

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE  
FIZIKAS NODAĻA

**NANOVADU MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU IZPĒTE UN TO  
PIELIETOJUMI NANOELEKTROMEHĀNISKĀS SISTĒMĀS**

MAĢISTRA DARBS

Autors: Līga Jasulaņeca

Stud. apl. Ij09119

Darba vad. Dr. Chem. Donāts Erts

RĪGA 2015

## ANOTĀCIJA

Darbā noteikti monokristālisku  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ , Ge un BeO nanovadu Junga moduļi. Nanovadu šķērsriezuma laukums noteikts robežās no  $7.1 \cdot 10^2 \text{ nm}^2$  līdz  $7.8 \cdot 10^4 \text{ nm}^2$ , garums no  $3,1 \text{ }\mu\text{m}$  līdz  $136 \text{ }\mu\text{m}$ . Mērījumi veikti skenējošā elektronu mikroskopā. Izmantotas atšķirīgas mehānisko īpašību noteikšanas metodes – elektriskā lauka ierosināta mehāniskā rezonanse, nanovadu lieces un spiedes deformācijas – un secināts, ka iegūtie rezultāti kļūdu robežās sakrīt. Eksperimentāli noteiktās Junga moduļa vērtības –  $36 \pm 9 \text{ GPa}$ ,  $135 \pm 40 \text{ GPa}$  un  $97 \pm 24 \text{ GPa}$  attiecīgi  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ , Ge un BeO nanovadiem.

Pētīts ar dabīgo oksīdu klātu Ge nanovadu pielietojums nanoelektromehāniskā slēdzī. Parādīts, kā adhēzija starp aktīvo elementu un elektrodu slēdzim ieslēgtā stāvoklī ir saistīta ar kontakta elektriskajām īpašībām un slēdža darbības spriegumu.

## ABSTRACT

This work presents determination of Young's modulus of monocrystalline  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ , Ge and BeO nanowires. Cross-sectional area of the examined nanowires ranged from  $7.1 \cdot 10^2 \text{ nm}^2$  to  $7.8 \cdot 10^4 \text{ nm}^2$ , with lengths spanning from 3,1  $\mu\text{m}$  līdz 136  $\mu\text{m}$ . The measurements were carried out in scanning electron microscope. Different mechanical testing methods were used – electric field induced mechanical resonance, bending and compressive deformation of nanowires, showing consistent results. Experimentally determined Young's modulus values were  $36 \pm 9 \text{ GPa}$ ,  $135 \pm 40 \text{ GPa}$  and  $97 \pm 24 \text{ GPa}$  for  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ , Ge and BeO nanowires, respectively.

Applications of native oxide covered Ge nanowires in nanoelectromechanical switches were explored. Dependence of adhesion between the active element and electrode on electrical properties and operating voltage of the switch in ON state was experimentally revealed.

# PUBLIKĀCIJU SARAKSTS AR DARBĀ IEKĻAUTAJIEM REZULTĀTIEM

## **Raksti**

1. Jasulaneca, L., Meija, R., Livshits, A., Prikulis, J., Biswas, S., Holmes, J. D., Erts, D. (2015). Determination of Young's modulus of  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanowires. – iesniegts *Materials Chemistry and Physics*
2. Meija, R., Kosmaca, J., Jasulaneca, L., Petersons, K., Biswas, S., Holmes, J. D., Erts, D. (2015). Electric current induced modification of germanium nanowire NEM switch contact. *Nanotechnology*, 26(19), 195503. doi:10.1088/0957-4484/26/19/195503

## **Konferenču prezentācijas**

1. **Jasulaneca L., Meija R., Livshitz A., Prikulis J., Holmes J. D., Erts D.**, „Measuring Young's modulus of  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanowires”, Advanced materials and technologies, Palanga, Lithuania, August 2014.
2. **Jasulaneca L., Meija R., Livšics A., Holmes J. D., Erts D.**, „Junga moduļa noteikšana  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadiem”, LU Cietvielu fizikas institūta 30. zinātniskā konference, Rīga, Latvija, februāris 2014.
3. **Jasulaneca L., Meija R., Prikulis J., Varghese J., Holmes J. D., Erts D.**, „Mechanical properties of antimony sulfide nanowires”, Functional materials and nanotechnologies 2012, Riga, Latvia, April 2012.
4. **Jasulaneca L., Meija R., Andzane J., Prikulis J., Holmes J. D., Erts D.**, „Characterizing mechanical properties of the nanowires by in situ SEM techniques”, 2nd European Nanomanipulation Workshop, Tartu, Estonia June, 2011.
5. **Meija R., Andzane J., Prikulis J., Jasulaneca L., Holmes J. D., Erts D.**, „Application of Individual Semiconductor Nanowires in Gateless Bistable Nanoelectromechanical Switch”, Functional materials and nanotechnologies 2011, Riga, Latvia, April, 2011.
6. **Jasulaneca L., Prikulis J., Meija R., Erts D.**, „ $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadu mehānisko un elektrisko īpašību mērījumi in situ”, Latvijas Universitātes 70. konference, Rīga, Latvija, februāris 2012.

7. **Meija R., Livšics A., Andžāne J., Jasulaņeca L., Prikulis J., Erts D.**, „Nanoelektromehānisku slēdžu darbības izpēte - skaitlisks modelis un eksperiments”, Latvijas Universitātes 70. konference, Rīga, Latvija, februāris 2012.
8. **Andžāne J., Meija R., Jasulaņeca L., Prikulis J., Erts D.**, „Nanoelektromehānisku slēdžu veidošana”, Latvijas Universitātes 69. Konference, Rīga, Latvija, februāris, 2011

## SATURS

Ievads .....	7
1. Literatūras apskats.....	9
1.1. Darbā izmantotie materiāli.....	9
1.2. Nanovadu mehāniskās īpašības.....	11
1.3. Nanovadu mehānisko īpašību noteikšanas metodes <i>in situ</i> .....	13
1.4. NEM slēdži .....	14
2. Eksperimentālā daļa .....	18
2.1. Nanovadu paraugu sagatavošana .....	18
2.2. Nanovadu Junga moduļa noteikšana.....	22
2.3. NEM slēdža kontakta īpašību izpēte .....	23
3. Rezultāti .....	25
3.1. Junga moduļa noteikšana nanovadiem.....	25
3.1. NEM slēdža kontakta īpašības .....	35
Secinājumi.....	43
Izmantotā literatūra .....	44

## APZĪMĒJUMU SARAKSTS

NEMS – nanoelektromehāniskā sistēma

MEMS – mikroelektromehāniskā sistēma

TEM – transmisijas elektronu mikroskops

HRTEM – augstas izšķirtspējas TEM

SEM – skenējošais elektronu mikroskops

AFM – atomspēku mikroskops

EBD – elektronu kūļa inducēta nogulsnešana

AAO – anodizēts alumīnija oksīds

## IEVADS

### **Pētījuma aktualitāte**

Lai turpinātu komplementāro metāla oksīda pusvadītāju (CMOS) tehnoloģiju attīstību līdzšinējā ātrumā, tiek izvirzītas jaunas energoefektivitātes, ātrdarbības, elementu integrācijas blīvuma un izturības prasības. Pateicoties mazajām noplūdes strāvām un stabilitātei pie augstas temperatūras [1], nanostruktūras tiek aplūkotas kā alternatīvi elementi, kas varētu papildināt esošās uz silīcija (Si) balstītās tehnoloģijas.

Nanovadi ir kvazi-viendimensionālas nanostruktūras ar rādiusu diapazonā no pāris nanometriem līdz pāris simtiem nanometru un ar garumu mikrometru vai pat milimetru skalā. Kvazi-viendimensionālās struktūras dēļ nanovadiem novērotas no makroskopiskā materiāla atšķirīgas optiskās [2], elektriskās [3] un mehāniskās [4-6] īpašības. Mehānisko īpašību raksturošana ļauj ne tikai paredzēt sintezēto nanostruktūru elastīgo un plastisko uzvedību tehnoloģiju izveides procesā, bet arī novērtēt sintēzes kvalitāti. Būtiska ir arī mehānisko īpašību noteikšanas metožu izpēte un optimizācija, jo šobrīd vēl nav vienotas standartizētas metodes, kā raksturot nanostruktūras. Literatūrā atrodama pretrunīga informācija par nanovadu mehānisko īpašību atkarību no izmēriem un atšķirībām no makroskopiska materiāla, turklāt rezultātiem ir būtiska izkliede.

Tāpat ievērojama uzmanība tikusi pievērsta nanovadu pielietojumiem – demonstrētas gan uz atsevišķiem nanovadiem [7], gan nanovadu masīviem [8] balstītas ierīces. Kā nozīmīgus piemērus jāmin nanoelektromehāniskos (NEM) slēdžus [9-12], sensorus (ķīmiskos [13], biosensorus [14]), nanolāzerus [15], termoelektriskās ierīces [16] un nanoģeneratorus [17]. NEM sistēmas iemantojušas popularitāti, pateicoties augstām rezonanses frekvencēm, ātrdarbībai, nelielajai masai un ekonomiskajam enerģijas patēriņam, kā arī iespējai tikt integrētām liela blīvuma strukturētos masīvos.

Adhēzija starp virsmām spēlē nozīmīgu lomu gan mikro-, gan nanomērogā. NEM slēdžu darbību būtiski ietekmē adhēzija starp aktīvo elementu un elektrodu, kas nepieciešama, lai slēdzis saglabātu ieslēgtu stāvokli un kas jāpārvar, lai tas atslēgtos. Adhēzija ir atkarīga no kontaktvirsmu laukuma, mehāniskās un ķīmiskās virsmas struktūras. Savukārt kontaktvirsmu struktūra slēdža darbības laikā var dinamiski mainīties gan mehānisku triecienu, gan strāvas izraisītas uzkaršanas rezultātā, ietekmējot ne vien spēku, kas jāpieliek, lai slēdzis nonāktu izslēgtā

stāvoklī, bet arī slēdža darbības ciklu skaitu un ātrdarbību. Līdz ar to kontaktvirsmas ietekme uz adhēzijas spēkiem NEM slēdža darbības laikā prasa detalizētu izpēti.

### **Pētījuma mērķis**

Darbs tika veikts ar mērķi noteikt dažādu materiālu nanovadu mehāniskās īpašības un izpētīt nanovadu kā aktīvo elementu funkcionalitāti konkrētā pielietojumā – NEM slēdzī. Ar nedestruktīvu metožu palīdzību raksturot NEM slēdža darbības parametrus ar iespējām optimizēt to darbību.

### **Pētījuma uzdevumi**

Noteikt Junga moduli  $Sb_2S_3$ , BeO un Ge nanovadiem *in situ* skenējošā elektronu mikroskopā, izmantojot gan dinamisko, gan statisko mehānisko īpašību raksturošanas metodi. Izpētīt robežvirsmu mijiedarbību nanokontaktos pie dažādiem NEM slēdžu darbības parametriem un atšķirīgiem kontaktu veidiem.

### **Zinātniskais jaunums**

Noteiktas  $Sb_2S_3$  un pirmo reizi sintezēto BeO nanovadu mehāniskās īpašības. Demonstrēta jauna nedestruktīva pieeja adhēzijas procesu raksturošanā NEM slēdzī. Parādīta kontakta elektrisko un mehānisko īpašību savstarpējā saistība atkarībā no NEM slēdža darbības sprieguma un strāvas blīvuma.

### **Praktiskā nozīme**

Zinot nanovadu mehāniskās īpašības, iespējams paredzēt to darbību un novērtēt ilgtspēju dažādos uz nanovadiem balstītos pielietojumos. Izpratne par procesiem NEM slēdža kontaktā ir būtiska ne tikai no slēdžu dizaina skatpunkta, bet arī plašāk - nanokontaktu veidošanā starp dažādām virsmām. Iegūtie secinājumi papildina zināšanas arī saistībā ar procesiem metāla-oksīda-pusvadītāja nanokontaktos.

# 1. LITERATŪRAS APSKATS

## 1.1. Darbā izmantotie materiāli

### **Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>**

Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> ir anizotrops feroelektrisks pusvadītājs, kas piemērots optoelektroniskiem pielietojumiem redzamās gaismas un tuvajā infrasarkanajā apgabalā (aizliegtās zonas platums 1,78 – 2,5 eV [18]). Aplūkota arī Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> potenciāla izmantošana saules baterijās materiāla lielā absorbcijas koeficienta dēļ ( $\alpha \geq 10^3 \text{ cm}^{-1}$  [19]). Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> blīvums ir 4,60 g cm<sup>-3</sup>, un makroskopiska kristāla elektriskā vadītspēja paralēli c-ass virzienam ir  $3.3 \cdot 10^{-8} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$  (T = 300 K) [20]. Demonstrētas Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> nanovadu pjezoelektriskās un feroelektriskās īpašības [21] un aprakstīti elektriskās strāvas vadīšanas mehānismi individuālos nanovados [22]. Autori parādījuši, ka Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> nanovadu īpatnējā elektriskā pretestība gaisā ir lielāka nekā slāpekļa atmosfērā, kas tiek saistīts ar skābekļa absorbciju un brīvo elektronu saķeršanu uz nanovadu virsmas. Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> nanovadu īpatnējā elektriskā pretestība noteikta robežās no 1,8 līdz 3,2 kΩ · m [23]. No elektrisko un fotovadītspējas īpašību viedokļa, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> nanovadi varētu tikt izmantoti kā aktīvie elementi NEM ierīcēs. Mehāniskās īpašības Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> līdz šim ir maz pētītas.

### **BeO**

BeO ir viens no ķīmiski stabilākajiem oksīdiem ar kušanas temperatūru 2,507°C un blīvumu 3,01 g cm<sup>-3</sup> [20]. Pateicoties tā termiskajām īpašībām (330 W · K<sup>-1</sup> · m<sup>-1</sup> - otra augstākā termiskā vadītspēja starp izolatoriem, ko pārsniedz vienīgi dimants) un aizliegtās zonas platumam ap 10,6 eV [20], BeO tiek izmantots kā izolators augstas jaudas elektroniskajās ierīcēs. Tā elektriskā īpatnējā pretestība pārsniedz 10<sup>16</sup> Ω · cm. Pie tam materiāla relatīvi zemās dielektriskās konstantes ( $k'_a = 6.87$ ,  $k'_c = 7.74$  attiecīgi a- un c- ass virzienos istabas temperatūrā [24]) BeO ir piemērots augstas frekvences pielietojumiem. Tā optiskās jutības dēļ BeO tiek plaši izmantots arī kā luminofors optiski stimulētās luminiscences dozimetros [25].

Teorētiski aprakstīta BeO vienslāņa nanocaurulīšu veidošanās, to elektriskās un mehāniskās īpašības [26, 27], bet līdz šim vēl nav veikta to sintēze. Pateicoties pjezoelektriskajam efektam, tiek paredzēta BeO nanostruktūru pielietošana NEM ierīcēs. Junga modulis un aizliegtās zonas platums aprēķināts vienslāņa nanocaurulītēm ar rādiusu 3,4-27,1 Å, paredzot Junga moduļa

vērtību, kas sasniedz aptuveni 30 % no oglekļa nanocaurulīšu vērtības. Aizliegtā zonas platuma vērtības noteiktas robežās no 7,3 - 8,8 eV [26] un 9,09 - 9,62 eV [27].

Literatūrā informācija par BeO nanovadu sintēzi un īpašībām, cik zināms, nav atrodama.

## **Ge**

Ge priekšrocības mikroelektronikā ir saistītas ar tā lielo lādiņnesēju kustīgumu, kas ir vairāk kā 4 reizes lielāks caurumiem un 2 reizes lielāks elektroniem [28], salīdzinot ar industrijā dominējošo materiālu silīciju (Si). Turklāt Ge savietojamība ar Si paver iespējas tā integrēšanai jau esošās uz Si balstītās ierīcēs.

Tomēr Ge ir dabā reti sastopams elements ar zemāku kušanas temperatūru (938 °C) nekā Si (1414°C) [29]. Tāpat Ge ar tā dabisko oksīdu  $\text{GeO}_x$  piemīt vājākas strukturālās un elektriskās īpašības nekā Si un  $\text{SiO}_2$ , kas ir bijis būtisks trūkums šī materiāla pielietojumu attīstībā, neskatoties uz to, ka vēsturiski pirmajā tranzistorā tika izmantots Ge. Tajā pašā laikā jāmin, ka ar  $\text{GeO}_x$  klātas Ge virsmu mehāniskās un elektriskās īpašības ir mazāk pētītas.

Literatūrā minēts, ka gaisā uz Ge virsmas veidojas dažādi germānija oksīda savienojumi ar atšķirīgām īpašībām. Piemēram, GeO tiek desorbēts, sākot ar 400°C augstu temperatūru. GeO ir ūdenī nešķīstošs, bet  $\text{GeO}_2$  šķīstošs. Virs 400°C Ge reaģē ar  $\text{GeO}_2$ , kā reakcijas produktam veidojoties GeO [30, 31]. Līdz ar to var secināt, ka Ge/ $\text{GeO}_x$  robežvirsmas ir dinamiskas, un ir nepieciešamība pēc detalizētiem pētījumiem, kas raksturo tās izmaiņas atšķirīgos pielietojumos.

## 1.2. Nanovadu mehāniskās īpašības

Gan eksperimentāli, gan skaitliskās modelēšanas rezultātā nanovadiem novērotas no makroskopiska materiāla atšķirīgas mehāniskās īpašības. Līdz šim iegūtos rezultātus var iedalīt atkarībā no tā, vai mehāniskās īpašības atšķiras no makroskopiska materiāla, vai novērojama atkarība no nanovadu diametra vai garuma/diametra attiecības, cik izteikta ir šī tendence un pie kādiem diametriem to var novērot. Atšķirības no makroskopiska materiāla demonstrētas, deformējot nanovadus gan elastīgi, gan plastiski. Piemēram, elastīgās deformācijas režīmā ZnO nanovadiem konstatēta Junga moduļa atkarība no nanovadu diametra. Samazinot diametru no 80 nm līdz 5 nm, konstatēta ZnO nanovadu Junga moduļa vērtības samazināšanās par aptuveni 26 % [4]. Ag nanovadiem eksperimentāli novērota Junga moduļa, tecēšanas robežas un stiprības palielināšanās, samazinot diametru no 130 nm līdz 34 nm [5]. Tāpat tika konstatēta Junga moduļa palielināšanās vairāk kā divas reizes (176 GPa nanovadam ar diametru 34 nm), salīdzinot ar makroskopisku Ag (84 GPa). Līdzīga tendence novērota arī Pb nanovadiem, kur pie lielām nanovadu diametra vērtībām ( $d > 100$  nm) Junga moduļa vērtības sakrīt ar makroskopisku materiālu, bet, diametram samazinoties, Junga moduļa vērtības nepārtraukti palielinās līdz pie 30 nm diametra divreiz pārsniedz makroskopiskā materiāla Junga moduli [6]. Novērotā tendence tika skaidrota galvenokārt ar virsmas efektiem, strukturāliem defektiem piedēvējot nenozīmīgu lomu. Tāpat arī SiC nanovadiem novērota sabrukšanas stiprības paaugstināšanās no 8.1 līdz 25.3 GPa, diametram samazinoties attiecīgi no gandrīz 50 nm līdz 17 nm [32]. Si  $\langle 100 \rangle$  nanovadiem eksperimentāli noteikta Junga moduļa samazināšanās nanovadu diametriem, kas mazāki par 100 nm [33-35]. ZnS nanojostām (*nanobelts*) demonstrēta cietības palielināšanās par 79% un Junga moduļa samazināšanās par 52% salīdzinājumā ar makroskopisku materiālu [36].

