

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
ĶĪMIJAS FAKULTĀTE

**GRAFĒNA UN BISMUTA SELENĪDA  
HETEROSTRUKTŪRU SINTĒZE UN ĪPAŠĪBAS**

BAKALaura DARBS

Autors: **Aleksandrs Nečiporenko**

Studenta apliecības Nr.: an15016

Darba vadītājs: asoc. prof. Dr.chem. Donāts Erts,

Mag. chem. Margarita Baitimirova

RĪGA

2018

## ANOTĀCIJA

**Grafēna un bismuta selenīda heterostrukturu sintēze un īpašības** . Nečiporenko A., zinātniskie vadītāji asoc. prof. Dr.chem. Donāts Erts., Mag. chem. Margarita Baitimirova. bakalaura darbs, 31 lappuses, 13 attēli, 2 tabulas, 37 literatūras avoti, 1 pielikums. Latviešu valodā.

Darbā ir veikta  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /grafēns heterostrukturu sintēze ar fizikālo tvaiku nogulsnešanas metodi, kā izejas materiālu izmantojot kristālisku  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Darbā tika pētītas  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostruktūru veidošanas sākumstadijas uz dažādos veidos apstrādāta grafēna un vizlas. Iegūtas heterostruktūras tika analizētas ar skenējošo elektronu mikroskopu un atomspēku mikroskopu.

GRAFĒNS, BISMUTA SELENĪDS, FIZIKĀLĀ TVAIKU NOGULSNĒŠANA

## ABSTRACT

### **Synthesis and properties of Graphene and bismuth selenide heterostructures.**

Nechiporenko A., scientific supervisors assoc. prof. Dr.chem. Donats Erts., Mag. chem Margarita Baitimirova. Bachelor work, 31 pages, 13 pictures, 2 tables, 37 literature sources, 1 appendix. In Latvian.

In this work heterostructures of  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  were synthesized on graphene by physical vapor deposition using crystalline  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  as source material. The initial stages  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostructures formations on graphene were studied. The obtained heterostructures were analyzed using scanning electron microscope and atomic force microscope.

GRAPHENE, BISMUTH SELENIDE, PHYSICAL VAPOR DEPOSITION

# SATURS

APZĪMĒJUMU SARAKSTS.....	5
IEVADS .....	6
1.LITERATŪRAS APSKATS .....	7
1.1 Grafēns.....	7
Grafēna ķīmiskas īpašības. ....	7
Grafēna iegūšanas metodes. ....	8
1.2 Bismuta selenīds .....	11
1.2.1 Bismuta selenīds ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ) un tā īpašības .....	11
1.2.2 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ nanostruktūru sintēze.....	12
2.1Izmantotā aparatūra, trauki un reaģenti .....	15
2.2 Grafēna pamatņu sagatavošana .....	16
2.2.1 Vara pamatņu sagatavošana un grafēna KTN sintēze uz tām .....	16
2.2.2 Vara šķīdināšana.....	17
2.2.3 PMMA slāņa šķīdināšana .....	17
2.2.4 Grafēna atkvēlināšana.....	17
2.4 Heterostruktūru $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /Grafēns sintēze .....	19
3.REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS .....	21
SECINĀJUMI .....	24
IZMANTOTĀ LITERATŪRA .....	25
Pielikumi.....	30
1.pielikums .....	30

## APZĪMĒJUMU SARAKSTS

AFM – atomspēku mikroskops

FTN – fizikālā tvaiku nogulsnešana

G – grafēns

ĶTN – ķīmiskā tvaiku nogulsnešana

PMMA - Poli(metilmetakrilāts)

SEM – skenējošais elektronu mikroskops

## IEVADS

Bismuta selenīds ir ideāls topoloģiskais izolators, kā arī termoelektriskais materiāls. Tam ir perpektīvs pielietojums termoelektrikas, nanotehnoloģiju, spintronikas un kvantu datoru attīstībā. Grafēns kā substrāts ir ideāls kandidāts  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  sintēzei, jo grafēna kristālrežģis izmēros ir samērā līdzīgs  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  kristālrežģimsakrīt [1]. Grafēns šādās heterostruktūrās var kalpot ne tikai kā substrāts, bet arī kā lokans, caurspīdīgs un augsti elektrību vadošs elektrods.  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /grafēns heterostruktūrām iespējams plašs pielietojums nanoierīču ražošanā un attīstībā [1].

Šajā darba tiek pētītas  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /grafēns heterostruktūru sintēzes sākumstadijas, lai saprast vai vienmērīgāks  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  pārklājums veidojas uz grafēna, kas pēc uzsintezēšanas tiek atkvēlināts vai netiek atkvēlināts. Līdz šim zinātniskajās datubāzēs nav sastopami pētījumi par  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  pārklājumu sintēžu sākumstadijām, tādēļ šo darbu var uzskatīt par novitāti.

**Darba mērķis:** Izpētīt sākumstadijas  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /grafēns heterostruktūru sintēzei ar fizikālu tvaiku nogulsnešanas metodi uz dažādi iegūtām grafēna pamatnēm.

### **Darba uzdevumi:**

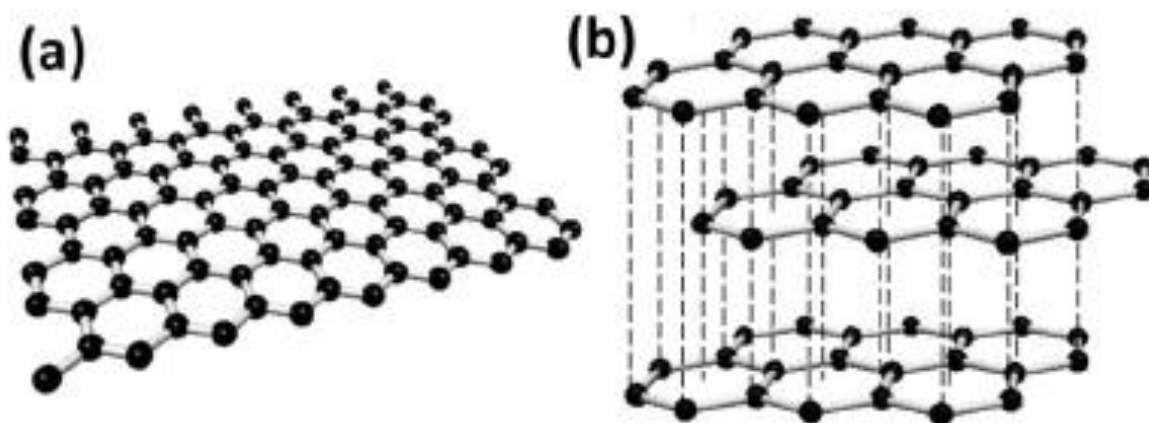
1. Sagatavot dažāda veida grafēna pamatnes priekš  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  sintēzes;
2. Izmantojot fizikālo tvaiku nogulsnešanas metodi sintezēt  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /grafēns heterostruktūras;
3. Iegūto heterostruktūru morfoloģiju un biezumu izpētīt ar skenējošo elektronu mikroskopiju un atomspēku mikroskopiju;
4. Secināt, kā grafēna atkvēlināšana ietekmē iegūto heterostruktūru morfoloģiju, biezumu un kvalitāti.

# 1.LITERATŪRAS APSKATS

## 1.1 Grafēns

Grafēns ir viena atoma plāns slānis veidots no  $sp^2$  – hibridezētiem oglekļa atomiem, kas ir sakārtoti divdimensionālā režģī, kas ir veidots no heksagoniem kā parādīts 1.1. attēlā.

