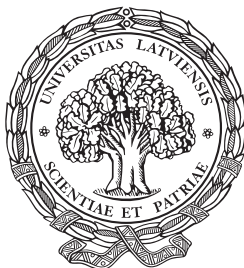


LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE
ĶĪMISKĀS FIZIKAS INSTITŪTS



Jana Andžāne

NANOVADU UN NANOCAURULĪŠU PIELIETOJUMS NANOELEKTROMEĀNISKĀS IERĪCĒS

Promocijas darba kopsavilkums

Doktora grāda iegūšanai dabaszinību nozarē
Apakšnozare: fizika, astronomija un mehānika

Zinātniskais vadītājs
Dr. Chem. Donāts Erts

Rīga, 2012

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultātē Ķīmiskās fizikas institūtā.

Darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projekta Nr. 2009/0138/ 1DP/1.1.2.1.2./ 09/IIPIA/ VIAA/004. „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē” laika posmā no 2005. gada līdz 2011. gadam.



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Darbs sastāv no ievada, 3 nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta.

Darba forma: publikāciju kopa fizikas, astronomijas un mehānikas nozarē, cietvielu fizikas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs : *Dr. Chem. Donāts Erts*

Darba recenzenti:

Uldis Rogulis, Dr. Phys., Latvijas Universitāte

Boriss Poļakovs, Dr. Phys., Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūts

Dr. Karine Mougín, Institut de Science des Materiaux de Mulhouse, CNRS, France

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2012. gada 23. martā
Latvijas Universitātes Fizikas, astronomijas un mehānikas nozares
promocijas padomes atklātā sēdē Ķengaraga ielā 8, Rīgā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties
Latvijas Universitātes bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4.

LU Fizikas, astronomijas un mehānikas zinātņu nozares promocijas

padomes priekšsēdētājs _____ *Ivars Tāle*

promocijas padomes sekretāre _____ *Laureta Buševiča*

© Latvijas Universitāte, 2011

© Jana Andžāne, 2011

ISBN 978-9984-45-462-7

ANOTĀCIJA

Nanoelektromehāniskās sistēmas ir sistēmas, kuru raksturīgie izmēri ir daži desmiti nanometri. Izmantojot nanoskalas efektus, nanoelektromehāniskās sistēmas piedāvā interesantas un unikālas īpašības, kas ļoti atšķiras no plaši izmantotajām mikroelektromehāniskajām sistēmām. Šajā darbā galvenā uzmanība tiek pievērsta divu pozīciju nanoelektromehānisku ON-OFF slēdžu izveidei. Principā šādas ierīces sastāv no aktīvā elementa (nanovada), kurš tiek pārslēgts starp ieejas elektrodiem, un strādā, pateicoties smalkai pievilkšanās un atgrūšanās spēku balansēšanai.

Šajā darbā

- tika realizēti uz vienā galā nostiprinātiem germānija un molibdēna-sulfidajodīda nanovadiem balstīti divu termināļu ON-OFF nanoelektromehāniskie slēdži ar vienu ieejas elektrodu;
- tika izpētīti un pilnveidoti realizēto nanoelektromehānisko ierīču darbības parametri;
- tika demonstrēti uz vienā galā nostiprinātiem germānija nanovadiem balstīti divu termināļu ON-OFF nanoelektromehāniskie slēdži ar diviem un trim ieejas elektrodiem;
- tika izpētītas un salīdzinātas dažādu struktūru oglekļa nanocaurulišu fizikālās īpašības;
- tika noskaidrota oglekļa nanocaurulišu fizikālo īpašību atkarība no to struktūras.

SATURA RĀDĪTĀJS

Anotācija	3
Autora publikāciju un konferenču tēžu saraksts	5
Galveno saīsinājumu saraksts	8
Ievads	9
Darba mērķi un motivācija	10
1. Literatūras pārskats	12
1.1. Nanoreļeji	12
1.2. Divu termināļu NEM sistēmas	13
1.2.1. Uz pusvadītāju nanovada balstītas divu termināļu NEM ierīces	13
1.2.2. Divu termināļu NEMS, kuru aktīvie elementi ir oglekļa nanocaurulītes	14
1.3. Nanovadu un nanocaurulišu sintēzes metodes	15
1.4. Salīdzinājums starp pusvadītāju nanovadiem un oglekļa nanocaurulītēm kā NEM aktīvajiem elementiem	16
2. Eksperimentos izmantotās iekārtas un paraugi	17
2.1. Nanomanipulāciju sistēma izmantošanai TEM	17
2.2. Nanomanipulāciju sistēma izmantošanai SEM	17
2.3. Paraugu sagatavošana	18
2.4. Nanovadu un nanocaurulišu sintēzes metodes	18
3. Eksperimentu rezultāti un diskusija	19
3.1. ON-OFF divu termināļu nanoelektromehāniskie slēdži (NEMS)	19
3.1.1. Divu termināļu slēdzis ar vienu ieeju	20
3.1.2. Uz pusvadītāju nanovada balstītas ON-OFF divu termināļu ierīces ar diviem un trim ieejas elektrodiem	23
3.2. NEM slēdžu darbības parametri	25
3.2.1. Dabiskā oksīda loma	25
3.2.2. Kontakta laukuma un elektrodu materiāla loma	26
3.2.3. Nanovada atslēgšana ar elektrisko lauku	28
3.2.4. Adhēzijas spēka „vājināšana” kontakta vietā	29
3.2.5. Nanovadu izturība	30
3.3. Oglekļa nanocaurulišu izpēte pielietojumam NEM ierīcēs	31
3.3.1. Oglekļa nanocaurulišu elektrovadāmība un izturība	31
3.3.2. Oglekļa nanocaurulišu lauka emisijas īpašības	32
Aizstāvamās tēzes	36
Pateicības	37
References	38

Autora zinātnisku publikāciju saraksts

1. J. Andzane, J. Prikulis, R. Meija, J. D. Holmes and D. Erts. **Two-input bistable controlled nanoelectromechanical switch based on the individual single-clamped Ge nanowire**, submitted
2. J. Andzane, J. Prikulis, D. Dvorsek, D. Mihailovic and D. Erts. **Two-terminal nanoelectromechanical bistable switches based on molybdenum-sulfur-iodine molecular wire bundles**. *Nanotechnology*, 21 125706 (2010)
3. J. Andzane, N. Petkov, A. I. Livshits, J. J. Boland, J. D. Holmes and D. Erts. **Two-terminal nanoelectromechanical devices based on germanium nanowires**. *Nano Letters* 9 (5), 1824-1829 (2009)
4. D. Erts, R. Meija, P. Birjukovs, J. Andzane, M. Studers, R. Löhmus, J. D. Holmes. **Devices based on semiconductor nanowires**, *Proceedings of IEEE, CAS Proceedings*, V.1, 37-47. (2009)
5. Z. Li, J. Andzane, D. Erts, J. M. Tobin, K. Wang, M. A. Morris, G. Attard, J. D. Holmes. **A New Supercritical Fluid Method for Growing Carbon Nanotubes**. *Advanced Materials*, 19, 3043-3046 (2007).
6. J. Andzane, J. M. Tobin, Z. Li, J. Prikulis, M. Baxendale, H. Olin, J. D. Holmes, D. Erts. **Selection of Application Specific Single and Multi-walled Carbon Nanotubes by in Situ Characterization of Conductive and Field Emission Properties**. *AZojono: Journal of Nanotechnology Online*, DOI 10.2240/azojono0123 (2007)

Autora publikācijas un patenti, kuri nav iekļauti promocijas darbā

Raksts:

J. Andzane, R. Poplauskis, J. Prikulis, R. Lohmus, S. Vlassov, S. Kubatkin, D. Erts. **Application of tuning fork sensors for in-situ studies of dynamic force interactions inside scanning and transmission electron microscopes**, *Materials Science-Medžiagotyra*, submitted

Patents:

R. Poplauskis, J. Dzelve, I. Pastore, J. Andžane, A. Viksna, D. Erts. **Paņēmiens nanotehnoloģijās izmantojamas metāla zondes izgatavošanai**. Latvijas patents Nr. 13875, spēkā no 21.08.2008.

Darba rezultāti tika prezentēti sekojošās starptautiskajās konferencēs:

1. D. Erts, J. Andzane, R. Meija, J. Prikulis, J. D. Holmes. **Characterization of semiconductor nanowire based nanoelectromechanical switches**. *EUROMAT 2011*, 12-15 September, Montpellier, France
2. A. I. Livshits, J. Andzane, R. Meija, J. Prikulis, R. Lohmus, J. D. Holmes and D. Erts. **The bistable NEMS operating voltage reduction: numerical**

- simulations vs experiment.** 2nd European Nanomanipulation Workshop, Tartu, Estonia, 6th-8th June 2011
3. J. Andzane, R. Meija, J. Prikulis, L. Jasulaneca, J. D. Holmes and D. Erts. **Gateless multiplexer based on individual single clamped Ge nanowire.** 2nd European Nanomanipulation Workshop, Tartu, Estonia, 6th-8th June 2011
 4. R. Meija, J. Andzane, J. Prikulis, L. Jasulaneca, J. D. Holmes and D. Erts. **Application of Individual Semiconductor Nanowire in Gateless Bistable Nanoelectromechanical Switch.** International Baltic Sea region conference „Functional materials and nanotechnologies” April 5-8, 2011, Riga, Latvia
 5. R. Meija, J. Andzane, J. Prikulis, S. Kubatkin, J. D. Holmes, D. Erts. **Development and Characterization of Nanoelectromechanical Switches.** The 12th International Conference-School „Advanced Materials And Technologies”, Palanga, Lietuva, 27-31 August 2010
 6. D. Erts, J. Andzane, M. Studers, R. Meija, J. D. Holmes. **Nanoelectromechanical systems.** The 11th International Conference-School „Advanced Materials and Technologies”, Palanga, Lithuania, August 27-31, 2009., p. 23.
 7. D. Erts, R. Meija, P. Birjukovs, J. Andzane, M. Studers, R. Löhmus, J. D. Holmes. **Devices based on semiconductor nanowires.** 2009 International Semiconductor Conference, October 12-14, Sinaia, Romania
 8. Erts D., Andzane J., Studers M, Holmes J. D. **Nanoelectromechanical Devices.** International conference „Functional materials and nanotechnologies” March 31 – April 3, 2009, Riga, Latvia
 9. Meija R., Lishics A., Andzane J., Erts D. **Mechanical, Electrical and Thermal Properties of Single Semiconductor Nanowires.** International conference „Functional materials and nanotechnologies” March 31 – April 3, 2009, Riga, Latvia
 10. D. Erts, J. Andzane, N. Petkov, J. D. Holmes. **Nanoelectromechanical Devices Based on Nanowires.** ZING conference on Nanomaterials, Cancun, Mexico, December 6-8, 2008.
 11. D. Erts, J. Andzane, J. Prikulis, D. Mihailovic. **Two Terminal Nanoelectromechanical Devices Based On Mo₆S₃I₆ Nanowires.** Hot Nano Topics 2008, 23–30 May 2008, Portorož, Slovenia, p. 49.
 12. J. Andzane, J. Prikulis, J. D. Holmes, D. Mihailovic, D. Erts. **Operation conditions of semiconductor nanowires based two terminal nanoelectromechanical on off devices.** Functional materials and nanotechnologies, Riga, Latvia, April 1-4, 2008.
 13. J. Andzane, R. Meija, J. Prikulis, N. Petkov, B. Wu, J. Boland, J. D. Holmes, D. Erts. **Mechanical properties of ZnO and Ge nanowires. Functional materials and nanotechnologies 2008, Riga, Latvia, April 1-4, 2008.**
 14. J. Andzane, J. Prikulis, D. Mihailovic, D. Erts. **Bistable Mo₆I₃S₆ nanowire nanoelectromechanical device: in situ demonstration.** DESYGN-IT workshop, November 23, 2007, London, UK
 15. J. Andzane, J. Prikulis, J. Tobin, Z. Li, M. Baxendale, H. Olin, J. D. Holmes, D. Erts. **Structure dependent conductive and field emission properties of carbon nanotubes.** DESYGN-IT workshop, November 23, 2007, London, UK

16. D. Erts, J. Andzane, J. D. Holmes. **In situ Characterization of Bistable Nano-electromechanical Devices Based on Semiconductor Nanowires**. 4th International conference on nanotechnologies NANOVED 2007, November 12-14, 2007, Bratislava, Slovakia
17. J. Andzane, J. Tobin, Z. Li, J. Prikulis, J. D. Holmes, D. Erts. **Structure Dependent Conductive, Field Emission and Mechanical Properties of Carbon Nanotubes Grown by Different Methods**. 4th International conference on nanotechnologies NANOVED 2007, November 12-14, 2007, Bratislava, Slovakia
18. D. Erts, J. Andzane, K. Ziegler, N. Petkov, J. D. Holmes. **In situ Characterization of Bistable Nanoelectromechanical Devices Based on Ge Nanowires**. The International Workshop on Micro- and Nano-Technologies and Systems. 17-18 October 2007 Moscow, Russia.
19. J. Andzane, J. Tobin, Z. Li, J. Prikulis, J. D. Holmes, D. Erts. **Conductive, Field Emission and Mechanical Properties of Carbon Nanotubes Grown by Different Methods**. European Congress on Advanced Materials and Processes, Nürnberg, Germany, 10-13 th September, 2007, p. 47
20. J. Andzane, J. Prikulis, J. Tobin, Z. Li, J. Holmes, D. Erts. **Structure dependent conductive and field emission properties of carbon nanotubes**. International Conference on Nanoscience and Technology (ICN+T 2007), Stockholm, Sweden, 2-6 July 2007
21. J. Andzane, J. Holmes, D. Erts. **In Situ Nanodevices Based on Individual Free Standing Nanowires and Nanotubes**. 4th International Workshop on Nanosciences and Nanotechnologies NN07, 16-18 July 2007, Thessaloniki, Greece.
22. J. Andzane, J. Prikulis, Z. Li, J. Tobin, J. Holmes, D. Erts. **In Situ Investigation of Electrical Properties of Carbon Nanotubes Grown by Different Methods**. 4th International Workshop on Nanosciences and Nanotechnologies NN07, 16-18 July 2007, Thessaloniki, Greece
23. D. Erts, J. Andzane, J. D. Holmes. **Nanoelectromechanical Devices Based on Nanowires and Nanotubes investigated by in Situ Techniques**. 6th ESF Nanotribology Workshop, p. 19, Santa Margherita di Pula, Italy, 13th-16th May 2007
24. R. Lohmus, D. Erts, J. Andzane, A. Löhmus. **Apparatus for in situ lateral force interactions and adhesion measurements of Au nanoparticles on the surface using a combined AFM/SEM**. 6th ESF Nanotribology Workshop, p. 46, Santa Margherita di Pula, Italy, 13th-16th May 2007
25. J. Andzane, J. D. Holmes, D. Erts. **In situ Nanodevices based on Free standing nanowires and Nanotubes**. International Baltic Sea Region Conference „Functional materials and nanotechnologies”, p. 54, Riga, Latvia, 2-4 April 2007
26. J. Andzane, J. Prikulis, J. Tobin, Z. Li, J. D. Holmes, D. Erts. **In situ investigation of Electrical Properties of Carbon Nanotubes Grown by Different Methods**. International Baltic Sea Region Conference „Functional materials and nanotechnologies”, p. 56, Riga, Latvia, 2-4 April 2007
27. J. Ancane, J. Andzane, J. Prikulis, J. D. Holmes, D. Erts. **In situ Investigation of Mechanical and Electrical Properties of Nanowires**. International Congress of Young Chemists „YoungChem 2006”, p. 84, Pultusk, Poland, 25th-29th October 2006

28. D. Erts, J. Andzane, A. Löhmus, R. Löhmus, J. Holmes. **In situ Characterisation of Nanowires and Nanotubes Inside Transmission Electron Microscope**. The 5th ESF-Nanotribology Workshop 23-27 September 2006, Antalya, Turkey, p. 46
29. J. Andzane, Z. Li, J. Tobin, M. Baxendale, J. Prikulis, H. Olin, J. D. Holmes, D. Erts. **Conductive, Field Emission and Mechanical Properties of Individual Single and Multiwalled Carbon Nanotubes**. The International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals, Trinity College, Dublin, Ireland, July 2-7, 2006
30. J. Andzane, Z. Li, J. Tobin, M. Baxendale, J. Prikulis, J. D. Holmes, D. Erts. **Conductive, Field Emission and Mechanical Properties of Single and Multiwall Carbon Nanotubes**. International Conference on Nanoscience and Technology ICN&T 2006. Basel/Switzerland, July 30 – August 4, 2006, p. 313–314

Autora ieguldījums

Šis darbs tika veikts sadarbībā ar vairākām zinātniskajām grupām. Šajā darbā veiktajos eksperimentos izmantotie nanovadi un nanocaurulītes tika sintezēti zinātniskajās grupās Korkas Universitātes Ķīmijas fakultātes Superkritisko šķidrumu centrā Īrijā un Josefa Stafana (Josef Stefan) institūtā Ļubļanā Slovēnijā.

