice sa dajú pripraviť fyzikálnymi metódami, ako naparovaním na podložku vo vákuu. Tu tvorba zárodkov, ich rast, zlievanie a tvorba ďalších zárodkov spôsobujú, že častice majú nepravidelný tvar a široký interval veľkosti. Ak chceme získať oddeľené nanočastice s malým rozptylom rozmerov, používame chemické metódy. Častice sa pritom pokrývajú surfaktantom, ktorý kontroluje ich rozmery, častice obalí a v určitom okamžiku zastaví ich ďalší rast aj zhlukovanie. Častice sa získajú vo forme koloidného roztoku, ktorý sa dá naniesť na rozličné podložky. Ako surfaktant sa používajú organické zlúčeniny, výnimočne aj anorganické, napr. oxid kremičitý. Presne kontrolovaný rast nanočastíc je potrebný najmä pre plazmonické súčiastky (tab. 11), kde rozmer častice ovplyvňuje rezonanciu žiarenia.

Metódy chemickej prípravy častíc sa rozdeľujú podľa toho, ako sa do reakčnej zmesi privedie energia potrebná na to, aby reakcia prebehla. Možnosti sú:

- ohrev v otvorenej nádobe pri atmosférickom tlaku v kvapaline, ktorá vriete pri teplote podstatne vyššej ako voda, je ňou napr. difenyléter;
- ohrev vo vodnom roztoku, ale v uzavretej nádobe pri zvýšenom tlaku, aby sa dosiahla teplota vyššia ako bod varu vody 100 °C. Je to princíp podobný tlakovému hrncu v domácnosti;

- ohrev pomocou ultrazvukových vln;
- ohrev pomocou laserového lúča;
- energia sa privedie elektrickým prúdom.

Na našom pracovisku používame prvú metódu tepelného rozkladu. Ako príklad uvediem prípravu Fe_2O_3 z východiskovej chemikálie – acetylacetonátu železa a ďalších komponentov (najmä kyseliny olejovej a olejového amínu, z ktorých vznikne surfaktant) v spomenutom difenylétere. Zmes sa zohrieva pri $265\text{ }^\circ\text{C}$ a potom sa ochladí. Hotové nanočastice sa rozpustia v toluéne. Výsledky prípravy štyroch typov nanočastíc sú v **tabulke 9**. Rozptyl rozmerov okolo 10% sa dá dosiahnuť pri použití kvalitných chemikálií a zodpovedá súčasnému svetovému štandardu.

Tab. 9 Použité chemikálie a rozmery zhotovených magnetických nanočastíc Fe_2O_3 , CoFe_2O_4 a Co a nemagnetických nanočastíc Au
Hrúbka surfaktantu je okolo 1 nm

Nanočastice	Východisková chemikálie	Surfaktant	Rozmer [nm]	Rozptyl rozmeru [%]
Fe_2O_3	acetylacetonát železa	olejová kyselina a olejový amín	6,4	9
CoFe_2O_4	acetylacetonáty železa a kobaltu	olejová kyselina a olejový amín	7,6	7
Co*	dikobaltkarbonyl	olejová kyselina a olejový amín	11	11
Au	kyselina chlórzlatitá	olejový amín	15	15

* Nanočastice Co pripravili vo výskumnom centre Caesar v Bonne

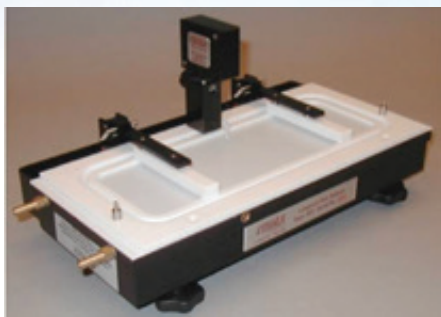
Na štúdium vlastností nanočastíc alebo ich využitie ako citlivého média senzorov (**kap. 15.2**) je potrebné naniest' ich na podložky.

- Najskôr sme používali kvapnutie roztoku nanočastíc na podložku. Pri správnom zriedení roztoku sa nanočastice usporiadali vplyvom van der Waalsových príťažlivých síl a priestorového odpudzovania do pravidelnej monovrstvy. Jej rovnomernosť sa dala zlepšiť, ak sa magnetické častice usporiadali vo vonkajšom magnetickom poli. Ak bol roztok hustejší, vznikali mnohovrstvové pokrytia – umelé kryštály (**obr. 2b**).

Obr. 26 Korýtko (fa Tima) na nanášanie molekulárnych vrstiev na podložky

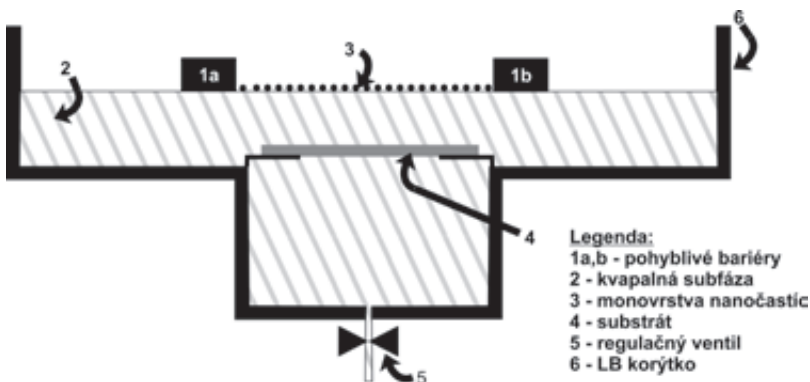
Dve priečne ramená – bariéry sa pohybujú pozdĺž vaničky a molekuly na povrchu kvapaliny sformujú do mono-molekulárnej vrstvy

(Obr. uverejnený so súhlasom J. Ciráka, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU, kde sa používanie týchto metód na Slovensku zaviedlo.)

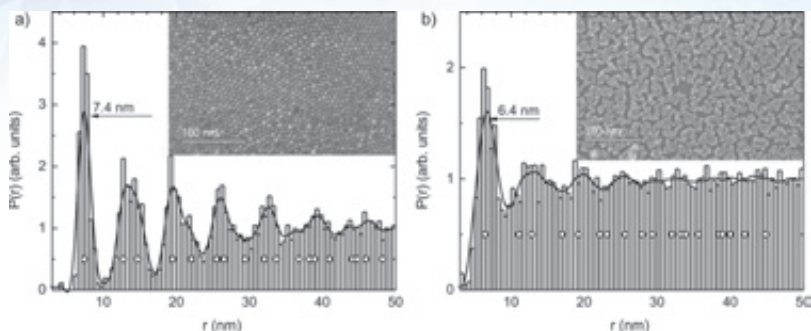


- Roztok možno kvapnúť na podložku a rozprestrieť ho po jej povrchu pomocou odstredivej sily v odstredivke. (Takto sa nanášajú aj fotorezisty – [kap. 7.](#))
- Našou súčasťou technikou vyvárať nanočastic na podložkách je u nás upravená Langmuirova-Blodgettovej (LB) metóda (pozri portrét I. Langmuira v [Portrétach s. 94.](#))

LB-metóda sa používa na nanášanie nanočastic na rozličné podložky z hladiny kvapaliny – spravidla vody, na povrchu ktorej sa najprv vytvorí usporiadaná nanočasticová vrstva. Robí sa to v korýtku (vaničke) podľa [obr. 26.](#) Naše usporiadanie metódy je schematicky znázornené na [obr. 27.](#)



Obr. 27 Konkrétne usporiadanie modifikovanej Langmuirevej-Schaefferovej metódy používané vo Fyzikálnom ústave SAV
 (Patent č. 288234, SR 2014)



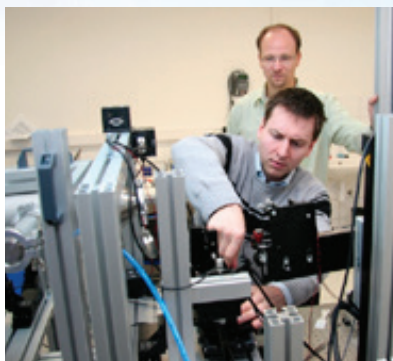
Obr. 28 Monovrstvy nanočastíc Fe_2O_3 na podložke z kremíka po nanesení (a) a po odstránení surfaktantu UV ožiaréním zobrazené pomocou SEM (b)

Sú v pravej hornej časti obrázkov. V dolnej časti sú korelačné funkcie vypočítané z obrázkov. Vyjadrujú pravdepodobnosť $P(r)$, že nanočastice nájdeme vo vzdialenostiach r . Prvé maximum v obr. a pri 7,4 nm zodpovedá najmenej možnej vzdialenosti stredov dotýkajúcich sa častíc. Po odstránení surfaktantu sa častice priblížili o 1 nm na 6,4 nm (obr. b). To zodpovedá ich priemeru, ktorý bol v tomto prípade 6,2 nm. Nasledujúce maximá na obr. a zodpovedajú vzdialenostiam ďalších susedov častíc. V obr. b sú maximá rozmazané, lebo po odstránení surfaktantu sa pravidelnosť rozloženia častíc porušila. Prázdne krúžky v obr. a, b zodpovedajú teoretickým vzdialenostiam v dokonalom hexagonálnom usporiadaní.

Monovrstva nanočastíc sa sformuje na povrchu vody pomocou bariér, pričom podložka – substrát je ponorená pod hladinou. Častice vďaka použitému surfaktantu odpudzujú vodu, a preto sa do nej neponoria. Potom sa voda pomaly vyčerpá cez regulačný ventil a monovrstva nanočastíc v usporiadanom stave dosadne na povrch substrátu.

Keďže nanočastice sú pokryté nevodivým surfaktantom, nehodia sa na použitie tam, kde nanočasticová vrstva musí viesť elektrický prúd (ako v senzoch plynov). Surfaktant sa preto odstráni UV žiarením. Ožiarenie trvá niekoľko minút. Nanočasticová monovrstva Fe_2O_3 pred a po UV ožiarení je na **obr. 28**. Po ožiarení je vrstva už nesúvislá a pokrytie podložky sa zníži asi na dve tretiny pôvodného. Cez takéto vrstvy tečie iba slabý prúd. Preto v senzoch musíme používať aspoň dve monovrstvy na sebe.

Vlastnosti nanočastíc, vrstiev nanočastíc, ich vytváranie sa skúmajú na našom pracovisku pomocou zariadení získaných v uplynulých rokoch z domácich zdrojov i zo štrukturálnych fondov EÚ. Príklady sú na **obr. 29** a **obr. 30**.



Obr. 29 Meranie pomocou mikroskopu atomárných síl
(Vedecká pracovníčka Fyzikálneho ústavu SAV M. Benkovičová)

Obr. 30 Príprava zariadenia na analýzu vrstiev nanočastíc pomocou rozptylu rtg žiarenia
(Vedeckí pracovníci Fyzikálneho ústavu SAV K. Vegsö – vpredu a P. Šíffalovič.)
Žiarenie dopadá na vzorku pod veľmi šikmým uhlom, podobne ako keď pristáva lietadlo, aby sa zabezpečila dostatočná interakcia žiarenia s tenkou vrstvou nanočastíc.

15.2. Nanočasticové oxidové senzory plynov

Senzory plynov z oxidových polovodičov sa skúmajú od r. 1962. Vtedy Seiyama et al. publikovali meranie koncentrácie CO_2 a pár etylalkoholu v ovzduší pomocou polovodiča ZnO. Takéto senzory vyrába veľa friem. Dnes sú najrozšírenejšou polovodičovou súčiastkou, ak nepočítame jednotlivé tranzistory v integrovaných obvodoch. (Existujú aj iné typy pevnolátkových senzorov plynov z piezoelektrických materiálov, organických zlúčenín a i.)

Senzory slúžia na sledovanie znečisťujúcich a zdravie ohrozujúcich pár a plynov v ovzduší, zloženia výfukových plynov motorových vozidiel, škodlivín z priemyselných výrob a na prevenciu požiarov. Pomocou citlivých senzorov sa dajú podľa unikajúcich pár odhaľovať výbušniny, v zdravotníctve sa meria skladba plynov vydychovaných človekom, pomocou čoho možno odhaliť onkologické ochorenia pľúc alebo diabetes a i. Hlavné merané zložky sú dnes pary acetónu CH_3COCH_3 , amoniak NH_3 , chlór Cl_2 , pary etylalkoholu $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, metán

CH_4 , oxidy dusný NO , dusičitý NO_2 , siričitý SO_2 , uhoľnatý CO , uhľičitý CO_2 , ozón O_3 , peroxid vodíka H_2O_2 , sírovodík H_2S , vlhkosť H_2O a iné. CO a H_2S sú toxické, CH_4 a CO_2 sú skleníkové plyny, ktoré zvyšujú globálny ohrev, NO_2 a SO_2 patria do obidvoch týchto skupín. CO spôsobil už mnoho úmrtí, nebezpečný je aj H_2S , ktorý viaže hemoglobín a bráni zásobovaniu orgánov ľudského tela kyslíkom.

