

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

**NANOVADU SAKĀRTOŠANA UZ ELEKTRODIEM AR
DIELEKTROFORĒZI NANOELEKTROMEHĀNISKU SLĒDŽU
IZVEIDEI**

BAKALaura DARBS

Autors: Matīss Mārtiņš Ramma

Studenta apliecības Nr:mr16043

Darba vadītāji: Asoc. Prof. Dr. Chem. Donāts Erts, Ķīmiskās fizikas institūts

Dr. Phys. Jeļena Kosmača, Ķīmiskās fizikas institūts

RĪGA 2019

ANOTĀCIJA

Dielektroforēze ir polarizējumu daļiņu manipulācija nehomogēnā elektriskā laukā. Ar šīs manipulācijas metodi ir iespējama viendimensionālu nanovadu sakārtošana uz mikroelektrodu pāriem, tāpēc var tikt pielietota nanoelektromehānisko slēdžu izveidē. Šīs nanoierīces veic pārslēgšanos starp izslēgtiem un ieslēgtiem stāvokļiem izmantojot nanovadus kā pārslēgšanās elementus.

Darbā tika pētīta dielektroforēzes procesa iznākuma atkarība no dažādiem ietekmējošiem faktoriem ar mērķi optimizēt individuālu nanovadu sakārtošanu uz mikroelektrodu pāriem nanoelektromehānisko slēdžu izveidei. Eksperimentāli tika pētīts dielektroforēzes procesa iznākuma atkarība no maiņsprieguma frekvences un amplitūdas CuO nanovadu uznešanā uz mikroelektrodiem. Tika izstrādāts paņēmieni kapilāro spēku ietekmes mazināšanai ar superkritiskās žāvēšanas palīdzību, kas ļauj uznest brīvi stāvošos nanovadus virs elektrodu pamatnes. Demonstrēts nanoelektromehāniskai slēdzis ar dielektroforēzi uznestu CuO nanovadu.

Atslēgvārdi: dielektroforēze, CuO, nanovadi, superkritiskā žāvēšana, nanoelektromehāniskie slēdži.

ABSTRACT

Dielectrophoresis is the manipulation of polarized particles in an inhomogeneous electric field. This method can be used for alignment of one dimensional nanowires on microelectrode pairs, which is needed for the creation of nanoelectromechanical switches. These nanodevices switch from off and on states by using nanowires as switching elements.

In this work different dielectrophoretic result influencing factors were studied with the goal of optimizing single nanowire alignment on the microelectrode pairs for the creation of nanoelectromechanical switches. Dielectrophoretic experiments were carried out to study the influences frequencies and amplitudes of the applied voltage on the alignment of CuO nanowires on microelectrodes. A technique was developed for the reduction of capillary forces by means of supercritical drying, allowing for the placement of freestanding nanowires over the electrode base. Nanoelectromechanical switch with dielectrophoretic aligned CuO nanowire was demonstrated.

Keywords: dielectrophoresis, CuO, nanowires, supercritical drying, nanoelectromechanical switches.

PUBLIKĀCIJAS

Konferenču prezentācijas

1. **M.M. Ramma**, J. Kosmaca, L. Jasulaneca, R. Meija, G.Kunakova, R. Sondors, D. Erts, One dimensional nanostructure alignment through dielectrophoresis, Nanoelectronics, nanotechnologies and radiation processes, Latvija, Rīga 01.02.2019 (Mutiska)
2. **M. M.Ramma**, Daniels Jevdokimovs, Jelena Kosmaca, Liga Jasulaneca, Gunta Kunakova, Donats Erts, Dielectrophoretic alignment of individual nanowires towards the creation of nanoelectromechanical switches, Advanced Materials and Technologies, Lithuania, Palanga 27-31.07.2018. (Stenda referāts)
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, Boston, USA, 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, Palanga, Lietuva, 19.-23.08.2019
5. D. Erts, J.Kosmaca, J.Andzane, L.Jasulaneca, A. I. Livshits, J.Blums, **M.M.Ramma**, R.Meija, Creation of nanowire-based nanoelectromechanical switches, Nanotechnology and Innovation in the Baltic Sea Region, Sonderborga, Denmark, 30.05-01.06.2018

Tehnoloģija

J.Kosmaca, **M.Ramma**, J.Prikulis, D. Erts. Assembly of the nanowires on the electrodes using dielectrophoresis, Institute of Chemical Physics, University of Latvia, 2018, izstrādāts ERAF projekta "Nanoelektromehānisku slēdžu izveide" ietvaros

SATURA RĀDĪTĀJS

APZĪMĒJUMU SARAKSTS	5
1. IEVADS	6
2. LITERATŪRAS APSKATS	8
2.1. Nanovadi	8
2.2. Nanoelektromehāniskie slēdži	9
2.3. Dielektroforēze	11
2.4. Kapilārie spēki	13
2.5. Superkritiskā žāvēšana	14
3. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA	15
3.1. Nanovadu sintēze ar termālas oksidēšanās metodi	15
3.2. Nanovadu suspensijas sagatavošana	15
3.3. Dielektroforēzes veikšana	17
3.4. Superkritiskā žāvēšana	18
3.5. Izmantotās iekārtas un vielas	20
4. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	21
4.1. Eksperimentālās DEP frekvences diapazona noteikšana	21
4.2. DEP iznākuma atkarība no maiņsprieguma frekvences	22
4.3. DEP iznākums atkarība no maiņsprieguma amplitūdas	25
4.4. Superkritiskā žāvēšana	26
4.5. CuO nanovada NEM slēdzis	27
5. SECINĀJUMI	30
6. IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI	31

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

CMOS-Complementary Metal–Oxide–Semiconductor, Metāla-Oksīda-Pusvadītāja

DEP-dielektroforēze

IPA-izopropanols

NEM – nanoelektromehāniskie

NV, NW-nanovadi

SEM- skanējošais elektrona mikroskops

CO₂ - oglekļa dioksīds

LCO₂ - oglekļa dioksīds šķidrā fāzē

CuO - vara oksīds

nm - nanometri

μm - mikrometri

Cu – varš

V_{p_k}- p_k – maiņsprieguma amplitūda no maksimuma līdz minimumam

1. IEVADS

Nanovadi ir viendimensionāli nanomateriāli, kurus plaši pielieto dažādās nanoierīcēs.¹⁻³ Piemēram, nanoelektromehāniskos (NEM) slēdžos tie, mehāniski izliecoties un savienojot mikroelektrodus var kalpot, kā pārslēgšanās elements starp izslēgtiem un ieslēgtiem stāvokļiem.⁴ NEM slēdži izceļas ar zemiem enerģijas patēriņiem un strāvas zudumiem, tāpēc tos uzskata par alternatīvu tehnoloģiju pašlaik industrijā dominējošām Metāla-Oksīda-Pusvadītāja jeb CMOS (no angļu valodas Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor) loģisko funkciju sistēmām.⁵ Pētījumi liecina, ka NEM slēdži varētu tikt integrēti kopā CMOS veidojot NEM-CMOS hibrīdsistēmas ar uzlabotiem enerģijas patēriņiem un samazinātiem strāvas zudumiem.^{4,6}

Nanoelektromehānisko slēdžu izveidē nepieciešama gan mikro, gan nano izmēra elementu ražošana un precīza novietošana. Piemēram, mikroelektrodu struktūras var izgatavot ar litogrāfijas metodēm⁷, bet nepieciešamos nanovadus var sintezēt.⁸ Viena no lielākajām problēmām NEM slēdžu izveidošanā ir to pārslēgšanās elementu – nanovada precīza uznešana uz mikroelektrodu struktūras.

Dielektroforēze jeb polarizējamu daļiņu kustība šķidrā vidē nehomogēnā elektriskā laukā⁹, ir metode, kas var nodrošināt liela skaita nanovada sakārtošanu uz mikroelektrodiem ar augstu efektivitāti¹⁰. Šīs metodes ieguvumi ir spēja manipulēt liela daudzuma skaita nanovadus salīdzinoši ātri un lēti^{10,11}, taču individuala nanovada precīza novietošana uz paradzētā mikroelektroda var būt problemātiska, jo jāpiemeklē dielektroforēzes procesa parametri, kas atbilst nanovadu īpāšībām^{11,12} un mikroelektrodu dizainam.¹³ Vel viena aktuāla problēma, kas saistās ar dielektroforēzes procesu, ir šķidrums žūšanas procesā radušies kapilārie spēki. Tie var izraisīt nanovadu ieliekšanos un pielipšanu pie mikroelektrodu pamatnes virsmas izjaucot NEM slēdža dizainu. Darbā kapilāro spēku iedarbība tika novērsta izmantojot superkritisko žāvēšanu.¹⁴

Darba mērķi:

Izpētīt CuO nanovadu novietošanu uz mikroelektrodu struktūrām ar dielektroforēzi NEM slēdžu izveidei.

Darba uzdevumi:

- 1) Izpētīt dielektroforēzes procesa iznākuma atkarību no maiņsprieguma frekvences un amplitūdas
- 2) Pielietot superkritiskās žāvēšanas metodi kapilāro spēku radīto efektu novēršanai.
- 3) Pārbaudīt ar dielektroforēzes palīdzību izveidotā nanoelektromehānisko slēdzi ar kā aktīvo elementu CuO nanovadu, darbību.

Darbs uzrakstīts uz 36 lapaspusēm, tas satur 21 attēlus, 1 tabulu, 41 atsauces.
Darbs sadalīts 6 nodaļās un 15 apakšnodaļās..

2. LITERATŪRAS APSKATS

2.1. Nanovadi

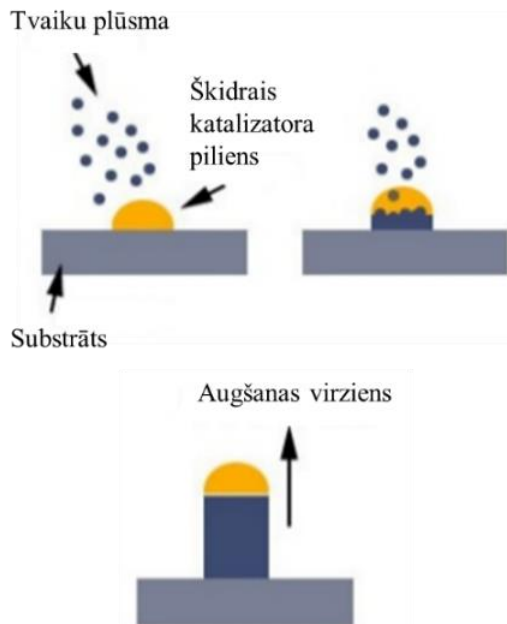
Nanovadi ir nanomateriāli, kuru diametri ir līdz simts nanometriem, bet garumiem virs mikrometra. Augstās garumi pret diametru attiecības dēļ, nanovadi tiek uzskatīti par viendimensionāliem nanostruktūrām. Nanovadi var būt veidoti no pusvadītāju (Si^{15} , ZnO^{15} , CuO^8 , Ge^{16} u.c.), metāla (Ag^{17} , Au^{18} , Ni^{19} , Co^{19} u.c.) vai dielektriķu (SiO_2^{20} , CaTiO_3^{21} u.c.) materiāliem.

