

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

**PUSVADĪTĀJU NANOVAĻDU ĪPAŠĪBAS UN PIELIETOJUMI
NANOELEKTROMEĶĀNISKĀS SISTĒMĀS**

BAKALĀURA DARBS

Autors: **Raitis Sondors** Stud.apl.nr.: rs07019

Darba vadītāji: Asoc.prof. Dr. Chem. Donāts Erts,

Vad.pētn. Dr. Phys. Jeļena Kosmača

RĪGA, 2019

ANOTĀCIJA

Nanovadi ir viendimensionāli nanomateriāli ar rādīsu nanometros un garumu mikrometros. Nanovadi ir vēlamas komponentes nanoelektromehāniskās (NEM) ierīcēs, piemēram, slēdžos. Šajās ierīcēs nanovadi kalpo kā aktīvie elementi, kas, mehāniski pārslēdzoties, spēj pārslēgt elektriskās ķēdes, tāpēc ir svarīgas nanovadu mehāniskās un elektriskās īpašības.

Darbā tika pētīti CuO, GeSn un Bi₂Se₃ nanovadi ar mērķi tos pielietot NEM ierīcēs.

Tika veikta CuO nanovadu sintēze ar termiskās oksidācijas metodi. Izanalizēta dažādu sintēzes parametru, piemēram, ūdens tvaika un elektriskā lauka, ietekme uz nanovadu morfoloģiju. Tika izpētītas CuO nanovadu mehāniskās īpašības. GeSn nanovadu Junga modulis tika noteikts ar rezonanses metodi *in-situ* skenējošajā elektronu mikroskopā (SEM). Demonstrētas perspektīvas CuO un Bi₂Se₃ nanovadu integrēšanai NEM slēdžos.

Atslēgvārdi: nanovads, termiskā oksidācija, CuO, GeSn, Bi₂Se₃, Junga modulis, NEM slēdzis

ABSTRACT

Nanowires (NWs) are one-dimensional nanomaterials with radii in the scale of nanometers and lengths in the scale of micrometers. NWs are desirable components in nanoelectromechanical (NEM) devices, such as switches. NWs are the active element in these devices, diverting current by altering their position, thus their mechanical and electrical properties are important.

CuO, GeSn and Bi₂Se₃ NWs were investigated for use in NEM devices.

CuO NWs were synthesized via thermal oxidation method. Various synthesis parameters, such as the presence of water vapor or an applied electric field, were investigated for their effect on NW morphology. Mechanical properties of CuO NWs were investigated. Young's modulus of GeSn NWs was determined via *in-situ* SEM resonance method. Perspective integration of CuO and Bi₂Se₃ NWs in to NEM switches was demonstrated.

Keywords: nanowire, thermal oxidation, CuO, GeSn, Bi₂Se₃, Young's modulus, NEM switch

PUBLIKĀCIJAS

Raksts starptautiski recenzējamā žurnālā

J. Kosmaca, R. Meija, M. Antsov, G. Kunakova, **R. Sondors**, I. Iatsunskyi, E. Coy, J. Doherty, S. Biswas, J. D. Holmes, D. Erts, Investigating the Mechanical Properties of GeSn Nanowires, *Nanoscale* – iesniegts, iesniegtas atbildes recenzentiem

Konferenču prezentācijas

1. **R. Sondors**, R. Meija, J. Kosmaca, D. Erts, Synthesis of CuO nanowires by thermal oxidation method, Latvijas Universitātes 77. starptautiskā zinātniskā konference, 01.02.2019
2. M. Ramma, J. Kosmača, L. Jasulaņeca, R. Meija, G. Kunakova, **R. Sondors**, D. Erts, One-dimensional nanostructure alignment on electrodes through dielectrophoresis, Latvijas Universitātes 77. starptautiskā zinātniskā konference, 01.02.2019
3. J. Kosmaca, R. Meija, M. Antsov, M. M. Ramma, **R. Sondors**, J. Andzane, J. D. Holmes, D. Erts, Application of one-dimensional GeSn, CuO and Bi₂Se₃ nanomaterials in nanoelectromechanical switches, NANO Boston Conference, ASV, Bostona, 22.-24.04.2019
4. **R. Sondors**, M. M. Ramma, E. Kauranens, J. Kosmaca, R. Meija, M. Antsov, D. Erts, High yield CuO nanowire growth via thermal oxidation method for application in nanoelectromechanical switches, Advanced Materials and Technologies, Lietuva, Palanga, 19.-23.08.2019

Tehnoloģija

J. Kosmaca, R. Sondors, J. Prikulis, D. Erts, Electric field assisted synthesis of CuO nanowires by thermal oxidation method, Institute of Chemical Physics, University of Latvia, 2018, izstrādāts ERAF projekta “Nanoelektromehānisku slēdžu izveide” ietvaros

SATURA RĀDĪTĀJS

Anotācija	2
Abstract	3
Publikācijas	4
Satura rādītājs	5
Apzīmējumu saraksts	6
Ievads	7
1. Literatūras apskats	8
1.1 Nanovadi un to izmantošana NEM ierīcēs	8
1.2 Nanovadu sintēzes metodes	10
1.3 Metodes nanovadu mehāniskai raksturošanai	12
2. Eksperimentālā daļa	14
2.1 Tehniskais aprīkojums	14
2.2 Nanovadu paraugu sagatavošana mērījumiem	17
2.2.1 CuO nanovadu sintēze	17
2.2.2 Individuālu GeSn un Bi₂Se₃ nanovadu sagatavošana eksperimentiem <i>in-situ</i> SEM	
20	
3. Rezultāti un diskusija	23
3.1 CuO nanovadu vizualizācija un izmēru noteikšana ar SEM	23
3.2 Nanovadu mehānisko īpašību noteikšana un analīze	27
3.2.1 CuO nanovadu Junga moduļi, iegūti ar lieces metodi	27
3.2.2 GeSn nanovadu Junga moduļi, iegūti ar rezonanses metodi	28
3.3 Nanovadu ieviešana NEM ierīcēs	30
3.3.1 Bi₂Se₃ nanovadu pārvietošana <i>in-situ</i> SEM	30
3.3.2 CuO nanovada NEM slēdža kontakta pretestība	32
Secinājumi	33
Autora ieguldījums	34
Izmantotā literatūra un avoti	35

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

AC – maiņstrāva

DC - līdzstrāva

NEM – nanoelektromehānisk

SEM – skenējošais elektronu mikroskops

Bi_2Se_3 – bismuta selenīds

Cu – varš

CuO – vara (II) oksīds

Cu_2O – vara (I) oksīds

Ge – germānijs

GeSn – ar alvu dopēts germānijs

d – diametrs

E – Junga modulis

f – frekvence

L – garums

I – strāva

I_z – šķērsriezuma laukuma inreces moments

R - pretestība

U - spriegums

ρ – masas blīvums

σ – elektriskā vadītspēja

ω – cikliskā frekvence

IEVADS

Pateicoties straujai mūsdienu nanozinātnes un nanotehnoloģiju attīstībai, nanomateriālu pielietojumi sniedzas no medicīnas[1] līdz elektronikai[2]. Tiek atklāti arvien jauni nanomateriāli, kā arī tiek izgudrotas ierīces, kurās izmanto tos. Nanovadi ir kvazi-viendimensionāli nanomateriāli, kas ir īpaši piemēroti izmantošanai nanoelektromehāniskās (NEM) sistēmās. Tās ir tādas ierīces, kas satur detaļas, kuru raksturīgie izmēri nepārsniedz 100 nm [3]. Pusvadītāju nanovadi būtu ideālas komponentes izmantošanai NEM slēdžos.

Lai sekmētu NEM ierīču tehnoloģijas attīstību, nepieciešams izstrādāt efektīvas metodes nanovadu sintēzei un izvērtēt dažādu materiālu nanovadu piemērotību praktiskiem pielietojumiem, kā arī atrast paņēmienus, kā būvēt un testēt NEM nanoierīces. Atsevišķu nanovadu noraksturošana ir īpaši svarīga, jo to fizikālās īpašības var atšķirties no makromēroga materiāliem ar tādu pašu sastāvu [4].

Darba mērķis:

Ssintezēt nanovadus, izpētīt dažādu pusvadītāju nanovadu fizikālās īpašības un to piemērotību izmantošanai NEM ierīcēs.

Darba uzdevumi:

1. Izpētīt sintēzes parametru ietekmi uz sintezēto CuO nanovadu morfoloģiju;
2. Noteikt GeSn un CuO nanovadu mehāniskās īpašības;
3. Demonstrēt perspektīvas izmantot nanomanipulācijas NEM slēdžu izveidei.

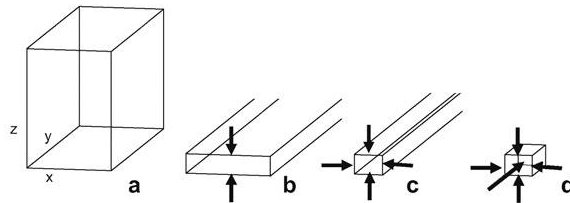
Darbā tika izmantota termiskās oksidācijas metode CuO nanovadu iegūšanai. Nanovadu vizualizācija, raksturošana un to nanomanipulācijas tika veiktas ar skenējošās elektronu mikroskopijas metodēm.

Darbs uzrakstīts uz 38 lapaspusēm, tas satur 26 attēlus, atsauces uz 45 izmantotajiem avotiem. Darbs sadalīts 3 nodaļās un 14 apakšnodaļās. Pirmo nodaļu veido literatūras apskats. Tam seko eksperimentālā daļa, kurā aprakstīts darbā izmantotais tehniskais aprīkojums un izmantotās eksperimentālās metodes un materiāli. Trešajā nodaļā atrodami rezultāti un diskusija.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1 Nanovadi un to izmantošana NEM ierīcēs

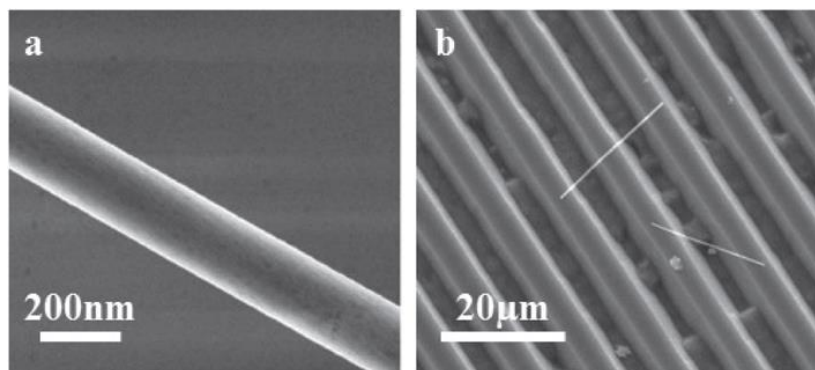
Struktūras, kuru raksturīgie izmēri nepārsniedz simtus nanometru, pieņemts saukt par nanostruktūrām[5]. Atkarībā no dimensiju skaita, kuras pārsniedz nanomērogu, pieņemts nanostruktūras iedalīt trīsdimensionālajās (nanokompozīti), divdimensionālajās (nanoplāksnes, pārklājumi), viendimensionālajās (nanovadi, nanocaurules) un nulldimensionālajās (kvantu punkti, nanoporas) nanostruktūrās[6] (skat. Att. 1.1).



Att. 1.1 Nanostruktūru dimensionalitātes shematisks attēlojums:

$a - 3D, b - 2D, c - 1D, d - 0D$. Avots:[6]

Mūsdienu literatūrā par nanovadiem pieņemts saukt viendimensionālas nanostruktūras, kuru diametri nepārsniedz dažus simtus nanometru, un kuru garumi ievērojami pārsniedz to diametrus[7], kā, piemēram, Att. 1.2 redzamajiem vara nanovadiem. Ir novērota nanovadu fizikālo īpašību atkarība no to sastāva, struktūras[8,9] un izmēriem[4]. Pusvadītāju nanovadus iespējams pielietot, lai izveidotu dažādas elektroniskas ierīces, piemēram, lauka efekta tranzistorus [10], dažādu gāzu sensorus [11] un lāzerus [12].

