



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

**Promocijas darba
kopsavilkums**

Līga Jasulaņeca

**INTEGRĒTI
NANOELEKTROMEHĀNISKI
SLĒDŽI DARBAM ISTABAS UN
KRIOGĒNĀS TEMPERATŪRĀS**

Rīga 2024



LATVIJAS UNIVERSITĀTE

FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE

Līga Jasulaņeca

INTEGRĒTI NANOELEKTROMEHĀNISKI SLĒDŽI DARBAM ISTABAS UN KRIOGĒNĀS TEMPERATŪRĀS

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Doktora grāda (PhD) iegūšanai dabaszinātnēs

Fizikas un astronomijas nozarē

Materiālu fizikas apakšnozarē

Rīga 2024

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātē Ķīmiskās fizikas institūtā laika posmā no 2020. gada līdz 2024. gadam.



NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



MikroTik

Šis darbs ir izstrādāts ar FLPP lzp-2019/1-0349, ESF 8.2.2.0/20/I/006 projektu un LU Fonda administrētās MikroTik stipendijas atbalstu.

Darba forma: disertācija fizikas un astronomijas nozarē, materiālu fizikas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs: Prof. *Dr. chem.* **Donāts Erts**, Latvijas Universitātes Ķīmiskās fizikas institūts, Latvija.

Darba recenzenti:

- 1) Prof. *Dr. phys.* **Anatolijs Šarakovskis**, Latvijas Universitāte, Latvija;
- 2) Prof. *Dr. sc. ing.* **Andris Šutka**, Rīgas Tehniskā Universitāte, Latvija;
- 3) Asoc. Prof. *Dr. phys.* **Rynno Lohmus**, Tartu Universitāte, Igaunija.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Universitātes Fizikas un astronomijas zinātņu nozares promocijas padomes atklātajā sēdē 2024. gada 17. septembrī plkst. 14.00 LU Cietvielu fizikas institūtā, Ķengaraga ielā 8, Rīgā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Raiņa bulvārī 19.

LU Fizikas un astronomijas zinātņu nozares promocijas padomes

Priekšsēdētājs: Prof. *Dr. habil. phys.* **Linards Skuja**

Sekretāre: **Sintija Siliņa**

© Līga Jasulaņeca, 2024

© Latvijas Universitāte, 2024

ISBN 978-9934-36-258-3

ISBN 978-9934-36-259-0 (PDF)

ANOTĀCIJA

Palielinoties pieprasījumam pēc portatīvām ierīcēm ar mazu jaudas patēriņu, tiek meklētas alternatīvas skaitļošanas un loģikas pamatelementam - elektroniskajam tranzistoram. Naoelektromehāniskie (NEM) slēdži ir ierīces, kuru noplūdes strāva izslēgtā stāvoklī ir niecīga, jo strāvas signāla pārvades komponentes ir fiziski atdalītas viena no otras. Šo slēdžu darbības izpēti ne tikai istabas un augstās temperatūrās, bet arī zemās temperatūrās motivē potenciālie pielietojumi kosmosa un kvantu tehnoloģijās.

Ar augšupejošo pieeju sintezētas viendimensionālas (1D) nanostruktūras tiek uzskatītas par nākotnes elektronikas komponentēm to augstās kvalitātes un materiālu daudzveidības dēļ, taču to morfoloģijai un elektromehāniskajām īpašībām piemīt liela izkliede. To pielietošanai integrētos NEM slēdžos nepieciešama parametru kontrole un savietojamība ar esošajām planārajām tehnoloģijām.

Šajā darbā CuO, Bi₂Se₃ un Ge pusvadītāju 1D nanostruktūras pētītas kā aktīvie elementi NEM slēdžos ar mērķi izstrādāt slēdžu tehnoloģiju un izmantot ar augšupejošo metodi audzētu pusvadītāju nanostruktūru unikālās īpašības slēdžu pielietojumu paplašināšanai. Darbā ietverta nanostruktūru sintēze, morfoloģijas, elektrisko un mehānisko īpašību, pārnese un sakārtošanas uz substrāta raksturošana un NEM slēdža izveide un darbības raksturošana istabas un kriogēnās (<120 K) temperatūrās.

NEM slēdžu darbība pētīta *in situ* skenējošā elektronu mikroskopā un uz silīcija virsmas integrētās ierīcēs. Izgatavotajiem integrētajiem NEM slēdžiem demonstrēta atkārtota ieslēgšanās un izslēgšanās, īstenojot gan loģisko elementu, gan atmiņas elementu funkcijas. Slēdžu darbība īstenoja istabas temperatūrā un kriogēnās temperatūrās līdz 2 K. Parādīta NEM slēdžu darbība ar minimālo ieslēgšanās spriegumu 4,5 V un maksimālo ieslēgta/izslēgta stāvokļa strāvas attiecību 10³. Izveidots NEM slēdzis, ar jaunu darbības kontroles veidu, kurā tiek mērīta deformācijas laikā caur aktīvo elementu plūstošā strāva.

Šis pētījums paver iespējas attīstīt ātrdarbīgākas un izturīgākas atmiņas un skaitļošanas ierīces, kā arī jutīgākus sensorus plašam temperatūru diapazonam.

Pētījuma rezultāti publicēti 11 zinātniskajos rakstos.

Atslēgvārdi: naoelektromehāniski slēdži, nanovadi, nanolentas, kriogēnas temperatūras, Bi₂Se₃, CuO, Ge

SATURA RĀDĪTĀJS

ANOTĀCIJA	3
APZĪMĒJUMI	5
1. IEVADS	6
1.1. Vispārīgs ievads un motivācija	6
1.2. Darba mērķis un uzdevumi	7
1.3. Aizstāvamās tēzes	7
1.4. Darba zinātniskā novitāte	8
1.5. Darba praktiskais nozīmīgums	8
1.6. Autora ieguldījums	9
1.7. Promocijas darba rezultātu aprobācija	9
2. LITERATŪRAS PĀRSKATS	12
2.1. Nanoelektromehāniskie slēdži	12
2.2. Viendimensionālas nanostruktūras	13
2.3. Integrēti nanoelektromehāniskie slēdži	14
3. METODEDES	15
3.1. Viendimensionālu nanostruktūru sintēze	15
3.2. Viendimensionālu nanostruktūru mehānisko, transporta un kontakta īpašību raksturošana	15
3.3. NEM slēdža izgatavošana	16
3.4. NEM slēdža darbība	17
4. REZULTĀTI UN DISKUSIJAS	18
4.1. Viendimensionālu nanostruktūru sintēze	18
4.2. Viendimensionālu nanostruktūru mehāniskās un lādiņnesēju transporta īpašības	18
4.2.1. Mehāniskās īpašības	18
4.2.2. Lādiņnesēju transporta īpašības	22
4.2.3. Magnetopretestības mērījumi	23
4.3. NEM slēdži <i>in situ</i>	25
4.3.1. Spēki NEM slēdža kontaktā	26
4.3.2. NEM slēdža ieslēgšanās sprieguma samazināšana	27
4.4. Integrēti NEM slēdži	28
4.4.1. Integrētu NEM slēdžu ģeometrija	28
4.4.2. NEM slēdžu apkopojums	30
4.4.3. CuO NEM slēdži istabas temperatūrā	31
4.4.4. Bi ₂ Se ₃ NEM slēdži kriogēnās temperatūrās	32
SECINĀJUMI	36
LITERATŪRAS SARAKSTS	37
PATEICĪBAS	39

APZĪMĒJUMI

Saīsinājumi

1D NS	viendimensionāla/-s nanostruktūra/-s
2T	divu terminālu
3T	trīs terminālu
AC	maiņstrāva
AFM	atompēku mikroskops
Bi ₂ Se ₃	bismuta selenīds
CMOS	komplementārais metāla oksīda pusvadītājs
CuO	vara oksīds
D	noteces elektrods
DC	līdzstrāva
FET	lauktranzistors
G	aizvara elektrods
Ge	germānijs
MEM	mikroelektromehāniskais
NEM	nanoelektromehāniskais
NS	nanostruktūra/-s
NV	nanovads
S	izteces elektrods
SdH	Šubņikova-de Hāsa (oscilācijas/ frekvences)
SEM	skenējošais elektronu mikroskops
SiO ₂	silīcija dioksīds
SS	zemsliedzīgais slīpums
TI	topoloģiskais izolators
WAL	vājā anti-lokalizācija

Izvēlēti simboli un mērvienības

A	laukums [m ²]
B	magnētiskais lauks [T]
d	diametrs [m]
E	Junga modulis [GPa]
f	frekvence [Hz]
L	garums [m]
R	pretestība [Ω]
t	biezums [m]
w	platums [m]
z	augstums/padziļinājuma dziļums [m]

1. IEVADS

1.1. Vispārīgs ievads un motivācija

Nanoelektromehāniskie (NEM) slēdži ir energoefektīvas ierīces, kuras pārvada strāvas signālu, izmantojot elektrostatiskā lauka izraisītu mehānisko deformāciju. Pretstatā elektroniskajiem slēdžiem, NEM slēdžu efektivitāti neierobežo termiskie efekti. Tas nozīmē, ka NEM slēdži spēj vienlaicīgi patērēt mazu enerģiju un sasniegt augstu signāla/troksņa attiecību. Abas priekšrocības ir pieejamas vienlaicīgi, pateicoties tam, ka izslēgtā NEM slēdži komponentes ir fiziski atdalītas viena no otras.

NEM slēdžu pārkums jau ir pierādīts tādos pielietojumos, kuros nepieciešams zems spriegums, maza jauda un augsta temperatūras stabilitāte [1–4]. Šobrīd tiek meklēti veidi, kā NEM slēdžus var integrēt esošajās pusvadītāju elektronikas platformās (komplementāro metāla-oksīda-pusvadītāju jeb CMOS tehnoloģijās) [5, 6]. Arī salīdzinājumā ar komerciāli pieejamajām mikroelektromehāniskajām (MEM) sistēmām, kuras plaši tiek izmantotas paātrinājumu sensoros un žiroskopos, NEM slēdži ir daudz ātrdarbīgāki un ļauj ievērojami samazināt ierīces izmērus un masu. Vairākos pētījumos demonstrēta stabila NEM slēdžu darbība augstās temperatūrās līdz 500 °C. Darbība zemās temperatūrās ir īpaši aktuāla kvantu skaitļošanas un kosmosa tehnoloģiju pielietojumos [7], bet NEM pārslēgšanās nav pētīta temperatūru diapazonā, kas iekļauj par 77 K zemākas temperatūras.

NEM slēdžu būtiskākā sastāvdaļa ir aktīvais elements – struktūra, kas, mehāniski deformējoties, izveido elektromehānisku kontaktu ar nekustīgu elektrodu. NEM slēdžu aktīvo elementu izgatavošanā izmanto divas galvenās metodes: lejupejošu (top-down) un augšupejošu (bottom-up). Izmantojot lejupejošo metodi, materiāls tiek ņemts nost no lielākām struktūrām, tā veidojot arvien mazākas struktūras. Šī metode tiek pielietota industrijā elektronisko tranzistoru un MEM sistēmu izgatavošanā. Ar augšupejošo metodi nanostruktūras tiek veidotas no mazākām komponentēm, piemēram, atomiem. Kā aktīvie elementi tiek izmantoti viendimensionāli (1D, piemēram, nanovadi) un divdimensionāli (2D, piemēram, plānās kārtiņas) materiāli. Aktīvo elementu izmēru diapazons ir no pāris nanometriem līdz simtam nanometru biezumā un no desmitiem līdz simtiem mikrometru garumā. Nanovadu īpašās priekšrocības ir augstā virsmas-tilpuma attiecība, zemā kristālisko defektu koncentrācija, augstā mehāniskā rezonanses frekvence un iespēja viegli kombinēt kristalogrāfiski atšķirīgus materiālus heterostruktūrās.

Lai nanovadus integrētu ierīcēs, nepieciešama to sintēzes iznākuma, fizikālo un ķīmisko īpašību kontrolēšana un raksturošana. Šobrīd jau literatūrā ir pieejama plaša informācija par dažādu nanovadu īpašībām, tomēr sintēžu rezultāti mēdz atšķirties, un bieži tiek novērota būtiska izmēru un fizikālo īpašību

izkliede. Tāpēc katras sintēzes rezultātā nepieciešama nanovadu morfoloģisko, mehānisko un elektrisko īpašību raksturošana. Vislabāk ir raksturošanā kombinēt dažādas metodes, lai pārliecinātos par rezultātu uzticamību.

Uz 1D NS balstīto ierīču darbības principus ir ērti pārbaudīt ar *in situ* metodēm, piemēram, skenējošā (SEM [8, 9]) vai transmisijas elektronu mikroskopos (TEM [10]). Izmantojot nanomanipulatorus, *in situ* metodes ļauj reālā laikā izsekot viendimensionālo nanostruktūru deformācijai. Attālumu starp aktīvo elementu un elektrodu var variēt plašās robežās, ļaujot izpētīt dažādus deformācijas režīmus un atrast optimālo NEM slēdža darbībai.

Lai padarītu uz nanovadiem balstītas ierīces savietojamas ar tradicionālajām plāno kārtiņu izgatavošanas tehnoloģijām, ir jāatrisina īpašs izaicinājums – nanovadu integrēšana uz planāra substrāta ar elektrodiem. Lai to paveiktu, nepieciešams uzlabot integrēšanas procesa atkārtojamību iznākuma un nanovadu novietojuma precizitātes ziņā.

Integrētas nanovadu ierīces joprojām ir pētniecisko laboratoriju izpētes objekts un nav pieejamas komerciāli. Prototipu izveide un to darbības raksturošana ievērojami pavirzītu uz priekšu nanoelektromehānisko slēdžu pētījumus un tuvinātu industriālo pielietojumu realizāciju.

1.2. Darba mērķis un uzdevumi

Pētījuma **mērķis** ir uz viendimensionālām pusvadītāju nanostruktūrām balstītu integrētu nanoelektromehānisku slēdžu darbības principu izpēte istabas un kriogēnās temperatūrās.

Darba **uzdevumi** ir:

1. Piemeklēt sintēzes parametrus, lai nodrošinātu nepieciešamo nanostruktūru iznākumu un morfoloģiju pielietojumam NEM slēdžos.
2. Noteikt sintezēto viendimensionālo nanostruktūru mehāniskās un elektriskās īpašības pielietojumam NEM slēdžos un lai izveidotu NEM slēdža izgatavošanas vadlīnijas.
3. Atrast optimālos parametrus integrēta NEM slēdža darbībai, izmantojot nanostruktūrām noteikto morfoloģiju, elektromehāniskās īpašības, *in situ* pētījumus un teorētisko modeli.
4. Izgatavot elektrodu sistēmas nanovadu sakārtošanai un izpētīt viendimensionālu nanostruktūru pārnese un sakārtošanas metodes.
5. Izveidot integrētu NEM slēdzi un demonstrēt tā darbību istabas un kriogēnās temperatūrās.

1.3. Aizstāvamās tēzes

1. Izstrādātās augšupejošās sintēzes metodes ļauj iegūt integrētu nanoelektromehānisko slēdžu izveidei optimālu viendimensionālo nanostruktūru iznākumu (daudzumu) un morfoloģiju (V un VII publikācija).

2. Ar struktūru parametrus kontrolējošu augšupejošo metodi sintezētas pusvadītāju nanostruktūras (CuO un Bi_2Se_3) var integrēt planāros nanoelektromehāniskos slēdžos, izmantojot to pārvešanu, sakārtošanu uz elektrodiem, superkritisko žāvēšanu un kontaktu izveidi (I, III, IV un VI publikācija).
3. Nanoelektromehāniskie slēdži ar integrētām viendimensionālām nanostruktūrām atkārtojami darbojas gan istabas (CuO nanovadi), gan kriogēnās temperatūrās (Bi_2Se_3 nanolentas). Strāva, kas plūst caur nanostruktūru pārslēgšanās laikā, sniedz informāciju par nanostruktūras deformāciju un var tikt izmantota nanoelektromehāniskā slēdža kontrolei (I, III un VI publikācija).

