

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Biomedicīnas inženierzinātņu un nanotehnoloģiju institūts

Maksims Šneiders

Doktora studiju programmas “Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve”
doktorants

**ACETONA TVAIKU KONCENTRĀCIJAS
NOTEIKŠANAS METODE, IZMANTOJOT P-N
PĀREJAS OPTISKO STIMULĀCIJU**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. phys.*
JURIJS DEHTJARS

Rīga 2022

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 1. jūlijā plkst. 10 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 417. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. phys.* Jānis Spīgulis,
Latvijas Universitāte, Latvija

Vadošais pētnieks *Dr. phys.* Dmitrijs Bočarovs,
Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūts, Latvija

Profesore *Dr.* Arzum Erdem
Ege University, Turcija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Maksims Šneiders,

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, rekomendācijas, literatūras saraksts, 40 attēlu, septiņas tabulas, viens pielikums, kopā 60 lappušu, ieskaitot pielikumu. Literatūras sarakstā ir 82 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs tika veltīts jauna acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metodes un sensora izstrādei, kas paredzēts medicīniskiem mērķiem (biomarķieru noteikšanai), darba, apkārtējās vides, kā arī pretterorisma aizsardzības mērķiem.

Pamatojoties uz vairākiem pētījumiem, acetona koncentrācija organismā, ārpus noteiktās robežas, var liecināt par kādu vielmaiņas slimību. Palielinātā acetona tvaiku koncentrācija var negatīvi ietekmēt darba apstākļus un apkārtējo vidi, tāpēc acetona tvaiku koncentrācijas noteikšana ir nozīmīga. Līdz šim piedāvātie risinājumi nesniedz iespēju noteikt zemas acetona tvaiku koncentrācijas to darbības procesu nepilnību dēļ.

Promocijas darba ietvaros tika veikts līdz šim pieejamo sensoru, to priekšrocību, trūkumu un darbības apskats. Tika uzskaitīti fizikālie priekšnosacījumi jauna sensora izveidei. Darbā tika izstrādāta metodoloģija un izmantotie instrumenti. Tika realizēta metode, acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai, izmantojot jaunu sensoru uz p-n pārejas optiskas stimulācijas. Tika atspoguļoti un izvērtēti rezultāti. Darba rezultātā tika sniegti secinājumi un rekomendācijas turpmākiem pētījumiem.

Promocijas darbā pirmo reizi tika demonstrēta iespēja samazināt acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas sliekšni līdz 0,636 ppm (attiecinot uz jutīgās daļas laukumu 1 mm²), realizējot metodi ar jauno sensoru acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā; satur ievadu, 7 nodaļas, secinājumus, rekomendācijas, izmantotās literatūras sarakstu, 40 attēlus, 7 tabulas, 1 pielikumu, kopā 60 lappuses. Literatūras sarakstā ir 82 nosaukumi.

ANNOTATION

The dissertation is dedicated to the development of a new acetone gas/vapour concentration determination method and sensor for medical (biomarker determination), labor, environmental and counter-terrorism protection purposes.

Based on several studies, acetone concentration outside the norm may indicate a metabolic disease. Elevated acetone gas/vapour concentration can adversely affect working conditions and the environment; thus, determination of acetone gas/vapour concentrations is necessary. The solutions proposed thus far do not allow to detect low concentrations of acetone gas/vapour due to shortcomings in their operating processes.

Within the dissertation, a literature review of existing sensors citing their advantages, disadvantages and operation principles was performed. The physical preconditions for creating a new sensor were studied. The methodology and tools used were developed as a part of the work. A method for estimating acetone vapour concentration using a new p-n opticaly stimulated sensor was realized. The results were presented and evaluated. As a result of the dissertation, conclusions and recommendations for further research were provided.

For the first time, the possibility to reduce the acetone vapour concentration determination threshold to 0.636 ppm (applied to the sensitive area of 1 mm²) was demonstrated by realizing a method in which the new sensor for acetone vapour concentration determination was used.

The dissertation is written in Latvian; contains an introduction, 7 chapters, conclusions, recommendations, list of references, 40 figures, 7 tables, 1 annex, 60 pages in total. List of references consists of 82 sources.

DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

Saisinājums	Skaidrojums latviešu valodā
β	strāvas pastiprinājuma koeficients
r	relatīvais gaisa mitrums
t	apkārtējā gaisa temperatūra
v	ticamā varbūtība
ΔI	strāvas stipruma pieaugums
$\Delta \tau$	strāvas stipruma pieauguma laika intervāls
A	mērījumu precizitāte
K	tvaiku koncentrācija
R	mērījumu izšķirtspēja
U	elektriskās ķēdes strāvas spriegums
Φ	optiskā starojuma intensitāte
ATH	noteiktas acetona tvaiku koncentrācijas iepludināšanas ierīce
GOS	gaistošs organisks savienojums
HgXe	dzīvsudraba-ksenona (lampa)
LED	gaismas diode
MOP	metālu oksīdu pusvadītājs
SSD	attālumā starp avotu un sensora virsmu
ppm	daļas no miljona (1 ppm = 0,0001 %)
UV	ultravioletais (starojums)

SATURA RĀDĪTĀJS

IEVADS	9
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	15
1.1. Gāzu un tvaiku noteikšanas metodes	15
1.2. Pusvadītāju gāzu/tvaiku sensoru priekšrocības un trūkumi	16
1.3. Fotostimulēto pusvadītāju gāzu/tvaiku sensoru priekšrocības un trūkumi	17
1.4. Pētījuma pamatojums	18
2. P-N PĀREJAS OPTISKĀS STIMULĀCIJAS IZMANTOŠANAS FIZIKĀLIE PRIEKŠNOSACĪJUMI.....	20
2.1. Adsorbcijas un desorbcijas kinētika	20
2.2. Fermi līmenis pusvadītājos.....	21
2.3. Enerģētisko zonu izliekšanās	21
2.4. Elektronu koncentrācija nelīdzsvarotā stāvoklī.....	22
3. METODOLOĢIJA UN INSTRUMENTI.....	23
3.1. Tranzistora izvēle un sagatavošana	23
3.2. Tvaiku nodrošināšanas aparāts.....	24
3.2.1. ATII izmantošanas procedūra.....	28
3.2.2. Acetona tvaiku koncentrācijas kļūdas aprēķins.....	29
3.3. Pētījuma metodoloģija.....	31
3.3.1. Sensora strāvas stipruma reģistrēšana un apstrāde	33
3.3.2. Sensora pieslēgšana	34
4. SENSORA DARBĪBAS REŽĪMU UN PARAMETRU NOTEIKŠANA.....	36
4.1. Optiskā stimulācija	36
4.1.1. Gaismās intensitāte	36
4.1.2. Spektrālā josla.....	37
4.2. Elektriskās ķēdes spriegums.....	40
4.3. Virsmas optiskā degazācija	41
4.4. Strāvas pastiprinājuma koeficients.....	42
5. ACETONA TVAIKU KONCENTRĀCIJAS SLIEKŠŅA NOTEIKŠANA	43
5.1. Bez degazācijas un ar mazu strāvas pastiprinājuma koeficientu.....	43

5.2. Ar degazāciju un lielu strāvas pastiprinājuma koeficientu.....	44
6. ACETONA TVAIKU KONCENTRĀCIJAS NOTEIKŠANAS METODE, IZMANTOJOT SENSORU UZ P-N PĀREJAS OPTISKĀS STIMULĀCIJAS	45
6.1. Metodes salīdzinājums ar pasaulē pieejamiem analogiem.....	45
6.2. Acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metodes izmantošanas procedūra	46
7. REKOMENDĀCIJAS. METODES IZMANTOŠANAS IESPĒJAS	48
7.1. LED kā optiskās stimulācijas avots.....	48
7.2. Apkārtējās vides ietekme, izmantojot LED kā optiskās stimulācijas avotu.....	50
7.3. Selektīva sensora koncepts	51
SECINĀJUMI	52
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	53
PATEICĪBAS	58
PIELIKUMS.....	59

IEVADS

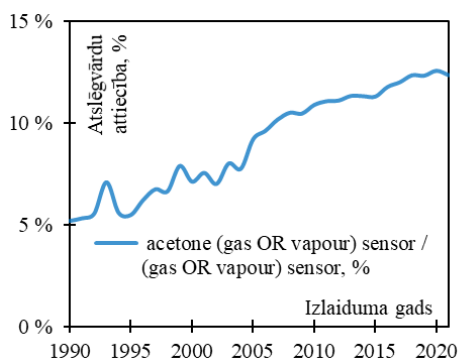
Cilvēka izelpotā gaisa izpētei un analīzei ir pietiekami ilga vēsture medicīniskajā diagnostikā. Jau kopš Hipokrāta (*Hippocrates of Kos*) laikiem bija zināms, ka dažu slimību ietekmē pacienta izelpai parādās raksturīga smarža, piemēram, neārstētam cukura diabētam ir raksturīga acetona smarža, savukārt sēra smarža ir raksturīga pie aknu darbības traucējumiem.

Tiek uzskatīts, ka moderna izelpas izpēte sākas 1780. gada beigās ar Lavuazjē (*Antoine Lavoisier*) atklājumu. Viņš identificēja ogļskābo gāzi kā izelpotā gaisa galveno komponenti. 1971. gadā Paulings (*Linus Pauling*) ievēroja, ka vesela cilvēka izelpa satur veselu virkni gaistošu organisko savienojumu (turpmāk tekstā – GOS) [1, 2].

Mūsdienās ir zināmi vairāk nekā 3000 GOS [3], kuru veidošanās notiek cilvēka organismā. Tie tiek izvadīti caur gāzu apmaiņas mehānismiem plaušās [4,5]. Daži GOS tiek uzskatīti kā biomarkieri vai kā potenciālie biomarkieri, kuri norāda uz saslimšanu, ja to koncentrācija atšķiras no lielumiem, kas iegūti no vispārējās populācijas. Noteiktie biomarkieri sastopami pie šādām slimībām: aptaukošanās, plaušu vēzis, nieru mazspēja, sirdslēkmes un cukura diabēts [6–9].

Paaugstināta GOS koncentrācija apkartēja vidē var negatīvi ietekmēt cilvēka veselību un neizbēgami palielina risku uz dažādām saslimšanām, tai skaitā plaušu vēzi, sirdslēkmēm, alerģiju [10–14]. Iespējamie GOS avoti ir gaisa piesārņojums ar rūpnieciskajām gāzēm, degvielas sadegšanas produktiem u. c.

Acetons ir viens no ketoniem, un tas tiek metabolizēts aknās, savukārt acetona tvaiki ir GOS, kas ir noteikts kā biomarkieris. Acetons tiek pakļauts metabolismam un tiek izvadīts no organisma ar urīnu. Pamatojoties uz vairākiem pētījumiem, acetona koncentrācija organismā ārpus noteiktās robežas var liecināt par kādu vielmaiņas slimību [5,7,8,15].



1. att. Publikāciju skaita attiecība atslēgvārdiem “acetone (gas OR vapour) sensor” pret “(gas OR vapour) sensor” periodā 1990.–2021. gadam. 2022. gada 16. februāra dati no www.sciencedirect.com.

Acetona tvaiki rodas dažādās koncentrācijās, ražojot un glabājot patēriņa preces, komercpreces, būvmateriālus utt. Palielinātā acetona tvaiku koncentrācija var negatīvi ietekmēt darba apstākļus un apkārtējo vidi, tāpēc acetona tvaiku koncentrācijas noteikšana ir pieprasīta (1. att.) [10,16,17].

Moderno sensoru klāstā vislabāk piemērotas GOS koncentrācijas noteikšanai ir pusvadītāju struktūras. Šie sensori ir mazgabarīta ierīces, kas piemērotas zemas tvaiku koncentrācijas noteikšanai, tomēr šāda tipa sensoriem ir trūkums – to darbībai ir nepieciešams uzturēt sensora jutīgo daļu (sensora daļa, kurai mainās elektriskās īpašības mērķa gāzu/tvaiku klātbūtnē) augstā temperatūrā. Lai to novērstu, pēdējos gados pusvadītāju sensorus stimulē ar UV apstarojumu, kas maina pusvadītāja, uz kura ir absorbētas gāzu/tvaiku molekulas, lādiņnesēju koncentrāciju un rezultātā sensora izejas strāvas stiprumu. Šis strāvas stiprums ir atkarīgs no absorbēto gāzu/tvaiku molekulu daudzuma. Ar šādiem sensoriem acetona tvaiku koncentrāciju var izmērīt bez sensora jutīgās daļas uzkaršanās, taču šai metodei ir samērā augsts noteikšanas sliekšnis, kas apgrūtina GOS noteikšanu pacienta izelpā, piemēram, kuņģa-zarnu trakta slimību, diabēta vai citu patoloģiju gadījumos.

Sensora jutīgumu var paaugstināt, izmantojot eksponenciālo sakarību starp absorbēto molekulu daudzumu un fotoģenerēto strāvu caur pusvadītāja ierīces p-n pāreju.

Šis promocijas darbs vēlīts zemas acetona tvaiku koncentrācijas (mazāk par 100 ppm) noteikšanas metodes izstrādei un atbilstoša sensora izveidei, izmantojot p-n pārejas optisko stimulāciju bez sensora jutīgās daļas uzkaršanās.

Promocijas darba rezultātā realizēta acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metode, izmantojot jauno sensoru uz p-n pārejas optiskās stimulācijas, kas ļauj noteikt acetona tvaiku koncentrāciju diapazonā no 16,3 ppm līdz 13 060 ppm (attiecinoši uz 1 mm² lielu jutīgo daļu no 0,636 ppm līdz 509 ppm) gaisā.

Promocijas darba mērķis

Izstrādāt acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metodi, izmantojot jauno sensoru uz p-n pārejas optiskās stimulācijas.

Promocijas darba uzdevumi

1. Metodes, kas nodrošina izejas fotoģenerētās strāvas izmaiņas atkarībā no acetona tvaiku koncentrācijas gaisā, pamatojums.
2. Sensora izstrāde uz pamatotās metodes bāzes.
3. Pētījuma metodoloģijas izstrāde un tvaiku nodrošināšanas aparāta izveidošana sensora strāvas stipruma reģistrācijai laikā atkarībā no acetona tvaiku koncentrācijas gaisā.
4. Sensora strāvas stipruma pieauguma un strāvas stipruma pieauguma laika intervāla darbības režīmu izpēte un ar to saistīto parametru noteikšana:
 - optiskās stimulācijas režīms;
 - elektriskās ķēdes spriegums;
 - virsmas optiskā degazācija;

- strāvas pastiprinājuma koeficients.
5. Sensora strāvas stipruma pieauguma un strāvas stipruma pieauguma laika intervāla atkarībā no acetona tvaiku koncentrācijas gaisā noteikšana.
 6. Metodes realizācija acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai gaisā, izmantojot jauno sensoru uz p-n pārejas optiskās stimulācijas. Metodes izmantošanas procedūra.
 7. Metodes izmantošanas iespējas: sistēmas izmēru samazināšanas, sistēmas darbaspēja ārpus standartapstākļiem, selektīva sensora koncepts.

Aizstāvamās tēzes

1. Acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai gaisā tiek izveidota metode ar jaunu sensoru, kurā p-n pāreja, kas ir bipolārs germānija sakausējums, tiek optiski stimulēta (HgXe lampas starojums, gaismas plūsma $\Phi = 4,65 \text{ mW/cm}^2$).
2. Sensors darbojas acetona tvaiku koncentrācijas diapazonā no 16,3 ppm līdz 13 060 ppm.
3. Uz p-n pārejas bāzes optiski stimulēta sensora emitera strāvas stiprums ir eksponenciāli atkarīgs no acetona tvaiku koncentrācijas gaisā.
4. Sensora acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanās sliekšnis ir 0,636 ppm (attiecinot uz jutīgās daļas laukumu 1 mm^2), izmantojot šādus darbības režīma parametrus: HgXe lampa, $\Phi = 4,65 \text{ mW/cm}^2$; $\Phi_{\text{degazācija}} = 77,5 \text{ mW/cm}^2$; $U = 12 \text{ V}$; $\beta = 152$, saslēgšanas ķēde – emitera atkārtotājs ar kopīgu bāzi, apkārtējās vides nosacījumi: $t = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $r = 45 \pm 5 \%$.
5. Jaunā metode acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai, izmantojot sensoru uz p-n pārejas optiskās stimulācijas bāzes, ļauj noteikt acetona tvaiku minimālo koncentrāciju gaisā 0,636 ppm (attiecinot uz jutīgās daļas laukumu 1 mm^2) ar nenoteiktību 2,0 % (ticamā varbūtība 95 %).

Promocijas darba zinātniskā novitāte

1. Realizēta metode acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai gaisā, kas, izmantojot sensoru uz p-n pārejas optiskās stimulācijas, nodrošina acetona koncentrācijas mērījumus diapazonā no 16,3 ppm līdz 13 060 ppm ar nenoteiktību 2,0 % (ticamā varbūtība 95 %, $t = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $r = 45 \pm 5 \%$), mērot strāvas stipruma pieaugumu.
2. Pierādīts, ka, veicot strāvas stipruma pieauguma laika intervāla mērījumus sensoram uz p-n pārejas optiskās stimulācijas, ir iespējams veikt acetona koncentrācijas mērījumus diapazonā no 16,3 ppm līdz 13 060 ppm ar nenoteiktību 11 s (ticamā varbūtība 95 %, $t = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $r = 45 \pm 5 \%$).
3. Pierādīts, ka uz p-n pārejas bāzes optiski stimulēta sensora emitera strāvas stiprums ir eksponenciāli atkarīgs no acetona tvaiku koncentrācijas gaisā. Acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai gaisā ir izveidots sensors uz p-n pārejas optiskās stimulācijas bāzes, ko nevajag karsēt. Sensora acetona koncentrācijas noteikšanas apakšējais sliekšnis ir 0,636 ppm, augšējais sliekšnis ir 509 ppm, attiecinot uz jutīgās daļas laukumu 1 mm^2 . Minimāli noteicamā

koncentrācija ir 79 reizes mazāka, salīdzinot ar koncentrācijas noteikšanas metodēm, kur izmanto pašreiz tirgū pieejamus optiski stimulētus sensorus.

Promocijas darba praktiskā nozīmība

Realizēta acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metode, izmantojot sensoru uz p-n pārejas optiskās stimulācijas bāzes, ko var izmantot acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai gaisā ar sliksni līdz 0,636 ppm (attiecinot uz jutīgās daļas laukumu 1 mm²). Metodi var izmantot medicīniskiem mērķiem (biomarķieru noteikšanai), darba, apkārtējās vides, kā arī pretterorisma aizsardzības mērķiem.

Promocijas darba aprobācija

Par promocijas darba rezultātiem ziņots 11 zinātniskajās konferencēs.

1. 9th International Conference On BIONICS and PROSTHETICS BIOMECHANICS and MECHANICS MECHATRONICS and ROBOTICS, 2013. gada 17.–21. jūnijs, Rīga, Latvija.
2. Rīgas Tehniskās universitātes 54. starptautiskā zinātniskā konference, 2013. gada 14.–16. oktobris, Rīga, Latvija.
3. 55. Rīgas Tehniskās universitātes studentu zinātniskā un tehniskā konference, 2014. gada 29. aprīlis, Rīga, Latvija.
4. First European Biomedical Engineering Conference for Young Investigators, 2015. gada 28.–30. maijs, Budapest, Hungary.
5. Rīgas Tehniskās universitātes 56. starptautiskā zinātniskā konference, 2015. gada 14.–16. oktobris, Rīga, Latvija.
6. XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing, 2016. gada 31. marts–2. aprīlis, Paphos, Cyprus.
7. Rīgas Tehniskās universitātes 57. starptautiskā zinātniskā konference, 2016. gada 14.–18. oktobris, Rīga, Latvija.
8. The joint conference of the European Medical and Biological Engineering Conference (EMBEC) and the Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics (NBC), 2017. gada 11.–15. jūnijs, Tampere, Finland.
9. World Congress on Medical Physics & Biomedical Engineering, 2018. gada 3.–8. jūnijs, Prague, Czech Republic.
10. Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā zinātniskā konference, 2018. gada 10.–12. oktobris, Rīga, Latvija.
11. XV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing, 2019. gada 26.–28. septembris, Coimbra, Portugal.