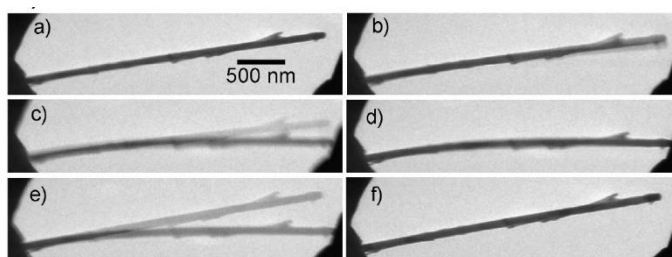


Att. 1.2 SEM attēli: (a) vara nanovads (b) divi vara nanovadi uz rievotas silīcija pamatnes.

Avots: [13]

Dažādu pusvadītāju nanovadu mehāniskā izturība [14] un elastība [15] tos padara par perspektīvu materiālu NEM ierīču izveidei[16]. NEM ierīcēs tiek izmantota nanovadu kustības ietekme uz tiem cauri plūstošo elektrisko signālu, vai arī otrādi – elektriskā signāla ietekme uz nanovadu kustību. Šādas NEM ierīces ir, piemēram, rezonatori [17] un slēdži [18], kuros

nanovadu noliekšanās elektrostatiskās mijiedarbības rezultātā tiek izmantota elektriskās ķēdes pārslēgšanai (Att. 1.3).



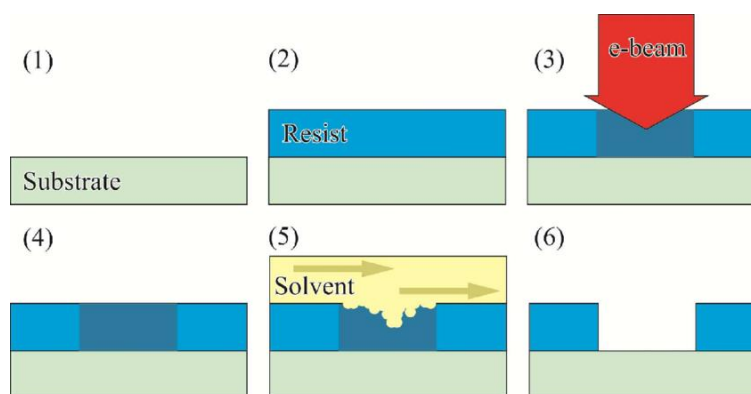
Att. 1.3 NEM slēdzis: (a) germānija nanovads nostiprināts uz vienā pusē, otrs gals brīvs, (b) nanovada brīvajam galam tuvu esošam elektrodam tiek pielikts spriegums, kurš elektrostatiskās mijiedarbības rezultātā noliec nanovadu, (c) spriegumam sasniedzot pietiekoši lielu vērtību, nanovads pielīp elektrodam, noslēdzot elektrisko ķēdi, (d) spriegumam samazinoties līdz pietiekoši mazai vērtībai, nanovads atlīp no elektroda, atslēdzot elektrisko ķēdi, (f) nanovads ir atgriezies savā sākotnējā pozīcijā. Avots: [19]

Pateicoties nanomēroga izmēriem, nanovadiem iespējams novērot no izmēra atkarīgas elektriskās[20] un mehāniskās[4] īpašības, kas potenciāli ļauj piemeklēt nanovadus atbilstoši konkrētas NEM ierīces vajadzībām. Šajā darbā tiek aplūkoti CuO, GeSn un Bi₂Se₃ nanovadi, kuru mehāniskās [14,15,21] un elektriskās [22] īpašības ir piemērotas NEM pielietojumiem.

1.2 Nanovadu sintēzes metodes

Nanovadu sintēzes metodes var iedalīt augšupejošās (*bottom-up*) un lejupejošās (*top-down*)[23]. Par lejupejošām sauc metodes, kuru pamatā ir nevajadzīgā materiāla atdalīšana no kādas lielāka objekta ar mērķi iegūt mazāku sistēmu. Par augšupejošām sauc tās metodes, kuru pamatā ir pareizo apstākļu nodrošināšana kādu mazāku daļiņu pašorganizācijai lielākās struktūrās.

Nanovadu sintēzei lejupejošās metodes galvenokārt iekļauj optiskās litogrāfijas vai elektronu stara litogrāfijas pielietojumu vajadzīgās nanostruktūras iegūšanai uz īpaša iepriekš sagatavota substrāta (Att. 1.4).



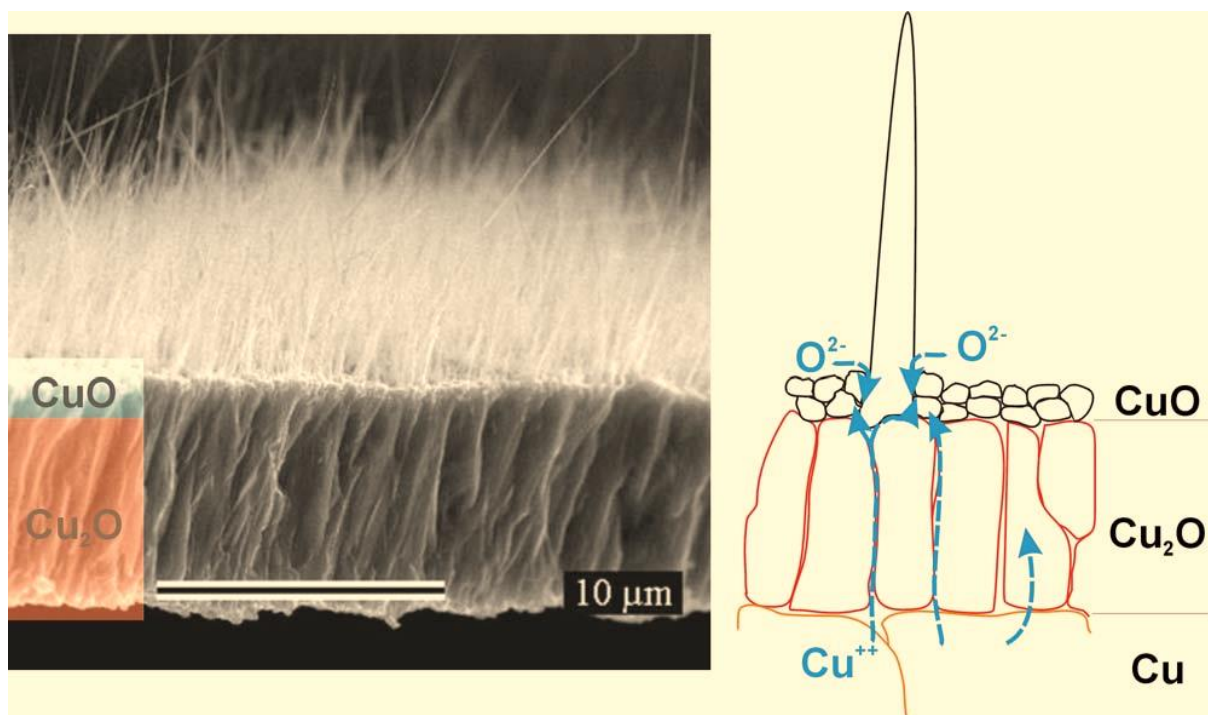
Att. 1.4 Elektronu stara litogrāfijas metodes soļu shematisks attēlojums:

(1) tiek izvēlēts substrāts, (2) substrātam tiek uzklāts pret elektronu staru jutīgas vielas slānis, (3) vielas slānis tiek apstarots ar elektronu staru, (4) vielas slānis apstarotajās vietās ir mainījies ķīmiskās īpašības, (5) ar īpašu šķīdinātāju tiek noņemts apstarotās vielas slānis, (6) uzklātā viela uz substrāta palikusi tikai neapstarotajās vietās. Avots:[24]

Augšupejošās metodes nanovadu iegūšanai ir, piemēram, tvaika-šķidrums-cietas vielas metode (*Vapor-Liquid-Solid, VLS*), tvaika-cietas vielas metode (*Vapor-Solid, VS*) un termiskās oksidācijas metode (*thermal oxidation*). Šajā darbā aplūkoti nanovadi arī tiek sintezēti ar augšupejošām metodēm: GeSn nanovadi ar tvaika-šķidrums-cietas vielas metodi [25], un Bi₂Se₃ nanovadi ar tvaika-cietas vielas metodi [26]. Darbā tiks plašāk izpētīta augšupejošā CuO nanovadu sintēze.

Viena no vislētākajām un pieejamākajām vara(II) oksīda (CuO) sintēzes metodēm ir termiskās oksidācijas metode. CuO nanovadu augšanu skābekļa klātbūtnē pie augstām temperatūrām skaidro ar vara jonu difūziju pa Cu₂O graudu robežām vai kristālrežģa defektiem[27]. Sintēzes sākumā vara substrāta virsmu pārklāj Cu₂O slānis. Lielu spiedes spriegumu rezultātā Cu₂O slānim novērojama liela porainība un režģa defekti[28]. Cu₂O slāņa tālākā augšana skaidrojama ar Cu jonu difūziju pa slāņa kristālrežģi, bet difūzija pa graudu

robežām izskaidro nanovadu veidošanos. Augšanas mehānisma shematisks attēlojums redzams Att. 1.5.



Att. 1.5 (a) Uz vara folijas uzsintezētu CuO nanovadu SEM attēls (sānskats) ar atzīmētiem CuO un Cu₂O slāņiem (b) Shematisks CuO nanovadu augšanas mehānisma attēlojums

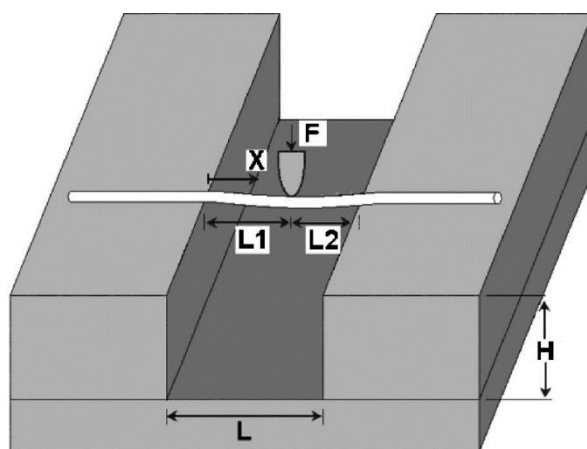
Avots:[27]

Ar termiskās oksidācijas metodi uzsintezēto nanovadu morfoloģiju ietekmē vairāki sintēzes parametri, piemēram, karsēšanas temperatūra un ilgums, skābekļa plūsmas ātrums [29], elektriskā lauka klātbūtne [30] un gaisa mitrums [31].

1.3 Metodes nanovadu mehāniskai raksturošanai

Nanomēroga izmēru dēļ nanovadu un citu nanostruktūru fizikālo īpašību noteikšanai lielākoties nav iespējams pielietot makroskopisku objektu īpašību noteikšanai ierastas metodes, un ir jāmeklē jauni paņēmieni[32]. Nanovadu Junga moduļa noteikšanai plaši tiek izmantota atomspēku mikroskopa lieces metode[4] un elektromehāniskās rezonanses metode[33].

Atomspēku mikroskopa lieces metodē nanovads tiek novietots virs pazeminājuma, abiem tā galiem tiek nostiprinātiem pie pazeminājuma malām. Ar atomspēku mikroskopa galviņu noslogojot nanovada vidu, iespējams reģistrēt tā nolieci pie dažādām pieliktā spēka vērtībām (Att. 1.6), un, aprakstot nanovada lieci ar siju teorijas palīdzību, iespējams izteikt nanovada Junga moduli.



