

Matīss Maltisovs

**AUGSTA SPRIEGUMA BISTABILO VIEDO
LOGU ELEKTRONISKO SHĒMU DARBĪBAS
METOŽU IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Radioelektronikas institūts

Matīss Maltisovs

Doktora studiju programmas “Elektronika” doktorants

**AUGSTA SPRIEGUMA BISTABILO VIEDO LOGU
ELEKTRONISKO SHĒMU DARBĪBAS METOŽU
IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
asoc. profesors *Dr. sc. ing.*
DMITRIJS PIKUĻINS

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Maltisovs M. Augsta sprieguma bistabīlo viedo loģu elektronisko shēmu darbības metožu izpēte. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 44 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes P-08 2021. gada 7. decembra lēmumu, protokols Nr. 5.

<https://doi.org/10.7250/9789934227431>
ISBN 978-9934-22-743-1

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda (*Ph. D.*) iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 11. martā Rīgas Tehniskās Universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

asoc. profesors *Dr. sc. ing.* Andis Supe
Rīgas Tehniskā Universitāte

profesors *Dr. phys.* Mārtiņš Rutkis
Latvijas Universitāte, Cietvielu Fizikas institūts

profesors *Ph. D.* Tims Vilkinsons
Kembridžas universitāte, Lielbritānija

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.

Matīss Maltisovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 2 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 32 attēli, 9 tabulas, kopā 44 lappuses. Literatūras sarakstā ir 22 nosaukumi.

VELTĪJUMS

Sievai Rūtai

Dēliem Krišjānim and Mārtiņam

PATEICĪBA

Vispirms, liels paldies darba vadītājam asoc. prof. *Dr. sc. ing.* Dmitrijam Pikulinam par darba vadīšanu, vērtīgiem padomiem, ieteikumiem un atbalstu darba izstrādē, tā pilnveidē.

Paldies bijušajiem kolēģiem no *EuroLCDs* par atbalstu, diskusijām, palīdzīgu roku paraugu sagatavošanā un mērījumu veikšanā: Aināram Ozolam, Ilmāram Sekacim, Kristapam Morusam, Jānim Kļaviņam, Jānim Kondratjevam, Kārlim Krūmiņam, Kristiānam Krūmiņam, Rolandam Šķirmantam, Dainim Backānam, Jānim Zālītim, Artūram Jankevičam, Mikusam Matisonam, Jānim Čerņavskim, Mārtiņam Rudzājam, Lāsmai Vaitai, Mārcim Ruzaiķim un Elīnai Emarei.

Liels paldies *HansaMatrix Innovation* vadībai par doto iespēju izstrādāt promocijas darbu un ar to saistītos zinātniskos rakstus: Ilmāram Osmanim, Krišam Osmanim and Aijai Kopštālei. Paldies arī esošajiem un bijušajiem kolēģiem par atbalstu elektronikas dizaina izstrādē, ražošanā un testēšanā: Valteram Skrastiņam, Linardam Grigānam, Uģim Sirmelim, Robertam Gotlaufam, Pāvelam Ivanovam and Mārcim Greitānam.

Vēlos pateikties saviem vecākiem - Jurim un Solvitai par ticību maniem sapņiem un atbalstu brīžos, kad tas bija visvairāk vajadzīgs.

No sirds pateicos savai sievai Rūtai par viņas nerimstošo mīlestību un atbalstu visu studiju garumā, visiem kāpumiem un kritumiem šo pēdējo gadu laikā.

ANOTĀCIJA

Šķidro kristālu displejus cilvēce ikdienā izmanto jau vairākus gadu desmitus, un pieprasījums pēc to integrācijas un jaunu produktu izstrādes tikai pieaug. Viens no izpētes un īstenošanas virzieniem ir viedie logi, lai gan tie ir zināmi jau vairāk nekā 25 gadus, līdz galam tie nav izpētīti, un cilvēki tos savā ikdienā tik naski lietot nevēlas.

Promocijas darba mērķis ir noskaidrot, vai *Smectic-A* šķidrās kristāls var būt nākamās paaudzes produkts, kas spētu uzlabot cilvēku ikdienu. *Smectic-A* šķidrās kristāls spēj atrasties divos optiski pretējos stāvokļos — gaismu caurlaidīgā un izkliedējošā - bez papildu energoresursiem, ļaujot ietaupīt elektroenerģiju darbības laikā. Šī šķidrās kristāla optiskās īpašības, salīdzinot ar tirgū pieejamajiem produktiem, ir krietni labākās, t. i., gaismas caurlaidība vienā stāvoklī ir $> 85 \%$, otrā - $< 2 \%$. Paverot iespējas produktu izmantot dažādiem nolūkiem, piemēram, viedajiem logiem, lai izkliedētu gaismu saulainā dienā vai sniegtu privātuma sajūtu atklātā ofisa telpā.

Ir veikta padziļināta *Smectic-A* šķidrās kristāla analīze par esošajiem pētījumiem, iegūtajiem eksperimentālajiem datiem un mēģinājumiem izstrādāt funkcionālus produktus. Iegūtā informācija ir detalizēti aprakstīta, izceļot galvenās neatrisinātās problēmas un piedāvājot to risinājumus.

Lai saprastu *Smectic-A* šķidrās kristāla potenciālu viedo logu tehnoloģijā, veikta esošo produktu analīze, sniegts kopsavilkums par aktīvajiem viedajiem logiem un to salīdzinājums. Eksperimentāli izpētīta *Smectic-A* šķidrās kristāla gaismas caurlaidības un pārslēgšanās ātruma atkarība no pārslēgšanās frekvences, kā arī jaudas patēriņš, balstoties uz pārslēdzamo šķidrās kristāla šūnas laukumu. Papildus tam veikta padziļināta ilgtermiņa funkcionālā stabilitātes izpēte, un tās laikā uzskaitīti un izanalizēti populārākie defektu veidi. Sniegti risinājumi defektu novēršanai un ieteikumi pārslēgšanas sistēmu, ražošanas procesu optimizācijai. Izstrādāta metodika, kā noteikt šķidrās kristāla elektriskos parametrus, lai varētu izveidot elektrisko simulācijas modeli un atvieglot elektronisko sistēmu izstrādi.

Ir apkopoti darba rezultāti, sniegti ieteikumi dažādu dizainu un izmēru *Smectic-A* šķidro kristālu funkcionālajai lietošanai.

SATURS

Anotācija	6
Simbolu un saīsinājumu saraksts	8
1. Darba vispārīgais raksturojums	10
1.1. Tēmas aktualitāte	10
1.2. Promocijas darba mērķis	11
1.3. Zinātniskā novitāte un iegūtie rezultāti	12
1.4. Aizstāvamās tēzes	12
1.5. Aprobācija	13
1.5.1. Zinātniskajos žurnālos un datubāzēs publicētie raksti	13
1.5.2. Autora prezentācijas zinātniskajās konferencēs	13
2. Viedo logu ierīces	14
2.1. Aktīvās ierīces	14
2.1.1. <i>Smectic-A LC</i> šūnas	14
2.2. Funkcionālās īpašības	16
2.2.1. <i>LC</i> šūnas frekvences reakcija	16
2.2.2. <i>LC</i> šūnas elektriskie parametri	20
2.3. Ilgtermiņa pārslēgšanas problēmas	23
2.3.1. Funkcionālā pārbaude	23
2.3.2. Iegūti defekti	24
2.4. Defektu novēršana	27
2.4.1. Pārbaudes cikla un pārslēgšanas parametru optimizācija	27
2.4.2. Pārslēgšanas signālu formas optimizācija	32
2.4.3. Citas defektu risināšanas metodes	34
2.5. Elektrisko simulāciju modelis	35
2.5.1. <i>ITO</i> un dielektriskā slāņa elektriskā pretestība	35
2.5.2. <i>LC</i> šūnas kapacitāte	37
2.5.3. <i>LC</i> pretestība	39
Secinājumi	41
Literatūras saraksts	42

SIMBOLU UN SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

<i>LCD</i>	šķidrā kristāla displejs
<i>SmA</i>	<i>Smectic-A</i> šķidrā kristāls
<i>LC</i>	šķidrā kristāls
<i>TV</i>	televīzija
<i>EC</i>	elektrohromiska ierīce
<i>PDLC</i>	polimēru izkliedēta šķidrā kristāla ierīce
<i>SPD</i>	suspendētu daļiņu ierīce
<i>UV</i>	ultravioleta gaisma
<i>ITO</i>	indija alvas oksīds
SiO_2	silīcija dioksīds
<i>Ns</i>	nematisks šķidrā kristāls
<i>Ss</i>	smektisks šķidrā kristāls
$n(r)$	vienības vektors, r - telpas koordināta, nosaka vēlamu molekulu orientāciju
<i>Sc</i>	<i>Smectic-c</i> šķidrā kristāls
<i>ChLC</i>	holestēriskais šķidrā kristāls
<i>Chiral</i>	unikāla spēja selektīvi atstarot vienas komponentes apļveida polarizēto gaismu
ϵ	šķidrā kristāla šūnas materiāla dielektriskais koeficients
<i>IR</i>	infrasarkanā gaisma
η_o	parastais laušanas koeficients
η_p	polimēra laušanas koeficients
<i>RMS</i>	vidējā kvadrātiskā vērtība no izmērītā sprieguma vai patērētās jaudas
<i>PVD</i>	fizikālā tvaiku kondensācijas pārklāšana
LiCoO_2	litija kobalta(II) oksīds
WO_3	polikristālisks volframa oksīds
$\Omega/\text{kvadrātu}$	indija alvas oksīda pretestības mērvienība
<i>PC</i>	dators
<i>OPMP</i>	optisko parametru mērīšanas platforma
<i>AHV</i>	mainīgs augsta sprieguma avots
<i>E24 standard</i>	vēlamo skaitļu sistēma, kas izstrādāta elektronikas komponentu vērtību uzskaitēi
<i>Wh</i>	vatstunda
<i>PDT</i>	produktu izstrādes pārbaude
<i>HALT</i>	ļoti paātrināta dzīves cikla pārbaude
<i>QT</i>	kvalifikācijas pārbaude

<i>FOAT</i>	uz kļūdām vērsta paātrināta pārbaude
<i>BIT</i>	sadeģšanas pārbaude
<i>PVC</i>	polivinilhlorīds, logu rāmjos izmantots sintētisks plastmasas polimērs
<i>RC</i>	rezistora un kondesatora slēgums
<i>C_{LC}</i>	šķidrā kristāla kapacitāte
<i>R_S</i>	šķidrā kristāla šūnas virknes pretestība (indija alvas oksīda pretestība)
<i>R_P</i>	šķidrā kristāla šūnas paralēlā pretestība (šķidrā kristāla pretestība)
<i>Q_C</i>	kondesatora uzlāde (šķidrā kristāla šūnas uzlāde)
<i>V_S</i>	barošanas spriegums
<i>E</i>	elektriskās lauka intensitāte
<i>E_{br}</i>	šķidrā kristāla elektriskās caursites vērtība
<i>ICT</i>	informācijas un komunikāciju tehnoloģijas
<i>VATP</i>	Ventspils augsto tehnoloģiju parks
<i>SGD</i>	viedo logu vadības elektronika
<i>2D</i>	divdimensiju

1. DARBA VISPĀRĪGAIS RAKSTUROJUMS

1.1. Tēmas aktualitāte

Mūsdienās šķidro kristālu displeji (*LCD*) ir daudzu ierīču neatņemama sastāvdaļa. Augot pieprasījumam, arvien vairāk tiek izstrādāti un ieviesti jauna veida *LCD* produkti. Tos izmanto visur — gan viedtālrunos un televizoros (*TV*), gan veļasmašīnās. Šķidro kristālu (*LC*) lietojums ir daudz plašāks — viens no tiem ir viedais stikls, kam ir no sprieguma atkarīgas optiskās īpašības, un tās var mainīt, izmantojot īpašus elektriskus signālus.

Viedā stikla tehnoloģija tiek pētīta jau vairākus gadu desmitus, tomēr pieprasījums pēc šiem produktiem aug, tādēļ tiek veidotas inovācijas izejmateriālos, tehnoloģijās un rasti jauni lietojumu veidi dažādos produktos, piemēram, viedajos logos.

Logiem ir svarīga funkcija ikvienās mājās un komerciālajās ēkās. Tie padara telpu gaišāku, ļaujot ietaupīt elektrības izmaksas. Tie nodrošina arī siltuma apmaiņu, kā rezultātā ir nepieciešams izmantot gaisa kondicionēšanas vai citas ierīces, lai pielāgotu komforta līmeni iekštelpās. Taču logi nav labākais izolācijas materiāls aukstajā sezonā, un tie cilvēkiem neasociējas ar modernajām tehnoloģijām.

Ir divi viedo stiklu veidi, un to nosaka pēc tā, vai to maināmībai ir nepieciešams elektriskais signāls:

- **Aktīvie (atkarīgi no signāla):**
 - elektrochromiska ierīces (*EC*);
 - polimēru izkliedēta šķidrā kristāla ierīces (*PDLC*);
 - suspendētu daļiņu ierīces (*SPD*);
 - citas (piemēram, bistabila *Smectic-A* (*SmA*) šķidro kristālu ierīces).
- **Pasīvie (nav atkarīgi no signāla):**
 - termohromiskas ierīces;
 - fotohromiskas ierīces.

Galvenās viedā stikla priekšrocības:

- **privātums** – zema gaismas caurlaidība gaismas izkliedes stāvoklī, iespēja aizstāt dienas un nakts aizkarus vai žalūzijas;
- **finanšu ekonomija** – tīrīšanas aprikojuma, apkures izmaksu, gaisa kondicionēšanas un apgaismojuma ekonomija, nav nepieciešams izmantot āra žalūzijas un veikt to apkopi;
- **aizsargā no ultravioletā starojuma (*UV*)** – bloķē > 98 % *UV* starojuma;
- **informācijas attēlošana, mārketing** – var izmantot kā projekcijas ekrānu, pārslēdzoties uz gaismas izkliedes stāvokli.

Pēdējo 50 gadu laikā tiek veikti dažādi pētījumi saistībā ar *SmA LC* un to ierīcēm. Lai gan tehnoloģijas attīstās strauji, nav izdevies izstrādāt *SmA LCD*, ko varētu iegādāties ikviens, salīdzinot ar līdzīgiem produktiem, piemēram, *PDLC*.

Tas liek uzdot jautājumu: kāpēc tā.

