

Avots: Drensmine

Kas ir nanotehnoloģija

Kurts Švarcs

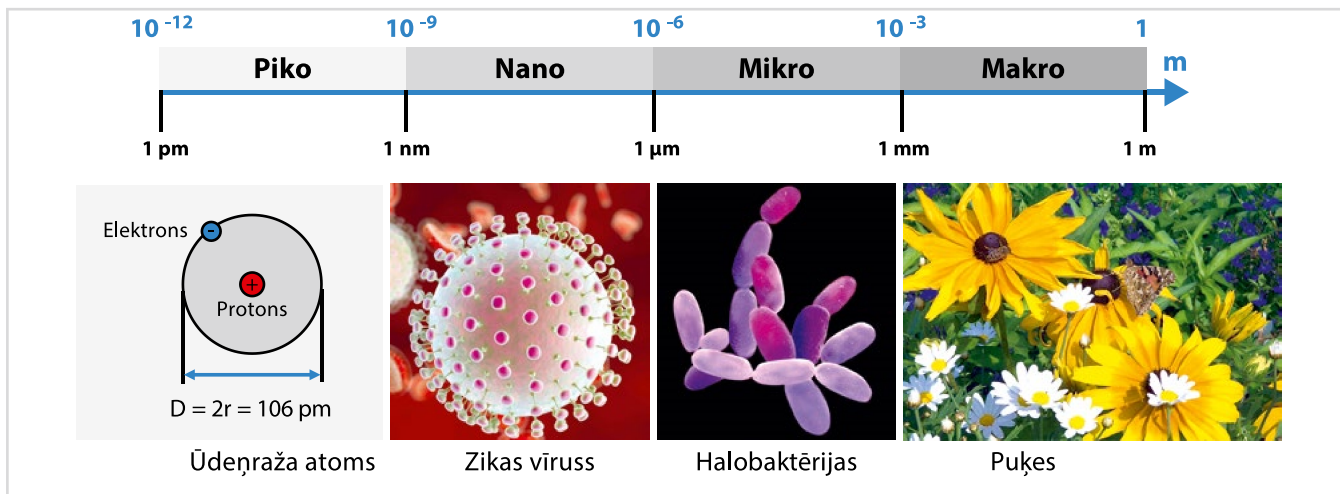
Nanotehnoloģija ir zinātnes un tehnikas nozare, kuras pārstāvji iegūst un izmanto nanostruktūras no dažādiem materiāliem (metāliem, pusvadītājiem, dielektriķiem, organiskiem un bioloģiskiem materiāliem), tai skaitā ģenētisko DNS molekulu struktūras. Šodien nanotehnoloģiju izmanto visās tehnikas nozarēs, bioloģijā un medicīnā [1].

Nanotehnoloģija ikdienā

Mūsu ikdienas pieredze ir makroskopiska. Cilvēka acs 25 centimetru attālumā (šādā attālumā mēs lasām) var izšķirt milimetra desmitdaļas. Sešpadsmitā gadsimta beigās holandiešu brillu meistari konstruēja pirmo mikroskopu ar izšķirtspēju ap vienu mikronu ($1\mu\text{m} = 0,001\text{ mm}$), tā paverot jaunas iespējas mikropasaulē, it īpaši bioloģijā un medicīnā. Divdesmitajā gadsimtā elektronu mikroskopija (izšķirtspēja ap

nanometru, $1\text{ nm} = 0,001\mu\text{m} = \text{miljonā daļa milimetra}$) pavēra ieskatu vīrusu un makromolekulu pasaulē (1. att.).

Nanostruktūras ir materiālu daļiņas ar izmēriem no 1 līdz 100 nanometriem. Zelta (Au) nanodaļiņā, lodītē ar diametru 2 nm ($D = 2R$), ietilpst aptuveni 300 zelta atomi. Šādu nanodaļiņu īpašības, saskaņā ar kvantu fizikas likumsakarībām, atšķiras no tā paša materiāla makroskopiskām īpašībām. Kā piemēru var minēt zelta (Au) nanodaļiņas, kuras izmanto ķīmisko procesu katalizē. Brīnumainā kārtā viduslaiku mākslinieki prata