Att. 1.6 Shematisks attēlojums nanovada noslogošanai ar atomspēku mikroskopa lieces metodi. Piemērots no [34]

Elektromehāniskās rezonanses metodē nanovadam elektrostātiski mijiedarbojoties ar ārēju laikā mainīgu elektrisko lauku, tajā tiek ierosinātas uzspiestas svārstības; Elektriskā lauka frekvencei sakrītot ar nanovada pašsvārstību frekvenci, novērojams straujš svārstību amplitūdas pieaugums, un, zinot nanovada ģeometriskos izmērus, tā blīvumu un šķērsriezuma laukumu, matemātiski aprakstot tā šķērssvārstības, iespējams izteikt Junga moduli.

Nanovadu šķērssvārstības iespējams aprakstīt ar Eilera-Bernulli siju teorijas palīdzību. Aprakstot nanovadu kā elastīgu siju, tā neitrālās ass novirzi no sākuma stāvokļa apraksta diferenciālvienādojums [35]

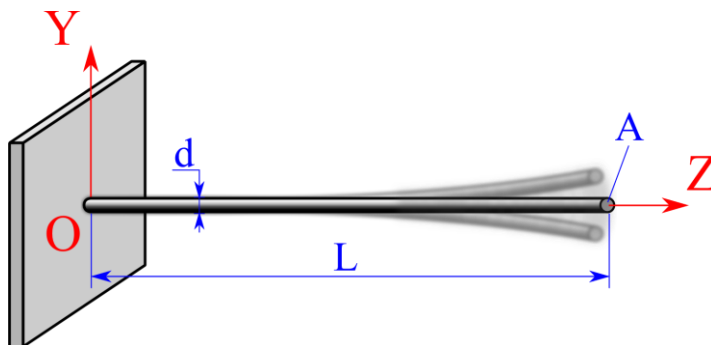
$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(EI_z \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

kur E – nanovada Junga modulis, I_z – šķērsriezuma inerces moments, y – neitrālās ass novirze no sākuma stāvokļa, z – attālums uz neitrālās ass virzienā, ρ – nanovada blīvums, A – nanovada šķērsriezuma laukums, t – laiks.

Pieņemot, ka $E=\text{const}$, $\rho=\text{const}$ un $I_z=\text{const}$, atrisinot vienādojumu ar mainīgo atdalīšanas metodi, var iegūt nanovada pašsvārstību frekvenci attiecīgām svārstību modām:

$$\omega_n = \frac{\beta_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI_z}{\rho A}} \quad (2)$$

kur L – nanovada garums, $n=1,2,3,\dots$, un β_n – no robežnosacījumiem atkarīgs koeficients.



Att. 1.7 Shematisks vienā galā nostiprināta cilindriska nanovada svārstību attēlojums; L - nanovada garums, d - nanovada diametrs, A - nanovada šķērsriezuma laukums, OZ - nanovada neitrālā ass, YOZ - nanovada svārstību plakne

Cilindriskam nanovadam ar diametru d var izteikt A un I_z ar formulām

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

un

$$I_z = \frac{\pi d^4}{64}. \quad (4)$$

Ņemot vērā, ka $\omega = 2\pi f$, nanovada svārstību frekvenci var izteikt ar formulu

$$f = \frac{\beta_n^2 d}{8\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (5)$$

kur $\beta_1 = 1.875$ ir konstante pirmajai rezonanses modai vienā galā nostiprinātam nanovadam.

2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

2.1 Tehniskais aprīkojums

CuO nanovadu sintēzei ar termālās oksidācijas metodi tika izmantota GSL-1100X vakuumkrāsns (Att. 2.1) ar maksimālo temperatūra 1100°C, maksimālo uzsilšanas ātrumu 10°C/min).



Att. 2.1 Vakuumkrāsns GSL-1100X,

Attēla avots: <https://www.mixtl.com>

Paraugu vizualizācijai un ģeometrisku parametru noteikšanai tika izmantots skenējošais elektronu mikroskops (SEM) Hitachi S4800 (Att. 2.2) ar izšķirtspēju līdz 1nm un palielinājumu 30 līdz $8 \cdot 10^5$ reižu.



Att. 2.2 Skenējošais elektronu mikroskops Hitachi S4800

Līdzsprieguma iegūšanai un strāvas mērīšanai tika izmantots Keithley Model 6487 pikoampērmetrs/sprieguma avots (Strāvas mērījumu precizitāte līdz 2nA, sprieguma diapazons līdz 500, Att. 2.3).



Att. 2.3 Pikoampērmetrs/sprieguma avots Keithley 6487, Attēla avots: <https://www.tek.com>

Maiņspriegums tika iegūts ar Agilent N9310A signālu ģeneratoru (9 kHz – 3 GHz frekvenču diapazons, Att. 2.4).



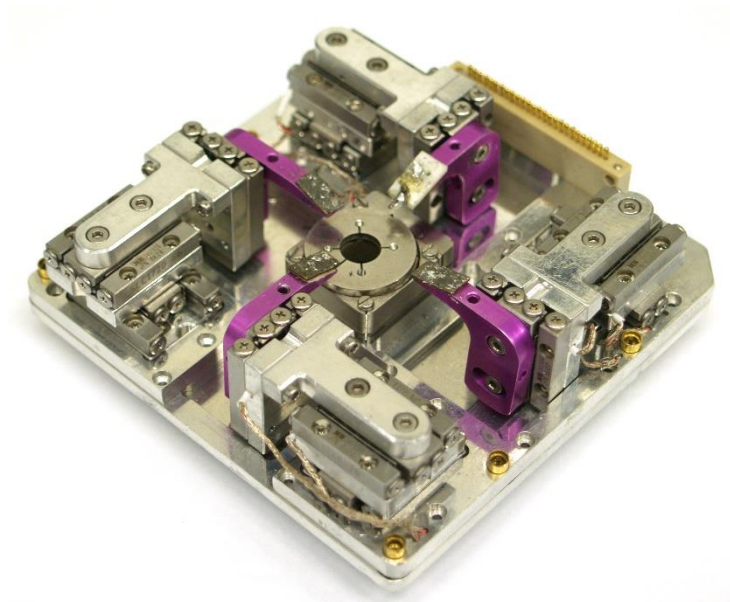
Att. 2.4 Signālu ģenerators Agilent N9310A, Attēla avots: <https://cal.equipment>

Sprieguma frekvences un amplitūdas reģistrēšanai tika izmantots osciloskops Tektronix TDS 1012 (frekvenču diapazons līdz 100 MHz, Att. 2.5)



Att. 2.5 Osciloskops Tektronix TDS 1012, Attēla avots: <https://www.testwall.com>

Nanomēroga manipulācijas *in-situ* SEM tika veiktas ar SmarAct 13D nanomanipulāciju sistēmu (Att. 2.6), kas sastāv no divpadsmit lineārajiem manipulatoriem SLC-1720, kas, sagrupēti četrās grupās, veido četrus 3D nanomanipulatorus, un viena SR-1908 rotācijas manipulatora. Nanomanipulāciju sistēma pieslēgta kontroles sistēmai MCS-15CH-DI.

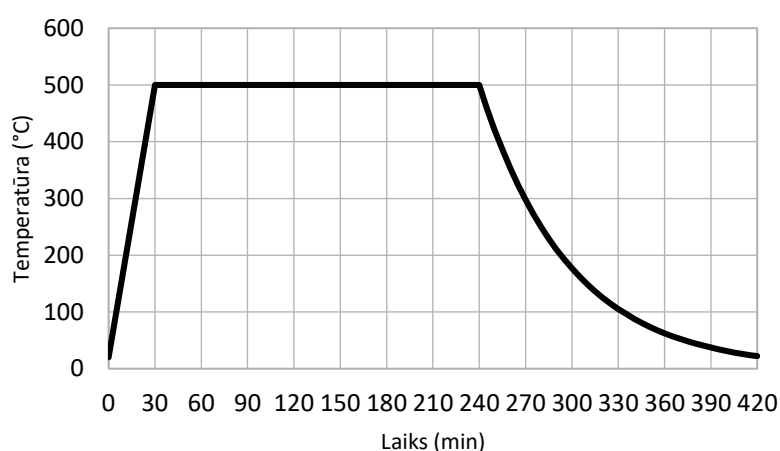


Att. 2.6 Nanomanipulāciju sistēma SmarAct 13D

2.2 Nanovadu paraugu sagatavošana mērījumiem

2.2.1 CuO nanovadu sintēze

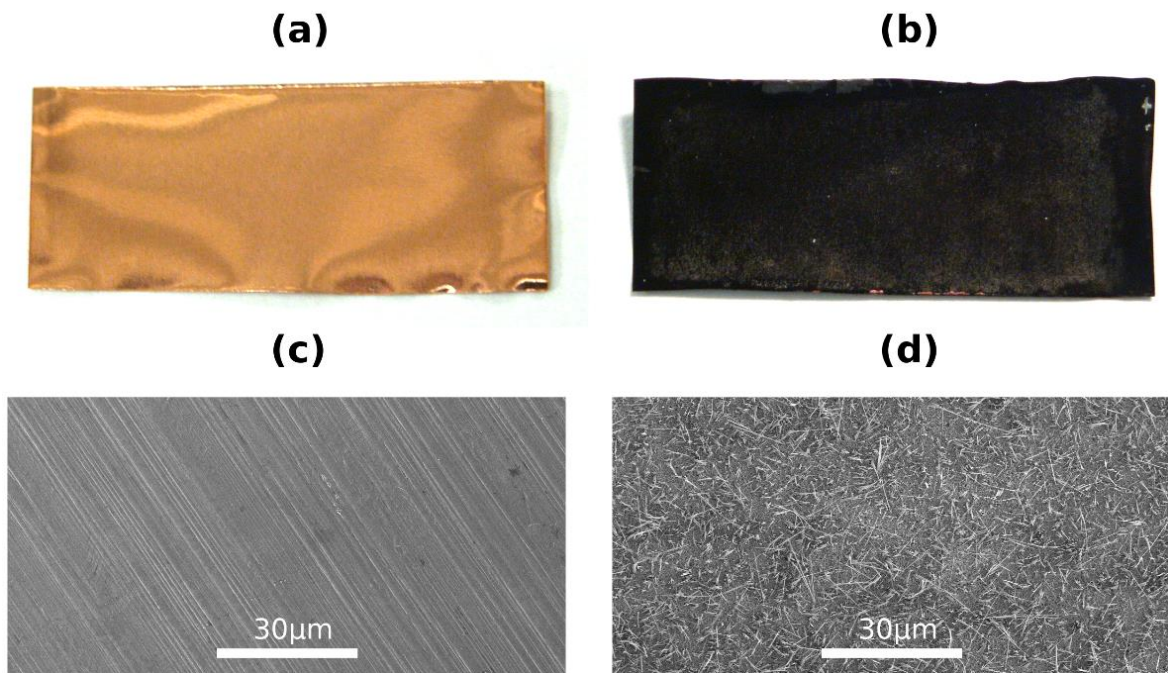
CuO nanovadi tika sintezēti ar termālās oksidācijas metodi[36], ievietojot Cu foliju uz kvarca pamatnes kvarca caurulē GSL-1100X vakuumkrāsnī. Lai iegūtu nanovadus ar diametriem zem simts nanometriem un garumiem vairākos mikrometros, balstoties uz iepriekšējiem pētījumiem[37], tika izvēlēti sekojoši sintēzes parametri: sintēze tika veikta gaisā pie atmosfēras spiediena, 30 minūšu laikā uzkaršējot krāsni no istabas temperatūras līdz 500°C temperatūrai, uzturot šādu temperatūru turpmākās 210 minūtes, pēc tam ļaujot krāsnij atdzist (Att. 2.7).