- Esošie pētījumi nesniedz detalizētu informāciju par izmantoto paraugu izmēriem, tomēr vairumā gadījumu tie bija $< 50 \times 50$ mm. Tas nozīmē, ka neatkarīgi no tehnoloģiskajām iespējām nav rasts tehniskais risinājums, lai veiksmīgi ražotu dažāda izmēra *SmA LC* ierīces, no 8×8 mm līdz 300×400 mm vai lielākas.
- Diezgan plaši tiek apspriesta pārslēgšanas metodikas, t. i., matricu adresēšana ar termiskā un elektriskā lauka efektiem [1, 2], elektrodu konfigurācijas [3], funkcionālo parametru un pārslēgšanas raksturlielumi [4, 5], elektrohidrodinamika [6] un tamlīdzīgi. Neviena no pētījumiem pilnībā neattiecas uz pārslēgšanās sliedņu frekvencēm abos stāvokļos (gaismas izkliede un caurspīdīgums). Nav zināma pārslēgšanas ātruma un gaismas caurlaidības frekvences korelācija.
- Papildus *LC* pārslēgšanas pētījumiem tiek risināti citi jautājumi, piemēram, dažāda līmeņa pelēko toņu iegūšana gaismas izkliedes stāvoklī ar frekvenču un signāla amplitūdu variācijām. Taču netiek apskatītas tēmas par pārslēgšanas secību, pauzēm starp stāvokļiem un pikseļu pārslēgšanu, to ietekmi uz gaismas caurlaidību un tamlīdzīgi.
- Nav pieejama informācija par ilgstošām pārslēgšanas problēmām un defektiem, kā arī nav publicēti pētījumi par *LC* defektu analīzi, risinājumu meklēšanu un preventīvajiem pasākumiem defektu novēršanai.
- Teorētisko pētījumu un eksperimentu trūkums līdzvērtīga slodzes modeļa iegūšanai, lai varētu atdarināt *LCD* ar līdzvērtīgu slodzi elektronikas izstrādes simulācijas vidēs. Šī modeļa izstrāde efektīvāk paātrinātu elektronikas produktu projektēšanas procesu bez papildu pārbaudēm ar īstiem paraugiem, kam ir augstas ražošanas izmaksas.
- Nav zināms, kā izmainās elektroenerģijas patēriņš attiecībā pret pārslēdzamo lauku, minimālais strāvas daudzums, kas nepieciešams, lai pārslēgtu noteiktu *LCD* vai pikseļa lielumu, kā arī enerģijas patēriņš dažādiem *LC* šūnu tipiem un dizainiem.
- Nav informācijas par aizsargpārklājumu biezuma atšķirībām, piemēram, SiO_2 , kas ietekmē pārslēgšanas ātrumu, gaismas caurlaidību un enerģijas patēriņu, kā arī ietekmi uz indija alvas oksīda (*ITO*) pretestības izmaiņām un tamlīdzīgi.

1.2. Promocijas darba mērķis

Darba mērķis ir izpētīt *SmA LC* šūnu darbību un to elektriskās īpašības, kā arī iegūt padziļinātu izpratni par funkcionālo ilgtermiņa stabilitāti. Lai sasniegtu mērķi, ir jāizpilda šādi uzdevumi:

- izpētīt *SmA LC* šūnu gaismas caurlaidību un pārslēgšanas ātrumu atkarībā no pārslēgšanas frekvences (2.2. nodaļa, 2.2.1. apakšnodaļa);
- izpētīt enerģijas patēriņu, pamatojoties uz pārslēgšanas lauku (2.2. nodaļa, 2.2.2. apakšnodaļa);

- izpētīt dažādu *LC* šūnu dizaina veidu pārslēgšanas atšķirības (2.3. nodaļa, 2.3.2. apakšnodaļa);
- izpētīt līdzvērtīgas slodzes iespējas elektrisko apakšsistēmu simulācijās (2.5. nodaļa, 2.5.1.—2.5.3. apakšnodaļas);
- izpētīt *LC* defektu veidus, to rašanās iemeslus un sniegt iespējamus risinājumus (2.3. un 2.4. nodaļa).

Papildus iepriekš minētajam ir jāizpēta citas aktīvās viedā stikla ierīces, pārskatot un analizējot to zinātnisko pētījumu tēmas par elektrisko un optisko funkcionalitāti, lai tās varētu salīdzināt ar *SmA LC* ierīcēm.

1.3. Zinātniskā novitāte un iegūtie rezultāti

Promocijas darba izstrādes laikā veikti vairāki darbi:

- izstrādāts jauns kapilārais pildīšanas process, kas ļauj veiksmīgi pildīt dažāda izmēra (no 10×10 mm līdz 300×400 mm) *SmA LC* šūnas;
- izstrādāta optisko parametru mērīšanas platforma (OPMP) un pārslēgšanas ierīces, lai varētu izmērīt gaismas caurlaidību, pārslēgšanās ātrumu, skata leņķi un pārslēgt līdz pat piecām dažādu dizainu *SmA LC* tipa šūnām, lai palielinātu testēšanas apjomu nākotnes vajadzībām;
- pirmo reizi pētīta *SmA LC* šūnu frekvences reakcija un tās atkarība no pārslēgšanas ātruma, gaismas caurlaidības un enerģijas patēriņa;
- pirmo reizi pētīta *SmA LC* šūnu līdzvērtīgas slodzes modeļa teorētiskā pieeja;
- pirmo reizi pētīta *SmA LC* šūnu ilgtermiņa pārslēgšanas defektu analīze;
- pirmo reizi nodrošināta *SmA LC* šūnu defektu risināšanas metodika;
- izstrādāts rūpnieciskais *SmA LC* draiveris ar iespēju vienlaikus pārslēgt divas *LC* šūnas ar izmēru līdz 300×400 mm.

1.4. Aizstāvāmās tēzes

- 300×400 mm *SmA LC* šūnā ir iespējams nodrošināt viedo stiklu lietojumiem nepieciešamos parameterus — gaismas caurlaidību > 85 % un pārslēgšanas ātrumu < 150 ms caurspīdīgajam stāvoklim, gaismas caurlaidību < 2 % un pārslēgšanas ātrumu < 1700 ms gaismas izkliedes stāvoklim pieslēdzot $100\text{—}240$ V $> 0,9$ A nulles komponentes taisnstūra formas kontroles signālu $20\text{—}40$ Hz robežās caurspīdīgajam stāvoklim un $400\text{—}700$ Hz robežās gaismas izkliedes stāvoklim.
- Ilgstošas funkcionālās pārbaudes laikā, pārslēdzot > 1000 reizes starp abiem optiskajiem stāvokļiem, *SmA LC* šūnā parādās šādi vizuālie defekti: nevienmērīgs aktīvais laukums, vizuāls kontrasts starp lāzera ablācijas līnijām un pikseļa aktīvo laukumu, *LC* gadījumu kopas un reģioni, kas ir pārslēgušies uz kādu no optiskajiem stāvokļiem, un pikseļu perimetri — nevienmērīgi un viļņveidīgi.

- *SmA LC* šunu ilgtermiņa funkcionālo un vizuālo stabilitāti varētu uzlabot, optimizējot pārslēgšanas parametrus un ciklu, izmantojot papildu 1—5 s pauzes starp stāvokļu un pikselu pārslēgšanām, vadības signāla maiņa uz nulles komponentes sinusoidālu, kā arī termiskā apstrāde, taču ir jārod kompromis starp vizuālo veiktspēju, pārslēgšanas ātrumiem un elektronikas dizaina sarežģītību.
- *SmA* šķidro kristālu veiktspēju var modelēt ar praktiski iegūto līdzvērtīgās slodzes teorētisko modeli: $RS = 71 \Omega$, $RP = 13 \text{ k}\Omega$, $C = 53 \text{ nF}$, kas sniegs pietiekamu informāciju par $300 \times 400 \text{ mm}$ *SmA LC* šūnas funkcionalitāti 100—240V diapazonā, ko var pielāgot citiem izmēriem.

1.5. Aprobācija

1.5.1. Zinātniskajos žurnālos un datubāzēs publicētie raksti

- M. Maltisovs, K. Krumins, A. Ozols, and D. Pikulins, “Study of the Operational Properties of Bistable Smectic-A Liquid Crystal Displays”, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 55, no. 3, pp. 54–62, 2018, doi: 10.2478/lpts-2018-0021. (**Scopus**).
- M. Maltisovs and D. Pikulins, “Study of Electrical Properties of Bistable Smectic-A Liquid Crystal Displays”, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 56, no. 5, pp. 3–11, 2019, doi: 10.2478/lpts-2019-0026. (**Scopus**).
- M. Maltisovs, K. Krumins, A. Ozols, and D. Pikulins, “Identifying Defects in Bistable Smectic-A Liquid Crystal Displays After Extended Period of Functional Testing”, *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/RTUCON51174.2020.9316559. (**IEEE Xplore**).
- M. Maltisovs, K. Krumins, A. Ozols, and D. Pikulins, “Resolving Defects in Bistable Smectic-A Liquid Crystal Displays”, *2020 IEEE 3rd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*, Shenyang, China, 2020, pp. 243-247, doi: 10.1109/AUTEEE50969.2020.9315707. (**IEEE Xplore**).

1.5.2. Autora prezentācijas zinātniskajās konferencēs

- International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies – **CONNECT 2020**, Riga, Latvia, May 13—15, 2020.
- IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University – **RTUCON 2020**, Riga, Latvia, November 5—7, 2020.
- IEEE 3rd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering – **AUTEEE 2020**, Shenyang, China, November 20—22, 2020.

2. VIEDO LOGU IERĪCES

2.1. Aktīvās ierīces

Viedajam stiklam, logiem vai pārslēdzamiem stikliem ir no sprieguma atkarīgas optiskās īpašības, kuras var mainīt, pielietojot īpašus elektriskus signālus. Šīs tehnoloģijas ietver *EC*, *SPD* un *PDLC* ierīces. Katram no šiem veidiem ir atšķirīgi darbības principi, priekšrocības un trūkumi.

Viedais stikls ir dinamisks, ļaujot tradicionāli statiskam materiālam kļūt dzīvam un daudzfunkcionālam. Šī tehnoloģija ļauj kontrolēt dažādas gaismas formas, tostarp redzamo gaismu, *UV* un infrasarkanu gaismu (*IR*). Stikli, kas nodrošina privātumu ir balstīti tehnoloģijās, kas ļauj caurspīdīgiem materiāliem (piemēram, stiklam vai polikarbonātam) pēc pieprasījuma pārslēgties no caurspīdīga uz ēnotu vai pilnīgi necaurspīdīgu (2.1. att.). Tehnoloģiju var integrēt logos, starpsienās un citās caurspīdīgās virsmās un izmantot dažādās nozarēs, piemēram, arhitektūrā, interjera dizainā, automobiļu ražošanā, viedajos mazumtirdzniecības logos un plaša patēriņa elektronikā [7].



2.1. att. (a) Stikli, kas nodrošina privātumu, atrodies izslēgtā stāvoklī vienmērīgi izkliedē uz tiem krītošos gaismas starus, (b) stikliem atrodies ieslēgtā stāvoklī, gaismas stari vairs netiek izkliedēti [7].

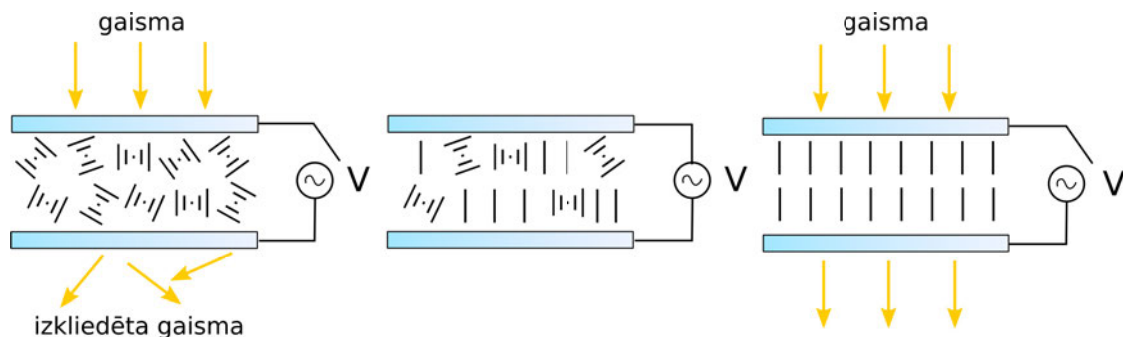
2.1.1. *Smectic-A LC* šūnas

Lielākā daļa *LC* ierīču ir monostabīlas, un tām ir tikai viens iespējamais stāvoklis bez pievienota elektriskā lauka. Tām nepieciešams pastāvīgs pievadīts spriegums un bieža attēla atsvaidzināšana, palielinot elektroenerģijas patēriņu. Lai atrisinātu šo problēmu, rodas iespēja izmantot bistabīlu displeju, kur attēls (informācija) tiek saglabāts atmiņā uz ilgu laiku, tādējādi ļaujot samazināt elektroenerģijas patēriņu, līdzīgi kā elektrochromatiskajās ierīcēs [8].

SmA LC šūnas piedāvā dažas svarīgas priekšrocības – tās var darbināt bez polarizatoriem, kas nodrošina augstāku gaismas caurlaidību, kā arī uzlabo kontrastu un novērš nepieciešamību ražošanas procesā izmantot *LC* izlīdzināšanu.

SmA LC tiek pārslēgtas starp gaismas caurspīdīgu stāvokli (homeotropiskā orientācija)

un necaurspīdīgu gaismas izkliedes stāvokli (fokāla koniska tekstūra), izmantojot ārēju elektrisko lauku ar dažādām frekvencēm (2.2. att.). Optisko stāvokļu stabilitāti elektriskajā laukā nodrošina *SmA* slāņveida struktūra un materiāla augstā viskozitāte, kas nodrošina elektrooptisko ierīču energoefektivitāti [9].

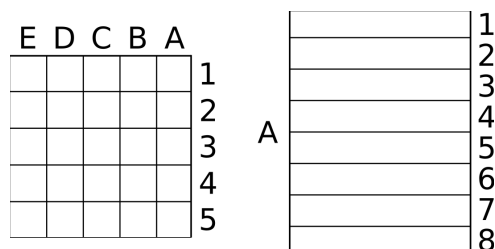


2.2. att. Bistabila *SmA* *LC* šūnu pārslēgšanas secība, no kreisās puses — gaismas izkliedes stāvoklis (netiek lietots elektriskais lauks), notiek *LC* pārslēgšana (tiek lietots elektriskais lauks) un gaismas caurlaidības stāvoklis (*LC* šūna ir pilnībā pārslēgta no viena stāvokļa uz otru) [10].

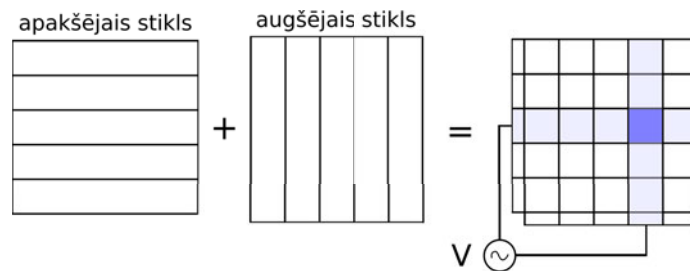
2.1. tabula

SmA *LC* šūnu parametri

Šūnas izmērs	300 × 400 mm
Distanceru izmērs	15 μm
Šķidrā kristāla veids	<i>Smectic-A</i>
<i>ITO</i> pretestība	80 Ω/kvadrātu



2.3. att. *LC* šūnu grafiskais attēlojums. Kreisajā pusē — 5 × 5 un labajā — 8 × 1 dizains.

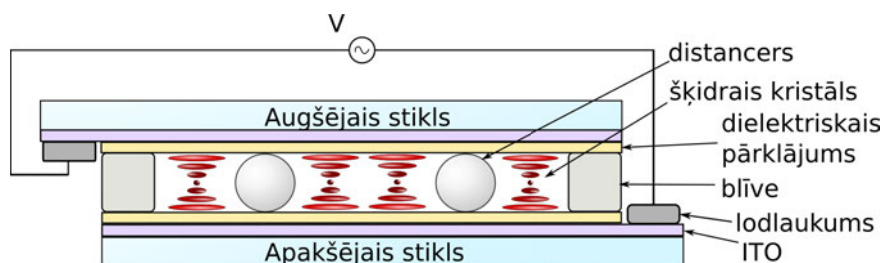


2.4. att. Pasīvās matricas vadīšanas tehnikas vienkāršots shematiskais attēlojums.

