RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte
Tehniskās fizikas institūts

Gatis Mozoļevskis
Doktora studiju programmas „Materiālzinātne” doktorants

AUGSTA SPRIEGUMA ŠĶIDRO KRISTĀLU EKRĀNU DIELEKTRISKĀ CAURSITE

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:
profesors *Dr. habil.phys.*
ARTŪRS MEDVIDS
Dr. phys.
MĀRTIŅŠ RUTKIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2017

Mozoļevskis G. Augsta sprieguma šķidro kristālu ekrānu dielektriskā caursite. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2017. – 31 lpp.

Iespiests saskaņā Tehniskās fizikas institūta 2017. gada 29. septembra lēmumu, protokola nr. 8.

ISBN 978-9934-22-031-9

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora zinātniskā grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2017. gada 15. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātē, Paula Valdena ielā 3/7, 272. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. habil. sc. ing Jānis Grabis
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Dr. habil. phys. Donāts Millers
Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūts, Latvija

Dr. habil. phys. Steponas Ašmontas
Viļņas Fizikālo zinātņu un tehnoloģiju centrs, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora zinātniskā grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Vārds Uzvārds ……. (paraksts)
Datums: ……

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 90 attēlu, 11 tabulu, kopā 98 lappuses. Literatūras sarakstā ir 122 nosaukumi.

PATEICĪBA

Pirmkārt, izsaku lielu pateicību mana promocijas darba vadītājiem profesoram *Dr. habil. phys.* Artūram Medvidam un *Dr. phys.* Mārtiņam Rutkim, Cietvielu Fizikas institūta direktoram, par darba vadīšanu, vērtīgiem ieteikumiem, atbalstu un zinātniskajām diskusijām, kas deva motivāciju un jaunas idejas darba izstrādē un pilnveidē. Liels paldies *Dr. phys.* Edgaram Nitišam kā neoficiālajam trešajam darba vadītājam par atbalstu mērījumu veikšanā un rakstu sagatavošanā.

Liels paldies esošajiem un bijušajiem kolēģiem no *EuroLCDs* par atbalstu, diskusijām un palīdzību paraugu sagatavošanā un mērījumu veikšanā. Vēlos pateikties uzņēmuma vadībai – Aināram Ozolam un Uldim Saleniekam – par atbalstu promocijas darba izstrādāšanā. Ilmāram Osmanim par pārliecināšanu rakstīt promocijas darbu par šķidrajiem kristālu ekrāniem. Un paldies visam *EuroLCDs* kolektīvam par palīdzību paraugu sagatavošanā, mērīšanas iekārtu izstrādē un mērījumu veikšanā: Ilmāram Sekacim, Kristapam Morusam, Jānim Kļaviņam, Jānim Kondratjevam, Kārlim Krūmiņam, Kristiānam Krūmiņam, Matīsam Maltisovam, Rolandam Šķirmantam, Dainim Backānam, Jānim Zālītim, Jānim Čerņavskim, Mārtiņam Rudzājam, Lāsmai Vaitai, Mārcim Ruzaiķim un Elīnai Emarei.

SATURS

DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS 6
Tēmas aktualitāte 6
Promocijas darba mērķis 6
Darba uzdevumi 6
Aizstāvāmās tēzes 7
Darba zinātniskā nozīme un novitāte 7
Darba praktiskā nozīme 7
Darba aprobācija 7
LITERATŪRAS APSKATS 8
METODISKĀ DAĻA 11
REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS 13
1. Elektroda virsmas raupjums 13
2. Elektroda sadalīšana 14
3. Izlīdzinošais slānis 18
4. Plānās kārtiņas 19
Plāno kārtiņu pretestība un I–V līknes 19
Dielektriskā caursite LCDs ar dielektriskajām plānajām kārtiņām 22
Bistabilo ekrānu un holestērisko slēģu slēgšanās ātrums un caurlaidība 24
Nesimetriska dizaina šķidro kristālu ekrāns 25
5. Dielektriskās caursites mehānisms šķidro kristālu ekrānos 27
SECINĀJUMI 29
LITERATŪRAS SARAKSTS 30
DARBA APROBĀCIJA 31
Publikācijas zinātniskajos žurnālos 31
Dalība starptautiskās zinātniskās konferencēs 31

DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Logi ir viena no svarīgākajām ēku dizaina sastāvdaļām, un tie ir arī svarīga enerģijas efektivitātes uzlabošanas sastāvdaļa. Viedie logi ir aptuveni par 70 % energoefektīvāki vasaras laikā un par 45 % ziemas laikā nekā standarta vienas paketes logi. Tie samazina kopējo ēkām izmantoto enerģijas patēriņu par 25 %. Saskaņā ar ASV Enerģijas departamenta datiem ēkas patērē 40 % no kopējā enerģijas patēriņa ASV. Kopējais enerģijas patēriņš ēkām ir vairāk nekā 400 miljardi dolāru. Izmantojot viedos logus, iespējams ietaupīt 100 miljardus dolāru tikai ASV vien. Šobrīd tirgū pieejamas divas tehnoloģijas: polimērā disperģēts šķidrais kristāls un elektrohromie stikli. Polimērā disperģētam šķidrajam kristālam piemīt augsta izkliede atvērtā stāvoklī un nepieciešama nepārtraukta enerģijas padeve atvērtā stāvoklī. Elektrohromiem viedajiem stikliem arī piemīt vairāki trūkumi – lēns slēgšanās ātrums, nokrāsa atvērtā stāvoklī un nepieciešams nepārtraukts enerģijas patēriņš aizvērtā stāvoklī. Ir sagaidāms, ka viedo logu tirgus 2022. gadā sasniegs 8 miljardus dolāru.

Bistabilajam smektiskajam SmA šķidrajam kristālam ir potenciāls kļūt par vadošo viedo logu tehnoloģiju. Caurspīdīgā stāvoklī ir ļoti maza izkliede; izkliedējošais stāvoklis ir vizuāli necaurspīdīgs. Gan caurspīdīgais, gan necaurspīdīgais stāvoklis tiek saglabāts arī pēc sprieguma noņemšanas, līdz ar to enerģija ir nepieciešama tikai īsu brīdi, lai pārslēgtu no viena stāvokļa uz otru. Bistabilitāte ir saistīta ar augstu viskozitāti, tāpēc šķidrā kristāla pārslēgšanai ir nepieciešamas augsts spriegums (20–30 V/μ) un pastāv liela iespēja, ka notiks dielektriskā caursite. Holestērisko šķidro kristālu ātri pārslēdzošie slēģi ir otra tehnoloģija, kur nepieciešams augsts spriegums. Ātri slēdzošiem slēģiem ir vairāki potenciāli lietojumi – kā projekcijas ekrāns telpiskiem 3D ekrāniem, 3D slēģu brilles, viedie logu un gaismu modulējošas ierīces.

Ir pieejams ļoti ierobežots daudzums pētījumu, kas veltīti šķidro kristālu ekrānu dielektriskās caursites uzlabošanai, izmantojot dielektrisko plāno kārtiņu un elektrodu sadalīšanu. Citu augsta spriegumu kondensatora tipu ierīču, piemēram, elektroluminescentais ekrāns, pētījumi parāda, ka augstu noturību pret dielektrisko caursiti var panākt, izmantojot liela k dielektriskās plānās un biezās kārtiņas. *LED* diožu un kondensatoru pētījumi rāda, ka izturību un mūža ilgumu var uzlabot, samazinot elektroda virsmas raupjumu un izlīdzinošo slāni.

Promocijas darba mērķis

Izstrādāt augsta sprieguma šķidro kristālu ekrānu tehnoloģiju, kas nodrošina augstu gaismas caurlaidību un lielu pārslēgšanās ātrumu.

Darba uzdevumi

1. Apkopot jaunāko zinātnisko literatūru par dielektriskās caursites cēloņiem un mehānismu, kā arī par tās iespējamības samazināšanas metodēm šķidro kristālu ekrānos un citās līdzīgās augsta sprieguma ierīcēs.

2. Eksperimentāli pārbaudīt vairākas šķidro kristālu ekrānu dielektriskās caursites samazināšanas metodes un novērtēt to ietekmi uz elektriskajām un optiskajām īpašībām.
3. Izstrādāt elektriskās un optiskās testēšanas metodes, lai novērtētu dielektriskās caursites lauka intensitāti, tās iemeslus un mehānismu.
4. Balstoties uz literatūras apskatu un eksperimentālajiem rezultātiem, izvēlēties vislabāko šķidrā kristāla ekrāna dizainu.

Aizstāvāmās tēzes

1. Dielektriskā plānā kārtiņa ir kritisks konstruktīvais elements, kas novērš dielektrisko caursiti un ļauj radīt izturīgus augsta sprieguma šķidro kristālu ekrānus.
2. Galvenais dielektriskās caursites iemesls šķidro kristālu ekrānos ir caurejošās poras dielektriskajā plānajā kārtiņā, kas rodas plāno kārtiņu nogulsnēšanas laikā. Plānā kārtiņa darbojas kā strāvu ierobežojošs slānis šķidrā kristāla ekrānā, tādēļ ir nepieciešams izmantot augstas kvalitātes plāno kārtiņu bez defektiem.
3. Piemērotākais veids noturīgu augsta sprieguma ekrānu iegūšanai ar augstu gaismas caurlaidību un lielu slēgšanās ātrumu ir 200–300 nm SiO_2 dielektrisku plāno kārtiņu izmantošana, kas nogulsnēta ar magnetrona uzputināšanu.

Darba zinātniskā nozīme un novitāte

1. Tika pētītas un novērtētas dažādas dielektrisko caursiti samazinošas metodes: elektroda sadalīšana, izlīdzinošais slānis un dielektriskās plānās kārtiņas izmantošana. Tika secināts, ka dielektriskās plānās kārtiņas izmantošana, kas nogulsnēta ar magnetrona uzputināšanu, ir visefektīvākā metode ierīču iegūšanai ar augstu dielektrisko noturību un augstu caurlaidību.
2. Pirmo reizi ir aprakstīts dielektriskās caursites mehānisms un tā rašanās iemesls škidro kristālu ekrānos. Tika demonstrēts, ka galvenais šķidro kristālu ekrānu caursites iemesls ir caurejošās poras un defekti dielektriskajā plānajā kārtiņā, kas atrodas starp caurspīdīgu vadošo elektrodu un šķidro kristālu.

Darba praktiskā nozīme

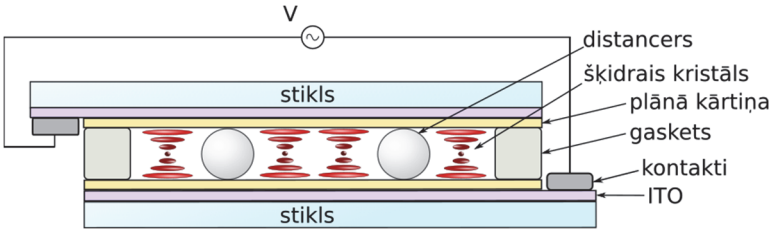
Izstrādāta zemu izmaksu un mērogojama augsta sprieguma šķidro kristālu ekrānu tehnoloģija, kas piemērota viedo logu un 3D telpisko ekrānu lietojumam.

Darba aprobācija

Promocijas darba rezultāti publicēti četros zinātniskajos žurnālos un prezentēti divās starptautiskās konferencēs.

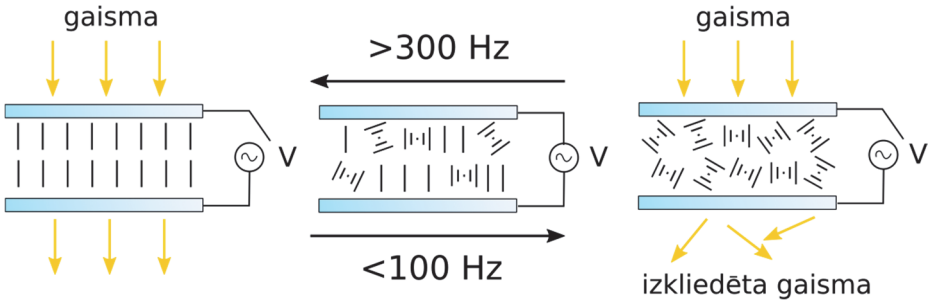
LITERATŪRAS APSKATS

Šķidrā kristāla ekrāna šķērsgriezums ir redzams 1. att. Kā pamatne parasti tiek izmantots 0,4–1,1 mm biezs sodas-kaļķakmens stikls ar vadošu caurspīdīgu elektrodu. Parasti kā elektrodu izmanto indija alvas oksīdu (IAO). Lai nepieļautu Na^+ jonu difūziju šķidrajā kristālā, starp IAO un stiklu tiek nogulsnēts 10–20 nm SiO_2 barjerslānis. Plānais pārklājums nodrošina šķidrā kristāla sakārtojumu un elektriski izolē elektroda virsmu. Visbiežāk tiek lietots poliimīds, bet dažkārt izmanto divas plānās kārtiņas: SiO_2 un poliimīdu. Distanceri nodrošina nemainīgu attālumu starp elektrodiem. Gaskets nodrošina, lai pamatnes savā starpā turētos kopā un šķidrais kristāls neizlīst ārā.



