



„Latvijas elektrisko un optisko iekārtu ražošanas nozares
kompetences centrs”

Līguma Nr. 1.2.1.1/18/A/006

Apakšprojekts Nr. 1.6 “Analogo elementu pētījumi, kas izmantoti Hi-End
audio produktu ražošanā”

Rūpnieciskais pētījums par DAC problemātiku,
frekvenču nobīdes rašanās iemesliem un
apstākļiem, kā arī iepriekšējā projekta
eksperimentālās izstrādes rezultāta novērtēšana
aparātvidē”

Pārskata periods
01.10.2019. – 31.03.2020.

Rīga, 2020.

Autoru (pētījumu komandas) uzskaitījums

Aleksandrs Zaslavskis

Aleksejs Muhins

Antoņina Kuzņecova

Boriss Ahmetžanovs

Ivo Berkolds

Leonīds Kuzņecovs

Mihails Tarasovs

Modris Kalpiņš

Tatjana Iljina

Valdis Belka

Viktors Sedovs

Olga Strauta

Tamāra Savina

Igors Iljins

Saturs

Saturs.....	3
Ievads	4
1. Vakuuma elektronu lauka iekārta	5
1.1. Pamata tehnoloģiskie virzieni vakuuma elektronu lauka iekārtu izveidei	5
1.2. Tehnoloģiskā aprīkojuma sagatavošana	10
1.3. Testa struktūras.....	12
1.4. Vakuuma atomu emisiju iekārtas materiāli	13
2. Audio pastiprinātājs	14
2.1 Hi-End pastiprinātājs	14
2.2 Par OpAmp parametriem	15
2.3 Hi-End OpAmp pamatprasības	15
2.4 Pastiprinātāja struktūra.....	15
2.5 Izstrādāto pastiprinātāju parametri	18
Secinājumi	25

Digitāli-analogo pārveidotāju (DAC) attīstības vēsture ir ļoti gara un šajā procesā ir notikusi to sadalīšana vairākās grupās atkarībā no to pielietojšanas mērķa.

Ir izrādījies, ka nav iespējams apvienot vienā iekārtā visas pārveidotāja īpašības, kas vienlaikus atbilstu visām prasībām (pat nerunājot par saskarni) – absolūta precizitāte, parametru novirze, pārveidošanas ātrums, pīķi, uzstādīšanas ātrums un citas.

Laika gaitā DAC ar pielietojumu audio nozarē tika iedalīti atsevišķā grupā. Pie galvenajiem šādu DAC parametriem, galvenokārt, pieskaitāma izlādes spēja, linearitāte, uzstādīšanas ātrums un pīķi. Tādi parametri kā augsta stabilitāte un absolūtā precizitāte šim pielietojumam atvirzījies otrā plānā.

Šādu DAC kvalitātes novērtējums saistās ar neparastu problēmu – mūzikas eksperti ziņo, ka DAC ar vienādiem deklarētajiem tehniskajiem parametriem pie ieslēgšanas būtiski atšķiras. Te radies secinājums, ka elektronikas nozares pieņemtie kritēriji audio DAC īpašību novērtēšanai neatbilst gala lietotāja pieņemtajiem kritērijiem. Tas novedis pie tā, ka parādījusies tā sauktā *Hi-End* aparatūra, kur deklarētie augsta līmeņa mērāmie elektriskie parametri ir tikai pirmais novērtēšanas līmenis. Tas vēl jāapstiprina ar novērtējumu no ekspertiem, kas ir autoritātes audio-muzikālajā jomā.

Te radusies vēl viena dīvaina situācija – daži audio DAC, kas radīti 20.gs. 90.-to gadu beigās, vēl joprojām ir audiofilu “ikonas”, neskatoties uz to, ka, piemēram, pēc izlādes spējas tie būtiski atpaliek no mūsdienu risinājumiem. Raksturīgs piemērs ir audio DAC “TDA7542-16”. Šis DAC vēl joprojām pēc ekspertu “noklausīšanās” tiek uzskatīts par īpaši kvalitatīvu. Cits piemērs ar augstu novērtējumu pie “noklausīšanās” ir audio DAC D20400 (20 izlādes), kas radīts pirms vairāk nekā 20 gadiem.

Tomēr, saistībā ar sarežģīto un dārgo šādu DAC izgatavošanu, tos *Hi-End* nišā aizvietojuši citi risinājumi, kas iekarojuši *Hi-Fi* masu tirgu. *Hi-End* nišā palikuši tikai daži uzņēmumi, kas izstrādā risinājumus. Viens no piemēriem ir *Asahi Kasei Semiconductors*, kas kā galveno mārketinga triku parāda, ka tā piedāvātie DAC ir ar 32 izlādēm. Tomēr tajā pašā laikā daļa no būtiskajiem parametriem atbilst 18 izlāžu iekārtas analogajiem parametriem (32 izlādes atbilst iekšējiem digitālajiem risinājumiem). Svarīgi atzīmēt, ka uz ekspertu vērtējumu būtisku ietekmi atstāj mārketinga triki – terminu un parametru izmantošana, kas ir standarta un obligāti nozarē, bet nekā nevar ietekmēt rezultātu, piemēram, “skābekli nesaturošs varš” vai “īpaša tehnoloģisko procesu pārraudzība”. Tomēr, DAC, ko ražo *Asahi Kasei Semiconductors*, šobrīd tiek uzskatīti par vislabākajiem starp tiem, kas pieejami *Hi-End* pielietojumam.

Šajā pētījumā tiek izvirzīts uzdevums izveidot DAC *Hi-End* tirgum, īpašu uzmanību pievēršot analogajiem parametriem.

Otrajā pētījuma daļā tika iegūtas zināšanas par vakuuma elementa un audio pastiprinātāja iegūšanu ar auksto katodu. Tika veikti pētījumi par dažādiem tehnoloģiskajiem virzieniem vakuuma elementu iegūšanai ar auksto katodu. Sagatavots veikto pētniecisko darbu, testēšanas struktūru un materiālu izvēles apraksts. Sadaļā par audio pastiprinātāju attēlota pastiprinātāja struktūra un iegūtie raksturlielumi.

1. Vakuuma elektronu lauka iekārta

1.1. Pamata tehnoloģiskie virzieni vakuuma elektronu lauka iekārtu izveidei

Salīdzinot vakuuma elektronu lauka iekārtas ar pusvadītāju iekārtām viena no to galvenajām priekšrocībām ir augstā noturība pret temperatūras un radiācijas ietekmi. Tas tiek noteikts ar elektronu lauka emisijas raksturlielumiem, kas atrodami šo iekārtu pamata uzbūvē. Bez tam tiek sagaidīta arī ātrdarbība, jo ballistiskā elektrona pārnese no katoda uz anodu notiek ļoti īsā laikā.

Papildus tādu iekārtu priekšrocība ir augsta voltampēru raksturlielumu vadītspēja, kas tiek izteikta kā eksponenciāla strāvas atkarība no sprieguma, kā strāvas atbildes laika uz iekšējo spriegumu zemā inerce salīdzinot ar pusvadītāju tranzistoriem ar līdzīgu bāzes struktūru, kas parasti rada trokšņus. Kopumā tas rada pievilcīgas iezīmes maztrokšņojošu ierīču izveidei audio pielietojumam.

Vakuuma mikroelektronikas attīstības kopējā tendence ir arvien zemāka sprieguma un arvien mazāku izmēru iekārtu izstrāde. Tradicionāli izgatavotajām vakuuma elektronu lauka mikroiekārtām neatkarīgi no tā, vai katodi ir veidoti no metāliska vai silīcija materiāla, tas tiek nodrošināts uz tālāka emitējošo spaiļu rādiusa samazināšanas rēķina un uz atveres diametra vadošajā elektrodā rēķina. Šie abi faktori rada iespējamību samazināt vadošā elektroda minimālo nepieciešamo sprieguma vērtību. Mūsdienu submikronās litogrāfijas metodes ļāvušas sasniegt minimālo darba sprieguma līmeni ~40-50 V un praktiski sasnieguši savu galējo līmeni. Pēdējo 15 gadu laikā viens no salīdzinoši perspektīviem ceļiem šādu iekārtu izstrādē, ņemot vērā paaugstinātas uzticamības prasības un vajadzību samazināt darba spriegumu, skaitās nelitogrāfiskās tehnoloģijas izstrāde atomu emisijas konstrukciju formēšanai, kas balstīta uz fizikālajiem struktūru pašorganizēšanās procesiem nanolīmenī. Tiek izmantots porainā alumīnija anodēšanas process, kas, pats par sevi saprotams, balstoties uz pašorganizēšanos veido dielektrisko slāni ar regulāru cilindrisku nanokanālu matricu. Tomēr, šobrīd zināmajām šādu struktūru izstrādēm ir eksperimentāls raksturs un ir paredzēta iespēja iegūt no tām atomu emisijas strāvu vienīgi pie sprieguma 20 līdz 80V.

Ņemot vērā, ka nozīmīgas atomu emisijas strāvas iegūšanai nepieciešams spēcīgs elektriskais lauks (~10⁷ V/cm) pie emitera virsmas, tad tādiem laukiem pie ne pārāk augsta sprieguma tiek pielietota īpaša emitera ģeometrija – tā vienmēr ir virsma ar lielu liekuma rādiusu: spaile, asmens, izvirzījumi u.c.

No elektrostatikas ir zināms, ka lādiņa virsmas blīvums uz vadītāja ar sarežģītu formu vienmēr pieņem lielāko vērtību uz saasinājumiem. Saglabājoties faktam, ka elektriskā lauka spriegums ir proporcionāls lādiņa virsmas blīvumam:

$$E = \sigma / \epsilon_0$$

kur E – elektriskā lauka spriegums

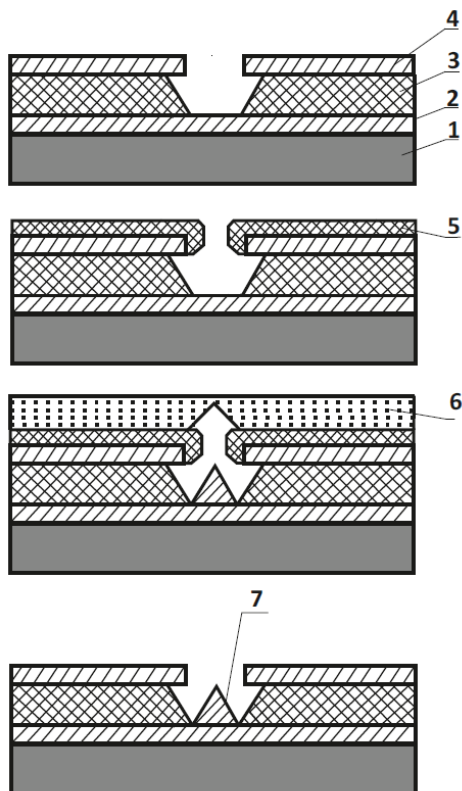
σ - lādiņa virsmas blīvums

$\epsilon_0 = 8685 \cdot 10^{-12} \text{ C/(V}\cdot\text{m)}$ – elektriskā konstante

tad, protams, elektriskā lauka spriegums būs īpaši augsts blakus apgabaliem ar mazu izliekuma rādiusu, saasinājumiem.