Att. 2.7 Temperatūra krāsnī sintēzes laikā

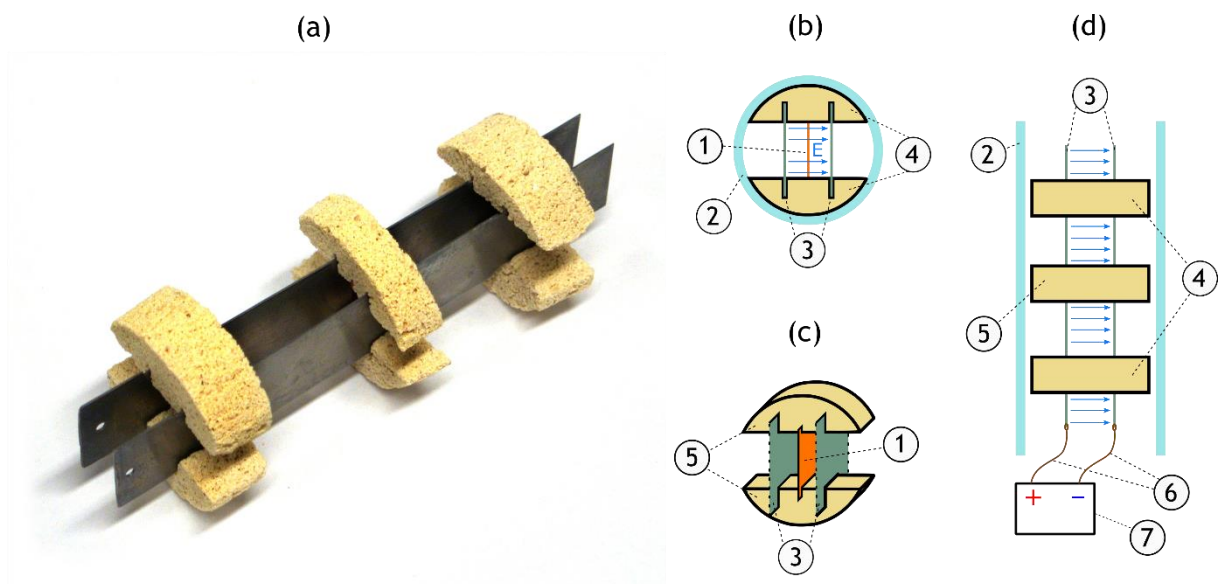
Pēc sintēzes novērojamā substrāta krāsas maiņa no sarkanbrūnas uz melnu liecina par vara oksīda nanostruktūru klātesamību (Att. 2.8(a) un (b)). Aplūkojot substrāta virsmu lielā palielinājumā SEM, bija iespējams pārliecināties par nanovadu klātesamību (Att. 2.8(c) un (d)).

Atsevišķās sintēzēs kvarca caurulē tika ievietots neliels trauks ar ūdeni ar nolūku palielināt ūdens tvaiku saturu gaisā sintēzes laikā.



Att. 2.8 Vara folijas fotoattēli un SEM attēli pirms (a)(c) un pēc (b)(d) sintēzes

Atsevišķās sintēzēs papildus ūdens tvaikam substrāts tika ievietots elektriskajā laukā starp diviem plakanparalēliem tērauda elektrodiem (Att. 2.9), kas tika pieslēgti līdzsprieguma avotam.



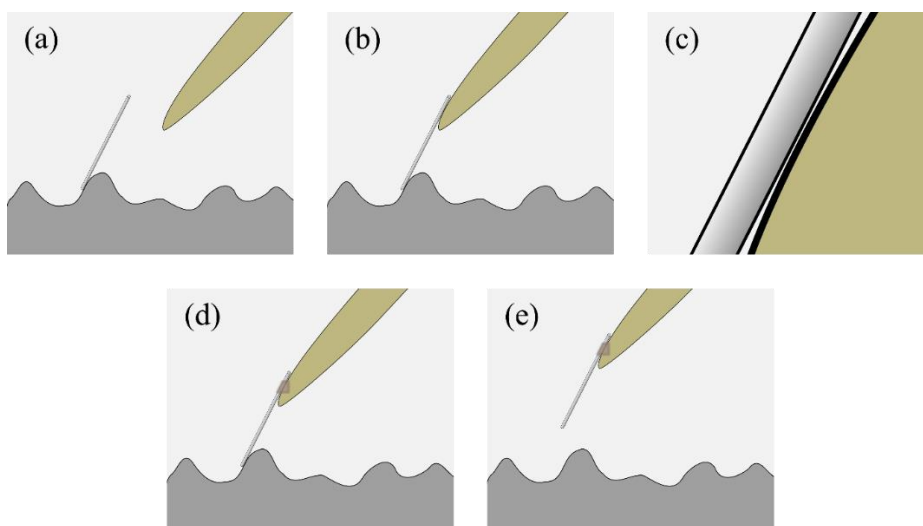
Att. 2.9 (a) Elektriskā lauka nodrošināšanai izmantotā eksperimentālā sistēma; (b) Eksperimentālās sistēmas shēma (sānskats); (c) Eksperimentālās sistēmas shēma vidējā posma shēma; (d) Eksperimentālās sistēmas shēma (virsskats); 1 - vara folija, 2 - kvarca caurule, 3 – tērauda elektrodi, 4 – elektrodu turētājs, 5 – vara substrāta turētājs, 6 – vadi elektrodu pievienošanai līdzsprieguma avotam, 7 – līdzsprieguma avots

Pēc sintēzes tika uzņemti substrāta SEM attēli un daļa substrāta ar nanovadiem tika ievietota traukā ar izopropanolu, kurš pēc tam 3 sekundes tika ievietots ultraskaņas vannā. Iegūtā nanovadu dispersija izopropanolā tika ar pipeti uznesta uz silīcija plāksnes, kas pēc tam tika ievietota SEM. Uz plāksnes pārnesto nanovadu SEM attēli tika izmantoti nanovadu ģeometrisku parametru noteikšanai.

2.2.2 Individuālu GeSn un Bi₂Se₃ nanovadu sagatavošana eksperimentiem *in-situ* SEM

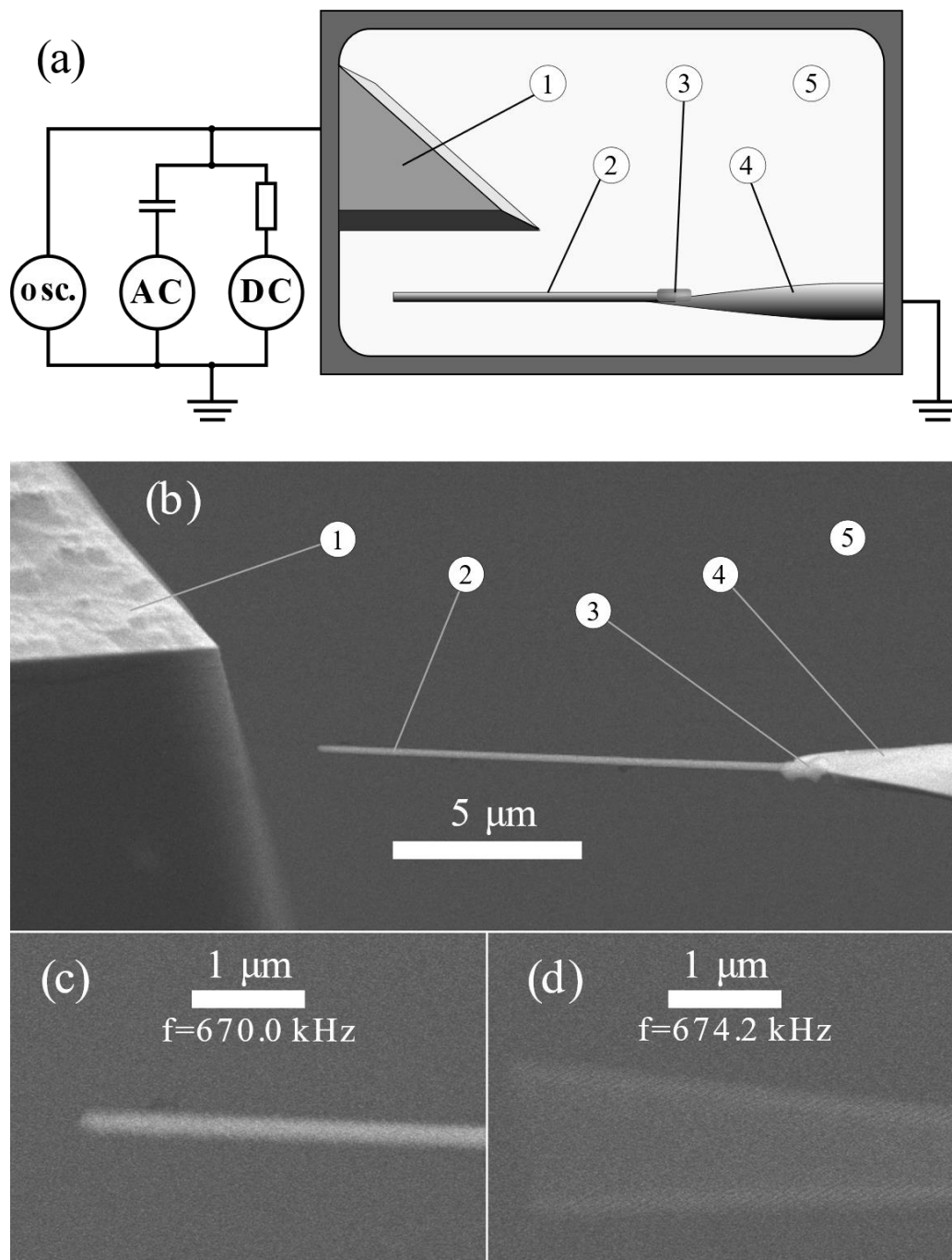
Eksperimentos tika izmantoti GeSn nanovadi, kas iepriekš sintezēti ar tvaika-šķidrumsacietas vielas metodi[25] Korkas universitāšu koledžā, Īrijā un Bi₂Se₃ nanovadi, kas iepriekš sintezēti ar fizikālo tvaiku nogulsnešanās metodi[26] Latvijas Universitātes Ķīmiskās fizikas institūtā. Nanovadu pārnesi un nanomanipulācijas veica *in-situ* SEM ar SmarAct 13D nanomanipulāciju sistēmu.

Sākmā atsevišķus nanovadus pārnesa no substrāta uz elektroķīmiski kodinātām zelta adatām. Uz nanomanipulāciju sistēmas 3D nanomanipulatoru turētājiem tika pielodētas zelta adatas. Nanomanipulatora vidū tika novietots substrāts ar uzsintezētiem nanovadiem. Nanovadi *in-situ* SEM tika pārnesti no plāksnītes, ar adatu pietuvojoties un pieskaroties brīvam nanovada galam, apstarojot kontakta vietu ar fokusētu elektronu staru. Elektronu stara iedarbības rezultātā sadaloties organiskiem piemaisījumiem SEM kamerā, uz apstarotās vietas nosēdās ogleklis, izveidojot pārklājumu, tādējādi stiprinot kontakta vietu. Kad adhēzijas spēki starp nanovadu un adatu pārsniedza adhēzijas spēkus starp nanovadu un pamatni, bija iespējams nanovadu nocelt no substrāta, lai veiktu tālākas nanomanipulācijas. Šādā veidā notiek tā saucamā elektronu stara inducēta pārnese (angl. *electron beam induced deposition*, EBID)[38].



Att. 2.10 (a) Zelta adata tiek pietuvināta uz virsmas stāvoša nanovada brīvajam galam, (b) zelta adata pieskaras nanovada brīvajam galam, (c) elektronu stars tiek koncentrēts uz nanovada un adatas kontakta vietu, (d) uz kontakta vietas nosēdies neliels oglekļa slānis, (e) pateicoties uzlabotai adhēzijai starp nanovadu un zelta adatu, ir iespējams nocelt nanovadu no virsmas

Lai nomērītu GeSn nanovadu Junga moduli, uz adatām uznestajos nanovados ar mainīgu elektrisko lauku tika ierosinātas mehāniskas svārstības. Att. 2.11(a) attēlota svārstību iegūšanai lietotā slēguma shēma.



