

NANOTEHNOLOOGIA JA TERAVIKMIKROSKOOPIA

Ants Lõhmus, Ilmar Kink

Tartu Ülikooli Füüsika Instituut

NANOTEHNOLOOGIAST ÜLDISELT

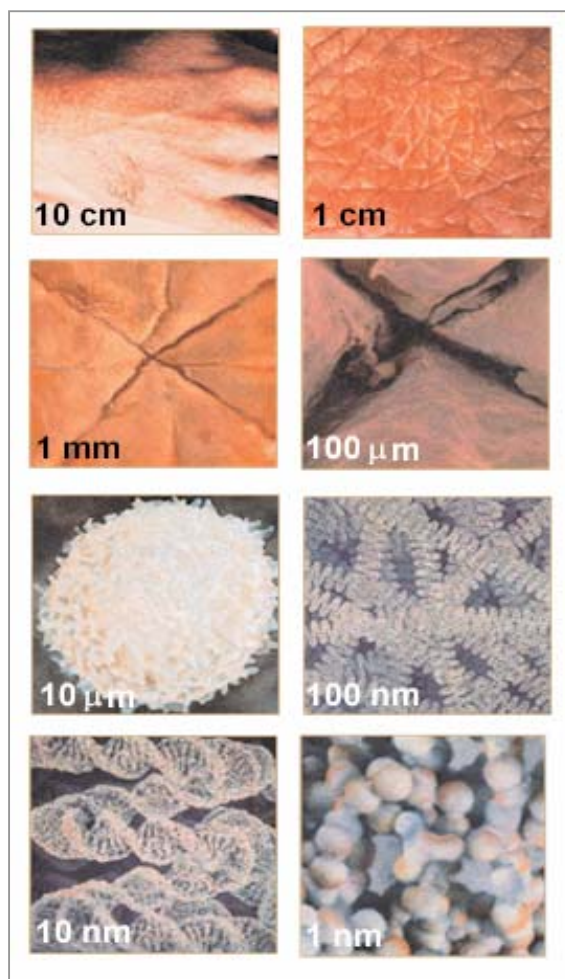
Nanotehnoloogia on multidistsiplinaarne tehnoloogia ja fundamentaalteaduste piirimaile olev uurimisvaldkond, mida peetakse peamiseks tuleviku kõrgtehnoloogilise tööstuse aluseks. Nagu nimigi viitab, tegeleb nanotehnoloogia objektide ja nähtustega nanomeetrilises skaalas (10^{-9} m, joonis 1) alates umbes 100 nanomeetrist ja lõpetades üksikute aatomite mõõtmetega. Nanotehnoloogia põhieesmärgiks võib lugeda püüdu üksikute aatomite või molekulide (või ka nende väikearvuliste kogumite) manipuleerimisega saavutada lõppkokkuvõttes makroskoopilises skaalas kasutatav efekt või tulemus. Nanotehnoloogiat püütakse rakendada väga erinevates valdkondades alates biotehnoloogiast ja meditsiinist lõpetades elektroonika ja masinaehitusega ja seetõttu on valdkonna konkreetne ja selgepiiriline kirjeldamine üsnagi keeruline ja definitsioon jääb paratamatult pisut laialivalguvaks.

NANOTEHNOLOOGIA ARENGU PÕHJUSED

Kõrgtehnoloogiline areng on viimasel ajal väga tiheidalt seotud olnud mikro- ja nanomaailma nähtuste ja objektidega. Eriti drastiliseks näiteks, kus viimasel ajal on edu saavutatud põhiliselt seadmete töötavate komponentide mõõtmete vähendamise teel, on kahtlemata elektroonikatööstus ja põhjused on ilmselged. Elektroonika- ja andmetööstuses peetaksegi nanotehnoloogia rakendamise lähimateks eesmärkideks veelgi väiksemaid transistore, mis toovad endaga kaasa veelgi suuremaid protsessorite kiiruseid, veelgi tihedamat infosalvestust, veelgi väiksemaid arvuteid jne. Aga lisaks sellele pole välistatud ka täiesti uutel põhimõtetel töötavad seadmed, sest nanomeetriliste mõõtmete juures hakkavad ilmnevad uued nähtused, nagu näiteks kvantefektid.

Teistes valdkondades on üldistamine pisut keerulisem, aga ühiseks jooneks võib lugeda püüdu arenda ressurside vähendamise ja protsesside efektiivsuse tõstmise suunas. On ju selge, et palju kasuli-

kum on näiteks viia ravim otse haige raku juurde kui jääda lootma statistilisele tõenäosusele ja kogu organismi ravimiga üle ujutada. Aga just selliseid nano-



Joonis 1.

