

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE  
FIZIKAS NODAĻA

**PEDOT SATUROŠU NANOŠĶIEDRU IEGŪŠANA,  
IZMANTOJOT ELEKTROVĒRPŠANAS METODI, UN TO  
ELEKTRISKO ĪPAŠĪBU RAKSTUROŠANA**

BAKALaura DARBS

Autors: **Oskars Bitmets**

Stud. Apl. Ob17013

Darba vadītājs: Dr. phys. Kaspars Pudžs

RĪGA 2020

## **Anotācija**

Šajā darbā ir veikti pētījumi ar PEDOT:PSS polimēra nanodiegiem un plānajām kārtiņām. Nanodiegi tika iegūti izmantojot elektrovērpšanas metodi. Tika pētītas iegūto paraugu īpašības – elektriskā vadītspēja un Zēbeka koeficients, kā arī nanodiegu dimensionālie lielumi.

Šī pētījuma mērķis ir iegūt nanodieģus ar pēc iespējas augstāku elektrisko vadītspēju. Tas tiek panākts palielinot PEDOT:PSS polimēra koncentrāciju šķīdumos, pārbaudot arī šķīdumu, kurā nav pievienots PEDOT:PSS polimērs. Ir izmērītas īpatnējās elektriskās vadītspējas un Zēbeka koeficienti nanodiegu un plāno kārtiņu paraugiem. Iegūtās vadītspējas un Zēbeka koeficienti ir salīdzināti savā starpā, lai saprastu elektrovērpšanas procesa ietekmi uz paraugu īpašībām.

*Atslēgvārdi:* elektrovērpšana, polimēru nanodiegi, elektriskā vadītspēja.

## **Abstratct**

In this work research is done with PEDOT:PSS containing nanowires and thin films. Nanowires have been obtained using electrospinning method. Properties of samples are measured – electrical conductivity, coefficient of Seebeck and the dimensions of nanowires.

The purpose of this work is to obtain nanowires with the highest possible electrical conductivity. PEDOT:PSS concentration in the solution is increased to achieve this purpose. As a reference, solution without PEDOT:PSS has been made and tested. Specific electrical conductivities and coefficient of Seebeck have been determined for thin films and nanowires. The results are compared with each other, to observe how electrospinning affects the properties of the samples.

*Keywords:* electrospinning, polimer nanowires, electrical conductivity

# Saturs

APZĪMĒJUMU UN ABREVIATŪRU SARAKSTS.....	4
IEVADS.....	6
<b>1</b> TEORĒTISKĀ DAĻA .....	7
<b>1.1</b> Organiskie materiāli.....	7
<b>1.2</b> Polimēri.....	9
<b>1.3</b> Elektriskais lauks, tā mijiedarbība ar lādiņiem un vielām .....	12
<b>1.4</b> Elektrovērpšana.....	15
<b>1.5</b> Termoelektriskais efekts un tā pielietojumi.....	17
<b>2</b> EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA .....	19
<b>2.1</b> Izmantotie materiāli .....	19
<b>2.2</b> Paraugu pamatnes .....	20
<b>2.3</b> Sīkstruktūras elektrodi .....	21
<b>2.3.1</b> Litogrāfija .....	22
<b>2.3.1</b> Termiskā iztvaicēšana vakuumā.....	23
<b>2.4</b> Elektrovērpšana.....	24
<b>2.5</b> Skenējošā elektronu mikroskopija .....	26
<b>2.6</b> Elektriskās vadītspēja un Zēbeka koeficients .....	26
<b>2.7</b> Plānās kārtiņas .....	28
<b>3</b> REZULTĀTI.....	29
SECINĀJUMI .....	35
PATEICĪBAS .....	36
IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI.....	37
1. Pielikums .....	39
2. Pielikums .....	40

## APZĪMĒJUMU UN ABREVIATŪRU SARAKSTS

$\alpha$	Zēbeka koeficients
$\gamma$	Tomsona koeficients
$\varepsilon_0$	elektriskā konstante
$\pi_p$	Peltjē koeficients
$\rho$	elektriskā vadītspēja
$\sigma$	elektriskā īpatnējā vadītspēja
$\varphi$	elektrona viļņu funkcija
A	paveiktais darbs
C	elektriskais lādiņš
c	atomorbitāles īpatsvara koeficients
E	elektriskais lauks
$E_n$	elektrona orbitāles līmeņa enerģija
$E_e$	elektrona kopējā enerģija
F	Kulona mijiedarbības spēks
h	Planka konstante
I	strāva
J	enerģija
L	laukums
l	orbitālais kvantu skaitlis
$l_e$	parauga garums (attālums starp elektrodiem)
m	metri
$m_e$	elektrona masa
$m_m$	magnētiskais kvantu skaitlis
N	elektriskā lauka plūsmas daudzums
$n_k$	galvenais kvantu skaitlis
n	mērījumu skaits
$n_{orb}$	orbitāles līmenis
q	elektriskais lādiņš
$Q_{DL}$	Džoula – Lenca siltuma daudzums
$Q_p$	Peltjē siltuma daudzums
r	attālums starp lādiņiem
R	pretestība

$R_H$ .....	Rīdberga konstante
S .....	sīmeni
$\Delta s$ .....	pārvietojums
t .....	laiks
$t_{st}$ .....	Stjudenta koeficients
T .....	temperatūra
$U_e$ .....	elektrona potenciālā enerģija
U .....	spriegums
V .....	volti
wt .....	svara procenti
Z .....	Atoma skaitlis
zT .....	Termoelektriskais labuma faktors
PEDOT .....	poli(3, 4-etilēndioksitiofēns)
PSS .....	polistirēna sulfonāts
PEO .....	Polietilēna oksīds jeb polietilēna glikols
PVA .....	Polivinilspirts
SEM .....	skenējošais elektronu mikroskops
TEG .....	termoelektriskais ģenerators

## IEVADS

Enerģijas izmantošanas efektivitāte vienmēr ir aktuāls jautājums. Ikdienā tiek izniekoti milzīgi daudzumi ar siltumenerģiju, kas nelietderīgi izkliedējās uz zemes. Šo enerģiju var pārveidot par elektrību, izmantojot termoelektriskos ģeneratorus (TEG). Tāpēc tas būtu visu cilvēku interesēs izveidot efektīvus TEG, kas būtu praktiski pielietojami.

Viens no veidiem, kā varētu veidot TEG ir izmantot nanodieģus. Pateicoties smalkajam nanodieģu izmēram, tos būtu iespējams iestrādāt dažādās sistēmās. Organisko materiālu nanodieģi tiek iegūti, izmantojot polimērus, kuri ir salīdzinoši lēti, plaši pieejami un ar zemu siltumvadītspēju, kas ir nepieciešama, veidojot efektīvus TEG. Ar elektrovērpšanas metodi iegūtu nanodieģu īpašības ir atkarīgas no izmantotā polimēru šķīduma. Pievienojot papildus aktīvās vielas var palielināt to elektrisko vadītspēju. Izmantojot dažādas polimēru proporcijas vai izmainīt to mehāniskās īpašības. Šajā darbā izgatavojot nanodieģus ar elektrovērpšanas metodi ir izmantots polietilēna oksīds PEO, kā nanodieģu struktūrveidojošs elements, kam dažādās proporcijās ir pievienoti elektrovadoši poli(3, 4-etilēndioksitiofēna) (PEDOT:PSS) maisījumi. Izgatavotajiem paraugiem ir noteiktas to īpašības, piemēram, īpatnējā elektriskā pretestība un nanodieģu diametrs.

Darbs sastāv no teorētiskās daļas, kurā tiek aprakstīti organiskie materiāli un polimēri, elektrodinamika un citas tēmas, kas ir aktuālas veidojot nanodieģus ar elektrovērpšanas metodi un TEG; eksperimentālā daļa, kurā tiek aprakstīti izmantotie materiāli, iekārtas un eksperimentu gaita; rezultāti un secinājumi.

### **Darba mērķis:**

Iegūt PEDOT:PSS saturošus nanodieģus, izmantojot elektrovērpšanas metodi, un raksturot to īpašības – elektrisko vadītspēju, nanodieģu diametru.

### **Darba uzdevumi:**

1. Pagatavot dažādu koncentrāciju polimēru šķīdumus nanodieģu iegūšanai;
2. Izgatavot plānās kārtiņas un noteikt elektriskās īpašības;
3. Izveidot elektrodus uz pamatnēm nanodieģu raksturošanai;
4. Ar elektrovērpšanas metodi izveidot nanodieģus un veikt to īpašību izpēti.
5. Salīdzināt plāno kārtiņu un nanodieģu īpašības.

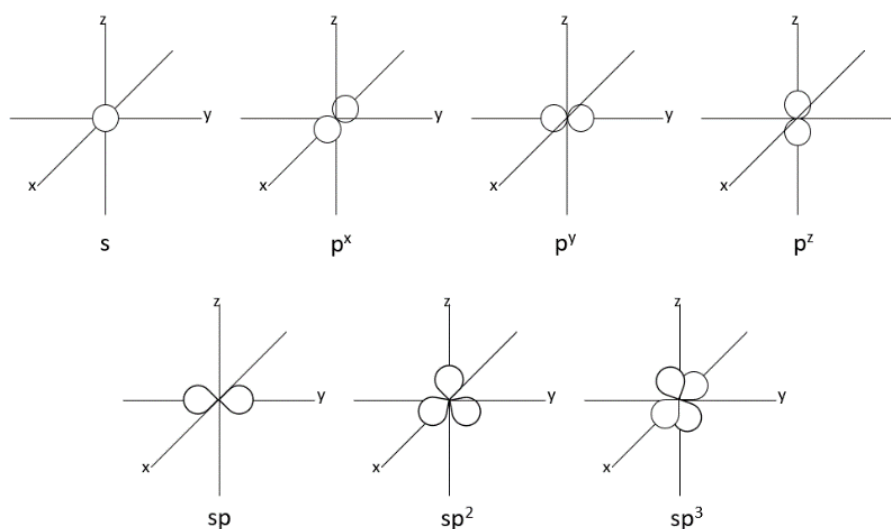
# 1 TEORĒTISKĀ DAĻA

## 1.1 Organiskie materiāli

Organiskie materiāli ir vielas, kuru sastāvā ir ogleklis. Sākotnēji tika uzskatīts, ka organiskās vielas var veidoties tikai dabiskā, ar dzīvību saistītā veidā, taču 1828. gadā jau notika organisko vielu mākslīga sintezēšana [1]. Šis atklājums sniedza jaunas iespējas un jaunu saprašanu par organiskajām vielām, mūsdienās ir zināmi jau vairāk nekā 9 miljoni organiskie savienojumi [2]. 1861. gadā organisko vielu struktūras un veidošanās pamattēzes definēja A. Butļerovs. Šīs tēzes ir:

1. “Vielu molekulās atomi ir saistīti noteiktā secībā, kuru sauc par ķīmisko struktūru.”
2. “Vielu īpašības ir atkarīgas no molekulas sastāva un no molekulas struktūras.”
3. “Pētot vielu īpašības un konkrēto reakciju pārvērtību produktus, var noteikt molekulu uzbūvi. Savukārt pēc molekulu uzbūves var paredzēt molekulu īpašības.”
4. “Molekulu veidojošie atomi un atomu grupas, savstarpēji ietekmējot cits citu, nosaka vielas ķīmiskās īpašības” [1].

Atomos ir s un p orbitāles, kurās atrodas elektroni. S orbitāles ir sfēriskas un tām var būt tikai viena orientācija, taču p formas orbitāles ir lāses formā. P formas orbitālēm var būt 3 orientācijas –  $p_x$ ,  $p_y$  un  $p_z$ . Orbitāļu hibridizācija ir s un p orbitāļu apvienošanās. Viena s un viena p orbitāle veido divas sp orbitāles, kas vērstas viena pretī otram. Viena s un divas p orbitāles veido trīs  $sp^2$  orbitāles, kurām piemīt triagonālā planārā struktūra. Viena s un trīs p orbitāles veido četras  $sp^3$  orbitāles, kas izkārtotas tetraedra formā (*Attēls 1*).



**Attēls 1** s un p orbitāļu hibridizācijas

Oglekļa atoma īpašības nodrošina ļoti lielu organisko vielu daudzveidību. Tas var veidot saites gan ar sevi, gan ar citiem atomiem dažādos veidos: tas var veidot saites gan ķēdēs, gan ciklos. Normālā stāvoklī oglekļa atomam ir 2 kovalentās saites, taču ierosinātā stāvoklī,  $sp^3$  hibridizācijas dēļ, veidojas 4 kovalentās saites. Šī iemesla dēļ ogleklis var veidot ļoti daudz savienojumus [3].

Organiskajās vielās atomus savstarpēji saista kovalentā saite. Šī saite veidojas, ja dažādu atomu elektroni apvienojās un sāk izmantot vienu, kopīgu orbitāli. Kovalento saiti veido ārējie jeb valences elektroni. Kovalentās saites īpašgadījums ir donora-akceptorā saite. Šo saiti nodrošina elektroni no viena atoma.