1. att. Šķidrā kristāla ekrāna šķērsgriezums.

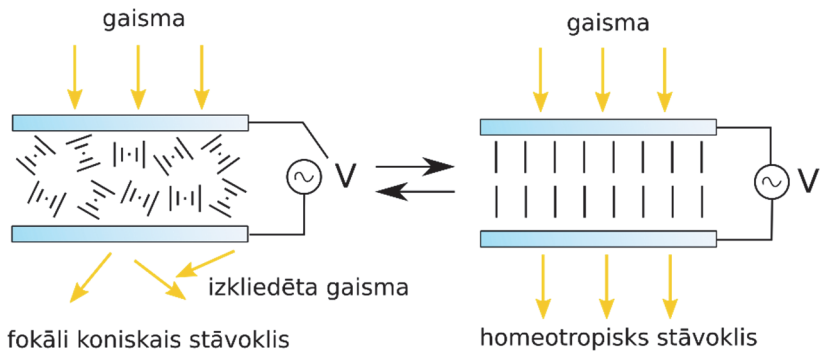
Bistabilā šķidrā kristāla ekrāna darbības princips ir redzams 2. att. Zemas frekvences (< 100 Hz) spriegums ierosina jonisko piedevu kustību caur slāņaino smektisko A tipa šķidro kristālu un rada izkliedējošas fokāli koniskas struktūras, un tā rezultātā ierīce kļūst necaurspīdīga. Parasti vienas struktūras izmērs ir aptuveni 1 μm. Pieliekot spriegumu ar frekvenci, kas lielāka par sliekšņa vērtību (~ 300 Hz – 1 kHz), šķidrā kristāla molekulas sāk rotēt ap savu garāko asi un dielektriski sakārtojas paralēli pieliktajam laukam, un ierīce kļūst caurspīdīga. Pēc sprieguma noņemšanas abi stāvokļi tiek saglabāti, pateicoties smektiskā A tipa šķidrā kristāla augstajai viskozitātei. Augstās viskozitātes dēļ ir nepieciešams izmantot augstu spriegumu (10 V/μ), un ir liela iespēja, ka notiks dielektriskā caursite [1].



2. att. Bistabilo šķidro kristālu ekrānu darbības princips.

Holestēriskais šķidrais kristāls ir viena no visdaudzsološākajām tehnoloģijām ātrdarbīgu slēģu lietojumam, pateicoties to lielajam slēgšanās ātrumam. Holestēriskais kristāls ir neimatiskā šķidrā kristāla un hirālās piedevas maisījums, veidojot spirālveida struktūras. Pieliekot spriegumu, šķidrais kristāls ieņem homeotropisku stāvokli, un ierīce kļūst caurspīdīga (skat. 3. att.). Noņemot spriegumu, šķidrais kristāls ātri pārslēdzas uz fokāli konisko struktūru.

Caurlaidība izkliedējošā stāvoklī ir atkarīga no ierīces uzbūves un izmantotā šķidrā kristāla sastāva un parasti ir < 10 % [2].



3. att. Holestēriskā šķidrā kristāla darbības princips.

Par elektrisko vai dielektrisko caursiti tiek dēvēts process, kurā pieliktā elektriskā lauka dēļ tiek sagrauts dielektriskais materiāls un tā vadāmība pieaug par vairākām kārtām. Ar dielektrisko caursites lauku vai dielektrisko caursites izturību tiek raksturota materiāla izturība pret dielektrisko caursiti. Tā tiek aprēķināta, izdalot pielikto dielektrisko lauku ar materiāla biezumu. Noturība pret dielektrisko caursiti atkarīga ne tikai no dielektriskā materiāla īpašībām, bet arī no ārējiem mainīgajiem – elektriskā lauka vienmērīguma, temperatūras un elektrodu kvalitātes. Dielektriskā caursite vizuāli novērojama kā dzirkstele un paliekoši fraktāļi uz elektroda virsmas [3].

Literatūrā atrodams tikai viens pētījums par dielektrisko caursiti šķidrā kristāla ekrānos, kurā kā visefektīvākā dielektriskās caursites noturības uzlabošanas metode minēta poliimīda plānās kārtiņas izmantošana [4]. Literatūrā nav aprakstīts dielektriskās caursites mehānisms šķidro kristālu ekrānos, bet aprakstīti vairāki modeļi un mehānismi šķidrumos: 1. modelis, kas balstīts uz vadoša kanāla izveidošanos; 2. elektronu lavīnas caursite; 3. cietas daļiņas mehānisms; 4. burbuļa modelis; 5. elektroķīmiskais modelis [3], [5].

Literatūrā aprakstītas vairākas dielektriskās caursites lauka uzlabošanas metodes.

1. Virsmas raupjuma samazināšana. Gan eksperimentālie rezultāti, gan aprēķini parāda, ka, samazinot virsmas raupjumu, iespējams uzlabot ierīces noturību pret dielektrisko caursiti [6].
2. Izlīdzinošais slānis. Pārklājot ITO elektrodu ar vadošo polimēru *PEDOT:PSS*, var samazināt virsmas raupjumu un samazināt noplūdes strāvu, un tā rezultātā paildzinās ierīces mūžs [7]. Ir veikti pētījumi arī ar citiem izlīdzinošajiem slāņiem, piemēram, *PVK* un *10GN* maisījumu [8].
3. Elektroda sadalīšana. Elektrodu var sadalīt strīpās, kas savienotas paralēlā slēgumā, tādējādi tiek radīta liela iekšējā pretestība jebkurā šķidrā kristāla ekrāna punktā, bet kopējā pretestība tiek saglabāta zema [9].

4. Dielektriskas plānās kārtiņas izmantošana. Šī metode tiek izmantota elektroluminiscences ierīcēs. Dielektriskā plānā kārtiņa ierobežo strāvas plūsmu. Plānajai kārtiņai ir jāatbilst vairākiem nosacījumiem: mazam caurumu skaitam un citiem defektiem, lielai dielektriskajai konstantei un augstam dielektriskās caursites laukam. Visplašāk tiek izmantoti tādi materiāli kā Al_2O_3, SiO_2, Si_3N_4 un $BaTiO_3$ [10].

Šķidro kristālu industrijā plāno kārtiņu nogulsnēšanai izmanto tādas metodes kā fleksogrāfijas druka, magnetrona uzputināšana, ķīmiskā tvaika nogulsnēšana, sietspiede un rotācijas uzklāšana. Citās industrijās plaši tiek izmantota arī termiskā iztvaicēšana un atomārā slāņa nogulsnēšana.

METODISKĀ DAĻA

Šķidrā kristāla ekrāna izgatavošanas shēma ir redzama 4. att. Stikla IAO pamatnes ar izmēru 300 mm × 400 mm ar virsmas pretestību 40–80 Ω/kv. tika iegādātas no piegādātājiem Ķīnā un Taivānā. Uz vienas pamatnes tika izveidoti 12 ekrāni (80 mm × 80 mm), tādējādi no divām pamatnēm tika iegūts panelis ar 12 ekrāniem. Pamatnes pēc mazgāšanas apstrādāja ar lāzeru, ievelkot ablācijas līnijas aktīvajam laukumam, marķieri, numerāciju utt. Pēc lāzera apstrādes pamatnes tika vēlreiz nomazgātas un pārklātas ar plāno kārtiņu. Plāno kārtiņu nogulsnēšanai tika izmantotas trīs dažādas metodes: fleksogrāfijas druka, sietspiede un uzputināšana ar magnetronu. Fleksogrāfijas druka ir tradicionālā metode šķidro kristālu ekrānu industrijā, kur materiāls tiek nogulsnēts no šķīduma ar masas daļu 3–6 %. Kā materiāli tika izmantoti SiO_2 un poliimīds ar biezumu 105–485 nm. Plāno kārtiņu biezums tika palielināts, uzklājot vairākus slāņus. *PEDOT:PSS* tika uzklāts ar sietspiedes metodi. Silīcija dioksīds tika uzklāts arī ar reaktīvo magnetrona uzputināšanu. Dažāda biezuma (100–300 nm) plānās kārtiņas tika iegūtas, variējot konveijera ātrumu. Uzputināšana tika veikta uzņēmumā *FHR Anlagenbau GmbH*, Vācijā. Distanceru (10–15 µm) suspensija organiskā šķīdinātājā tiek izsmidzināta uzkarsētā kamerā, kur šķīdinātājs izgaro un distanceri nosēžas uz pamatnes. Uz pretējā stikla ar šļirci tika dispensēts gaskets. Panelis tiek iegūts, savietojot abas pamatnes kopā. Bistabilā kristāla ekrāna izgatavošanai tika izmantota viena piliena uzpildes tehnoloģija, kur savietošana notiek vakuumā ar jau uzdispensētu šķidro kristālu. Gaskets pēc tam tika nocietināts temperatūrā > 150 °C. Nākamajā solī paraugi tika izgriezti no paneļa, un tukšie ekrāni uzpildīti ar šķidro kristālu vakuuma kamerā. Pēdējais solis paraugu izgatavošanā bija kontaktu pielodēšana ar ultraskaņas lodāmuru.

4. att. Ekrāna paraugu sagatavošanas procesa soļi.

Plānajām kārtiņām tika izmērīta pretestība un strāvas un sprieguma (I–V) līknes. Kā viens no elektrodiem tika izmantots IAO zem plānās kārtiņas, bet kā otrs elektrods tika izmantots šķidrais metāls. Pretestība 154 mm^2 lielam laukumam tika mērīta ar multimetru, bet I–V līkne ar elektrometru/augstas pretestības mērītāju *Keithly 6517B*. Šķidro kristālu ekrānu dielektriskās caursites mērījumiem kā strāvas avots tika izmantots *TTi TG210* funkciju ģenerators un signāla

pastiprinātājs *TREK MODEL PZD350*, kur maksimālais spriegums ir 2000 V pk-pk. Spriegums tika palielināts, līdz vizuāli tiek novērota caursite.

Caurlaidība un pārslēgšanās ātrums holestēriskajiem slēģiem un bistabilajiem ekrāniem tika mērīts ar uzņēmumā *EuroLCDs* izstrādātām mēriekārtām. Caurlaidība tika mērīta, izmantojot baltu *LED* gaismas diodi. Abu tipu ekrāniem tika mērītas četras vērtības:

1. caurlaidība atvērtā stāvoklī;
2. caurlaidība aizvērtā stāvoklī;
3. kritumlaiks – pārslēgšanās ātrums no atvērta uz aizvērtu stāvokli;
4. kāpumlaiks – pārslēgšanās ātrums no aizvērta uz atvērtu stāvokli.

Holestērisko ekrānu gadījumā īpašības tika mērītas diapazonā 30–200 V ar soli 1–3 V. Pie katras sprieguma vērtības mērījumi tika veikti 25 reizes, un izrēķināta vidējā vērtība. Bistabilo ekrānu īpašības tika mērītas diapazonā 60–240 V ar soli 10 V. Lai pārslēgtu uz atvērtu stāvokli, tika izmantota 1 kHz frekvence, lai pārslēgtu uz izkliedējošu stāvokli – 50 Hz.

REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

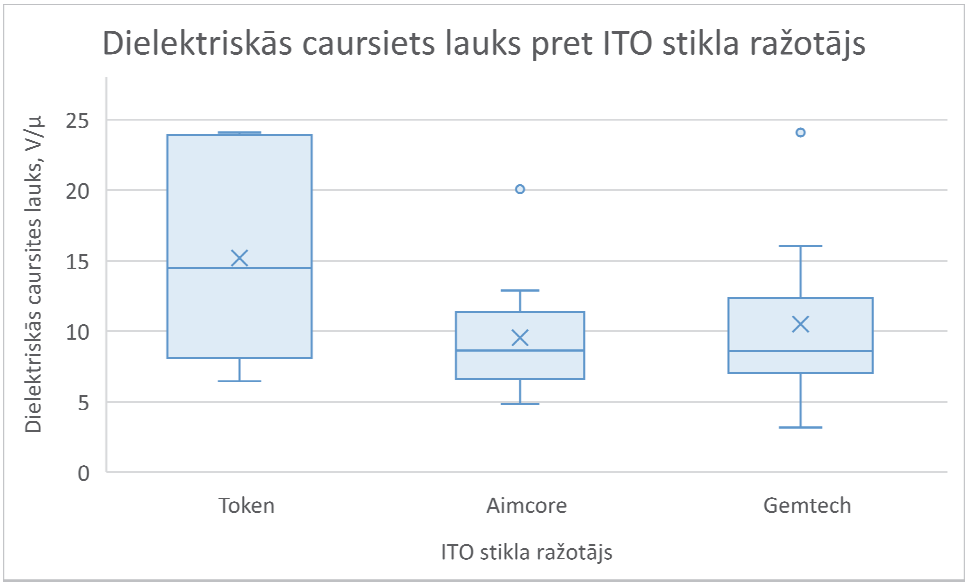
1. Elektroda virsmas raupjums

Lai novērtētu virsmas raupjuma ietekmi uz dielektriskās caursites vērtībām, tika izgatavoti šķidrā kristāla ekrāni ar dažādu ražotāju IAO stiklu. IAO stikla pamatnes tika iegādātas no vairākiem ražotājiem: *Token* (Ķīna), *Aimcore* un *Gemtech* (Taivāna). Visiem paraugiem tika izmērīts virsmas raupjums R_a, redzams 1. tabula. 5. attēlā redzams, ka dielektriskās caursites vērtībām ir liela standartnovirze un rezultāti nesakrīt ar virsmas raupjuma vērtībām. *Aimcore* stikliem ar vislīdzenāko elektroda virsmu ir arī viszemākā caursites lauka vērtība – 6,8 V/µm. To varētu izskaidrot ar zemāku virsmas pretestību nekā pārējām IAO pamatnēm. Paraugiem, kas izgatavoti no *Token* IAO stikla, ir visaugstākā vidējā caursites vērtība 10,8 V/µm, kā arī lielākā raupjuma novirze. Varētu sagaidīt, ka paraugiem ar lielāku virsmas raupjumu būs arī vairāk IAO defektu kā pīķi un izvirzījumi, kas izraisītu dielektrisko caursiti, bet šie mērījumi to neapstiprina. Iespējams, ka virsmas raupjums nekorelē ar dielektrisko caursiti izraisošu defektu daudzumu, jo virsmas raupjums tiek mērīts ļoti mazā laukumā ($6{,}6 \cdot 10^{-8}$ % no 300 mm × 400 mm pamatnes).

1. tabula

Vidējais virsmas raupjums un virsmas pretestība dažādu ITO stiklu ražotāju pamatnēm

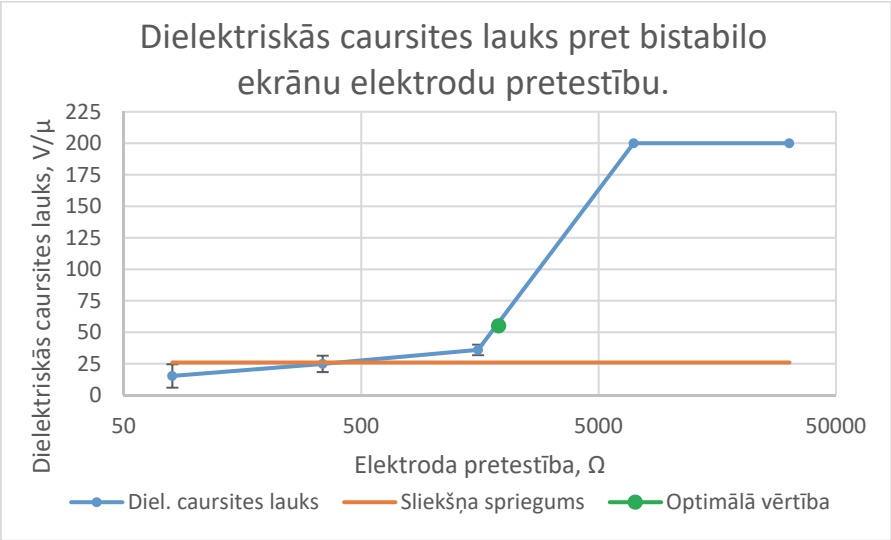
Ražotājs	Vidējais R_a, nm	Standartnovirze, nm	Virsmas pretestība, Ω/kv.
Aimcore	0,5	0,03	50
Gemtech	0,9	0,14	80
Token	1,0	0,27	80



5. att. Dielektriskās caursites lauks holestēriskajiem šķidro kristālu ekrāniem ar trīs dažādu stikla pamatņu piegādātājiem. *Token* stiklu vidējā vērtība ir 10,8 V/µm. *Aimcore* – 6,8 V/µm, *Gemtech* – 7,5 V/µm.

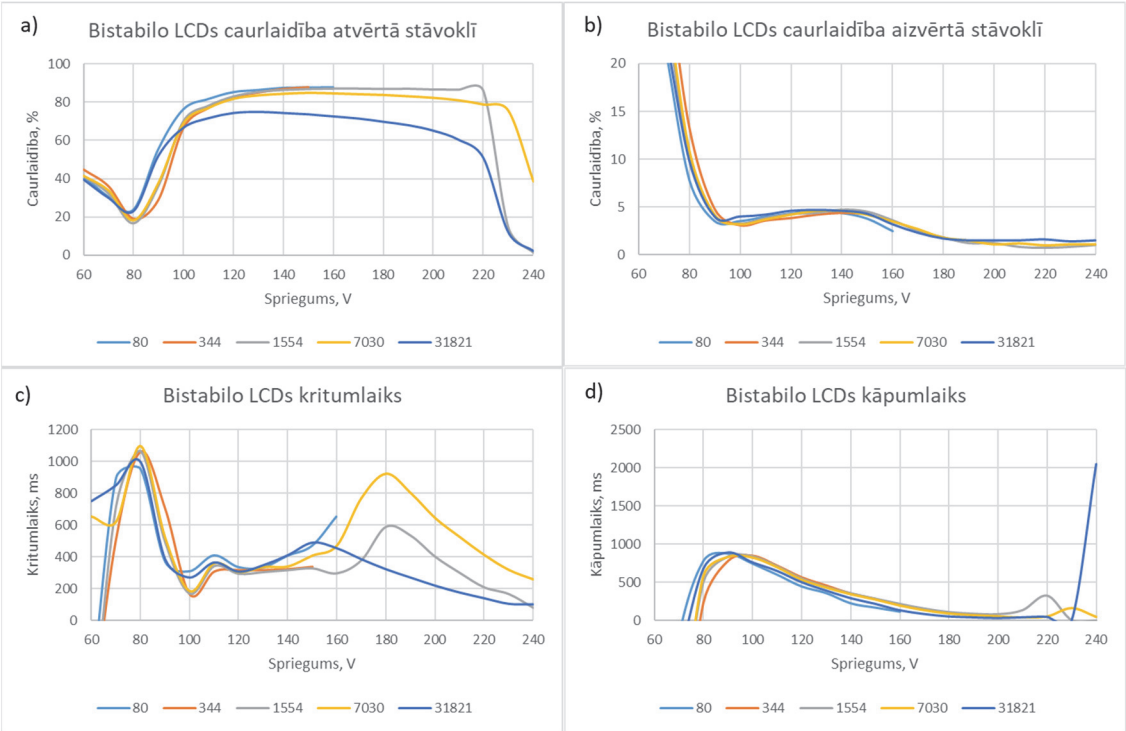
2. Elektroda sadalīšana

Bistabilajiem ekrāniem ar dažādu sadalītā elektrodu daļu platumu tika noteikts dielektriskās caursites lauks. Kā redzams 6. att., dielektriskās caursites lauks ekrānam ar sadalītu elektrodu, kura sadalītās iedaļas pretestība ir līdz 1554 Ω, ir ļoti tuvu pārslēgšanās sliekšņa vērtībai, tāpēc nevar iegūt izturīgu ierīci ar augstu izgatavošanas iznākumu. Ekrāni ar pretestību > 7000 Ω vispār netika caursisti. Optimālajam caursites laukam būtu jābūt aptuveni divreiz lielākam par pārslēģšanās sliekšņa vērtību ~ 55 V/µm, kas atbilst sadalītam elektrodam ar iedaļas vērtību ~1900 Ω.



6. att. Bistabilo ekrānu dielektriskās caursites lauks ar sadalītu elektrodu. Slēgšanās sliekšņa spriegums ir attēlots ar oranžo līniju pie 26 V/µm. Ekrāni ar elektroda līnijas pretestību > 7000 Ω netika caursisti.

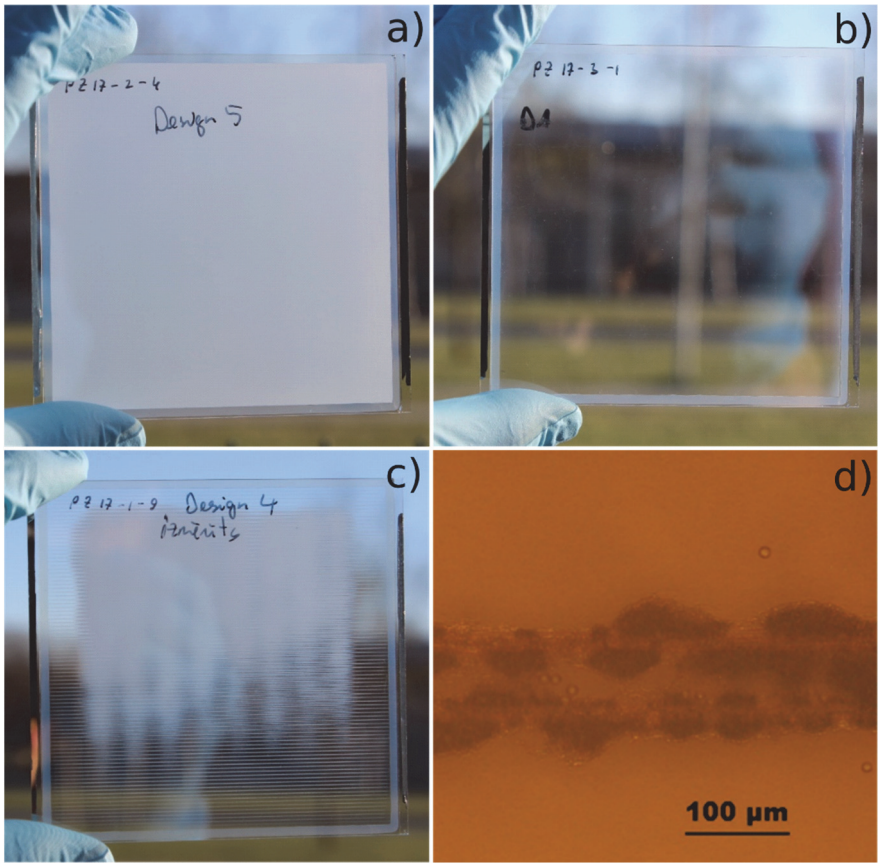
Pārslēgšanās ātrums un caurlaidība atvērtā un aizvērtā stāvoklī ir redzama 7. att. Ekrāni ar pretestību 80 Ω un 344 Ω tika caursisti pirms vēl tie sasniedza maksimālo spriegumu. Sliekšņa sprieguma vērtība tiek noteikta kā spriegums, kad caurlaidība atvērtā stāvoklī sasniedz maksimumu. Sliekšņa vērtība visiem ekrāniem ir aptuveni 130 V vai 26 V/µ (skat. 7. att. a). Caurlaidība atvērtā stāvoklī pretestībām 1554 Ω un 7030 Ω sāk samazināties pie 220 un 230 voltiem. Augstākajai pretestībai caurlaidība sāk samazināties jau pie 140 V. Šo efektu var izskaidrot ar elektroda uzkaršanu augstās pretestības dēļ. Uzkarst arī šķidrais kristāls, un pilnībā nenotiek pārslēgšanās uz caurspīdīgo stāvokli. Pie aptuveni 150 V kritumlaiks sāk palielināties (skat. 7 att. c), jo izkliedējošie un caurspīdīgie stāvokļi savā starpā sāk "sacensties". Šķidrā kristāla pārslēgšanu uz caurspīdīgu stāvokli ar augstu spriegumu izraisa pārlieku pārslēgšanu – šķidrais kristāls "iesprūst" homeotropiskā stāvoklī, un ir nepieciešams ilgāks laiks, lai to pārslēgtu atpakaļ uz izkliedējošu stāvokli. Tas arī ir iemesls, kāpēc caurlaidība aizvērtā stāvoklī samazinās pie 170 V, jo spriegums ir pietiekami augsts, lai pārslēgtu šķidro kristālu no "iesprūduša" caurspīdīgā stāvokļa uz izkliedējošu stāvokli. Visos gadījumos pārslēgšanās ātrums ir pietiekami ātrs <1 s.



7. att. Bistabilo ekrānu caurlaidība un slēgšanās ātrums ar virsmas pretestību 80 Ω/kv.: a) caurlaidība atvērtā stāvoklī; b) caurlaidība aizvērtā stāvoklī; c) kritumlaiks; d) kāpumlaiks. Ekrāni ar pretestību 80 Ω un 344 Ω tika caursisti vēl pirms spriegums sasniedza 150 V un 160 V.