Nanomeeter *zoomituna* inimese käe sisse.

meetrilisi ravimikandjaid või markereid peetakse üheks nanotehnoloogia rakenduseks meditsiinis. Sarnaseid kujukaid näiteid võib rida mis tuua väga erinevatelt elualadelt.

Üldistades võib öelda, et nanotehnoloogia võtmesõnadeks on kiirus, efektiivsus ja ressursisäästlikkus.

PEAMISED PROBLEEMID

Nanotehnoloogia kiire tööstusliku rakendamise põhitakistuseks on nanostruktuuride valmistamise odava tehnoloogia puudumine. Käesoleval ajal uuritakse väga mitmeid erinevaid potentsiaalseid mooduseid, aga ühist seisukohta, milline neist tulevikus prevaleerima hakkab, veel ei ole. Praegu elektroonikatööstuses peamiseks tehnoloogiaks oleva fotolito graafia rakendamisel on fundamentaalsed takistused, sest valguse lainepikkus jääb suuremaks kui objektide mõõtmed. Lahendus oleks kas elektron- või röntgenlito graafia kasutuselevõtt ja kogu maailmas käib aktiivne sellesuunaline uurimistöö, kuid siiani on need meetodid veel liiga kulukad otseses tootmistegevuses rakendamiseks. Aga kaugeltki mitte kõik ei pea ülalmainitud meetodeid perspektiivseteks ja uurimistöö käib väga mitmes erinevas suunas.

NANOTEHNOLOOGIA JA MAJANDUS

Probleemidest hoolimata on nanotehnoloogia kiiresti laienev valdkond, mis tungib järjest enam ka tööstusesse. Uuringud on näidanud, et just nanotehnoloogiat peetakse peamiseks majanduse mõjutajaks tulevikus. Seda kinnitab ka fakt, et kulutused nanotehnoloogiale on viimaste aastate jooksul kasvanud kogu maailmas. USA valitsus alustas spetsiaalset programmi (*National Nanotechnology Initiative*), mille ainus eesmärk on toetada ja arendada nanotehnoloogiat. Antud programmi eelarve on võrreldes aastaga 2000 kasvanud 56%, s.o. 422 miljonit dollarit ning kasvab samas tempos, jõudes järgmiseks 2003. aastaks, 710 miljonini. Euroopa Liidu liikmesmaades on näiteks valitsuse toetus nanotehnoloogiale aastatel 1997–2000 suurenenud üle 40% – 130 miljonilt eurolt aastal 1997, 184 miljoni euronil aastal 2000.

Ka Kaug-Idas on kulutused nanotehnoloogiale muljetavaldavad. Kõige kiirem on kasvutempo Jaapanis: aastal 1998 kulutas valitsus nanotehnoloogiale 113 miljonit dollarit, 2001. aastal oli summa 466 miljonit ning 2002. aastal 650 miljonit dollarit.

Kuna nanotehnoloogia piirid on muutunud hägusemaks, ei pruugi antud statistika reaalsust täpselt kajastada. Mitmeid teadusuuringute valdkondi (näiteks biotehnoloogiat) peaks samuti nanotehnoloogia hulka arvestama, kuna need on muutunud multidistsiplinaarseks. Seega võivad näitajad veelgi suuremad olla.

Mitmetes riikides on käivitatud erinevad nanotehnoloogia tugiprogrammid (suurimad USA-s ning Jaapanis), mis toetavad nii ettevõtteid kui teadusasutusi. Nanotehnoloogia firmade vastu tunnevad varasemast rohkem huvi riskikapitalifirmad. Mitmed maailma suuremad ettevõtted jagavad oma pikaajalistest uurimis- ja arendustegevuse eelarvest kuni poole nanotehnoloogiale. Peamised suuretted, kes on 2000. aastal investeerinud nanotehnoloogiasse, on IBM, Motorola, Hewlett Packard, Hitachi, Dow Chemical ja 3M.

USA *National Science Foundation* ennustab, et nanotehnoloogia toodete turg jõuab aastaks 2015 triljoni dollarini. Samas võib innovatsioonikiirus ning nanotehnoloogia areng tugevalt varieeruda erinevates tööstusharudes. Näiteks nanomaterjalidele ennustatakse kõige kiiremat kommertsialiseerumist.