Autors veica eksperimentus, izmantojot nanomanipulāciju sistēmas *in-situ* TEM un SEM, kā arī apstrādāja un apkopoja iegūtos eksperimentālos datus.

Eksperimentālie dati tika apspriesti un interpretēti Latvijas Universitātes Ķīmiskās fizikas institūta zinātniskajā grupā.

Raksti „**Two-terminal nanoelectromechanical devices based on germanium nanowires**”, „**Two-terminal nanoelectromechanical bistable switches based on molybdenum-sulfur-iodine molecular wire bundles**” un „**Selection of Application Specific Single and Multi-walled Carbon Nanotubes by in Situ Characterization of Conductive and Field Emission Properties**” ir balstīti uz autora iegūtajiem eksperimentālajiem datiem, un tie ir daļēji autora rakstīti; rakstu „**Two-input bistable controlled nanoelectromechanical switch based on the individual single-clamped Ge nanowire**” ir pilnībā rakstījis autors, un tas ir balstīts uz autora veiktajiem eksperimentiem.

Rakstā „**A New Supercritical Fluid Method for Growing Carbon Nanotubes**” tika izmantoti autora veikto oglekļa nanocaurulišu lauka emisijas mērījumu rezultāti, un rakstā „**Devices based on semiconductor nanowires**” tika izmantota daļa no autora eksperimentālajiem rezultātiem, kas ir saistīti ar nanoelektromehāniskajiem slēdžiem.

Galveno saīsinājumu saraksts.

BCNT – bambusa tipa oglekļa nanocaurulīte

CNT – oglekļa nanocaurulīte

MWCNT – daudzsienu oglekļa nanocaurulīte

NEM, NEMS – nanoelektromehāniskā sistēma, slēdzis

SEM – skenējošais elektronu mikroskops

SWCNT – viensienu oglekļa nanocaurulīte

TEM – transmisijas elektronu mikroskops

IEVADS

Pirms vairāk kā 50 gadiem, 1959. gadā, Ričards Feinmans, Nobela prēmijas laureāts fizikā, teica, ka fizikas likumos nav nekā, kas aizliedz cilvēkiem pārorganizēt atsevišķus atomus tā, kā viņi to vēlas: „... tas ir kaut kas, kas principā ir izdarāms, bet praksē tas nav izdarīts, jo mēs esam pārāk lieli.”[1]

Pēdējo 20 gadu laikā lietas ir mainījušas: jauns zinātnes virziens – nanotehnoloģija – ātri uzņem apgriezienus. Nanotehnoloģija ir zinātnes virziens par manipulācijām ar matēriju molekulārā un atomārā līmenī.

Nanozinātnē apskata struktūras, kuru ģeometriskie izmēri vismaz vienā dimensijā ir no 1 līdz 100 nanometriem, un attīsta materiālus un ierīces, kurām vismaz viena dimensija ir šajās robežās. Nanoizmēru apgabalā kvantu efekti kļūst ļoti svarīgi, un, izmantojot tos, nanoierīcēm parādas interesantas un unikālas īpašības, kuras stipri atšķiras no tām, kuras ir mikroierīcēm. Ir sagaidāms, ka nanoierīcēm būs ļoti zema enerģijas disipācija, aktīvā masa ar kārtu femtogrami, jaudas patēriņš attovatu līmenī un augsts integrācijas līmenis, kurš var sasniegt pat $2 \cdot 10^{12}$ elementus uz cm^2 [2].

Vairākas zinātniskās grupas ir jau nesen demonstrējušas tādas nanoelektroniskas ierīces kā tranzistori [3-7], loģiskās ķēdes [8], nanoelektromehāniskās ierīces [9-18] un sensori [19,20]. Šajā darbā galvenā uzmanība tiek pievērsta divpozīciju nanoelektromehānisku ON-OFF slēdžu izveidei. Šādas ierīces pamatā ir aktīvais elements (nanovads), kurš tiek pārslēgts starp ieejas elektrodiem.

Tipiski, NEM ierīču unikālās īpašības nosaka aktīvais elements, kurš parasti ir nostiprināts vienā vai abos galos un kura izmēri ir nanometru skalā. Visperspektīvākie materiāli izmantošanai aktīvajos elementos ir pusvadītāju nanovadi un oglekļa nanocaurulītes.

Pusvadītāju monokristālu nanovadi, pateicoties to elektrodošajām īpašībām, viendabīgajai ķīmiskajai un fizikālajai struktūrai, zemajai masai un labajai strukturālajai atkarījamībai, ir izcili kandidāti, lai tos izmantotu kā nanoelektromehānisku ierīču aktīvos elementus. Ir sagaidāms, ka šādi nanovadi ir spējīgi izturēt lielas temperatūras, kuras izraisa Džoula silšana, un lielus mehāniskos spriegumus, kas ir nepieciešams, lai izvairītos no ierīces atteices.

Izskatās, ka arī oglekļa nanocaurulītes, pateicoties to neparastajai tādu materiāla īpašību kā strukturālā izturība, mehāniskā elastība, laba elektriskā un termiskā vadāmība un mazs blīvums [21] kombinācijai, ir perfektas izmantošanai NEM ierīcēs. Pateicoties to lielajai garuma un diametra attiecībai, kas stipri palielina pielikto elektrisko lauku, oglekļa nanocaurulītes ir perspektīvi lauka elektronu emisijas emiteri [22-25].

Šajā darbā tika realizēti uz vienā galā nostiprinātiem germānija un molibdēna-sulfīda-jodīda nanovadiem balstīti divu termināļu ON-OFF nanoelektromehāniskie slēdži, un izpētīti un pilnveidoti realizēto nanoelektromehānisko ierīču darbības parametri. Tika arī izpētītas un salīdzinātas dažādu struktūru oglekļa nanocaurulīšu fizikālās īpašības, un noskaidrota oglekļa nanocaurulīšu fizikālo īpašību atkarība no to struktūras.

DARBA MĒRĶI UN MOTIVĀCIJA

ON-OFF nanoelektromehānisku sistēmu, kas ir balstītas uz vienā vai abos galos nostiprināta aktīvā elementa (individuālā nanovada, oglekļa nanocaurulītes vai grafēna) un kas ir releju, slēdžu vai RAM prototipi, izveide ir perspektīvais nanoelektronikas virziens.

Pie nanoizmēriem gravitācijas un inerces spēki vairs nenosaka iekārtas darbību tā, kā tas ir makroizmēru iekārtām. Viens no galvenajiem nosacījumiem NEM realizācijai ir adhēzijas spēka kontrole aktīva elementa/ieejas elektroda kontaktā, lai izvairītos no nanovada „pielipšanas” pie ieejas elektroda.

Vairākums NEM slēdžu un releju ir veidoti kā trīs termināļu iekārtas un izmanto trīs elektrodus: iztenci, noteci un aizvaru, kurš inducē lādiņu aktīvajā elementā [16,17,26,27]. Trīs termināļu konfigurācija parasti ir sasniedzama izmantojot foto- un elektronu litogrāfiju un tās ģeometrija pēc izveides nav maināma.

Divu termināļu (bez aizvara elektroda) NEM ierīces ir arī pētītas teorētiski [28,29] un eksperimentāli [11,12,13,16,17,27,30,31], un arī šis darbs ir koncentrēts uz to izpēti. Divu termināļu NEM ierīču priekšroka salīdzinājumā ar trīs termināļu ierīcēm ir to vienkāršākā konfigurācija, kurā tiek izmantoti tikai divi elektrodi. Šāda konfigurācija ir maināma un pielāgojama eksperimenta laikā. ON-OFF divu termināļu NEM slēdžus ar vairākiem elektrodiem līdz šim neviens nav demonstrējis.

Lai pielietotu nanovadus un oglekļa nanocaurulītes NEM ierīcēs, ir ļoti svarīgi zināt to fizikālas īpašības. Atsevišķi fakti par pusvadītāju nanovadu un oglekļa nanocaurulišu fizikālajām īpašībām ir pieejami [21,32,33], bet salīdzināt tos ir ļoti problemātiski, jo dažādas zinātniskās grupas izmanto dažādas sintēzes un fizikālo īpašību pētīšanas metodes. Ir nepieciešama dažādu individuālo nanovadu un nanocaurulišu īpašību izpēte identiskos eksperimentālos apstākļos, lai turpmāk tos varētu pielietot NEM ierīču izveidē.

Darba mērķi ir

- Demonstrēt uz individuāla aktīva elementa balstītus divu termināļu nanoelektromehāniskus slēdžus un izpētīt to darbības parametrus;
- Izpētīt pusvadītāju nanovadu un oglekļa nanocaurulišu piemērotību izmantošanai kā aktīvos elementus NEM ierīcēs.

Darba uzdevumi:

- Realizēt uz individuāla vienā galā nostiprināta pusvadītāja nanovada balstītu divu termināļu ON-OFF nanoelektromehānisko slēdzi, kurš strādā ar tiešo elektrisko vai mehānisko kontaktu starp aktīvo elementu un ieejas elektrodu, un izpētīt realizēta slēdža darbības parametrus un izturību. Slēdzim jāpārslēdzas starp ON un OFF pozīcijām, balansējot pievilksnās un atgrūšanās spēkus.
- Realizēt uz individuāla vienā galā nostiprināta pusvadītāju nanovada balstītu divu termināļu ON-OFF nanoelektromehānisko slēdzi, kuram ir vairāk par

-
- vienu ieejas elektrodu, un izpētīt tā darbības parametrus. Atrast ierīces darbības pilnveidošanas iespējas.
- Balstoties uz iegūtiem datiem, attīstīt adhēzijas spēka kontroles metodes NEM ierīces aktīvā elementa un ieejas elektroda kontakta vietā.
 - Izpētīt dažādu struktūru oglekļa nanocaurulišu fizikālas īpašības. Noskaidrot īpašību atkarību no oglekļa nanocaurulišu struktūras, kas dotu iespēju izvēlēties pareizo oglekļa nanocaurulišu tipu to pielietojumiem kā aktīvajiem elementiem NEM ierīcēs.

Darba zinātniskā novitāte:

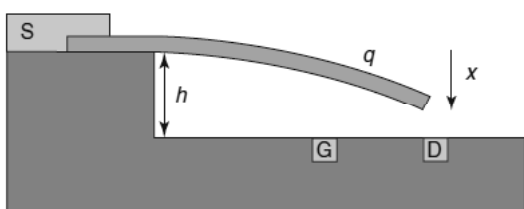
- Realizēti uz individuāla vienā galā nostiprināta germānija nanovada balstīti divu termināļu ON-OFF nanoelektromehāniskie slēdži.
- Realizēti uz individuāla vienā galā nostiprināta molibdēna-sulfīda-jodīda nanovada saišķa balstīti divu termināļu ON-OFF nanoelektromehānisko slēdži.
- Realizēti uz individuāla vienā galā nostiprināta germānija nanovada balstīti divu termināļu ON-OFF nanoelektromehāniskie slēdži, kuriem ir divi un trīs ieejas elektrodi.
- Izpētīti realizēto slēdžu darbības nosacījumi, un atrasti ceļi ierīču darbības pilnveidei.
- Vienādos apstākļos izpētītas dažādu struktūru oglekļa nanocaurulišu īpašības. Noskaidrota īpašību atkarība no nanocaurulišu struktūras. Balstoties uz iegūtajiem datiem, atbilstošie nanocaurulišu tipi tika izvēlēti turpmākajam pielietojumam NEM ierīcēs.

1. LITERATŪRAS PĀRSKATS

Tipisko nanoelektromehānisko ierīču piemēri ir nanoreleji un divu termināļu nanoslēdži (ON-OFF ierīces).

1.1. Nanoreleji

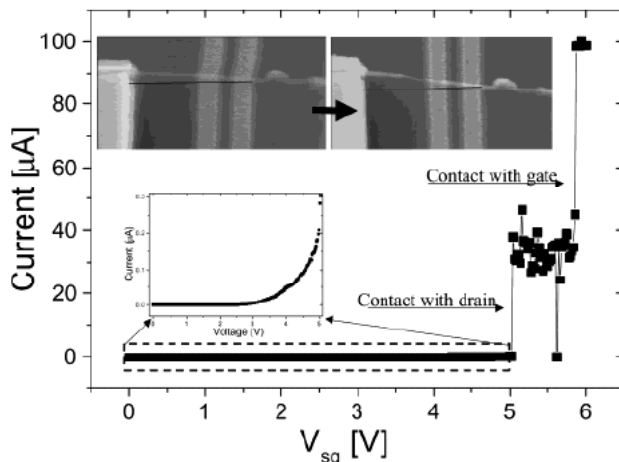
Nanoreleji strādā ka trīs termināļu ierīces, izmantojot trīs elektrodus: izteci, noteci un aizvaru, kurš inducē nekompensētu lādiņu aktīvajā elementā. Att. 1. ir parādīta tipiska uz oglekļa nanocaurulītes balstīta trīs termināļu releja shēma. Relejs bija teorētiski prognozēts un vēlāk eksperimentāli demonstrēts [34,10]. Oglekļa nanocaurulīte ir novietota uz silīcija terases un piestiprināta pie fiksēta elektroda S. Divi pārējie elektrodi izvietoti zem nanocaurulītes: aizvara elektrods G un noteces elektrods D.