Bistabilo ekrānu fotoattēli redzami 8. att. a–c. Izkliedējošā stāvoklī ekrāns ir necaurspīdīgs, jo tas izkliedē, absorbē un atstaro gaismu. Elektroda sadalošās līnijas ir labi redzamas, jo šķidrais kristāls nepārslēdzas vietās, kur IAO ir noablēts (skat. 8. att. d). To var izskaidrot arī ar to, ka ap asajām malām esošā augstā lauka dēļ palielinās izkliedi izraisošo jonu koncentrācija. Šo jonu koncentrācija kļūst pārāk liela, lai to pārslēgtu uz caurspīdīgu stāvokli. Šo labi redzamo līniju dēļ elektroda sadalīšana ir labāk piemērota ātri pārslēdzošu slēdžu lietojumam.

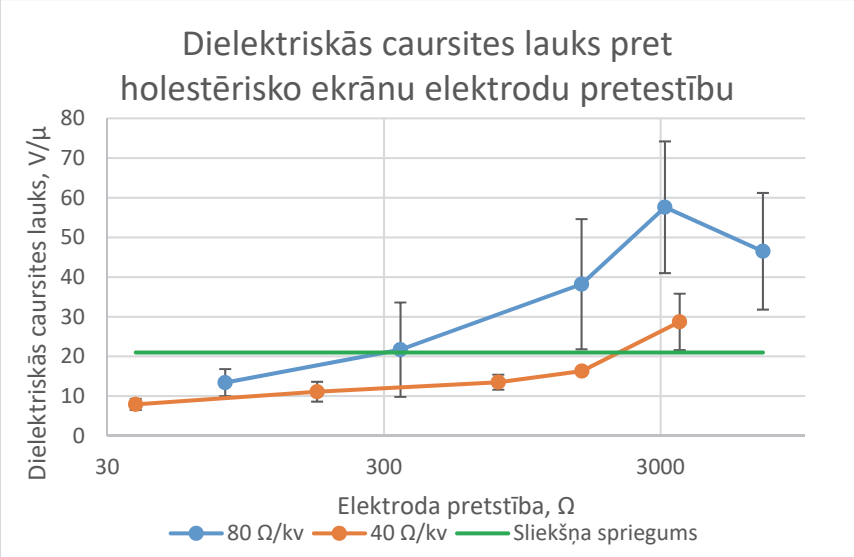
Holestēriskie šķidro kristālu ekrāni tika izgatavoti no pamatnēm ar divu veidu virsmas pretestībām: 80 Ω/kv. un 40 Ω/kv., lai novērtētu, kā virsmas pretestība ietekmē dielektrisko caursiti. Kā redzam 9. att., ekrāni ar mazāku virsmas pretestību tiek vieglāk caursisti – caursites lauka starpība ir ~ 2 reizes. To var izskaidrot ar lielāku strāvu un ātrāku ierīces izlādēšanos, kas rada dielektrisko caursiti. Sliekšņa vērtība abu ekrānu tipam ir 21 V/µm, kas nozīmē, ka ierīcēm jāstrādā pie elektriskā lauka > 40 V/µ. Ekrāniem ar elektrodu 80 Ω/kv. pretestībai vajadzētu būt > 1554 Ω, bet ar 40 Ω/kv. – > 3550 Ω. *Token* paraugiem (80 Ω/kv.) raksturīga arī lielāka rezultātu novirze, ko varētu izskaidrot ar citādāku IAO nogulsnēšanas procesu un zemāku homogenitāti ar lielāku IAO defektu skaitu nekā 40 Ω/kv paraugiem no *JMT*.



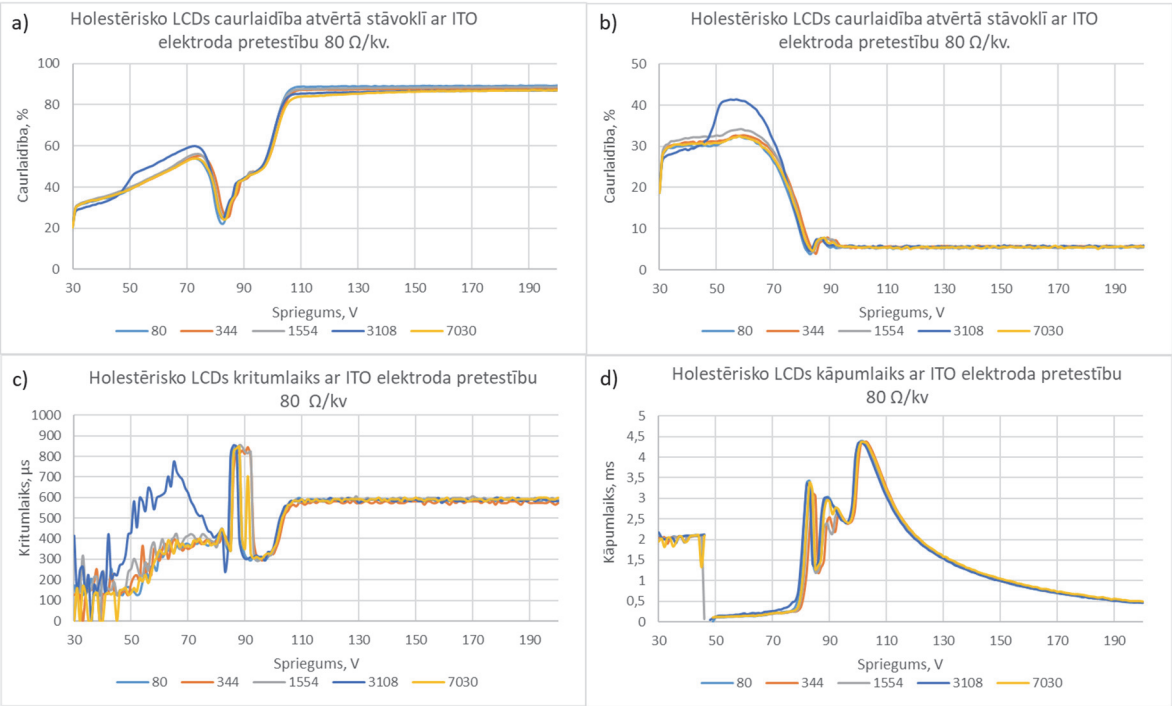
8. att. Bistabilo ekrānu fotogrāfijas: a) bistabilais ekrāns pārslēgts uz izkliedējošu stāvokli; b) ekrāns pārslēgts uz caurspīdīgu stāvokli; c) atdalošās līnijas ir redzamas, jo ap līnijām esošais šķidrais kristāls nav pārslēdzies uz caurspīdīgu stāvokli. Pie sprieguma > 200 V ekrāns pārkarst un pilnībā nepārslēdzas uz caurspīdīgu stāvokli; d) elektrodu sadalošās līnijas mikroskopa attēls. Viena līnija ir uz augšējā elektroda, bet otra – uz apakšējā elektroda.

Abu tipu ekrāniem tika izmērīts slēgšanās ātrums un caurlaidība. Kā var redzēt grafikos 10. un 11. att., caurlaidība atvērtā stāvoklī nesāk samazināties pie augstas pretestības, kā tas notiek bistabilajiem ekrāniem. Jāņem vērā, ka 40 Ω/kv. paraugi tiek caursisti daudz vieglāk, tāpēc visiem paraugiem nav mērījumu līdz 200 V. Slēgšanās sliekšņa vērtība abu pretestību paraugiem ir vienāda ~ 108 V. Caurlaidība atvērtā stāvoklī augstāka ir 40 Ω/kv. slēģiem (89,5–92,4 %), salīdzinot ar 80 Ω/kv. slēģiem (86,9–89,1 %), jo 40 Ω/kv. IAO stikla pamatnes ir pārklātas ar antiatstarojošu pārklājumu. Pārslēgšanas ātrums abu tipu ekrāniem ir vienāds. Varētu sagaidīt, ka zemākas pretestības elektrods ļautu uzlādēt ekrānu ātrāk un slēgšanās ātrums būtu ātrāks, bet šie mērījumi ļauj secināt, ka slēgšanās ātrumu ierobežo šķidrā kristāla īpašības.

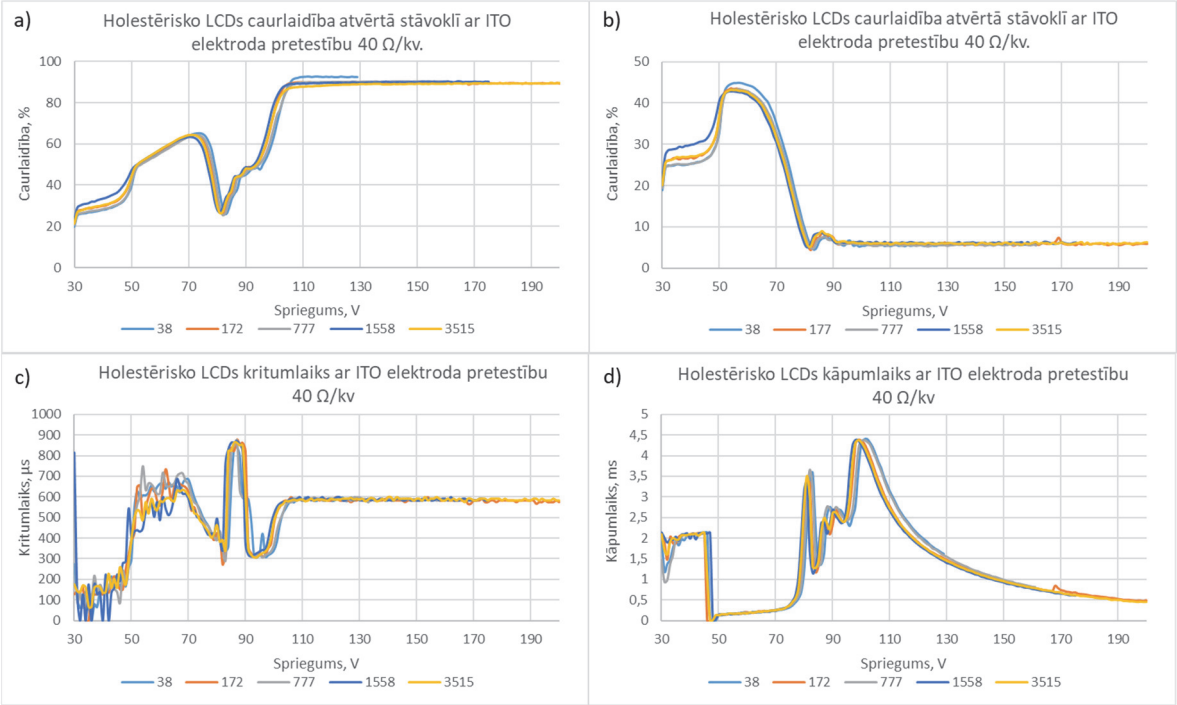
Holestērisko slēģu gadījumā elektroda sadalīšana ir daudz piemērotāka metode nekā bistabilo ierīču gadījumā, jo atdalošajām līnijām ir neliela ietekme uz optiskajām un elektriskajām īpašībām.



9. att. Holestērisko slēģu dielektriskās caursites lauks ar sadalītu elektrodu. Pārslēgšanās slieksnis ir attēlots ar zaļo līniju pie 21 V/µm.



10. att. Holestērisko slēģu caurlaidība un pārslēgšanās ātrums ar 80 Ω/kv. elektrodiem: a) atvērtā stāvokļa caurlaidība mainās no 86,9 % elektrodam ar iedaļas pretestību 7030 Ω līdz 89,1 % 80 Ω nesadalītam elektrodam; b) aizvērta stāvokļa caurlaidība ir 5,5 % visiem ekrāniem; c) kritumlaiks ir vienāds visiem ekrāniem – ~ 580 µs; d) kāpumlaiks pie 200 V visiem ekrāniem ir praktiski vienāds – 0,5 ms.



11. att. Holestērisko slēģu caurlaidība un pārslēgšanās ātrums ar 40 Ω/kv. elektrodiem: a) atvērtā stāvokļa caurlaidība mainās no 89,5 % elektrodam ar iedaļas pretestību 7030 Ω līdz 92,4 % 38 Ω nesadalītam elektrodam; b) caurlaidība aizvērtā stāvoklī mainās no 5,6 % pie 3550 Ω līdz 6 % 38 Ω; c) kritumlaiks ir vienāds visiem ekrāniem – ~580 µs; d) kāpumlaiks pie 200 V visiem ekrāniem ir praktiski vienāds – 0,5 ms.