Att. 2.11 (a) Eksperimentālā shēma nanovada svārstību ierosināšanai

(b) SEM attēls ar GeSn nanovadu pirms svārstību ierosināšanas

(c) SEM attēls ar nanovada galu, uzspiesto svārstību frekvence nesakrīt ar pašfrekvenci

(d) SEM attēls ar nanovada galu, uzspiesto svārstību frekvence sakrīt ar pašfrekvenci;

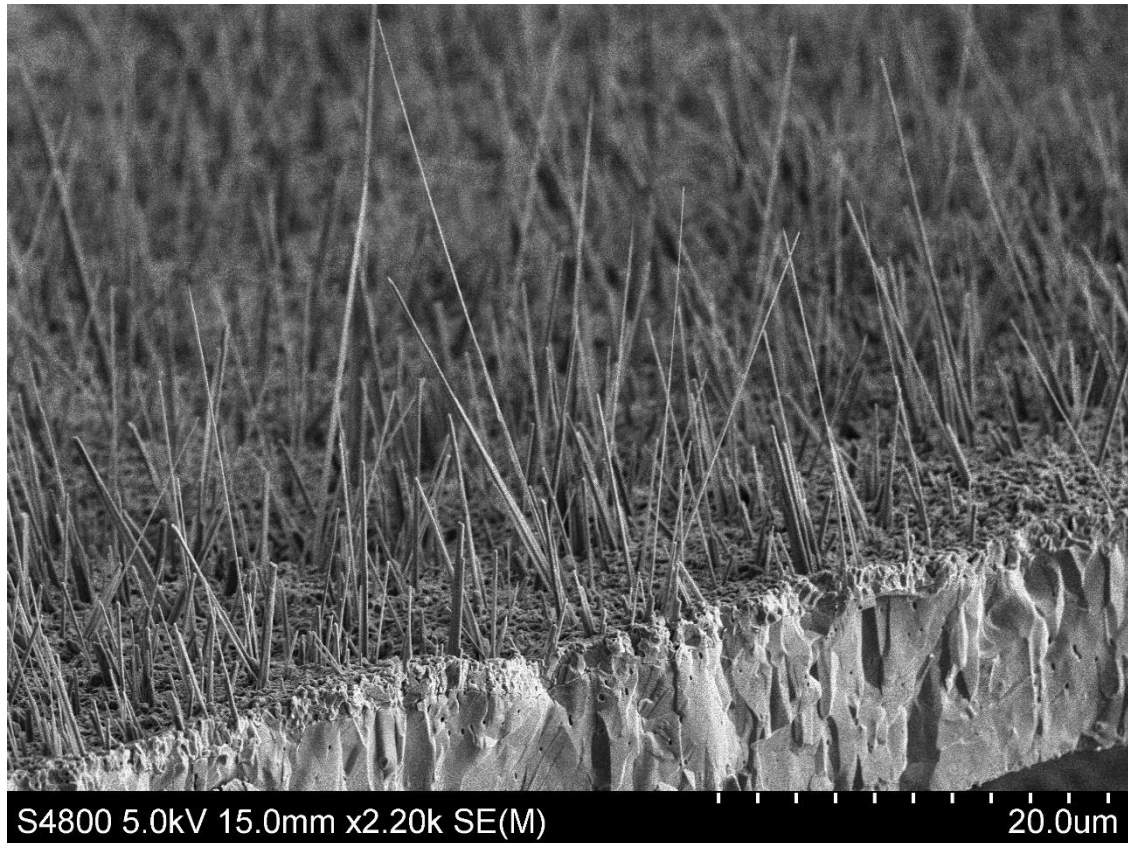
1 - elektrods, 2 - nanovads, 3 – ar fokusēta jonu stara metodi uzklāts platīna stiprinājums,
4 - zelta adata, 5 - SEM kamera, AC – maiņsprieguma avots, DC – līdzsprieguma avots,
osc. - osciloskops

Elektrodam (1) tiek pielikts līdzspriegums un maiņspriegums ar kontrolējamu frekvenci. Mainīga elektriskā lauka ietekmē uz zelta adatas (3) nostiprinātam nanovadam (2) elektrostatiskās mijiedarbības spēku rezultātā tiek uzspiestas svārstības. Eksperimenta gaitā ar soli 0,2 kHz tiek mainīta maiņsprieguma frekvence. Uzspiesto svārstību frekvencei tuvojoties nanovada pašsvārstību frekvencei, nanovada mehānisko svārstību amplitūda pieaug, sasniedzot maksimumu brīdī, kad elektriskā lauka svārstību frekvence sakrīt ar nanovada pašsvārstību frekvenci (Att. 2.11 (d)). Nomērītajiem nanovadiem rezonanse bija novērojama diapazonā no 7,4 kHz līdz 7,2 MHz.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

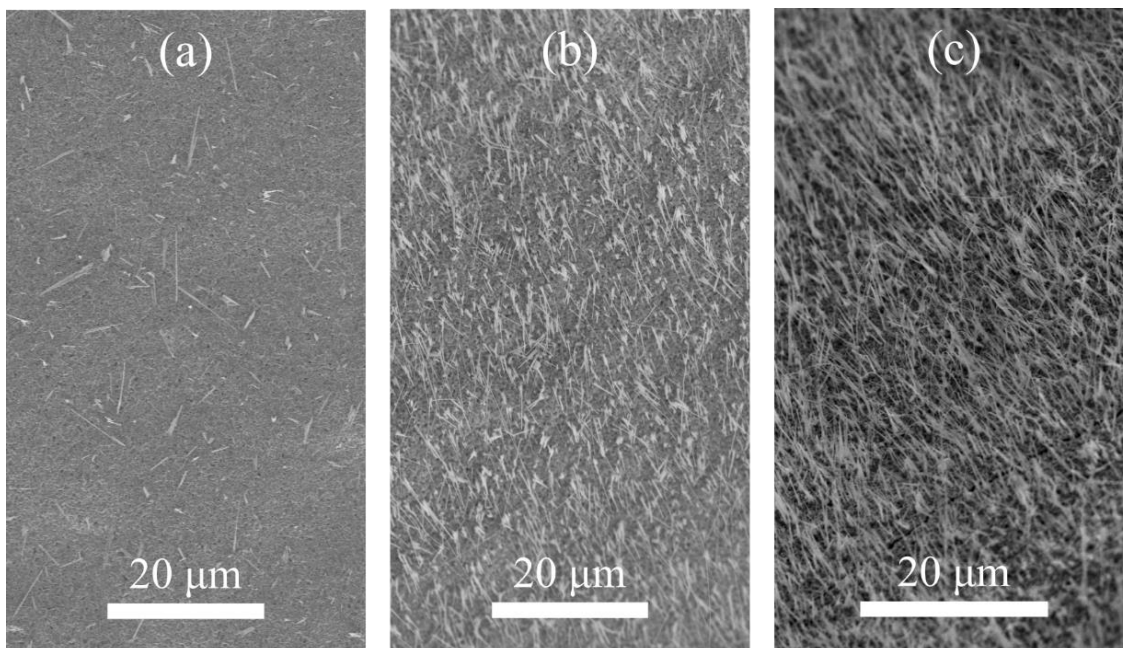
3.1 CuO nanovadu vizualizācija un izmēru noteikšana ar SEM

Pēc CuO nanovadu sintēzēm tika uzņemti SEM attēli ar substrāta virsmu, lai novērtētu uzsintezēto nanovadu daudzumu (Att. 3.1).



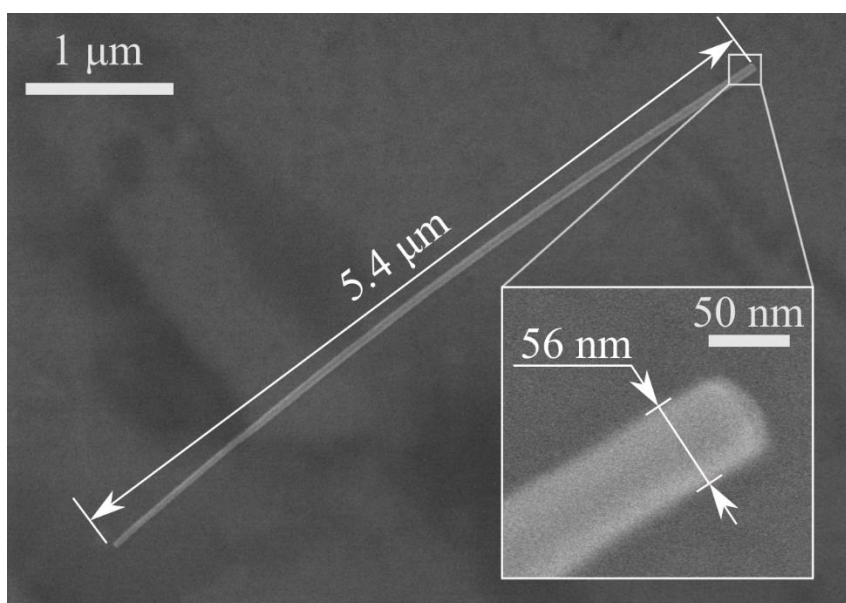
Att. 3.1 Ar termiskās oksidācijas metodi uzsintezēti CuO nanovadi uz substrāta virsmas (sānskats)

Pie dažādiem sintēzes parametriem sintezēto CuO nanovadu daudzuma uz substrāta virsmas salīdzinājums redzams Att. 3.2. Pēc SEM attēlu analīzes novērtēts, ka ar ūdens tvaiku veiktajās sintēzēs uz virsmas izveidojies vairāk nekā par 10 reizēm lielāks daudzums nanovadu, nekā sintēzēs bez ūdens tvaika, un ar ūdens tvaiku elektriskajā laukā veiktajā sintēzē uz virsmas ir vairāk nekā 2 reizes lielāks daudzums nanovadu nekā sintēzē ar ūdens tvaiku bez elektriskā lauka.



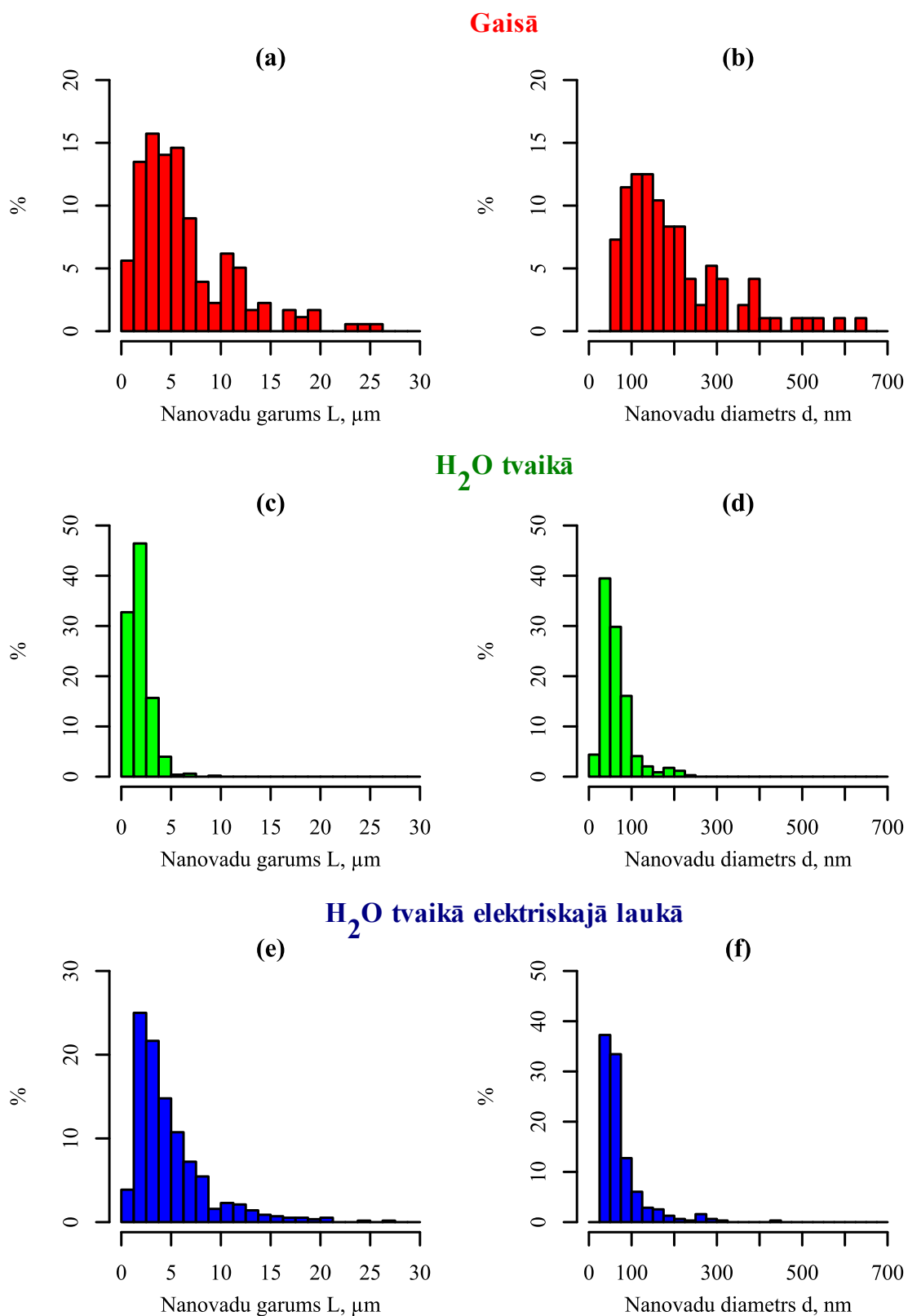
Att. 3.2 Substrāta virsmas SEM attēli (virsskats) pēc sintēzes pie dažādiem sintēzes parametriem: (a) gaisā, (b) gaisā ar ūdens tvaiku, (c) gaisā ar ūdens tvaiku, 20kV/m elektriskajā laukā

CuO nanovadi tika pārnesti uz silīcija plāksnes, izmantojot nanovadu dispersiju izopropanolā. No SEM attēliem tika noteikti nanovadu diametri un garumi (Att. 3.3).