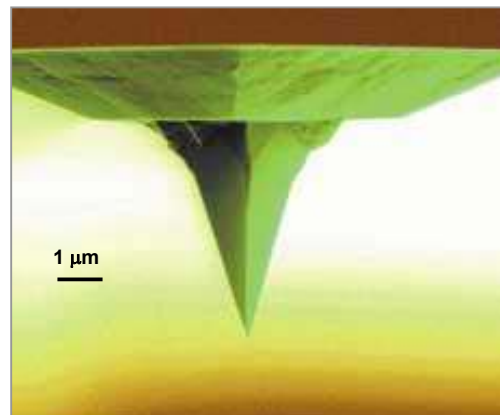
Seega ennustatakse nanotehnoloogia toodete turule hüppelist kasvu. Käesoleval hetkel on kogutulu antud tööstuses 45,5 miljonit USA dollarit, kuid aastaks 2005 ennustatakse nanotööstuse tuludeks 225,5 miljonit USA dollarit. Nanotehnoloogia toodete kasutajate ring laieneb järjest, kuna nanotoodete valmistamine muutub lihtsamaks, kiiremaks ja odavamaks.

NANOTEADUS

Kui eespool sai mainitud, et nanotehnoloogia laialatuslikuks rakendamiseks majandustegevuses käib alles ettevalmistus, siis nanoteadus – teadus nanoobjektide omadusest, nanomaailma protsessidest ja kuidas seda kõike kasutada saaks – on viimasel ajal jõudsalt arenenud. Seda eeskätt tänu sellele, et on välja arendatud piisavalt tõhusad vahendid ja meetodid nanostruktuuride uurimiseks. Just nanotehnoloogia rakenduste leidmisel ja nanoteaduses saab Eesti teadus edukalt kaasa rääkida, sest vajaminev aparatuur ei ole astronoomiliselt kallis ning uuritavad nähtused ja objektid on ülimalt mitmekesised ja laialatuslikud, mis tähendab et ka “väiksematele tegijatele” leidub oma “nišš”.

Üheks olulisemaks “nanoinstrumentiks” on teravikmikroskoop (*Scanning Probe Microscope*). Teravik-

mikroskoopia põhiolemus seisneb selles, et mini-atuurne ja üliterav teravik (joonis 2) “tunnetab” uuritavat pinda ja edastab oma seisundi muutuse kontrollaparatuuri kaudu arvutile, kus omakorda on võimalik saadud andmetest vajalik informatsioon välja filtreerida. Tavalise mikroskoobiga seob teravikmikroskoopi ainult nimi, kõik ülejäänud alates ehitusest ja lõpetades tööprintsipidega on täiesti fundamentaalselt erinev. Kõige tavalisemalt kasutatakse teravikmikroskoopi pinna profiili kujutamiseks, aga võimalikud kasutusalaad on palju laiemad, milledest märkimisväärseim on võimalus teravikuga kontrollitaval pinnal üksikuid aatomeid või nende väikeseid kogumeid ruumiliselt liigutada, neid näiteks nanostruktuuride “ehitusblokkidena” kasutades.



Joonis 2.
Teravikmikroskoobi teravik.

NANOTEHNOLOOGIA JA EESTI

Laiemas mõttes nanotehnoloogiaga tegelejaid on Eestis mitmetes valdkondades, alates geenitehnoloogidest (peamiselt TÜ allüksustes ja ka mõnedes kommertsettevõtetes), lõpetades materjaliteadusega (nii TTÜ kui TÜ vastavad allasutused). Teravikmikroskoopiaga aga tegeletakse peamiselt TÜ Füüsika Instituudis, kus vastava programmiga alustati juba 6–7 aastat tagasi. Üheks esimeseks suuremaks kordaminekuks võib lugeda universaalse tööstus- ja tehnikaõppe teravikmikroskoobi väljatöötamist ja väikeseerias tootmist (joonis 3). Vastav projekt käivitati koostöös Eesti Tehnoloogiaagentuuriga ja kümned eksemplarid on juba müüdnud Rootsi ülikoolidele. Seadmel on rida olulisi uuendusi, mis teevad selle eriti sobivaks õppetöös – odavus, avatud arhitektuur (kõik tööelemendid on hästi nähtavad) ning ta ei vaja tööks eritingimusi. Lisaks on seade konstrueeritud nii, et õppetöö käigus purunevaid detaile on võimalik kiiresti asendada õppeprotsessi oluliselt pidurdamata.