Lielākā daļa laika un zināšanu, izstrādājot piemērotus katodus vakuuma mikroelektronikas vajadzībām, tiek veltīta dažādiem miniatūras matricas izstrādes veidiem. Viens no veidiem nosaka to, ka elektronu emitters tiek izgatavots no silīcija, cits- no blīvi sakausēta metāla, kā piemēram, molibdēna vai volframa.

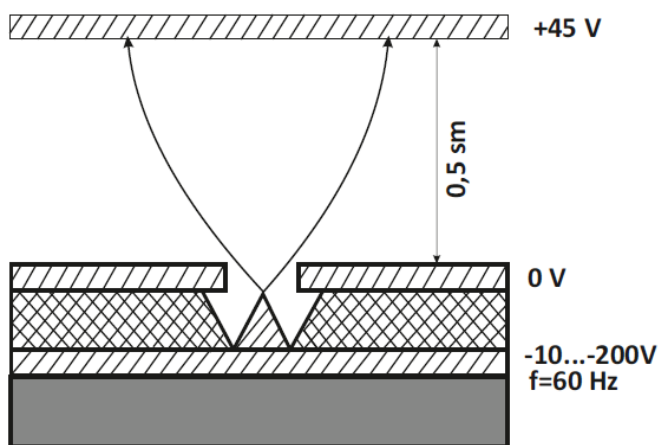
Pirmie pētījumi un darbi tika veikti 1961-1968.gadam un to veica Kenets Šolders (Kennet Shoulders) un Čārlzs Spints (Charles Spindt). Viņu atklājumu būtība ir sekojoša: uz safīra paliktņa tiek izveidota trīsslāņu plāno kārtiņu struktūra - Mo-Al₂O₃-Mo. Pēc tam ar litogrāfijas metodi un izveidotās struktūras kodināšanu tiek formētas cilindriskas mikro spraugas ar diametru 1,5 mikrometri.



1. paliktnis
2. vadītāja slānis no molibdēna (katoda slānis)
3. Dielektriķa slānis (alumīnija oksīds)
4. vadītāja slānis no molibdēna (tīkls)
5. Uzklājama alumīnija oksīda slānis
6. Hermētisks pārklājums
7. Noaasināts emitters (molibdēns)

1.zīmējums "Plānās kārtiņas matricveida atomu emisijas katoda uz dielektriska paliktna izgatavošanas tehnoloģiskā procesa shēma

Šādā veidā iegūto plānās kārtiņas matricveida katodu elektriskie izmēģinājumi tika veikti vakuuma kamerā. Lielākā daļā izmēģinājumu trīskārtu struktūra tika ierosināta ar strāvu ar frekvenci 60 GHz, bet pozitīvs piemaisījums tika pievienots iekšējam kolektoram, kā parādīts 2. zīmējumā. Ierosinātā kolektora maksimālā strāva šajās struktūrās veidoja apmēram 1,5 mikroA pie maksimālā sprieguma trīskāršajā struktūrā – 60V un attiecīgi 6 mikroA pie 100V un 100 mikroA pie 200V.



2.zīm. Plānās kārtiņas matricveida atomu emisijas katoda struktūras un izmēģinājuma shēmas shematisks attēlojums

Šādu struktūru detalizēti eksperimentālie izmēģinājumi parādīja, ka sakarība starp strāvas blīvumu un emitējošās spailēs virsmas elektrisko lauku ļoti labi tiek aprakstītas ar Faulera-Nordgreima fundamentālo vienādojumu:

$$\ln J / (E^2) = \ln A_0 - B_0/E \text{ vai } J = A_0 E^2 \exp(-B_0/E),$$

kur J – emisijas strāvas blīvums

E – emitējošās spailēs virsmas elektriskais lauks

A_0 , B_0 – konstanti lielumi, kas saistīti ar fundamentālā fizikālām konstantēm

Sakarība starp pielietoto potenciālu dažādību un elektrisko lauku tuvumā pie saasinājuma augšas tiek izteikta ar šādu formulu:

$$E = \beta U,$$

Kur U – potenciālu dažādība starp emiteru un ekstraktoru (vadošo elektrodu)

β – lauka pastiprināšanas koeficients vai kā bieži to sauc- formfaktors- lielums, kurš ir atkarīgs no saasinājuma augšdaļas formas un atomu emisijas struktūras ģeometriskajiem parametriem

Vispārējā gadījumā pastiprināšanas koeficients β saistīts ar struktūras ģeometriskajiem parametriem šādā attiecībā:

$$\beta = 1 / (r * f(r, l_a))$$

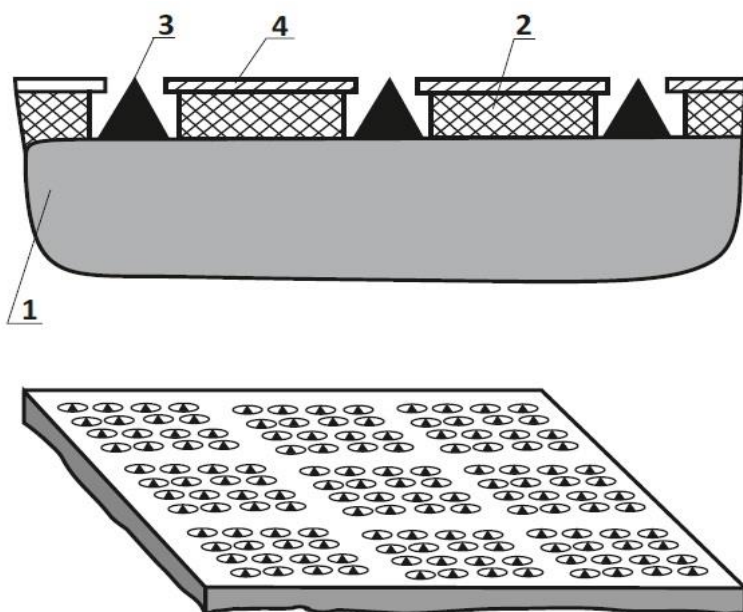
kur r – noaasinātā emitera rādiuss

l_a – attālums no noaasinātā emitera virsotnes līdz anodam;

$f(r, l_a)$ - argumentu r un l_a funkcija, kas atkarīga no struktūras ģeometrijas

Lai nodrošinātu maksimāli pastiprinātu elektrisko lauku, noaasinātais emiteris jāizstrādā maksimāli ass un tas jāuzstāda ekstraktora līmenī vai augstāk par to.

No formulas redzams, ka jebkurš pastiprināšanas koeficienta palielinājums noved pie samazinātas darba strāvas. Turklāt, ekstraktora atvērumu izmēri tiek taisīti pēc iespējas mazāki, lai ļautu maksimālam spriegumam sasniegt laukus, kas nepieciešami emisijai. Visās tehnoloģiskajās shēmās ekstraktoram ir pamats plānas dielektriskas kārtiņas veidā, kas izolē to no pamata emitera. Dielektriskās kārtiņas biezums tiek izvēlēta tāda, lai elektriskā lauka spriegums, kas rodas dielektriskajā kārtiņā, būtu nozīmīgi zemāks par tā elektrisko izturību.

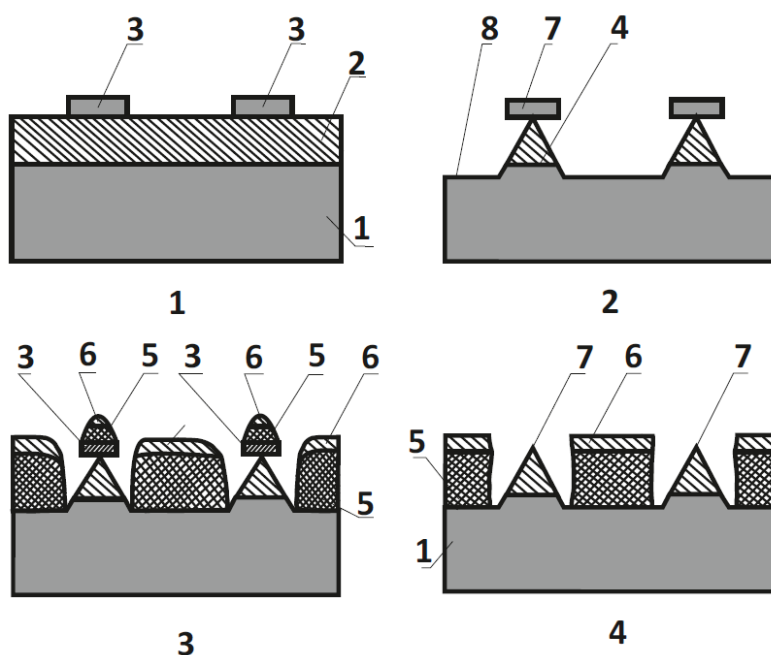


3.zīm. Spinta matrica (struktūra un skats no augšas)

(1 – silīcija paliktnis, 2 – dielektriskais slānis SiO_2 3 – metālisks noaasinātais emiteris, 4- metāliskais tīkls.