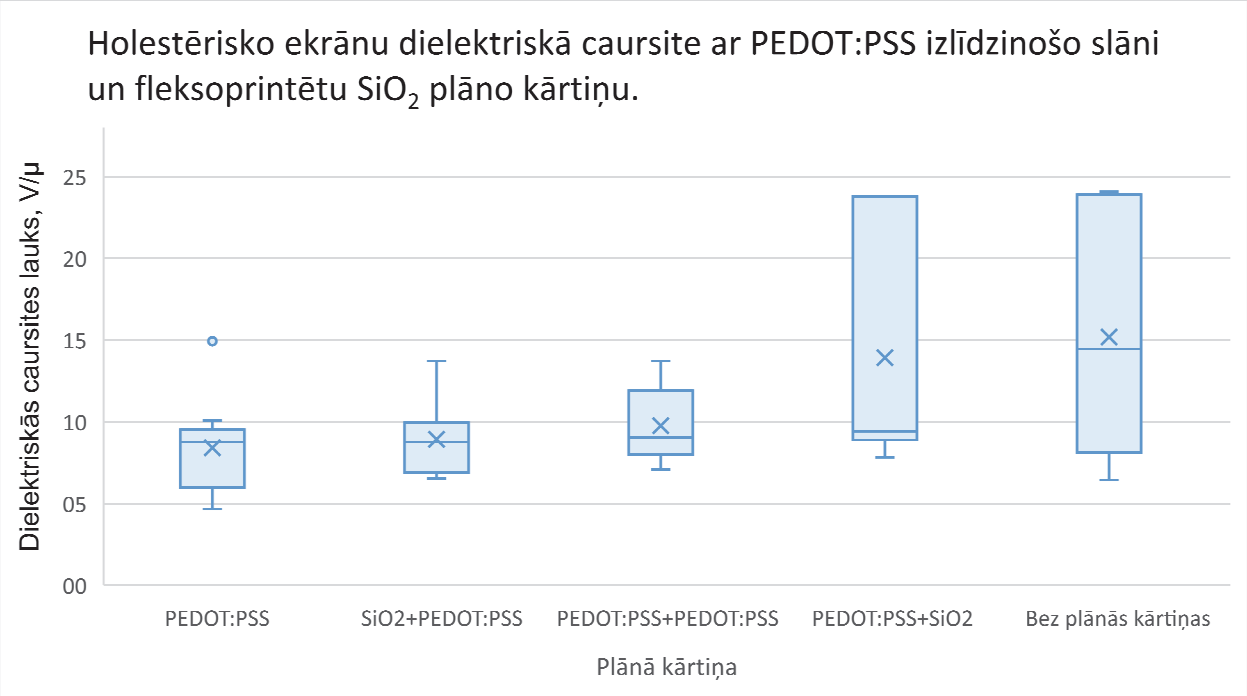
3. Izlīdzinošais slānis

Izmantojot fleksogrāfijas drukas (SiO_2) un sietspiedes metodes (*PEDOT:PSS*), tika izgatavoti četri paraugu veidi, no katra veida vismaz pa 10 paraugiem. Visi ekrāni ar šūnas biezumu 15 µm tika piepildīti ar holestērisko šķidro kristālu. Kā redzams 2. tabula, iegūtais *PEDOT:PSS* slānis bija ļoti nelīdzens. Plānās kārtiņas standartnovirze bija aptuveni 50 nm vai 80 % no kopējā biezuma. Dažiem paraugiem *PEDOT:PSS* slānis tika nogulsnēts uz SiO_2 plānās kārtiņas, kas iegūts ar fleksogrāfijas metodi. Vienai paraugu grupai fleksoprintēts SiO_2 tika nogulsnēts uz *PEDOT:PSS*. Caursites lauka intensitāte paraugiem ar un bez izlīdzinošā slāņa ir redzama 12. att. Kā redzams grafikā, izmantojot *PEDOT:PSS* slāni, caursites lauks samazinās. Iegūtie rezultāti skaidri parāda, ka ar sietspiedi iegūts *PEDOT:PSS* slānis neuzlabo ekrānu elektriskās īpašības. Galvenais lauka intensitātes samazināšanas cēlonis ir nelīdzenā *PEDOT:PSS* virsma.

2. tabula

PEDOT:PSS un SiO_2 plāno kārtiņu biezumi.

Nr.	Plānās kārtiņas apzīmējums	Biezums, nm
1	*PEDOT:PSS*	65 ± 52
2	SiO_2 + *PEDOT:PSS*	225 ± 60
3	2 x *PEDOT:PSS*	130 ± 104
4	*PEDOT:PSS* + SiO_2	225 ± 60



12. att. Dielektriskās caursites intensitāte šķidro kristālu ekrānos ar vairākām *PEDOT:PSS* un SiO_2 plāno kārtiņu kombinācijām starp IAO elektrodu un šķidrā kristāla slāni. Krustiņi apzīmē vidējās vērtības un līnijas mediānas.

4. Plānās kārtiņas

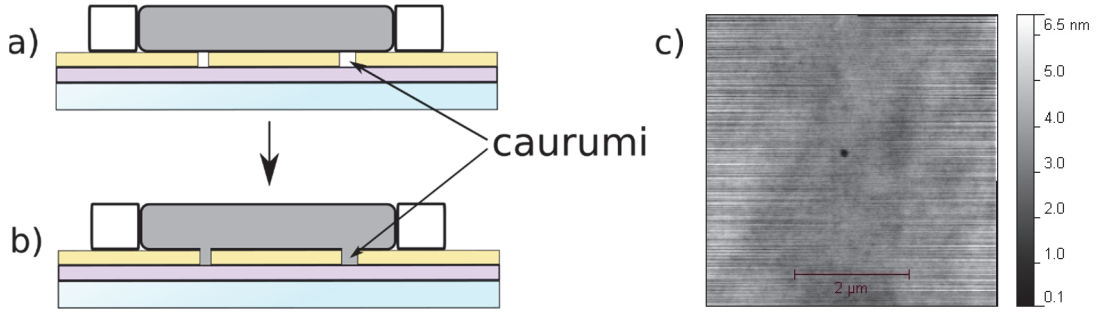
Plāno kārtiņu pretestība un I–V līknes

Plānajām kārtiņām tika noteiktas elektriskās īpašības, lai noteiktu to lomu dielektriskās caursites samazināšanā. Plānās kārtiņas tika nogulsnētas ar fleksogrāfijas drukas un magnetrona uzputināšanas metodēm.

Uzreiz pēc teflona gredzena piepildīšanas ar šķidro metālu multimetra uzrāda pretestību vairāki desmiti MΩ. Pēc vairākām minūtēm pretestība samazinās un nostabilizējas. Šķidrais metāls slikti slapina plāno kārtiņu, tādēļ paiet laiks, kamēr tas piepilda caurumus plānajā kārtiņā (skat. 13. att.). Plāno kārtiņu pretestības mērījumi ir redzami 3. tabula. Īpatnējā pretestība nav atkarīga no plānās kārtiņas biezuma. Pretestība uzputinātajām plānajām kārtiņām atšķiras

ievērojami – 120 nm plānās kārtiņas pretestība ir tikai 10 kΩ, bet divreiz biezākas plānās kārtiņas pretestība ir ~ 200 reižu lielāka. Izskaidrojums tika atrasts, veicot plāno kārtiņu atomspēku mikrosopijas (ASM) mērījumus. Plāno kārtiņu virsma ir ļoti gluda, bet atsevišķās vietās plānajā kārtiņā tika atrasti mazi caurumi, kas radušies to nogulsnēšanas laikā. Caurumu diametrs parasti bija pāris simti nm. Pretestības variēšana var tikt izskaidrota ar caurumu daudzumu plānajā kārtiņā.

Fleksogrāfijas druka ir slapjā metode, kur plānā kārtiņa tiek nogulsnēta no šķidruma atmosfērā. Ja uz pamatnes ir netīrums, materiāls to neslapina un ap to izveidojas caurums. Ar lielu iespējamību nākamais šķidrā materiāla slānis arī izveido caurumu uz jau esošajiem caurumiem. Magnetrona uzputināšanas procesā ir lielāka iespēja, ka atomi adsorbēsies arī uz netīrumiem un tos pārklās. Palielinot biezumu, pretestība pieaug vairākas reizes, liekot domāt, ka caurumu daudzum un/vai to izmērs ievērojami samazinās.



13. att. a) Teflona gredzens ar iekšējo laukumu 145 mm^2 tiek piepildīts ar šķidro metālu; b) caurumi plānajā kārtiņā piepildās ar šķidro metālu, samazinot pretestību starp kontaktiem; c) ar fleksogrāfijas druku nogulsnētas SiO_2 plānās kārtiņas ASM attēls.

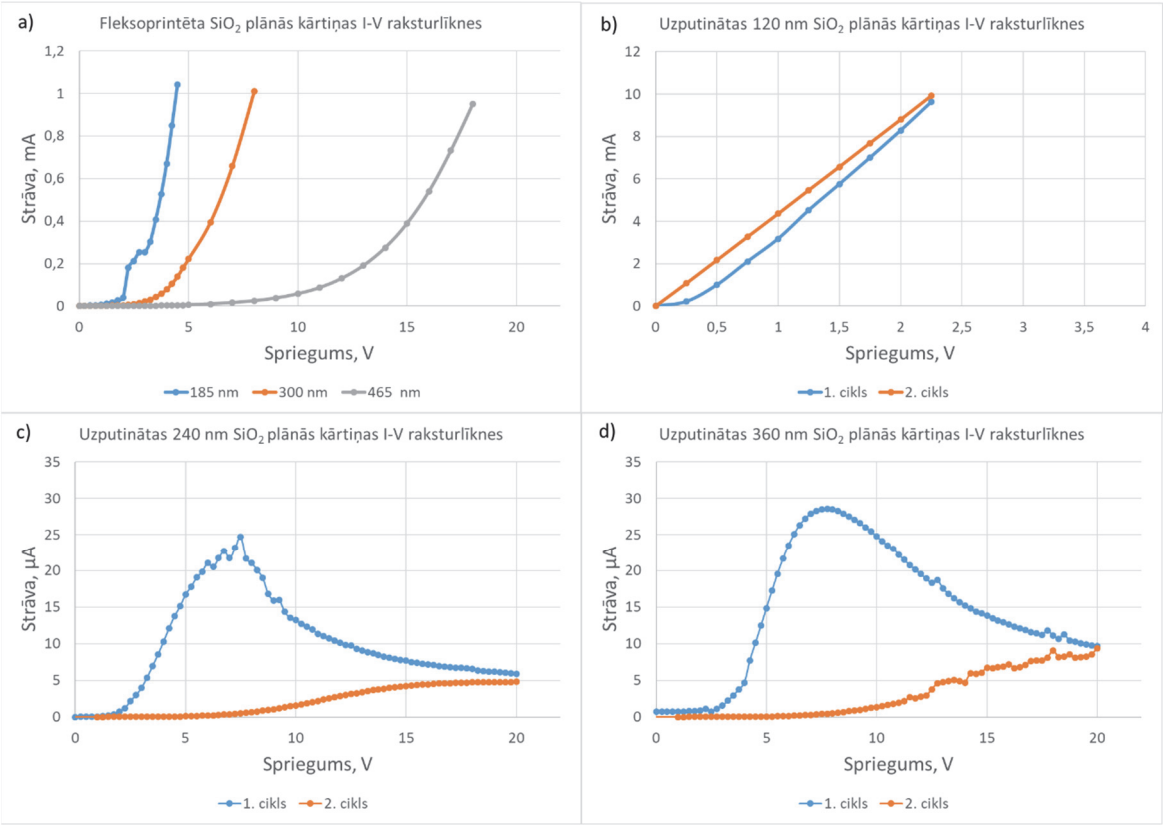
3. tabula

Pretestības mērījumi SiO_2, kas nogulsnēts ar fleksogrāfijas druku un reaktīvo magnetrona uzputināšanu. Īpatnējā pretestība tika aprēķināta, izdalot 145 mm^2 pretestību ar plānās kārtiņas biezumu.