1.4. Darba zinātniskā novitāte

Promocijas darbs veltīts ar augšupejošo metodi sintezētu nanostruktūru pielietojumiem nanoelektromehāniskos (NEM) slēdžos. Būtiskākie atklājumi, kas sniedz ieguldījumu NEM slēdžu pētniecības laukā ir šādi:

- Pirmo reizi parādīts, kā fizikālajā tvaiku nogulsnešanā zelta katalizatora daļiņas diametrs ietekmē Bi_2Se_3 nanolentu morfoloģiju.
- Izstrādāta metode ar augšupejošo pieeju sintezētu viendimensionālu pusvadītāju nanostruktūru integrēšanai planāros NEM slēdžos.
- Pirmo reizi demonstrēta NEM slēdža darbība ar CuO nanovadu kā aktīvo elementu, kas paver iespējas izturīgu NEM slēdžu izveidei.
- Pirmo reizi demonstrēta NEM slēdža darbība ar topoloģiskā izolatora Bi_2Se_3 nanolentu kā aktīvo elementu, kas paver iespējas topoloģisko virsmas stāvokļu izmantošanai NEM slēdžos.
- Pirmo reizi parādīta NEM slēdža darbība temperatūrās, kas zemākas par 77 K.
- Pirmo reizi parādīts, kā strāvas kontroli caur viendimensionālu nanostruktūru var izmantot, lai raksturotu nanovada deformāciju NEM slēdža darbības laikā.

1.5. Darba praktiskais nozīmīgums

Ar augšupejošo metodi sintezētu viendimensionālu pusvadītāju nanostruktūru izmantošanai ir ievērojams potenciāls tādu nākamās paaudzes NEM slēdžu izstrādē, kas sniegtu plašu funkcionalitāti elektronikas, sensoru, materiālu raksturošanas un kvantu skaitļošanas jomās.

Izpratne par CuO un Bi_2Se_3 viendimensionālo nanostruktūru kontrolētu sintēzi un elektromehāniskajām īpašībām varētu dot ieguldījumu ne tikai NEM slēdžu pētniecības un industriālajās jomās. Darbā aprakstītie rezultāti ir aktuāli arī lokanās elektronikas, termoelektrikas, elektroķīmiskās CO_2 reducēšanas un sensoru pielietojumos.

Darbā izstrādātā integrēšanas metode var tikt pielietota dažādu materiālu nanostruktūrām, kas sintezētas ar augšupejošo metodi, kā arī citiem zemdimentionāliem materiāliem, piemēram, grafēnam un van der Vālsa divdimensionālajiem materiāliem.

Nanoelektromehāniskās pārslēgšanās demonstrēšana kriogēnās temperatūrās, izmantojot Bi_2Se_3 , sniedz ieguldījumu tādu NEM slēdžu izveidē, kas izmantos topoloģisko virsmas stāvokļu unikālās īpašības. Loģisko un atmiņas NEM elementu darbība kriogēnās temperatūrās var tikt pielietota kvantu skaitļošanas un kosmosa tehnoloģiju attīstībā. Jauna pārslēgšanās veida demonstrēšana, izmantojot strāvas kontroli caur nanostruktūru, var sniegt ieguldījumu uzticamāku NEM slēdžu attīstībā.

1.6. Autora ieguldījums

Autore sniegusi savu ieguldījumu viendimensionālo nanostruktūru sintēzes iznākuma un morfoloģijas raksturošanā, to mehānisko un elektrisko īpašību noteikšanā, nanoelektromehānisko slēdžu izveidē, raksturošanā un darbības pārbaudē un optimizācijā. Autore veikusi eksperimentu plānošanu, eksperimentālos mērījumus, datu apstrādi, analīzi un apkopošanu, piedalījies publikāciju rakstīšanā un rediģēšanā. J. Kosmača (J.K.), R. Meija, R. Sondors (R.S.) snieguši ieguldījumu nanostruktūru mehānisko īpašību raksturošanā un NEM slēdža izveidē. M. Antsov sniedzis ieguldījumu nanostruktūru mehānisko īpašību raksturošanā. G. Kunakova sniegusi ieguldījumu nanostruktūru elektrisko īpašību raksturošanā. R. S. veicis sintēzes eksperimentus, J. K. un M. M. Ramma snieguši ieguldījumu CuO dielektroforēzes izpētē. A. I. Livšičs izstrādājis teorētisko NEM slēdža ieslēgšanās sprieguma aprēķinu, K. Niherysh sniedzis ieguldījumu NEM slēdžu mērījumu veikšanā zemās temperatūrās. J. Prikulis un R. Popļausks snieguši ieguldījumu elektriskās rezonanses detektēšanas sistēmas izveidē. E. Dzene un E. Kauranens snieguši ieguldījumu slēdžu izveidē un raksturošanā. D. Erts sniedzis ieguldījumu eksperimentu plānošanā, vadīšanā un publikāciju rediģēšanā.

1.7. Promocijas darba rezultātu aprobācija

Publikācijas

- I. Niherysh, K.; Jasulaneca, L.; Dzene, E.; Lombardi, F.; Erts D. Effect of Bending Deformation on Suspended Topological Insulator Nanowires: Towards a Topological Insulator Based NEM Switch. *Sensors and Actuators, A: Physical*, **2024**, 371, 115292.
- II. Jasulaneca, L.; Popļausks, R.; Prikulis, J.; Dzene, E.; Yager, T.; Erts, D. Characterization of Mechanical Oscillations in Bismuth Selenide Nanowires at Low Temperatures. *Micromachines* **2023**, 14 (10), 1910.

- III. Jasulaneca, L.; Meija, R.; Kauranens, E.; Sondors, R.; Andzane, J.; Rimsa, R.; Mozolevskis, G.; Erts, D. Cryogenic Nanoelectromechanical Switch Enabled by Bi_2Se_3 Nanoribbons. *Materials Science and Engineering: B* **2022**, *275*, 115510.
- IV. Ramma, M. M.; Katkevics, J.; Jasulaneca, L.; Kunakova, G.; Sondors, R.; Meija, R.; Erts, D.; Kosmaca, J. Dielectrophoretic Alignment and Electrical Characterization of CuO Nanowire-Based Systems. *Surfaces and Interfaces* **2021**, *27*, 101531.
- V. Sondors, R.; Kunakova, G.; Jasulaneca, L.; Andzane, J.; Kauranens, E.; Bechelany, M.; Erts, D. High-Yield Growth and Tunable Morphology of Bi_2Se_3 Nanoribbons Synthesized on Thermally Dewetted Au. *Nanomaterials* **2021**, *11* (8), 2020.
- VI. Jasulaneca, L.; Livshits, A. I.; Meija, R.; Kosmaca, J.; Sondors, R.; Ramma, M. M.; Jevdokimovs, D.; Prikulis, J.; Erts, D. Fabrication and Characterization of Double- and Single-Clamped CuO Nanowire Based Nanoelectromechanical Switches. *Nanomaterials* **2021**, *11* (1), 117.
- VII. Sondors, R.; Kosmaca, J.; Kunakova, G.; Jasulaneca, L.; Ramma, M. M.; Meija, R.; Kauranens, E.; Antsov, M.; Erts, D. Size Distribution, Mechanical and Electrical Properties of CuO Nanowires Grown by Modified Thermal Oxidation Methods. *Nanomaterials* **2020**, *10* (6), 1051.
- VIII. Meija, R.; Livshits, A. I.; Kosmaca, J.; Jasulaneca, L.; Andzane, J.; Biswas, S.; Holmes, J. D.; Erts, D. Resonance Assisted Jump-in Voltage Reduction for Electrostatically Actuated Nanobeam-Based Gateless NEM Switches. *Nanotechnology* **2019**, *30* (38), 385203.
- IX. Jasulaneca, L.; Kosmaca, J.; Meija, R.; Andzane, J.; Erts, D. Review: Electrostatically Actuated Nanobeam-Based Nanoelectromechanical Switches – Materials Solutions and Operational Conditions. *Beilstein Journal of Nanotechnology* **2018**, *9* (1), 271–300.
- X. Livshits, A. I.; Jasulaneca, L.; Kosmaca, J.; Meija, R.; Holmes, J. D.; Erts, D. Extra Tension at Electrode-Nanowire Adhesive Contacts in Nano-Electromechanical Devices. *European Journal of Mechanics, A/Solids* **2017**, *66*, 412–422.
- XI. Kosmaca, J.; Jasulaneca, L.; Meija, R.; Andzane, J.; Romanova, M.; Kunakova, G.; Erts, D. Young's Modulus and Indirect Morphological Analysis of Bi_2Se_3 nanoribbons by Resonance Measurements. *Nanotechnology* **2017**, *28* (32), 325701.

Darbā neiekļautās publikācijas

- XII. Kosmaca, J.; Katkevics, J.; Andzane, J.; Sondors, R.; Jasulaneca, L.; Meija, R.; Niherysh, K.; Rublova, Y.; Erts, D. Humidity-Dependent Electrical Performance of CuO Nanowire Networks Studied by Electrochemical

Impedance Spectroscopy. *Beilstein Journal of Nanotechnology* **2023**, *14* (1), 683–691.

XIII. Kosmaca, J.; Jasulaneca, L.; Meija, R.; Sondors, R.; Erts, D. Nanowires for NEMS Switches. *NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics* **2020**, 201–207.

Nozīmīgākās starptautiskās konferences

1. Jasulaneca, L.; Dzene, E.; Sondors, R.; Prikulis, J.; Erts, D. Bottom-Up Semiconductor 1D Nanostructures for Mechanical Switching. IEEE-NANO 2023: The 23rd IEEE International Conference on Nanotechnology, July 2–5, 2023, Jeju Island, Korea.
2. Dzene, E.; Jasulaneca, L.; Sondors, R.; Prikulis, J.; Niherysh, K.; Erts, D. Suspended Bi₂Se₃ nanostructures for substrate-free magnetoelectric characterization and device applications. IEEE-NANO 2023: The 23rd IEEE International Conference on Nanotechnology, July 2–5, 2023, Jeju Island, Korea.
3. Sondors, R.; Kunakova, G.; Andzane, J.; Jasulaneca, L.; Salnajs, D.; Lombardi, F.; Erts, D. Physical Vapor Deposition Synthesis Methods for Bi₂Se₃ NR with Tunable Geometry. 3-day International Conference on Materials Science, October 26–28, 2022, Verona, Italy.
4. Dzene, E.; Jasulaneca, L.; Sondors, R.; Erts, D. Comparison of methods for integration of Bi₂Se₃ nanowires in NEM switches. FM&NT-NIBS 2022 conference, July 3–6, 2022, Riga, Latvia.
5. Jasulaneca, L.; Meija, R.; Kauranens, E.; Sondors, R.; Andzane, J.; Prikulis, J.; Dzene, E.; Erts, D. On-chip Bi₂Se₃ nanowire nanoelectromechanical switches for cryogenic switching. ISNTT2021 International Symposium on Novel Materials and Quantum Technologies, December 14–17, 2021, Atsugi, Japan.

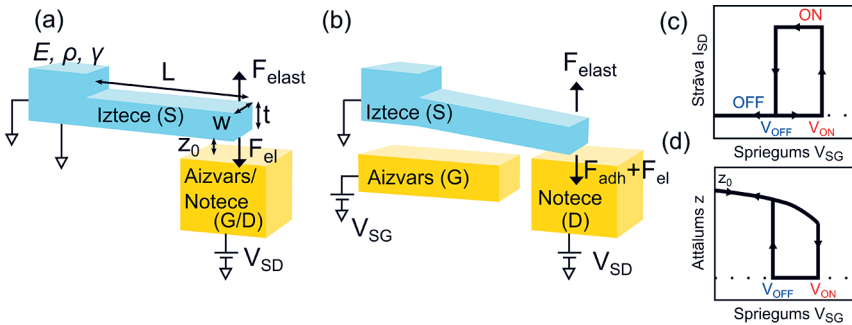
2. LITERATŪRAS PĀRSKATS

2.1. Nanoelektromehāniskie slēdži

Nanoelektromehāniskie (NEM) slēdži tiek uzskatīti par perspektīvu nākotnes elektronisko komponentu sastāvdaļu to unikālo energoefektivitātes, temperatūras un radiācijas stabilitātes, ātrdarbības un mērogojamības priekšrocību dēļ [11–13]. NEM slēdžu darbība ir demonstrēta atmiņas un loģiskajos elementos [11].

Elektriskā un mehāniskā mijiedarbība starp aktīvo elementu un elektrodu NEM slēdži ļauj realizēt izslēgtu (OFF) un ieslēgtu (ON) stāvokli (att. 2.1) [10,14]. Izslēgtā stāvoklī starp aktīvo elementu un elektrodu nav pielikts spēks, un tie ir fiziski atdalīti viens no otra un atrodas attālumā z_0 . Tātad elektriskā ķēde nav noslēgta, un reģistrētā strāva ir tuva nullei. Kad starp aktīvo elementu un elektrodu tiek pielikts spriegums, elektrostatisks spēks F_{el} darbojas pretējā virzienā elastības spēkam F_{elast} un noliec aktīvo elementu tuvāk elektrodam. Sasniedzot nestabilitātes punktu, aktīvais elements strauji paātrinās un nonāk kontaktā ar elektrodu, kas izpaužas kā krass strāvas lēcienš pie sprieguma vērtības V_{ON} . Samazinot spriegumu, F_{elast} darbojas pretim adhēzijas un elektriskajam spēkam starp aktīvo elementu un elektrodu F_{adh} un F_{el} . Brīdī, kad F_{elast} kļūst lielāks par F_{adh} un F_{el} summu, aktīvais elements atgriežas sākotnējā stāvoklī, kas atbilst spriegumam V_{OFF} .

Populārākās NEM slēdžu konfigurācijas ir divu terminālu (2T, att. 2.1 (a)) [15] un trīs terminālu (3T, att. 2.1 (b)) [16]. 2T konfigurācijā aktīvais elements ir izņemts (iztece, S), un nekustīgais elektrods tiek izmantots gan ieslēgšanai (kā



2.1. attēls. NEM slēdža shematiski attēli. (a) Divu terminālu slēdzis izslēgtā un (b) trīs terminālu slēdzis ieslēgtā stāvoklī. Junga modulis E , blīvums ρ un virsmas enerģija γ ir būtiskākās materiālu īpašības, kas nosaka slēdža darbību. (c) Tipiska NEM slēdža pārslēgšanās I - V raksturliktne. (d) Attālums starp aktīvo elementu un elektrodu kā funkcija no sprieguma

aizvars, G), gan strāvas signāla pārvadei (kā notece, D). 3T slēdži ieslēgšanas elektrods (G) ir atdalīts un atrodas nedaudz lielākā attālumā no elektroda, kas noslēdz ķēdi (D). Lielāka attāluma dēļ 3T slēdzim ir palielināts ieslēgšanas spriegums salīdzinājumā ar 2T, bet tā būtiska priekšrocība ir iespēja neatkarīgi kontrolēt darbības spriegumu. NEM slēdži var tikt izveidoti vienā vai vairākos punktos nostiprināta aktīvā elementa konfigurācijā, tā regulējot stinguma koeficientu.

Vienkāršākajā modelī, kurā divos galos nostiprināts slēdzis tiek aplūkots kā plakanparalēls kondensators ar vienu kustīgu plati, ieslēgšanās spriegumu V_{ON} var izteikt kā [17]

$$V_{ON} = \sqrt{\frac{8kz_0^3}{27\varepsilon_0 A}}, \quad (2.1)$$

kur k – stinguma koeficients, ε_0 – vakuuma dielektriskā caurlaidība, A – kondensatora plates laukums.

2.2. Viendimensionālas nanostruktūras

Atomāri gludā virsma, kristāliskums, kontrolējamas elektriskās īpašības un selektīvas dopēšanas iespēja, kas ļauj veidot krasi atšķirīgas materiālu kombinācijas, ir padarījušas kvazi-viendimensionālas nanostruktūras par perspektīvām nākotnes elektronisko ierīču sastāvdaļām [18]. To pielietošana NEM slēdžos ļautu palielināt ātrdarbību, samazināt izmērus un pievienot tiem papildus funkcionalitāti.