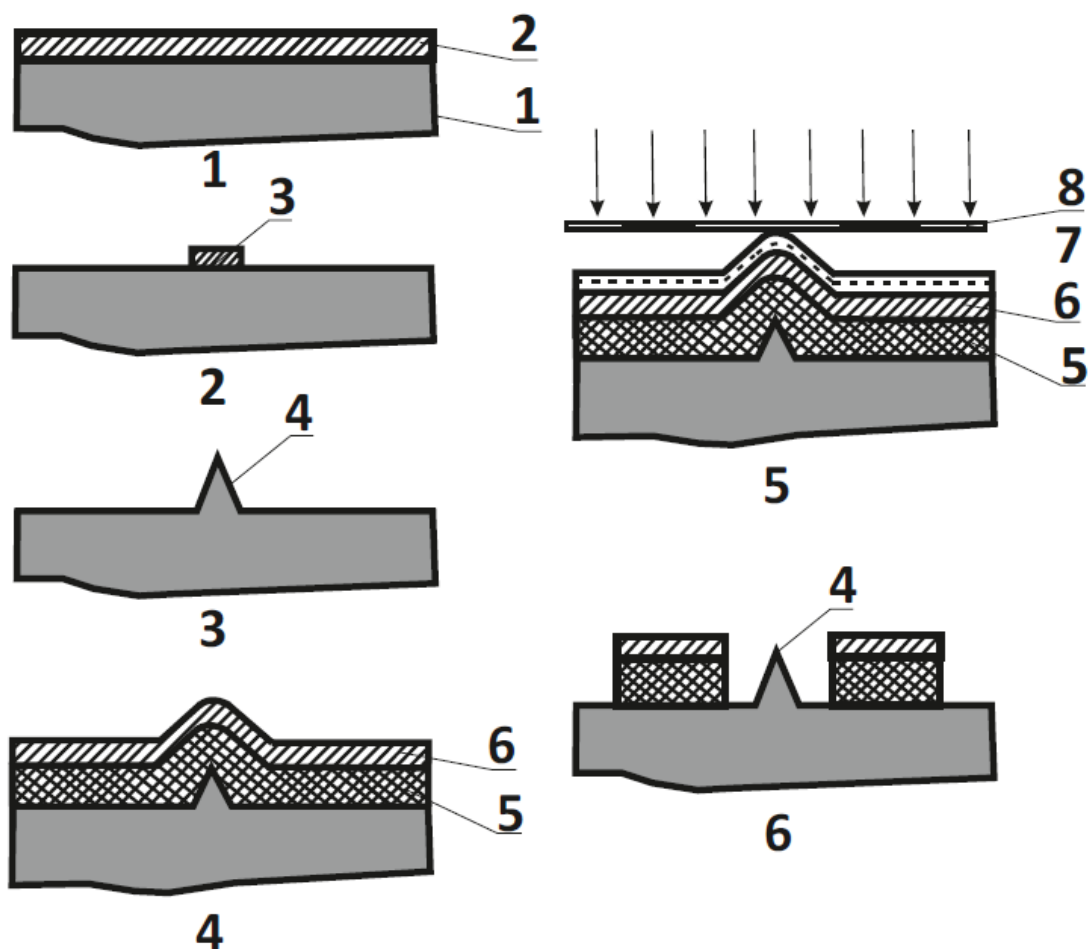
Cits tehnoloģiskais virziens saistīts ar atomu emisiju matricu izstrādi vienā veselumā uz silīcija pamatnes. Tehnoloģijas būtība:

p-tipa silīcija plāksnes ar orientāciju 100 un ar n-tipa epitaksikālo kārtu oksidē līdz biezumam $\text{SiO}_2 \sim 1$ mikrometrs. Pēc tam ar fotolitogrāfijas un kodināšanu tiek formēta SiO_2 disku matrica ar diametru 2 mikrometri. Pēc tam veic kodināšanu ar anizotropā šķidrumu, kam ir dažāds kodināšanas ātrums dažādās silīcija virsmās - 100 kodinās daudz ātrāk nekā 111. Tādā veidā tiek formētas silīcija piramīdas ar leņķi 70° . Pēc tam ar ķīmiskās uzklāšanas metodi no tvaika fāzes uzklāj SiO_2 un tam sekojoši plānu zelta kārtu. Pēc tam veic silīcija ķīmisko kodināšanu, kura procesa laikā SiO_2 diski galēji tiek piegriezti un noņemti. Tā tiek izveidota galēja matricas struktūra.



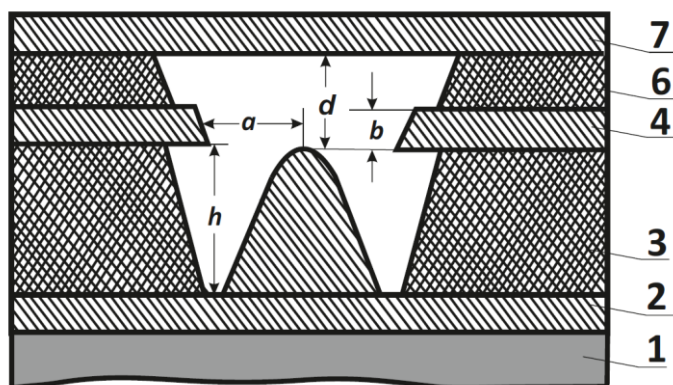
4.zīm. (1 – p-tips , 2 – n- tips , 3 – SiO_2 , 4 – pn pāreja , 5 – izolācija , 6 – metāla tīkls, 7 – piramidāls silīcija emitters)

Vēl cits procesa un struktūras veids parādīts 5.zīmējumā.



5.zīm. (1- silīcijs , 2 – SiO₂ , 3- SiO₂ laukumiņi, 4- spaile , 5 - SiO₂ , 6 - metāls)

Par pirmo vakuuma elektronu emisijas triodi tika paziņots 1986.gadā (Gray H.F.). Tā bija planāra iekārta. Tālākie pētījumi parādīja, ka efektīvākas trīskārtīgas konstrukcijas (6.zīmējums).



6.zīm

Literatūrā var atrast daudz konstruktīvu variantu, kas līdzīgi šim.

Viena no mūsdienīgākajām pieejām atomu emisiju iekārtu izveidē ir porainā alumīnija izmantošana, lai to tālāk aizpildītu ar nano caurulēm. Mērķis ir samazināt noasinātā katoda rādiusu un blīvuma palielināšana – spaiļu skaits uz kvadrātcentimetru.

Nemot vērā, ka šī darba mērķis ir izveidot autoemitējošas iekārtas izveide ar nelielu strāvas blīvumu un ar integrācijas iespējām ar pusvadītāju struktūrām, tad lielākā uzmanība tiks veltīta citam aspektam – jaunu aukstā katoda materiālu izvēle un to novērtēšana.

Lielākais jautājums, ko liek uzdot ikviena no iepriekš aprakstītajām konstrukcijām, ir materiāla izejas darbs. Šī lieluma samazināšanās gadījumā tiek pieņemts, ka būtiski samazinās prasības izmēriem. Cits pētnieciskais izaicinājums ir lauka strāvas samazināšana (samazinātas prasības minimālajiem izmēriem un strāvas vērtībā).

1.2. Tehnoloģiskā aprīkojuma sagatavošana

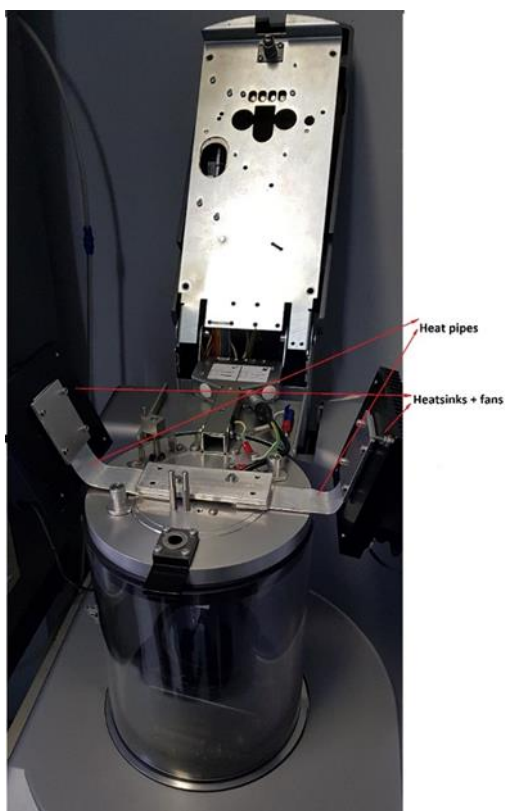
Eksperimentu norises nodrošināšanai nepieciešamas iekārtas materiālu sagatavošanai priekš noasināto katodu un dielektrisko plēvīšu veidošanas.

Dažādu materiālu, kas tiks izmantoti noasināto katodu izveidošanā, novērtējumus tika nolemts veikt ar mazgabarīta sistēmu magnetronu uzputināšanai Quorum 150T S. Šī iekārta paredzēta plāno kārtiņu paraugu izveidošanai elektronu mikroskopijas vajadzībām (kārtiņām dažu nanometru biezumā). Iekārtas priekšrocība ir tas, ka nepieciešams mazs mērķa izmērs (60 mm), kas samazina izmantotā materiāla daudzumu. Tomēr, ņemot vērā tās orientāciju uz specifisku plāno kārtiņu izveidošanu (daži nm), iekārtai nav paliktņa uzsildīšanas funkcijas un magnetrona un mērķa dzesēšanas funkcijas.

Magnetrona pārkaršanas dēļ uzputināšanu var veikt tikai ļoti ierobežotu laiku (mazāk nekā 10 min.), kas nav pietiekams kārtiņu izveidošanai ar biezumu 0,1-0,3 mikrometri. Tāpēc iekārtas sagatavošanai plānotajiem eksperimentiem bija nepieciešams atrisināt vairākus jautājumus – noņemt ieprogrammētos ierobežojumus cikla ilgumam, realizēt kontrolētu paliktņa uzsildīšanu un kontrolētu magnetrona dzesēšanu.

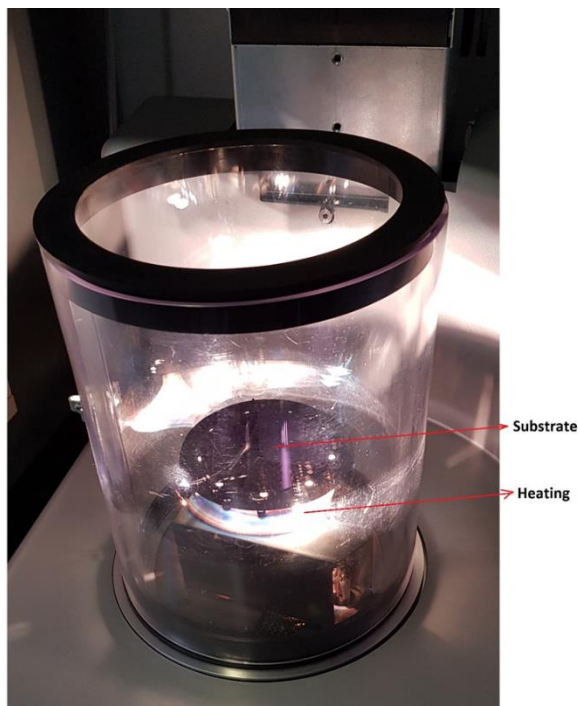
Lai noņemtu cikla ilguma ierobežojumus, tika veikta iekārtas programmnodrošinājuma pārstrāde. Tās rezultātā operators ir spējīgs uzstādīt uzputināšanas cikla ilgumu jebkādā diapazonā.

Lai atrisinātu jautājumu par mērķa un magnetrona dzesēšanu, ņemot vērā iekārtas nelielos izmērus, tika izmantotas apsildes caurules (heat pipe) un dzesēšanas ventilatori.



