



„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”

Pārskata periods
01.04.2021. – 30.11.2021.

Rīga, 2021.

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

Igoris Iljins

S a t u r s

1. Ievads	4
2. Operacionālā pastiprinātāja (OP) korekcija	5
3. Ciparu analogā pārveidotāja (DAC) korekcija	9
4. Secinājumi	13

Ievads.

Šajā pētījuma periodā tika veikti šādi darbi:

1. Pēc iepriekšējās aktivitātēs izgatavotā audio operacionālā pastiprinātāja (OP) paraugu vērtēšanas:

- veiktas būtiskas OP shemotehnikas izmaiņas,
- veikta OP topoloģijas pārstrādāšana,
- izstrādāti un izgatavoti OP fotošablonu komplekti,
- izgatavota OP plāksnīšu izmēģinājuma partija,
- veikta testēšanas struktūru vērtēšana.

2. Pēc iepriekšējās aktivitātēs izgatavotā ciparu analogā pāveidotāja (DAC) paraugu vērtēšanas:

- veikta DAC shemotehnikas korekcija,
- veikta DAC topoloģijas korekcija,
- izstrādāti un izgatavoti fotošablonu komplekti,
- izgatavota DAC plāksnīšu izmēģinājuma partija,
- veikta testēšanas struktūru vērtēšana.

1. Audio operacionālā pastiprinātāja korekcija.

Veicot iepriekšējos pētījumos izstrādātā operacionālā pastiprinātāja struktūras un tehnoloģiskuma vērtēšanu, tika atklāti šādi trūkumi:

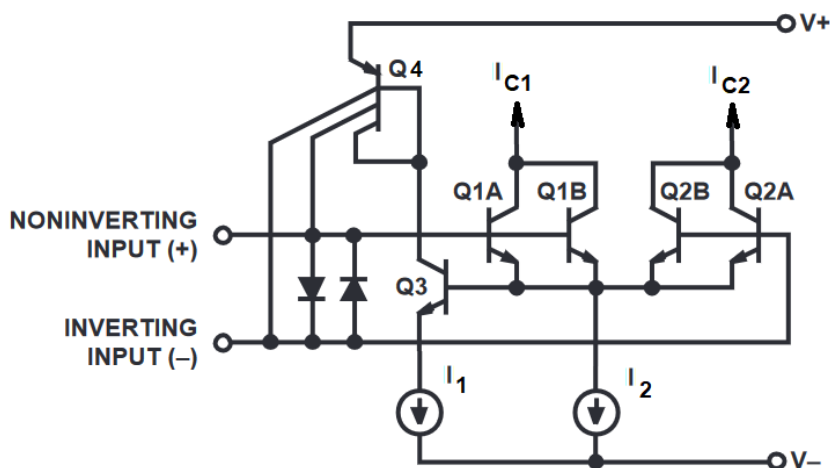
- ievērojamas ieejas strāvas, kuras esošās precizēšanas (trimming) procedūras gaitā, darba temperatūru diapazonā, garantēti neizdodas būtiski samazināt zem $1\ \mu\text{A}$. Iepriekš minētais samazina OP izmantošanas iespējas,
- ieejas strāvu precizēšanas (trimming) darbietilpīgums. Liels papildus ārējo komponentu daudzums, kas atrodas būtiski citādos temperatūras apstākļos. Shemotehniski ieejas strāvu kompensāciju nav iespējams saskaņot ar OP ieejas kaskādes darba strāvu. Iemesls – tā nav pieejama ārējām ķēdēm un līdz ar to tā dreifu nav iespējams ņemt vērā,
- aizsardzībai no fāzes apgriešanās, kas veidota uz ārējiem elementiem, ir nepieciešams liels to daudzums,
- liels skaits ārējo elementu (40 elementi) sarežģī korpusa un siltuma novades konstrukciju.

Lai novērstu iepriekš minētos trūkumus, tika pieņemts lēmums veikt iepriekšējo risinājumu korekciju. Pētījuma gaitā tika pārstrādāta operacionālā pastiprinātāja shemotehnika, kā arī tika pieņemts lēmums izmantot QFN16 4*4 0,65mm korpusu.

Tas ļāva:

- samazināt kopējo ārējo elementu skaitu hibrīdā pastiprinātājā no 40 uz 14,
- izslēgt parametru precizēšanas (trimming) operāciju hibrīdās mikroshēmas savākšanas laikā. Tā tika pārcelta uz plāksnīšu pārbaudes etapu, savienojot to ar citu elementu lāzerprecizēšanu,
- QFN korpusa būtiski samazina siltumpretestību un vienkāršo mikromontāžas konstrukciju.