Nanovadi tiek iegūti divās izteiktās metožu klasēs – *lejupejošās* (no angļu valodas *top down*) vai *augšupejošā* (*bottom up*). *Lejupejošās* metodes balstās uz lielāku struktūru apstrādāšanas līdz vajadzīgajiem samazinātajiem izmēriem. Litogrāfija ir viena no populārākajām šāda tipa metodēm, taču to ierobežo litogrāfiskās tehnikas izšķirtspēja, kā piemēram optiskās litogrāfiju izmantotās gaismas viļņa garums, tāpēc ne vienmēr ir iespējams iegūt vēlamos nanovadus ar izmēriem zem simts nanometru. Elektronu staru litogrāfija ir ar augstāku izšķirtspēju, tāpēc var tikt efektīvāk izmantota nanovadu iegūšanā. Elektronu litografijas trūkums ir tas, ka tā ir dārga un lēna. Litogrāfiskas tehnikas var arī tikt kombinētas ar struktūru reducējošām metodēm, kas var ļaut iegūt nanovadus biežumos zem 10 nm.²² Kopumā, lai gan šīs metodes spēj labi kontrolēt nanovadu biežumu, garumu, formu, kā arī atrašanos vietu, mazu izmēru nanovadu struktūrā radīšana ir dārgs, laikietilpīgs vairāku soļu process.^{23,24}

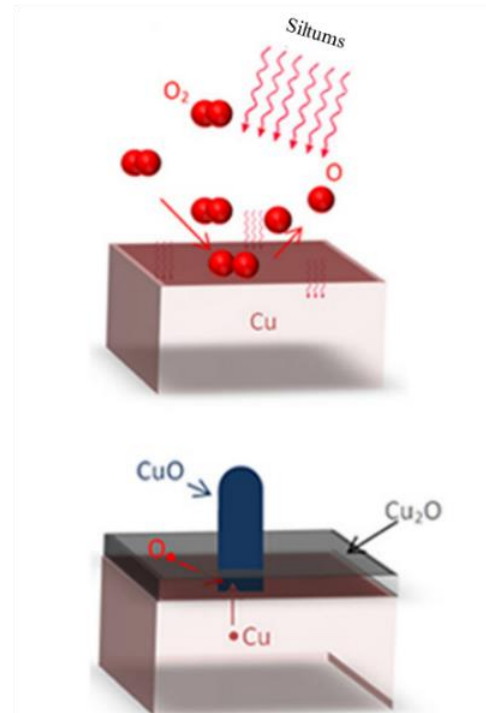
Augšupejošās metodes balstās uz kādas struktūras būvēšanu no mazākām sākuma vienībām izmantojot ķīmiskus procesus. Viena no populārākajām šāda tipa metodēm ir Tvaika-Šķidrums-Cietvielas (Vapor-Solid-Liquid) audzēšana (att. 2.1.1.). Daži nanometri lieli šķidra stāvokļa katalizatora pilieni uz substrāta virsmas absorbē tvaikus līdz pārsātinātam līmenim, un piliena apakšā sākas vielas kristalizēšanās, kā rezultātā sāk augt nanovads.²⁵

Šajā darbā dielektroforēzei tika izmantoti pusvadītāja Vara (II) oksīda jeb CuO nanovadi. Šie nanovadi tika audzēti ar *augšupejošo* metodi, termāli oksidējot vara materiālus pie augstām temperatūrām skābeklī bagātā atmosfērās.⁸ (att. 2.1.1.) Ar termālās oksidācijas metodi iespējams iegūt labas kvalitātes kristaliskus nanovadus ar diametriem 80-330 nm un garumiem 3-25 μm robežās. Kopumā *augšupejošās* metodes izceļas ar iespējām iegūt liela skaita nanovadus salīdzinoši lēti, kā arī ar iespējām kontrolēt to izmērus.

Tvaika- Šķidra – Cietvielas audzēšana



Termālā oksidēšana

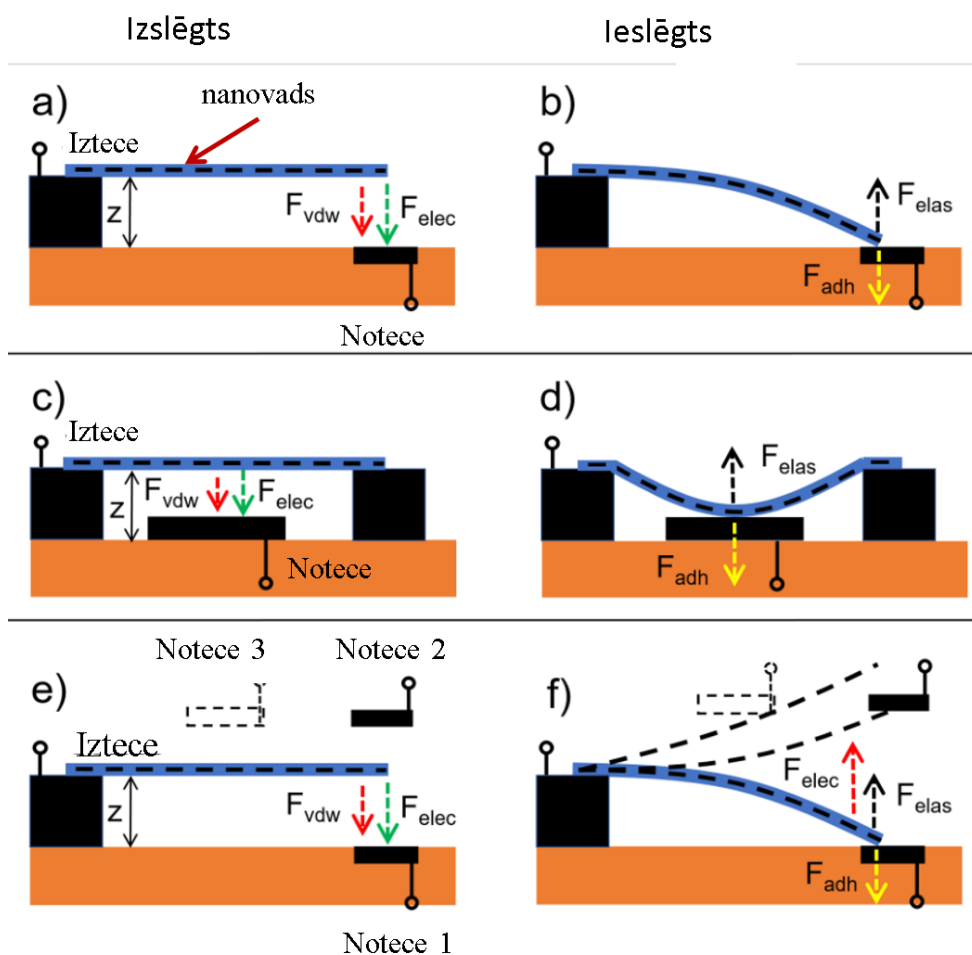


att. 2.1.1. Tvaika-Šķidra-Cietvielas²⁶ un termālās oksidēšanas²⁷ lejupejošās nanovada iegūšanas metožu ilustrācijas;

Nanovadi ir plaši pielietoti objekti daudzu veiksmīgu un funkcionālu ierīču izveidei, kā, piemēram, augstas jutības fotodetektoros¹, proteīnu biosensoros², gāzes sensoros³, kā arī ir neatņemama komponente nanoelektromehānisko (NEM) slēdžu darbībā.

2.2. Nanoelektromehāniskie slēdži

NEM slēdži ir ierīces, kas veic pārslēgšanos starp ieslēgtiem un izslēgtiem stāvokļiem izmantojot kādas nanoizmēra struktūras (nanovadi, nanocaurulītes u.c.)⁵. Šīs ierīces izceļas ar zemiem enerģijas patēriņiem un enerģijas zudumiem. NEM slēdži arī ir demonstrējušas darbošanās spējas saglabāšanos pie augstām temperatūrām²⁸ un lieliem ārējiem elektriskiem laukiem²⁹, kā arī noturību pret radiāciju.⁴



att. 2.2.1. Viena kontakta nanovada NEM slēdzis uz mikroelektrodu struktūras a) - izslēgtos un b) - ieslēgtos režīmos) un d) - divu kontaktu nanovada NEM slēdzis; e) un f) viena kontakta nanovada NEM slēdzis ar augstajiem noteces elektrodiem Notece 2 un Notece 3; F_{elec} elektrostatiskie, F_{vdw} van der Valsa, F_{elas} nanovada elastīgie, F_{adh} kontakta adhēzijas spēki; Attēls ņemts no ⁵

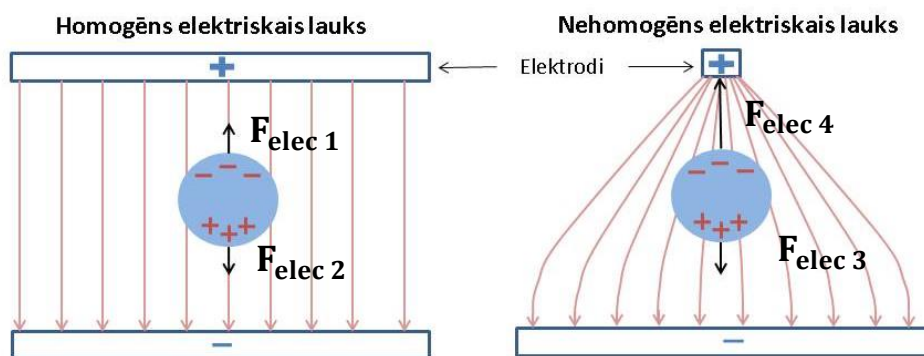
Nanoelektromehānisko slēdžu pārslēgšanās principi balstās uz spriegumu kontrolēšanu starp izteces un noteces mikroelektrodiem. (att. 2.2.1.) Izslēgtā stāvoklī, palielinot spriegumu starp izteces un noteces mikroelektrodiem, strāva neplūdis, bet pie kādas kritiskas sprieguma vērtības elektrostatiskie spēki kļūs lielāki par nanovada elastīgajiem spēkiem. Šajā brīdī nanovads ieleks kontaktā ar noteces mikroelektrodu noslēdzot ķēdi, kā rezultāta būs straujš plūstošās strāvas pieaugums starp izteces un noteces mikroelektrodiem (ieslēgts stāvoklis). NEM slēdžu darbībā ietekmējoši ir arī starpmolekulārie van der Valsa spēki, kā arī adhēzijas spēki, kas veidojas starp nanovada un mikroelektroda kontaktu. Ja nanovadam kontakta adhēzijas spēki ar noteces elektrodu ir mazāki par nanovada elastīgajiem spēkiem, tad NEM slēdzis var tik atslēgts pazeminot spriegumu starp izteces un noteces elektrodiem (att. 2.2.1.a,b,c,d). Gadījumos, ja kontakta adhēzijas spēki ir lielāki par elastīgajiem spēkiem, tad NEM slēdži tiek atslēgti palielinot spriegumu starp izteces un noteces 2 vai noteces 3 mikroelektrodiem (att. 2.2.1.e, un f).

Mikroelektrodu struktūras veidošana ar litogrāfiskām metodēm ir labi atstrādāta⁷, taču NEM slēdžu attīstība bremsējošs faktors ir nanovadu uznešana uz mikroelektrodiem. Veidojot nanovadus uz mikroelektrodiem ar *lejupejošām* metodēm, nanoierīču ražošanas process paliek dārgs un laikietilpīgs. Individuālu *augšupejošu* iegūtu nanovadu pārvešana no audzēšanas substrāta uz mikroelektrodiem ar speciālam zondēm³⁰ ir iespējama, taču šī metode arī ir laikietilpīga un nanovadi var tikt pārnesti tikai pa vienam. Viena no metodēm, kura varētu pārnest liela skaita *augšupejošus* nanovadus ātri, lēti, kā arī ar samērā vienkāršu aprīkojumu ir dielektroforēze.

2.3. Dielektroforēze

Šo manipulācijas metodi var pielietot plašam nanomateriālu klāstam, jo daļiņa var būt gan neitrāla, gan arī lādēta. Nanotehnoloģijās šī ir plaši pielietota metode vadītāju³¹ un pusvadītāju¹² nanovadu, kā arī oglekļu nanocaurulīšu³² manipulācijai dažādu elektrisko ierīču veidošanai.