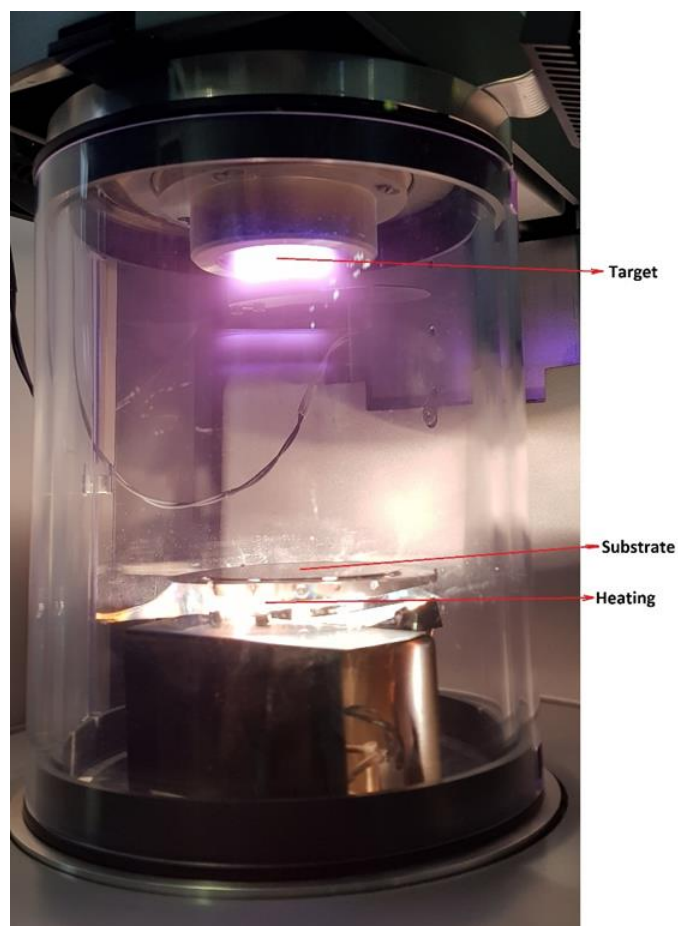
7.zīm. Magnetrona dzesēšanas risinājums

Paliktņa uzsildīšana tika īstenota ar halogēno lampu (2*50W) palīdzību un vakuuma ievadiem. Temperatūras uzturēšanas kontrole tika risināta ar Pt rezistoru un temperatūras regulatoru (+150 - +250C).



8.zīm. Paliktņa apsildes ieslēgšana atvērtas sistēmas gadījumā

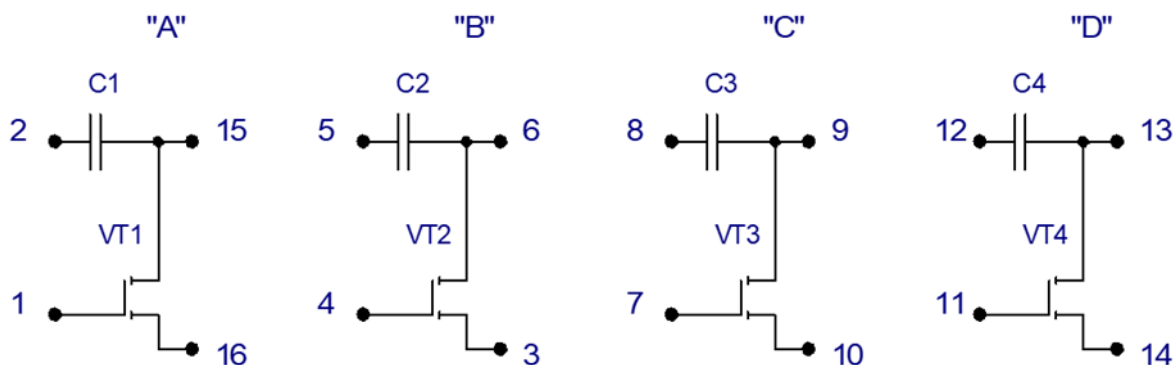
Iekārta tika sagatavota vadītājmateriālu uzputināšanai ar DC avota palīdzību, ar mērķi (izmērs dm 60mm), ar maināmu attālumu mērķis-paliktņis no 70 līdz 150mm, ar iespēju vadīt paliktņa uzsildīšanu.



9.zīm. Uzputināšanas process

1.3. Testa struktūras

Aprīkojuma darbību un mērījumu iespējamības novērtēšanai vakuuma kamerā tika izveidoti vairāki varianti planāro katodu. Tajā skaitā tika novērtēti daži tehnoloģiskie paņēmieni – izveidot šauras/noasinātas struktūras ar ķīmiskās kodināšanas metodi. 10. zīmējumā parādīta testēšanas kristāla 7353 principiālā shēma.



Kristāla 7353 konstrukcijā tika realizēti katrā pa 40 dažādas formas spaiļes- katrā tranzistorā.

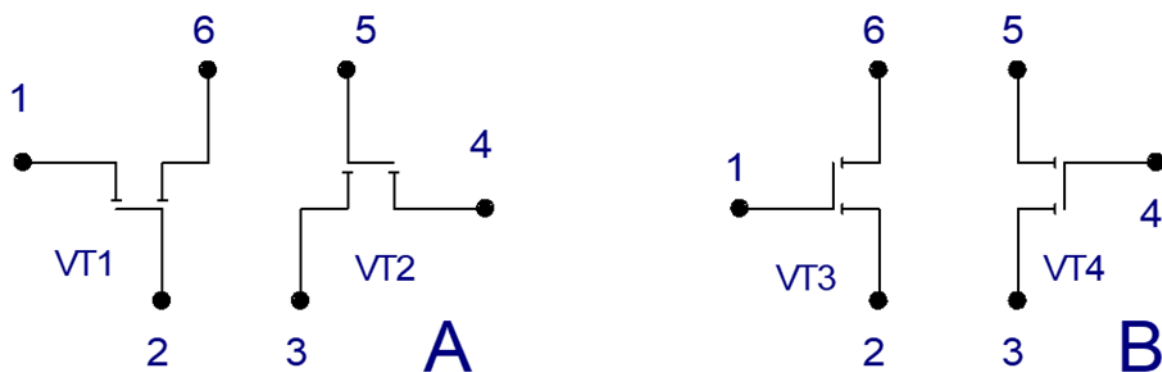
VT1, struktūra "A": slāņa topoloģija "iztece-satece" – iztece – "spaiļe", blīva satece

VT2, struktūra "B": slāņa topoloģija "iztece-satece" – iztece – "gara spaiļe", blīva satece

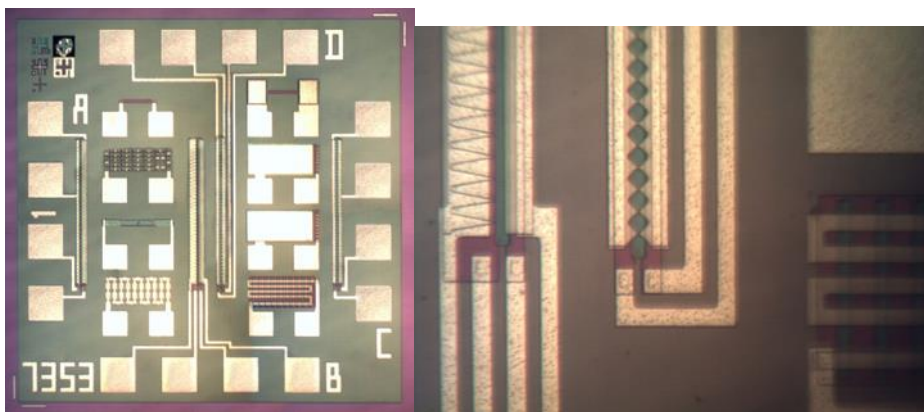
VT3, struktūra "C": slāņa topoloģija "iztece-satece" – izstece – satece- "spaiļes pretim stāvošas", izteces un sateces atdalīšana ar pārkodināšanas slāņa metodi. Sazobe starp pārkodinātajām formām – 1 mikrometrs (pēc rasējuma).

VT4, struktūra "D": slāņa topoloģija "iztece-satece" – izstece – satece- "asas spaiļes", izteces un sateces atdalīšana ar pārkodināšanas slāņa metodi. Sazobe starp pārkodinātajām formām – 2 mikrometri (pēc rasējuma).

Nomināli C1, C2, C3, C4 netiek reglamentēti, kondensatori tiek uztverti kā parazitārie elementi.

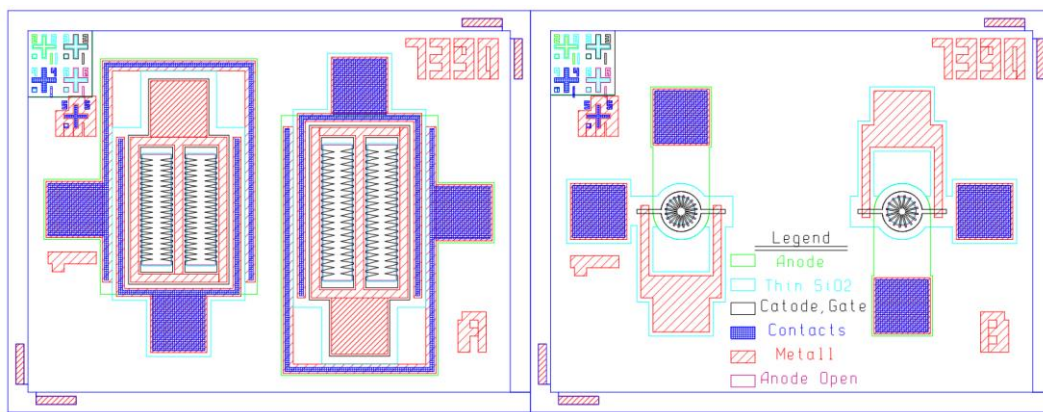


11. zīm. Testēšanas kristāla 7390 principiālā shēma.



12.zīm. kristāla 7353 fragmenta fotogrāfija

Konstrukcijā 7390 cita starpā realizēts mēģinājums izvietot spailas pa apli, lai palielinātu lauka blīvumu.



13.zīm. Kristāla 7390 kopskats.

1.4. Vakuuma atomu emisiju iekārtas materiāli

Līdz šim brīdim visa pasaulē ir veikts ļoti liels skaits katodu materiālu pētījumu. Tomēr lielākā daļā darbu tiek pētīti vieni un tie paši materiāli. Šajā pētījumā uzstādījums izmēģināt un novērtēt jaunus materiālus.