Att. 1. Uz oglekļa nanocaurulītes balstīta trīs termināļu releja shēma. S – izteces elektrods, G – aizvara elektrods un D – noteces elektrods [32].

Pieliekot spriegumu aizvara elektrodam, oglekļa nanocaurulītē inducējas lādiņš. Rezultējošais elektrostatiskais spēks ievieļ nanocaurulītes galu kontaktā ar noteces elektrodu D šādā veidā noslēdzot elektrisko ķēdi. Kad aizvara spriegums tiek samazināts, oglekļa nanocaurulīte atslēdzas no noteces elektroda un atver ķēdi.

Att. 2. ir parādīta uz oglekļa nanocaurulītes balstīta releja eksperimentālā realizācija. No ierīces I-V raksturlīknes ir labi nolasāmi divi strāvas lēcieni. Pirmais lēcenis notika kad oglekļa nanocaurulīte ielēca kontaktā ar noteces elektrodu pie izteces-noteces sprieguma 0.5V un aizvara sprieguma 5V (Att. 2, voltampēru raksturlīkne). Šajā releja darbības posmā nanocaurulītes nobīde un strāva ķēdē tiek regulēta ar aizvara sprieguma kontroli. Otrais strāvas lēcenis pie sprieguma 6V atbilst momentam, kad oglekļa nanocaurulīte ieleca mehāniskā un elektriskā kontaktā ar aizvara elektrodu (Att. 2, voltampēru raksturlīkne). Ja nanocaurulīte nonāk mehāniskā kontaktā ar aizvara elektrodu, nanocaurulītes nobīde ir neatgriezeniska un nanocaurulīte paliek kontaktā ar aizvara un noteces elektrodus pat tad, kad spriegums tiek noņemts. (Att. 2, I-V augšējā bilde pa labi).



Att. 2. Uz oglekļa nanocaurulītes balstīts trīs termināļu nanorelejs. Augšējās bildes: ierīces konfigurācijas SEM attēls pirms (kreisajā pusē) un pēc (labajā pusē) tam, kad oglekļa nanocaurulīte ielēca tiešā kontaktā ar aizvara elektrodu. Ierīces voltampēru raksturliktne kurā ir redzami divi strāvas lēcieni: pirmais lēcieni atbilst kontakta momentam starp nanocaurulīti un noteces elektrodu; otrais strāvas lēcieni atbilst brīdim, kad nanocaurulīte ielēca tiešā kontaktā ar aizvara elektrodu, un ierīce kļūva neatgriezeniski sabojāta.[10]

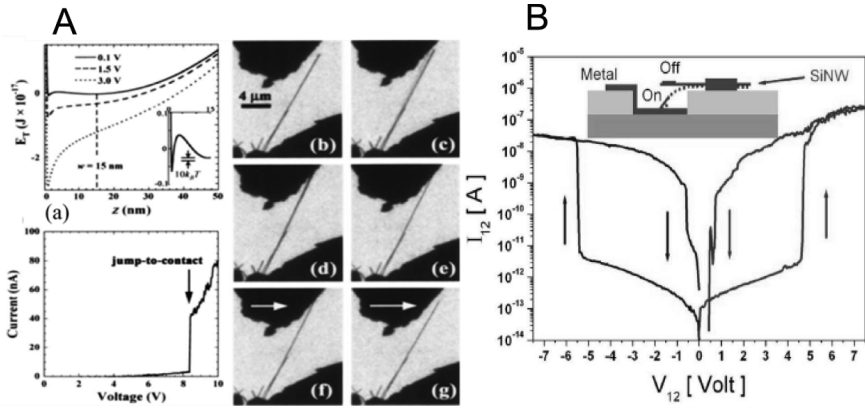
1.2. Divu termināļu NEM sistēmas

Divu termināļu NEM ierīces izmanto tikai divus pamata elektrodus (nav aizvara elektroda). Gan oglekļa nanocaurulītes, gan pusvadītāju nanovadi var tikt izmantoti kā šāda tipa ierīču aktīvie elementi. Divu termināļu ierīču darbības pamatprincips ir elektrostatisks, adhēzijas un elastības enerģiju balansēšana. Elektrostatiskā enerģija pievelk aktīvo elementu pie ieejas elektroda, lai tie nonāktu kontaktā (ON pozīcija). Deformētā nanovada elastības spēks ir salīdzināms ar adhēzijas spēku kontakta vietā un atslēdz aktīvo elementu no ieejas elektroda (OFF pozīcija).

1.2.1. Uz pusvadītāju nanovada balstītas divu termināļu NEM ierīces

Uz individuāliem germānija[12] un silīcija[35] nanovadiem balstītas nanoelektromehāniskās ierīces nesin tika realizētas dažās zinātniskās grupās.

Uz germānija nanovada balstīta nanoelektromehāniska un programmējama „read-only” atmiņa ir parādīta uz Att. 3A. (Ziegler et al [12]). Ierīcei ir divas pozīcijas. Starp diviem elektrodiem pieliktais elektrostatisks spēks ievilk nanovada galu kontaktā ar pretējo elektrodu (ON pozīcija). ON pozīcija ir skaidri novērojama gan vizuāli gan kā strāvas lēcieni uz voltampēru raksturliktnes.



Att. 3A. Uz germānija nanovada balstīta nanoelektromehāniska un programmējama „read-only” (tikai-nolasīšanas) atmiņa. a) ierīces voltampēru un enerģijas līknes; b-g) TEM attēli, kas secīgi ilustrē ierīces darbību [12]; B: uz silīcija nanovada balstīts ON-OFF slēdzis[35].

Nanovads paliek ON pozīcijā adhēzijas spēka dēļ pat tad, kad elektrostatiskais lauks starp elektrodiem ir izslēgts, jo adhēzijas spēks ir lielāks nekā deformētā nanovada elastības spēks. Iekārta var tikt izslēgta, izmantojot mehānisku nanovada nobīdi un atslēgšanu no elektroda vai arī karsējot sistēmu virs stabilitātes limita, lai pārvarētu Van der Vālsa pievilkšanas spēkus.

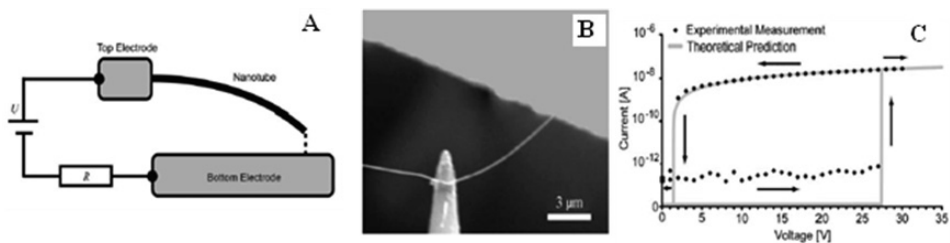
Uz silīcija nanovada balstīta ierīce ir parādīta Attēlā 3B. Ierīces pamatelements ir brīvā nanovada daļa. Kad ir pielikts spriegums starp to un apakšējo metāla elektrodu, tā elektrostatiskā spēka iedarbībā saliecas un pieskaras metāla elektrodam. Metāls ir nosēdināts arī uz nanovada gala virsmas, lai nodrošinātu labāku elektrisko kontaktu starp nanovadu un elektrodu, kad ierīce ir ON pozīcijā. Ierīce demonstrē atkārtojamu ON-OFF pārslēgšanu starp elektrodiem un augstu (virs 10000) on/off strāvu attiecību. Ierīces konfigurācija nav regulējama eksperimenta laikā.

1.2.2. Divu termināļu NEMS, kuru aktīvie elementi ir oglekļa nanocaurulītes

Uz oglekļa nanocaurulītes balstītas divu termināļu ierīces piemērs ir parādīts Att. 4 [11].

Ierīcei ir divas izteikti stabilas līdzsvara pozīcijas, kuras balstās uz elastības, elektrostatiskās un van der Vālsa enerģijas mijiedarbību, kā arī ir balstītas uz atgriezeniskās saites kontroles mehānismu, kas tiek realizēts caur virknē pieslēgtu pretestību R. „Augšējā” līdzsvara pozīcijā elektrostatiskais spēks ir līdzsvarots ar saliekta nanocaurulītes elastības spēku. Šajā pozīcijā ķēdē nav strāvas – OFF pozīcija. Ar pieliktās sprieguma vērtības palielināšanos, nanocaurulīte pievelkas pie apakšējā elektroda, ar kuru parādās lauka emisijas kontakts. „Apakšējā” līdzsvara pozīcija ir sasniedzama pateicoties spraugai starp nanocaurulītes galu un elektrodu, kuras lielumu nosaka

pie spraugas pieliktais spriegums, kurš tiek kontrolēts ar pretestības R palīdzību. Šajā pozīcijā ķēdē ir stabila strāva – ON pozīcija. Pārslēgšana starp pozīcijām ir iespējama regulējot pielikto spriegumu U, tādējādi mainot nanocaurulītes nolieci. Ierīces voltampēru raksturlikne ir parādīta Att. 4C. Eksperimentāli uzņemtā voltampēru raksturlikne ir ļoti labā saskaņā ar teorētiski prognozēto. Strāvas kontrolei ir virknē pieslēgta 0.98 GOhm pretestība. Oglekļa nanocaurulītes saīsinājums un pakāpeniskā degradācija tika novērota ar katru nākamo ierīces darbības ciklu. Ierīces darbība ir balstīta uz lauka emisijas strāvas un tiešs kontakts starp nanocaurulīti un elektrodu nav nepieciešams. Ja nanocaurulīte ienāk (ielec) tiešā kontaktā ar pretējo elektrodu, tā „pielip” pie elektroda, un ar to ierīce tiek neatgriezeniski sabojāta. Alternatīva metode kā izvairīties no nanocaurulītes „pielipšanas” ir pretējā elektroda pārklāšana ar izolatora slāni [17,31].



Att. 4. Uz oglekļa nanocaurulītes balstīta ierīce. A) ierīces shēma; B) ierīces TEM attēls; C) ierīces voltampēru raksturlikne [11].

1.3. Nanovadu un nanocaurulišu sintēzes metodes

Parastā germānija nanovadu un oglekļa nanocaurulišu sintēzes metode ir ķīmisko tvaiku nogulsnešanas metode (CVD).[36] CVD laikā pamatne tiek pārklāta ar metāliskām katalizatora daļiņām. Sintezēto nanovadu vai nanocaurulišu diametri ir atkarīgi no katalizatora daļiņu izmēra. Procesa laikā pamatne ir uzsildīta līdz 700°C. Lai iniciētu nanocaurulišu augšanu, reaktorā ielaiž divas gāzes: procesa gāzi (amonjaks, etilēns, etanols vai metāns oglekļa nanocaurulišu sintēzei un GeH₄) vai Ge(C₅H₅)₂ germānija nanovadu sintēzei). [21,37]. Nanovadi un oglekļa nanocaurulītes aug uz metāliskā katalizatora. Šis process joprojām nav līdz galam izpētīts. Katalizatora daļiņas var palikt uz nanovada vai uz nanocaurulītes pamatnes, vai uz nanovada/nanocaurulītes gala. Tas ir atkarīgs no adhēzijas starp katalizatora daļiņām un pamatni. Oglekļa nanocaurulišu audzēšanai komerciālos nolūkos metāliskās nanodaļiņas tiek samaisītas ar MgO vai Al₂O₃, lai palielinātu virsmas laukumu un panāktu lielāku sintēzes procesa efektivitāti. Nanovadu un nanocaurulišu struktūra un īpašības ir atkarīgas no CVD parametriem. Ir iespējams sintezēt viensienu un daudzsienu oglekļa nanocaurulītes, nanocaurulītes ar bambusam līdzīgu struktūru vai pildītas ar kādu materiālu (piemēram, ar C60 molekulām)[21]. Monokristālie germānija nanovadi var tikt audzēti dažādos virzienos un leģēti ar dažādām vielām

(piemēram, ar boru)[32]. Daudzsienu oglekļa nanocaurulītes un germānija nanovadi var tikt sintezēti arī ar superkritiskā šķidrums metodi un superkritisko plūstošā cieta-šķidra metodi. [raksts Nr. 5 no autora publikāciju saraksta] Molibdēna-sulfīda-jodīda nanovadi ir jauna nanovadu materiālu klase ar formulu $\text{Mo}_6\text{S}_{9-x}\text{I}_x$, kur S un I var būt dažādās proporcijās [38]. Nanovadi var tikt sintezēti vienkāršā viensoļu procesā un veido saišķus atkarībā no tā, kā tie ir audzēti.

1.4. Salīdzinājums starp pusvadītāju nanovadiem un oglekļa nanocaurulītēm kā NEM aktīvajiem elementiem

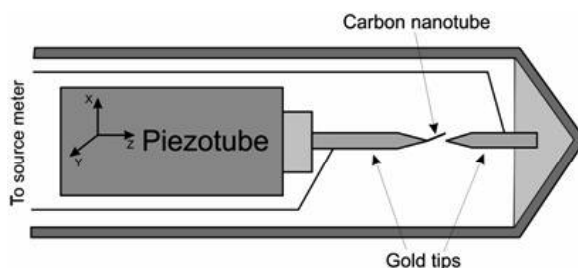
Pusvadītāju pielietojums var nodrošināt labāku aktīvā elementa stabilitāti, izmēru kontroli un elektriskās īpašības nekā oglekļa nanocaurulītes. Pusvadītāju nanovadu fizikālās īpašības ir labāk prognozējamas salīdzinājumā ar oglekļa nanocaurulīšu fizikālajām īpašībām, kuras ir stipri atkarīgas no nanocaurulīšu struktūras. Ir sagaidāms ka pusvadītāju nanovadu elektrovadāmība ir zemāka par oglekļa nanocaurulīšu elektrovadāmību, kas dabiski ierobežos strāvu NEM ierīces ķēdē, tā pasargājot nanovadu no sabrukšanas. Uz nanovadiem balstītas ierīces varēs izturēt augstākus darbības spriegumus salīdzinājumā ar uz oglekļa nanocaurulītēm balstītām ierīcēm, un nanovads netiks manāmi sabojāts. No otras puses, oglekļa nanocaurulītēm piemīt ļoti labas lauka elektronu emisijas īpašības, kas ļauj tās izmantot uz lauka emisijas strāvas balstītās NEM ierīcēs.

