

LATVIJAS UNIVERISTĀTE
ĶĪMISKĀS FIZIKAS INSTITŪTS

Boriss Poļakovs

Nanomateriālu struktūra,
mehāniskās un elektrovadāmības īpašības

Promocijas darbs fizikā

Kopsavilkums



Rīga 2006

Šis darbs tika izstrādāts Latvijas Universitātes Ķīmiskās fizikas institūtā Dr. Chem. Donāta Erta vadībā no 2002. līdz 2006. gadam.

Darba struktūra

Promocijas darbs sākas ar īsu aprakstu par tā būtību (abstraktu) un publikāciju sarakstu. Darbs veidots no vairākām nodaļām:

- 1. nodaļa: „Ievadā” dots īss vēsturisks apraksts un pamatota tēmas aktualitāte.
- 2. nodaļa: „Skenejošās mijiedarbību mikroskopijas principi”, iekļauti apraksti par izmantoto instrumentu darbības pamatprincipiem.
- 3. nodaļa: „Ge nanovadu masīvi anodizēta alumīnija oksīda matricā”, apraktīti AAO matricās sintezēto nanovadu elektrovadāmības un fotoelektrovadāmības pētījumi.
- 4. nodaļa: „Ge un Si nanovadi, kas audzēti uz katalītiskām nanodaļiņām”, aprakstītas uz nanodaļiņām audzēto nanovadu mehāniskās un elektrovadāmības īpašības un salīdzinātas ar matricās audzēto nanovadu īpašībām.
- 5. nodaļa: „3D DNS masīvi uz Au(111) virsmas”, aprakstīta masīvu veidošana un individuālu DNS molekulu elektrovadāmības pētījumi.
- 6. nodaļa: „Iespējamie pielietojumi”, veltīta Ge nanovadu un izveidotu DNS struktūru iespējamam pielietojumam.
- 7. nodaļa: „Secinājumi un tēzes”, apskatīti veikto pētījumu rezultāti un to novitāte.
- 8. nodaļa: „Bibliogrāfija”, satur izmantotās literatūras sarakstu.

Darbam pievienotas 8 rakstu kopijas. Promocijas darbs satur 62 lappuses, 54 attēlus, 4 tabulas un 89 atsauces literatūras avotiem.

Darba aktualitāte

Pašlaik plaši pētīti tādi nanomateriāli, kā oglekļa nanocaurulītes, metāliskie un pusvadītāju nanovadi, nanodaļiņas, fulerēni un citi, ar mērķi veidot funkcionālas nanoierīces. Tomēr tehnoloģija, kura ļautu savienot šos nanoobjektus funkcionālās ierīcēs, vēl ir nepietiekami attīstīta. Šo problēmu var skatīt divējādi. Pirmkārt, svarīga ir nanoobjektu precīza pozicionēšana. Perspektīva pieeja šā uzdevuma risināšanai ir pašorganizēšanās principa pielietošana, kad nanoobjekti spontāni sakārtojas 2D vai 3D arhitektūrās. Otrkārt, ir problemātiski apvienot nanoobjektus vienotā elektriskā ķēdē. Šobrīd vienīgā pieejamā tehnoloģija ir elektronu litogrāfija, kura ir dārga, sarežģīta un ierobežota telpiski tikai divās dimensijās. Viens no alternatīviem risinājumiem ir nanovadu izmantošana, lai elektriskā ķēdē savienotu individuālus nanoobjektus.

Šajā promocijas darbā tika pētītas divu nanomateriālu tipu (germānija nanovadi un DNS molekulas) struktūra, to mehāniskās un elektrovadāmības īpašības. Šie materiāli ir sakārtoti 3D arhitektūrās, kas ir būtiski to iespējamiem pielietojumiem.