Lai izveidoti noasinātu katodu tika nolemts izmēģināt literatūrā aprakstīto materiālu W un divus maz izpētītus materiālus WB_2 un $BaCO_3$. Tika nolemts W izmantot kā salīdzinošo materiālu. WB_2 un $BaCO_3$ tika izvēlēti kā materiāli kam var būt būtiski zemāks izejas darbs.

Tika iegādāti mērķi ar diametru 57mm $BaCO_3$ (99,9%), WB_2 (99,5%), W (99,99 %) un veikti pirmie kārtiņu uzputināšanas cikli.



Tā kā vakuuma iekārtas izveidošanai nepieciešamas dielektriskās plēvītes, tad šajā pētījumā tika izmantotas dielektriskās plēvītes uz reaktīvā silīcija nitrīda bāzes, alfa silīcijs izveidots uz iekārtas YBH-75.

Augstas pretestības mērķu sagriešanai tika izmantots impulsu ģenerators Pinnacle+.

14. zīm. Mērķis $BaCO_3$

2. Audio pastiprinātājs

2.1 Hi-End pastiprinātājs

“High End — ta sir mārketinga termins, kas apzīmē augstāko (elītes) klasi skaņas pastiprināšanas aparātiem un programmatūrai, kas paredzēts audiofilu augsto prasību apmierināšanai. Šāda, bieži ļoti dārga un ekskluzīva skaņas aparatūra, tiek ražota mazās sērijās vai pat pa vienai. Nereti to dara paši audiofili.

Atšķirībā no Hi-Fi mūsdienu radioelektronikā, lai sprastu “High End” pietrūkst reglamentējošu standartu vai citur raksturlielumu, kas spētu kvalificēt “High End”. Ražotāju deklarētās High-End klases preces kā likums ietver tikai augstākās kvalitātes komponentes, kuru izmantošana daudzos gadījumos ir ekonomiski nepamatota. Izstrādājot High-End klases izstrādājumus tiek pielietotas pašas mūsdienīgākās, nereti revolucionārās idejas, lai sasniegtu maksimāli iespējamo pozitīvo rezultātu. Nereti tie ir ekonomiski nepamatoti ne tikai priekš masveida ražošanas, bet arī nelielas partijas izgatavošanai. Paredzēti zīmola virzīšanai starp konkurentiem.

Mārketinga apraksts Hi-End produktam varētu būt tāds:

“Kas tā ir High-End aparatūra? Kas tā ir high-end skaņa? Tas ir tad, kad aizmirsti par skaņas sistēmu, kad telpu, kurā klausies, burtiski ieņem izpildītājs. Tas ir tad, kad jūs jūtat, ka komponists un izpildītājs runā ar jums cauri laikiem un no attāluma. Tā ir neparasta pacēluma sajūta muzikālās kulminācijas laikā. Tie ir neaprustāmi emociju “amerikāņu kalniņi”, kuras komponists kaut kādā brīnumainā veidā ir spējis iekodēt skaņu kombinācijā. Tā ir materiālās pasaules pazušana, kad paliek tikai jūsu apziņa un mūzika”.

Tādā veidā var noteikt Hi-End definīciju – tās ir sistēmas, kas izveidotas priekš klausītāja, kas augstu novērtē augstas kvalitātes audiosistēmas skanējumu un tās spēju maksimāli precīzi veidot zāles un skatuves, kurā tika veikts ieraksts, muzikālo atmosfēru.

Daudzos gadījumos, lai novērtētu Hi-End aparatūru, netiek izmantoti tehniskie raksturlielumi, bet gan ekspertu novērtējumi - tā saucamās noklausīšanās. Protams, ka eksperta autoritāte tieši ietekmē izstrādājuma tirgus vērtību. Tomēr vērts ir pieminēt faktu, kad pie audio sistēmu noklausīšanās ar vienādiem tehniskiem parametriem tiek novēroti pilnīgi dažādi skanējumi. “Nevaru aprakstīt, bet jūju atšķirību”. Tas liecina par mērāmo parametru sistēmas nevienmērību.

Operacionālajiem pastiprinātājiem (OpAmp) ir sava klasiskā parametru sistema. Izstrādājot OpAmp, izstrādātājs vienmēr satiekas ar nepieciešamību pēc kompromisiem. Atkarībā no uzdevuma, ieguvumus kādā parametrā tiek gūts kaitējot citiem parametriem. Tieši tāpēc līdz pat šim brīdim neeksistē ideālais operacionālais pastiprinātājs.

Var teikt, ka tirgū eksistē trīs dažādi OpAmp tipi – cietie OPA1612 (www.ti.com), Muses02 (www.njr.com) un hibrīdie SS OpAmp (www.burson.com), kurus salīdzina ar no ražošanas noņemtajiem OPA627, kurus eksperti novērtējuši kā “brilliant” Hi-End.

Jāpiebilst, ka tikai OPA1612 ir profesionāls apraksts un raksturlielumi, kas sniedz priekšstatu par tā īpašībām. Pārējām iekārtām ir ļoti īss apraksts, bet piesauktie piemēri raksturo tos labāk kā mārketinga panākumi nevis tehniskie sasniegumi.

Šī pētījuma ietvaros izdevās noformulēt dažus bāzes kritērijus, kas ļauj pieskaitīt OpAmp pie Hi-End klases, atduroties pret tehniskajiem parametriem.

2.2 Par OpAmp parametriem

Jāsaka, ka lielākā daļa ražotāju nesniedz tehniskos parametrus, kas pilnībā aprakstītu OpAmp īpašības. Raksturīgi, ka daži parametri, kam pirmām kārtām pievērš uzmanību patērētāji, tiek sniegti atvieglotos un reālajā pielietojumā nereālos apstākļos. Piemēram, THD tiek dots pie tikai aktīvas slodzes (2 kOm), bet citi parametri pie slodzes 600 Om. Pats par sevi saprotams, ka THD izmaiņas pie būtiskām strāvas slodzes izmaiņām var tikai pieņemt. Būtiskas kapacitatīvās slodzes trūkums rada situāciju, kad apskatāmie parametri kļūst ļoti mazinformatīvi, jo reālajā shemotehnikā kapacitatīvā slodze vienmēr eksistē un tā var būtiski mainīties, mainoties pašam signālam. Tas izskaidro lielāko daļu parametru neatbilstību un iekārtas patērētāju vērtības, kas uzbūvētas uz tādu OpAmp bāzes ar formāliem parametriem.

2.3 Hi-End OpAmp pamatprasības

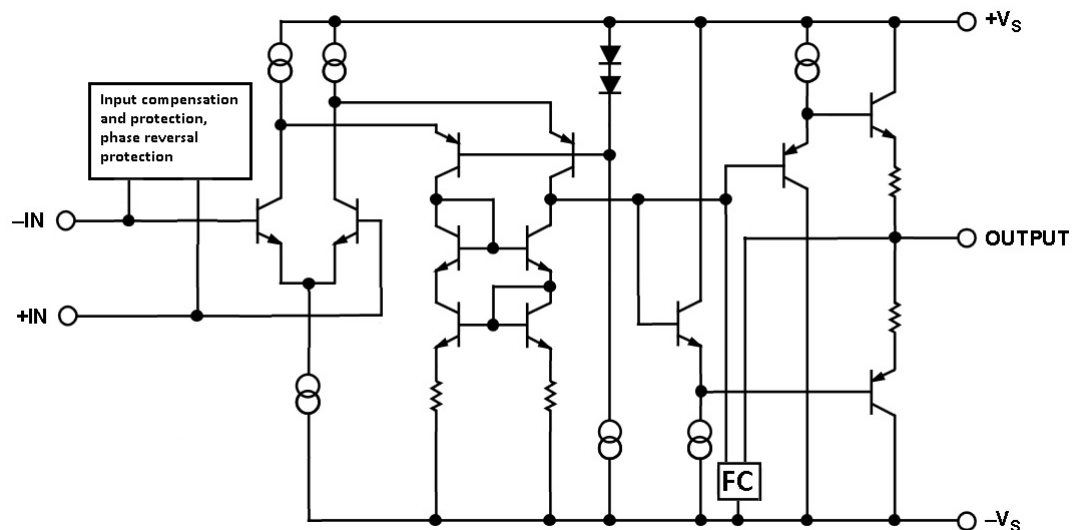
Balstoties uz pieredzi un daudzu gadu analogo integrālo shēmu izstrādēm, var noformulēt sekojošas prasības (Hi-End OpAmp):

- Visiem parametriem jābūt noteiktiem uz aktīvo un kapacitatīvo slodzi. Turklāt kapacitatīvā slodzei jābūt ne mazākai kā 200 pF. Visu parametru raksturošanai jānotiek pie cik iespējams lielas kapacitatīvās slodzes.
- Nelineārām novirzēm jābūt noteiktām pie izejas sprieguma - $V_{rms} > 7 \text{ V rms}$ (10V amplitūda), pie aktīvajās-kapacitatīvās (vairā nekā 300 pF) slodzes ar frekvenci 20 un 40 kHz.
- Jānosaka fāzes rezerves. Kā minimums tam jābūt ne mazākam par 60° pie aktīvās kapacitatīvās slodzes. Tas dod stabilitāti pārejas procesā. Projektējot parastus OpAmp izstrādātāji kā kompromisu izvēlas fāzes rezerves 15-20°.
- Jānosaka emisija pie maza signāla priekš aktīvi-kapacitatīvās slodzes.
- Uzaudzēšanas ātrumam jābūt noteiktam priekš atkārtotāja režīma (kā visgrūtākā) priekš aktīvi-kapacitatīvās slodzes (vairāk nekā 100 pF) un vairāk nekā 25 V/μSec.
- Izejas kaskādei jādarbojas režīmā, kas tuvs klasei A
- Audzēšanas ātrumam 25 V/μSec un kapacitatīvai slodzei 500 pF pastiprinātāja izejas strāva nedrīkst būt mazāka 15 mA.

Kā obligāts nosacījums pielietošanai reālos apstākļos - jābūt nodrošinātai aizsardzībai pret fāzes apgriešanos. Šī situācija kopumā var rasties, ja ieejas signāls tuvojas vai pārsniedz pārsniedz spriegumu uz barošanas šinas. Pie šī var rasties pie izejas pēkšņi izejošā signāla pārsitieni- kad mainās polaritāte.

2.4 Pastiprinātāja struktūra

Lai izpildītu norādītos kritērijus tika pieņemts lēmums izstrādāt hibrīdu pastiprinātāju uz liela ātruma pastiprinātāja, ar papildus ķēdēm frekvences korekcijai (FC), aizsardzības mezglus, ieejošās strāvas kompensāciju.