1. attēls. Šodienas ieskaits atomu, vīrusu un baktēriju pasaulē: ūdeņraža atoma izmēri (106 pm) ir uz labāko elektronu mikroskopu izšķirtspējas robežas; Zikas vīruss (ap 10 nm) izraisa Zikas drudzi un ir bīstams sievietēm grūtniecības periodā; halobaktērijas ir viensūnu organismi (šūnas izmēri ap 5 μm). Nanodaļiņu izmēri tiek definēti no 1 līdz 100 nm

izgatavot zelta suspensijas ar dažāda izmēra zelta nano daļiņām un iegūt dažādas toņu nokrāsas baznīcas stikla gleznojumos. Krāsu efekts vitražās saistās ar Saules gaismas absorbciju un izkliedi, un abi faktori ir atkarīgi no izmantotā materiāla daļiņu izmēriem. Šo nanoefektu stikla glezniecībā nesēn atklāja franču fiziķi Parīzes Dievmātes katedrāles vitražās (7. att.).

Viens no nano daļiņu ķīmiskās aktivitātes faktoriem ir virsmas laukuma attiecība pret tilpumu, kas sfēriskām (lodveida) daļiņām ir apgriezti proporcionāla daļiņu rādiusam ($\sim 1/R$); attiecība palielinās pie maziem izmēriem. Nano daļiņu ieguvei ir izstrādātas daudzas metodes, kuras saistās ar diviem principiāliem paņēmieniem: 1) makroskopiskā materiāla sasmalcināšana; 2) atomu vai molekulu klāsteru ieguve [1]. Monodispersu nano daļiņu ieguvē otrai metodei ir būtiskas priekšrocības.

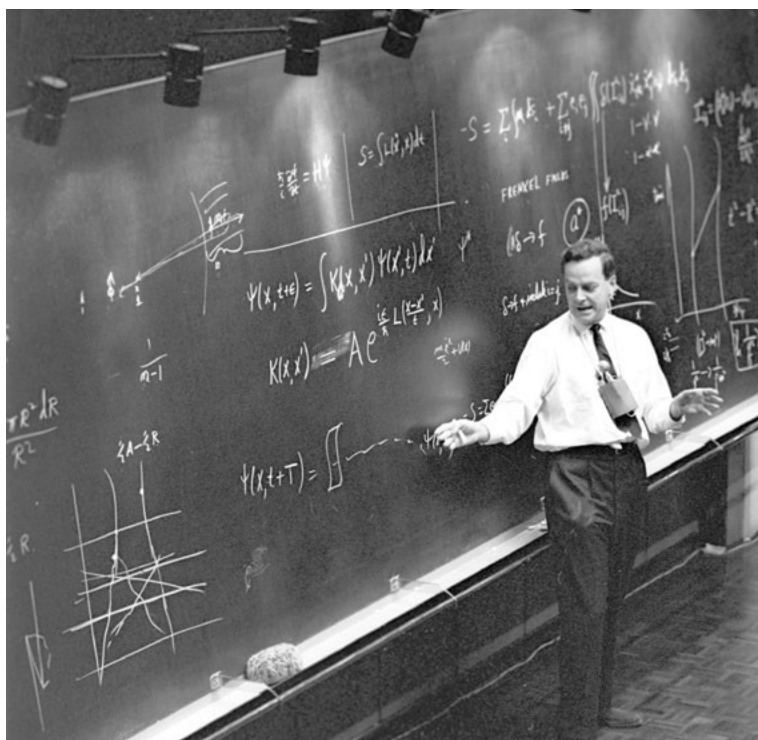
Mēs bieži pat nepamanām, ka nanotehnoloģija jau iekļuvusi mūsu ikdienā. Spilgts piemērs tam ir *iPhone*, kurā visi datoru un mikroprocesoru elementi ir nanostruktūras un tikai fotokamerā fotodetektori (CCD sensori) ir mikrostruktūras atbilstoši redzamās gaismas viļņu garumam (zaļajai gaismai $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$, 3. att.).