Základné oxidové polovodiče používané v senzoroch plynov sú v **tabuľke 10**. Uvádžam tu ich energetickú medzeru a teplotu tavenia. V oxidových polovodičoch sú tieto hodnoty väčšie ako v germániu alebo kremíku a hovoria nám o možnosti využitia polovodiča do vysokých teplôt a o jeho teplotnej stabilite. Sensory majú totiž pracovnú teplotu medzi 200 a 500 °C, čo je potrebné na to, aby na povrchu senzora rýchle prebiehali chemické reakcie detekcie adsorbovaného plynu a aby sa po ukončení merania plyn z povrchu rýchle uvoľnil a mohlo sa prikróčiť k inému meraniu. Tieto časy bývajú niekoľko minút. Polovodiče v **tabuľke 10** sú typu N, prúd v nich vedú elektróny. V niektorých prípadoch dopovaním, kontamináciou a pod. sa môžu zmeniť na typ P, potom prúd vedú diery.

Tab. 10 Šírka energetickej medzery E_g a teplota tavenia T_m základných polovodičových oxidov používaných v senzoroch plynov

Oxid	Fe_2O_3	InO_2	SnO_2	TiO_2	WO_3	ZnO
E_g [eV]	1,8	2,9	3,6	3 – 3,2	2,8	3,2 – 3,4
T_m [°C]	1 566	1 910	1 630	1 843	1 433	1 975

Z hľadiska funkcie senzorov sa rozlišujú dva typy plynov:

- oxidujúce plyny, napr. CO_2 , NO_2 , NO , N_2O , O_2 , ktoré majú veľkú afinitu – schopnosť priberať elektróny. Vyjadruje sa v elektrón-voltoch, afinita kyslíka je 0,43 eV a NO_2 ju má dokonca 2,28 eV;
- redukujúce plyny, napr. CH_4 , CO , H_2S , NH_3 , SO_2 majú naopak schopnosť elektróny uvoľňovať.

Príklady reakcií, ktoré prebiehajú na povrchu senzora: Keďže kyslíka je vo vzduchu veľa a tento plyn je oxidujúci, na začiatku sa

na povrchu senzora adsorbuje vo forme záporných iónov, napr. O^- , ktoré odobrali z polovodiča elektróny. Viazanie elektrónov spôsobí, že prúd tečúci polovodičom typu N a jeho vodivosť klesne. Teraz vystavíme senzor meranému plynu. Ak je to redukujúci plyn, napr. CO, prebehne reakcia:



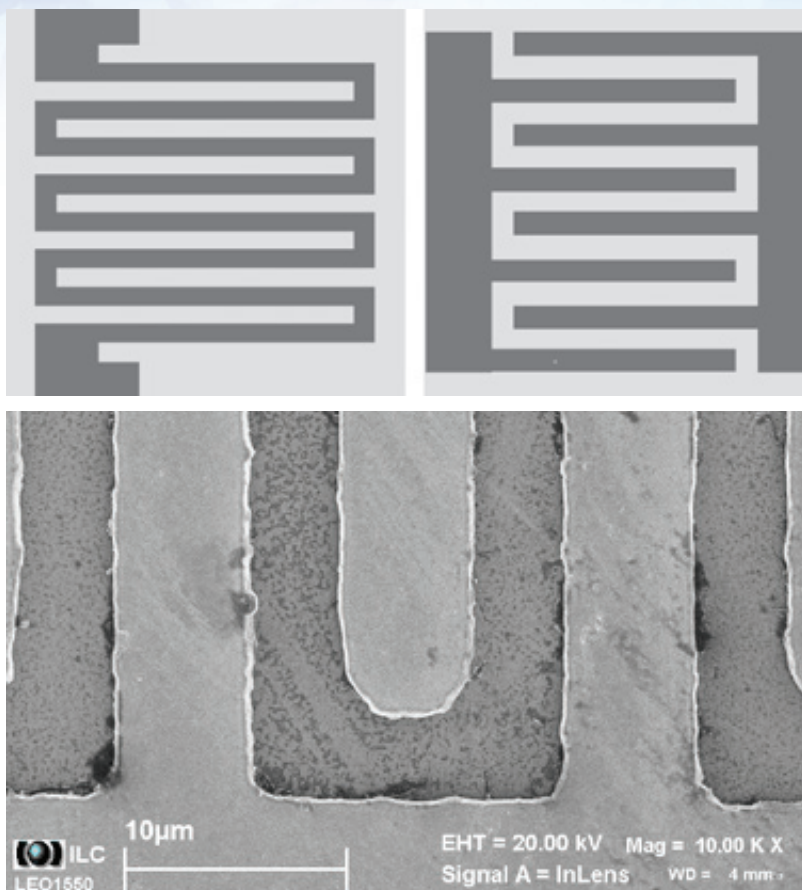
Pôvodne kyslíkom viazaný elektrón sa tým uvoľní a prúd a vodivosť polovodiča zase vzrastie. Ak senzor vložíme do prostredia obsahujúceho oxidujúci plyn, napr. NO_2 , prebehne reakcia:



Molekuly NO_2 zachytia ďalšie elektróny, prípadne vzhľadom na veľkú afinitu nahradia aj ióny O^- a prúd aj vodivosť polovodiča klesne ešte viac. Polovodiče typu P sa správajú v obidvoch prípadoch opačne.

Senzory sa desaťročia robili z vrstiev nanosených na podložku naparováním vo vákuu, natretím a spečením polovodičovej pasty a pod. V ére nanotechnológií prichádzajú na scénu nanoobjekty, hlavne nanočastice. Ich význam je v tom, že povlak vytvorený z nanočastíc má väčší celkový povrch, ako je povrch súvislej vrstvy rovnakej plochy. Senzor má potom väčší reakčný povrch a väčšiu citlivosť. Vysvetliť si to môžeme pomocou obrázku **obr. 36**, kde nanočastica má povrch $4\pi r^2$, pričom r je jej polomer, a plocha, ktorú na povrchu zaberá, je iba πr^2 . K ploche senzora však neprispieva iba táto geometrická plocha. Nanočastice nie sú ideálne gule, sú čiastočne deformované, obsahujú póry a pod., čo ich povrch ešte viac zväčšuje.

Príprava senzorov v našom laboratóriu prebieha takto: na podložke zo stabilnej korundovej keramiky Al_2O_3 sú na prednej strane vytvorené hrebeňové elektródy na meranie prúdu tečúceho cez nanočasticový povlak a na zadnej strane podložky meander na ohrev senzora prietokom elektrického prúdu (**obr. 31**). Na prednú stranu podložky



Obr. 31 Schéma podložky senzora (a) a detail senzora s nanočasticami medzi hrebeňovými elektródami (b)

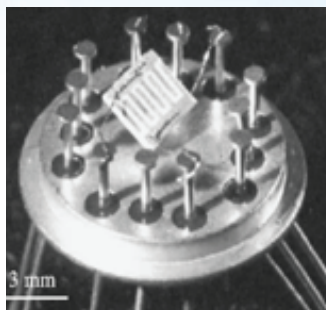
Senzor má plochu $2 \times 2 \text{ mm}^2$ s ohrievacím meandrom (vľavo) a hrebeňovými elektródami (vpravo). Meander a elektródy sú tmavé, medzery svetlé. Šírka meandra a elektród tvarovaných litograficky je $50 \text{ }\mu\text{m}$. Zhotovili sa naparením platiny s hrúbkou 200 nm (elektródy) a 500 nm (meander)

nanesieme (metódou podľa [kap. 15.1](#)) 2, 4, 7 alebo 10 monovrstiev nanočastíc, z ktorých odstránime surfaktant. Najčastejšie používame nanočastice Fe_2O_3 . Podložka je pritom nakontaktovaná v puzdre používanom pre polovodičové obvody ([obr. 32](#)).

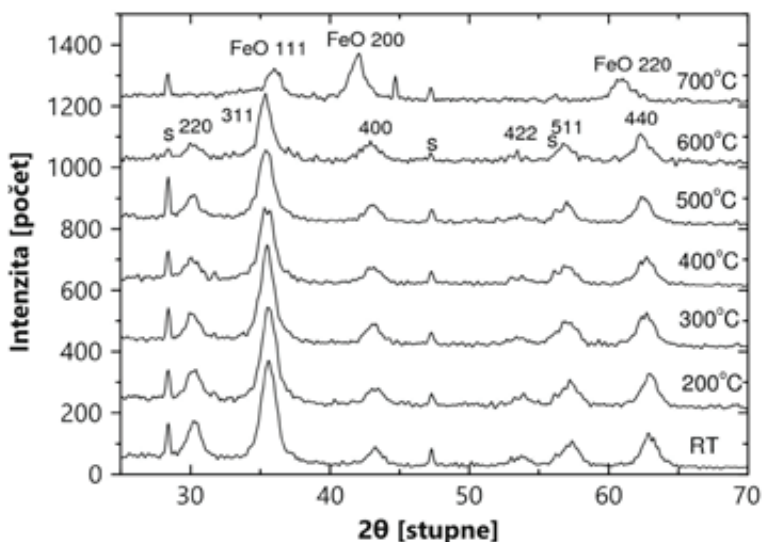
Obr. 32 Senzor v puzdre

Na povrchu podložky vidieť hrebeňové elektródy nakontaktované drôtkami, ktoré sú vyvedené na kolíky puzdra.

(Obr. uverejnený so súhlasom R. Rellu, CNR Lecce, Taliansko.)

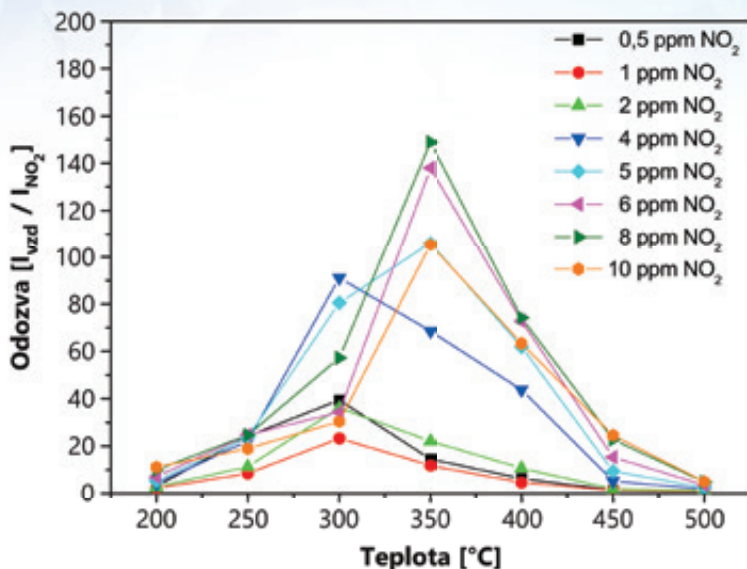


Ak chceme používať pracovnú teplotu senzora do 500 °C, treba overiť, ako sa nanočastice pri týchto teplotách správajú. Presvedčili sme sa o tom meraním pomocou difrakcie röntgenového žiarenia, ktoré má vlnovú dĺžku porovnateľnú so vzdialenosťami atómov v látke. Preto žiarenie interaguje s látkou a vďaka tomu dostávame spektrá s charakteristickými maximami (obr. 33). Z obrázku vyplýva, že do 500 °C sú nanočastice stabilné a dajú sa použiť.



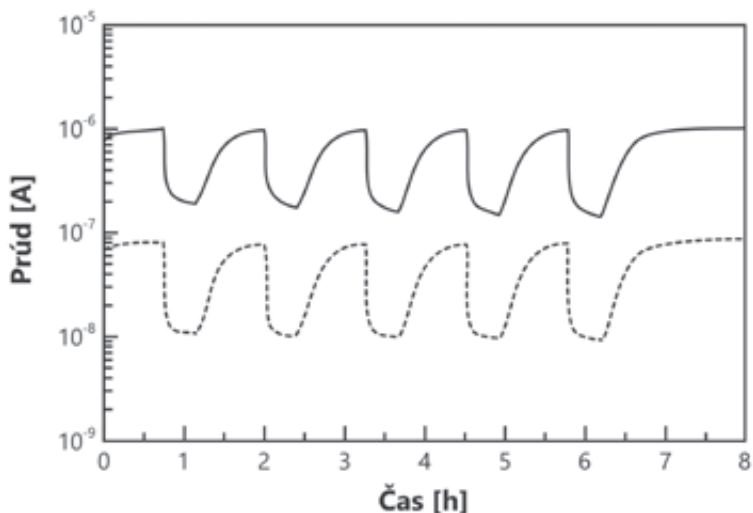
Obr. 33 Analýza nanočastíc Fe_2O_3 na Si-podložke pomocou röntgenového žiarenia s vlnovou dĺžkou 0,154 nm

Spektrá znázorňujú intenzitu žiarenia reflektovanú nanočasticami v závislosti od uhlu dopadu žiarenia. Nanočastice sa zahrievajú pri teplotách od 200 do 700 °C, pri každej teplote 30 min. Prvé zmeny v spektrách vidno pri 600 °C a pri 700 °C sa vytvoril nový oxid FeO. Do 500 °C sú nanočastice stabilné. Číslami sú označené reflexy žiarenia nanočasticami, s sú reflexy Si-podložky. RT – izbová teplota.