Publikācijas

I. Zinātniskās publikācijas un promocijas darba autora ieguldījums

1. Dekhtyar, Y., Komars, M., Sneiders, M., Selutina, M. Towards Optically Induced Semiconductor Gas Sensor: Sensing of Acetone. IFMBE Proceedings, 2015, 50, 63–65. Available from: doi:10.1007/978-981-287-573-0 (**SCOPUS**).
Šneidera, M. ieguldījums: pētījuma metode, eksperimentu veikšana, publikācijas rakstīšana.
2. Dekhtyar, Y., Selutina, M., Sneiders, M., Zunda, U. Towards Optically Induced Semiconductor Human Exhalation Gas Sensor. IFMBE Proceedings, 2016, 57, 482–485. Available from: doi:10.1007/978-3-319-32703-7 (**SCOPUS**).
Šneidera, M. ieguldījums: pētījuma metode, eksperimentu veikšana, publikācijas rakstīšana.
3. Dekhtyar, Y., Komars, M., Morozovs, F., Sneiders, M. Optically Induced Semiconductor Gas Sensor: Acetone Detection Range using Continuous and Cyclic Optical Irradiation Types. IFMBE Proceedings, 2018, 65, 330–333. Available from: doi:10.1007/978-981-10-5122-7 (**SCOPUS**).
Šneidera, M. ieguldījums: pētījuma metode, eksperimentu veikšana, publikācijas rakstīšana.
4. Dekhtyar, Y., Komars, M., Sneiders, M. Semiconductor Ethanol Sensor Inducted with Visible Light. IFMBE Proceedings, 2019, 68/3, 3–6. Available from: doi:10.1007/978-981-10-9023-3 (**SCOPUS**).
Šneidera, M. ieguldījums: pētījuma metode, eksperimentu veikšana, publikācijas rakstīšana.
5. Dekhtyar, Y., Komars, M., Sneiders, M. Optical Metrology of Novel Optically Stimulated Semiconductor Gas Sensor. IFMBE Proceedings, 2020, 76, 462–468. Available from: doi:10.1007/978-3-030-31635-8 (**SCOPUS**).
Šneidera, M. ieguldījums: pētījuma metode, eksperimentu veikšana, publikācijas rakstīšana.

II. Patents

1. RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE. *Gāzes detektēšanas sensors, izmantojot diožu optisko stimulāciju*. Jurijs Dehtjars, Maksims Komars, Maksims Šneideris (izgudrotāji). Int. Cl.: G01N 21/33; G01N 21/59; H01L 21/02; H01L 23/20; H01L 23/467. Iesniegšanas datējums 2020-12-18. LV 15569 B1. Publicēšanas datējums 2021-10-20.
Šneidera, M. ieguldījums: pētījuma metode, eksperimentu veikšana, patenta rakstīšana.

III. Konferenču tēzes

1. Dehtjars, J., Šneideris, M. Towards Optically Stimulated Semiconductor for Gas Sensing. In: *The 9th Baltic-Bulgarian Conference on Bionics and Prosthetics, Biomechanics and Mechanics, Mechatronics and Robotics (ICBBM 2013): Proceedings*, Latvia, Riga, 17–18 June, 2013. Riga: ICBBM Conference Committee, 2013, pp. 219–220. ISBN 978-9934-8409-0-6.

2. Dehtjars, J., Šneiders, M. Ethanol and Isopropanol Sensing Possibility Using Optically Stimulated Semiconductor. In: *RTU 55. Studentu zinātniskā un tehniskā konference*, Latvia, Rīga, 29 April, 2014. Rīga: RTU, 2014, pp.1–3.
3. Komars, M., Šneiders, M. Optically Stimulated Semiconductor Gas Sensitivity Dependence on Its Conductivity Type. In: *RTU 55. Studentu zinātniskā un tehniskā konference*, Latvia, Rīga, 29 April, 2014. Rīga: RTU, 2014, pp. 1–3.
4. Dekhtyar, Y., Komars, M., Sneiders, M., Selutina, M. Towards Optically Induced Semiconductor Gas Sensor: Sensing of Acetone. In: *First European Biomedical Engineering Conference for Young Investigators*, Hungary, Budapest, May 28–30, 2015. p. 20.
5. Dekhtyar, Y., Komars, M., Morozovs, F., Sneiders, M. Optically Induced Semiconductor Gas Sensor: Acetone Detection Range using Continuous and Cyclic Optical Irradiation Types. In: *Abstract book at EMBEC`17 & NBC`17*, Finland, Tampere, June 11–15, 2017. p. 304.
6. Dekhtyar, Y., Komars, M., Sneiders, M. Semiconductor Ethanol Sensor Inducted with Visible Light. In: *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering: Book of Abstracts*, Czech Republic, Prague, June 3–8, 2018. Prague, 2018, p. 676.

Promocijas darbs ir autora maģistra darba “Tranzistora elektrofizikālās īpašības atkarībā no optiskā starojuma un adsorbētām dažādu vielu gāzēm” loģisks turpinājums.

Pētījuma virzienā promocijas darba autora vadībā izstrādāti divi bakalaura darbi un trīs inženierprojekti.

- Bakalaura darbi

1. Komars, Maksims. *Optiskas stimulācijas ietekme uz tranzistoru izejas strāvu gāzes vidēs*. Rīga: [RTU], 2014. 53 lpp.
2. Zunda, Uldis. *Dažādu gāzu vides ietekme uz JMM-1 sensora strāvas signāla amplitūdu un laika konstanti*. Rīga: [RTU], 2015. 59 lpp.

- Inženierprojekti

1. Komars, Maksims. *Kamera optiski stimulēto gāzes sensoru kalibrēšanai*. Rīga: [RTU], 2015. 57 lpp.
2. Puriņš, Lauris. *Sensora testēšanas kamera ar kontrolētu iekšējo vidi*. Rīga: [RTU], 2015. 78 lpp.
1. Zunda, Uldis. *Optiski stimulētu pusvadītāju sensoru matrica gāzu detektēšanai*. Rīga: [RTU], 2016. 77 lpp.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Gāzu un tvaiku noteikšanas metodes

Ir dažādas metodes plaša GOS spektra noteikšanai un analīzei. To realizācijai izmanto sensorus, kas darbojas pēc dažādiem principiem [1,5,18–20]. Par *sensoru* pieņem uz fizikālu parametru izmaiņām reaģējošu ierīci, kuras raksturlielumu izmaiņas var noteikt. Ierīce pārveido neelektrisku fizikālu parametru par elektrisku parametru [21]. Ķīmiskais sensors ir ierīce, kas reaģē uz ķīmisko vielu, mijiedarbojoties ar to. Šiem gāzu un tvaiku sensoriem ir vairāki izmēri un formas (1.1. att.).



1.1. att. Kompānijas “Figaro” gāzu un tvaiku sensori [22].

Modernu acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metožu klāstā sensori, kas balstās uz pusvadītāju struktūrām, ir vislabāk piemēroti zemas tvaiku koncentrācijas noteikšanai. Papildu priekšrocība šai metodei ir zemāks enerģijas patēriņš un sensoru mazāki izmēri (1.1. tab.).

1.1. tabula

Gāzu/tvaiku noteikšanas metožu salīdzinājums [23,24]

Parametrs	Gāzu/tvaiku noteikšanas metodes				
	pusvadītāja	katalītiskās sadedzināšanas	elektroķīmiska	siltuma vadoša	infrasarkan. star. absorbcijas
Jutība	teicami	labi	teicami	slikti	teicami
Precizitāte	labi	teicami	labi	labi	teicami
Selektivitāte	vāji	slikti	labi	slikti	teicami
Detektēšanas laiks	teicami	labi	vāji	labi	labi
Stabilitāte	teicami	labi	slikti	labi	labi
Uzturēšana	teicami	labi	slikti	labi	vāji
Izmaksas	teicami	teicami	labi	labi	vāji
Koncentrācija	daži ppm	ap 10 ppm	1–1000 ppm	1–100 %	1 ppm–100 %

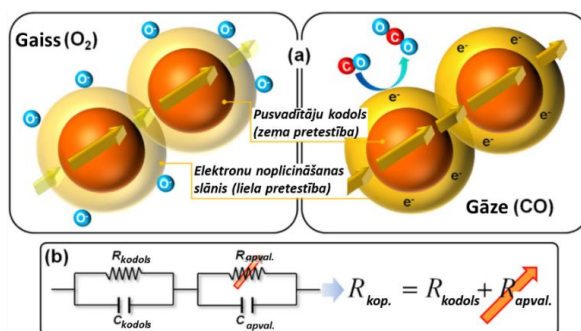
Pusvadītāju gāzu/tvaiku koncentrācijas noteikšanas metodei piemīt sekojošās priekšrocības: sensoru zemas ražošanas izmaksas, liela jutība un vienkārša ekspluatācija. Šādu metožu sensoru projektēšana un ražošana ir vienkāršāka, un tos ir ērti izmantot ražotnēs, medicīnas, vides, darba aizsardzības nolūkos u. tml. Tās ir galvenās priekšrocības pusvadītāju gāzu/tvaiku koncentrācijas noteikšanas metodei salīdzinājumā ar citām metodēm [23,25].

1.2. Pusvadītāju gāzu/tvaiku sensoru priekšrocības un trūkumi

Pirmie komerciāli pieejamie pusvadītāju gāzu/tvaiku sensori tika izstrādāti 60. gados Japānā. Šī tipa sensori ātri ieguva popularitāti visā pasaulē, pateicoties vienkāršam pielietojumam, mazam izmēram un ātram ražošanas procesam [18,20,26].

Tomēr pirmās paaudzes sensoriem bija dažādas problēmas: reģistrētās signāla vērtības dreifs gaisa relatīvā mitruma dēļ, kā arī ilgs noteikšanas laiks. Lai atrisinātu šo problēmu, tika pētīti dažādi pusvadītāju varianti un dažādi konstrukcijas parametri. Galvenie uzlabojumi tika veikti pēdējā desmitgadē, un tie ir balstīti uz pusvadītāju izmēra un struktūras optimizāciju [27–31].

Tradicionāliem pusvadītāju gāzu/tvaiku sensoriem darbības princips balstās uz mijiedarbību starp metāla oksīda pusvadītāju (turpmāk tekstā – MOP) un adsorbētām gāzu/tvaiku molekulām. Gāzu/tvaiku molekulas, adsorbējoties uz sensora virsmas, piesaista elektronus no pusvadītāja vadītspējas zonas. Tas rada enerģijas zonu izliekšanos pusvadītāja pievirsas slānī; rezultātā mainās strāvas stiprums, kas plūst caur sensoru (1.2. att.).



1.2. att. Pusvadītāju gāzu/tvaiku sensoru darbības princips [28].

Mēģinājumi uzlabot pusvadītāju sensoru gāzu/tvaiku koncentrācijas noteikšanas īpašības tiek īstenoti ar metāla oksīda pielietojumu, dažādām strukturālām izmaiņām un dažādām leģējošām piedevām. Tomēr vēl aizvien aktuāli ir trūkumi, kas saistīti ar šī sensoru veida darba apstākļiem un stabilitāti.

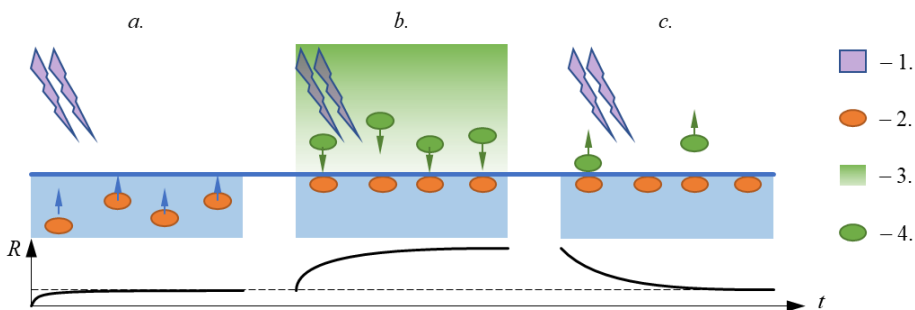
Tāda tipa sensoru izmantošanas galvenā problēma rodas tāpēc, ka elektroķīmisko reakciju norisei uz virsmas ir nepieciešams uzturēt sensora jutīgās daļas temperatūru diapazonā no 150 °C līdz 500 °C, līdz ar to ir apgrūtināta degtspējīgu gāzu/tvaiku noteikšana (jo, piemēram, acetona pašuzliesmošanās temperatūra ir 465 °C). Uzkaršanās līdz šādām temperatūrām bieži prasa tehnisko apkopi vai pat visa sensora nomainīšanu uz jaunu. Ilgstošas vai daudzkārtējas izmantošanas gadījumā notiek sensora jutīgās daļas sakušana. Tiek novērots nulles dreifs (nekontrolēta sensora izejas strāvas novirze no sākotnējās vērtības), kuru izraisa adsorbēto gāzu/tvaiku molekulu difūzija sensora materiālā – līdz ar to pusvadītāju sensoru ilgstoša vai daudzkārtēja izmantošana ir ierobežota [27,32,33].

1.3. Fotostimulēto pusvadītāju gāzu/tvaiku sensoru priekšrocības un trūkumi

Fotostimulēto pusvadītāju gāzu/tvaiku sensoru darbības princips balstās uz fotoinducētām ķīmiskām reakcijām (piemēram, fotokatalīzi). Šīs reakcijas notiek starp adsorbētajām gāzu/tvaiku molekulām un elektroniem/caurumiem, kurus ģenerē fotoni, absorbējoties MOP pievirsa slānī [34–38].

Relatīvi maza adsorbētā skābekļa daļa mijiedarbojas ar nestimulēto MOP virsmu, nebūtiski mainot vadītspēju. Apstarošanas laikā palielinās brīvo lādiņnesēju skaits vadītspējas zonā, kas nodrošina lielu skaitu aktīvo centru. Tas paaugstina ķīmisko aktivitāti uz sensora virsmas, tādējādi paaugstinot gāzu/tvaiku adsorbēcijas varbūtību uz MOP (1.3.a att.).

Adsorbēcija ir noteikšanas procesa galvenais nosacījums. Pētāmās gāzu/tvaiku molekulas reaģē ar brīvajiem lādiņnesējiem un adsorbētajām skābekļa molekulām (1.3.b att.). Tas izraisa būtiskas virsmas slāņa vadītspējas izmaiņas sakarā ar lādiņnesēju daudzuma izmaiņām. Nosakot vadītspējas izmaiņu virsmas slānī, ir iespējams noteikt pētāmās gāzu/tvaiku koncentrāciju. Pārtraucot pētāmās gāzu/tvaiku pieplūdi, sistēma atjaunojas sākotnējā stāvoklī (1.3.c att.).



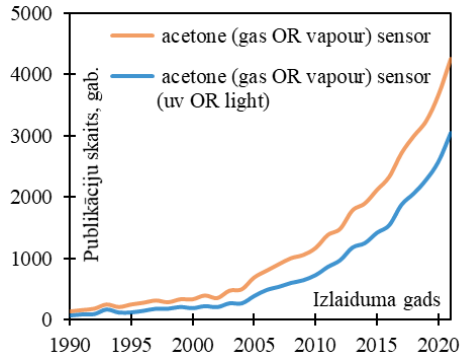
1.3. att. Fotostimulēto pusvadītāju gāzu/tvaiku sensoru darbības princips [28].

Apzīmējumi: 1. – UV starojums; 2. – brīvie lādiņnesēji; 3. – pētāmās gāzes/tvaiki;
4. – pētāmās gāzes/tvaiku molekulas.

Lai nodrošinātu šī tipa sensora darbību, ir nepieciešams sasniegt pietiekoši lielu brīvo lādiņnesēju blīvumu, kura izmaiņu būtu iespējams noteikt. Tas tiek sasniegts, apstarojot sensoru ar fotoniem, kuru enerģija ir lielāka par pusvadītāja aizliegtās zonas platumu. Palielinot gaismas intensitāti, ir iespējams uzlabot sensora jutīgumu. Tomēr apstarošana var arī negatīvi ietekmēt sensora parametrus – tiek ietekmēts gāzu/tvaiku molekulu adsorbēcijas/desorbcijas ātrums un pievirsa elektronu koncentrācijas izmaiņas ātrums, kas var radīt neprecizitātes sensora rādītājos [38,39].

Salīdzinot ar iepriekšējo sensoru grupu (1.2. nodaļa), fotostimulētu pusvadītāju sensoru darbībai nav nepieciešama augsta temperatūra, tāpēc šī metode aktīvi tiek pētīta un pilnveidota (1.4. att.).

Neskatoties uz fotostimulēto sensoru priekšrocībām, tie nespēj noteikt acetona gāzes/tvaiku koncentrāciju, kas ir zemāka par 100 ppm. Fotostimulēto pusvadītāju sensoru jutīgās daļas vidējais laukums ir $S \approx 0,5 \text{ mm}^2$ [40,41].



1.4. att. Publikāciju skaits periodā 1990.–2021. gadam, izmantojot atslēgvārdus: “acetone (gas OR vapour) sensor” un “acetone (gas OR vapour) sensor (uv OR light)”. 2022. gada 16. februāra dati no www.sciencedirect.com.

1.4. Pētījuma pamatojums

Pusvadītāju sensori ir vislabāk piemēroti zemas gāzu/tvaiku koncentrācijas noteikšanai, tomēr nepieciešamība karsēt sensora jutīgo daļu ierobežo sensora ilgstošu izmantošanu.

Fotostimulētie pusvadītāju sensori spēj noteikt gāzu/tvaiku koncentrāciju bez sensora jutīgās daļas uzkaršanās, tomēr šī tipa sensoriem ir augsts noteikšanas sliekšnis, kas apgrūtina zemas koncentrācijas acetona tvaiku noteikšanu.

Lai varētu izmantot fotostimulētos pusvadītāju gāzu/tvaiku sensorus medicīnas nozarē (pētot, piemēram, pacienta izelpu kuņģa-zarnu trakta slimību noteikšanai u. c.), ir nepieciešams samazināt sensora acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas sliekšni (1.2. tab.).

1.2. tabula

Acetona tvaiku koncentrācijas interesējošais vērtību diapazons dažādām nozarēm

Pielietošanas nozare	Interesējošais vērt. diap.	Avots
Darba un apkārtējās vides aizsardzība	250–2500 ppm	[13,16]
Medicīna (biomarķieri)	0,1 ppm–400 ppm	[5,8,15]

Nemot vērā iepriekš minēto, jāizstrādā sensors, kas spēj noteikt zemas acetona tvaiku koncentrācijas. Pašlaik sensoru strāvas stipruma vērtība ir lineāri atkarīga no tvaiku koncentrācijas.

Viens no iespējamiem risinājumiem ir izveidot sensoru, kura strāvas stipruma vērtība mainās nelineāri atkarībā no tvaiku koncentrācijas – tvaiku koncentrācijas palielināšanās rada eksponenciālu strāvas stipruma vērtības palielināšanos. Nelineāro sakarību ir iespējams panākt, nodrošinot tuneļefektu. Pamatojoties uz literatūras apskatu, mērķa sasniegšanai tika noteikti uzdevumi (ievada nodaļa).

2. P-N PĀREJAS OPTISKĀS STIMULĀCIJAS IZMANTOŠANAS FIZIKĀLIE PRIEKŠNOSACĪJUMI

Šajā nodaļā aprakstīti fizikālie priekšnosacījumi metodes izveidošanai uz optiski stimulētas p-n pārejas bāzes. Lai izprastu mijiedarbību starp p-n pāreju un adsorbentu, tika ievēroti divi faktori: procesa kinētika, kas vērojama uz pusvadītāja virsmas, kā arī izmaiņas pusvadītāja pievirsas slānī.