Šodien dažādie nanomateriāli tiek producēti rūpnieciski un brīvi pieejami tālākiem tehniskiem un zinātniskiem pielietojumiem. Produkta cena ir atkarīga no materiāla, tā tīrības pakāpes un nano daļiņu izmēriem. Daži piemēri no Kanādas firmas *M K Impex Corporation*: viens grams zelta (Au) nano daļiņu ar izmēriem 90 nm un tīrības pakāpi 99,99% maksā 378 €; viens grams 99,5% alumīnija oksīda (Al_2O_3) nano daļiņu pulvera ar izmēriem 78 nm maksā tikai 9 €.

Oglekļa atomi: no sodrējiem un dimanta līdz fullerēnam un grafēnam

Ogleklis un oglekļa savienojumiem ir īpaša loma nanotehnoloģijā. Ogleklis ir polimorfs materiāls, kas dabā sastopams kā dimants (dārgakmens un cietākais minerāls), grafīts un akmeņogles (koku un augu pārakmeņojums). Jau trešajā gadu tūkstoši p.m.ē. Senajā Ēģiptē un Senajā Ķīnā oglekļa sadegšanas produktus – sodrējus izmantoja augstas kvalitātes tintes un tušas izgatavošanai. Sodrēji rodas koka un sveķu sadegšanas rezultātā, un tie sastāv no oglekļa atomu nano daļiņām ar izmēriem no 10 līdz 100 nanometriem. Nezinot sodrēju atomāro struktūru, senie ēģiptieši gatavoja augstvērtīgu tušu (sodrēju emulsiju), ar kuras palīdzību tapušie teksti un zīmējumi uz papirusa gandrīz bez izmaiņām saglabājušies tūkstošiem gadu [2].

Sodrēju rūpnieciskā ražošana sākās deviņpadsimtā gadsimta beigās, kad sodrējus izmantoja kā pildvielas gumijas rūpniecībā. Divdesmitajā gadsimtā sodrēji (angliski *carbon black*) kļuva par neaizvietojamu sastāvdaļu gumijas autoriepās. Ogleklis palielina autoriepu izturību, un mūsdienās šīm vajadzībām izmanto ap 95% no sodrēju produkcijas, kas pasaules mērogā veido ap desmit miljoniem tonnu.