Atsevišķs jautājums ir mērījumu rezultātu izkliede, kas nanomērogā mēdz būt izteikti liela. Arī viena materiāla nanovadiem dažādas mehāniskās testēšanas metodes var dot būtiski atšķirīgus rezultātus. Piemēram, ZnO nanovadiem ar *in situ* rezonanses metodi noteikts Junga modulis 140-220 GPa, un konstatēta tā atkarība no nanovadu diametra (robežās no 17 nm līdz 550 nm) [37]. Savukārt AFM stiepes deformācijas rezultātā iegūta vērtība  $97 \pm 18$  GPa, kas ir neatkarīga no nanovadu diametra [4]. Atšķirīgos rezultātus var skaidrot ar to, ka virsmas efekti ir vairāk vai mazāk izteikti katrā no deformāciju veidiem (vairāk – liecē, mazāk – stiepē) [38]. Tātad pastāv nepieciešamība detalizētāk apskatīt dažādus deformāciju mehānismus, to īpatnības un interpretāciju.

Jāatzīmē, ka skaitliskās modelēšanas rezultātos redzama tendence Junga moduļa vērtības augšanai vai dilšanai sākties pie ievērojami mazākiem nanovadu diametriem – nanovadiem ar diametru virs 10 nm netiek novērotas atšķirības no makroskopiskā materiāla Junga moduļa [39]. Jāņem vērā, ka dažām izplatītām modelēšanas metodēm ir ierobežots aplūkojamo diametru apgabals, piemēram, molekulārās dinamikas modeļi tiek pielietoti nanovadiem ar diametru līdz aptuveni 10 nm.

Nanovadu īpatnējās mehāniskās īpašības iespējams izskaidrot ar virsmas efektiem, ko rada nanovadiem raksturīgā lielā virsmas laukuma un tilpuma attiecība. Virsmas efektu izcelsme tiek saistīta ar virsmas atomu īpašo stāvokli – mazāku tuvāko atomu skaitu (jeb koordinācijas skaitli) un atšķirīgu elektronu blīvumu - salīdzinājumā ar atomiem tilpumā. Virsmas atomi ir pakļauti virsmas spriegumam  $\tau$ , kas sastāv no 2 komponentēm – no deformācijas neatkarīgās un atkarīgās daļas (kas ir lineāra deformācijas funkcija), ko izraisa tieši reducētais koordinācijas skaitlis:

$$\tau = \tau^0 + S\varepsilon, \quad (1)$$

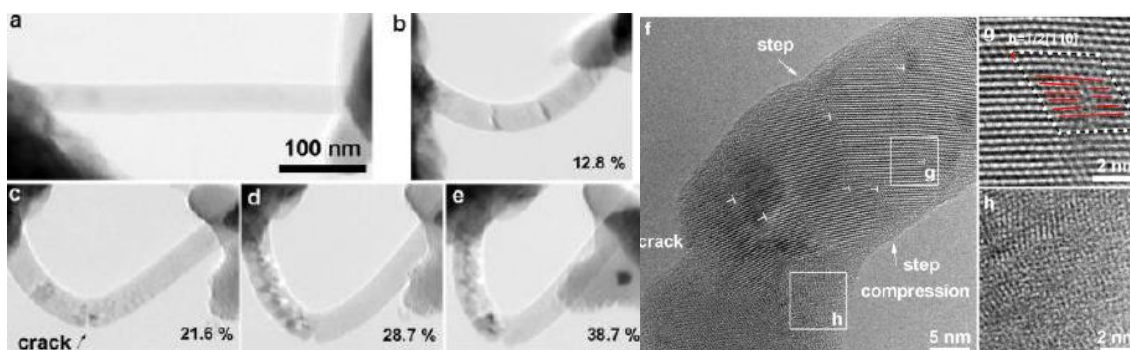
kur  $\tau^0$  – no deformācijas neatkarīgā virsmas sprieguma daļa,  $S$  – virsmas elastīgais stingums,  $\varepsilon$  – deformācija [39]. Metāliem ar skaldnē centrētu kubisku simetriju raksturīgs virsmas stiepes spriegums, kas nozīmē, ka saraujoties virsma var nonākt enerģētiski izdevīgākā stāvoklī. Saraušanās rezultātā virsmas atomu apkārtējā vide tiecas līdzināties tilpumam, palielinot koordinācijas skaitli un elektronu blīvumu. Savukārt pusvadītāju materiāliem raksturīga virsmas rekonstrukcija jeb virsmas atomu brīvo saišu saistīšanās ar kaimiņu atomiem, lai minimizētu virsmas enerģiju. Tāpat pusvadītāju virsmām piemīt spiedes spriegums, kas tiek kompensēts ar struktūras izstiepšanos (nanovadu gadījumā palielinās to garums).

Salīdzinot ar makroskopisku materiālu, kam mehāniskās īpašības lielā mērā nosaka defekti (punktu, lineārie – dislokācijas, graudu robežas), ierobežotajā nanostruktūras tilpumā iespējams daudz mazāks defektu blīvums.

### 1.3. Nanovadu mehānisko īpašību noteikšanas metodes *in situ*

Pateicoties skenējošās zondes un elektronu mikroskopa attīstībai, tiek izstrādātas arvien precīzākas metodes nanovadu mehānisko īpašību noteikšanai, kā arī tiek uzlabota eksperimentu atkārtojamība. Vispārīgi mehānisko testēšanu var iedalīt vairākos posmos – nanovadu manipulācija un precīza novietošana attiecībā pret pārējām shēmas komponentēm, spēka pielikšana un mērīšana un mehāniskās deformācijas reģistrēšana ar izšķirtspēju nanometros. Lai sasniegtu nepieciešamo spēka izšķirtspēju, kas parasti ir ar kārtu nN, izmanto AFM kronšteinus vai speciāli izveidotas mikroelektromehāniskas sistēmas.

*In situ* mērīšanas metožu priekšrocība ir nanovadu deformāciju novērošana reālā laikā. Nanovadu mehānisko īpašību raksturošanā plaši tiek izmantoti TEM (transmisijas elektronu mikroskops) un SEM (skenējošais elektronu mikroskops). Augstas izšķirtspējas TEM (HRTEM) ļauj tieši izsekot defektu ietekmei uz deformāciju mehānismiem. Piemēram, pakļaujot Si <100> nanovadus plastiskai stiepes deformācijai *in situ* TEM, tieši novērota kristāliskā režģa sakārtotības mazināšanās un dislokāciju struktūru izveide „kakla” reģionā, nanovada diametram samazinoties četras reizes pirms sagrūšanas [40]. Lieces deformācijā Si nanovadiem novērota plaisu nukleācija stiepei pakļautajā daļā un plastiskas deformācijas izraisīta pāreja uz amorfu struktūru spiedeī pakļautajā daļā [41] (1.1. att.). Savukārt SEM piedāvā ne tikai individuālu nanovadu, bet arī visplašākās dažādu NEMS konfigurāciju izpētes iespējas, ļaujot iegūt statistiski nozīmīgākus rezultātus nekā integrējot visus elementus vienā ierīcē, piemēram, ar litogrāfijas metodi.



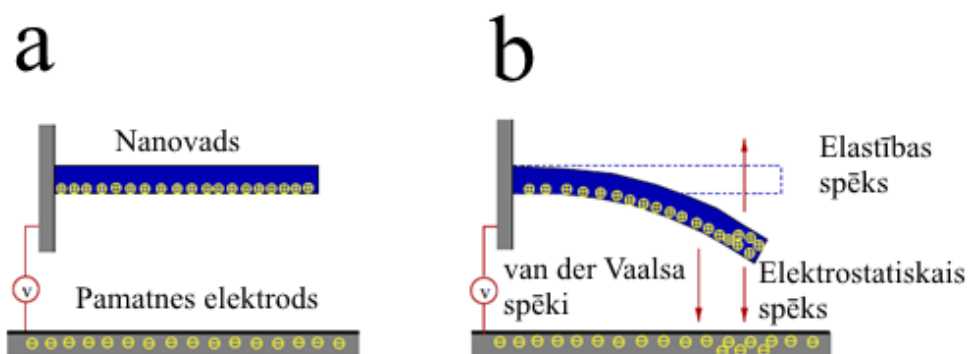
1.1. att. TEM attēli individuāla Si nanovada lieces deformācijas gaitā [41]. a)-e) Si nanovads pie pakāpeniski augošas deformācijas (norādīta procentos), redzama plaisas (crack) izveidošanās pie 21.6% (c) un pārvietošanās (d,e). f-h) HRTEM attēlos parādīta plaisa un dislokācijas stiepei pakļautajā daļā (f), dislokāciju struktūra (g) un amorfais reģions spiedeī pakļautajā daļā (h)

## 1.4. NEM Slēdži

### NEM slēdžu darbības principi

NEM slēdžu izveide un funkcionalitātes izpēte tiek veikta ar motivāciju radīt enerģētiski ekonomiskākas un ātrdarbīgākas ierīces, kas varētu aizstāt vai papildināt esošās MEMS un CMOS tehnoloģijas [42]. NEM un CMOS slēdžiem ir līdzīgi pielietojumi atmiņas elementos un loģiskajās ierīcēs, tomēr to darbības principi, parametri un uzbūve ir atšķirīga. Salīdzinājumā ar CMOS tehnoloģiju, NEM slēdžiem raksturīga darbības stabilitāte pie augstas temperatūras un ārējos laukos, pie tam ievērojama priekšrocība ir lielā  $I_{ON}/I_{OFF}$  (ieslēgta/izslēgta slēdža strāvas) attiecība (piemēram, atsevišķiem nanovadiem tā sasniegusi  $10^5$  [1]).

NEM slēdzis sastāv no aktīvā elementa un viena vai vairākiem elektrodiem, kas izslēgtā stāvoklī atrodas noteiktā attālumā cits no cita (1.2. att.). Ja starp aktīvo elementu un elektrodu tiek radīta potenciālu starpība, tajos inducējas lādiņi, kas rada elektrostātisko spēku. NEM slēdzis tiek aktivizēts, elektrostātiskajam spēkam deformējot aktīvo elementu līdz tas nonāk mehāniskā kontaktā ar elektrodu. Pie maziem aktīvā elementa-elektroda attālumiem ( $<100$  nm) ieguldījumu kopējā spēkā dod arī van der Vaalsa spēki. Pie tādas pieliktā spēka vērtības, kas pārsniedz aktīvā elementa elastības atgriešanās spēku, elements zaudē stabilitāti un paātrinās elektroda virzienā, noslēdzot elektrisko ķēdi. Šajā brīdī ķēdē parādās straujš strāvas kāpums, kas atbilst ieslēgtam stāvoklim. Ieslēgšanas spriegums ir atkarīgs no slēdža elementu savstarpējās konfigurācijas un aktīvā elementa elastīgajām īpašībām.



1.2. att. NEM slēdža darbības princips. Starp aktīvo elementu (*nanotube*) un elektrodu (*ground plane*) pieliktais spriegums a)  $V=0$ , aktīvais elements atrodas nedeformētā stāvoklī, b)  $V\neq 0$ , aktīvais elements ir deformējies elektrostātiskā un van der Vaalsa spēku ietekmē [71]

Tā kā elektrostatisks spēks palielinās apgriezti proporcionāli attāluma starp abām slēdža komponentēm kvadrātam, tiek paredzēts, ka, samazinot izmērus, NEM slēdžiem ievērojami palielināsies efektivitāte un samazināsies aktivizācijai nepieciešamie spriegumi.

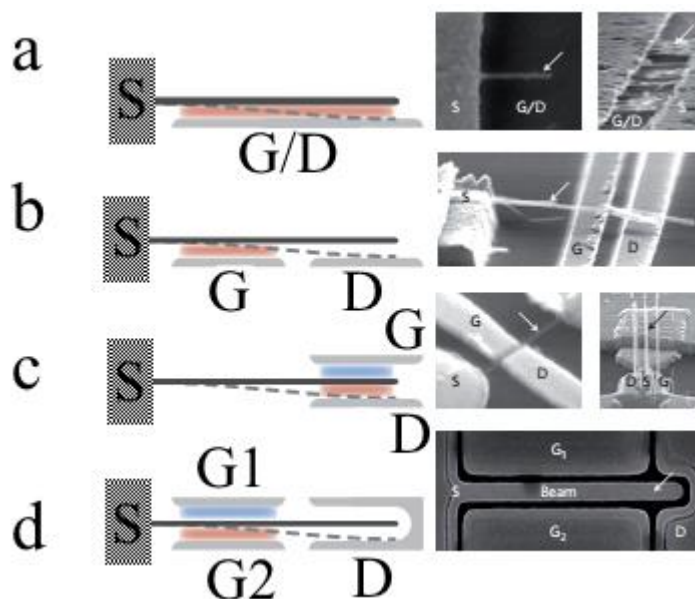
Pretēji elektrostatisks un van der Vaalsa spēkiem darbojas nanovada elastības spēks, kas tiecas saglabāt nanovada sākotnējo nedeformēto stāvokli. Lai NEM slēdzis atgrieztos izslēgtā stāvoklī pēc sprieguma noņemšanas, nanovada elastības spēkam ir jāpārvar kontakta adhēzijas spēks. Elastības spēku var palielināt, izmantojot stingus materiālus (ar lielu Junga moduli) kā aktīvos elementus un lielākus attālumus starp elektrodiem. Tajā pašā laikā nepieciešams arī lielāks ieslēgšanas spriegums, kas palielina gan caur aktīvo elementu plūstošo strāvu, gan mehānisko triecienu kontakta izveidošanās brīdī. Šie efekti var novest pie nanovada nevēlamas uzkaršanas un kontakta lokālas modifikācijas, kas savukārt var ietekmēt slēdža darbības parametrus atkārtotos pārslēgšanās ciklos. Praksē attāluma starp aktīvo elementu un elektrodiem samazināšana ir ierobežota tunelēšanas dēļ.

Vispārīgi slēdža dinamiku var aprakstīt ar 4. kārtas nestacionāru diferenciālvienādojumu

$$\rho A \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} + c \frac{\partial r}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 r}{\partial x^4} = q_{el} + q_{vdW}, \quad (2)$$

kur  $x$  – koordināte aktīvā elementa aksiālajā virzienā,  $r(x, t)$  – attālums starp aktīvo elementu un elektrodiem,  $t$  – laiks,  $\rho$  un  $A$  – aktīvā elementa materiāla blīvums un laukums,  $E$  – Junga modulis,  $I$  – laukuma inerces moments,  $c$  – sistēmas dzišanas konstante [43]. Kopējo spēku, kas pielikts nanovadam, šeit raksturo ar slodzi uz garuma vienību, ko sastāda elektrostatisks spēks  $q_{el}$  un van der Vālsa spēks  $q_{vdW}$  summa.

Literatūrā demonstrētas dažādas NEM slēdžu konfigurācijas. Piemēram, ir tikušas izmantotas vienā galā un abos galos nostiprinātas nanostruktūras ar virkni aktīvajiem elementiem – nanovadiem, nanocaurulītēm, plānajām kārtiņām, nanovadu masīviem [1]. Demonstrēti gan divu terminālu, gan trīs un vairāk terminālu slēdži. 1.3. att. ilustrē vienā galā nostiprinātas nanostruktūras dažādas NEM slēdža konfigurācijas.



1.3. att. NEM slēdžu veidi. Shematisks slēdžu attēlojums (kreisajā pusē) un ierīču attēli (labajā pusē). S (source) – iztece, D (drain) – notece, G (gate) – aizvars. Aktīvais elements norādīts ar bultu. a) Divu terminālu slēdzis, kurā spriegums tiek pielikts starp S un G/D elektrodiem. Elektrostatiskais spēks pievelk aktīvo elementu, līdz tas nonāk kontaktā ar G/D. b) Trīs terminālu slēdzis, kurā spriegums tiek pielikts starp S un G elektrodiem, aktīvais elements izveido kontaktu ar D. c) Trīs terminālu slēdzis, kur G rada elektrostatisko spēku, kas atgrūž aktīvo elementu, savukārt D – pievelk. d) Četru terminālu slēdzis ar diviem aizvara elektrodiem [1]

Saistībā ar NEM slēdžu dizainu literatūrā tiek pieminēti arī būtiski trūkumi – ierīču stabilitāte, atkārtājamo ciklu skaits, aktīvā elementa neatgriezeniska adhēzija pie elektroda virsmas, nodegšana vai mehāniska sabrukšana.

Literatūrā minētas tādas metodes adhēzijas samazināšanai nanokontaktos kā aktīvo elementu virsmas ķīmiska funkcionalizēšana, kontaktaukuma samazināšana, palielinot virsmas raupjumu, un pielāgojot vienu otram materiālu virsmas enerģijas [44, 45]. Parādīta arī alternatīva metode NEM slēdžu gadījumā, kas balstās uz rezonanses svārstību ierosināšanu aktīvajā elementā [12]. Lai raksturotu adhēziju nanokontaktā, parasti izmanto aktīvā elementa atrašanu no virsmas. Šajā metodē nepieciešams nodrošināt virsmai perpendikulāru atgriezējspēku, bet praksē grūtības rada parazītiskā tangenciāli vērsta spēka komponente (slīde).

### Ge nanovadi kā NEM slēdžu aktīvie elementi

Monokristāliski Ge nanovadi tiek pētīti kā potenciāli NEM slēdžu aktīvie elementi, pateicoties to monokristāliskajai struktūrai un nelielajai masai. Parādīts, ka Ge nanovadiem

raksturīga lielāka mehāniskā stabilitāte un elektriskā pretestība nekā oglekļa nanocaurulītēm [46]. Eksperimentāli noteiktā Ge nanovadu stiprības robeža –  $15 \pm 4$  GPa - ir tuvu teorētiskajai vērtībai (14 GPa) [47], kas liecina par neievērojamu defektu blīvumu sintezētajos nanovados.

Saistībā ar Ge raksturīgo nestabilo oksīdu, liela uzmanība veltīta Ge nanovadu virsmas ķīmiskajai apstrādei, lai iegūtu vēlamās ķīmiskās, strukturālās un elektriskās īpašības. Piemēram, Ge virsmas pasivēšana ar halogēniem (HF, HCl, HBr, HI) vai organiskajiem savienojumiem noņem dabīgo Ge oksīda slāni un palēnina reoksidēšanās procesu [31]. Bieži pēc virsmas pasivēšanas novērota omisku kontaktu veidošanās, kas izpaužas kā voltampēru raksturlīknes izmaiņa no nelineāras uz lineāru [30].