Siinkohal on sobiv märkida, et nagu tänapäeval kõikjal kõrgtehnoloogilises teadustes, on ka TÜ FI teravikmikroskoopia programmi edu üheks aluseks koostöö, seda nii rahvusvahelises (peamiselt Lundi Ülikooli ja Chalmeri Tehnikaülikooliga Rootsis ning Läti Ülikooliga) kui kodumaises (TTÜ ja TÜ allasutused) ulatuses. Tippaparatuur on muutunud piisavalt kalliks ja samas väga spetsiifiliseks, mistõttu igal grupil pole lihtsalt mõistlik igat seadet endale hankida. Veelgi olulisem (ja ka ressursisäästlikum) on aga spetsiifilise *know-how* ja kogemuste vahetamine, mis aga sageli selles kontekstis märkimata jäetakse.



Joonis 3.
TÜ FI-s loodud õppetstarbeline aatomjõumikroskoop – EduScope.

Käesoleval ajal hõlmab TÜ FI teravikmikroskoopia uurimisprogramm mitmeid erinevaid suundi, mis küll ühest küljest moodustavad omaette terviklikke projekte, teisalt aga täiendavad üksteist ressursside ja tulemuste jagamise ning ühise kasutamise teel. Üheks selliseks uurimissuunaks, millega TÜ FI-s aktiivselt tegeletakse, on hübriidmikroskoopide väljatöötamine ja rakendamine uurimistöös. Hübriidmikroskoop on teravikmikroskoobi kombinatsioon mingi teist tüüpi mikroskoobiga, mille korral samaaegselt uuritakse objekti täpselt sama osa erinevate meetoditega. Tulemuseks on rikkalikum ja mitmekülgsem informatsioon objekti omadustest. Käesoleval ajal on loomisel ja kasutusel kaks hübriidmikroskoopi: TEM-SPM [1] (joonis 4) ja SPM-SNOM [2] (vastavalt TEM – *Transmission Electron Microscope*, transmissioon-elektronmikroskoop ja SNOM – *Scanning Near-field Optical Microscope*, lähiväljamikroskoop). Nendest esimene võimaldab teravikmikroskoobi tööd vahetult jälgida, st vaadelda, kuidas teravik ja pind omavahel üksteist mõjutavad, kui kiiresti ja millistel kaugustel kasvavad nanokontaktid nende vahele jne. Vahetult saab mõõta näiteks elektrijuhtivuse iseärasusi nanokontaktides. Samuti saab visualiseerida aatomjõumikroskoobi režiimis töötava teraviku objektiga kontakti hüppamise kaugust, sealt lahtirebimise jõudusid ja kõike seda reaalses aegruumis filmida.

Vaatamata ahvatlevatele võimalustele on aga maailmas vaid paar teadlaste gruppi, kes sellist tööd püüavad teha (peamiselt Jaapanis [3] ja Rootsis [4]). Põhiprobleemiks, mis piirab niivõrd huvitavate nähtuste jälgimist, on teravikmikroskoobi mõõtmed. Tuleb ju terve teravikmikroskoop mahutada 5 mm siseläbimõõduga toru sisse ja seal teha ka vajalikud liigutused kolmes ruumikoordinaadis. Teravikmikroskoop ise aga koosneb mõnekümnest mikrodetailist, mis tuleb üksikhaaval suure täpsusega valmistada. Peale kõige muu ei tohi elektronkiirte teele sattuda isoleeritud juhtmeid. Seega tuleb nii teravikmikroskoobi montaaž kui eeljüsteering teostada optilise mikroskoobi all.

TÜ FI-s loodud seade on juba leidnud rakendust mitmetes teadusuuringutes [5].

Hiljuti töötati välja koostöös TÜ Orgaanilise ja Bioorgaanilise Keemia Instituudiga uudne materjal, mida on võimalik kasutada lähiväljamikroskoobi teravike valmistamiseks. Läbipaistev ja samaaegselt hea elektrijuhtivusega teravik (joonis 5) avaks uued võimalused tunnelmikroskoopia baasil pinna spekt-

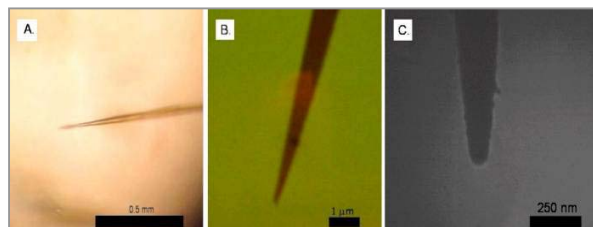
raaluuringuteks. Senini on seda üritatud teha, kasutades helesinist looduslikku India teemanti, mille kõrge hind ja eriti veel selle töötlemise kallidus ei võimalda seda materjali praktikas kasutada.

