VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Valdas Astrauskas

0,25 μm KMOP TECHNOLOGIJOS KRŪVIUI JAUTRAUS PRIEŠSTIPRINTUVIO PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

DESIGN AND INVESTIGATION CHARGE SENSITIVE PREAMPLIFIER IN CMOS 0,25 μm TECHNOLOGY

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas valstybinis kodas 621H61003

Mikro ir nano elektronikos specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)
Algirdas Baškys
(Vardas, pavardė)
2013-06-
(Data)

Valdas Astrauskas

0,25 μm KMOP TECHNOLOGIJOS KRŪVIUI JAUTRAUS PRIEŠSTIPRINTUVIO PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

DESIGN AND INVESTIGATION CHARGE SENSITIVE PREAMPLIFIER IN CMOS 0,25 μm TECHNOLOGY

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003

Mikro ir nano elektronikos specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas	dr. Vaidotas Barzdėnas (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	2013-06- (Data)
Konsultantas	(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)
Lietuvių kalbos konsultantas	lekt. Vaida Buivydienė (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	2013-06- (Data)

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Elektronikos fakultetas
Kompiuterių inžinerijos katedra
Technikos mokslų sritis
Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo kryptis
Elektronikos inžinerijos studijų kryptis
Elektronikos inžinerijos studijų programa
Mikro ir nano elektronika specializacija

TVIRTINU
Kompiuterių inžinerijos katedros vedėjas
prof. Algirdas Baškys _____
2012 m. spalio mėn. d.
.

Studentui (ei) **Valdui Astrauskui**
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: **0,25 µm KMOP technologijos krūviui jautraus priešstiprintuvio projektavimas ir tyrimas**
(lietuvių kalba)

Design and Investigation of Charge Sensitive Preamplifier in CMOS 0,25 µm Technology
(anglų kalba)

Patvirtinta 201 ____ m. _____ mėn. _____ d. dekano įsakymu Nr. _____

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2013 m. birželio mėn. 01 d.

Darbo tikslas: **Su programiniu paketu Cadence suprojektuoti 0,25 µm KMOP technologijos krūviui jautrų priešstiprintuvį ir ištirti plačiame jo veikimo diapazone.**

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Naudojant integrinių grandynų projektavimo programinį paketą Cadence suprojektuoti krūviui jautrų priešstiprintuvį, plačiai taikomą šiuolaikinėje medicinos technikoje. Projektavimui naudoti 0,25 µm ir/arba 90 nm silicio komplementariųjų lauko tranzistorių (KMOP) technologiją. Pagrindiniai krūviui jautraus priešstiprintuvio parametrai: registravimo trukmė turi būti mažiau nei 45 ns, vartojamoji galia mažiau nei 3 µW, ekvivalentinis triukšmų krūvis mažiau nei 100 ē, perdavimo koeficientas didesnis nei 12 mV/kē. Aktyviajam taškiniui jutikliui naudojama CdZnTe medžiaga, kurios storis yra nuo 500 µm iki 100 µm, vaizdo taško dydis mažiau nei (50×50) µm, gūburinio išvado diametras iki 50 µm. Krūviui jautraus stiprintuvo tyrimai turi būti atlikti tiek principinei elektrinei schemai, tiek suprojektuotai topologijai.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: _____
(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Vadovas: _____ **Vaidotas Barzdėnas, dr.**
(parašas) (vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Užduotį gavau: _____ _____
(studento parašas) (data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Kompiuterių inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. ……..
Data ….-….-….

Elektronikos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **0,25 mikro m KMOP technologijos krūviui jautraus priešstiprintuvio projektavimas ir tyrimas**

Autorius **Valdas Astrauskas** Vadovas doc. dr. **Vaidotas Barzdėnas**

Kalba
lietuvių
užsienio

Anotacija

Šio magistro darbo tikslas – naudojant integrinių grandynų projektavimo programinį paketą Cadence suprojektuoti krūviui jautrų priešstiprintuvį (KJP) – vieną iš krūviui jautraus stiprintuvo KJS sudedamųjų dalių, plačiai taikomą skaitmeninėse elementariųjų dalelių registravimo sistemose (SEDRS). Projektavimui buvo panaudota 0,25 μm silicio komplementariųjų lauko tranzistorių (KMOP) technologija.