Obr. 34 Odozva senzora z Fe_2O_3 z desiatich monovrstiev nanočastíc od teploty senzora pre koncentrácie NO_2 vo vzduchu od 0,5 do 10 ppm

Senzory sa testujú v zmesiach meraného plynu, v našom prípade NO_2 , CO a pár acetónu, so vzduchom. Zmesi sa presne nastavujú. Senzor sa napája napätím 5 alebo 10 V a prúd sa meria presným ampérmetrom. Príklad merania NO_2 vo vzduchu je na obr. 34. Máme tu odozvu senzora, teda pomer prúdu senzora vo vzduchu (I_{vzd}) ku prúdu v zmesi vzduchu s NO_2 (I_{NO_2}) od teploty merania. Pomer je > 1 , lebo NO_2 zachytáva elektróny. Odozva nad 100 svedčí o vynikajúcej citlivosti. Jej maximum je pri 350 °C. Vtedy je reakcia meraného plynu na povrchu intenzívna, pri ďalšom zvyšovaní teploty začína pokles odozvy v dôsledku uvoľňovania plynu z povrchu. Aj pri najmenšej koncentrácii NO_2 , t. j. 0,5 ppm (500 ppb) máme ešte pri 300 °C odozvu 40. Pritom odparovaním výbušniny nitroglycerín sa v jej okolí vytvára koncentrácia molekúl 1 ppm. Náš senzor môže zaznamenať prítomnosť tejto výbušniny aj iných nitrátových výbušnín. V životnom prostredí sú samozrejme koncentrácie škodlivín



Obr. 35 Závislosť prúdu senzora od času pri opakovaných meraniach koncentrácie 5 ppm NO_2 vo vzduchu ukazuje, že výstup senzorov sa nemení, teda neprejavuje sa tzv. hystereza

Teplota merania 350 °C, horná súvislá krivka zodpovedá senzoru zo 7 monovrstiev Fe_2O_3 nanočastíc, spodná prerušovaná krivka senzoru zo 7 monovrstiev CoFe_2O_4 nanočastíc

vyššie. Z obr. 35 vidieť, že pri opakovaných meraniach sa výstupné hodnoty senzorov nemenia.

Extrapolácia našich výsledkov ukazuje, že pri zlepšení presnosti miešania plynov sa bude dosahovať citlivosť na úrovni 100 ppb alebo aj menej NO_2 vo vzduchu. Hraničné citlivosti merania CO máme okolo 100 ppm a pár acetónu okolo 5 ppm. Citlivosť senzorov na redukujúce plyny je vo všeobecnosti menšia ako citlivosť na oxidujúce plyny s vysokou elektrónovou afinitou. Súvisí to s priebehom reakcií opísaných rovnicami (5) a (6) a tu majú naše senzory ešte priestor na zlepšovanie.

15.3. Plazmonické fotovoltické články

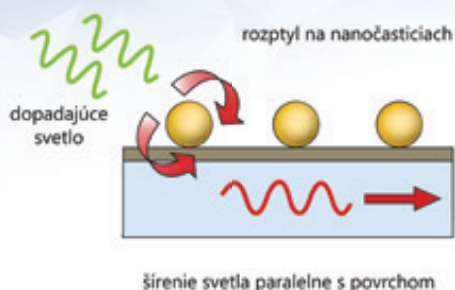
Ďalšou oblasťou aplikácie nanomateriálov sú slnečné – fotovoltické články. Základom článku je prechod PN. Má schopnosť separovať

dvojicu elektrón – diera vytvorenú pohltením fotónu, teda kvanta slnečného žiarenia v článku. Na elektródach článku vzniká potom napätie a článok sa stáva zdrojom elektrickej energie. Tieto články sú základom solárnej energetiky, rozvoj ktorej sa urýchlil po veľkej energetickej kríze rokov 1973 – 1974. Fyzikálne limity účinnosti premeny slnečného žiarenia na elektrickú energiu v slnečnom článku stanovila priekopnícka práca Shockleyho a Queissera z r. 1961 a svet dnes smeruje k týmto hodnotám a hľadá aj technické riešenia, ako ich prekročiť.

Články prvej generácie z kryštalického, príp. polykryštalického Si, ktoré sú na trhu, majú účinnosť premeny do 30%. Robia sa z relatívne hrubých (niekoľko sto μm) kremíkových plátok používaných aj v technológii integrovaných obvodov. Sú preto drahé. Články zhotovené z polovodičov, ako je GaAs, a odvodených zlúčenín sú ešte drahšie. Znižovanie ceny je vedúcim motívom vývoja článkov druhej generácie. Sú zhotovené z tenkých polovodičových vrstiev na lacných podložkách, napr. na skle. Tenké vrstvy však absorbujú pri kolmom, ale aj šikmom prechode žiarenia článkom iba jeho časť a články sú preto menej účinné. Výskum preto pokračuje článkami tretej generácie a usiluje sa o zvýšenie absorpcie, a tým účinnosti článku s cieľom dosiahnuť účinnosť až 40 – 60%. Jedno z riešení, ktoré sa ponúka, je zakotvené v nanotechnológii. Sú to plazmonické slnečné články s hrúbkou iba 1 – 2 μm využívajúce nanočastice.

Názov článkov je odvodený od plazmónov¹¹. Plazmonické články zlepšujú absorpciu žiarenia jeho rozptylom na kovových nanočasticiach (príp. nanotyčinkách alebo aj na pyramídach vyformovaných na povrchu článku). Nanočastice sú umiestnené na povrchu alebo v štruktúre článku. Žiarenie sa na nich rozptyľuje do rozličných smerov, a preto sa šíri aj pozdĺž článku, kde sa môže na veľkej dráhe dobre pohltiť (obr. 36). Dobrý rozptyl vyžaduje, aby boli nanočastice svetlom excitované pri určitej vlnovej dĺžke (resp. jej zodpovedajúcej frekvencii), ktorá zodpovedá ich plazmónovej rezonancii. Tento princíp je známy ešte

11 Plazmóny sú kvantá oscilácií elektrónov, podobne ako sú fonóny kvantá mechanických vibrácií kryštálovej mriežky materiálu.



Obr. 36 Podiel svetla vedeného paralelne s povrchom absorbujúcej štruktúry pokrytej nanočasticami sa zvyšuje v dôsledku jeho rozptylu na nanočasticiach excitovaných pri ich plazmónovej rezonancii (Podľa Centra udržateľných energetických systémov Austrálskej národnej univerzity, <http://nanotechweb.org/cws/article/in-depth/38421>)

z r. 1998, keď Stuart a Hall ukázali, že citlivosť Si-fotodetektorov sa zvýšila 20-násobne naparením Ag nanoostrovčekov na ich povrch.

Dominantnými nanočasticami v slnečných článkoch sú dnes Ag a Au. Sú to vzácne kovy, ktoré neabsorbujú veľa svetla. Príklad účinku nanočastíc Au na fotoprúd kremíkového prechodu PN je v **tabuľke 11**. Vidíme, že fotoprúd vzrastie takmer dvojnásobne. Z hľadiska ceny nanočastíc je lepšou voľbou striebro.

Tab. 11. Zväčšenie fotoprúdu v Si-prechodoch PN (Schaadt et al.).

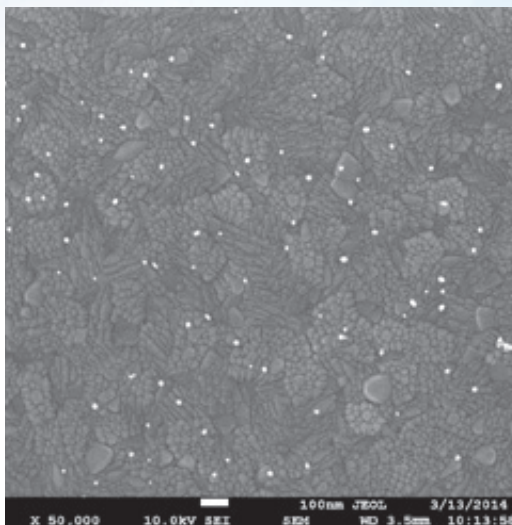
Priemer Au-nanočastíc [nm]	50	80	100
Hustota nanočastíc [cm ⁻²]	6,6 × 10 ⁸	1,6 × 10 ⁸	7,7 × 10 ⁷
Pokrytie povrchu nanočasticami [%]	1,3	0,8	0,6
Vlnová dĺžka rezonancie [nm]	520	550	570
Zväčšenie fotoprúdu [%] pri vlnovej dĺžke svetla [nm]	75 pri 460	85 pri 480	55 pri 550

Vhodným objektom na využitie plazmoniky sú fotovoltaické články z organických materiálov. Vychádzajú z veľmi lacných surovín, dajú sa urobiť na lacných ohybných substrátoch, sú ľahké, čo má pri perspektíve pokrývania článkami celých fasád budov svoj význam. Ich účinnosť je zatiaľ iba do 10%, sú preto dobrým uchádzačom na jej zvyšovanie použitím plazmoniky. Organické slnečné články sa štandardne zhotovujú z polyméru P3HT a derivátu fullerénu PC61BM¹².

12 P3HT: poly(3-hexyltiofén), PC₆₁BM: [6,6]-feny-C₆₁-kovový ester kyseliny maslovej

Obr. 37 Organický slnečný článok zo zmesi P3HT – PC61BM s dobre viditeľnou mozaikovou štruktúrou prechodov PN zobrazený pomocou SEM

Biele bodky znázorňujú Au-nanočastice zhotovené laserovou abláciou.



Uvediem výsledky skupiny V. Nádaždyho et al. (Fyzikálny ústav SAV), ktorá využíva zmes uvedených komponentov v pomere 1,5 : 1 hmotnostných percent. Zmes sa naniesie na sklenenú podložku opatrenú vodivým kysličníkom indiu a cínu (ITO) ako jednou elektródou, na ktorej sú vopred umiestnené Au-nanočastice s priemerom 30 nm. Nanočastice aj zmes hrúbky 110 nm sa naniesú z roztokov v odstredivke. Ako druhá vodivá elektróda slúži naparená dvojvrstva vápnika a striebra. Nanesená zmes predstavuje heteroprechod PN v podobe mozaiky oblastí jedného a druhého komponentu, na rozhraní ktorých sú prechody PN (obr. 37). V porovnaní s technológiou používanou v mikroelektronike, použitou v 1. generácii článkov, sú tieto postupy jednoduchšie a lacnejšie. V tabuľke 12 sú výsledky pre organické slnečné články s dvoma typmi Au nanočastíc. Nanočastice typu 1 sa získali komerčnou cestou a mali na povrchu surfaktant z citrátu sodíka. Nanočastice typu 2 zhotovili riešitelia metódou odparenia laserovým zväzkom vo vode. Tieto častice surfaktant nemali. Z porovnania článkov v riadku 1 a 2 konštatujeme zvýšenie účinnosti asi o 20% a z porovnania riadkov 3 a 4 asi o 10%.

Plazmonické snečné články si vyžadujú ďalší výskum, otvárajú však priestor nanotechnológii využívajúcej nielen nanočastice, ale aj fullerény.

Tab. 12. Účinnosť a iné vlastnosti organických snečných článkov zo zmesi P3HT: PC61BM s dvoma typmi Au-nanočastíc s priemerom 30 nm

Č.	Článok	Účinnosť [%]
1	bez nanočastíc	2,52
2	s dodanými Au-nanočasticami	3,02
3	bez nanočastíc	2,58
4	s Au-nanočasticami zhotovenými abláciou	2,84

16. Doslov

Veľké prostriedky, ktoré sa dnes do nanovedy a nanotechnológií vkladajú, či už z dôvodov vedeckých, výrobných, investično-rozvojových, alebo politických, sú záväzné z dvoch hľadísk: treba sa usilovať o zlepšenie kvality života súčasnej generácie a garantovať udržateľný rozvoj v budúcnosti. Špecifikom nanovedy, ktorá smeruje do oblasti malých rozmerov a štruktúr spojených s menšou spotrebou materiálov, ich menším opotrebením a väčšou životnosťou, menšou hmotnosťou a energetickou náročnosťou, je kladná spätná väzba. Len vďaka nej bol možný vyše pol storočia trvajúci exponenciálny rast parametrov bez nároku na vyššiu spotrebu a náklady na spracovanie základného kvanta informácie v mikroelektronike a v súčasnej nanoelektronike. V iných odvetviach nemá takýto rast obdobu. Nanoveda a nanotechnológie majú preto šancu preklenúť rozpor medzi záujmami prítomnosti a budúcnosti, čo nemožno povedať o dobývaní vesmíru alebo o automobilizme.