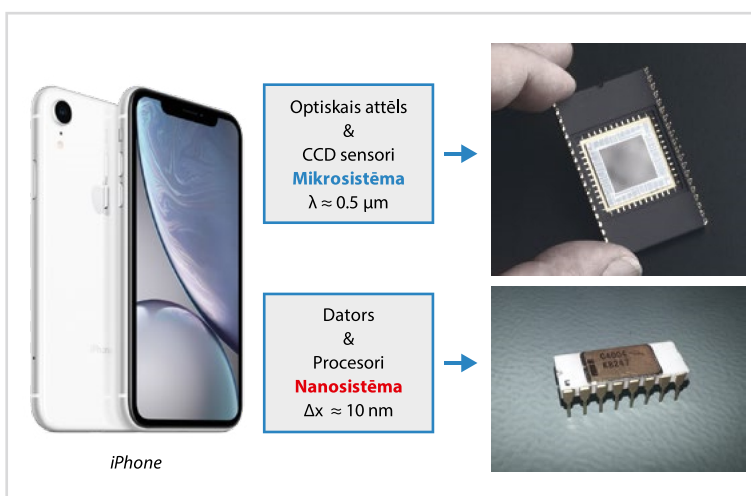


Avots: CERN

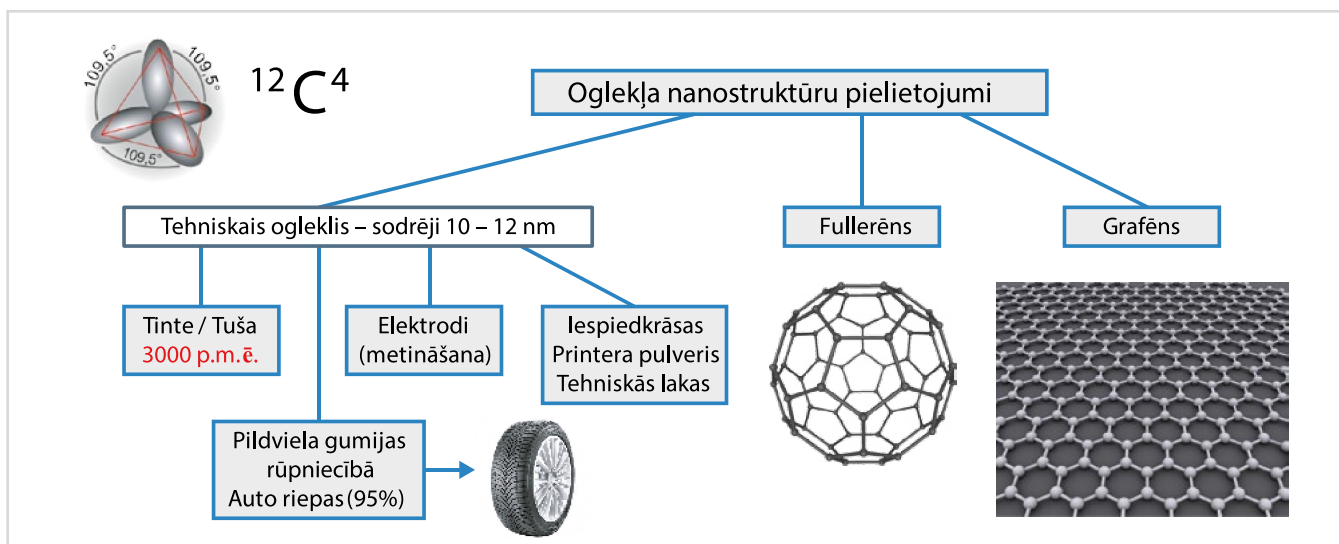
2. attēls. Viens no pirmajiem vizionāriem nanotehnikas jomā bija ievērojamais amerikāņu fiziķis Ričards Fainmens (*Richard Phillips Feynman*, 1918 – 1988), kurš 1959. gadā slavenajā lekcijā Kalifornijas Tehnoloģiskajā institūtā analizēja nanotehnikas perspektīvas nākotnē.

Attēlā: Ričards Fainmens uzstājas ar priekšlasījumu Eiropas Kodolpētījumu organizācijā (CERN) 1965. gada decembrī, neilgi pēc Nobela prēmijas saņemšanas

1985. gadā amerikāņu un angļu fiziķi Roberts Kērls (*Robert Floyd Curl*, dzimis 1957), Harolds Kroto (*Harold Walter Kroto*, 1939–2016) un Ričards Smolijs (*Richard Smalley*, 1943–2005) ar masspektroskopiju oglekļa tvaikos atklāja oglekļa makromolekulu (fullerēnu) ar 60 oglekļa atomiem C_{60} (atomsvars 720), kurai ir ikosaedra (divdesmitskalda) struktūra (4. att.). Vēlāk atklāja arī fullerēna molekulas ar lielāku atomu skaitu (C_{70} , C_{76} , C_{84} u.c.). Par šo atklājumu autori 1996. gadā saņēma Nobela prēmiju ķīmijā.



3. attēls. *iPhone* dators un procesori ir nanostruktūras, un tikai fotokamerā attēla detektori (*Charged Coupled Device* – CCD sensori) ir mikrosistēmas atbilstoši redzamās gaismas viļņu garumam

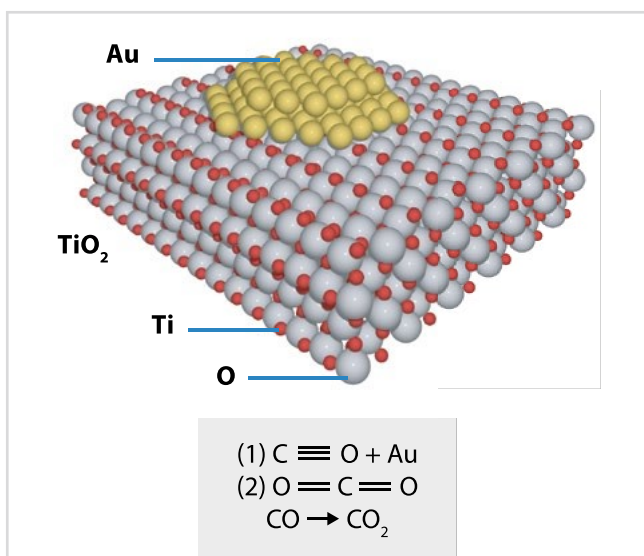


4. attēls. Oglekļa nanodaļiņas plaši izmanto nanotehnoloģijā: (1) tehnisko oglekli – sodrējus; (2) fullerēnu – lodveida C_{60} molekulas; (3) grafēnu ar monoatoma heksagonālo divdimensionālo režģi