Atomiem piemīt īpašība, elektronegativitāte, kas var ietekmēt saites veidošanos. Elektronegativitāte raksturo to, cik ļoti atoms pievelk elektronus. Ja molekulu veido atomi ar dažādām elektronegativitātēm, molekulā veidojas polaritāte.

Saišu veidošanos raksturo arī kvantu mehānikas likumi. Noteiktiem elektroniem pastāv noteiktas iespējamās enerģijas un orbitāles, kuras nosaka Šrēdingera vienādojums:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E_e - U_e)\varphi = 0 \quad (1)$$

kur  $E_e$  ir elektrona kopējā enerģija,  $U_e$  ir elektrona potenciālā enerģija,  $h$  ir planka konstante,  $m$  ir elektrona masa,  $\varphi$  ir viļņu funkcija. Šrēdingera vienādojumam ir daudz risinājumi, tos var aprakstīt ar kvantu skaitļiem:  $n_k$  – galvenais kvantu skaitlis,  $l$  – orbitālais kvantu skaitlis,  $m_m$  – magnētiskais kvantu skaitlis un  $s$  – spins. Rezultējošo molekulāro viļņu funkciju pēc saites veidošanās nosaka divas vai vairāk atomārās viļņu funkcijas:

$$\varphi = c_1\varphi_1 + c_2\varphi_2 \quad (2)$$

kur  $c$  ir koeficients, kas nosaka atomorbitāles īpatsvaru [1].

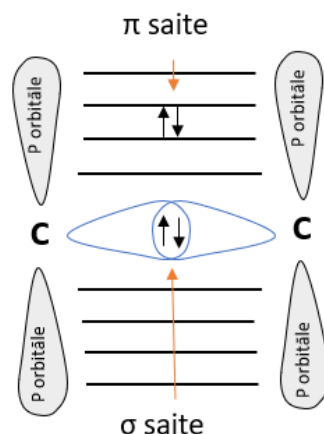
Elektronu orbitāles atomos ir kvantētas un tās nosaka enerģētiskie līmeņi. Elektroni var pāriet starp atomu orbitālēm, saņemot vai izstarojot noteiktu enerģijas daudzumu. Līmenim atbilstošo enerģiju var aprēķināt pēc formulas:

$$E_n = \frac{R_H Z^2}{n^2} \quad (3)$$

kur  $R_H$  ir Rīdberga konstante,  $Z$  ir atoma skaitlis un  $n$  ir attiecīgais līmenis. Augstākos enerģijas līmeņos enerģija samazinās un elektrons ir mazāk saistīts ar kodolu. Jo lielāks atomskaitlis, jo lielāks protonu skaits kodolā un ciešāk saistīti elektroni [4].

Saites starp atomiem veidojas pārklājoties elektronu mākoņiem. Šī pārklāšanās var notikt dažādos veidos, tāpēc pastāv dažādu tipu saites, kas ir redzamas *Attēlā 2*. Ja orbitāles pārklājās uz atomu ass, tad veidojas  $\sigma$  tipa saite. Šis ir kovalentās saites veidošanās princips. Ja

orbitāles pārklājās perpendikulāri atoma asij, tad veidojas  $\pi$  tipa saite. Abām saitēm ir dažādas elektronu orbitāles, taču abas saites var veidoties arī vienlaicīgi, to sauc par dubulto saiti [5].



Attēls 2  $\pi$  un  $\sigma$  tipa saites

Kamēr  $\sigma$  tipa saite ir cieši saistīta ar atomu kodoliem un nodrošina molekulas galveno struktūru,  $\pi$  tipa saites elektroni atrodas tālu no kodola un ir saistīti vājāk. Poli-konjugētās saitēs  $\pi$  tipa saites apvienojas – vienai molekulai ir kopīga viena  $\pi$  saite. Tieši šī īpašība nodrošina lādiņnesēju kustību molekulās un lielo daudzveidību organiskajās vielās un to īpašībās [5].

## 1.2 Polimēri

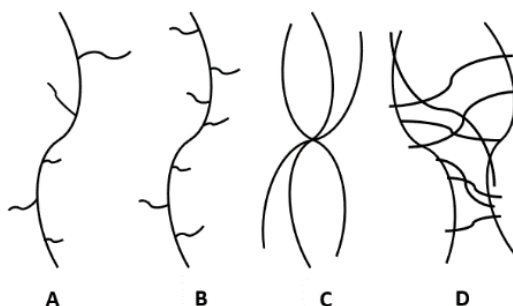
Polimērus, jeb makromolekulas veido organiskās molekulas – monomēri. Monomēri ir individuālas molekulas, kuras saistās ar kovalentajām saitēm un izveido molekulu ķēdes – polimērus. Polimērus var iedalīt dabiskajos un sintētiskajos polimēros. Dabiskos polimērus veido dzīvie organismi, piemēram, dabīgais polimērs ir proteīni, bet sintētiskie polimēri tiek mākslīgi sintezēti.

Polimēra ķēdes garumu raksturo indekss “ $n$ ” ko sauc arī par polimerizācijas pakāpi. Polimēru ķēdes garumam ir nozīmīga loma. Veidojot šķīdumus no polimēriem ar garām ķēdēm, polimēri savā starpā var saistīties (sapīties). Tas ietekmē šķīduma viskozitāti, lielāka polimerizācijas pakāpe nodrošina lielāku šķīduma viskozitāti [6].

Polimēru ķēdes var veidoties no viena un tā paša monomēra un tās var veidoties no dažādiem monomēriem. Pieņemot polimērus A un B, tie var sakārtoties dažādi, piemēram: šķietami patvaļīgā secībā A – B – A – A – B – A – B – B – A – A – A, mainīgā secībā A – B – A – B – A – B – A – B vai periodiskā secībā A – A – A – A – B – B – B – B [7]. Šādus polimērus sauc par lineāri sakārtotiem polimēriem.

Polimēru ķēdes var būt arī nelineāras. Tām parasti ir pamata ķēde, no kuras var veidoties dažāda veida atzarojumi, kas redzami Attēlā 3. Tie var būt patvaļīgi, dažāda garuma (A) vai

vienāda (līdzīga) garuma atzarojumi (B). Salīdzinoši rets gadījums ir, kad atzari veidojas no viena kopīga centra (C). Šķērssaistītiem polimēriem ir patvaļīgi, šķērsi sakārtoti zari (D) [7].



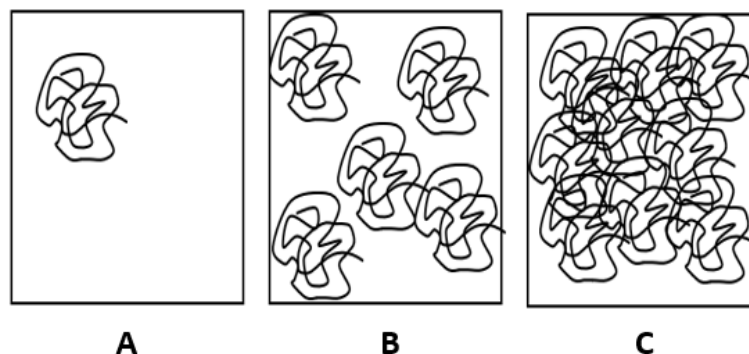
**Attēls 3** Polimēru ķēžu izkārtojumi

Pēc uzbūves polimērus iedala divās galvenajās kategorijās. Pirmā kategorija ir termoplasti, no kuriem var veidot dažādas formas cietus ķermeņus. Termoplastus veido D veidā (šķērssaistīti, no angļu valodas crosslinking) sakārtoti polimēri – tie ir viens liels un sapīts polimērs. Otrā kategorija ir polimēru šķiedras. No polimēru šķiedrām tiek veidoti audumi vai arī diegi, vadi utt. [7].

Polimēru ķēdes materiālā var būt gan orientētas, gan neorientētas. Kamēr polimēru šķiedras pārsvarā ir orientētas, arī termoplastiem var būt reģioni ar orientētām polimēru ķēdēm. Orientētas ķēdes var būtiski ietekmēt polimēru mehāniskās īpašības, palielinot to izturību un elastību. Lai iegūtu paraugus ar orientētām šķiedrām, tiek izmantotas dažādas metodes, piemēram, elektrovērpšana. Šajā metodē tiek izmantots polimēra šķīdums, kas sacietē diega stiepšanas procesā [8].

Polimēru šķīdumi var šķīst sarežģītas un grūti aprakstāmas sistēmas. Taču tos var raksturot, jo individuālie polimēri atrodas līdzīgos apstākļos. Polimēra šķīdumus var veidot no parastiem polimēriem un no polielektrolītiem. Polielektrolīti ir polimēri ar pozitīvu vai negatīvu lādiņu, kas nodrošina Kulona mijiedarbību starp polimēru ķēdēm, ieviešot papildus efektus šķīdumā. Šie papildus efekti ir osmotiskā spiediena palielināšanās un polimēru ķēžu izstiepšanās atšķaidītos šķīdumos [7].

Atkarībā no polimēra ķēdes garuma un tā koncentrācijas var iegūt atšķaidītus, daļēji atšķaidītus vai koncentrētus šķīdumus (Attēls 4).



**Attēls 4** A) Atšķaidīts B) daļēji atšķaidīts un C) koncentrēts polimēra šķīdums

Atkarībā no polimēra koncentrācijas šķīdumā, izmainās osmotiskais spiediens, atsevišķo polimēru mijiedarbības dēļ. Osmotisko spiedienu ietekmē polimēru skaits, nevis to ķēžu garums. Sasniedzot pārklāšanās limitu koncentrētā šķīdumā, veidojas viendabīga polimēra sistēma, kurā individuālo polimēru ķēžu īpašības var tikt ignorētas. Palielinoties osmotiskajam spiedienam, viendabīgums samazinās un polimēru ķēdes sāk sadurties un atgrūsties kā cietas sfēras [7].

No polimēra iegūtā materiāla īpašības ir iespējams mainīt, jaucot kopā dažādus polimērus. Cietā polimēra trauslumu var novērst, pievienojot polimēru, kuram piemīt elastīgums. Sajauktie polimēri var veidot homogēnu vai 2 fāžu šķīdumu. Diemžēl lielākā daļa polimēru neveido homogēnu šķīdumu. Homogēnu šķīdumu nodrošina dipolu – dipolu mijiedarbība starp sajauktajiem polimēriem. Taču šķīdumu karsējot, ir iespējams pāriet no 2 fāžu šķīduma uz homogēnu. Starp sajauktajiem polimēriem var notikt arī reakcijas un veidoties ķīmiskās saites [7].

Polimēriem piemīt svarīgas mehāniskās īpašības, kuras nepiemīt citiem materiāliem, piemēram, cietvielām (kristāliem) vai šķidrām vielām. Polimēri ir viskoelastīgi materiāli, kuriem piemīt elastības un viskozitātes īpašības gan cietā, gan šķidrā fāzē. Taču šīs īpašības ir atkarīgas no temperatūras - polimērs var kļūt par brīvi tekošu šķīdumu vai cietu plastmasu, zaudējot savu elastību. Šo pārejas temperatūru sauc par stiklošanās temperatūru [7].

Lielākā daļa polimēru ir izolatori un slikti vada elektrisko strāvu. Tiem nav brīvo lādiņnesēju un tiem ir plaša aizliegtā spruga, kas nozīmē, ka zemākais elektronu ierosmes reģions ir ultravioletais. Taču konjugētiem polimēriem, kuriem ir dubultsaites, ir papildus lādiņnesēji, kas šos polimērus padara par pusvadītājiem. Šādiem polimēriem ir mazāka aizliegtā sprauga, un tie spēj mijiedarboties ar redzamo gaismu [7].

Elektriskā vadītspēja ir atkarīga no lādiņnesēju koncentrācijas un to kustīguma. Liela daļa polimēru ir izolatori, jo tajos ir ļoti maz brīvo lādiņnesēju, taču to vadītspējas ir iespējams ievērojami palielināt, polimēra šķīdumam pievienojot metāliskas vai citas vadošas daļiņas, iegūstot kompozītmateriālu. Polimēru ķēdes var saturēt jonus vai sāļus, kas nodrošina vadītspēju, kā arī ķēdēs esošie elektroni var tikt ierosināti. Pievienojot papildus vielas polimēram ir nepieciešama augsta pievienoto daļiņu koncentrācija (vismaz 20% no tilpuma). Tas var būtiski ietekmēt polimēru mehāniskās īpašības, samazinot to viskoelastību. Pēc vielas pievienošanas polimērs vadītspējas palielināšanā nepiedalās, bet kalpo kā struktūras elements vadošajām daļiņām [8].

Polimēru vadītspēja ir atkarīga no to morfoloģijas un ķēžu orientācijas paraugā. Vadītspēju var arī ietekmēt magnētiskā uzņēmība, termoelektriskie efekti, foto vadītspēja un citi efekti [8].