Šajā darbā kā aktīvie elementi tika izmantotas pusvadītāju CuO, Bi₂Se₃ un Ge 1D nanostruktūras.

CuO ir p-tipa pusvadītājs, kura aizliegtās zonas platums ir 1,2 eV [19], un tam piemīt monoklīniska kristāliskā struktūra. CuO nanovadi guvuši ievēribu tādos pielietojumos kā ķīmiskajos un gāzes sensoros [20] un demonstrēti arī lauktranzistorā [21]. Pateicoties 1326 °C augstai kušanas temperatūrai [22], CuO nanovadi ir perspektīvi NEM slēdžiem, kas darbojas augstās temperatūrās. Izmantojot vienkāršas audzēšanas metodes, piemēram, termisko Cu oksidēšanu [23], CuO nanovadus var iegūt ar lielu sintēzes iznākumu. Nanovadu morfoloģiju var kontrolēt, izmantojot ārējo elektrisko lauku [24] un mitrumu [25].

Bi₂Se₃ ir pusvadītājs, kura aizliegtās zonas platums ir 0,3 eV, tam piemīt romboedriskā kristāliskā struktūra [26]. Tam ir slāņaina struktūra, kur atomus plāknē saista kovalentas saites, bet starp plāknēm – van der Vālsa spēki [27]. Kristalogrāfiskās c-ass virzienā Bi₂Se₃ teorētiski ir izolators tilpumā un tam piemīt vadoši 2D virsmas stāvokļi, kas ir 3D topoloģisko izolatoru (TI) materiālu klasi raksturojoša iezīme [26]. Lai novērotu topoloģiskos virsmas stāvokļus, Fermi līmenim jāatrodas aizliegtajā zonā [28]. Reālā Bi₂Se₃ kristālā tas ir izaicinājums, jo tam piemīt augsta Se vakanču koncentrācija [29], kas liek Fermi līmenim nobīdīties uz vadītspējas zonu. Augstās laukuma/tilpuma attiecības dēļ nanostruktūrās var panākt tilpuma lādiņnesēju ietekmes samazināšanu vai

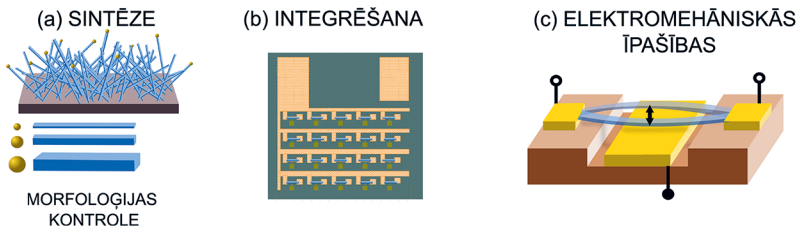
pat izslēgšanu [30]. Zonu struktūru TI materiālos iespējams kontrolēt arī ar mehāniskās deformācijas palīdzību [31–33], kas motivē šo materiālu pielietošanu NEM sistēmās.

Ge nanovadu augstais Junga modulis (100–150 GPa) un stiprība [34] padara tos par piemērotiem NEM slēdža aktīvajiem elementiem. Ar tiem demonstrēta atkārtojama NEM pārslēgšanās *in situ* skenējošā elektronu mikroskopā (SEM) [8,9]. Oksīda slānis, kas atmosfērā veidojas uz Ge virsmas, funkcionē kā tunelbarjera [9,10,35], kas palielina nepieciešamo enerģiju elektronu injekcijai no metāliskajiem kontaktiem. Tāpēc pie zemiem spriegumiem (2–4 V) uz Ge nanovadiem balstītiem NEM slēdžiem novērojama augsta pretestība un zema strāva. Vienlaicīgi oksīda klātbūtne samazina Ge nanovada degradācijas risku strāvas parādīšanās brīdī. Ge nanovadu audzēšanai tiek izmantotas gan šķidrās, gan tvaika fāzes metodes. Augstākais sintēzes iznākums līdz pat 80% panākts, izmantojot superkritiskā šķidrums sintēzi [36].

2.3. Integrēti nanoelektromehāniskie slēdži

NEM slēdžu pētījumi, kas veikti *in situ* transmisijas un skenējošā elektronu mikroskopā [8–10] ir būtiski paplašinājuši izpratni par NEM slēdžu darbības principiem. *In situ* pētījumi ļauj sekot līdz NEM slēdži notiekošajiem dinamiskajiem procesiem reālā laikā, sniedzot informāciju par materiālu un kontaktu īpašībām. Vēl viena *in situ* pētījumu priekšrocība ir viegla dažādu elektroaktīvā elementa konfigurāciju izveidošana. Tāpēc *in situ* mērījumi ir būtisks solis arī integrētu NEM slēdžu izveidē – vispirms tiek pārbaudīts princips, tad tiek izgatavotas integrētas sistēmas ar zemu pielāgojamību, bet augstu precizitāti.

Integrētu NEM slēdžu izveide un raksturošana ir vairāku pakāpju process (att. 2.2), kas iekļauj nanomateriālu sintēzi (att. 2.2 (a)) un izmēru sadalījuma raksturošanu, mehānisko un elektrisko īpašību raksturošanu un integrēšanas metožu izpēti uz planāra substrāta ar elektrodiem (att. 2.2 (b)), un īslaicīgas un ilglaicīgas NEM slēdža darbības raksturošanu (att. 2.2 (c)) dažādos apstākļos.



2.2. attēls. Integrēta NEM slēdža izstrādes process. (a) 1D NS audzēšana un morfoloģijas kontrole. (b) Elektrodu sistēmu izgatavošana un 1D NS sakārtošana uz tām, un kontaktu izveide uz 1D NS. (c) Shematisks integrēta NEM slēdža raksturošanas attēls

3. METODEDES

3.1. Viendimensionālu nanostruktūru sintēze

CuO un Bi₂Se₃ viendimensionālās nanostruktūras sintezētas, izmantojot termisko oksidēšanu un fizikālo tvaiku nogulsnešanu kvarca caurules vaku-umkrāsnī Latvijas Universitātes Ķīmiskās fizikas institūtā. CuO nanovadi tika audzēti uz 25 μm biezas vara folijas (99,9% tīrība, Goodfellow GmbH). Vienā oksidēšanas ciklā temperatūra tika celta ar ātrumu 16 °C minūtē līdz 500 °C, un oksidēšana veikta 210 min pie konstantas temperatūras. Tad krāsnij tika ļauts atdzist līdz istabas temperatūrai.

Au katalizatora nanodaļiņas ar diametru robežās no 8 līdz 150 nm tika iegūtas, karsējot termiski iztvaicētas 1,5–16 nm Au plānās kārtiņas uz stikla substrāta.

Bi₂Se₃ nanostruktūras tika audzētas no Bi₂Se₃ pulvera (99,999% Bi₂Se₃ pulveris, Sigma-Aldrich) uz stikla pamatnes slāpekļa atmosfērā gan ar zelta katalizatoru, gan bez katalizatora. Pirms karsēšanas krāsns tika izskalota ar N₂ gāzi. Vienā sintēzes ciklā temperatūra tika paaugstināta no istabas temperatūras līdz 585 °C 45 minūšu laikā, tad noturēta konstanta 15 minūtes un tad krāsnij ļauts atdzist līdz 535 °C. Šajā cikla daļā notika Bi₂Se₃ iztvaikošana. Nākamajā fāzē, lai uzsāktu 1D nanostruktūru audzēšanu, tika palaista N₂ plūsma pie konstanta 25 Torr spiediena. Plūsma tika apturēta, kad temperatūra bija sasniegusi 500 °C, un atsūknēšana pārtraukta pie 475 °C. Lai noslēgtu procesu, caurule tika papildīta ar N₂ un substrāts izņemts, kad temperatūra krāsnī sasniegusi 110–170 °C.

Ge nanovadi sintezēti, izmantojot superkritiskā šķidrums metodi (SCF) Korkas Universitātes koledžā (Korka, Īrija).

3.2. Viendimensionālu nanostruktūru mehānisko, transporta un kontaktu īpašību raksturošana

Viendimensionālo nanostruktūru morfoloģija raksturota, izmantojot skenējošo elektronu mikroskopu (SEM, Hitachi FE-SEM S 4800) un atomspēku mikroskopu (AFM, Asylum Research MFP-3D). 1D NS garums, platums un biezums tika noteikts ar SEM. Lai noteiktu brīvi stāvošas 1D NS izmērus, tā tika piestiprināta elektroķīmiski kodināta zelta elektroda galā un rotēta ar mikromotora palīdzību (Faulhaber ADM0620), lai atrastu garāko un īsāko projekciju.

Integrētu 1D NS biezums, forma un deformācijas profils tika noteikti ar AFM. Lai minimizētu šķērsspēka ietekmi, kas var novest pie nevēlamas brīvi stāvošu 1D NS deformācijas vai slīdēšanas virs aizvara elektroda, tika izmantots dinamisko svārstību režīms. Tika izmantoti kronšteini ar rezonanses frekvenci 300 ± 100 kHz un spēka konstanti 8,4–57 N/m (AC160TS).

1D NS mehāniskās īpašības tika noteiktas ar kvazistatiskās un dinamiskās deformācijas metodēm elastīgajā režīmā. Kvazistatiskajā metodē NS tika

deformēta, pieliekot pakāpeniski pieaugošu spēku tās viduspunktā ar AFM adatu, vienlaicīgi mērot spēku un deformāciju. Dinamiskajā metodē nanostrukturai tika pielikts ārējais spēks maiņsprieguma formā, lai ierosinātu svārstības, kas tika detektētas vizuāli SEM un elektriski ar ķēžu analizatoru (VNA, Rohde & Schwarz ZNB 8). Fundamentālā rezonanses frekvence noteikta kā tā frekvence, pie kuras svārstību amplitūda ir maksimālā un kurai atbilst amplitūdas frekvences atkarība, ko var aprakstīt ar Lorencas funkciju. Fundamentālā rezonanses frekvence un noteiktie 1D NS izmēri izmantoti, lai noteiktu Junga moduli. Lai noteiktu svārstību atkarību no temperatūras, tika izveidota ar PPMS savietojama elektriskā sistēma svārstību signāla pastiprināšanai.

Lādiņnesēju transports tika mērīts divu un četru elektrodu konfigurācijā, ar litogrāfiju izveidojot uz 1D NS metāla elektrodus. Pretestības atkarība no temperatūras tika mērīta fizikālo īpašību mērīšanas sistēmā (PPMS, DynaCool 9T, Quantum Design) temperatūru diapazonā no 300 līdz 2 K. Magnetopretestība Bi_2Se_3 nanolentām mērīta paraugam perpendikulārā magnētiskajā laukā B līdz 14 T zemās temperatūrās. Laukefekts raksturots, mērot garenvirziena pretestību R_{S-D} atkarībā no aizvara sprieguma caur SiO_2 dielektriķi.

3.3. NEM slēdža izgatavošana

Šajā darbā izgatavoti divu konfigurāciju integrēti NEM slēdži. Slēdžos ar plāno metāla kārtiņu kontaktiem tikai no apakšas nanostruktūru pie virsmas notur adhēzijas spēks starp nanostruktūru un elektrodu. Slēdžos ar papildus kontaktiem no augšas plānā kārtiņa tiek uzklāta uz nanostruktūras galiem elektriskās un mehāniskās stabilitātes uzlabošanai.

Kā substrāti izmantotas Si plāksnītes ar īpatnējo pretestību 1–50000 $\Omega\cdot\text{cm}$ ar plāno termiskā SiO_2 kārtiņu biezumu diapazonā 200–1000 nm.

Plāno metāla kārtiņu elektrodi (S, D un G) tika veidoti ar foto- un elektronu kūļa litogrāfiju (EBL). Fotolitogrāfijas gadījumā izmantotas tiešā ieraksta lāzerlitogrāfijas iekārta (Heidelberg μPG 101 Tabletop Micro Pattern Generator) un masku savietotājs (Mask aligner Suss MA/BA6 Gen4). EBL (Raith eLINE) tika izmantots, lai veidotu elektrodus, kas šaurāki par 1 μm . G elektrodi tika veidoti ar slapjo un sauso (Oxford ICP Etcher PlasmaPro 100 Cobra) kodināšanu veidotos padziļinājumos. Visu elektrodu metalizācijai izmantota 5 nm Ti adhēzijas slāņa un 55–195 nm Au slāņa termiskā iztvaicēšana. Liekais metāla pārklājums tika noņemts, šķīdinot neattīstīto rezistu.

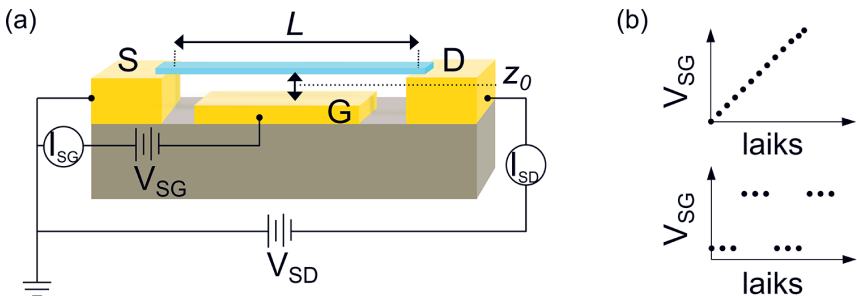
Izmantojot mehānisko pārnesi, dielektroforēzi un nanomanipulācijas elektronu mikroskopā, 1D NS tika pārnestas uz substrāta ar elektrodiem. Bi_2Se_3 1D NS tika veikta nanovadus klājošā oksīda kodināšana pirms augšējo kontaktu metalizācijas, lai samazinātu kontakta pretestību. Lai atbrīvotos no izgatavošanas procesā izmantotā šķidrums un vienlaicīgi mazinātu risku 1D NS pielipt G elektrodam kapilāro spēku ietekmē, NEM slēdži tika žāvēti superkritiskajā CO_2 .

3.4. NEM slēdža darbība

NEM slēdžu darbība raksturota *in situ* SEM istabas temperatūrā un PPMS kriogēnās temperatūrās līdz 2 K. *In situ* mērījumiem izmantota SmarAct 13D nanomanipulāciju sistēma ar četriem 3D nanomanipulatoriem, lai mainītu attālumu līdz elektrodiem un pieliktu ārējo elektrisko spēku. Pretstatā integrētam slēdzim, aktīvie elementi netika nostiprināti uz planāriem substrātiem, bet gan uz asiem kodinātu zelta elektrodu galiem. Kodinātas Au adatas un apzeltīti AFM kronšteini tika izmantoti kā NEM slēdža elektrodi.

NEM slēdža raksturošanā tika izmantoti divi vai trīs termināli (att. 3.1. (a)) un divi elektriskā spēka pielikšanas veidi (att. 3.1. (b)). Pirmajā veidā, lai iegūtu precīzas V_{OFF} un V_{ON} vērtības un izsekotu to izmaiņām darbības gaitā, spriegums uz G elektroda mērījumos tika izvērsts pakāpeniski ar nelielu soli (3.1. att. (b) augšējais panelis). Otrajā veidā, lai mēritu ieslēgta un izslēgta NEM slēdža strāvas līmeņa izmaiņas ilgākā darbības laikā, starp S un G elektrodiem tika pielikts periodiski mainīgs kvadrātisks sprieguma signāls (3.1. att. (b) apakšējais panelis), vienlaicīgi mērot katram sprieguma līmenim atbilstošo strāvas vērtību. Šajā gadījumā nevar iegūt precīzu informāciju par V_{ON} un V_{OFF} izmaiņām, bet tiek saīsināts laiks, kurā strāva plūst cauri NS un potenciāli izmaina kontakta īpašības.