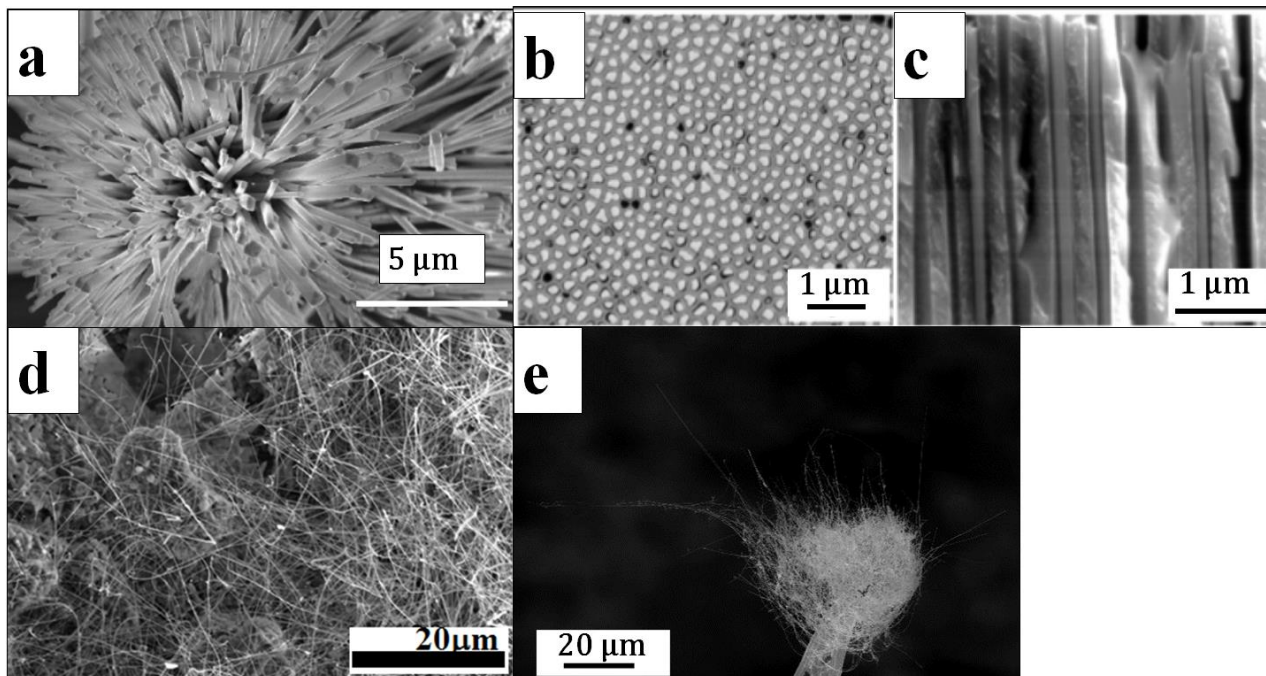
Salīdzinoši mazāk pētījumu veikts ar mērķi raksturot Ge dabīgā oksīda ietekmi uz nanovadu elektriskajām īpašībām [48, 49]. Piemēram, lādiņnesēju dinamikas īpatnības skaidrotas ar Ge vadītspējas un valences zonu izliekšanās modeli, kas rodas, jo elektroni tiek saķerti dabīgajā Ge oksīdā, liekot caurumiem uzkrāties pie nanovada virsmas [48]. Detalizēti pētīti arī Ge–zelta katalizatora daļiņas Šotkī tipa kontakti [50], novērojot kontakta vadītspējas palielināšanos, samazinot nanovadu diametru. NEM slēdžos Ge dabīgais oksīda slānis uzlabo to funkcionalitāti, ļaujot uz Ge nanovadiem balstītiem slēdžiem darboties pie augstākiem spriegumiem bez aktīvā elementa bojāšanas [46]. Tāpat parādīts, ka Ge ar oksīda slāni var darboties kā atmiņas elements, kur informācijas ierakstīšana balstās uz lādiņu saķeršanu uz Ge oksīda virsmas [51].

## 2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

### 2.1. Nanovadu paraugu sagatavošana

#### Nanovadu sintēze

$\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadu pulvera sintēze aprakstīta literatūrā [52]. Darbā tika rakturoti arī monokristāliski  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadi, kas sintezēti anodizētas alumīnija oksīda (AAO) matricas porās ar nanovadu diametriem robežās no 80 nm līdz 200 nm [21]. Ge nanovadi tika sintezēti Korkas universitāšu koledžā Īrijā, izmantojot superkritiskā šķīduma metodi, ar ko detalizētāk var iepazīties literatūrā [53]. LU Ķīmiskās fizikas institūtā tika izstrādāta jauna metode BeO nanovadu sintēzei, kas balstās uz neitronu starojuma radītām berilija (Be) strukturālām izmaiņām un oksidēšanos augstā temperatūrā. Neitronos starots metālisks Be tika karsēts gāzu maisījuma plūsmā – 200 mL/min He + 0.1%  $\text{H}_2$  + 2.5 mL/min gaiss ar temperatūras pieaugumu  $20^\circ\text{C}/\text{min}$  līdz  $1300^\circ\text{C}$  temperatūrai (virs Be kušanas T). Intensīva Be oksidēšanās sākās ap  $1000^\circ\text{C}$ . Tika sintezēti nanovadi ar diametru robežās no 10-150 nm. Darbā izmantoto nanovadu SEM attēli redzami 2.1. att.

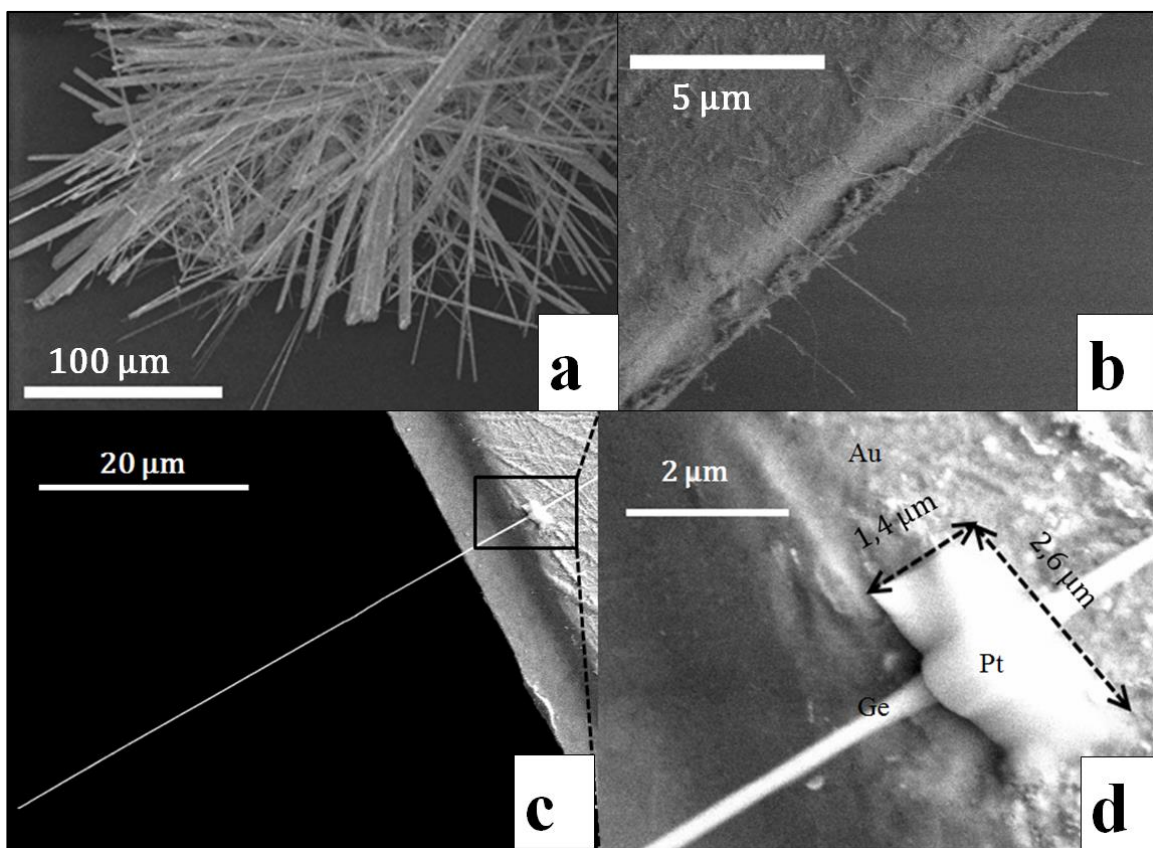


2.1. att. SEM attēli: a)  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadu pulveris – nanovadi izkārtoti rozetēs, b) ar 200 nm diametra  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadiem pildīta pulēta AAO matrica no augšas un c) šķērsgriezumā [21], d) BeO nanovadi, e) Ge nanovadi uz zelta adatas

## Nanovadu paraugu sagatavošana mehānisko īpašību mērījumiem

Individuāla nanovada mehānisko īpašību mērījumiem ir nepieciešami atsevišķi stāvoši vienā galā pie pamatnes nostiprināti nanovadi. Lai šādus paraugus izveidotu, nanovadiem jābūt sausa pulvera veidā, ko var pārnest uz pamatnes.

$\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadu pulvera iegūšanai no AAO matricu virsmas tika mehāniski noņemts nanovadu slānis (2.2. a) att.). Tāpat tika izmantoti nanovadi no izšķīdinātām AAO matricām. Pildītas AAO matricas ar nanovadu diametriem robežās no 80 nm līdz 200 nm tika abpusēji nopulētas un šķīdinātas nelielā tilpumā endorfā 9 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Pēc 1-2 dienu šķīdināšanas, kad matrica bija izšķīdusi, endorfā tika ievietoti ultraskaņā aptuveni 30 s, līdz izveidojās viendabīgs pelēcīgs šķīdums. Izveidotais šķīdums tika centrifugēts līdz izveidojas nogulsnes, liekais šķīdums tika atdalīts ar mikropipeti. Nogulsnes tika skalotas 1 M HCl, pH tika normalizēts, skalojot nogulsnes ar ūdeni. Visbeidzot nogulsnes tika noskalotas etanolā un atstātas žāvēties istabas temperatūrā.



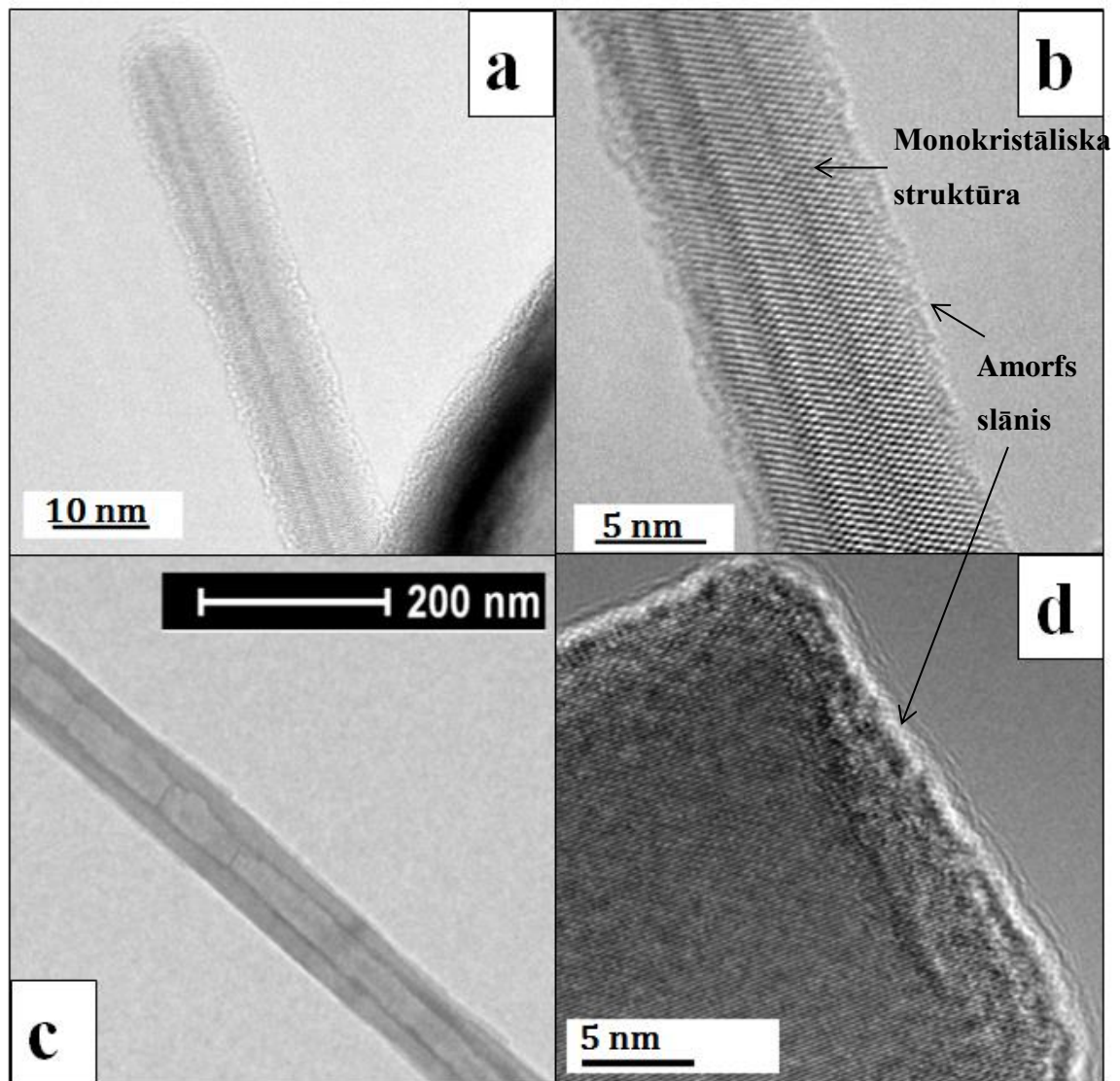
2.2. att. SEM attēli: a) No AAO matricas virsmas iegūti  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadi b) Nanovadi uz vadoša TEM sietīņa malas. c) Ge nanovads uz vadoša TEM sietīņa, piestiprināts ar EBD metodi, nodrošinot mehānisko un elektrisko kontaktu. d) Lielāka palielinājuma Pt stiprinājuma attēls

Mehānisko īpašību mērījumiem tika izmantoti atšķirīgi nanovadu stiprināšanas veidi.  $Sb_2S_3$  nanovadi tika pielīmēti pie asiem kodināta zelta elektrodiem, izmantojot elektrovadošu līmi (CW 2400 Circuit Works Conductive Epoxy). Ar detalizētāku metodes aprakstu var iepazīties literatūrā [52].

Lai nanovadus piestiprinātu pie pamatnes ar alternatīvu metodi – elektronu stara inducētu platīna (Pt) nogulsnešanu (EBD), – sausi nanovadi tika uznesti uz TEM sietiņiem. Pirms uznešanas sietiņi tika nomazgāti acetona un izopropanolā, un vadāmības nodrošināšanai tiem tika uzputināta 5 nm hroma un 20 nm zelta kārtiņa. Uzputināšana tika veikta iekārtā Gatan 682 PECS. Pēc paraugu apskates SEM, turpmākam darbam tika izvēlēti nanovadi, kuru viens gals atrodas uz sietiņa malas, bet otram iespējams brīvi piekļūt ar elektrodiem (2.2. b) att.). Šie nanovadi tika nofiksēti pie pamatnes dubultstaru fokusētā jonu kūļa iekārtā SEM-FIB TESCAN LYRA3, uzklājot 1-2  $\mu\text{m}$  x 2-3  $\mu\text{m}$  platu un 1 – 3  $\mu\text{m}$  biezu platīna kārtiņu (2.2. c, d att.). EBD metode izvēlēta kā vissaudzīgākā attiecībā pret nanovadu strukturālām izmaiņām, salīdzinot ar elektronu kūļa litogrāfiju vai Pt kontaktu veidošanu ar  $Ga^+$  jonu kūli. Literatūrā norādīts, ka litogrāfijas gadījumā aptuveni 60 % gadījumu nanovadi tiek sagrauti vai tiek ietekmētas to virsmas īpašības, bet, veidojot kontaktus ar jonu kūli, pat pie vidējām dozām novērota nanovadu kristāliskās struktūras pāreja uz amorfu. No elektrisko īpašību viedokļa ar EBD veidotiem kontaktiem raksturīga augstāka kontakta pretestība (līdz vairākiem  $G\Omega$ ) nekā ar jonu kūli [54]. Platīna stiprinājuma platums izvēlēts atbilstoši nanovada diametram, lai nodrošinātu nostiprināta nanovada gala robežnosacījuma izpildīšanos [55].

### **Nanovadu paraugu sagatavošana raksturošanai TEM**

BeO un Ge nanovadu raksturošanai TEM nanovadu pulveris ar asu skalpeli tika uzņemts uz TEM sietiņiem. Augstas izšķirtspējas transmisijas elektronu mikroskopā (TEM) FEI Tecnaī G20 200kV Ge un BeO nanovadiem tika novērota monokristāliska struktūra ar amorfu virsmu klājošu slānīti (2.3. d, a, b att.). Daļai lielāka diametra BeO nanovadu ( $> 50$  nm) konstatēta divslāņaina struktūra (2.3. c att.).



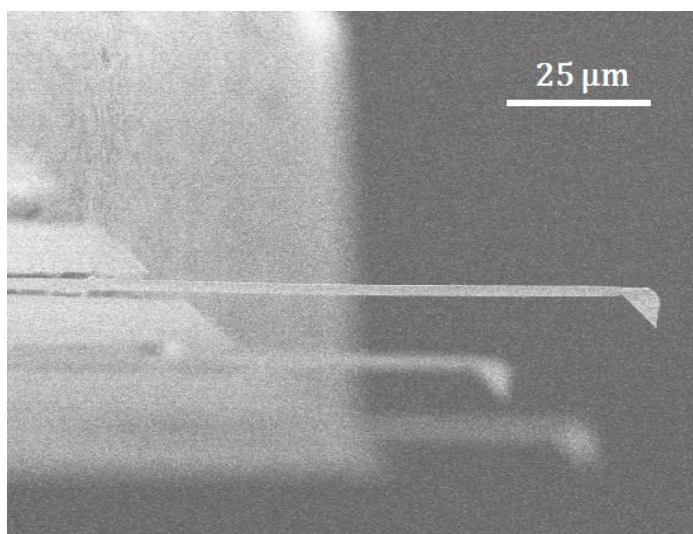
2.3. att. TEM attēli: Augstas izšķirtspējas TEM attēlos redzama BeO (a, b viens nanovads atšķirīgos palielinājumos) un Ge (d) nanovadu kristāliskā struktūra ar amorfo slānīti. c) BeO nanovadam ar diametru 91 nm TEM attēlā redzama divslāņaina struktūra

## 2.2. Nanovadu Junga moduļa noteikšana

Junga moduļa mērījumi tika veikti *in situ* lauka emisijas skenējošā elektronu mikroskopā SEM Hitachi S4800. Eksperimentālās shēmas komponentu manipulācijai un pozicionēšanai izmantota ar SEM savietojama SmarAct 13D nanomanipulāciju sistēma. Elektrovadošie paraugi tika pielodēti pie sistēmas manipulatoriem, kas savienoti ar ārējām mērīšanas iekārtām. Nanovadu paraugu izmēru precīzai noteikšanai rotējot paraugu izmantots mikro soļu-dzinējs Faulhaber ADM0620. Nosakot Junga moduli ar elektriski ierosinātu mehāniskās rezonances metodi, pie nanomanipulatora elektrodiem pieslēgts augstas frekvences signālu ģenerators Agilent N9310A un līdzsprieguma avots Keithley 6430. Rezonanse detektēta reālā laikā SEM video režīmā kā strauja nanovadu svārstību amplitūdas palielināšanās brīdī, kad ierosinošā elektriskā lauka frekvence sakrīt ar nanovada rezonances frekvenci.