Dielektroforēze (angļu val. *dielectrophoresis*, DEP) ir polarizētu daļiņu kustībā šķidrā vide nehomogēnā elektriskā laukā.⁹ Daļiņu kustība notiek pateicoties elektriskā lauka radītai pozitīvo un negatīvo daļiņas lādiņnesēju polarizēšana, kā rezultātā daļiņa kļūst par dipolu. Nehomogēna elektriskā lauka gadījumā, kāds no daļiņas dipola poliemi tiks piesaistīts stiprāk nekā otrs, tādēļ daļiņai būs rezultējošs spēks, un tā kustēsies elektriskā lauka virzienā. (att. 2.3.1.)



att. 2.3.1. Polarizējamas neitrālas daļiņas uzvedība homogēna un nehomogēna elektriskā laukā; F_{elec} –elektrostatiskie spēki; $F_{elec 1}=F_{elec 2}$, $F_{elec 3} < F_{elec 4}$; Attēls pielāgots no⁴¹

Rezultējošo spēku polarizētam nanovadam (att. 2.3.2) nehomogēnā elektriskā laukā apraksta dielektroforēzes spēks¹²:

$$\vec{F}_{\text{DEP}} = \Gamma \varepsilon_m \text{Re}[K(f)] \nabla \vec{E}^2 \quad (1),$$

kur Γ ir nanovada ģeometriskā konstante, ε_m ir šķidrās vides dielektriskā konstante, $\nabla \vec{E}$ ir elektriskā lauka gradients, f ir frekvence elektriskā lauka ģenerējošam spriegumam, $\text{Re}[K(f)]$ ir Klauziusa-Mossotti faktora reālā daļa. Nanovadu gadījumā dielektroforēzes spēks iedalās divās kopkomponentēs. ¹² Viena no dielektroforēzes spēka komponentēm veidojas gadījumos, kad nanovads ir paralēlā orientācijā pret elektriskā lauka gradientu, un šis spēks ir proporcionāls garās ass Klauziusa-Mossotti faktoram jeb K_g . Otra dielektroforēzes spēka komponente veidojas, kad nanovada orientācija ir perpendikulāra elektriskā lauka gradientam, kura ir proporcionāla īsās ass Klauziusa-Mossotti faktoram jeb K_i . Garās un īsās ass Klauziusa-Mossotti faktors var aprēķināti pēc šiem vienādojumiem¹¹:

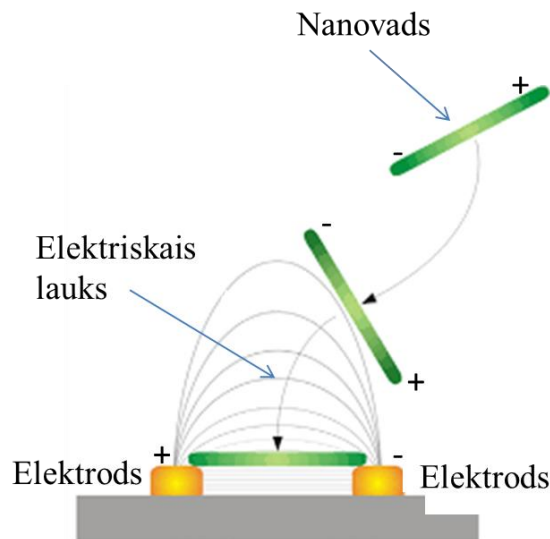
$$K_g = \frac{(2\pi f)^2 \varepsilon_m^a (\varepsilon_{nw}^a - \varepsilon_m^a) - \sigma_m (\sigma_{nw} - \sigma_m)}{(2\pi f)^2 \varepsilon_m^a + \sigma_m^2} \quad (2),$$

$$K_i = 2 \frac{(2\pi f)^2 (\varepsilon_{nw}^{a^2} - \varepsilon_m^{a^2}) + \sigma_{nw}^2 - \sigma_m^2}{(2\pi f)^2 (\varepsilon_{nw}^a + \varepsilon_m^a)^2 + (\sigma_{nw} + \sigma_m)^2} \quad (3),$$

,kur ε_m^a ir šķidrās vides absolūtā dielektriskā caurlaidība, ε_{nw}^a ir nanovada absolūtā dielektriskā caurlaidība, σ_m ir šķidrās vides elektriskā caurlaidība un σ_{nw} ir nanovadu elektriskā caurlaidība. Materiāla dielektriskā caurlaidība ir proporcionālā materiāla dielektriskai konstantei un var tikt aprēķināta pēc:

$$\varepsilon_{m;nw}^a = \varepsilon_{m;nw} \cdot \varepsilon_0 \quad (4)$$

,kur $\varepsilon_{m;nw}$ šķidrās vides vai nanovada dielektriskā konstante, ε_0 ir elektriskā konstante ($8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}^2$).



att. 2.3.2. Ilustrācija nanovadu uznešanai ar dielektroforēzi nehomogēnā elektriskā laukā; Attēls ņemts no ³³

Elektriskā lauka ģenerējošā sprieguma amplitūda¹³ un frekvence^{11,12}, elektrodu ģeometrija¹³, nanovadu koncentrācija šķīdumā³⁴, vides un nanovadu materiālu īpašības¹² ir svarīgākie parametri, kas ietekmēs dielektroforēzes iznākumu, tāpēc vēlāmos rezultātus ir iespējams panākt mainot šos parametrus.

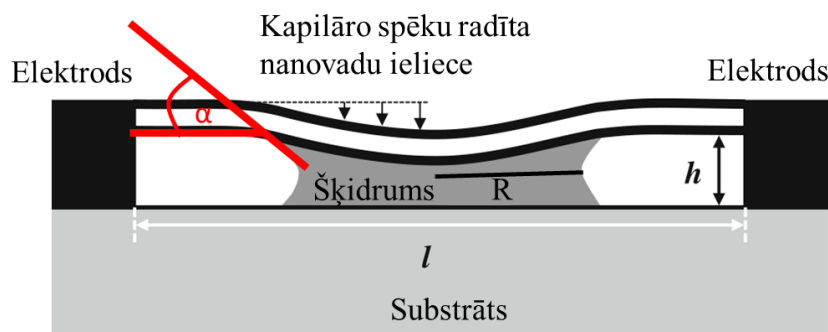
2.4. Kapilārie spēki

Viena izteikta problēma izmantojot dielektroforēzi nanovadu manipulācijām ir kapilāro spēku ietekme, kas var neatgriezeniski pielipināt nanovadu pie substrāta virsmas. Šie spēki veidojas, kad viela no šķidrās fāzes pāriet uz gāzes fāzi. Fāzes maiņas laikā daļa šķidruma nonāk starp nanovadu un substrāta virsmu (att. 2.4.1). Šķidrums žūšanas laikā saglabās minimālo virsmas laukumu ieliecoties, kā rezultātā veidosies spiediena atšķirība starp atmosfēru un ieliekto šķidrumu, un to apraksta vienādojums³⁵:

$$\Delta p = -\frac{2\gamma\cos(\alpha)}{h} \quad (5)$$

, kur Δp -spiediena atšķirība starp atmosfēru un ieliekto šķidrumu, γ -šķidruma virsmas spraigums, α -slapināšanās leņķis, h -attālums starp divām virsmām. Kapilārais spēks ir aprakstāms ar vienādojumu³⁵:

$$F_{cap} = \pi R^2 \frac{2\gamma\cos(\alpha)}{h} \quad (6)$$



att. 2.4.1. Ilustrācija šķidruma žūšanas laikā kapilāro spēku radīta brīvi stāvoša nanovadu ieliece substrāta virzienā; α -šķidruma slapināšanas leņķis, h -attālums starp nanovadu un substrāta virsmu, l -nanovada garums, R -šķidruma rādiuss; Attēls ņemts no ³⁵

Kā redzams pēc vienādojumiem (5 un 6), šis spēks ir atkarīgs no augstuma. Tāpēc uznesot nanovadus uz mikroelektrodiem, kuru augstumi ir tipiski 100-200 nm, tas būs ļoti ievērojams. Šī iemesla dēļ, ja nanovadi tiek uznesti uz NEM slēdža paredzētām mikroelektrodu struktūram ar dielektroforēzi, tad ir vajadzīga šķidruma žāvēšanas metode, kura neizraisīs nanovadu ieliekšanos un pielipšanu kapilāro spēku ietekmē. Viena no metodēm, kas to var izdarīt ir superkritiskā žāvēšana.

2.5. Superkritiskā žāvēšana

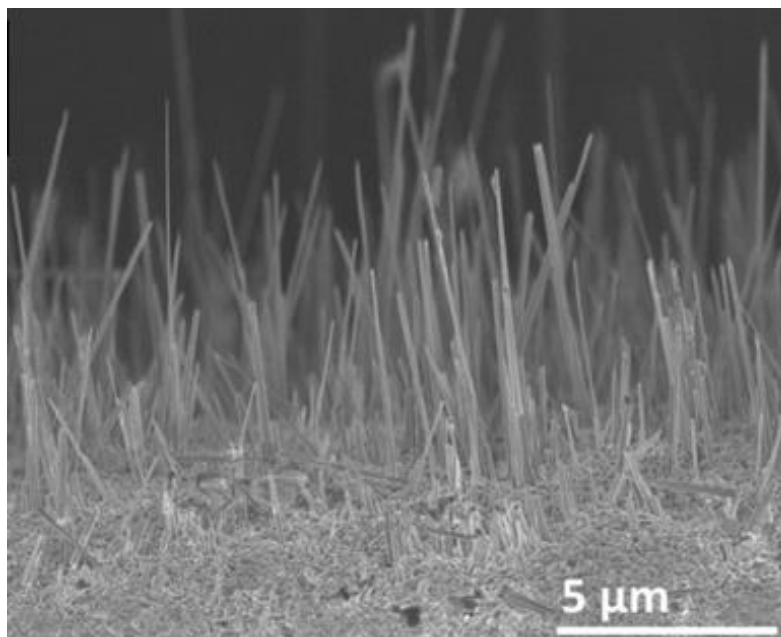
Superkritiskā žāvēšana izmanto ļoti neparastās superkritiskā šķidruma īpašības. Superkritiskais šķidrums ir vielas fāze, kas veidojas, kad viela sasniedz kritisko temperatūru un kritisko spiedienu. Šajā fāzē vielai piemīt gan šķidruma, gan gāzes īpašības. Viela būs blīva kā šķidrums, bet var izplesties un saspiesties kā gāze.³⁶ Šo īpašību dēļ, vielai pārejot no superkritiskā šķidruma fāzes uz gāzveida fāzi neveidosies kapilārie spēki, tāpēc tā var tikt izmantota nanostruktūru žāvēšanā.¹⁴ Vispopulārāk izmantotā viela superkritiskajā žāvēšanā ir Oglekļa dioksīds jeb CO_2 , jo ir zema kritiskā temperatūra (32°C), tā nav uzliesmojoša, kā arī šķidrā fāzē labi jauca ar metanolu, etanolu, izopropanolu, acetonu un citām ķīmijā plaši pielietotiem šķidrumiem.³⁶

Tipiski izmērcētus paraugus superkritiski žāvē vispirms nomainot šķidrumu, kurā paraugs atrodas ar šķidro(L) CO_2 , jo, piemēram, izopropanolam kritiskā temperatūra ir 235°C .³⁶ Šķidruma maiņa notiek atkārtoti skalojot paraugu ar L CO_2 . Pēc šķidruma maiņas, šķidro CO_2 , ar temperatūras un spiediena palīdzību, pārnēs superkritiskajā šķidruma fāzē, un pēc tam gāzes fāzē. Rezultātā paraugs tiek izžāvēts bez kapilāriem spēkiem.

3. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

3.1. Nanovadu sintēze ar termālās oksidēšanās metodi

Eksperimentos tika pielietoti CuO nanovadi, jo ir piemēroti NEM slēdžiem. Tie ir arī iegūstam lielā skaitā ar *augšupejošo* termālās oksidēšanās metodi (2.1.). Nanovadi tika iegūti Ķīmiskās fizikas institūtā karsējot vara foliju 500 °C uz 3.5 stundām gaisa vidē pie atmosfēras spiediena. (att. 3.1.1)



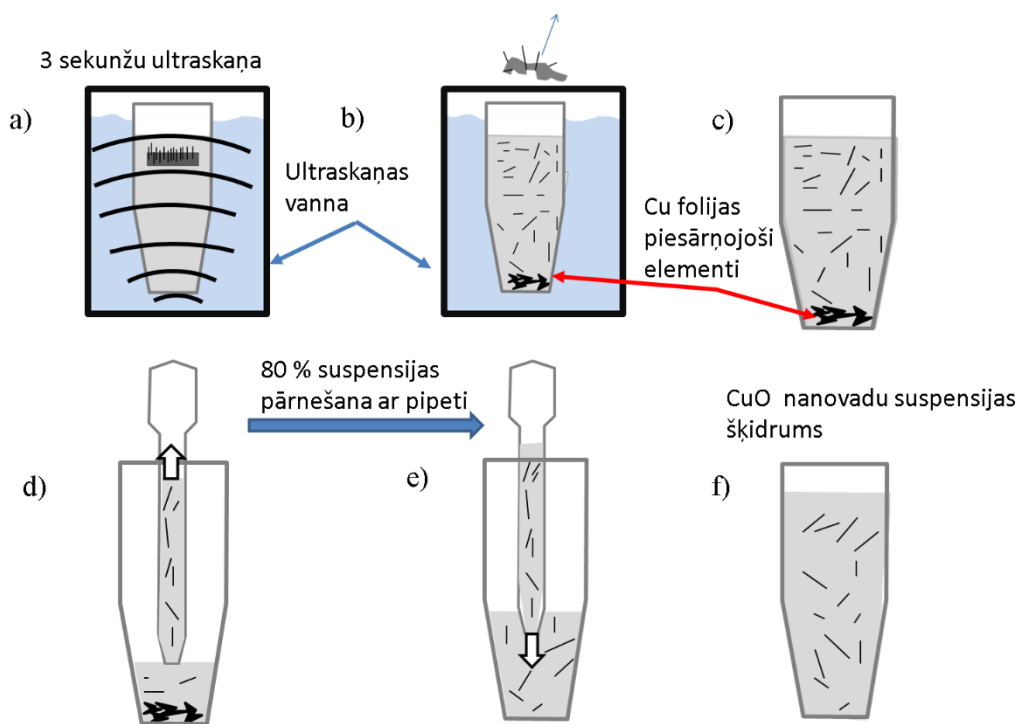
att. 3.1.1.SEM bilde ar termālās oksidēšanās iegūtiem nanovadiem uz Cu folijas

3.2. Nanovadu suspensijas sagatavošana

. Par šķīdrumu tika izvēlēts izopropanols jeb IPA, jo var tik izmantots superkritiskajā žāvēšanā. Lai izveidotu nanovadu suspensija, kas ir nepieciešama, lai veiktu dielektroforēzi, tika veikti sekojošie soļi:

1. Trauciņš (*Eppendorfa 2 ml*) ar iepildītu izopropanols un iemērcēta vara folija, uz kuras ir uzaudzēti CuO nanovadi(att. 3.1.1.), tika pārnesta uz ultraskaņas vannu (att. 3.2.1.a) .
2. Ultraskaņas vanna tika ieslēgta uz neilgu 3 sekunžu laiku, lai minimizētu šķīdruma piesārņošanu ar vara foliju elementiem. Ultraskaņas laikā CuO nanovadi no folijas virsmas tika norauti, un tie izkaisījās pa visu izopropanola šķīdrumu.
3. Pēc ultraskaņas, no trauciņa vara folija tika izņemta ārā. (att. 3.2.1.b un c)

4. Ultraskaņas laikā Cu piesārņojoši elementi nosēdās trauciņa apakšā, tādēļ ar pipeti tika pārliets augšējās trauciņā daļas 80 % šķidruma tilpumu uz jaunu trauku (att. 3.2.1.d,e), iegūstot tīru CuO nanovadu izopropanola suspensiju. (att. 3.2.1.f).



att. 3.2.1 .CuO nanovada suspensijas pagatavošanas soļu ilustrācija; a) Trauciņš ar CuO nanovadu apaugušu Cu foliju ultraskaņā 3s; b)Cu folijas izņemšana ārā no nanovadu suspensijas, c)CuO nanovadu IPA suspensija, kura apakšā nosēdušies Cu folijas elementi; d) un e) suspensijas pārlišana jaunā traukā ar pipeti; f) CuO IPA nanovada suspensija

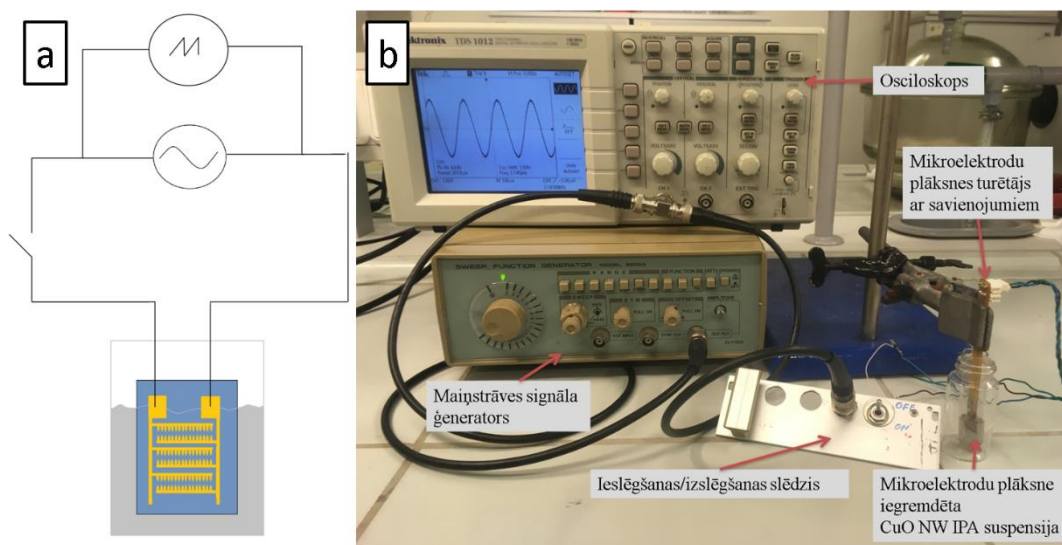
Rezultātā tika iegūts CuO nanovada suspensija. Tika novērots, ka CuO nanovadi sāk nosēties trauka apakšā pēc aptuveni 40 min (att. 3.2.2.), tādēļ katreiz pirms dielektroforēzes veikšanas, iegūto suspensiju sakratīja uz 1 min (MICROSPIN FV-2400), lai vienmērīgi izkaisītu nanovadus pa šķidrumu, kā arī paraugu ielika ultraskaņas vannā uz 3 s, lai nanovadus atdalītu vienu no otra.



att. 3.2.2. Nanovadu suspensijas sagatavošana pirms dielektroforēzes ar šķidruma kratīšanu un ultraskaņu

3.3. Dielektroforēzes veikšana

Eksperimentālais iestatījums (att. 3.3.1). Dielektroforēzes eksperimenta veikšanai tika izmantots maiņstrāvas signāla ģenerators (*Hung Chang Model 8205a*), kurš bija savienots ķēdē ar mikroelektrodu plāksni. Mikroelektrodu plāksne bija iemērcēta CuO nanovadu IPA šķīdumā. Signāla frekvences un sinusoīdā maiņstrāvas amplitūdas nolasišanā izmantots tika osciloskops (*Tektronix TDS 1012*), kurš bija savienots paralēli. Procesa kontrolēšanai tika izmantots virknes slēdzis ķēdē.



att. 3.3.1. Dielektroforēzes eksperimentu a) Shematiskais izkārtojums, b) Laboratorijas, NW-nanovadi, IPA –izopropanols

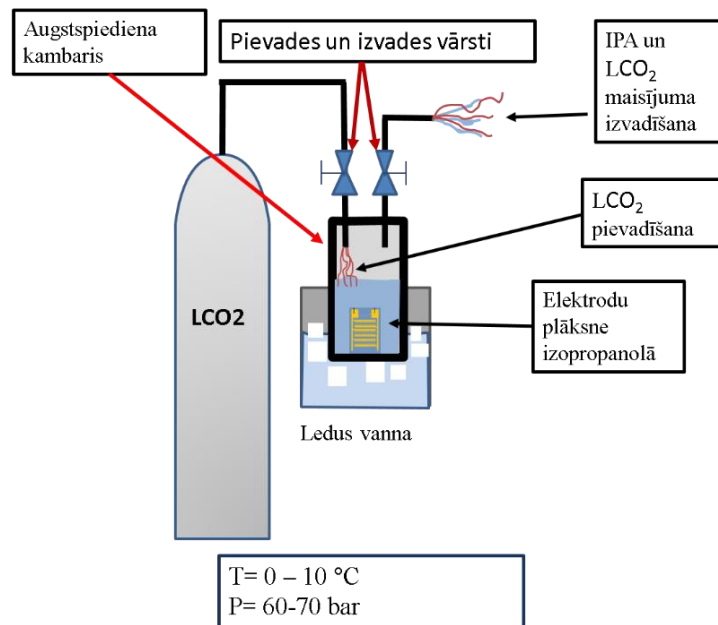
Dielektroforēzes procesa iznākuma atkarību no frekvences noteikšanai tika veikti vairāki eksperimenti ar viena CuO nanovadu IPA suspensiju pie dažādām frekvencēm intervālā starp 500 Hz un 500 kHz. Dielektroforēzes laiks (20 min) un maiņsprieguma amplitūda (5V p_k - p_k) šajos eksperimentus bija konstants.

Pēc tam tika veiktas dielektroforēzes pie divām atšķirīgām. maiņsprieguma amplitūdām (2.5 un 10 V $p_k - p_k$). Laiks palika konstants (20 min). Šie eksperimenti tika veikti bez superkritiskās žāvēšanas.

3.4. Superkritiskā žāvēšana

Lai novērstu kapilāro spēku ietekmi uz ar DEP uznestiem CuO nanovadiem, tika veikta superkritiskā žāvēšana, kura tika veikta divos posmos – vispirms izopropanola šķidrums tika aizvietots ar šķidro oglekļa dioksīdu jeb LCO₂ (att. 3.4.1), bet pēc tam supekritiskais CO₂ tika žāvēts.(att. 3.4.2 un att. 3.4.3) Izopropanola pārskalošana tika veikta pēc sekojošiem soļiem:

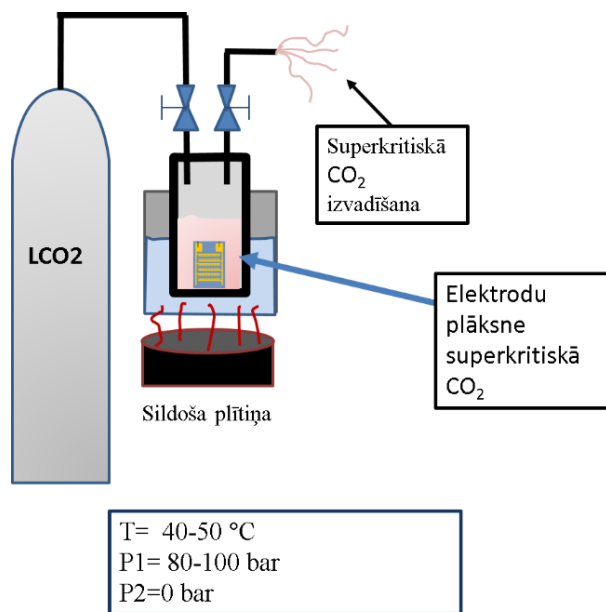
- 1) Mikroelektrodu plāksne pēc dielektroforēzes veikšanas no CuO nanovadu suspensijas tika strauji pārnesta uz atvērtu trauku ar tīru izopropanolu neļaujot plāksnei izžūt. Trauks pēc tam tika novietots augstspiediena kambarī (*BERGHOF BR 40*), kambaris stingri noslēgts.
- 2) Pēc tam augstspiediena kambaris tika iemērcēts ledus vannā, lai pazeminātu tā iekšējo temperatūra līdz 0-10 °C, kas ir optimāla temperatūra šķidrā CO₂ fāzes uzturēšanai. Temperatūras mērīšanā tika izmantots termopāris (AX-18B).
- 3) Pēc temperatūras pazemināšanas no šķidrā CO₂ balona (*Linde Group*) tika pievadīts šķidrā CO₂ līdz kambara iekšējais spiediens sasniedza 60-70 bar, kas ir optimāls spiediens šķidrās CO₂ fāzes uzturēšanai. Spiediens tika nolasīts no augstspiediena kambarī iebūvēta barometra.
- 4) Kad optimāla temperatūra un spiediens šķidrās CO₂ fāzes uzturēšanai tika sasniegts, tiek uzsākta skalošana, lai izopropanols tiktu aizvietots ar LCO₂. Šajā solī cauri kambara izvadīšanas un ievadīšanas vārstiem pamīšus tiek izvadīts šķidrā CO₂ un izopropanola maisījums, kā arī piegādāts papildus LCO₂ optimāla spiediena uzturēšanai. Skalošana tika veikta līdz brīdim, kad no kambara izvadīšanas vārstiem vairs novēroja tikai tīru šķidro CO₂.