2. EKSPERIMENTOS IZMANTOTĀS IEKĀRTAS UN PARAUGI

Darbā tika izmantotas nanomanipulāciju sistēmas *in-situ* eksperimentu veikšanai transmisijas elektronu mikroskopā un skenējošā elektronu mikroskopā.

2.1. Nanomanipulāciju sistēma izmantošanai TEM

Nanomanipulāciju sistēma ir shematiski parādīta Att. 5. Keramiskais 3D pjezoskeneris ir iebūvēts TEM paraugu turētāja iekšpusē un ļauj regulēt zelta elektroda pozīciju attiecībā pret pretējo, fiksēto elektrodu. [39,40] Eksperimenti tika veikti transmisijas elektronu mikroskopā Philips TEM-301 ar darba spriegumu 80 kV. Transmisijas elektronu mikroskops ir aprīkots ar CCD videokameru eksperimentu vizualizācijai un attēlu iegūšanai. Pjezoskenera kustības kontrolei tika izmantots paštaisīts elektroniskais bloks.



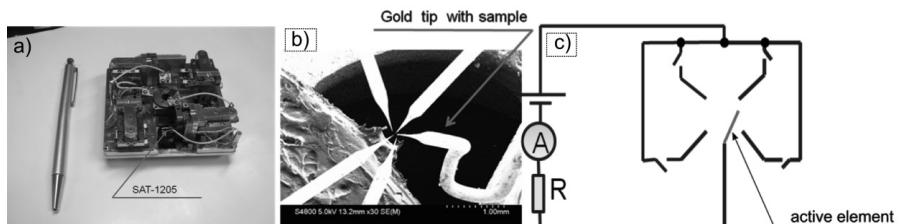
Att. 5. *In-situ* eksperimentos izmantotā TEM paraugu turētāja shematiskais attēls.

2.2. Nanomanipulāciju sistēma izmantošanai SEM

SmarAct 13D nanopozicionieru sistēma tika izmantota *in-situ* eksperimentu veikšanai lauka emisijas skenējošā elektronu mikroskopā. Att. 6. ir parādīts a) SmarAct sistēmas fotoattēls; b) uz nanopozicionieriem piestiprināti un gatavi *in-situ* eksperimentam zelta elektrodi (SEM attēls); c) eksperimenta elektriskās ķēdes shēma.

Spriegums un strāva abās nanomanipulāciju sistēmās tiek kontrolēti un reģistrēti ar sprieguma avotu/femtoampērmetru Keithley-6430. Mainīga papildus pretestība (10 kOhm – 0.98 GOhm) tika pievienota virknē strāvas kontrolei.

Eksperimentiem, kas ir saistīti ar mehāniskajām oscilācijām, tipiskais sistēmas skaļrunis SAT-1205 (Att. 6 (a)) tika novietots uz SmarAct sistēmas pamatnes, lai izraisītu mehāniskās oscilācijas ar dažu desmitu nanometru amplitūdu. Ar šo skaļruni visai sistēmai var uzspiest svārstības ar frekvenci no 1Hz – 2MHz.



Att. 6. a) SmarAct sistēmas fotoattēls; b) uz nanopozicionieriem piestiprināti n gatavi in-situ eksperimentam zelta elektrodi (SEM attēls); c) eksperimenta elektriskā shēma.

2.3. Paraugu sagatavošana

Praugi (nanovadi un oglekļa nanocaurulītes) tika pielīmēti ar elektrovadošo epoksīdlimi CW2400 zem optiskā mikroskopa ar 8x palielinājumu pie elektroķīmiski kodinātām adatām. Pulverveida oglekļa nanocaurulītes un $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķi pirms līmēšanas uz zelta adatām tika ielikti dihloretānā un tika apstrādāti ar ultraskaņu 15 minūtes. Germānija nanovadi tika audzēti uz virsmas un pielīmēti uz adatām tieši no šī virsmas „kā audzēti”, bez papildu apstrādes. Gatan PECS 682 kodināšanas un putināšanas iekārta tika izmantota paraugu apstrādei ar Ar joniem.

2.4. Nanovadu un nanocaurulīšu sintēzes metodes

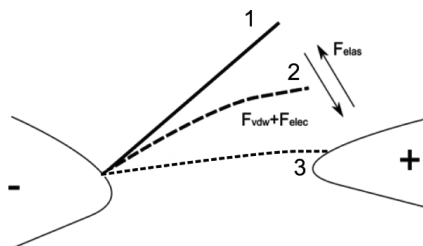
Germānija nanovadi tika audzēti uz zelta daļiņām ar superkritiskā šķidrums metodi [33]. $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadi tika ražoti viensoļu procesā un kā audzēti veido nanovadu saišķus [38].

Oglekļa nanocaurulītes, kuru fizikālās īpašības tika izpētītas šī darba laikā, tika sintezētas ar CVD un SCF metodēm. Nanocaurulīšu garumi bija starp 600 nm un 8 μm , un rādiusi starp 7 un 50 nm. Salīdzināšanai tika izpētītas neattīrītas daudzsienu oglekļa nanocaurulītes no Aldrich. Viensienu un daudzsienu CNTes tika sintezētas uz MgO atbalstītiem Co/Mo (cauruļu tipa nanocaurulītes) un Pd/Mo (bambusa tipa nanocaurulītes) katalizatoriem. MgO tika sagatavots no $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ sadalīšanās pie 450 °C 6 stundu laikā [41]. SCF audzētās nanocaurulītes tika sagatavotas uz MgO atbalstīta 3 masas% Co un 4 masas% Mo katalizatora.

3. EKSPERIMENTU REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. ON-OFF divu termināļu nanoelektromehāniskie slēdži (NEMS)

Kā aprakstīts iepriekš, divu termināļu ierīču priekšrocība salīdzinājumā ar trīs termināļu ierīcēm ir to vienkāršā konfigurācija, kurā tiek izmantoti tikai divi elektrodi. Divu termināļu NEM ierīces aktīvais elements var tikt pieslēgts pie ieejas elektroda (ON pozīcija) ar sprieguma pielikšanu starp ieejas elektrodu un parauga adatu, kurai pielīmēts aktīvais elements. Kad pieliktais spriegums starp elektrodu un parauga adatu sāk pieaugt no 0, aktīvais elements uzsāk vienmērīgu kustību ieejas elektroda virzienā (Att. 8-1) un nonāk tā saucamajā „lēciens kontaktā” pozīcijā (Att. 8-2). Šajā pozīcijā elektrostatiskais pievilšanās spēks ir līdzsvarā ar deformētā nanovada elastības atgrūšanās spēku. Pēc šī punkta, ja spriegums turpina pieaugt, nanovads nokļūst kontaktā ar pretējo elektrodu ar tūlītēju lēcieni (Att. 8-3).



Att. 8. „Lēcieni kontaktā” pozīcijas shematiskais attēls. Pēc sprieguma pielikšanas starp elektrodiem, aktīvais elements pārvietojas no starta pozīcijas (1 – nepārtraukta līnija) uz „lēciens kontaktā” pozīciju (2 – punktēta līnija). „Lēcieni kontaktā” pozīcijā aktīvā elementa elastības atgrūšanās spēks F_{elas} ir vienāds ar summāro pievilksanas spēku (van der Vālsa spēks F_{vdw} un elektrostatiskais spēks F_{elec}). Pēc tam, ja spriegums turpina pieaugt, aktīvais elements lec kontaktā ar ieejas elektrodu (3 – punktēta līnija).

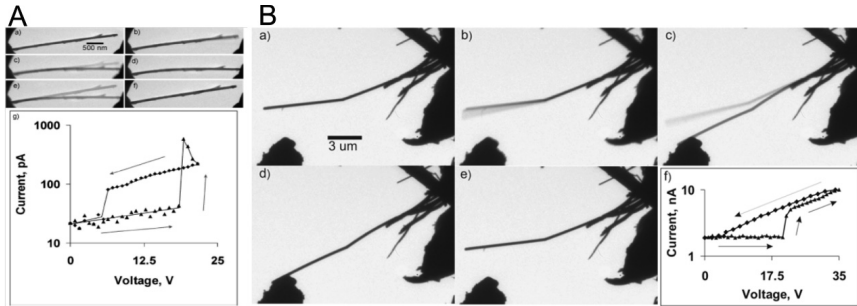
Ja pēc tam spriegums starp elektrodiem ir stipri samazināts vai nulle, aktīvā elementa elastības spēks (ja tas ir pietiekoši liels, lai pārvarētu adhēzijas spēku kontaktā vietā) atslēdz aktīvo elementu no ieejas elektroda (OFF pozīcija). Pēc tam cikls var tikt atkārtots.

Eksperimentu gaitā ir iespējams regulēt starpelektrodu distances izmantojot TEM un SEM nanomanipulatoru sistēmas, kas nav iespējams litogrāfiski izveidotu NEM gadījumā. Kad konstruē divu termināļu ON-OFF NEM ierīci, sākuma distancēm starp elektrodiem jābūt pietiekoši lielām, lai sasniegtu lielu deformētā aktīvā elementa elastības spēku, ar kā palīdzību izvairīties no aktīvā elementa „pielipšanas” pie ieejas elektroda. Dažos gadījumos lielas sākuma distances noved pie augstiem darbības spriegumiem un strāvām, tātad aktīvajam elementam jāiztur augstus spriegumus un Džoula silšanu. Aktīvā elementa struktūrai jābūt stabilai, lai aktīvais elements nesabojātos brīdī, kad tas ielec kontaktā ar ieejas elektrodu.

3.1.1. Divu termināļu slēdzis ar vienu ieeju

Uz pusvadītāju (germānija un molibdēna-sulfīda-jodīda) nanovada balstītie divu termināļu slēdži ar vienu ieejas elektrodu tika realizēti ar TEM nanomanipulatoru sistēmu (Att. 9). Darbības cikli tika atkārtoti 50 reizes katrai ierīcei; nanovadu kušana vai cita veida degradācija netika novērota eksperimentu laikā.

Sākumā nanovads ir novietots starta pozīcijā, un nanovada brīvais gals ir 300 nm attālumā no ieejas elektroda uz germānija nanovada balstītas ierīces gadījumā un 3 μm attālumā – uz $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķa balstītas ierīces gadījumā (Att. 9 A-a, B-a).



Att. 9. A: Uz individuāla germānija nanovada balstīts divu termināļu NEMS. a-f) TEM attēlu secība, kas ilustrē ierīces darbību; e) voltampēru raksturliktne; B: Uz individuāla $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķa balstīts divu termināļu NEMS. a-e) TEM attēlu secība, kas ilustrē ierīces darbību; f) strāvas-spieguma raksturliktne; 0.98 GOhm pretestība tika pieslēgta virknē strāvai ierobežošanai, lai nepieļautu nanovada bojāšanu.

Kad starp elektrodiem pieliktais spriegums tiek izvērsts (ar sākuma vērtību 0 V), nanovads kustas ieejas elektroda virzienā elektrostatiskā un van der Vālsa spēku iedarbībā (Att. 9 A-b, B-b). Nanovads lec kontaktā ar ieejas elektrodu pie sprieguma 19 V un no attāluma 250 nm uz germānija nanovada balstītas ierīces gadījumā un pie 20 V un no 2 μm – uz $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķa balstītas ierīces gadījumā (Att. 9 A-c, B-c). Kontakta momentā ir reģistrēts strāvas lēcienš no trokšņa līmeņa uz augšu (Att. 9 A-g, B-f). Pateicoties adhēzijas spēkam kontaktā, nanovads paliek kontaktā ar ieejas elektrodu (raksturliktnes augšējais zars, Att. 9 A-d,g; B-d,f) sprieguma pieaugšanas un pēc tam samazināšanas laikā līdz momentam, kad notiek nanovada atslēgšana nanovada elastības spēka iedarbības rezultātā (6V uz germānija nanovada balstītas ierīces gadījumā (Att. 9 A-e) un 1.2V uz $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķa balstītas ierīces gadījumā (Att. 9 B-e)). Nanovadu atslēgšana no ieejas elektroda ir skaidri nolasāma no voltampēru raksturliktnes, kā strauja strāvas samazināšanās līdz trokšņu līmenim (Att. 9 A-e, g; B-e, f).

Slēdžu darbībā iesaistītie spēki (elektrostatiskais un van der Vālsa) var tikt aprēķināti pielietojot sfēras-plaknes ģeometriju, kuru bieži izmanto atomspēku mikroskopijas aprēķinos [42,43]. Pielietojot šo modeli, elektrostatiskais spēks ir vienāds ar [42]:

$$F_{el} = \frac{\pi\epsilon\epsilon_0RU^2}{d}, \quad (1)$$

kur R ir nanovada rādiuss, U ir starp elektrodu un nanovadu pieliktais spriegums un d ir attālums starp nanovada galu un ieejas elektrodu. Van der Vālsa spēks ir vienāds ar [43]:

$$F_{vdw} = \frac{Ad}{12z_0^2}, \quad (2)$$

kur A ir Hamakera konstante Au-Ge kombinācijai ($A=2,5eV$) [43], d ir nanovada diametrs un z_0 ir atdalīšanas attālums. Jau dažu desmitu nanometru attālumā van der Vālsa spēkam nav nozīmīgas lomas nanovada kustībā, jo tas ir ļoti vājš salīdzinājumā ar elektrostatisko spēku, un to var neņemt vērā. Piemēram, pie „lēcienu kontaktā” attālumā (250 nm) un sprieguma 19 V van der Vālsa spēks aprēķināts germānija nanovadam pēc (2) formulas ir vairāk nekā par 3 kārtām vājāks nekā elektrostatisks spēks, kas ir aprēķināts pēc (1) formulas (attiecīgi $3,2 \cdot 10^{-13}N$ un $1,93 \cdot 10^{-9}N$).