Junga moduļa noteikšanai ar elastīgās lieces deformācijas metodi tika izmantoti mīksti silīcija nitrīda AFM (atomspēku mikroskopa) kronšteini (atsperes) ar stinguma koeficientu robežās no 0.002 N/m līdz 0.02 N/m (Olympus BL-RC-150VB), 2.4. att. Spiedes deformācijas gadījumā pielietota atsperē ar stinguma koeficientu 0,16 N/m.

Lai precīzi noteiktu stinguma koeficientu un līdz ar to arī pielikto spēku, pirms mērījumiem atsperes tika kalibrētas AFM, izmantojot termiskā trokšņa (thermal noise) metodi [56].



2.4. att. AFM SiN kronšteini, kas izmantoti nanovadu *in situ* lieces deformācijā.

### 2.3. NEM slēdža kontakta īpašību izpēte

Lai izpētītu slēdža kontakta īpašību izmaiņas atkarībā no ieslēgtā slēdzī plūstošās strāvas/pieliktā sprieguma, SEM tika izveidota shēma ar 2 zelta elektrodiem un aktīvo elementu (2.5. att.). Starp elektrodu nr.3 un aktīvo elementu uz elektroda nr. 1 tika izveidots mehānisks kontakts, izveidojot 2-terminālu slēdzi ieslēgtā stāvoklī. Elektrods nr. 2 tika novietots vienā plaknē ar abiem pārējiem un perpendikulāri aktīvajam elementam rezonanses ierosmei.

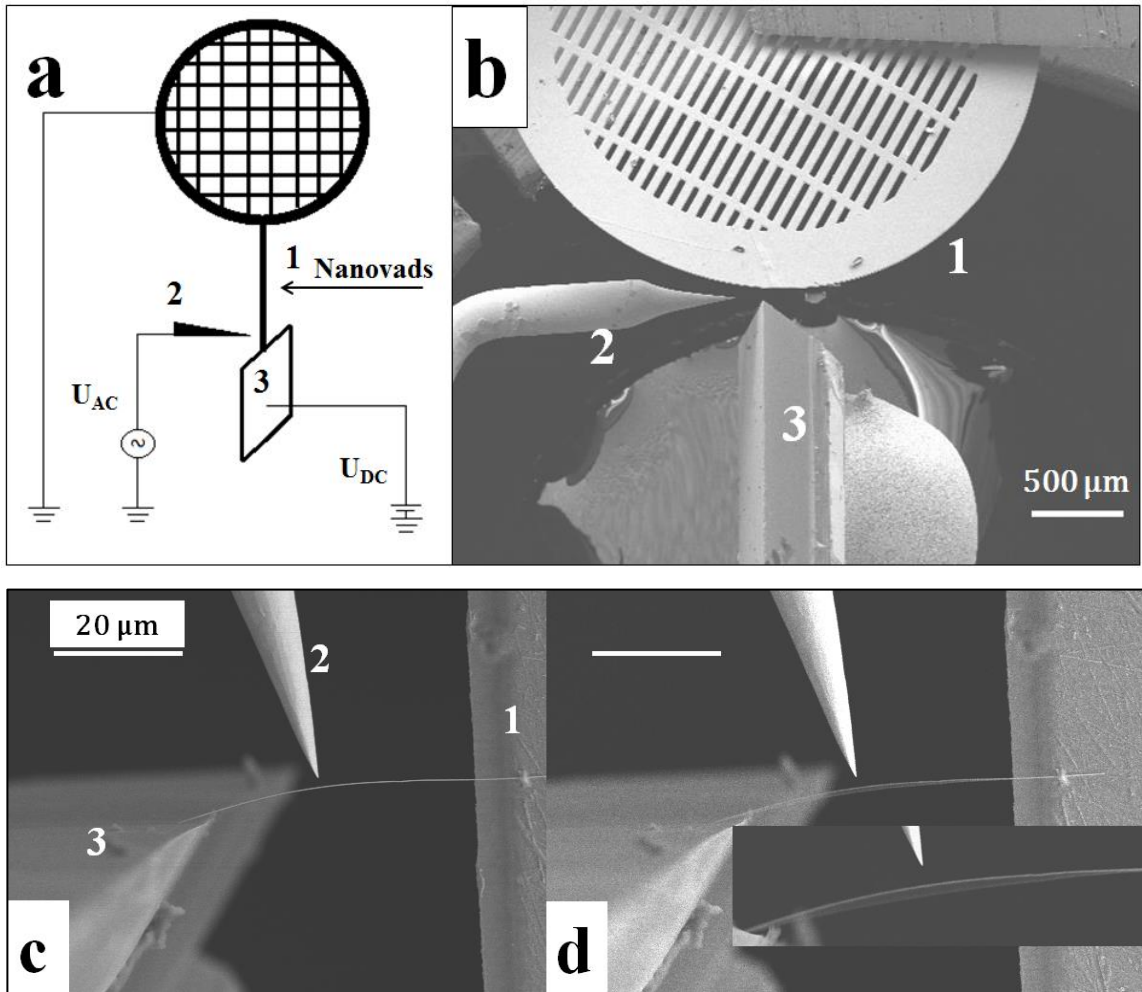
Starp elektrodu nr. 2 un iezemētiem elektrodiem nr. 1 un nr. 3 tika izvērsts signālu ģenerators maiņspriegums tajā frekvenču reģionā, kas atbilst abos galos nostiprināta nanovada svārstībām, svārstības reģistrētas SEM TV režīmā līdzīgi kā viena nostiprināta gala gadījumā.

Starp elektrodu nr. 3 un aktīvā elementa elektrodu nr. 1 tika izvērsts līdzspriegums, palielinot sprieguma vērtību no 0 V līdz noteiktai vērtībai  $U'$  V un atpakaļ ar definētu soli. Pēc līdzsprieguma izvērses tika atkārtota rezonanses frekvences noteikšana.

Cikls, kas sastāv no līdzsprieguma un tam sekojošas maiņsprieguma izvērses starp attiecīgajiem elektrodiem, tika atkārtots, pakāpeniski palielinot spriegumu  $U'$  līdz maksimālajai vērtībai. Lai izvairītos no bojājumiem aktīvajā elementā, par maksimālo sprieguma vērtību tika pieņemti 30 V vai arī tāda, pie kuras sasniegts 10 nA strāvas ierobežojums [12, 46, 57].

Keithley 6430 tika izmantots gan strāvas mērīšanai, gan kā līdzsprieguma avots. Papildus ar Keithley 6487 tika uzlikts līdzspriegums starp ierosinošo elektrodu un paraugu, lai palielinātu svārstību amplitūdu un uzlabotu detektēšanas precizitāti. Elektroda – nanovada kontakta laukuma noteikšanai SEM attēli tika uzņemti eksperimenta beigās, lai izvairītos no *in situ* SEM novērotās elektronu stara inducēta organiskā materiāla nogulsnešanās uz kontaktvirsmas, kas arī palielina adhēziju.

Lai noņemtu Ge nanovadus klājošo amorfā oksīda slāni, nanovadi tika pakāpeniski kodināti ar argona joniem kodināšanas iekārtā Gatan 682 PECS.



2.5. att. a) Shēma NEM slēdža kontakta īpašību izpētei: 1 – TEM sietiņš, uz kura atrodas piestiprinātie nanovadi, 2 – zelta elektrods svārstību ierosināšanai aktīvajā elementā, 3 – plakans slēdža elektrods, b) eksperimenta SEM attēls. c) NEM slēdzis ieslēgtā stāvoklī, d) abos galos nostiprināta aktīvā elementa rezonanses svārstības. Iespraudumā – nanovada rezonanses svārstību attēls, izmantojot lielāku palielinājumu

### 3. REZULTĀTI

#### 3.1. Junga moduļa noteikšana nanovadiem

Nanovadu Junga modulis tika noteikts, izmantojot atšķirīgas *in situ* metodes, lai pārbaudītu to pielietošanas efektivitāti dažādu materiālu ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ , BeO, Ge) mehānisko īpašību pētījumiem nanovadiem plašā izmēru diapazonā (šķērsriezuma laukums no  $7.1 \cdot 10^2 \text{ nm}^2$  līdz pat  $7.8 \cdot 10^4 \text{ nm}^2$ , garums no 3,1  $\mu\text{m}$  līdz 136  $\mu\text{m}$ ).

#### Junga moduļa noteikšana ar elektriski ierosinātas mehāniskās rezonanses metodi

Elektriski ierosinātās mehāniskās rezonanses metode ir tikusi plaši pielietota nanovadu elastīgo īpašību pētīšanā [59, 60, 64]. Nanovads tika raksturots kā vienā galā nostiprināts stienis, izmantojot dinamisko Eilera-Bernulli vienādojumu rezonanses frekvencei [58]

$$f_n = \frac{\beta_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}, \quad (3)$$

kur  $f_n$  – svārstību frekvence n-tajai svārstību modai, L – nanovada garums, E – Junga modulis, I – laukuma inerces moments,  $\rho$  – blīvums un A – laukums. I ir atkarīgs no nanovadu šķērsriezuma laukuma, atbilstoši formulām

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \text{ – nanovadiem ar apaļu šķērsriezuma laukumu,} \quad (4)$$

$$I_x = \frac{ab^3}{12} \text{ un } I_y = \frac{b^3a}{12} \text{ – nanovadiem ar taisnstūra šķērsriezuma laukumu,} \quad (5)$$

kur d – nanovada diametrs, a un b – taisnstūra malu garumi.

$\beta_n$  ir no raksturīgā vienādojuma

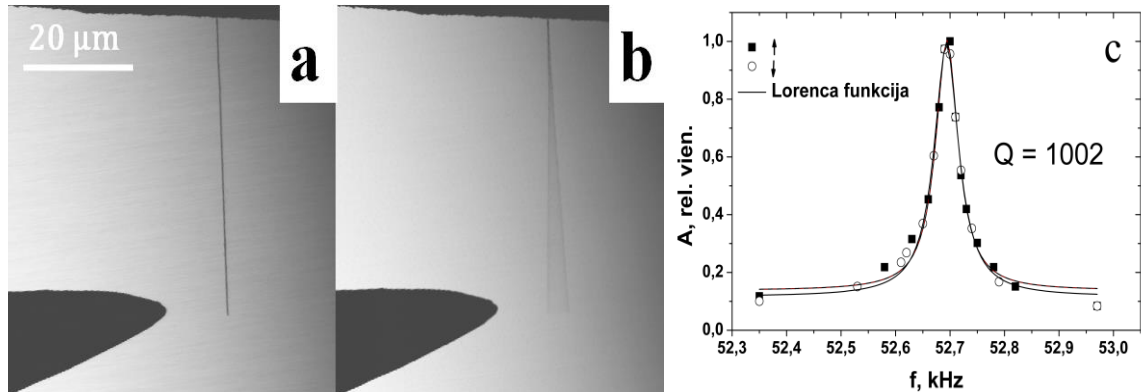
$$\cos\beta_n \cosh\beta_n + 1 = 0 \quad (6)$$

iegūtā īpašvērtība, kas atkarīga no robežnosacījumiem un svārstību modas - fundamentālajai svārstību modai  $\beta_0 = 1.875$  Pie pamatnes piestiprinātajā nanovada galā tika piemēroti robežnosacījumi

$$y(x)|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{dy(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad (7)$$

kur  $y(x)$  – nanovada pārvietojums atkarībā no koordinātes x uz nanovada ass, kur  $x = 0$  atbilst stiprinājuma punktam.

Nanovada rezonanses svārstības un svārstību amplitūdas atkarība no frekvences pirmajai svārstību modai parādīti 3.1. att. Jau iepriekš tika noteikts, ka  $Sb_2S_3$  nanovadiem ar atšķirīgu šķērsriezuma malu garumu var novērot 2 fundamentālās rezonanses frekvences ar svārstībām savstarpēji perpendikulāros virzienos. Tika aprēķināts, ka eksperimentāli noteiktā malu garumu attiecība kļūdu robežās sakrīt ar rezonanses frekvenču attiecību [52].



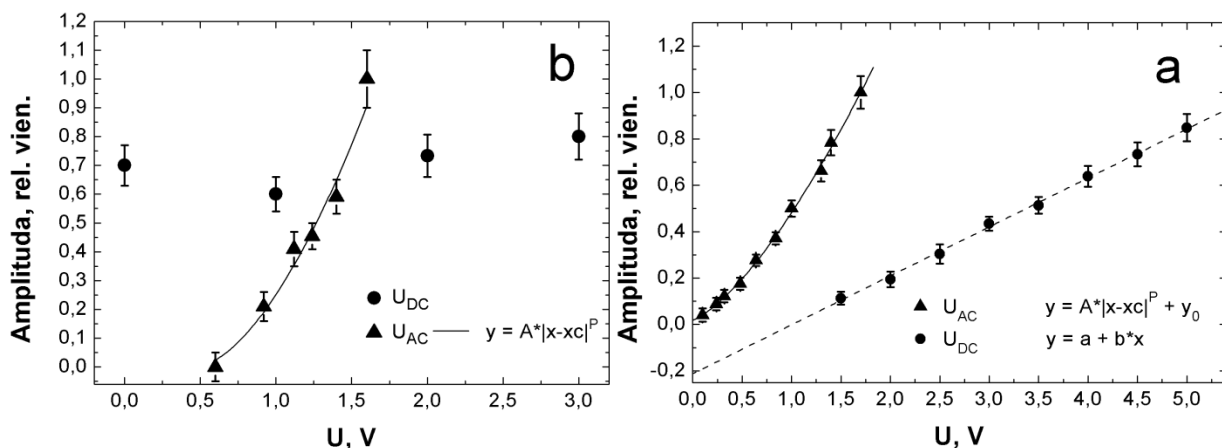
3.1. att. SEM attēli nanovadu rezonanses frekvences noteikšanai, kur ierosinošā lauka svārstību frekvence neatbilst (a) nanovada pašsvārstību frekvencei un (b) - sakrīt ar nanovada pašsvārstību frekvenci. c) Svārstību spektra aproksimācija ar Lorencas funkciju  $Q$  noteikšanai. Kvadrāti apzīmē amplitūdas vērtības, kas iegūtas, frekvenci izvēršot augošā virzienā, apli – dilstošā virzienā

Kā ierosinošo spēku lietojot laikā mainīgu elektrisko lauku ar leņķisko svārstību frekvenci  $\omega$ , nanovada pirmās kārtas rezonansi var novērot ne tikai pie frekvences  $\omega_0$ , kas atbilst nanovada pašsvārstību frekvencei, bet arī pie  $\omega_0/2$ . Pie tam abu ierosinošo frekvenču izraisīto svārstību amplitūdas mainās atbilstoši pieliktā spēka  $F$  izteiksmei

$$F = B(Q_0 + \alpha U_{AC} \cos \omega t)^2 = (BQ_0^2 + 0.5\alpha^2 B^2 U_{AC}^2) + 2\alpha BQ_0 U_{AC} \cos \omega t + 0.5\alpha^2 B U_{AC}^2 \cos 2\omega t, \quad (8)$$

kur  $B$  – proporcionalitātes konstante,  $Q_0$  – lādiņš uz nanovada gala, kas līdzsvaro elektroda materiāla (šajā darbā – Au) un nanovada materiāla atšķirīgās izejas darba funkciju vērtības,  $\alpha$  – no ģeometrijas atkarīgs reizinātājs,  $U_{AC}$  – pieliktā sprieguma amplitūda,  $t$  – laiks [59]. Lai pārliedzinātos, ka noteikta patiesā rezonanses frekvence, tika nomērīta svārstību amplitūdas atkarība no ierosinošā spēka komponentu amplitūdām pie  $\omega_0$  un  $\omega_0/2$  (3.2. att.). Tika secināts, ka eksperimentālos datus pie  $\omega_0$  vislabāk apraksta aproksimācija ar lineāru funkciju gadījumā, kad svārstību amplitūda tiek variēta, izmantojot  $U_{DC}$ , savukārt atkarību no  $U_{AC}$  var raksturot ar

pakāpes funkciju ar rādītāju 1,47. Pie  $\omega_0/2$  amplitūdas atkarību no sprieguma  $U_{AC}$  aproksimācijā iegūts pakāpes funkcijas rādītājs 2,37, savukārt atkarība no  $U_{DC}$  netika novērota.



3.2. att. Aktīvā elementa rezonanses svārstību amplitūdas atkarība no pieliktā maiņsprieguma signāla (triņģstūri) un līdzsprieguma (apļi) amplitūdas pie ierosinošā lauka frekvences a)  $\omega_0$  un b)  $\omega_0/2$

Tika noteikts arī rezonatora labums  $Q$ , kas raksturo pilnās uzkrātās enerģijas un vienā periodā izkliedētās enerģijas attiecību (reizinātu ar  $2\pi$ ). Nosakot  $Q$ , ierosinošā lauka frekvence tika izvērsta pieaugošā un dilstošā virzienā, lai iegūtu paplašinātu un sašaurinātu svārstību kontūra platumu (att. 3.1. c), no kurienes aprēķināta vidējā  $Q$  vērtība. Aproksimējot svārstību amplitūdas atkarību no frekvences augošā virzienā ar Lorenca funkciju, tika iegūts  $Q=957$ , dilstošā virzienā –  $Q=1047$ . Šādā veidā iespējams iegūt precīzāku rezultātu, jo tiek izslēgts masas palielināšanās izraisītais frekvences pieaugums, ko izraisa nevēlama oglekļa savienojumu nogulsnešanās uz nanovada elektronu stara ietekmē.

Jāņem vērā, ka gaisā notiek nanovadu virsmas oksidēšanās, kuras rezultātā ap monokristālisko nanovadu izveidojas plāns oksīda slānītis. Tā ieguldījums ar rezonanses metodi noteiktajā Junga moduļa vērtībā ir atkarīgs no slānīša biezuma, elastīgajām īpašībām un blīvuma. Tāpēc eksperimentos, kuros izmantoti nekodināti nanovadi,  $E$  noteikts, izmantojot formulu [60]

$$E = \frac{1}{\gamma^2} \left( 1 + \frac{\rho_o}{\rho} \left( \frac{1}{\gamma^2} - 1 \right) \right) E' + E_o \left( 1 - \frac{1}{\gamma^4} \right), \quad (9)$$

kur  $E' = \frac{4\pi^2 \rho A L^4}{\beta^4 I} f^2$  – no eksperimentāli noteiktās frekvences aprēķinātā vērtība, pieņemot, ka nanovads ir viendabīgs bez oksīda slāņa.  $\gamma = (d - 2t)/d$ , kur  $d$  – nanovada diametrs,  $t$  – oksīda slāņa biezums,  $\rho$  – nanovada materiāla blīvums,  $\rho_o$  – oksīda blīvums,  $E_o$  – oksīda Junga modulis.