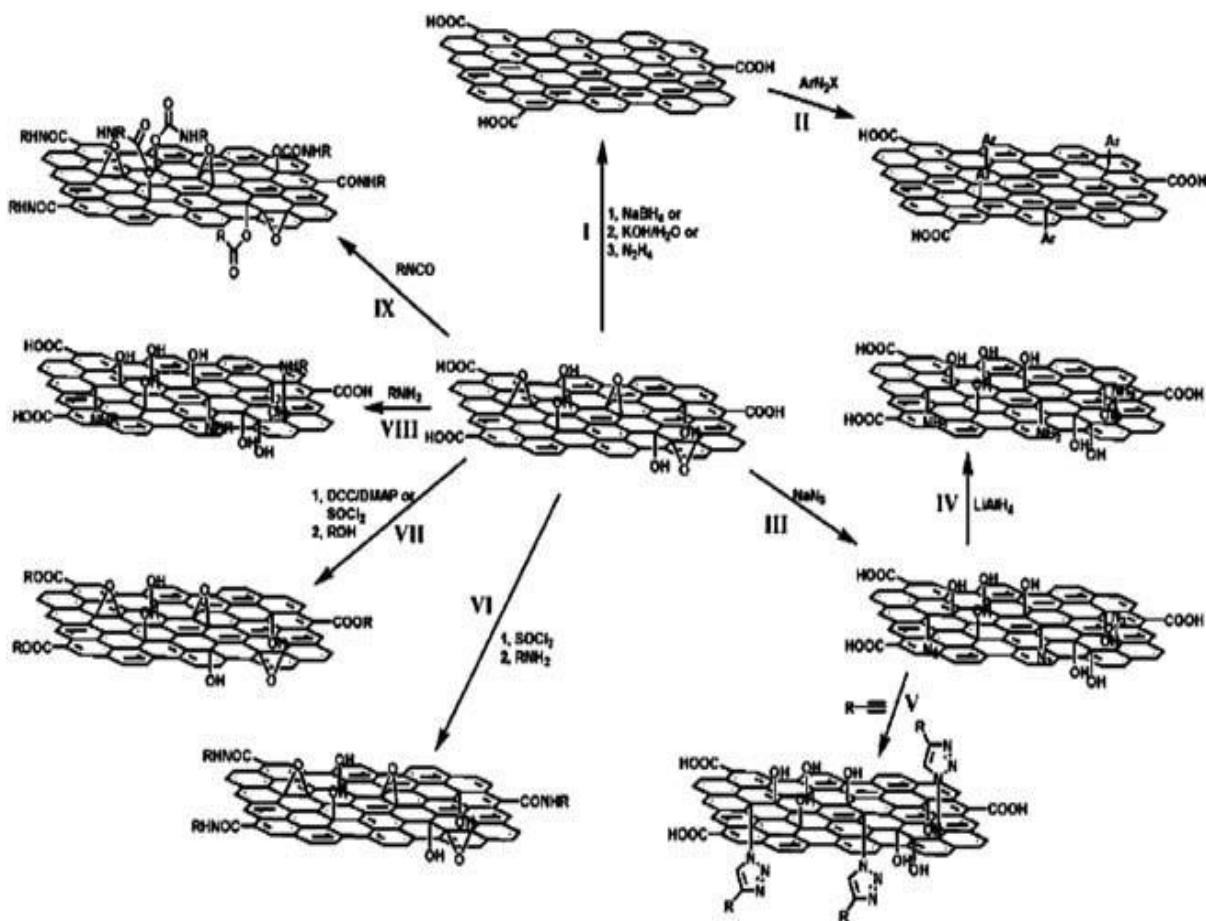
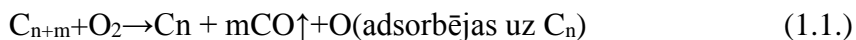
No Grafēna mono slāņiem sastāv grafīts(3D struktūra) kā parādīts 1.1. attēlā. Grafēnam piemīt unikāla elektriskā un termiska vadāmība, jo tam vadāmības zona un valences zona saskaras un gandrīz neveido aizliegto zonu. Grafēns ir pusvadītājs, kura lādiņnesēji uzvedas kā Diraka fermioni, kuriem ir nulles efektīva masa Diraka punktos Brilluina zonas leņķos. Tas dod grafēnam unikālas īpašības: ultraliels nesēju kustīgums (teorētiski līdz  $200\,000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ), kvantu Holla efekts istabas temperatūrā, augsta siltumvadītspēja, 2,3% gaismas absorbcija, Junga modulis 1,0 TPa un iekšējais spēks 130 Gpa (grafēna saraušanas spēks ir 200 reizes lielāks nekā tēraudam). Grafēns ir perspektīvais materiāls izmantošanai elektroniskajās ierīcēs tādās, kā grafēna elektronu tranzistori, integrālās shēmas, caurspīdīgā un lokamā elektronika, superkapacitori un akumulatori[2,3,4]



1.1.att.Grafēna struktūra(a) un grafīta struktūra(b). [2]

**Grafēna ķīmiskas īpašības.** Grafēns nešķīst visos organiskos pamatšķīdinātajos (etanols, izopropanols, acetons, hloroforms, heksans u.c.) un ūdens. Lai izšķīdinātu grafēnu, parasti to oksidē līdz grafēna oksīdam vai grafītu oksidē un disperģē un/vai pievieno citas funkcionālas grupas kas ir parādīts attēlā 1.2. [5].Grafēna oksīds ir nevadošs. Vēl grafēnu var oksidēt  $O_2$  klātie pie  $200-600^\circ\text{C}$  pie zema spiediena, grafēna oksidēšana notiek pēc vienādojuma 1.1. [6]. Grafēna oksīds labi šķīst tetrahidrofurana (THF), tetrahloroglekļa ( $CCl_4$ ) un 1,2 – dihlormetānā, ja ar  $SOCl_2$  iedarbību aktivēt karboksil grupas [7].Grafēna oksīdu ar karboksil grupām var esterificēt ar hidroksil grupām polivinilspirta (PVS) un ar silanu grupām (Si-O-H) [8,9]. Grafēna oksīdu var sulfurēt ar koncentrētas sērskābes un koncentrētas slāpekļskābes

maisījumu attiecība 1:1 ar mikroviļņu iedarbību, kur rezultātā veidojas C-SO<sub>3</sub> saites[10]. Grafēna oksīds var pievienot amīnogrūpas, ja grafēna oksīdu ievietot uz amonjaka šķīduma un apstrādāt ar ultraskaņu, kura rezultātā veidojas grafēna amīns [11].

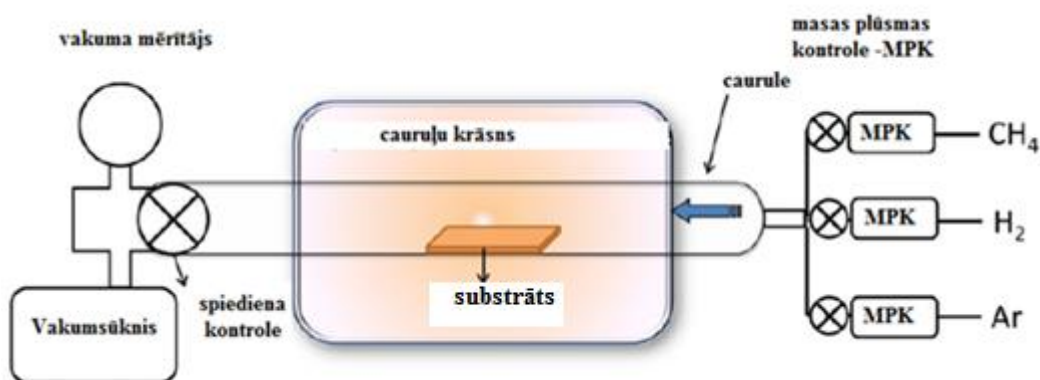


1.2.att. Grafēna un grafēna oksīda iespējamās parvertības [5]

Reducējot grafēnu ar ūdeņradi var iegūt pilnīgi hidrogenētu grafēnu, kurš ir pilnīgi nevadošs, jo oglekļa atomi pāriet no sp<sup>2</sup>hibridizētu stāvoklī uz sp<sup>3</sup> hibridizētu stāvoklī. Hidrogenētam grafēnam ir magnētiskas īpašības [12,7]. Grafēns reaģē ar XeF<sub>2</sub> kur reakcijas rezultātā veidojas grafēna fluorīds. Fluors veido C-F saiti ar oglekļa atomiem no grafēna, C-F saites veidojas C=C dubultsaitei pievienojoties fluoram. Grafēna fluorīds ir pusvadītājs ar 3eV aizliegtu zonu [13,7].

**Grafēna iegūšanas metodes.** Grafēna iegūšanai izmanto piecas metodes: Ķīmiskā tvaika nogulsnešana (ĶTN), Grafīta oksidēšana, grafēna epitaksiāla augšana uz silīcija karbīda (SiC) virsmas un grafēna noņemšana ar līmlenti jeb ar “mehānisko eksfoliāciju” [2,14-16].

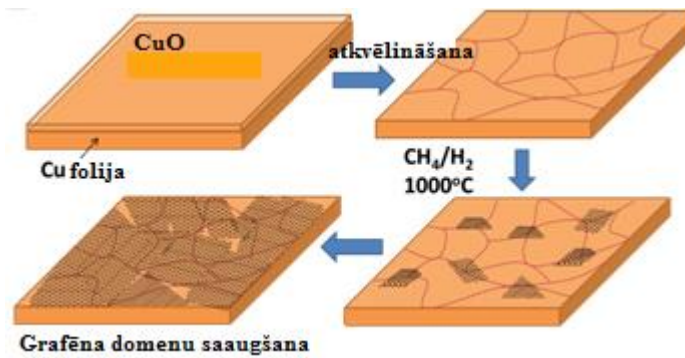
Visaugstākās kvalitātes grafēnu var iegūt ar mehānisku eksfoliāciju. Tā ir metode, ar kuru pirmo reizi tika iegūts grafēns un par grafēna atklāšanu K. Novoselovs un A. Geims ieguva Nobela prēmiju. Iegūtu ar šo metodi grafēnu var izmantot zinātniskos mērķos, bet ar šo metodi grafēnu nevar iegūt rūpnieciski, jo tiek iegūts grafēns ar mazu laukumu [14]. Ar to rodas nepieciešamība attīstīt citas alternatīvas grafēna iegūšanas metodes, piemēram ķīmiskā tvaika nogulsnešana (ĶTN). ĶTN ir viena no visizmantotākajām metodēm, gan rūpniecībā, gan laboratorijas grafēna sintēzē. Parasti ĶTN sintēzei izmanto parējas metālu substrātus, piemēram Ni, Pd, Ru, Ir un Cu. Uz Cu katalizatora grafēna sintēze noris visātrāk, jo ogleklim ir maza šķīdība varā, kā arī varš ir šīs sintēzes efektīvs katalizators. 1.2. attēlā ir parādīta sintēzes iekārtas shēma, kura sastāv no caurules, kura atrodas cauruļu krāsnī. Spiedienu caurulē var regulēt ar vakuumsūkni un masas plūsmas kontroli (MPK). [2]