2.1. Adsorbcijas un desorbcijas kinētika

Kad pusvadītājs ir ievietots gāzu/tvaiku vidē, uz tā virsmas adsorbējas gāzu/tvaiku molekulas. Šis process turpinās, kamēr netiek sasniegts līdzsvara stāvoklis, kad adsorbējamo molekulu skaits ir vienāds ar desorbējamo molekulu skaitu laika vienībā.

Līdzsvara sasniegšanas procesu starp virsmu un gāzu/tvaiku vidi sauc par adsorbcijas kinētiku, kuru var aprakstīt Lengmīra modeļa ietvaros (*Langmuir adsorption model*) [42].

$$\frac{dn}{dt} = \alpha \cdot P \cdot (N^* - N) - \beta \cdot N, \quad (2.1)$$

kur: α – adsorbēto molekulu skaits;

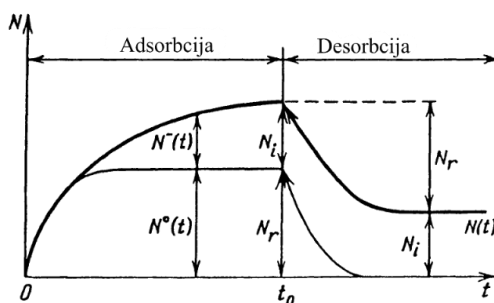
β – desorbēto molekulu skaits;

N^* – maksimālais daļiņu skaits, kas var adsorbēties uz virsmas laukuma vienību;

N – adsorbēto molekulu virsmas koncentrācija uz laukuma vienību;

P – atmosfēras spiediens.

Desorbcijas process notiek divos posmos (2.1. att.): hemosorbcijas neitrālās formas ātrā desorbcija un uzlādētās formas lēnā desorbcija. Pilna desorbcija dažos gadījumos var ilgt 10^4 – 10^5 s, tādējādi īslaicīgos pētījumos var novērot tikai neitrālās formas desorbciju.



2.1. att. Adsorbcijas un desorbcijas kinētika [42].

Apzīmējumi: N_r , N_i – atgriezeniski un neatgriezeniski hemosorbētu daļiņu virsmas koncentrācijas; pie $t = 0$ s notiek gāzu/ tvaiku ieplūde, t_0 – desorbcijas procesa sākums.

2.2. Fermi līmenis pusvadītājos

Fermi līmenis ir elektronu maksimālā enerģija pie temperatūras $T = 0 \text{ }^\circ\text{K}$. Palielinoties elektronu daudzumam kvantu sistēmā, Fermi līmenis pieaug. Tas samazinās, samazinoties elektronu daudzumam. Dažādu veidu vadītspējas (p-, n- tipi) pusvadītājos Fermi līmenis, ja temperatūra tiecas uz absolūto nulli, atrodas aizliegtās zonas vidū.

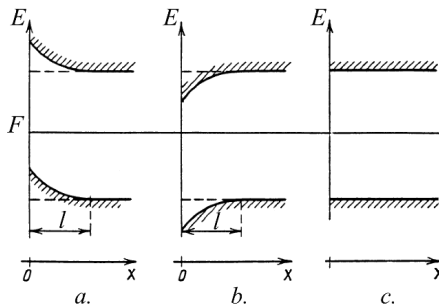
Elektronu skaits n-tipa pusvadītājiem vadītspējas zonā ir lielāks, tāpēc elektronu vidējā enerģija vadītspējas zonā, līdz ar to Fermi līmenis, ir augstāks nekā p-tipa pusvadītājiem.

Fermi līmenis ir atkarīgs no diviem faktoriem [43]:

1. Piemaisījuma koncentrācijas un pusvadītāja tipa;
2. Pusvadītāja temperatūras.

2.3. Enerģētisko zonu izliekšanās

Polarizētas gāzu/tvaiku molekulas, nonākot kontaktā ar pusvadītāja virsmu, maina brīvo lādiņnesēju koncentrāciju pusvadītāja pievirsas slānī (Debaī garumā). Pieņemot, ka adsorbēto molekulu lādiņš ir vienmērīgi sadalīts pa virsmu, pusvadītāja pievirsas slānī rodas līdzvērtīgs lādiņš ar pretēju zīmi. Rezultātā pusvadītāja pievirsas slānī notiek enerģijas zonu izliekšanās (2.2. att.).



2.2. att. Enerģētisko zonu izliekšanās [42]:

a. negatīvi lādēta virsma; b. pozitīvi lādēta virsma; c. elektriski neitrāla virsma.

Apzīmējumi: F – Fermi līmenis; x – virziens uz pusvadītāja iekšieni, perpendikulāri adsorbējošai virsmai; l – adsorbēto molekulu mijiedarbības dziļums.

Adsorbēto molekulu mijiedarbības dziļums pusvadītājā ir ierobežots ar Debaī garuma dziļumu.

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Phi}{e \cdot (n_0 + p_0)}}, \quad (2.2)$$

kur: $\Phi = kT/e$ — temperatūras potenciāls;
 ε — pusvadītāja relatīvā dielektriskā caurlaidība;
 n_0, p_0 – elektronu, caurumu līdzsvara koncentrācijas;
 e – elektrona lādiņš.

2.4. Elektronu koncentrācija nelīdzsvarotā stāvoklī

Apstarojot pusvadītāju, notiek elektronu/caurumu pāru ģenerācija, kas nobīda Fermi līmeni pusvadītāja aizliegtās enerģijas zonas centra virzienā. Šajā gadījumā varbūtība $f(E)$ elektronam sasniegt līmeni ar enerģiju E pakļaujas Fermi–Diraka (*Fermi–Dirac*) sadalījuma funkcijai [43]. Sadales funkcijai ir divi parametri: Fermi līmenis un temperatūra.

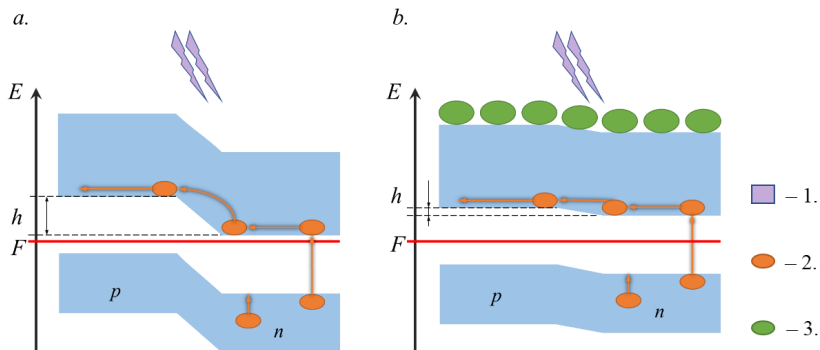
$$f(E) = \left(1 + \exp\left(\frac{E - F}{k \cdot T}\right) \right)^{-1}, \quad (2.3)$$

kur: F – Fermi līmenis, eV;

k – Bolcmaņa konstante, $1,380 \cdot 10^{-23}$ J/K;

T – temperatūra, °K.

Pamatojoties uz 2.3. nodaļu, polarizētas molekulas adsorbēcija izraisa p-n pārejas potenciāla barjeras augstuma izmaiņas (2.3. att.), tas maina varbūtību fotoģenerētiem elektroniem pārvarēt p-n pārejas potenciāla barjeru.



2.3. att. Elektronu p-n pārejas potenciāla barjeras pārvarēšana: a. pie optiskās stimulācijas; b. pie papildus adsorbētām polarizētām molekulām.

Apzīmējumi: 1. – optiskā stimulācija; 2. – brīvie lādiņnesēji;

3. – pētāmās gāzu/tvaiku molekulas; F – Fermi līmenis; h – p-n pārejas potenciāla barjeras augstums.

Ņemot vērā iepriekš minēto, ir iespējams izveidot metodi, kas balstās uz optiski stimulētu p-n pāreju un kurai ir nelineāra (eksponenciāla, pēc (2.3)) strāvas stipruma atkarība no adsorbēto molekulu skaita.

3. METODOLOĢIJA UN INSTRUMENTI

Saskaņā ar apskatītiem fizikāliem priekšnosacījumiem bija nepieciešams pusvadītājs ar p-n pāreju, kurai optiskās stimulēšanas fotoni var pārvarēt aizliegto enerģijas zonu pusvadītājā. Pusvadītāja virsma nedrīkstēja būt pārklāta ar biezu aizsargslāni, kas varētu ekranēt adsorbēto molekulu un pusvadītāja mijiedarbību, piemēram, silīcija pusvadītājiem oksīdu slāņa (SiO_2) biezums var sasniegt 0,6 μm , kas pārsniedz Debaī garumu [46].

Izmantotajai optiskās stimulācijas enerģijai bija jābūt dažu eV diapazonā, bet lielākai par vidējo siltuma enerģiju, lai izvairītos no iespējamā termiskā trokšņa.

Lai pētītu sensora īpašības, tika konstruēts tvaiku nodrošināšanas aparāts ar sekojošām pamatdaļām: testa kameru, elektrisko ķēdi sensora saslēgšanai un noteiktas acetona tvaiku koncentrācijas iepludināšanas ierīci (turpmāk tekstā – ATII). Sensors tika novietots testa kamerā, kurā tika iepludināta acetona tvaiki.

Par sensora darbības noteikšanas parametriem tika pieņemti: strāvas stipruma pieaugums (turpmāk tekstā – ΔI) un strāvas stipruma pieauguma laika intervāls (turpmāk tekstā – $\Delta \tau$). Pirmais parametrs raksturo adsorbēto molekulu blīvumu, otrais – šīs adsorbcijas ātrumu.

Pētījumi tika veikti standartapstākļos ($t = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $r = 45 \pm 5 \%$), uzturētos BIN institūta laboratorijas telpās.

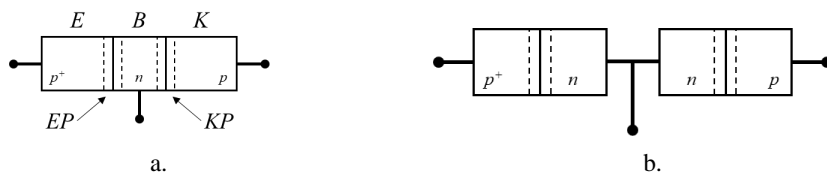
3.1. Tranzistora izvēle un sagatavošana

Pusvadītāja ražošanas metodi, kurā nav izveidots papildu aizsargslānis, sauc par sakausēto tehnoloģiju. Lai viss atbilstu iepriekš aprakstītajām prasībām, par sensoru tika ņemts sakausēts bipolārais tranzistors (turpmāk tekstā – sensors) (3.1. tab.) [45], kam uzbūves struktūrā iekļautas pretēji slēgtas p-n pārejas (3.1. att.). Tranzistora izmantošana deva iespēju pastiprināt strāvas stiprumu, neizstrādājot un nekonstruējot papildu pastiprināšanas ķēdi.

3.1. tabula

Sakausēta bipolārā tranzistora MP41A raksturlielumi [46]

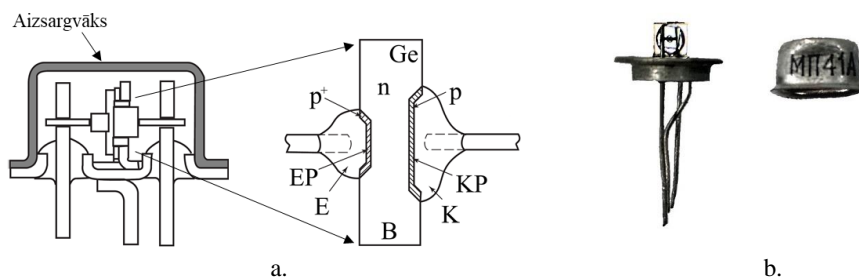
Parametrs/Raksturlielums	Vērtība
Tranzistora tips	p-n-p
Pusvadītāja materiāls	germānijs
Ekspluatācijas maksimālie dati:	
Pastāvīgs spriegums: kolektors-bāze	15 V
Pastāvīgs spriegums: kolektors-emitters	15 V
Pastāvīgs spriegums: emitters-bāze	10 V
Pastāvīga izkliedējamā jauda	150 mW



3.1. att. Bipolārais tranzistors [44,47]: *a.* p-n-p tipa tranzistora shematiskais attēls; *b.* imitācija ar pretēji ieslēgtām diodēm.

Apzīmējumi: *E* – emitters; *B* – bāze; *K* – kolektors; *EP* – emitera pāreja; *KP* – kolektora pāreja; *p+, p, n* – pusvadītāju tipi.

Mehāniski noņemot aizsargvāku (3.2. att.), tika nodrošināta piekļuve tranzistora p-n pārejām. Emitera pārejas laukums – aptuveni vienāds ar $0,012 \text{ mm}^2$, kolektora pārejas laukums – aptuveni vienāds ar $0,016 \text{ mm}^2$. Sensora jutīgās daļas laukums – vienāds ar iepriekšminēto laukuma summu un papildus izveidoto laukumu Debaī garumā ārpus p-n pārejas (2.3 nodaļa, (2.2)). Izvēlētajam sensoram šis laukums aptuveni vienāds ar $0,0390 \text{ mm}^2$.



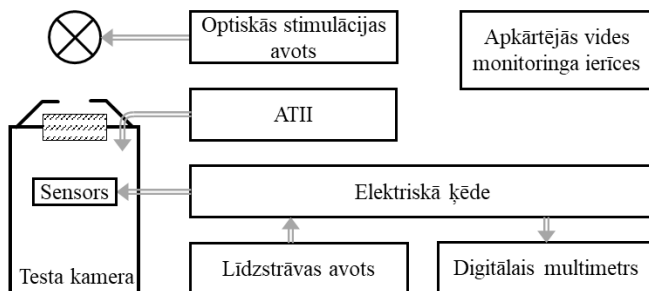
3.2. att. Sensors: *a.* konstruktīvais noformējums [44,47]; *b.* ar noņemtu aizsargvāku.

Apzīmējumi: *E* – emitters; *B* – bāze; *K* – kolektors; *EP* – emitera pāreja; *KP* – kolektora pāreja; *p+, p, n* – pusvadītāju tipi.

3.2. Tvaiku nodrošināšanas aparāts

Lai varētu eksperimentāli izpētīt sensora darbību, tika nodrošināta kontrolēta vide. Pētījumu veikšana ar sensoru, kas atrodas atīrītā sintētiskā gaisā vai slāpekļī (tā saucamās nulles jeb tīrās gāzes) [48], var izraisīt nekorektu rezultātu interpretāciju vēlāk. Tas saistīts ar to, ka atmosfēras gaisā ir arī citas gāzes dažādās koncentrācijās, un to ietekme nav prognozējama. Turklāt sensora graduēšana vidē ar nepietiekamu mitrumu var izraisīt nekontrolētu reģistrētās strāvas stipruma vērtības dreifu, veicot mērījumus praktiskos apstākļos [49]. Šis efekts ir izteikts, strādājot ar cietvielas sensoriem vai fotojonizācijas detektoriem (*PID*) [17,50], tāpēc sensora kalibrēšanu ir jāveic tādā vidē, kādā tas tiks izmantots vēlāk [51].

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, tika izveidots tvaiku nodrošināšanas aparāts ar sekojošiem mezgliem (3.3. att.) un to mērķiem:



3.3. att. Tvaiku nodrošināšanas aparāta funkcionālā shēma.

- testa kamera – sensora izvietojšanai noteiktā tvaiku vidē, ārējo apstākļu (telpas apgaismojuma un gaisa masu kustības telpā) ietekmes novēršanai;
- elektriskā ķēde (3.4. att.) – sprieguma padevei uz sensoru un izvadi strāvas stipruma reģistrācijas nolūkos;
- optiskās stimulācijas avots (*Hamamatsu L9566-02A*, HgXe lampa: *L10852*; gaismas vads: *A10014-50-0110* [52]) – homogēna blīvuma optiskas plūsmas nodrošināšanai uz sensora virsmas;
- pastāvīgs sprieguma avots (*ANSMANN APS 300* [53]) – sprieguma padeve elektriskajai ķēdei;
- ATII (3.5. att.) – sīkāk 3.2.1. nodaļā;
- digitālais multimetrs (*PeakTech P 4390* [54]) – sensora strāvas stipruma reģistrācijai, reģistrētas strāvas stipruma vērtības pārraidei uz datoru turpmākai apstrādei (*PeakTech DMM Tool* [55], versija: 2.0.2018.0905);
- apkārtējās vides monitoringa ierīces – apkārtējās vides temperatūras, gaisa relatīvā mitruma un atmosfēras spiediena noteikšanai.

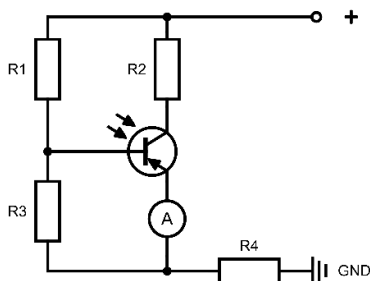
3.2. tabula

Izmantotās mēriekārtas raksturlielumi

Mērījuma parametrs	Izmantotā ierīce	Raksturlielumi
Apkārtējā gaisa temperatūra	<i>Sensirion SHT31</i> [56]	$R = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$ $A = \pm 0,30 \text{ } ^\circ\text{C}$
Atmosfēras spiediens	<i>Bosch BMP280</i> [57]	$A = \pm 0,12 \text{ hPa}$
Relatīvais mitrums	<i>Sensirion SHT31</i>	$R = 0,01 \text{ } \%$ $A = \pm 2,00 \text{ } \%$

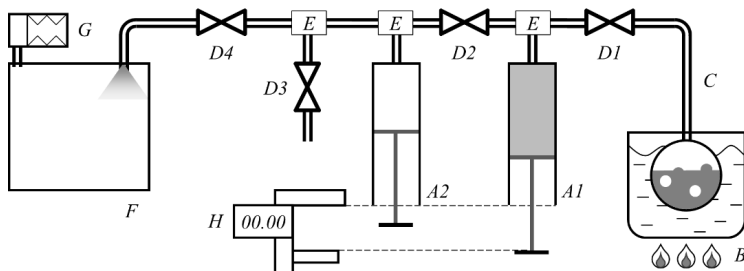
Mērījuma parametrs	Izmantotā ierīce	Raksturlielumi
Spriegums	PeakTech P 4390	$R = 0,1 \text{ mV}$ $A = \pm 0,8 \%$
Starojuma jauda	Ophir Nova II, 3A [58,59]	$R = 4$ zīmīgie cipari $A = \pm 3\%$
Strāvas stiprums	PeakTech P 4390	$R = 0,1 \mu\text{A}$ $A = \pm 1,0 \%$
Strāvas pastiprinājuma koeficients	LCR-T3-H [60]	$R = 1$
Strāvas reģistrēšanas laiks	PeakTech P 4390	$R = 3 \text{ Hz}$

Lai nodrošinātu sensora emitera strāvas stipruma (turpmāk tekstā – strāvas stiprums) reģistrāciju, tika izveidota elektriskā ķēde (3.4. att.). Ķēde izveidota kā emitera atkārtotājs ar kopīgu bāzi. Lai ievērotu tranzistora ražotāja prasības, tika pievienots strāvas ierobežotājrezistors R4. Eksperimentāli tika noteikts, ka reģistrētās strāvas stipruma vērtības dreifs ir zemāks, ja kolektora pāreja tiek novietota emitera vietā, un otrādi. Šai ķēdei piemīt liels strāvas stipruma pastiprinājums un augsta temperatūras stabilitāte [61].



3.4. att. Sensora saslēgšanas elektriskā ķēde.
Apzīmējumi: $R1 = 22 \text{ k}\Omega$, $R2 = 33 \Omega$, $R3 = 100 \text{ k}\Omega$, $R4 = 0,11 \text{ k}\Omega$.