Nogulsnēšanas metode	**Biezums, nm**	**Pretestība 145 mm^2, MΩ**	**Īpatnējā pretestība, kΩ/nm**
Fleksogrāfija	185	0,55	3
	300	1,1	3,7
	465	1,45	3,1
Reaktīvā magnetrona uzputināšana	120	0,01	0,08
	240	2	8,3
	360	10	27,8

Fleksoprintētu SiO_2 I–V raksturlīknes ir redzamas 14. a) att. Straujais strāvas pieaugums liecina par dielektriskās caursites procesu. Dielektriskās caursites spriegums pieaug līdz ar plānās kārtiņas biezuma pieaugumu no 10,8 V/µm līdz aptuveni 17 V/µm. Uzputinātu plāno

kārtiņu I–V raksturlīknes ir redzamas 14. att. b–d). Plānā kārtiņa ar biezumu 120 nm neuzrāda dielektriskas īpašības, kas saskan ar pretestības mērījumiem, kas uzrādīja ļoti zemu pretestību. Strāva 240 un 300 nm plānajām kārtiņām sāk pieaugt pie 2 un 2,75 V, kas ir līdzīgi kā viena slāņa fleksoprintētajam SiO_2. Kad strāva sasniedz 25–30 µA, tā sāk samazināties. Otrajā mērīšanas ciklā strāva sāk pieaugt pie daudz augstāka sprieguma 7–8 V. No šiem mērījumiem var secināt, ka paraugiem ar 240 un 360 nm plānajām kārtiņām notiek pašdziedēšanās. Acīmredzot dielektriskās caursites laikā temperatūra sasniedz pietiekami augstu vērtību, lai IAO sadalītos un caursites vietā izveidotos nevadošs defekts. Atšķirībā no uzputinātām filmām pašdziedēšanās nav novērojama fleksoprintētajām plānajām kārtiņām. Par iemeslu varētu būt plānās kārtiņas sadalīšanās temperatūrā, jo fleksoprintēts SiO_2 satur polisiloksāna sadalīšanās reakcijas blakusproduktus.



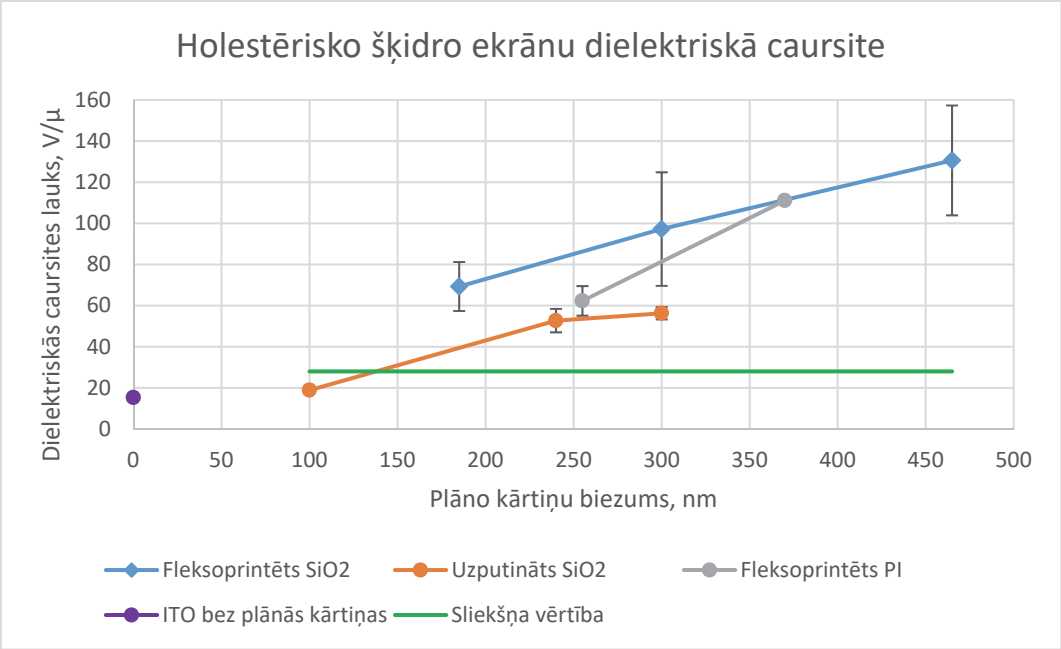
14. att. Fleksoprintētu un uzputinātu SiO_2 strāvas-sprieguma raksturlīknes: a) 185 nm plānajai kārtiņai caursite notiek pie 2 V, bet 300 nm plānajai kārtiņai caursite notiek pie 3,5 V. Biezākajai 465 nm plānajai kārtiņai strāvas pieaugums nav tik straujš, un caursite notiek pie apmēram 8 V; b) uzputinātas 120 nm SiO2 plānās kārtiņas I–V raksturlīknes. Strāva pieaug lineāri uzreiz jau pie 0,25 V; c) 240 nm SiO_2 plānās kārtiņas I–V raksturlīknes. Dielektriskā caursite sākas pie 2 V. Strāva sasniedz maksimumu pie 24 µA un 7,5 V un tad samazinās līdz 5 µA. Otrajā ciklā strāva sāk pieaugt pie 7 V un sasniedz 5 µA; d) 360 nm SiO_2 plānās kārtiņas I–V raksturlīknes. Strāva sasniedz 28 µA pie 7,75 V un tad samazinās līdz 10 µA. Otrajā ciklā strāva sāk pieaugt pie 8 V un sasniedz 10 µA.

Viedo logu izmantošanā ļoti svarīga ir arī augsta caurlaidība un bezkrāsains izskats. Fleksoprintēts SiO_2 pārklājums samazina caurlaidību par 6–8 %, salīdzinot ar nepārklātu IAO pamatni. Tas skaidrojams ar plānās kārtiņas interferenci un blakusproduktu rašanos polisiloksāna sadalīšanās procesā, kas palielina absorbciju. Tas izskaidro arī dzelteni-brūno paraugu iekrāsojumu. Uzputinātais SiO_2 tieši pretēji palielina caurlaidību pat par 5 %. Uzputināta SiO_2 gaismas laušanas koeficients ir 1,5, kas darbojas kā antiatstarojošs slānis starp IAO (n = 1,9) un gaisu (n = 1).

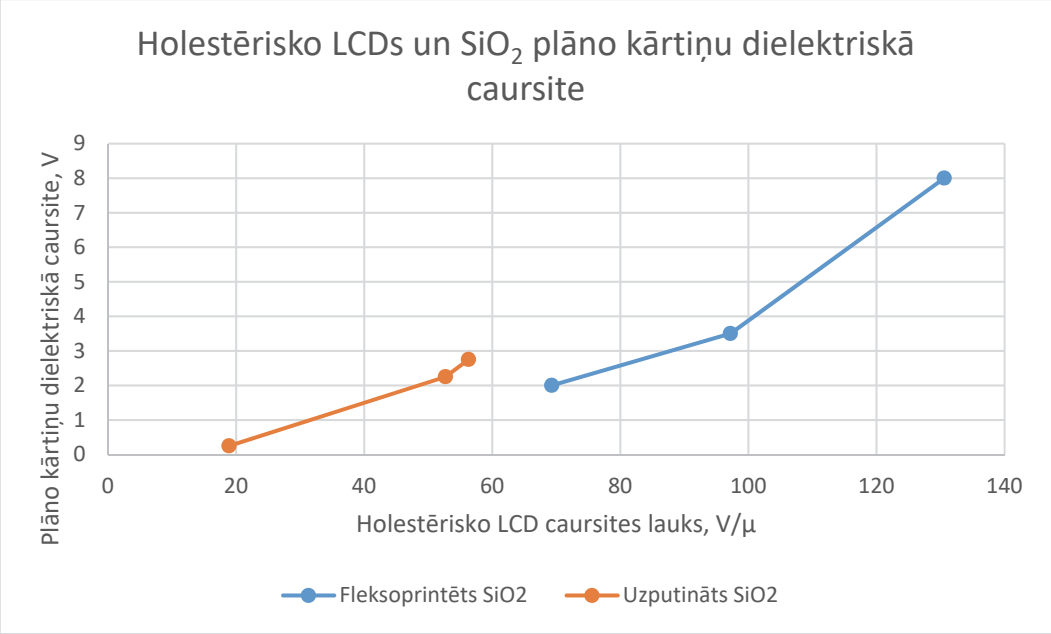
Dielektriskā caursite ekrānosar dielektriskajām plānajām kārtiņām

Holestēriskie slēģi tika izgatavoti ar trīs veida plānajām kārtiņām: fleksoprintētu SiO_2 un PI un uzputinātu SiO_2. Plāno kārtiņu biezumi bija robežās 100–465 nm. Paraugiem ar fleksoprintētām SiO_2 plānajām kārtiņām ir visaugstākā noturība pret dielektrisko caursiti, un pat 185 nm biezs slānis ir pietiekams, lai izgatavotu noturīgu holestērisko slēģi (skat. 15. att.). Fleksoprintētam PI ir nedaudz zemāka noturība pret dielektrisko caursiti, bet uzputinātam pārklājumam ir viszemākā noturība pret dielektrisko caursiti. Neskatoties uz to, paraugi ar plāno kārtiņu ar biezumu > 240 nm ir pietiekami noturīgi, lai pārslēgtu slēģus ar ± 200 V (40 V/µm).

Plāno kārtiņu dielektriskā caursite atkarībā no šķidro kristālu ekrānu dielektriskās caursites ir attēlota 16. att. Kā redzams grafikā, ir labi redzama sakarība starp šīm abām vērtībām, un ekrāna noturību pret dielektrisko caursiti nosaka plānās kārtiņas kvalitāte nevis netīrumi, kas iekļuvuši izgatavošanas procesa laikā.

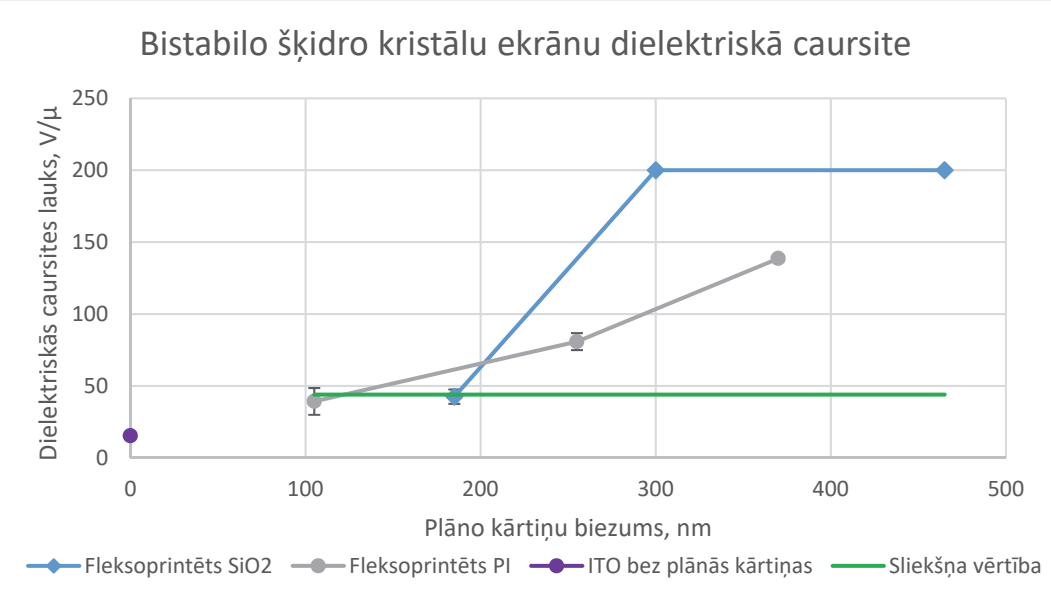


15. att. Holestērisko slēģu dielektriskā caursite ar dažāda biezuma plānajām kārtiņām: ar fleksogrāfijas druku nogulsnētiem SiO_2 un PI un uzputinātu SiO_2. Pārslēgšanās sliekšņa vērtība attēlota ar zaļu krāsu ar vērtību 28 V.



16. att. Plāno kārtiņu dielektriskās caursites lauks un dielektriskās caursites lauks šķidro kristālu ekrāniem ar tām pašām SiO_2 plānajām kārtiņām.

Bistabilo ekrāni tika izgatavoti ar fleksoprintētām SiO_2 un PI plānajām kārtiņām ar biezumu 100–465 nm. Kā redzams 17. att., līdzīgi kā holestērisko slēgu gadījumā, visaugstākā noturība pret dielektrisko caursiti ir paraugiem ar fleksoprintētu SiO_2. Paraugi ar 300 un 465 nm PI plānajām kārtiņām netika caursisti, izmantojot esošo aprīkojumu ar lauku 200 V/µm. Lai izgatavotu izturīgu ierīci, plāno kārtiņu biezumam ir jābūt vismaz > 200 nm.



17. att. Bistabilo šķidro kristālu ekrāni ar fleksoprintētu SiO_2 un PI. Slēgšanās sprieguma vērtība ir attēlota biezākajam PI ar visaugstāko sliekšņa vērtību pie 44 V/µm. Mērījumu limits 200 V/µm. Paraugi ar PI > 300 nm netika caursisti. Kā atskaites punkts ir izmantota caursite paraugiem bez plānajām kārtiņām.