1.2.att Ķīmiskā tvaika nogulsnešanas iekārtas principiāla shēma [2]

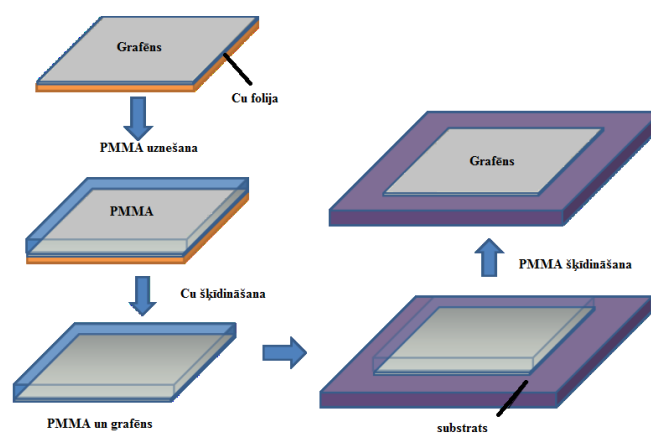
1.3. attēlā ir parādīti grafēna sintēzes etapi. No sākumā substrāts, piemēram Cu folija tiek atkvēlināta 400°C-1000°C, un vara oksīds reducējas ar H<sub>2</sub> par Cu un veidojas ūdens. Pēc tam tiek ieviests ar mazo plūsmu metāns (CH<sub>4</sub>), kas sadalās atšķaidītā ūdeņradī 900°C-1000°C uz Cu virsmas. Šajā etapā notiek grafēna augšana pēc reakcijas 1.2. Augšanas laika veidojas grafēna domēni, kuri palielinās pēc platības līdz atsevišķie domēni saaug kopā, un veido plašu grafēna pārklājumu. Pēc CH<sub>4</sub> iedarbības krāsnī atdzesē līdz istabas temperatūrai [2,17-18].





1.3.att. grafēna sintezēs shēma [2]

Grafēnu pārņemšanai no pamatnes, metāla pamatni ķīmiski nokodina, lai iegūtu brīvu grafēnu, kuru pēc tam pārnes uz izvēlētu substrātu. Pirmais etaps ir polimēra uznešana uz grafēnu. Parasti kā polimēru izmanto poli(metilmetakrilātu) (PMMA) vai polidimetilsiloksānu (PDMS). Polimēra kārtiņa veido palīgstruktūru grafēna pārņemšanas procesā. Pēc tam piemēram Cu pamatni ķīmiski kodina ar dzelzs hlorīda ( $\text{FeCl}_3$ ) šķīdumu pēc reakcijām 1.3 un 1.4. Ķīmiski kodināt metāla pamatni var arī ar citiem kodināšanas reaģentiem:  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_8$ , un  $\text{CuCl}_2$ . Pēc pamatnes pilnīgas izšķīdināšanas peldošu membrānu no polimera un grafēna var pārnest uz izvēlētā substrātā. Nākamā etapa no grafēna šķīdina polimeru ar acetonu vai hloroformu. Pārņemšanas process ir attēlots 1.4. attēlā. ĶTN ir diezgan laikietilpīga un sarežģīta metode, tāpēc ir nepieciešams apskatīt citas iespējas kā sintezēt grafēnu [2,19].



1.4.att. CVD grafēna pārņemšanas shēma. [2]

Vēl viena alternatīva grafēna iegūšanas metode ir grafīta oksidēšana. Metodes priekšrocības ir tās lētums un vienkāršums salīdzinot ar ĶTN. Grafīta pulveri var oksidēt izmantojot , nātrija nitrāta un sērskābes šķīdumus un pievienojot tam kālija permanganāta šķīdumu. Iegūtu grafēna oksīdu var viegli disperģēt ūdenī, izmantojot mehānisko enerģiju (piemēram, ultraskaņas apstrāde), Grafēna oksīda disperģēšana ūdenī saistīta ar ūdens mijiedarbību ar skābekli saturošām funkcionālām grupām, kuras piesaistās grafēna virsmai oksidēšanas procesā. Ar termisko iedarbību grafēna oksīdu var pēc tam reducēt līdz grafēnam. Šīs metodes trūkumi ir nekontrolējams grafēna slāņu skaits un ķīmisku reaģentu izmantošana kuri var sabojāt grafēna struktūru [15,16].

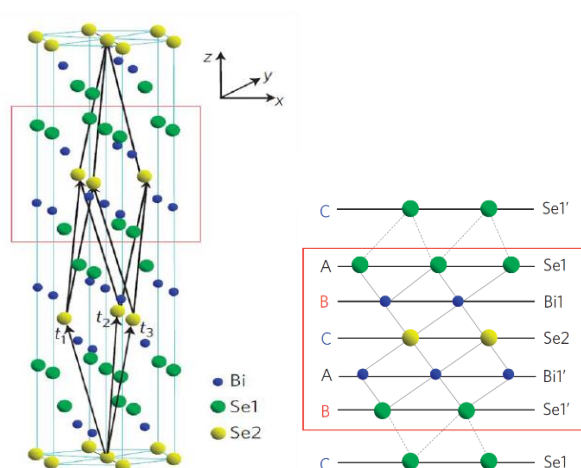
Grafēnu var iegūt ar epitaksiālu augšanu uz silīcija karbīda (SiC) virsmas. Metode ir dārga salīdzinot ar ĶTN, jo šajā metodē tiek izmantots silīcija karbīda mono-kristāls kurš ir dārgs un kuru grūti iegūt, bet uz tā tiek iegūts augstas kvalitātes grafēns Silīcija karbīda (SiC) pārvēršana par grafēnu notiek ar silīcija atomu sublimāciju pie augstām temperatūrām (parasti 800 - >1600 °C) vakuumā. Uz silīcija karbīda virsmas veidojas grafēns pēc reakcijas 1.4 [20,21].



## 1.2 Bismuta selenīds

### 1.2.1 Bismuta selenīds (Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>) un tā īpašības

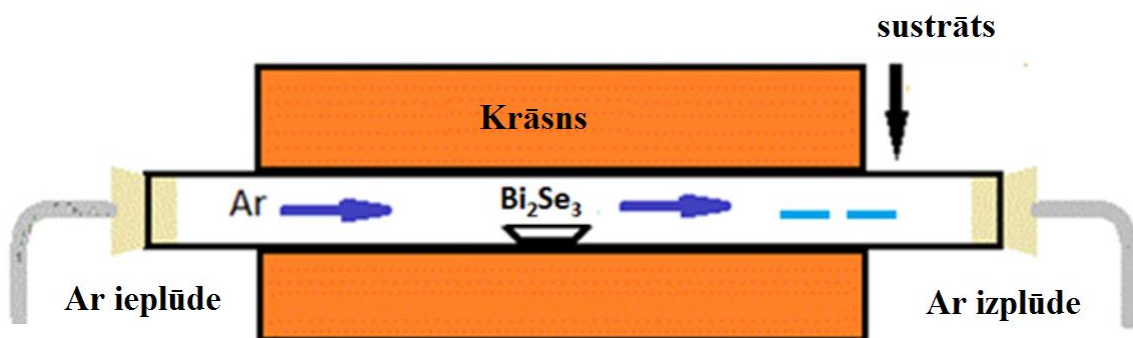
Bisma selenīds (Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>) ir pusvadītājs un termoelektriskais materiāls kuram ir 0,3eV aizliegtu zonu, tā dabiski sastopamie selēna vakances darbojas kā elektrondonori [22,23]. Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> ir novēroti topoloģiski aizsargāti virsmas stāvokļi [24]. Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> kristāla struktūra sastāv no bismuta un selēna atomu mainīgajiem slāņiem ar pamata atkārtojumu Se-Bi-Se-Bi-Se (skat. 1.5. att.). Pieci atsevišķie Bi un Se atomu slāņi (0,95 nm biezi), tiek turēti kopā ar spēcīgu kovalento saiti, slāņi savienoti sava starpa ar vājām van der Vālsa saitēm [25]. Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> izmanto termoelektriskos ierīces, jo slāņveida Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> kristāliska struktūra rada izceļos termoelektriskos rādītājus. [26]



1.5.att.  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  kristāliska struktūra[27]

### 1.2.2 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ nanostruktūru sintēze

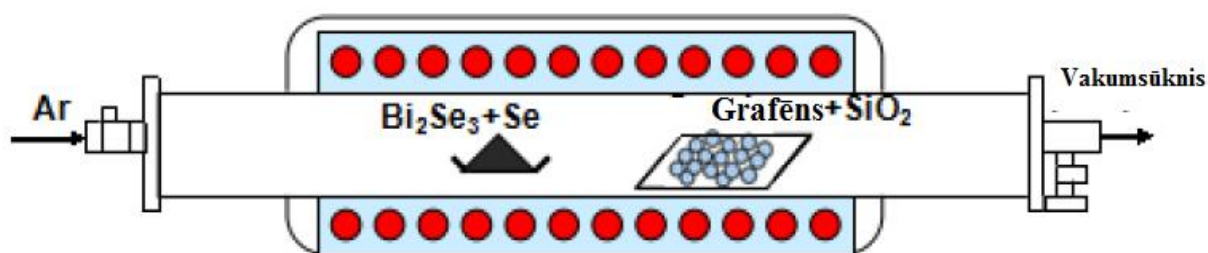
Fizikāla tvaika nogulsnešana (FTN) viena no pamat  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostruktūru sintēzes metodēm [28].  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  kārtiņas augšana notiek ar FTN iekārtu. Lai  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  granulas varētu iztvaikoties sintezēs laikā, tiem jāatrodas krāsns karstākajā vieta pie 535-585°C temperatūrā. Sintezēs laika spiediens jābūt zem 0,5 Pa, lai struktūras varētu nogulsnēties uz substrāta temperatūras diapazonā no 200 līdz 430°C. Argonu vai slāpekli izmanto kā nesagāzi augšanas laikā, lai vedot  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  tvaiku plūsmu un paātrina nogulsnešanas procesu, kas nodrošina plānās kārtiņas veidošanas procesu. Plānās kārtiņas biezumu var regulēt, mainot augšanas laiku [29,30].