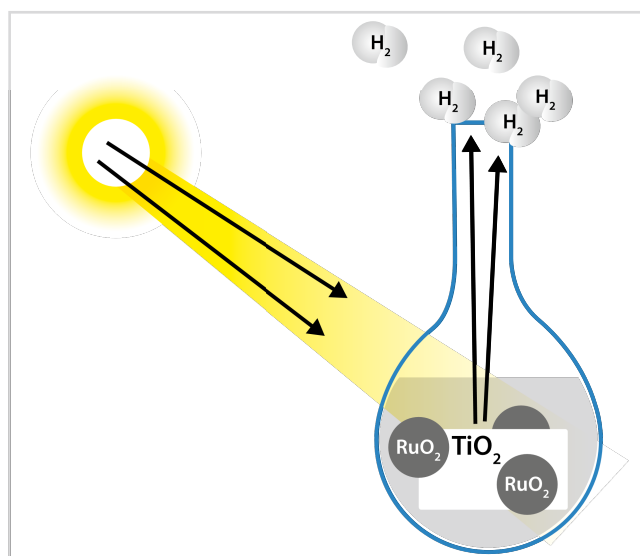
Nosaukums "fullerēns" saistās ar amerikāņu zinātnieku Ričardu Bakminsteru Fuleru (*Richard Buckminster Fuller*, 1895–1983), kurš līdzīgas ģeometriskas struktūras aprakstījis ģeodēzijā. Fullerēni tiek iegūti kondensācijas procesā no gāzu fāzes. Izstrādātas speciālas metodes tīra C_{60} fullerēna kristālu ieguvei (kubiska simetrija, režģu konstante 1,415 nm) ar aizliegto zonu $E_g \approx 1,6$ eV, kas nosaka optisko transmisiju infrasarkanā spektra diapazonā. Fullerēni var veidot arī polimērus un nanocaurulītes no oglekļa atomiem (C) un fullerēna (C_{60}). Šādas caurulītes ar diametru no viena līdz dažiem desmitiem nanometru tiek plaši izmantotas nanotehnoloģijā. Fullerēnu C_{60} izmanto saules baterijās. Fullerēns ar sārnu metālu piemaisījumiem ir supravadītājs ($RbCs_2C_{60}$ pie kritiskās temperatūras $T_{kr} = 33$ K). Fullerēna pētījumi pagājušā gadsimta 90. gados tika uzsākti arī Latvijā, Rīgas Tehniskās universitātes Ķīmijas fakultātē [3], un vēlāk paplašināti Latvijas Universitātes Cietvielu

fizikas institūtā, aplūkojot fullerēna fotopolimerizāciju un mehāniskās īpašības (sk. [4]).

Taču vēl lielāku sensāciju izraisīja oglekļa atomu monoslāņa ar sešstūrīgo oglekļa divdimensionālo režģi – grafēna atklāšana (4. att.). Grafēnu 2004. gadā atklāja krievu izcelsmes britu fiziķi no Mančestras Universitātes Andrejs Geims (*Андрей Константинович Гейм*, dzimis 1958) un Konstantīns Novosjolovs (*Константин Сергеевич Новоселев*, dzimis 1974). Grafēnam piemīt metāliska elektriskā vadītspēja (specifiskā pretestība $31 \Omega m$) un augsta siltumvadītspēja ($5000 W/(mK)$). Grafēna monoatomu slānis ir materiāls ar vislielāko stiepes izturību ($125 GPa$) un elastības modulu $E_{el} = 1020 GPa$ lielāku nekā dimantam ($E_{el} = 800 GPa$)! Atklājuma autori 2010. gadā saņēma Nobela prēmiju ķīmijā. Reti kāds atklājums tik ātri saņem augstāko atziņību zinātnes pasaulē. Grafēna neparastās īpašības paver jaunas iespējas pusvadītāju tehnikā un optoelektronikā.