Pastiprinātāja ieejas strāvu kompensācijai tiek izmantots klasiskais risinājums ar modifikācijām – kompensējošās strāvas avots ir kompensējošā tranzistora kolektora strāva. Tā ir proporcionāla ieejas diferenciālās kaskādes darba strāvai.



1.attēls

1.attēlā ir dots ieejas strāvu kompensācijas struktūrrisinājums. I_1 strāvas avots ir proporcionāls ieejas diferenciālās kaskādes I_2 darba strāvas avotam. Ar Q3 tranzistora kaskādes slēgumu tiek realizēti divi svarīgi momenti:

- I_1 avots praktiski atrodas zem tāda paša sprieguma kā I_2 avots,
- Q3 tranzistora kolektors atrodas zem tāda paša sprieguma kā diferenciālā pāra Q1 un Q2 tranzistoru kolektori.

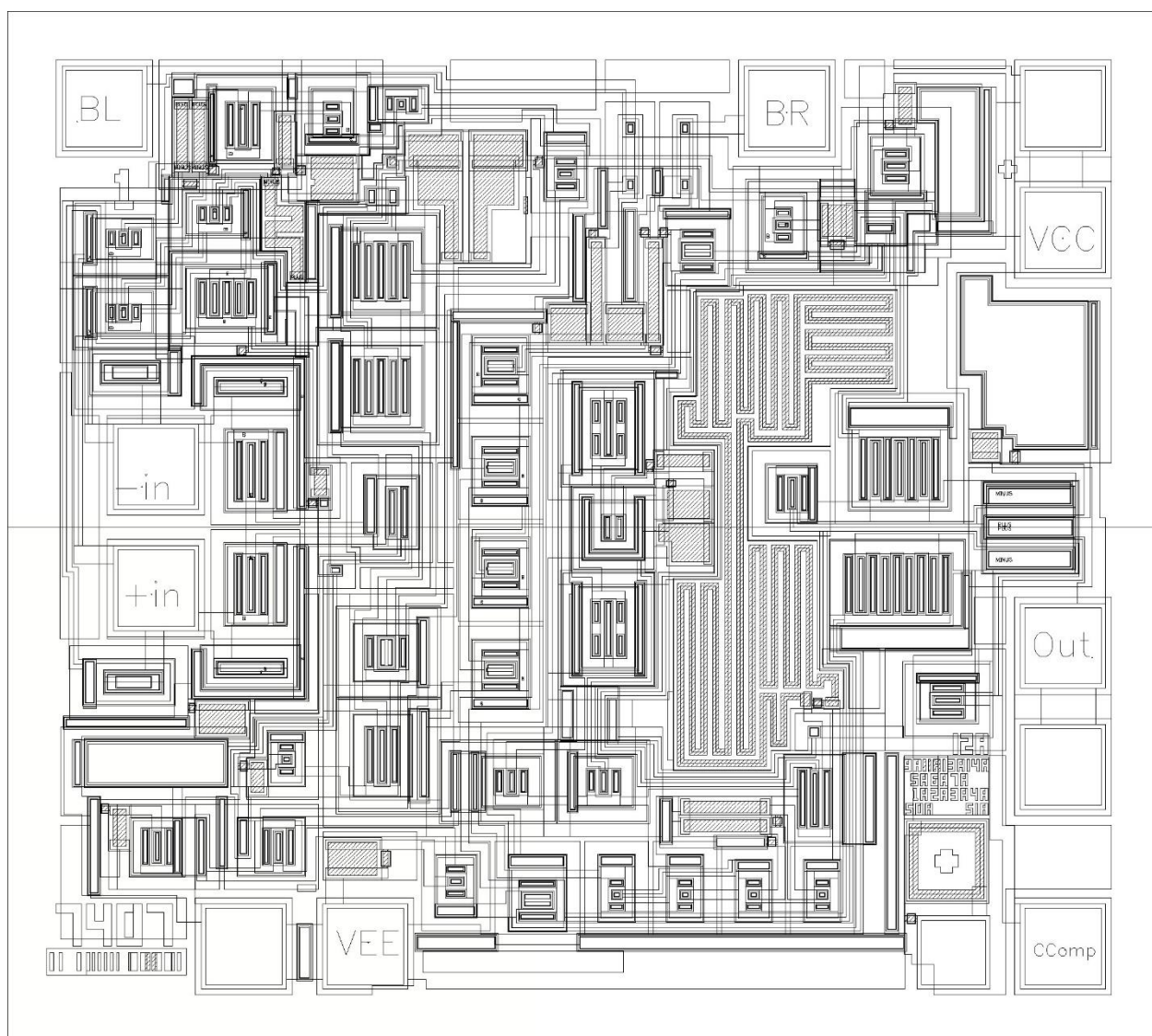
Iepriekš minētais nodrošina, ka mainot barošanas spriegumu un temperatūru, Q3 tranzistora un diferenciālā pāra Q1 un Q2 tranzistoru raksturlielumi mainās identiski. Uz Q4 tranzistora realizētais strāvas spogulis (current mirror) formē divas kolektora strāvas, kuras ir proporcionālas ieejas diferenciālā pāra Q1 un Q2 bāzes strāvām un kuras mainās kopā ar tām.