Perspektiivseks uurimismetoodikaks nanotehnoloogias on saamas nanotomograafia [6]. See on uurimismeetod, mis võimaldab uuritavate objektide pinnalähedase ruumala kolmedimensionaalset ülitäpset (teoreetiliselt kuni aatomlahutuseni) kujutamist ja rakendada seda erinevate objektide ruumistruktuuride kindlakstegemisel. Meetod annab unikaalset informatsiooni aine ehituse ja struktuuri kohta, mille saamiseks puuduvad üldiselt alternatiiv-



Joonis 4.

Teravikmikroskoop, mis elektronmikroskoobi sees võimaldab otseselt ja reaalajas jälgida teraviku ja objekti vahel toimuvaid protsesse.

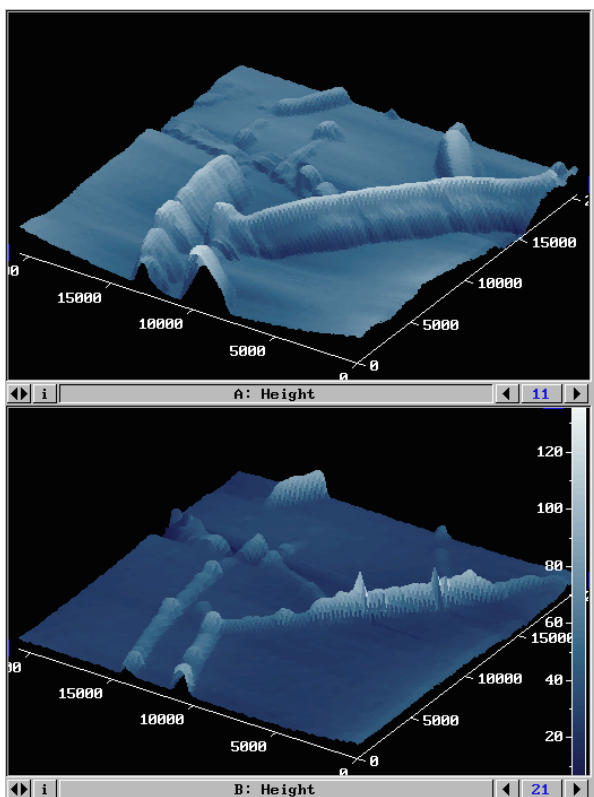


Joonis 5.

Läbipaistev ja elektrit juhtiv teravik, mida saab kasutada üheaegselt nii lähivälja- kui tunnelmikroskoobi andurina.

sed võimalused ja mida saab kas otseselt rakendada mitmetes teistes teadusuuringutes või mis üldiselt rikastavad teadmisi fundamentaalsete seoste kohta aine struktuuri ning omaduste vahel (joonis 6).

Uurimismetoodika ühendab endas traditsioonilise teravikmikroskoopia tehnoloogiaga, mis võimaldab objekti pindmise aatomkihi järjestikulist eemaldamist. Pärast igat eemaldamist võetud teravikmikroskoobi pildist moodustatakse kompuutertöötuse abil objekti ruumiline kujutis. Põhimõtteliselt on eemaldamiseks kasutatavad mitmed erinevad meetodid. Antud projektis on põhiliselt kavas kasutada laserablatsiooni, sest sellel on mitmed eelised teiste meetodite (nt keemiline söövitamine, plasmaerosioon jne) ees.



Joonis 6.

TÜ FI nanotomograafia projekti esmased katsed näitavad meetodi perspektiivsust nanotehnoloogilistes uuringutes. Pildil on nanostruktuurne objekt enne ja pärast laserablatsiooni.