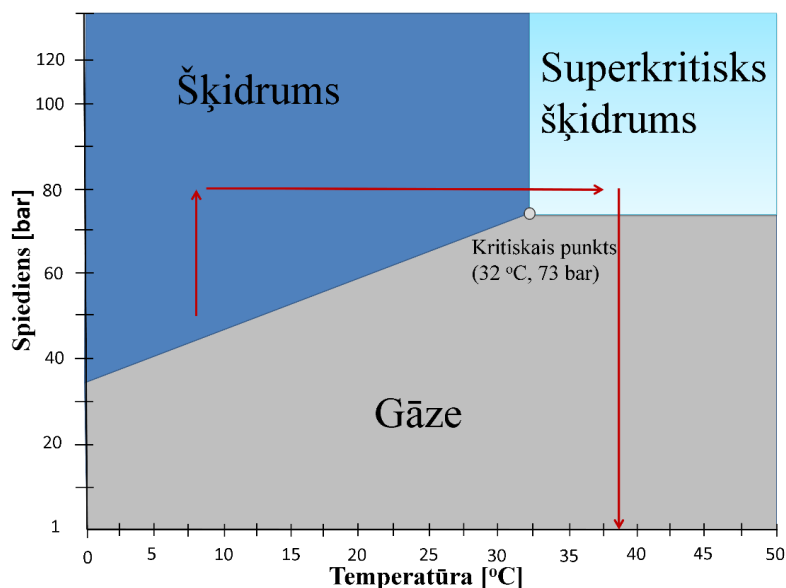
att. 3.4.1. Izopropanola šķidrums aizvietošana ar šķidro LCO₂ ; T temperatūra un P - spiediens

Otrais šī procesa posms ir augstspiediena kambarī esošā LCO₂ superkritiskā žāvēšana, kas tika veikta sekojoši:(att. 3.4.2)att. 3.4.2. **Ilustrācija superkritiskā žāvēšana ar šķidro LCO₂ ; T temperatūra, P1 sākotnējais spiediens, P2 beigu spiediens**

- 1) Augstspiediena kambarim tika pievadīts papildus LCO₂ līdz kambara spiediens ir 80 bar
- 2) Kambaris tiek izņemts no ledus vannas, un pārvietots traukā ar ūdeni, kurš tiek sildīts ar plītiņu līdz kambara iekšēja temperatūra sasniedz optimālu 40-50 °C. Spiediens kambarī līdz ar temperatūras pieaugumu, arī pieauga.
- 3) Šajā posmā CO₂ būtu jābūt superkritiskā šķidrums fāzē. Tad arī pakāpeniski no augstspiediena kambara ar izvadīšanas vārstiem tika izvadīts viss CO₂ uzturot konstantu temperatūru optimālajā 40-50 °C atzīmē.
- 4) Pēc tam augstspiediena kambaris var tikt atvērts un mikroelektrodu plāksne izņemta.



att. 3.4.2. Ilustrācija superkritiskā žāvēšana ar šķidro LCO₂ ; T temperatūra, P1 sākotnējais spiediens, P2 beigu spiediens



att. 3.4.3. Oglekļa dioksīda fāžu diagramma; Līnijas norāda aptuveno superkritiskā CO₂ žāvēšanas ceļu

3.5. Izmantotās iekārtas un vielas

Iekārtas: Augstas temperatūras krānsn *GSL-1100X*, ultraskaņas vanna *CT-405*, centrifūga - kratītājs *MICROSPIN FV-2400*, maiņsprieguma signāla ģenerators *Hung Chang Model 8205a*. Osciloskops *Tektronix TDS 1012*, augstspiediena kambaris *BERGHOF BR 40*, *Linde Group* 120 bar Superkritiskā šķidrums CO₂ balons, *AX-18B* termopāris, plītiņa, skanējošā elektrona mikroskops (SEM) *Hitachi S4800*.

Vielas: Vara folija 99 % tīrība, izopropanols.

4. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

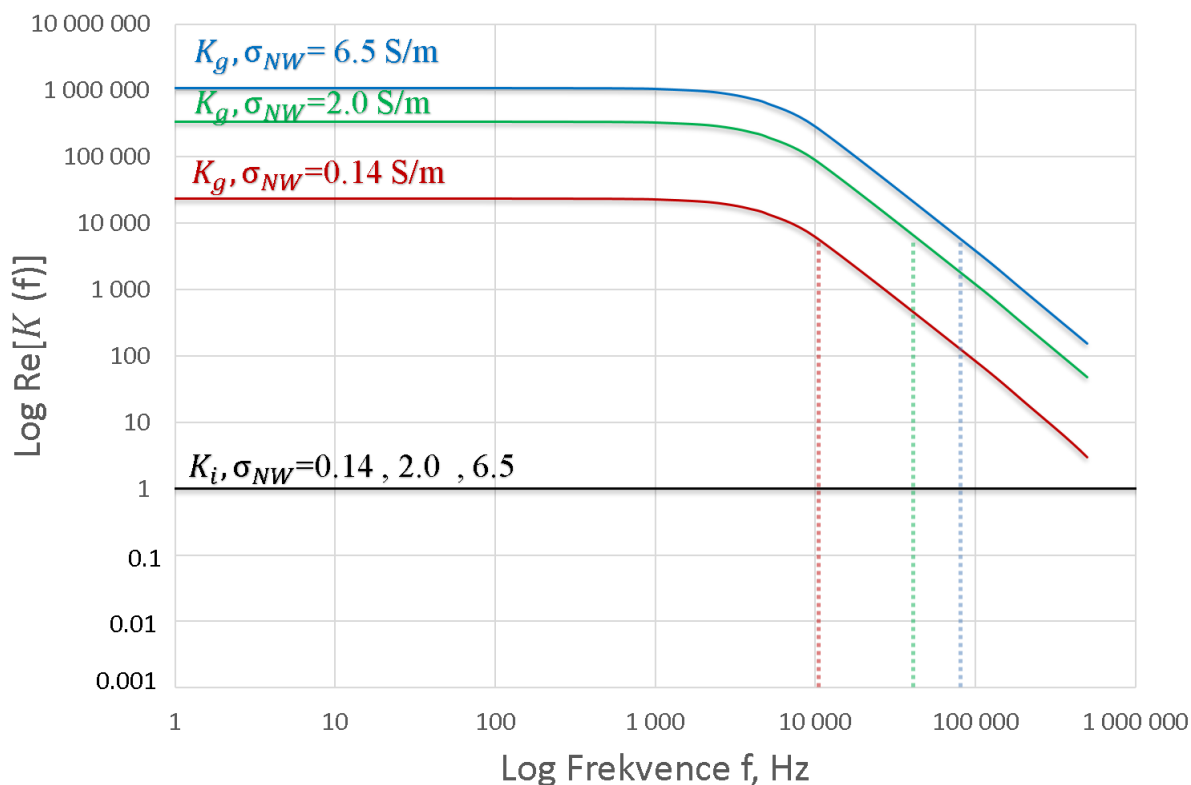
4.1. Eksperimentālās DEP frekvences diapazona noteikšana

Dielektroforēzes spēks ir lielākoties atkarīgs Klauziusa-Mosotti faktora reālās daļas. Šis faktors ir atkarīgs no nanovadu un šķidrās vides elektriskās vadītspējas, dielektriskās konstantes, kā arī no elektriskā lauka ģenerējošās sprieguma frekvences. Lai veiksmīgi veiktu nanovadu manipulāciju uz mikroelektrodiem, Klauziusa-Mosotti faktoram jābūt pozitīvam (pozitīva DEP). Pozitīvā DEP dielektroforēzes spēks būs vērsts pieaugušā elektriskā lauka intensitātes virzienā (virzienā uz mikroelektrodiem), tādēļ pētījums uzsākts ar pozitīvās dielektroforēze meklēšanu CuO nanovadu un izopropanola suspensijas gadījumā.

Pētījumi liecina^{11,12}, ka tādiem augsta garuma pret diametra attiecības objektiem kā nanovadiem ir jāņem vērā divas Klauziusa-Mosotti faktora vērtības, kuras raksturo rezultējošo dielektroforēzes spēku. Vienā gadījumā, kad nanovads būs orientēts paralēli elektriskā lauka gradientam (garās ass Klauziusa-Mosotti faktors, K_g), otrs kad nanovads būs orientēts perpendikulāri elektriskā lauka gradientam (īsās ass Klauziusa-Mosotti faktors, K_i).¹² Viens no šiem pētījumiem¹¹ empīriskā ceļā noteica, ka visaugstāko mikroelektrodu pāru savienojumu skaits ar nanovadiem notiek gadījumos, kad K_g pret K_i attiecība ir 3000. Izmantojot dielektriskās konstantes un elektriskās vadāmības izopropanolam (IPA) un CuO nanovadiem, tika meklēta frekvenci pie kuras šī attiecība ir 3000.

No literatūras avotiem atrastās dielektriskās konstantes un vadītspējas IPA bija attiecīgi ($\epsilon_m = 18.0$, $\sigma_m = 6 * 10^{-6}$ S/m³⁷), bet CuO nanovadiem ($\epsilon_{nw} = 10.5^{38}$). Meklējot CuO nanovadu vadītspēju (σ_{nw}), no literatūras avotiem tika iegūtas dažādas vērtības (2.0^{39} un 6.5^{40} S/m). Latvijas Universitātes Ķīmiskas fizikas institūtā veiktais CuO nanovada 2 punktu mērījumam šī vērtība tika noteikta, kā (0.14 S/m). Izmantojot šīs vērtības ar izteiksmēm (2)

un (3), tika aprēķinātas K_g , K_i (att. 4.1.1.).



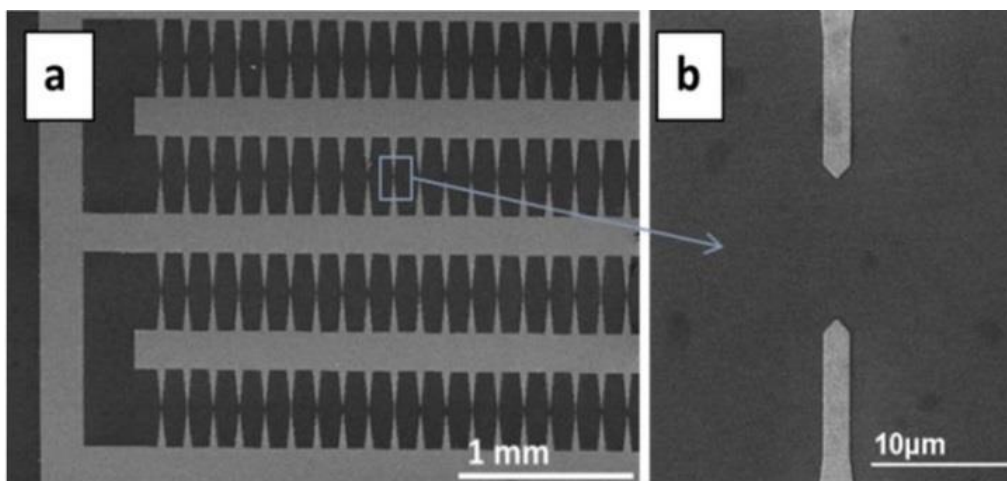
att. 4.1.1. CuO nanovadu garās K_g un īsās K_i ass Klauziusa-Mossoti faktoru atkarība no maiņsprieguma frekvences izopropanola šķīdumā. Rastītās vertikālās līnijas norāda, kur $K_g/K_i = 3000 \cdot \sigma_{nw}$ ir nanovadu vadītspēja

Salīdzinot garās un īsās ass Klauziusa-Mossotti faktora vērtības (att. 4.1.1.) ir redzams, ka pie zemām frekvencēm garās ass vērtība ir daudz augstāka, bet sāk strauji kristies pēc 1000 Hz. Tika aprēķināts, ka pēc 1MHz visos vadītspējas gadījumos K_g vērtība kļūst negatīva. Ir arī novērojams, ka pieaugot vadītspējai, pieaug garās ass vērtību amplitūdas. Īsās ass vērtība K_i visiem vadītspējas gadījumiem redzamajā apgabalā (att. 4.1.1.) ir tuvu viens ar vērā neņemamām izmaiņām. K_i vērtība kļūst negatīva pie 10 GHz lielas frekvences.