Būtībā shemotehnika ir daudz sarežģītāka. Tā ļauj veikt plēves rezistoru, kuri neatkarīgi vada Q4 kolektora strāvas, precizēšanu (trimming) ar lāzeru. Aprēķināts, ka tas ļauj kompensēt ieejas strāvas līdz 10 nA (t.i. samazināt aptuveni 100 reizes).

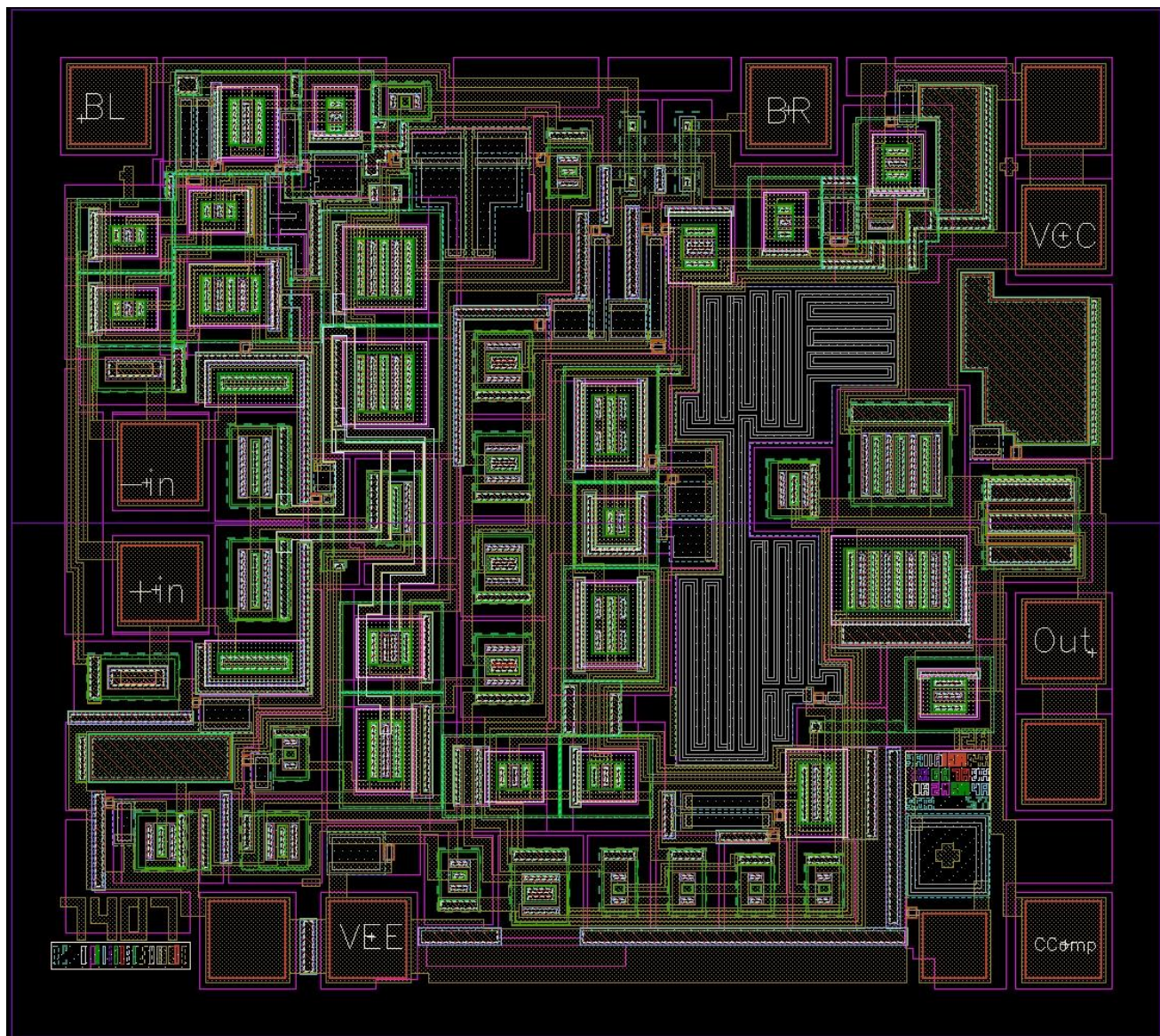
Atšķirībā no hibrīdizpildījuma, kur aizsardzība no fāzes apgriešanās bija izveidota ieejas ķēdēs (ierobežojot ieejas signālu noteiktās robežās), shēmas korekcijas gaitā tika realizēts cits risinājums - tiek sekots ieejas diferenciālā pāra tranzistoru kolektoriem.