Keďže sme na pôde nanovedy, je vhodné citovať R. Smalleyho, ktorý vymedzil desať hlavných problémov ľudstva na nastávajúcich 50 rokov. Sú to: energia, voda, potraviny, životné prostredie, chudoba, terorizmus a vojna, choroby, vzdelanie, demokracia a populácia. Nanotechnológie prispievajú k riešeniu minimálne prvých siedmich z nich. Rozvoj sa bude opierať o nové materiály a štruktúry, ktoré som už spomínal a ktoré možno rekapitulovať takto: katalyzátory, membrány a rozpúšťadlá v zelenej chémii, slnečné články, palivové články, uskladnenie vodíka, batérie a osvetľovacia technika v energetike, spintronické a fotonické súčiastky a ploché displeje v informatike, farbivá, povrchy, obalová technika, keramiky, kompozity a kvapaliny vo sfére materiálov, senzory a analytická technika v inžinierstve, podávanie liečiv, génová terapia, implantáty, biosenzory, protetika a kozmetika v oblasti zdravia a hygieny. Vývoj je v súlade s poznaním, že hlavné aktivity N&N sa odohrávajú vo sfére materiálov, pričom z hľadiska publikovania a patentovania na prvých troch miestach sú materiálový výskum, chémia a biomedicína.

Šancou a povinnosťou nanotechnologického hnutia je zapojenie nielen prírodných, technických a lekárskeho vied, ale aj spoločenských a humanitných odborov. Ide o celkové začlenenie nanovedy a nanotechnológií do spoločenského pohybu 21. storočia. Dá sa predpokladať, že to bude storočie veľkej štvorky – nano-, bio-, informačných a kognitívnych technológií (klaster NBIC), čo musí nájsť svoj odraz aj vo vzdelávaní.

▲ Pojmy, skratky, vybrané fyzikálne veličiny a konštanty

Pojmy

Čip, mikročip – polovodičová doštička s plochou okolo 1 cm^2 , v ktorej je zhotovený integrovaný obvod – mikroprocesor, pamäť alebo iná súčiastka.

Diera – nosič kladného náboja v polovodiči tej istej veľkosti a opačného znamienka, ako je náboj elektrónu.

Difúzia – samovoľné prenikanie molekúl alebo atómov jednej látky medzi molekuly alebo atómy druhej látky spôsobené ich neusporiadaným tepelným pohybom.

Energetická medzera (E_g) – oddeľuje v polovodiči pásy vodivosti pomocou elektrónov a dier, má hodnoty $0,5 - 3,5 \text{ eV}$.

Excimerový laser – laser, v ktorom žiarenie vzniká v plyne alebo zmesi plynov vybudených elektrickým výbojom. Používa vzácne plyny ako Ar, Kr, Xe a halogénové plyny ako F_2 , Cl_2 , spravidla v zmesi plynů z prvej a druhej skupiny.

Fluorescencia – vyžarovanie svetla atómami alebo molekulami látky pri ich ožiarení elektromagnetickým žiarením, ktoré po ožiarení pretrváva (okolo $1 \mu\text{s}$).

Fotonika – disciplína, ktorá zahŕňa vytváranie svetla (napr. pomocou laserov), jeho prenos (napr. optickými vláknamí), detekciu, zosilňovanie a využitie v informatike, medicíne, meraní, od UV po infračervené žiarenie.

Fullerény – veľké molekuly uhlíka v tvare mnohostenov s počtom atómov až 94. Bežné fullerény sú guľatý C_{60} a elipsoidický C_{70} .

Integrovaný obvod – kompaktný elektronický obvod vytvorený v polovodičovej doštičke – čipe, ktorý pozostáva z tranzistorov.

Klaster – čiastočka (fragment) pevnej látky, zhľuk 10 až 100 atómov

alebo molekúl s rozmerom medzi molekulou, ktorá spravidla obsahuje 2 – 10 atómov, a nanočasticou.

Koloidný roztok – nepravý roztok, jemné nerozpustené čiastočky rozptýlené v kvapaline, ktoré sa neusadia na dno nádoby.

Kompozitné materiály – materiály so zlepšenými vlastnosťami zhotovené spojením jednoduchých materiálov. Skladajú sa zo základného materiálu, v ktorom sú rozmiestnené výplňové zložky. Príklady: železobetón, sklolaminát alebo nanočastice typu jadro–obal (škrapina), ako Co – Ag.

Nanočastica – častica materiálu s počtom 100 až 100 000 atómov a rozmermi v 1 – 100 nm, spravidla 5 – 50 nm, guľatého, prípadne iného tvaru.

Obrovská magnetorezistencia – veľký pokles odporu po vložení materiálu do magnetického poľa. Pri nízkej teplote, napr. kvapalného hélia, je pokles odporu až o 200%.

Prechod PN – rozhranie medzi polovodičom typu N a polovodičom typu P, základná štruktúra elektronických súčiastok. Elektrický prúd môže cez prechod PN prechádzať iba od polovodiča typu P ku N.

Piezoelektrický element – využíva piezoelektrický jav, ktorý spočíva v tom, že keď pripojíme na piezoelektrický materiál – kryštál elektrické napätie, kryštál sa deformuje – mení svoje rozmery.

Polovodiče – materiály s elektrickou vodivosťou medzi vodičmi (kovmi) a nevodičmi (izolantmi). Delia sa na polovodiče typu N, v ktorých prúd vedú elektróny, a polovodiče typu P, v ktorých prúd vedú diery. Príklady polovodičov: arzenid gália (GaAs), germánium (Ge), kremík (Si).

Spintronika – odvetvie elektroniky, kde nositeľom informácie nie je iba náboj elektrónu, ale aj jeho magnetický moment, ktorý má pôvod v spine elektrónu, t. j. momente jeho hybnosti. Podľa klasickej predstavy je to rotácia elektrónu okolo jeho osi.

Supravodič – materiál, ktorého elektrický odpor pri znižovaní teploty pod 10 – 20 K klesne na nulu. Osobitnú skupinu tvoria „vysokoteplotné“ supravodiče, v ktorých sa stav s nulovým odporom dosiahne už pri ochladení kvapalným dusíkom, teda pri 78 K.

Surfaktant – surface active agent – povrchová vrstva na nanočasticách, ktorá ich chráni pred oxidáciou, obmedzuje ich zhukovanie a pôsobí aj pri vytváraní častíc chemickými metódami.

Tranzistor – základný polovodičový prvok, ktorý sa používa vo funkcii spínača, zesilňovača, oscilátora. Je stavebnou jednotkou integrovaných obvodov. Jednoelektrónový tranzistor reaguje na prítomnosť jediného elektrónu.

Tribológia – náuka o trení.

Uhlíková nanorúrka – alotropická modifikácia uhlíka, má valcovitý tvar. Rozoznávajú sa jednostenné a mnohostenné nanorúrky.

Skratky

AMD – Advanced Micro Devices, výrobca mikroelektronických súčiastok

AFM – atomic force microscope, mikroskop atomárnych síl

CNT – carbon nanotube, uhlíková nanorúrka

DFT – density-functional theory, teória funkcionálu hustoty

DNA – deoxyribonukleová kyselina

EC, EK – European Commission, Európska komisia

ERC – European Research Council, Európska výskumná rada, orgán na financovanie špičkových projektov základného výskumu

Fa – firma

FET – field effect transistor, tranzistor, v ktorom sa prietok prúdu ovláda vonkajším elektrickým poľom

GMR – giant magnetoresistance, obrovská magnetorezistencia

HDP – hrubý domáci produkt

IBM – International Business Machines, výrobca zariadení pre informatiku

ICT, IKT – information and communication technologies, informačné a komunikačné technológie

IO – integrovaný obvod

- JRC EC** – Joint Research Center EC, Spojené výskumné centrum EK
- MFM** – magnetic force microscope, mikroskop magnetických síl
- MBE** – molecular beam epitaxy, molekulárna zväzková epitaxia, rast vrstvy, ktorá kopíruje kryštalickú štruktúru podložky naparováním v ultravysokom vákuu
- NC** – Nobelova cena
- NMP** – Nanoveda, nanotechnológie, materiály a nové produkčné technológie, tematická oblasť 7. RP
- N&N** – nanoveda a nanotechnológie
- NNI** – Národná nanotechnologická iniciatíva, USA
- RAM** – random access memory, pamäť s ľubovoľným prístupom, možný je záznam aj jeho prepísanie. Flash RAM je polovodičová pamäť využívaná v tzv. USB kľúčoch, vyvinutá v Japonsku. Rýchlo sa vymazáva, z čoho konštruktéri odvodili názov flash – záblesk
- RP** – rámcový program, spoločné výskumné programy Európskej únie riadené z Bruselu. V rokoch 2007 – 2013 to bol 7. RP, v rokoch 2014 – 2020 nasleduje 8. RP, ktorý sa nazýva Horizont 2020
- PC RAM** – phase change RAM, pamäti RAM využívajúce zmenu stavu materiálu medzi kryštalickým a amorfným tvarom – fázou
- ROM** – read only memory, pamäť, v ktorej je možný iba záznam, napr. kompaktný disk CD
- SEM** – scanning electron microscope, rastrovací elektrónový mikroskop
- SMM** – single molecule microscopy, jednomolekulová mikroskopia
- SPM** – scanning probe microscope, rastrovací sondový mikroskop, spoločný názov pre AFM, MFM a STM
- STED** – stimulated emission depletion microscopy, mikroskopia so zmenšovaním stimulovanej emisie
- STM** – scanning tunneling microscope, rastrovací tunelový mikroskop
- TEM** – transmission electron microscope, transmisný elektrónový mikroskop
- UV** – ultrafialové žiarenie
- 0D, 1D, 2D** – nula-, jedna- a dvojdimenzionálne objekty

Tab. I Vybrané fyzikálne veličiny

Značka	Názov	Jednotka
B	magnetická indukcia	T (tesla)
E	energia	J (joule), eV (elektrónvolt) = $1,602 \times 10^{-19}$ J
F	sila	N (newton)
I	elektrický prúd	A (ampér)
l	dĺžka	m (meter)
m	hmotnosť	kg (kilogram)
n_o	absolútny index lomu	bezrozmerná veličina
mol	látkové množstvo	mól*
p	tlak	Pa (pascal), bar = 10^5 Pa
T	teplota	K (Kelvin)
t	čas	s (sekunda)
λ	vlnová dĺžka	nm (nanometer)

*množstvo látky, v ktorom je rovnaký počet molekúl (atómov) ako v 12 g izotopu uhlíka C_{12} (porovnaj tabuľka II – Avogadrova konštanta)

Tab. II Vybrané fyzikálne konštanty

Názov	Hodnota
Boltzmannova konštanta	$k = 1,3805 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
elektrická konštanta, permitivita vákua	$\epsilon_0 = 8,859 \times 10^{-12} \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4 \text{ A}^2$
elektrický náboj elektrónu	$e = -1,602 \times 10^{-19} \text{ A s}$
hmotnosť vodíkového atómu	$m_H = 1,6731 \times 10^{-27} \text{ kg}$
magnetická konštanta, permeabilita vákua	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ m kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$
Planckova konštanta	$h = 6,624 \times 10^{-34} \text{ J s}$
počet molekúl v jednom mole (Avogadrova konštanta)	$N_A = 6,026 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
pokojoová hmotnosť elektrónu	$m_o = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
rýchlosť svetla vo vákuu	$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$

▲ Portréty priekopníkov nanovedy a nanotechnológií

Eric Betzig (1960), americký biofyzik. Vyštudoval na Cornellovej univerzite, pôsobí v Lekárskom ústave Howarda Hughesa. Vyvinul „jednomolekulovú mikroskopiu“. Nobelova cena za chémiu 2014 za vývoj superrozlišovacieho fluorescenčného mikroskopu (nanoskopu) (2005) spolu s S. W. Hellom a W. E. Moernerom.

Gerd Binnig (1947), nemecký fyzik. Vyštudoval na Univerzite vo Frankfurte n. Mohanom, pôsobí v Laboratóriu fa IBM v Rüşchlikone vo Švajčiarsku neďaleko Zürichu. Tu spolu s H. Rohrerom a spolupracovníkmi vynašli rastrovací tunelový mikroskop (1981). Nobelova cena za fyziku 1986 za rastrovací tunelový mikroskop spolu s H. Rohrerom. (Druhú polovicu ceny získal E. Ruska za elektrónový mikroskop.) Pred pár rokmi otvorili v Rüşchlikone nové Nanotechnologické centrum Binniga a Rohrera pomenované na ich počesť.

Robert F. Curl (1933), americký chemik. Vyštudoval na Kalifornskej univerzite v Berkeley. Pôsobil na Riceovej univerzite v Houstone a na Harvardovej univerzite. Zaoberal sa infračervenou a mikrovlnovou spektroskopiou. Spoluobjavitel' molekuly C_{60} pozostávajúcej z 12 päťuholníkov a 20 šesťuholníkov pripomínajúcej futbalovu loptu r. 1985 na Riceovej univerzite. Nobelova cena za chémiu 1996 za objavenie molekuly uhlíka C_{60} (1985), na ktorej sa podieľali H. Kroto a R. Smalley.