Adhēzijas spēks nanovada un ieejas elektroda kontaktā var tikt aprēķināts pielietojot Karpika ievesto vispārīgo pārejas vienādojumu[44], kas ir ļoti laba Maugis-Dugdale adhēzijas modeļa aproksimācija [45,46]. Maugis teorijas piemērotība nanokontaktiem tika apstiprināta dažās zinātniskajās grupās [40,44]. Adhēzijas spēka vērtība var tikt atrasta, ja atrisina šādus vienādojumus:

$$\frac{a}{a_0(\alpha)} = \left(\frac{\alpha + \sqrt{1 - \frac{F}{F_c(\alpha)}}}{1 + \alpha} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

kur a ir kontakta rādiuss, a_0 kontakta rādiuss, kad slodze ir nulle, F ir slodze, F_c kritiskā negatīva slodze, un α ir pārejas parametrs, kuram ir jābūt intervālā $0 < \alpha < 1$. Pārejas parametrs var tikt aprēķināts izmantojot šādu vienādojumu:

$$\lambda = -0.924 \ln(1 - 1.02\alpha), \quad (4)$$

kur λ ir parametrs, kuru nedefinēja Maugis [42] un kurš ir vienāds ar:

$$\lambda = 2\sigma_0 \left(\frac{R}{\pi\gamma K^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (5)$$

kur σ_0 - adhēzijas spēks uz laukuma vienību starp divām virsmām, R - nanovada gala liekuma rādiuss, γ - adhēzijas darbs, un K - kombinētais nanovada un elektroda elastības modulis. K var tikt aprēķināts kā

$$K = \frac{4}{3} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}, \quad (6)$$

kur E_1 un E_2 ir nanovadu (Ge, Mo₆S₃I₆) un elektroda (Au) materiālu Junga moduļi (attiecīgi 112GPa[33], 40GPa[47] un 117Gpa[33]), un ν_1 un ν_2 ir ar katru vielu saistītie Puasona koeficienti (0.44 zeltam, 0.28 Mo₆S₃I₆ un germānijam [48]). Kon-

takta rādiuss a_0 , kad slodze ir nulle, un kritiskā negatīva slodze F_c var tikt izteikti caur Maugis bezdimensionālajām vienībām

$$F'_c(\lambda) = \frac{F_c}{\pi\gamma R} \text{ un } a'_0(\lambda) = a_0 \left(\frac{K}{\pi\gamma R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

un viegli aprēķināti pēc empīriskajiem vienādojumiem: [41]

$$a'_0(\lambda) = 1.54 + 0.279 \left(\frac{2.28\lambda^{1.3}-1}{2.28\lambda^{1.3}+1} \right) \quad (8)$$

$$F'_c(\lambda) = -\frac{7}{4} + \frac{1}{4} \left(\frac{4.04\lambda^{1.4}-1}{4.04\lambda^{1.4}+1} \right) \quad (9)$$

Adhēzijas spēks nanovada/elektroda kontaktā (Att. 9), aprēķināts pēc formulām (3)-(9), ir vienāds ar 445 nN uz germānija nanovada balstītai ierīcei un 190 nN uz $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķa balstītai ierīcei.

Cilindriska nanovada elastības spēks F_{elas} ir proporcionāls elastības koeficientam k un nanovada gala nobīdei no neitrālas pozīcijas x :

$$F_{elas} = -kx \quad (10)$$

Nanovada elastības koeficients ir atkarīgs no nanovada parametriem [49]:

$$k = \frac{12E_b I}{L^3}, \quad (11)$$

kur L ir nanovada garums, E_b nanovada Junga modulis un $I = \pi R^4/4$ šķērssriegzuma inerces moments, un R ir nanovada diametrs. Nanovada Junga modulis var tikt aprēķināts, nosakot tā ģeometriju un rezonanses frekvenci, kad tas ir nostiprināts vienā galā [50]. Tas tiek izdarīts, izmantojot TEM nanomanipulāciju sistēmu.

$$f_1 = \frac{\beta_1^2 D}{8\pi L^2} \sqrt{\frac{E_b}{\rho}}, \quad (12)$$

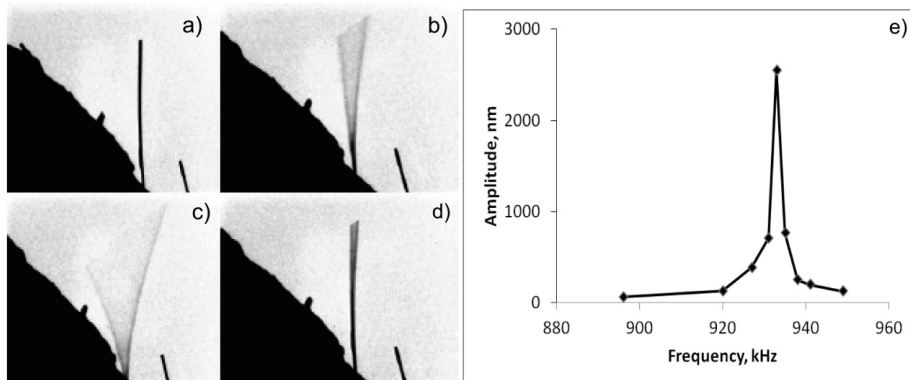
kur f_1 ir nanovada rezonanses frekvence pirmajai harmonikai, D un L ir nanovada diametrs un garums, ρ ir nanovada blīvums un E_b ir nanovada Junga modulis. β_1 koeficients pirmajai harmonikai kurš izriet no vienādojuma $\cos \beta_1 \cosh \beta_1 = -1$ un ir vienāds ar $\beta_1 = 1.875$.

Lai noteiktu nanovada rezonanses frekvenci, mainīgas frekvences oscilējošs spriegums tika pielikts pie TEM paraugu turētājā iebūvēta pjezoskenera, kas izraisīja pjezoskenera mehāniskas oscilācijas. Nanovada uzvedība frekvenču izveršanas laikā tika novērota vizuāli. Att. 10 a-d) parāda TEM attēlu secību, kurā ir redzams rezonējošais nanovads. Nanovada rezonanses kvalitātes faktors bija intervālā 225-235 (Att. 10 e).

Nanovadiem ar rādiusiem ap 50 nm un vairāk Junga modulis ir ap 140 GPa, kas ir tuvu vidējam germānija nanovadu Junga moduļim (117 GPa) [33]; $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķiem Junga modulis ir ap 40 GPa.

Saliekto nanovadu elastības spēks, kas ir aprēķināts pēc formulām (10)-(12), ir 460 nN germānija nanovadam un 525 nN $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķim. Germānija nanovada elastības spēka vērtība ir tikai dažus nanoņūtonus lielāka nekā adhēzijas

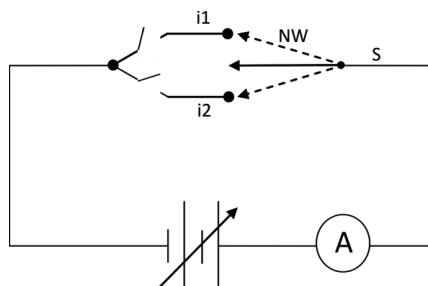
spēka vērtība nanovada/ieejas elektroda kontaktā, un ar to pietiek, lai atslēgtu nanovadu no ieejas elektroda. Uz $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķa balstītas ierīces gadījumā saišķa elastības spēks (525 nN) ir 2.5 reizes lielāks nekā teorētiski nepieciešams, lai pārvarētu kontakta adhēzijas spēku (190nN). Iespējams, ka šāda atšķirība ir tāpēc, ka adhēzijas spēki starp zeltu un $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadiem nevar tikt aprēķināti lietojot klasiskās kontakta teorijas, jo tās neņem vērā ķīmisko mijiedarbību starp zelta un sēra atomiem.



Att. 10. a-d) Rezonējoša nanovada TEM attēlu secība. Piķa rezonanses frekvence ir 933 kHz. e) Nanovada amplitūdas atkarība no frekvences. Rezonanses kvalitātes faktors ir 233.

3.1.2. Uz pusvadītāju nanovada balstītas ON-OFF divu termināļu ierīces ar diviem un trim ieejas elektrodiem

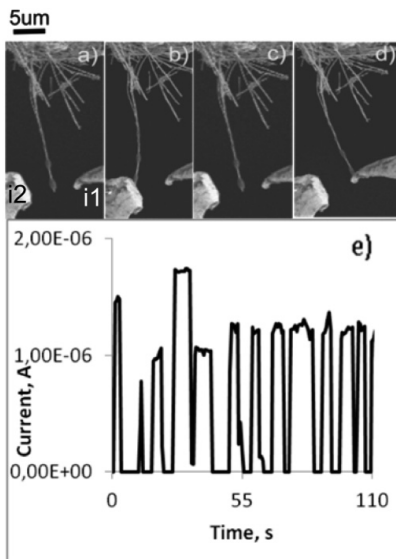
Uz germānija nanovada balstīta ierīce ar diviem ieejas elektrodiem tika realizēta, izmantojot nanomanipulatoru sistēmu SEM iekšpusē. Par NEM aktīvo elementu tika izvēlēts ar dabisku oksīda slāni pārklāts germānija nanovads. Eksperimenta shēma ir parādīta Att. 11.



Att. 11. Divu termināļu ierīces ar diviem ieejas elektrodiem shēma.

Aktīvais elements – germānija nanovads – var tikt pievienots pie ieejas elektroda i1 vai i2 un tad signāls var tikt nodots tālāk signāla līniju s.

Att. 12 ir parādīts uz germānija nanovada balstītais On-Off NEM slēdzis, kuram ir divi ieejas elektrodi. Sākumā nanovads ir novietots neitrālā pozīcijā starp diviem ieejas elektrodiem (Att. 12 a). Nanovads var tikt pieslēgts pie ieejas elektroda, ja pieliek spriegumu starp vajadzīgo ieejas elektrodu un parauga elektrodu (Att. 12 b, d). Kad spriegums ir izslēgts, nanovads atslēdzas no ieejas elektroda un atgriežas sākumā pozīcijā (Att. 12 c).

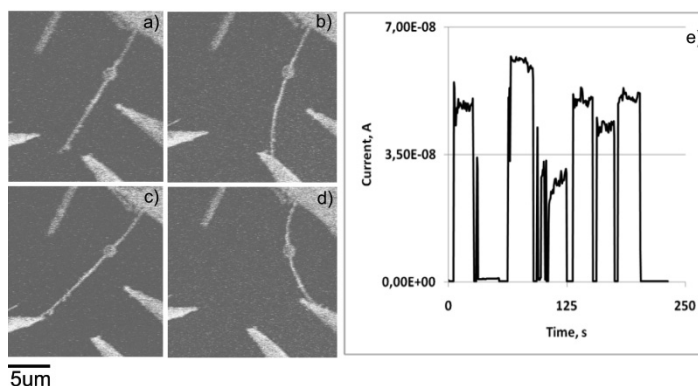


Att. 12. a-d) SEM attēlu secība, kas ilustrē slēdža darbību. a) nanovads neitrālajā pozīcijā starp diviem ieejas elektrodiem; b) nanovads kontaktā ar kreiso ieejas elektrodu; c) nanovads atgriežas neitrālajā pozīcijā pēc atslēgšanas no kreisā ieejas elektroda; d) nanovads kontaktā ar labo ieejas elektrodu; e) slēdža voltampēru raksturliktne.

Realizētajā NEM ierīcē nanovads lec kontaktā ar ieejas elektrodu pie sprieguma ap 25 V no 40 nm distances. Strāvas lēcieni tika reģistrēti katru reizi, kad nanovads saskārās ar ieejas elektrodu (Att. 12 e). Ierīces stabilai funkcionēšanai ir nepieciešams spriegums, kas ir nedaudz lielāks par spriegumu, pie kura nanovads lec kontaktā ar ieejas elektrodu, lai kompensētu nevēlamas fluktuācijas ierīces konfigurācijā. Parasti, ja nanovads lec kontaktā pie sprieguma 25-30 V, darbības spriegumam jābūt 40-45V. NEM ierīces darbības cikli tika atkārtoti vairāk par 50 reizēm bez aktīvā elementa manāmiem bojājumiem vai degradācijas.

Tika realizēts un parādīts (Att. 13.) arī uz germānija nanovada balstīts NEM slēdzis ar trim ieejas elektrodiem. Att. 13 a-d) SEM bildes: germānija nanovads neitrālā

līdzsvara pozīcijā un kontaktā ar katru no ieejas elektrodiem. Ierīces darbības spriegums ir ap 20 V, un strāvas lēcieni tika reģistrēti katru reizi, kad nanovads lēca kontaktā ar ieejas elektrodu (Att. 13 e).



Att. 13. a-d) SEM attēlu secība, kas ilustrē ierīces darbību; a) germānija nanovads neitrālā (līdzsvara) pozīcijā starp ieejas elektrodiem; b-d) germānija nanovads kontaktā ar ieejas elektrodiem; e) ierīces raksturlikne – strāva atkarībā no laika.

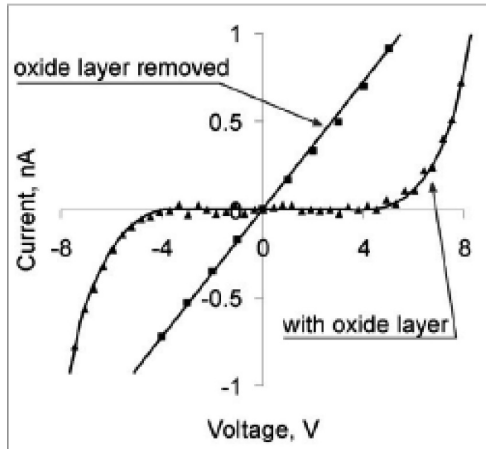
Uz pievilkšanās un atgrūšanās spēku balansēšanas balstīto divu termināļu On-Off ierīču trūkums ir tas, ka starpelektrodu distancēs jāpielāgo katram nanovadam individuāli. Ja ierīcei ir plānoti vairāk nekā divi elektrodi, ir ļoti sarežģīti pielāgot visas starpelektrodu attālumus tā, lai ierīce darbotos korekti. Šī problēma var tikt atrisināta, atrodot universālu nanovadu atslēgšanas metodi, kas nebūtu tik ļoti atkarīga no nanovada elastības spēka/adhēzijas spēka balansēšanas.

Iepriekš minētā ierīce ar trim ieejas elektrodiem tika realizēta izmantojot pilnveidotus darbības principus, un tās darbība tiks detalizēti aprakstīta nakamajā nodaļā.

3.2. NEM slēdžu darbības parametri

3.2.1. Dabiskā oksīda loma

Par NEM aktīvajiem elementiem izmantotie germānija nanovadi ir pēc savas dabas monokristāliski un pārklāti ar dabisku amorfā oksīda slāni. Oksīda slāņa biezums ir 4-7 nm. Germānija nanovadu divu punktu elektrovadāmības mērījumi parādīja nevadošo spraugu, kuras platums ir atkarīgs no oksīda slāņa biezuma, jo divu punktu mērījumos kontaktā starp nanovadu un pretējo elektrodu ir oksīda slānis. Nevadošās spraugas platums mainās no 2V (no -1V līdz 1V) līdz 12 V (no -6V līdz 6V). Germānija nanovada voltampēru raksturliknes piemērs ar nevadošo spraugu no -4V līdz 4 V ir parādīts Att. 14.



Att. 14. Nelineārā germānija nanovada voltampēru raksturlikne atbilst ar oksīdu pārklātam nanovadam; lineārā raksturlikne atbilst tam pašam nanovadam ar noņemtu oksīda slāni. Oksīda slānis tika noņemts ar Ar joniem.