ATII (3.5. att.) tika veidots no diviem cilindriem ar brīvi pārvietojamiem virzuļiem. Digitālais bīdāmā tika izmantots virzuļa pārvietojuma noteikšanai, tālāk tas tika pārveidots par iepludināto tvaiku tilpumu (koeficients parādīts 3.3. tab., tika pārbaudīts izmantojot nosvērtu ūdens destilāta masu). Acetona iztvaicēšanas sistēma tika veidota no iztvaicēšanas kolbas, kas tika ievietota ūdens vannā. Izmantojot silikona caurules, slēgvārstus un t-veida pārejas, ATII tika samontēta vienā kontūrā un pievienota testa kamerai.



3.5. att. ATII funkcionālā shēma.

Apzīmējumi: A1 – primārais cilindrs; A2 – sekundārais cilindrs; B – iztvaicēšanas kolba sildītājvannā ar ūdeni; C – caurule; D1, D2 – noslēdzošais krāns; D3 – aizspiednis; E – t-veida savienotājs; F – testa kamera; G – spiediena izlīdzināšanas mainīgais tilpums; H – digitālais bīdmērs.

Acetons šķidrā un gāzveida fāzē spēj izšķīdināt daudzas organiskas vielas, tāpēc ATII konstrukcijā izmantotajiem materiāliem (3.3. tab.) bija jābūt izturīgiem pret acetona tvaikiem [62]. Iekārtas ekspluatācija aprakstīta 3.2.1. nodaļā.

3.3. tabula

ATII funkcionālās daļas, to materiāli un raksturlielumi

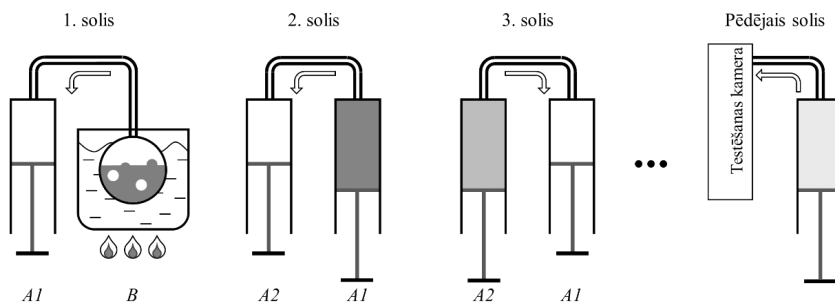
Pozīcija	Nosaukums	Materiāls	Raksturlielumi
A1, A2	Cilindrs	Stikls	$V(\max) \approx 91$ ml
	Virzulis	Stikls	koef. = 0,678 ml/mm
B	Iztvaicēšanas kolba	Stikls	$V = 3$ ml
C1	Caurule	Silikons	iekš. $\varnothing = 3$ mm
C2	Caurule	Silikons	iekš. $\varnothing = 5$ mm
D1	Slēgvārsts	Stikls	iekš. $\varnothing = 3$ mm
D2, D4	Slēgvārsts	Teflons	iekš. $\varnothing = 5$ mm
D3	Ārējais aizspiednis	Plastmasa	iekš. $\varnothing = 7$ mm
E	T-veida pārejas savienojumi	Stikls, polipropilēns	iekš. $\varnothing = 4$ mm
F	Cilindriskas formas testa kamera	Nerūsējošais tērauds	$\varnothing \approx 97$ mm $H \approx 130$ mm iekš. $V = 1008,5$ ml
	Optiskās stimulācijas caurlaides lodziņš	Stikls <i>BC-11</i>	$\square = 40 \times 40$ mm $h = 4$ mm
	Diafragma/ LED fiksators	ABS	logs = 12 x 12 mm
G	Mainīgais tilpums spiediena izlīdzināšanai	Silikons	$V =$ dinamisks

Pozīcija	Nosaukums	Materiāls	Raksturlielumi
H	Digitālais bīdmērs	Tacklife DC02 [63]	$R = 0,01 \text{ mm}$ $A = \pm 0,03 \text{ mm}$ $L = 0-150 \text{ mm}$

Gadījumā, kad pētījumu bija nepieciešams veikt piesātināta acetona tvaiku vidē, kameras pamatnē tika ieliets (padeves ilgums $t = 5 \text{ s}$) ķīmiski tīrs acetons ar tilpumu $V = 6,0 \text{ ml}$ (*EMSURE Acetone for analysis* [64]). Acetona izgarošana kameras telpā nodrošināja piesātināta acetona tvaiku vidi. Šajā gadījumā darbs ar ATII nebija nepieciešams.

3.2.1. ATII izmantošanas procedūra

Noteiktās acetona tvaiku koncentrācijas iegūšana, kas ir zemāka par piesātinātu acetona tvaiku koncentrāciju, tika balstīta uz tvaiku maisījuma atšķaidīšanas metodi starp diviem cilindriem līdz vēlamās vērtības sasniegšanai (3.6. att.) [51].



3.6. att. Acetona tvaiku maisījuma atšķaidīšanas procedūra.

Apzīmējumi: A1 – primārais cilindrs; A2 – sekundārais cilindrs;
B – iztvaicēšanas kolba sildītājvannā ar ūdeni.

Pirmkārt, tika sagatavoti acetona piesātināti tvaiki A1 cilindrā. Šim nolūkam iztvaicēšanas kolba, piepildīta ar ķīmiski tīru acetonu $V = 2,3 \text{ ml}$, tika iegremdēta sildītājvannā ar ūdeni, kura temperatūra pārsniedza acetona viršanas temperatūru ($t_{\text{var}} = 56,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Acetons, izgarojot iztvaicēšanas kolbā, sajaucās ar iepriekš sagatavoto gaisa porciju A1 cilindrā, radot ar acetonu piesātinātus tvaikus, tā koncentrācija tika noteikta, izmantojot 3.1. vienādojumu [65,66]:

$$K_0 = \frac{P(\text{piesat})}{P(\text{atm})} \cdot 10^6, \quad (3.1)$$

kur: K_0 – acetona piesātinātu tvaiku koncentrācija, ppm;
 $P(\text{piesat})$ – piesātināts acetona tvaiku spiediens, hPa;
 $P(\text{atm})$ – atmosfēras spiediens pētījumu laikā, hPa.

Piesātināts acetona tvaiku spiediens tika aprēķināts, izmantojot Antuāna vienādojumu (*Antoine equation*) [67]. Teorētisko rezultātu novirze no eksperimentāliem datiem, izmantojot šo vienādojumu, tika noteikta kā mazāka par 0,1 % (istabas temperatūrā) [68].

$$P(\text{piesat}) = 10^{\left(A - \frac{B}{T(\text{atm}) + C}\right)}, \quad (3.2)$$

kur: A, B, C – Antuāna vienādojuma (*Antoine equation*) konstantes;
 $T(\text{atm})$ – apkārtējās vides temperatūra, °C.

Lai turpinātu procedūru, tika nodrošināta piesātināto acetona tvaiku temperatūras samazināšana A1 cilindrā līdz apkārtējās vides temperatūrai (kontrolēts, mērot virsmas temperatūru A1 cilindrā un vizuāli novērojot acetona kondensāciju A1 cilindra iekšpusē). Turpmākie soļi tika paredzēti, lai sasniegtu vēlamu tvaiku koncentrāciju, atšķaidot tvaiku maisījumu starp A1 un A2 cilindriem (padeves tilpums ir mazāks nekā atšķaidītāja tilpums; maisījuma padeves ilgums $t = 5$ s) ar sagatavoto gaisa porciju mērķa cilindrā. Katra nākamā tvaiku koncentrācija tika noteikta, izmantojot 3.3. vienādojumu [69]:

$$K(\text{jauna}) = K(\text{padeves}) \cdot \frac{V(\text{padeves})}{V(\text{gaiss}) + V(\text{padeves})}, \quad (3.3)$$

kur: $K(\text{padeves})$ – acetona tvaiku koncentrācija padeves cilindrā, ppm;
 $V(\text{padeves})$ – maisījuma tilpums padeves cilindrā, ml;
 $V(\text{gaiss})$ – iepriekš sagatavotais gaisa tilpums mērķa cilindrā, ml.

Vēlamā koncentrācija tika iegūta, mainot piegādātā maisījuma tilpumu un sagatavoto gaisa tilpumu cilindros. Koncentrācijas aprēķinos tika ņemts vērā, ka, padodot tvaika maisījumu testa kamerā, notiek tvaiku atšķaidīšanās.

3.2.2. Acetona tvaiku koncentrācijas kļūdas aprēķins

Iepludinātās acetona tvaiku koncentrācijas vērtības relatīvā kļūda tika noteikta, pamatojoties uz 3.4., 3.5. un 3.6. izteiksmēm [70].

$$A + B = \frac{\Delta A + \Delta B}{|A + B|}, \quad (3.4)$$

$$A \cdot B = \frac{\Delta A}{|A|} + \frac{\Delta B}{|B|}, \quad (3.5)$$

$$\frac{A}{B} = \frac{\Delta A}{|A|} + \frac{\Delta B}{|B|}, \quad (3.6)$$

kur: A, B – izmērītā fizikālā vērtība atsevišķā mērījumā;
 $\Delta A, \Delta B$ – izmērītās fizikālās vērtības absolūtā kļūda.

Piesātinātā acetona tvaiku spiediena aprēķina relatīvā kļūda, izmantojot Antuāna vienādojumu (*Antoine equation*), tika aprēķināta, pamatojoties uz 3.2. un 3.4. izteiksmēm.

$$\varepsilon P(\text{piesat}) = \varepsilon P(\text{Antoine}) + \varepsilon P(\text{temp}), \quad (3.7)$$

$$\varepsilon P(\text{piesat}) = \frac{\varepsilon P(\text{Antoine}) \cdot P(\text{atm}) + \varepsilon P(\text{temp}) \cdot P(\text{atm})}{P(\text{atm}) + P(\text{atm})},$$

kur: $\varepsilon P(\text{Antoine})$ – teorētisko rezultātu novirze no eksperimentāliem datiem, izmantojot Antuāna vienādojumu (*Antoine equation*), %;

$\varepsilon P(\text{temp})$ – apkārtējās gaisa temperatūras mērījuma relatīvā kļūda, izmantojot Antuāna vienādojumu (*Antoine equation*), %.

Piesātinātās acetona tvaiku koncentrācijas rezultāta relatīvā kļūda tika aprēķināta, pamatojoties uz 3.1., 3.6. un 3.7. izteiksmēm.

$$\varepsilon K_0 = \varepsilon P(\text{piesat}) + \frac{\Delta P(\text{atm})}{P(\text{atm})}, \quad (3.8)$$

kur: $\Delta P(\text{atm})$ – atmosfēras spiediena mērījuma absolūtā kļūda (3.2. tab.), hPa.

Ievietojot vērtības iegūtajā 3.8. izteiksmē, tika iegūta relatīvā kļūda:

$$\varepsilon K_0 = 0,22 \%$$

Acetona maisījuma koncentrācijas koeficienta relatīvā kļūda tika aprēķināta, pamatojoties uz 3.3., 3.4., 3.5. un 3.6 izteiksmēm.

$$\varepsilon K(\text{atšķ.}) = \varepsilon K_0 + \frac{\Delta V(\text{padeves})}{V(\text{padeves})} + \frac{\Delta V(\text{gaiss}) + \Delta V(\text{padeves})}{V(\text{gaiss}) + V(\text{padeves})}, \quad (3.9)$$

kur: $\Delta V(\text{gaiss})$ – gaisa tilpuma absolūtā mērījuma kļūda (3.3. tab.) mērķa cilindrā, ml;

$\Delta V(\text{padeves})$ – acetona tvaiku tilpuma absolūtā mērījuma kļūda (3.3. tab.) padeves cilindrā, ml.

Iepludinātās acetona tvaiku koncentrācijas maksimālā relatīvā kļūda, kas tika sasniegta pie minimālā iepludinātā acetona tvaiku tilpuma, izmantojot vienu atšķaidīšanas ciklu:

$$\varepsilon K(\text{atšķ.}) = 2,9 \%$$

Aprēķinātā relatīvās kļūdas vērtība tika izmantota arī parējām iepludinātajām acetona tvaiku koncentrācijām.

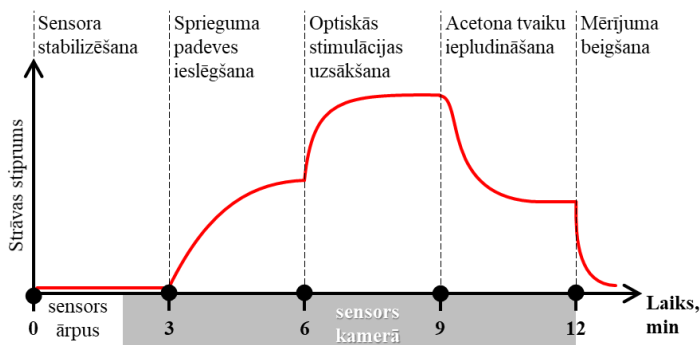
3.3. Pētījuma metodoloģija

Tika uzturēta testa kameras tīrība. Pirms katra pētījuma uzsākšanas kameras iekšējās sienas tika noslaucītas ar acetonu, un pēc tam kamera tika izvēdināta (5 min).

Veicot pētījuma sēriju par Δt , eksperimentāli tika noteikts, ka tas tiek sasniegts 180 s laikā pēc acetona iepludināšanas brīža testa kamerā [71,72], li līdz ar to katrs posms tiek izvēlēts 180 s ilgs.

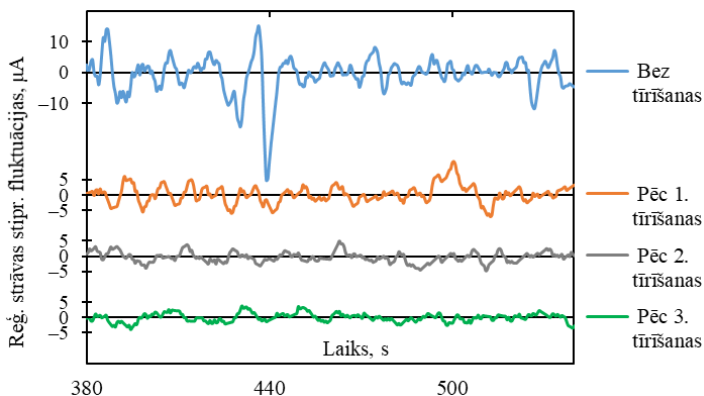
Pētījuma veikšanas procedūra (3.7. att.) notika piecos posmos:

1. **Sensora stabilizēšana.** Šajā posmā elektriskās ķēdes barošanas kontakti (“+” un GND) tika saslēgti kopā (īsslēgums). 120 s pēc izmēģinājuma uzsākšanas sensors tika ievietots testa kamerā. 175 s pēc izmēģinājuma uzsākšanas elektropadeves kontakti tika atvienoti.
2. **Sprieguma padeves ieslēgšana.** Šajā posmā elektriskā ķēde tika saslēgta 180. sekundē pēc izmēģinājuma uzsākšanas.
3. **Optiskās stimulācijas uzsākšana.** Optiskā stimulācija tika uzsākta 360. sekundē pēc izmēģinājuma uzsākšanas.
4. **Acetona tvaiku iepludināšana.** Optiskā stimulācija turpinājās. Tika veikta noteiktās acetona tvaiku koncentrācijas iepludināšana (padeves ilgums $t = 8$ s) – notiek 540. sekundē pēc izmēģinājuma uzsākšanas. Tika veikta slēgvārsta D4 atvēršana vai acetona ieliešana kamerā (veicot izmēģinājumus ar piesātinātiem acetona tvaikiem); tika veikta 5 s pirms iepludināšanas uzsākšanas. Testa kamerā iepludinātās acetona tvaiku tilpums bija ~58 ml.
5. **Pētījumu pabeigšana.** 720. sekundē izmēģinājums tika pārtraukts. Tika izslēgts optiskās stimulācijas avots, atslēgta sprieguma padeve sensoram, tika atvērta kamera.



3.7. att. Strāvas stiprums ar noteiktiem mērījuma posmiem.

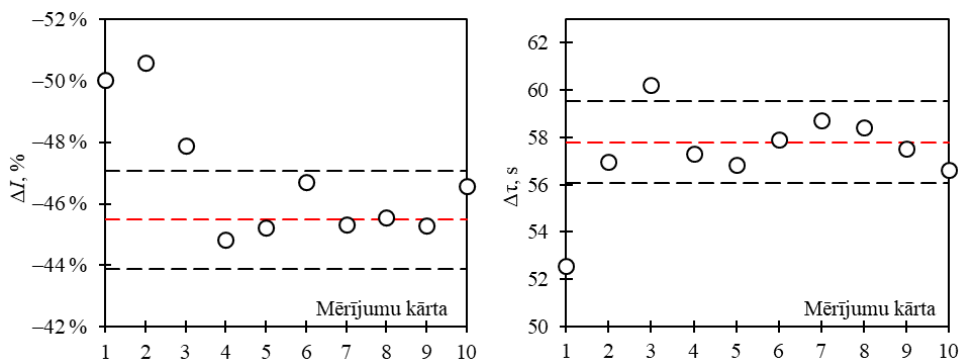
Sensora ilgstošas uzglabāšanas (virs nedēļas) rezultātā tika novērotas palielinātas fluktuācijas reģistrētajā strāvas stiprumā 3. posmā (optiskās stimulācijas uzsākšana), tāpēc sensora sagatavošanas procesā tika iekļauta sensora tīrīšana ar acetonu un izžāvēšana standartapstākļos vismaz 2 stundas. Sensors tiek iegremdēts vanniņā ar acetonu uz 100 s un pēc tam noskalots 10 s ar acetona strūklu. Tīrīšanas procedūra tika atkārtota 2–3 reizes pirms pētījuma sākšanas (3.8. att.).



3.8. att. Reģistrētās strāvas stipruma fluktuācijas pēc sensora tīrīšanas posmiem.
Pētījumu nosacījumi: $K = \text{piesāt. tvaiki}$, $\Phi = 4,65 \text{ mW/cm}^2$.

Vidējās vērtības, ticamās varbūtības, standartnovirzes izmaiņas, ΔI un $\Delta \tau$ aprēķini tika veikti, izmantojot programmu *Microsoft Excel 2016 64-bit* (versija: 16.0.11231.20122).

Veicot pētījumu, pirmie trīs mērījumi netika iekļauti rezultātos, jo ΔI un $\Delta \tau$ atradās ārpus ticamās varbūtības. Eksperimentāli tika noteikts, ka turpmākie septiņi mērījumi (4.–10.) ietilpa ticamās varbūtības robežās (3.9. att.).



3.9. att. ΔI un $\Delta \tau$ pēc mērījumu kārtas, ar ticamu varbūtību un vidējo vērtību (aprēķināti iekļaujot no 4. līdz 10. mērījumam).

Pētījumu nosacījumi: $K = \text{piesāt. tvaiki}$, $\Phi = 4,65 \text{ mW/cm}^2$, $\beta = 33$, $\nu = 95 \%$.

Veicot pētījumu sēriju, pārtraukums starp tiem bija no 120 līdz 180 s. Eksperimentāli tika noteikts, ka vērtību izkliede, ja pārtraukuma ilgums starp pētījumiem ir līdz 5 min, neizraisa nozīmīgu novirzi.

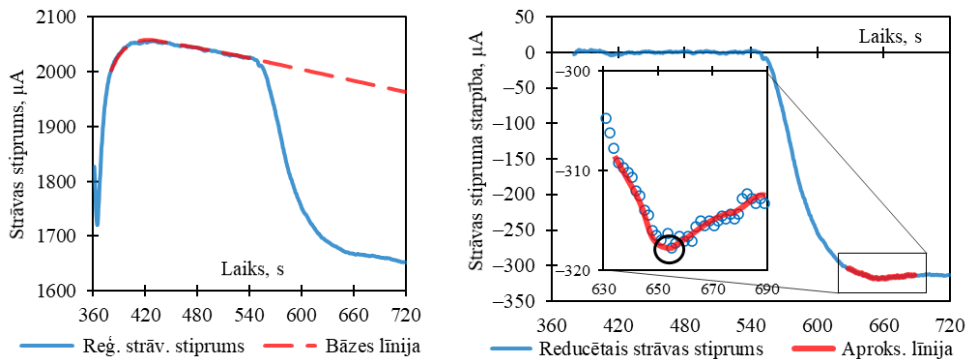
3.3.1. Sensora strāvas stipruma reģistrēšana un apstrāde

Eksperimentāli tika noteikts, ka reģistrētajam strāvas stiprumam ir nulles dreifs (3.10. att. pa kreisi). Nulles dreifa raksturs nav promocijas darba objekts, tāpēc tas netika pētīts. Pirms tika veikta sensora strāvas stipruma noteikšana, tika apstrādāti digitālā multimetra dati (strāvas stiprums).