Polimēriem piemīt ļoti labas mehāniskās īpašības, piemēram, elastība, korozijas pretestība, viegli formējami, mazs svars un citas. Tiem piemīt ļoti zema siltuma vadītspēja. Viens no iemesliem ir polimēru ķēžu izkārtojums (*Attēls 5*). Polimēriem var būt amorfi un sakārtoti reģioni. Amorfajos reģionos atomu svārstības ir lokalizētas, tā rezultātā materiālam piemīt zema siltuma vadītspēja, taču to ir iespējams palielināt polimēru ķēdes sakārtojot. Polimēru ķēdes var sakārtot izmantojot vērpsšanas metodes, kuru rezultātā siltuma vadītspēja ir pieaugusi pat 20 reizes [9].



**Attēls 5** Polimēru amorfie un sakārtotie reģioni

### 1.3 Elektriskais lauks, tā mijiedarbība ar lādiņiem un vielām

Atomārajām daļiņām - protoniem un elektroniem - piemīt elektriskais lādiņš. Starp lādētām daļiņām pastāv pievilkšanās vai atgrūšanās spēks – Kulona mijiedarbība. To apraksta formula:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (4)$$

Kulona mijiedarbība ir atkarīga no lādiņiem  $q_1$ ,  $q_2$  un attāluma  $r$  kvadrāta starp tiem.  $\epsilon_0$  ir elektriskā konstante. Ap elektriski lādētām daļiņām veidojās arī elektriskais lauks  $E$ , kas ir atkarīgs no daļiņas lādiņa un attāluma no tā. Daļiņas radīto elektrisko lauku apraksta formula:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (5)$$

Kopējo elektrisko lauku veido katras daļiņas radītais lauks ar superpozīcijas principu. Tātad lielāks daļiņu skaits rada spēcīgāku elektrisko lauku. Elektriskā lauka līnijas veido plūsmu caur noslēgtu laukumu. Šī lauka plūsmu apraksta Gausa teorēma, kas parāda plūsmas daudzuma  $N$  atkarību no lādiņa  $q$ :

$$N = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (6)$$

Elektriskais lauks plūst uz elektronu, bet prom no protona. Lādiņš piemīt atsevišķām daļiņām vai atomu joniem, kas var radīt elektrisko lauku. Normālos apstākļos atomos lādiņi viens otru līdzsvaro un veido neitrāli lādētu daļiņu.

Elektrisko lauku var arī ietekmēt tajā ievietotās vielas. Dielektriķi, jeb vielas ar sliktu elektrisko vadītspēju, samazina elektriskā lauka stiprumu. Tā pavājināšanos raksturo relatīvā dielektriskā caurlaidība  $\epsilon_r$ , kas tiek pierēzināta pie  $\epsilon_0$ . Kamēr gaisam šis lielums ir aptuveni 1, dažādu kondensatoru materiāliem (šie ir materiāli ar zemu elektrisko vadītspēju, piemēram, stikls) tas var sasniegt vairākus tūkstošus [10].

Ja uz lādiņu  $q$  iedarbojas elektriskais lauks  $\vec{E}$ , tad pielikto spēku aprēķina pēc formulas:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (7)$$

Ja pieliktā spēka rezultātā lādiņš pārvietojas no punkta A uz punktu B, tad tiek paveikts darbs:

$$A = \vec{F}\Delta s \quad (8)$$

Veicot darbu elektriskā lauka virzienā, tiek paveikts pozitīvs darbs, taču darbu veicot pretējā virzienā, tas kļūst negatīvs. Paveiktais darbs ir vienāds ar lādiņa potenciālās enerģijas izmaiņu. Satuvinot divus vienādus lādiņus (kustība pretēji elektriskajam laukam), tiek paveikts darbs un potenciālā enerģija palielinās.

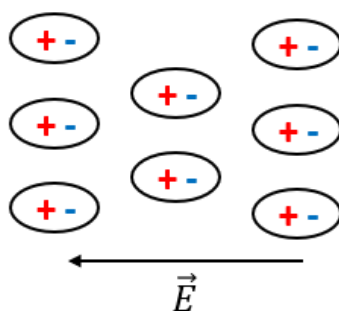
Padarītais darbs pret lādiņa lielumu ir potenciālu starpība elektriskajā laukā, jeb spriegums. Gan sprieguma, gan potenciāla SI mērvienība ir V (volts). Ja elektriskais lauks paveic 1 J lielu darbu pārvietojot 1 C lielu pozitīvu lādiņu, tad spriegums ir 1 V.

Vielas var ne tikai vadīt, bet arī uzkrāt elektriskos lādiņus. Kapacitāti raksturo lādiņš, kuru pievadot objektam, tā virsmas potenciāls palielinās par 1V. Ķermeņa kapacitāte ir arī atkarīga no ķermeņa izmēra un tā formas, no ķermeņa dielektriskās caurlaidības un no ķermeņu daudzuma sistēmā. Kapacitāti mēra farados, kas ir kuloni uz voltiem. Vienu faradu liela kapacitāte ir ļoti augsts lielums, praktiski sastopamie kapacitātes lielumi mikrofaraudi vai pat pikofaraudi.

Ķermenī esošos lādiņus, to izkārtojumu, var ietekmēt elektriskais lauks. Elektriski neitrālam ķermenim tuvu novietojot lādētu ķermeni ar elektrisko lauku notiek elektrostatiskā

indukcija. Neitrālajā ķermenī brīvie lādiņi tiecas pie lādētā ķermeņa un veidojas lādēta virsmas daļa un elektriskais lauks. Ārējais lauks pastiprinās, kamēr iekšā lauks kompensējās. Tā veidojās dipols.

Lai gan dielektriķos pārsvarā nav brīvo lādiņnesēju, kas izkārtotos elektriskajā laukā, tomēr polarizēšanās tajos notiek. Elektriskā lauka klātbūtnē, dielektriķos esošajos atomos, veidojas dipoli. Šajās molekulās elektriskie lādiņi ir nobīdīti, tās sauc par polārām molekulām. Molekulu izkārtojums veidojas elektriskā lauka virzienā (*Attēls 6*), kā rezultātā dielektriķa iekšienē veidojas pretējs elektriskais lauks. Dipolu orientēšanos ietekmē temperatūra, augstākās temperatūrās tā pasliktinās.



**Attēls 6** Molekulu orientēšanās elektriskajā laukā

Pusvadītāji ir materiālu kategorija starp vadītājiem un dielektriķiem. Pusvadītājiem ir raksturīgas īpašības: 1) vadītspēja ir atkarīga no ārējiem apstākļiem, no temperatūras, apgaismojuma, u.c., 2) vadītspēja palielinās pieaugot temperatūrai un 3) vadītspēju ietekmē piejaukumi. Pusvadītāju vadītspējas ir robežās no  $10^{-8} \frac{S}{m}$  līdz  $10^5 \frac{S}{m}$  [11].

Zemās temperatūrās pusvadītāju elektriskā vadītspēja ir līdzīga dielektriķiem, taču pieaugot temperatūrai tā palielinās. Tas notiek tāpēc ka temperatūras ietekmē no kovalentajām saitēm atbrīvojās lādiņnesēji – elektroni un caurumi.

Elektriskā vadītspēja raksturo to, cik liels elektriskās strāvas blīvums  $\left(\frac{A}{m^2}\right)$  veidojās atkarībā no elektriskā lauka intensitātes  $\left(\frac{V}{m}\right)$ . Elektriskā vadītspēja ir atkarīga no īpatnējās elektriskās vadītspējas un parauga izmēriem. To apraksta formula:

$$\rho = \frac{\sigma}{L} \cdot l_e \quad (9)$$

kur  $\sigma \left[\frac{S}{m}\right]$  ir īpatnējā elektriskā vadītspēja,  $L$  ir parauga šķērsriezuma laukums un  $l_e$  ir parauga garums. Elektriskā vadītspēja ir apgriezta elektriskā pretestība. Kā iepriekš minēts tā ir atkarīga no temperatūras un to apraksta formula:

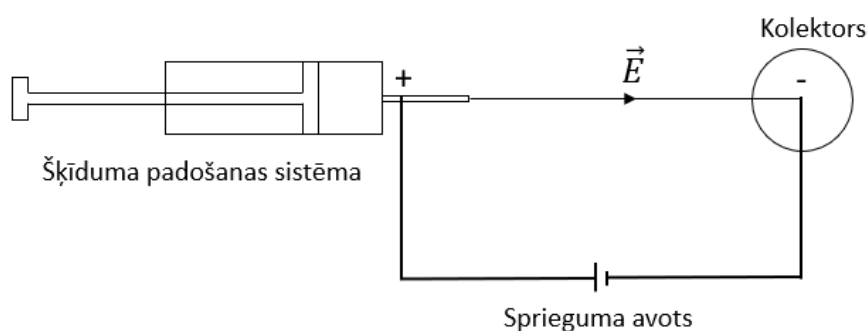
$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha_t(\Delta T)] \quad (10)$$

kur  $\rho_T$  ir izmainītā īpatnējā pretestība,  $\alpha_t$  ir materiālam raksturīgais temperatūras koeficients un  $\Delta T$  ir temperatūras izmaiņa [12].

## 1.4 Elektrovērpšana

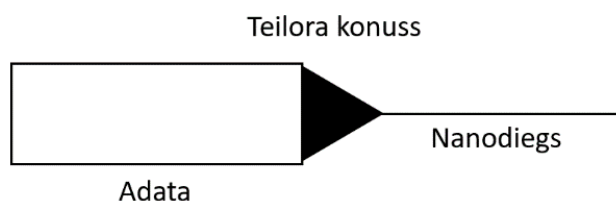
Elektrovērpšana ir viena no nanodiegu iegūšanas metodēm. Ar to iegūto nanodiegu īpašības var tikt mainītas, atkarībā no elektrovērpšanas iekārtas uzstādījumiem un izmantotajiem materiāliem, tāpēc nanodiegi ir plaši pielietoti dažādās jomās, piemēram, medicīnā, apģērbu ražošanā, filtros, enerģijas ģeneratoros un citur. [13]

Elektrovērpšanas iekārtai ir vienkārša uzbūve. Tās galvenās komponentes ir sprieguma avots, šķīduma padošanas sistēma un nanodiegu kolektors (*Attēls 7*).



**Attēls 7** Elektrovērpšanas iekārtas shematiskais attēlojums

Sprieguma avota pozitīvā daļa tiek pieslēgta pie šķīduma padošanas sistēmas, bet negatīvā daļa pie kolektora. Veidojās elektriskais lauks starp padošanas sistēmu un kolektoru. Uzlādējoties šķīdumam, adatas galā veidojas Teilora konuss, no kura Kulona mijiedarbības iespaidā tiek vilkts nanodiegs (*Attēls 8*).

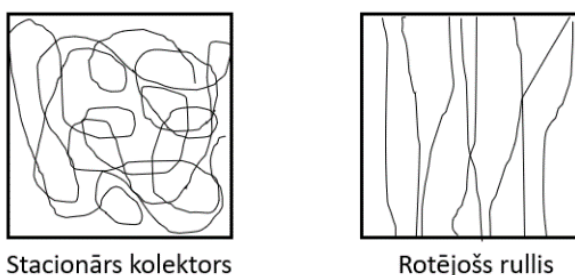


**Attēls 8** Nanodiega vilkšana no Teilora konusa

Kā padošanas sistēma tiek izmantota šprīce, kas, ar smalkas vītnes skrūvi, ir savienota ar soļa motoru. Soļu motora darbības rezultātā, tiek izspiests šķīdums no šprīces. Mainot soļa motora ātrumu mainās arī šķīduma padošanas ātrums. Atkarībā no šķīduma padošanas ātruma var palielināties vai samazināties iegūto nanodiegu diametrs. Palielinot padošanas ātrumu, palielinās veidoto nanodiegu diametrs. Sasniedzot pārāk mazu ātrumu diegi neveidojās, taču pārāk liels ātrums diegos var veidot ieslēgumus un citus defektus. [13]

Sprieguma avots ar līdzstrāvu, kas viedo elektrisko lauku, tiek izmantots kā šķīduma transports. Palielinot pielikto spriegumu palielinās spēks, ar kādu tiek vilkti diegi, un lielāka spēka rezultātā samazinās iegūto nanodiegu diametrs.

Uz kolektora tiek iegūti diegi. Ir dažādi kolektori un atkarībā no tiem mainās diegu izkārtojums uz parauga. Vienkāršākais kolektors ir stacionārs mērķis, taču, izmantojot šo kolektoru, iegūtie nanodiegi neveido konkrētu struktūru, bet gan haotisku tīklu. Cits kolektora veids ir rotējošs rullis, ar kuru ir iespējams iegūt diegus ar sakārtotu struktūru. Rotācijas rezultātā diegi ir izstiepti un sakārtoti paralēli. (*Attēls 9*)



**Attēls 9** Nanodiegu izkārtojums uz kolektoriem

Svarīgs arī ir attālums starp šprīces adatu un kolektoru, jo tas ietekmē elektrisko lauku – volti uz metru. Ja attālums ir pārāk mazs, polimēra šķīdums nespēs izzūt un nanodiegos var veidoties ieslēgumi, kā arī nanodiegi var kļūt plakani, nevis cilindriski, pie pārāk maziem attālumiem. Nanodiegu izzūšanas ātrums ir atkarīgs no izmantotā šķīdinātāja. [13]

Lai iegūtu nanodiegos tiek izmantots šķīdums, kuru veido no polimēra un atbilstoša šķīdinātāja. Pievienojot citas aktīvās vielas šķīdumam, var mainīt nanodiegu īpašības. Svarīgas šķīduma īpašības ir viskozitāte, virsmas spraigums, elektriskā vadītspēja un polimēra koncentrācija. Šīs īpašības ietekmē veidoto nanodiegu diametru.