Aizsardzībai no fāzes apgriešanās ieejas ķēdē bija vēl otrs trūkums – būtiska parazitkapacitāte. Jaunajā risinājumā šī problēma tika novērsta.

Ņemot vērā visu iepriekš minēto, tika pārstrādāta operacionālā pastiprinātāja topoloģija. Topoloģijas ārējais izskats ir dots 2.attēlā un 3.attēlā.



2.att. Operacionālā pastiprinātāja kopskats



3.att. Operacionālā pastiprinātāja kopskats krāsās/kārtās

Pētījuma gaitā tika izgatavoti starpposmu un darba šablonu komplekti, kā arī tika izgatavota OP plāksnīšu izmēģinājuma partija.

Operacionālie pastiprinātāji tika izgatavoti ar plēves rezistoriem, izmantojot komplimentāro bipolāro tehnoloģiju.

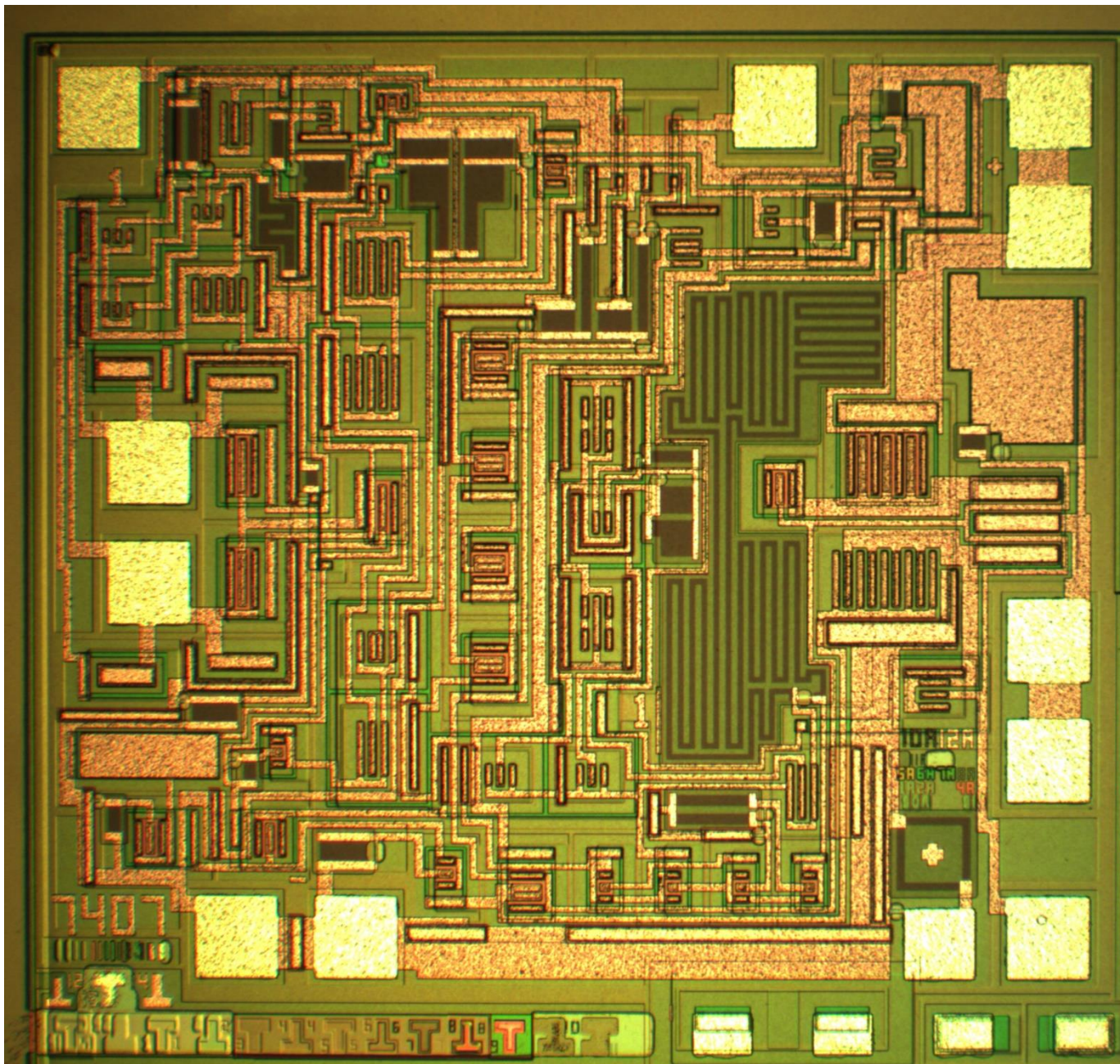
Tehnoloģijas pamatsoļi:

1. N^+ slēptā kabata
2. N^+ slēptais slānis
3. P^+ slēptais slānis
4. P-kabata
5. Epitaksija
6. Sadalīšana
7. N^- bāze
8. P^- bāze
9. P^+ emitters

10. N⁺ emitters
11. Kontakts 1
12. Silīcija nitrīds (Si₃N₄)
13. Kontakts 2
14. Papildus metalizācija
15. Plēves rezistors
16. Metalizācija
17. Pasivācija

Lai pēc iepriekš minētā tehnoloģiskā maršruta izgatavotu plāksnītes, bija nepieciešams veikt aptuveni 600 tehnoloģiskās operācijas.

Šobrīd galvenās tehnoloģiskās operācijas ir pabeigtas. Ir iegūti kristāli (4.att.). Tiem ir jāveic precizēšana (trimming) ar lāzeru un jāmēra to parametri.



4.att. Izgatavotā operacionālā pastiprinātāja kristāls

2. Ciparu analogā pārveidotāja (DAC) korekcija.

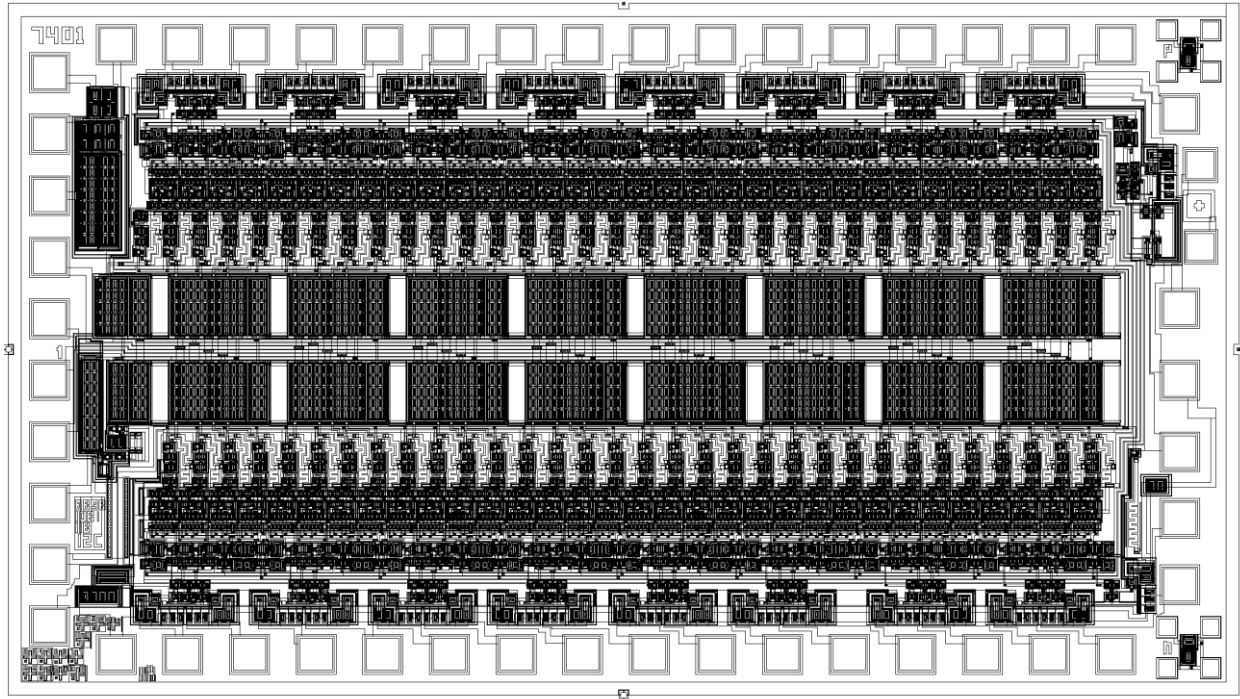
Veicot iepriekšējās petījumu aktivitātēs izstrādātā ciparu analogā pārveidotāja (DAC) kristālu analīzi, tika konstatētas šādas problēmas:

- Iref references strāvas ieeja nekorekti uzturēja potenciālu uz ieejas (kompensācija). Šī neprecizitāte ļāva novērtēt DAC darbību, bet neļāva sasniegt nepieciešamo atkārtojamības precizitāti visās 16 strāvas izejās,
- atklājās neprecizitātes dešifratora darbībā.

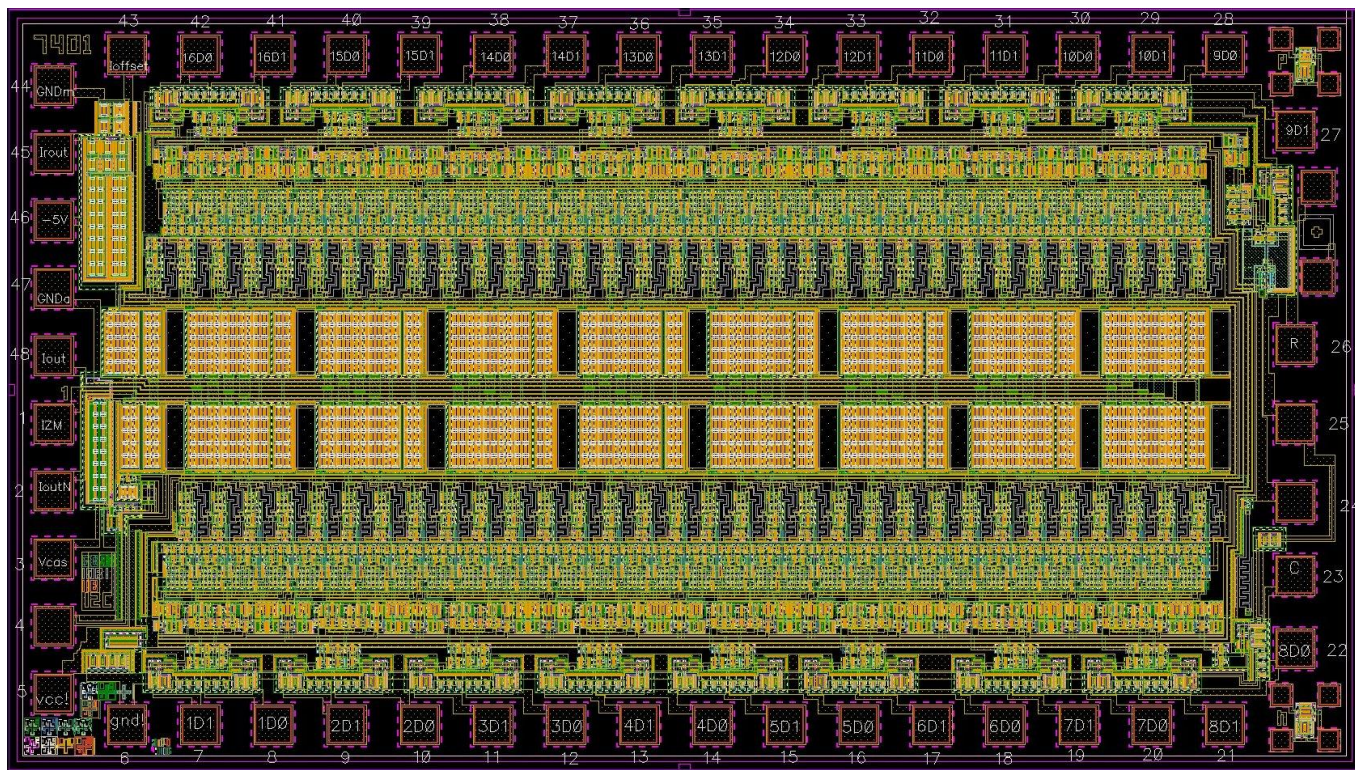
Tā kā esošajā CMOS tehnoloģijā ir grūti iegūt precīzi saskaņotus maza izmēra tranzistorus, tika pieņemts lēmums no shēmas izslēgt operacionālo pastiprinātāju, kurš