Att. 3.3 SEM attēli ar uz silīcija plāksnes pārnesta CuO nanovada garumu un diametru (virsskats)

Nanovadu morfoloģijas raksturošanai tika uzņemti un izanalizēti aptuveni 400 SEM attēli. Att. 3.4(a), (c) un (e) redzamās garumu sadalījuma histogrammas iegūtas no 1238 nanovadu garuma mērījumiem. Att. 3.4(b), (d) un (e) redzamās diametru sadalījuma histogrammas iegūtas no 824 nanovadu diametru mērījumiem.



*Att. 3.4 Uzsynetēto CuO nanovadu ģeometrisko parametru sadalījuma histogrammas:
 Gaisā synetētiem nanovadiem – (a) garumu sadalījums, (b) diametru sadalījums,
 H_2O tvaikā synetētiem nanovadiem – (c) garumu sadalījums, (d) diametru sadalījums
 H_2O tvaikā un 20 kV/m elektriskajā laukā synetētiem nanovadiem – (e) garumu sadalījums,
 (f) diametru sadalījums*

No histogrammām redzams, ka abās ar ūdens tvaiku veiktajās sintēzēs nanovadiem novērojama mazāka izmēru izkliede un nanovadu diametri nav lielāki par 300 nm. Ar ūdens tvaika klātbūtni sintezēto nanovadu vidējais garums ($1,8 \pm 1,1 \mu\text{m}$) un diametrs ($63 \pm 37 \text{ nm}$) bija mazāks nekā nanovadiem, kas sintezēti gaisā ($6,4 \pm 4,9 \mu\text{m}$ un $201 \pm 123 \text{ nm}$). Ar ūdens tvaiku elektriskajā laukā veiktajās sintēzēs nanovadu vidējais diametrs ($73 \pm 53 \text{ nm}$) bija tuvs sintēzēm bez elektriskā lauka, bet to garums ($4,9 \pm 3,8 \mu\text{m}$) bija lielāks nekā sintēzēs ar pievienotu ūdens tvaiku bez elektriskā lauka.

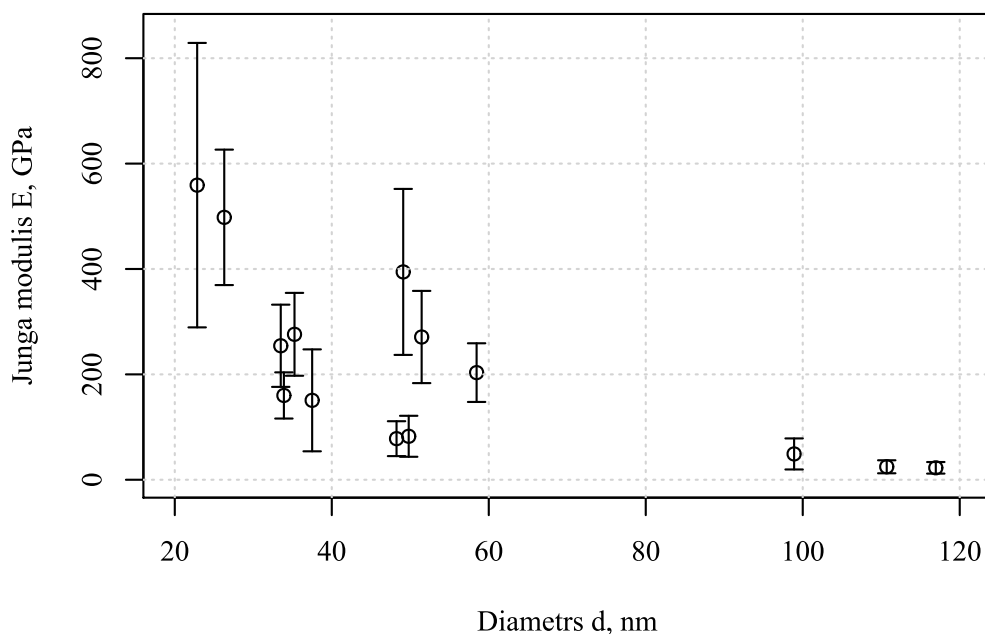
Elektriskā lauka ietekme uz sintezēto nanovadu garumu sakrīt ar iepriekšējiem novērojumiem[30]. Sintēzē ūdens tvaikā bez elektriskā lauka novērojami īsāki nanovadi nekā abās pārējās sintēzēs. Cik zināms, ūdens tvaika ietekme uz nanovadu garumu literatūrā iepriekš nav aprakstīta. Sintēzes parametru ietekmi uz sintezēto nanovadu izmēriem var potenciāli izmantot, lai pēc konkrētas nanoierīces vajadzībām izgatavotu nanovadus ar konkrētiem diametriem un garumiem.

3.2 Nanovadu mehānisko īpašību noteikšana un analīze

3.2.1 CuO nanovadu Junga moduļi, iegūti ar lieces metodi

Uzsintezētiem CuO nanovadiem tika veikta mehāniska raksturošana, lai noskaidrotu to piemērotību NEM ierīču izveidei. Nanovadi tika nosūtīti uz Tartu universitāti, kur tiem tika noteikti Junga moduļi, izmantojot atomspēku mikroskopa lieces metodi[4].

No iegūtajiem datiem tika sastādīts Att. 3.5 redzamais grafiks, kurā attēlota Junga moduļa atkarība no nanovadu diametra. Diapazonā virs 90 nm aprēķinātās Junga moduļa vērtības ir mazākas nekā iepriekš novērotā Junga moduļu vidējā vērtība šajā diapazonā (ap 200 GPa [14,40]), bet diapazonā zem 60 nm novērojama Junga moduļa vērtības palielināšanās virs šīs vērtības, kas padara šādu izmēru nanovadus par potenciāliem kandidātiem NEM slēdžiem. Līdzīga Junga moduļa atkarība no diametra novērota jau iepriekš gan citu materiālu nanovadiem [39], gan arī CuO nanovadiem, kuru diametri ir diapazonā no 70 nm līdz 220 nm [40], tomēr diametru diapazonā zem 70 nm CuO nanovadu Junga modulis iepriekš nav raksturots. Šis efekts, iespējams, saistīts ar nanovadu kristāliskās struktūras atkarību no izmēra [40] – nanovadiem ar lielāku diametru ir lielāka iespēja kristālrežģī veidoties defektiem, vai arī, iespējams, nanovadiem ir izveidojusies polikristāliska struktūra, kā rezultātā samazinās Junga modulis.



Att. 3.5 CuO nanovadu Junga moduļu atkarība no nanovada diametra

3.2.2 GeSn nanovadu Junga moduļi, iegūti ar rezonanses metodi

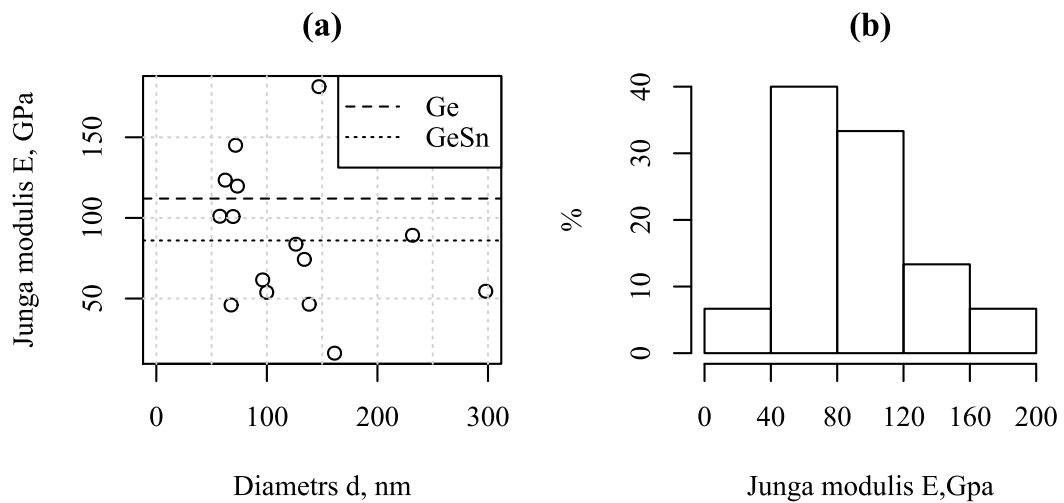
Germānija nanovadiem jau iepriekš demonstrētas labas mehāniskās un elektriskās īpašības[19]. Ar alvu dopēta germānija nanovadi ir jauns nanomateriāls, kurš nesēn ticis izveidots ar mērķi uzlabot germānija nanovadu elektriskās un optiskās īpašības. Lai novērtētu, kā alvas piemaisīšana ir izmainījusi nanovadu mehāniskās īpašības, tika aprēķināti GeSn nanovadu Junga moduļi.

Tika nomērīti 15 nanovadi ar diametriem diapazonā no 57 nm līdz 298 nm un garumiem diapazonā no 2,6 μm līdz 42,1 μm. Vienā galā nostiprinātam nanovadam Junga moduļi tika aprēķināti ar formulu

$$E = \frac{64\pi^2 L^4 f^2 \rho}{\beta^4 d^2}, \quad (7)$$

kur L – nanovada garums, f – rezonanses frekvence, d – diametrs, ρ - blīvums un β=1,875.

No aprēķinātajām Junga moduļa vērtībām tika sastādīti Att. 3.7 redzamais grafiks un histogramma. Redzams, ka GeSn nanovadiem nav novērojama tik izteikta Junga moduļa atkarība no nanovada diametra, kāda iepriekš novērota CuO nanovadiem. Redzams arī, ka vairāk kā divas trešdaļas iegūto Junga moduļa vērtību atrodas diapazonā no 40 līdz 140 GPa, kas ir tuvu alvas (E=50 Gpa) un germānija (E=130 GPa) makroskopisko materiālu Junga moduļa vērtībām. Salīdzinot ar germānija nanovadu Junga moduli (E = 112 GPa[41]), GeSn nanovadu Junga moduļa vidējā vērtība (E = 86 GPa) ir mazāka. Lielā izkliede (standartnovirze 43 GPa) var būt skaidrojama ar izvēlētā modeļa neprecizitātēm – nanovadi tika aprakstīti kā cilindri ar viscaur nemainīgu šķērsgriezuma laukumu, lai gan daudziem nanovadiem bija novērojama neliela atšķirība starp diametru stiprinājuma vietā un diametru nanovada brīvajā galā. Lai uzlabotu precizitāti, analītiskās izteiksmes vietā varētu izmantot skaitliskās metodes.