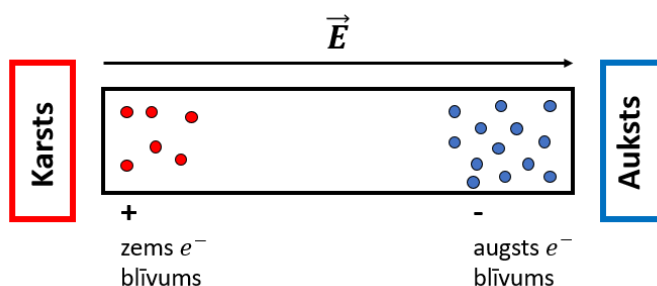
Augstāka viskozitāte un polimēra koncentrācija palielina diametru, bet augstāka elektriskā vadītspēja to samazina. Nanodiegos var veidoties ieslēgumi un to vilkšanas procesā var veidoties pilieni. Ieslēgumu daudzumu var samazināt palielinot viskozitāti un polimēra ķēžu garumu. Šķīduma virsmas spraigums ietekmē Teilora konusa veidošanos un diegu vilkšanas procesa stabilitāti. [13]

Diegu īpašības var ietekmēt arī apkārtējie apstākļi, piemēram, temperatūra un gaisa mitrums. Augsta gaisa mitruma dēļ diegos var veidoties ieslēgumi. Palielinoties telpas temperatūrai var samazināties diegu diametrs. [13]

## 1.5 Termoelektriskais efekts un tā pielietojumi

Termoelektriskais efekts ir ievērojams fenomens ar daudziem praktiskiem pielietojumiem. Termoelektriskais efekts ļauj izmantot termopārus ātrai un efektīvai temperatūras mērīšanai, tie dod iespēju izmantot termoelektriskos ģeneratorus, kuri pārveido siltumu elektrībā. Savienojot divus dažādus metālus ķēdē, notiek Fermī līmeņu izlīdzināšanās un lādiņu pārdalīšanās.

Zēbeka efekta darbības princips ir elektronu kustība materiālā. Materiāla karstajā daļā elektroniem ir lielāka enerģija un tie pārvietojas uz auksto materiāla daļu. Šī rezultātā aukstajā daļā ir vairāk elektronu nekā karstajā un aukstā daļa paliek negatīvi uzlādēta. Veidojas elektriskais lauks (*Attēls 10*). Taču sasniedzot noteiktu elektronu blīvumu, aukstā puse ir piesātināta ar elektroniem un elektronu blīvums aukstajā pusē palielināties vairs nevar.



**Attēls 10** Termoelektriskais efekts

Termoelektriskais efekts var notikt ar P tipa un N tipa pusvadītājiem. *Attēls 12* ir redzams N tipa pusvadītājs, taču P tipa pusvadītāja gadījumā elektronu vietā būtu caurumi un elektriskais lauks būtu pretējā virzienā [14]. Zēbeka efektu izmanto termopāros. Divu dažādu metālu kontaktpunktā veidojas spriegums, kas ir atkarīgs no temperatūras. Zēbeka koeficients ir lielums, kas raksturo, cik liela sprieguma izmaiņa rodas uz temperatūras gradientu:

$$\alpha = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{dV}{dT} \quad (11)$$

Kamēr Zēbeka efekta rezultātā no siltuma tiek iegūta strāva, Peltjē efekts darbojas pretēji: slēdzot ķēdē divus dažādus materiālus, ar strāvas vai sprieguma avotu un nodrošinot strāvas plūsmu, materiālu kontaktpunktā rodas temperatūras izmaiņa, kas ir atkarīga no strāvas plūšanas virziena. Temperatūra var palielināties vai samazināties. Temperatūra samazinās, ja strāva plūst no n-tipa uz p-tipa materiālu. Kontaktpunktā elektroni absorbē siltuma enerģiju, veicot pāreju starp dažādo materiālu enerģijas līmeņiem. Peltjē koeficients  $\pi$  raksturo siltuma daudzumu, ko spēj pārnest lādiņnesējs:

$$Q_P = \pi \cdot I \quad (12)$$

$Q_P$  ir radītais vai samazinātais siltuma daudzums, bet  $I$  ir caur paraugu plūstošā strāva. Nosakot Peltjē koeficientu ir jāņem vērā Džoula – Lenca likums, kas apraksta siltuma izdalīšanos vadītājā, atkarībā no pretestības un laika:

$$Q_{DL} = I^2 R t \quad (13)$$

Tātad kopējais izdalītais siltuma daudzums ir:

$$Q_P + Q_{DL} = I(\pi + IRt) \quad (14)$$

Tomsona termoelektriskais efekts notiek, ja caur materiālu, kuram ir temperatūras gradients, plūst strāva. Tādā gadījumā notiek papildus siltuma absorbcija vai izstarošana. To izraisa Zēbeka un Peltjē efekta atkarība no temperatūras. Tomsona koeficients raksturo siltuma daudzumu, kas ir absorbēts vai izstarots, kad vienu ampēru liela strāva plūst vienu sekundi, metālā starp diviem punktiem, kuru temperatūras starpība ir  $1^\circ\text{C}$ . Tas var būt pozitīvs vai negatīvs, atkarībā no materiāla. Pozitīvs Tomsona efekts ir sudrabam, negatīvs ir platīnam, taču svinam šis efekts nav. Nosakot Tomsona koeficientu  $\gamma$  ir jāņem vērā Džoula – Lenca likums un siltumplūsma starp ķermeni un apkārtējo vidi. Tomsona efektu apraksta sakarība, kas ir atkarīga no siltuma izmaiņas  $dQ$ , strāvas, temperatūras izmaiņas un Tomsona koeficienta:

$$dQ = \gamma \cdot I \cdot dT \quad (15)$$

Šos trīs efektus var savstarpēji apvienot izmantojot divas Kelvina sakarības. Pirmā Kelvina sakarība ir:

$$\alpha_{ab} = \frac{\pi_{ab}}{T} \quad (16)$$

Bet otrā Kelvina sakarība ir:

$$\frac{d\alpha_{ab}}{dT} = \frac{\gamma_a - \gamma_b}{T} \quad (17)$$

Indekss  $ab$  nozīmē to, ka atbilstošais koeficients raksturo abus materiālu kontaktu. Ja  $a$  un  $b$  ir atsevišķi, tad koeficients raksturo individuālo materiālu.

Sākotnēji tika izmantoti metāli termoelektrisko efektu iegūšanai, taču tajos šie efekti ir maz izteikti. Pēc dažādu pusvadītāju atklāšanas bija iespējams iegūt daudz augstākus termoelektriskos koeficientus [15]. Termoelektrisko efektu stiprums ir atkarīgs no materiāla termoelektriskajām īpašībām. Ir nepieciešama pēc iespējas lielāka elektriskā vadītspēja un mazāka siltumvadītspēja. Termoelektrisko efektivitāti apraksta termoelektriskais labuma faktors. Tas ir atkarīgs no Zēbeka koeficienta  $\alpha$ , elektriskās vadītspējas  $\sigma$ , siltumvadītspējas  $k$  un temperatūras  $T$ :

$$zT = \frac{\sigma \alpha^2 T}{k} \quad (18)$$

## 2 EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

### 2.1 Izmantotie materiāli

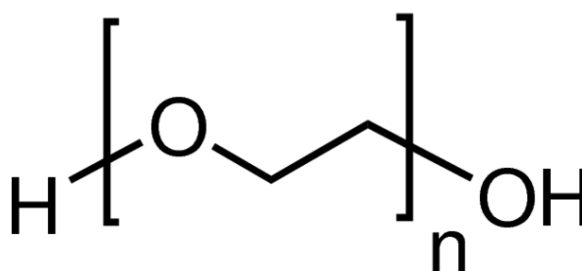
PEDOT:PSS ir organiskajā elektronikā plaši lietots polimēru maisījums. Veidojot nanodieģus ar elektrovērpšanas metodi ir iegūtas orientētas polimēru ķēdes, kas varētu palielināt elektrisko vadītspēju. Ideālā gadījumā nanodieģus varētu iegūt izmantojot tīru PEDOT:PSS polimēru, kuram piemīt salīdzinoši augsta elektriskā vadītspēja. Taču no tīra PEDOT:PSS nav iespējams iegūt nanodieģus, jo tam nav vajadzīgās īpašības, piemēram, atbilstoša viskozitāte. Tāpēc ir jāizgatavo polimēru šķīdums.

Šajā darbā ir izmantots PEO un divi dažādi PEDOT:PSS maisījumi, kuriem ir atšķirīgas īpašības, tās ir attēlotas *Tabulā 1* [16][17].

**Tabula 1** PEDOT:PSS polimēru raksturlielumi

Polimērs	Viskozitāte, $mPa \cdot s$	Vielas daudzums, %	PEDOT:PSS attiecība	Īpatnējā pretestība, $\Omega \cdot cm$	Daļiņu izmērs, $nm$
AI4083	5 līdz 12	1.3 - 1.7	1/6	500 līdz 5000	100
PH1000	< 50	1.0 - 1.3	1/2.5	< 0.0012	30

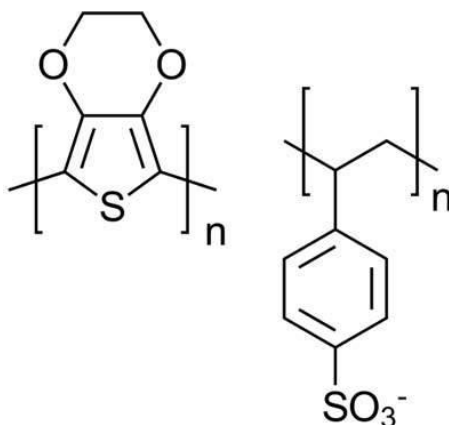
PEO ir netoksisks, ūdenī šķīstošs, polimērs, kura struktūrformula ir redzama *Attēlā 11*. Tas ir plaši izmantots kā nesošā palīgviela farmācijā, pārtikā un kosmētikā. Šim polimēram ir daudz citu pielietojumu, atkarībā no tā ķēdes garuma [18]. Izmantojot šo polimēru plānajās kārtiņās var uzlabot to viendabīgumu [19].



**Attēls 11** PEO polimēra struktūra

PEDOT ir vadošs polimērs, bet PSS ir izolators. PEDOT tiek oksidēts polimerizācijas procesā ar PSS, kas PEDOT polimēru padara stabilu. PEDOT radikālie stāvokļi ir delokalizēti gar polimēru ķēdi, taču PSS to novērš. Ūdens šķīdumos PEDOT polimēru aptver PSS, kas var izraisīt pazeminātu elektrisko vadītspēju [20].

PEDOT:PSS ir caurspīdīgs un elektrovadošs polimēru kompozīts, tā struktūrformula ir redzama *Attēlā 12*. Tas ir poli(3, 4-etilēndioksitiofēna) un polistirēna sulfanāta sajaukums. Atkarībā no PEDOT un PSS proporcijas, šim kompozītam var piemist augsta vadītspēja vai arī tikai caurumu vadītspēja pusvadītāju līmenī un tas ir plaši pielietots plāno kārtiņu izgatavošanā. PEDOT:PSS maisījumam AI4083 izejas darbs ir robežās no 5.0 līdz 5.2 eV. To izmanto caurumu transporta un injekcijas slāņos, kā arī gaismas diodēs. PH1000 ir ar augstu vadītspēju un caurspīdīgumu. To izmanto kā caurspīdīgu elektrodu [20].



**Attēls 12** PEDOT:PSS struktūrformula

Elektrovērpšanai nepieciešamā šķīduma iegūšanas process ir vienkāršs, bet tas aizņem daudz laiku. Šķīduma pamata struktūru veido dejonizēts ūdens un polimērs PEO. Šķīduma sastāvdaļas tiek nosvērtas tirtelpās, izmantojot ķīmijas svarus *METTLER TOLDEO*. Vispirms tiek nosvērts attiecīgais polimēra daudzums un pēc tam pievieno ūdeni. Šķīdumu samaisa izmantojot šprinces adatu, kas samazina vielas zudumus. Pēc tam polimēra šķīdums tiek maisīts 3 dienas izmantojot magnētisko maisītāju. Pēc maisīšanas ir iegūts viendabīgs šķīdums – polimērs ir izšķīdis un uzbriedis. Tālāk notiek otra polimēra PEDOT:PSS pievienošana.