2.2. Funkcionālās īpašības

2.2.1. LC šūnas frekvences reakcija

Frekvences reakcija ir viens no galvenajiem elementiem, kas raksturo produktu un ļauj salīdzināt to ar citiem. Tas sniedz svarīgu informāciju par $SmA LC$ pārslēgšanās sliekšņa robežvērtībām, kā arī par piemērotākajām frekvencēm, lai sasniegtu augstāko gaismas caurlaidību caurspīdīgā stāvoklī un zemāko izkliedes stāvoklī. Frekvences reakcijas mērījumiem ir izgatavotas divas dažāda veida $SmA LC$ šūnas. Galvenās atšķirības ir dielektriskā (izolācijas) pārklājuma uzklāšanas procedūrā: pusei šūnu dielektriskais pārklājums (Silīcija dioksīds SiO_2) tika uzklāts pirms ITO ablācijas procesa, otrai pusei — dielektriskais pārklājums tika uzklāts pēc ITO ablācijas (2.5. att.). Kontakti tika pielodēti uz augšējiem un apakšējiem elektrodiem.



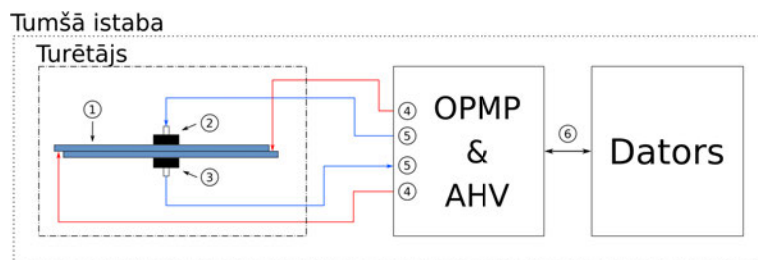
2.5. att. LC šūnas shematiskais attēls šķērsgriezumā [11].

Eksperimentos tika izmantoti trīs paraugi no katra dizaina veida (skat. LC šūnu parametrus 2. nodaļā, 2.1.1. apakšnodaļā). Atsauces frekvences -1 kHz pārslēgšanai uz caurspīdīgo stāvokli un 50 Hz pārslēgšanai uz izkliedes stāvokli tika izvēlētas, pamatojoties uz LC ražotāja ieteikumiem [12, 13].

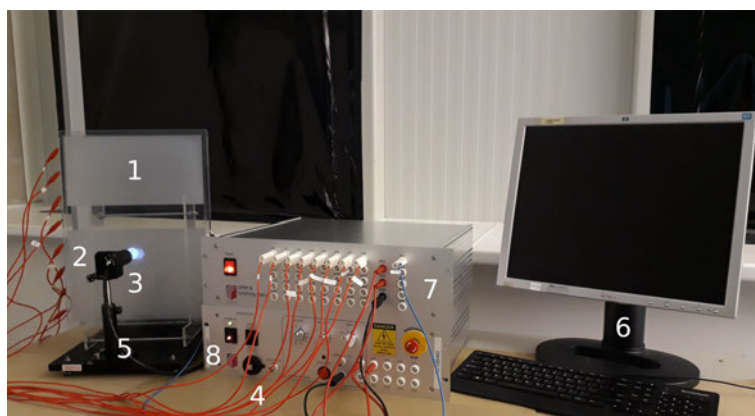
Darba spriegums 13 V/ μ m (195 V) tika noteikts ražošanas procesā, veicot dielektriskās caursītes pārbaudes. Eksperimenta stends parādīts 2.6. un 2.7. attēlā, un tas ietver:

1. $SmA LC$ šūnu;
2. optiskās lēcas un baltas LED gaismas avotu;
3. optiskās lēcas un fotodiodes ($VTB-1013BH$ ar pielāgotu reakciju redzamās gaismas spektra daļai, ko izmanto kā gaismas detektoru);
4. augsta sprieguma vadus;

5. zema sprieguma un datu/signālu vadus;
6. *USB* komunikācijas kabeli, datoru;
7. optisko parametru mērīšanas platformu (OPMP), kas ļauj izmērīt gaismas caurlaidību un pārslēgšanās ātrumu;
8. mainīgu augsta sprieguma avotu (*AHV*), kas nodrošina nepieciešamo sprieguma līmeni elektriskā lauka radīšanai, lai pārslēgtu *SmA LC* šūnas.



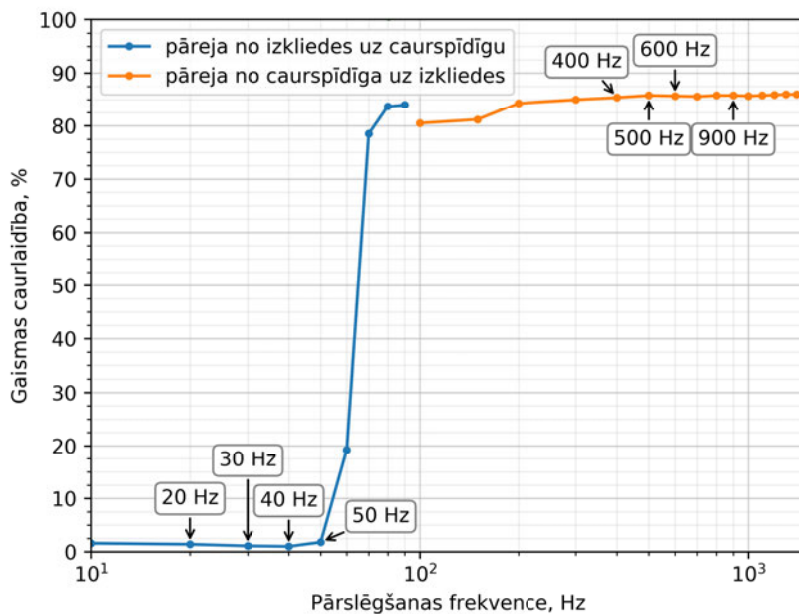
2.6. att. *SmA LC* šūnu testēšanas stenda grafiskais attēlojums.



2.7. att. Pārskats par eksperimentālo stendu, ko izmanto *SmA LC* šūnu funkcionālajai pārbaudei.

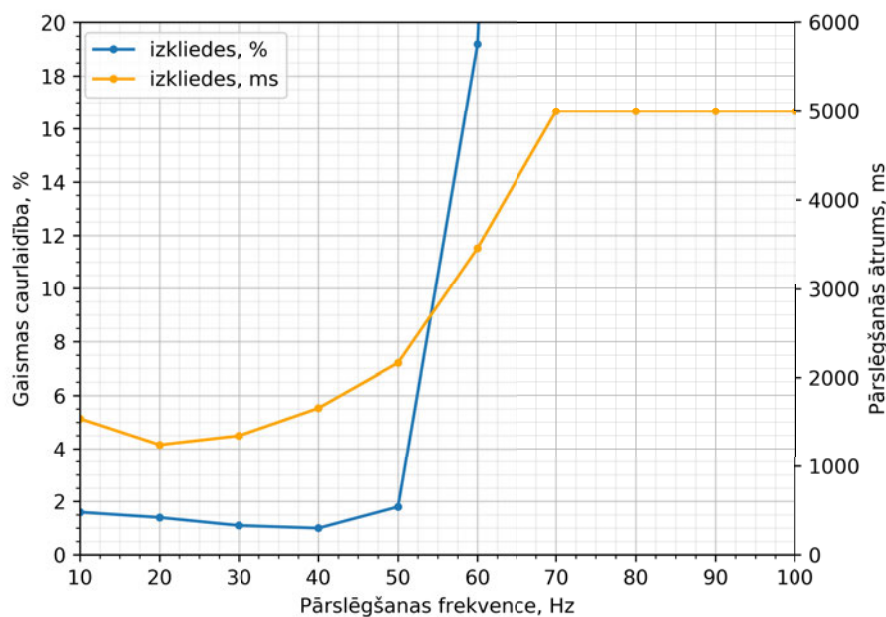
Iegūtā *SmA LC* frekvences reakcija redzama 2.8. attēlā. Gaismas caurlaidība ir atkarīga no pārslēgšanas frekvences, t. i., *SmA LC* šūnai ir nepieciešama specifiska frekvence un signāla forma, lai sasniegtu noteiktas gaismas caurlaidības vērtības. Pāreja no caurspīdīga uz izkliedes stāvokli atspoguļo zilā līknē, pārslēgšanās no izkliedes uz caurspīdīgu stāvokli — oranžā līknē (2.8. att.).

Frekvenču diapazons pārslēgšanai uz izkliedes stāvokli ir ļoti šaurs (10—60 Hz), salīdzinot ar frekvenču diapazonu pārslēgšanai uz caurspīdīgu stāvokli (200—1,5 kHz). *SmA LC* šūna nevar pilnībā mainīt savu stāvokli frekvenču diapazonā 5—15 Hz, un virs 50 Hz gaismas caurlaidība sāk strauji palielināties. 60—100 Hz diapazonā *SmA LC* šūna paliks starp gaismas izkliedes un caurspīdīgu stāvokli — starpposmā. Maksimālo gaismas caurlaidību (> 85 %) pārejai uz caurspīdīgu stāvokli var sasniegt tikai diapazonā 500 Hz—1,5 kHz, kur šī vērtība paliks no 85,4—86,1 %.



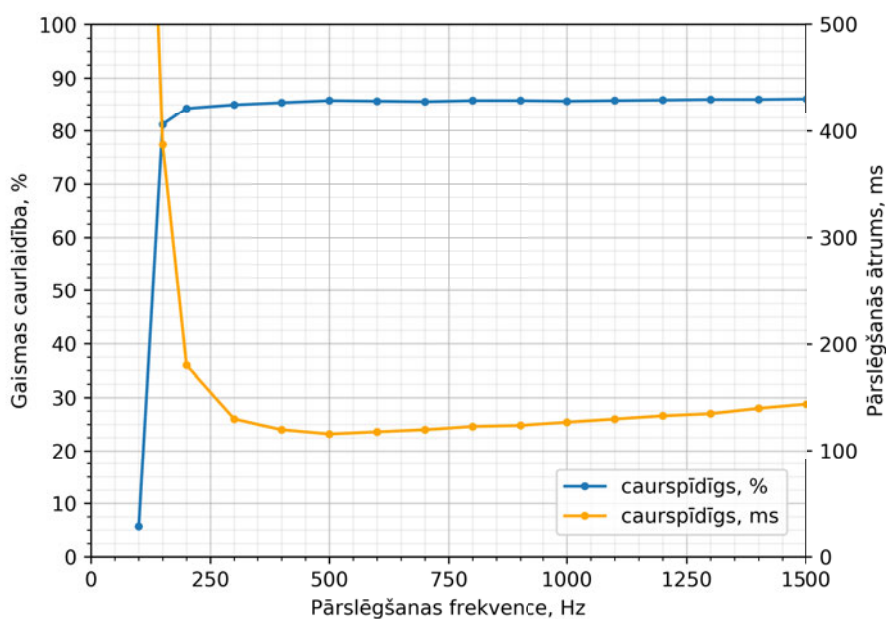
2.8. att. Gaismas caurlaidība dažādās pārslēgšanas frekvencēs.

Detalizētāks attēls (2.9. att.) parāda gaismas izkliedes stāvokļa frekvences reakcijas tuvplānu 10—50 Hz diapazonā (zilā līkne) un vēl vienu svarīgu parametru — pārslēgšanās ātrumu (oranžā līkne). Diapazonā 60—100 Hz *SmA LC* šūna paliks starpposmā. Lai sasniegtu lielāko pārslēgšanās ātrumu (≈ 1300 — 1700 ms) un zemāko gaismas caurlaidību (≈ 1 — $1,8$ %) izkliedes stāvoklī, *SmA LC* šūna jāpārslēdz 20—40 Hz diapazonā. Pārslēgšanās ātrums sāk strauji mainīties no 20 Hz (≈ 1300 ms) līdz 50 Hz (≈ 2200 ms). No 70 Hz līdz 100 Hz pārslēgšanās ātrums nemainās. Iestatītais maksimālais pārslēgšanās laiks — 5 s, un šajā periodā *SmA LC* netika manītas pazīmes izešanai no starpposma, un gaismas caurlaidība mainījās 20—70 % diapazonā. *SmA LC* šūnai nevar būt gan liels pārslēgšanās ātrums no viena stāvokļa uz otru, gan zema vai augsta gaismas caurlaidība, t. i., nepieciešama pārslēgšanās parametru optimizācija, lai iegūtu labas optiskās īpašības vai lielu pārslēgšanās ātrumu.



2.9. att. Pārejas laikā uz izkliedes stāvokli pārslēgšanās ātrums (oranžā līkne) un gaismas caurlaidība (zilā līkne) pie dažādām pārslēgšanas frekvencēm.

Otrajā detalizētajā attēlā (2.10. att.) ir redzams caurspīdīgā stāvokļa frekvences reakcijas tuvplāns. Gaismas caurlaidība (zilā līkne) paliek relatīvi nemainīga ($> 85\%$) 100—1,5 kHz frekvenču diapazonā. No 100 Hz līdz 250 Hz *SmA LC* šūna paliks starposmā, nekad pilnībā nesasniedzot caurlaidības vai izkliedes stāvokli.

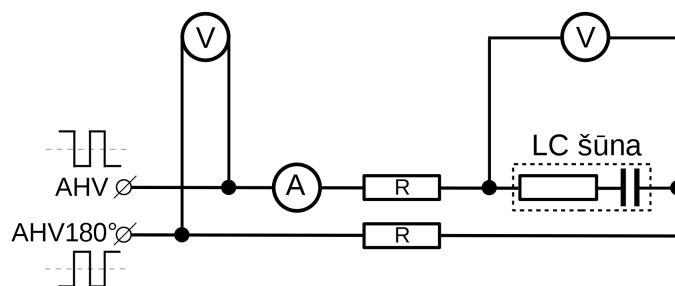


2.10. att. Pārejas laikā uz caurspīdīgu stāvokli pārslēgšanās ātrums (oranžā līkne) un gaismas caurlaidība (zilā līkne) pie dažādām pārslēgšanas frekvencēm.

Pārslēgšanās ātrums (oranžā likne) no 100 Hz un līdz 500 Hz samazinās no ≈ 400 ms līdz ≈ 115 ms, savukārt no 500 Hz līdz 1,5 kHz lineāri palielinās līdz ≈ 150 ms. 400—700 Hz diapazons varētu būt vispiemērotākais SmA LC šūnas pārslēgšanai caurspīdīgā stāvoklī, kur gaismas caurlaidība saglabājas 85 % robežās un pārslēgšanās ātrums svārstās no 115ms līdz 150 ms.