Digitālā multimetra dati tika apstrādāti programmā *OriginLab OriginPro 2018 (64-bit) SRI* (versija: b9.5.1.195) [73]. Šim mērķim tika izmantota šāda procedūra:

1. Tika veikts reģistrētās strāvas stipruma imports no digitāla multimetra saglabātā datu žurnālā uz programmas vidi (reģistrētās strāvas stipruma vērtības laikā).
2. Ņemot vērā datus, tika izveidots grafiks, programmā tika izvēlēta bāzes līnijas atņemšanas funkcija (*Peak Analyzer, Goal: Subtract Baseline*). Bāzes līnijas (*BSpline*) manuālai noteikšanai tika izvēlēti vismaz septiņi punkti (*Baseline Mode: User Defined*) optiskās simulācijas periodā no 380 s līdz 535 s. Laika periods no 360 s līdz 380 s netika ņemts vērā nekontrolējamo pārejas procesu dēļ.

Reducētais strāvas stiprums (3.10. att. pa labi) ir reģistrētās strāvas stipruma un bāzes līnijas starpība.



3.10. att. Reģistrētās strāvas stiprums ar noteiktu bāzes līniju (pa kreisi);
reducētais strāvas stiprums ar pārliekuma punktu (pa labi).

Reducētā strāvas stipruma vērtības trokšņu izlīdzināšana (3.10. att. pa labi) tika veikta ar 9. kārtas polinomiālo aproksimāciju, kas konstruēta laika posmā ± 20 s no pārliekuma punkta.

ΔI ir vienāds ar strāvas stipruma vērtību pārliekuma punktā (3.10. att. pa labi), sasniegtu pēc acetona tvaiku iepludināšanas attiecībā pret reģistrēto strāvas stipruma vērtību references vidē pirms acetona tvaiku iepludināšanas brīža testa kamerā (3.11. att.) [51,71].

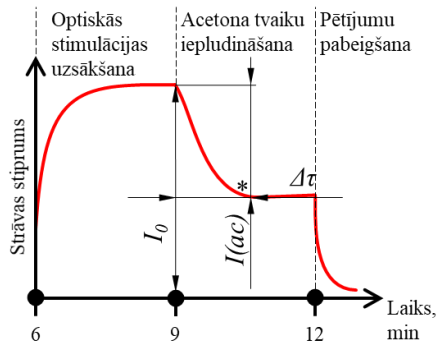
$$\Delta I = \frac{I(\text{ac})}{I_0} \cdot 100 \%, \quad (3.9)$$

kur: I_0 – strāvas stipruma vērtība pirms acetona tvaiku iepludināšanas, μA ;
 $I(ac)$ – reducēta strāvas stipruma vērtība pārliekuma punktā, sasniegta pēc acetona iepludināšanas, μA .

Papildus tika izpētīts $\Delta\tau$ pēc acetona iepludināšanas brīža testa kamerā (3.11. att.).

$$\Delta\tau = \tau(\text{piesat}) - \tau(\text{ieplud}), \quad (3.10)$$

kur: $\tau(\text{ieplud})$ – acetona tvaiku iepludināšanas sākums testa kamerā, s;
 $\tau(\text{piesat})$ – pārliekuma punkta sasniegšanas brīdis reducēta strāvas stipruma posmā, s.



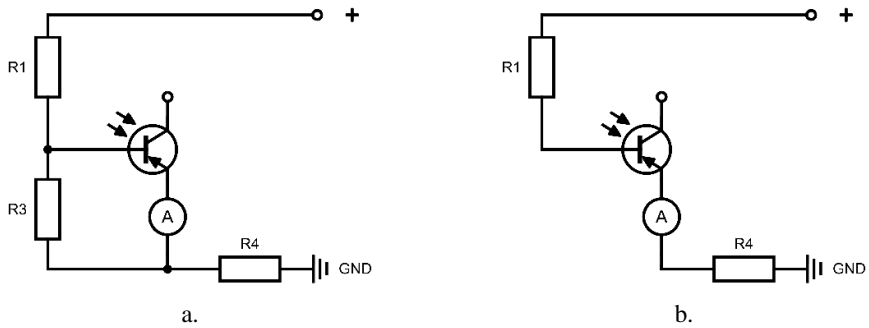
3.11. att. Strāvas stiprums atkarībā no laika.

Apzīmējumi: $I(0)$ – strāvas stipruma vērtība pirms acetona tvaiku ieplūdes; $I(ac)$ – reducēta strāvas stipruma vērtība pārliekuma punktā; * – pārliekuma punkta sasniegšanas brīdis.

3.3.2. Sensora pieslēgšana

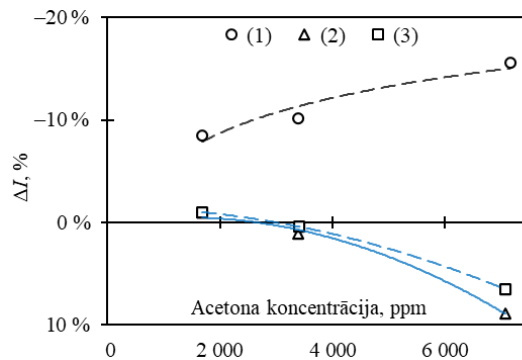
Tika pētīts, kāds sensora saslēguma tips ir efektīvāks izvēlētajai elektriskajai ķēdei. Šim mērķim tika papildus piedāvātas divas saslēguma kombinācijas (3.12. att.):

- saslēgums bez kolektora pārejas;
- tikai emitera pārejas (p-n pāreja) saslēgums.



3.12. att. Elektriskās ķēdes saslēguma veidi.

Rezultāti demonstrēja (3.13. att.), ka, palielinoties koncentrācijai, palielinās strāvas stipruma pieaugums ΔI . Acetona tvaiku koncentrācijas diapazons: no 1700 ppm līdz 7100 ppm. Strāvas stipruma pieaugums ΔI , iedarbinot divas p-n pārejas (standarta saslēgums, 3.4. att.), bija lielāka nekā tad, ja tika iedarbināta viena p-n pāreja.



3.13. att. ΔI izmaiņas atkarībā no sensora saslēguma veida.

Apzīmējumi: (1) – standarta saslēguma veids; (2) – saslēgums bez kolektora pārejas; (3) – saslēgums caur emitera pāreju (p-n pāreja).

Pētījumu nosacījums: $\beta = 33$.

4. SENSORA DARBĪBAS REŽĪMU UN PARAMETRU NOTEIKŠANA

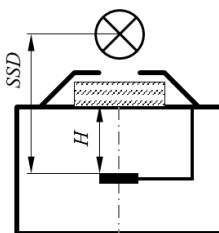
Šajā nodaļā tiek aprakstīti pētījuma rezultāti, lai noteiktu darbības režīmus koncentrācijas noteikšanai ar sensoru. Izmantojot noteiktus optimālus darbības režīmus, nākamā nodaļā tika veikta sensora aprobācija.

4.1. Optiskā stimulācija

Optiskās stimulācijas intensitātes un spektra efektīvās daļas noteikšana ir svarīga (1.3. nodaļa), jo šie parametri var ietekmēt arī pētāmā sensora darba raksturlielumus.

4.1.1. Gaismās intensitāte

Pētījuma laikā sensors tika novietots kamerā gar kameras centrālo asi $H = 65$ mm attālumā no lodziņa ar emitera pāreju perpendikulāri optiskās stimulācijas avota virzienam. Optiskās stimulācijas avots ir novietots $SSD = 133$ mm attālumā no sensora virsmas (4.1. att.). Attālums tika izvēlēts tā, lai pētījuma laikā fotoģenerētās strāvas stipruma maksimālā vērtība emitera pārejā nepārsniegtu tranzistora ražotāja noteikto atļauto vērtību (3.1. tab.). Pētījumiem tika izvēlēta nepārtraukta optiskā stimulācija [72,74,77].

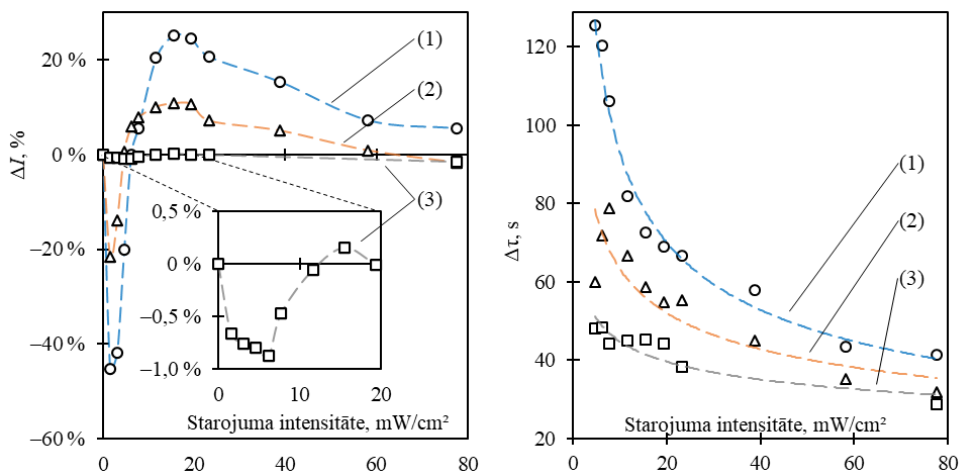


4.1. att. Sensora un optiskās stimulācijas avota novietojums attiecībā pret testa kameru.
Apzīmējumi: H – attālums starp sensora virsmu un lodziņu.

Attiecība starp optiskā starojuma intensitāti Φ un ΔI , $\Delta \tau$ dota 4.2. att.

Rezultātos tika identificēti divi izteikti ekstrēmi pie optiskā starojuma intensitātes vērtībām $\Phi_1 = 3,10$ mW/cm² un $\Phi_2 = 15,5$ mW/cm². ΔI mainās, samazinoties acetona tvaiku koncentrācijai, kā arī pie lielām optiskā starojuma intensitātes vērtībām.

Maksimālais $\Delta \tau$ tika noteikts, kad pētāmās starojuma intensitātes minimums bija vienāds ar $\Phi = 1,55$ mW/cm². $\Delta \tau$ samazinās, samazinoties acetona tvaiku koncentrācijai un palielinoties optiskās stimulācijas intensitātei.



4.2. att. ΔI un $\Delta \tau$ izmaiņas atkarībā no optiskās stimulācijas intensitātes.

Apzīmējumi: (1) – $K =$ piesāt. tvaiki; (2) – $K = 13\,000 \pm 100$ ppm; (3) – $K = 2040 \pm 10$ ppm.

Pētījumu nosacījumi: $U = 12$ V, $\beta = 33$.

Maksimālais ΔI tika novērots pie mazākās optiskā starojuma intensitātes $\Phi = 1,55$ mW/cm², tomēr pie šīs intensitātes nebija iespējams noteikt $\Delta \tau$. Lai veiktu $\Delta \tau$ izpēti, turpmākajos pētījumos tika izvēlēta starojuma intensitātes vērtība $\Phi = 4,65$ mW/cm².

4.1.2. Spektrālā josla

Lai izceltu konkrētu HgXe lampas starojuma spektra apgabalu, tika izmantoti 3 gaismas filtri:

- Gaismas filtrs UFS-2 (*VΦC-2*) – lai izceltu spektra UV starojuma joslu;
- Gaismas filtrs SZS-16 (*C3C-16*) – lai izceltu spektra redzamās gaismas starojuma joslu;
- Gaismas filtrs KS-17 (*KC-17*) – lai izceltu spektra IS starojuma joslu.

Gaismas filtra caurlaidības spektrālie raksturlielumi τ_λ tika izteikti ar optiskā blīvuma D_λ vai starojuma absorbcijas koeficienta k_λ vērtībām dažādiem viļņu garumiem [75]. Tas tika aprēķināts ar 4.1. un 4.2. vienādojumiem:

$$D_\lambda = -\lg \tau_\lambda = k_\lambda \cdot l, \quad (4.1)$$

$$\tau_\lambda = 10^{-D_\lambda} = 10^{-k_\lambda \cdot l}, \quad (4.2)$$

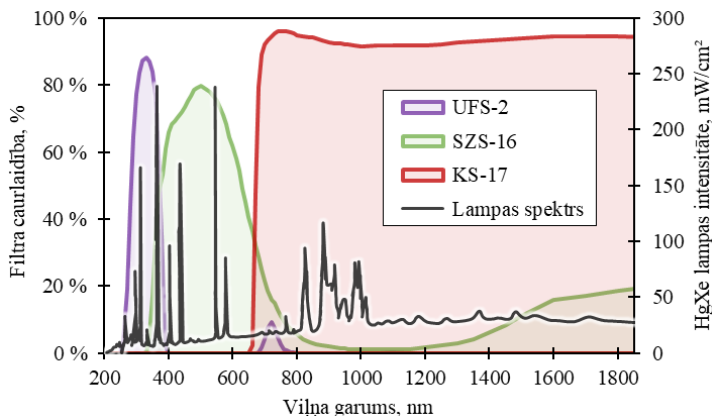
kur: τ_λ – gaismas filtra caurlaides koeficients;

D_λ – optiskais blīvums;

k_λ – starojuma absorbcijas koeficients;

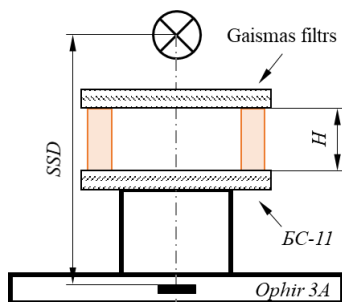
l – gaismas filtra biezums, mm.

Minētās gaismas filtru spektra caurlaidības joslas ļauj noteikt HgXe lampas starojuma spektra apgabalu pārklāšanos (4.3. att.).



4.3. att. Gaismas filtru caurlaidības spektrālās joslas un HgXe lampas starojuma spektrs.

Lai normētu filtru caurlaisto optiskās stimulācijas intensitāti, tika samontēts mērstends (4.4. att.), kurā tika novietota *Ophir Nova II* mēriekārta. Attālums starp gaismas filtriem $H = 11$ mm. Lai pasargātu gaismas filtru KS-17 (*KC-17*) no deformācijas stipras sakaršanas dēļ, tika palielināts $SSD = 200$ mm.



4.4. att. Mērstends caurlaistās optiskās stimulācijas intensitātes normēšanai.
Apzīmējumi: H – attālums starp abiem gaismas filtriem.

Optiskās stimulācijas intensitāte attālumam, kurā tika veikti pētījumi, tika pārrēķināta pēc 4.3. izteiksmes:

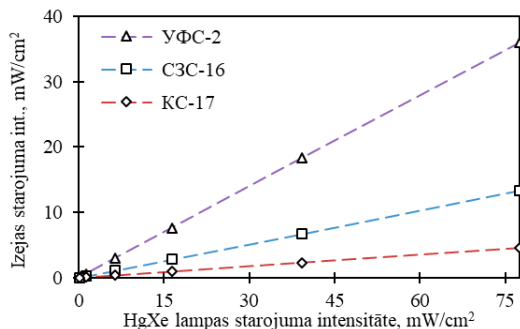
$$I(\text{pēt.}) = I(\text{kalib.}) \cdot \left(\frac{SSD(\text{kalib.})}{SSD(\text{pēt.})} \right)^2, \quad (4.3)$$

kur: $I(\text{kalib.})$ – optiskās stimulācijas intensitātes vērtība, veicot kalibrēšanu, mW/cm^2 ;

SSD(kalib.) – SSD kalibrēšanas laikā, mm;

SSD(pēt.) – SSD pētījumu veikšanas laikā, mm.

Optiskās stimulācijas intensitātes mazākā vērtība tika iegūta, izmantojot gaismas filtru KS-17 (KC-17) (4.5. att.). HgXe lampas starojuma intensitāte tika normēta attiecībā pret šo vērtību, lai turpmāk salīdzinātu starojuma spektra nodalītās daļas ar citiem gaismas filtriem un bez tiem (4.1. tab.).



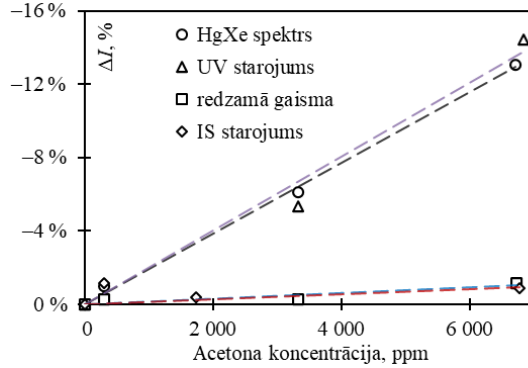
4.5. att. Gaismas filtru optiskās stimulācijas caurlaižamā starojuma intensitāte atkarībā no HgXe lampai uzstādītās starojuma intensitātes vērtības.

4.1. tabula

Optiskās stimulācijas intensitāte, ņemot vērā gaismas filtru caurlaides spēju un normēto vērtību uzstādījumus

Gaismas filtra tips	Optiskā starojuma intensitāte, mW/cm ²	
	Izmērītā	Normētā
Bez filtra	77,5	4,52
UFS-2 (YΦC-2)	36,0	9,73
SZS-16 (C3C-16)	13,4	26,2
KS-17 (KC-17)	4,52	77,5

4.6. att. attēlā doti ΔI rezultāti, izmantojot normēto optiskās stimulācijas intensitāti. Analizējot rezultātus, tika konstatēts vienāds ΔI gan pie UV starojuma joslas, gan pie HgXe lampas pilnā (nefiltrētā) starojuma spektra. Starojuma ietekmē ΔI bija vienāda HgXe lampas gan infrasarkanā, gan redzamās gaismas spektra joslā, taču atšķīrās, izmantojot HgXe lampas UV spektra joslu – rezultāts bija 11 reizes mazāks.



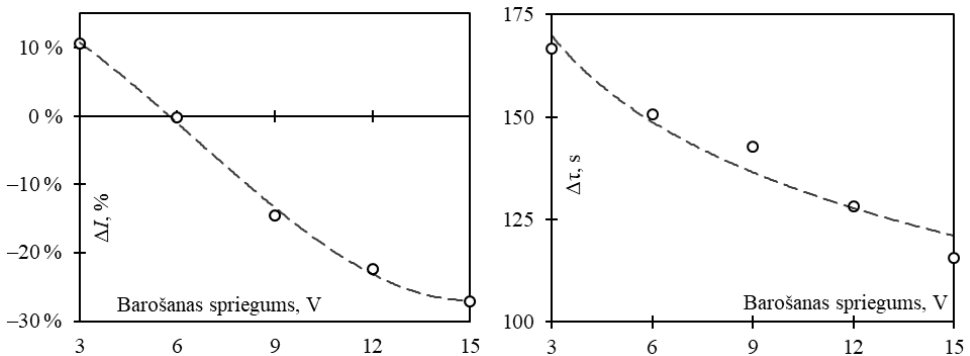
4.6. att. ΔI izmaiņas atkarībā no HgXe lampas starojuma spektrālām joslām.
Pētījumu nosacījums: $\beta = 33$.

ΔI starpība starp optiskās stimulācijas starojuma pilno spektru un UV starojuma joslu nebija nozīmīga, tāpēc turpmākie pētījumi tika veikti, izmantojot optisku stimulēšanu bez gaismas filtra.