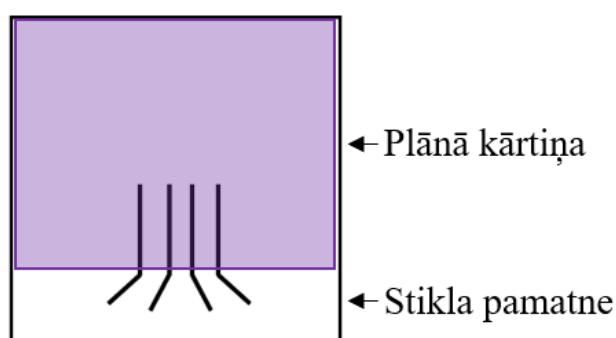
Kad ir pievienots PEDOT:PSS polimērs, šķīduma maisīšana turpinās vismaz 30 minūtes, pirms to izmanto nanodiegu iegūšanai. Šķīdumu izgatavošanas procesā ļoti būtiska ir tīrība un laiks, cik ilgi polimēri ir šķīduši. Šķīdumā var veidoties ieslēgumi, kas nevēlami ietekmēs elektrovērpšanas procesu. Polimēra šķīdums tiek uzglabāts tumsā, istabas temperatūrā. No šķīduma var izgatavot gan plānās kārtiņas, gan nanodiegus.

## 2.2 Paraugu pamatnes

Par paraugu pamatnēm ir izmantoti  $26 \times 77 \text{ mm}^2$  *ISOLAB* mikroskopa priekšmetstikliņi. Vispirms stikliņos tiek izveidoti iegriezumi, lai tos pēc tam varētu salauzt mazākos paraugos. Tālāk notiek stikliņu tīrīšanas process.

Stikliņu tīrīšanai tiek izmantoti Koplīna trauciņi, ultraskaņas vanna un šķīdinātāji. Stikliņus ievieto Koplīna trauciņā, to piepilda ar acetonu un ievieto ultraskaņas vanniņā uz 15 minūtēm. Tālāk stikliņus skalo ar dejonizētu ūdeni 10 reizes. Stikliņus vēlreiz ievieto Koplīna trauciņā, kas pildīts ar 2% deterģenta šķīdumu, uz 15 minūtēm ultraskaņas vannā, pēc tam skalo 10 reizes. To pašu atkārto ar dejonizētu ūdeni un izopropanolu. Pēdējā solī stikliņus neskalo, bet atstāj Koplīna trauciņā, kas pildīts ar izopropanolu.

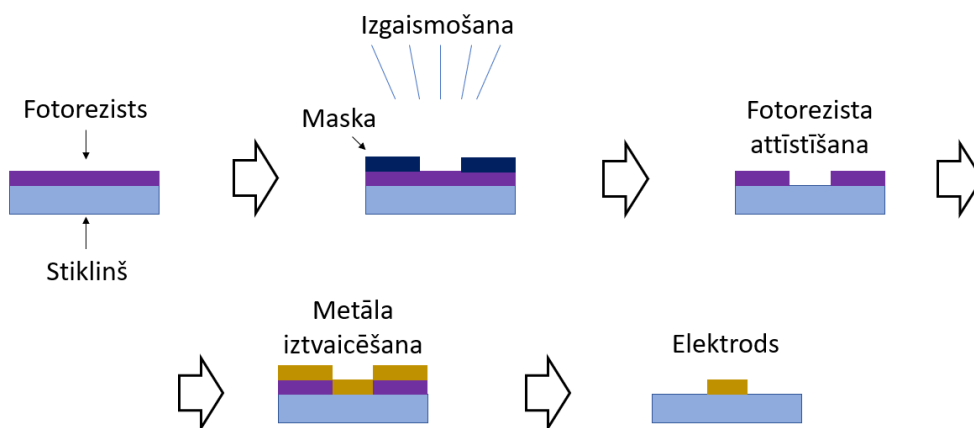
Elektriskajiem mērījumiem tiek izmantoti divu veidu elektrodi. Makroskopiskie elektrodi, kas redzami *Attēlā 13*, tiek izmantoti plānajām kārtiņām – elektriskās vadītspējas un Zēbeka koeficientu mērījumiem. Četri šādi elektrodi atrodas 2 mm attālumā viens no otra. Tie ir pārāk lieli priekš nanodiegu mērījumiem, tāpēc ir izgatavoti sīkstruktūras elektrodi.



**Attēls 13** Makroskopiskie elektrodi

### 2.3 Sīkstruktūras elektrodi

Sīkstruktūras elektrodu iegūšana notiek ar litogrāfijas darba plūsmu. Elektrodu iegūšanai ir vairāki soļi, kopsavilkums ir parādīts *Attēlā 14*. Vispirms uz stikliņiem uzklāj fotorezistu. Pēc tam uzliek masku, izgaismo un attīsta fotorezistu. Tālāk iztvaicē metālu un beigās iegūst stikliņu ar elektrodiem.



**Attēls 14** Elektrodu izgatavošanas process

### 2.3.1 Litogrāfija

Lai uz tīrajiem stikļiem iegūtu elektrodus ir jāizmanto litogrāfijas process. Šajā procesā tiek izmantots pozitīvais fotorezists AZ1518. Izgaismojot pozitīvo fotorezistu, uz stikļa iegūst masku ap izgaismoto laukumu.

Elektrodu iegūšanai tiek izmantota īpaši izgatavota sīkstruktūras elektrodu maska (*Attēls 15*). Uz šīs maskas elektrodi strauji sašaurinās maskas vidū. Attālums starp elektrodiem ir  $20\ \mu\text{m}$ . Maskas dizains nodrošina to, ka elektriskās vadītspējas mērījumus ietekmē tikai tie nanodiegi, kas ir uzklājušies maskas centrā. Tas nodrošina iespēju veikt precīzus mērījumus ar vienu vai dažiem nanodiegiem, kas ir saskaitāmā daudzumā. Uz maskas ir elektrodi ar četriem dažādiem garumiem. Uz īsāka elektroda var iegūt mazāk diegu skaitu, taču, samazinās arī diega uzklāšanās iespēja.



**Attēls 15** Sīkstruktūras elektrodu maska

Notīrītos stikļus žāvē ar slāpekli. Sausos stikļus novieto uz plītnes un karsē 10 minūtes  $180\ ^\circ\text{C}$  temperatūrā. Kad tie ir noņemti no plītnes un atdzisuši, uz tiem var uzklāt fotorezistu AZ1518, izmantojot rotējošā diska metodi. Izmantotā iekārta ir *SPIN Coater Laurell WS400* (*Attēls 16*[21]).



**Attēls 16** Rotējošā diska iekārta *SPIN coater Laurell WS400*

Pēc fotorezista uzklāšanas stikļiņus vēlreiz novieto uz plītiņas un karsē 100 °C temperatūrā 120 sekundes. Būtiska nozīme ir gaisa mitrumam telpā. Ja tas ir zem 40%, tad ir nepieciešams stikļiņus atstāt 20 minūtes velkmes skapī pirms nākamā soļa. Fotorezista kārtiņai ir nepieciešams noteikts mitruma daudzums, lai ķīmiskā reakcija izgaismošanas procesā notiktu veiksmīgi.

Paraugu izgaismošanai un maskas novietošanai, tiek izmantota iekārta *Mask Aligner Suss MA6* (Attēls 17[22]). Šī iekārta dod iespēju ātri iegūt kvalitatīvu masku uz parauga, izgaismojot ar atbilstošu gaismas dozu. Izgaismošanai tiek izmantota 350 W dzīvsudraba lampa. Veicot izgaismošanu pirmo reizi, ir nepieciešama gaismas dozas pielāgošana.



**Attēls 17** Izgaismošanas iekārta *Mask aligner Suss MA6*

Pēc izgaismošanas tiek veikta parauga attīstīšana. Vienā trauciņā tiek ieliets attīstītājs AZ726, bet otrā dejonizēts ūdens. Abos trauciņos jābūt pietiekami daudz šķīdumam, lai noklātu visu stikliņu. Izgaismotos stikļiņus ievieto pirmajā trauciņā un, maisot, tur attīstītājā 90 sekundes. Stikļiņus izņem un ievieto otrajā trauciņā. Ūdenī stikliņu tur 30 sekundes, tas aptur rezista attīstīšanas procesu. Pēc izņemšanas no ūdens, stikļiņus nopūš ar slāpekli. Procesa beigās ir iegūtas maskas uz stikliņiem. Tos pārbauda zem mikroskopa un, ja viss ir kārtībā, uz tiem var uznest metāla slāni ar termiskās iztvaicēšanas vakuuma metodi.

### **2.3.1** Termiskā iztvaicēšana vakuumā

Lai uz parauga iegūtu metāla elektrodus, ir izmantota iekārta *Thermal evaporator Edwards AUTO 306* (Attēls 18[23]). Stikliņi vispirms tiek piestiprināti pie diska, kuru ievieto iekārtā. Iekārtā atrodas divi metāla iztvaicētāji (laiviņas). Vienā no tiem tiek ievietots hroms,

bet otrā varš vai zelts. Varu izmanto uz elektrodiem priekš plānajām kārtiņām, taču sīkstruktūras elektrodi ir no zelta, lai novērstu oksidēšanos un nodrošinātu labāku kontaktu ar nanodiegiem.



**Attēls 18** Termiskās iztvaicēšanas iekārta *Thermal evaporator Edwards AUTO 306*

Kad stikliņi un metāli ir iekārtā, var uzsākt vakuuma atsūkņēšanu. Pirms tam tiek ieslēgta dzesēšanas sistēma – atver ūdens padevi un ieslēdz ūdens sūkni. Vakuumu atsūkņē divi sūkņi. Pirmais strādā priekšvakuumsūkņis, kad tas sasniedz noteiktu vakuumu, ieslēdzās turbomolekulārais sūkņis. Apmēram 1 stundas laikā iekārta sasniedz vajadzīgo vakuumu  $< 2 \cdot 10^{-5}$  mbāri.

Lai noteiktu uzputinātās kārtiņas biezumu, tiek izmantots kvarca rezonators. Caur laiviņu, kurā atrodas hroms, tiek cauri laista strāva. Pakāpeniski palielinot strāvas stiprumu, laiviņa uzsilts un hroms hroms sāk iztvaikot un noklāties uz stikliņa.  $10nm$  hroms nodrošina labāku adhēziju stiklam ar otro metālu. Pēc hroma uzputināšanas laiviņa tiek aizsegta un strāva tiek pieslēgta pie otrās laiviņas. Otrais metāls (zelts vai varš) tiek iztvaicēts  $100nm$  biezā kārtā uz stikliņa. Iztvaicēšanas laikā disks, pie kura piestiprināts stikliņš, rotē, lai nodrošinātu vienmērīgu metāla biezumu.

Pēc putināšanas stikliņu ieliek trauciņā ar acetonu. To ievieto ultraskaņas vannā. Šajā procesā tiek noņemts nevajadzīgais metāls. Starp metālu un stikliņu esošais fotorezists izšķīst acetona, taču metāls, kas bija uz tīra stikla paliek.

## 2.4 Elektrovērpšana

Nanodiegu iegūšanai tiek izmantota paštaisīta elektrovērpšanas iekārta, kas ir redzama *Attēlā 19*. Elektrovērpšanas iekārta sastāv no sprieguma avota, šķīduma padošanas sistēmas un kolektora. Sprieguma avots ir regulējams, ar maksimālo sprieguma vērtību  $20 kV$ . Šķīduma

padošanas sistēma sastāv no soļu motora, šprīces, šprīces turētāja un vadības bloka. Vadības bloks ļauj kontrolēt soļu motora ātrumu, to norādot hercos.

Šķīduma padošanas sistēmai ir veikti uzlabojumi – tiek izmantotas stikla šprīces ar maināmiem, uzskrūvējamiem adatas uzgaļiem, lai to varētu izdarīt, ir pielāgots šprīces turētājs. Arī nanodiegu kolektoram ir veikti uzlabojumi. Sākotnējā, stacionārā kolektora vietā ir uzstādīts rotējošs rullis. Uz iekārtas ir izveidoti stiprinājumi rullim un transmisijas sistēma motoram, kas to savieno ar rulli. Ruļļa griešanās ātrumu ir iespējams kontrolēt, taču attālums starp kolektoru un adatu ir fiksēts. Elektrovērpšanas process notiek organiskā stikla kamerā, kas novērš nevēlamas gaisa plūsmas no apkārtējās vides. Kamera kalpo arī kā drošības elements, bez tā nevar ieslēgt augstspriegumu.



**Attēls 19** Elektrovērpšanas iekārta nanodiegu iegūšanai

Vispirms uz ruļļa tiek uzklāta Al folija, lai pasargātu ruļļa virsmu no bojājumiem. Kā arī tas novērš vajadzību tīrīt rulli pēc katras izmantošanas reizes. Uz ruļļa piestiprina paraugu stikliņus izmantojot alumīnija līmlenti.