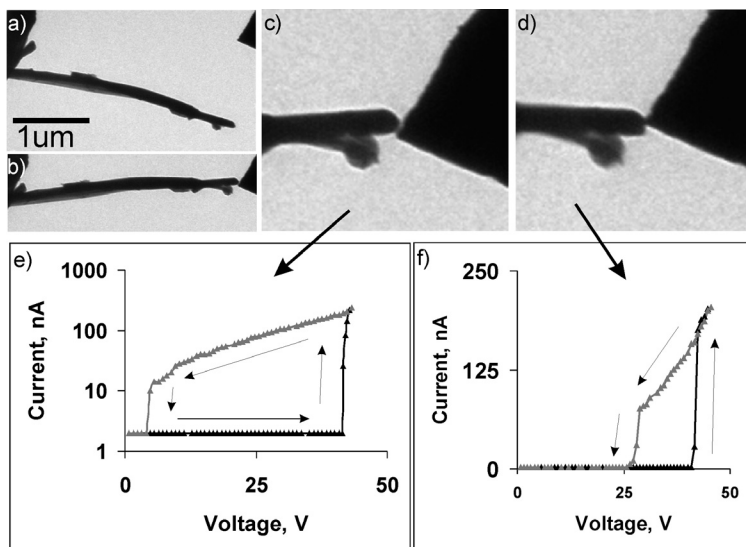
Ar oksīdu pārklāto germānija nanovadu īpatnējā pretestība pārsniedza germānija īpatnējo pretestību ($0.5 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) [51] no dažām reizēm līdz pat dažām kārtām. Lai šos vadus varētu pielietot NEM ierīcēs ar zemiem ieslēgšanas-izslēgšanas spriegumiem, oksīda slāni, lai uzlabotu nanovada voltampēru raksturliedzi un izvairītos no nevadošās spraugas, ir jānoņem no nanovadu virsmas. Oksīda slāni var noņemt kodinot nanovadus ar Ar joniem. Uzreiz pēc kodināšanas germānija nanovadu elektrovadāmība pieaug un parāda omisku raksturu bez nevadošās spraugas (Att. 14).

3.2.2. Kontakta laukuma un elektrodu materiāla loma

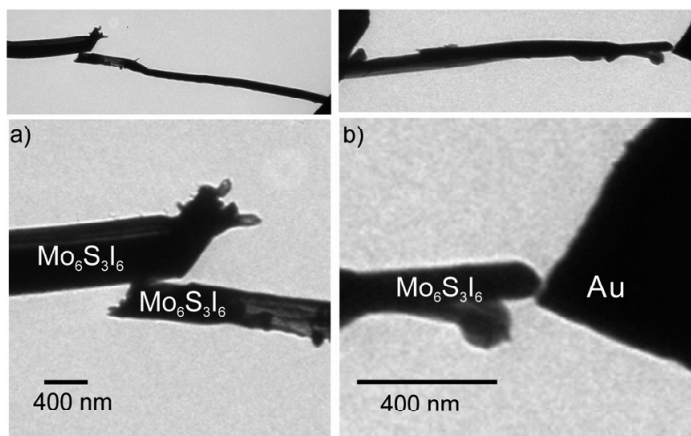
Nanovada atslēgšanas spriegums var tikt veiksmīgi mainīts, ja izmaina kontakta laukumu starp nanovadu un ieejas elektrodu, tādā veidā izmainot adhēzijas spēku starp nanovadu un ieejas elektrodu. Šis efekts ir parādīts ierīcei, kas ir balstīta uz $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķa (Att. 15). Šajā gadījumā, mainot kontakta laukumu starp nanovadiem un ieejas elektrodu no $\sim 100 \text{ nm}^2$ (Att. 15 c) uz $\sim 45 \text{ nm}^2$ (Att. 15 d), nanovadu saišķa atslēgšanās spriegums tiek pārbīdīts no 5V uz 27 V (Att. 15 e, f).

Adhēzijas spēks kontaktā ir atkarīgs arī no materiāliem, kas atrodas kontaktā. Adhēzijas spēka atkarība no elektroda materiāla ir parādīta ar $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ -Au un $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ - $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ kontaktu piemēriem un salīdzināta ar Ge-Au kontakta adhēziju. Att. 16 ir parādīti $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ -Au un $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ - $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ kontaktu laukumi.

Adhēzijas spēki, kas aprēķināti pēc formulām (3)-(9), ir aptuveni vienādi abiem kontaktiem (750 nN $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ - $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ kontaktā un 900 nN $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ -Au kontaktā), bet kontakta laukums starp diviem $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķiem ir 9 reizes lielāks par kontakta laukumu starp $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ un zelta elektrodu (attiecīgi 900 nm^2 un 100 nm^2). Salīdzinājumam: lai sasniegtu tikpat lielu (750 - 900 nN) adhēzijas spēku Ge-Au kontaktā, nepieciešamais kontakta laukums ir 1500 - 1900 nm^2 . Tātad adhēzijas



Att. 15. TEM attēli: a) $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķis un ieejas elektrods sākuma pozīcijās (pie nulles sprieguma); b) tas pats nanovadu saišķis kontaktā ar ieejas elektrodu; c) lielāka palielinājuma kontakta attēls kontaktam ar laukumu 100 nm^2 ; d) lielāka palielinājuma kontakta attēls kontaktam ar laukumu 45 nm^2 ; e) lielākā kontakta (c) voltampēru raksturliktne: lēciens kontaktā un atslēgšana notika pie spriegumiem 42 V un 5 V ; f) mazākā kontakta (d) voltampēru raksturliktne: lēciens kontaktā un atslēgšana notika pie spriegumiem 42 V un 5 V .



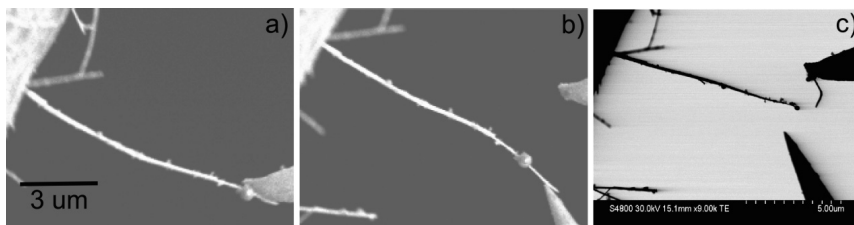
Att. 16. TEM attēli: a) $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6 - \text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ kontakts mazā un lielā palielinājumā; b) $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6 - \text{Au}$ kontakts mazā un lielā palielinājumā.

spēks Ge-Au kontaktā uz laukuma vienību ir divas reizes vājāks nekā $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ - $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ kontaktā un gandrīz divdesmit reizes vājāks nekā $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ -Au kontaktā. Tādēļ, izmantojot germānija nanovadus, var tikt sasniegti mazāki darbības attālumi salīdzinājumā ar $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadiem.

3.2.3. Nanovada atslēgšana ar elektrisko lauku

Lai veiksmīgi realizētu divu termināļu ierīces ar vairākiem ieejas elektrodiem, universāla un mazāk atkarīga no nanovada elastības spēka un ierīces konfigurācijas atslēgšanas metode ir nepieciešama. Visvienkāršākais veids kā pārslēgt nanovadu no viena ieejas elektroda uz otru ir pielikt pietiekoši stipru elektrostatisko lauku starp otro elektrodu un parauga adatu, lai pārvarētu adhēzijas spēku kontaktā starp nanovadu un pirmo elektrodu un atrautu nanovadu no kontakta. Att. 17 ir parādīta nanovada pārslēgšana no augšējā elektroda (Att. 17 a) pie apakšējā elektroda ar stipru elektrostatisko lauku.

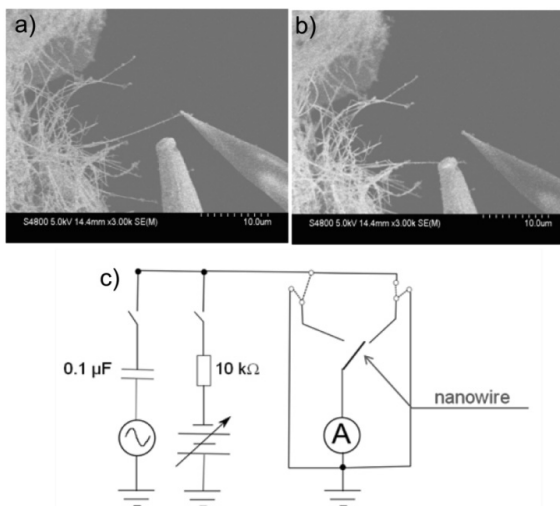
Att. 17 parādītajā gadījumā adhēzijas spēks kontakta vietā starp augšējo elektrodu un nanovadu ir aprēķināts pēc formulām (3)-(9) un ir vienāds ar 500 nN. Lai atslēgtu nanovadu, starp zemāko elektrodu un parauga adatu tika pielikts elektriskais lauks, un nanovada atslēgšana notika pie sprieguma 180 V. Šim spriegumam atbilstošais elektrostatiskais spēks ir vienāds ar 480 nN un ir pietiekami stiprs, lai atslēgtu nanovadu, ja ņem vērā arī saliekta nanovada elastības spēku. Nanovads tika veiksmīgi pārslēgts vienu reizi no augšējā uz apakšējo elektrodu (Att. 17 a, b) un pēc tam tika neatgriezeniski sabojāts pārslēgšanas procesā (Att. 17 c).



Att. 17. a) germānija nanovads kontaktā ar augšējo elektrodu; b) nanovads pārslēgts no augšējā elektroda pie apakšējā elektroda pie 180 V sprieguma, kas pielikts starp zemāko elektrodu un parauga adatu; c) Pārslēgšanas laikā sabojāta nanovada TEM attēls.

Nanovadu atslēgšanas metode ar elektriskā lauka palīdzību var tikt pilnveidota, un pārslēgšanas spriegums var tikt samazināts, ja vienlaicīgi ar elektrostatisko (DC) lauku pieliek mainīgo elektrisko (AC) lauku. Eksperimenta slēguma shēma un SEM attēli ir parādīti Att. 18. Nanovads lec kontaktā ar augšējo elektrodu pie sprieguma 12 V, kas ir pielikts starp augšējo elektrodu un parauga adatu, un „pielip” pie kontakta: Att. 18 a). Elastības spēks ir pārāk vājš, lai atslēgtu nanovadu. Starp elektrodiem pieliktais DC lauks ar vērtību pat līdz 200V neatslēdza nanovadu no kontakta ar augšējo elektrodu. Pēc tam AC un DC elektriskie lauki tika pielikti vienlaicīgi starp apakšējo elektrodu un parauga adatu (Att. 18c). Nanovada atslēgšana no augšējā

elektroda notika pie nanovada rezonanses frekvences (1.033 MHz) ar 22V DC un 23V pk-pk AC spriegumiem (Att. 18b). Šī procesa mehānika pagaidām nav noskaidrota. Hipotēze ir tāda, ka adhēzijas spēks kontaktā samazinās nanovada oscilāciju dēļ, un tāpēc atslēgšanas spriegums arī samazinās. Izmantojot šo metodi, atslēgšanas spriegums var tikt samazināts gandrīz par kārtu.



Att. 18. AC+DC nanovada atslēgšana. a) nanovads ielec kontaktā ar augšējo elektrodu pie pieliktā DC sprieguma 12V starp augšējo elektrodu un parauga adatu; b) nanovads atslēdzas no augšējā elektroda un pieslēdzas pie apakšējā elektroda pie vienlaicīgi pieliktiem 22V DC un 23V pk-pk 1,033 MHz AC spriegumiem starp apakšējo elektrodu un parauga adatu; c) eksperimenta slēguma shēma.

Šajā jomā ir nepieciešama turpmāka izpēte, īpaši, (1) elektrisko un mehānisko kontakta starp nanovadu un elektrodu skaitliskā modelēšana un (2) universālas nanovada atslēgšanas metodes, kura būs mazāk atkarīga no ierīces konfigurācijas un individuāla nanovada elastības spēka, attīstība.

3.2.4. Adhēzijas spēka „vājināšana” kontakta vietā

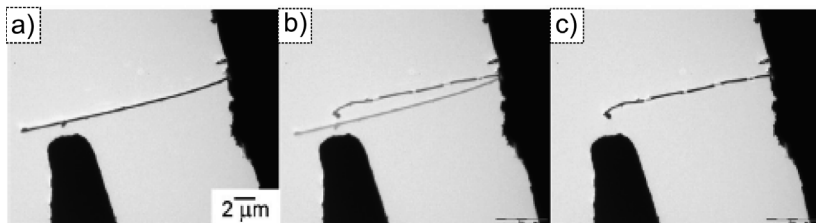
Cita metode nanovada pārslēgšanas starp elektrodiem ir mehānisko oscilāciju pielikšana ierīcei. Kā tas tika parādīts [52], mehānisko oscilāciju pielikšana manipulatoram ļauj kontrolēt („vājināt”) adhēzijas spēku un manipulēt ar mikrodaļiņām uz plakanas virsmas. Šī parādība nav pagaidām līdz galam izskaidrota, bet pats princips – mehānisko oscilāciju pielikšana ierīcei – var tikt izmantots, lai „vājinātu” adhēzijas spēku nanovada/ieejas elektroda kontaktā un sasniegtu nanovada atslēgšanu.

NEM ierīce ar trim ieejas elektrodiem, kas ir pieminēta iepriekšējā nodaļā (Att. 13), tika realizēta pielietojot mehānisko oscilāciju metodi. Sākumā nanovads lec kontaktā ar vienu no ieejas elektrodiem pie sprieguma 12 V un pēc tam var tikt

pārslēgts starp ieejas elektrodiem ar darba spriegumu 20 V (Att. 13 a-d). Attālumi starp elektrodiem un nanovadu nav pietiekoši lieli, lai sasniegtu pietiekami lielu elastības spēku nanovada atslēgšanai no kontakta. Ja nelieto mehāniskās oscilācijas, nanovads „pielīp” pie elektroda un nevar tikt atslēgts pat ar 200V spriegumu, kas ir pielikts pie cita ieejas elektroda. Bet, ja maiņspriegums ir pielikta pie skaļruņa (mehānisko oscilāciju avota), un mehāniskās oscilācijas tiek pārnestas no skaļruņa uz visu ierīci, nanovads veiksmīgi atslēdzas no elektroda, pie kura bija „pielīpis”, un lec kontaktā ar izvēlēto ieejas elektrodu, pie kura ir pielikts spriegums. Nanovada atslēgšana notiek pie noteiktas frekvences, kura atšķiras katram kontaktam un ir robežās no 1.5kHz līdz 3.5 kHz. Strāvas lēcieni tika reģistrēti katru reizi, kad nanovads saskarās ar ieejas elektrodu (Att. 13e). Šis parādības daba vēl nav saprasta, un skaitliska procesa modelēšana ir nepieciešama. Pielietojot mehānisko oscilāciju metodi adhēzijas relaksācijai, var izveidot NEM slēdžus ar vairākiem ieejas elektrodiem un mazām starpelektrodu distancēm.

3.2.5. Nanovadu izturība

Ar dabisko oksīdu pārklātie nanovadi bojājas pie spriegumiem ap 35 V un vairāk. Att. 19 ir parādīts ar oksīdu pārklāts nanovads pirms (Att. 17a) lēciena kontaktā, lēciena un degradācijas momentā (Att. 19b) un pēc lēciena (Att. 19c).