Tā kā literatūrā netika atrasta informācija par  $Sb_2S_3$  un  $BeO$  nanovadu amorfā slānīša ķīmisko sastāvu un mehāniskajām īpašībām, oksīda slāņa ietekme ņemta vērā tikai  $Ge$

nanovadiem. Aprēķinos pieņemts, ka nanovadus klāj tikai  $\text{GeO}_2$  ( $\rho_o = 3,629 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $E_o = 4,33 \text{ GPa}$  [61]), un slāņa biezums ir aptuveni 3 nm. Eksperimentos izmantotajiem individuāliem Ge nanovadiem no uzņemtajiem TEM attēliem noteiktais oksīda slāņa biezums bija 2-4 nm. Pie tam literatūrā 3-4 nm norādīts kā maksimālais Ge slāņa biezums, pēc kura sasniegšanas, turpmāka oksidēšanās netiek novērota [46, 54]. No formulas (9) redzams, ka nanovadus klājošais oksīds ietekmē noteiktās Junga moduļa vērtības īpaši mazāka diametra nanovadiem (lielākām parametra  $\gamma$  vērtībām). Ge nanovadam ar diametru 68 nm ( $\gamma \approx 0.91$ ), E vērtība ar oksīda slāņa ietekmi noteikta 139 GPa, kas ir par 35 % lielāka nekā aplūkojot viendabīgu materiālu (103 GPa).

Kopumā Junga modulis tika noteikts 21  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ , 5 BeO un 3 Ge nanovadiem, izmantojot rezonanses metodi. 3.1. tabulā apkopotas  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ , Ge un BeO nanovadiem noteiktās Junga moduļa vidējās un atbilstošās makroskopiskā kristāla vērtības (ja tās bija pieejamas).

### 3.1. tabula

**$\text{Sb}_2\text{S}_3$ , Ge un BeO nanovadu ar mehāniskās rezonanses metodi noteiktās Junga moduļa E vērtības, makroskopiska kristāla Junga modulis  $E_{\text{makro}}$ , nanovada šķērsriezuma laukums A, cilindrisku nanovadu diametrs d ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$  norādīta tikai A vērtība atšķirīgo šķērsriezuma formu dēļ), rezonatora labums Q. Ge nanovadiem iekavās norādīta E vērtība, kas iegūta, neņemot vērā oksīda slāņa ietekmi. Sniegts arī salīdzinājums ar literatūru nanovadiem, kuriem atbilstošie dati ir publicēti**

	d, nm	$A \cdot 10^4, \text{ nm}^2$	E, GPa	$E_{\text{makro}}, \text{ GPa}$	E, GPa (literatūrā)	Q
Ge	68-246	0,36 - 4,75	$135 \pm 40$ ( $115 \pm 29$ )	$\sim 103-155$ <sup>[62]</sup>	$112 \pm 43$ [47]	600-1002
$\text{Sb}_2\text{S}_3$	Skatīt A	1,1- 7,8	$36 \pm 9$	$\sim 34$ *	-	200-450
BeO	30-108	0,07-0,92	$97 \pm 24$	$\sim 370-419$ <sup>[63]</sup>	-	830

\*Tā kā literatūrā netika atrasta makroskopiska kristāliska  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  E vērtība, tabulā sniegta elastības konstante kristāla c-ass virzienā, kas uzskatāma tikai par orientējošu

Rezultāti parāda, ka ar rezonanses metodi noteiktā E vērtība Ge nanovadiem ir tuva makroskopiska kristāla Junga modulim. Literatūrā netika atrasta monokristāliska  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  E vērtība, tāpēc veikts salīdzinājums ar  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  kristāla elastības konstantes vērtību c-ass virzienā - 33,8 GPa, ko var orientējoši salīdzināt ar Junga moduli attiecīgajā virzienā. Konstantes vērtība aprēķināta, izmantojot skaņas izplatīšanās ātrumu gar attiecīgo kristalogrāfisko virzienu ( $2.71 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$  [20]). Savukārt BeO nanovadiem eksperimentāli noteiktā Junga moduļa vērtība ir gandrīz 4 reizes mazāka nekā makroskopiskam BeO kristālam.

Tālāki ķīmiskā sastāva un nanovadu struktūras pētījumi nepieciešami, lai izskaidrotu kraso atšķirību BeO gadījumā. Tika uzņemti TEM attēli, no kuriem secināts, ka nanovadi ir monokristāliski, bet bez viena definēta kristalogrāfiskā augšanas virziena. Lielākajai daļai nanovadu konstatēta monokristāliska struktūra ar amorfu apvalku, pie tam vidējā parametra  $\gamma$  vērtība, kas raksturo amorfā slāņa biezuma un nanovada diametra attiecību, ir 0.80. Iespējams, ka ar to var skaidrot nesakritību ar makroskopiska kristāla E, tomēr pagaidām trūkst informācijas par amorfā slāņa blīvumu un Junga moduli, lai pārlicinātos par tā ietekmi uz noteiktajām E vērtībām.

Junga moduļa kļūdas aprēķinātas, ņemot vērā no SEM attēliem noteikto garuma, diametra (vai malu garumu) kļūdas pikseļos, kā arī rezonanses frekvences noteikšanas kļūdas. Jāņem vērā, ka bez jau aplūkotā amorfā slāņa ietekmes, rezultātu izklaidē ieguldījumu dod arī robežnosacījumu nenoteiktība, nanovada liekums un papildus masa uz nanovada.

Literatūrā minēts, ka nostiprināta gala robežnosacījuma nenoteiktības rezultātā rezonanses metodē var rasties līdz 30% liela kļūda Junga moduļa noteikšanā, stiprinājuma defektu gadījumā sasniedzot pat 70% [64]. Precizitātes palielināšanai literatūrā aprakstīta eksperimentāla *in situ* metode, kur tiek izmantots papildus balsta elektrods, kas tiek pārvietots pa nanovada garumu, nosakot rezonanses frekvenci brīvajai nanovada daļai [65], līdzīgi kā spēlējot ģitāru. Šādā veidā iespējams efektīvi atbrīvoties no stiprinājuma punkta nenoteiktības radītajām kļūdām. Tomēr metodes pielietošana ir sarežģīta īpaši BeO nanovadiem (un citiem vāji vadošiem nanovadiem), kam tika konstatēta atgrūšanās no atbalsta elektroda lādiņa uzkrāšanās rezultātā. Pie tam īsu nanovadu gadījumā, lietojot balsta elektrodu, rezonanses svārstībām ir pārāk maza amplitūda, lai tās varētu novērot vizuāli SEM. Tāpēc kā piemērotākā metode, kas nodrošina nostiprināta robežnosacījuma izpildīšanos, šajā darbā tika izmantoti katram nanovada diametram piemērota platuma un garuma Pt stiprinājumi kā aprakstīts [55].

Svārstību labums  $Q \propto \frac{1}{W}$ , kur  $W$  – izklaidētā enerģija vienā svārstību ciklā. Enerģija var tikt izklaidēta caur stiprināšanas punktu, viskozās slāpēšanas, termoelastisko zudumu un virsmas zudumu rezultātā. Viskoza slāpēšanu var neņemt vērā, jo SEM paraugu nodalījumā spiediens ir aptuveni  $7 \cdot 10^{-4}$  Pa. Zemākās  $Q$  vērtības atbilst nanovadiem, kas pie pamatnes piestiprināti ar vadošo epoksīdu, augstākās – ar Pt EBD stiprinājumu. Salīdzinot, piemēram, ar Si rezonatoriem [66], Ge  $Q$  vērtības ir par 1 līdz pat 2 kārtām zemākas. To apstiprina arī literatūras dati ( $Q \approx 100-600$ ), kur  $Q$  noteikts ar izoprēna slāni ķīmiski pasivētiem monokristāliskiem Ge nanovadiem ar tādu pašu stiprinājumu, pie tam novērojot  $Q$  samazināšanos līdz ar nanovadu diametru [67].

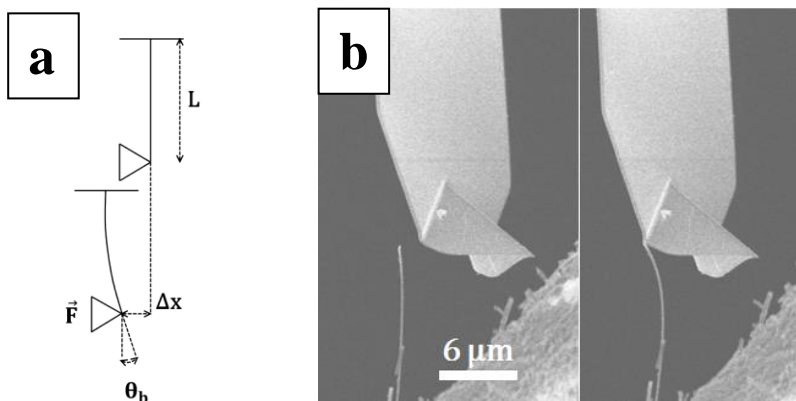
Lai pārbaudītu ar rezonanses metodi iegūtos rezultātus, Junga modulis tika noteikts vēl ar divām metodēm – statiskās lieces un spiedes deformāciju, izmantojot cilindriskas formas  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadus.  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadi izvēlēti, jo Ge nanovadiem literatūrā ir pieejami dati par Junga moduli, deformējot liecē [47].

### Lieces deformācijas metode

Lai pārbaudītu iegūtos rezultātus, Junga modulis 6 ar rezonanses metodi raksturotajiem  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadiem (no izšķīdinātas AAO matricas) tika noteikts arī ar *in situ* SEM lieces deformācijas metodi. Metode balstās uz nanovada nolieci, kad tam tiek pielikts spēks nanovada asij perpendikulārā virzienā. Nanovads un AFM kronšteins (atspere) tika novietoti vienā plaknē perpendikulāri skenējošā elektronu stara virzienam, lai varētu mērīt reālo pārvietojumu, nevis tā projekciju. Junga moduļa noteikšanai tika uzņemti 2 SEM attēli – viens ar nanovadu līdzsvara stāvoklī, otrs – deformētā stāvoklī (3.3. b att.). No attēliem tika noteikti AFM atsperes gala pārvietojums  $\Delta x$  un  $\theta_B$  - nanovada nolieces leņķis slodzes pielikšanas punktā. Nolieces leņķa izmantošana ļāva saglabāt vienu un to pašu relatīvi augstu SEM palielinājumu eksperimenta gaitā, kas samazināja leņķa un pārvietojuma noteikšanas kļūdas. Junga modulis  $E$  tika aprēķināts, izmantojot statiskās lieces vienādojumu vienā galā nostiprinātam stienim

$$E = FL^2/2I\left(\frac{dy}{dx}\right) \approx FL^2/2I\theta_B \text{ (maziem nolieces leņķiem)}, \quad (10)$$

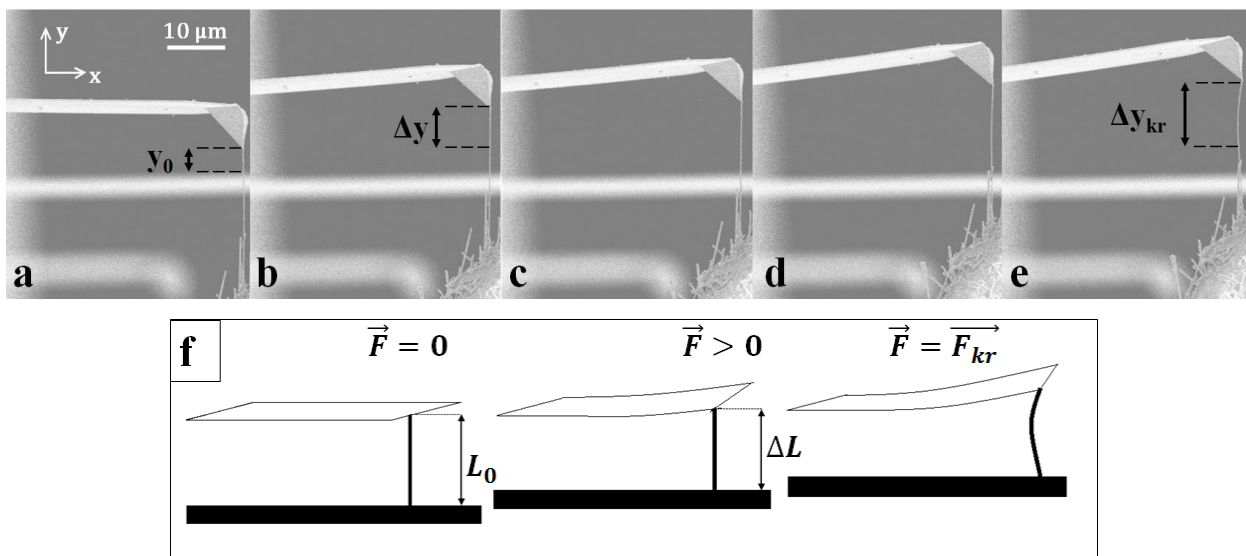
kur  $L$  – nanovada garums,  $I$  – nanovada laukuma inerces moments. Pieliktais spēks  $F$  aprēķināts, izmantojot kalibrācijā noteikto atsperes stinguma koeficientu  $k$  un nomērīto pārvietojumu  $\Delta x$  pēc formulas  $F = k\Delta x$ . Spēks  $F$  tika pielikts atšķirīgās vertikālās pozīcijās pa nanovada asi, konstatējot homogēnas elastīgās īpašības nanovada garenvirzienā. Eksperimenta shēma parādīta 3.3. att.



3.3. att. a) Statiskās lieces eksperimenta shēma. SEM attēli: b) atsevišķs nanovads bez pielikta spēka un c) brīdī, kad uz to darbojas perpendikulāri vērsts spēks

## Spiedes deformācijas metode

Izmantojot AFM atsperi, nanovadu iespējams pakļaut arī spiedes deformācijai, pieliekot spēku aksiālā virzienā. 2 Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> nanovadiem Junga modulis tika noteikts, novērtējot ar AFM atsperi pieliktā kritiskā spēka vērtību spiedes sloģojuma eksperimentā. Spiedes eksperimenta shēma un atbilstošais *in situ* eksperiments redzams 3.4. att. Līdzīgi kā lieces deformācijā, pieliktais spēks tika aprēķināts, reģistrējot atsperes nolieci *y* ass virzienā. Nekustīgs fona elements, kas atrodas ārpus fokusa un nav piestiprināts atsperai, tika izmantots kā atskaites punkts.



3.4. att. a-e) Spiedes eksperimenta SEM attēli: nanovada Junga moduļa noteikšana, izmantojot kritisko slodzi, pie kuras notiek nanovada ļozdes deformācija. Nanovads tiek vienmērīgi pārvietots *y* ass virzienā perpendikulāri AFM atsperai. Pēc fonā esošā elementa iespējams precīzi noteikt atsperes pārvietoĶumu. f) Eksperimenta shēma

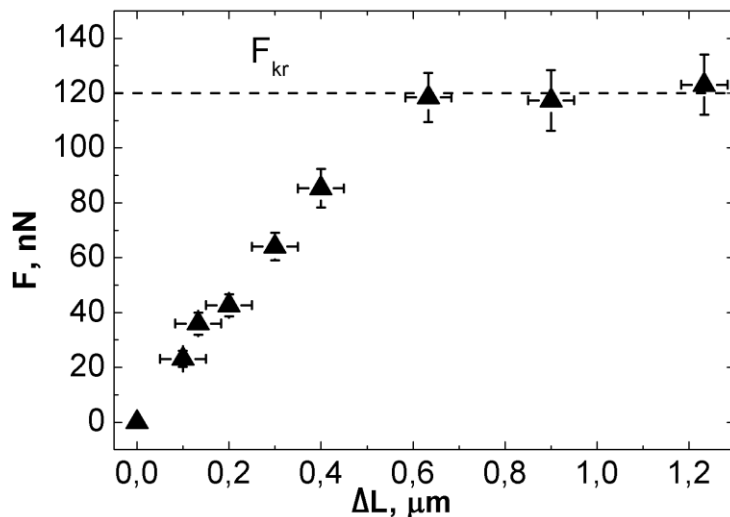
Lai noteiktu Junga moduli, tika izmantota minimālā kritiskā spēka  $F_{kr}$  izteiksme saskaņā ar Eilera teoriju

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}, \quad (11)$$

kur  $I$  – šķērsĶriezuma laukuma minimālais inerces moments,  $L$  – nanovada Ķarums,  $K$  – Ķaruma redukcijas koeficients, kas atkarīĶs no nanovada stiprināšanas veida. Tika pieņemts, ka pie substrāta piestiprinātais nanovada Ķals ir nekustīĶi nostiprināts, bet otrs – locīkļa (šarnīrs). Šiem robeĶnosacīĶumiem atbilst  $K \approx 0,7$ .

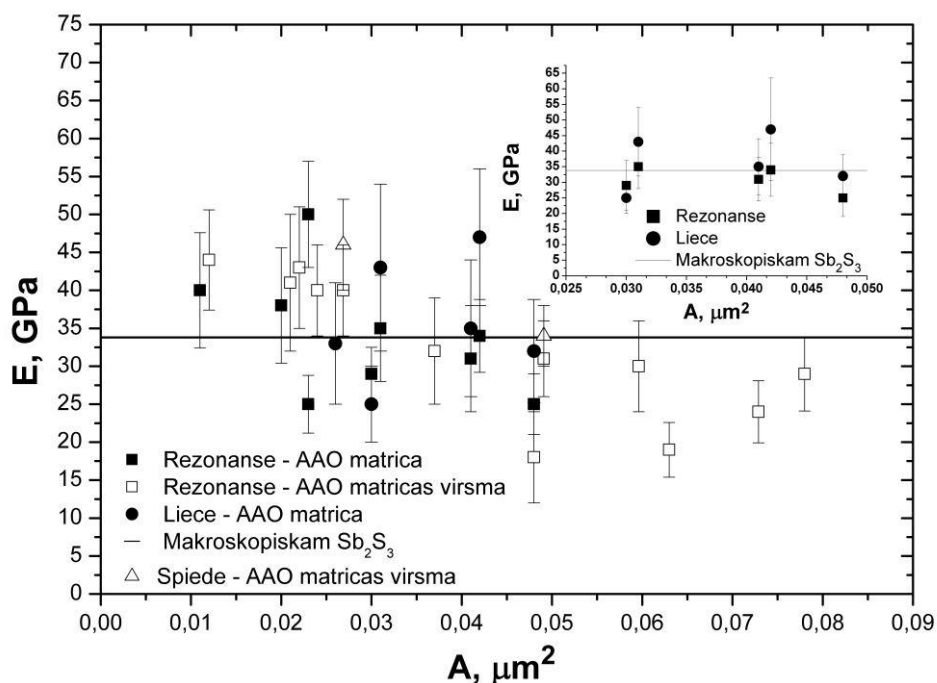
Pakāpeniski palielinot nanovadam pielikto spēku, tika sasnieĶta robeĶvērtība  $F_{kr}$ , pie kuras tas zaudē stabilo līdzsvaru un izliecas. 3.5. att. parādīta pieliktā spēka atkarība no attāĶuma

starp abiem nanovada galiem  $\Delta L$  deformācijas gaitā. Redzams, ka pie nelielām  $\Delta L$  vērtībām strauji palielinās un, sasniedzot kritisko vērtību, pie kuras notiek lodzes deformācija, tas gandrīz vairs nepieaug. Attēlotajā eksperimentā  $F_{kr}$  sasniedza 120 nN. Noņemot spēku, nanovads atgriezās sākotnējā stāvoklī - netika konstatēta paliekoša plastiskā deformācija.