5. attēls. Zelta (Au) nanodaļiņas oglekļa monoksīda katalizē: Au daļiņām, kuru izmēri ir mazāki par 5 nanometriem, piemīt simtkārt lielāka katalītiska aktivitāte nekā makroskopiskajam zeltam. Au nanodaļiņas uz titāna oksīda monokristāla (TiO_2) efektīvi pārvērs oglekļa monoksīdu (CO) oglekļa oksīdā (CO_2)



6. attēls. Ūdeņraža iegūšanai izstrādāta jauna nanokatalītiska reakcija ar rutēnija nanodaļiņām uz titāna oksīda (TiO_2) kristāla: rutēnija nanodaļiņas adsorbē ūdens radikāļus un ultravioletais starojums veido ūdeņraža molekulas (H_2) [6]

Rīgas Politehniskā augstskola, Vilhelms Ostvalds un nanokatalizatori

Rīgas Politehniskā augstskola (*Polytechnikum zu Riga*) ar vācu profesoru sastāvu pastāvēja no 1862. līdz 1896. gadam, kad augstskola tika pārveidota par Rīgas Politehnisko institūtu ar obligātu darbību krievu valodā. Rīgas Politehniskajā augstskolā pamatā darbojās ķīmijas, inženierzinātņu, arhitektūras un lauksaimniecības nodaļas, kas laika gaitā sekmēja Latvijas Universitātes, Rīgas Tehniskās universitātes un Jelgavas Lauksaimniecības akadēmijas dibināšanu.

Rīgas Politehniskajā augstskolā laikā no 1881. līdz 1887. gadam strādāja Rīgā dzimušais vācbaltiešu profesors Vilhelms Ostvalds (*Wilhelm Ostwald*, 1853–1932). Izcilais zinātnieks, fizikālās ķīmijas un katalīzes pamatlicējs, 1909. gadā saņēma Nobela prēmiju ķīmijā "Par darbiem katalīzē un par ķīmisko reakciju līdzsvara un reakcijas ātruma fundamentāliem pētījumiem". Vilhelms Ostvalds ir vienīgais Latvijā dzimušais Nobela prēmijas laureāts (sk. [5]). Ostvalds 1884. gadā Rīgā izdeva monogrāfiju "Vispārīgās ķīmijas mācību grāmata" (*Lehrbuch der Allgemeinen Chemie*), kas pieredzēja vairākus izdevumus un sekmēja ķīmijas attīstību Eiropā. Ostvalds precīzi definēja katalīzes procesu un katalizatoru: "Katalizators ir materiāls, kas palielina ķīmiskās reakcijas ātrumu bez paša materiāla (t.i. katalizatora) izmaiņām." 1902. gadā Ostvalds saņēma patentu saistībā ar katalītiskas slāpekļskābes (HNO_3) ražošanu, kas bija viens no pirmajiem ķīmiskās rūpniecības ražošanas procesiem.

Divdesmitajā gadsimtā ķīmijā parādījās nanokatalizatori (5. att.). Nanokatalīzē izmanto daļiņas, kuru izmēri ir no diviem līdz pieciem nanometriem un kuras satur ap simt atomu. Pateicoties augstākai virsmas aktivitātei, nanodaļiņu katalītiskā aktivitāte ir desmit līdz simt reizi lielāka nekā attiecīgam makroskopiskam materiālam. Oglekļa monoksīda (CO) oksidācijas katalīzei izmanto zelta (Au) nanodaļiņas, kuru izmēri



7. attēls. Krāsu efekts vitrāžās saistās ar Saules gaismas absorbciju un izkliedi, un abi faktori ir atkarīgi no izmantotā materiāla daļiņu izmēriem. Šo nanoefektu stikla glezniecībā nesēn atklāja franču fiziķi Parīzes Dievmātes katedrāles vitrāžās