Att. 19. Ar oksīdu pārklāta germānija nanovada degradācija NEM ierīces darbības laikā; a) germānija nanovads pirms degradācijas; b) lēcieni kontaktā un degradācija, kad starp elektrodiem pieliktais spriegums ir 37V; c) tas pats nanovads pēc degradācijas.

Attēlā 19b ir skaidri redzams, ka germānija nanovada kodols ir izkūsis un sadalīts atsevišķos segmentos oksīda caurules iekšpusē. $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadi bojājas pie spriegumiem 25-35 V, bet dažos gadījumos šo nanovadu saišķu degradācija notika tikai pie 100 V lieliem spriegumiem. Pārsvārā nanovadu saišķi bojājas pa vidu, kas nozīmē ka tas notika nanovadu Džoula silšanas nevis defektu dēļ.

Ar Ar joniem apstrādāti nanovadi bojājas pie spriegumiem, kas ir augstāki par 10 V. Lai nanovadus ar noņemto oksīda slāni varētu lietot par NEM ierīču aktīviem elementiem, papildus pretestībai ir jābūt pieslēgtai virknē elektriskajā ķēdē strāvas ierobežojumam.

Strāvas blīvumi germānija nanovados un $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadu saišķos NEM darbības laikā bija ar vienu kārtu un intervālā $0.2\text{-}12\cdot 10^6$ A/m² germānijam un $7\cdot 10^6\text{-}3.2\cdot 10^5$ A/m² $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$.

3.3. Oglekļa nanocaurulišu izpēte pielietojumam NEM ierīcēs

Oglekļa nanocaurulītēm var būt dažādas struktūras, piemēram, caurulītes var būt viensienu, daudzsienu, ar bambusam līdzīgu struktūru, pildītas ar dažādiem materiāliem (piemēram, ar C_{60} fullerēniem) u. tml. Oglekļa nanocaurulišu fizikālās īpašības ir atkarīgas no to struktūras. Ir ļoti svarīgi zināt nanocaurulišu elektrovadošās un lauka emisijas īpašības to turpmākai lietošanai NEM ierīcēs, bet ir ļoti grūti salīdzināt dažādu zinātnisko grupu rezultātus, jo eksperimentālie apstākļi un sintēzes metodes, ko katra grupa pielieto, nav vienādas. Tāpēc ir nepieciešams izpētīt un salīdzināt dažādu struktūru oglekļa nanocaurulišu īpašības.

3.3.1. Oglekļa nanocaurulišu elektrovadāmība un izturība

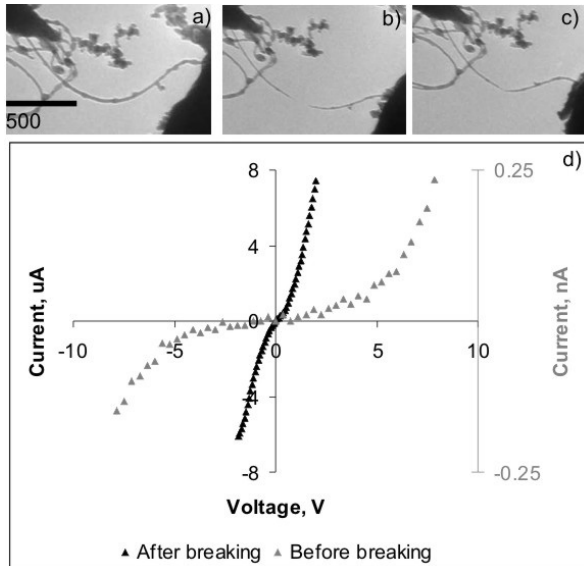
Oglekļa nanocaurulišu elektrovadāmības izpētē tika izmantota *in-situ* divu punktu mērījumu metode. Cauruļveida daudzsienu un viensienu oglekļa nanocaurulišu pretestība svārstījās diapazonā no 250 kOhm līdz 1 MOhm, kas sakrīt ar publicētiem datiem par CVD audzēto oglekļa nanocaurulišu divu punktu pretestības mērījumiem [21]. CVD audzētām nanocaurulītēm ar bambusa tipa struktūru, kā arī komerciālām un ar SCF metodi audzētām MWCNT nomērītās pretestības izrādījās par 3 kārtām lielākas (Tabula 1.). Šī fakta izskaidrojums varētu būt tāds, ka komerciālām un SCF audzētām oglekļa nanocaurulītēm ir fragmentāras ārējās čaulas ar lielu defektu skaitu. Kā tika ziņots iepriekš, nanocaurulišu ārējās čaulas ir dominējošās elektronu transportēšanā, un tās nosaka nanocaurulišu elektrovadāmību [53]. Divu punktu mērījumu laikā primārais kontakts starp nanocaurulīti un pretējo elektrodu notiek caur nanocaurulišu ārējo defektīvo čaulu (Att. 20 a).

Sākumā nanocaurulītei ir liela pretestība (Att. 20d, pelēkie trīsstūrīši un skala pa labi). Pēc sprieguma pieaugšanas līdz CNT sadegšanas robežai nanocaurulīte pārdeg pa vidu (Att. 20b) un pēc pārdegšanas izskatās tievāka. Hipotēze ir tāda, ka CNT ārējās čaulas iztvaiko pārdegšanas procesā laikā. Ja pēc CNT pārdegšanas savieno palikušos CNT galus kopā (Att. 20c), „salabotās” nanocaurulītes pretestība ir par 3-4 kārtām mazāka par pirms pārdegšanas nomērīto pretestību. Iespējams, ka tas notiek tāpēc, ka pēc CNT pārdegšanas un ārējo čaulu iztvaikošanas, elektronu transportēšana notiek caur bezdefektu iekšējām čaulām. Detalizētie CNT pārdegšanas parametri var tikt atrasti Tabulā 1.

Tabula 1.

Oglekļa nanocaurulišu elektrovadāmības un pārdegšanas parametri.

	Cauruļveida MWCNT	SWCNT	SWCNT pildītas ar C_{60}	MWCNT Aldrich	MWCNT SCF audzētas	MWCNT bambusa tipa
Pārdegšanas spriegums, V	4.0-4.5	4.5-6.0	5.0-11.0	0.7-5.0	0.7-8.0	≥ 25
Pārdegšanas strāva, μA	10-18	12-19	7-80	0.0005-0.005	0.0003-0.01	≥ 0.3



Att. 20. a) daudzsienu CNT divu punktu mērījumu laikā; b) CNT pārdeg pa vidu mērījumu laikā; c) atpakaļ savienoti pārdegušās CNT gali turpmākai elektrovadāmības izpētei; d) salīdzinājums starp voltampēru raksturliņņēm pirms (pelēkie trīsstūrīši, skala pa labi) un pēc (melnie trīsstūrīši, skala pa vidu) CNT pārdegšanas.

Ekspimentālie rezultāti parāda, ka oglekļa nanocaurulišu elektrovidošās īpašības ir atkarīgas no to struktūras. Ar C_{60} molekulām pildītām nanocaurulītēm ir labāka elektrovadāmība, un tās var tikt pielietotas NEM ierīcēs, kuras darbojas ar zemiem ieslēgšanās spriegumiem un tiešā mehāniskā un elektriskā kontaktā starp elektrodu un aktīvo elementu. Bambusa tipa nanocaurulišu elektro vadāmība ir sliktāka salīdzinājumā ar pārējām CNT struktūrām, tomēr šis nanocaurulišu tips ir spējīgs izturēt spriegumus līdz 25 V un vairāk un var tikt pielietots NEM ierīcēs, kuru darbības spriegums ir līdz 25 V. Nanocaurulišu ārējo čaulu sliktā kvalitāte var par dažām kārtām samazināt nanocaurulišu elektro vadāmību.

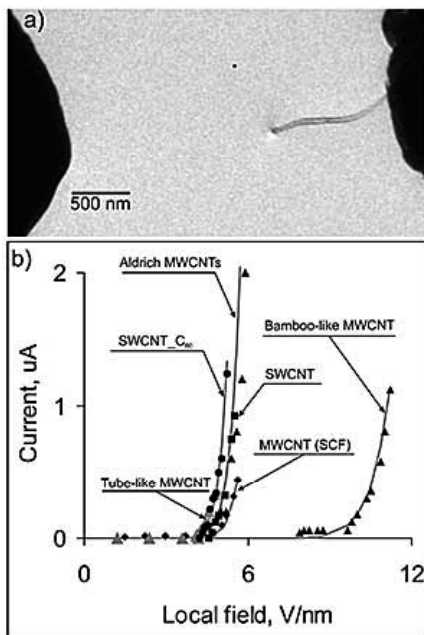
3.3.2. Oglekļa nanocaurulišu lauka emisijas īpašības

Lauka emisijas mērījumiem oglekļa nanocaurulīte tika pietuvināta pie pretējā elektroda izmantojot TEM nanomanipulāciju sistēmu, un lokālais elektriskais lauks līdz 10V/nm tika pielikts starp oglekļa nanocaurulīti un pretējo elektrodu (Att. 21 a). Lokālais elektriskais lauks var tikt aprēķināts kā

$$E = \frac{\gamma V}{d}, \quad (13)$$

kur V ir pieliktais spriegums starp elektrodēm, d ir starpelektrodu attālums un γ ir ģeometriskais lauka uzlabošanas faktors. Lauka uzlabošanas faktors ir atkarīgs no

nanocaurulītes ģeometriskajiem izmēriem un ir vienāds ar $(0.87L/r+4.5)$, kur L un r ir attiecīgi nanocaurulītes garums un rādiuss [53,54].



Att. 21. a) Oglekļa nanocaurulītes lauka emisijas mērījuma TEM attēls;
b) Salīdzinājums starp dažādu struktūru nanocaurulīšu lauka emisijas īpašībām. Cietas līnijas – Foulera-Nordheima (Fowler-Nordheim) tuvinājums.

Att. 21b ir parādīts dažādu struktūru CNT lauka emisijas strāvu salīdzinājums. Visos gadījumos lauka emisijas strāvas atkarība no lokālā elektriskā lauka labi sakrīt ar Foulera-Nordheima lauka emisijas modeli (Att. 21b, cietas līnijas). Pēc Foulera-Nordheima modeļa, lauka emisijas strāva ir atkarīga no emitēra virsmas lokālā lauka sekojošā veidā[55]:

$$I = A \frac{1.5 \cdot 10^{-6}}{\emptyset} \left(\frac{V}{d}\right)^2 \gamma^2 \exp\left(\frac{10.4}{\emptyset^2}\right) \exp\left(\frac{-6.44 \cdot 10^9 \emptyset^{1.5} d}{\gamma V}\right), \quad (14)$$

kur A ir emitēra virsmas laukums, \emptyset ir darba funkcija, V ir pieliktais spriegums, d ir starpelektrodu attālums, un γ ir lauka uzlabošanas faktors. Katram CNT struktūras tipam, izņemot bambusa tipa CNT, darba funkcija ir vienāda ar grafīta darba funkciju, kas ir 5.1 eV. Bambusa tipa nanocaurulītēm eksperimentālie dati sakrīt ar Foulera-Nordheima tuvinājumu gadījumā, ja darba funkcija ir vienāda ar 8.1 eV. Iespējams ka tā ir nanocaurulītes savienojumu, kas ir starp MWCNT čaulām, ietekme. Noteiktās vidējās piesātinātās lauka emisijas strāvas svārstījās intervālos no 10 nA

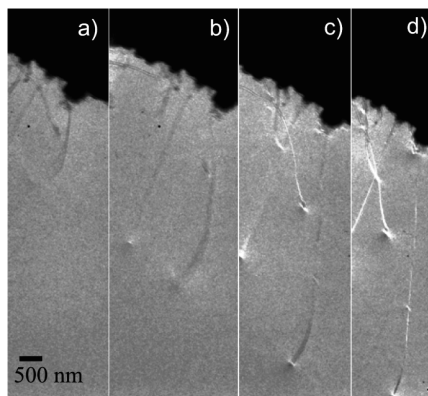
līdz 500 nA CVD audzētām cauruļveida daudzsienu nanocaurulītēm, no 100 nA līdz 1.5 μ A – bambusa tipa nanocaurulītēm un no 150 nA līdz 2 μ A – SCF sintezētām daudzsienu nanocaurulītēm. Komerčiāli pieejamām daudzsienu nanocaurulītēm (Aldrich) piemīt lielākas lauka emisijas strāvas, kuras sasniedz 10 μ A. Nanocaurulīšu lauka emisijas parametru salīdzinājums var tikt atrasts Tabulā 2.

Tabula 2.

Oglekļa nanocaurulīšu lauka emisijas īpašības

	MWCNT cauruļveida	SWCNT	SWCNT pildītas ar C ₆₀	MWCNT Aldrich	MWCNT SCF audzētas	MWCNT bambusa tipa
Lauka emisijas uzsākšanas lokālais lauks V/nm	1.5-4.1	3.0-4.9	3.5-4.0	4.5-5.5	2.5-4.5	8-10
Lauka emisijas strāva, μ A	0.01-0.5	0.1-5.0	0.1-10.0	5-15	0.15-2.0	0.1-1.5
Sadegšanas strāva, μ A	0.1-1.0	0.15-10	2.5-10	10-25	0.45-3.5	0.45-2.0
Sadegšanas lokālais lauks, V/nm	3-6	4-6	4-9	6-8	3.5-8	9-12
Sadegšanas vieta	kontaktā	kontaktā	Pakāpeniskā degradācija	Pakāpeniskā degradācija	kontaktā	kontaktā, pakāpeniskā degradācija
Lauka uzlabošanas faktors	20 \pm 5	110 \pm 30	90 \pm 10	105 \pm 15	135 \pm 30	150 \pm 30

Ar SCF metodi sintezētas daudzsienu nanocaurulītes parāda neparastu garuma palielinājumu (stiepšanos) lauka emisijas mērījumu laikā (TEM attēlu secība ir parādīta Att. 22).



Att. 22. a-d) TEM attēlu secība, kas ilustrē ar SCF metodi sintezēto daudzsienu oglekļa nanocaurulišu stiepšanos lauka emisijas mērījumu laikā.

Eksperimentālie rezultāti parāda, ka oglekļa nanocaurulišu lauka emisijas īpašības ir atkarīgas no nanocaurulišu struktūras. Ar C_{60} molekulām pildītām nanocaurulītēm ir uzlabotas lauka emisijas īpašības, bet mērījumu laikā tika novērota šo nanocaurulišu pakāpeniskā degradācija, kas nozīmē ka uz šī tipa nanocaurulītēm balstīto lauka emisijas NEM ierīču dzīvības laiks būs diezgan īss. Bambusa tipa nanocaurulišu lauka emisijas īpašības ir sliktākas salīdzinājumā ar citām oglekļa nanocaurulišu struktūrām, bet šādas nanocaurulītes labāk iztur stiprus elektriskos laukus. Ārējo čaulu kvalitāte gandrīz neietekmē nanocaurulišu lauka emisijas īpašības. Ar SCF metodi sintezētas daudzsienu nanocaurulītes var tikt izmantotas par lauka emisijas NEM ierīču aktīvajiem elementiem neparastās stiepšanās lauka emisijas laikā dēļ.