Tika aprēķinātas frekvences pie, kurām $K_g/K_i = 3000$, un tās ir 10 kHz, 50 kHz un 80 kHz. Pamatojoties uz šiem aprēķiniem tika izvēlēts pētīt dielektroforēzes iznākumus plašākā frekvenču reģionā no 500 Hz - 500 kHz, kas iekļauj šīs frekvences.

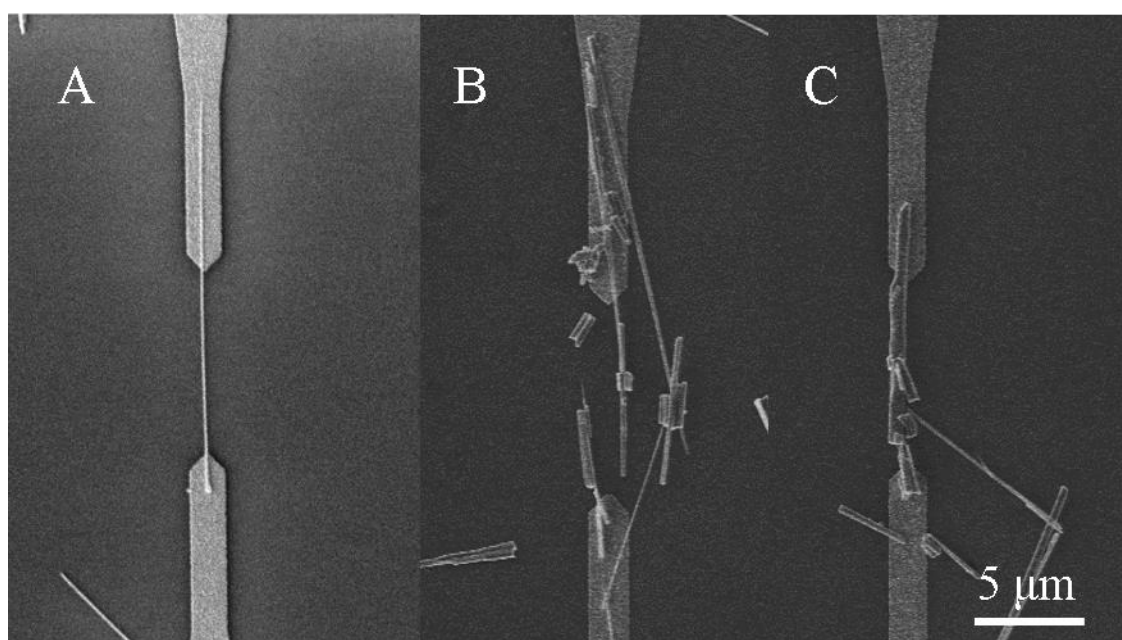
4.2. DEP iznākuma atkarība no maiņsprieguma frekvences

Dielektroforēze tika veikta uz litogrāfiski veidotām zelta mikroelektrodu struktūrām, kas atveido nanoelektromehānisko slēdžu mikroelektrodu dizainu uz Si/SiO₂ plāksnēm (att. 4.2.1.). Uz katras no plāksnēm ir 4 rindas, un katrā rindā ir 38 mikroelektrodu pāri.



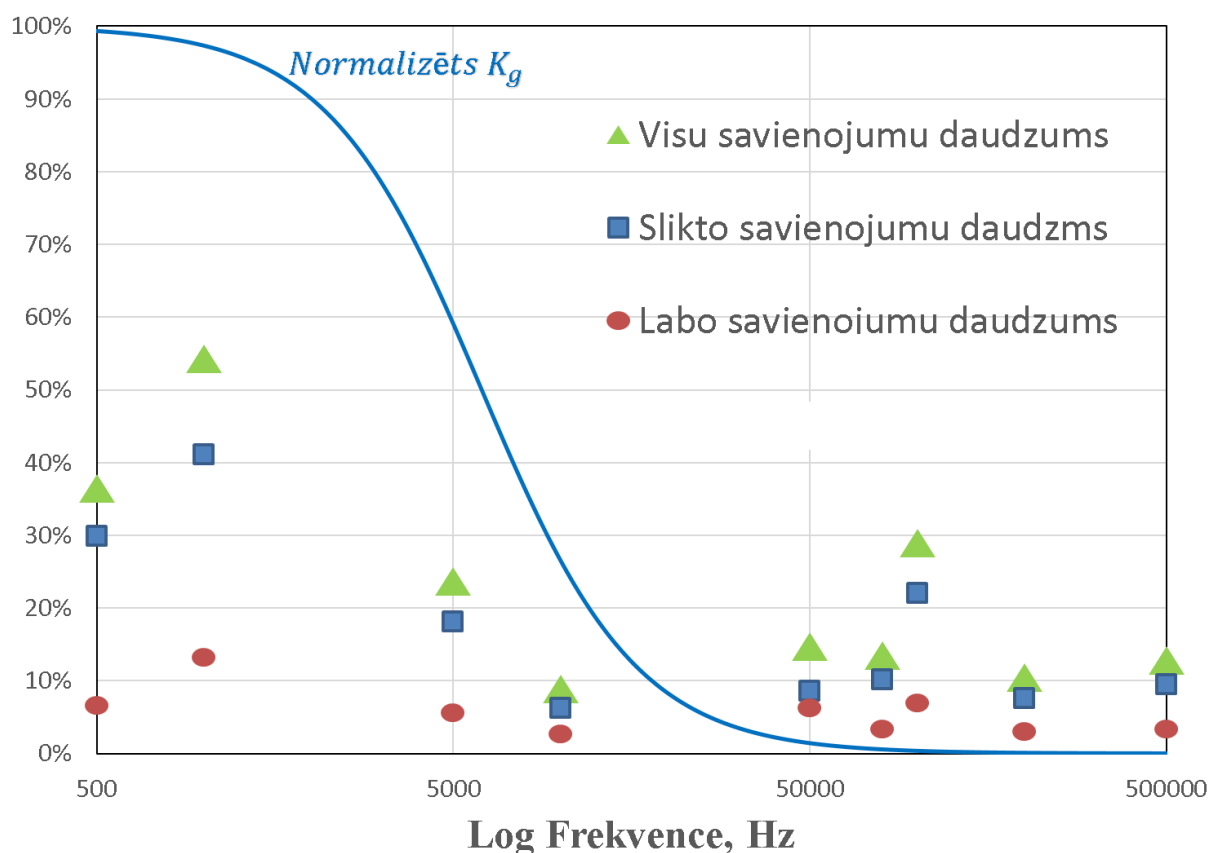
att. 4.2.1. a) Mikroelektrodu plāksne ar zelta mikroelektrodu struktūra uz Si/SiO₂ substrāta , b)Mikroelektrodu pāris; Bilde uzņemtas ar SEM

Pēc DEP veikšanas, uz katrām no plāksnes 152 mikroelektrodu pāru vietām ar SEM tika pārbaudīts vai mikroelektrodu pāris ir savienots ar nanovadiem, kā arī izvērtēs vai nanovadu savienojums ir vēlams NEM slēdžu gadījumam. NEM slēdžiem ir nepieciešami vienu nanovadu savienojuma ar mikroelektrodu pāriem (att. 4.2.2 A). Eksperimentāli iegūtie savienojumi tāpēc tika iedalīti divās kategorijās – labajos un sliktajos savienojumos. Labie savienojumi ir gadījumi, kad mikroelektrodu pārus savieno viens nanovads (att. 4.2.1. A), bet sliktie, kad savienojums veidojas ar vairākiem nanovadiem (att. 4.2.1.B), vai ar struktūrām, kuras nevar uzskatīt par nanovadiem (mikrodaļas ar biezumiem virs 1000 nm, (att. 4.2.1.C).



att. 4.2.2. A) Labs viena nanovada savienojums, B) Sliktas savienojumus, kas veidojas ar vairākiem nanovadiem, C) Sliktas savienojums ar mikrodaļiņām

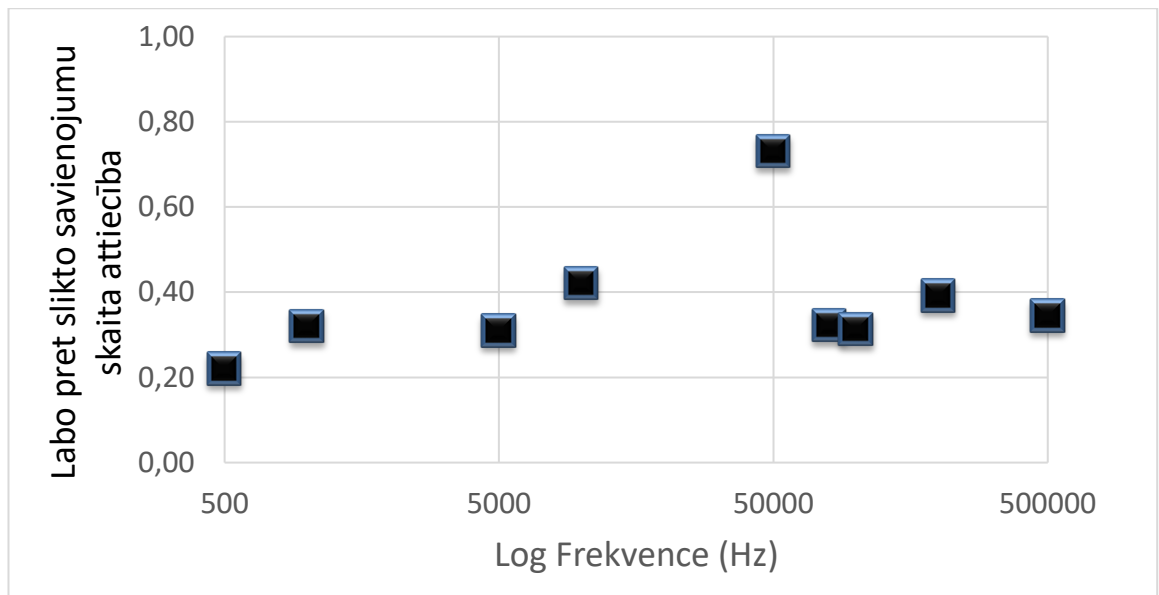
Pēc savienojumu skaita un kvalitātes noteikšanas katrā no eksperimentiem, iegūtie rezultāti tika apkopoti grafiski. Savienojumu daudzums tiek definēts, kā procentuāli izteikts savienoto mirkoelektrodu pāru skaits no kopējā mikroelektrodu pāru skaita.(att. 4.2.3)



att. 4.2.3 Savienojumu daudzuma atkarība no maiņsprieguma frekvences; Garās ass Klauziusa-Mossotti faktora vērtības K_g tika normalizētas pret tās maksimumiem un ir vienādas pie visām avotos iegūtām CuO nanovadu vadītspējām.