Üheks huvitavaks teadussuunaks, kus nanotehnoloogiat otseselt rakendatakse ja mis põhimõtteliselt võib kiiresti igapäevaelus rakendatavaid tulemusi saavutada, on nanotriboloogia (triboloogia – teadus hõõrdumisest). See on uus tehnika ja füüsika piirimaile olev uurimissuund, kus selgitatakse nakkumise (ehk teisisõnu kleepumise), hõõrdumise, kulumise ja määrimise, keemilise aktiivsuse ning triboelektromagnetismi olemust nanostruktuursel tasandil [vt. nt [7]]. Üheks nanotriboloogia levinud uurimismeetodiks on skaneeriva nanoteraviku kasutamine ülaltoodud protsesside uurimiseks. Nanotriboloogia arengus oli oluline mõistmine, et pindade hõõrdumisel on printsiipaalne tähtsus mikro- ja nanokontaktidel, mille üldpindala on tunduvalt väiksem hõõrduvate pindade pindalast. Ühtset hõõrdumise-kulumise teooriat, mis põhineks keemilise sideme aatomudelil ja elektron-foononprotsessidel, ei ole veel loodud. Pole isegi selge, kas libisemisel pindade liikumine toimub ühtlase kiirusega või seeriana diskreetsetest kleepumis-libisemisprotsessidest.

TÜ FI vastav uurimissuund on osa üleeuroopalisest Euroopa Teadusfondi koostööprogrammist “Nanorobo”.

Lisaks ülalkirjeldatule mõnevõrra “eksootilistele” teravikmikroskoopia rakendamisele kasutatakse seda TÜ FI-s igapäevaselt ka “traditsiooniliselt” – mitmesuguste objektide pindade nanostruktuuride kujutamiseks. Märkimisväärne on, et seejuures tehakse aktiivset koostööd väga paljude teadusharudega ja uurimisobjektide nimistu on parajalt kirev, alates biokeemilistest DNA-ga seotud objektidest, lõpetades geoloogiliste proovidega. Kitsamalt füüsikateadustest rääkides, tuleks lugeda enimarendatuks nanotehnoloogia valdkonnaks, kus teravikmikroskoopiat edukalt rakendatakse, kilede- ja ka üldisemalt materjalitehnoloogiat.

TULEVIKUPERSPEKTIIVID

Nanotehnoloogia lubadused on suured ja ambitsioonikad ning teatud skeptitsism on igati õigustatud. Aga isegi juhul, kui ainult mürdosa visioonidest kunagi igapäevaelus kasutamist leiavad, on arengusuund ilmselt ennast õigustanud. Positiivsete tulemuste saavutamine on tõenäoline juba ainuüksi seetõttu, et erinevalt paljudest varasematest teaduse “suurtest lubadustest” (nagu näiteks juhitava ja kasutatava termotuumareaktsiooni projekt, mis laias laastus omab kahte võimalikku tulemit), on nanotehnoloogiliste visioonide spekter väga lai. See-

ga on ka tõenäosus, et osadki tulemused rakendamist leiavad, üsna suur.

Lisaks ei tohi ära unustada saadud kogemuste ja uute teadmiste tunnetuslikku väärtust. Nanostruktuurides lakkab materia olemast ainult aatomite ja molekulide statistiline kogum ja iga aatom omandab individuaalse mõõtme, mis toob endaga kaasa kontseptuaalselt erineva lähenemise vajaduse, mis omakorda viib tunnetusliku maailmapildi uuele tasemele.

Nanotehnoloogia olulisust tulevikus on teadvustanud endale nii Eesti teadlaskond kui ka laiem üldsus. Kuigi praegu leiab nanotehnoloogia Eesti majanduses vaid minimaalsel tasemel rakendamist, on tulevikule mõeldes oluline Eesti teadus- ja uurimisasutustes nanoteadusega aktiivselt edasi tegeleda, et olla valmis murranguks – nanotehnoloogia laialdaseks rakendamiseks kõrgtehnoloogilises tööstuses. Olemasolev tase lubab edukalt osaleda nanoteaduste arengus ja kaasa aidata murrangu kujundamisele, aga pidev ja laiaulatuslik töö

on hädavajalik taseme säilitamiseks ja valmisoleku kindlustamiseks nii tehnilise kui ka intellektuaalse külje pealt.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Lõhmus, R., Erts, D., Lõhmus, A., Jompol, J., Olin, H. *Phys. Low-Dim. Struct.*, 2001, 3/4, 81.
2. Tätte, T., et al. *Materials Sci. Eng.*, 2002, C 19, 101.
3. Kizuka, T., Yamada, K., Deguchi, S., Narusk, M. *Phys. Rev.*, 1997, B 55, R7398.
4. Erts, D., Lõhmus, A., Lõhmus, R., Olin, H. *Appl. Phys.*, 2001, A72, S71.
5. Erts, D. et al. *Proc. 12th European Congress on Electron Microscopy*, Brno, Czech Republic, 2000, 1271.
6. Magerle, R. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85, 2749.
7. Detkov, D.V. *Phys. Uspekhi*, 2000, 6, 541.