2.2.2. LC šūnas elektriskie parametri

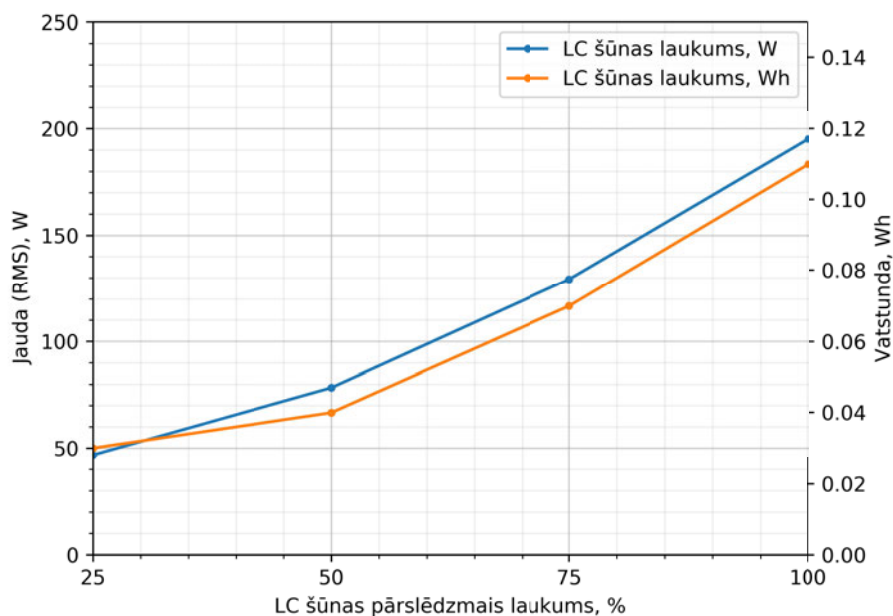
Lai elektriski raksturotu produktu un salīdzinātu to ar citiem, ir jānoskaidro spriegums, strāva un jauda. Ņemot vērā frekvences mērījumu rezultātu analīzi, secināts, ka pārslēgšanas frekvence izkliedes stāvoklim jāizmaina no 50 Hz uz 30 Hz un caurspīdīgam stāvoklim no 1 kHz uz 600 Hz, lai iegūtu labākus optiskos parametrus un lielāku pārslēgšanās ātrumu. Sprieguma un strāvas mērījumiem tika izmantotas atjaunotās un LC ražotāja ieteiktās pārslēgšanas frekvences. Spriegums tika mērīts pie AHV avota izejas (2.11. att.) un uz SmA LC šūnas, lai pārbaudītu, vai savienojumi un/vai LC šūnai izmantotie kabeli neradīs sprieguma kritumus. Strāvas mērījumi tika veikti ar ārējiem rezistoriem un bez tiem, t. i., ārējie rezistori tika izmantoti, lai ierobežotu SmA LC šūnu strāvu. Strāvas ierobežošanai tika izmantoti 10 dažādi ārējie metāla oksīda plēves (*metal oxide film*) rezistori ar pretestību no 8,2—330 Ohm (saskaņā ar $E24$ standartu). Tas ļāva noteikt minimālo vajadzīgās strāvas daudzumu, lai pilnībā pārslēgtu SmA LC šūnu no caurspīdīga uz izkliedes stāvokli un otrādi. Sprieguma un strāvas mērījumi tika veikti astoņiem pikseliem (viss SmA LC šūnas laukums), sešiem pikseliem (6/8 laukuma), četriem pikseliem (4/8 laukuma), diviem pikseliem (2/8 laukuma) un vienam pikselim (1/8 laukuma).



2.11. att. SmA LC šūnas strāvas ierobežošanas un mērījumu eksperimenta shematiskais attēls.

Tika analizēti sprieguma un strāvas mērījumu rezultāti, aprēķināta patērētā jauda (RMS) un vatstundas (Wh) (2.12. att.). Pārslēdzamais SmA LC šūnu laukums tika noregulēts, paralēli savienojot blakus esošos pikselus. Elektroenerģijas patēriņš palielinās eksponenciāli, atkarībā no izmantoto pikselu skaita. Pārslēdzot visu SmA LC šūnas laukumu, elektroenerģijas patēriņš augstāko punktu sasniedz pārejas laikā uz caurspīdīgu stāvokli. Vienai pārslēgšanas reizei uz caurspīdīgu stāvokli nepieciešams $\approx 0,11$ Wh.

Piemēram, pārslēdzot *SmA LC* šūnu 15 reizes, patērētā elektroenerģija būtu $\approx 1,65$ Wh, salīdzinot ar gaismas diožu (*LED*) spuldzi (8,5 W atbilst 60 W kvēlspuldzei), kas patērē $\approx 0,07$ Wh, *SmA LC* šūna patērētu aptuveni tādu pašu elektroenerģijas daudzumu, kā divas 8,5 W *LED* spuldzes.



2.12. att. *SmA LC* šūnas patērētās jaudas (*RMS*) un elektroenerģijas (Wh) atkarība no pārslēgšanas laukuma.

SmA LC šūnas pārslēgšanas frekvenču salīdzinājums redzams tabulās — starp 600 Hz un 1 kHz (2.2. tab.), 30 Hz un 50 Hz (2.3. tab.).

2.2. tabula

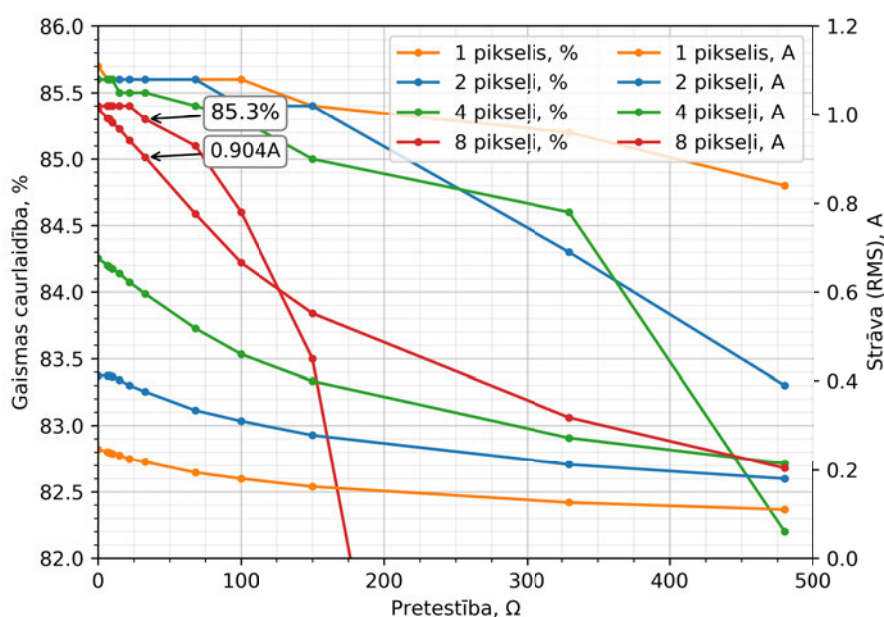
Elektrisko parametru salīdzinājums starp 600 Hz and 1 kHz

Pārslēgšanās Frekvence	Spriegums	Strāva (<i>Pk-Pk</i>)	Strāva (<i>RMS</i>)	Jauda (<i>Pk-Pk</i>)	Jauda (<i>RMS</i>)	Gaismas caurlaidība
600 Hz	190 V	3,12 A	1,03 A	588,21 W	194,42 W	85,10 %
1 kHz	190 V	3,14 A	1,33 A	590,74 W	249,94 W	85,02 %
Starpība:		0,64 %	22,56 %	0,43 %	22,21 %	

Elektrisko parametru salīdzinājums starp 30 Hz un 50 Hz

Pārslēgšanās Frekvence	Spriegums	Strāva ($Pk-Pk$)	Strāva (RMS)	Jauda ($Pk-Pk$)	Jauda (RMS)	Gaismas caurlaidība
30 Hz	190 V	3,10 A	0,26 A	581,13 W	49,29 W	1,52 %
50 Hz	190 V	3,09 A	0,29 A	579,92 W	55,05 W	1,74 %
Starpība:		0,32 %	10,34 %	0,21 %	10,46 %	

Strāvas ierobežošanas mērījumi ar ārējiem rezistoriem redzami 2.13. attēlā. Mērījumi veikti astoņiem pikseliem (viss $SmA LC$ šūnas laukums), četriem pikseliem (4/8 laukuma), diviem pikseliem (2/8 laukuma) un vienam pikselim (1/8 laukuma). Lai pārslēgtu visu $SmA LC$ šūnas laukumu no izkliedes uz caurspīdīgu stāvokli un iegūtu $> 85\%$ gaismas caurlaidību, minimālais nepieciešamais strāvas apjoms ir 0,9 A.



2.13. att. Strāvas ierobežošanas mērījumi ar ārējiem rezistoriem.

Lai samazinātu strāvas patēriņu, $SmA LC$ šūnu var pārslēgt secīgi (pa pikseliem vai pikseļu grupām), taču ir jāņem vērā arī pārslēgšanās ātrums. Piemēram, astoņu pikseļu pārslēgšana uz izkliedes stāvokli aizņems līdz 5 s un $\approx 0,9$ A, savukārt LC šūnas pārslēgšana secīgi — 4 reizes par diviem pikseliem aizņems 3—5 s un patērēs $\approx 0,3$ A (vienā pārslēgšanas reizē).

2.3. Ilgtermiņa pārslēgšanas problēmas

2.3.1. Funkcionālā pārbaude

Katrs produkts ir jāpārbauda, lai verificētu projektēšanas un izstrādes procesus. Jāpārliecinās, ka produkts ir drošs patērētājam, atbilst vajadzīgajiem produkta, produktu grupas un ražošanas standartiem, pilda paredzēto funkciju.

LCD un *LC* šūnas verificē dažādi, piemēram, veic funkcionālo parametru izmaiņu pārbaudes, produktu izstrādes pārbaudes (*PDT*), paātrinātu ilgtermiņa pārbaudi (*HALT*), kvalifikācijas pārbaudes (*QT*), neveiksmēm orientētu paātrinātu pārbaudi (*FOAT*), sadegšanas/sabrukšanas pārbaudes (*BIT*) [14–16] un tamlīdzīgi. Dažādi ražotāji un pētniecības laboratorijas ir rūpīgi analizējušas un uzlabojušas šīs metodoloģijas. Pārbažu posmi ir adaptīvi, tos var izmantot dažādiem produktiem, taču, lai iegūtu labākos rezultātus, katrs no posmiem ir jāpielāgo konkrētā produkta vajadzībām. Nav labāka vai sliktāka verificēšanas veida, katrai pārbaudes metodoloģijai ir svarīga nozīme produkta kvalitātē, veiktspējē, apkopes iespējās u. tml.

Pēc ražošanas savietošanas procesa (*assembly process*) *SmA LC* šūnām veic elektriskās sabrukšanas pārbaudi (*LC breakdown*). Šajā pārbaudē nosaka maksimālo darba spriegumu, lai sistēma, kas darbosies ar šāda veida *LC* šūnām normālos darbības un bojājumu apstākļos, nerasniegtu šo robežvērtību.

Kad maksimālais darba spriegums ir noskaidrots, *SmA LC* šūnām veic optiskos mērījumus, lai noskaidrotu zemāko gaismas caurlaidību gaismas izkliedes stāvoklim un augstāko — caurspīdīgajam [17]. Papildus tiek veikti pārslēgšanas ātruma un patērētās strāvas mērījumi, lai varētu noteikt *LC* šūnas efektivitāti un elektroenerģijas patēriņu.

SmA LC šūnu verifikācija notika ar vienādiem parametriem (2.5. tab.). Funkcionālās pārbaudes cikls ietver:

- a) pārslēgšanu uz izkliedes stāvokli, gaismas caurlaidības un pārslēgšanās ātruma mērīšanu;
- b) pauzi starp stāvokļiem;
- c) pārslēgšanu uz caurspīdīgu stāvokli, gaismas caurlaidības un pārslēgšanās ātruma mērīšanu;
- d) pauzi starp stāvokļiem;
- e) pauzi starp cikliem.

2.4. tabula

Vide, kurā veiktas pārbaudes

Telpa	tumšā telpa
Apgaismojums	nemainīgs
Temperatūra	istabas temperatūra

SmA LC šūnu funkcionālās pārbaudes parametri

Mērījumu frekvence	500 Hz
Mērījumu laiks	4 s
Mērījumu leņķis	0°
Pārslēgšanas spriegums	13 V/ μ (195 V)
Pārslēgšanas signāla forma	nulles komponentes taisnstūra formas signāls (<i>DC balanced square wave</i>)
Izkliedes stāvokļa frekvence	30 Hz
Caurspīdīga stāvokļa frekvence	600 Hz
Pārslēgšanas laiks (izkliedes stāvoklim)	3 s
Pārslēgšanas laiks (caurspīdīgam stāvoklim)	1,5 s
Pauze starp stāvokļiem	2 s
Pauze starp cikliem	5 min

Katra *LC* šūna tika pārslēgta vairāk nekā 1000 reizes (pilnus ciklus), un šī pārbaude ilga aptuveni 40 stundas. Vairāk nekā 30 dienu laikā tika pārbaudītas 20 *SmA LC* šūnas. Mērījumi tika apturēti ik pēc 100 cikliem, un *LC* šūnas tika fotografētas, lai pārlicinātos par vizuālajām izmaiņām.

LCD un *LC* šūnas funkcionāli tiek pārbaudītas dažādās vidēs, tajā skaitā arī tumšā telpā. Šādā telpā, kur apgaismojums ir nemainīgs, iespējams samazināt optisko mērījumu kļūdu. Taču ne vienmēr ir iespējams nodrošināt nemainīgu telpas temperatūru, ja vien netiek izmantota klimata kamera, kur to var iestatīt uz nemainīgu vērtību. Klimata kameras tiek izmantotas, lai pārlicinātos, ka izstrādātais produkts spēs pilnībā darboties dažādos ekstremālos mitruma un temperatūras apstākļos. Šādas pārbaudes ir nepieciešamas, lai patērētājs zinātu produkta funkcionālās robežas, kurās to drīkst izmantot. Šajā gadījumā temperatūru noteica ēkas ventilācijas sistēmas iestatījumi (2.4. tab.).

Pārbaudēs izmantotais stends bija tāds pats, kā aprakstīts 2.2. nodaļā, 2.2.1. apakšnodaļā.

2.3.2. Iegūti defekti

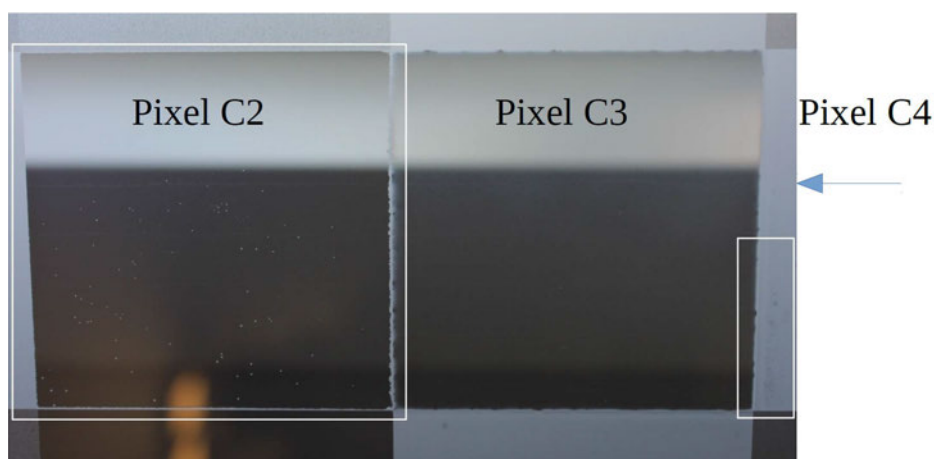
2.14.—2.17. attēlā redzami visbiežāk sastopamo defektu veidi, kas tika identificēti funkcionālās pārbaudes laikā un pēc tās. *SmA LC* šūna ar 5x5 dizainu redzama 2.14. attēlā. Viens pikselis (*C3*) no šīs *LC* šūnas tika funkcionāli pārbaudīts, un blakus esošie pikseli (*C2* un *C4*) vizuāli novēroti, lai saprastu ietekmi uz tiem. Pirms

funkcionālās pārbaudes tika iestatīti sākotnējie pikseļu stāvokļi, t. i., pikseļi $C2$ un $C3$ tika pārslēgti uz caurspīdīgu stāvokli, un pikselis $C4$ — uz izkliedes stāvokli.