4.2. Elektriskās ķēdes spriegums

Šo pētījumu mērķis bija atrast optimālo spriegumu, kas tika padots elektriskajai ķēdei (3.4. att.) (līdzīgi [76]). Mērķa izpildei tika veikti pieci atsevišķi pētījumi ar ķēdes spriegumiem $U = 3; 6; 9; 12; 15$ V, izmantojot līdzstrāvas avotu *IPS-1 (MHC-1)*.

Attiecība starp ķēdes spriegumu U un ΔI , $\Delta \tau$ dota 4.7. att.



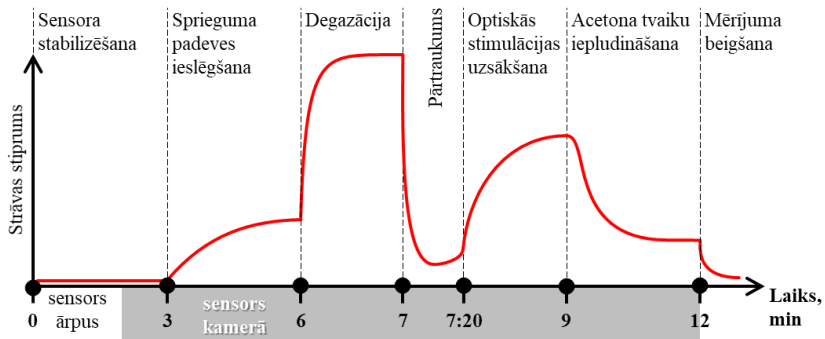
4.7. att. ΔI un $\Delta \tau$ izmaiņas atkarībā no ķēdes sprieguma.
Pētījuma nosacījumi: $K = 13\,070 \pm 28$ ppm, $\beta = 33$.

Maksimālais ΔI tika atrasts pie sprieguma $U = 15 \text{ V}$. Samazinot ķēdes spriegumu, ΔI samazinājās līdz $U = 6 \text{ V}$ un sāka palielināties pie mazāka sprieguma. Ķēdes spriegumam samazinoties, arī $\Delta \tau$ samazinājās.

Ņemot vērā to, ka $U = 15 \text{ V}$ ir maksimāli atļautais ekspluatācijas barošanas spriegums un tiek novērots ΔI tuvināšanās piesātinājumam, turpmākajiem pētījumiem ķēdes spriegums tika pieņemts $U = 12 \text{ V}$.

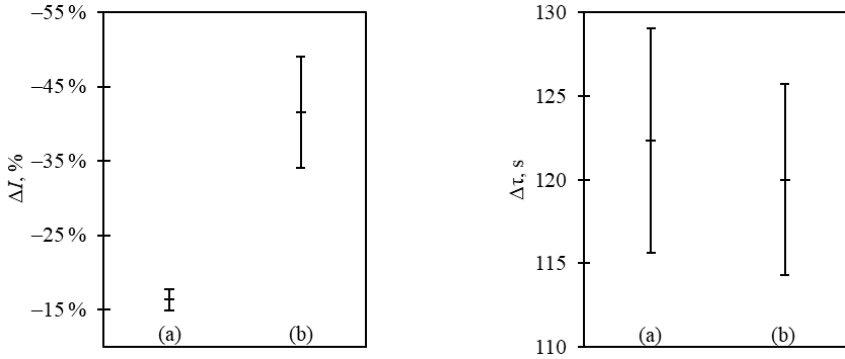
4.3. Virsmas optiskā degazācija

Pētījuma veikšanas procedūra (3.3. nodaļa) tika mainīta (4.8. att.), pievienojot papildu posmu – virsmas optisko degazāciju (turpmāk tekstā – degazācija). Degazācija norisinājās pēc sprieguma padeves ieslēgšanas, bet pirms optiskās stimulēšanas iesākšanas. Degazācijas posms tika veikts 60 s pie optiskās stimulācijas intensitātes $\Phi_{\text{degazācija}} = 77,5 \text{ mW/cm}^2$. Par optiskās degazācijas avotu tika izmantota HgXe lampa. Tālākās 20 s lampa tika izslēgta. Sekojošs optiskās stimulācijas posms tika samazināts līdz 100 s.



4.8. att. Strāvas stiprums dažādos mērījuma posmos ar papildu degazācijas posmu.

Degazācijas ietekme uz ΔI , $\Delta \tau$ dota 4.9. att. Veicot degazācijas posmu, vidējais ΔI palielinās 2,6 reizes. Vidējais $\Delta \tau$ neuzrādīja statistiski nozīmīgu novirzi ($p = 0,34$).

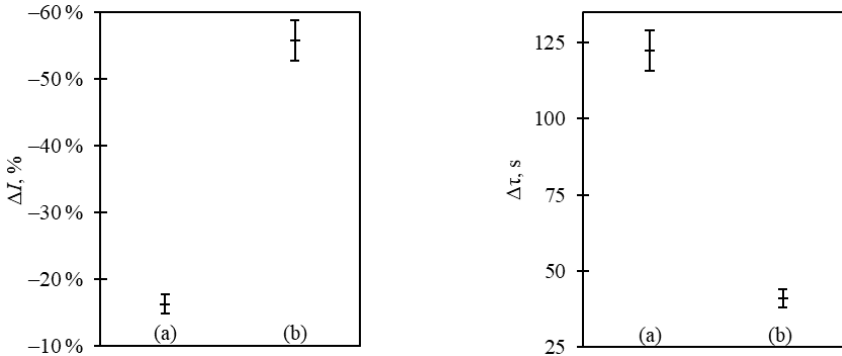


4.9. att. ΔI un $\Delta \tau$ vērtību izkliede bez degazācijas posma (a) ar degazācijas posmu (b).
Pētījumu nosacījumi: $K = 13\,090 \pm 30$ ppm, $\beta = 33$, $\nu = 95$ %.

4.4. Strāvas pastiprinājuma koeficients

Veicot sensoru atlasī, tika ievērota strāvas pastiprinājuma koeficienta izkliede. Analizējot strāvas pastiprinājuma koeficienta izmaiņu ietekmi uz rezultātiem, tika paņemti divi vienāda zīmola tranzistori ar mazāko un lielāko atrasto strāvas pastiprinājuma koeficientu.

Strāvas pastiprinājuma koeficienta ietekme uz ΔI , $\Delta \tau$ dota 4.10. att. Izmantojot sensoru ar lielāko koeficientu ($\beta = 316$ pret $\beta = 33$), vidējais ΔI palielinājās 3,4 reizes. Vidējais $\Delta \tau$ šajā gadījumā samazinājās 3,0 reizes.

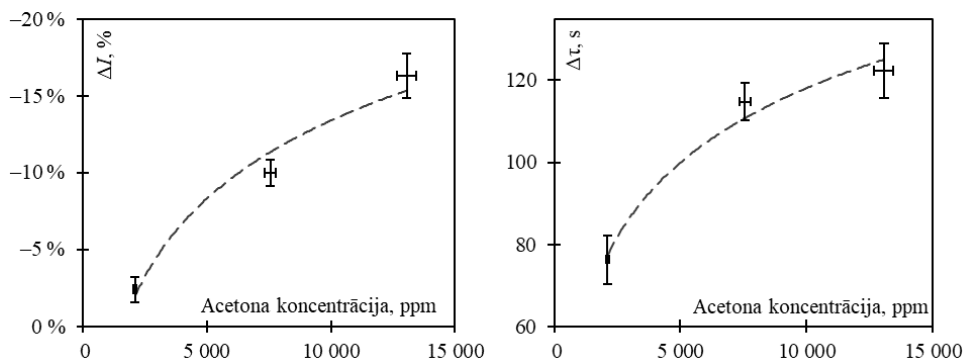


4.10. att. ΔI un $\Delta \tau$ vērtību izkliede sensoriem ar dažādiem strāvas pastiprinājuma koeficientiem ($\beta = 33$ (a) un $\beta = 316$ (b)).
Pētījumu nosacījumi: $K = 13\,090 \pm 90$ ppm, $\nu = 95$ %.

5. ACETONA TVAIKU KONCENTRĀCIJAS SLIEKŠŅA NOTEIKŠANA

5.1. Bez degazācijas un ar mazu strāvas pastiprinājuma koeficientu

5.1. attēlā redzama dažādas acetona tvaiku koncentrācijas ietekme uz ΔI un $\Delta \tau$, izmantojot šādus sensora darbības parametrus: $U = 12 \text{ V}$, $\Phi = 4,65 \text{ mW/cm}^2$. ΔI un $\Delta \tau$ atkarībā no acetona tvaiku koncentrācijas mainījās saskaņā ar eksponenciālu sakarību.



5.1. att. Acetona tvaiku koncentrācijas noteikšana, izmantojot sensoru.

Pētījumu nosacījumi: $\nu = 95 \%$, $\beta = 33$.

Izanalizējot rezultātus, tika secināts, ka sensors spēj noteikt zemas acetona tvaiku koncentrācijas. Minimālais $\Delta I = -2,4 \%$ tika sasniegts pie acetona tvaiku koncentrācijas $K = 2110 \text{ ppm}$. Pārrēķinot minimālo koncentrācijas vērtību, ja sensora jutīgās daļas laukums ir 1 mm^2 , pēc 5.1. formulas tika noteikts:

$$K_{1\text{mm}^2} = \frac{S_{\text{jut}}}{1 \text{ mm}^2} \cdot K = \frac{0,0390}{1} \cdot 2110 = 82,3 \text{ ppm}, \quad (5.1)$$

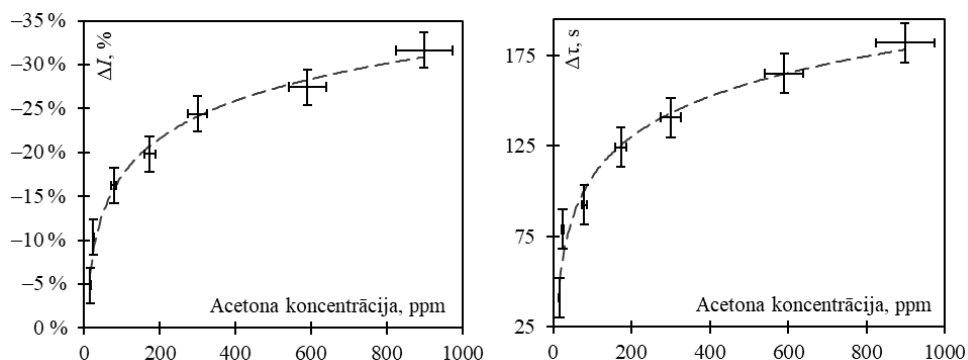
kur: S_{jut} – sensora jutīgās daļas laukums, mm^2 .

Palielinoties acetona tvaiku koncentrācijai, ΔI palielinājās eksponenciāli. Graduējot sensora ΔI , nenoteiktība nepārsniedza $1,4 \%$ (ticamā varbūtība 95%).

Palielinoties acetona tvaiku koncentrācijai, $\Delta \tau$ palielinājās eksponenciāli. Minimālais $\Delta \tau = 76 \text{ s}$ tika sasniegts pie minimālās acetona koncentrācijas vērtības. Graduējot sensora $\Delta \tau$, nenoteiktība nepārsniedza $6,7 \text{ s}$ (ticamā varbūtība 95%).

5.2. Ar degazāciju un lielu strāvas pastiprinājuma koeficientu

Vienāda zīmola tranzistoru rezultāti ar palielinātu strāvas pastiprinājuma koeficientu un iepriekš veiktu degazāciju redzami 5.2. attēlā.



5.2. att. Acetona tvaiku koncentrācijas noteikšana, izmantojot sensoru.

Pētījumu nosacījumi: $\nu = 95\%$, $\beta = 152$.

Izanalizējot rezultātus, tika secināts, ka sensors spēj noteikt zemas acetona tvaiku koncentrācijas. Minimālais $\Delta I = -4,86\%$ tika sasniegts pie acetona tvaiku koncentrācijas $K = 16,3$ ppm. Pārrēķinot minimālo koncentrācijas vērtību, ja sensora jutīgās daļas laukums ir 1 mm^2 , balstoties uz 5.1. izteiksmi, tika noteikts:

$$K_{1\text{mm}^2} = 0,636 \text{ ppm}$$

Palielinoties acetona tvaiku koncentrācijai, ΔI palielinājās eksponenciāli. Graduējot sensora ΔI , nenoteiktība nepārsniedza $2,0\%$ (ticamā varbūtība 95%).

Palielinoties acetona tvaiku koncentrācijai, $\Delta\tau$ palielinājās eksponenciāli. Minimālais $\Delta\tau = 41,1$ s tiek sasniegts pie minimālās uzstādītās acetona koncentrācijas vērtības. Graduējot sensora $\Delta\tau$, nenoteiktība nepārsniedza 11 s (ticamā varbūtība 95%).

Līdz šim pasaulē pieejamiem uz pusvadītāja bāzes veidotiem optiski stimulētiem sensoriem, (1.3. nodaļa) pārrēķinātais koncentrācijas sliekšnis pie aktīvās virsmas laukuma 1 mm^2 , balstoties uz 5.1. izteiksmi, tika noteikts:

$$K_{1\text{mm}^2} \approx 50 \text{ ppm}$$

6. ACETONA TVAIKU KONCENTRĀCIJAS NOTEIKŠANAS METODE, IZMANTOJOT SENSORU UZ P-N PĀREJAS OPTISKĀS STIMULĀCIJAS

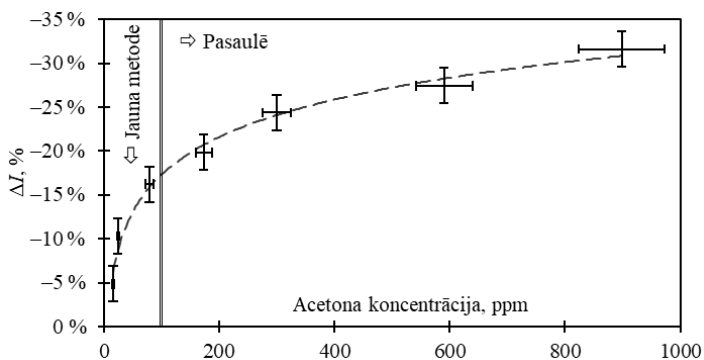
6.1. Metodes salīdzinājums ar pasaulē pieejamiem analogiem

Ir izveidota jauna metode acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai. Metode ir realizēta, izmantojot sensoru uz p-n pārejas optiskās stimulācijas bāzes. Metodes būtība balstās uz pusvadītāja tvaiku noteikšanas metodes pilnveidošanu ar p-n pārejas optisko stimulāciju.

Metodes fizikālie priekšnosacījumi ļauj realizēt sensoru acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanu bez pusvadītāja tvaiku noteikšanas metodes trūkuma – sensora jutīgās daļas uzkaršanās, kas ir nepieciešama metodes darbībai, līdz ar to nenotiek sensora jutīgās daļas sakušana un adsorbēto tvaiku molekulu difūzija sensora materiālā, kas ierobežo pusvadītāju tvaiku noteikšanas metodes ilgstošu vai daudzkārtēju izmantošanu. Salīdzinot ar fotostimulētiem pusvadītāju sensoriem, minimāli nosakāmās koncentrācijas sliekšnis pazeminās.

Jauno sensoru var izmantot acetona tvaiku un to koncentrācijas noteikšanai. Šādus sensorus izmanto, piemēram, atmosfēras piesārņojuma novērtēšanai, dažādu tvaiku noplūžu kontrolēšanai, kā arī medicīnas nozarē.

Acetona tvaiku minimāli nosakāmā koncentrācija ir 79 reizes mazāka (attiecinot jutīgās daļas laukumu), salīdzinot ar pašreiz tirgū pieejamiem fotostimulētiem pusvadītāju sensoriem (6.1. att.).



6.1. att. Acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metodes salīdzinājums ar pasaulē pieejamiem analogiem.

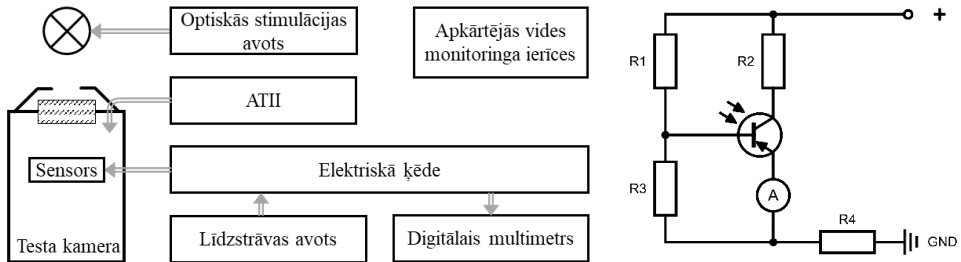
Metodi var izmantot, piemēram, atmosfēras piesārņojuma novērtēšanai, dažādu gāzu noplūdes kontrolēšanai, kā arī medicīnas nozarē, lai analizētu pacientu izelpu kuņģa-zarnu trakta slimību noteikšanai un izvērtēšanai vai organisma šūnas metabolisma izvērtēšanai u. c.

6.2. Acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metodes izmantošanas procedūra

Acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metodē tiek izmantots sensora izejas fotoģenerētās strāvas stipruma pieauguma mērījums. Jaunā metode ļauj noteikt acetona tvaiku minimālo koncentrāciju gaisā 0,636 ppm (attiecinot uz jutīgās daļas laukumu 1 mm²) ar nenoteiktību 2,0 % (ticamā varbūtība 95 %), izmantojot šādus darbības režīma parametrus: HgXe lampa, $\Phi = 4,65 \text{ mW/cm}^2$; $\Phi_{\text{degazācija}} = 77,5 \text{ mW/cm}^2$; $U = 12 \text{ V}$; $\beta = 152$, saslēgšanas ķēde – emitera atkārtotājs ar kopīgu bāzi, apkārtējās vides nosacījumi: $t = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $r = 45 \pm 5 \text{ \%}$.

Izstrādātā acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metode balstās uz ΔI mērīšanu, jo šis parametrs uzrāda mazāko novirzi, novērtējot acetona tvaiku koncentrāciju (5.2. nodaļa). Lai varētu novērtēt acetona tvaiku koncentrāciju, izmantojot sensoru, kas balstīts uz optiski stimulētām p-n pārejām, jāņem vērā vairāki nosacījumi.

1. Pirms sensora izmantošanas, ja sensors bija ilgstoši uzglabāts (vairāk par nedēļu), iegremdēt to vanniņā ar acetonu uz 100 s un pēc tam skalot 10 s ar acetona strūklu. Tīrīšanas procedūru jāatkārto 2–3 reizes, pēc procedūras jāpagaida divas stundas, pirms sākt turpmāko punktu izpildi.
2. Saslēgt sensora elektrisko ķēdi (6.2. att. pa labi) un sagatavot tam testa iekārtu (6.2. att. pa kreisi). Nodrošināt sensoram barošanas spriegumu $U = 12 \text{ V}$, sensora virsmas optisko stimulāciju ar intensitāti $\Phi = 77,5 \text{ mW/cm}^2$, izmantojot HgXe avotu. Apkārtējās vides parametriem jābūt: $t = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $r = 45 \pm 5 \text{ \%}$.



6.2. att. Tvaiku nodrošināšanas aparāta funkcionālā shēma (pa kreisi) un sensora saslēgšanas elektriskā ķēde (pa labi).
Apzīmējumi: $R_1 = 22 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 33 \text{ }\Omega$, $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 0,11 \text{ k}\Omega$.

3. Mērījuma veikšanas procedūra.

- 3.1. Sensora stabilizēšana. Šajā posmā elektriskās ķēdes barošanas kontakti (“+” un GND) tiek saslēgti kopā (īsslēgums). 120 s pēc izmēģinājuma sākšanas sensors tiek ievietots testa kamerā. 175 s pēc izmēģinājuma sākšanas elektropadeves kontakti tiek atvienoti.
- 3.2. Sprieguma padeves ieslēgšana. Šajā posmā elektriskā ķēde tiek saslēgta 180. s pēc izmēģinājuma sākšanas.