Magistro darbe buvo analizuojama SEDRS sistemų konstrukcija, SEDRS veikimo principas, jose naudojamų KJP veika ir pagrindiniai jų parametrai.

Darbo metu buvo apskaičiuotos ir įvertintos AJT sujungimų parazitinės talpos ir varžos siekiant tiksliau įvertinti jų įtaką KJP signalui.

Buvo suprojektuotos KJP principinė elektrinė schema ir jos topologija bei atliktas schemos ir topologijos kompiuterinis modeliavimas, o gauti rezultatai palyginti.

Pagrindiniai gauti KJP parametrai – registravimo trukmė mažesnė nei 45 ns, vartojamoji galia mažesnė nei 3 μW, perdavimo koeficientas didesnis nei 35 mV/kē. Aktyviajam taškiniui jutikliui naudojama CdZnTe medžiaga, kurios storis yra nuo 500 μm iki 100 μm, vaizdo taško dydis mažesnis nei (50×50) μm, gūburinio išvado diametras iki 50 μm.

Magistro darbą sudaro šešios dalys: įvadas, literatūros analizė, parazitinių talpų ir varžų skaičiavimai, KJP schemos ir topologijos projektavimo ir tyrimo rezultatai, išvados ir literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 62 p. teksto be priedų, 39 iliustr., 13 lent., 37 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: skaitmeninė elementariųjų dalelių registravimo sistema, aktyvusis taškinis jutiklis, krūviui jautrus stiprintuvas, krūviui jautrus priešstiprintuvis, krūvis, KMOP, perdavimo koeficientas, registracijos trukmė, triukšmai, parazitinės talpos, gūburinis išvadas.

Vilniaus Gediminas technical university

Faculty of **Electronics**

Computer Engineering department

ISBN ISSN

Copies No. ……..

Date ….-….-….

Electronics Engineering study programme master's thesis.

Title **Design and Invesitgation of Charge Sensitive Preamplifier in CMOS 0,25 micro m Technology**

Autor **Valdas Astrauskas** Executive Vadovas doc. dr. **Vaidotas Barzdėnas**

Language

lithuanian

foreign (english)

Annotation

The purpose of the master's thesis: using integrated circuits designing software „Cadence" to project charge sensitive preamplifier (CSP) which is one of the blocks of the charge sensitive amplifier (CSA). It is widely applicable in digital counting systems of elementary particles counting systems (DCSEP). There was used 0,25 μm technology of CMOS for the designing.

In the master's thesis there was analyzed the construction of DCSEP, its operation principle, CSP's act and basic parameters used in it.

During the master's thesis there was calculated and evaluated APD's junction of parasitic capacitance and resistance in order to precisely evaluate their influence to CSP signal.
There was designed CSP's principal electrical scheme and its typology and there was performed the computer-based simuliation of scheme and typology. The given results were compared.

The basic received parameters of CSP: peaking time is less than 45 ns, power consumption is less than 3 μW, the gain is bigger than 35 mV/kē. For the APD there was used the CdZnTe material whose thickness is from 500 μm to 100 μm, pixel size is less than (50×50) μm, the bump diameter is to 50 μm.

Master's thesis consists of six parts: introduction, literature analysis, the calculations of parasitic capacitance and resistance, CSP's scheme and typology designing and analysis results, conclusions and references.

The amount of thesis: 62 pages without appendixes, 39 illustrations, 37 bibliographical sources.

The appendixes of the thesis are enclosed separately.

Keywords: digital elementary particles counting system, active pixel device, charge sensitive amplifier, charge sensitive preamplifier, charge, CMOS, gain, shaping time, noise, parasitic capacitance, bump.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų, sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Valdas Astrauskas, 20054529

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Elektronikos inžinerija, MNEfm-11

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2013 m. gegužės 29 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „0,25 mikro m KMOP technologijos krūviui jautraus priešstiprintuvio projektavimas ir tyrimas“ patvirtintas 2011 m. lapkričio 22 d. dekano potvarkiu Nr. 260el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas dr. Vaidotas Barzdėnas.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

	Valdas Astrauskas
(Parašas)	(Vardasi ir pavardė)