Pēc funkcionālās pārbaudes pikselis $C2$ joprojām atradās gaismas caurspīdīgā stāvoklī. Taču lāzera ablācijas līniju tuvumā (pikseļu atdalīšanas līnijas) LC reģioni bija nevienmērīgi pārslēgušies no caurspīdīga uz izkliedes stāvokli. Papildus tam ir izveidotas LC gadījumu kopas un reģioni, kas ir pārslēgušies uz starpposmu vai izkliedes stāvokli, un tā rezultātā pikseļa $C2$ aktīvais laukums ir vizuāli punktots.

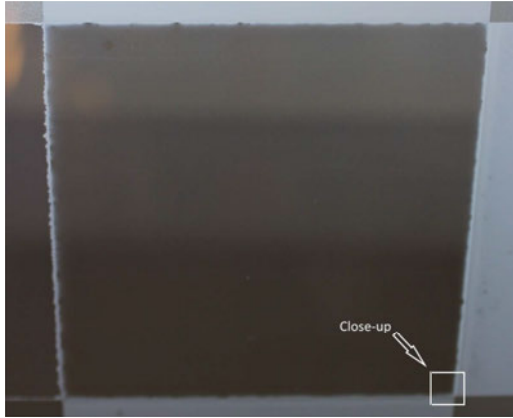
Pikseļa $C3$ gaismas caurlaidība ir samazinājusies par $\approx 0.4\%$, un tas nav pilnībā pārslēdzies caurspīdīgā stāvoklī. $C3$ perimetrs, tāpat kā $C2$ — nevienmērīgi pārslēdzies no caurspīdīga uz izkliedes stāvokli. Pikseļa $C3$ aktīvais laukums ir vizuāli vienmērīgs, un nav izveidotas LC gadījumu kopas un reģioni, kas būtu pārslēgušies uz kādu no optiskajiem stāvokļiem.

Pikselis $C4$ (2.14. att.) ir tikai daļēji redzams, taču tā sākotnējais stāvoklis nav mainījies. Uzmanīgi aplūkojot attēlu, var redzēt, ka lāzera ablācijas līniju tuvumā aktīvais laukums nevienmērīgi sācis pārslēgties uz caurspīdīgu stāvokli. Līdzīgi kā $C2$ un $C4$ izveidotas LC gadījumu kopas un reģioni, kas ir pārslēgušies uz starpposmu vai caurspīdīgu stāvokli.

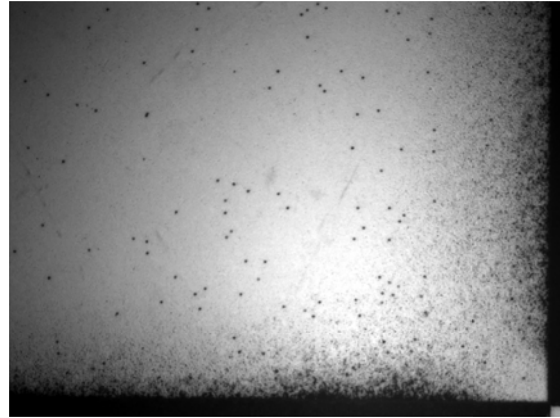


2.14. att. SmA LC šūnas (5×5 dizains) tuvplāns ar $C2$, $C3$ un $C4$ pikseļiem.

Pikseļa $C3$ tuvplāns (a) un mikroskopa uzņemts attēls ir redzams 2.15. attēlā. Ap $C3$ aktīvā laukuma perimetru ir izveidotas LC gadījumu kopas un reģioni, kas atrodas starpposmā. Funkcionālās pārbaudes laikā pikseļi $C2$ un $C4$ netika iezemēti. No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka elektriskais lauks ietekmē blakus esošos pikseļus. Izveidotās LC gadījumu kopas un reģioni ar laiku kļūst lielāki, ja pārslēgšanas cikls netiek izmainīts, kā arī tie paliek optiski nemainīgi, t. i., optiskais gaismas caurlaidības stāvoklis netiek mainīts funkcionālās pārbaudes laikā un arī pēc tās.



(a)

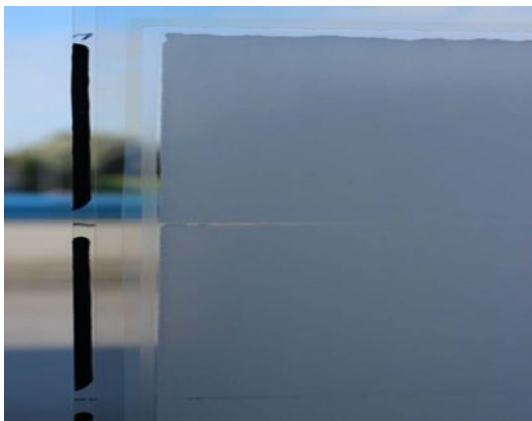


(b)

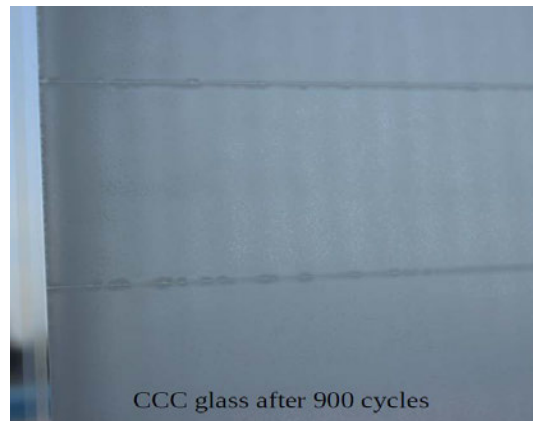
2.15. att. *SmA LC* šūna (5×5 dizains): (a) - pikselis *C3* un (b) - *C3* apakšējā labā stūra tuvplāns, kas uzņemts ar mikroskopu.

Otrs izpaltītākais defektus veids ir izteiktas lāzera ablācijas līnijas. Defekts tika novērots *SmA LC* šūnām 8×1 dizainu. 2.16. (a) attēlā redzams vizuālais kontrasts starp lāzera ablācijas līnijām un pikseļa aktīvo laukumu. Pikseļu perimetri ir nevienmērīgi un viļņveidīgi, taču aktīvie laukumi — vienmērīgi un nav redzamas *LC* gadījumu kopas un reģioni, kas būtu pārslēgušies uz kādu no optiskajiem stāvokļiem.

2.16.(b) attēlā lāzera ablācijas līnijas ir vairāk izkliedētas (ar zemāku gaismas caurlaidību), salīdzinot ar *SmA LC* šūnas aktīvo laukumu. *LC* šūna nav pārslēgusies uz gaismas izkliedes stāvokli, un aktīvais laukums ir nevienmērīgs, viļņveidīgs. Lāzera ablācijas līniju tuvumā var novērot *LC* gadījumu kopas un reģionus, kas pārslēgušies uz gaismas izkliedes un caurspīdīgo stāvokli.

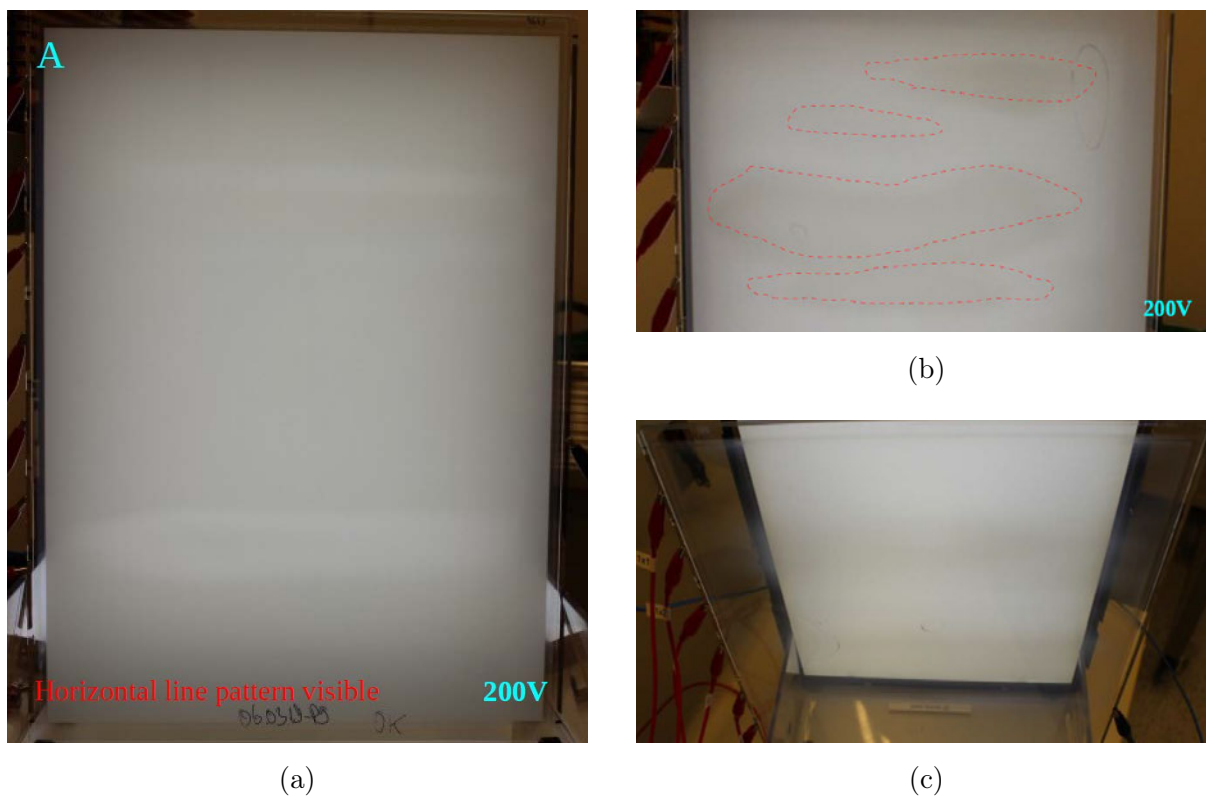


(a)



(b)

2.16. att. *SmA LC* šūna (8×1 dizains): (a) — perimetra un lāzera ablācijas līniju tuvplāns; (b) — aktīvā laukuma un lāzera ablācijas līniju tuvplāns.



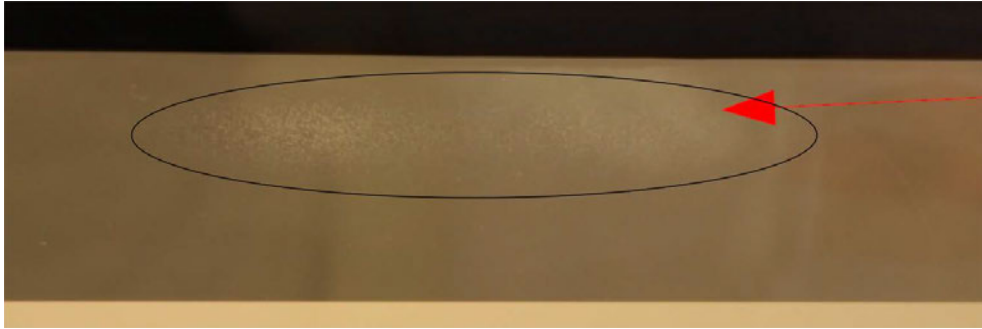
2.17. att. *SmA LC* šūna (8×1 dizains): (a) — izkļiedes stāvokļa tuvplāns, (b) un (c) — caurspīdīga stāvokļa tuvplāns. Labākai defektu novērošanai tika izmantots papildu apgaismojums aiz *SmA LC* šūnas.

2.4. Defektu novēršana

2.4.1. Pārbaudes cikla un pārslēgšanas parametru optimizācija

Bez padziļinātiem pētījumiem un papildu pārbaudēm nav iespējams veikt *SmA LC* šūnu pārslēgšanas parametru optimizāciju. Kopā tika veiktas trīs dažādas pārbaudes, lai noskaidrotu pārbaudes cikla un parametru optimizācijas efektivitāti un iespēju novērst dažādus defektus, kas tika aprakstīti 2.3. nodaļā, 2.3.1. apakšnodaļā. Pārbaudēs izmantotais stends un pārslēgšanas parametri bija tādi kā aprakstīts 2.3. nodaļā, 2.3.1. apakšnodaļā.

2.18. attēlā redzams viens no visbiežāk sastopamajiem defektu veidiem — *LC* gadījumu kopas un reģioni, kas ir pārslēgušies uz starpposmu, izkļiedes vai caurspīdīgu stāvokli. Šīs kopas un reģioni veidojas brīžos, kad *LC* molekulas atrodas zemākajā enerģijas līmenī un tām tiek pievienots elektriskais lauks ar zemu intensitāti, un kad zemā rotācijas spēka dēļ nevar veikt stāvokļu maiņu. Šāda defekta rašanās iemesli var būt dažādi, piemēram, nevienmērīgs *SmA LC* šūnas biezums, neatbilstoši pārslēgšanas parametri vai konkrēts pārbaudes cikls.



2.18. att. *LC* gadījumu kopas un reģioni starpposmā, pirms pārābudes cikla un pārslēgšanas parametru optimizācijas.

Šajā gadījumā, lai novērstu defektu, ir nepieciešama pārslēgšanas sprieguma un pārābudes cikla secības optimizācija. Starp pikseļu un stāvokļu pārslēgšanām ir jāpievieno papildu pauzes. Gaismas izkliedes un caurspīdīgam stāvoklim nepieciešams izmantot atšķirīgus pārslēgšanas spriegumus. Iegūtie rezultāti ir redzami 2.19. attēlā, un pārslēgšanas parametri salīdzināti 2.6. tabulā.

Atjaunots funkcionālās pārābudes cikls ietver:

- a) pārslēgšanu uz izkliedes stāvokli, gaismas caurlaidības un pārslēgšanās ātruma mērīšanu;
- b) **pauzi starp pikseļiem;**
- c) pauzi starp stāvokļiem;
- d) pārslēgšanu uz caurspīdīgu stāvokli, gaismas caurlaidības un pārslēgšanās ātruma mērīšanu;
- e) **pauzi starp pikseļiem;**
- f) pauzi starp stāvokļiem;
- g) pauzi starp cikliem.