Atsevišķi pusvadītāju nanovadi var kalpot kā vienota ierīce, kā daži pētnieki to demonstrējuši savos darbos [1, 2, 3]. Tomēr jāpiebilst, ka gandrīz visas uz nanovadiem / nanocaurulītēm balstītās, iepriekš aprakstītās ierīces ir realizētas planarā konfigurācijā. Tas nozīmē, ka, neskatoties uz ultra mazo nanovadu diametru (līdz dažiem nanometriem), reālām ierīcēm izmērs tomēr paredzams mikronos vai milimetros. Tāpēc tādas ierīces nevar palīdzēt integrālo shēmu tālākai samazināšanai. Nanovadi, kas sakārtoti 3D masīvos cietajā matricā (piemēram, AAO) ir perspektīvs materiāls nanoinženierijai, lai veidotu komplicētas 3D elektriskās ķēdes un nanoierīces. Pašlaik ir ļoti maz informācijas par pusvadītāju nanovadu masīvu elektriskajām īpašībām [4] un nav informācijas par īpašībām, kas piemīt AAO matricā veidotiem germānija nanovadiem.

Viens no perspektīviem virzieniem pusvadītāju nanovadu un nanopunktu pielietojumiem ir optoelektronika un telekomunikāciju tehnika [5]. Fotovadāmības procesu izpēte šajās struktūras var snigt būtisku informāciju, lai izveidotu jaunas ierīces optisko signālu konversijai par elektrisku signālu. Šobrīd fotovadāmības īpašības elementāru pusvadītāju nanovadu masīviem nebija pētītas.

Turpretī, individuāliem pusvadītāju nanovadiem gan optiskās, gan elektriskās īpašības bija rūpīgi izpētītas, tāpēc nepieciešams salīdzināt vai tās atšķiras no matricās veidoto nanovadu īpašībām. Ļoti maz ir pētīta spēku mijiedarbība nanocaurulītēm [6] un šis jautājums vispār nebija pētīts pusvadītāju nanovadiem. Tāds pētījums var dot svarīgu informāciju, lai attīstītu nanoelektromehāniskas ierīces un arī, lai meklētu metodes to integrācijai 3D masīvos.

DNS bāzes mijiedarbība ir ļoti labi izpētīta [7] kā arī, DNS molekulu uzskata par perspektīvu komponentu, lai izveidotu jaunus nanomateriālus [8]. Zināšanas par to, kā izveidot 3D DNS arhitektūras, un kā ar to palīdzību sakārtot nanomēroga objektus, lai izveidotu strukturētas nano un makrostrukturās, ir ļoti svarīgas nanotehnoloģijai un nanomateriālu ķīmijai. DNS molekulu mehānisko un elektrovadāmības īpašību izpēte ir svarīga nanoelektronikai, lai izstrādātu nanoobjektu savienošanu elektriskās ķēdēs.

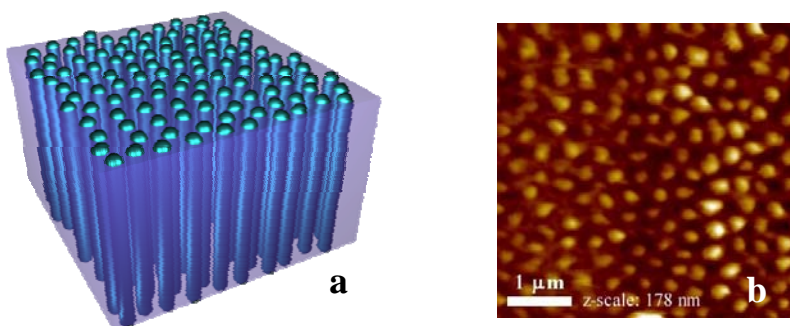
Darba mērķi

Šajā darbā tika izvirzīti šādi uzdevumi:

- Izpētīt AAO matricā sintezētu 3D germānija nanovadu masīva struktūru (arhitektūru), elektrovadāmības un fotoelektrovadāmības īpašības;
- Salīdzināt elektrovadāmību uz nanodaļiņām izaudzētiem nanovadiem ar AAO matricas izaudzētiem nanovadiem;
- Izpētīt individuālu nanovadu mehāniskās īpašības;
- Izpētīt struktūru (arhitektūru), mehāniskās un elektrovadāmības īpašības 3D DNS masīvam, kas veidots uz Au virsmas.

Galveno rezultātu apskats

Liela blīvuma vertikāli sakārtoti germānija nanovadu masīvi tika sintezēti 50 un 100 nm diametra anodizeta alumīnija oksīda porās ar superkritiskā šķidrums metodi (1. attēls). Nanovadu blīvums lauka vienībā ir $1.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ un $9 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$. Nanovadu elektrovadāmība tika pētīta ar vadošo atomspēku mikroskopu (ASM) un ar uzputinātiem metāla makrokontaktiem.