Turinys

Paveikslų sąrašas 9

Lentelių sąrašas 11

Įvadas. Užduoties analizė 12

1. Skaitmeninės elementariųjų dalelių registravimo sistemos – SEDRS 15
1.1. Puslaidininkinis dalelių registravimo metodas 15
1.2. Medžiagos puslaidininkinių jutiklių gamybai 17
1.3. Dvilustės aktyviųjų taškinių jutiklių sistemos 18
1.4. SEDRS registravimo elektronikos sandara 22
1.5. Skyriaus išvados 23

2. Krūviui jautrus stiprintuvas ir jo parametrai 24
2.1. KJS sandara ir veikimas 24
2.2. KJS parametrai 26
2.2.2. Krūviui jautraus stiprintuvo perdavimo koeficientas 27
2.3. Krūviui jautraus stiptintuvo registracijos trukmė τ 27
2.4. Krūviui jautraus stiprintuvo vartojamoji galia 28
2.5. KMOP Krūviui jautraus stiprintuvo triukšmai 29
2.6. Skyriaus išvados 33

3. ATJ sujungimų talpos ir varžos 34
3.1. Parazitinių talpų įtaka SEDRS registruojančiai elektronikai 34
3.2. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}jutiklis}$ tarp kontaktinės aikštelės ir jutiklio skaičiavimas 37
3.3. Talpos tarp gretimų kanalų kontaktinių aikštelių $C_{kont\text{-}kont}$ skaičiavimas 40
3.4. Talpos tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo $C_{kont\text{-}pad}$ skaičiavimai 43
3.5. Gūburinio išvado, kontaktinės aikštelės ir UBM sluoksnių varžos skaičiavimas 45
3.6. Skyriaus išvados 50

4. KJP principinės elektrinės schemos projektavimas ir tyrimas Cadence programiniu paketu 51
4.1. Krūviui jautraus priešstiprintuvio schemos analizė, reikiamų parametrų nustatymas 51
4.2. KJS perdavimo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo krūvio Qdet 54
4.3. KJS perdavimo koeficiento priklausomybė nuo detektoriaus talpos Cdet 57
4.4. KJS perdavimo koeficiento priklausomybė nuo detektoriaus parazitinės talpos Cpar 60
4.5. KJS perdavimo koeficiento priklausomybė nuo KJP grįžtamojo ryšio talpos Cf 62
4.6. Skyriaus išvados 63

5. KJP topologijos projektavimas ir modeliavimas 64
5.1. Reikalavimai topologjos projektavimui 64
5.2. KJP topologija ir jos modeliavimo rezultatai. 66
5.3. Skyriaus išvados 70

6. Išvados 71

Literatūra 74

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Detektoriaus veikimo principą vaizduojanti blokinė schema 16

1.2 pav. Dvilustė skaitmeninė elementariųjų dalelių registravimo sistema 20

1.3 pav. ATJ skerspjūvio vaizdas 20

1.4 pav. 0,13 μm KMOP technologijos (SCN013 8RF_IBM) kristalo skersinis pjūvis. 21

1.5 pav. ATJ vaidas iš viršaus 21

1.6 pav. Aktyviųjų taškinių jutiklių registravimo elektronikos architektūra 23

2.1. pav. Blokinė krūviui jautraus stiprintuvo schema 25

2.2. pav. KJS išėjimo impulso priklausomybė nuo naudojamų integratorių skaičiaus 28

2.3. pav. Aktyviųjų taškinių jutiklių matrica 29

2.4. pav. Blokinė triukšmų poveikio schema 30

3.1 pav. Parazitinės talpos, atsirandančios tarp jutiklio ir kontakto 35

3.2 pav. Parazitinės talpos tarp gretimų kontaktinių aikštelių 35

3.3 pav. $C_{kont\text{-}pad}$ parazitinės talpos prilausomybė nuo vaizdo taško dydžio 36

3.5. pav. Jutiklio srovės impulso dedamųjų priklausomybė nuo gūburinio išvado skersmens 37

3.6 pav. Parazitinės talpos, atsirandančios tarp jutiklio ir kontakto 38

3.7 pav. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}jutiklis}$ priklausomybė nuo kontaktinės aikštelės spindulio R 39

3.8 pav. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}jutiklis}$ priklausomybė nuo atstumo tarp jutiklio ir kontaktinės aikštelės 40

3.9 pav. Talpa tarp gretimų kanalų kontaktinių aikštelių 41

3.10 pav. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}kont}$ priklausomybė nuo atstumo tarp kontaktinių aikštelių 42