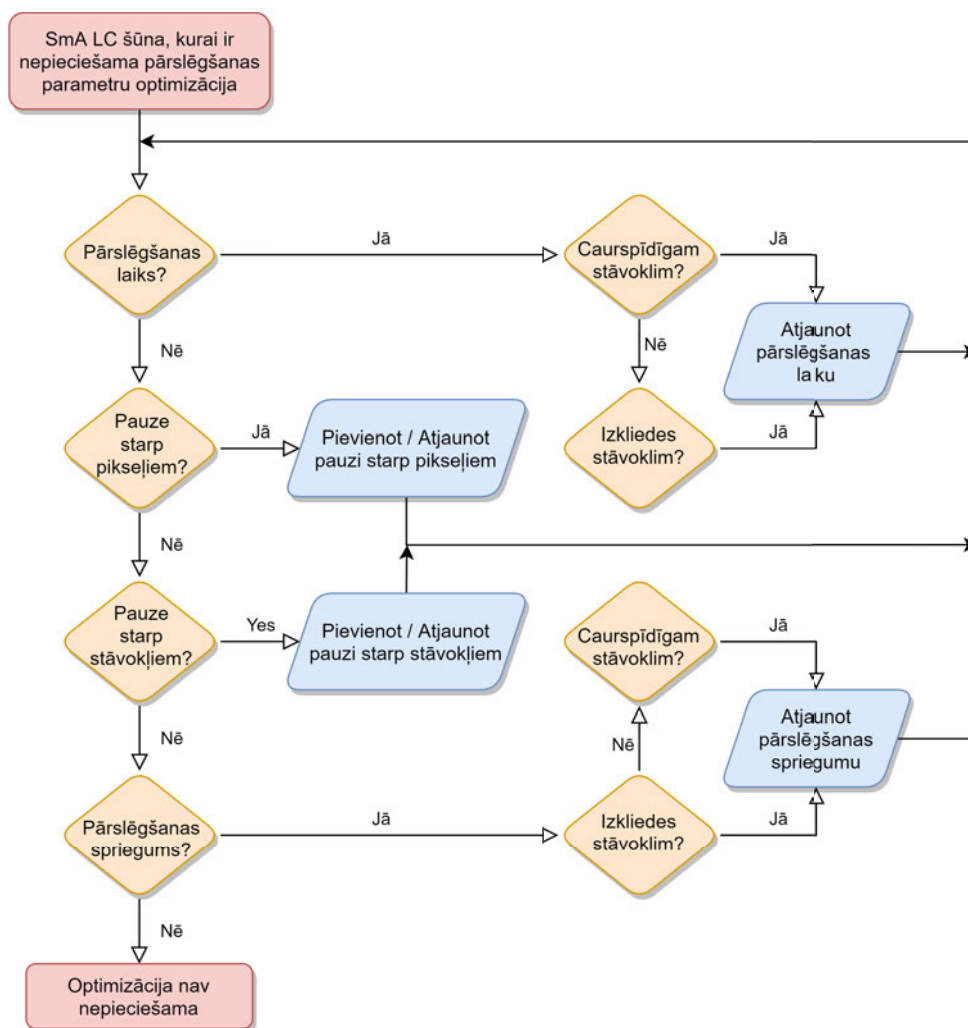
SmA LC šūnu funkcionālās pārbaudes parametri pirms un pēc to atjaunošanas

	Pirms	Pēc
Mērījumu frekvence	500 Hz	
Mērījumu laiks	4 s	
Mērījumu leņķis	0°	
Pārslēgšanas spriegums (izkliedes stāvoklim)	13 V/ μ (195 V)	
Pārslēgšanas spriegums (caurspīdīgam stāvoklim)	13 V/ μ (195 V)	9 V/ μ (135 V)
Pārslēgšanas signāla forma	nulle komponentes taisnstūra formas signāls (<i>DC balanced square wave</i>)	
Izkliedes stāvokļa frekvence	30 Hz	
Caurspīdīga stāvokļa frekvence	600 Hz	
Pārslēgšanas laiks (izkliedes stāvoklim)	3 s	7,5 s
Pārslēgšanas laiks (caurspīdīgam stāvoklim)	1,5 s	
Pauze starp pikseļiem	0 s	1 s
Pauze starp stāvokļiem	2 s	5 s
Pauze starp cikliem	5 min	

Ieteikums būtu pārslēgšanas parametru un pārbaudes cikla optimizāciju sākt ar pārslēgšanas laika izmaiņšanu. Pēc tam veikt esošo paužu optimizāciju, taču, ja iepriekš minētais nesniedz vēlamos rezultātus, ir jāpievieno papildu pauzes starp pikseļiem un stāvokļiem. Pārslēgšanas sprieguma optimizācija ir jāizmanto kā pēdējā iespēja, jo pēc tam viss iepriekš minētais būs jāizmaina atkārtoti (2.20. att.).



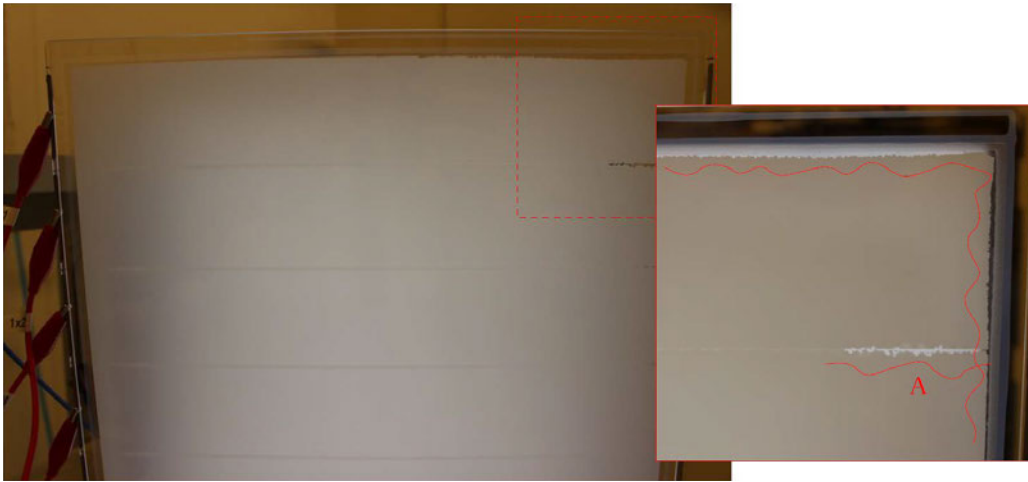
2.19. att. *LC* gadījumu kopas un reģioni tika novērsti, optimizējot pārbaudes ciklu un pārslēgšanas parametrus.



2.20. att. *SmA LC* šūnu pārslēgšanas parametru optimizācijas diagramma.

Ar pārslēgšanas parametru un pārbaudes cikla optimizāciju ir iespējams uzlabot dažādu defektu vizuālo stāvokli, piemēram, pikseļu perimetra nevienmērību. Šis defekts mēdz atgriezties pēc X cikliem, taču mazāk izteikts (2.21. att.).

Piemēram, ja *SmA LC* šūna ar šādu defektu tiek iestrādāta *PVC* logā, tad melnā izolācijas materiāla dēļ pieejamā aktīvā laukuma platība samazināsies par $\sim 2\text{--}5\%$ un nevienmērīgais perimetrs nebūs redzams.



2.21. att. Bojāta *SmA LC* šūna ar nevienmērīgu aktīvā laukuma perimetru un izteiktām lāzera ablācijas līnijām.

Nevienmērīgu aktīvo laukumu lāzera ablācijas līniju tuvumā var uzlabot tikai daļēji, neviens no eksperimentiem, pārbaudēm un optimizācijas veidiem neuzrādīja potenciālu šī defekta novēršanai. Šo defektu nav iespējams saskatīt ar neapbruņotu aci caurspīdīgā stāvoklī. Taču defektu var pamanīt, pievēršot īpašu uzmanību līnijām gaismas izkliedes stāvoklī.

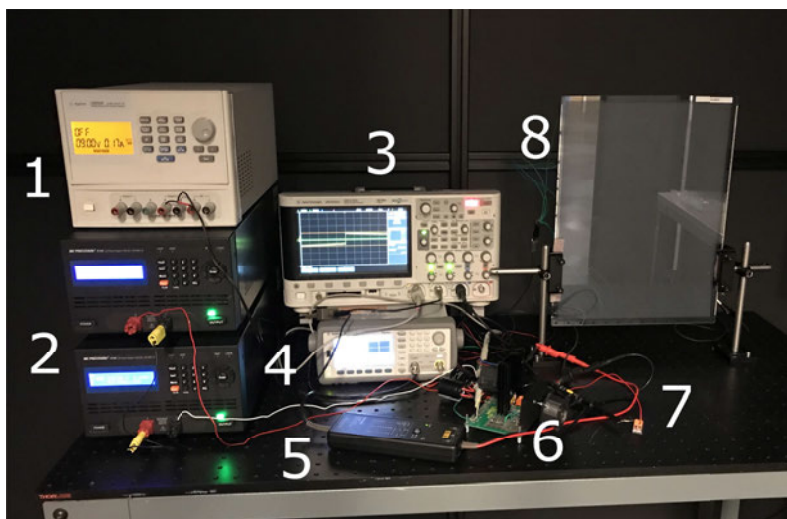
Līdzīgs rezultāts tika iegūts nevienmērīgam (bezkrāsainam) aktīvajam laukumam. Defekts ir saistīts ar *SmA LC* šūnas izgatavošanas procesu un tajā izmantotajām metodēm. Lai izvairītos no šāda defekta, ražošanas procesi ir jāoptimizē (2.22. att.).



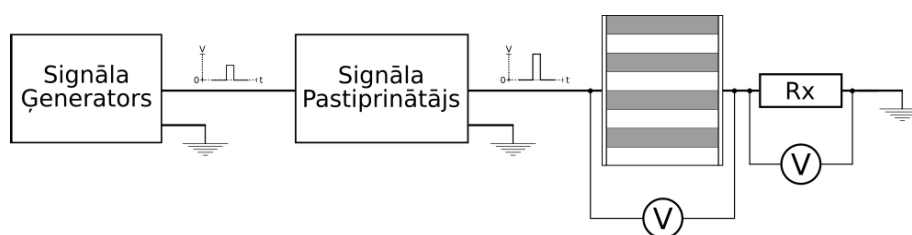
2.22. att. *SmA LC* šūna ar nevienmērīgu (bezkrāsainu) aktīvo laukumu gaismas izkliedes stāvoklī. Labākai defektu novēršanai tika izmantots papildu apgaismojums aiz *SmA LC* šūnas.

2.4.2. Pārslēgšanas signālu formas optimizācija

Lai veiktu šādu pārbaudi, nepieciešams papildu aprīkojums, jo iepriekš izmantotais eksperimenta stends ar *AHV* (augsta sprieguma avots) spēj ģenerēt tikai nulles komponentes taisnstūra formas signālu ar dažādām amplitūdām un laika periodiem. Augsta sprieguma barošanas avots, signālu ģenerators, signāla pastiprinātājs un citas iekārtas ir redzamas 2.23. attēlā, vienkāršota funkcionālā shēma — 2.24. attēlā.



2.23. att. Eksperimenta stends, kas tika izmantots *SmA LC* šūnu pārslēgšanas signāla formu optimizācijā. Izmantotais aprīkojums: 1 — *Agilent U8032A*; 2 — *B&K Precision 9184*; 3 — *Agilent DSOX2014A*; 4 — *Agilent 33500B*; 5 — *Tektronix P5200*; 6 — *Apex PA93*; 7 — *Rx* (strāvas mērīšanas rezistors); 8 — *SmA LC* šūna.



2.24. att. Vienkāršota shēma, kur vizualizēta sinusoidāla, trijstūra vai citu speciāli izveidotu signālu formas ģenerēšana, pastiprināšana no 100 V līdz ± 200 V un pieslēgšana *SmA LC* šūnai, un papildu *Rx* pretestībai.

Tika veiktas dažādas pārslēgšanas signālu formu pārbaudes, lai noskaidrotu, vai iespējams ar citiem signālu veidiem iegūt labākus optiskos parametrus vai uzlabot pārslēgšanas ātrumus. Lai pareizi pārslēgtu *SmA LC* šūnu pārslēgšanas signālam ir jābūt līdzstrāvas līdzsvarotam (*DC balanced*). Šī iemesla dēļ tika pārbaudīta sinusoidāla un trijstūra signāla formas ģenerēšana un pastiprināšana.

Vairākas *SmA LC* šūnas tika pārbaudītas ar trīs dažādiem pārslēgšanas signāliem. Pārslēgšanas spriegumi, pauzes starp pikseliem un stāvokļiem, pārslēgšanas laiki un citi parametri nemainījās. Iegūtie rezultāti ir redzami 2.7. un 2.8. tabulā. *SmA LC* šūnas varēja pārslēgt starp stāvokļiem tikai ar taisnstūra un sinusoidālas formas signāliem, bet ar trijstūra — palika starpposmā.

Izmantojot sinusoidālas formas signālu, tika iegūti labāki elektriskie rezultāti, salīdzinot ar taisnstūra formas signālu rezultātiem. Pārslēdzot *SmA LC* šūnu ar šādu signālu, tiek ietaupīts elektroenerģijas patēriņš un ilgtermiņā — zemākas uzturēšanas izmaksas. Turpretim iegūtie optiskie parametri ir sliktāki, caurspīdīgā stāvoklī gaismas caurlaidība samazinās par $\approx 4-8\%$, izkliedes — palielinās par $\approx 6-10\%$.

2.7. tabula

Caurspīdīgā stāvokļa signālu formas pārbaudes rezultāti

Signāls	A, <i>RMS</i>	W, <i>Pk-Pk</i>	W, <i>RMS</i>	Enerģija, Wh	Gaismas caurlaidība
Taisnstūra	0,11—0,12	198—207	22—23	0,25—0,26	1,3—1,4
Sinusoidāla	0,14—0,16	135—157	29—32	0,09—0,15	7,5—11,2
Trijstūra	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

2.8. tabula

Izkliedes stāvokļa signālu formas pārbaudes rezultāti

Signāls	A, <i>RMS</i>	W, <i>Pk-Pk</i>	W, <i>RMS</i>	Enerģija, Wh	Gaismas caurlaidība
Taisnstūra	0,23—0,25	287—306	46—48	0,18—0,26	85,3—85,6
Sinusoidāla	0,07—0,08	135—157	13—15	0,05—0,06	10,5—14,4
Trijstūra	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

2.4.3. Citas defektu risināšanas metodes

Temperatūras pārbaude tiek veikta iepriekš uzkarstētā rūpnieciskā krāsnī, lai noskaidrotu, vai *SmA LC* šūnas iespējams “atiestatīt” vai novērst iepriekš minētos defektus (2.25. att.).



2.25. att. Bojāta *SmA LC* šūna ar nevienmērīgu aktīvo laukuma.

Temperatūras pārbaudē izmantotās *SmA LC* šūnas defektus nevarēja novērst ar pārslēgšanas parametru un pārbaudes ciklu optimizācija. *SmA LC* šūna tika ievietota iepriekš uzkarstētā krāsnī līdz 100 °C. *LC* izkusa 25 minūšu laikā, pēc tam *LC* šūna tika atstāta istabas temperatūrā, lai atdzistu. Nav iespējams vizuāli atšķirt izkusušu *SmA LC* un tādu, kas atdzēsēs līdz istabas temperatūrai. Aptuvenais atdzišanas laiks bija $\approx 2-3$ h (2.26. att.).

Pēc tam, kad *SmA LC* šūna bija pilnībā atdzisusi līdz istabas temperatūrai, tika vizuāli pārbaudīts izkliedes stāvoklis. Ar neapbruņotu aci bija redzams, ka *SmA LC* šūna izskatījās viendabīga un bez defektiem. Tā tika vēlreiz funkcionāli pārbaudīta, lai pārliecinātos, ka iepriekš identificētie defekti neatkārtojas, to pārslēdzot vismaz 100 reizes.