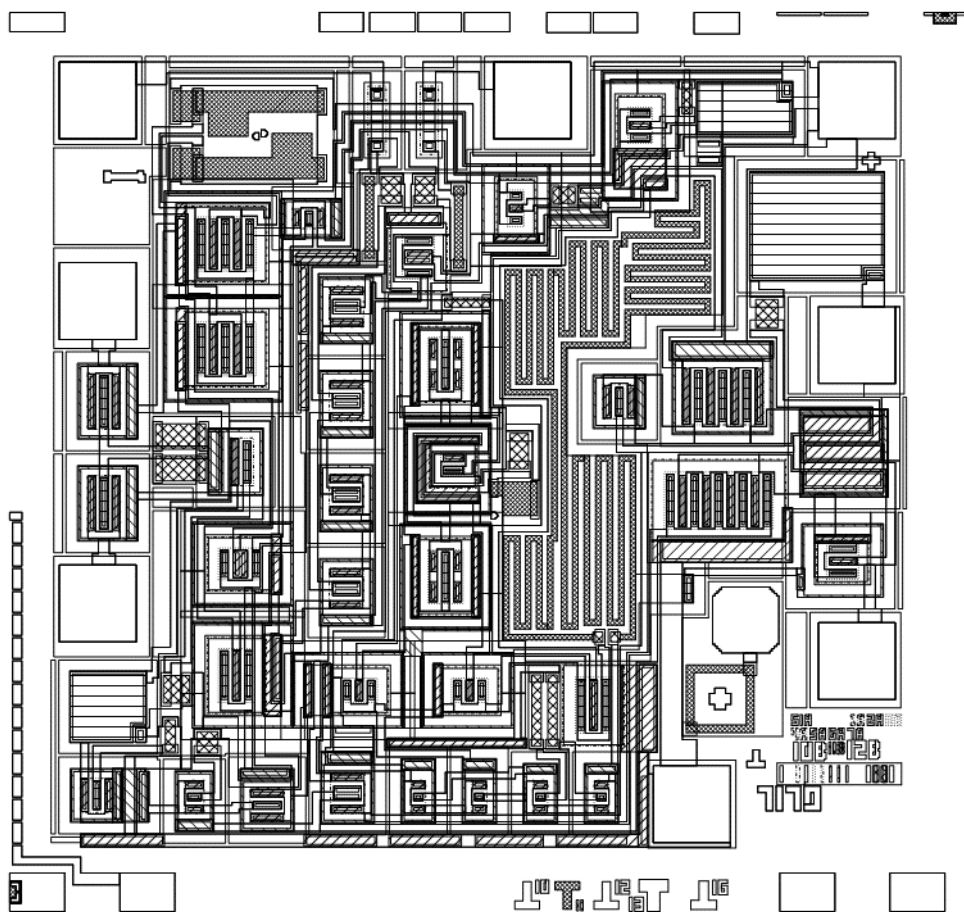


2.1.zīm. Pastiprinātāja struktūra

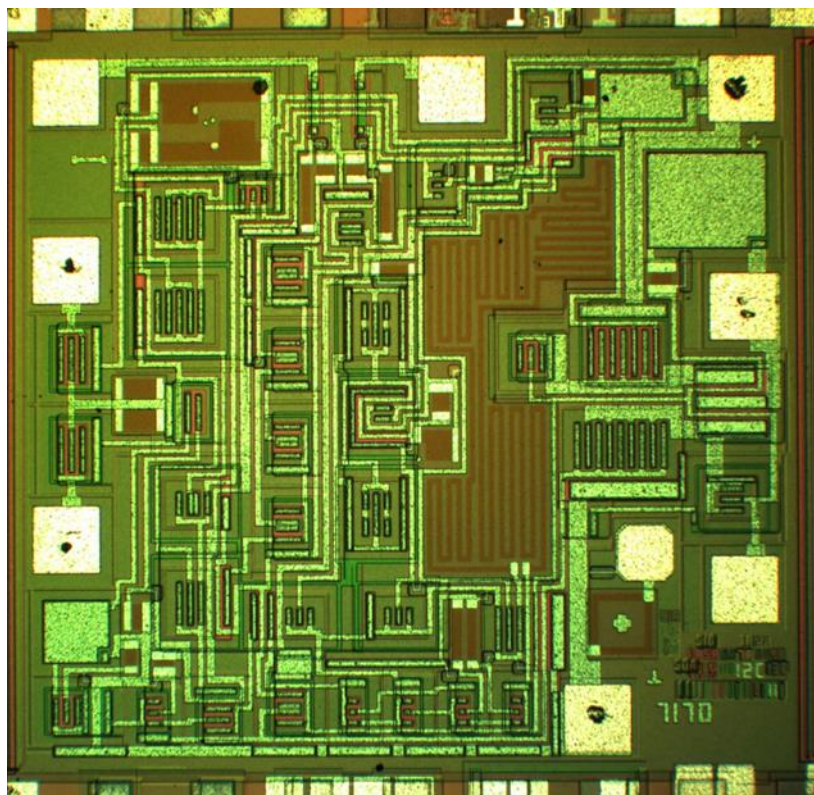
Balstoties uz iepriekšējām zināšanām, par pastiprinātāja kodolu tika izvēlēts izmantot bipolāro pastiprinātāju ar lielāku par 120 MHz joslu un pastiprināšanas ātrumu 150V/μs. Tādi bāzes parametri ļauj izveidot hibrīdo pastiprinātāju ar lielu rezervi fāzē (ar augstu noturību).

2.1. zīmējumā attēlotais bloks ļauj sasniegt nepieciešamo frekvenču korekciju, un speciāli izstrādātais ieejas ķēžu kompensācijas bloks (Input compensation) nodrošina ieejas strāvu kompensēšanas funkciju, aizsardzību pret fāzes pagriešanos, speciālas korektīvās ķēdes priekš atgriezeniskās saites ķēdēm.

Pastiprinātājs izstrādāts pēc bipolārās komplimentārās tehnoloģijas ar integrētu plānās kārtiņas rezistoru, kas kalibrēts ar lāzeru.



2.2.zīm. Pastiprinātāja kopskats.

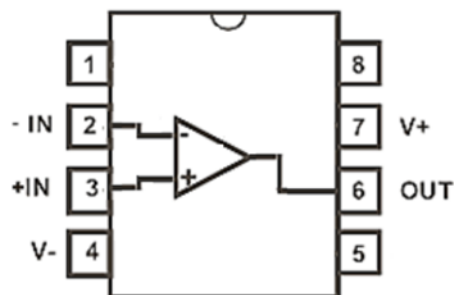


2.3. zīm. Pastiprinātāja fotogrāfija

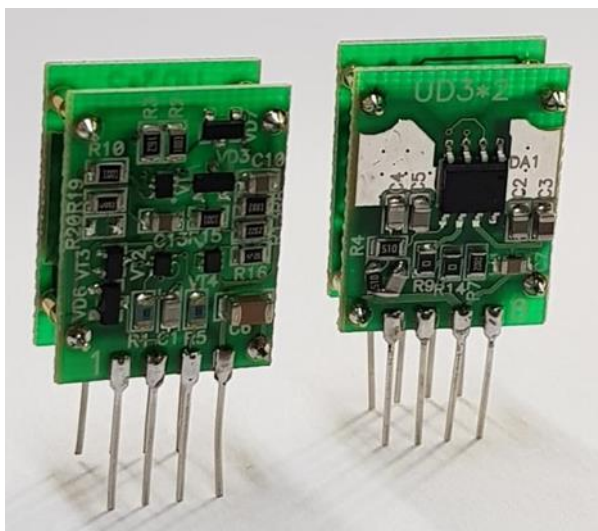
Izstrādājot hibrīdo pastiprinātāju, tika pieņemts lēmums orientēties uz konstrukciju DIP-8 (footprint) un izvadu nozīmi saglabāt tādu, kāda pieņemta lielākajai daļai pastiprinātāju šādos korpusos. Tas ļaus ātrāk perspektīvos izstrādājumus virzīt tirgū. Pētījuma gaitā tika izveidoti pastiprinātāji ar vienu un ar diviem kanāliem.

Pin information

Pin name	Pin number	Description
-IN	2	Inverting input
+IN	3	Non-inverting input
NC	1,5,8	No internal connection
OUT	6	Output
V-	4	Negative power supply
V+	7	Positive power supply



2.4.zīm. Izeju apzīmējumi viena kanāla pastiprinātājam



2.5. Divu kanālu pastiprinātāja prototipa fotogrāfija

Divu kanālu pastiprinātāja katrs kanāls ir identisks ar vienkanālu pastiprinātāju. Tiem nav kopēju ķēžu, izņemot barošanas ķēdi. Divu kanālu pastiprinātāja izeju apzīmējumi atbilst rūpnieciskajam standartam dubultajiem pastiprinātājiem DIP-8.

2.5 Izstrādāto pastiprinātāju parametri

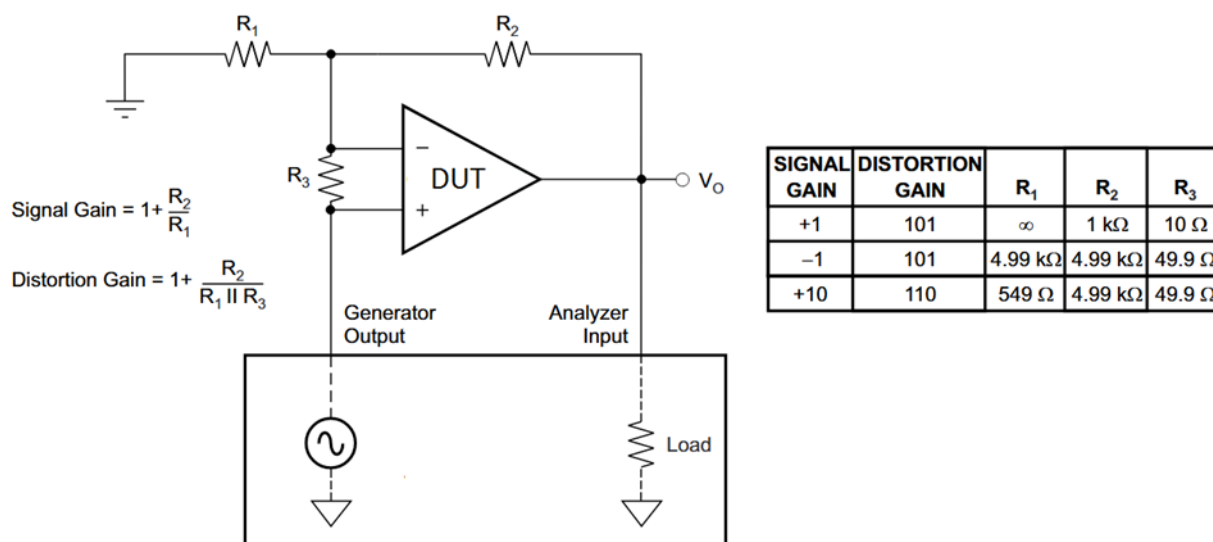
Aktivitātes ietvaros tika novērtēti izstrādāto pastiprinātāju parametri. Kopsavilkums par atšķirīgajām īpašībām:

- mazāk nekā $2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ zema ieejas sprieguma troksnis
- izteikti zema kopējie harmoniskie traucējumi un troksnis ($R_I = 600 \text{ Ohm}$ $C_I = 330 \text{ pF}$):
0,00015 % pie 20 kHz
0,00036 % pie 40 kHz
- Unity-gain stabils pie $R_I=600 \text{ Ohm}$ $C_I=1000 \text{ pF}$
- Fāzes robeža pie $G=+1$ & $R_I = 600 \text{ Ohm}$ bez ārējas korekcijas:

- 125° pie $C_l=100\text{ pF}$
- 60° pie $C_l=330\text{ pF}$
- Sprieguma maiņas ātrums $G=+1\ 30\text{ V}/\mu\text{S}$ & $R_l = 600\text{ Ohm}$ $C_l = 330\text{ pF}$
- zems ieejas ofset spriegums ne vairāk kā $250\mu\text{V}$
- joslas platums $> 35\text{MHz}$
- plašs barošanas diapazons $+9\text{V}$ to $+36\text{V}$ ($\pm 4,5\text{ V}$ $\pm 18\text{ V}$)
- ieejas strāva $< 1\mu\text{A}$
- lineārs izejas līmenis A klase
- zems mazā signāla pārsitiens ar kapacitatīvo slodzi (100mV izejas solis):
 - 8% $R_l=600\text{ Ohm}$, $R_{sl}=0\text{ Ohm}$, $C_l=100\text{ pF}$;
 - 10% $R_l=600\text{ Ohm}$, $R_{sl}=0\text{ Ohm}$, $C_l=250\text{ pF}$;
 - 30% $R_l=600\text{ Ohm}$, $R_{sl}=0\text{ Ohm}$, $C_l=1000\text{ pF}$;
 - 15% $R_l=600\text{ Ohm}$, $R_{sl}=25\text{ Ohm}$, $C_l=1000\text{ pF}$
- bez fāzes pagriešanās
- spaile-spaile izejas sprieguma svārstības 32V ar $V_{cc} = \pm 18\text{V}$ and $R_l=600\text{ Ohm}$

Tika veikti mērījumi galvenajiem parametriem un noteiktas aptuvenas to robežas.

Viens no visgrūtāk mēramajiem parametriem ir THD, jo tam ir ļoti mazas vērtības. Mērīšanai tika izmantota metode no Texas Instrument, kas attēlota 2.6.zīmējumā



2.6.zīm. THD mērīšanas metode

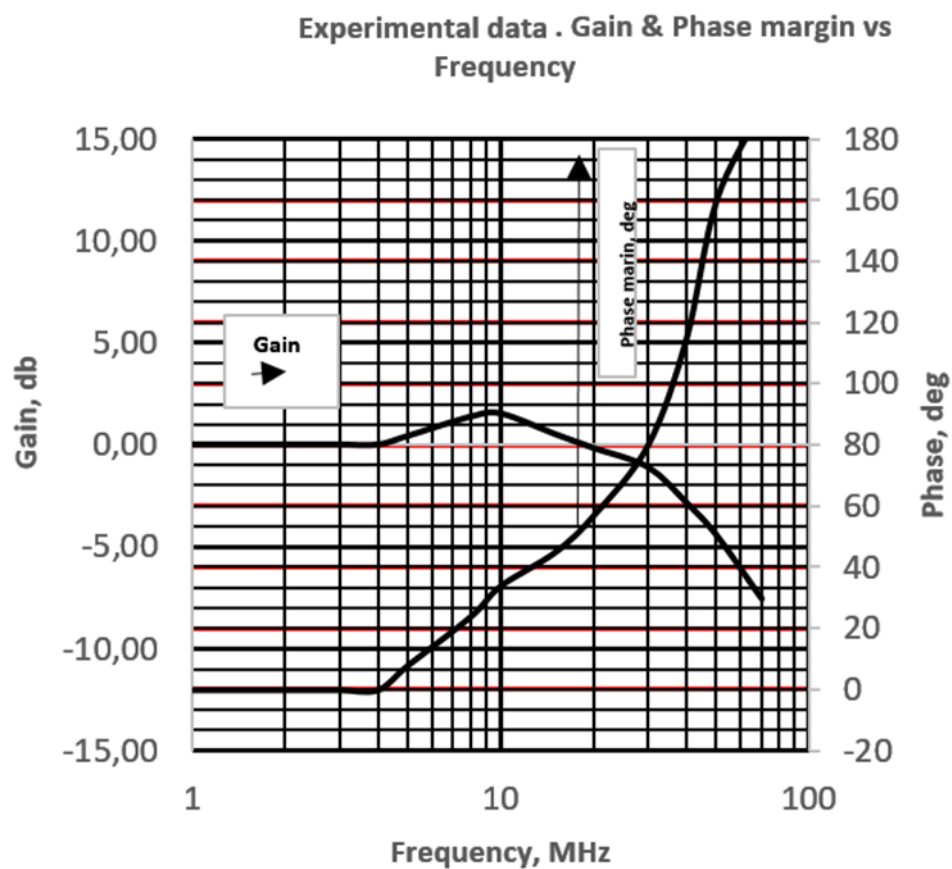
Metodes būtība ir tāda, ka mēramais pastiprinātājs pats piedalās mērīšanas procesā. Pastiprinātājs tiek ieslēgts tādā veidā, ka pamata harmonikas signāliem ir pastiprinājums 1, bet visām augstākajām harmonikām pastiprināšanas koeficients ir lielāks par 100. tas ļauj mērījumiem izmantot zemākas precizitātes mērinstrumentus pastiprinātāja izejā.

Elektriskie raksturlielumi:

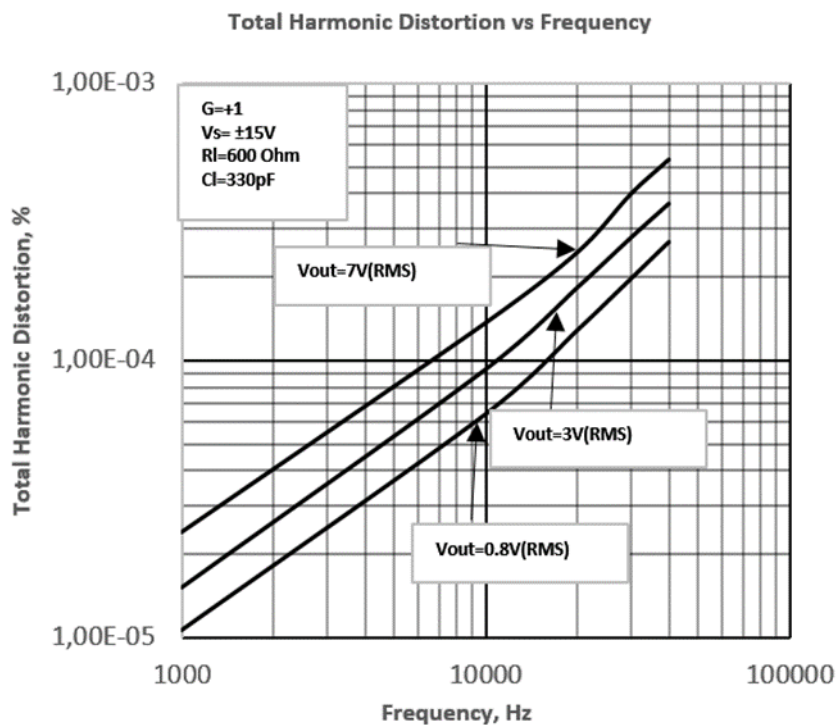
pie $T_a = +25^{\circ}\text{C}$, $V_s = \pm 15\text{ V}$ $R_I = 600\text{ Ohm}$ and $C_I = 100\text{ pF}$ ja nav noteikts citādi.

Parametrs	Mērīšanas apstākļi	Min.	Tips	Maks	vienības
THD+N , Kopējie harmoniskie traucējumi + troksnis	80-kHz platjosla G=+1, f=1kHz, $V_{out}=3\text{V(RMS)}$ $R_I=600\text{ Ohm}$ $C_I=330\text{pF}$ G=+1, f=20kHz, $V_{out}=3\text{V(RMS)}$ $R_I=600\text{ Ohm}$ $C_I=330\text{pF}$ G=+1, f=40kHz, $V_{out}=3\text{V(RMS)}$ $R_I=600\text{ Ohm}$ $C_I=330\text{pF}$ G=+1, f=1kHz, $V_{out}=7\text{V(RMS)}$ $R_I=600\text{ Ohm}$ $C_I=330\text{pF}$ G=+1, f=20kHz, $V_{out}=7\text{V(RMS)}$ $R_I=600\text{ Ohm}$ $C_I=330\text{pF}$ G=+1, f=40kHz, $V_{out}=7\text{V(RMS)}$ $R_I=600\text{ Ohm}$ $C_I=330\text{pF}$ G=+1, f=1kHz, $P_{out}=50\text{mW}$ $R_I=128\text{ Ohm}$ G=+1, f=1kHz, $P_{out}=10\text{mW}$ $R_I=32\text{ Ohm}$			0.000015 0.00018 0.00036 0.000024 0.00024 0.00053 0.000055 0.00021	%
GBW	G=+1	35			MHz
SR , sprieguma maiņas ātrums	G=+1		30		V/ μS
Pilnas jaudas platjosla	G=+1, $V_o=1\text{ Vpp}$		4.5		MHz
	G=+1, $V_o=26\text{ Vp-p}$		0.35		
Fāzes robeža	G=+1 $R_I=600\text{ Ohm}$ $C_I=330\text{ pF}$	60			grādi
Ieejas sprieguma troksnis	G=+1		2		nV/VHz
V_{os} ieejas offset spriegums	$V_s = \pm 15\text{ V}$	250			μV
	$V_s = \pm 5\text{ V}$	350			
I_b ieejas strāva	$V_s = \pm 15\text{ V}$	± 1			μA
	$V_s = \pm 5\text{ V}$	± 1.5			
A_{ol} atvērtā loka ieguvums	$V_{out} = \pm 10\text{ V}$ $R_L = 2\text{ kOhm}$		82		V/mV