3.11 pav. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}pad}$ priklausomybė nuo atstumo tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo 44

3.12 pav. Jutiklio ir registruojančios elektronikos sujungimas ir ekvivalentinė varžų schema 46

3.13 pav. Gūburinio išvado matmenys 47

3.14 pav. Gūburinio išvado varža, priklausomai nuo jo geometrijos 48

3.15 pav. Kontaktinės aikštelės ir UBM sluoksnių varža, priklasuomai nuo jų geometrijos 50

4.1 pav. KJP principinė elektrinė schema 52

4.2 pav. KJP principinė schema, suprojektuota Cadence 53

4.3 pav. srovės ilpulso „trikampis“ suformuotas ipulse elemente 54

4.4 pav. KJP išėjimo signalas, kai Qdet = 1 kē, T = 27 °C, Cdet = 30 fF, Cfb = 25 fF, CdZnTe jutiklis 55

4.5 pav. KJP išėjimo signalai, kai Qdet kinta nuo 1 kē iki 20 kē, T = 27 °C, Cdet = 30 fF, Cfb = 25 fF, CdZnTe jutiklis 55

4.6 pav. KJP perdavimo koeficientas K, kai Cdet = 30 fF, Cfb = 25 fF, T = 27 °C 56

4.7 pav. KJP išėjimo įtampos laikinės chrakteristikos, kai Cdet kinta nuo 0 fF iki 1000 fF 58

4.8 pav. KJP perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo Cdet, kai T=27°C, Cf=25 fF, Qin= 1kē, jutiklis – CdZnTe 59

4.9 pav. KJP perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo suminės Cpar talpos, kai T=27°C, Cdet=30 fF, Cf=25 fF, Qin= 1 kē, jutiklis – CdZnTe 61

4.10 pav. KJP perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo Cfb talpos, kai T=27°C, Cdet=30fF, Qin= 1 kē, jutiklis – CdZnTe 62

5.1. pav. Krūviui jautraus priešstiprintuvio topologija 67

5.2 pav. KJP įšėjimo signalai, schemos Cfb talpa 25 fF, topologijos Cfb talpa 56,25 fF, Qdet = 1 kē, Cdet = 30 fF 67

5.3 pav. KJP įšėjimo signalai, schemos ir topologijos talpa 56,25 fF, Qdet = 1 kē, T = 27 °C, Cdet = 30 fF 68

5.4 pav. KJP princinės elektrinės schemos ir topologijos įšėjimo signalai, Cfb = 56,25 fF, Qdet kinta nuo 10 kē iki 70 kē, T = 27 °C, Cdet = 30 fF 69

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}jutiklis}$ dydis kintant gūburinio išvado skersmeniui ir kontaktinės aikštelės matmenims 38

2 lentelė. Dielektrikų dielektrinės skvarbos 41

3 lentelė. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}kont}$ priklausomybės nuo atstumo tarp kontaktinių aikštelių 41

4 lentelė. Dielektrikų dielektrinės skvarbos 43

5 lentelė. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}pad}$ dydis kintant kontaktinės aikštelės spinduliui R 44

6 lentelė. Galimi UBM metalizacijos sluoksniai 46

7 lentelė. Gūburinio išvado varžos priklausomybė nuo jo geometrijos ir medžiagos 48

8 lentelė. Kontaktinės aikštelės ir UBM sluoksnių varžos priklausomybė nuo geometrijos ir medžiagos 49

9 lentelė. KJP modeliavimo rezultatai 56

10 lentelė. KJP išėjimo įtampos ir perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo Cdet 58

11 lentelė. KJP išėjimo įtampos ir perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo Cpar talpos 60

12 lentelė. KJP išėjimo įtampos ir perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo Cfb talpos 62