Bistabilo ekrānu un holestērisko slēģu slēgšanās ātrums un caurlaidība

Visu trīs veidu holestēriskajām ierīcēm tika izmērīta caurlaidība un slēgšanās ātrums. Rezultāti ir apkopoti 4. tabula. Caurlaidība un kritumlaiks mainās atkarībā sprieguma, bet ir konstantipēc sliekšņa vērtības. Paraugiem ar fleksoprintētu SiO_2 sliekšņa vērtība ir aptuveni 105, un mainās 3 V robežās atkarībā no plānās kārtiņas biezuma. Tikai kāpumlaiks nepārtraukti samazinās, palielinot spriegumu. Pārslēgšanās uz atvērtu stāvokli ir salīdzināta kā spriegums, kas nepieciešams, lai pārslēgtu uz atvērtu stāvokli 1 ms laikā. Starpība starp dažādiem kārtiņu biezumiem ir tikai pāris voltu. Paraugiem ar uzputinātu SiO_2, sliekšņa vērtība ir augstāka – 117 V. Arī kāpumlaika spriegums ir par 20 V augstāks. Sliekšņa spriegumu starpība ir saistīta ar dielektrisko konstanti – uzputinātajam SiO_2 dielektriskā konstante ir 3,9, bet fleksoprintētam SiO_2 saskaņā ar materiāla specifikāciju dielektriskā konstante ir 14. Fleksoprintēta PI ekrānu sliekšņa vērtība mainās ievērojami – no 112 V 105 nm plānajai kārtiņai līdz 138 V 370 nm plānajai kārtiņai. Kāpumlaika spriegums arī ir augstāks nekā paraugiem ar līdzīga biezuma SiO_2 plāno kārtiņu. Pārslēgšanas spriegums ekrāniem ar 370 nm PI plāno kārtiņu ir par 40 V augstāks nekā ekrāniem ar 485 nm fleksoprintētu SiO_2. Galvenais šīs starpības iemesls ir zemāka dielektriskā konstante ($\varepsilon = 2{,}9$) nekā SiO_2 plānajām kārtiņām.

Caurlaidība atvērtā stāvoklī ir atkarīga no pamatnes caurlaidības. Ekrāni ar viszemāko caurlaidību ir izgatavoti no pamatnēm ar viszemāko caurlaidību. Galvenais iemesls ir nogulsnēšanas metode. Fleksogrāfijas drukas metodē SiO_2 tiek iegūts polisiloksānu sadalīšanās reakcijas rezultātā, un tā rezultātā iegūtie blakus produkti absorbē gaismu. Holestēriskajiem slēģiem ar plānās kārtiņa biezumu virs 300 nm ir labi redzams brūngans iekrāsojums. Otrs faktors, kas samazina pamatnes caurlaidību, ir gaismas laušanas koeficienta starpība. Uzputināts SiO_2 ($n = 1{,}5$) un PI ($n = 1{,}66$) ir labāks antiatstarojošs slānis starp IAO ($n = 1{,}9$) un gaisu ($n = 1$) nekā fleksoprintēts SiO_2 ($n = 1{,}7$).

Ekrāniem ar uzputinātu SiO_2 ir viszemākā caurlaidība aizvērtā stāvoklī. Iemesls šai starpībai ir elektroda virsmas mijiedarbība ar šķidro kristālu ekrānu. Fleksoprintēta plānā kārtiņa ir ļoti gluda, bet uzputinātai plānajai kārtiņai ir lielāks virsmas raupjums, kas ierosina šķidrā kristāla izkliedējošo stāvokli.

4. tabula

Holestērisko ekrānu caurlaidības un slēgšanās ātruma kopsavilkums.
Attēlotie rezultāti iegūti pie 140 V.

Nogulsnēšanas metode	Plānā kārtiņa	Plānās kārtiņas biezums, nm	Dielektriskā konstante, ε	ITO stikla un plānās kārtiņas caurlaidība pie 550 nm, %	Caurlaidība atvērtā stāvoklī, %	Caurlaidība aizvērtā stāvoklī, %	Spriegums, lai pārslēgtu atvērtā stāvoklī 1 ms laikā, V	Kritumlaiks, ms
Fleksogrāfijas druka	SiO_2	185	14	81,7	83,5	7,3	141	0,56
		300		82,6	83,6	7,2	144	0,58
		485		79,9	82,5	7,4	144	0,57
	PI	105	2,9	92,7	89,9	5,6	159	0,64
		255		92	91,2	7,1	176	0,52
		370		91,3	89	6,3	186	0,56
Uzputināšana ar magnetronu	SiO_2	240	3,9	88,9	87,7	4,4	165	0,55
		300		93,7	87,8	6	168	0,56

Abu tipu bistabilo šķidro kristālu ekrāniem tika izmērīta caurlaidība un slēgšanās ātrums. Rezultāti ir apkopoti 5. tabula. Sliekšņa vērtība SiO_2 ir starp 140–150 V visiem trīs biezumiem, kamēr pārslēgšanās sprieguma vērtība PI pieaug no 170 V līdz 220 V. To var izskaidrot ar lielāku dielektrisko konstanti SiO_2 ($\varepsilon = 14$) kā PI ($\varepsilon = 2{,}9$). Caurlaidība atvērtā stāvoklī līdzīgi kā holestērisko slēģu gadījumā korelē ar pamatnes caurlaidību.

Līdzīgi kā ar ekrāniem ar sadalītu elektrodu, paraugiem novērojama pārdraivēšana. Tas ir iemesls, kāpēc kāpumlaiks ir tik mazs, jo tas aizņem ļoti mazu laiku, lai pārslēgtu no 50 % "aizvērtā stāvokļa" uz atvērtu stāvokli.

PI ir vairāk piemērots viedo logu lietojumam, lielākoties pateicoties augstākai caurlaidībai atvērtā stāvoklī. Pārdraivēšanu var novērst, izmantojot zemāku spriegumu, lai pārslēgtu uz atvērto stāvokli, un augstāku spriegumu, lai pārslēgtu uz izkliedējošo stāvokli.

5. tabula

Bistabilo ekrānu slēgšanās ātruma un caurlaidības ar SiO_2 un PI fleksoprintētām plānajām kārtiņām. Attēlotie rezultāti iegūti pie 200 V. SiO_2 plānajām kārtiņām caurlaidība aizvērtā stāvoklī iegūta, mērot pie 130 V.

Nogulsnēšanas metode	Plānā kārtiņa	Plānās kārtiņas biezums, nm	Dielektriskā konstante, ε	ITO stikla un plānās kārtiņas caurlaidība pie 550 nm, %	Caurlaidība atvērtā stāvoklī, %	Caurlaidība aizvērtā stāvoklī, %	Kāpumlaiks, ms	Kritumlaiks, ms
Fleksogrāfijas druka	SiO_2	185	14	81,7	84,1	3,9	62	876
		300		82,6	82,3	3,6	56	707
		485		79,9	78,5	3,1	30	359
	PI	105	2,9	92,7	87,6	3,3	170	601
		255		92	85	2,8	194	929
		370		91,3	81	2,6	298	758

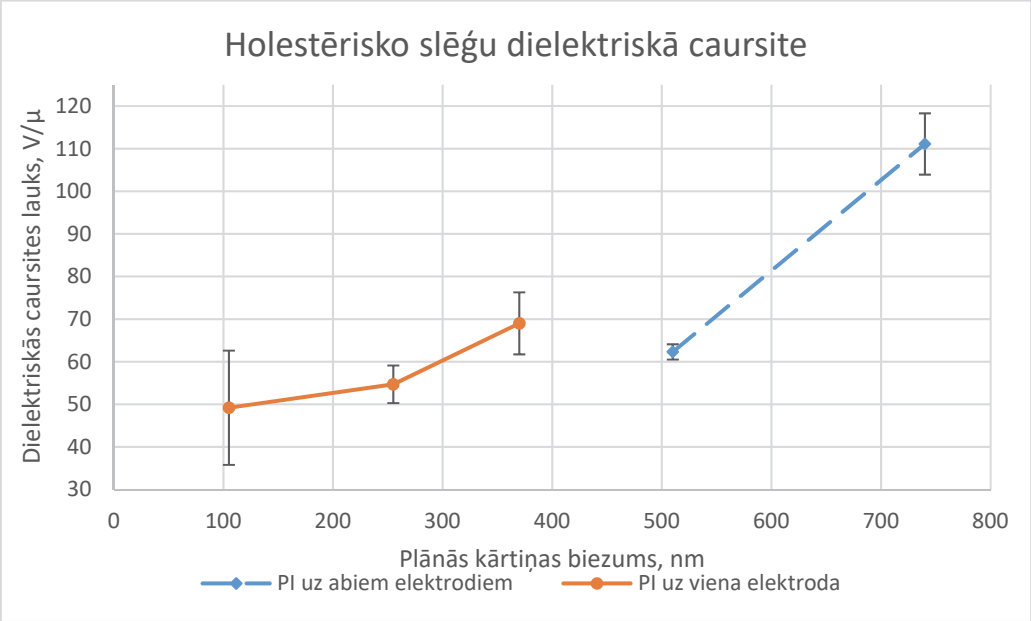
Nesimetriska dizaina šķidro kristālu ekrāns

Tika izgatavoti holestēriskie slēģi ar PI plāno kārtiņu tikai uz viena elektroda un salīdzināti ar slēdžiem, kur plānā kārtiņa ir nogulsnēta uz abiem elektrodiem. Ekrāni, izmantojot tikai vienu plāno kārtiņu, samazinātu ražošanas izmaksas.

Nesimetriskiem paraugiem tika noteikts dielektriskās caursites lauks un salīdzināts ar rezultātiem, kas aprakstīti nodaļā "Dielektriskā caursite *LCD*s ar dielektriskajām plānajām kārtiņām". Netika testēti ekrāni ar 105 nm plānajām kārtiņām uz abiem elektrodiem, tāpēc biezums nepārklājas (skat. 18. att.). Grafikā ir redzams, ka paraugam ar vienu 355 nm plāno kārtiņu ir tikpat liela dielektriskā noturība kā paraugam ar 255 + 255 = 510 nm plānajām kārtiņām. Acīmredzot vienai biezākai plānajai kārtiņai ir mazāk dielektrisko caursiti veicinošu defektu.

Pārslēgšanās ātrums un caurlaidība ir tikpat svarīgi parametri kā noturība pret dielektrisko caursiti. Holestēriskie slēģi tiek testēti, pieliekot spriegumu tikai vienam elektrodam, tāpēc ir nepieciešams pārbaudīt, vai ir nozīme tam, pie kura elektroda tiek pielikts spriegums – ar vai bez plānās kārtiņas. Paraugi tika testēti, pieliekot spriegumu gan vienam, gan otram elektrodam, un salīdzinātas optiskās un elektriskās īpašības. Kā redzams 6. tabula rezultāti ir praktiski identiski, kas nozīmē, ka asimetriskais dizains neietekmē slēgšanos.

Lai novērtētu, kura dizaina ekrāni slēdzas ātrāk un ir ar lielāku caurlaidību, tika salīdzinātas optiskās un elektriskās īpašības paraugam ar vienu 255 nm plāno kārtiņu un ekrānu ar divām 105 + 105 = 210 nm plānajām kārtiņām. Pārslēgšanās ātruma starpība ir neievērojama, bet caurlaidība atvērtā stāvoklī ar divām plānajām kārtiņām ir par 2 % lielāka. Ir vairāki iemesli, kāpēc caurlaidība simetriska dizaina paraugam ir lielāka. Pirmkārt, PI slānis darbojas kā antiatstarojošs pārklājums, un divas plānās kārtiņas palielina caurlaidību vairāk nekā viena. Otrkārt, nesimetriska dizaina plānais pārklājums ir par 25 % biezāks ar zemāku caurlaidību.



18. att. Dielektriskās caursites lauks holestēriskajiem *LCDS* ar plāno kārtiņu uz vienu (nepārtrauktā līnija) un abiem (pārtrauktā līnija) elektrodiem. Plāno kārtiņu biezumi vienā ekrānā ir saskaitīti kopā, piemēram, ekrānam ar plānās kārtiņas biezumu 510 nm ir divas plānās kārtiņas ar biezumu 255 nm.

6. tabula

Nesimetrisku holestērisko ekrānu caurlaidība un slēgšanās ātrums
(Rezultāti tika mērīti pie 200 V)

PI biezums, nm	Elektrods uz kura ir pielikts spriegums	Caurlaidība atvērtā stāvoklī, %	Caurlaidība aizvērtā stāvoklī, %	Kāpumlaiks, μs	Kritumlaiks, ms
105	1	88,2	6,2	463	0,58
	2	88,3	6,4	471	0,57
255	1	87,4	5,6	555	0,59
	2	87,5	5,6	556	0,60
370	1	87,2	5,9	611	0,60
	2	87,2	5,9	615	0,60

5. Dielektriskās caursites mehānisms šķidro kristālu ekrānos

Dielektriskā caursite notiek divos materiālos: plānajā kārtiņā un šķidrajā kristālā. Dielektriskās caursites noturība augsti attīrītiem šķidrumiem ir diapazonā 1–4 MV/cm [5]. Caursites noturība augsti attīrītiem cietvielu dielektriķiem ir 10 MV/cm [11]. Dielektriskās caursites noturība holestērisko un bistabilo šķidro kristālu ekrāniem ir daudz zemāka: 0,08–0,15 MV/cm. Šīs vērtības ir zemākas, bet salīdzināmas kā Dirkinga pētījumā: 0,23–0,78 MV/cm. Iemesls varētu būt tas, ka Dirkings savos pētījumos ir izmantojis maza izmēra paraugus (1,5 cm^2), kur dielektriskās caursites iespējamība ir mazāka.