1. attēls. (a) – AAO porās audzēti nanovadi, shematisks zīmējums; (b) – germānija nanovadi AAO membrānā, atsegti ar mehānisku un ķīmisku apstrādi un vizualizēti ar atomspēka mikroskopu (skats no augšas).

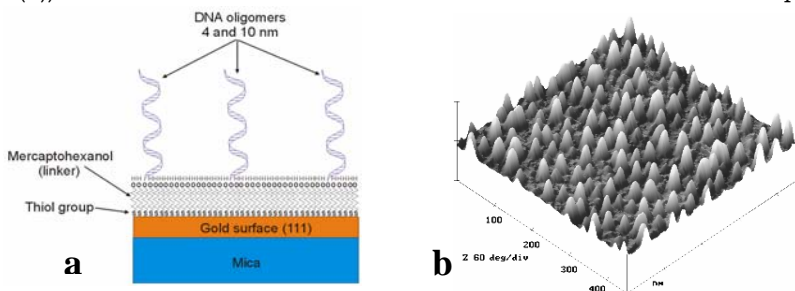
Praktiski visi nanovadi, kas izaudzēti AAO matricā, bija vadoši. Mērījumi parādīja, kā nanovadu īpašības bija ļoti līdzīgas, kas liecina par labu audzēšanas atkārtotamību un nesabojātu nanovadu struktūru. Makrokontakti tika izmantoti, lai izmērītu strāvas-sprieguma raksturlīknes lielām nanovadu grupām. Aktivācijas enerģijas tika mērīta germānija nanovadiem gan zemās, gan augstās temperatūrās.

Iegūtie rezultāti (0.58-0.61 eV) ļoti līdzīgi makroskopiskā germānija aizliegtās zonas platumam (0.66 eV). Kontakta radītā pretestība starp nanovadiem un elektrodu bija samazināta, izmantojot mehānisku pulēšanu un selektīvu ķīmisku AAO membrānas kodināšanu pirms kontaktu uzputināšanas. Elektrovadāmības dati, iegūtie ar vadošo ASM un makrokontaktiem deva līdzīgus rezultātus. Tika konstatēts, ka abas metodes ir pielietojamas AAO matricā audzētu nanovadu elektrovadāmības raksturošanai [10, 11].

Izmantojot ITO un zelta makro elektrodus, tiem pašiem nanovadu masīviem tika izpētītas arī fotovadāmības īpašības, abu elektrodu priekšrocības tika analizētas un salīdzinātas. Fotostrāva auga lineāri līdz ar sprieguma palielināšanu vismaz līdz 50 V. Fotostrāvas vērtība bija pietiekami liela lai to detektētu pat katrā atsevišķā nanovadā. No tā var secināt, ka līdzīgi nanovadu masīvi var būt pieskaņoti optoelektrisku ierīču veidošanas tehnoloģijai. Papildus tika pētīta nanovadu masīvu fotokinētika, temperatūras efekti un gaismas pārdale fotoluminiscences dēļ nanovadu masīvu matricā [12].

Elektrovadāmība individuāliem germānija un silīcija nanovadiem, izaudzētiem uz katalītiskām nanodaļiņām, tika pētīta ar transmisijas elektronu mikroskopu, kas apvienots ar skenējošo tuneļmikroskopu. Tas atļauj reizē ar elektriskiem mērījumiem vizualizēt arī kontakta reģionu. Nanovadu pretestība bija mazākā salīdzinājumā ar makroskopiska Ge īpašībām zelta atomu piemaisījuma dēļ. Šo nanovadu elektrovadāmība bija daudz lielāka (10^3 - 10^4 reizes) salīdzinājumā ar bezpiemaisījuma nanovadiem izaudzētiem AAO matricā. Tika arī atrasts, ka nanovadiem piemīt ļoti liela elastība salīdzinājumā ar makroskopisko germāniju [13, 14, 15].

Telpiski atdalīti 3D DNS molekulu masīvi uz Au (111) virsmas bija pagatavoti ar vienkāpnes monoslaņa uzvešanu, izmantojot merkaptohexanola un alkantiol-modificēto DNS molekulas maisījumu (2(a) attēls). ASM bija izmantots oscilējošā un kontakta vadošā režīmā, lai vizualizētu DNS uz virsmas (attēls 2(b)) un izmērītu mehāniskās un elektrovadošās individuālo DNS īpašības [16].