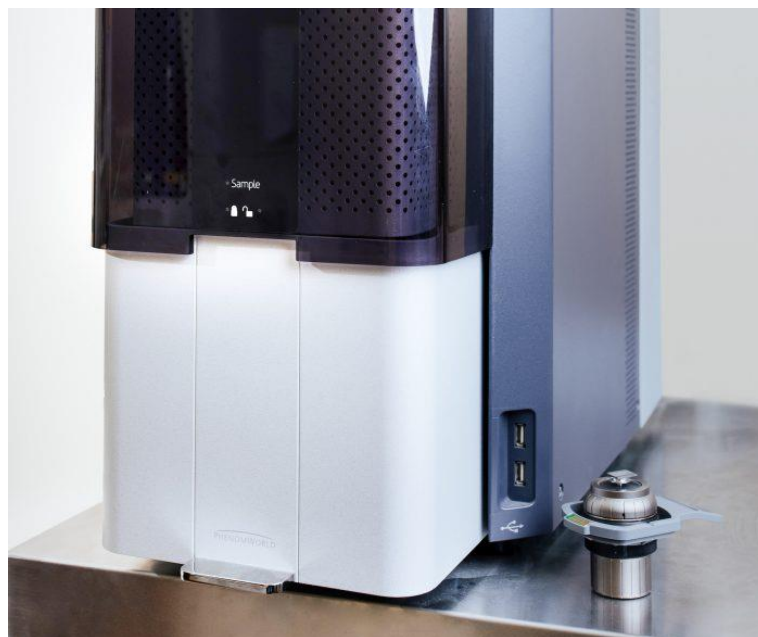
Pirms nanodiegu izgatavošanas tiek iztīrīta šprīce izmantojot ūdeni, pēc tam izopropanolu un beigās izpūšot ar slāpekli. Kad šprīce ir sausa tiek samaisīts polimēra šķīdums, to uzpilda šprīcē, atbrīvojās no gaisa burbuļiem. Šprīci ievieto turētājā, pieslēdz pozitīvo strāvas kājiņu un aiztaisa kameru. Kamerai ārpusē tiek pievienots negatīvais kontakts.

Tiek ieslēgta šķīduma padošanas sistēma, kas šprīci nofiksē turētājā. Tiek ieslēgts ruļļa griešanas motors. Kad adatas galā ir redzams neliels šķīduma piliens, tiek ieslēgts augstspriegums un sākās diegu vilkšanas process. Jāpievērš uzmanība pilienam adatas galā. Ja piliens ir pārāk mazs, palielina padošanas ātrumu. Ja piliens ir pārāk liels – samazina.

Diegu vilkšanas procesa ilgums ir atkarīgs no izmantotā šķīduma. Šķīdumiem ar augstāku viskozitāti ir nepieciešams vairāk laika, lai iegūtu pietiekami daudz nanodiegu uz paraugu stikliņiem. Kad process ir beidzies izslēdz augstspriegumu, ruļļa motoru un padošanas sistēmu. Noņem kameras vāku un no ruļļa noņem foliju un paraugu stikliņus.

## 2.5 Skenējošā elektronu mikroskopija

Pēc nanodiegu iegūšanas uz paraugiem, ir jāpārlicinās, ka tie šķērso elektrodus. Lai to izdarītu, tiek izmantots skenējošais elektronu mikroskops *SEM phenom Pro* (Attēls 20[24]).



Attēls 20 Skenējošais elektronu mikroskops *SEM phenom Pro*

Izmantojot šo mikroskopu ir ātri un ērti iespējams pārbaudīt nanodiegu. Vispirms parauga stikliņš tiek pielīmēts pie metāla turētāja, izmantojot oglekļa līmlenti. Turētāju ievieto statīvā. Ņemot vērā nanodiegu izmērus un stikla vadītspēju, tiek izmantots turētājs priekš nevadošiem paraugiem. Lai pārbaudītu paraugus, elektroni tiek paātrināti 10 kV režīmā.

Pirms attēlu uzņemšanas tiek uzstādīts pareizs kontrasts/gaišums un fokuss, lai iegūtu pēc iespējas kvalitatīvāku attēlu. Vispirms tiek uzņemtas bildes ar elektrodiem no attāluma, lai noteiktu nanodiegu skaitu, kas piedalās strāvas vadīšanā. Pēc tam attēls tiek palielināts (līdz pat 20000 reizu palielinājums) un ar iebūvēto SEM funkciju nomēra nanodiegu diametru. Šajā brīdī tiek arī noteikts elektrodu pāris, starp kuriem veikt elektriskos mērījumus. Izmantojot SEM ir jābūt uzmanīgam, jo elektronu kūlis var sabojāt paraugus.

## 2.6 Elektriskās vadītspēja un Zēbeka koeficients

Elektriskās vadītspējas mērījumi tiek veikti kriostatā (Attēls 21). Kriostats nodrošina labu zemējumu, kas novērš trokšņus mērījumu laikā. Visi mērījumi ir veikti vakuumā, lai novērstu gaisa mitruma ietekmi uz mērījumiem.

Vispirms tiek ieslēgts dators un strāvas avots. Pēc tam kriostatu novieto uz galda. Parauga stikliņu novieto uz mērīšanas statīva un ar metāla kājiņām piestiprina. Pie elektrodiem pievieno vadus un pielīmē tos ar sudraba pastu. Sudraba pastu pirms lietošanas kārtīgi samaisa, pievieno šķīdinātāju, ja nepieciešams.

Kriostats tiek salikts atpakaļ kopā, tiek pieslēgti vadi. Tālāk notiek vakuuma atsūkņošana, vispirms ar priekšvakuumsūkni, pēc tam ar turbomolekulāro sūkni (*Attēls 21*). Divu sūkņu izmantošana ļauj ātri sasniegt nepieciešamo vakuumu. Mērījumi ir veikti  $< 2 \cdot 10^{-4}$  mbar lielā vakuumā.



**A**

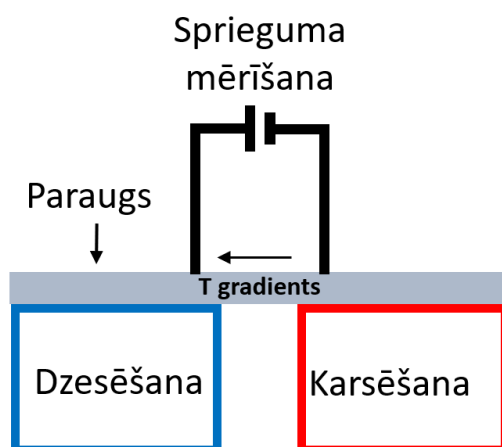
**B**

**C**

**Attēls 21** A) kriostats B) priekšvakuumsūknis C) turbomolekulārais sūknis

Mērījumi tiek veikti izmantojot elektrometru *Keithley 617* ar divu kontaktu metodi. Mērot volt-ampēr raksturlīknes, katrs līknes punkts tiek mērīts 10 reizes, kamēr nomērītā vērtība stabilizējās. Katrs paraugs tiek mērīts trīs reizes. No iegūtajiem rezultātiem tiek aprēķinātas paraugu vadītspējas. Zinot iepriekš noteiktos nanodiegu izmērus un to daudzumu uz parauga, tiek aprēķinātas īpatnējās vadītspējas pēc formulas (9).

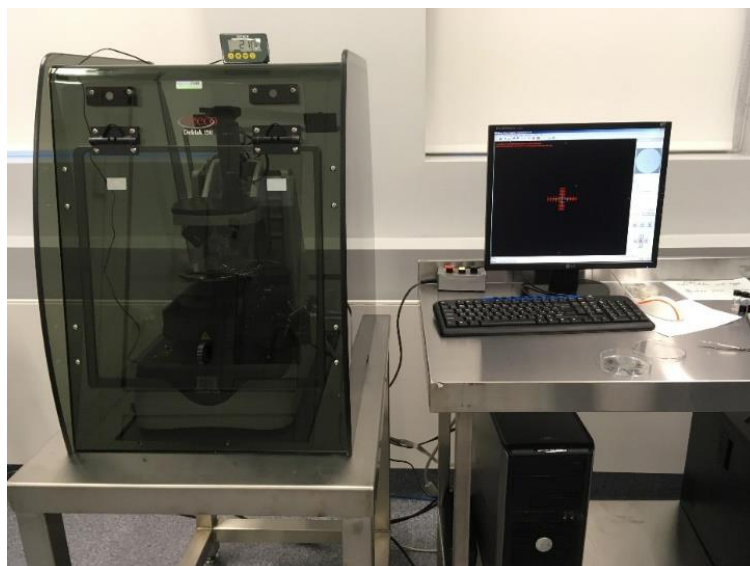
Lai noteiktu Zēbeka koeficientu tiek izmantots temperatūras kontrolieris *PTC10* un nanovoltmetrs *KEITHLEY 2182A*. Mērījumi ir veikti temperatūras diapozonā no  $25^{\circ}\text{C}$  līdz  $55^{\circ}\text{C}$ . Zēbeka koeficienta iekārtas shēma ir parādīta *Attēlā 22*. Iekārtai ir divi peltjē elementi, viens no tiem tiek sildīts, bet otrs dzesēts, uzturot temperatūras gradientu. Parauga vidū tiek mērīta strāva. Iekārtai ir veikts uzlabojums – ir uzstādīti 3D printēti termopāru turētāji, kas ļauj precīzi novietot termopārus uz parauga. To precīza novietošana ir ļoti svarīga, jo, atkarībā no termopāra pozīcijas un tā spiediena uz parauga, var mainīties rezultāti.



Attēls 22 Zēbeka iekārtas shēma

## 2.7 Plānās kārtiņas

Plānās kārtiņas tiek izgatavotas no tiem pašiem šķīdumiem, no kuriem ir iegūti nanodiegi. Uz attīrītiem stikliņiem tiek uznesta plānā kārtiņa ar rotējošā diska metodi. Pēc tam virsū tiek iztvaicēti vara elektrodi, izmantojot iepriekš sagatavoto makroskopisko elektrodu masku. Izmantojot profilometru *Profiler Dektak 150* (Attēls 23) iegūst kārtiņas biezumu. Šī iekārta mēra paraugu biezumus ar adatu. Uz plānās kārtiņas ir ievilkta švīka pār kuru tiek vilkta adata. Mērot adatas augstuma novirzi iegūst kārtiņas biezumu.



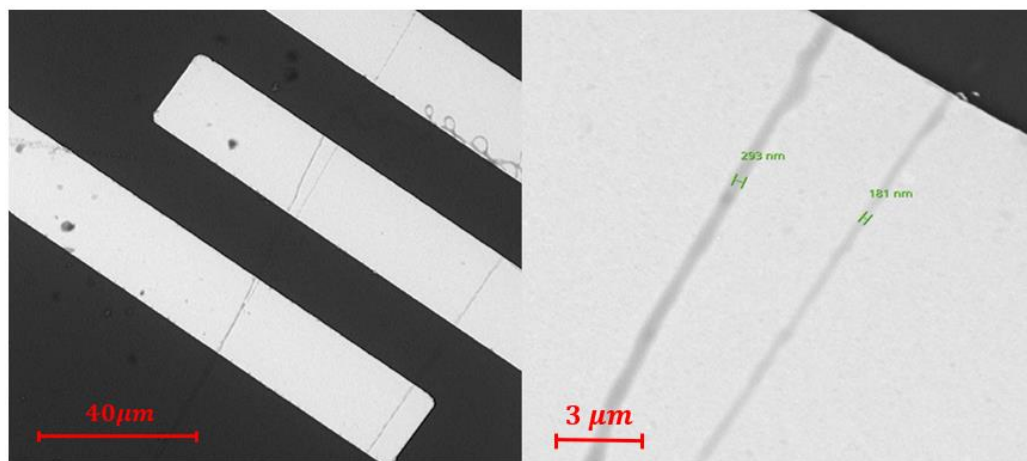
Attēls 23 Profilometrs *Profiler Dektak 150*

### 3 REZULTĀTI

Rezultātos tiek apskatīti 5 šķīdumi, kas veidoti no PEO un PEDOT:PSS (AI4083 un PH1000) polimēriem. Viens šķīdums ir bez pievienota PEDOT:PSS, kamēr pārējie ir ar sekojošiem PEDOT:PSS svara procentiem (wt): 20%, 33%, 43% un 50%.

No šķīdumiem tika izveidoti nanodiegi un plānās kārtiņas. Tika noteiktas to īpašības – nanodiegu diametri, elektriskā vadītspēja un Zēbeka koeficients. Iegūtās īpašības ir izmantotas, lai salīdzinātu plānās kārtiņas un nanodiegu savā starpā.