Šī *SmA LC* šūna bija iestrādāta *PVC* loga paketē, tāpēc vienīgais defekts, kas bija radies pēc temperatūras pārbaudes, bija ārējo stikla lokšņu izliekums. Vizuāli *LC* šūnas aktīvais laukums bija vienmērīgs, lāzera ablācijas līnijas bija smalkas, tikpat kā neredzamas, kā arī *LC* šūna funkcionāli pārslēdzās starp pikseliem un stāvokļiem bez problēmām.



(a)



(b)

2.26. att. SmA LC šūna pēc temperatūras pārbaudes: (a) — aktīvais laukums ir vienmērīgs un caurspīdīgs, (b) — izkliedes stāvoklis pēc vairāk nekā 100 funkcionālajiem pārbaudes cikliem.

2.5. Elektrisko simulāciju modelis

2.5.1. ITO un dielektriskā slāņa elektriskā pretestība

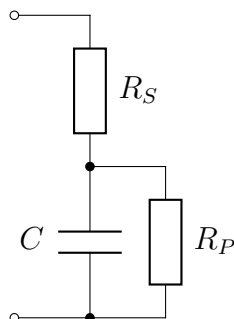
Elektriskās funkcionālās shēmas izstrādes laikā ir nepieciešams veikt teorētiskus aprēķinus un simulācijas dažādiem elektriskiem ķēdes posmiem. LC šūna ir atkarīga no sprieguma un frekvences, tāpēc teorētiska simulācijas modeļa izstrāde ir atkarīga no LC šūnas kapacitātes.

LCD vai LC šūnas funkcionālo darbību var atspoguļot ar vienkāršu pretestības un kapacitātes shēmu. Ar šīs elektriskās shēmas palīdzību var veikt LC šūnu teorētiskus pētījumus un simulācijas dažādu situāciju verificēšanai [18].

Anizotropo īpašību dēļ, SmA LC šūnas kapacitāte (C_{LC}) nav konstanta. Tā svārstās no minimālās kapacitātes vērtības, kad LC šūnai nav pieslēgts spriegums, līdz maksimālajai — pārslēgta starp optiskajiem stāvokļiem [19]. LC šūnas kapacitātes (C_{LC}) izmaiņa ir atkarīga no pārslēgšanas laika. Šo korelāciju ir rūpīgi analizējuši un pētījuši dažādi LC ražotāji, un laboratorijas. Tomēr LC šūnas kapacitātes un pārslēgšanas laika korelācija ir atkarīga no konkrētā LC veida [19,20].

Pirmajā tuvinājumā LC šūnu var uzskatīt par ideālu kondensatoru, jo pēc uzbūves tas līdzinās plakanam kondensatoram, kam abas plāksnes veido ITO slāņi un starp tiem atrodas LC materiāls ar ϵ_r [21]. Precīzāk — ir jāņem vērā vadāmības zudumus

un šaurā frekvenču joslā LC šūnu vajag aproksimēt ar neideāla kondensatora modeli (2.27. att.), kur R ir ITO un dielektriskā pārklājuma elektriskā pretestība, bet C — plakana kondensatora elektriskā kapacitāte. Pievienojot papildus R un C elementus, var iegūt modeli, kas apraksta LC šūnu līdz pat frekvenču diapazonam 10^{-1} — 10^7 Hz [18].



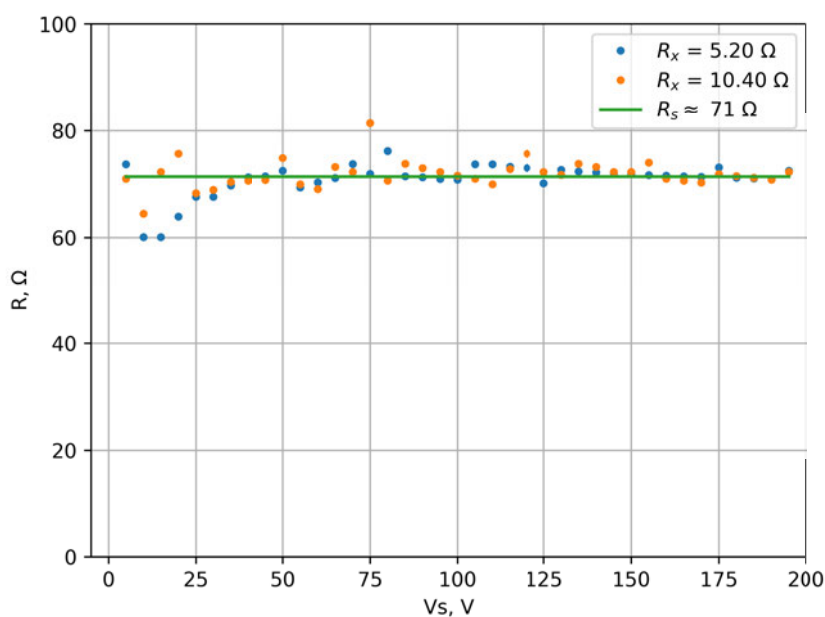
2.27. att. LC šūnas līdzvērtīgas slodzes elektriskais slēgums.

Līdzvērtīgas slodzes virknes pretestību R_S (2.1. vienādojums) var noteikt, kad LC šūnai tiek strauji pieslēgts spriegums un tas nomērīts uz virknē esošā rezistora ($R_x = 5$ — 10Ω) (2.29. att.). Pirmajā brīdī LC šūnas kapacitāte ir īsslēgumā, un tā rezultātā tiek izveidots sprieguma dalītājs un R_S var aprēķināt šādi:

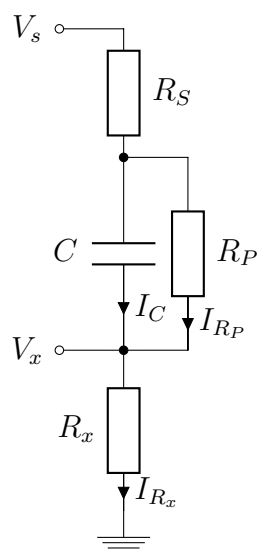
$$R_S = \frac{(V_s - V_x)R_x}{V_x} \quad (2.1.)$$

Līdzvērtīgas slodzes virknes pretestības R_S mērījumu rezultāti ir redzami 2.28. attēlā. Mērījumos tika izmantotas divas dažādas R_x vērtības — $5,2 \Omega$ un $10,4 \Omega$. Mērījumi tika veikti ar vairākām V_s vērtībām, sākot no 5 V līdz 195 V ar 5 V soli. Zilie punkti apzīmē $R_x = 5,2 \Omega$ un oranžie — $R_x = 10,4 \Omega$. Zaļā līnija apzīmē abu R_x mērījumu datu vidējo vērtību.

Izteikta novirze ir redzama 5 — 30 V diapazonā. Pieslēdzot spriegumu, LC šūna pakāpeniski pārslēdzas starp optiskajiem stāvokļiem. Tas ir saistīts ar zemo LC molekulu rotācijas spēku, ko izraisa elektriskais lauks, tām atrodoties zemākajā enerģijas līmenī. No 40 V līdz 195 V R_S nav atkarīga no pieslēgtā sprieguma un $R_S \approx 71 \Omega$.



2.28. att. Virknes pretestības R_S atkarība no V_S .



2.29. att. Vienkāršota elektrisko parametru mērīšanas shēma.

2.5.2. LC šūnas kapacitāte

LC molekulu pārorientācija ir saistīta ar LC šūnas kapacitātes izmaiņām C_{LC} . Anizotropo īpašību dēļ, SmA LC šūnas kapacitāte (C_{LC}) ir atkarīga no pieslēgtā sprieguma [21].

Lai noteiktu līdzvērtīgas slodzes paralēlo pretestību R_P un kapacitāti C , LC šūnai ir jāpieslēdz pakāpenisks sprieguma solis un jāizmaina $R_x = 1\text{ k}\Omega$ (2.2. vienādojums) [11]:

$$\frac{V_x(t)}{R_x} = I_{R_x}(t) = I_C(t) + I_{R_P}(t). \quad (2.2.)$$

Pēc noteikta laika C ir uzlādēta, $I_C = 0$ and $I_{R_x} = I_{R_P}$. $R_S \ll R_x, R_P$, tāpēc R_P var aprēķināt pēc sprieguma dalītāja formulas (2.1. vienādojums).

Kad R_P ir noskaidrots, tad I_C var aprēķināt šādi:

$$I_C(t) = I_{R_x}(t) = I_{R_x}(t) - I_{R_P}(t) = \frac{V_x(t)}{R_x} - \frac{V_s - V_x(t)}{R_P} \quad (2.3.)$$

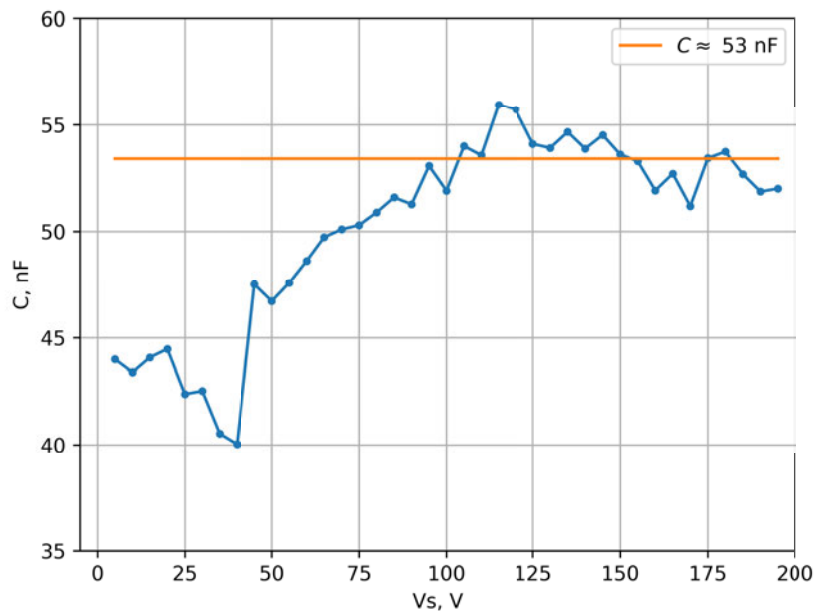
Kondensatorā uzkrāto lādiņu var noskaidrot, integrējot $I_C(t)$:

$$Q_C = \int I_C(t) dt \quad (2.4.)$$

Pilnībā uzlādēta kondensatora jaudu var aprēķināt šādi:

$$C = \frac{Q_C}{V_s - V_x} \quad (2.5.)$$

Iegūtie *SmA* LC šūnas kapacitātes C mērījumu rezultāti ir redzami 2.30. attēlā, kur zilie punkti apzīmē C , oranžie — C vidējo vērtību. 5–40 V diapazonā tika iegūta ≈ 44 nF kapacitāte ar nelielu kritumu pie 35 V. Palielinot V_s LC šūnas kapacitāte turpināja palielināties līdz ≈ 53 nF. No 110–195 V kapacitātes izmaiņas novērojamas 10 % robežās. Šķidro kristālu materiāla dielektriskā caurlaidība ir atkarīga no molekulu novietojuma, un to var ietekmēt ārējais elektriskais lauks. Elektriskā lauka un kapacitātes atkarība nav lineāra.



2.30. att. LC šūnas kapacitātes C atkarība no V_s .

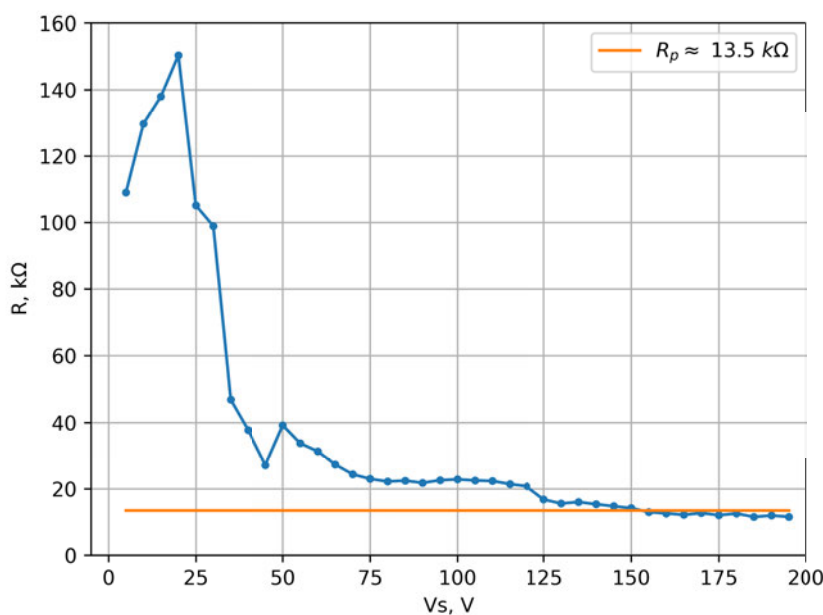
2.5.3. LC pretestība

Augstas viskozitātes šķidrajam kristālam ir nepieciešams stiprs elektriskais lauks, lai to nodrošinātu ir vajadzīgs augsts darba spriegums. Izmantojot augstu darba spriegumu, iespējams sasniegt LC elektriskās sabrukšanas robežvērtību E_{br} . E_{br} nosaka LC vadītspēja, elektrodu virsmas gludums, aizsargpārklājuma kvalitāte, LC tīrība, piemēram, putekļu daļiņas LC slānī un tamlīdzīgi. Dielektriskā caursīte ir sarežģīts process, un tas ir apspriests citur [22]. Jaudas izkliedi uz R_S un R_P var aprēķināt šādi:

$$P_{R_S}(t) = I_x^2(t) * R_S = R_S * \frac{V_x^2(t)}{R_x^2} \quad (2.6.)$$

$$P_{R_P}(t) = \frac{U_c^2(t)}{R_p} = \frac{(V_s(t) - V_x(t) * (1 + \frac{R_S}{R_x}))^2}{R_P} \quad (2.7.)$$

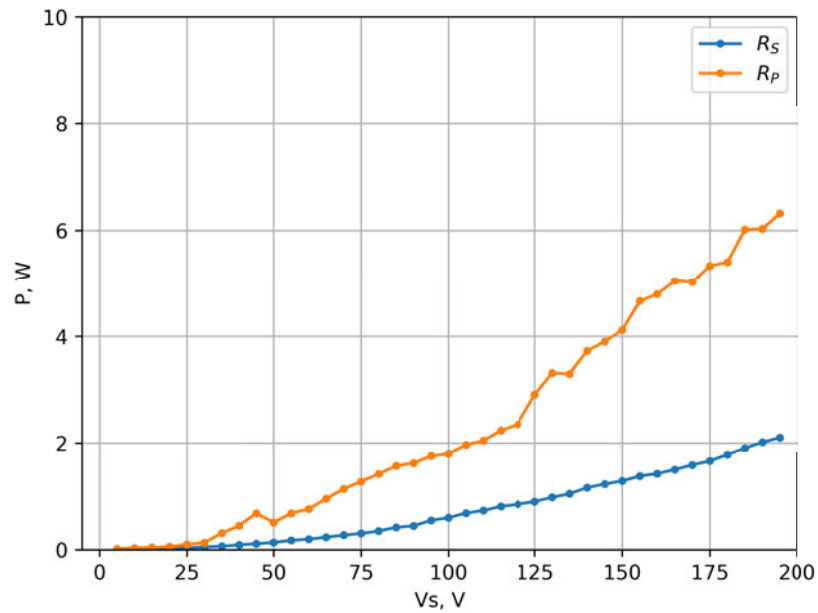
Paralēlās pretestības R_P iegūtie mērījumu rezultāti ir redzami 2.31. attēlā, kur zilie punkti apzīmē R_P , oranžie — R_P vidējo vērtību. 5—20 V diapazonā iegūtā pretestība palielinājās, kam sekoja straujš kritums un tā samazinājās līdz $\approx 13,5$ k Ω . No 125—195 V paralēlās pretestības izmaiņas tika novērotas 5 % robežās. Zemā pretestība ir izskaidrojama ar LC sastāva atšķirību.