nodrošināja kompensāciju Iref strāvas ieejā. Šī funkcija tika nodota ārējiem elementiem, kā rezultātā šajā mezglā tika vienkāršots uzdevums.

Lai novērstu atklātos nekorektumus, tika veikta kristāla pārstrādāšana, topoloģijas korekcija (5.att.), izgatavoti fotošablوني, kā arī tika izgatavotas plāksnīšu izmēģinājuma partijas.



5.att. DAC kopskats



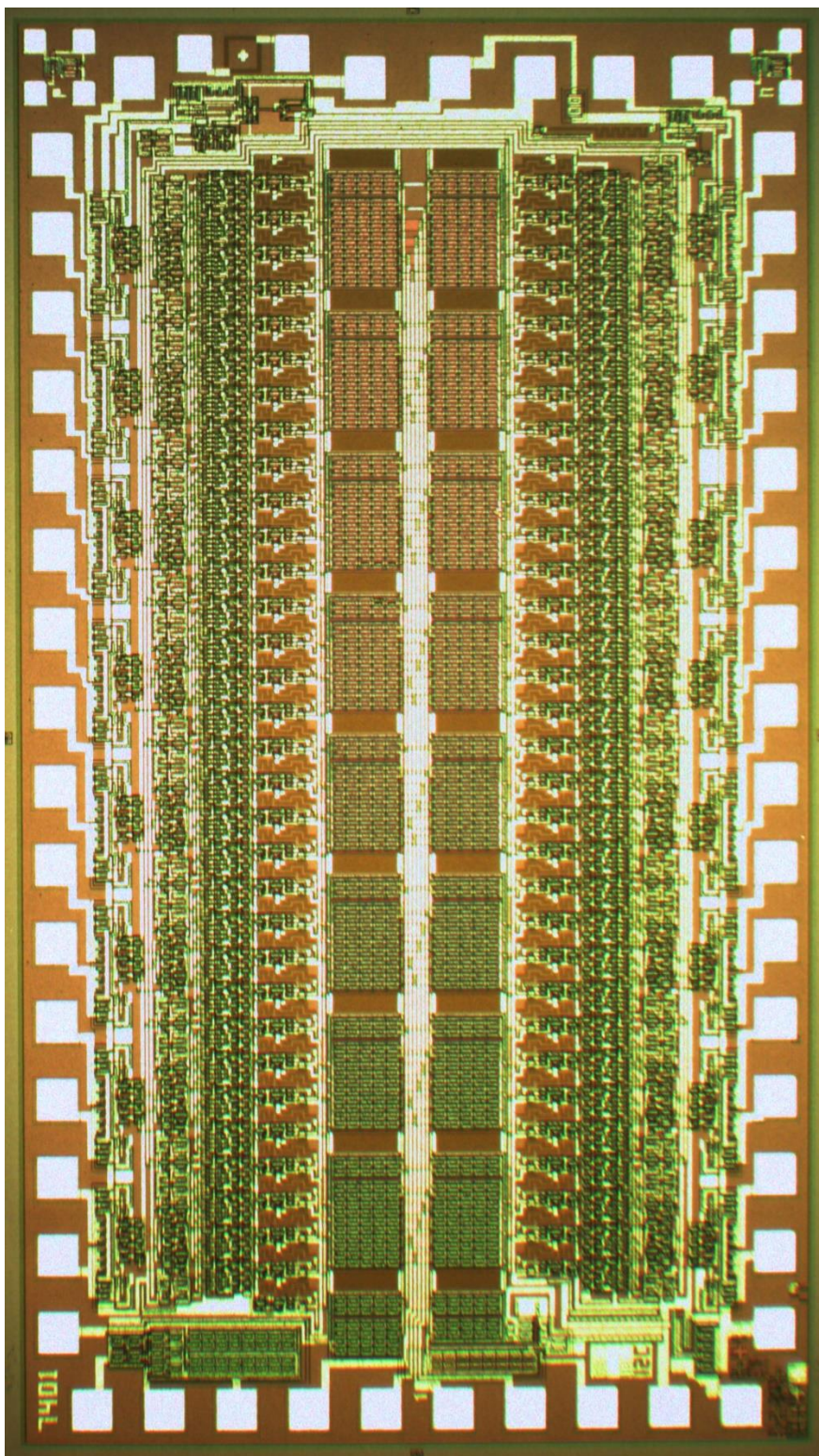
6.att. DAC kopskats krāsās/kārtās

Tehnoloģijas pamatsoli:

0. Sākuma pamatne K Φ -4,5

1. P-kabata, bora implantācija, dziļums $7 \pm 1 \mu\text{m}$, pretestība $1600 \pm 1 \Omega/\text{sq}$
2. N - apgabali, fosfora implantācija, dziļums $1 \pm 0,5 \mu\text{m}$, pretestība $120 \pm 30 \Omega/\text{sq}$
3. P - apgabali, bora implantācija, dziļums $1,2 \pm 0,5 \mu\text{m}$, pretestība $350 \pm 50 \Omega/\text{sq}$
4. Oksīds, slāņa biezums $0,048 \pm 0,004 \mu\text{m}$
5. Polisiļcijs, slāņa biezums $0,4 \pm 0,04 \mu\text{m}$, pretestība $30 \pm 15 \Omega/\text{s}$
6. N - kanāla piebūve, fosfora leģēšana, dziļums $0,6 \pm 0,3 \mu\text{m}$, pretestība $100 \pm 25 \Omega/\text{sq}$
7. P - kanāla piebūve, bora leģēšana, dziļums $0,6 \pm 0,3 \mu\text{m}$, pretestība $250 \pm 50 \Omega/\text{sq}$
8. N+ kontaktu leģēšana, fosfora leģēšana, dziļums $0,8 \pm 0,3 \mu\text{m}$, pretestība $30 \pm 6 \Omega/\text{sq}$
9. SiO₂ starpslāņu izolācija, slāņa biezums $0,75 \pm 0,075 \mu\text{m}$