K. Eric Drexler (1955), americký inžinier. Jeho *alma mater* je Massachusettský technologický inštitút. Svoje vizionárske sklony prejavil už záujmom o kolonizáciu vesmíru. Študoval veľmi tenké kovové vrstvy na voskovom podklade, aby demonštroval možnosti ich využitia ako plachiet na pohon vesmírnych lodí tlakom slnečného žiarenia. Potom sa začal zaoberať molekulárnou nanotechnológiou. Známa je jeho kniha *Engines of Creation*, v ktorej navrhol nano-assembly, zariadenie, ktoré dokáže vytvoriť svoju vlastnú kópiu. Nápad sa pochopiteľne ne-realizoval. Drexlerovi oponoval R. Smalley, o čom píšem v [kap.12](#).

Donald M. Eigler (1953), americký fyzik. Vyštudoval na Kalifornskej univerzite v San Diegu, pôsobil v Bellových laboratóriách a vo fa IBM. Je priekopníkom manipulovania atómov pomocou hrotu STM. Z atómov xenónu zostavil na povrchu niklu nápis IBM, z molekúl CO vytvoril logické nanoobvody. Za tieto výsledky obdržal (spolu s N. C. Seemanom, zakladateľom technológie využitia DNA v nanoobvodoch) r. 2010 Kavliho cenu v nanovede.

Albert Einstein (1879 – 1955), americký fyzik nemeckého pôvodu. Pôsobil na Patentovom úrade v Berne, na univerzitách v Zürichu, Prahe, Berlíne, bol riaditeľom Ústavu cisára Wilhelma pre fyziku. Po odchode do USA pôsobil na Princetonskej univerzite. Vypracoval špeciálnu a všeobecnú teóriu relativity. Pomocou kvantovej teórie vysvetlil zákony fotoelektrického javu. Nobelova cena za fyziku 1921 za rozvoj teoretickej fyziky a formulovanie zákona fotoelektrického javu. V rebríčku najvýznamnejších svetových fyzikov sa spravidla umiestňuje na prvom mieste.

Albert Fert (1938), francúzsky fyzik. Vyštudoval na École Normale Supérieure v Paríži, pôsobil na Michiganskej štátnej univerzite a Univerzite Paríž – Sud v Orsay, kde so spolupracovníkmi objavili r. 1988 efekt obrovskej magnetorezistencie (súčasne, ale nezávisle od skupiny P. Grünberga v Jülichu). Objav bol prelomom v magnetických diskoch s GB kapacitou. Nobelova cena za fyziku 2007 za objav obrovskej magnetorezistencie spolu s P. Grünbergom.

Richard Feynman (1918 – 1988), americký fyzik. Študoval na Massachusettskom inštitúte technológie, pôsobil na Cornellovej univerzite a známom Caltechu (Kalifornský technologický inštitút). Zaoberal sa kvantovou elektrodynamikou, bol však univerzálnym fyzikom a v mladosti sa zúčastnil vývoja americkej jadrovej štiepnej bomby. (Hovoril, že tam nebolo veľmi čo robiť a svoju tvorivosť uplatňoval pri otváraní trezorov svojich kolegov. Predpokladal, že ako fyzikom im pri voľbe kódu ako prvý príde na um základ prirodzených logaritmov 2,71828.)

V rebríčkoch najvýznamnejších fyzikov všetkých čias sa umiestňuje v prvej desiatke spolu s I. Newtonom, N. Bohrom, A. Einsteinom a i. Keď predniesol svoju slávnu prednášku *Tam na dne je veľa priestoru*, mal 41 rokov, ako fyzik bol dozretý a rozhladený. Prispel aj k vyšetreniu katastrofy kozmickej lode Challenger v januári 1986. Nobelovu cenu dostal r. 1965 spolu s J. S. Schwingerom a S. Tomonagom za nezávislé príspevky ku kvantovej elektrodynamike, QED.

André Geim¹³ (1958), holandský a britský fyzik ruského a predtým nemeckého pôvodu. Vyštudoval na Moskovskom inštitúte fyziky a technológie. Pôsobil na Univerzitách v Nottinghamu a v Kodani a nakoniec v Manchestri. Venoval sa supravodivosti, diamagnetickému nadnášaniam, grafénu. Nobelova cena za fyziku 2010 spolu s K. S. Novoselovom za prelomové pokusy týkajúce sa materiálu grafén. Povýšený do šľachtického stavu (Sir André Konstantin Geim).

Peter Grünberg¹⁴ (1939), nemecký fyzik. Narodil sa v Plzni v Protektoráte Čechy a Morava. V roku 1946 bola rodina odsunutá do Nemecka s výnimkou otca, ktorý zahynul v internačnom tábore. Vyštudoval na Univerzite J. W. Goetheho vo Frankfurte n. Mohanom. Pôsobil na Technickej univerzite v Darmstadte, na Univerzite v Ottawe a nakoniec vo Výskumnom centre fyziky tuhých látok v Jülichu. Venoval sa výskumu tenkých vrstiev, osobitne magnetizmu v multivrstvách. V Jülichu

-
- 13 Je pravdepodobne jediným laureátom NC, ktorý obdržal aj Ig Nobelovu cenu r. 2000. Je to cena s humorným nábojom za výskum, „ktorý radšej ani nemal byť vykonaný“. Geim ju dostal spolu s M. Berrym za pokusy s nadnášaním živej žaby, odvodené od diamagnetickej levitácie vody v silnom magnetickom poli. Bol to seriózny výskum, pečať senzačnosti mu dala žaba. Geim a Berry sa neurazili a cenu prijali. V r. 2000 bola napr. v informatike udelená cena za softvér, ktorý signalizuje, že po klávesnici počítača behá mačka.
- 14 S prof. Grünbergom som sa stretol na konferencii na Univerzite v Bielefelde v r. 2008. Gratuloval som mu k Nobelovej cene. Na otázku, čo teraz robí, mi povedal, že po dosiahnutí 65 rokov veku bol podľa nemeckého zákona penzionovaný. Nechcel som veriť, že to platí aj na laureátov NC, ale platilo. Dnes, keď školstvo v Nemecku prešlo pod pôsobenie zemských vlád, sa predpisy pozmenili a vek penzionovania sa zvýšil. Na druhej strane dôchodky nemeckých profesorov a záujem o ich služby v nemeckom priemysle po odchode do dôchodku môžu naše prípadné obavy o Grünbergov osud rozptýliť.

so spolupracovníkmi objavili efekt obrovskej magnetorezistencie (súčasne, ale nezávisle od skupiny A. Fert a v Orsay). Objav bol prelomom v magnetických diskoch s GB kapacitou. Nobelova cena za fyziku 2007 za objav obrovskej magnetorezistencie spolu s A. Fertom.

Stefan W. Hell (1962), nemecký chemik a biofyzik. Študoval na Univerzite v Heidelbergu, pôsobí na Ústave spoločnosti M. Plancka pre biofyzikálnu chémiu v Göttingene a v Nemeckom výskumnom centre onkologických ochorení v Heidelbergu. Vyvinul mikroskopiu so zmenšovaním stimulovanej emisie (STED). Nobelova cena za chémiu 2014 za vývoj super-rozlišovacieho fluorescenčného mikroskopu (nanoskopu) (2000) spolu s E. Betzigom a W. E. Moernerom.

Sumio Iidžima (1939), japonský fyzik. Študoval na Univerzite elektrokommunikácií v Tokiu, pôsobil na Univerzite Tohoku v Sendai, Štátnej univerzite v Arizone a dnes pracuje v spoločnosti NEC v Cukube. Venuje sa elektrónovej mikroskopii s vysokým rozlíšením. Pripisuje sa mu objav nanorúrok (r. 1991), ktoré sa síce spomínali už aj predtým, ale Iidžimova publikácia vyvolala mimoriadny záujem a rozvoj príslušného výskumu. Bola mu udelená Kavliho cena za nanovedu.

Klaus von Klitzing¹⁵ (1943), nemecký fyzik. Vyštudoval na Technickej univerzite v Braunschweigu, potom pôsobil na Univerzite vo Würzburgu, v Oxforde a v Laboratóriu vysokých magnetických polí v Grenoble, na Technickej univerzite v Mníchove a v Ústave výskumu tuhých látok Spoločnosti Maxa Plancka v Stuttgarte. Venoval sa vlastnostiam látok v silných magnetických poliach, neskôr nízkorozmerným elektronickým systémom, najmä vrstvám. R. 1980 objavil kvantový

15 K. von Klitzing je čestným doktorom vied SAV (2000). Oslovili sme ho v tej súvislosti, že v Elektrotechnickom ústave SAV skonštruovali primárny etalón elektrického odporu (J. Novák a kol.) na báze kvantového Hallovhov javu. K. von Klitzing odpísal, že doktorát prijme, lebo akceptuje iba po jednom vyznamenaní z každej krajiny a zo Slovenska nemá zatiaľ žiadne. Po promócií a večeri v Smoleniciach bol taký zdvorilý, že verejne prikázal svojej manželke, aby mu odteraz kupovala iba slovenské vína. Jeho príchod v júli 2000 bol sprevádzaný slabým zemetrasením. Vedeli sme, že laureát NC je už blízko.

Hallov jav. V tomto prípade sa čas objavu dá určiť úplne presne, bolo to 5. februára 1980 o 2. h v noci v laboratóriu v Grenoble. S efektom súvisí Klitzingova konštanta $R_K = h/e^2 = 25,8 \text{ k}\Omega$, kde h je Planckova konštanta a e náboj elektrónu. Kvantový Hallov jav sa využíva pri konštrukcii presných odporových etalónov. NC za fyziku 1985 za objav kvantového Hallovhov javu.

Walter Kohn (1923), americký fyzik. Narodil sa vo Viedni. Jeho rodičia zahynuli v holokauste. Po obsadení Rakúska Hitlerom sa s detským transportom dostal do Anglicka a neskôr do Kanady. Študoval na Torontskej univerzite. Ako nemecký občan nemal povolený vstup do chemického pavilónu a zameral sa na matematiku a fyziku. Doktorát získal na Harvardovej univerzite pod vedením laureáta NC za fyziku Juliana Schwingera. Pôsobil na Univerzite Carnegie Mellon a na Kalifornskej univerzite. Venoval sa výskumu polovodičov. Základným spôsobom prispel k vypracovaniu teórie funkcionálu hustoty (spolupracoval s P. Hohenbergom a L. J. Shamom). NC za chémiu 1998 za vývoj teórie funkcionálu hustoty (DFT), druhú časť ceny získal John A. Pople za vývoj počítačových metód v kvantovej chémii. Dve Kohnove práce sú na čele rebríčka najcitovanejších prác uverejnených v časopise Physical Review v období 1893 – 2003.

Harry W. Kroto¹⁶ (1939), anglický chemik sliezskeho pôvodu (Krotoschiner). Študoval na Univerzite v Sheffielde. Pôsobil v laboratóriách v Ottawe a v New Jersey (Bellove laboratóriá). Venoval sa spektroskopii a novým polostabilným látkam. Spoluobjaviteľ molekuly C_{60} pozostávajúcej z 12 päťuholníkov a 20 šesťuholníkov pripomínajúcej futbalovú loptu r. 1985 na Riceovej univerzite v Houstone. Kroto nazval molekulu fullerénom alebo buckminsterfullerénom podľa architekta Buckminstera Fullera, ktorý navrhoval podobné sférické kupoly. R. 2003 organizoval

16 S H. Krotom som sa stretol na konferencii v Alexandrii v obnovenej Alexandrijskej knižnici r. 2006. Kroto kritizoval zbyrokratizované pomery vo vede a žiadal, aby skutočné vedecké talenty dostali inštitucionálne zdroje a neboli hodené do súkolia grantových systémov.

Memorandum laureátov NC proti vojne v Iraku. Nobelova cena za chémiu 1996 za objavenie molekuly uhlíka C_{60} (1985) spolu s R. F. Curlom a R. Smalleyom. Povýšený do šľachtického stavu (Sir Harold Walter Kroto).

Irving Langmuir (1881 – 1957), americký fyzik a chemik. Vyštudoval na Kolumbijskej univerzite v New Yorku, doktorát získal v Göttingene, kde bol jeho školiteľom laureát NC Walter Nernst. Zaoberal sa adsorpciou a inými povrchovými javmi, výbojmi v plynch, teóriou mocenstva. Je po ňom pomenovaná adsorpčná izoterma a metóda depozície molekúl na podložku z povrchu kvapaliny ponáraním a vynáraním podložky (Langmuirova - Blodgettovej metóda, Katarina Blodgettová bola jeho spolupracovníčka). Nobelova cena za chémiu 1932 za výskum v chémii povrchov (1916).