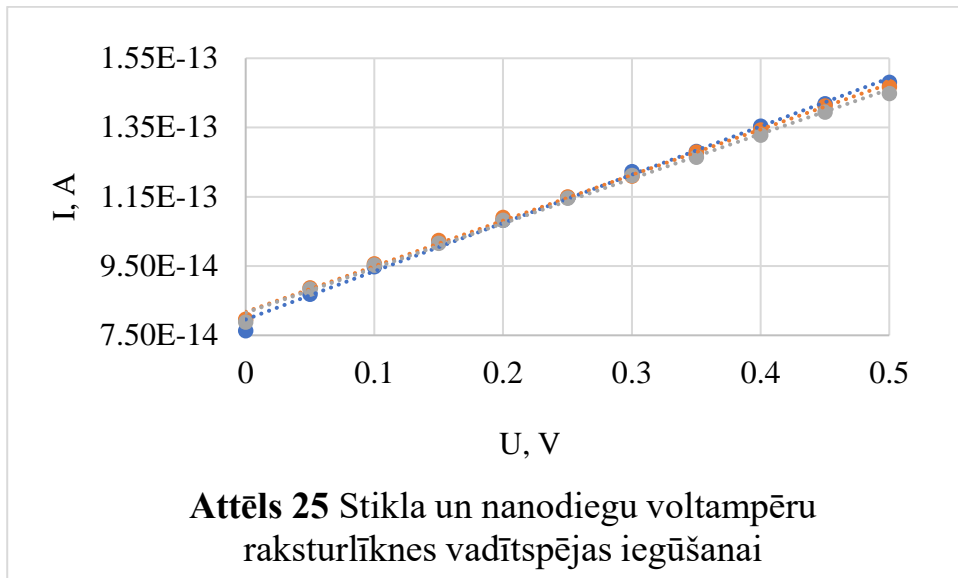
Vispirms tiek apskatīti polimēra AI4083 paraugi. Nanodiegu paraugi ir izgatavoti uz sīkstruktūras elektrodiem. Viena no nanodiegu paraugu SEM bildēm (wt = 50%) ir redzama *Attēlā 24*.



**Attēls 24** Pa kreisi nanodiegi uz elektrodiem, melnā krāsā ir stikla pamatne, baltā krāsā elektrodi. Pa labi Nanodiegu diametru mērījumi. Diegs pa kreisi ar 293 *nm* diametru, pa labi ar 181 *nm* diametru.

Mērot nanodiegu īpatnējo elektrisko vadītspēju ir jāņem vērā pamatnes (stikla) vadītspējas ieguldījums. Lai to izdarītu tika uzņemtas voltampēru raksturliķnes tīriem elektrodiem uz stikla, kā arī pēc nanodiegu uznešanas uz stikla. Nanodiegu vadītspēju nosaka starpība starp tīrās pamatnes vadītspēju un parauga ar nanodiegiem vadītspēju.

Ar katru paraugu ir veikti trīs mērījumi. Attēlā 25 ir parādītas voltampēru raksturliķnes paraugam ar 30 PEDOT:PSS svara procentiem.



Izmantojot iebūvēto funkciju *Regression* no *Excel Data analysis*, ir iegūtas elektriskās vadītspējas katrai līknei. Tālāk ir aprēķināta vidējā elektriskās vadītspējas vērtība:

$$\rho_{vid(stikls+diegi)} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}{n} = 1.34 \cdot 10^{-13} \text{ S} \quad (19)$$

Pēc vidējās vērtības iegūšanas notiek kļūdu aprēķināšana:

$$\Delta\rho_1 = \rho_{vid(stikls+diegi)} - \rho_1 = -6.14 \cdot 10^{-15} \text{ S} \quad (20)$$

$$\Delta\rho_{diegi+stikls} = t \cdot \sqrt{\frac{\sum_i \Delta\rho_i^2}{n(n-1)}} = 7.42 \cdot 10^{-15} \text{ S} \quad (21),$$

Kur  $t$  ir Stjudenta koeficients trīs vienpusējiem mērījumiem (2.353) un  $n$  ir mērījumu skaits.

Lai iegūtu nanodiegu elektrisko vadītspēju, no kopējās vadītspējas (nanodiegi + stikls) tiek atņemta tīra stikla elektriskā vadītspēja.

$$\rho_{vid(diegi)} = \rho_{vid(stikls+diegi)} - \rho_{vid(stikls)} = 1.55 \cdot 10^{-14} \text{ S} \quad (22)$$

Lai iegūtu nanodiegu elektrovadītspējas kļūdas tiek izmantota parciālās atvasināšanas metode, kas šajā gadījumā nozīmē tīra stikla un stikla + nanodiegu kļūdu kvadrātu saskaitīšana zem saknes:

$$\Delta\rho_{diegi} = \sqrt{\Delta\rho_{diegi+stikls}^2 + \Delta\rho_{stikls}^2} = 8.50 \cdot 10^{-15} \text{ S} \quad (23)$$

Pēc tam tiek aprēķinātas īpatnējās vadītspējas plānajām kārtiņām un nanodiegiem, kur  $l_e$  ir attālums starp elektrodiem un  $L$  ir plānās kārtiņas vai nanodiegu šķērsriezuma laukums:

$$\sigma_{diegi} = \frac{\rho_{vid(diegi)} \cdot l_e}{L} = 1.20 \cdot 10^{-7} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1} \quad (24)$$

Aprēķinot īpatnējās vadītspējas tiek iegūtas absolūtās kļūdas, izmantojot ievietošanas paņēmieni, ņemot vērā vadītspēju kļūdas:

$$\Delta\sigma_{diegi} = \frac{(\rho_{vid(diegi)} + \Delta\rho_{diegi}) \cdot l_e}{L} - \frac{\rho_{vid(diegi)} \cdot l_e}{L} = 6.58 \cdot 10^{-8} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1} \quad (25)$$

Izmantojot aprēķinātās absolūtās kļūdas ir iegūtas mērījumu relatīvās kļūdas:

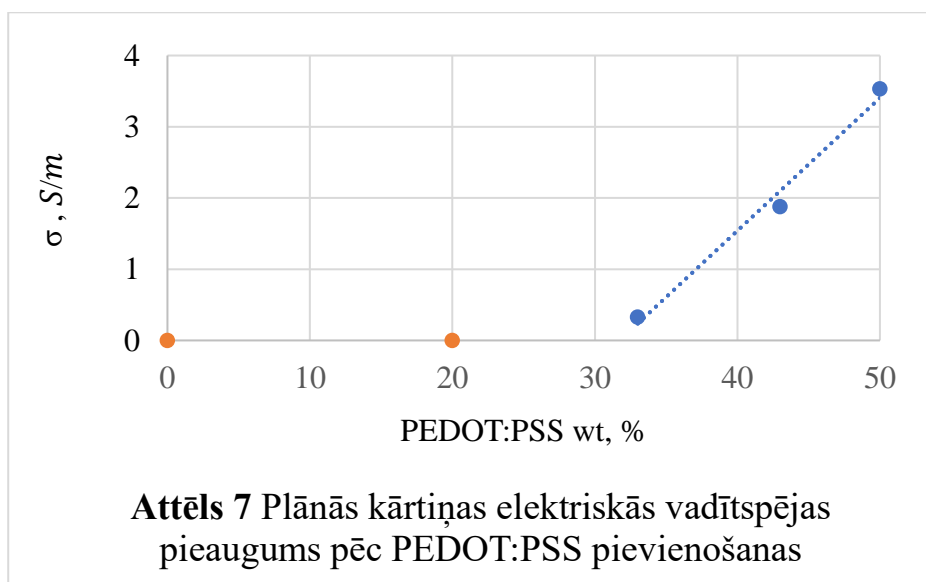
$$r_{diegi} = \frac{\Delta\sigma_{diegi}}{\sigma_{diegi}} \cdot 100 = 55 \% \quad (26)$$

Plāno kārtiņu paraugiem ir aprēķinātas to īpatnējās vadītspējas, kuras ir uzrakstītas *Tabulā 2*, grafiski tās ir redzamas *Attēlā 26*.

**Tabula 2** Plāno kārtiņu īpatnējās elektriskās vadītspējas

PEDOT:PSS wt, %	$\sigma, S \cdot m^{-1}$	$\Delta\sigma, S \cdot m^{-1}$	r, %
0	6.45E-08	0.50E-08	7.66
20	8.13E-04	0.02E-04	0.29
33	3.27E-01	0.01E-01	0.22
43	1.88E+00	0.01E+00	0.62
50	3.53E+00	0.02E+00	0.53

*Tabulā 2* ir redzams, ka, pievienojot PEDOT:PSS polimēru, pieaug plāno kārtiņu īpatnējā elektriskā vadītspēja. Paraugam ar 20 PEDOT:PSS svara procentiem vadītspēja ir pieaugusi  $2 \cdot 10^4$  reizes, 33 PEDOT:PSS svara procentiem vadītspēja pieaug  $7 \cdot 10^6$  reizes, 43 PEDOT:PSS svara procentiem pieaug  $3 \cdot 10^7$  reizes un 50 PEDOT:PSS svara procentiem vadītspēja ir pieaugusi  $5 \cdot 10^7$  reizes. Augstā elektriskā vadītspēja nodrošina arī daudz zemākas mērījumu kļūdas,  $r < 1\%$ .



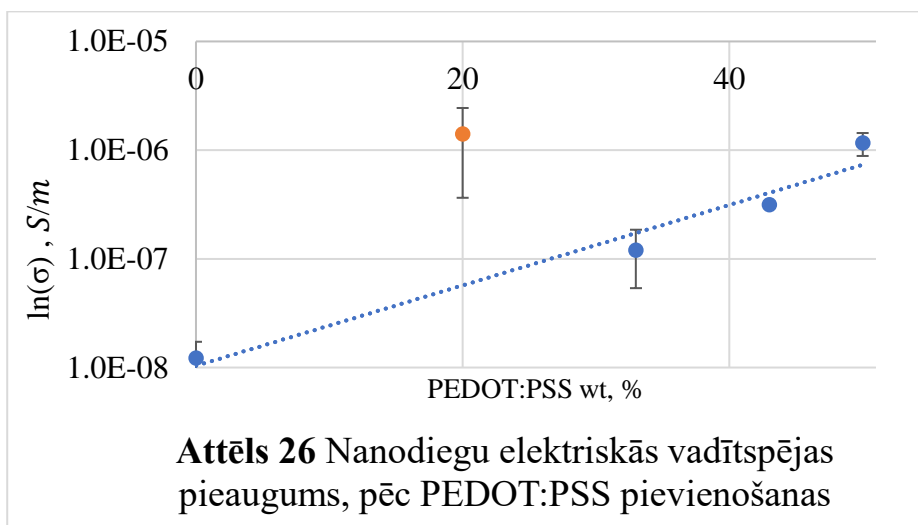
Pievienoto daļiņu koncentrācijai šķīdumā ir jābūt vismaz 20%, lai iegūtu paaugstinātu elektrisko vadītspēju. Grafiski ir redzams, ka šajā gadījumā, elektriskā vadītspēja sāk pieaugt lineāri, sasniedzot vismaz 30% PEDOT:PSS svara procentus.

Izmantojot tos pašus šķīdumus ir iegūti nanodiegi. To aprēķinātās īpatnējās vadītspējas ir norādītas *Tabulā 3* un grafiski ir redzamas *Attēlā 26*.

**Tabula 3** Nanodiegu īpatnējās elektriskās vadītspējas

PEDOT:PSS wt, %	$\sigma, S \cdot m^{-1}$	$\Delta\sigma, S \cdot m^{-1}$	$r, \%$
0	1.22E-08	0.51E-08	42
20	1.40E-06	1.04E-06	74
33	1.20E-07	0.65E-07	55
43	3.15E-07	0.14E-07	4
50	1.16E-06	0.28E-06	24

Tabulā 2 ir redzams, ka, pievienojot PEDOT:PSS polimēru, nanodiegu elektriskā vadītspēja pieaug. Paraugam ar 20 PEDOT:PSS svara procentiem vadītspēja ir pieaugusi 115 reizes. Taču šis mērījums ir ar ļoti lielu kļūdu un tas ir novirzīts no tendences līknes. Tāpēc šis mērījums ir pieņemts kā rupja kļūda. Paraugam ar 33 PEDOT:PSS svara procentiem vadītspēja ir pieaugusi 10 reizes, ar 43 PEDOT:PSS svara procentiem pieaug 26 reizes un ar 50 PEDOT:PSS svara procentiem vadītspēja pieaug 95 reizes.



Pēc rezultātu attēlošanas grafiski, logaritmiskā mērogā, ir redzams, ka veidojas lineāra tendences līkne. Tas norāda uz to, ka, pēc PEDOT:PSS pievienošanas, nanodiegu elektriskā vadītspēja pieaug eksponenciāli.

Aprēķinātajās nanodiegu un plāno kārtiņu īpatnējās elektriskās vadītspējas ir novērojama milzīga atšķirība. Salīdzinot nanodiegu elektriskās īpatnējās vadītspējas ar tīriem PEO paraugiem, pēc PEDOT:PSS pievienošanas, vadītspēja pieaug līdz 95 reizēm, bet plāno kārtiņu īpatnējās vadītspējas pieaug līdz pat  $5.5 \cdot 10^7$  reizēm, izmantojot tos pašus šķīdumus.