10. Plēves rezistors, slāņa biezums $0,015 \pm 0,005 \mu\text{m}$, pretestība $850 \pm 140 \Omega/\text{sq}$
11. Metalizācija - alumīnijs ar silīciju, slāņa biezums $1,3 \pm 0,04 \mu\text{m}$
12. Pasivācija, slāņa biezums $0,73 \pm 0,07 \mu\text{m}$

Kopumā, lai izgatavotu plāksnītes pēc šī tehnoloģiskā maršruta, bija nepieciešams veikt aptuveni 450 operācijas.



7.att. Izgatavotā DAC kristāls

Šobrīd galvenās tehnoloģiskās operācijas ir pabeigtas. Ir iegūti kristāli (7.attēls), kurus nepieciešams precizēt (trimming) ar lāzeru, kā arī ir jāveic kristālu parametru mērījumi.

Secinājumi.

Lai veiktu pētījuma visu darbu kopumu, bija nepieciešama savlaicīga un saskaņota uzņēmuma darbība. Taču vīrusa COVID-19 noteikto ierobežojumu un radīto problēmu dēļ (materiālu piegāžu aizkavēšanās, karantīnas pasākumi), daļa no tehnoloģiskiem procesiem tika nobīdīti laikā. Iepriekš minētā dēļ visus pētījuma darbus neizdevās pabeigt šīs aktivitātes laikā.

Izgatavoto kristālu tehnoloģiskie testi parādīja, ka slāņu parametri atbilst tehniskām prasībām un līdz ar to var veikt nākamos soļus - kristālu precizēšanu (trimming) ar lāzeru un parametru mērīšanu.

Saskaņā ar š.g. 3. novembrī pieteiktajiem pētījuma grozījumiem ir precizēti šī starpposma sasniedzamie rezultāti un jaunajā termiņā, līdz 30.05.2022., pētījuma kopējie rezultāti tiks sasniegti.