1.6.att  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  fizikāla tvaika nogulsnešanas[31]

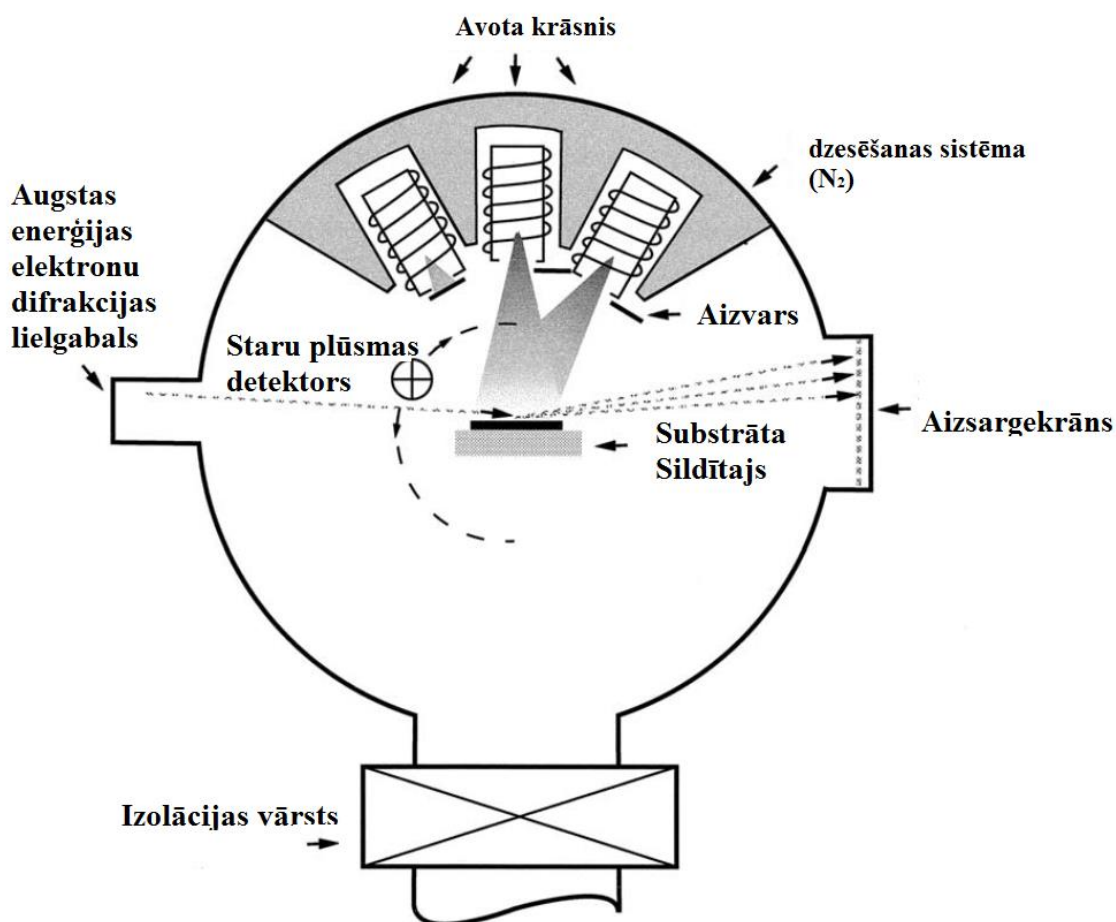
$\text{Bi}_2\text{Se}_3$  ķīmiskā tvaika nogulsnešana  $\text{FTN}$  ir viena no pamat sintezēs metodēm.  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  pulveris un Se parasti ievieto krāsns centra kur temperatūra parasti ir 550°C, kā substrāts tiek izmantots silicijs, kurš tiek novietots 430-300°C temperatūrā. Atšķirība no FTN,  $\text{FTN}$  sintēze tvaikā fāzē notiek ķīmiska reakcija [32].

$\text{Bi}_2\text{Se}_3$  plānās kārtiņas uz grafēna var audzēt ar ĶTN metodi horizontālā kvarca caurulē. Kā ir parādīts 1.7. attēlā,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  pulveris un Se kā iztvaikošanas prekursors atrodas nemainīgās temperatūras zonā un G/SiO<sub>2</sub> substrāts tika novietots uz kvarca laivas zemākas temperatūras zonā. Horizontālā kvarca caurulē tika samazināts spiediens līdz  $1,0 \times 10^{-6}$  Torr ar mehānisko sūkni. Ar argonu gāzes plūsmu noņem skābekļa atlikumu. Pastāvīgās temperatūras krāsns zona tika uzkaršēta un uzturēta 1550 °C temperatūrā 15 minūtes. Pēc tam krāsni atdzesē līdz istabas temperatūrai ar Ar gāzes plūsmu [1].



1.7.att  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  ķīmiska tvaika nogulsnešanas uz grafēna/SiO<sub>2</sub> iekārtas shēma.[1]

Molekulārā stara epitāksija ir viena no dārgākajiem, precīzākajiem un lēniem  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  sintezēs metodēm. Šajā procesa pie zema spiediena molekulās vai atomi nogulsnējas no stariem uz substrāta virsmas kura bija iepriekš uzkaršēta [33]. Parasti šajā metode ka prekursori tiek izmantoti Bi un Se ar augstu tīrības pakāpi un substrātu karšē no 150 līdz 300°C un augšanas ātrums ir no 0,3 līdz 1 nm/minūtē [34,35].



1.8.att Molekulārā stara epitāksijas iekārtas shēma.[33]

$\text{Bi}_2\text{Se}_3$  mehāniska eksfoliācija ir līdzīgs process grafēna eksfoliācijai.  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  gadījumā tiek noslāņoti kristāliskas plānas kartiņas, kuras biezums ir 60-90 nm. Tas ir viss vienkāršākā un vislētākā metode, bet visneprecīzākā, jo ar šo metodi nevar kontrolēt parauga izmērus. [36].

## 2.EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

### 2.1Izmantotā aparatūra, trauki un reaģenti

#### Aparatūra

Svari KERN 440 – 33,  $d = \pm 0,01$  g

Termostats, diapazons: 0 līdz  $+50^{\circ}\text{C}$

Līdzstrāvas avots HQ Power PS3003.  $d = \pm 0,1$  V,  $d = \pm 0,01$  A

Multimetrs MASTECH M9803R.  $d = \pm 0,01$  mA

Iekārta grafēna sintēzei FIRST NANO Easy tube 101

Rotācijas iekārta Spin-Coater LABOTEK ELMI MF-002

Vakuumpkrāsns MSI GSL-1100X

Eļļas sūknis EDWARD 8

Elektroniskais manometrs STINGER CVM211PAL

Skenējošais elektron mikroskops Hitachi S-4800s

*Bruker XFLASH 5010* EDX

Invertētais epifluorescētais mikroskops OLYMPUS IX71

Objektīvs X10/0,3na

Atomspēku mikroskops *Asylum Research MFP-3D*

#### Mērtrauki

Mērkolba, 100 mL  $\pm 0,10$ mL

Mērpipete, 5 mL  $\pm 0,01$ mL

Mērpipete, 10 mL  $\pm 0,02$ mL

#### Reaģenti

Vara folija, Cu , 99,9%, biezums: 0,025 mm

Poli(metilmetakrilāts) PMMA, izšķīdināts anizolā

Slāpekļskābe,  $\text{HNO}_3$ , analītiski tīra, 65 – 67%

Dzelzs(III) hlorīda heksahidrāts  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , >97%

Sālsskābe, HCl, analītiski tīra, 35%

Acetons, analītiski tīrs, >99,8 %

2-propanols, analītiski tīrs, >99,9%

Dejonizēts ūdens,  $\text{H}_2\text{O}$

Ūdeņradis,  $\text{H}_2$ , saspiests, >99,9%

Slāpekklis,  $\text{N}_2$ , saspiests, >99,9%

Metāns, CH<sub>4</sub>, saspiests, >99,9%

Argons, Ar, saspiests, >99,9%

Dabiska vizla TED PELLA V1

Bismuta selenīds, Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, "Sigma-Aldrich", 99,999%