13 lentelė. KJP elektrinės schemos ir topologijos perdavimo koeficientai 69

Įvadas. Užduoties analizė

Abibendrintai krūvio stiprintuvas – tai srovės integratorius, valdomas srovės šaltinio su talpinio pobūdžio įtaisu. Priešingai nei jo pavadinimas, krūvio stiprintuvas nestiprina krūvio jo įėjimo metu (jis gali stiprinti tik jo sukeltą įėjimo įtampą), o perduoda įėjusį krūvį į atskaitinį, paprastai tai būna grįžtamojo ryšio, kondensatorių ir padaro įšėjimo įtampą proporcingą atskaitinio kondensatoriaus krūviui ir atitinkamai įėjimo krūviui. Paparastai krūvio stiprintuvai projektuojami kaip operaciniai stiprintuvai su grįžtamojo ryšio kondensatoriumi. Tokiu būdu grandinė veikia kaip krūvio-įtampos keitiklis [1]. Dėl šios savybės krūviui jautrūs stiprintuvai plačiai taikomi siganalams apdoroti, gaunamiem iš talpinių jutiklių, tokių kaip fotodetektoriai, fotodiodai, slėgio jutikliai, elementariųjų dalelių (jonizuojančios spinduliuotės) jutikliai, pjezoelekriniai jutikliai, piroelektriniai jutikliai ir kt. [2]. Dėl Milerio efekto grandinės pilnutinė įėjimo varža (impedansas) lygi beveik nuliui. Todėl visos atskiros talpos (kabelių talpos, stiprintuvo įėjimo talpos, ir t.t.) stiprintuvo įėjime iš esmės esti įžemintos ir neturi įtakos įšėjimo signalui [1].

Vėliau signalas sustiprinamas, suformuojamas, ir perduodamas registruojančiai/nuskaitymo elektronikai. Populiariausios registruojančios/nuskaitymo elektronikos grandinės yra CCD (angl. Charge Coupled Device) – pasyvieji taškiniai jutikliai ir ATJ (angl. Active Pixel Sensor – APS) – aktyvieji taškiniai jutikliai. Nuskaitymo/registravimo grandinių paskirtis yra išmatuoti labai mažą krūvį, laikomą kondensatoriuje [3,4,11].

Krūviui jautraus stiprintuvo KJS registracijos trukmės ribos nustatymas yra tiesiogiai susietas su krūviui jautraus stiprintuvo (KJS) darbo dažniu. Didėjant registracijos trukmei yra mažinamas KJS darbo dažnis, priešingu atveju didėja klaidos tikimybė nuskaitant informaciją KJS išėjime. Vis dažniau šie stiprintuvai yra įgyvendinami monolitiniuose procesuose, kurie yra būtini siekiant didesnio jutiklių skaičiaus ploto vienete ar kuo didesnio funkcijų integracijos laipsnio [2].

Šie stiprintuvai gaminami taikant Si KMOP ir GaAs technologijas. KMOP technologija plačiai taikoma todėl, kad jos pagrindu pagamintuose įtaisuose teka labai mažos srovės, ko pasekoje šie įtaisai vartoja mažai galios, jiems naudojami mažų įtampų maitinimo šaltiniai. Didžiausias šios technologijos trūkumas yra sąlyginai prastas atsparumas jonizuojančiai spinduliuotei (1 – 10) Mrad. Todėl esant didelei spinduliuotei plačiau taikomos GaAs technologijos, nes GaAs yra 10 kartų atsparesnis jonizuojančiai spinduliuotei nei Si [3,11].

Pagal panaudojimo sritį, krūviui jautrūs stiprintuvai plačiai taikomi šiuolaikinėje diagnostikos medicinoje, t.y. rentgenografijoje, mamografijoje, dendografijoje [3,11].

Tiek rentgenografijoje, tiek mamografijoje naudojami rentgeno spinduliai, kurie, viršijus leistina dozę, yra kenksmingi organizmui. Todėl nerekomenduojama per metus, nesant būtinybei, darytis rentgeno nuotraukas daugiau negu du kartus. Tačiau atsiranda atvejų, kai būtina daryti daug

rentgenologinių tyrimų, nes tik tokiu būdu pavyksta iki galo ištirti organizmą ir tiksliai nustatyti diagnozę, kad būtų išgelbėta ligonio gyvybė.

Remiantis tarptautinių organizacijų skelbiamais statistiniais duomenimis, vidutiniškai apie 30% visos metinės apšvitos nuo jonizuojančiosios spinduliuotės dozės žmogus pasaulyje gauna medicininių procedūrų metu. Taigi, medicininė apšvita yra svarbus žmonių apšvitos šaltinis. Būtina pabrėžti tai, kad ši apšvita didesnė ekonomiškai išsivysčiusiose šalyse. Rentgeno diagnostikos, branduolinės medicinos ir spindulinės terapijos apimtys didėja. Kaip buvo minėta, to priežastis – jonizuojančioji spinduliuotė duoda daug naudos tiek diagnozuojant, tiek gydant įvairius susirgimus [6].