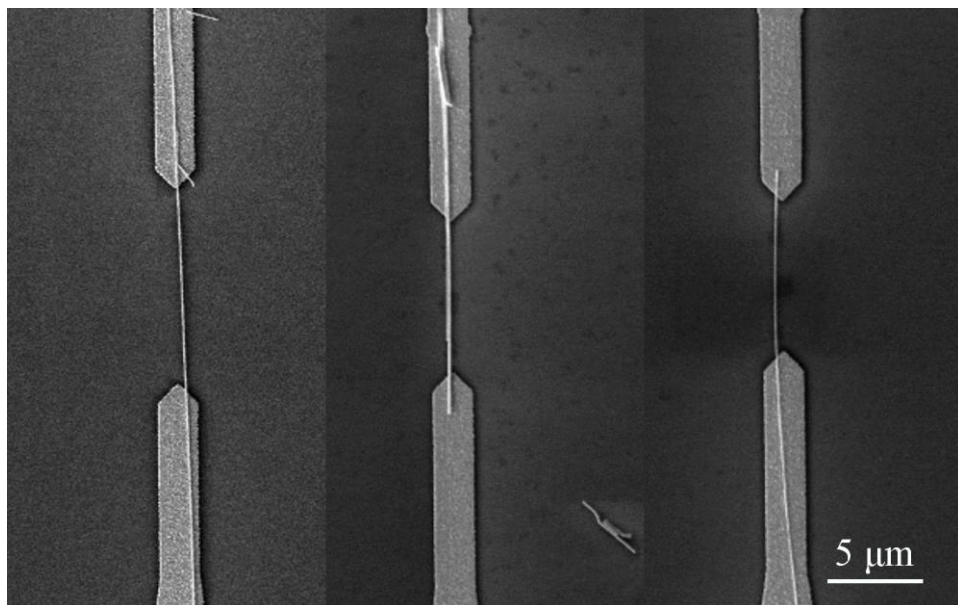
Veicot dielektroforēzi pie dažādām maiņsprieguma frekvencēm, apstiprinājās pozitīvas dielektroforēzes esamība izvēlētajā frekvenču diapazonā, kā arī tika iegūta savienojumu atkarība, gan savienojumu skaita, gan to kvalitātes ziņā. Lielāks savienojumu skaits ir novērojams pie frekvencēm (500 un 1000 Hz), kas var tikt skaidrots ar K_g vērtības straujo krišanos rezultējot samazinātā dielektroforēzes spēkā pēc 1000 Hz. Zemāka dielektroforēzes spēku rezultātā būtu mazāka iespējamība piesaistīt nanovadu uz mikroelektrodu pāriem, kas arī ir novērojams līdzīgos pētījumos ar pusvadītāju nanovadiem.¹²

Lai gan savienojumu skaits ir svarīgs faktors NEM slēdžu izstrādei, lai iegūtu kvalitatīvus slēdžus ir nepieciešami pēc iespējas vairāk labo nanovadu savienojumu bez sliktajiem. Tāpēc par labāko frekvenci tika izvēlēta frekvence, kuras labo un slikto savienojumu skaita attiecība bija visaugstākā.



att. 4.2.4. Labo pret slikto savienojumu daudzuma attiecība pie dažādām frekvencēm

Pēc grafika (att. 4.2.4) ir redzams, ka lielākoties šī attiecība ir starp 0.2 un 0.4, bet vienīgi pie 50 kHz šī attiecība ir krietni augstāka – 0.73. Pie šīs frekvences gandrīz puse no savienojumiem ir labi un vēlami NEM slēdžu gadījumam, tāpēc šī tika izvēlēta, kā optimāla frekvence, lai veiktu DEP priekš NEM slēdžu izveides. Daži piemēri veiksmīgajiem savienojumiem pie 50 kHz ir parādīti att. 4.2.5.



att. 4.2.5. Vienu vadu savienojumu piemēri pie 50 kHz

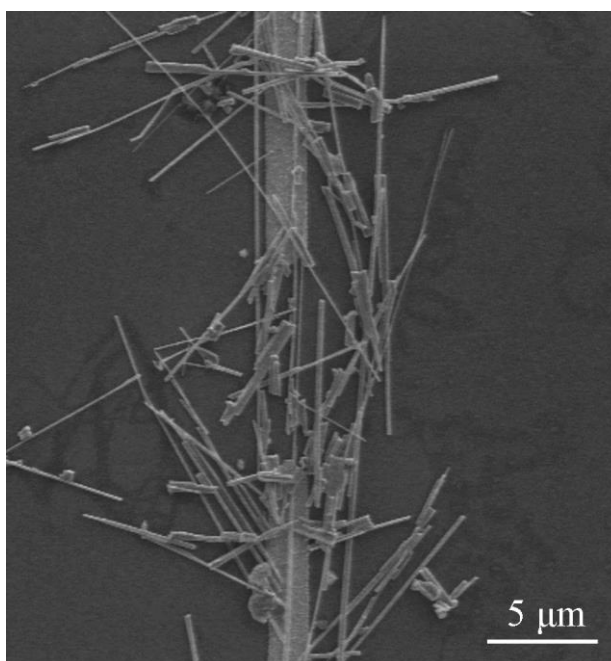
4.3. DEP iznākums atkarība no maiņsprieguma amplitūdas.

Pie 50 kHz frekvences papildus tika veikta dielektroforēze pie atšķirīgiem spriegumiem- 2.5 un 10 V p_k - p_k . Rezultāti apkopoti tabulā 1.

Dielektroforēzes eksperimentālais iznākums pie dažādām maiņsprieguma amplitūdām

Spriegums (V p_k - p_k)	Visu savienojumu daudzums	Labo pret slikto savienojuma skaita attiecība
2.5	28 %	0.83
5	15 %	0.73
10	100 %	0.00

Redzams, ka pie 2.5 V p_k - p_k savienojumu daudzums, kā arī labo pret slikto savienojuma attiecība ir nedaudz augstāka, kā pie 5V, bet pie 10 V p_k - p_k visi mikroelektrodu pāri tika savienoti ar vairāku nanovadu masīviem (att. 4.3.1.). Citos pētījumu rezultātos arī ir novērota uznesto nanovadu masīvu veidošanās pie augstākām maiņsprieguma amplitūdām uz mikroelektrodu pāriem¹³, un var tikt skaidrots ar elektriskā lauka intensitāte pieaugumu pie lielākiem spriegumiem. Kopumā ir redzams, ka pieliktajam spriegumam ir liela ietekme uz nanovadu savienojuma skaitu un to kvalitāti.

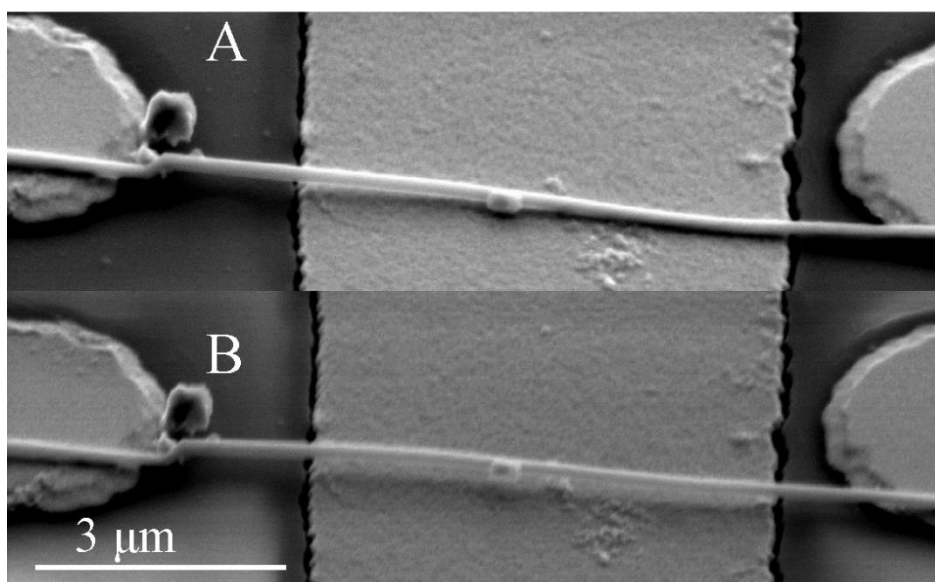
att. 4.3.1. SEM attēls ar tipisku nanovadu masīvu pie 10 V p_k - p_k

4.4. Superkritiskā žāvēšana

NEM slēdžu gadījumā uznestiem nanovadiem jābūt brīvi stāvošiem uz mikroelektrodiem nepieskaroties mikroelektrodu substrāta un pamatnes elektrodu

virsmām, taču dielektroforēzes manipulācija notiek šķidrā vidē, kur šķidruma žūšanas laikā kapilārie spēki nanovadus ielieks substrāta virzienā, kur tas veidos kontaktu ar pamatnes elektrodu. Kontakta vietā adhēzijas spēki var šo nanovadi neatgriezeniski pielipināt izjaucot NEM slēdzi.(att. 4.4.1.A)

Lai pārbaudītu kapilāro spēku iedarbību, plāksni atkārtoti iegremdēja IPA, pēc tam ļaujot šķidrumam iztvaicēt. Šajā gadījumā nanovads tika ieliekts, kā arī tas pielipa pie mikroelektrodu virsmas. (att. 4.4.1. A).Lai pārbaudītu superkritiskās žāvēšanas iespējām novērst kapilāros spēkus, uz mikroelektrodu plāksnes ar augstiem mikroelektrodiem, ar dielektroforēzi tika uzests nanovads, un plāksne pēc tam izžāvēta pēc eksperimentālās daļas aprakstītiem superkritiskās žāvēšanas procedūras (apakšnodaļa 3.4). Rezultātā uznestais nanovads nepieskaras apakšējam elektrodam. (att. 4.4.1. B).

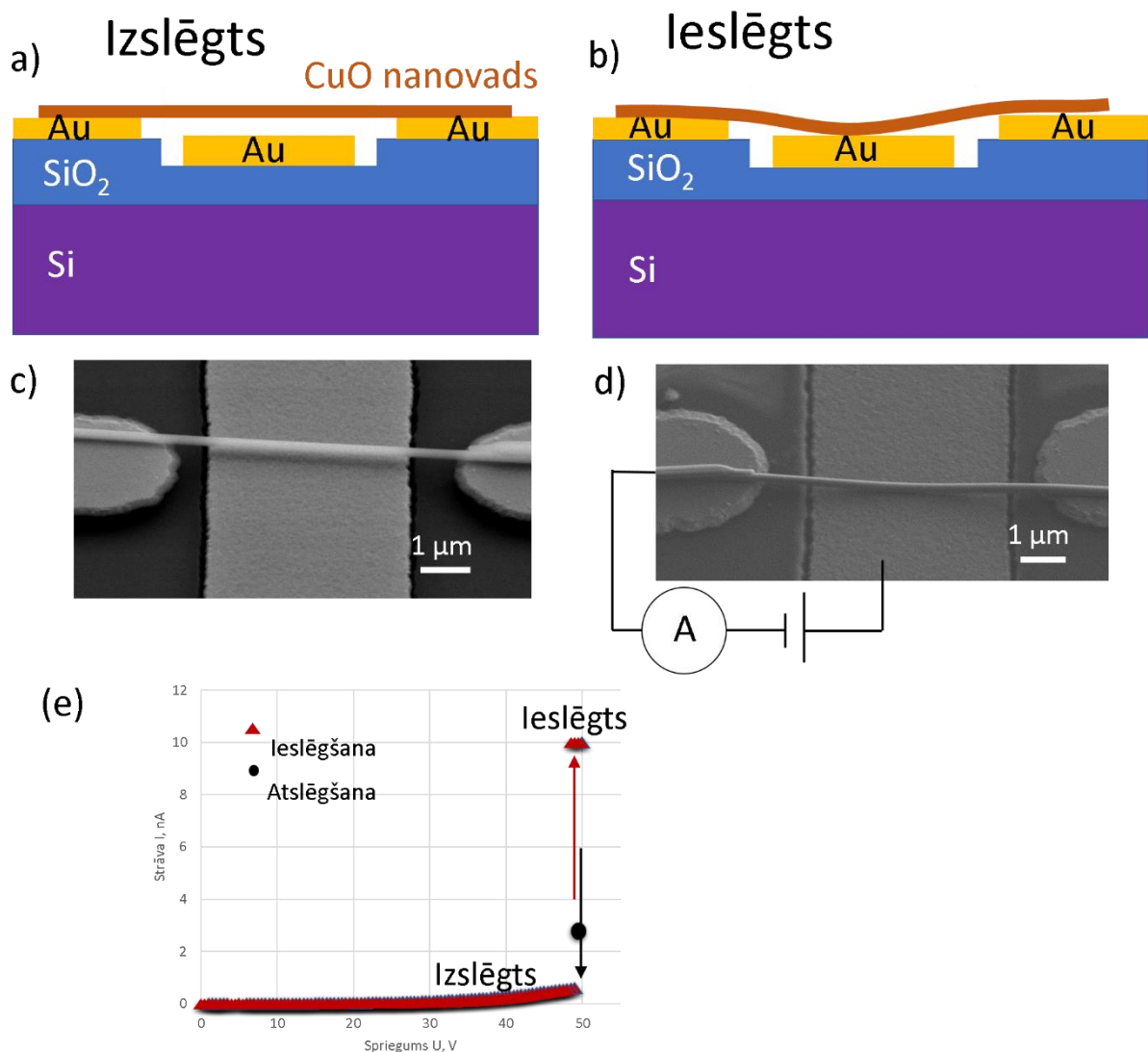


att. 4.4.1. Ar dielektroforēzi uzests CuO nanovads 120 nm augstumā virs mikroelektrodu; , A)Pēc parastās žāvēšanas. B)Pēc superkritiskās žāvēšanas; Bilde uzņemta SEM 50 ° leņķī

Šie rezultāti apstiprina superkritiskās žāvēšanas efektivitāti kapilāro spēku novēršanai, kā arī pamato, vajadzību pēc superkritiskās žāvēšanas NEM slēdžu izveidei ar dielektroforēzi

4.5. CuO nanovada NEM slēdzis

Balstoties uz iepriekšējās apakšnodaļas aprakstītajiem rezultātiem, tika veikta nanovadu uznešana ar dielektroforēzi uz NEM slēdža mikroelektrodiem pie 50 kHz frekvences..



att. 4.5.1. Shematiska NEM slēdža ilustrācija: a)izslēgtā, b)ieslēgtā stāvoklī; c) DEP uzņests CuO nanovads uz mikroelektrodu pāra noteces un izteces, izslēgts stāvoklis, SEM attēls 35° leņķī; d) nanovads kontaktā ar aizvaru elektrodu, ieslēgts stāvoklis, SEM attēls 35° leņķī; e) NEM slēdža strāvas-sprieguma raksturliktne;

Attēlā att. 4.5.1. c un d redzamais nanovads ar 220 nm diametru, un 20 μm garumu. Attālums mikroelektrodu noteces un izteces elektrodēm ir 6 μm . Augstums starp mikroelektrodu pāri un pa vidus esošo aizvara (gate) elektrodu ir 120 nm. NEM slēdža darbība tika raksturota uzņemot plūstošās strāvas atkarību no pieliktā sprieguma (att. 4.5.1.e).