- 3.3. Virsmas optiskā degazācija (turpmāk tekstā – degazācija). Degazācijas posms tiek veikts 60 s pie optiskās stimulācijas starojuma intensitātes $\Phi_{\text{degaz.}} = 77,5 \text{ mW/cm}^2$. Par optiskās degazācijas avotu tiek izmantota HgXe lampa. Tālākās 20 s lampa tiek izslēgta.
- 3.4. Optiskās stimulācijas sākšana. Optiskā stimulācija tiek sākota 360. s pēc izmēģinājuma sākšanas.
- 3.5. Acetona tvaiku iepludināšana. Optiskā stimulācija turpinājās. Tiek veikta noteiktās acetona tvaiku koncentrācijas iepludināšana (padeves ilgums $t = 8 \text{ s}$) – notiek 540. s pēc izmēģinājuma sākšanas.
- 3.6. Pētījumu pabeigšana. 720. s izmēģinājums tiek pārtraukts. Tiek izslēgts optiskās stimulācijas avots, atslēgta sprieguma padeve sensoram, tiek atvērta kamera.
4. Mērījumu veikšanas procedūra tiek atkārtota (3. solis) četras reizes (pirmās trīs atkārtotās reizes atrodas ārpus ticamības intervāla). Ceturtajā reizē tiek veikta strāvas stipruma reģistrācija acetona tvaiku iepludināšanas posmā.
5. Tiek veikta reģistrēto pirmdatu apstrāde programmā *OriginLab OriginPro 2018 (64-bit) SRI* (versija: b9.5.1.195), izmantojot šādu procedūru:
 - 5.1. Reģistrētās strāvas stipruma pirmdatu imports no digitāla multimetra saglabātā datu žurnāla uz programmas vidi (tiek saglabātas laika un reģistrētās strāvas stipruma vērtības).
 - 5.2. No datiem tiek izveidots grafiks. Programmā tiek izmantota bāzes līnijas atņemšanas funkcija (*Peak Analyzer, Goal: Subtract Baseline*). Bāzes līnijas (*BSpline*) manuālai noteikšanai tiek izmantoti vismaz septiņi punkti (*Baseline Mode: User Defined*).
 - 5.3. Apstrādāts reģistrētās strāvas stiprums ir reģistrētās strāvas stipruma un bāzes līnijas starpība.
 - 5.4. Apstrādātās strāvas stipruma vērtības trokšņu izlīdzināšanu jāveic ar 9. kārtas polinomiālo aproksimāciju, kas konstruēta laika posmā $\pm 20 \text{ s}$ no pārliekuma punkta.
6. Tiek aprēķināta emitera strāvas stipruma izmaiņas vērtība, izmantojot šādu izteiksmi:

$$\Delta I = \frac{I(\text{ac})}{I_0} \cdot 100 \%, \quad (6.1)$$

kur: I_0 – neapstrādātā strāvas stipruma vērtība pirms acetona tvaiku iepludināšanas, μA ;
 $I(\text{ac})$ – apstrādātā strāvas stipruma vērtība pārliekuma punktā, sasniegta pēc acetona iepludināšanas, μA .

7. Izmantojot sensora tarēšanas līkni, tiek novērtēta acetona tvaiku koncentrācija, izmantojot ar 6.1. izteiksmi aprēķināto ΔI vērtību.

7. REKOMENDĀCIJAS. METODES IZMANTOŠANAS IESPĒJAS

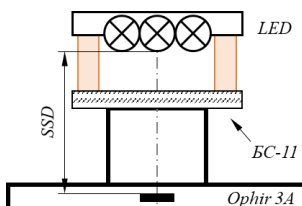
Lai efektīvāk iesāktu jaunās metodes lietošanu praksē, ir svarīgi izvērtēt sistēmas mazos gabarītus, mainīgos ārējos apstākļus, kā arī izmantojamos gāzu/tvaiku maisījumus. Tika izvērtēti vairāki faktori:

- Sistēmas izmēru samazināšanas iespējas, aizvietojojot HgXe lampu ar *LED* (līdzīgi [72,77]). Šajā darbā pētāmās sensora sistēmas tilpums ir aptuveni 30 l, rekomendētās sistēmas tilpums – aptuveni 1,5 l.
- Sistēmas darbība dažādos apkārtējās vides apstākļos, jo sensoru izmantošana var tik īstenota ārpus apstākļiem, kuros tika veikti šī darba pētījumi.
- Selektīva sensora koncepts, lai varētu īstenot metodi gāzu/tvaiku maisījumos.

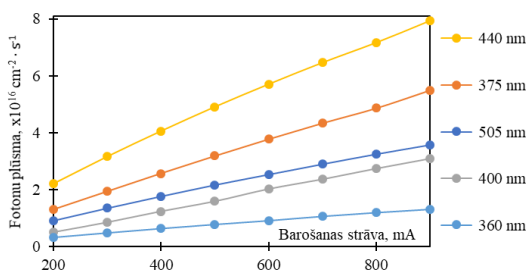
7.1. LED kā optiskās stimulācijas avots

Pēc HgXe lampas starojuma spektra efektīvās joslas noteikšanas tika veikta efektīvā viļņa garuma meklēšana *LED* vajadzībām. *LED* izmantošana nodrošināja noteikta viļņa garuma fotonu mijiedarbību ar pusvadītāju (1. pielikums).

Kalibrēšanas iekārtā (7.1. att.) uz *LED* balstīts optiskās stimulācijas avots tika novietots izveidotajā fiksatorā, $SSD = 78$ mm.



7.1. att. Iekārta *LED* optiskās stimulācijas intensitātes normēšanai.



7.2. att. Optiskās stimulācijas laikā krītošo fotonu skaits atkarībā no noteiktās strāvas stipruma vērtības, uzstādītas *LED* barības avotā.

Veicot LED kalibrēšanu, bija iespējams noteikt optiskās stimulācijas jaudas vērtības atkarību no piegādātā strāvas stipruma LED (7.2. att.).

Stimulācijas jauda tika pārveidota fotonu skaitā, kuri vienas sekundes laikā krīt uz laukuma vienību [78], pēc (7.1):

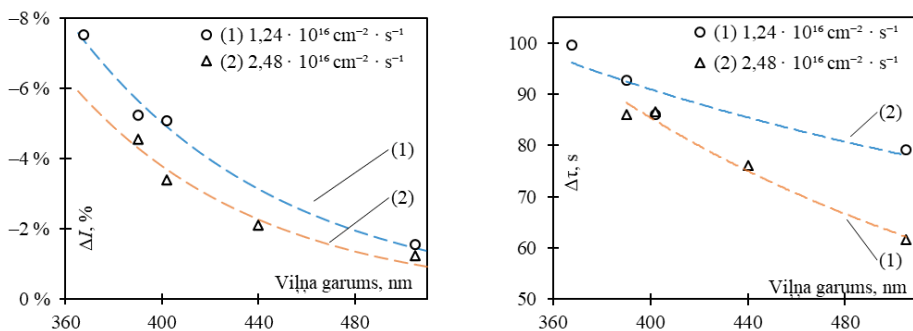
$$n = W \cdot \lambda / (h \cdot c), \quad (7.1)$$

kur: W – izmērītā optiskās stimulācijas jaudas vērtība kalibrēšanas laikā, W;
 λ – LED viļņa garums, nm;
 h – Planka konstante (*Planck constant*), J · s;
 c – gaismas ātrums, m/s.

LED viļņa garuma ietekme uz ΔI , $\Delta \tau$ dota 7.3. att.

Maksimālā ΔI tika noteikta pie $\lambda = 367,5$ nm, turklāt ΔI samazinājās, palielinoties optiskās stimulēšanas starojuma viļņa garumam. Palielinoties optiskās stimulēšanas starojuma krītošo fotonu skaitam (intensitātei), samazinājās arī ΔI .

Tika novērota $\Delta \tau$ samazināšanās, palielinoties optiskās stimulēšanas starojuma viļņa garumam. Optiskās stimulēšanas starojuma krītošo fotonu skaita ietekme uz $\Delta \tau$ nav skaidra.



7.3. att. ΔI un $\Delta \tau$ izmaiņas atkarībā no LED optiskā starojuma viļņu garuma un krītoša fotonu daudzuma.

Pētījumu nosacījumi: $t = 24$ °C, $r = 56$ %, $K =$ piesāt. tvaiki, $\beta = 33$.

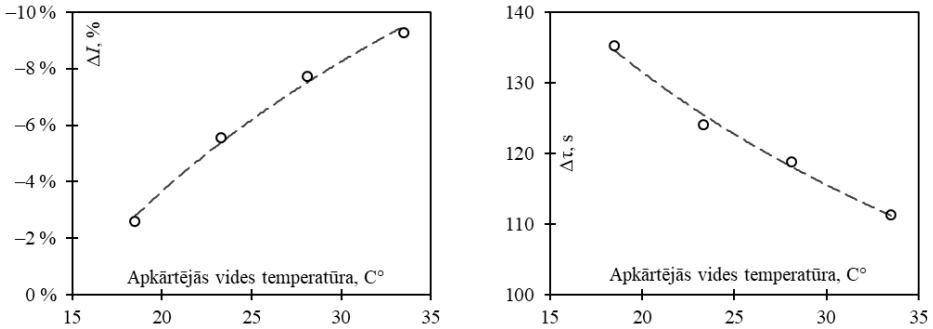
LED starojuma ietekmes izpēte tika veikta piesātināta acetona tvaiku vidē, jo mazākas tvaiku koncentrācijas gadījumā (piemēram, 13 000 ppm) ΔI nebija iespējams izpētīt palielinātās reģistrētās strāvas stipruma trokšņa dēļ. Pie optiskās stimulācijas ar $\lambda = 367,5$ nm ΔI bija mazāka nekā tad, ja tika izmantota HgXe lampa ar UV starojuma spektra joslu, tātad efektīvais optiskās stimulēšanas starojuma viļņa garums bija mazāks par $\lambda = 367,5$ nm.

7.2. Apkārtējās vides ietekme, izmantojot LED kā optiskās stimulācijas avotu

Apkārtējās vides parametru (relatīvā mitruma un apkārtējās vides temperatūras) ietekmes izpēte ir svarīga, jo to izmaiņa ietekmē pusvadītāja sensora darbību [79–82]. Gaisa relatīvais mitrums ir proporcionāls ūdens molekulu daudzumam, kas adsorbēsies uz sensora virsmas. Apkārtējās temperatūras izmaiņas ietekmē procesus, kas notiek pusvadītāja materiālā, līdz ar to šie faktori var ietekmēt acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas rezultātus.

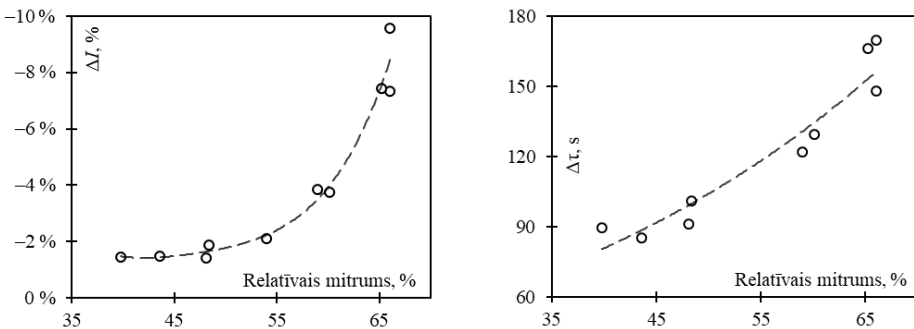
Apkārtējās vides temperatūra tika regulēta ar sildelementu. Relatīvais mitrums tika regulēts ar ūdens strūklu. Sasniedzot nepieciešamo apkārtējās vides temperatūru un relatīvo mitrumu, tika veikts 15 minūšu pārtraukums. Par optiskās stimulācijas avotu tika izmantota LED ar $\lambda = 367,5$ nm un $\Phi = 5,41$ mW/cm².

Apkārtējās vides temperatūras ietekme uz ΔI un $\Delta \tau$ dota 7.4. att. Līdz ar temperatūras paaugstināšanos ΔI palielinājās, savukārt $\Delta \tau$ samazinājās.



7.4. att. ΔI un $\Delta \tau$ izmaiņas atkarībā no apkārtējās vides temperatūras.

Pētījumu nosacījumi: $r = 56$ %, $K =$ piesāt. tvaiki, $\lambda = 367,5$ nm, $\beta = 33$, $\Phi = 5,41$ mW/cm².



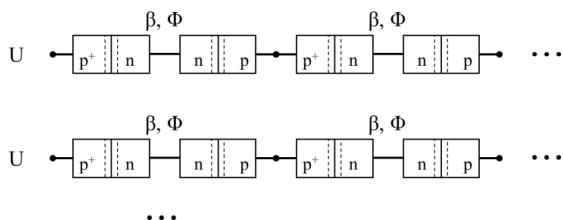
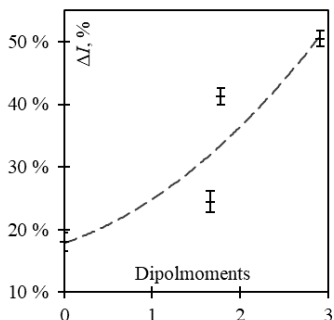
7.5. att. ΔI un $\Delta \tau$ izmaiņas atkarībā no relatīvā mitruma.

Pētījumu nosacījumi: $t = 24$ °C, $K =$ piesāt. tvaiki, $\lambda = 367,5$ nm, $\beta = 33$, $\Phi = 5,41$ mW/cm².

Relatīvā mitruma ietekme uz ΔI un $\Delta \tau$ dota 7.5. att. Palielinoties relatīvajam mitrumam, ΔI , $\Delta \tau$ arī palielinās.

7.3. Selektīva sensora koncepts

Galvenais pusvadītāju gāzu/tvaiku koncentrācijas noteikšanas metodes trūkums ir selektivitātes trūkums (1.1. tab.) – grūtības izmantot sensoru jauktā gāzu/tvaiku vidē.



7.6. att. ΔI izmaiņas atkarība no dipolmomenta benzīna, n-butanola, etilacetāta, acetona tvaikiem (pa kreisi [76]), tvaiku maisījuma komponentu koncentrācijas noteikšanas sensora koncepts (pa labi).

Izpētot jauno acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metodi, tika izdarīti secinājumi par metodes jutības atkarību no tās galvenajiem darbības režīma parametriem (6.2. nodaļa): optiskās stimulācijas, elektriskās ķēdes strāvas sprieguma, virsmas optiskās degazācijas, strāvas stipruma pastiprinājuma koeficienta. Tika novērota korelācija starp ΔI un lietotā tvaika dipolmomentu (7.6. att. pa kreisi), kas ļauj secināt, ka optiski inducēta pusvadītāja elektrofizikālās īpašības ir atkarīgas no gāzes dipolmomenta.

Selektīva sensora konceptam tika piedāvāts risinājums izmantot sensora elementu kopu (matricu) (7.6. att. pa labi), kas nodrošinās konkrētu gāzu adsorbciju.

SECINĀJUMI

1. Izstrādāta acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas metode, izmantojot jauno sensoru uz p-n pārejas optiskās stimulācijas.
2. Metode, kas nodrošina izejas fotogenerētās strāvas izmaiņas atkarībā no acetona tvaiku koncentrācijas gaisā, ir pamatota.
3. Sensors ir izveidots uz pamatotas metodes.
4. Izstrādāta pētījuma veikšanas procedūra, izveidots tvaiku nodrošināšanas aparāts sensora strāvas stipruma reģistrācijai atkarībā no acetona tvaiku koncentrācijas gaisā.
5. Veikti pētījumi par sensora strāvas stipruma pieaugumu un strāvas stipruma pieauguma laika intervāla darbības režīmu un šādu parametru noteikšanu:
 - optiskās stimulācijas režīms;
 - elektriskās ķēdes spriegums;
 - virsmas optiskā degazācija;
 - strāvas pastiprinājuma koeficients.
6. Veikti pētījumi par sensora strāvas stipruma pieaugumu un strāvas stipruma pieauguma laika intervāla atkarību no acetona tvaiku koncentrācijas gaisā.
7. Sasniegta metode acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai gaisā, izmantojot jauno sensoru uz p-n pārejas optiskās stimulācijas. Piedāvāta metodes izmantošanas procedūra.
8. Izvērtētas metodes izmantošanas iespējas, sistēmas izmēru samazināšanas iespējas, sistēmas darbība ārpus standartapstākļiem ietvaros. Piedāvāts selektīva sensora koncepts.
9. Acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai gaisā izveidota metode ar jaunu sensoru, kurā p-n pāreja, kas ir bipolārs germānija sakausējums, tiek optiski stimulēta (HgXe lampas starojums, gaismas plūsma $\Phi = 4,65 \text{ mW/cm}^2$).
10. Sensors darbojas acetona tvaiku koncentrācijas diapazonā no 16,3 ppm līdz 13 060 ppm.
11. Uz p-n pārejas bāzes optiski stimulēta sensora emitera strāvas stiprums ir eksponenciāli atkarīgs no acetona tvaiku koncentrācijas gaisā.
12. Sensora acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanas sliekšnis ir 0,636 ppm (attiecinoši uz jutīgās daļas laukumu 1 mm^2), izmantojot šādus darbības režīma parametrus: HgXe lampa, $\Phi = 4,65 \text{ mW/cm}^2$; $\Phi_{\text{degazācija}} = 77,5 \text{ mW/cm}^2$; $U = 12 \text{ V}$; $\beta = 152$, saslēgšanas ķēde – emitera atkārtotājs ar kopīgu bāzi, apkārtējās vides nosacījumi: $t = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $r = 45 \pm 5 \%$.
13. Jauna metode acetona tvaiku koncentrācijas noteikšanai, izmantojot sensoru uz p-n pārejas optiskās stimulācijas bāzes, ļauj noteikt acetona tvaiku minimālo koncentrāciju gaisā 0,636 ppm (attiecinoši uz jutīgās daļas laukumu 1 mm^2) ar nenoteiktību 2,0 % (ticamā varbūtība 95 %).

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Mürtz, M. Breath Diagnostics Using Laser Spectroscopy. *Optics & Photonics News*, 2005, 16(1), 30–35. Available from: doi:10.1364/OPN.16.1.000030.
2. Pauling, L., Robinson, A.B., Teranishi, R., Cary, P. Quantitative analysis of urine vapor and breath by gas-liquid partition chromatography. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1971, 68(10), 2374–2376. Available from: doi:10.1073/pnas.68.10.2374.
3. Phillips, M., Herrera, J., Krishnan, S., Zain, M., Greenberg, J., Cataneo, R.N. Variation in volatile organic compounds in the breath of normal humans. *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications*, 1999, 729(1–2), 75–88. ISSN 0378-4347. Available from: doi:10.1016/S0378-4347(99)00127-9.
4. Miekisch, W., Schubert, J.K., Noeldge-Schomburg, G.F.E. Diagnostic potential of breath analysis—focus on volatile organic compounds. *Clinica Chimica Acta*, 2004, 347(1–2), 25–39. ISSN 0009-8981. Available from: doi:10.1016/j.cccn.2004.04.023.
5. Thalakkotur, L.M., Prabhahari, P., Sukhanazerin, A., Biji, P. Technologies for Clinical Diagnosis Using Expired Human Breath Analysis. *Diagnostics (Basel)*, 2015, 5(1), 27–60. Available from: doi:10.3390/diagnostics5010027.
6. Risby, T.H., Sehnert, S.S. Clinical application of breath biomarkers of oxidative stress status. *Free Radical Biology and Medicine*, 1999, 27(11–12), 1182–1192. Available from: doi:10.1016/s0891-5849(99)00212-9.
7. de Zwart, L.L., Meerman, J.H.N., Commandeur, J.N.M., Vermeulen, N.P.E. Biomarkers of free radical damage: Applications in experimental animals and in humans. *Free Radical Biology and Medicine*, 1999, 26(1–2), 202–226. ISSN 0891-5849. Available from: doi:10.1016/S0891-5849(98)00196-8.
8. Wang, C., Sahay, P. Breath analysis using laser spectroscopic techniques: breath biomarkers, spectral fingerprints, and detection limits. *Sensors (Basel)*, 2009, 9(10), 8230–8262. Available from: doi:10.3390/s91008230.
9. Shirasu, M., Touhara, K. The scent of disease: volatile organic compounds of the human body related to disease and disorder. *Journal of Biochemistry*, 2011, 150(3), 257–266. Available from: doi:10.1093/jb/mvr090.
10. Jones, A.P. Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(28), 4535–4564. ISSN 1352-2310. Available from: doi:10.1016/S1352-2310(99)00272-1.
11. Katsouyanni, K. Ambient air pollution and health. *British Medical Bulletin*, 2003, 68(1), 143–156. Available from: doi:10.1093/bmb/ldg028.
12. Kampa, M., Castanas, E. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 2008, 151(2), 362–367. ISSN 0269-7491. Available from: doi:10.1016/j.envpol.2007.06.012.