3.5. att. Pieliktais spēks atkarībā no attāluma starp nanovada galiem spiedes deformācijas gaitā

3.6. att. apkopotas ar mehāniskās rezonanses, lieces un spiedes deformācijas metodēm noteiktās  $E$  vērtības no AAO matricu virsmas un izšķīdinātām AAO matricām iegūtiem  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadiem atkarībā no to šķērsriezuma laukuma. Nanovadu šķērsriezuma laukums bija robežās no  $1,1 \cdot 10^4 \text{ nm}^2$  līdz  $7,8 \cdot 10^4 \text{ nm}^2$ . Nanovadu garums noteikts robežās no 6,6 līdz 30  $\mu\text{m}$ .  $E$  vērtības atrodas robežās no 18-50 GPa un ir izklaidētas ap makroskopiska  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  kristāla elastības konstantes vērtību  $c$ -ass virzienā - 33,8 GPa, ko var orientējoši salīdzināt ar Junga moduli attiecīgajā virzienā. Dažādos apstākļos augušo  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadu tuvās  $E$  vērtības liecina par sintēzes vienmērīgu kvalitāti, arī atšķirīgu sintēzes metožu rezultātā tiek iegūti nanovadi ar līdzīgām mehāniskajām īpašībām. Redzams, ka  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadiem novērojama tendence Junga moduļa vērtībai palielināties līdz ar šķērsriezuma laukuma samazināšanos, tomēr tā nav izteikta.



3.6. att.  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadu Junga moduļa  $E$  atkarība no šķērsriezuma laukuma  $A$ . Atspoguļoti ar 3 dažādām metodēm iegūti rezultāti – mehānisko rezonansi (kvadrāti), statisko lieci (apļi) un spiedes deformāciju (trijstūri). Tukšie datu punktu marķieri apzīmē nanovadus, kas iegūti no AAO matricu virsmas, pildītie – no šķīdinātām AAO matricām. Nepārtrauktā līnija atbilst makroskopiska  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  kristāla elastības konstantei  $c$ -ass virzienā. Iespraudumā parādītas  $E$  vērtības 5 nanovadiem, kas noteiktas gan ar lieces, gan mehāniskās rezonanses metodi

Var secināt, ka ar mehāniskās rezonanses, spiedes un lieces deformācijas metodēm iegūtie rezultāti kļūdu robežās sakrīt aplūkotajā šķērsriezuma laukuma vērtību apgabalā. Literatūrā minēts, ka atšķirīgos veidos (spiedē un stiepē) deformējot ZnO nanovadus ar 20 nm diametru, spiedē iegūtas lielākas  $E$  vērtības (200 GPa) nekā stiepē (170 GPa) [68]. Autori šo efektu skaidro ar virsmas (pretstatā tilpuma) elastības ietekmi, jo spiedē nanovadu virsma tiek pakļauta lielākiem spriegumiem un deformācijām, salīdzinājumā ar stiepi, kur spriegums ir vienmērīgi sadalīts pa šķērsriezuma laukumu. Jāņem vērā, ka šajā darbā visās aplūkotajās metodēs nanovadi tiek pakļauti līdzīgiem uz lieci balstītiem deformāciju mehānismiem.

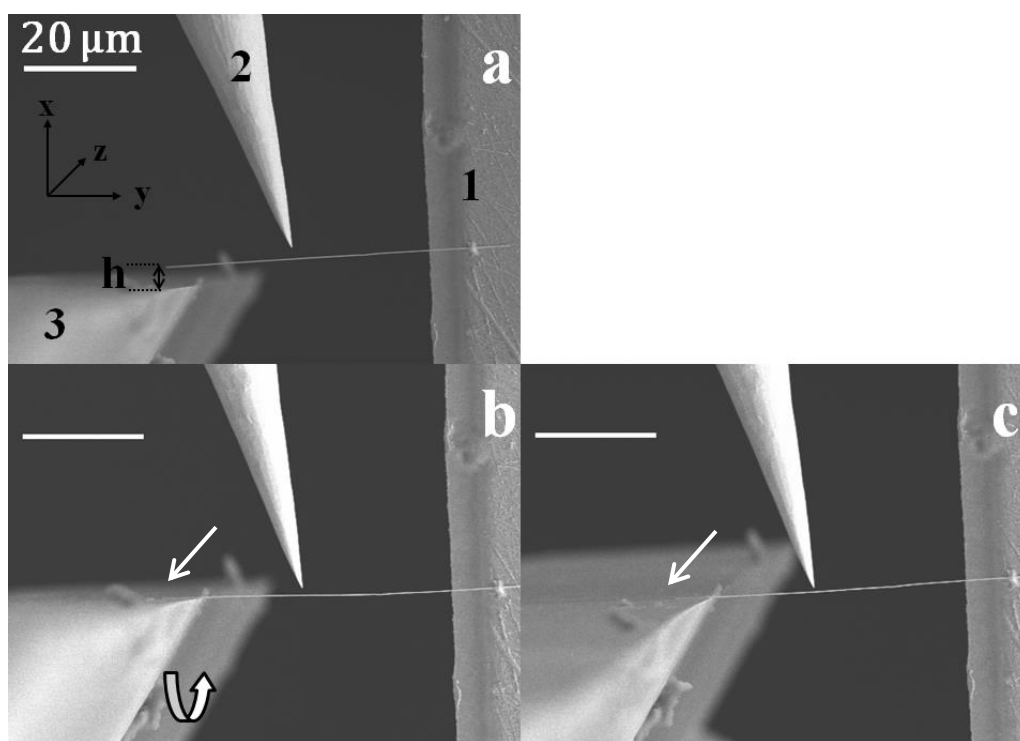
Salīdzinājumā ar rezonanses metodi, lieces un spiedes deformācijās praktiskas grūtības rada slīdēšana kontaktā un atbilstošu robežnosacījumu piemērošana nanovada galam, kuram pielikts spēks. Slīdēšanu kontaktā *in situ* SEM var samazināt, apstarojot kontaktvietu ar elektronu staru, kā rezultātā uz tās notiek ogļūdeņražu nogulsnešanās un lokāla stiprināšanās. Tomēr šādā gadījumā jāreķinās ar nogulsnētā materiāla elastību (ogļūdeņražu stiprinājuma Junga modulis

aptuveni 40 GPa [60]) un iespējamo pētāmā materiāla piesārņojumu. Praksē lieces un spiedes metodēs jāņem vērā arī AFM atsperes stinguma koeficienta piemeklēšana, lai varētu novērot samērojamas atsperes un nanovada deformācijas. Līdz ar to nanovadiem, kuru mehāniskās īpašības iepriekš nav raksturotas, visvienkāršāk pielietojama ir rezonanses metode. Tā kā rezonanses metode ir ļoti jutīga uz masas izmaiņām visā nanostrukturā kopumā, tā ir īpaši piemērota, raksturojot nanovadus kā aktīvos elementus elektromehāniskos pielietojumos.

Visi darbā pētītie nanovadi varētu tikt izmantoti kā aktīvie elementi NEM slēdžos, jo, neskatoties uz makroskopiska BeO dielektriķa dabu, ar aprakstīto metodi sintezētie monokristāliskie nanovadi uzrādīja vadāmību ar īpatnējo pretestību 10-20  $\Omega \cdot m$ . Darba nākamajā daļā kā slēdžu aktīvie elementi tiks aplūkoti Ge nanovadi, turpinot šajā jomā veiktos pētījumus [12,46] un ar mērķi papildināt izpratni par Ge oksīda ietekmi uz slēdža kontakta īpašībām. Saskaņā ar Starptautiskajām pusvadītāju tehnoloģiju vadlīnijām (International Technology Roadmap for Semiconductors 2013 [70]), nanokontaktu īpašību izpēte ir viena no aktuālajām jomām metālu-oksīdu pusvadītāju ierīču attīstībā.

### 3.1. NEM slēdža kontakta īpašības

Izmantojot Ge nanovadus kā aktīvos NEM slēdža elementus, tika izveidota 2 terminālu slēdža konfigurācija kā pretējo elektrodu izmantojot ar zelta kārtiņu klātu plāksni. Kā minēts darba ievada daļā, būtisks slēdžu darbību raksturojošs parametrs ir aktivizācijas spriegums  $U_{ON}$ , pie kura aktīvais elements ielec kontaktā.  $U_{ON}$  tika noteikts pie dažādiem NEM slēdža aktīvā elementa-elektroda savstarpējiem attālumiem  $h$ . Lai precīzi noteiktu  $h$  un, nemainot konfigurāciju, novērotu kontaktvietu, tika izmantota SEM galdiņa leņķa regulēšanas funkcija (*Tilt*) (3.7. att.).

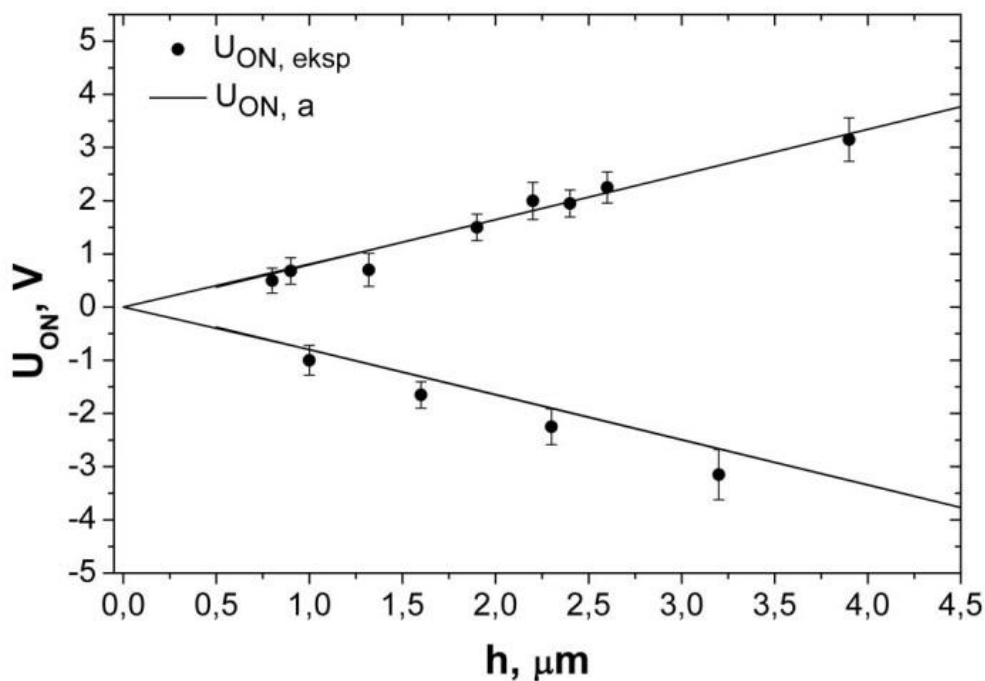


3.7. att. a) Elektroda plāksnes virsma (3) novietota paralēli SEM elektronu stara krišanas virzienam (plāksnes virsma turpinās dziļumā). Aktīvais elements atrodas attālumā  $h$  no plāksnes virsmas. b) Aktīvais elements kontaktā ar plāksni. Rotējot SEM manipulatora turētāja galdiņu, tiek novērota kontaktvieta (c). Bultiņa norāda nanovada gala atrašanās vietu

3.7. att. parādīti iegūtie eksperimentālie rezultāti nanovadam ar garumu 18,9 μm, diametru 68 nm un ar rezonanses metodi noteikto Junga moduli 139 GPa. Nomērītā  $U_{ON}$  atkarība no  $h$  salīdzināta ar analītisko aprēķinu rezultātiem  $U_{ON,a}$ , izmantojot formulu MEMS slēdžiem [71]

$$U_{ON,a} = \sqrt{k(h - h_{eq}) \cdot \frac{2h_{eq}^2}{\left(1 + \frac{2h_{eq}}{\pi w}\right)wL\epsilon_0}}, \quad (12)$$

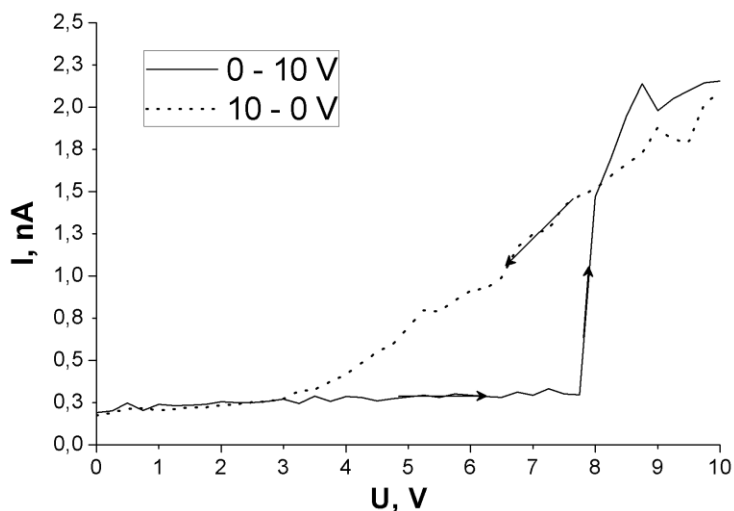
kur  $k = \frac{8EI}{L^3}$  – stinguma koeficients vienā gala nostiprinātam stienim,  $E$  – nanovada Junga modulis,  $I$  – nanovada laukuma inerces moments,  $h$  – sākotnējais attālums starp nanovada galu un elektroda plakni,  $w$  – aktīvā elementa platums,  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$  – vakuuma dielektriskā caurlaidība.  $h_{eq} \approx \frac{2}{3}h$  definēts kā attālums, pie kura notiek nanovada ielekšana kontaktā ar elektrodu. Saskaņā ar formulu (12) slēdzis tika modelēts kā šaurs atsperē iekārts stienis ar taisnstūra šķērsgriezumu, kura biezums atbilst nanovada diametram, savukārt platums  $w$  iegūts, pielīdzinot laukuma inerces momenta vērtību reālajai – cilindriskajai – ģeometrijai. Vienīgā brīvības pakāpe modelī ir attālums starp plāksni un aktīvā elementa galu. Izteiksme aktivizācijas spriegumam iegūta, atrisinot  $F_{elas} + F_{elek} = 0$ , kur  $F_{elas} = k \cdot h_{maks}$  – elastības spēks,  $F_{elek} = \frac{\epsilon_0 w L U_{ON}^2}{2h_{eq}^2} \left(1 + \frac{2h_{eq}}{\pi w}\right)$  – elektrostatisks spēks.



3.8. att. NEM slēdža ieslēgšanas sprieguma  $U_{ON}$  atkarība no aktīvā elementa un elektroda attāluma  $h$ . Aplī – eksperimentāli noteiktās vērtības, nepārtrauktās līnijas – ar analītisko formulu aprēķinātās vērtības gan pozitīvām, gan negatīvām sprieguma vērtībām

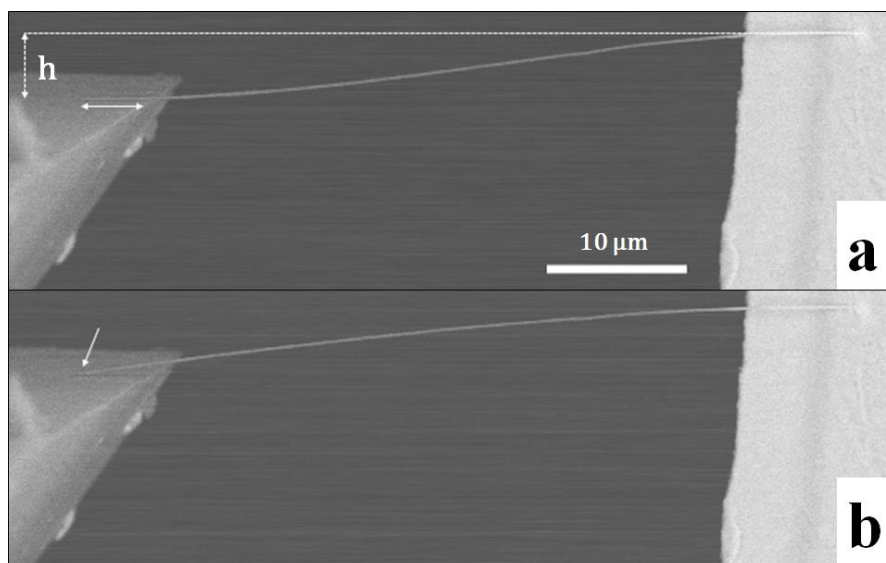
Att. 3.8. parādīts, ka aplūkotajā attālumu apgabalā (no 0,8  $\mu\text{m}$  līdz 4,6  $\mu\text{m}$ ) NEM slēdža ieslēgšanās sprieguma atkarību no attāluma var labi aprakstīt ar formulu, kas tiek lietota MEMS,

neņemot vērā van der Waalsa spēku ietekmi. Pie visiem aplūkotajiem h eksperimentāli tika novērota slēdžiem raksturīgā problēma – kontakta saglabāšanās arī pēc pieliktā sprieguma noņemšanas. Att. 3.9. redzama slēdža voltampēru raksturlīkne, kur pakāpeniski palielinot spriegumu  $U$  no 0 V līdz 10 V, reģistrēta ieslēgšanās pie aptuveni 8 V, kam raksturīgs straujš strāvas  $I$  kāpums līdz gandrīz 2,3 nA. Samazinot  $U$  līdz 0 V,  $I$  vērtības samazinās līdz trokšņa līmenim bez strauja lēciena, kas nozīmē, ka slēdzis ir palicis kontaktā arī pēc sprieguma noņemšanas.



**3.9. att. NEM slēdža voltampēru raksturlīkne gadījumā, kad adhēzijas spēki nanokontaktā liedz atgriezties izslēgtā stāvoklī. Bultiņas norāda sprieguma izmaiņas virzienu.**

Aplūkotajam attālumam apgabalā bija raksturīga nanovada „pielipšana” elektrodam, izveidojot kontaktu ar visu garuma daļu, kas atrodas virs elektroda (att. 3.10.). Šāds efekts NEM slēdžos ir nevēlams, jo lielāks kontakta laukums palielina adhēzijas spēku, kas traucē slēdzim atgriezties sākotnējā stāvoklī.