2. attēls. (a) - DNS masīva uz Au (111) virsmas shematiskais zīmējums; (b) - DNS masīva attēls uzņemts ar oscilējošo ASM.

DNS blīvums uz virsmas (10^{10} - 10^{11} cm⁻²) palielinās nelineāri līdz ar DNS koncentrāciju uzklāšanās šķīdumā. Tika pierādīts, ka gan vienkāpnes, gan divkāpnes DNS molekulas, piestiprinātas pie virsmas, ir orientētas perpendikulāri virsmas plaknei. Šī arhitektūra ir ļoti piemērota nanoobjektu sakārtošanai uz virsmas [17]. DNS elektrovadāmība tika mērīta ar vadošo atomspēku mikroskopu un konstatēts, ka DNS molekula slikti vada elektrisko strāvu.

Rezultātu novitāte

Šajā darbā tika pētītas organiskas un neorganiskas izcelsmes nanovadu arhitektūras, radītas ar pašorganizācijas metodēm: sakārtoti 3D germānija nanovadu masīvi un telpiski atdalīti 3D DNS masīvi.

Cik mums ir zināms, elektrovadošo īpašību kompleksa pētījums germānija nanovadu masīvos AAO matricā tika izdarīts pirmo reizi. Pie tam, šai arhitektūrai tika izpētīta kontaktu problēma nanovads/elektrods un atrasta metode kontaktu uzlabošanai. Fotovadāmības un fotodinamikas pētījumi germānija nanovadu masīviem tika veikti pirmo reizi.

Individuāla pusvadītāja nanovada nanoelektromehāniskās mijiedarbības tika pētītas pirmo reizi. Informācija par nanovadu mehāniskajām īpašībām un par kontakta spēkiem bija izmantota, lai izstrādātu un demonstrētu uz viena nanovada balstītas nanoelektromehāniskas ierīces (neizdzēšamas tikai-rakstīt spontānas pieejas atmiņa) darbības principus.

Sintezēta jauna DNS 3D arhitektūra uz Au virsmas (111). DNS molekulas viskoelastiskās un elektrovadāmības īpašības tika pētītas pirmo reizi tādā arhitektūrā.

Pētījumu praktiska nozīme

Sakārtotu nanovadu masīvi ir perspektīvs materiāls nano un optoelektronikai. Šī darba centrālā tēma ir nanovadu veselīgums apkārtējās matricas iekšpusē un nanovadu elektrovadāmība, kā arī nanovada/elektroda kontaktu problēma, kas ir svarīgas jebkurām elektroniskām ierīcēm, kas ir izveidotas uz nanovadu bāzes. Šajā darbā vēl tika pētītas Ge nanovadu izmantošanas iespējas gaismas detektēšanai.

Individuālu nanovadu elektrisko un mehānisko īpašību pētīšana ir svarīga nanoelektromehāniskas ierīces veidošanai uz nanovadu bāzes. Iegūtie dati tika izmantoti, lai piedāvātu un arī demonstrētu atmiņas elementu, izmantojot vienu nanovadu. Nanoelektromehāniskas ierīces tehnoloģija nākotnē var attīstīties kā laba alternatīva tradicionāliem elektriskiem relejiem un atmiņas elementiem.

DNS oligomēru masīvi ir perspektīva nanoarhitektūra gan nanotehnoloģijā, gan biotehnoloģijā. Līdzīga DNS masīvu arhitektūra izmantojama, tā saucamajā, DNS čipu tehnoloģijā (Nanogen) DNS analīzei. Tika diskutēta DNS pielietošana, lai savienotu un elektriski adresētu nanoobjektus. Mūsu dati apstiprina nepieciešamību metalizēt DNS molekulu, lai palielinātu tās elektrisko vadāmību.