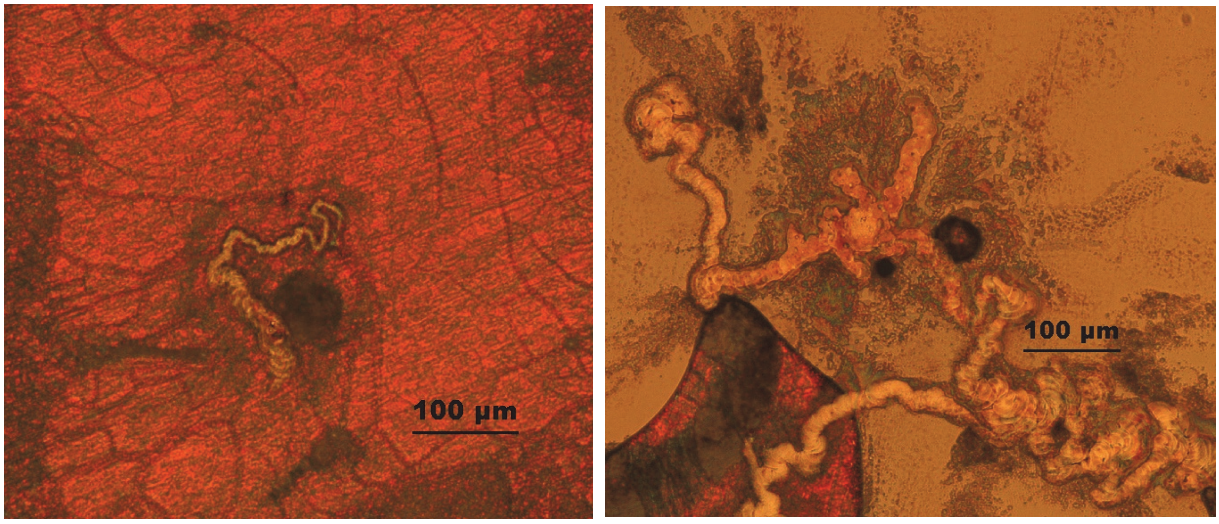
Bistabilo un holestērisko šķidro kristālu dielektriskās konstantes nav mērītas, bet varam pieņemt, ka tās ir 3,5–10, kā minēts citos pētījumos. Dielektriskās konstantes vērtības ir salīdzināmas ar plāno kārtiņu dielektriskajām konstantēm. Šķidrā kristāla biezums ir 20–100 reižu lielāks, tāpēc lielākā daļa elektriskā lauka samazinās uz šķidrā kristāla nevis dielektriskās plānās kārtiņas. Holestēriskā šķidrā kristāla sliekšņa vērtība, neizmantojot plāno kārtiņu, ir ~ 108 V. Izmantojot dielektrisko plāno kārtiņu, sliekšņa vērtība tiek palielināta, jo plānā kārtiņa samazina uz šķidro kristālu krītošo lauku. Atkarībā no materiāla pieaugums sasniedz 30 V. Izmanojot ar fleksogrāfijas druku nogulsnētu SiO_2 plāno kārtiņu, sliekšņa vērtība praktiski nepieaug. Izmantojot poliimīdu, caursites sliekšņa pieaugums ir ~ 8 V/100 nm holestēriskajām un ~20 V/100 nm bistabilajām ierīcēm. Uzputināts SiO_2 palielina sliekšņa vērtību par ~ 3 V/100 nm. Sliekšņa vērtības pieaugums ir ļoti mazs, salīdzinot ar dielektriskās caursites sprieguma pieaugumu 350–1850 V. Tas nozīmē, ka elektriskā lauka samazinājumam uz šķidro kristālu ir ļoti maza ietekme uz dielektriskās caursites noturības pieaugumu.

Pēc šķidrā kristāla ekrāna dielektriskās caursites tās vietā paliek melns punkts, un ir neiespējami noteikt caursiti izraisijušo defektu. Dielektriskās caursites ātrums netika mērīts, bet, mērot pārslēgšanās ātrumu, tika secināts, ka dielektriskā caursite notiek uzreiz pēc sprieguma pielikšanas, kas ļauj izslēgt termisko, erozijas un elektroķimisko caursites mehānismu, jo šie mehānismi notiek vairāku sekunžu laikā un vēl ilgāk.

Šķidro kristālu ekrānos bez dielektriskās plānās kārtiņas dielektrisko caursiti visticamāk izraisa defekts elektrodā, kur elektriskais lauks tiek palielināts un elektroni tiek iedzīti šķidrajā kristālā. Ja tiek izmantota plānā kārtiņa, elektroni tiek iedzīti šķidrajā kristālā caur carumiem plānajā kārtiņā. Plānā kārtiņa strādā kā strāvu samazinošs slānis. Šie elektroni lauka dēļ iegūst lielāku enerģiju nekā zaudē sadursmju laikā un izsit ārā citus elektronus, tādējādi ierosinot lavīnas procesu. Kad lavīnas process sasniedz sliekšņa vērtību, strāva pieaug un pieliktais lauks sabrūk. Abi elektrodi tiek savienoti ar vadošu kanālu. Procesu var novērot kā dzirksteli. Augstās temperatūras dēļ šķidrais kristāls sadalās, un kušanas dēļ elektroda virsma tiek sabojāta. Dielektriskā caursite izpaužas divos veidos:

1. notiek pašdziedēšanās, un šķidro kristālu ekrāns joprojām darbojas, bet dielektriskā caursite paliek kā neliels defekts;

2. dielektriskā caursite izveido vadošu kanālu, šķidrais kristāls sadalās lielā laukumā, un šķidrā kristāla ekrāns vairs nepārslēdzas. Augstās temperatūras dēļ stikls var uzkarst un saplaisāt (skat. 19. att.).



19. att. Dielektriskā caursite holestēriskajos šķidrā kristāla ekrānos: a) pašdziedēšanās efekts; b) ap dielektrisko caursiti šķidrais kristāls sadalījies gāzē.

SECINĀJUMI

1. Šķidro kristālu ekrāniem bez plānajām kārtiņām vai citām modifikācijām ir ļoti zema noturība pret dielektrisko caursiti un liela elektriskā lauka standartnovirze. Elektroda virsmas raupjums vairāku nm robežās neietekmē dielektriskā caursites lauka intensitāti.
2. Nehomogēns *PEDOT:PSS* izlīdzinošais slānis samazina šķidro kristālu ekrānu noturību pret dielektrisko caursiti.
3. Šķidro kristālu ekrāniem var palielināt dielektriskās caursites noturību, ja elektrods tiek sadalīts joslās, kur vienas joslas pretestība ir lielāka par 1,5 kΩ. Diemžēl sadalošās līnijas ir redzamas caurspīdīgā ekrāna stāvoklī, tāpēc šī metode ir labāk piemērota ātri slēdzošiem holestēriskajiem slēdžiem.
4. Škidro kristālu ekrāniem ar fleksodrukāšanas metodi nogulsnētiem 200–450 nm SiO_2 un poliimīda plānajām kārtiņām ir augstāks dielektriskās cauristes lauks nekā ierīcēm ar uzputinātām SiO_2 plānajām kārtiņām, bet ir zemāka optiskā caurlaidība un novērojams krāsojums. Viedajiem logiem un slēdžiem krāsojums nav vēlams.
5. Galvenais dielektriskās caursites iemesls šķidrajos kristālu ekrānos ir caurumi plānajās kārtiņās ar izmēru pāris simti nm. Šķidrajos kristālu ekrānos caursite notiek ar elektronu lavīnas mehānismu.
6. Slēgšanās ātrums holestēriskā šķidrā kristāla ekrānam ar 40 Ω/kv un 80 Ω/kv IAO elektrodu ir vienāds. Tas liecina, ka pārslēgšanās ātrumu ierobežo šķidrais kristāls nevis ierīces uzlādēšanās ātrums. Zemākas pretestības elektroda izmantošana nepalielinās slēgšanās ātrumu.
7. Asimetriskam ekrāna dizainam, kur ar plāno dielektrisko kārtiņu pārklāts tikai viens elektrods, ir augstāka noturība pret caursiti nekā ekrāniem ar dielektriskajām plānajām kārtiņām uz abiem elektrodiem ar vienādu kopējo biezumu. Gaismas caurlaidība atvērtā stāvoklī ar tikai vienu plāno kārtiņu ir zemāka par 2–3 %, jo dielektriskā plānā kārtiņa darbojas kā antiatstarojošs slānis starp IAO elektrodu un šķidro kristālu.
8. Viedo logu un 3D telpisko ekrānu lietojumam kā dielektriskais aizsargslānis vislabāk piemērotas ir ar magnetrona uzputināšanas metodi nogulsnētas 200–300 nm biezas silīcija dioksīda kārtiņas, jo tām piemīt augsta caurlaidība un augsta noturība pret dielektrisko caursiti.

LITERATŪRAS SARAKSTS

[1] D. J. Gardiner and H. J. Coles, "Highly anisotropic conductivity in organosiloxane liquid crystals," *J. Appl. Phys.*, vol. 100, no. 12, pp. 1–8, 2006.

[2] K.-H. Kim, B.-H. Yu, S.-W. Choi, S.-W. Oh, and T.-H. Yoon, "Dual mode switching of cholesteric liquid crystal device with three-terminal electrode structure," *Opt. Express*, vol. 20, no. 22, p. 24376, 2012.

[3] M. Szklarczyk, "Electrical Breakdown of Liquids," in *Modern Aspects of Electrochemistry: No. 25*, no. 25, Kluwer Academic Publishers Group, 1993, pp. 253–296.

[4] I. Dierking, "Dielectric breakdown in liquid crystals," *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol. 34, no. 5, pp. 806–813, 2001.

[5] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering, Fundamentals*, 2nd ed., vol. 1, no. c. 2001.

[6] S. K. Nandi, D. J. Llewellyn, K. Belay, D. K. Venkatachalam, X. Liu, and R. G. Elliman, "Effect of Microstructure on Dielectric Breakdown in Amorphous HfO2 Films," *Microsc. Microanal.*, vol. 20, no. S3, pp. 1984–1985, 2014.

[7] A. Elschner *et al.*, "PEDT/PSS for efficient hole-injection in hybrid organic light-emitting diodes," *Synth. Met.*, vol. 111, pp. 139–143, 2000.

[8] C. H. Jonda, a B. R. Mayer, and U. Stolz, "Surface roughness effects and their influence on the degradation of organic light emitting devices," *J. Mater. Sci.*, vol. 35, pp. 5645–5651, 2000.

[9] S. Palmer, "Stripes in ITO_Palmer 2005.pdf," US 2005/0206820A1, 2005.

[10] J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, *Handbook of Visual Display technology*, 2nd ed. Springer, 2016.

[11] A. Bogi and S. Faetti, "Elastic, dielectric and optical constants of 4'-pentyl-4-cyanobiphenyl," *Liq. Cryst.*, vol. 28, no. 5, pp. 729–739, 2001.

DARBA APROBĀCIJA

Promocijas darba rezultāti publicēti četros zinātniskajos žurnālos un prezentēti divās starptautiskās konferencēs.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. G. Mozolevskis, A. Ozols, E. Nitiss, E.Linina, A. Tokmakov, M. Rutkis, "Reduction of Electric Breakdown Voltage in LC Switching Shutters", Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2015. (SCOPUS)
2. J. Klavins, G. Mozolevskis, A. Ozols, E. Nitiss, M Rutkis, "Screen Printing of SU-8 Layers for Microstructure Fabrication", Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2015, (SCOPUS)
3. G. Mozolevskis, E. Nitiss, A. Medvids, "Electric breakdown of dielectric thin films for high-voltage display applications", Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2017. (SCOPUS)
4. G. Mozolevskis, I. Sekacis, E. Nitiss, A. Medvids, M. Rutkis, "Dielectric breakdown of fast switching LCD shutters", Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2017. (SCOPUS)

Dalība starptautiskās zinātniskās konferencēs

1. G. Mozolevskis, E. Nitiss, A. Medvids, "Electric breakdown of dielectric thin films for high-voltage display applications", *SPIE/COS Photonics Asia*, Beijing, China, October 12–14, 2016.
2. G. Mozolevskis I. Sekacis, E. Nitiss, A. Medvids, M. Rutkis, "Dielectric breakdown of fast switching LCD shutters", SPIE Photonics West, San Francisco, USA, January 28–February 2, 2017.