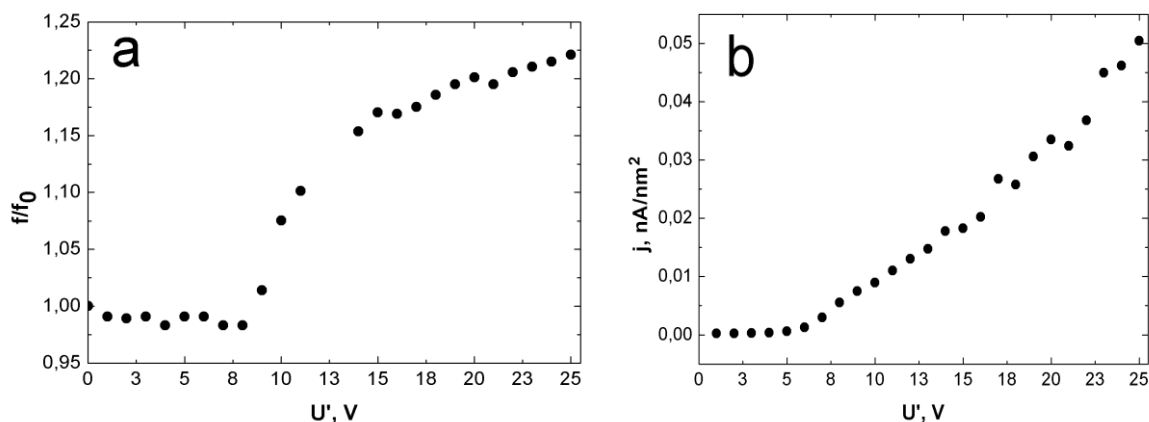
**3.10. att. Aktīvā elementa kontakta izveidošana ar elektrodu NEM slēdža ieslēgšanas brīdī (sākotnējais elektroda-nanovada savstarpējais attālums  $h = 4,1 \mu\text{m}$ ): a) ar visu nanovada garuma daļu, kas atrodas virs elektroda, b) vienā punktā, kas ievērojami samazina adhēzijas spēku. Bultiņa norāda kontakta apgabalu**

Viens no veidiem, kā risināt aprakstīto problēmu, būtu palielināt attālumu starp nanovadu un elektrodu, kas izraisītu nanovada elastības spēka pieaugšanu. Lielākiem attālumiem nepieciešami lielāki aktivizācijas spriegumi, kas savukārt ietekmē strāvas blīvumu nanokontaktā. Tāpēc nepieciešami pētījumi, lai raksturotu sprieguma ietekmi uz slēdža kontakta adhēziju. Adhēzijas raksturošana dinamiskam slēdzim ir eksperimentāli sarežģīta, jo jāzina ne tikai ieslēgšanās brīdī kontaktā izdalītais strāvas blīvums, bet arī iespējamās mehāniskā trieciena radītās kontakta virsmas izmaiņas. Tāpēc šajā darbā pētītas izmaiņas kontakta stiprībā statiskam NEM slēdzim ieslēgtā stāvoklī atkarībā no pieliktā sprieguma un caurizgājušā strāvas blīvuma. Jau iepriekš parādīts, ka Ge nanovadu-zelta nanokontaktiem eksistē kritiskā strāvas blīvuma vērtība, kuru palielinot, izmaiņas kontakta stiprībā vairs netiek novērotas [72]. Turpmākajā darba daļā aplūkots, kā kontakta elektrisko īpašību izmaiņas ietekmē kontakta stiprību slēdža darbības laikā.

## NEM slēdža kontakta stiprība atkarībā no sprieguma un strāvas blīvuma

NEM slēdzis ieslēgtā stāvoklī tika raksturots kā abos galos nostiprināts cilindrisks stienis, izmantojot Eilera-Bernulli formulu (3). Papildus nostiprinātā nanovada gala robežnosacījumam (7) otrā nanovada galā  $x=L$  tika izveidots uz adhēzijas spēkiem balstīts kontakts, ko var aprakstīt ar robežnosacījumu šarnīram  $y(x)|_{x=L} = 0, \frac{d^2y(x)}{d^2x}|_{x=L} = 0$ . Kā izejas punkts tālākiem mērījumiem pie šāda nostiprinājumu veida tika noteikta rezonanses frekvence  $f_0$ , izveidojot Ge nanovada – zelta elektroda kontaktu bez sprieguma pielikšanas.

Aktīvajam elementam pieliekot pakāpeniski pieaugošu spriegumu, tika novērotas nanovada rezonanses frekvences  $f$  izmaiņas, salīdzinot ar  $f_0$ . 3.11. a) att. parādīta relatīvās rezonanses frekvences izmaiņas  $f/f_0$  atkarība no pieliktā sprieguma  $U'$  nanovadam, kura rezonanses frekvence viena nostiprināta gala gadījumā bija 145 kHz. Abos galos nostiprināta aktīvā elementa rezonanses frekvence pirms sprieguma pielikšanas  $f_0$  bija 651 kHz. Pieliekot un pakāpeniski palielinot ciklēšanas spriegumu  $U'$ , rezonanses frekvences vērtība pieauga līdz maksimālajai vērtībai 795 kHz, kas ir par 22 % lielāka nekā sākotnējā. 3.11. b) att. redzama strāvas blīvuma  $j$  atkarība no pieliktā ciklēšanas sprieguma. Līdz 6 V strāva praktiski neplūst caur nanokontaktu, toties apgabalā no 6 V tiek novērota strauja strāvas blīvuma palielināšanās. Līdzīga tendence tika novērota relatīvajai rezonanses frekvences izmaiņai - līdz aptuveni 8 V frekvences izmaiņas gandrīz netiek novērotas, strauji palielinoties līdz 15 V un sasniedzot lēni augošu vērtību pie augstākiem spriegumiem. Šī saistība starp relatīvās rezonanses frekvences izmaiņas un strāvas blīvuma nanokontaktā atkarību no  $U'$  norāda uz robežnosacījumu izmaiņu jeb aktīvā elementa elektroda kontakta stiprināšanos, strāvas blīvumam palielinoties.



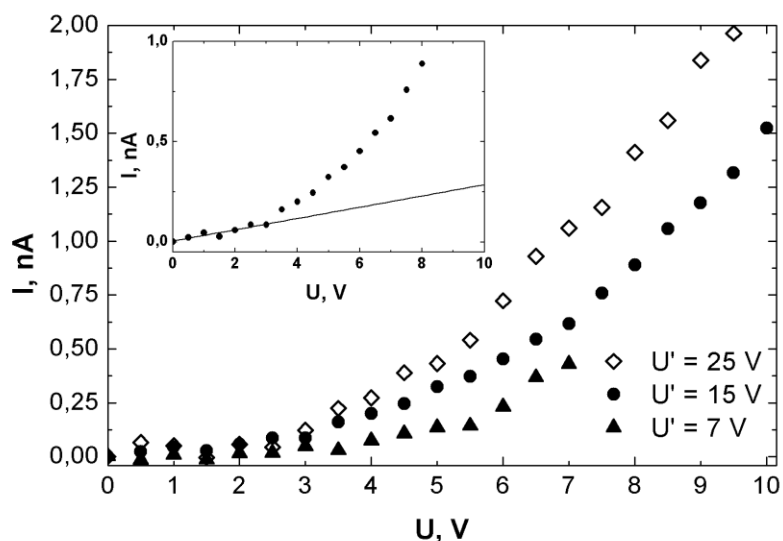
3.11. att. a) Relatīvās rezonanses frekvences  $f/f_0$  un b) strāvas blīvuma  $j$  atkarība no sprieguma  $U'$

Relatīvā rezonanses frekvences izmaiņa apskatītajiem NEM slēdžiem bija robežās no 1.04 līdz 1.35. Tā kā īpašvērtību  $\beta^2$  attiecība problēmām ar atšķirīgajiem robežnosacījumiem nanovada galā  $x=L$  (šarnīrs/nostiprināts) ir 1.45, tad eksperimentāli iegūtās vērtības atbilst sagaidāmajai frekvenču attiecībai, robežnosacījumam nanovada galā mainoties. Līdz ar to var secināt, ka rezonanses frekvences izmaiņa raksturo adhēzijas palielināšanos NEM slēdža kontaktā. To apstiprina arī fakts, ka, atkārtojot spriegumu ciklēšanu bez kontakta izjaukšanas, relatīvā rezonanses frekvence saglabāja savu piesātinājuma vērtību bez tālākas palielināšanās.

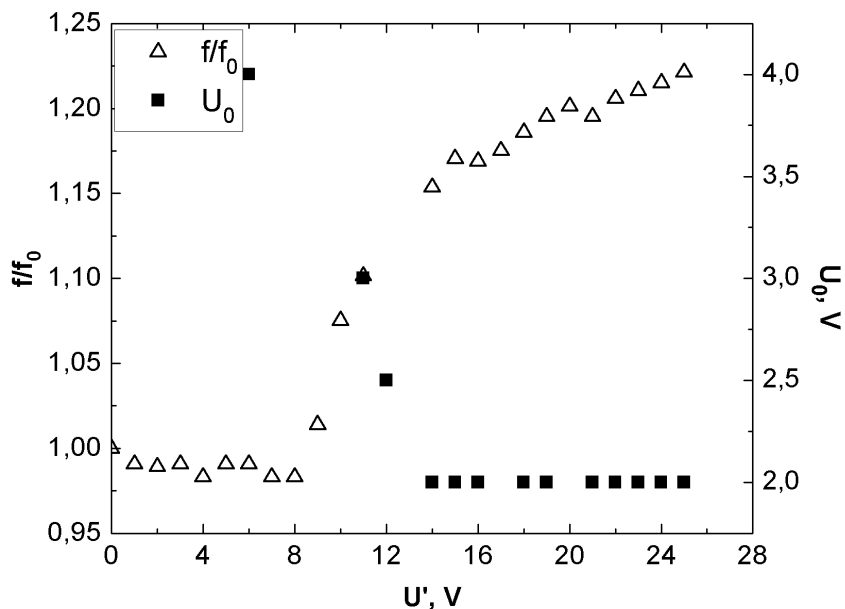
### **Dabīgā Ge oksīda slāņa ietekme uz kontakta stiprību**

Ieslēgta Ge NEM slēdža voltampēru raksturlīknes pie atšķirīgām ciklēšanas sprieguma vērtībām parādītas 3.12. att. Vispārīgi  $I(U)$  nelinearitāti nosaka Šotkī barjeras, kas veidojas pusvadītāja nanovada-metāla kontaktos. Voltampēru raksturlīkņu forma ir atkarīga gan no pašu nanovadu raksturojošām īpašībām - īpatnējās pretestības, piejaukumu koncentrācijas un lādiņnesēju kustīguma, gan no kontakta īpašībām – Šotkī barjeras augstuma un kontakta laukuma. Darbā izmantotā metāla-pusvadītāja-metāla konfigurācija ir labi piemērota nanovada īpatnējo raksturlielumu un kontakta īpašību „atsaistīšanai”, apskatot dažādus  $I(U)$  līknes apgabalus [73], jo nanovads atrodas SEM vakuumā, nevis uz izolatora substrāta, kur būtu jāņem vērā arī iespējamo lādiņnesēju saķeršanu substrāta materiālā.

3.12. att. redzams, ka līknēm raksturīgs apgabals pie mazām sprieguma vērtībām (0-5,5V), kurā strāvu var aprakstīt ar lineāru funkciju. Šis apgabals sniedz informāciju par izveidotā elektriskā kontakta veidu (omisks vai Šotkī) un tiek saistīts ar oksīda slāņa klātbūtni uz pusvadītāja virsmas [74, 75]. Lai izpētītu strāvas izraisīto kontakta adhēzijas palielināšanos atkarībā no oksīda slāņa, tika definēta  $U_0$  kā minimālā sprieguma vērtība, pie kuras strāvas atkarība no sprieguma kļūst nelineāra un aplūkota  $U_0$  atkarība no  $U'$ .  $U_0$  iegūšanai voltampēru raksturlīkne tika aproksimēta ar lineāru funkciju.  $U_0$  vērtībai atbilst tā sprieguma vērtība, pie kuras taisnes determinācijas koeficients  $R^2$  samazinās vairāk kā par 1 %, iekļaujot nākamo datu punktu (3.12. att. iespraudums). 3.13. att. redzams, ka  $U'$  palielinoties,  $U_0$  samazinās no sākotnējās maksimālās vērtības  $U_{0,max}$  līdz minimālai  $U_{0,min}$ , pie tam straujas samazināšanās apgabals sakrīt ar stāvu rezonanses frekvences pieaugumu.  $U_0$  vērtības stabilizācijai atbilst arī relatīvās frekvences stabilizācija.

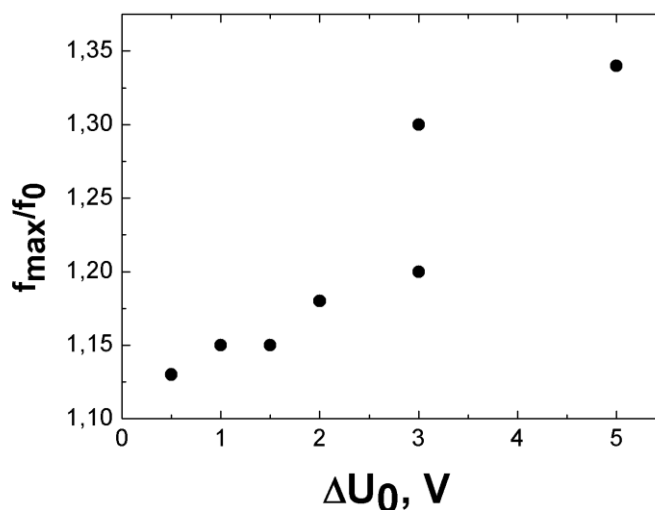


3.12. att.  $U_0$  noteikšana no NEM slēdža voltampēru raksturlīknēm: palielinoties ciklēšanas sprieguma maksimālajai vērtībai  $U'$ ,  $U_0$  samazinās



3.13. att. Relatīvās rezonanses frekvences  $f/f_0$  un parametra  $U_0$  atkarība no ciklēšanas sprieguma  $U'$

Lai detalizētāk izpētītu dabīgā Ge oksīda ietekmi uz slēdža kontakta mehāniskajām un elektriskajām īpašībām, oksīda slānis uz aktīvā elementa tika pakāpeniski nokodināts. Izveidojot atšķirīgus kontaktus dažādās nanovada vietās, nomērītā  $U_{0,max}$  – vērtība tika noteikta robežās no 3 V līdz 8 V. 3.14. att. parādīta  $f_{maks}/f_0$  izmaiņa atkarībā no  $\Delta U_0$  vērtības dažādiem nanokontaktiem, kur  $\Delta U_0 = U_{0,max} - U_{0,min}$ . Redzams, ka  $\Delta U_0$  vērtībai pieaugot, aug arī  $f_{maks}/f_0$ .



3.14. att. Relatīvā rezonanses frekvence  $f_{\max}/f_0$  atkarībā  $\Delta U_0$

Šo novērojumu var skaidrot ar dabīgā Ge oksīda struktūru aktīvā elementa-elektroda kontaktā. No TEM attēliem tika secināts, ka nanovada oksīda struktūra nav vienmērīga, tuvāk monokristāliskajam Ge esošā slāņa daļa atšķiras no tālāk esošās. No iegūtajiem rezultātiem iespējams izteikt hipotēzi, ka plānāki un blīvāki oksīda slāņi, kam atbilst mazākas  $\Delta U_0$  vērtības, vājāk pakļaujas strukturālām izmaiņām, līdz ar to tiek sasniegta gan zemāka mehāniskās stiprināšanās pakāpe, gan mazākas izmaiņas nevadošajā apgabalā. Savukārt biežākiem un mazāk blīviem oksīda slāņiem, kam atbilst lielākas  $\Delta U_0$  vērtības, var sagaidīt izteiktākas kontakta mehānisko un elektrisko īpašību izmaiņas.

No iegūtajiem rezultātiem secināts, ka kontakta adhēzijas palielināšanos ieslēgtā NEM slēdzī var iedalīt posmos, kuros dominē atšķirīgi procesi. Pie maziem spriegumiem cauri nanokontaktam plūst neliela strāva, un izmaiņas kontaktā ir minimālas. Palielinot spriegumu, notiek strāvas izraisīta siltuma izdalīšanās kontaktā. Šo procesu rezultātā robežvirsmā, ko veido Ge-dabīgais Ge oksīds-zelts, tiek pakļauta strukturālām izmaiņām, kuru rezultāts ir kontakta adhēzijas palielināšanās. Turpinot palielināt spriegumu, tiek sasniegts posms, kurā ar strāvas izdalīto siltuma daudzumu nepietiek, lai turpinātu modificēt robežvirsmu starp materiāliem. Tika izteikta hipotēze, ka uzkaršanas rezultātā mainās robežvirsmas raupjums, palielinot efektīvo kontaktlaukumu un samazinot attālumu starp monokristālisko Ge un elektrodu.

Tālākiem pētījumiem būtu nepieciešams salīdzināt uz rezonanses mērīšanu balstīto adhēzijas raksturošanas metodi ar adhēzijas spēka noteikšanas metodi, kur aktīvais elements ar zināmu stinguma koeficientu tiek atrauts no elektroda, detektējot tā nolieci.

## SECINĀJUMI

### **Nanovadu mehānisko īpašību noteikšana**

1. Junga modulis noteikts  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ , BeO un Ge nanovadiem, izmantojot elektriski ierosinātas mehāniskās rezonanses metodi, lieces deformācijas un spiedes deformācijas metodes, secinot, ka ar visām metodēm iegūtie rezultāti kļūdu robežās sakrīt.

2.  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadiem noteikta Junga moduļa vērtība  $36 \pm 9$  GPa, kas kļūdu robežās sakrīt ar makroskopiska kristāla elastības konstanti c-ass virzienā.  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  nanovadiem novērota tendence Junga modulim palielināties aplūkotajā šķērsriezuma laukumā no  $1,1 \cdot 10^4 \text{ nm}^2$  līdz  $7,8 \cdot 10^4 \text{ nm}^2$ . Tālāki pētījumi mazāka šķērsriezuma laukuma nanovadiem nepieciešami, lai apstiprinātu šo novērojumu.

3. BeO nanovadiem noteikta Junga moduļa vērtība  $97 \pm 24$  GPa, kas ir gandrīz 4 reizes mazāka nekā makroskopiskam BeO. Tālāki ķīmiskā sastāva un struktūras pētījumi nepieciešami, lai izskaidrotu novēroto atšķirību.

4. Ge nanovadiem noteikta vidējā Junga moduļa vērtība ir  $135 \pm 40$  GPa, ņemot vērā amorfā nanovadus klājošā oksīda slāņa ietekmi. Nomērītā vērtība nanovadiem atbilst makroskopiska Ge kristāla Junga modulim.