Tīra polimēra AI4083 specifiskācijā ir norādīts, ka tā elektriskā vadītspēja ir  $0.04 S \cdot m^{-1}$ . Pēc PEO pievienošanas vadītspēja ir pieaugusi gandrīz 90 reizes ( $3.53 S \cdot m^{-1}$ ) plāno kārtiņu gadījumā, bet samazinājusies gandrīz 35000 reizes ( $1.16 \cdot 10^{-6}$ ) nanodiegu

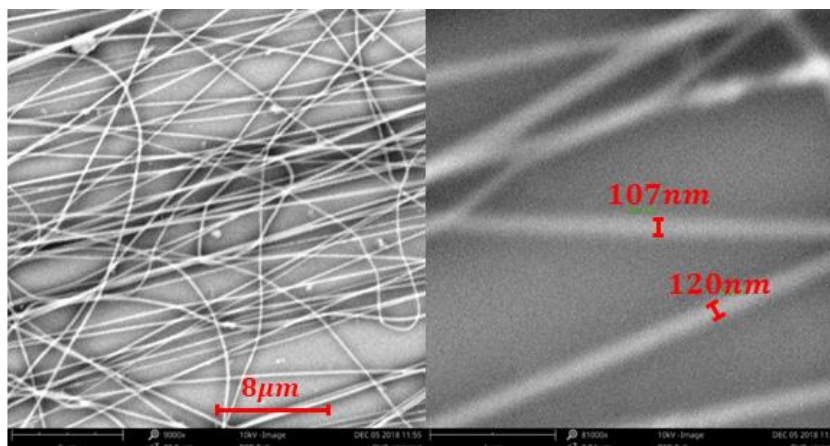
gadījumā (rezultāti ar 50 PEDOT:PSS svara procentiem). Polimērā AI4083 PEDOT pret PSS attiecība ir 1 pret 6. PSS molekula ir izolators un šķīduma veidošanas procesā PSS molekulas varētu tikt atdalītas no PEDOT molekulas, izraisot jonu elektriskās vadītspējas izmaiņas plānajās kārtiņās. Taču PSS daļiņu izmēri ir 100 nm, kas ir gandrīz samērojami ar nanodiegu izmēriem. Tas varētu izraisīt nehomogēnu PEDOT:PSS polimēru izkārtošanos nanodiegu ķēdē. Ja nanodiega diametrs ir samērojams ar PSS daļiņas izmēru, tad diegos veidojas izolējoši apgabali, samazinot to elektrisko vadītspēju. Elektrovērpšanas procesā PEDOT:PSS kompozīts varētu tikt izjaukts pārāk daudz, kas padarītu PEDOT polimēru nestabilu atstājot ietekmi uz elektrisko vadītspēju.

Plānajām kārtiņām ir nomērīti Zēbeka koeficienti, tie ir attēloti *Tabula 4*. Plānajām kārtiņām, bez pievienota PEDOT:PSS, nebija iespējams nomērīt Zēbeka koeficientu, zemās elektriskās vadītspējas dēļ. Salīdzinot *Tabulā 4* esošos rezultātus, ir redzams, ka paraugam 20 PEDOT:PSS svara procentiem ir vislielākais Zēbeka koeficients -  $11.69 \frac{\mu V}{K}$ , bet pārējiem paraugiem tie kļūdu robežās sakrīt un ir ap  $8.5 \frac{\mu V}{K}$ .

**Tabula 4** Zēbeka koeficienta vērtības

PEDOT:PSS wt, %	$\alpha, \frac{\mu V}{K}$	$\Delta\alpha, \frac{\mu V}{K}$	$r, \%$
20	11.69	0.16	1.33
33	8.61	0.39	4.49
43	8.35	0.07	0.83
50	8.99	0.45	5.01

PEDOT:PSS maisījumam PH1000 daļiņu izmērs ir 30 nm, kas ir vairākas reizes mazāks par nanodiegu diametru, tas varētu atstāt mazāku ietekmi uz nanodiegu elektrisko vadītspēju. Ir izgatavots paraugs, izmantojot polimēru PH1000, tam ir 20 PEDOT:PSS svara procenti. No šī šķīduma iegūtie nanodiegi ir redzami *Attēlā 27*.



**Attēls 27** Nanodiegi, kas iegūti ar PH1000 polimēra šķīdumu

No šī šķīduma izgatavotai plānai kārtiņai elektriskā īpatnējā vadītspēja ir  $5.48 \cdot 10^3 S \cdot m^{-1}$ , šī ir 15 reizes mazāka vadītspēja salīdzinot ar tīra PH1000, literatūrā norādīto, vadītspēju ( $8.33 \cdot 10^4 S \cdot m^{-1}$ )[20]. Plānajai kārtiņai un nanodiegiem, kas ir izgatavoti uz elektrodiem konfigurācijā, kā plānajām kārtiņām, ir noteikti Zēbeka koeficienti  $20 \pm 2 \frac{\mu V}{K}$  un  $17 \pm 2 \frac{\mu V}{K}$ . Iegūtie Zēbeka koeficienti ir līdzīgi, kas liecina par līdzīgu sastāvu gan nanodiegos, gan plānajā kārtiņā.

## SECINĀJUMI

1. Iegūto nanodiegu elektriskā vadītspēja ir līdz pat  $5 \cdot 10^7$  reizēm mazāka par plāno kārtiņu vadītspējām, kas var tikt skaidrotas ar:
  - a. Nanodiegu izgatavošanas laikā ar elektrovērpšanas metodi, iespējams, tiek izjaukta PEDOT:PSS konfigurācija, kas stipri ietekmē elektrisko vadītspēju polimēru kompozītā.
  - b. Ar elektrovērpšanas metodi iegūto diegu diametrs ir samērojams ar molekulārā jona PSS daļiņu izmēru šķīdumā Al4083, kas noved pie nevadošu apgabalu veidošanos nanodiegos un zemas elektriskās vadītspējas diegiem.
2. Augstākā iegūtā elektriskā vadītspēja plānajām kārtiņām no PEDOT:PSS maisījuma Al4083 ir iegūta ar 50 PEDOT:PSS svara procentiem ir  $3.53 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ . Iegūtā vadītspēja ir gandrīz 90 reizes lielāka par tīra PEDOT:PSS (Al4083) elektrisko vadītspēju. Tas var tikt skaidrots ar jonu vadītspējas pieaugumu, PEO polimēram samazinot izolējošā PSS molekulāro jonu koncentrāciju pie PEDOT ķēdēm.
3. Noteiktie Zēbeka koeficienti plānajām kārtiņām un nanodiegiem kļūdu robežās sakrīt, kas liecina par to, ka ķīmiskais sastāvs nanodiegos ir tāds pats, kā šķīdumos. Tas nozīmē, ka elektriskās vadītspējas lielās atšķirības starp plānajām kārtiņām un nanodiegiem ir saistītas ar savstarpējo polimēru struktūru materiālos.

## PATEICĪBAS

Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūta Organisko materiālu laboratorijas vadošajam pētniekam, darba vadītājam Dr.phys. Kasparam Pudžam.

Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūta Organisko materiālu laboratorijas vadošajam pētniekam un vadītājam Dr.phys. Aivaram Vembrim.

Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūta Elektronisku un fotonisku ierīču prototipēšanas laboratorijas pētniekam Dr.sc.ing. Robertam Rimšam, par sīkstruktūras elektrodu maskas izgatavošanu.

Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūta Organisko materiālu laboratorijas pētniekam MSc. Andrejam Tokmakovam, par apmācību un padomiem, kas saistīti ar elektrovērpšanas metodi.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

- [1] I. Meirovics, *Organiskā ķīmija*. Rīga: Zvaigzne, 1992.
- [2] S. Zumdahl, C. Noller, M. Usselman, and R. Norman, “Chemical Compound,” 2019. <https://www.britannica.com/science/chemical-compound> (accessed Feb. 18, 2020).
- [3] R. Meyers, *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edit. Academic Press, 2001.
- [4] J. Clayden, N. Greeves, and S. Warren, *Organic chemistry*, Second Edit. OXFORD, 2012.
- [5] E. Siliņš, *Organiskie pusvadītāji*. Rīga: Liesma, 1968.
- [6] P. J. Flory, “Viscosities of Linear Polyesters. An Exact Relationship between Viscosity and Chain Length,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 62, no. 5, pp. 1057–1070, May 1940, doi: 10.1021/ja01862a020.
- [7] G. Strobl, *The Physics of Polymers*, Third Edit. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [8] D. I. Bower, *An Introduction to Polymer Physics*. New York: Cambridge University Press, 2002.
- [9] C. Huang, X. Qian, and R. Yang, “Thermal conductivity of polymers and polymer nanocomposites,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 132, pp. 1–22, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.mser.2018.06.002.
- [10] E. Šilters, *Fizikas rokasgrāmata*. Rīga: Zvaigzne, 1985.
- [11] T.-H. Le, Y. Kim, and H. Yoon, “Electrical and Electrochemical Properties of Conducting Polymers,” *Polymers (Basel)*, vol. 9, no. 12, p. 150, Apr. 2017, doi: 10.3390/polym9040150.
- [12] D. C. Giancoli, *Physics for scientists & engineers with modern physics*, Third Edit. Prentice Hall, 2000.
- [13] N. Bhardwaj and S. C. Kundu, “Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 28, no. 3, pp. 325–347, May 2010, doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.01.004.
- [14] L. Tzounis, “Organic Thermoelectrics and Thermoelectric Generators (TEGs),” in *Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications*, IntechOpen, 2019.
- [15] R. E. Newnham, *properties of materials*. Oxford University Press, 2005.
- [16] Celvius, “Clevios<sup>TM</sup> ph 1000,” no. 81076212, 2019.

- [17] Celvius, “Clevios™ P VP Ai 4083,” *Clevios\_P\_Vp\_Ai\_4083*, vol. 81075812, no. 81075812, pp. 1–2, 2010.
- [18] Sigma Aldrich, “Poly(ethylene glycol) and Poly(ethylene oxide),” 2020. <https://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=20204110> (accessed May 25, 2020).
- [19] L. Anyang General Chemical Co., “Water soluble resin: Polyethylene Oxide properties and uses,” 2020. <http://www.sellchems.com/polyethylene-oxide-properties-and-uses/> (accessed May 25, 2020).
- [20] Ossila, “PEDOT:PSS,” 2020. <https://www.ossila.com/products/pedot-pss?variant=30366225236064> (accessed May 25, 2020).
- [21] “SPIN coater Laurell WS400.” <http://lims.cfi.lu.lv/WebForms/Equipment/EquipmentView.aspx?toolId=13> (accessed May 28, 2020).
- [22] “Mask aligner Suss MA6.” <http://lims.cfi.lu.lv/WebForms/Equipment/EquipmentView.aspx?toolId=31> (accessed May 28, 2020).
- [23] “Thermal evaporator Edwards.” <http://lims.cfi.lu.lv/WebForms/Equipment/EquipmentView.aspx?toolId=52> (accessed May 28, 2020).
- [24] “SEM Phenom Pro.” <http://lims.cfi.lu.lv/WebForms/Equipment/EquipmentView.aspx?toolId=24> (accessed May 28, 2020).

## 1. Pielikums

Darba rezultāti ir referēti šādās konferencēs:

1. **Oskars Bitmets, Kaspars Pudžs, Andrejs Tokmakovs, Kārlis Kundziņš**, Ar elektrovērpšanas metodi iegūtu PEDOT:PSS saturošu nanošķiedru raksturošana (Characterisation of electrospun PEDOT:PSS containing nanofiber) *LU CFI 36. zinātniskā konference*, Rīga, 2020.gada 11.-13.februāris, *36th Scientific Conference of the Institute of Solid State Physics, University of Latvia*, February 11-13, 2020, Book of Abstracts, p.23
2. **Oskars Bitmets, Kaspars Pudžs, Andrejs Tokmakovs**, Elektrovērpšanas metode funkcionālu nanodiegu iegūšanai un to īpašību pētīšana (Electrospinning method for functional nanowires fabrication and study of their properties) *LU CFI 35. zinātniskā konference*, Rīga, 2019.gada 20.-22.februāris, *35th Scientific Conference of the Institute of Solid State Physics, University of Latvia*, February 20-22, 2019, Book of Abstracts, p.49

Darbā ir veikti šādi uzlabojumi iekārtām:

1. Uzstādīts rotējošā ruļļa kolektors elektrovērpšanas iekārtai, kas savienots ar elektrisko motoru caur transmisijas sistēmu. Uzstādīta atbilstoša motora kontroles vadība. Nodrošināts zemējums kolektoram.
2. Veiktas modifikācijas elektrovērpšanas iekārtas padošanas sistēmai: modificēts šprīces turētājs, kas dod iespēju izmantot modernākas šprīces ar uzskrūvējamu adatu.
3. Izgatavoti termopāru turētāji priekš Zēbeka koeficienta mērīšanas iekārtas, izmantojot Autodesk programmatūru, modeļu izveidošanai, kuri iegūti izmantojot 3D printeri.

## 2. Pielikums

Bakalaura darbs „PEDOT saturošu nanošķiedru iegūšana, izmantojot elektrovērpšanas metodi, un to elektrisko īpašību raksturošana” ir izstrādāts LU Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai. Noslēguma darbs iesniegts kā elektroniska kopija, bez droša elektroniska paraksta.

Autors: Oskars Bitmets

Rekomendēju/nerekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: Dr.phys. Kaspars Pudžs 28.05.2020.

Recenzents: docents Dr.phys. Juris Prikulis

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā 28.05.2020.

Dekāna pilnvarotā persona: metodiķe Lāsma Štāle

Darbs aizstāvēts Bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

\_\_\_\_\_. prot. Nr. \_\_\_\_\_.

Komisijas sekretārs: docents Ivars Driķis