### **Šķīdumu pagatavošana**

*HNO<sub>3</sub> un 2-propanola (1:9) elektrolīta šķīdums:* 50 mL vārglāzē ,pēc 36 mL 2 – propanolam maisot pievieno 4 mL koncentrētas slāpekļskābes (66%);

*25% HNO<sub>3</sub> šķīdums:* 100 mL vārglāzē pievieno 79 mL dejonizēta ūdeni, pēc pievieno 21 mL koncentrētas slāpekļskābes (66%);

*20% FeCl<sub>3</sub> šķīdums:* uz laboratorijas svariem nosver 39,4 g dzelzs (III) hlorīda heksahidrāta un pārnes 100 mL mērkolbā, izšķīdina dejonizētā ūdenī un uzpilda līdz atzīmei;

*5% HCl šķīdums:* 100 mL vārglāzē pievieno 88 mL dejonizēta ūdens, pēc pievieno 12 mL koncentrētas sālsskābes (35%);

## **2.2 Grafēna pamatņu sagatavošana**

### **2.2.1 Vara pamatņu sagatavošana un grafēna ĶTN sintēze uz tām**

No sākumā izgrieza vara foliju ar izmēriem 1cm X 2cm, attaukoja ar acetonu, pēc tam ar 2-propanolu destilēto ūdeni un nožāvēja ar gaisa plūsmu. Pēc tam substrātu elektroķīmiski pulēja ar slāpekļskābes un 2-propanola šķīdumu (1:9) 3 minūtes 4°C temperatūrā ar 15 V spriegumu un strāvas stiprumu ap 0,2 A. Katods ir Pt elektrods un anods ir sagatavotais Cu substrāts. Pēc elektroķīmiskās pulēšanas Cu substrātu skaloja ar 2-propanolu un ar destilēto ūdeni. Pēc skalošanas substrātu nožāvēja ar gaisa plūsmu.

Svaigi nopolēto Cu substrātu ievietoja ĶTN iekārtā, lai sintezētu grafēnu pēc parametriem, kuri ir norādīti 2.1.tabulā.

**Grafēna sintēzes parametri**

	Ar Plūsma, L/min	H <sub>2</sub> plūsma, L/min	CH <sub>4</sub> Plūsma, L/min	t, °C	Laiks, min	Spiediens, Torr
Sildīšana	-	0,2	-	1020	-	0,5
Atkvēlināšana	-	0,2	-	1020	30	0,5
Augšana	-	0,2	0,4	1020	90	0,5
Atdziestāšana	0,3	0,3	-	-	30	0,5

**2.2.2 Vara šķīdināšana**

Pēc grafēna sintezēs paraugu G/Cu paklājā ar polimeru PMMA izmantojot rotētāju, lai paklājums būtu vienmērīgs. Rotēšanas ātrums 3000 apgr./min. Rotēšanas laiks 10 sekundes. Pēc polimera uznešanas paraugu žāvēja 12 stundas istabas temperatūrā

Paraugu PMMA/G/Cu ievietoja Petrī traukā ar 25% HNO<sub>3</sub> šķīdumu uz 3 minūtēm. Pēc tam paraugu pārnesa 20% FeCl<sub>3</sub> šķīdumā un izturēja tajā līdz brīdim, kad Cu pamatne izšķīst pilnībā (aptuveni 2 stundas). Kad varš ir nošķīdis, paraugu pārnesa traukā ar destilēto ūdeni. Ūdeni mainīja pēc katram 10 minūtēm līdz dzeltena krāsa izzūd. Pēc tam paraugu atstāja uz 10 minūtēm destilētā ūdenī, kuram pievienoja 2ml 5% HCl šķīduma. Pēc tam PMMA/G paraugu vairākas reizes skaloja ar destilēto ūdeni, nostiprināja uz priekšmetstikliņa un žāvēja 24 stundas istabas temperatūrā.

**2.2.3 PMMA slāņa šķīdināšana**

Paraugu PMMA/G/stikls ievietoja Petrī traukā ar acetonu uz 2 stundām līdz PMMA ir nošķīdis. Pēc tam šķīdinātāju nomainīja uz 2-propanolu un atstāja uz 10 minūtēm. Pēc tam paraugu vairākas reizes skaloja ar destilēto ūdeni.

**2.2.4 Grafēna atkvēlināšana**

Paraugu G/stikls izkarsēja 250°C temperatūrā secīgi gaisa atmosfērā, tad H<sub>2</sub>/Ar atmosfērā, lai atkvēlināt grafēnu un noņemtu PMMA paliekas. Pēc parametriem, kuri ir norādīti 2.2.tabulā. [37].

**Grafēna atkvēlināšanas parametri**

	Ar Plūsma, L/min	Gaiss(bez plūsmas)	H <sub>2</sub> ,plūsma, L/min	t, °C	Laiks, min	Spiediens, Torr
Sildīšana	-	+	-	250	-	760
Atkvēlināšana	-	+	-	250	60	760
Ar,ventilēšana	0,2	-	-	250	7	0,5
Atkvēlināšana	0,4	-	0,2	250	60	0,5
Atdzesēšana	0,2	-	-	-	30	0,5

**2.3 Grafēna eksfoliācija**

Uz adhēzijas lentes ievietoja augsti orientētu pirolītiska grafīta gabalu un uzreiz norauj, šo darbību atkārtoja uz adhēzijas lentes 2-3cm<sup>2</sup> laukuma. Pēc adhēzijas lente ar augsti orientētu pirolītiska grafīta gabaliem tiek piespiest ar pinceti uz attīrīta stikla, šo darbību atkārtoja uz visa stiklā virsmas. Pēc iegūto eksfolietu grafēnu apskatīja optiskajā mikroskopā lai novērtēt rezultātu. (skat. 2.1. attēls)

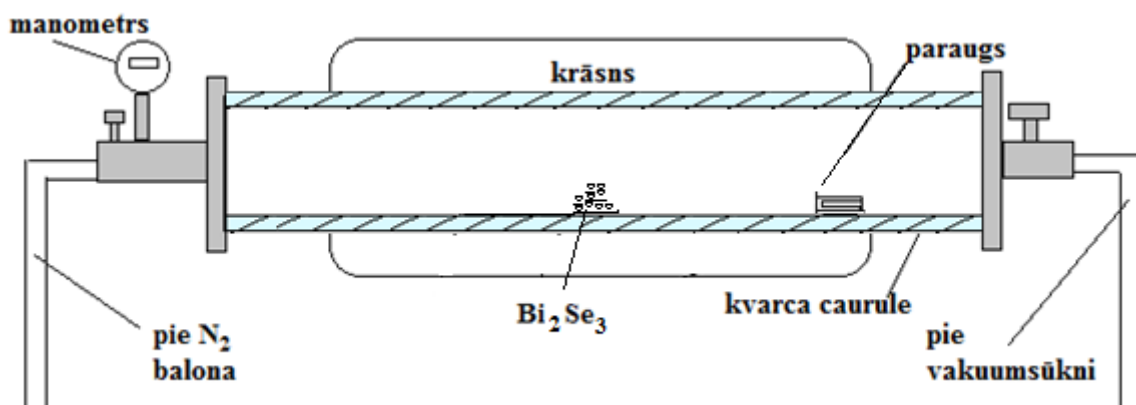


**2.1.att. Eksfoliēta grafēna attēli optiskajā mikroskopā**

## 2.4 Heterostruktūru Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/Grafēns sintēze

Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> nanostruktūru sintēzi veica kā substrātus izmantojot atkvēlināto un neatkvēlināto ĶTN grafēnu, eksfolietu grafēnu un priekš salīdzināšanas – vizlu.

FTN iekārtas kvarca caurulē (skat. 2.2. attēls) ievietoja 0,04g/0,01g Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> (krāsns centrā) un substrātu novietoja horizontāli attiecīgajā temperatūras zona no 300°C līdz 500°C pēc krāsns temperatūras gradienta. Pēc tam ar N<sub>2</sub> plūsmu no reaktora caurules izspieda atmosfērā esošo skābekli, lai sintēzes laikā struktūras neoksidētos. Tad ar sūkni samazināja spiedienu caurulē līdz ~170mTorr/~5Torr. Tad sistēmu 30 minūšu laikā uzkarsēja līdz 585°C. Kad krāsns centrā temperatūra sasniedz 585°C un paturēja 0min/15min, sistēmu papildīja ar slāpekli līdz atmosfēras spiedienam pie lai 585°C/470°C pārtraukt sintēzes procesu un pirms parauga izņemšanas, krāsniņ ļāva atdziest līdz temperatūrai <100°C.