Pasak Radiacinės saugos centro Klaipėdos skyriaus vedėjos Irmos Zakarauskienės kiekvienais metais Lietuvoje atliekama apie 3,7 milijono rentgeno tyrimų. Mūsų šalyje gyvena apie 3,5 milijono gyventojų, tad išeitų, kad kiekvienas mūsų kasmet vidutiniškai tiriamas bent kartą. O vienam milijonui pasaulio gyventojų per metus vidutiniškai atliekama 330 tūkstančių rentgeno tyrimų [7].

Dažniausiai atliekami krūtinės ląstos rentgenografiniai tyrimai. Tačiau tyrimų skaičius neatspindi bendros dozės, kurią vieni ar kiti tyrimai lemia, kadangi įvairių tyrimų metu pacientai gauna įvairias dozes. Vis labiau populiarėjančių kompiuterinės tomografijos tyrimų nulemtos dozės sudaro beveik pusę visų rentgeno diagnostinių tyrimų nulemtos dozės. Taip yra todėl, kad pacientai kompiuterinės tomografijos tyrimų metu gauna dideles rentgeno dozes [6].

Norint mažesnio neigiamo jonizuojančios spinduliuotės poveikio žmogaus organizmui reikia mažesnės apšvitos jonizuojančiais spinduliais. Norint mažinti jonizuojančių spindulių apšvitą, reikia sumažinti švitinimo ekspozicijos trukmę ir tuo pačiu gauti daug ir aukštos kokybės rentgeno vaizdų [4,10]. Todėl siekiant sumažinti jonizuojančios spinduliuotės švitinimo trukmę, apšvitos dozę ir pagerinti gaunamų rentgeno vaizdų kokybę buvo pradėtos kurti skaitmeninės elementariųjų dalelių registravimo sistemos – SEDRS. Krūviui jautrūs stiprintuvai naudojami SEDRS aktyviuose jutikliuose – jų pirminėje, analoginėje registravimo elektronikoje.

Šio magistro darbo tikslas – naudojant integrinių grandynų projektavimo programinį paketą Cadence suprojektuoti krūviui jautrų priešstiprintuvį – vieną iš krūviui jautraus stiprintuvo sudedamųjų dalių, plačiai taikomą skaitmeninėse elementariųjų dalelių registravimo sistemose SEDRS. Darbo metu bus projektuojama 0,25 μm silicio komplementariųjų lauko tranzistorių (KMOP) technologija.

Pagrindiniai šio darbo uždaviniai:

- Išanalizuoti skaitmeninių elementariųjų dalelių registravimo sistemą (SEDRS), siekiant išsiaiškinti SEDRS veikimo principą, konstrukcijos sandarą, suprasti elementariųjų dalelių detektavimo ypatumus;
- Atlikti SEDRS naudojamų krūviui jautrių stiprintuvų (KJS) analizę, siekiant geriau suprasti KJP veiką, išsiaiškinti pagrindinius KJS parametrus;
- Išsiaiškinti SEDRS nuskaitymo elektronikoje atsirandančius parazitinius veiksnius, jų įtaką detektoriaus signalui.
- Atlikti platų principinės elektrinės KJP schemos kompiuterinį modeliavimą;
- Suprojektuoti KJP topologiją ir atlikti jos kompiuterinį modeliavimą;
- Principinės elektrinės schemos ir topologijos tyrimo rezultatus palyginti, suformuluoti išvadas.

Pagrindiniai užsiduotieji krūviui jautraus priešstiprintuvio parametrai yra tokie: registravimo trukmė turi būti mažesnė nei 45 ns, vartojamoji galia mažesnė nei 3 μW, ekvivalentinis triukšmų krūvis mažesnis nei 100 ē, perdavimo koeficientas didesnis nei 12 mV/kē. Aktyviajam taškiniui jutikliui naudojama CdZnTe medžiaga, kurios storis yra nuo 500 μm iki 100 μm, vaizdo taško dydis mažesnis nei (50×50) μm, gūburinio išvado diametras iki 50 μm.