Tika pētīti divi NEM slēdža pārslēgšanās kontroles veidi: ar un bez strāvas kontroles pirms kontakta izveides starp aktīvo elementu (S) un apakšējo (G) elektrodu. Pakāpeniski palielinot spriegumu starp S un G elektrodiem, NEM slēdzim bez strāvas kontroles straujas I_{S-G} strāvas izmaiņas tika reģistrētas tikai ieslēgšanās brīdī. Savukārt NEM slēdzim ar papildus I_{SD} strāvas kontroli izmaiņas tika monitorētas visā mehāniskās deformācijas laikā.



3.1. attēls. NEM slēdža darbības raksturošana. (a) NEM slēdža ģeometrijas un elektrisko slēgumu shematisks attēls. 2T konfigurācijā pielikts tikai V_{SG} spriegums, 3T konfigurācijā pielikti gan V_{SG} , gan V_{SD} . (b) Sprieguma pielikšanas veidi. Augšējais panelis: pakāpeniska izvērse, lai raksturotu V_{ON} un tā izmaiņas. Apakšējais panelis: kvadrātisks V_{SG} signāls, lai raksturotu I_{ON} un I_{OFF} izmaiņas ilgākā laika posmā

4. REZULTĀTI UN DISKUSIJAS

4.1. Viendimensionālu nanostruktūru sintēze

Termiskās oksidēšanas rezultātā tika iegūti cilindriski CuO nanovadi ar diametru robežās no 20 līdz 320 nm. NEM slēdžiem atbilstošākais nanovadu sintēzes iznākums (nanostruktūras uz kvadrātmikrometru) un izmēri iegūti ar termisko oksidēšanu elektriskajā laukā katoda pusē paaugstināta mitruma atmosfērā. Ar šiem parametriem iegūti nanovadi ar vidējo diametru aptuveni 70 nm, vidējo garumu aptuveni 5 μm un lielu garuma/diametra attiecību.

No dažāda biezuma Au katalizatora kārtiņām karsēšanas rezultātā tika izveidotas Au nanodaļiņas ar diametru robežās no 8 līdz 150 nm. Sintēzē uz 10 nm diametra nanodaļiņām, kas tika iegūtas no 3 nm biezas kārtiņas, tika iegūts augstākais Bi₂Se₃ nanolentu sintēzes iznākums – aptuveni 100 nanolentu uz 1000 μm^2 . Iegūtais Bi₂Se₃ nanolentu sintēzes iznākums aptuveni 50 reizes pārsniedza to, kas iegūts sintēzē bez katalizatora [37]. Sintēze ar katalizatoru ļāva iegūt Bi₂Se₃ nanolentas ar vidējo garumu robežās no 3 līdz 6 μm un vidējo biezumu no 30 līdz 110 nm.

NEM slēdžim ar 200 nm attālumu līdz aizvara elektrodam šie izmēri atbilstu ieslēgšanās spriegumam V_{ON} robežās no aptuveni 13 V līdz 32 V un rezonanses frekvencēm no 7,5 MHz līdz 8,2 MHz divos galos nostiprinātā konfigurācijā.

4.2. Viendimensionālu nanostruktūru mehāniskās un lādiņnesēju transporta īpašības

4.2.1. Mehāniskās īpašības

CuO un Bi₂Se₃ 1D NS Junga modulis E tika noteikts, izmantojot *in situ* SEM rezonansi un CuO gadījumā arī AFM trīspunktu lieces metodi.

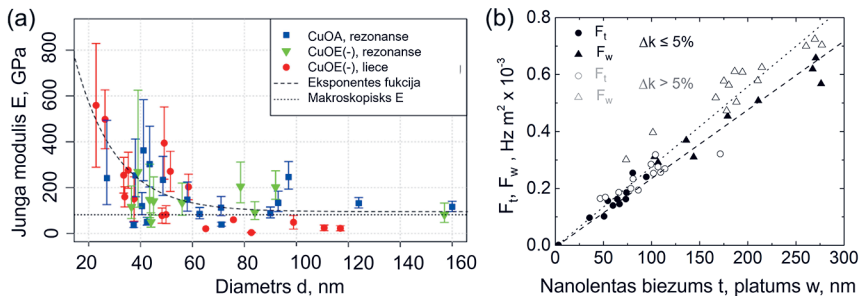
Termiskās oksidēšanas rezultātā iegūtajiem cilindriskajiem CuO nanovadiem tika novērota Junga moduļa atkarība no diametra (att. 4.1 (a)). Diametru diapazonā no 20 līdz 160 nm Junga moduļa vērtības izmaiņu var aprakstīt ar eksponenciālu sakarību, kas pie lielām diametra vērtībām tiecas uz 95 GPa – vērtību, kas ir tuva makroskopiskā CuO Junga modulim (82 GPa [38]). Izteikts Junga moduļa pieaugums tika novērots nanovadiem ar diametru, kas mazāks par 50 nm. Maksimālā Junga moduļa vērtība sasniedza pat 550 GPa. Junga moduļa pieaugums bija izteiktāks lieces deformācijā iegūtajām vērtībām salīdzinājumā ar rezonansi. Atšķirīgos rezultātus starp metodēm var skaidrot ar dažādiem robežnosacījumiem nanovada galos – rezonanses gadījumā nanovads ir nostiprināts vienā galā, bet lieces – abos galos, kas palielina iespēju veidoties iekšējam mehāniskajam spriegumam. Literatūrā CuO nanovadiem novērota līdzīga atkarība no izmēriem, izmantojot AFM trīspunktu lieces deformāciju [38]. Apgabalā no 190 nm līdz

80 nm noteikts aptuveni trīskāršs Junga moduļa vērtības pieaugums [38]. Tomēr pētījumā [38] mērīti nanovadi līdz aptuveni 80 nm diametram, bet šajā darbā – līdz aptuveni 20 nm diametram. Vispārīgi Junga moduļa atkarība no izmēra var tikt skaidrota ar virsmas spriegumu, kas mazu izmēru gadījumā, relatīvajam virsmas daudzam pieaugot, dod lielāku ieguldījumu kopējā elastībā [39].

Fundamentālo rezonanses frekvenču skaits ir atkarīgs no nanostrukturās šķērsgriezuma. Atšķirībā no CuO, kuriem cilindriskās formas dēļ bija raksturīga viena fundamentālā rezonanses frekvence, Bi₂Se₃ nanolentām taisnstūrveida šķērsgriezuma dēļ tika novērotas divas – viena platuma (f_w) un viena biezuma (f_t) virzienā. Ideāla taisnstūra gadījumā abu frekvenču attiecībai būtu jāsakrīt ar platuma w un biezuma t attiecību. Tomēr Bi₂Se₃ gadījumā tika novērotas novirzes no šīs attiecības. Šīs novirzes varēja izskaidrot ar Bi₂Se₃ virsmas morfoloģijas specifiku – tā kā Bi₂Se₃ ir slāņains materiāls, uz nanolentu virsmas sintēzes procesā bieži vien veidojas pakāpienveida terases [37,40]. Šīs terases ietekmē šķērsgriezuma laukumu un laukuma inerces momentu, un jāņem vērā, aprēķinot Junga moduli. Terašu klātbūtni var visprecīzāk nomērīt ar AFM, bet tas ir laikietilpīgi. Tāpēc tika izstrādāta metode, kas ļauj ar rezonanses palīdzību atšķirt nanolentas ar taisnstūrveida šķērsgriezumu no nanolentām ar terašu klātbūtni. Tika ieviests parametrs k , kas raksturo, kādā mērā šķērsgriezums atšķiras no taisnstūrveida:

$$k = \frac{f_t/f_w}{t/w} \quad (4.1)$$

Izmantojot parametru k , eksperimentālie rezultāti tika sadalīti divās grupās. Tikai nanolentas ar taisnstūrveida šķērsgriezumu tika izmantotas, lai noteiktu Junga moduli (att. 4.1 (b) pildītie datu punkti).



4.1. attēls. CuO nanovadu un Bi₂Se₃ nanolentu ar rezonansi un AFM lieces deformāciju noteiktas efektīvais Junga modulis. (a) CuO nanovadu Junga moduļa atkarība no diametra. Eksperimentālie punkti attēlo anoda (CuOA) un katoda (CuOE-) pusē audzētos nanovadus, raustītā līkne – aproksimāciju un eksponenciālu sakarību, nepārtrauktā līnija – makroskopiska CuO Junga moduļa vērtību. (b) Bi₂Se₃ nanolentu rezonanses frekvenču parametru atkarība no nanolentu biezuma vai platuma. Pildītie datu punkti iegūti nanolentām ar taisnstūrveida šķērsgriezumu, tukšie – iekļaujot arī mērījumus nanolentām ar terasēm

Att. 4.1 (b) parādīta rezonanses frekvenču parametru F_t un F_w atkarība no nanolentas platuma vai biezuma. Lineārā atkarība norāda uz to, ka Junga modulis nav atkarīgs no izmēra. Taisnes slīpuma koeficients ir proporcionāls $\sqrt{(E/\rho)}$, kur ρ – Bi_2Se_3 masas blīvums (7680 kg m^{-3} [41]). Junga modulis tika aprēķināts, izmantojot rezonanses frekvenču parametru izteiksmes

$$F_t = t \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ un } F_w = w \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4.2)$$

kur

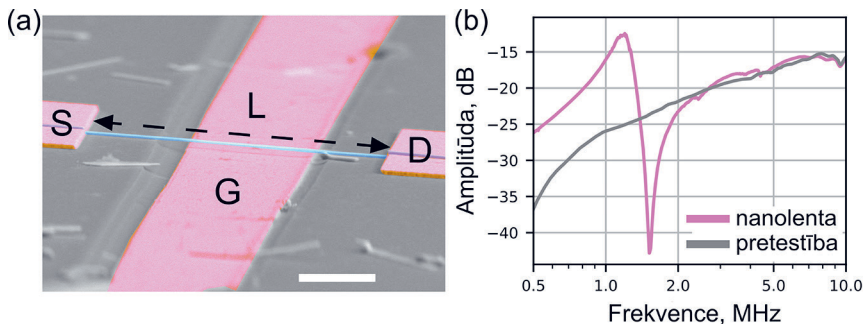
$$F_t = \frac{4\sqrt{3}\pi f_t L^2}{\beta^2} \text{ un } F_w = \frac{4\sqrt{3}\pi f_w L^2}{\beta^2}. \quad (4.3)$$

Noteiktajam slīpuma koeficientam $2,4 \pm 0,1 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$ atbilstošā vidējā E vērtība bija $44 \pm 4 \text{ GPa}$. Šī vērtība ir tuva makroskopiska Bi_2Se_3 kristāla Junga moduļa vērtībai ($47 \pm 9 \text{ GPa}$ [42]), ko var skaidrot ar līdzīgu defektu blīvumu audzētajās nanolentās. Att. 4.1 (b) parāda arī vidējās Junga moduļa vērtības palielināšanos par aptuveni 30% gadījumā, ja aprēķinā tiek iekļautas arī nanolentas ar terasēm. Šo pieaugumu var skaidrot ar virsmas laukuma palielināšanos un no tā izrietošo virsmas efektu nozīmības pastiprināšanos.

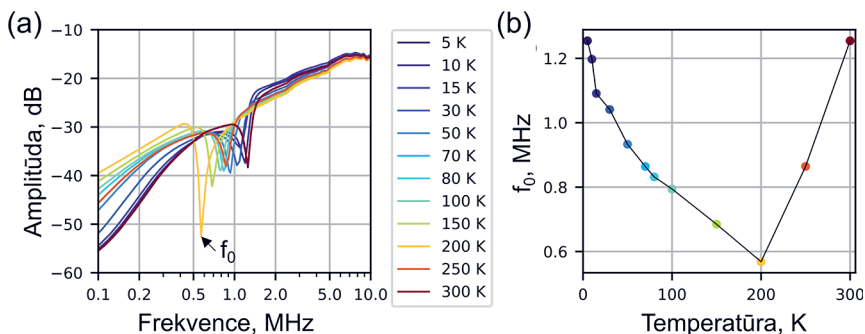
Divos galos nostiprinātu 1D NS mehānisko īpašību mērīšana ar AFM ir uzticama, bet laikietilpīga metode. Tomēr to nevar izmantot zemu temperatūru mērījumos. Lai radītu iespēju noteikt dinamiskās īpašības integrētos divos galos nostiprinātos NEM slēdžos atkarībā no temperatūras, tika izveidota elektriska ar PPMs paraugu turētāju savietojama rezonanses detektēšanas sistēma. Elektriskā rezonanses detektēšana balstās uz faktu, ka pusvadītāju nanovada mehāniskās svārstības ietekmē caur nanovadu plūstošo strāvu [43,44]. Mērot svārstības ierosinošā signāla transmisijas koeficienta S_{21} amplitūdas izmaiņas, ejot cauri nanovadam, rezonansi var detektēt brīdī, kad ierosinošā signāla frekvence sakrīt ar mehānisko rezonanses frekvenci.

Attēlā 4.2 redzami izveidotās detektēšanas sistēmas mērījumu rezultāti divos galos nostiprinātai Bi_2Se_3 nanolentai ar $7,6 \mu\text{m}$ garumu, 224 nm biezumu, 125 nm platumu un 50Ω pretestību R_{SD} (att. 4.2 (a)). S_{21} parametra amplitūdas atkarībā no frekvences tika novērots asimetrisks maksimums-minimums $1,5 \text{ MHz}$ frekvences tuvumā (att. 4.2 (b)). Šis spektra apgabals tika saistīts ar nanovada mehānisko rezonansi un lai par to pārliecinātos, nanovada vietā ķēdē tika ievietota 20Ω pretestība, kas ir tuva nanovada pretestības vērtībai. Šīs sistēmas amplitūdas spektrā (att. 4.2 (b) pelēkā likne) maksimuma-minimuma klātbūtne netika novērota. Tika veikti arī amplitūdas atkarības no V_{SG} sprieguma mērījumi, un novērotas sistemātiskas $1,5 \text{ MHz}$ maksimuma-minimuma amplitūdas izmaiņas, kādas neuzrādīja pārējās spektra komponentes.

Svārstību atkarība no temperatūras tika mērīta Bi_2Se_3 nanolentai ar $8,3 \mu\text{m}$ garumu, 35 nm biezumu un 266 nm platumu un 36Ω R_{S-D} pretestību temperatūru diapazonā no 5 K līdz 300 K (att. 4.3). Palielinot temperatūru, tika novērota rezonanses frekvences samazināšanās aptuveni divas reizes,



4.2. attēls. Elektriskā viendimensionālu nanostrukturū rezonanses frekvences noteikšana. (a) Bi₂Se₃ nanolentas SEM attēls leņķī parāda S, D un G elektrodus un brīvi stāvošo nanolentu. Nanolenta atrodas aptuveni 200 nm attālumā no G elektroda un zem S un D elektrodziem. Krāsojums pievienots uzskatāmībai. Skalas izmērs 2 μm. (b) RF S₂₁ parametra amplitūdas spektrā novērots asimetrisks maksimums-minimums pie 1,5 MHz frekvences Bi₂Se₃ nanolentai (rozā). Ķēdē nomainot nanovadu ar 20 Ω pretestību, straujās spektra izmaiņas pazūd



4.3 attēls. Bi₂Se₃ nanolentas svārstību atkarība no temperatūras. (a) Bi₂Se₃ nanolentas sistēmas amplitūdas atkarība no temperatūras reģionā no 5 K līdz 300 K. (b) Negatīvā pīķa frekvences f₀ atkarība no temperatūras parāda vairāk kā divkārtšu rezonanses frekvences samazināšanos, palielinot temperatūru no 5 K līdz 200 K, kam seko atgriešanās pie zemo temperatūru vērtības

pie 200 K sasniedzot minimumu. Turpinot palielināt temperatūru no 200 K līdz 300 K, rezonanses frekvence atgriezās pie sākotnējās zemo temperatūru vērtības. Līdzīga atkarība tika novērota šim paraugam arī atkārtotos mērījumos. Temperatūras atkarību visticamāk var skaidrot ar parauga izgatavošanas laikā radītu mehānisko spriegumu un materiālu diferenciālo termālo izplešanos karsēšanas/dzesēšanas cikla laikā [45]. Papildus pētījumi būtu nepieciešami, lai detalizēti raksturotu Bi₂Se₃, SiO₂ substrāta un Au plāno kārtiņu kontaktu deformāciju atkarībā no temperatūras.