13. Autrup, H. Ambient Air Pollution and Adverse Health Effects. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2010, 2(5), 7333–7338. ISSN 1877-0428. Available from: doi:10.1016/j.sbspro.2010.05.089.
14. Yamazoe, N. Toward innovations of gas sensor technology. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 108(1–2), 2–14. ISSN 0925-4005. Available from: doi:10.1016/j.snb.2004.12.075.
15. Wang, Z., Wang, C. Is breath acetone a biomarker of diabetes? A historical review on breath acetone measurements. *Journal of Breath Research*, 2013, 7(3), 1–18. Available from: doi:10.1088/1752-7155/7/3/037109.
16. Potyrailo, R.A., Surman, C., Nagraj, N., Burns, A. Materials and Transducers Toward Selective Wireless Gas Sensing. *Chemical Reviews*, 2011, 111(11), 7315–7354. Available from: doi:10.1021/cr2000477.
17. RAE Systems Inc. *The PID Handbook: Theory and Applications of Direct-Reading Photoionization Detectors*. Third edition. San Jose: RAE Systems by Honeywell, 2013. 167 pp. ISBN 0-9768162-1-0.
18. Moseley, P.T. Solid state gas sensors. *Measurement Science and Technology*, 1997, 8, 223–237. Available from: doi:10.1088/0957-0233/8/3/003.
19. Arshak, K., Moore, E., ÓLaighin, G., Harris, J., Clifford, S. A Review of Gas Sensors Employed in Electronic Nose Applications. *Sensor Review*, 2004, 24(2), 181–198. Available from: doi:10.1108/02602280410525977.
20. Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., Ning, H. A Survey on Gas Sensing Technology. *Sensors (Basel)*, 2012, 12(7), 9635–9665. Available from: doi:10.3390/s120709635.
21. Kaķītis, A., Galiņš, A., Leščevics, P. *Sensori un mērišanas sistēmas*. Jelgava: LLU, 2008. 395 lpp. ISBN 978-9984-784-73-1.
22. *Products - FIGARO Engineering inc* [online]. [viewed 07 Feb 2021]. Available from: <https://www.figarosensor.com/product>.
23. Korotcenkov, G. Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice? *Materials Science and Engineering: B*, 2007, 139(1), 1–23. ISSN 0921-5107. Available from: doi:10.1016/j.mseb.2007.01.044.
24. Ishihara, T., Matsubara, S. Capacitive Type Gas Sensors. *Journal of Electroceramics*, 1998, 2, 215–228. Available from: doi:10.1023/A:1009970405804.
25. Capone, S., Forleo, A., Francioso, L., Rella, R., Siciliano, P., Spadavecchia, J., Presicce, D.S. Taurino, A.M. Solid State Gas Sensors: State of the Art and Future Activities. *ChemInform*, 2004, 35. Available from: doi:10.1002/chin.200429283.
26. Jaaniso, R., Tan, O.K. *Semiconductor gas sensors*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. 576 pp. ISBN 978-0-85709-236-6.
27. Korotcenkov, G., Cho, B.K. The role of grain size on the thermal instability of nanostructured metal oxides used in gas sensor applications and approaches for grain-size stabilization. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2012, 58(4), 167–208. ISSN 0960-8974. Available from: doi:10.1016/j.pcrysgrow.2012.07.001.

28. Kim, H.J., Lee, J.H. Highly sensitive and selective gas sensors using p-type oxide semiconductors: Overview. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 192, 607–627. ISSN 0925-4005. Available from: doi:10.1016/j.snb.2013.11.005.
29. Yamazoe, N., Sakai, G., Shimanoe, K. Oxide Semiconductor Gas Sensors. *Catalysis Surveys from Asia*, 2003, 7, 63–75. Available from: doi:10.1023/A:1023436725457.
30. Fine, G.F., Cavanagh, L.M., Afonja, A., Binions, R. Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring. *Sensors*, 2010, 10(6), 5469–5502. Available from: doi:10.3390/s100605469.
31. Darvishnejada, M.H., Firooz, A.A., Beheshtian, J., Khodadadib, A.A. Highly sensitive and selective ethanol and acetone gas sensors by adding some dopants (Mn, Fe, Co, Ni) onto hexagonal ZnO plates. *RSC Advances*, 2016, 6, 7838–7845. Available from: doi:10.1039/C5RA24169C.
32. Doll, T. *Advanced Gas Sensing. The Electroadsorptive Effect and Related Techniques*. Boston: Springer US, 2003. 202 pp. ISBN 978-1-4613-4647-0.
33. Karmakar, M., Mondal, B., Pal, M., Mukherjee, K. Acetone and ethanol sensing of barium hexaferrite particles: A case study considering the possibilities of non-conventional hexaferrite sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 190, 627–633. ISSN 0925-4005. Available from: doi:10.1016/j.snb.2013.09.035.
34. Mishra, S., Ghanshyam, C., Ram, N., Bajpai, R.P., Bedi, R.K. Detection mechanism of metal oxide gas sensor under UV radiation. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, 97(2–3), 387–390. ISSN 0925-4005. Available from: doi:10.1016/j.snb.2003.09.017.
35. Comini, E., Faglia, G., Sberveglieri, G. *Solid State Gas Sensing*. Boston: Springer US, 2009. 280 pp. ISBN 978-0-387-09664-3.
36. Muraoka, Y., Takubo, N., Hiroi, Z. Photoinduced conductivity in tin dioxide thin films. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(10). Available from: doi:10.1063/1.3126713.
37. Xu, F.; HO, H.-P. Light-Activated Metal Oxide Gas Sensors: A Review. *Micromachines*, 2017, 8(333). Available from: doi:10.3390/mi8110333.
38. Geng, Q., He, Z., Chen, X., Dai, W., Wang, X. Gas sensing property of ZnO under visible light irradiation at room temperature. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 188, 293–297. ISSN 0925-4005. Available from: doi:10.1016/j.snb.2013.07.001.
39. Kamble, V.B., Umarji, A. M. Defect induced optical bandgap narrowing in undoped SnO₂ nanocrystals. *AIP Advances*, 2013, 3(8). Available from: doi:10.1063/1.4819451.
40. Peng, L., Xie, T.-F., Yang, M., Wang, P., Xu, D., Pang, S., Wang, D.-J. Light induced enhancing gas sensitivity of copper-doped zinc oxide at room temperature. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 131(2), 660–664. ISSN 0925-4005. Available from: doi:10.1016/j.snb.2007.12.060.
41. Ahn, H., Wang, Y., Hyun Jee, S., Park, M., Yoon, Y.S., Kim, D.-J. Enhanced UV activation of electrochemically doped Ni in ZnO nanorods for room temperature acetone sensing. *Chemical Physics Letters*, 2011, 511(4–6), 331–335. ISSN 0009-2614. Available from: doi:10.1016/j.cplett.2011.06.045.

42. Vol'kenshtejn, F.F. *Elektronnye processy na poverhnosti poluprovodnikov pri hemosorbicii*. Moskva: Nauka, 1987. 432 lpp.
43. Bonch-Bruevich, V.L., Kalashnikov, S.G. *Fizika poluprovodnikov*. Moskva: Nauka, 1977. 672 lpp.
44. Starosel'skij, V. I. *Fizika poluprovodnikovyh priborov mikroelektroniki: uchebnoe posobie*. Moskva: Vysshee obrazovanie, 2009. 463 lpp. ISBN 978-5-9692-0261-0.
45. Stepanenko, I.P. *Osnovy teorii tranzistorov i tranzistornyh skhem*. Izdanie 4. Moskva: Energiya, 1977. 672 lpp.
46. Moskatov, E. A. *Spravochnik po poluprovodnikovym priboram*. Izdanie 2. Taganrog. 219 lpp.
47. Gurtov, V. A. *Tverdotel'naya elektronika: Uchebnoe posobie*. Moskva, 2005. 492 lpp.
48. *ISO 8573-1:2010 Compressed air – Part 1: Contaminants and purity classes*. Third Edition. International Organization for Standardization, 2010. 9 pp.
49. McDermott, H.J. *Air Monitoring for Toxic Exposures*. Second Edition. John Wiley & Sons, 2004. 688 pp. ISBN 978-0-471-45435-9.
50. *Safety and Health Information Bulletins | Calibrating and Testing Direct-Reading Portable Gas Monitors | Occupational Safety and Health Administration* [online]. [viewed 07 Feb 2021]. Available from: <https://www.osha.gov/dts/shib/shib093013.html>.
51. Wright, R.S. *EPA Traceability Protocol for Assay and Certification of Gaseous Calibration Standards*. Research Triangle Park: EPA, 2012. 174 pp.
52. *Hamamatsu Spot light source. Lightningcure series*. Iwata City: Hamamatsu Photonics K.K., 2015. 12 pp.
53. *APS 300 - ANSMANN AG* [online]. [viewed 07 Feb 2021]. Available from: <https://www.ansmann.de/en/power-supplies/aps-300-level-6>.
54. *PeakTech 4390. Bedienungsanleitung / Operation manual*. Germany: PeakTech, 2013. 86 pp.
55. *PeakTech DMM Tool. Operation Manual*. Germany: PeakTech, 2017. 18 pp.
56. *SHT31 Smart Gadget User Guide*. Switzerland: Sensirion AG, 2015. 11 pp.
57. *BMP280: Data sheet*. Revision 1.19. Germany: Bosch Sensortec, 2018. 49 pp.
58. *Nova II User Manual*. Revision 2.37-1. Ophir OPTRONICS, 2014. 103 pp.
59. *Power Sensors 1.1*. Ophir, 2021. 73 pp.
60. *AVR Transistortester - Mikrocontroller.net* [online]. [viewed 07 Feb 2021]. Available from: https://www.mikrocontroller.net/articles/AVR_Transistortester.
61. Gershunskij, B.S. *Osnovy elektroniki i mikroelektroniki*. Izdanie 3. Kiev: Vishcha shkola, 1987. 422 lpp.
62. *Chemical Compatibility Guide*. Graco, 2013. 51 pp.
63. *DC02 Tacklife | The Future of Tools* [online]. [viewed 04 Feb 2019]. Available from: <https://www.tacklifetools.com/product/product/index/id/90>.
64. *Acetone for analysis EMSURE®174; ACS,ISO,Reag. Ph Eur | 67-64-1 | Sigma-Aldrich* [online]. [viewed 07 Feb 2021]. Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/mm/100014>.
65. Hori H., Tanaka I. Equilibrated Vapor Concentrations for Bicomponent Organic Solvents. *Journal of Occupational Health*, 1998, 40(2), 132–136. Available from: doi:10.1539/joh.40.132.

66. Boumphrey, S., Marshall, N. Understanding vaporizers. *Continuing Education in Anaesthesia Critical Care & Pain*, 2011, 11(6), 199–203. ISSN 1743-1816. Available from: doi:10.1093/bjaceaccp/mkr040.
67. Green, D.W., Perry, R.H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Eighth Edition. New York: McGraw-Hill, 2008. 2700 pp. ISBN 978-0-07-159313-7.
68. Poling, B.E., Prausnitz, J.M., O'Connell J.P. *Properties of Gases and Liquids*. Fifth Edition. New York: McGraw-Hill, 2001. 768 pp. ISBN 978-0-07-149999-6.
69. Chou, J. *Hazardous Gas Monitors: A Practical Guide to Selection, Operation and Applications*. New York: McGraw-Hill, 2000. 258 pp. ISBN 978-0-071358-76-7.
70. Koshkin, N.I., SHirkevich, M.G. *Spravochnik po elementarnoj fizike*. 9-e izdanie. Moskva: Nauka, 1982. 206 lpp.
71. Dekhtyar, Y., Komars, M., Sneiders, M., Selutina, M. Towards Optically Induced Semiconductor Gas Sensor: Sensing of Acetone. *IFMBE Proceedings*, 2015, 50, 63–65. Available from: doi:10.1007/978-981-287-573-0.
72. Dekhtyar, Y., Komars, M., Sneiders, M. Optical Metrology of Novel Optically Stimulated Semiconductor Gas Sensor. *IFMBE Proceedings*, 2020, 76, 462–468. Available from: doi:10.1007/978-3-030-31635-8.
73. *Origin User Guide*. Northampton: OriginLab Corporation, 2016. 279 pp.
74. Dekhtyar, Y., Komars, M., Morozovs, F., Sneiders, M. Optically Induced Semiconductor Gas Sensor: Acetone Detection Range using Continuous and Cyclic Optical Irradiation Types. *IFMBE Proceedings*, 2018, 65, 330–333. Available from: doi:10.1007/978-981-10-5122-7.
75. *Katalog cvetnogo stekla*. Moskva: Mashinostroenie, 1967. 63 lpp.
76. Dekhtyar, Y., Selutina, M., Sneiders, M., Zunda, U. Towards Optically Induced Semiconductor Human Exhalation Gas Sensor. *IFMBE Proceedings*, 2016, 57, 482–485. Available from: doi:10.1007/978-3-319-32703-7.
77. Dekhtyar, Y., Komars, M., Sneiders, M. Semiconductor Ethanol Sensor Inducted with Visible Light. *IFMBE Proceedings*, 2019, 68/3, 3–6. Available from: doi:10.1007/978-981-10-9023-3.
78. *Oriel Product Training. Spectral Irradiance*. Section one: Features. Stratford: Newport. 39 pp.
79. Fang, F., Futter, J., Markwitz, A., Kennedy, J. UV and Humidity Sensing Properties of ZnO Nanorods Prepared by the arc Discharge Method. *Nanotechnology*, 2009, 20(24). Available from: doi:10.1088/0957-4484/20/24/245502.
80. Qiu, X., Tang, R., Zhu, J., Oiler, J., Yu, C., Wang, Z., Yu, H. The effects of temperature, relative humidity and reducing gases on the ultraviolet response of ZnO based film bulk acoustic-wave resonator. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 151(2), 360–364. ISSN 0925-4005. Available from: doi:10.1016/j.snb.2010.07.052.
81. Procek, M., Stolarczyk, A., Pustelny, T. Impact of Temperature and UV Irradiation on Dynamics of NO₂ Sensors Based on ZnO Nanostructures. *Nanomaterials*, 2017, 7(10). Available from: doi:10.3390/nano7100312.
82. Li, W., Ding, C., Cai, Y., Liu, J., Wang, L., Ren, Q., Xu, J. Enhanced Humidity Sensitivity with Silicon Nanopillar Array by UV Light. *Sensors*, 2018, 18(2). Available from: doi:10.3390/s18020660.

PATEICĪBAS

Liels paldies manam promocijas darba vadītājam profesoram Jurijam Dehtjaram par vērtīgo padomu, vadību un izsmelšajām konsultācijām visā darba tapšanas gaitā! Bez Jūsu nākotnes redzējuma un idejām darbs netiktu īstenots.

Izsaku pateicību maniem kolēģiem no Biomedicīnas inženierzinātņu un nanotehnoloģiju institūta – par atbalstu un sniegtajām idejām, kas nenoliedzami palīdzēja pētījuma īstenošanā.

Liels paldies manam studentam Maksimam Komaram par tvaiku nodrošināšanas aparāta prototipa projektēšanu, eksperimentālo datu ieguvu un neizsmelamo entuziasmu!

Liels paldies Fjodoram Tjuļkinam, Sabīnei Teifurovai un Komara ģimenei par darba rediģēšanu un kritiskajām piezīmēm.

Īpaša pateicība SIA “INLAB” un tās vadītājam Maksimam Poļakovam par augstprecizitātes mēriekārtas sniegšanu.

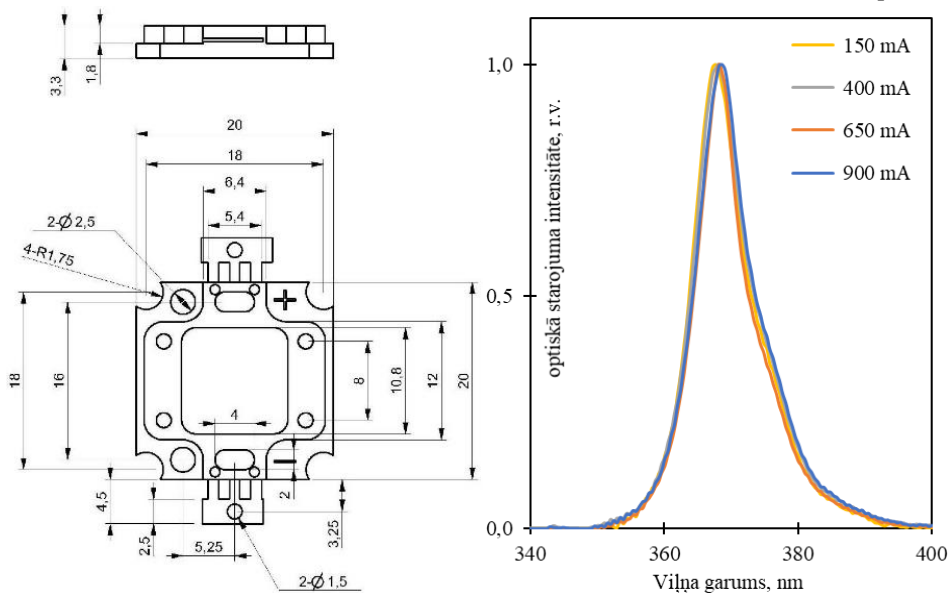
Paldies promocijas padomes “RTU P-16” sekretārei Natālijai Mozgai par konsultācijām darba noformēšanas un nodošanas jautājumos!

Paldies RTU Doktorantūras daļai!

Sirsnīgs paldies maniem draugiem, sievai un ģimenei, īpaši vectēvam Arkādijam Šneideram, kas nemitīgi atbalstīja un motivēja mani visa promocijas darba tapšanas gaitā!

PIELIKUMS

pielikums



P.2. att. Izmantotās LED izmēri (pa kreisi);
LED $\lambda = 367,5$ nm normētais starojuma spektrs pie dažādiem barošanas spriegumiem (pa labi).
Mēriekārta: OPSYTEC UVpad E [1].

P.1. tabula

Izmantotās LED galvenie raksturlielumi [2]

Viļņa garums, nm	Barošanas spriegums, V	Maksimālais strāvas stiprums, mA	Starojuma leņķis, °
367,5	9-11	1000	120
390	9-11	1000	120
402	9-11	1000	120
440	9-11	1000	120
505	9-11	1000	120

1. Spektralradiometer UVpad E mit externem Sensorkopf für Bestrahlungsstärke [online]. [viewed 07 Feb 2021]. Available from: <https://www.opsytec.de/produkte/spektrometer/uvpad-e>.
2. 10W 20W 30W 50W 100W White Royal Blue RGB Yellow Red Green High Power COB LED / eBay [online]. [viewed 07 Feb 2021]. Available from: <https://www.ebay.com/itm/10W-20W-30W-50W-100W-White-Royal-Blue-RGB-Yellow-Red-Green-High-Power-COB-LED-/201871395881>.