1. Skaitmeninės elementariųjų dalelių registravimo sistemos – SEDRS

1.1. Puslaidininkinis dalelių registravimo metodas

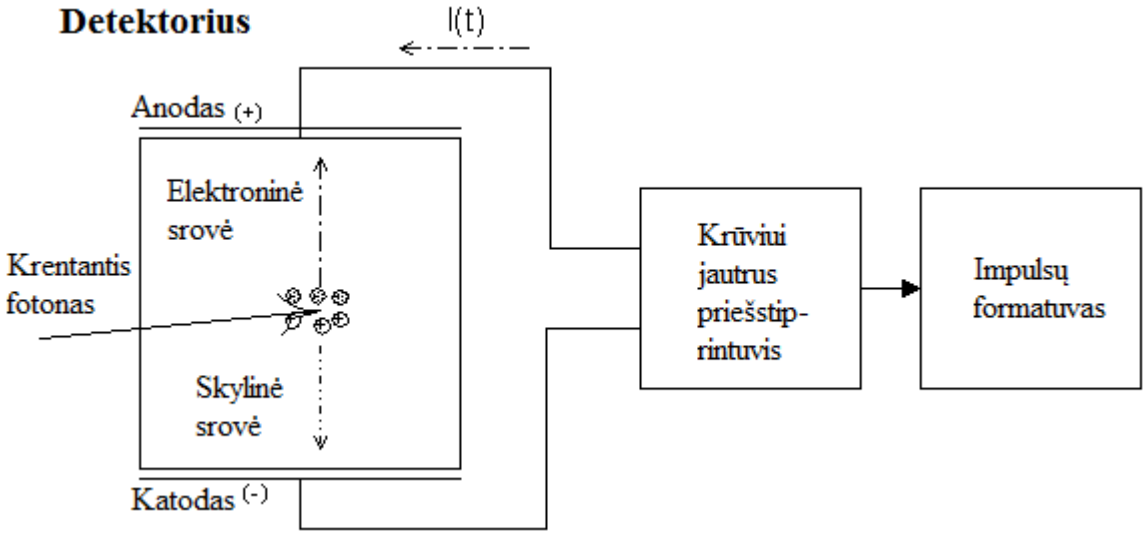
Yra žinoma, jog visi elektringų dalelių, γ kvantų, neutronų registravimo metodai remiasi medžiagos jonizacija. Jonizacijos vyksmo rezultatus (pvz.: išsiskyrusią energiją, jonų krūvius, šviesos blykstelėjimų skaičių, elektronų-skylių porų skaičių) galima užregistruoti. Skiriami keli pagrindiniai dalelių registravimo metodai: jonizacinis (dujinis), kolorimetrinis, scintiliacinis ir puslaidininkinis. SEDRS taikomas pastarasis – puslaidininkinis dalelių registravimo metodas. Šis metodas paremtas tuo, kad jonizacijos metu, švitinamojoje medžiagoje sukuriamos elektronų-skylių poros, kurių skaičius proporcingas sugertai spinduliuotės energijai, t.y. puslaidininkyje jonizuojanti spinduliuotė sukuria greitus elektronus, kurie jonizacijos metu išmuša medžiagos elektronus iš valentinės juostos. Šiame vyksme gimsta daugybė krūvininkų porų (elektronas - skylė) (1.1 pav.), nes elektronas – skylė poros susidarymo energija yra nedidelė lyginant su spinduliuojamų dalelių energijomis: T = 77 K temparatūroje Ge ji lygi 2,95 eV, Si – 3,72 eV. Tai tęsiasi apie 10^{-12}s, maždaug tol, kol pirminė elektringoji dalelė sulėtėja [8,9,11].

Galutinė jonizuojančios spinduliuotės sąveikos su medžiaga vyksmo fazė yra sukurtų krūvininkų rekombinacija. Rekombinacijos metu kuriamas elektrinis impulsas (krūvis Q_0), kurį nesudėtinga užregistruoti. Krūvininkų porų skaičius N_0 proprcingas kritusios dalelės energijai E_0:

$$N_0 = \frac{E_0}{\varepsilon_{pair}} \quad (1)$$

Čia ε_{pair} – vienai krūvininkų porai sukurti reikalinga energija. Porų bus tuo daugiau, kuo didesnė kritusios dalelės energija E_0. Tokiu būdu galima sužinoti puslaidininkiniame jutiklyje kritusios dalelės energiją E_0, o tai reiškia, kad galima atpažinti ir tą dalelę išspinduliavusį šaltinį [9].