Tēzes un secinājumi

1. Izstrādāta individuālu nanovadu cietajā AAO matricā elektrovadāmības kontroles metode ar vadošā atomspēka mikroskopa palīdzību un parādīta to pielietošanas iespēja.
2. Izstrādāta nanovadu/elektrodu kontaktu uzlabošanas metode nanovadu masīviem AAO matricā, izmantojot selektīvu ķīmisku kodināšanu.
3. Pierādīts, ka germānija nanovadi, kas izaudzēti AAO porās ar superkritisko šķidrumu metodi, ir elektrovadoši un tiem piemīt fotovadāmības.
4. Piedāvāti uz nanovadiem balstītas nanoelektromehāniskas ierīces veidošanas principi un demonstrēts prototips.
5. Izstrādāta DNS oligomēru 3D masīvos uz cietas virsmas elektrovadāmības zondēšanas metode ar vadošo atomspēka mikroskopu un parādīta to pielietošanas iespēja.

Publikācijas

Promocijas darba galvenie rezultāti tika publicēti 8 starptautiskos žurnālos. Rezultāti tika paziņoti 22 starptautiskās konferencēs (25 tēzes) un 7 vietējās konferencēs (18 tēzes), tēzes publicētas tēžu un rakstu krājumos.

Darbs tika aprobēts Fizikālās enerģētiska un Cietvielu institūtu semināros.

Raksti:

1. B.Polyakov, B.Daly, J.Prikulis, V.Lisauskas, B.Vengalis, J.Holmes, D.Erts. High Density Arrays of Germanium Nanowire Photoresistors. *Advanced Materials*, 18, 14, 1812-1816, 2006.
2. D.Erts, B.Polyakov, B.Daly, M.Morris, S.Ellingboe, J.Boland, J.Holmes. High Density Germanium Nanowire Assemblies: Contact Challenges and Electrical Characterization. *Journal of Physical Chemistry B*, 110, 820-826, 2006.

3. K.Ziegler, B.Polyakov, J.Kulkarni, T.Crowley, K.Ryan, M.Morris, D. Erts and J.Holmes. Conductive films of ordered nanowire arrays, *Journal of Material Chemistry*, 14, 4, 585 - 589, 2004.
4. K.Ziegler, D.Lyons, J.Holmes, D.Erts, B.Polyakov, H.Olin, K.Svensson, E.Olsson. Bistable nanoelectromechanical devices, *Applied Physics Letters*, 84, 20, 3957-4121, 2004. (Also selected for publication in *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology*, 9, 19, 2004)
5. D.Erts, B.Polyakov, E.Saks, H.Olin, K.Ziegler, J.D.Holmes. Semiconducting nanowires: properties and architectures, *Solid State Phenomena*, 99-100, 109-116, 2004.
6. D.Erts, B.Polyakov, A.Löhmus, R.Löhmus, H.Olin, M.A.Morris, J.D.Holmes. Metallic and semiconducting nanowires studied by TEM-SPM. *Physics of Low-Dimensional Structures*, 3/4, 65-74, 2003.
7. B.Polyakov, D.Erts, U.Malinovskis, I.Muiznieks, E.Tuite. SPM studies of DNA architectures on Au(111) and mica surfaces. *Physics of Low-Dimensional Structures*, 3/4, 269-277, 2003.
8. D.Erts, B.Polyakov, H.Olin, and E.Tuite. Spatial and mechanical properties of dilute DNA monolayers on gold imaged by AFM. *Journal of Physical Chemistry B*, 107, 3591-3597, 2003.

Konferences:

1. *International Conference on Nanotechnology ICNT2006, Basel, Switzerland, July 30 – August 6, 2006.*
D.Erts, B.Polyakov, P.Birjukovs, B.Daly, J.Xu, J.D.Holmes. Conductive and photoconductive properties of semiconductor nanowire arrays.
2. *European Conference on Organised Films ECOF-10, Riga, Latvia, August 21-24, 2006.*
-B.Polyakov, D.Erts, U.Malinovskis, I.Muiznieks, E.Tuite. Mechanical and electroconductive properties of spatially distributed DNA oligomer arrays on Au(111).
-U.Malinovskis, A.Pastare, B.Polyakov, D.Erts, I.Muiznieks. Self-assembled DNA net-like structures on the mica surface.
3. *2nd Latvian Conference on Nanomaterials and Nanotechnologies, Riga, Latvia, March 27-28, 2006.*
-B.Polyakov, J.Prikulis, L.Grigorjeva, D.Miller, V.Zauls, J.H.Holmes, D.Erts. High density arrays of germanium nanowire photoresistors.
-K.Erta, K.Didriksons, B.Polyakov, J.H.Holmes, D.Erts. Two terminal nanoelectromechanical devices based on individual Ge nanowires and its arrays.
-U.Malinovskis, A.Pastare, B.Polyakov, D.Erts, I.Muizhniekas. Controllable self-assembled DNA net-like structures on the mica surface.
4. *Int. Conference TNT-2005 (Trends in Nanotechnology), Oviedo, Spain, 29 August – 2 September, 2005.*
B.Polyakov, B.Daly, J.Prikulis, B.Vengalis, J.Holmes, D.Erts. Photoconductive Properties of Germanium Nanowires Incorporated in Anodic Aluminium Oxide Membranes.
5. *10th INTEL Academic Forum, Gdansk, Poland, May 18-20, 2005.*
D.Erts, B.Polyakov, B.Daly, J.Holmes. Conductive and Photoconductive Properties of Ge Nanowire array in AAO.
6. *NSTI Nanotechnology Conference & Trade Show, Anaheim, CA, USA, May, 2005.*
B.Daly, J.Kulkarni, K.Ziegler, T.Crowley, D.Erts, B.Polyakov, M.Morris, J.Holmes. Conductive Films of Ordered Nanowire Arrays.
7. *4th ESF Nanotribo workshop, Porquerolles, France, June 19-22, 2005.*
D. Erts, B. Polyakov, B. Redkins, J.D. Holmes. Electrostatic, friction forces and conductivity of Ge nanowire arrays encapsulated within oxidized alumina.
8. *21st Scientific Conference of University of Latvia, Riga, 7-9 February, 2005.*
- B.Polyakov, B.Daly, Y.Prikulis, L.Grigorjeva, D.Millers, J.Holmes, D.Erts. Electroconductive and photoelectroconductive properties of Ge nanowires inside AAO membranes.
- B.Redkin, B.Polyakov, J.Holmes, D.Erts. Nanotribology on Ge nanowire architectures.
- U.Malinovskis, A.Pastare, B.Polyakov, I.Muiznieks, D.Erts. Controlled selfassembling of DNA networks on mica surface.
- D.Erts, J.Prikulis, B.Polyakov. New ES structural funds and home-made instruments in the Institute of Chemical Physics.
9. *1st Latvian Conference on Nanomaterials and Nanotechnologies, Riga, Latvia, March 30-31, 2005.*