Att. 3.7 No rezonanses frekvencēm aprēķināto GeSn nanovadu Junga moduļu (a) atkarība no diametra (horizontālās līnijas atbilst germānija nanovadu Junga modulim un aprēķinātajai vidējai GeSn nanovadu Junga moduļa vērtībai) un (b) GeSn nanovadu Junga moduļa sadalījuma histogramma

3.3 Nanovadu ieviešana NEM ierīcēs

Kad nanovadu īpašības ir zināmas, tos var izmantot, lai uzbūvētu, piemēram nanoelektromehāniskās vai citas nanoierīces. Viena no metodēm nanoierīču izveidei ir nanomanipulācijas *in-situ* skenējošajā elektronu mikroskopā, kas tiek aprakstīta zemāk.

Kad nanovads novietots konkrēta izkārtojuma NEM slēdzī, nepieciešams raksturot tā elektriskās īpašības, lai novērtētu tā pielietojamību.

3.3.1 Bi₂Se₃ nanovadu pārvietošana *in-situ* SEM

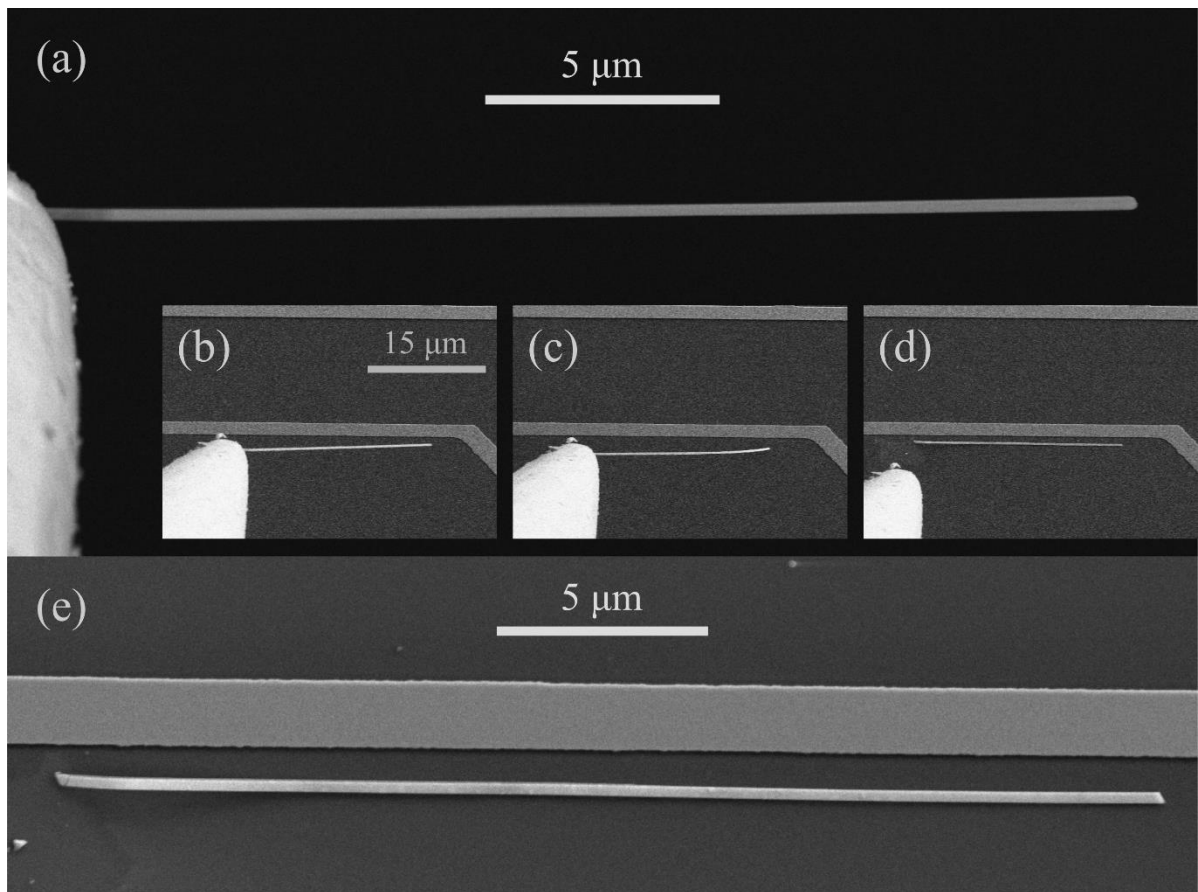
Uz substrāta tika atlasīti nanovadi, kuru garumi nav mazāki par 15 μm. Tie tika pārnesti no substrāta uz noteiktas vietas uz iepriekš sagatavotas virsmas ar mikroelektrodu sistēmām. Šis eksperiments tika veikts *in-situ* skenējošajā elektronu mikroskopā, kas ļāva vizualizēt nanomanipulāciju procesu. Atsevišķos nanomanipulācijas posmos uzņemti SEM attēli redzami Att. 3.8.

Zelta adata ar nanovadu tika pietuvināta pie virsmas, uz kuras noteiktā vietā, lēnām tuvinot (Att. 3.8(b)), nanovads tika novietots vēlamajā vietā. Nanovada saskares virsmas laukumam palielinoties, adhēzijas spēks starp nanovadu un virsmu kļuva lielāks par adhēzijas spēku starp nanovadu un zelta adatu, un, adatu no virsmas attālinot, nanovads palika pielipis virsmas (Att. 3.8(d) un (e)).

Pārnēsot Bi₂Se₃ nanovadus īpaša vērība tika pievērsta uznesamo nanovadu leņķim pret uznešanai paredzēto virsmu - Att. 3.7(a) redzamais nanovads bija jānovieto tuvu un paralēli Att. 3.8(b)-(e) redzamiem niobija celiņiem. Veiksmīgas nanomanipulācijas veikšanai bija nepieciešams pārliecināties, ka nanovada brīvais gals atrodas tuvāk uznešanai paredzētajai virsmai nekā zelta adatas gals. Att. 3.8(c) redzams, kā nanovada brīvais gals ir pieskāries virsmai.

In-situ nanomanipulāciju metodes galvenā priekšrocība ir liela kontrole pār manipulējamo objektu pārvietošanu un spēja tiešā laikā vērot notiekošos procesus. Galvenais trūkums šai metodei ir lēns operāciju ātrums – viena nanovada veiksmīga uznešana un pārvešana var aizņemt veselu dienu.

Alternatīva metode nanovadu pārvešanai ir dielektroforēze, kurā nanovadi šķidrā vidē tiek pārvietoti elektriskā lauka iedarbības rezultātā [42]. Tā ir daudz efektīvāka laika ziņā, taču mazāk precīza, un to nevar izmantot katrai elektrodu ģeometrijai.



Att. 3.8 Nanovada pārvešana no zelta adatas uz nanoierīces virsmas, SEM attēli: (a) nanovads ir pielipis kreisajā attēla daļā redzamajai zelta adatai, (b) adata ar nanovadu tuvojas zemāk esošas nanoierīces virsmai (virsskats), (c) nanovada gals ir pieskāries nanoierīces virsmai (virsskats), (d) nanovads ir pielipis nanoierīces virsmai (virsskats), (e) uz nanoierīces virsmas guļošs nanovads (virsskats)

3.3.2 CuO nanovada NEM slēdža kontakta pretestība

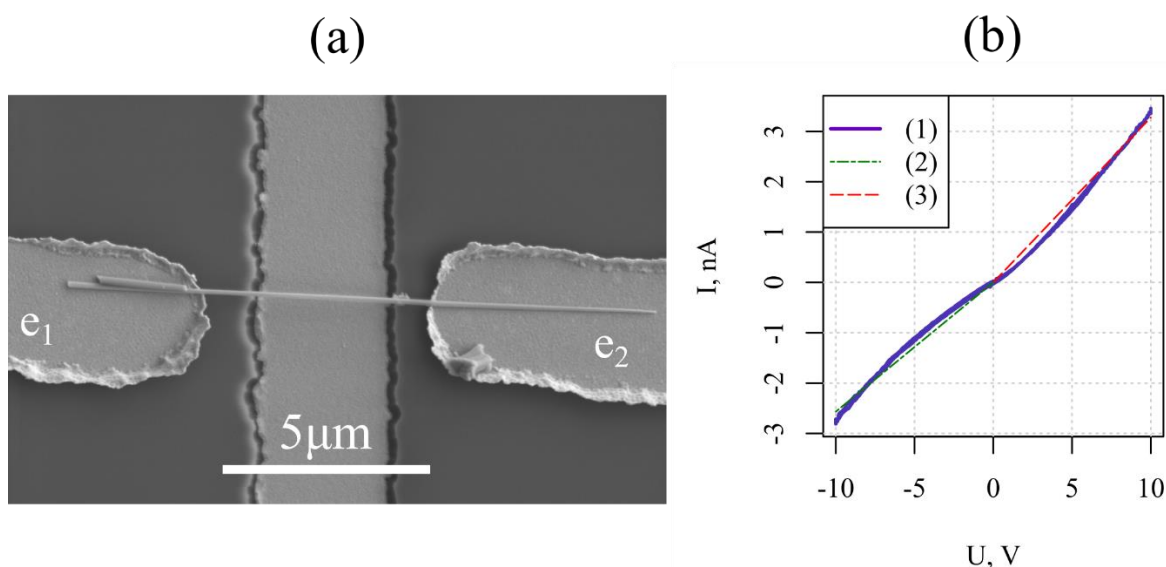
CuO nanovadu, kas ir mehāniski uzņests uz metāliskiem elektrodiem, kā parādīts attēlā 3.6(a), varētu izmantot kā NEM slēdzi. Viens no lielākajiem šādu slēdžu trūkumiem ir liela nanovada-elektrodu kontakta pretestība[43]. Lai izvērtētu nanovada-elektrodu kontaktu kvalitāti, tika veikti elektriski mērījumi, uzņemot voltampēru raksturlīkni.

Elektrodi e_1 un e_2 (Att. 3.6(a)) tika pieslēgti sprieguma avotam. Uzņemta voltampēru raksturlīkne (zilā līnija Att. 3.6(b)) tika aproksimēta ar taisnēm diapazonā no -10 V līdz 0 V (zaļā pārtrauktā līnija Att. 3.6(b)) un ar diapazonā no 0 V līdz +10V (sarkanā pārtrauktā līnija Att. 3.6(c)). No lineārām aproksimācijām tika noteiktas elektriskās pretestības vērtības: diapazonā no -10 V līdz 0 V – 3,9 G Ω , un diapazonā no 0 V līdz +10 V – 3,1 G Ω .

Lai novērtētu kontakta ietekmi uz sistēmas kopējo pretestību, tika aprēķināta nanovada īpatnējā vadītspēja pēc sekojošas formulas:

$$\sigma = \frac{L}{RA} = \frac{4L}{R\pi d^2}, \quad (6)$$

kur R – no voltampēru raksturlīknes noteiktā pretestība, A – nanovada šķērsriezuma laukums, L – nanovada garums, d – nanovada diametrs. Tika iegūtas vērtības (0,10 S/m un 0,13 S/m), kas ir tuvu literatūrā atrodamām vērtībām vara (II) oksīda makroizmēra objektiem (0,1 – 1 S/m [44,45]). Tādējādi, sistēmas vadītspēja tuva paša nanovada vadītspējai. Tas parāda, ka elektrodu-nanovada kontakts mehāniski uzņestam nanovadam nav būtiski ietekmējis sistēmas kopējo elektrisko pretestību.