### **NEM slēdža kontakta īpašību raksturošana**

5. Demonstrēta nedestruktīva metode kontakta adhēzijas raksturošana Ge NEM slēdzī atkarībā no slēdža darbības sprieguma un strāvas blīvuma, izmantojot abos galos nostiprināta nanovada rezonanses svārstības.

6. Parādīta relatīvās rezonanses frekvences saistība ar raksturīgā sprieguma izmaiņu  $\Delta U_0$ , kas apraksta elektriskā kontakta strāvas inducētās izmaiņas un ir atkarīga no oksīda slāņa biezuma un kontakta laukuma metāla-pusvadītāja kontaktā.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] Loh, O. Y., Espinosa, H. D. (2012). Nanoelectromechanical contact switches. *Nature Nanotechnology*, 7(5), 283–95. doi:10.1038/nnano.2012.40
- [2] Agarwal, R., Lieber, C. M. (2006). Semiconductor nanowires: optics and optoelectronics. *Applied Physics A*, 85(3), 209–215. doi:10.1007/s00339-006-3720-z
- [3] Schon, G. (2000). Superconducting nanowires. *Nature*, 404(6781), 948–9. doi:10.1038/35010260
- [4] Hoffmann, S., Östlund, F., Michler, J., Fan, H. J., Zacharias, M., Christiansen, S. H., Ballif, C. (2007). Fracture strength and Young's modulus of ZnO nanowires. *Nanotechnology*, 18(20), 205503. doi:10.1088/0957-4484/18/20/205503
- [5] Zhu, Y., Qin, Q., Xu, F., Fan, F., Ding, Y., Zhang, T., et al. (2012). Size effects on elasticity, yielding, and fracture of silver nanowires: In situ experiments. *Physical Review B*, 85(4), 045443. doi:10.1103/PhysRevB.85.045443
- [6] Cuenot, S., Frétygny, C., Demoustier-Champagne, S., Nysten, B. (2004). Surface tension effect on the mechanical properties of nanomaterials measured by atomic force microscopy. *Physical Review B*, 69(16), 165410. doi:10.1103/PhysRevB.69.165410
- [7] Xiang, J., Lu, W., Hu, Y., Wu, Y., Yan, H., Lieber, C. M. (2006). Ge/Si nanowire heterostructures as high-performance field-effect transistors. *Nature*, 441(7092), 489–93. doi:10.1038/nature04796
- [8] Peng, K., Wang, X., Lee, S.-T. (2008). Silicon nanowire array photoelectrochemical solar cells. *Applied Physics Letters*, 92(16), 163103. doi:10.1063/1.2909555
- [9] Jang, W. W., Lee, J. O., Yoon, J.-B., Kim, M.-S., Lee, J.-M., Kim, S.-M., Lee, W.-S. (2008). Fabrication and characterization of a nanoelectromechanical switch with 15-nm-thick suspension air gap. *Applied Physics Letters*, 92(10), 103110. doi:10.1063/1.2892659
- [10] Kaul, A. B., Wong, E. W., Epp, L., Hunt, B. D. (2006). Electromechanical carbon nanotube switches for high-frequency applications. *Nano Letters*, 6(5), 942–7. doi:10.1021/nl052552r
- [11] Lee, J. O., Song, Y.-H., Kim, M.-W., Kang, M.-H., Oh, J.-S., Yang, H.-H., Yoon, J.-B. (2013). A sub-1-volt nanoelectromechanical switching device. *Nature Nanotechnology*, 8(1), 36–40. doi:10.1038/nnano.2012.208

- [12] Andzane, J., Meija, R., Livshits, A. I., Prikulis, J., Biswas, S., Holmes, J. D., Erts, D. (2013). An AC-assisted single-nanowire electromechanical switch. *Journal of Materials Chemistry C*, *1*(43), 7134. doi:10.1039/c3tc31240b
- [13] Cui, Y., Wei, Q., Park, H., Lieber, C. M. (2001). Nanowire nanosensors for highly sensitive and selective detection of biological and chemical species. *Science (New York, N.Y.)*, *293*(5533), 1289–92. doi:10.1126/science.1062711
- [14] Allen, B. L., Kichambare, P. D., Star, A. (2007). Carbon Nanotube Field-Effect-Transistor-Based Biosensors. *Advanced Materials*, *19*(11), 1439–1451. doi:10.1002/adma.200602043
- [15] Duan, X., Huang, Y., Agarwal, R., & Lieber, C. M. (2003). Single-nanowire electrically driven lasers. *Nature*, *421*(6920), 241–245. doi:10.1038/nature0135
- [16] Yang, Y., Lin, Z.-H., Hou, T., Zhang, F., Wang, Z. L. (2012). Nanowire-composite based flexible thermoelectric nanogenerators and self-powered temperature sensors. *Nano Research*, *5*(12), 888–895. doi:10.1007/s12274-012-0272-8
- [17] Wang, Z. L., Song, J. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. *Science (New York, N.Y.)*, *312*(5771), 242–6. doi:10.1126/science.1124005
- [18] Rodriguez-Castro, J., Dale, P., Mahon, M. F., Molloy, K. C. and Peter, L. M., 2007. Deposition of antimony sulfide thin films from single-source antimony thiolate precursors. *Chemistry of Materials*, *19* (13), 3219-3226.
- [19] Ben Nasr, T., Maghraoui-Meherzi, H., Ben Abdallah, H., Bennaceur, R. (2011). Electronic structure and optical properties of Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> crystal. *Physica B: Condensed Matter*, *406*(2), 287–292. doi:10.1016/j.physb.2010.10.070
- [20] Madelung, O. (2004). *Semiconductors: Data Handbook*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-18865-7
- [21] Varghese, J., Barth, S., Keeney, L., Whatmore, R. W., Holmes, J. D. (2012). Nanoscale ferroelectric and piezoelectric properties of Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> nanowire arrays. *Nano Letters*, *12*(2), 868–72. doi:10.1021/nl2039106
- [22] Bao, H., Cui, X., Li, C. M., Song, Q., Lu, Z., Guo, J. (2007). Synthesis and Electrical Transport Properties of Single-Crystal Antimony Sulfide Nanowires. *Journal of Physical Chemistry C*, *111*(45), 17131–17135. doi:10.1021/jp076828q
- [23] Bukins, J., Kunakova, G., Birjukovs, P., Prikulis, J., Varghese, J., Holmes, J. D., Erts, D. (2011). Characterization of Resistivity of Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> Semiconductor Nanowires by Conductive AFM and In Situ Methods. In *Advanced Materials Research* (Vol. 222, pp. 106–109).

- [24] Subramanian, M. A., Shannon, R. D., Chai, B. H. T., Abraham, M. M., Wintersgill, M. C. (1989). Dielectric constants of BeO, MgO, and CaO using the two-terminal method. *Physics and Chemistry of Minerals*, 16(8), 741–746. doi:10.1007/BF00209695
- [25] Sommer, M., Jahn, A., Henniger, J. (2008). Beryllium oxide as optically stimulated luminescence dosimeter. *Radiation Measurements*, 43(2-6), 353–356. doi:10.1016/j.radmeas.2007.11.018
- [26] Baumeier, B., Krüger, P., Pollmann, J. (2007). Structural, elastic, and electronic properties of SiC, BN, and BeO nanotubes. *Physical Review B*, 76(8), 085407. doi:10.1103/PhysRevB.76.085407
- [27] Baima, J., Erba, A., Rérat, M., Orlando, R., Dovesi, R. (2013). Beryllium Oxide Nanotubes and their Connection to the Flat Monolayer. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(24), 12864–12872. doi:10.1021/jp402340z
- [28] Sze, S. M. *Physics of Semiconductor Devices*, Second edition, 1981 (John Wiley, New York)
- [29] W. M. Haynes, ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL, 95th Edition
- [30] Hanrath, T., Korgel, B. A. (2004). Chemical surface passivation of Ge nanowires. *Journal of the American Chemical Society*, 126(47), 15466–72. doi:10.1021/ja0465808
- [31] Collins, G., Fleming, P., Barth, S., O'Dwyer, C., Boland, J. J., Morris, M. A., Holmes, J. D. (2010). Alkane and Alkanethiol Passivation of Halogenated Ge Nanowires. *Chemistry of Materials*, 22(23), 6370–6377. doi:10.1021/cm1023986
- [32] Cheng, G., Chang, T.-H., Qin, Q., Huang, H., Zhu, Y. (2014). Mechanical properties of silicon carbide nanowires: effect of size-dependent defect density. *Nano Letters*, 14(2), 754–8. doi:10.1021/nl404058r
- [33] Li, X., Ono, T., Wang, Y., Esashi, M. (2003). Ultrathin single-crystalline-silicon cantilever resonators: Fabrication technology and significant specimen size effect on Young's modulus. *Applied Physics Letters*, 83(15), 3081. doi:10.1063/1.1618369
- [34] Kizuka, T., Takatani, Y., Asaka, K., Yoshizaki, R. (2005). Measurements of the atomistic mechanics of single crystalline silicon wires of nanometer width. *Physical Review B*, 72(3), 035333. doi:10.1103/PhysRevB.72.035333

- [35] Han, X. D., Zheng, K., Zhang, Y. F., Zhang, X. N., Zhang, Z., Wang, Z. L. (2007). Low-Temperature In Situ Large-Strain Plasticity of Silicon Nanowires. *Advanced Materials*, 19(16), 2112–2118. doi:10.1002/adma.200602705
- [36] Li, X., Wang, X., Xiong, Q., Eklund, P. C. (2005). Mechanical properties of ZnS nanobelts. *Nano Letters*, 5(10), 1982–6. doi:10.1021/nl0513885
- [37] Chen, C., Shi, Y., Zhang, Y., Zhu, J., Yan, Y. (2006). Size Dependence of Young's Modulus in ZnO Nanowires. *Physical Review Letters*, 96(7), 075505. doi:10.1103/PhysRevLett.96.075505
- [38] Miller, R. E., Shenoy, V. B. (2000). Size-dependent elastic properties of nanosized structural elements. *Nanotechnology*, 11(3), 139–147. doi:10.1088/0957-4484/11/3/301
- [39] Park, H. S., Cai, W., Espinosa, H. D., Huang, H. (2011). Mechanics of Crystalline Nanowires. *MRS Bulletin*, 34(03), 178–183. doi:10.1557/mrs2009.49
- [40] Han, X. D., Zheng, K., Zhang, Y. F., Zhang, X. N., Zhang, Z., Wang, Z. L. (2007). Low-Temperature In Situ Large-Strain Plasticity of Silicon Nanowires. *Advanced Materials*, 19(16), 2112–2118. doi:10.1002/adma.200602705
- [41] Tang, D.-M., Ren, C.-L., Wang, M.-S., Wei, X., Kawamoto, N., Liu, C., Golberg, D. (2012). Mechanical properties of Si nanowires as revealed by in situ transmission electron microscopy and molecular dynamics simulations. *Nano Letters*, 12(4), 1898–904. doi:10.1021/nl204282y
- [42] Muñoz-Gamarrá, J. L., Uranga, A., Barniol, N. (2014). Nanomechanical switches based on metal-insulator-metal capacitors from a standard complementary-metal-oxide semiconductor technology. *Applied Physics Letters*, 104(24), 243105. doi:10.1063/1.4882918
- [43] Loh, O., Wei, X., Ke, C., Sullivan, J., Espinosa, H. D. (2011). Robust carbon-nanotube-based nano-electromechanical devices: understanding and eliminating prevalent failure modes using alternative electrode materials. *Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 7(1), 79–86. doi:10.1002/sml.201001166
- [44] Bhushan, B. (2003). Adhesion and stiction: Mechanisms, measurement techniques, and methods for reduction. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 21(6), 2262. doi:10.1116/1.1627336
- [45] Loh, O., Wei, X., Sullivan, J., Ocola, L. E., Divan, R., & Espinosa, H. D. (2012). Carbon-carbon contacts for robust nanoelectromechanical switches. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 24(18), 2463–8. doi:10.1002/adma.201104889

- [46] Andzane, J., Petkov, N., Livshits, A. I., Boland, J. J., Holmes, J. D., Erts, D. (2009). Two-terminal nanoelectromechanical devices based on germanium nanowires. *Nano Letters*, 9(5), 1824–9. doi:10.1021/nl8037807
- [47] Ngo, L. T., Almécija, D., Sader, J. E., Daly, B., Petkov, N., Holmes, J. D., Boland, J. J. (2006). Ultimate-strength germanium nanowires. *Nano Letters*, 6(12), 2964–8. doi:10.1021/nl0619397
- [48] Hanrath, T., Korgel, B. A. (2005). Influence of surface states on electron transport through intrinsic Ge nanowires. *The Journal of Physical Chemistry. B*, 109(12), 5518–24. doi:10.1021/jp044491b
- [49] Prasankumar, R. P., Choi, S., Trugman, S. A., Picraux, S. T., Taylor, A. J. (2008). Ultrafast electron and hole dynamics in germanium nanowires. *Nano Letters*, 8(6), 1619–24. doi:10.1021/nl080202
- [50] Léonard, F., Talin, A. A., Swartzentruber, B. S., Picraux, S. T. (2009). Diameter-Dependent Electronic Transport Properties of Au-Catalyst/Ge-Nanowire Schottky Diodes. *Physical Review Letters*, 102(10), 106805. doi:10.1103/PhysRevLett.102.106805
- [51] Chen, W.-H., Liu, C.-H., Li, Q.-L., Sun, Q.-J., Liu, J., Gao, X., Wang, S.-D. (2014). Intrinsic Ge nanowire nonvolatile memory based on a simple core-shell structure. *Nanotechnology*, 25(7), 075201. doi:10.1088/0957-4484/25/7/075201
- [52] Jasulaņeca, L., "Antimona sulfīda nanovadu mehāniskās īpašības", bakalaura darbs, LU FMF, Rīga, 2012
- [53] Holmes, J. D., Lyons, D. M., Ziegler, K. J. (2003). Supercritical fluid synthesis of metal and semiconductor nanomaterials. *Chemistry (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 9(10), 2145–51. doi:10.1002/chem.200204521
- [54] Hanrath, T., Korgel, B. A. (2004). Germanium nanowire transistors: a comparison of electrical contacts patterned by electron beam lithography and beam-assisted chemical vapour deposition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, 218(1), 25–34. doi:10.1243/174034905X35379
- [55] Qin, Q., Xu, F., Cao, Y., Ro, P. I., Zhu, Y. (2012). Measuring true Young's modulus of a cantilevered nanowire: effect of clamping on resonance frequency. *Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 8(16), 2571–6. doi:10.1002/sml.201200314
- [56] Hutter, J. L., & Bechhoefer, J. (1993). Calibration of atomic-force microscope tips. *Review of Scientific Instruments*, 64(7), 1868. doi:10.1063/1.1143970

- [57] Hummelgård, M., Zhang, R., Carlberg, T., Vengust, D., Dvorsek, D., Mihailovic, D., Olin, H. (2010). Nanowire transformation and annealing by Joule heating. *Nanotechnology*, 21(16), 165704. doi:10.1088/0957-4484/21/16/165704
- [58] Gere, J. M. and Timoshenko, S. P. (1997). *Mechanics of Materials*. (Boston, MA: PWS Publishing)
- [59] Wang, Z., Gao, R., Poncharal, P., de Heer, W., Dai, Z., Pan, Z. (2001). Mechanical and electrostatic properties of carbon nanotubes and nanowires. *Materials Science and Engineering: C*, 16(1-2), 3–10. doi:10.1016/S0928-4931(01)00293-4
- [60] Ding, W., Calabri, L., Chen, X., Kohlhaas, K. M., & Ruoff, R. S. (2006). Mechanics of crystalline boron nanowires. *Composites Science and Technology*, 66(9), 1112–1124. doi:10.1016/j.compscitech.2005.11.030
- [61] Bridge, B., Patel, N. D., & Waters, D. N. (1983). On the Elastic Constants and Structure of the Pure Inorganic Oxide Glasses. *Physica Status Solidi (a)*, 77(2), 655–668. doi:10.1002/pssa.2210770231
- [62] Wortman, J. J., & Evans, R. A. (1965). Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio in Silicon and Germanium. *Journal of Applied Physics*, 36(1), 153. doi:10.1063/1.1713863
- [63] Ivanovskii, A. L., Shein, I. R., Makurin, Y. N., Kiiko, V. S., Gorbunova, M. A. (2009). Electronic structure and properties of beryllium oxide. *Inorganic Materials*, 45(3), 223–234. doi:10.1134/S0020168509030017
- [64] Zeng, D.-J., Zheng, Q.-S. (2007). Resonant frequency-based method for measuring the Young's moduli of nanowires. *Physical Review B*, 76(7), 075417. doi:10.1103/PhysRevB.76.075417
- [65] Zeng, D., Wei, X., Liu, J. Z., Chen, Q., Li, X., Zheng, Q. (2009). Tunable resonant frequencies for determining Young's moduli of nanowires. *Journal of Applied Physics*, 105(11), 114311. doi:10.1063/1.3141735
- [66] Feng, X. L., He, R., Yang, P., & Roukes, M. L. (2007). Very High Frequency Silicon Nanowire Electromechanical Resonators. *Nano Letters*, 7(7), 1953–1959. doi:10.1021/nl0706695
- [67] Smith, D. A., Holmberg, V. C., Lee, D. C., & Korgel, B. A. (2008). Young's Modulus and Size-Dependent Mechanical Quality Factor of Nanoelectromechanical Germanium Nanowire Resonators. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(29), 10725–10729. doi:10.1021/jp8010487

- [68] Xu, F., Qin, Q., Mishra, A., Gu, Y., Zhu, Y. (2010). Mechanical properties of ZnO nanowires under different loa modes. *Nano Research*, 3(4), 271–280. doi:10.1007/s12274-010-1030-4
- [69] Ding, W., Dikin, D. A., Chen, X., Piner, R. D., Ruoff, R. S., Zussman, E., Li, X. (2005). Mechanics of hydrogenated amorphous carbon deposits from electron-beam-induced deposition of a paraffin precursor. *Journal of Applied Physics*, 98(1), 014905. doi:10.1063/1.1940138
- [70] International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS, 2013); <http://www.itrs.net/home.html>
- [71] Dequesnes, M., Rotkin, S. V, Aluru, N. R. (2002). Calculation of pull-in voltages for carbon-nanotube-based nanoelectromechanical switches. *Nanotechnology*, 13(1), 120–131. doi:10.1088/0957-4484/13/1/325
- [72] Pētersons, K., „Nostiprinātu nanovadu slēdžu darbības parametri”, bakalaura darbs, LU FMF, Rīga, 2014
- [73] Zhang, Z., Yao, K., Liu, Y., Jin, C., Liang, X., Chen, Q., Peng, L.-M. (2007). Quantitative Analysis of Current–Voltage Characteristics of Semiconducting Nanowires: Decoupling of Contact Effects. *Advanced Functional Materials*, 17(14), 2478–2489. doi:10.1002/adfm.200600475
- [74] Card, H. C., & Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1589–1601. doi:10.1088/0022-3727/4/10/319
- [75] Card, H. C., & Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes II. Thermal equilibrium considerations. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1602–1611. doi:10.1088/0022-3727/4/10/320