- B.Polyakov, B.Daly, Y.Prikulis, L.Grigorjeva, D.Miller, J.H.Holmes, D.Erts. Conductive and photoconductive properties of Ge nanowires in anodic aluminium oxide membranes.
 - B.Redkins, B.Polyakov, J.H.Holmes, D.Erts. Local electrostatic, friction forces and conductivity of Ge nanowire arrays encapsulated within oxidized aluminium.
 - D.Erts, B.Polyakov, J.H.Holmes. Nanoelectromechanical devices.
 - R.Udris, L.Lauks, J.H.Holmes, B.Polyakov, D.Erts. Light and radiation detection by germanium nanowire arrays.
10. *International Conference TNT-2004, (Trends in Nanotechnology), Segovia, Spain, September 13-17, 2004.*
B.Polyakov, D.Erts, J.Holmes. Complex studies of Ge nanowire arrays in oxidized alumina membranes.
11. *Nordic-Baltic SPM Workshop, Trondheim, Norway, June 15-17, 2004.*
 - B.Polyakov, D.Erts, J.Holmes. AFM studies of conductive Ge nanowire arrays in oxidized alumina membranes.
 - D.Erts, H.Olin, J.Holmes, B.Polyakov, A.Lohmus. Electrical and mechanical properties of nanowires studied by SPM.
12. *SPM - 2004 International Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, May 2-6, 2004.*
 U.Malinovskis, A.Pastare, B.Polyakov, I.Muiznieks, D.Erts. AFM studies of DNA networks on mica surface.
13. *20th Scientific Conference of University of Latvia, Riga, February 16-18, 2004.*
 - B.Polyakov, L.Lauks, R.Udris, J.Holmes, D.Erts. Thin films of conductive ordered Ge nanowire arrays.
 - D.Erts, B.Polyakov, E.Saks, A.Patmalnieks, H.Olin, J.Holmes. Metal and semiconducting nanowires and architectures.
14. *8th Conference of Latvian Physical Society, Jelgava, Latvia, July 1, 2003.*
 D.Erts, B.Polyakov, E.Saks, U.Maļinoskis. Nanocomponents: properties, architectures, devices.
15. *Scanning Probe Microscopy – 2003 International workshop, Nizhny Novgorod, Russia, March 2-5, 2003.*
 - B.Polyakov, D.Erts, U.Malinovskis, I.Muiznieks, E.Tuite., SPM studies of DNA architectures on Au(111) and mica surfaces.
 - D.Erts, B.Polyakov, A.Löhmus, R.Löhmus, H.Olin, J.D.Holmes. Properties of metallic and semiconducting nanowires studied by TEM-SPM.
16. *E-MRS 2003 Fall Meeting, Warsaw, Poland, September 15-19, 2003.*
 D.Erts, B.Polyakov, E.Saks, H.Olin, J.D.Holmes. Semiconducting nanowires: properties and architectures.
17. *II ESF-Nanotribology Workshop, Antalya, Turkey, October, 2003.*
 D.Erts, B.Polyakov, E.Tuite. Force interactions between AFM tip and individual DNA oligomers.
18. *19th Scientific Conference of University of Latvia, Riga, February 10-12, 2003.*
 - B.Polyakov, D.Erts, U.Malinovskis, I.Muiznieks, E.Tuite. DNA macromolecular architectures: creation and properties investigation.
 - D.Erts, B.Polyakov, A.Truhins, L.Skuja, A.Patmalnieks, K.M.Ryan, J.D.Holmes. Investigation of 3D semiconducting nanowire architectures using TEM, AFM and optical methods.
 - U.Maļinovskis, I.Muiznieks, B.Polyakov, D.Erts. DNA macromolecular architectures on solid surfaces.
19. *Nordic-Baltic SPM Workshop, Tartu, Estonia, May 29-31, 2002.*
 - D.Erts, J.D.Holmes, D.Lyons, M.A.Morris, H.Olins, E.Olsson, B.Polyakov, L.Ryen, K.Svensson. Properties of silicon nanowires studied by TEM-STM.
 - B.Polyakov, D.Erts, E.Tuite, H.Olin, M.Knite. Conductive and mechanical properties of 2- dimensional DNA-arrays and electroconductive polymer composites.
20. *15th Interernational Congres on Electron Microscopy. Durban, South Africa, 1-6 september, 2002.*
 D.Erts, H.Olin, B.Polyakov, L.Ryen, E.Olsson, J.Holmes. Conductive and mechanical properties of silicon nanowires investigated in situ by TEM-SPM.
21. *International conference on nanometer scale science and Technology, 21st European conf. On Surface Science, Malmö, Sweden, June 24-28, 2002.*
 D.Erts, J.D.Holmes, D.Lyons, A.A.Morris, H.Olin, E.Olsson, B.Polyakov, L.Ryen, and K.Svensson. Solution-Grown Silicon Nanowire Studied By TEM-STM.
22. *International Sc. Conf. on Biomedical Engineering and Microtechnologies, RTU, Riga, Latvia, October 10 - 14, 2002.*
 D.Erts, B.Polyakov, E.Tuite. Conductive and mechanical properties of DNA arrays.
23. *18th Scientific Conference of ISSP University of Latvia, February 2002.*

D.Erts, B.Polyakov, H.Olin. Mechanical properties and conductivity of single silicon nanowires measured by scanning tunneling microscope compatible with transmission electron microscope.

24. *International Scientific Conference on Biomedical Engineering and Microtechnologies, RTU, Riga, Latvia, October 10 - 14, 2002.*

D.Erts, B.Polyakov, J.D.Holmes, H.Olin. Properties of silicon nanowires.

25. *Adriatico Research Conference on Interaction and Assembly of Biomolecules, Trieste, Italy, 27-31 August, 2001.*

B.Polyakov, D.Erts, E.Tuite, H.Olin. Force and conductivity measurements on DNA-arrays and MCH monolayers on Au(111) surface with cAFM.