Ernst Mach (1838 – 1916), rakúsky fyzik a filozof. Pôsobil na univerzitách v Grazi, Prahe a vo Viedni. Zaoberal sa mechanikou, termikou, akustikou a optikou. Objavil (zvukovú) nárazovú vlnu, ktorá vzniká na prednej časti telesa pri nadzvukovej rýchlosti obtekania. Je po ňom pomenované Machovo číslo – pomer rýchlosti letu a rýchlosti zvuku. Ak $M > 1$, letí lietadlo nadzvukovou rýchlosťou.

William E. Moerner (1953), americký chemik. Študoval na Cornellovej univerzite, pôsobí na Stanfordovej univerzite. Zaoberal sa absorpciou svetla molekulami a fluorescenciou. Nobelova cena za chémiu 2014 za vývoj superrozlišovacieho fluorescenčného mikroskopu (nanoskopu) (1989) spolu s E. Betzigom a S. W. Hellom.

Konstantin S. Novoselov (1974), britský fyzik ruského pôvodu. Vyštudoval na Moskovskom inštitúte fyziky a technológie. Pôsobil na Univerzite Nijmegen a na Manchesterskej univerzite. Bol žiakom A. Geima. Venoval sa supravodivosti, magnetickým doménam, grafénu. Nobelova cena za fyziku 2010 spolu s A. Geimom za prelomové pokusy týkajúce sa materiálu grafén. Povýšený do šľachtického stavu (Sir Konstantin Sergejevič „Kost’a“ Novoselov).

Heinrich Rohrer¹⁷ (1933 – 2013), švajčiarsky fyzik. Vyštudoval na ETH v Zürichu. Bol študentom laureáta NC za fyziku Wolfganga Pauliho. V r. 1963 nastúpil do laboratória fa IBM v Rüşchlikone vo Švajčiarsku neďaleko Zürichu. Venoval sa supravodivosti a jadrovej magnetickej rezonancii. Tu spolu s G. Binnigom a spolupracovníkmi vynašli rastrovací tunelový mikroskop (1981). Nobelova cena za fyziku 1986 za rastrovací tunelový mikroskop spolu s G. Binnigom. (Druhú polovicu ceny získal E. Ruska za elektrónový mikroskop.) Pred pár rokmi otvorili v Rüşchlikone nové Nanotechnologické centrum Binniga a Rohrera pomenované na ich počesť.

Ernst Ruska (1906 – 1988), nemecký fyzik. Vyštudoval na Technickej univerzite v Mníchove, pôsobil na Technickej univerzite v Berlíne. Tu postavil prvý elektrónový mikroskop. Zamestnal sa vo firme Siemens, kde vyvinuli r. 1939 prvý komerčný elektrónový mikroskop. Potom pôsobil na Ústave Fritza Habera v Berlíne. NC za fyziku 1986 za elektrónový mikroskop. (Druhú polovicu ceny dostali G. Binnig a H. Rohrer za rastrovací tunelový mikroskop.)

Richard Smalley (1943 – 2005), americký fyzik. Pôsobil na Michiganskej a Princetonskej univerzite. Venoval sa formovaniu anorganických a polovodičových klastrov s využitím molekulárnych zväzkov. Na Riceovej univerzite v Houstone sa stal r. 1985 spoluobjaviteľom molekuly C_{60} pozostávajúcej z 12 päťuholníkov a 20 šesťuholníkov, pripomínajúcej futbalovú loptu. Americký Senát prijal pri jeho úmrtí rezolúciu, v ktorej ho označil za *Otca nanotechnológie*. Nobelova cena za chémiu 1996 za objavenie molekuly uhlíka C_{60} spolu s R. F. Curlom a H. Krotom.

17 H. Rohrera som stretol r. 2000 na konferencii k švajčiarskemu národnému projektu *Nanovedy* v Berne r. 2000. Na tejto konferencii vystúpil s ideou paralelného budovania mnohých štruktúr zdola nahor, aby sa proces urýchlil. Švajčiarsko vďaka svojim tradíciám v jemnej mechanike a hodinárskom priemysle patrí k vedúcim krajinám aj v nanotechnológii. Rohrerov „chraplák“ a ťažká zrozumiteľnosť švajčiarskej nemčiny mi počúvanie jeho prednášky neuláhčili, ale stála za to. Na chvíľu som zabudol, že mi hodinu pred otvorením konferencie ukradli cestovnú tašku s dokladmi aj peniazmi.

Portréty predstaviteľov odboru na Slovensku

Július Cirák (1953), prof. Ing. CSc., experimentálnu elektrofyziku vyštudoval na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave. Jeho školiteľom bol prof. J. Krempaský. Zahraničné pobyty absolvoval na Biofizikálnom ústave Maďarskej akadémie vied v Szegede a na ICTP v Terste v Taliansku. Pôsobí v Ústave jadrového a fyzikálneho inžinierstva Fakulty elektrotechniky a informatiky STU vo vednom odbore fyzikálne inžinierstvo. Oblasti výskumu: usporiadané organické molekulárne systémy a nanoštruktúry; technológia a štúdium elektrických a optických vlastností s aplikáciami pre organickú elektroniku.

Ivan Frollo (1939), prof., Ing., DrSc., rádioelektroniku vyštudoval na Elektrotechnickej fakulte SVŠT v Bratislave. Bol doktorandom na Ústave merania SAV. Svojou vedeckovýskumnou aktivitou ovplyvňuje rozvoj meracej techniky, hlavne so zameraním na merania v lekárskech vedách. Významné výsledky dosiahol v oblastiach: meracie metódy a prístroje pre biológiu, fyziológiu, kardiochirurgiu a respirológiu, elektronické meracie prístroje pre fyziológiu a tomografické metódy a systémy na báze jadrovej magnetickej rezonancie s využitím vo fyzike nanokvapalín. Získal 22 patentov. Absolventi doktorandského štúdia: 11.

Matej Jergel (1954), Ing., DrSc., fyziku tuhých látok vyštudoval na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave. Zahraničné pobyty absolvoval na synchrotrónoch v Hamburgu, Paríži a Grenoble, dva a pol roka pôsobil na Národnom polytechnickom inštitúte v Mexico City. Pôsobí vo Fyzikálnom ústave SAV. Oblasti výskumu: rtg štruktúrna analýza nanoštruktúr pre rtg optiku, fotovoltiku, spintroniku a elektroniku vrátane vývoja a zavádzania nových techník a metodík, priekopník využitia synchrotrónového žiarenia vo výskume štruktúry látok. Absolventi doktorandského štúdia: 1 a vedenie dvoch v Mexiku.

Peter Kopčanský (1955), doc., RNDr., CSc., jadrovú fyziku vyštudoval na Univerzite P. J. Šafárika v Košiciach. Zahraničné pobyty absolvoval

vo FTINT v Charkove, na Sheffieldskej univerzite a v Poľskej akadémii vied v Poznani. Pôsobí na Ústave experimentálnej fyziky SAV, kde ho spočiatku viedol Ing. Anton Zentko, DrSc. Oblasť výskumu: magnetizmus nanomateriálov, najmä nanočastíc, magnetické kvapaliny, aplikácie magnetických nanočastíc v nanomedicíne: cielený transport liečiv, hypertermia a zvýšenie kontrastu v diagnostike, štúdium vplyvu magnetických nanočastíc na rozrušovanie štruktúr zodpovedných za ochorenia, ako je Parkinsonova a Alzheimerova choroba, štúdium štruktúry nanočastíc metódami rtg a neutrónového rozptylu. Absolventi doktorandského štúdia: 13.

Ivan Kostič (1955), Dr. Rer. Nat., fyziku vyštudoval na Fyzikálnej fakulte Moskovskej štátnej univerzity, rigoróznou prácu obhájil v odbore elektronika a vákuová technika na Univerzite Komenského v Bratislave. Pracuje v Laboratóriu elektrónovej litografie na Ústave informatiky SAV. Zahraničné pobyty absolvoval na Technickej univerzite v Kasseli, Ústave mikroelektroniky NCSR v Aténach a Ústave elektroniky BAV v Sofii. Oblasť výskumu: elektrónová litografia, technológie prípravy štruktúr pre mikroelektroniku, senzorku, nanofotoniku a mikroelektromechanické systémy, rastrovacía elektrónová mikroskopia.

Štefan Luby (1941), prof., Ing., DrSc., Dr. h. c., fyziku tuhých látok a jadrovú fyziku vyštudoval na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave u prof. J. Krempaského. Zahraničné pobyty absolvoval na Univerzite Salento, Univerzite Syrakúzy (USA), Univerzite v Číbe a na Univerzitách v Bielefelde a v Stuttgarte (ako hosťujúci profesor Nadácie Alexandra von Humboldta). Pôsobil na Univerzite P. J. Šafárika v Košiciach a v Elektrotechnickom a Fyzikálnom ústave SAV. Oblasť výskumu: amorfné polovodiče, osobitne Ge, spoľahlivosť integrovaných obvodov a efekt elektromigrácie, kovové multivrstvy pre rtg zrkadlá a štruktúry s efektom obrovskej magnetorezistencie, v súčasnosti nanočasticové senzory plynov. Absolventi doktorandského štúdia a vedenie domácich a zahraničných študijných pobytov: 12.

Eva Majková (1950), RNDr., DrSc., fyziku tuhých látok vyštudovala na Univerzite Komenského v Bratislave. Zahraničné pobyty absolvovala na Univerzite v Nice, Univerzite v Bielefelde, Univerzite v Sendai a v synchrotrónových laboratóriách v Hamburgu a Grenobli. Pôsobí vo Fyzikálnom ústave SAV, kde sa pod jej vedením vybudovalo laboratórium Nanolab. Oblasť výskumu: amorfné kovové materiály, kovové multivrstvy so zameraním na zrkadlá mäkkého rtg a extrémneho ultrafialového žiarenia a na efekt obrovskej magnetorezistencie a jeho využitie v štruktúrach spintroniky. V ostatných rokoch sa zamerala na prípravu nanočastíc kovových a magnetických materiálov a ich komplexnú charakterizáciu. Absolventi doktorandského štúdia: 8.

Vojtech Nádaždy (1961), Ing., CSc., mikroelektroniku vyštudoval na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave, ašpirantúru v odbore fyzika tuhých látok absolvoval vo Fyzikálnom ústave SAV, kde aj pôsobí. Na zahraničných pobytoch bol v Anglicku, Japonsku a Holandsku, kde sa venoval výskumu elektricky aktívnych defektov v polovodičoch pre fotovoltiku. Oblasť výskumu: spektroskopia hlbokých hladín v polovodičoch, fotovoltika na báze anorganických a organických polovodičov, aplikácia kovových a polovodičových nanočastíc vo fotovoltike a senzorike.

Viera Skákalová (1954), doc., Ing., DrSc., vyštudovala na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave, tu získala hodnosť PhD. vo výskume vodivých polymérov. Pôsobila vo Weizmannovom ústave v Izraeli, neskôr, od r. 2001 v Ústave výskumu tuhých látok Max-Planckovej spoločnosti v Štuttgarte a od r. 2011 na Viedenskej univerzite. V r. 2004 založila spoločnosť Danubia NanoTech, s. r. o. so sídlom v Bratislave. Organizovala konferencie Európskej spoločnosti materiálového výskumu (E-MRS) 2007, 2009 a 2012, editovala knihu *Grafén: vlastnosti, príprava, charakterizácia a súčiastky*. V súčasnosti sa venuje výskumu uhlíkových nanorúrok, grafénu a iných dvojdimenzionálnych materiálov. Absolventi doktorandského štúdia: 7.

Peter Šiffalovič (1975), Dr. Rer. Nat., PhD., fyziku – optiku a optoelektroniku vyštudoval na Univerzite Komenského v Bratislave. Bol doktorandom na Fakulte fyziky Univerzity v Bielefelde, školiteľa Prof. Dr. U. Heinzmann a Prof. Dr. M. Drescher, dizertáciu obhájil *summa cum laude*. Zahraničné pobyty absolvoval na Univerzite Šizuoka a v synchrotrónových laboratóriách v Hamburgu a Grenobli. Pôsobí vo Fyzikálnom ústave SAV. Oblasť výskumu: nelineárne javy, femtosekundová fotoelektrónová spektroskopia, spintronické štruktúry, vytváranie a štruktúra nanočasticových vrstiev pomocou malouhlového rtg rozptylu. Absolventi doktorandského štúdia: 1.

Ivan Štich (1959), prof., Ing., DrSc., fyziku tuhých látok vyštudoval na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave, v štúdiu pokračoval na Medzinárodnej škole pokročilých štúdií v Terste. Zahraničné pobyty absolvoval na Univerzite v Cambridge, UK a v Spojenom výskumnom centre atómových technológií v Cukube. Pôsobí vo Fyzikálnom ústave SAV, predtým na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU. Oblasť výskumu: molekulárna dynamika, počítačové modelovanie manipulácie atómov pomocou hrotu mikroskopu s atomárnym rozlíšením s využitím slovenského superpočítača Aurel, teória funkcionálu hustoty a kvantového Monte Carla, nanomanipulácie pomocou skenovacích sondových mikroskopov, nanotribológia. Absolventi doktorandského štúdia: 4.