Pakāpeniski palielinot spriegumu ar 0.5 V lielu soli starp mikroelektrodu pāri un aizvaru elektrodu, tika panākta nanovada ielekšana kontaktā ar aizvaru elektrodu pie 48.5 V liela sprieguma noslēdzot ķēdi (att. 4.5.1.d). Pirms ielekšanas kontaktā, ir vērojama neliela strāvas palielināšanās, kas liecina par iespējamu elektronu tunelēšanos, kad nanovads sāk pietuvoties aizvaru elektrodam. Ieslēgšanās brīdī ir vērojams straujš plūstošās strāva pieaugums (att. 4.5.1.e). NEM slēdzis tika atslēgts pakāpeniski samazinot pielikto spriegumu,

un atslēgšanās brīdī pie 49 V nanovads atlec no kontakta ar aizvara elektrodu strauji samazinot plūstošo strāvu (att. 4.5.1.e.).

Kopumā ir demonstrēta dielektroforēzes pielietojamība individuālu nanovadu manipulācijām NEM slēdžu izveidei. Nākotnē tiek plānots samazināt NEM slēdža ieslēgšanās , kas var tikt panākts izmantojot mazāka diametru nanovadus, kā arī pielietojot oscilējošu elektrisko lauku.

5. SECINĀJUMI

- Ar dielektroforēzes manipulētu nanovadu savienojuma daudzums un kvalitāte ir atkarīgi no frekvences un pieliktā sprieguma, tāpēc dielektroforēzes iznākums var tikt mainīts ar šiem parametriem
- Superkritiskā žāvēšana ir efektīva metode kapilāro spēku radītai nanovadu deformācijas un pielipšanas pie pamatnes novēršanā, kad nepieciešams savienot mikroelektrodu pārus ar dielektroforēzi
- Ar dielektroforēzi pārnesti nanovadi ir izmantoti NEM slēdža prototipa veidošanai

6. IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

1. Gao, L.*u.c.* Passivated Single-crystalline CH₃NH₃PbI₃ Nanowire Photodetector with High Detectivity and Polarization Sensitivity. **16**(12).7446-7454.(2016).
 2. Kim, K. *u.c.* Silicon nanowire biosensors for detection of cardiac troponin I (cTnI) with high sensitivity. *Biosens. Bioelectron.***77**(15).695-701.(2015).
 3. Kim, Y., Hwang, I., Kim, S., Lee, C. & Lee, J. Sensors and Actuators B : Chemical CuO nanowire gas sensors for air quality control in automotive cabin. **135**. 298–303 (2008).
 4. Loh, O. Y. & Espinosa, H. D. Nanoelectromechanical contact switches. *Nat. Nanotechnol.* **7**. 283–295 (2012).
 5. Jasulaneca, L., Kosmaca, J., Meija, R., Andzane, J. , Erts, D. Review: Electrostatically actuated nanobeam-based nanoelectromechanical switches – materials solutions and operational conditions. *Beilstein J. Nanotechnol.* **9**. 271–300. (2018).
 6. Zhou, Y., Thekkel, S. , Bhunia, S. Low Power FPGA Design Using Hybrid CMOS-NEMS Approach. Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design. 14-19.(2007).
- Zhou, Yu & Thekkel, Shijo & Bhunia, Swarup. (2007). Low power FPGA design using hybrid CMOS-NEMS approach. Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design. 14-19. 10.1145/1283780.1283785.
7. Thormann, W., Bosch, P. Van Den & Bond, A. M. Voltammetry at Linear Gold and Platinum Microelectrode Arrays Produced by Lithographic Techniques. *Anal.Chem.***57**(14). 2764–2770. (1985).
 8. Jiang, X., Herricks, T. & Xia, Y. CuO Nanowires Can Be Synthesized by Heating Copper Substrates in Air. *Nano Lett.* **2**.1333–1338 (2002).
 9. Pohl, H. A. The motion and precipitation of suspensoids in divergent electric fields. *J. Appl. Phys.* **22**. 869–871 .(1951).
 10. Freer, E. M., Grachev, O., Duan, X., Martin, S. , Stumbo, D. P. High-yield self-limiting single-nanowire assembly with dielectrophoresis. *Nat. Nanotechnol.* **5**. 525–530(2010).

11. Collet, M. *u.c.* Large-Scale Assembly of Single Nanowires through Capillary-Assisted Dielectrophoresis. *Advanced Materials*. **27**(7).(2014).
12. Raychaudhuri, S., Dayeh, S. A., Wang, D. , Yu, E. T. Precise semiconductor nanowire placement through dielectrophoresis. *Nano Lett.* **9**.2260–2266.(2009).
13. Boote,J.J., Evans,S.D.Dielectrophoretic manipulation and electrical characterization of gold nanowires. *Nanotechnology*.**16**(9).(2005).
14. Namatsu, H., Yamazaki, K.,Kurihara, K.Supercritical drying for nanostructure fabrication without pattern collapse.*Microelectronic Engineering*. **46**. 129–132.(1999).
15. Yang,P.,Yan,Ruoxue,Y.,Fardy,M. (2011).Semiconductor Nanowire:What's Next?. *Nano Letters*. **10**(5).1529-1536.(2010).
16. Mathur, S., Shen, H., Sivakov, V. , Werner, U. Germanium Nanowires and Core - Shell Nanostructures by Chemical Vapor Deposition of [Ge (C 5 H 5) 2]. *Chemistry of Materials*.**16**(12).2449–2456.(2004).
17. Zhao, J., Buia, C., Han, J. & Lu, J. P. Quantum transport properties of ultrathin silver nanowires.*Nanotechnology*. **14**.(2002).
18. Smith, P. A. *u.c.* Electric-field assisted assembly and alignment of metallic nanowires Electric-field assisted assembly and alignment of metallic nanowires. *Applied Physics Letters*. **77**(9). 1399-1401. (2000).
19. Whitney,T. M., Searson, P. C., Jiang J. S., Chien,C. L. Fabrication and Magnetic Properties of Arrays of Metallic Nanowires.*Science*.**261**(5126).1316-9.(1993).
20. Saulig-Wenger, K., Cornu, D., Chassagneux, F., Miele, P. , Multimate, L. Direct synthesis of amorphous silicon dioxide nanowires and helical self-assembled nanostructures derived therefrom.*Journal of Materils Chemistry*. 3058–3061 (2003).
21. Durrani, S. K., Khan, Y., Ahmed, N., Ahmad, M. , Hussain, M. A. Hydrothermal Growth of Calcium Titanate Nanowires from Titania.*Iranian Chemical Society*. **8**. 562–569.(2011).
22. Lieber, C. M. , Wang, Z. L. Functional Nanowires. *MRS Bulletin*. **32**(2). 99–108. (2007).
23. Shen, G.,Cheuh,.Y,Lockwood,D.J.*Nanowire Electronics*. Nodała 3.1.1

24. Juhasz, R., Elfstro, N. , Linnros, J. Controlled Fabrication of Silicon Nanowires by Electron Beam Lithography and Electrochemical Size Reduction. *Nano Letters*. **5**(2). 275-280. (2005)..
25. Wu, Y. , Yang, P. Direct Observation of Vapor - Liquid - Solid Nanowire Growth. *Journal of the American Chemical Society*. **123**(13).3165–3166. (2001).
26. Dindar, A.,Roman, S. An Introduction to NanoWires And Their Applications. Pieejams:
http://www.southalabama.edu/engineering/ece/faculty/akhan/Courses/Nanotechnology-summer05/nanowires_presentation.pdf.
27. Filipic,G.,Cvelbar,U.Copper oxide nanowires : a review of growth. *Nanotechnology*.**23**(19).(2012).
28. Lee, T., Bhunia, S. , Mehregany, M. Electromechanical Computing at 500 ° C with Silicon Carbide. *Science*. **329**. 1316-8. (2010).
29. Jonsson, L. M., Axelsson, S., Nord, T., Viefers, S. & Kinaret, J. M. High frequency properties of a CNT-based nanorelay. *Nanotechnology*. **15**.1497. (2004).
30. Li, Q. *u.c.* Precise Alignment of Single Nanowires and Fabrication of Nanoelectromechanical Switch and Other Test Structures. *IEEE Transactions on Nanotechnology*.**6**.256–262. (2007).
31. Papadakis, S. J., Gu, Z. , Gracias, D. H. Dielectrophoretic assembly of reversible and irreversible metal nanowire networks and vertically aligned arrays. *Appl. Phys. Lett*. **88**. 25–28 (2006).
32. Duchamp, M. *u.c.* Controlled positioning of carbon nanotubes by dielectrophoresis: Insights into the solvent and substrate role. *ACS Nano* **4**. 279–284 (2010).
33. Maijenburg, A. W. *u.c.* Dielectrophoretic alignment of metal and metal oxide nanowires and nanotubes : A universal set of parameters for bridging prepatterned microelectrodes. *J. Colloid Interface Sci*. **355**. 486–493. (2011).
34. Dong, L. *u.c.* Dielectrophoretically Controlled Fabrication of Single-Crystal Nickel Silicide Nanowire Interconnects. *Nano Lett*. **5**(10). 2112-2115. (2005).
35. Mann, D.,Jeong, K. Y. *Nanowire Field Effect Transistors : Principles and*

Applications. Nodała 5.1.4.4

36. Supercritical Drying. Pieejams: <http://www.aerogel.org/?p=345>.
37. Shell Chemicals, Isopropyl Alcohol. Technical Datasheet. Pieejams: https://www.shell.com/business-customers/chemicals/our-products/solvents-chemical/alcohols/_jcr_content/par/tabbedcontent/tab_2059969138/textimage.stream/1460023056315/aaeae8596c242531773e29e5d6c63faadd13b672/ipa-s1111-na-070416.pdf
38. Wu, J. Single CuO Nanowires Electrical Properties and Application on Photoelectrochemical Water Splitting. (2014).
39. Zappa, D. *u.c.* Integration of ZnO and CuO nanowires into a thermoelectric module. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. **5**, 927–936. (2014).
40. Walia, S. *u.c.* Progress in Materials Science Transition metal oxides – Thermoelectric properties. *Prog. Mater. Sci.* **58**, 1443–1489. (2013).
41. Li, M., Li, W. H., Zhang, J., Alici, G. , Wen, W. A review of microfabrication techniques and dielectrophoretic microdevices for particle manipulation and separation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **47 (6)**, 1-29. (2014).

Bakalaura darbs “Nanovadu sakārtošana uz elektrodiem ar dielektroforēzi nanoelektromehānisku slēdžu izveidei.” 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: Matīss Mārtiņš Ramma

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai:

Darba vadītājs: Dr.Chem. Donāts Erts

Darba vadītāja: Dr.Phys. Jeļena Kosmača

Recenzents: Dr.Phys. Anatolijs Šarakovskis

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā _____.2019.

Dekāna pilnvarotā persona: vecākā metodiķe Dzintra Holsta

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījumu komisijas sēdē
_____.2019. protokols _____