2.2.att. Heterostruktūru Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/Grafēns sintēzes iekārtas shēma

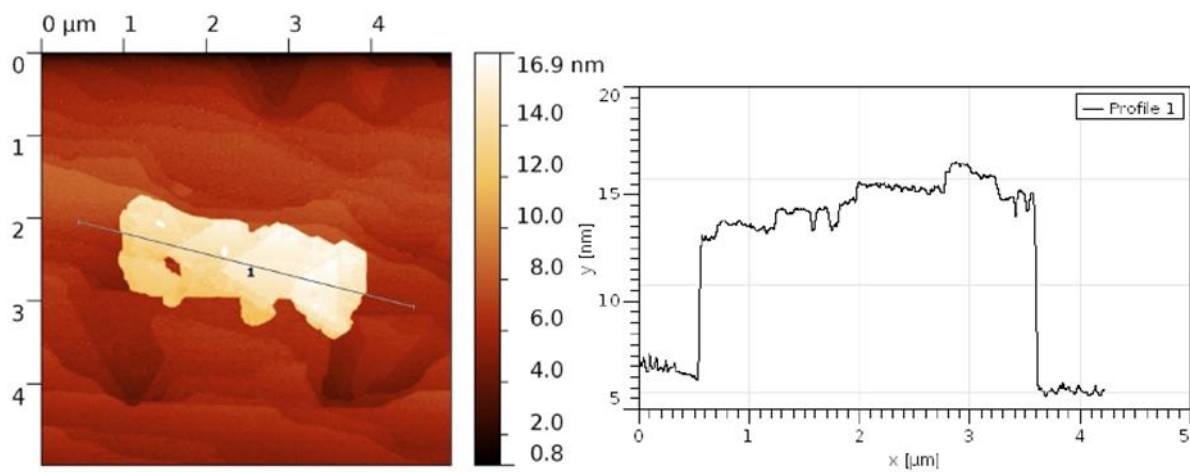
## 2.4 Skenējošā elektronu mikroskopa attēlu uzņemšana

Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/grafēns paraugiem uzņēma SEM attēlus ar palielinājumiem no X5000 līdz X100000, lai novērtētu iegūtu struktūru morfoloģiju un izmērus. SEM attēlus uzņēma atkarībā no pamatnes, ar 1 – 5kV paātrinātā sprieguma un 5-10 μA strāvas.

## 2.5 Atomspēka mikroskopa attēlu uzņemšana

Ar AFM izmērīja struktūru un pārklājuma biezumu, lai precīzi noteikt struktūras izmērus. Lai iegūtu AFM attēlu, adatu (Silīcija adatu bez paklājuma ar 7 nm rādiusu) tiek iestiprināta kronšteinā. Uz adatas kronšteina tiek fokusēts lāzera stars, ta lai uz fotodetektora saņemt pēc iespējas stiprāku signālu. Ar datorprogrammu (*Asylum research*) tiek atrasta precīza skenējošas adatas svārstības frekvence, kura ir aptuveni 330 kHz. Adatu tiek novietota parauga vietā, kur ir nepieciešams uzņemt reljefa attēlu, tā lai paraugs atrastos adatas

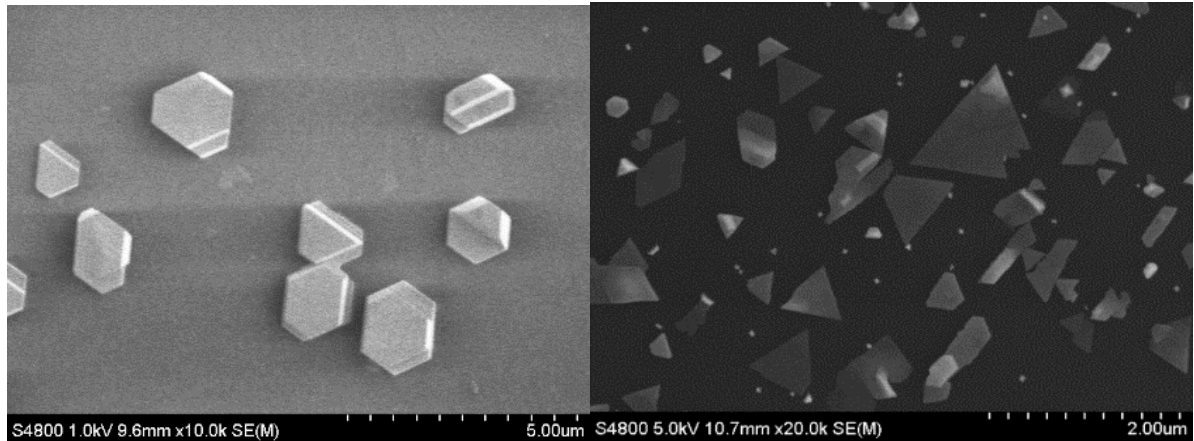
svārstības diapazonā. Pēc tam tiek piemeklēti optimālie parametri bildes iegūšanai. AFM attēlu uzņemšanai tiek izmantots puskontakta režīms. 2.3. attēlā ir  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostrukturās AFM virsmas skans un biezuma noteikšanas piemērs.



2.3. att.  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostrukturās AFM attēls un tās biezuma profils

### 3.REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

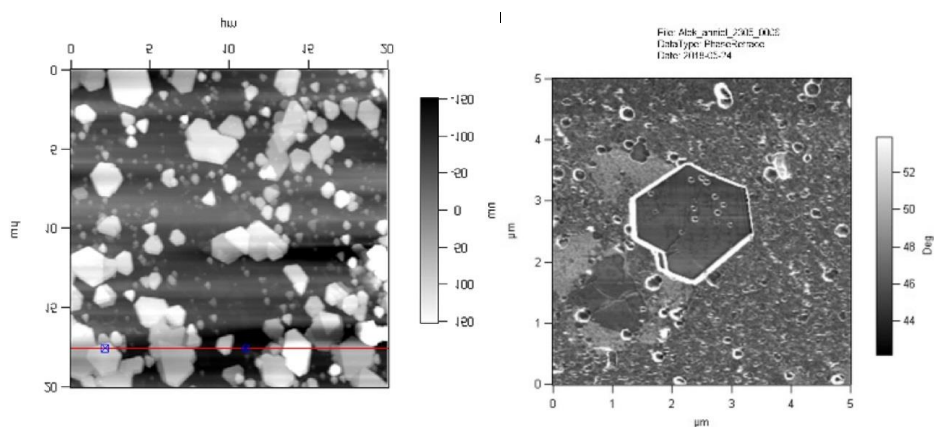
SEM un AFM attēli  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostrukturām, iegūtām ar FTN metodi uz dažāda veida grafēna pamatnēm, ir parādītas, attiecīgi, 3.1. un 3.2. attēlā.



a

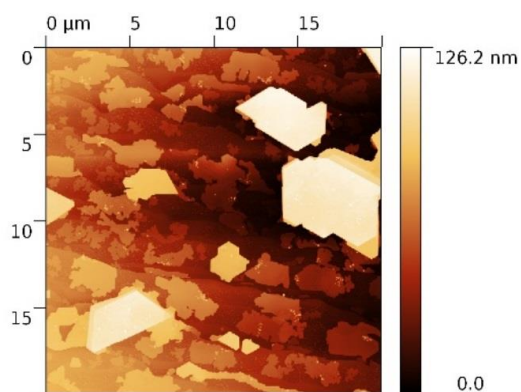
b

3.1.att. SEM attēli  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostrukturās uz: a) vizlas un b) eksfolieta grafēna



a

b

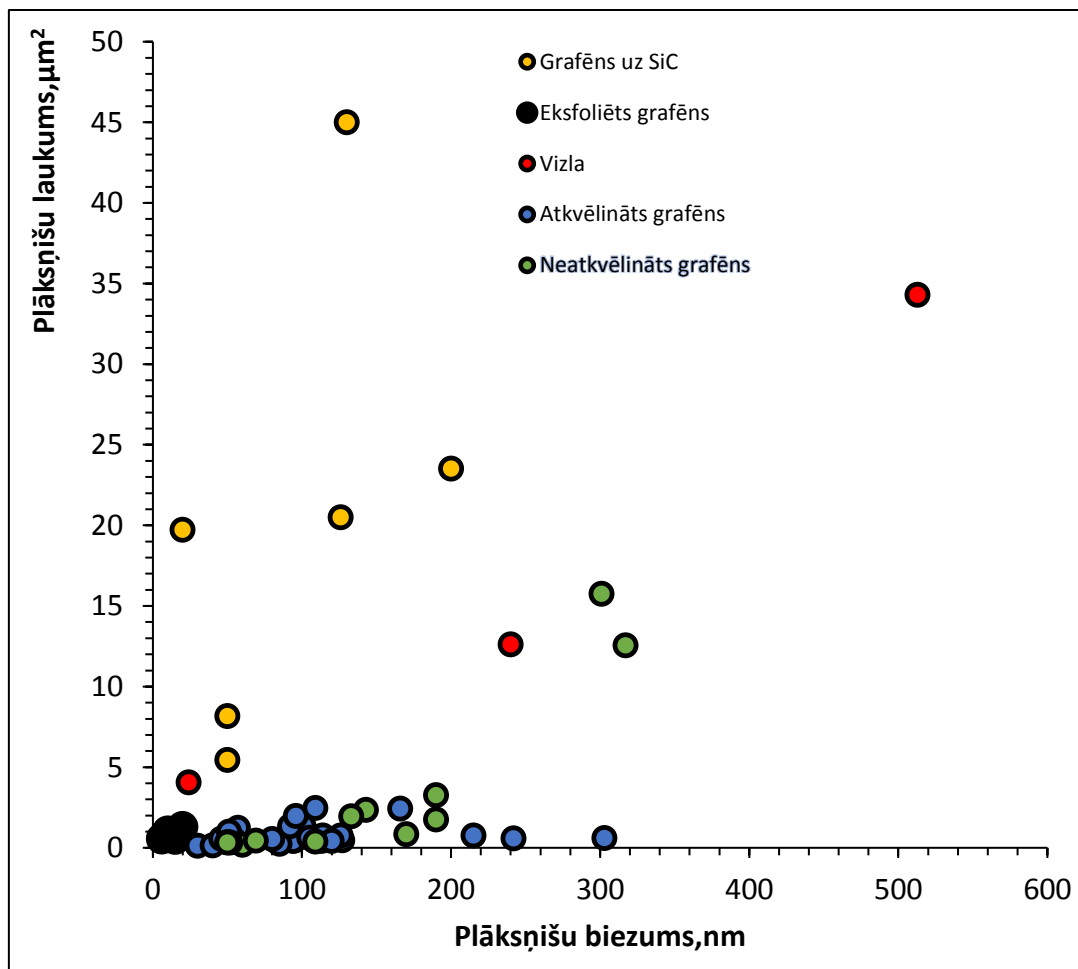


c

3.2.att AFM attēli  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostrukturās uz: a) neatkvēlināta grafēna, b) atkvēlināta grafēna un c) SiC,