Ivo Vávra (1949), Ing., CSc., fyziku tuhých látok vyštudoval na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave. Pôsobí v Elektrotechnickom ústave SAV. Oblasť výskumu: fyzika a technológia materiálov pre mikroelektroniku, štúdium mikroštruktúry materiálov metódami elektrónovej mikroskopie a jej vplyvu na elektrické vlastnosti. V poslednom období sa venuje štúdiu nanomateriálov vrátane ich negatívneho vplyvu na ľudské zdravie a životné prostredie a biomimetike. Doktorandské štúdium končilo uňho päť absolventov¹⁸.

18 Diplomantom I. Vávru bol súčasný prezident SR Andrej Kiska.

Literatúra

Koncepcie nanovedy a nanotechnológií sa produkujú v rozsahu tisícov strán na úrovni vlád, inštitúcií, vedeckých spoločností a firiem. Uvádzam niekoľko dôležitejších, ktoré majú nadnárodný charakter. Literatúru ku kapitolám uvádzam najviac s prvými troma autormi, ďalší sú uvedení ako et al., s názvami preloženými do slovenčiny a s uvedením zväzku časopisu, roku vydania s rozsahom strán alebo čísla článku, napr. 52, 2014, s. 23 – 41 alebo 076324.

- Feynman, R. P., There's plenty of room at the bottom (Tam na dne je veľa priestoru), prednáška na California Inst. of Technol., 29. 12. 1959, <http://nano.xerox.com/nanotech/fey.html>.
- National Nanotechnology Initiative (Národná nanotechnologická iniciatíva), Clinton, W. J., 2000 (tím Bieleho domu 1998).
- Nanostructure Science and Technology, National Science and Technology Council (Veda a technika nanoštruktúr, Národná rada pre vedu a techniku), Siegel, W., predseda, Loyola Coll. Maryland, 1999.
- Springer Handbook of Nanotechnology (Springerova príručka nanotechnológie), ed. B. Bhushan, Berlin-Heidelberg-New York, 2004, 1221 s., ISBN 3-540-01218-4.
- Nanoscience and Nanotechnology, Action plan for Europe 2005 – 2009 (Nanoveda a nanotechnológie, akčný plán pre Európu), Európska komisia, COM (2005) 243, 7. 6. 2005.
- The Ethics and Politics of Nanotechnology (Etika a politika nanotechnológie), UNESCO, Paríž 2006, unesdoc.unesco.org/images/0014/001459/145951e.
- Genesys White Paper (Biela kniha Genesys), ed. Dosch, H., Van de Voorde, M. H., Max-Planck Inst. für Metallforschung, Stuttgart, 2008, ISBN 978-3-00-027338-4.

- Commission Recommendation on A Code of Conduct for Responsible Nanosciences and Nanotechnologies Research (Odporúčanie komisie – kódex správania pre zodpovedný výskum v nanovedách a nanotechnológiách), Európska komisia, C (2008) 424, ISBN 978-92-79-1-11605-6.
- Allhoff, F., Lin, P., Moore, D., What is nanotechnology and what does it matter? From science to ethics (Čo je nanotechnológia a aký je jej význam? Od vedy k etike), Wiley-Blackwell, UK 2010, 293 s., ISBN 978-1-4051-7544-9.
- Nanoscience and nanotechnology, opportunities and uncertainties (Nanoveda a nanotechnológie – možnosti a pochybnosti), Royal Society, Royal Acad. Eng., 2004, doplnené 2011.
- Nanotechnology research directions for societal needs in 2020 (Smery výskumu v nanotechnológii z hľadiska spoločenských potrieb roka 2020), ed. Roco, M. C., Mirkin, C. A., Hersam, M. C., Springer, New York 2011, <http://www.wtec.org/nano2>. (Štúdiá je známa ako Nano 2. Nano 1, ed. Roco M. C. et al. vyšla r. 1999.)
- Nanotechnology: the invisible giant tackling Europe's future challenges (Nanotechnológia: neviditeľný obor reflektujúci budúce európske výzvy), DG Res. Inov. Ind. Techn. EUR 13325 EN, 2013, ISBN 978-92-79-28892-0.
- Graphene: Properties, preparation, characterisation and devices (Grafén: vlastnosti, príprava, charakterizácia a súčasti), ed. Skákalová, V., Kaiser, A. B., Woodhead Publ. Series in Electr. and Opt. Materials, Cambridge 2014, 376 s. ISBN-13: 978-0857095084 a ISBN-10: 0857095080
- Tag, B., Mausbach, J., ed., Nanomedizin, Interdisziplinäre Betrachtung (Nanomedicína, interdisciplinárne úvahy), edition weimar, Vo. 20, VDG, Weimar, 2014, 167 s., ISBN 978-3-89739-782-8.

Literatúra ku kap. 1

- Shelley-Egan, C., Ambivalencia sľubnej technológie, Nanoethics 4, 2010, s. 183 – 189.
- Školský lexikón, Encyklopedický ústav SAV, Slovenské pedagogické nakladateľstvo, Bratislava, 1992.

Literatúra ku kap. 2

- Taniguči, N., O základnej koncepcii nanotechnológie, Proc. Int. Conf. Production Engn. Part II, British Society of Precision Engineering, 1974.
- Nobelova cena za chémiu 2014, Kráľovská švédská akadémia vied, 8. 10. 2014, <http://www.nobelprize.org>.

Literatúra ku kap. 3

- Bastani, B., Fernandez, D., Práva duševného vlastníctva v nanotechnológii, Thin Solid Films 420 – 421, 2002, s. 472 – 477.
- Stix, G., Malá veľká veda, Scientific American sept. 2001, s. 6 – 31.

Literatúra ku kap. 4

- Moore, G. E., Vtesnať viacej komponentov do integrovaného obvodu, Proc. IEEE 86, 1998, s. 82 – 85, reprint z Electronic Mag. 38, 1965, č. 8, s. 114 – 117.
- Schaler, B., Pôvod, podstata a dôsledky Moorovho zákona, http://research.microsoft.com/en-us/um/people/gray/Moore_law/html. Navštívené 14. 11. 2013.

Literatúra ku kap. 5

- Bamidele, J., Lee, S. H., Kinošita, Y., (Turanský, R., Štich, I.) et al., Vertikálna manipulácia atómov mikroskopom atomárnych síl v dynamickom móde bez zmien na hrote viackrokovým mechanizmom, Nature Comm., júl 2014, DOI: 10.1038/ncomms5476.
- Binnig, G., Quate, C. F., Gerber, C., Mikroskop atomárnych síl, Phys. Rev. Lett. 56, 1986, s. 930 – 933.
- Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, Ch. et al., Povrchové štúdie rastrovacou tunelovou mikroskopiou, Phys. Rev. Lett. 49, 1982, s. 57 – 61. http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy
- Jelínek, P., Tam dole je spousta místa, Bulletin Akademie věd ČR, 2014, č. 2, s. 4 – 8.
- Rangelow, I. W., Ivanov, T., Ivanova, K. et al., Piezorezistívny samoaktivovaný súbor ramienok pre nanotechnologické aplikácie, Microelectronic Eng. 84, 2007, s. 1 260 – 1 264.
- Sugimoto, Y., Pou, P., Abe, M., Jelínek, P. et al., Chemická identifikácia individuálnych povrchových atómov mikroskopiou atomárnych síl, Nature 446, 1. 3. 2007, s. 64 – 67.
- Sugimoto, Y., Pou, P., Custance, O., Jelínek, P. et al., Komplexné tvarovanie vertikálnou výmenou atómov s použitím mikroskopie atomárnych síl, Science 322, 17. 10. 2008, s. 413 – 417.

Literatúra ku kap. 6

- Koniec Moorovho zákona je nadohľad, tvrdí fa AMD, <http://www.pcworld.com/article/2032913>.

Literatúra ku kap. 7

- Grigorescu, A. E., Hagen, C. W., Rezisty pre sub-20 nm elektrónovú zväzkovú litografiu so zameraním na HSQ: súčasný stav, *Nanotechnology* 20, 2009, 292001.
- Hrkút P., Andok R., Bencúrova A. et al., Zborník 20. medzinárodnej konf. APCOM 2014. Ed. Vajda, J., Jamnický, I., Bratislava, FEI STU, 2014, s. 312–315.
- Klein, C., Loeschner, H., Platzgummer, E. et al., 50-keV elektrónový mnohozväzkový generátor masiek pre 11-nm HP nód: prvé výsledky overenia koncepcie elektrónového mnohozväzkového expozičného zariadenia, *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS* 11, 2012, 031402.
- Mohammad A. M., Mustafa M., Dew S. K. et al., *Nanotvarovanie: techniky a princípy*, kap. 2, Springer-Verlag, Wien 2012, Ed. Stepanova, M., Dew, S., s. 11 – 41, ISBN: 978-3-7091-0423-1.
- Sze, S. M., *VLSI technológia*, McGraw-Hill Book Co., New York 1988, *Litografia* s. 141 – 183, 676 s., ISBN 0-07-100347-9.
- Vieu, C., Carcenac, F., Pépin, A. et al., Elektrónová zväzková litografia: rozlišovacia schopnosť a aplikácie, *Appl. Surf. Sci.* 164, 2000, s. 111–117.

Literatúra ku kap. 8

- Gould, P., Nanočastice sondujú biosystémy, *Materialstoday*, 2004, február, s. 36 – 43.
- Held, G. A., Grinstein, G., Kvantový limit hustoty magnetického záznamu, *Appl. Phys. Lett.* 79, 2001, s. 1 501 – 1 503.
- Kaye, P., Laflamme, R., Mosca, M., Úvod do kvantového počítačania, Oxford Univ. Press 2007, 288 s.
- Kouwenhoven, L. P., Venema, L. C., Tepelný tok cez nanomostíky, *Nature* 404, 2000, s. 943 – 944.

- Li, M., Li, J. C., Vplyv rozmerových efektov na energetickú medzeru polovodičových zliučení, *Material Lett.* 60, 2006, s. 2 526 – 2 529.
- Šajgalík, P., Hnatko, M., Lenčes Z. et al., Príprava $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ nanokompozitov pre obrábacie nástroje in situ, *J. Appl. Ceram. Technol.* 3, 2006, s. 41 – 46.
- Wahrheit, D. B., Gould, P., Nanočastice: zdravotný impakt? *Materialstoday*, 2004, február, s. 32 – 35.
- Yacaman, M. J., Ascencio, J. A., Liu, H. B. et al., Štrukturálne tvary a stabilita častíc nanometrových rozmerov, *J. Vac. Sci. Technol. B* 19, 2001, s. 1 091 – 1 103.

Literatúra ku kap. 9

- Hersam, M., Nanoveda a nanotechnológia v post-hype ére, *ACS Nano* 5, 2011, s. 1-2.
- Service, R. F., Z Bellových laboratórií vyhodili hviezdneho fyzika, ktorému sa dokázalo falšovanie údajov, *Science* 298, 2002, č. 5591, s. 30 – 31.
- Spasenovic, M., Sme už na vrchole hype-cyklu grafénu? <http://www.graphenetracker.com>.

Literatúra ku kap. 10

- Drexler, E., *Tvoriace stroje*, Anchor Press, 1986.
- Ebbesen, M., Úloha humanitných a spoločenských vied vo výskume a vývoji nanotechnológie, *Nanoethics* 2, 2008, s. 1 – 13.
- Hatto, P., *Medzinárodná štandardizácia v nanotechnológiách*, Michigan State University, 2006.
- Joint Research Center, Ispra, Úvahy a definície nanomateriálov na regulačné účely, Res. Rep. 2010.

- Marchant, G. E., Sylvester, D. J., Abbott, K. W., Princípy ma-
nažmentu rizika v nanotechnológii, Nanoethics 2, 2008, s. 43
– 60.
- Rashba, E., Gamota, D., Predbežné štandardy a komercializácia
nanotechnológie, J. Nanopart. Res. 5, 2003, s. 401 – 407.
- Toumey, C., Súkromie v tieni nanotechnológie, Nanoethics 1,
2007, s. 211 – 222.

Literatúra ku kap. 11

Nobelovské publikácie o graféne

- Geim, A. K., Novoselov, K. S., Vzostup grafénu, Nature Mater. 6,
2007, s. 183-191.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V. et al., Efekt elek-
trického poľa v atomárne tenkej uhlíkovej vrstve, Science 306,
2004, 22. Oct., s. 666 – 669.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov S. V. et al., Dvojdmenzionálny
plyn bezhmotových Diracových fermiónov v graféne, Nature
438, 2005, s. 197 -200.
- Schedin, F., Geim, A. K., Morozov, S. V. et al., Detekcia jednotli-
vých molekúl plynu adsorbovaných na graféne, Nature Mat. 6,
Sept. 2007, s. 652 – 655.