4.2.2. Lādiņnesēju transporta īpašības

CuO nanovadi

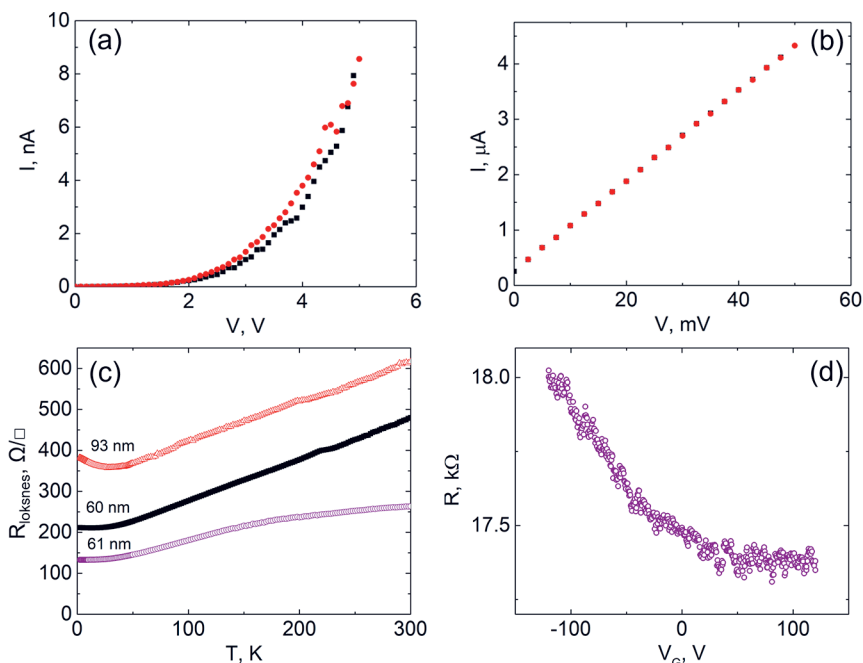
CuO nanovadiem ar termiski iztvaicētiem Pd/Au kontaktiem no augšas tika novērota liela īpatnējās elektriskās pretestības vērtību izkliede diapazonā no 0,05 līdz 160 $\Omega\cdot\text{m}$. Tika noteiktas augstas kontakta pretestības vērtības, sasniedzot 540 M Ω . Šie rezultāti norāda, ka, lai izveidotu uz CuO nanovadiem balstītus slēdžus ar augstu ieslēgta/izslēgta stāvokļa strāvas attiecību, būtu nepieciešams veikt kontaktu optimizāciju (piem., kodināšanu vai kontakta metālu piemeklēšanu, salāgojot izejās darbu vērtības).

Bi₂Se₃ nanolentas

Lai samazinātu Bi₂Se₃-metāla kontakta pretestību, pirms metalizācijas Bi₂Se₃ klājošais oksīds tika kodināts HCl/CH₃COOH maisījumā, un termiskā iztvaicēšana tika veikta pie spiediena, kas nav augstāks par $7e^{-7}$ mbar. Tas ļāva samazināt kontakta pretestību par vairākām kārtām un iegūt lineāru *I-V* atkarību (att. 4.4 (a–b)). Noteiktā īpatnējā pretestība gan brīvi stāvošām, gan uz virsmas esošām Bi₂Se₃ nanolentām bija ar kārtu $2\text{--}4\cdot 10^{-5}$ $\Omega\cdot\text{m}$ istabas temperatūrā, kas ir salīdzināma ar literatūrā norādītām vērtībām [30]. Att. 4.4 (c) redzama brīvi stāvošu Bi₂Se₃ nanolentu loksnes pretestības $R_{\text{loksnes}} = R_w/L$ atkarība no temperatūras, kur w – nanolentas platums, L – attālums starp kontaktiem. Lielākajai daļai paraugu tika novērota sagaidāma lineāra pretestības samazināšanās temperatūru apgabalā no 300 līdz 20 K, ko saista ar Bi₂Se₃ augsto dabisko defektu – Se vakanču – koncentrāciju. Par 20 K zemākā temperatūrā R_{loksnes} sasniedza plato (paraugi ar biezumu 60 nm un 61 nm) vai nelielu pretestības pieaugumu (paraugs ar 93 nm biezumu). Piesātinājumu zemo temperatūru reģionā var skaidrot ar pusvadītājiem raksturīgo tilpuma lādiņnesēju izsalšanas mehānismu [46], bet paaugstināšanos – ar elektronu-elektronu mijiedarbības ietekmes palielināšanos [47,48].

Lai pārliecinātos par vairākuma lādiņnesēju tipu Bi₂Se₃ nanolentās, uz pamatnes ar SiO₂ aizvara oksīdu novietotiem paraugiem tika veikti laukefeka mērījumi. Pakāpeniski mainot spriegumu V_{S-G} no 0 V uz negatīvu un pozitīvu polaritāti 2 K temperatūrā, tika reģistrētas R_{S-D} izmaiņas. Att. 4.4 (d) redzama pretestības R_{S-D} palielināšanās negatīvo sprieguma vērtību apgabalā no aptuveni 17,5 k Ω pie 0 V līdz 18,0 k Ω pie –120 V. Pozitīvu spriegumu apgabalā R_{S-D} izmaiņas netika novērotas. Šāda R_{S-D} atkarība laukefektā norāda uz n-tipa pusvadītāju, kas izskaidrojams ar negatīvo Se vakanču lielo koncentrāciju Bi₂Se₃ (plaknē $10^{13}\text{--}10^{14}$ cm^{-2} [29]) un atbilst temperatūru atkarībā novērotajai tendencei. Nelielo pretestības izmaiņu, kas ir tikai 2,86%, var izskaidrot ar augstu lādiņnesēju koncentrāciju. Relatīvi lielais nanolentas biežums nosaka to, ka transportā piedalās arī tilpuma lādiņnesēji. Kopā ar SiO₂ akumulācijas slāni, abi papildus vadītspējas kanāli apgrūtina lādiņu neitralitātes punkta sasniegšanu. Mazākas lādiņnesēju koncentrācijas pie virsmas gadījumā tiktu sagaidīts, ka

pretestība pie negatīvām sprieguma vērtībām sasniedz maksimumu (sauktu par lādiņu neitralitātes punktu) un tad samazinās, demonstrējot ambipolāro transportu.

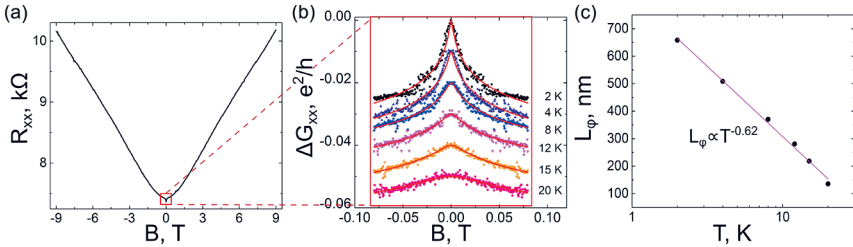


4.4. attēls. Bi_2Se_3 nanolentu-metāla elektrisko kontaktu optimizācija un lādiņnesēju transporta īpašības. Bi_2Se_3 nanolentu slāpās kodināšanas rezultātā no nelineāras I - V raksturlieknes ar augstu pretestību (a) iegūta lineāra I - V ar zemu pretestību (b). (c) Lokšnes pretestības temperatūras atkarība no 300 K līdz 2 K trīs dažāda biezuma brīvi stāvošām nanolentām. (d) Pretestības atkarība no aizvara sprieguma 2 K temperatūrā norāda uz n-tipa vairākuma lādiņnesēju laukefektu

4.2.3. Magnetopretestības mērījumi

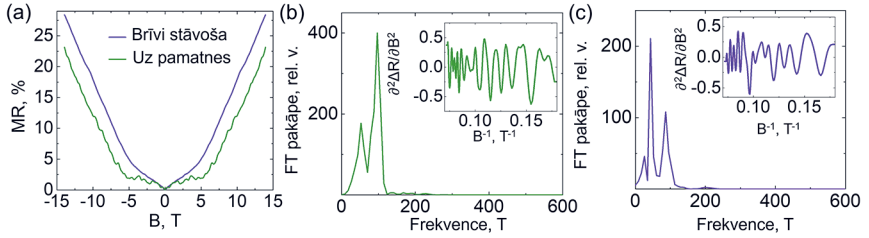
Gan uz pamatnes esošām, gan brīvi stāvošām Bi_2Se_3 nanolentām tika veikti magnetopretestības (MR) mērījumi paraugam perpendikulārā magnētiskajā laukā B līdz 14 T. Att. 4.5 (a) redzama tipiska garenvirziena pretestības R_{xx} atkarība no magnētiskā lauka brīvi stāvošai nanolentai. Pretestība palielinās, palielinoties B lauka intensitātei, jo Lorenca spēka ietekmē elektronu veiktā ciklotrona kustība samazina brīvā noskrējiena garumu. Lielākajai daļai paraugu tika novērots izteikts negatīvs maksimums apgalbā pie mazām B vērtībām ap $B = 0$, kas ir raksturīga elektronu interferences efekta (vājās anti-lokalizācijas

jeb WAL) iezīme (att. 4.5 (a) un (b)). Mērot WAL maksimumu atkarību no temperatūras no 2 K līdz 20 K, var redzēt, ka tie paliek mazāk izteikti pie augstākām temperatūrām (att. 4.5 (b) ilustrēti kā vadītspējas maksimumi). Šo temperatūras atkarību var skaidrot ar kvantu interferences efektu samazināšanos fononu izkliedes palielināšanās rezultātā. Veicot vadītspējas likņu simetrizāciju un piemeklējot liknes ar Hikami-Larkina-Nagaokas vienādojumu [49], tika noteikta elektronu fāzes koherences garuma L_φ atkarība no temperatūras (att. 4.5 (c)). 2 K temperatūrā L_φ ir $0,7 \mu\text{m}$ un samazinās līdz $0,1 \mu\text{m}$ pie 20 K. Brīvi stāvošām nanolentām iegūtā L_φ vērtība sakrīt ar literatūrā norādīto L_φ aptuveni 20 nm biezai ar molekulārā kūļa epitaksiju veidotai Bi_2Se_3 plānajai kārtiņai uz safīra substrāta 2 K temperatūrā [50], kas norāda uz šajā darbā sintezēto nanolentu augsto kvalitāti. No $L_\varphi(T)$ atkarības tika iegūts eksponenciālais faktors $-0,62$. Šī vērtība ir tuva $-0,5$, kas raksturīga 2D sistēmām, kurās dominējošais dekoherences mehānisms ir elektronu-elektronu mijiedarbība [50].



4.5. attēls. Pretestības mērījumi brīvi stāvošai Bi_2Se_3 nanolentai atkarībā no virsmas perpendikulāri vērsta magnētiskā lauka. (a) Bi_2Se_3 nanolentas pretestība 2 K temperatūrā no 0 līdz 9 T magnētiskajā laukā. Vājās anti-lokalizācijas apgabals $B = 0$ tuvumā ir izcelts ar sarkanu rāmi. (b) Paraugam (a) nomērītās pretestības liknes ir attēlotas kā vadītspējas starpība $G(B)-G(0)$ pie temperatūrām no 2 līdz 20 K. Nepārtrauktās liknes parāda aproksimāciju ar Hikami-Larkina-Nagaokas (HLN) vienādojumu. (c) No HLN vienādojuma aproksimācijas iegūtā elektronu fāzes koherences garuma L_φ atkarība no temperatūras ar eksponenciālo faktoru $-0,62$

Lai salīdzinātu brīvi stāvošu un uz virsmas atbalstītu Bi_2Se_3 nanolentu lādiņnesēju transporta īpašības, vienas un tās pašas nanolentas daļa tika padarīta brīvi stāvoša, bet daļa – atstāta uz pamatnes. Att. 4.6. (a) redzams, ka relatīvā magnetopretestība, kas tika noteikta kā $(R(B)-R(0))/R(0)$, bija nedaudz augstāka brīvi stāvošajai daļai. Lai raksturotu Šubņikova-de Hāsa (SdH) oscilācijas pie augstām B vērtībām, no eksperimentāli iegūtajiem $R(B)$ datiem tika atņemts polinomiālas funkcijas fons, un rezultāti attēloti diapazonā no 4 T līdz 14 T. Tad ΔR tika aprēķināta kā funkcija no inversā magnētiskā lauka $1/B$ un tās atvasinājums $\partial^2 \Delta R / \partial B^2$ analizēts, izmantojot Furjē transformāciju (att. 4.6 (b) un (c)).



4.6. attēls. Magnetoprestības mērījumu salīdzinājums vienas Bi_2Se_3 nanolentas daļai uz pamatnes (zaļā likne) un brīvi stāvošai daļai (violetā likne). Magnetoprestības (a) datu analīze ļāva reģistrēt Šubņikova-de Hāsa oscilācijas pie lieliem magnētiskajiem laukiem (b–c). Furjē transformāciju spektros divkāršajam atvasinājumam $\partial^2 \Delta R / \partial B^2$ (ieliktņi) ir parādītas divas dominējošās frekvences uz virsmas esošajai (b) un trīs frekvences brīvi stāvošajai daļai (c)

Uz virsmas esošajai daļai tika reģistrētas tikai divas frekvences pie $F_{supp,1} = 52,9$ T un $F_{supp,2} = 96,9$ T. Katra no SdH svārstības raksturojošajām frekvencēm atbilst atšķirīgam vadītspējas kanālam – apakšējai vai augšējai Bi_2Se_3 nanolentas virsmai vai tilpumam [30]. Tas, cik oscilācijas ir izteiktas katrā no kanāliem, ir atkarīgs no lādiņnesēju kustīguma, kas ir tieši proporcionāls izklīdes laikam. Apakšējās virsmas kanālam parasti ir sagaidāms mazāks kustīgums nekā augšējās, jo to samazina uz substrāta esošais lādiņnesēju akumulācijas slānis [30]. Tāpēc arī šajā darbā $F_{supp,1}$ un $F_{supp,2}$ tika saistītas ar Bi_2Se_3 augšējiem virsmas stāvokļiem un tilpuma stāvokļiem.

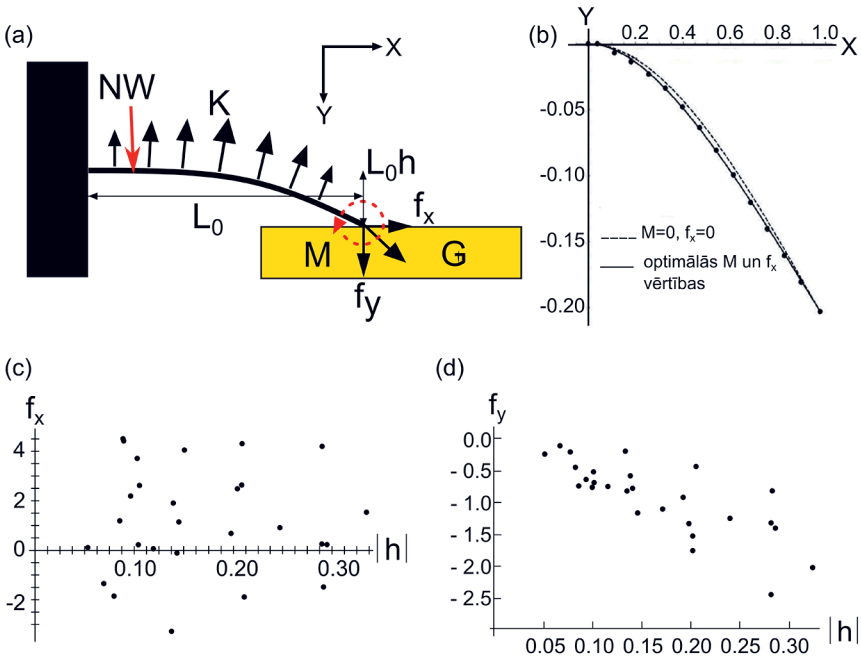
Brīvi stāvošajai Bi_2Se_3 nanolentas daļai tika reģistrētas trīs frekvences: $F_{sus,1} = 25,9$ T, $F_{sus,2} = 43,4$ T un $F_{sus,3} = 93,6$ T (att. 4.6 (c)). Trešās zemākās frekvences izcelsme tika saistīta ar apakšējās virsmas stāvokļiem, kuru kustīgumu vairs neietekmē substrāta akumulācijas slāņa klātbūtne. Tas nozīmē, ka brīvi stāvošai nanolentai var piekļūt abiem virsmas vadītspējas kanāliem un potenciāli efektīvāk izmantot virsmas stāvokļu īpašības NEM slēdžos. Tāds pats skaits dominējošo frekvenču reģistrēts arī brīvi stāvošiem deformētiem Bi_2Se_3 nanovadiem literatūrā [33].