nepārsniedz piecus nanometrus ($2 R \leq 5 \text{ nm}$). Nanodaļiņas ar speciālu paņēmieni uzklāj uz metāla oksīda monokristāla (TiO_2). Divslāņu Au nanodaļiņā ar diametru 2 nm ir ap 75 zelta atomu, un šīs daļiņas aktīvi oksidē oglekļa monoksīdu skābekļa molekulu klātbūtnē un pārvērš to ogļskābajā gāzē ($\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$, 5. att.). Oglekļa monoksīds ir bezkrāsains, indīgs, degtspējīga gāze bez garšas un smaržas, nedaudz vieglāka par gaisu. CO rodas dažādos sadegšanas procesos no automobiļu izplūdes gāzēm līdz rūpnieciskai ražošanai. Ieelpotais CO asinīs saista hemoglobīnu ar letālām sekām. Tāpēc oglekļa monoksīda katalizatori tiek izmantoti daudzos ražošanas procesos, lai saistītu šo gāzi.

Nesen starptautiska zinātnieku grupa atklāja jaunu nanokatalizatoru ūdeņraža ieguvei [6]. Ūdeņradis (H_2) ir perspektīvs materiāls automobiļiem ar dzinējiem, kuros ūdeņraža oksidācijas reakcijās rodas ūdens tvaiki (atšķirībā no benzīna motoriem, tie ir nekaitīgi videi). Šādi ūdeņraža dzinēji tiek projektēti visos vadošajos autoindustrijas koncernos. Jaunizstrādātie nanokatalizatori izmanto fotoķīmiskās reakcijas, kuras sekmē katalītisko galaproduktu iznākumu. Šāda katalītiskā reakcija ilustrēta 6. attēlā. Nanokatalizators ir rutēnija (Ru) nanodaļiņas uz titāna oksīda monokristāla (TiO_2). Rutēnija nanodaļiņas uz TiO_2 monokristāla iegūst ar rutēnija oksīda piemaisījumiem (RuO_2). Rutēnija nanokatalizators nodrošina ūdens radikāļu adsorbpciju uz katalizatora virsmas, un ūdeņraža molekulas (H_2) – katalīzes galaprodukta veidojas ultravioletā starojuma izraisītās fotoķīmiskās reakcijas rezultātā. Reakcijas kvantu iznākums (molekulu skaits uz absorbēto gaismas kvantu skaitu) ir ap 3%, kas atbilst labāko katalizatoru parametriem.

Nanotehnoloģija ap mums

Nanotehnoloģiju šodien izmanto visās tautsaimniecības nozarēs – no pārtikas rūpniecības līdz metalurģijai.

Īpaša loma nanotehnoloģijai ir pusvadītāju tehnikā (jauni tranzistori, fotosensori) un informācijas apstrādē. Fullerēni tiek izmantoti saules baterijās, bet grafiēni ir perspektīvi optoelektronikā un datoru atmiņu sistēmās. Nanodaļiņas sāk izmantot medicīnā, kur pirmie eksperimenti paver jaunas iespējas cīņā pret ļaundabīgiem audzējiem. Arī Latvijas fiziķi aktīvi darbojas nanotehnoloģijas jomā, par ko liecina, piemēram, J. Šuņina *Springer* izdevniecībā publicētā monogrāfija [1] un starptautiskās konferences "Funkcionālie materiāli un nanotehnoloģijas", ko regulāri organizē Latvijas Universitātes Cietvielu Fizikas institūts (orgkomitejas priekšsēdētājs akadēmiķis Andris Šternbergs). **E&P**

Literatūra

- [1] Y. Shunin, S. Belluci, A. Gruodis, T. Lobanova-Shunina, *Non Regular Nanosystems*, Springer International Publishing AG 2018.
- [2] "History of Ink and Pen Writing with Ink", www.historyofpencils.com.
- [3] O. Neilands et al., New route for [60] Fullerene functionalisation in [4+2] Cycloaddition reaction using Indene, *Tetrahedron Letters*, Elsevier, <http://www.elsevier.com/locate/tetlet>, 2015.
- [4] I. Manika, J. Maniks, R. Pokulis, J. Kalnacs. Photoinduced Hardening and Reduction of Dislocation Mobility in C60 Single Crystals, *Nanotubes and Nanostructures* 10(1), 69-80, 2002.
- [5] J. Stradiņš, Vienīgais Nobela prēmijas laureāts no Latvijas, <http://www.lza.lv/ZV/zv031500.htm>
- [6] <http://www.chemie.de/news/161833>