Prehľadové štúdie o graféne a grafénových senzoch

- Basu, S., Bhattacharyya, P., Ostatný vývoj tuholátkových sen-
zorov plynu z grafénu a oxidu grafénu, Sens. Actuators B 173,
2012, s. 1 – 21.
- Singh, V., Joung, D., Zhai, L. et al., Grafénové materiály: minulosť, prí-
tomnosť a budúcnosť, Prog. in Mater. Sci. 56, 2011, s. 1 178–1 271.

Iné publikácie

- Berry, V., Nepriestupnosť grafénu a jej využitia, *Carbon* 62, 2013, s. 1–10.
- Blake, P., Hill, E. W., Castro, A. H. et al. Zviditeľnenie grafénu, *Appl. Phys. Lett.* 91, 2007, 063124.
- Boehm, H.-P., Setton, R., Stumpp, E., Nomenklatúra a terminológia grafitových zlúčenín zhotovených interkaláciou, *Pure and Appl. Chem.* 66, 1994, s. 1 893 – 1 901.
- Bolotin, K. I., Sikes, K. J., Jiang, Z. et al., Ultravysoká pohyblivosť elektrónov v podloženom graféne, *Sol. State Comm.* 146, 2008, s. 351 – 355.
- Bunch, J. S., Verbridge, S. S., Alden, J. S. et al., Nepriepustné atomárne membrány z grafénových plátok, *Nano Lett.* 8, 2008, s. 2458 – 2462.
- Kaiser, A. B., Skákalova, V., Elektrická vodivosť v polyméroch, uhľíkových nanorúrkach a graféne, *Chem. Soc. Rev.* 40, 2011, s. 786 – 3 801.
- Lalmi, B., Oughaddou, H., Enriquez, H. et al., Epitaxný rast plátka silicénu, *Appl. Phys. Lett.* 97, 2010, 223109.
- Lee, J.-U., Yoon, D., Cheong, H., Stanovenie Youngovho modulu grafénu pomocou Ramanovej spektroskopie, *Nano Lett.* 12, 2012, s. 4 444 – 4 448.
- Lunárny kozmický výtah, Wikipédia.
- Park, H. J., Meyer, J., Roth, S., Skákalova, V., Rast a vlastnosti niekoľkovrstvového grafénu pripraveného chemickou depozíciou z pár, *Carbon* 48, 2010, s. 1 088 – 1 094.
- Rakov, E. G., Metódy prípravy uhľíkových nanorúrok, *Russian Chem. Rev.* 69, 2000, s. 35 – 52.

Literatúra ku kap. 12.

Kapitola 12.1.

- Fulton, T. A., Dolan, G. J., Pozorovanie efektov nabíjania v malých tunelových spojoch pomocou jediného elektrónu, Phys. Rev. Lett. 59, 1987, s. 109 – 112.
- Mandal, S., Jednoelektrónový tranzistor, Int. J. of Innov. in Eng. and Technol. 2, 2013, s. 408 – 414.
- Nanotechnológia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology>.
- Natarajan, C. M., Tanner, M. G., Hadfield, R. H., Supravodivý detektor z nanodrôtu schopný zaznamenať jediný fotón: fyzika a aplikácie, Supercond. Sci. and Technol. 25, 2012, 063001.
- Smalley, R., http://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Smalley.
- Xie, F. – Q., Maul, R., Augenstein, A. et al., Atómové kvantové tranzistory spínateľné pomocou vratnej rekonštrukcie kontaktu, Nano Lett. 8, 2008, s. 4493 – 4497.
- Yonzon, C. R., Stuart, D. A., Zhang, X. et al., K pokročilým chemickým a biologickým nanosenzorom – prehľad, Talanta 67, 2005, s. 438 – 448.
- **Kapitola 12.2.**

- Fudžisaki, Y., Prehľad vynárajúcich sa pevnolátkových nevolatilných pamätí, Jap. J. Appl. Phys. 52, 2013, 040001.
- Roukes, M., Naozaj veľa miesta, Sci. Amer., Sept. 2001, s. 42 – 48.

Literatúra ku kap. 13

- Bacchini, F., Vytvára nanotechnológia nové etické problémy? Nanoethics 7, 2013, s. 107 – 119.

- Benedikt XVI., Láska v pravde, Vatikán 2009: <http://rcdow.org.uk/archbishop/news/caritas-in-veritatereleased/>.
- Bensaude-Vincent, B. Samosporiadanie, samoorganizácia: nanotechnológia a životné procesy, Nanoethics 3, 2009, s. 31 – 42.
- Castillo, del A. M. P., Prístup členských krajín EÚ k regulácii nanomateriálov; dve roviny riadenia, Nanoethics 7, 2013, s. 189 – 199.
- Dalton-Brown, S., Globálna etika a nanotechnológia: porovnanie nanoetiky v EÚ a v Číne, Nanoethics 6, 2012, s. 137 – 150.
- Etheridge, M. L., Campbell, S. A., Erdman, A. G. et al., Obraz nanomedicíny: stav skúmaných a akceptovaných nanomedicínskych produktov, Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine 9, 2013, s. 1 – 14.
- Garcia, T., Sandler, R., Spravodlivosť vo zvyšovaní ľudských schopností? Nanoethics 2, 2008, s. 277 – 287.
- Hongladarom, S., Nanotechnológia, vývoj a budhistické hodnoty, Nanoethics 3, 2009, s. 97 – 107.
- Invernizzi, N., Vízia brazílskych vedcov o nanovede a nanotechnológiách, Nanoethics 2, 2008, s. 133 – 148.
- Jacobs, J. F., Poel, van de I., Osseweijer, P., Ochranné prostriedky proti sľečnému žiareniu s nanočasticami dioxidu titánu (TiO₂): spoločenský experiment, Nanoethics 4, s. 103 – 113.
- Kearnes, M., Wynne, B., Nanotechnológia a ambivalencia. Politika entuziazmu, Nanoethics 1, 2007, s. 131 – 142.
- Naik, G., Prosíme dieťa. Blond, nepehové, bez bolestí brucha, The Wall Street J., 12. 2. 2009.
- Penzias, A., Idey a informácie, Simon&Schuster, New York 1989, 224 s., INSB 0-671-69196-1.
- Schattenburg, M. L., Od nanometrov ku gigaparsekom: úloha nanoštrúr v odhaľovaní tajomstiev vesmíru, J. Vac. Sci. Technol. B 19, 2001, s. 2 319 – 2 328.

- Thomas, C. R., George, S., Horst, A. M. et al., Nanomateriály v životnom prostredí: od materiálov k účinnému skríningu, ACS Nano 5, 2011, s. 13 – 20.
- Thompson, P. B., Opak zvyšovania ľudských schopností: nanotechnológia a problém slepého kurčaťa, Nanoethics 2, 2008, s. 305 – 316.
- Toumey, C., Sedem náboženských reakcií na nanotechnológiu, Nanoethics 5, 2011, s. 251 – 267.
- Vincent, B. B., Loeve, S., Metafory v nanomedicíne: prípad cieľného dodávania liečiv, Nanoethics 8, 2014, s. 1 – 17.

Literatúta ku kap. 14

- Autumn, K., Liang, Y. A., Hsieh, S. T. et al., Adhézna sila jedného vlasu na chodidle gekona, Nature, Vo. 405, 2000, s. 681 – 685.
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Biomimetics>
- Schmitt, X. O., Niektoré zaujímavé užitočné biomimetické premeny, 3rd Int. Biophysics Congress 1969, 297 s.
- Vávra, I., Program biomimetiky, Technická univerzita Ostrava a i. inštitúcie, oznámené osobne, 2013.

Literatúra ku kap. 15

Kapitola 15. 1.

- Benkovičova, M., Vegsö, K., Šiffalovič, P., et al., Príprava zlatých nanočastíc pre plazmonické využitia, Thin Solid Films 543, 2013, s. 138 – 141.

- Lu, X., Rycenga, M., Skrabalek, S. E. et al., Chemická syntéza nových plazmonických nanočastíc, *Ann. Review of Phys. Chem.* 60, 2009, s. 167 – 192.
- Wu, W., He, Q., Jiang, C., Magnetické častice oxidu železa: syntéza a povrchová funkcionalizácia, *Nanoscale Res. Lett.* 3, 2008, s. 397 – 415.
- Chitu, L., Čuškin, Y., Luby, Š., et al., Štruktúra a samousporiadanie Co nanočastíc, *Mater. Sci. Engn. C* 27, 2007, s. 23 – 28.
- Chitu, L., Jergel, M., Majková, E., et al., Štruktúra a magnetické vlastnosti CoFe_2O_4 a Fe_3O_4 nanočastíc, *Mater. Sci. Engn. C* 27, 2007, s. 1 415 – 1 417.
- Chitu, L., Šiffalovič, P., Majková, E., et al., Spôsob výroby nanočasticových monovrstiev a multivrstiev, Patent č. 288234 z 8. 10. 2014, Úrad priemyselného vlastníctva SR.
- Šiffalovič, P., Chitu, L., Majková, E., et al., Kinetika preusporiadania nanočastíc spôsobená UV fotolýzou surfaktantu, *Langmuir* 26, 2010, s. 5 451 – 5 455.

Kapitola 15. 2.

- Capone, S., Manera, M. G., Taurino, A., et al., $\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanočasticové multivrstvy nanosené technikou Langmuira-Blodgettovej pre senzory plynov, *Langmuir* 30, 2014, s. 1 190 – 1 197.
- Ivančo, J., Luby, Š., Jergel, M., et al., Sensory oxidu dusičitého a acetónu z oxidových nanočastíc, *Sensor Lett.* 11, 2013, s. 2 322 – 2 326.
- Luby, Š., Chitu, L., Jergel, M., et al., Súbory oxidových nanočastíc pre senzory plynov CO a NO_2 , *Vacuum* 86, 2012, 590 – 593.
- Seiyama, T., Kato, A., Fujiishi, K. et al., Nový detektor plynov používajúci polovodičovú tenkú vrstvu, *Anal. Chem.* 34, 1962, s. 502 – 1 503.

- Tagučí, N., Japonský patent 45-3820, 1961.
- Wetchakun, K., Samerjai, T., Tamaekong, N. et al., Polovodičové oxidy kovov ako senzory environmentálne nebezpečných kovov, *Sensors and Actuators B* 160, 2011, s. 580 – 591

Kapitola 15. 3.

- Čen, X., Yhao, C., Rothberg, L. et al., Zlepšenie objemového heteropriechodu organických fotovoltických súčiastok pomocou plazmónov, *Appl. Phys. Lett.* 93, 2008, 123302.
- Schaad, D. M., Feng, B., Yu, E. T., Zvýšená optická absorpcia v polovodiči pomocou povrchových plazmónových excitácií v kovových nanočasticiach, *Appl. Phys. Lett.* 86, 2005, 063106.
- Schuller, J. A., Barnard, E. S., Cai, W. et al., Plazmonika pre extrémnu koncentráciu a manipuláciu svetla, *Nature Mat.* 9, 2010, s. 193 – 204.
- Shockley, W., Queisser, H. J., Limit účinnosti slnečných článkov s prechodom PN, *J. Appl. Phys.* 32, 1961, s. 510 – 519.
- Stuart, H. R., Hall, D. G., Rozmerový efekt ostrovčekov v nanočasticami zlepšených detektoroch, *Appl. Phys. Lett.* 73, 1998, s. 3 815 – 3 822.
- Vojtko, A., Jergel, M., Nádaždy, V. et al., Organické plazmonické slnečné články na ITO elektróde bez dierovej transportnej vrstvy, *Phys. Stat. Sol. A*, 2014, A 212, 2015, 867 – 876.

Literatúra ku kap. 16

- Kozhukharov, V., Machkova, M., Nanomateriály a nanotechnológia: európske iniciatívy, stav a stratégia, *J. Chem. Tech. Mat.* 48, 2013, s. 3 – 11.
- Leydesdorff, L., Rafols, I., Globálna mapa vedy založená na kategorizácii ISI, *JASIST* 60, 2009, s. 348 – 362.

Literatúra k Portrétom

- Abrahams, M., Ig Nobelove ceny 2, Dutton, New York 2004, 243 s., ISBN 0-525-94912-7.
- Feldman, B., Nobelova cena, Arcade Publ., New York 2000, 489 s., IKISBN 1-55970-537-X.
- Luby, Š, Anatómia jednej Nobelovej ceny, Klaus von Klitzing. Moji intelektuáli, VEDA, vydavateľstvo SAV, Bratislava 2003, ISBN 80-224-0767-4, s. 129 – 133.

Obr. 38 Listy kapucínky sú príkladom uplatnenia nanotechnológií v prírode.

Udržiavajú sa čisté pomocou lotosového efektu, pri ktorom sa kvapky vody odpudzujú od povrchu listu.



Populárne o vede a technike