4.3. NEM slēdži *in situ*

In situ nanomanipulāciju metodes tiek izmantotas to vieglās pielāgojamības dēļ – viena eksperimenta gaitā ir iespējams izpētīt plašu parametru telpu, mainot attālumus un leņķus starp nanostruktūru un elektrodiem. Tas ir īpaši nozīmīgi, jo vienādi sintezētām nanostruktūrām ir raksturīga ievērojama fizikālo īpašību izklīde. *In situ* metodes ļauj mērījumus veikt vienam un tam pašam paraugam. *In situ* SEM tika izpētīti šādi NEM slēdža darbības aspekti: kā no nanovada deformācijas var raksturot spēkus, kas darbojas NEM slēdža kontaktā un kā var izmantot rezonansi, lai samazinātu ieslēgšanās spriegumu un līdz ar to arī nanostruktūru degradācijas risku.

4.3.1. Spēki NEM slēdža kontaktā

Lai noteiktu spēkus vienā galā nostiprināta aktīvā elementa kontaktā ar aizvara elektrodu, tika veikti eksperimenti, ko veidoja šādi soļi (att. 4.7 (a-b)): 1) pakāpeniski palielinot spriegumu starp aktīvo elementu (nanovadu NV) ar garumu L_0 un plaknes elektrodu (e1), kas atrodas attālumā L_0h viens no otra, tika izveidots kontakts; 2) pēc kontakta izveidošanas tika reģistrēts eksperimentālais aktīvā elementa deformācijas profils un salīdzināts ar teorētiski modelēto, izmantojot virsmai paralēlā f_x un perpendikulārā f_y reakcijas spēka komponentes; 3) iepriekšējie soļi tika atkārtoti citai attāluma vērtībai. Teorētiskais modelis balstās uz Eilera-Bernulli deformāciju analīzi nelineārā vispārīgā gadījumā, ņemot vērā virsmas reakcijas spēku un lieces momentu M kontakta punktā.



4.7. attēls. Spēku noteikšana vienā galā nostiprināta NEM slēdža kontaktā. (a) Eksperimenta shēma, K – pieliktā ārējā elektrostātiskā spēka lineārais blīvums. (b) Tipiska kontaktā esoša deformēta nanovada forma, kur X – koordināte nanovada ass virzienā un Y – asij perpendikulārā virzienā. Aplī atbilst eksperimentālajiem datu punktiem, raustītā līnija – analītiskajam atrisinājumam pie $f_x = 0$ un $M = 0$, nepārtrauktā līnija – piemeklētajam atrisinājumam ar optimālām f_x un M vērtībām pie $|h| = 0,21$. (c) Virsmai paralēlā f_x (d) perpendikulārā f_y reakcijas spēka komponente kā funkcija no $|h|$

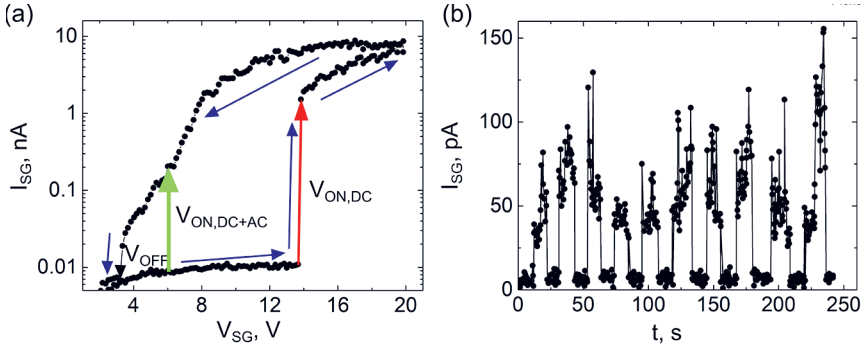
Tipisks vienā galā nostiprināta Ge nanovada ar 139 μm garumu un 99 nm rādiusu deformācijas profila grafiks redzams att. 4.7 (b). Deformācijas profili tika iegūti, salīdzinot SEM attēlus pirms un pēc kontakta izveides. Eksperimentālos rezultātus var aprakstīt, izvēloties atbilstošākās M un statistiskās berzes f_x vērtības. Att. 4.7 (c-d) redzamas iegūtās f_x un f_y spēka komponentes atkarībā no bezdimensionāla parametra $|h|$, kas atbilst nanovada nolieces un garuma attiecībai. f_x vērtībām tika konstatēta liela izkliede (att. 4.7 (c)), un to absolūtā vērtība bija salīdzināma vai pat lielāka nekā f_y (att. 4.7 (d)). Iegūtie rezultāti tika skaidroti ar to, ka nanovada gals kontakta izveides brīdī paātrinājuma ietekmē slīd pa kontakta elektroda virsmu. Pēc apstāšanās virsmas adhēzijas spēki traucē tam atgriezties relaksētā stāvoklī, tāpēc uz kontaktā esošu nanovadu iedarbojas gan lieces, gan aksiālās stiepes deformācija. Līdzīgu analīzi varētu veikt arī divos galos nostiprinātiem nanovadiem, bet to deformācijas profila raksturošana SEM būtu sarežģītāka.

4.3.2. NEM slēdža ieslēgšanās sprieguma samazināšana

Ieslēgšanās sprieguma samazināšana ļautu palielināt slēdžu efektivitāti un mazināt aktīvā elementa degradācijas riskus. Vienkāršākā pieeja ieslēgšanās sprieguma samazināšanai 2T slēdžī ir attāluma samazināšana starp aktīvo elementu un aizvara elektrodu. Tomēr attāluma samazināšana samazina arī elastības spēku, kas var novest pie nepietiekama spēka, lai atgrieztos sākotnējā stāvoklī.

Tika izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta metode, kas ļauj samazināt ieslēgšanās spriegumu, vienlaicīgi nesamazinot elastības spēku. Šajā metodē klasiski izmantotajam līdzspriegumam tika pievienots maiņspriegums ar aktīvā elementa rezonanses frekvenci. Tādā veidā aktīvais elements tiek vienlaicīgi deformēts kvazistatiski un tajā tiek ierosinātas mehāniskās svārstības. V_{ON} samazināšanas princips tika eksperimentāli pārbaudīts $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ un Bi_2Se_3 1D NS vienā galā nostiprinātos 2T NEM slēdžos *in situ*. Att. 4.8 (a) parādīta NEM slēdža ieslēgšanās raksturliktne un V_{ON} sprieguma vērtības, pielietojot tikai DC lauku vai pielietojot AC-DC lauku. Pirmajā gadījumā straujš strāvas lēcienš tika novērots pie 13,8 V. Pieliekot AC spriegumu ar frekvenci 610,8 kHz, kas tuva izmantotā aktīvā elementa rezonanses frekvencei $f_0 = 623$ kHz ar amplitūdu $V_{ON,AC} = 0,45$ V, ieslēgšanās tika reģistrēta pie $V_{ON,DC} = 5,0$ V.

Att. 4.8 (b) demonstrēta uz Bi_2Se_3 nanolentas balstīta NEM slēdža ieslēgta stāvokļa strāvas atkarība no laika. Bi_2Se_3 slēdžim AC-DC lauka ierosināta pārslēgšanās bija vienīgais veids, kā realizēt slēdža atkārtojamu darbību, jo ļāva samazināt strāvu ieslēgšanās brīdī. DC pārslēgšanās rezultātā tika novērota aktīvā elementa strukturāla degradācija.



4.8. attēls. NEM slēdža ieslēgšanās sprieguma samazināšana, pievienojot AC lauku. (a) NEM slēdža darbības raksturlīkne. Izmantojot tikai līdzsprieguma komponenti, NEM slēdzis ieslēdzas pie 13,8 V (sarkanā linija), bet izmantojot līdzspriegumu kombinācijā ar maiņspriegumu pie rezonanses frekvences, ieslēgšanās spriegums samazinās līdz 5,0 V (zaļā linija). (b) Strāvas atkarības no laika grafiks, parādot atkārtojamu Bi_2Se_3 nanolentas NEM slēdža pārslēgšanos, izmantojot AC-DC spriegumu

4.4. Integrēti NEM slēdži

4.4.1. Integrētu NEM slēdžu ģeometrija

Galvenie NEM slēdžu ģeometriskie parametri ir aktīvā elementa rādiuss/biezums, brīvi stāvošais garums un attālums līdz aizvara (G) elektrodam. Lai aprēķinātu fiksēto ģeometriju integrētos CuO un Bi_2Se_3 1D NS slēdžos, tika ņemtas vērā iepriekš noteiktās nanostruktūru elektromehāniskās īpašības un *in situ* mērījumu rezultāti. Tika izvēlēts tāds darbības sprieguma apgabals, kurā nenotiks aktīvā elementa degradācija un pie kura ieslēgtā stāvoklī caur slēdzi plūdis pietiekami liela strāva, lai nodrošinātu augstu signāla/trokšņa attiecību. Šis apgabals bija līdz 50 V CuO un līdz 20 V Bi_2Se_3 . Spriegumam atbilstošie ģeometriskie parametri tika aprēķināti, izmantojot skaitliski-analītisku modeli.

Lai aprēķinātu ieslēgšanās spriegumu V_{ON} , Eilera-Bernulli vienādojums divos galos nostiprinātam cilindriskam nanovadam ar rādiusu R un garumu L_0 , uz kuru darbojas elektrostatiskais spēks, tika izteikts formā:

$$Y^{(4)}(\xi) - F_x(\xi)Y^{(2)}(\xi) - F_E(\xi) = 0, \xi = \frac{L}{L_0} \quad (4.4)$$

Vienādojumā (4.4) Y ir pārvietojums nanovadam perpendikulārā virzienā, ξ – normalizēta koordināte nanovada garenvirzienā, F_x – stiepes spēks, F_E – lineārais elektrostatiskā spēka blīvums. Kāpinātājā norādīti atvasinājumi pēc normalizētās koordinātes.

Elektrostatiskais spēks tika izteikts kā

$$F_E = \frac{16}{EL_0 R^4} \frac{V^2 \epsilon_0}{\sqrt{z^2 - R^2} Lnc^2}, c = \frac{2z^2}{R^2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{z^2}} \right) - 1, \quad (4.5)$$

kur

$$z = z_0 + Y(\xi) \quad (4.6)$$

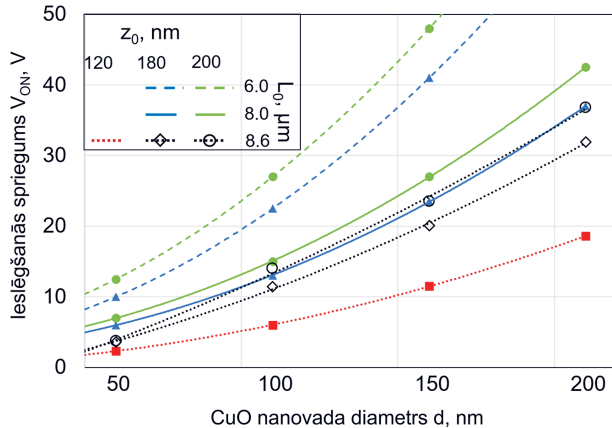
Vienādojumā (4.6) z_0 ir sākotnējais un z ir mainīgais attālums no nanovada ass līdz G elektrodam un E - Junga modulis.

Stiepes spēks F_x tika aprēķināts kā

$$F_x = \frac{4}{R^2} \left[1 - \int_0^1 \sqrt{(1 - (Y^{(1)}(\xi))^2) d\xi} \right] \quad (4.7)$$

Izmantojot abos galos nostiprināta nanovada robežnosacījumus, vienādojumi (4.4)–(4.7) tika risināti skaitliski virknei pakāpeniski pieaugošu elektriskā sprieguma vērtību. Sliekšņa spriegums, kuru palielinot, atrisinājums vairs neeksistē (t.i., nanovada virsma šķērso elektroda virsmu), tika noteikts kā V_{ON} .

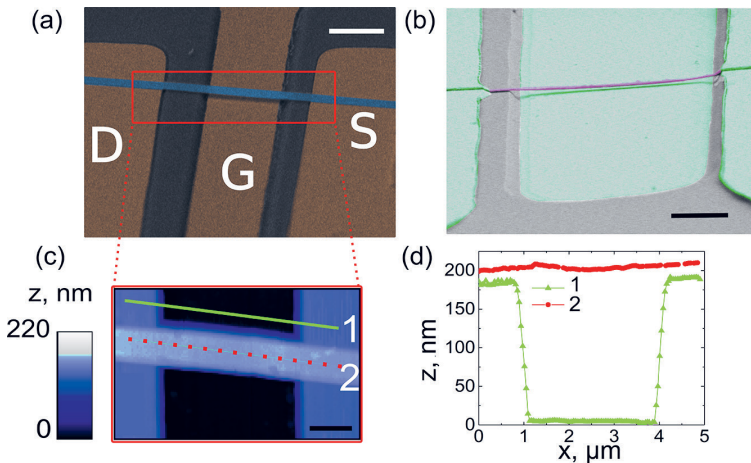
CuO NEM slēdža V_{ON} vērtības atkarībā no izmēriem un attāluma līdz G elektrodam grafiski attēlotas att. 4.9, pieņemot no iepriekšveiktajiem mērījumiem vidējo Junga moduļa vērtību šajā diametru diapazonā kā 155 GPa.



4.9. attēls. Uz CuO balstīta NEM slēdža V_{ON} aprēķins atkarībā no nanovada diametra d . z_0 – attālums līdz G elektrodam, L_0 – brīvi stāvošais nanovada garums. Līnijas pievienotas uzskatāmībai. Raustīta līnija atbilst $L_0 = 6,0 \mu m$, nepārtraukta $L_0 = 8,0 \mu m$ un punktota $L_0 = 8,6 \mu m$. Sarkans kvadrāts atbilst $z_0 = 120$ nm, zils trīsstūris $z_0 = 180$ nm un zaļš aplis $z_0 = 200$ nm

4.4.2. NEM slēdžu apkopojums

Ņemot vērā iepriekšējās nodaļās noteikto viendimensionālo nanostruktūru morfoloģiju, elektriskās un mehāniskās īpašības, darbības spriegumu apgabalu un teorētisko modeli, tika noteikta integrēto slēdžu ģeometrija. Izveidotie integrētie NEM slēdži tika raksturoti optiskajā mikroskopā, SEM un AFM to izgatavošanas procesā un darbības pārbaudes laikā. Att. 4.10 redzamā Bi_2Se_3 NEM slēdža SEM noteiktais garums bija $3,3\ \mu\text{m}$, ar AFM noteiktais attālums līdz G elektrodam $190\ \text{nm}$ un biezums $51\ \text{nm}$. Daļai no brīvi stāvošajiem aktīvajiem elementiem ar AFM un/vai SEM tika konstatēts vienmērīgs deformācijas profils virs G elektroda (att. 4.10 (a)), daļai – nevienmērīgs (att 4.10. (b)), kas tika ņemts vērā, nosakot sagaidāmo ieslēgšanās spriegumu.