Uz visos iegūtajos  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /grafēns un  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /vizla paraugos ir izveidojušās atsēvišķās plāksnītes ar raksturīgo stehiometriskā  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  formu – sešstūris, trīsstūris un trapecē.

Pēc iegūtajiem AFM attēliem  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /grafēns heterostruktūrām tika noteikti plāksnīšu biezumi un virsmas laukumi, izmantojot datorprogrammu *ImageJ* (skat. 1. pielikumā). Pēc iegūtajiem datiem tika aprēķināta laukuma-pret-biezuma attiecība. 3.3. attēlā ir parādīta  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /grafēns laukuma-pret-biezuma vērtības atkarība no plāksnīšu biezuma.



3.3.att.  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  kristālu laukuma atkarība no biezuma uz dažādam pamatnēm.

No 3.3. attēla var redzēt, ka salīdzināšanas paraugam  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /vizla ir izveidojušās nanostruktūras ar ļoti lielu laukumu salīdzinot pret to biezumu, kas norāda uz FTN metodes piemērotajiem apstākļiem plānu plāksnīšu veidošanai, no kuriem varētu uzsintezēt labas kvalitātes plānus pārklājumus, ja ir nepieciešami pārklājumi uz nevadošām pamatnēm.

$\text{Bi}_2\text{Se}_3$  plāksnīšu uz atkvēlinātā un neatkvēlinātā grafēna augšana notiek tāpat kā vienādi. Tām ir izteikta augšana biezumā. Kas nozīme, ka grafēna atkvēlināšana, attiecīgi, „iztaisņošana”, nelīdzēja iegūt plānākas un platākas plāksnītes. Iespējams,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  plāksnīšu

izteiktā augšana biežumā uz  $\text{KTN}$  grafēna ir saistīta ar nepilnīgi tīru grafēna virsmu, jo  $\text{KTN}$  grafēna pārnēšanas procesā tiek izmantotas daudzas ķīmikālijas (polimērs PMMA,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  u.c.). Tomēr mehāniski eksfoliētam grafēnam, kura pārvešanā uz cietu pamatni netika izmantotas nekādas ķīmikālijas,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanoplāksnīšu augšana arī ir novērota ar izteiktu augšanu biežumā, kaut tās ir plānākas nekā uz  $\text{KTN}$  grafēna. No 3.3. attēla iegūtas sakarības var redzēt, ka  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  plāksnītes uz grafēna, audzētā uz SiC, ir izteikta augšana platumā, kas nozīmē, ka grafēns un SiC ir piemērota pamatne plānu  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostruktūru sintēzei, kur tālākojos pētījumos varētu iegūt augstās kvalitātes  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanopārklājumus uz elektrību vadošām pamatnēm.

## SECINĀJUMI

1. Grafēna atkvelināšanas process neietekmē  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ /grafēns heterostruktūru morfoloģiju un biezumu.
2. Visplānākas un visplātākās  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanoplāksnītes veidojas uz grafēna, kas sintezēts uz SiC substrāta, kas padara šo substrātu vispiemērotāku  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  nanostruktūru sintēzei.

## IZMANTOTĀ LITERĀTŪRA

1. Jiaxin Zhang, Cheng Yang, Mei Liu, Shouzhen Jiang, Chao Zhang, Zhencui Sun, Fuyan Liu, Yuanyuan Xu and Baoyuan Man, Fabrication of Graphene/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/Graphene heterostructure

without the surface oxidation of Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> *Front Nanosci Nanotech*, **2015** doi: 10.15761/FNN.1000104 Volume 1(1): 19-22

2. Kumar, A.; Lee, H. C. Synthesis and biomedical applications of graphene: present and future trends. *Advances in graphene science*. **2013**. [tiešsaiste].

<https://www.intechopen.com/books/advances-in-graphene-science/synthesis-and-biomedical-applications-of-graphene-present-and-future-trends> [skatīts 15.01.2018.].

3. Haegyem Kim, Kyu-Young Park, Jihyun Hong, Kisuk Kang

All-graphene-battery: bridging the gap between supercapacitors and lithium ion batteries

*Scientific Reports*, **2014**, volume 4, Article number: 5278

4. Matthew J. Allen, Vincent C. Tung, and Richard B. Kaner

Honeycomb Carbon: A Review of Graphene *Chem. Rev.* **2010**, 110, 132–145

5. Liping Huang, Bin Wu, Gui Yu and Yunqi Liu Graphene: learning from carbon nanotubes

*J.Mater.Chem.*, **2011**, 21, 919–929

DOI: 10.1039/c0jm02225j

6. Li Liu, Sunmin Ryu, Michelle R. Tomasik, Elena Stolyarova, Naeyoung Jung, Mark S. Hybertsen, Michael L. Steigerwald, Louis E. Brus and George W. Flynn. Graphene Oxidation: Thickness-Dependent Etching and Strong Chemical Doping *Nano Lett.*, **2008**,

Vol. 8, No. 7

7. Hong Ying Mao, Yun Hao Lu, Jia Dan Lin, Shu Zhong, Andrew Thye Shen Wee, Wei Chen Manipulating the electronic and chemical properties of graphene via molecular functionalization

*Progress in Surface Science*, **2013**, Volume 88, Issue 2, Pages 132-159

8. Horacio J. Salavagione, Mari an A. Gomez, and Gerardo Martinez polymeric Modification of Graphene through Esterification of Graphite Oxide and (Polyvinylalcohol) *Macromolecules*, **2009**, 42 (17), pp 6331–6334

9. Shifeng Hou, Marc L. Kasner, Shujun Su, Krutika Patel and Robert Cuellari Highly Sensitive and Selective Dopamine Biosensor Fabricated with Silanized Graphene *J. Phys. Chem. C*, **2010**, 114 (35), pp 14915–14921

10. Bong Gill Choi, HoSeok Park, Min Ho Yang, Young Mee Jung, Sang Yup Lee, Won Hi Hong and Tae Jung Park Microwave-assisted synthesis of highly water-soluble graphene towards electrical DNA sensor *Nanoscale*, **2010**, **2**, 2692-2697
11. Nihar Mohanty and Vikas Berry Graphene-Based Single-Bacterium Resolution Biodevice and DNA Transistor: Interfacing Graphene Derivatives with Nanoscale and Microscale Biocomponents *Nano Lett.*, 2008, 8 (12), pp 4469–4476
12. Sunmin Ryu, Melinda Y. Han, Janina Maultzsch, Tony F. Heinz, Philip Kim, Michael L. Steigerwald, and Louis E. Brus. Reversible Basal Plane Hydrogenation of Graphene *Nano Lett.*, **2008**, Vol. 8, No. 12,
13. Rory Stine, Woo-Kyung Lee, Keith E. Whitener, Jr, Jeremy T. Robinson, and Paul E. Sheehan. Chemical Stability of Graphene Fluoride Produced by Exposure to XeF<sub>2</sub> *Nano Lett.*, **2013**, 13 (9), pp 4311–4316
14. [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf) [skatits18.01.2018].
15. Goki Eda, Giovanni Fanchini, Manish Chhowalla Large-area ultrathin films of reduced graphene oxide as a transparent and flexible electronic material. *Nature Nanotechnology*, **2008**. **3**, 270–274 doi:10.1038/nnano.2008.83
16. Sasha Stankovich, Dmitriy A. Dikin, Geoffrey H. B. Dommett, Kevin M. Kohlhaas, Eric J. Zimney, Eric A. Stach, Richard D. Piner, SonBinh T. Nguyen & Rodney S. Ruoff Graphene-based composite materials. *Nature* **2006**. **442**, 282–286  
doi:10.1038/nature04969
17. Maria Losurdo, Maria Michela Giangregorio, Pio Capezzuto and Giovanni Bruno Graphene CVD growth on copper and nickel: role of hydrogen in kinetics and structure *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2011**, 13, 20836–20843  
DOI: 10.1039/c1cp22347j
18. Saman Choubak, Pierre L. Levesque, Etienne Gaufrès, Maxime Biron, Patrick Desjardins, and Richard Martel Graphene CVD: Interplay Between Growth and Etching on Morphology and Stacking by Hydrogen and Oxidizing Impurities *J. Phys. Chem C.*, **2014**  
DOI: 10.1021/jp5070215
19. Ji Won Suk, Alexander Kitt, Carl W. Magnuson, Yufeng Hao, Samir Ahmed, Jinho An, Anna K. Swan, Bennett B. Goldberg, and Rodney S. Ruoff Transfer of CVD-Grown Monolayer Graphene onto Arbitrary Substrates *ACS nano*, **2011**. 5(9), 6916-6924. DOI: 10.1021/nn201207c