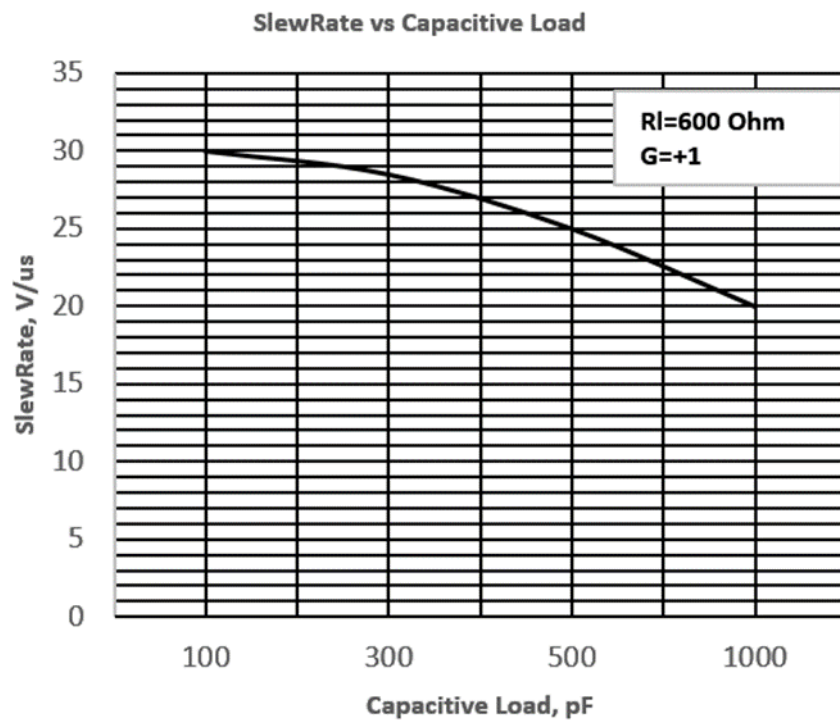
Vout izejas sprieguma svārstības	Izejas signāls - SIN 10kHz RI=600 Ohm Vs= ±15 V	± 13	V
Īssavienojuma plates strāva	Vs= ±15 V	25	mA
Maza signāla pārsitieni	RI=600 Ohm, Rsl= 0 Ohm Cl= 100 pF	8	%
	RI=600 Ohm, Rsl= 0 Ohm Cl= 300 pF	10	
	RI=600 Ohm, Rsl= 0 Ohm Cl=1000 pF	30	
	RI=600 Ohm, Rsl=25 Ohm Cl=1000 pF	15	
Vs		±4.5 ±18	V
Strāvas stiprums izslēgtā stāvoklī		8 10	mA
Darba temperatūras diapazons		-40 +85	°C



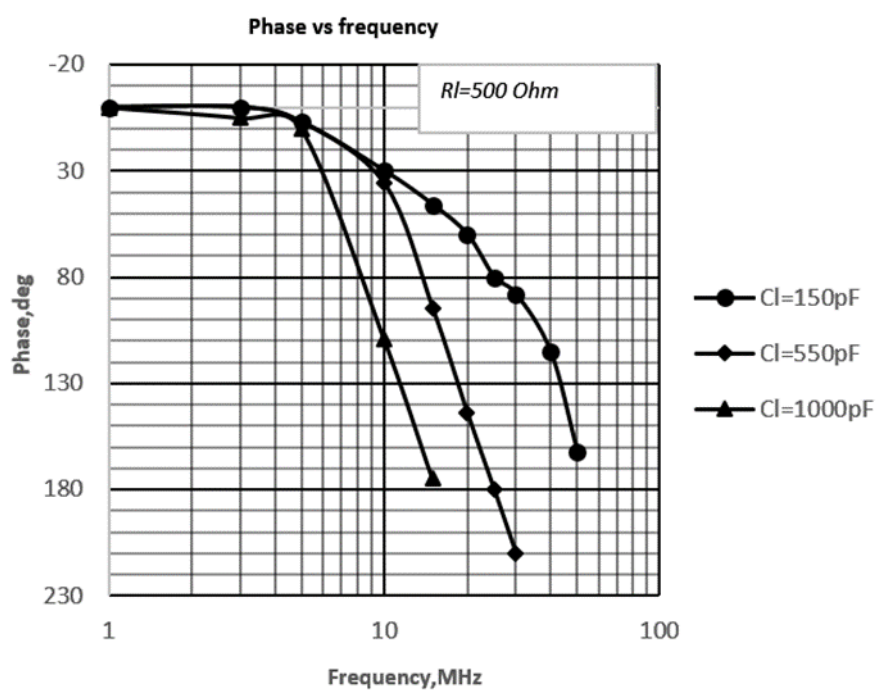
2.7.zīm. Amplitūdas un fāzes raksturlielumi. Fāzes rezerve



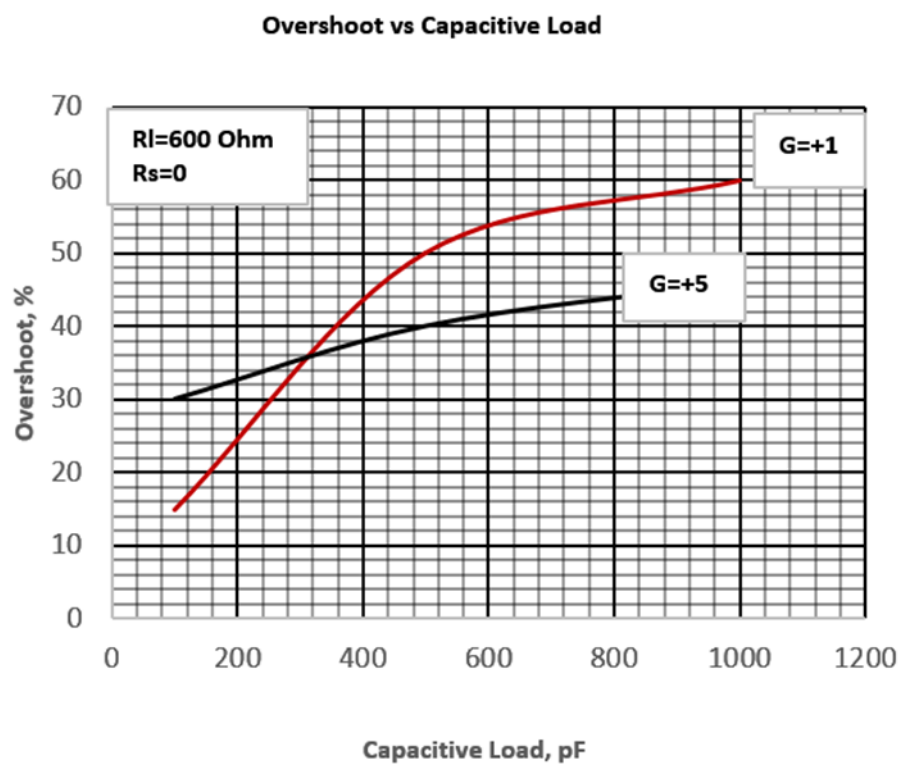
2.8..zīm. THD atkarība no izejas sprieguma.



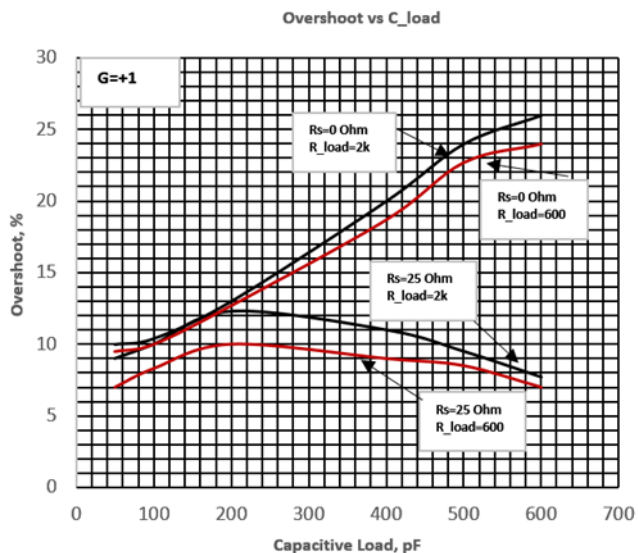
2.9.zīm. izejas sprieguma pastiprināšanas ātruma atkarība no slodzes kapacitātes



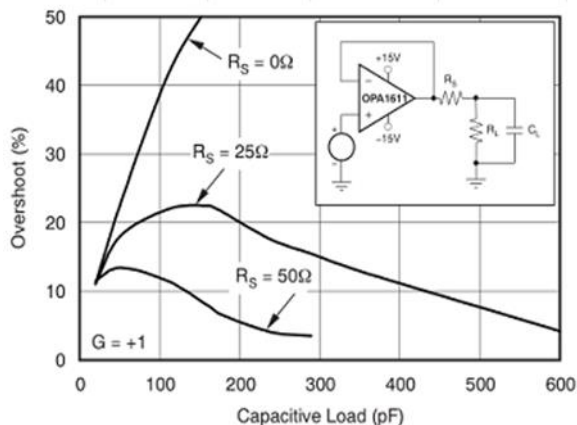
2.10. zīm. Fāzes atkarība no slodzes kapacitātes



2.11.zīm. Pārsitienu atkarība no slodzes kapacitātes un no pastiprināšanas koeficienta



OPA 1611-12 Small-Signal Overshoot vs Capacitive Load



2.12.zīm. Hibrīdā OpAmp un OPA1611 pārsitienu salīdzinājums

Salīdzinošie grafiki par izstrādātajiem pastiprinātājiem ar OPA1611 uzrāda nozīmīgi lielāku noturības rezervi un secīgi nozīmīgi mazāku pārsitienu līmeni.

Secinājumi

Aktivitātes ietvaros tika veikti pētījumi par divām tēmām:

- Vakuuma elementa ar auksto katodu izstrāde
- Hi-End audio pastiprinātāja izstrāde

Pētījuma laikā izstrādājot vakuuma elementu, tika veikti iekārtas sagatavošanas darbi, veikti tehnoloģiskie testi aprīkojuma darbības pārbaudei un novērtēti tehnoloģiskie procesi, iegādāti un aprobēti jauni materiāli aukstā katoda izveidei. Tas dod iespēju sekojošās aktivitātēs pievērsties pētniecībai un zināšanu iegūšanai.

Izstrādājot Hi-End audio operacionālo pastiprinātāju tika izgatavoti pastiprinātāju prototipi un veikta to izpēte. Iegūtie rezultāti parāda, ka izstrādātie prototipi ir vienā līmenī ar labākajiem paraugiem pasaulē un vairākos parametros pat pārspēj tos.

Sekojošās aktivitātēs tiks veikts parametru noturības novērtējums ražošanā, novērtēta montāžas procesu ietekme uz parametriem un veikta paraugu eksperimentālā izstrāde