AIZSTĀVAMĀS TĒZES

1. Divu termināļu ON-OFF NEM slēdži var tikt realizēti izmantojot individuālus no viena gala nostiprinātus Ge un $\text{Mo}_6\text{S}_3\text{I}_6$ nanovadus kā aktīvus elementus. Nanovada atslēgšanas spriegumu var kontrolēt, ja mainīt nanovada/ieejas elektroda kontakta laukuma izmēru un/vai kontaktējošus materiālus.
2. Ge nanovadu dabiskais oksīda slānis spēlē ļoti nozīmīgu lomu divu termināļu NEM slēdžu darbībā. Ar oksīdu pārklātus nanovadus var izmantot slēdžos, kuri strādā uz augstākiem (līdz 45 V) spriegumiem. Ge nanovadi ar noņemtu oksīda pārklājumu ir labi kandidāti izmantošanai zemu spriegumu NEM slēdžos.
3. Divu termināļu ON-OFF slēdžu darba spriegumu var samazināt izmantojot tā saukto adhēzijas spēka „vājināšanu” nanovada/ieejas elektroda kontakta vietā. Adhēzijas spēka „vājināšana” var būt sasniegta pieliekot pie ierīces mehāniskās vai elektriskās oscilācijas.
4. Oglekļa nanocaurulītes ir daudzsološās kandidātes izmantošanai par aktīviem elementiem NEM slēdžos. Ir iespējams, ka daudzsienu oglekļa nanocaurulīšu elektrovadāmība ir atkarīga no nanocaurulītes ārējo čaulu kvalitātes, bet lauka emisijas īpašības nosaka nanocaurulīšu iekšējās čaulas. Ir iespējams, ka čaulu krustojumi bambusa tipa nanocaurulīšu iekšā padara tās izturīgākas bet ar vājākām elektriskām īpašībām. Atkarībā no struktūras, oglekļa nanocaurulītes var būt izmantotas tiešā kontakta vai lauka emisijas NEM slēdžos.

PATEICĪBAS

Es gribētu pateikt PALDIES visiem maniem pasniedzējiem, kolēģiem, maniem draugiem un manai ģimenei. Es esmu ļoti pateicīga manam zinātniskajam vadītājam Dr. Donātam Ertam par apmācību un trenēšanu. Tas bija viņš, kurš deva man iespēju pievienoties eksperimentālistu pasaulei, un tas bija viņš, kurš vienmēr palīdzēja man atrast pareizo ceļu, kad es biju pazudusī novada mežā ☺. Es esmu pateicīga manam kolēģim Dr. Jurim Prikulim par to, ka viņš nevienu reizi neatteicās atbildēt uz maniem jautājumiem un palīdzēt man. Es esmu pateicīga Dr. Aleksandram Lifšicam par ļoti noderīgām diskusijām un konsultēšanu teorētiskajā un eksperimentālajā fizikā. Paldies visiem maniem kolēģiem no Ķīmiskās fizikas institūta un īpaši Raimondam Meijam par draudzību un palīdzību. Es esmu ļoti pateicīga Jānim Ziemelim par perfekto tehnisko atbalstu un Dr. Ants Lohmus un Dr. Rynno Lohmus, un viņu zinātniskajai grupai no Tartu Universitātes Fizikas institūta par elegantiem tehniskajiem risinājumiem.

Es gribētu izteikt pateicību arī:

Dr. Justinam Holmsam un viņa zinātniskajai grupai no Korkas Universitātes un Dr. Draganam Mihailovičam un viņa zinātniskajai grupai par manos eksperimentos izmantoto paraugu sintezēšanu un nenovērtējamo piedalīšanos zinātnisko rakstu tapšanā.

Es gribētu izteikt pateicību Latvijas Universitātes Fizikas un Matemātikas fakultātes komandai un īpaši Ārijai Dēmei par informatīvo un morālo atbalstu.

Paldies Latvijas Universitātei un Eiropas Sociālajam Fondam par finansiālo atbalstu.

REFERENCES

1. Richard P. Feynman, Transcript of speech: „*There's plenty of room at the bottom*”, 1959.
2. D. Erts, B. Polyakov, H. Olin, E. Tuite. *Spatial and mechanical properties of dilute DNA monolayers on gold imaged by AFM*. J. Phys. Chem. B, 107, N15, 3591-3597 2003.
3. Tans S. J., Verschuere A. R. M., Dekker C., „*Room temperature transistor based on a single carbon nanotube*”, Nature, 393, 49-52, 1998.
4. Postma H. W. Ch., Teepen T., Yao Z., Grifoni M., Dekker C., „*Carbon Nanotube Single-Electron Transistors at Room Temperature*”, Science, 293, 76-79, 2001.
5. Auvray S., Derycke V., Goffman M., Filoramo A., Jost O., and Bourgoin J.-P., „*Chemical Optimization of Self-Assembled Carbon Nanotube Transistors*”, Nano Lett., 5(3), 451-455, 2005.
6. Xiao K., Liu Y., Hu P., Yu G., Fu L., and Zhu D., „*High performance field-effect transistors made of a multiwall CNx/C nanotube intramolecular junction*”, Appl. Phys. Lett., 83(23), 4824-4826, 2003.
7. Weitz R. T., Zscheschang U., Effenberger F., Klauk H., Burghard M., Kern K., „*High-Performance Carbon Nanotube Field Effect Transistors with a Thin Gate Dielectric Based on a Self-Assembled Monolayer*”, Nano Lett., 7, 22-27, 2007.
8. Bathold A., Hadley P., Nakanishi T., Dekker C., „*Logic Circuits with Carbon Nanotube Transistors*”, Science, 294, 1317-1320, 2001.
9. Rueckes T., Kim K., Joslevisch E., Tseng G. Y., Cheung C., and Lieber C. M., „*Carbon Nanotube-Based Nonvolatile Random Access Memory for Molecular Computing*”, Science, 289, 94, 2000.
10. Lee S.W, Lee D.S., Morjan R.E., Jhang S.H., Sveningsson M., Nerushev O. A., Park Y.W., and Campbell E.E.B, „*A Three Terminal Carbon Nanorelay*”, Nano Lett. 4, 2027, 2004.
11. Ke C., Espinosa H. D., „*In Situ Electron Microscopy Electromechanical Characterization of a Bistable NEMS Device*”, Small, 2(12), 1484 – 1489, 2006.
12. Ziegler, K. J.; Lyons, D. M.; Holmes, J. D.; Erts, D.; Polyakov, B.; Olin, H.; Olsson, E.; Svensson, K. *Bistable nanoelectromechanical devices*. Appl. Phys. Lett. 84, 4074, 2004.
13. Li, X. et al. Precise Alignment of Single Nanowires and Fabrication of Nanoelectromechanical Switch and Other Test Structures IEEE Trans.Nanotechnol. 6, 256, 2007.
14. Viasnoff, V.; Meller, A.; Isambert, H. *DNA nanomechanical switches under folding kinetics control* Nano Lett. 6, 101, 2006.
15. Jang, J. E. et al. *Nanoscale memory cell based on a nanoelectromechanical switched capacitor*. Nat. Nanotechnol. 3, 26, 2008.
16. Jang, W. W. et al. Fabrication and characterization of a nanoelectromechanical switch with 15-nm-thick suspension air gap Appl. Phys. Lett.92, 103110, 2008.
17. Jang, J. et al. Nanoelectromechanical switches with vertically aligned carbon nanotubes Appl. Phys. Lett. 87, 163114, 2005.
18. Park M., Cola B., Siegmund T., Xu J., Maschmann M. R., Fisher T. S., and KimH., „*Effects of a Carbon Nanotube Layer on Electrical Contact Resistance Between Copper Substrates*”, Nanotechnology, 17, 2294–2303, 2006.
19. Brian H., Halsall H.B., Dong Z., Jazieh A., Tu Y., Wong D., Pixley S., Behbehani M.I, and Schulz M. J., „*A Carbon Nanotube Needle Biosensor*”, J. Nanosc. Nanotechn., 7, 2293–2300, 2007.
20. Melosh et al. *Ultra High Density Nanowire Lattices and Circuits*. Science 300, 112, 2003.
21. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Avouris Ph. „*Carbon Nanotubes*” Topics in Applied Physics, Springer Verlag, Berlin, 80, 1 – 430, 2001.

22. Wong Y. M. et al, „*Field Emitter Using Multiwalled Carbon Nanotubes Grown on the Silicon Tip Region by Microwave Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition*”, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 21(1), 391-394, 2003.
23. Bonard J. M., Weiss N. Kind H., Stockli T., Forro L., Kern K, Chatelain A., „*Tuning the Field Emission Properties of Patterned Carbon Nanotube Films*”, *Adv. Mater.*, 13(3), 184-188., 2001.
24. Wang Q. H., Corrigan T. D., Dai J. Y., Chang R. P. H., Krauss A. R., „*Field Emission from Nanotube Bundle Emitters at Low Fields*”, *Appl. Phys. Lett.*, 70(24), 3308-3310, 1997.
25. Pan Z. W. et al, „*Amorphous Carbon Nanowires Investigated by Near-Edge-x-Ray-Absorption-Fine-Structures*”, *J. Phys. Chem. B*, 105(8), 1519-1522, 2001.
26. Hwang, H. J.; Kang, J. W. *Carbon nanotube based nanoelectromechanical switch* *Physica E* 27, 163, 2005.
27. Chen, Z.; Tong, L.; Wu, Z.; Liu, Z. Fabrication of electromechanical switch using interconnected single-walled carbon nanotubes *Appl. Phys. Lett.* 92, 103116, 2008.
28. Dequesnes, M.; Rotkin, S. V.; Aluru, N. R. *Calculation of pull-in voltages for carbon-nanotube-based nanoelectromechanical switches* *Nanotechnology* 13, 120, 2002.
29. Bulashevich, K. A.; Rotkin, S. V. *Nanotube devices: microscopic model*. *JETP Lett. (Engl. Transl.)* 75, 205, 2002.
30. Akita, S. et al, *Nanotweezers Consisting of Carbon Nanotubes Operating in an Atomic Force Microscope* *Appl. Phys. Lett.* 79, 1691, 2001.
31. Dujardin, E.; Derycke, V.; Goffman, M. F.; Lefe'vre, R.; Bourgoin, J. P. *Self-assembled switches based on electroactuated multiwalled nanotubes* *Appl. Phys. Lett.* 87, 193107, 2005.
32. Damon A. Smith, Vincent C. Holmberg, and Brian A. Korgel *Flexible Germanium Nanowires: Ideal Strength, Room Temperature Plasticity, and Bendable Semiconductor Fabric* www.acsnano.org Vol. 4 No. 4 2356-2362, 2010.
33. Ngo L.T., Alme'cija D., Sader J.E., Daly B., Petkov N., Holmes J.D., Erts D., Boland J., *Ultimate-Strength Germanium Nanowires* *Nano Lett.* 6-12, 2964, 2006.
34. Kinaret, J; Nord, T. And Viefers, S. *A Carbon Nanotube Based Nanorelay*, *Appl. Phys. Lett.* 82, 1287, 2003.
35. Q. Li et al, „*Precise alignment of single nanowires and fabrication of nanoelectromechanical switch and other test structures*”, *IEEE Trans. Nanotech.*, vol. 6, no. 2, pp. 256-262, 2007.
36. Park J.-H., Sudarshan T.S. *Chemical Vapor Deposition*, ASM International, 2001.
37. Mathur S., Shen H., Sivakov V. And Werner U. „*Germanium nanowire and Core-Shell Nanostructures by Chemical Vapor Deposition of [Ge(C₅H₅)₂]*”, *Chem. Mater.* 16, 12, 2449, 2004.
38. D. Vrbanic et al., *Air-stable monodispersed Mo₆S₃I₆ nanowires* *Nanotechnology* 15, 635, 2004.
39. Erts D., Olin H., Ryen L., Olsson E., Thölen A. *Sharvin and Maxwell conductance in gold point contacts using TEM-STM* *Phys. Rev. B* 61, 12, 725, 2000.
40. Erts D., Löhmus A., Löhmus R., Olin H., Pokropivny A.V., Ryen L., Svensson K. *Force interactions and adhesion of gold contacts using a combined atomic force microscope and transmission electron microscope*. *Appl. Surf. Sci.* 188, 460, 2002
41. Li Q. W., Yan H., Cheng Y., Zhang J., Liu Z. F., „*A Scalable CVD Synthesis of High-Purity Single-Walled Carbon Nanotubes With Porous MgO as Support Material*”, *J. Mater. Chem.*, 12(4): 1179-1183, 2002.
42. Terris B. D., Stern J. E., Rugar D., Mamin H. J. *Contact electrification using force microscopy* *Phys. Rev. Lett.* 63 2669, 1989.

43. Visser J., On Hamaker constants: A comparison between Hamaker constants and Lifshitz-van der Waals constants *Advan. Colloid Interface Sci.*,3, 331, 1972.
44. Carpick R. W., Ogletree D.F, Salmeron M., *A General Equation for Fitting Contact Area and Friction vs Load Measurements* *J. Colloid Interface Sci.* 211, 395, 1999.
45. Maugis D., *Adhesion of spheres: The JKR-DMT transition using a Dugdale mode* *J. Colloid Interface Sci.* 150, 243, 1992.
46. Lantz, M. A.; O'Shea, S. J.; Welland, M. E. *Simultaneous force and conduction measurements in atomic force microscopy* *Phys. Rev. B* 56, 15345, 1997.
47. Kis A., Csanyi G., Vrbancic D., Mrzel A., Mihailovic D., Kulik A.J. and Forro L. *Nanomechanical Investigation of Mo6S9-xIx Nanowire Bundles*, *Small* 3, 1544-8, 2007
48. Wortman J.J., Evans R.A., „*Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio in Silicon and Germanium*” *J. Appl. Phys.* 36, 153, 1965.
49. Timoshenko S., and Goodier J. *Theory of Elasticity* (New York: McGraw-Hill), 608, 1970.
50. Meirovich L., *Element of Vibration Analysis*. McGraw-Hill, NewYork, 1986.
51. Cutnell, John D. & Johnson, Kenneth W. *Physics Fourth Edition*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
52. Watanabe T., Iwasaki M., Matsumura H., and Jiang Z.W. *Study on Adhesion Force Reduction and State Estimation by Piezo-transducer*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009.
53. Collins P.G., Arnold M.S., Avouris P., „*Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown*”, *Science*, 292 (5517), 706 – 709, 2001.
54. Brodie I., and Spindt C., „*Vacuum Microelectronics*”, *Adv. Electron. Electron. Phys.* 83, 1, 1992.
55. Tuggle D.W., Jiao J., and Dong L.F. „*Field emission current fluctuations from isolated carbon nanotubes*” *Surf. Interface Anal.* 36, 489–492, 2004.