2.31. att. Paralēlās pretestības R_P atkarība no V_S .

Izkliedētās jaudas R_S un R_P iegūtie mērījumu rezultāti ir redzami 2.32. attēlā, kur zilie punkti apzīmē R_S pretestību, oranžie — R_P . Pie 195 V V_S $R_S \approx 2.1$ W un $R_P \approx 6.3$ W. SmA LC šūnas iegūto pretestību (virknes un paralēlā) vērtības palielinājās eksponenciāli.

Lielākā daļa jaudas tiek izkliedēta uz R_P . R_P iespējams samazināt, samazinot darba spriegumu V_S ; tomēr tas ietekmēs SmA LC šūnas pārslēgšanas ātrumu un optiskos parametrus. R_S nav iespējams samazināt, jo ir nepieciešams noteikts strāvas minimums, lai uzlādētu LC šūnas kapacitāti C .



2.32. att. R_S un R_P izkliedētās jaudas atkarība no V_S .

SECINĀJUMI

Promocijas darba mērķis bija izpētīt *SmA LC* šūnu darbību un to elektriskās īpašības, kā arī iegūt padziļinātu izpratni par funkcionālo ilgtermiņa stabilitāti. Autors ir guvis šādus rezultātus.

- 1. Izpētīja *SmA LC* šūnu gaismas caurlaidību un pārslēgšanas ātrumu atkarību no pārslēgšanas frekvences.** *SmA LC* šūnai ir nepieciešama specifiska frekvence un signāla forma, lai sasniegtu noteiktas gaismas caurlaidības vērtības. Frekvenču diapazons pārslēgšanai uz izkliedes stāvokli ir ļoti šaurs (10—60 Hz), salīdzinot ar frekvenču diapazonu pārslēgšanai uz caurspīdīgo stāvokli (200—1,5 kHz). 60—100 Hz diapazonā *SmA LC* šūna paliks starp gaismas izkliedes un caurspīdīgu stāvokli — starpposmā. **Lai sasniegtu lielāko pārslēgšanās ātrumu (≈ 1300 — 1700 ms) un zemāko gaismas caurlaidību (≈ 1 — $1,8$ %) izkliedes stāvoklī, *SmA LC* šūna jāpārslēdz 20—40 Hz diapazonā. 400—700 Hz diapazons varētu būt vispiemērotākais *SmA LC* šūnas pārslēgšanai caurspīdīgā stāvoklī, kur gaismas caurlaidība saglabājas 85 % robežās un pārslēgšanas ātrums svārstās no 115 līdz 150 ms.**
- 2. Izpētīja enerģijas patēriņu, pamatojoties uz pārslēgšanas lauku.** Elektroenerģijas patēriņš palielinās eksponenciāli, atkarībā no izmantoto pikseļu skaita. Pārslēdzot visu *SmA LC* šūnas laukumu, elektroenerģijas patēriņš augstāko punktu sasniedz pārejas laikā uz caurspīdīgu stāvokli. **Vienai pārslēgšanas reizei uz caurspīdīgu stāvokli nepieciešams $\approx 0,11$ Wh. Lai pārslēgtu visu *SmA LC* šūnas laukumu no izkliedes uz caurspīdīgu stāvokli un iegūtu > 85 % gaismas caurlaidību, minimālais nepieciešamais strāvas apjoms ir 0,9 A;**
- 3. izpētīja pārslēgšanas atšķirības starp dažādiem *LC* šūnu dizaina veidiem.** *SmA LC* šūnām ar 8×1 dizainu lāzera ablācijas līnijas ir vairāk izkliedētas (ar zemāku gaismas caurlaidību), salīdzinot ar *LC* šūnas aktīvo laukumu un pikseļu perimetri — nevienmērīgi un viļņveidīgi. *LC* šūnām ar 5×5 vai šaha laukumam līdzīgiem izkārtojuma dizainiem būs problēmas ar pārslēgšanas secību, attēla vai teksta attēlošanu. Lāzera ablācijas līniju tuvumā veidojas *LC* gadījumu kopas un reģioni, kas pārslēgušies uz kādu no optiskajiem stāvokļiem. Elektriskais lauks ietekmē blakus esošos pikseļus, ja tie nav iezemēti. Izveidotās *LC* gadījumu kopas un reģioni ar laiku kļūst lielāki, ja pārslēgšanas cikls netiek izmainīts. *SmA LC* šūnas ir jutīgas pret pārslēgšanas parametriem, zemās paralēlās pretestības dēļ tām ir tendence uzsilt, intensīvi pārslēdzoties starp stāvokļiem. Pārslēgšanas ātrums palielinās un *LC* šūna paliek starpposmā. *SmA LC* šūnas nekad bieži un ātri nemainīs savus optiskos stāvokļus bez noteiktas pauzes starp pārslēgšanas soļiem, izņemot gadījumus, kad tiks veikta elektriskās sabrukšanas pārbaude.
- 4. Izpētīja *LC* defektu veidus un to rašanās iemeslus.** Papildus augstāk

minētajiem 8×1 un 5×5 dizainu defektu veidiem — nevienmērīgs, viļņveidīgs aktīvais laukums, izteiktas vizuālas gaismas izkliedes atšķirības, *LC* šūna palikusi starpposmā, to nevarēja pārslēgt uz citu optisko stāvokli. **Ar pārslēgšanas parametru un pārbaudes cikla optimizāciju ir iespējams uzlabot dažādu defektu vizuālo stāvokli, piemēram, pikseļu perimetra nevienmērību.** Šis defekts mēdz atgriezties pēc *X* cikliem, taču mazāk izteikts. Nevienmērīgu aktīvo laukumu lāzera ablācijas līniju tuvumā var uzlabot tikai daļēji, neviens no eksperimentiem, pārbaudēm un optimizācijas veidiem neuzrādīja potenciālu šī defekta novēršanai. Šo defektu nav iespējams saskatīt ar neapbruņotu aci caurspīdīgā stāvoklī. Taču defektu var pamanīt, pievēršot īpašu uzmanību līnijām gaismas izkliedes stāvoklī. Līdzīgs rezultāts tika iegūts nevienmērīgam (bezkrāsainam) aktīvajam laukumam. Defekts ir saistīts ar *SmA LC* šūnas izgatavošanas procesu un tajā izmantotajām metodēm. Lai izvairītos no šāda defekta, ražošanas procesi ir jāoptimizē. Temperatūras pārbaude pierādīja, ka ir iespējams “atīstatīt” *SmA LC* šūnu pēc tam, kad tā ir bojāta ar nepareiziem pārslēgšanas parametriem, testēšanas secību vai citu nezināmu iemeslu. Šo metodi vajadzētu izmantot tikai tad, ja defektu nav iespējams novērst ar augstāk minētajām optimizācijām. Papildus tam, procedūru nepieciešams atkārtoti pārbaudīt ar citām bojātām *LC* šūnām un defektu veidiem.

5. **Izpētīja līdzvērtīgas slodzes iespējas elektrisko apakšsistēmu simulācijās.** Iegūtie virknes R_S un paralēlās pretestības R_P rezultāti liecina, ka R_S nepārsniedz paredzētās *ITO* pielaides ($\pm 20\%$) un nav atkarīgs no pievienotā sprieguma. R_P pretestība ir zemāka, salīdzinot ar citu *LC* šūnu paralēlām pretestībām, piemēram, holesterisko *LC* šūnu. Īpaša uzmanība jāpievērš jaudas izkliedei, jo *LC* šūna ar zemu iekšējo paralēlo pretestību ātri sasniegs temperatūras sabrukšanas robežu, t. i., pārstās darboties. **Kapacitātes C mērījumi sniedz informāciju par *SmA LC* šūnu funkcionālo diapazonu (100—195 V).** Papildu padziļināta izpēte būtu jāveic 5—95 V diapazonā, lai noskaidrotu *LC* molekulu rotācijas sliekšņa spriegumu. **Elektrisko simulāciju modeļa parametri — $R_S = 71 \Omega$, $R_P = 13 \text{ k}\Omega$, $C = 53 \text{ nF}$, sniegs pietiekamu informāciju par $300 \times 400 \text{ mm}$ *SmA LC* šūnas funkcionalitāti un to var integrēt lielāku elektronisko sistēmu izstrādē.** Šo metodiku var pielāgot arī citiem *LC* šūnu tipiem un izmantot, lai izveidotu jaunus elektrisko simulāciju modeļus.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] S. Lu and D. H. Davies, “THERMALLY AND ELECTRICALLY ADDRESSED DYE SWITCHING LCDs.” *Molecular crystals and liquid crystals*, vol. 94, no. 1-2, pp. 167–189, 1983.
- [2] A. Hochbaum, “Thermally Addressed Smectic Liquid Crystal Displays,” *Optical Engineering*, vol. 23, no. 3, jun 1984.
- [3] K. Liu and K. H. Yang, “ELECTRODE CONFIGURATIONS TO REDUCE THE POWER CONSUMPTION AND ENHANCE THE CONTRAST OF THE MATRIX-ADDRESSED SMECTIC A LIQUID CRYSTAL DISPLAY.” *IBM technical disclosure bulletin*, vol. 27, no. 7 B, pp. 4145–4148, dec 1984.
- [4] D. F. Aliev, V. L. Aristov, V. V. Mitrokhin, and V. P. Sevostyanov, “Operating characterization of a smectic A LCD,” *Displays*, vol. 12, no. 2, pp. 86–90, 1991.
- [5] S. S. Seomun, Y. Takanishi, K. Ishikawa, H. Takezoe, and A. Fukuda, “Evolution of switching characteristics from tristable to V-shaped in an apparently antiferroelectric liquid crystal,” *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, vol. 36, no. 6 A, pp. 3586–3590, 1997.
- [6] V. L. Aristov, S. P. Kurchatkin, M. V. Mitrokhin, and V. P. Sevostyanov, “Electrohydrodynamic formation of liquid crystal focal conic domains,” in *Liquid Crystals: Physics, Technology, and Applications*, vol. 3318. SPIE, feb 1998, p. 529.
- [7] Gauzy, “Smart Glass - Everything You Want To Know...And More.” [Online]. Available: <https://www.gauzy.com/smart-glass-everything-you-want-to-know/>
- [8] J. Bin Lias, T. Naing Oo, T. Yazawa, M. Kimura, and T. Akahane, “Liquid crystal alignment on patterned-alignment films,” *Journal of Information Display*, vol. 12, no. 2, pp. 101–107, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15980316.2011.567826>
- [9] J. W. Huh, T. H. Choi, J. H. Kim, J. H. Woo, J. H. Seo, and T. H. Yoon, “Bistable Switching of Diffractive Smectic-A Liquid Crystal Device between Haze-Free Transparent and High-Haze Translucent States,” *ACS Photonics*, vol. 5, no. 8, pp. 3152–3158, aug 2018.
- [10] G. Mozolevskis, “DIELECTRIC BREAKDOWN OF HIGH VOLTAGE LIQUID CRYSTAL DISPLAYS,” Ph.D. dissertation, RIGA TECHNICAL UNIVERSITY, Riga, 2017.
- [11] G. Mozolevskis, A. Ozols, E. Nitiss, E. Linina, A. Tokmakov, and M. Rutkis, “Reduction of Electric Breakdown Voltage in LC Switching Shutters,” *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 52, no. 5, pp. 47–57, 2015.

- [12] T. V. Clapp, W. A. Crossland, A. B. Davey, M. Grassman, J. P. Hannington, R. K. King, M. Pivnonenko, S. Robson, and H. Xu, “Liquid crystal formulations and structures for smectic a optical devices,” p. 85, 2011. [Online]. Available: <http://www.dowcorning.com/content/paintink/paintinkresin/default.aspx>
- [13] J. P. Hannington, T. V. Clapp, F. Nishida, R. K. King, O. Farooq, M. Grassman, W. A. Crossland, H. J. Coles, A. B. Davey, H. Xu, O. Haderler, and M. Pivnenko, “Oligosiloxane modified liquid crystal formulations and devices using same (US Patent),” p. 28, 2013.
- [14] K. R. Fowler, *Test and Integration*. Elsevier Inc., 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-405879-8.00014-3>
- [15] H. Grzeskowiak, T. Lhommeau, and D. Delaux, “Highly Accelerated Testing,” *Reliability of High-Power Mechatronic Systems 2: Aerospace and Automotive Applications Issues, Testing and Analysis*, pp. 57–108, 2017.
- [16] E. Suhir, J. Nicolics, and S. Yi, “Failure-oriented-accelerated-testing and its role in making a device into a product,” *2019 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2019 - Proceedings*, pp. 33–38, 2019.
- [17] M. Maltisovs, K. Krumins, A. Ozols, and D. Pikulins, “Study of the Operational Properties of Bistable Smectic-A Liquid Crystal Displays,” *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 55, no. 3, pp. 54–62, 2018.
- [18] H. Aoki, “Dynamic characterization of a-Si TFT-LCD pixels,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 43, no. 1, pp. 31–39, 1996.
- [19] B. Bahadur, *Liquid Crystals — Applications and Uses, Vol. 1*. Singapore: World Scientific Pub Co Inc., 1990. [Online]. Available: <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/1013>
- [20] T.-H. Choi, S.-M. Do, B.-G. Jeon, and T.-H. Yoon, “Low-power control of haze using a liquid-crystal phase-grating device with two-dimensional polymer walls,” *Optics Express*, vol. 27, no. 3, p. 3014, 2019.
- [21] G. Karmakar, S. Roy, G. Chattopadhyay, and Z. Xiao, “Dynamically controlling exterior and interior window coverings through IoT for environmental friendly smart homes,” *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2017*, pp. 487–491, 2017.
- [22] C. Neusel and G. A. Schneider, “Size-dependence of the dielectric breakdown strength from nano- to millimeter scale,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2014.



Matīss Maltisovs dzimis 1991. gadā Madonā. Ventspils Augstskolā (VeA) ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu elektronikā (2013) un profesionālo maģistra grādu elektronikā (2015). No 2014. līdz 2017. gadam strādājis SIA "EuroLCDs" par produktu/procesu inženieri, no 2017. līdz 2018. gadam bijis VeA vieslektors, lasot bakalaura un maģistra studiju līmeņa lekcijas. No 2018. līdz 2021. gadam strādājis SIA "HansaMatrix Innovation" par elektronikas inženieri. Patlaban ir SIA "Lightspace Technologies" elektronikas inženieris.

Zinātniskās intereses ir saistītas ar viedajiem logiem un jaudas elektroniku.