Att. 3.6 (a) Uz diviem zelta elektrodiem novietots CuO nanovads;

(b) Redzamā nanovada voltampēru raksturlīkne (1) kopā ar lineārām aproksimācijām: diapazonā no -10 V līdz +10 V (2), un diapazonā no 0 V līdz +10 V (3)

SECINĀJUMI

Tika veikta CuO nanovadu sintēze ar termiskās oksidācijas metodi. Novērota ūdens tvaika un elektriskā lauka klātbūtnes ietekme uz uzsintezēto CuO nanovadu morfoloģiju, sintezējot nanovadus ar termiskās oksidācijas metodi. Ūdens tvaiku klātbūtne sintēzes laikā palielina uzsintezēto nanovadu skaitu, bet samazina to diametru un garumu.

Uzsintezētiem CuO nanovadiem tika izvērtētas mehāniskās un elektriskās īpašības. Novērota CuO mehānisko īpašību atkarība no izmēra – nanovadu Junga modulis pieaug pie mazākiem diametriem.

Tika veikta GeSn nanovadu mehāniskā raksturošana ar rezonanses metodi. Noteikta GeSn nanovadu Junga moduļa vērtība 86 ± 43 GPa ir salīdzināma ar germānija nanovadu Junga moduļa vērtību, kas parāda šo nanovadu pielietojamību turpmākai izmantošanai NEM ierīcēs.

Tika demonstrēta Bi₂Se₃ nanovadu pārnese *in-situ* SEM, kas parāda ka nanomanipulācijas var būt sekmīgi izmantotas eksperimentālai nanoierīču prototipu izveidei. Tika demonstrēta mehāniski uznestu CuO nanovadu pielietojamība NEM slēdzī. Parādīts, ka, mehāniski uznesot nanovadu, iespējams iegūt kontaktu, kura pretestība būtiski neietekmē NEM slēdža kopējo pretestību.

AUTORA IEGULDĪJUMS

Autors patstāvīgi izveidoja eksperimentālo iekārtu elektriskā lauka nodrošināšanai vakuumkrāsnī, veica visas CuO nanovadu sintēzes un to morfoloģisko raksturošanu, interpretēja savu mērījumu datus, sagatavoja CuO nanovadu paraugus lieces mērījumiem un analizēja iegūtos CuO nanovadu Junga moduļa aprēķinu datus, piedalījās GeSn nanovadu rezonanses mērījumos un no iegūtajiem datiem aprēķināja GeSn nanovadu Junga moduli.

Autors veica nanovadu nanomanipulācijas, mērīja un interpretēja CuO nanovada NEM slēdža voltampēru raksturlielņus.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

- [1] Peer D, Karp J M, Hong S, Farokhzad O C, Margalit R and Langer R 2007 Nanocarriers as an emerging platform for cancer therapy *Nat. Nanotechnol.* **2** 751
- [2] Fiori G, Bonaccorso F, Iannaccone G, Palacios T, Neumaier D, Seabaugh A, Banerjee S K and Colombo L 2014 Electronics based on two-dimensional materials *Nat. Nanotechnol.* **9** 768
- [3] Arab A and Feng Q 2014 Reliability research on micro- and nano-electromechanical systems: a review *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **74** 1679–90
- [4] Zhu Y 2017 Mechanics of crystalline nanowires: an experimental perspective *Appl. Mech. Rev.* **69** 10802
- [5] Kelsall R W, Hamley I W and Geoghegan M 2005 *Nanoscale science and technology* (Wiley Online Library)
- [6] Sagadevan Suresh 2013 Semiconductor Nanomaterials, Methods and Applications: A Review *Nanosci. Nanotechnol.* **3** 62–74
- [7] Cao G and Limmer S J 2004 Oxide nanowires and nanorods *Encycl.Nanosci.Nanotechnol.* **8** 377–96
- [8] Qian F, Li Y, Gradecak S, Wang D, Barrelet C J and Lieber C M 2004 Gallium nitride-based nanowire radial heterostructures for nanophotonics *Nano Lett.* **4** 1975–9
- [9] Grzybowski G, Beeler R T, Jiang L, Smith D J, Kouvetakis J and Menendez J 2012 Next generation of Ge_{1-y}Sn_y (y= 0.01-0.09) alloys grown on Si (100) via Ge₃H₈ and SnD₄: Reaction kinetics and tunable emission *Appl. Phys. Lett.* **101** 72105
- [10] Schwierz F 2010 Graphene transistors *Nat. Nanotechnol.* **5** 487
- [11] Liao L, Zhang Z, Yan B, Zheng Z, Bao Q L, Wu T, Li C M, Shen Z X, Zhang J X and Gong H 2009 Multifunctional CuO nanowire devices: p-type field effect transistors and CO gas sensors *Nanotechnology* **20** 85203
- [12] Yan R, Gargas D and Yang P 2009 Nanowire photonics *Nat. Photonics* **3** 569–76
- [13] Mante P-A, Belliard L and Perrin B 2018 Acoustic phonons in nanowires probed by ultrafast pump-probe spectroscopy *Nanophotonics* **7** 1759–80
- [14] Polyakov B, Dorogin L M, Vlassov S, Antsov M, Kulis P, Kink I and Lohmus R 2012 In situ measurements of ultimate bending strength of CuO and ZnO nanowires *Eur. Phys. J. B* **85**
- [15] Sheng H, Zheng H, Cao F, Wu S, Li L, Liu C, Zhao D and Wang J 2015 Anelasticity of twinned CuO nanowires *Nano Res.* **8** 3687–93
- [16] Shen G, Chen P C, Ryu K and Zhou C 2009 Devices and chemical sensing applications

- of metal oxide nanowires *J. Mater. Chem.* **19** 828–39
- [17] Fung W Y, Dattoli E N and Lu W 2009 Radio frequency nanowire resonators and in situ frequency tuning *Appl. Phys. Lett.* **94** 9–11
- [18] Jasulaneca L, Kosmaca J, Meija R, Andzane J and Erts D 2018 Review: Electrostatically actuated nanobeam-based nanoelectromechanical switches – materials solutions and operational conditions *Beilstein J. Nanotechnol.* **9** 271–300
- [19] Andzane J, Petkov N, Livshits A I, Boland J J, Holmes J D and Erts D 2009 Two-Terminal Nanoelectromechanical Nanowires *Nano Lett.* **9** 1824–9
- [20] Léonard F and Talin A A 2006 Size-dependent effects on electrical contacts to nanotubes and nanowires *Phys. Rev. Lett.* **97** 26804
- [21] Kosmaca J, Jasulaneca L, Meija R, Andzane J, Romanova M, Kunakova G and Erts D 2017 Young’s modulus and indirect morphological analysis of Bi₂Se₃ nanoribbons by resonance measurements *Nanotechnology* **28**
- [22] Zhu H, Zhao E, Richter C A and Li Q 2014 Topological Insulator Bi₂Se₃ Nanowire Field Effect Transistors *ECS Trans.* **64** 51–9
- [23] Hobbs R G, Petkov N and Holmes J D 2012 Semiconductor nanowire fabrication by bottom-up and top-down paradigms *Chem. Mater.* **24** 1975–91
- [24] Garcia-Ortiz C 2013 Design and characterization of plasmonic devices
- [25] Biswas S, Doherty J, Saladukha D, Ramasse Q, Majumdar D, Upmanyu M, Singha A, Ochalski T, Morris M A and Holmes J D 2016 Non-equilibrium induction of tin in germanium: towards direct bandgap Ge_{1-x}Sn_x nanowires *Nat. Commun.* **7** 11405
- [26] Andzane J, Kunakova G, Charpentier S, Hrkac V, Kienle L, Baitimirova M, Bauch T, Lombardi F and Erts D 2015 Catalyst-free vapour–solid technique for deposition of Bi₂Te₃ and Bi₂Se₃ nanowires/nanobelts with topological insulator properties *Nanoscale* **7** 15935–44
- [27] Gonçalves A M B, Campos L C, Ferlauto A S and Lacerda R G 2009 On the growth and electrical characterization of CuO nanowires by thermal oxidation *J. Appl. Phys.* **106** 1–5
- [28] Chopra N, Hu B and Hinds B J 2007 Selective growth and kinetic study of copper oxide nanowires from patterned thin-film multilayer structures *J. Mater. Res.* **22** 2691–9
- [29] Kumar A, Srivastava A K, Tiwari P and Nandedkar R V. 2004 The effect of growth parameters on the aspect ratio and number density of CuO nanorods *J. Phys. Condens. Matter* **16** 8531–43
- [30] Tang C, Liao X, Zhong W, Yu H and Liu Z 2017 Electric field assisted growth and field

- emission properties of thermally oxidized CuO nanowires *RSC Adv.* **7** 6439–46
- [31] Xu C H, Woo C H and Shi S Q 2004 The effects of oxidative environments on the synthesis of CuO nanowires on Cu substrates *Superlattices Microstruct.* **36** 31–8
- [32] Zhu Y, Ke C and Espinosa H D 2007 Experimental techniques for the mechanical characterization of one-dimensional nanostructures *Exp. Mech.* **47** 7–24
- [33] Poncharal P, Wang Z L, Ugarte D and De Heer W A 1999 Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes *Science (80-.)*. **283** 1513–6
- [34] Chen Y, Dorgan B L, McIlroy D N and Aston D E 2006 On the importance of boundary conditions on nanomechanical bending behavior and elastic modulus determination of silver nanowires *J. Appl. Phys.* **100** 1–7
- [35] Gere J M and Timoshenko S P 1997 *Mechanics of materials* (Boston: PWS Publishing Company)
- [36] Jiang X, Herricks T and Xia Y 2002 CuO Nanowires Can Be Synthesized by Heating Copper Substrates in Air *Nano Lett.* **2** 1333–8
- [37] Xu C H, Woo C H and Shi S Q 2004 Formation of CuO nanowires on Cu foil *Chem. Phys. Lett.* **399** 62–6
- [38] Van Dorp W F and Hagen C W 2008 A critical literature review of focused electron beam induced deposition *J. Appl. Phys.* **104** 1–42
- [39] Agrawal R, Peng B, Gdoutos E E and Espinosa H D 2008 Elasticity size effects in ZnO nanowires– a combined experimental-computational approach *Nano Lett.* **8** 3668–74
- [40] Tan E P S, Zhu Y, Yu T, Dai L, Sow C H, Tan V B C and Lim C T 2007 Crystallinity and surface effects on Young’s modulus of CuO nanowires *Appl. Phys. Lett.* **90** 16–8
- [41] Ngo L T, Alméjida D, Sader J E, Daly B, Petkov N, Holmes J D, Erts D and Boland J J 2006 Ultimate-Strength Germanium Nanowires *Nano Lett.* **6** 2964–8
- [42] Raychaudhuri S, Dayeh S A, Wang D and Yu E T 2009 Precise semiconductor nanowire placement through dielectrophoresis *Nano Lett.* **9** 2260–6
- [43] Jasulaneca L, Kosmaca J, Meija R, Andzane J and Erts D 2018 Electrostatically actuated nanobeam-based nanoelectromechanical switches–materials solutions and operational conditions *Beilstein J. Nanotechnol.* **9** 271–300
- [44] Collins B T, Desisto W, Kershaw R, Dwight K and Wold A 1989 Preparation and characterization of Cu(II) oxide *J. Less Common Met.* **156** 341–6
- [45] Xu C-N, Tanaka E, Yamada H, Zheng X-G, Tsuji Y Y and T, Tomokiyo Y and Soejima Y 2001 Evidence of Charge Stripes, Charge-Spin-Orbital Coupling and Phase Transition in a Simple Copper Oxide CuO *J. Phys. Soc. Japan* **70** 1054–63

Bakalaura darbs “Pusvadītāju nanovadu īpašības un pielietojumi nanoelektromehāniskās sistēmās” izstrādāts Latvijas Universitātes Ķīmiskās fizikas institūtā.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: Raitis Sondors

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai:

Darba vadītājs: Dr.Chem. Donāts Erts

Darba vadītāja: Dr.Phys. Jeļena Kosmača

Recenzents: Dr.Phys. Dmitrijs Bočarovs

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā _____._____.2019.

Dekāna pilnvarotā persona: vecākā metodiķe Dzintra Holsta

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījumu komisijas sēdē

_____._____.2019. protokols _____