26. *Second International Conference on Scanning Probe Spectroscopy, Hamburg, Germany, July 19 -22, 2000.*

D.Erts, B.Polakov, H.Olin, T.Vajakas, E.Tuite. Tunneling and force spectroscopy of self assembled DNA monolayers on Au(111) abstract,

27. *Eleventh International Conference on Mechanics of Composite Materials, Riga, Latvia, June 11 -15, 2000.*

D.Erts, B.Polakov, and E.Tuite. Spatial, Mechanical, Conductivity Characterization of Self-Assembled DNA Arrays on Au(111) by Atomic Force Microscopy.

28. *Nordic-Baltic SPM Workshop, Goteborg, Sweden, June 5-7, 2000.*

B.Polakov, D.Erts, H.Olin, T.Vajakas, E.Tuite. Conductive and Nanomechanical SPM Characterization of Self Assembled DNA Arrays on Au(111).

29. *International seminar "Medical Engineering and Physics: Science, Practice, Busyness", Riga, 6-9 October, 1999.*

D.Erts, E.Tuite, B.Polyakov. Structure and conductive properties of self assembled DNA by scanning probe microscopy.

References

- [1] M.Huang, S.Mao, H.Feick, H.Yan, Y.Wu, H.Kind, E.Weber, R.Russo, P.Yang. *Science*, 292, 1897, 2001.
- [2] C.Thelander, T. Martensson, M.Björk, B. Ohlsson, M. Larsson, L Wallenberg, L.Samuelson. *Applied Physics Letters*, 83, 2052, 2003.
- [3] M.Bjork, B.Ohlsson, C.Thelander, A.Persson, K.Deppert, L.Wallenberg, L.Samuelson. *Applied Physics Letters*, 81, 4458, 2002.
- [4] C. Liu, W.Yiu, F.Au, J.Ding, C.Lee, S.Lee. *Applied Physics Letters*, 83, 15, 2003.
- [5] A.Yakimov, A.Dvurechenskii, A.Nikiforov, Y.Proskuryakov. *Journal of Applied Physics*, 89, 5676, 2001.
- [6] M. Duquesnes, S.Rotkin, N.Aluru. *Nanotechnology* 13, 120, 2002.
- [7] A.P.Alivisatos, K.Johnson, X.Peng, T.E.Wilson, C.J.Loweth, M.Bruchez, P.G.Schultz. *Nature*, 382, 609, 1996.
- [8] N.C.Seeman. *Nature*, 421, 427, 2003.
- [9] K.Ziegler, B.Polyakov, J.Kulkarni, T.Crowley, K.Ryan, M.Morris, D. Erts and J.Holmes. *Journal of Material Chemistry*, 14, 4, 585, 2004.
- [10] D.Erts, B.Polyakov, B.Daly, M.Morris, S.Ellingboe, J.Boland, J.Holmes. *Journal of Physical Chemistry B*, 110, 820-826, 2006.
- [11] D.Erts, B.Polyakov, B.Redkins, J.Holmes. *Proceedings of the 1st Latvian Conference on Nanotechnology*, Riga, Latvia, 83 March 30-31, 2005.
- [12] B.Polyakov, B.Daly, J.Prikulis, V.Lisauskas, B.Vengalis, J.Holmes, D.Erts. *Advanced Materials*, 18, 14, 1812-1816, 2006.
- [13] K.Ziegler, D.Lyons, J.Holmes, D.Erts, B.Polyakov, H.Olin, K.Svensson, E.Olsson. *Applied Physics Letters*, 84, 20, 3957, 2004.
- [14] D.Erts, B.Polyakov, E.Saks, H.Olin, K.Ziegler, J.D.Holmes. *Solid State Phenomena*, 99-100, 109, 2004.
- [15] D.Erts, B.Polyakov, A.Löhmus, R.Löhmus, H.Olin, M.A.Morris, J.D.Holmes. *Physics of Low-Dimensional Structures*, 3/4, 65-74, 2003.

- [16] B.Polyakov, D.Erts, U.Malinovskis, I.Muiznieks, E.Tuite. *Physics of Low-Dimensional Structures*, 3/4, 269, 2003.
- [17] D.Erts, B.Polyakov, H.Olin, and E.Tuite. *Journal of Physical Chemistry B*, 107, 3591, 2003.