20. Claire Berger, Zhimin Song, Xuebin Li, Xiaosong Wu, Nate Brown, Ce'cile Naud, Didier Mayou, Tianbo Li, Joanna Hass, Alexei N. Marchenkov, Edward H. Conrad, Phillip N. First,

Walt A. de Heer Electronic Confinement and Coherence in Patterned Epitaxial Graphene *Science*, **2006**: Vol. 312, Issue 5777, pp. 1191-1196 DOI: 10.1126/science.1125925

21. Walt A. de Heera,<sup>1</sup> Claire Bergera,<sup>b</sup> Ming Ruana, Mike Sprinklea, Xuebin Lia, YikeHua, Baiqian Zhanga, John Hankinsona, and Edward Conrad

Large area and structured epitaxial graphene produced by confinement controlled sublimation of silicon carbide *PNAS* September 29, 2011.

22. Mishra, S K; S Satpathy; O Jepsen. Electronic structure and thermoelectric properties of bismuth telluride and bismuth selenide". *Journal of Physics* **1997**: Condensed Matter. 9: 461–470.

23. Hor, Y. S.; A. Richardella; P. Roushan; Y. Xia; J. G. Checkelsky; A. Yazdani; M. Z. Hasan; N. P. Ong; R. J. Cava p-type Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> for topological insulator and low-temperature thermoelectric applications. *Physical Review B*. **2009**. 79 (19): 195208. doi:10.1103/PhysRevB.79.195208.

24. Hsieh, D.; Y. Xia; D. Qian; L. Wray; J. H. Dil; F. Meier; J. Osterwalder; L. Patthey; J. G. Checkelsky; N. P. Ong; A. V. Fedorov; H. Lin; A. Bansil; D. Grauer; Y. S. Hor; R. J. Cava; M. Z. Hasan. A tunable topological insulator in the spin helical Dirac transport regime. *Nature*. **2009**. 460 (7259): 1101–1105. doi:10.1038/nature08234. ISSN 0028-0836. PMID 19620959.

25. H. Lind, S. Lidin, and U. Häussermann, Structure and bonding properties of (Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>m</sub> (Bi<sub>2</sub>)<sub>n</sub> stacks by first-principles density functional theory *Physical Review B*. **2005**. 72, 184101

26. Zulfiqar Ali, Sajid Butt, Chuanbao Cao, Faheem K. Butt, Muhammad Tahir, M. Tanveer, Imran Aslam, Muhammad Rizwan, Faryal Idrees, and Syed Khalid Thermochemically evolved nanoplatelets of bismuth selenide with enhanced thermoelectric figure of merit. *AIP ADVANCES*, **2014**. 117129

27. H. Zhang, C. Liu, X. Qi, X. Dai, Z. Fang, and S. Zhang. Topological insulators in Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> and Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> with a single Dirac cone on the surface *Nature Physics*. **2009**. 5 438

28. L. Gao, et al., The high-yield growth of Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> nanostructures via facile physical vapor deposition, *Vacuum*. **2016**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum>.

29. Handong Li, Lei Gao, Hui Li, Gaoyun Wang, Jiang Wu, Zihua Zhou, and Zhiming Wang Growth and band alignment of Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> topological insulator on H-terminated Si (111) van der Waals surface *Appl. Phys. Lett.* **2013**, 102, 074106
30. J. Andzane, G. Kunakova, S. Charpentier, V. Hrkac, L. Kienle, M. Baitimirova, T. Bauch, F. Lombardi and D. Erts Catalyst-free vapour-solid technique for deposition of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> and Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> nanowires/nanobelts with topological insulator properties *Nanoscale*, **2015**, Issue 38
31. Jerome T. Mlack, Atikur Rahman, Gary L. Johns, Kenneth J. T. Livi, and Nina Marković Substrate-independent catalyst-free synthesis of high-purity Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> nanostructures *Applied Physics Letters*, **2013**, 102, 193108;  
doi: 10.1063/1.4807121
32. MeiLiu, Fu Yan Liu, Bao Yuan Man, Dong Bi, Xue You Xu Multi-layered Nanostructure Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> grown by chemical vapor deposition in selenium-rich atmosphere *Applied Surface Science*, **2014**, 317, 257–261
33. John R. Arthur Molecular beam epitaxy *Surface Science*, 2002, 500(1-3):189-217
34. S. Schreyeck, N. V. Tarakina, G. Karczewski, C. Schumacher, T. Borzenko, C. Brune, H. Buhmann, C. Gould, K. Brunner and L. W. Molenkamp Molecular beam epitaxy of high structural quality Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> on lattice matched InP(111) substrates *Applied Physics Letters*, **2013**, 102, 041914 <http://dx.doi.org/10.1063/1.4789775>
35. Guanhua Zhang, Huajun Qin, Jun Chen, Xiaoyue He, Li Lu, Yongqing Li and Kehui Wu Growth of Topological Insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Thin Films on SrTiO<sub>3</sub> with Large Tunability in Chemical Potential *Adv. Funct. Mater.* **2011**, 21, 2351–2355
36. K. M. F. Shahil, M. Z. Hossain, V. Goyal, and A. A. Balandin Micro-Raman spectroscopy of mechanically exfoliated few-quintuple layers of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, and Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> materials *J. Appl. Phys.* **2012**, 111, 054305;  
doi: 10.1063/1.3690913
37. Yung-Chang Lin, Chun-Chieh Lu, Chao-Huei Yeh, Chuanhong Jin, Kazu Suenaga, and Po-Wen Chiu. Graphene Annealing: How Clean Can It Be? *Nano Lett.*, **2012**, 12 (1), pp 414–419.

## **PATEICĪBAS**

Izsaku pateicības darba vadītājiem asoc. prof. Donātam Ertam un mag. chem. Margaritai Baitimirovai, LU Ķīmiskās fizikas institūta darbiniekiem, Janai Andžānei, Līgai Britālai un Edijam Kauranenam par palīdzību darba tapšanā.

# Pielikumi

1.pielikums

## *Dati grafikam laukums atkarība no biezuma*

pamatne	Laukums, mkm2	h,nm	pamatne	Laukums, mkm2	h,nm	
KTN atkvēlināts grafēns	2,44	166	KTN neatkvēlināts	12,57	317	
	0,13	30		15,78	301	
	0,16	40		1,76	190	
	0,48	127		3,28	190	
	0,68	108		0,86	170	
	0,46	108		2,36	143	
	0,77	94		0,20	60	
	0,65	96		1,97	133	
	0,81	98		0,39	109	
	1,37	101		0,34	52	
	0,78	94		0,36	50	
	0,45	95		0,33	50	
	0,68	112		0,45	69	
	0,77	215		Vizla	4,07	24
	0,44	94			34,32	513
	0,60	242	12,63		240	
	0,41	83	Grafēns uz SiC	23,53	200	
	0,26	85		45,02	130	
	1,35	92		20,51	126	
	1,98	96		8,19	50	
	2,49	109		5,45	50	
	0,44	113		19,74	20	
	0,77	126	Eksfoliēts grafēns	1,03	10	
	0,76	114		1,31	20	
	0,44	120		0,56	15	
	0,63	105		0,71	12	
	1,25	57		0,58	6	
	0,62	303				
	0,58	46				
	0,54	54				
	0,56	80				
	1,01	51				

Bakalaura darbs „Grafēna un bismuta selenīda heterostruktūru sintēze un īpašības”  
” izstrādāts LU Ķīmiskas fizikas institūtā.

(darba nosaukums)

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

Autors: \_\_\_\_\_  
(personiskais paraksts) (paraksta atšifrējums)

Rekomendēju/nerekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs asoc. prof. Dr.chem. Donāts Erts: \_\_\_\_\_  
(personiskais paraksts) (datums)

Vadītāja Mag. chem. Margarita Baitimirova: \_\_\_\_\_  
(personiskais paraksts) (datums)

Recenzents asoc.prof. Dr.chem. Guntars Vaivars: \_\_\_\_\_  
(personiskais paraksts) (datums)

Darbs iesniegts Ķīmijas fakultātē: \_\_\_\_\_ (datums)

Dekāna pilnvarotā persona, metodiķe: \_\_\_\_\_ Vija Gutāne  
(personiskais paraksts)

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē:

\_\_\_\_\_ protokols Nr. \_\_\_\_\_ (ieraksta sekretārs)  
(datums) (protokola Nr.)

Komisijas sekretāre, lektore: \_\_\_\_\_  
(personiskais paraksts) (paraksta atšifrējums)