4.10. attēls. Izgatavotie integrētie NEM slēdži. (a) SEM attēls ar Bi_2Se_3 NEM slēdzi un iezīmētiem S, D un G elektrodēm. (b) NEM slēdzis ar nevienmērīgu attālumu starp aktīvo elementu un G elektrodu. (c) Iezīmētā laukuma (a) AFM attēls, lai noteiktu attālumu līdz G elektrodam, nanovada deformācijas profilu un biezumu un (d) attēlā iezīmēto līnijas profilu grafiki. Attēli iekrāsoti uzskatāmībai

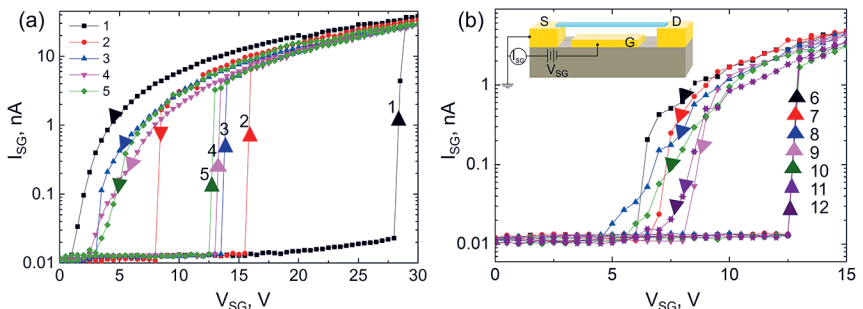
Tabula 4.1 apkopo raksturoto 10 CuO un Bi_2Se_3 NEM slēdžu izmērus, elastības parametrus un aprēķinātās un eksperimentāli iegūtās V_{ON} vērtības. CuO NEM slēdžiem tika izmantoti aktīvie elementi ar diametru no $50\ \text{nm}$ līdz $210\ \text{nm}$, un Bi_2Se_3 slēdžiem elementi ar biezumu robežās no $51\ \text{nm}$ līdz $145\ \text{nm}$. Attālums līdz G elektrodam variēja no $120\ \text{nm}$ līdz $200\ \text{nm}$ un eksperimentāli noteiktās V_{ON} vērtības no $4,5\ \text{V}$ līdz $49\ \text{V}$. Visiem Tabulā 4.1 iekļautajiem NEM slēdžiem aktīvā elementa galos ir kontakti, kas balstās uz adhēziju starp aktīvo elementu un apakšējo plānās kārtiņas elektrodu (S un D), bez papildus stiprinājuma no augšas.

4.1. tabula. Izveidoto integrēto CuO un Bi₂Se₃ NEM slēdžu parametru apkopojums. Norādīti ģeometriskajiem parametriem (diametram d /biezumam t , brīvi stāvošajam garumam L_0 , attālumam līdz G elektrodam z_0 , laukuma inerces momentam I) atbilstošais elastības spēks F_{elast} un eksperimentālās $V_{ON,eksp}$ un aprēķinātās $V_{ON,apr}$ ieslēgšanas sprieguma vērtības

NEM slēdža nr.	d (t), nm	L_0 , μm	z_0 , nm	$I \times 10^{-29}$, m^{-4}	F_{elast} , nN	$V_{ON,eksp}$ V	$V_{ON,apr}$ V
CuO-1	50	6,2	120	0,03	11,1	4,5	4,3
CuO-2	125	8,6	120	1,20	16,8	12	8,5
CuO-3	210	6,4	120	9,60	325	49	39
CuO-4	100	7,4	190	0,49	17,1	26	17
CuO-5	118	9,2	190	0,95	17,3	16	12
CuO-6	150	6,7	190	2,50	117	28	37
Bi ₂ Se ₃ -1	51	3,3	190	0,57	64,0	20	23
Bi ₂ Se ₃ -2	122	3,3	190	3,30	368	25	27
Bi ₂ Se ₃ -3	86	3,6	200	1,00	91,0	17	15
Bi ₂ Se ₃ -4	145	6,7	200	2,70	28,0	27	27

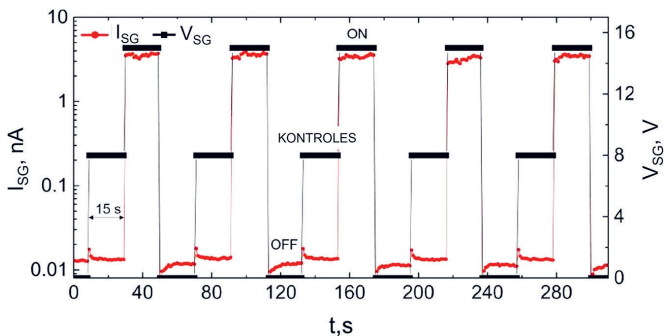
4.4.3. CuO NEM slēdži istabas temperatūrā

Strāvas-sprieguma atkarība pirmajos 5 darbības ciklos istabas temperatūrā CuO NEM slēdžim ar diametru $d = 150$ nm, garumu $L_0 = 6,7$ μm un attālumu līdz G elektrodam $z_0 = 190$ nm (CuO-6 tabulā 4.1) parādīta att. 4.11 (a). Tika novērots, ka V_{ON} samazinās ar katru nākamo ciklu, bet izslēgta un ieslēgta stāvokļa strāva saglabā savas vērtības. V_{ON} sistemātiskās izmaiņas tika skaidrotas ar mehānisku relaksāciju uz CuO nanovada-apakšējo kontaktu robežvirsmas, kuras rezultātā notiek nanovada slidēšana. Līdzīgs V_{ON} samazināšanās efekts mehāniski nenostiprinātu elektrodu gadījumā novērots arī literatūrā [15,51].



4.11. attēls. Integrēta CuO NEM slēdža sākotnējo darbības ciklu I - V raksturlieknes. (a) V_{ON} pakāpeniski mainās no 28,0 V (melnā likne) uz 12,5 V (zaļā likne) piecu pirmo darbības ciklu gaitā. (b) Pēc pirmajiem cikliem iestājas darbības režīms, kurā V_{ON} saglabā 12,5 V vērtību vairāku ciklu garumā

No piektā cikla šim slēdzim tika novērots stabils ieslēgšanās spriegums V_{ON} pie 12,5 V, V_{OFF} paliekot robežās no 2,5 līdz 3,5 V (att. 4.11 (b)). Stabila V_{ON} režīmā tika raksturots, kā mainās strāva ieslēgtā stāvoklī, veicot ilgstošu NEM slēdža ciklēšanu (att. 4.12). Trīs dažādi sprieguma līmeņi tika pielikti kvadrātiska signāla formā: 0 V (OFF stāvoklis), 8,0 V (kontroles spriegums) un 15 V (ieslēgts stāvoklis). Kontroles spriegums bija nepieciešams, lai pārliecinātos, ka nanovads nav nonācis pastāvīgā kontaktā ar G elektrodu. 100 darbības ciklu laikā netika novērota ieslēgta stāvokļa strāvas samazināšanās vai būtiska izslēgta stāvokļa strāvas palielināšanās, kas liecina par CuO nanovadu termisko un mehānisko izturību.



4.12. attēls. Fragments no ilgstošas CuO slēdža ciklēšanas, izmantojot kvadrātiska V_{SG} sprieguma signālu. Sarkanie datu punkti norāda strāvas līmeni I_{SG} izslēgtā ($\sim 0,01$ nA, 0 V), kontroles ($\sim 0,01$ nA, 8,0 V) un ieslēgtā ($\sim 4,0$ nA, 15 V) stāvoklī, ko kontrolē pieliktais spriegums (melnie datu punkti)

4.4.4. Bi_2Se_3 NEM slēdži kriogēnās temperatūrās

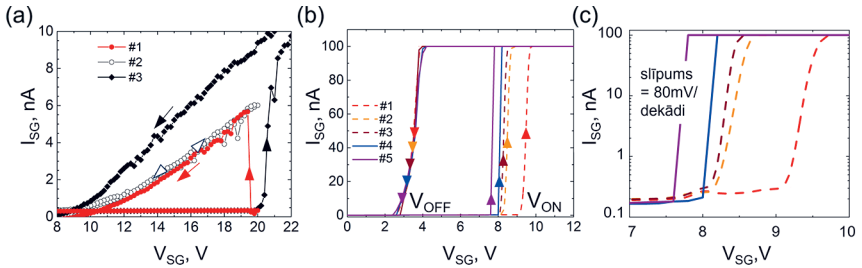
Klasiskie NEM slēdži

NEM slēdža darbība kriogēnās temperatūrās tika demonstrēta Bi_2Se_3 nanolentu slēdžos ar nefiksētiem kontaktiem. Izgatavoto Bi_2Se_3 NEM slēdžu aktīvo elementu biezums bija no 51 līdz 145 nm, attālums līdz G elektrodam līdz 200 nm un eksperimentāli noteiktais ieslēgšanas spriegums V_{ON} no 8 līdz 27 V. Tipiskam Bi_2Se_3 NEM slēdzim ar $L_0 = 3,3$ μm , $t = 51$ nm, $z_0 = 190$ nm un $w = 512$ nm (Bi_2Se_3 -1 tabulā 4.1) eksperimentāli tika noteikta 19,9 V V_{ON} vērtība 5 K temperatūrā.

Slēdži tika realizēti dažādos darbības režīmos. Energoneatkarīgs (angļu val. *non-volatile*) režīms tika realizēts, kad adhēzijas spēks bija lielāks par elastības spēku pēc elektriskā sprieguma noņemšanas, liekot aktīvajam elementam palikt kontaktā ar elektrodu. I - V raksturlīknēs tas izpaudās kā klasisks NEM slēdža ieslēgšanās cikls ar strauju strāvas lēcieni (att. 4.13 (a) cikls #1), kuram seko nelineāra Šotki-tipa I - V bez lēciena (att. 4.13 (a) cikls #2). Palielinot temperatūru līdz 300 K un atdzesējot atkārtoti līdz 5 K, ierīcei tika novērots nākamais

ieslēgšanās cikls ar strāvas lēcieni (att. 4.13 (a) cikls #3). Līdzīga atmiņas elementa funkcija, tikai bez atslēgšanas, iepriekš realizēta ar Si un Ge nanovadiem [10].

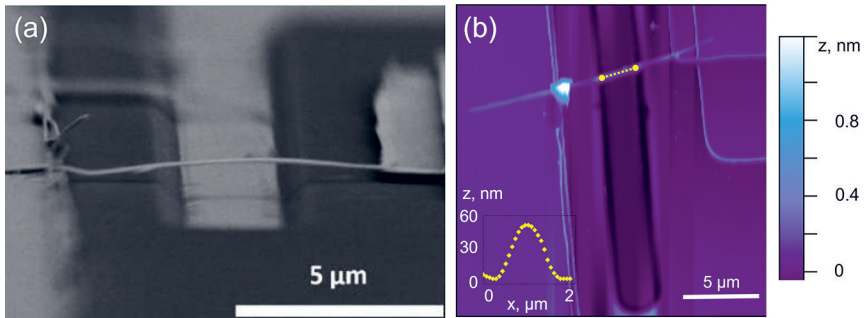
Energoatkarīgs (angļu val. *volatile*) darbības režīms, kur nanolenta atgriežas sākotnējā stāvoklī pēc sprieguma noņemšanas, tika realizēts, kad elastības spēks pārsniedza adhēzijas spēku kontaktā. Att. 4.13 (b-c) ieslēgšanās reģistrēta pie $V_{ON} = 9,2$ V 10 K temperatūrā. Pirmajos 3 ciklos V_{ON} pakāpeniski samazinājās līdz aptuveni 8,0 V. Nākamajos 2 ciklos, kas tika veikti 5 K temperatūrā, V_{ON} samazinājās līdz aptuveni 7,8 V. Pakāpeniskā ieslēgšanās sprieguma samazināšanās ir līdzīga kā CuO gadījumā. Atšķirībā no CuO NEM slēdža, novērota krasāka pāreja uz izslēgtu stāvokli pie aptuveni 2,3 V. Izslēgšanās sprieguma vērtība saglabājās tā pati gan 10 K, gan 5 K temperatūrā. Izslēgtā stāvokļa strāvas līmenis bija ap 0,1 nA un ieslēgtā ap 100 nA, sniedzot 10^3 ON/OFF strāvas attiecību. Vidējā zemsliekšņa slīpuma vērtība bija 80 mV uz strāvas dekādi (att. 4.13 (c)). Šī vērtība ir lielāka nekā teorētiskais MOSFET limits 60 mV uz dekādi istabas temperatūrā, bet būtu viegli paaugstināma, piemēram, palielinot strāvas ierobežojumu ķēdē.



4.13. attēls. Atkārtojama energoneatkarīga (a) un energoatkarīga ((b) un (c)) Bi_2Se_3 NEM slēdža darbība 5 un 10 K temperatūrās. (a) Pirmajam pārslēgšanās ciklam (pildīti sarkani aplī) seko cikls bez strāvas lēciena (tukši aplī), kam seko nākamais cikls ar strāvas lēcieni (pildīti melni rombi) pēc sildīšanas un atkārtotas dzesēšanas. (b) Trīs cikli 10 K (#1–#3 raustītās līnijas), kam seko 2 cikli 5 K (#4–#5 nepārtrauktās līnijas). (c) I - V raksturlīknes no (b) attēlotas log skalā zemsliekšņa slīpuma noteikšanai

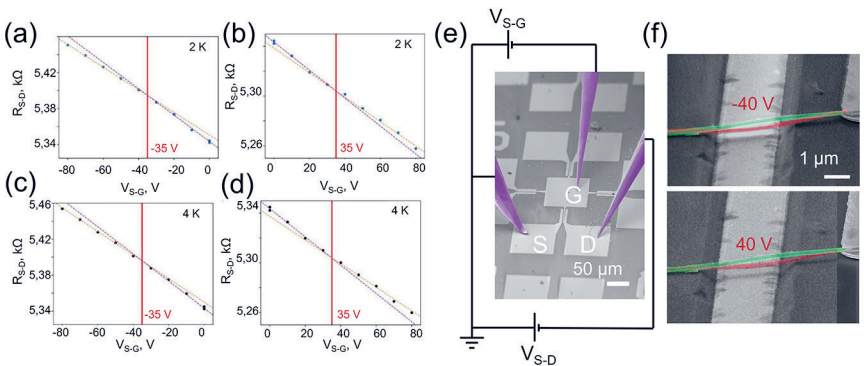
NEM slēdži ar strāvas kontroli izslēgtā stāvoklī

Klasiskā NEM slēdžī nav iespējams iegūt informāciju par aktīvā elementa deformācijas gaitu, tikai reģistrēt krasas strāvas izmaiņas brīdī, kad aktīvais elements jau ir nonācis kontaktā ar aizvara elektrodu. Tika pārbaudīts, vai, mērot cauri aktīvajam elementam plūstošo strāvu, var iegūt informāciju par tā deformācijas stāvokli. Lai padarītu strāvas izmaiņas labāk novērojamas, tika izveidots NEM slēdžis ar uz augšu izliektu Bi_2Se_3 nanolentu (att. 4.14). Šādam slēdžim tika paredzēta krasa pāreja no viena deformācijas stāvokļa uz otru brīdī, kad pieliktais spēks sasniedz kritisko vērtību, tāpēc varētu sagaidīt arī krasākas cauri plūstošās strāvas izmaiņas.



4.14. attēls. (a) SEM attēls lenķi ar NEM slēdzi ar augšup izliektu Bi_2Se_3 nanolentu un tā AFM attēls (b). Grafiks parāda dzeltenās līnijas profilu nanolentai virs G elektroda

Starp nanolentu un G elektrodu tika pielikts spriegums V_{S-G} un monitorēta pretestība nanolentā R_{S-D} . 2 K un 4 K temperatūrā V_{S-G} tika pakāpeniski palielināts līdz 80 V amplitūdai gan ar pozitīvu, gan negatīvu polaritāti (att. 4.15 (a)). Tika novērota atkarība, kas var tikt sadalīta divos lineāros reģionos ar atšķirīgu slīpuma koeficientu, kas mainās pie ± 35 V. Šī izmaiņa tika saistīta ar nanolentas deformācijas maiņu no augšup izliektas un lejup izliektu. Lai pārliecinātos par šo efektu, NEM slēdža darbība tika raksturota *in situ* SEM istabas temperatūrā (att. 4.15 (e-f)). Pie līdzīgām sprieguma vērtībām tika apstiprināta pāreja no viena deformācijas stāvokļa uz otru gan pie pozitīvas, gan negatīvas G sprieguma polaritātes (att. 4.15 (f)).



4.15. attēls. R_{S-D} atkarībā no V_{S-G} 2 K (a-b) un 4 K (c-d) temperatūrā. Oranžā raustītā līnija apmēsimē lineāru sakarību pie lielām elektriskā lauka vērtībām, bet violetā – pie mazām. Vertikālā sarkanā līnija norāda pārejas sprieguma vērtību ± 35 V. (e) SEM attēls ar (a-d) mērīto slēdzi *in situ* ar pievienotiem nanomanipulatora elektrodiem. (f) Viens otram pa virsu uzlikti SEM attēli, kas apstiprina Bi_2Se_3 nanolentas deformāciju, kad pieliktais V_{S-G} spriegums mainās no 0 V (zaļš) uz pārejas sprieguma (sarkans) vērtību. Augšējais attēls atbilst negatīvam, apakšējais – pozitīvam spriegumam

Mehāniskā sprieguma izraisītā elektriskās pretestības izmaiņa ļauj nepārtraukti kontrolēt strāvu slēdži ne tikai pārslēgšanās brīdī, bet arī visos deformācijas brīžos.

SECINĀJUMI

1. Izpētīts, ka CuO termiskās oksidēšanas metode ar elektrisko lauku paaugstināta mitruma atmosfērā sniedz NEM slēdžu izveidei optimālo nanovadu iznākumu un morfoloģiju ar vidējo diametru aptuveni 70 nm un vidējo garumu aptuveni 5 μm . Bi_2Se_3 nanolentu sintēze uz 3 nm biezas Au kārtiņas nodrošina optimālo iznākumu ar aptuveni 100 nanolentām uz 1000 μm^2 ar 3 līdz 6 μm vidējo garumu un 30 līdz 110 nm vidējo biezumu.
Sintezēto nanostruktūru morfoloģija ļauj izveidot NEM slēdžus, kas atkārtjami ieslēdzas un izslēdzas. Lai izveidotu NEM slēdžus ar ieslēgšanās spriegumu, kas ir zemāks par 4 V, nepieciešama tālāka dimensiju samazināšana.
2. CuO nanovadu efektīvajam Junga modulim tika novērota atkarība no nanovadu diametra pie diametra vērtībām, kas mazākas par 50 nm, sasniedzot līdz pat 550 GPa Junga moduļa vērtību. Bi_2Se_3 nanolentām tika novērota konstanta 44 GPa vidējā Junga moduļa vērtība apskatītajā nanolentu biežumu diapazonā no 35 nm līdz 171 nm.
Izstrādāta metode brīvi stāvošu divos galos nostiprinātu nanostruktūru vibrāciju elektriskai detektēšanai atkarībā no temperatūras diapazonā no 5 K līdz 300 K un frekvenču diapazonā līdz 10 MHz. Ar šo metodi Bi_2Se_3 nanolentām noteikta izteikta rezonanses frekvences atkarība no temperatūras, ko varētu skaidrot ar diferenciālo nanostruktūras-elektrodu-substrāta materiālu termisko izplešanos.
4. Izstrādāta metode ar augšupejošo pieeju sintezētu viendimensionālu nanostruktūru integrēšanai NEM slēdžos, izmantojot foto- un elektronu kūļa litogrāfiju. Ar šo metodi izveidoti NEM slēdži ar CuO nanovadiem un Bi_2Se_3 nanolentām kā aktīvajiem elementiem 120 nm līdz 200 nm attālumā no nekustīgā aizvara elektroda.
5. Demonstrēti uz CuO nanovadiem balstīti NEM slēdži ar atkārtojamu darbību istabas temperatūrā. CuO NEM slēdzim tika īstenota pārslēgšanās ar stabili 12,5 V ieslēgšanās spriegumu un aptuveni 4,0 nA strāvu ieslēgtā stāvoklī. Līdz ar to NEM slēdži ar CuO nanovadiem kā aktīvajiem elementiem ir piemēroti robustai darbībai pielietojumos, kur nepieciešama pārslēgšanās pie augstām sprieguma vērtībām.
6. Demonstrēti NEM slēdži kriogēnās temperatūrās, kas, izmantojot Bi_2Se_3 nanolentas kā aktīvos elementus, realizē gan energoatkarīgu, gan energoneatkarīgu darbības režīmu. Šiem slēdžiem zemākais ieslēgšanās spriegums bija 8,0 V, ieslēgtas/izslēgtas strāvas attiecība 10^3 un zemsliekšņa slīpums 80 mV/dekādi, kas ir tuva elektronisko tranzistoru limitam istabas temperatūrā (60 mV/dekādi).
7. Tika demonstrēti NEM slēdži 2 K temperatūrā ar nepārtrauktu strāvas kontroli caur Bi_2Se_3 nanolentas aktīvo elementu ieslēgtā stāvoklī. Jaunā pārslēgšanās metode ļautu precīzāk noteikt ieslēgšanās spriegumu un palielināt NEM slēdža darbības ciklu skaitu.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] M. Muruganathan, N. H. Van, M. E. Schmidt, and H. Mizuta, *Advanced Functional Materials* **32**, 2209151 (2022).
- [2] S. Saha, M. S. Baghini, M. Goel, and V. R. Rao, *IEEE Transactions on Electron Devices* **67**, 3894 (2020).
- [3] T.-H. Lee, S. Bhunia, and M. Mehregany, *Science* **329**, 1316 (2010).
- [4] Y. Qian, B. W. Soon, P. Singh, H. Campanella, and C. Lee, *Nanoscale* **6**, 5606 (2014).
- [5] H. S. Kwon, J. W. Ko, and W. Y. Choi, *IEEE Electron Device Letters* **41**, 1257 (2020).
- [6] Y. Li, E. Worsey, S. J. Bleiker, P. Edinger, M. Kumar Kulsreshath, Q. Tang, A. Yuji Takabayashi, N. Quack, P. Verheyen, W. Bogaerts, K. B. Gylfason, D. Pamunuwa, and F. Niklaus, *Nanoscale* **15**, 17335 (2023).
- [7] X. Deng, N. Kang, and Z. Zhang, *Chip* **2**, 100064 (2023).
- [8] J. Andzane, R. Meija, A. I. Livshits, J. Prikulis, S. Biswas, J. D. Holmes, and D. Erts, *Journal of Materials Chemistry C* **1**, 7134 (2013).
- [9] J. Andzane, N. Petkov, A. I. Livshits, J. J. Boland, J. D. Holmes, and D. Erts, *Nano Letters* **9**, 1824 (2009).
- [10] K. J. Ziegler, D. M. Lyons, J. D. Holmes, D. Erts, B. Polyakov, H. Olin, K. Svensson, and E. Olsson, *Applied Physics Letters* **84**, 4074 (2004).
- [11] O. Y. Loh and H. D. Espinosa, *Nature Nanotechnology* **7**, 283 (2012).
- [12] A. Peschot, C. Qian, and T.-J. K. Liu, *Micromachines* **6**, 1046 (2015).
- [13] L. Wang, P. Zhang, Z. Liu, Z. Wang, and R. Yang, *Chip* 100038 (2023).
- [14] M. Dequesnes, S. V. Rotkin, and N. R. Aluru, *Nanotechnology* **13**, 120 (2002).
- [15] O. Loh, X. Wei, J. Sullivan, L. E. Ocola, R. Divan, and H. D. Espinosa, *Advanced Materials* **24**, 2463 (2012).
- [16] X. L. Feng, M. H. Matheny, C. A. Zorman, M. Mehregany, and M. L. Roukes, *Nano Letters* **10**, 2891 (2010).
- [17] G. M. Rebeiz, N. S. Barker, J. B. Muldavin, and G.-L. Tan, in *RF MEMS* (John Wiley & Sons, Ltd, 2003), pp. 21–57.
- [18] C. Jia, Z. Lin, Y. Huang, and X. Duan, *Chem. Rev.* **119**, 9074 (2019).
- [19] F. Marabelli, G. B. Parravicini, and F. Salghetti-Drioli, *Physical Review B* **52**, 1433 (1995).
- [20] N. Kaur, M. Singh, and E. Comini, *Langmuir* **36**, 6326 (2020).
- [21] A. M. B. Gonçalves, L. C. Campos, A. S. Ferlauto, and R. G. Lacerda, *Journal of Applied Physics* **106**, 034303 (2009).
- [22] G. Filipič and U. Cvelbar, *Nanotechnology* **23**, 194001 (2012).
- [23] X. Jiang, T. Herricks, and Y. Xia, *Nano Letters* **2**, 1333 (2002).
- [24] C. Tang, X. Liao, W. Zhong, H. Yu, and Z. Liu, *RSC Advances* **7**, 6439 (2017).
- [25] C. H. Xu, C. H. Woo, and S. Q. Shi, *Superlattices and Microstructures* **36**, 31 (2004).
- [26] Y. Xia, D. Qian, D. Hsieh, L. Wray, A. Pal, H. Lin, A. Bansil, D. Grauer, Y. S. Hor, R. J. Cava, and M. Z. Hasan, *Nature Physics* **5**, 398 (2009).
- [27] A. Ambrosi, Z. Sofer, J. Luxa, and M. Pumera, *ACS Nano* **10**, 11442 (2016).
- [28] Y. Ando, *Journal of the Physical Society of Japan* **82**, 102001 (2013).

- [29] S. N. Shirodkar, G. M. Stephen, A. T. Hanbicki, A. L. Friedman, and P. Dev, *Journal of Physical Chemistry C* **126**, 16877 (2022).
- [30] G. Kunakova, L. Galletti, S. Charpentier, J. Andzane, D. Erts, F. Léonard, C. D. Spataru, T. Bauch, and F. Lombardi, *Nanoscale* **10**, 19595 (2018).
- [31] S. M. Young, S. Chowdhury, E. J. Walter, E. J. Mele, C. L. Kane, and A. M. Rappe, *Physical Review B* **84**, 085106 (2011).
- [32] D. Flötotto, Y. Bai, Y.-H. Chan, P. Chen, X. Wang, P. Rossi, C.-Z. Xu, C. Zhang, J. A. Hlevyack, J. D. Denlinger, H. Hong, M.-Y. Chou, E. J. Mittemeijer, J. N. Eckstein, and T.-C. Chiang, *Nano Letters* **18**, 5628 (2018).
- [33] C. Schindler, C. Wiegand, J. Sichau, L. Tiemann, K. Nielsch, R. Zierold, and R. H. Blick, *Applied Physics Letters* **111**, 171601 (2017).
- [34] L. T. Ngo, D. Almécija, J. E. Sader, B. Daly, N. Petkov, J. D. Holmes, D. Erts, and J. J. Boland, *Nano Letters* **6**, 2964 (2006).
- [35] R. Meija, J. Kosmaca, L. Jasulaneca, K. Petersons, S. Biswas, J. D. Holmes, and D. Erts, *Nanotechnology* **26**, (2015).
- [36] M. Aghazadeh Meshgi, S. Biswas, D. McNulty, C. O'Dwyer, G. Alessio Verni, J. O'Connell, F. Davitt, I. Letofsky-Papst, P. Poelt, J. D. Holmes, and C. Marschner, *Chemistry of Materials* **29**, 4351 (2017).
- [37] J. Andzane, G. Kunakova, S. Charpentier, V. Hrkac, L. Kienle, M. Baitimirova, T. Bauch, F. Lombardi, and D. Erts, *Nanoscale* **7**, 15935 (2015).
- [38] E. P. S. Tan, Y. Zhu, T. Yu, L. Dai, C. H. Sow, V. B. C. Tan, and C. T. Lim, *Applied Physics Letters* **90**, 163112 (2007).
- [39] G. Wang and X. Li, *Journal of Applied Physics* **104**, 113517 (2008).
- [40] L. Fang, Y. Jia, D. J. Miller, M. L. Latimer, Z. L. Xiao, U. Welp, G. W. Crabtree, and W.-K. Kwok, *Nano Letters* **12**, 6164 (2012).
- [41] S. Giraud, A. Kundu, and R. Egger, *Physical Review B* **85**, 035441 (2012).
- [42] A. Cavallin, V. Sevriuk, K. N. Fischer, S. Manna, S. Ouazi, M. Ellguth, C. Tusche, H. L. Meyerheim, D. Sander, and J. Kirschner, *Surface Science* **646**, 72 (2016).
- [43] Y. Xu, C. Chen, V. V. Deshpande, F. A. DiRenno, A. Gondarenko, D. B. Heinz, S. Liu, P. Kim, and J. Hone, *Applied Physics Letters* **97**, 243111 (2010).
- [44] C. B. Maliakkal, J. P. Mathew, N. Hatui, A. A. Rahman, M. M. Deshmukh, and A. Bhattacharya, *Journal of Applied Physics* **118**, 114301 (2015).
- [45] R. G. DeAnna, S. Roy, C. A. Zorman, and M. Mehregany, *Proc. Int. Conf. Modeling and Simulation of Microsystems*, 644–647 (1999).
- [46] L. He, F. Xiu, Y. Wang, A. V. Fedorov, G. Huang, X. Kou, M. Lang, W. P. Beyermann, J. Zou and K. L. Wang, *Journal of Applied Physics* **109**, 103702 (2011).
- [47] W. J. Wang, K. H. Gao, and Z. Q. Li, *Scientific Reports* **6**, 25291 (2016).
- [48] J. Wang, A. M. DaSilva, C.-Z. Chang, K. He, J. K. Jain, N. Samarth, X.-C. Ma, Q.-K. Xue, and M. H. W. Chan, *Physical Review B* **83**, 245438 (2011).
- [49] S. Hikami, A. I. Larkin, and Y. Nagaoka, *Progress of Theoretical Physics* **63**, 707 (1980).
- [50] S. Matsuo, K. Chida, D. Chiba, T. Ono, K. Slevin, K. Kobayashi, T. Ohtsuki, C.-Z. Chang, K. He, X.-C. Ma, and Q.-K. Xue, *Physical Review B* **88**, 155438 (2013).
- [51] P. Ryan, Y.-C. Wu, S. Somu, G. Adams, and N. McGruer, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **21**, (2011).

PATEICĪBAS

Es vēlos pateikties darba vadītājam Donātam Ertam par pavadīšanu aizraujošajā nanoelektromehānikas jomā, kurā esat bijis vairāku būtisku atklājumu pionieris. Es novērtēju Jūsu degsmi, radošās un nereti grūti īstenojamās idejas, spēju uzdot jautājumus un pievērst uzmanību gan lielajam zinātniskās izpētes stāstam, gan tā niansēm.

Ķīmiskās fizikas institūta kolēģi uzturēja manu motivāciju šo gadu laikā ar savu aizrautību, jautro garu, pacietību un klātbūtni. Īpašs paldies nanoelektromehānikas grupai: Ļenai, Raimondam, Raitim, Aleksandram Livšicam, Janai, Edijam, Matīsam, Jurim un Raimondam P. un visiem pārējiem. Paldies, Elza, ka biji kopā ar mani vientuļākajā pētniecības posmā. Es no jums visiem esmu daudz mācījusies.

Paldies maniem Cietvielu fizikas institūta kolēģiem par sadarbību, atbalstu un iepazīstināšanu ar aizraujošo mikro- un nanoizgatavošanas pasauli.

Un paldies Elīnai, Vjačeslavam, Kirilam un Guntai par centieniem izskaidrot grūti izskaidrojamas lietas.

Noslēgumā paldies manai ģimenei un draugiem. Īpaši manai meitai Emmai par to, ka teici, ka nevēlies vairs izaugt liela, ja pieaugušajiem ir tik garlaicīgas profesijas kā manējā. (Ar nepacietību gaidu Tavu doktora darbu).