Prijungus prie jutiklio elektrodų įtampą, jutiklyje atsiranda elektrinis laukas ε, kuris verčia krūvininkus dreifuoti link jutiklio elektrodų. Krūvininkų dreifo greitis v yra proporcingas elektrinio lauko stiprumui ε jutiklio puslaidininkyje: $v = \mu \cdot \varepsilon$, kur μ yra krūvininkų judrumas puslaidininkyje. Jutiklio puslaidininkyje dreifuojant krūvininkams atsiranda momentinė srovė. Ji randama taip: $I = q \cdot N_0 \cdot v$, čia q yra elektrono krūvis, n – krūvininkų skaičius ir v – jų vidutinis greitis. Trumpalaikio srovės impulso trukmė yra nustatoma pagal tai, kokį atstumą x įveikia krūvininkai. Srovės impulsas susideda iš dviejų dedamųjų: elektronų impulso ir skylių impulso. Tačiau elektronų kuriama srovė yra kur kas didesnė nei skylių, dėl didesnio elektronų judrumo [9].



1.1 pav. Detektoriaus veikimo principą vaizduojanti blokinė schema

Elektrinio lauko stiprumą detektoriaus puslaidininkyje galimą išreikšti ir taip:

$$\varepsilon = \frac{V}{L} \quad (2)$$

Čia L – detektoriaus storis, o V – įtampa, paduodama į jutiklio elektrodus. Vykstant šviesos dalelių ir puslaidininkio atomų sąveikai, generuojamas krūvis Q_0, kuria elektroninę I_e ir skylinę I_h sroves, kurių tekėjimo trukmė atitinkamai T_e ir T_h. Todėl šviesos dalelių energiją, elektrinio lauko stiprį ir generuojamą krūvį galima susieti šiomis formulėmis:

$$Q_0 = q \cdot N_0 = q \cdot \frac{E_0}{\varepsilon_{pair}} \quad (3), \qquad I_{h0} = Q_0 \cdot \frac{\mu_h \cdot \varepsilon}{L} \quad (4),$$

$$I_{e0} = Q_0 \cdot \frac{\mu_e \cdot \varepsilon}{L} \quad (5), \qquad T_e = \frac{L-x}{\mu_e \cdot \varepsilon} \quad (6), \qquad T_h = \frac{L-x}{\mu_h \cdot \varepsilon} \quad (7)$$

Taigi indukuotas krūvis – tai srovės nuo laiko integralas. Todėl norint išmatuoti indukuoto krūvio dydį, jutiklis yra prijungiamas prie krūviui jautraus priesštiptuvio, kuris išėjime kuria įtampos impulsą, kuris tiesiogiai proporcingas srovės nuo laiko integralui (8 formulė):

$$Q = \int I\ t\ dt = I_{e0} \cdot T_e + I_{h0} \cdot T_h = Q_0 \cdot \frac{\mu_e \cdot \varepsilon}{L} \cdot \frac{L-x}{\mu_e \cdot \varepsilon} + Q_0 \cdot \frac{\mu_h \cdot \varepsilon}{L} \cdot \frac{L-x}{\mu_h \cdot \varepsilon} = Q_0 \quad (8)$$

Šiomis formulėmis naudosimės 4-ajame skyrelyje skaičiuodami δ srovės impulso dydį patenkantį į krūviui jautrų priešstiprintuvį [9].

1.2. Medžiagos puslaidininkinių jutiklių gamybai

Jutiklinė SEDRS dalis arba detektorius gali būti sudaryta iš dujų (pvz.: GOSSIPO detektoriai) arba iš kietųjų kūnų (pvz.: ATLAS, AMPTEK, MEDIPIX, DIXI, PILATUS detektoriai). Nors jonizuojančios spinduliuotės sąveika su dujomis ir kietaisiais kūnais iš esmės nesiskiria, tačiau plačiau naudojami detektoriai, kuriose dujos keičiamos kietu kūnu dėl geresnio detektavimo efektyvumo ir galimybės gaminti mažesnių matmenų įtaisus. Taip yra todėl, kad dujose atomai išsidėstę daug rečiau, t.y. jų tankis yra žymiai mažesnis nei atomų kietuose medžiaguose, dėl to elektringąją dalelę dujose sunkiau sustabdyti. Kitaip tariant, elektringos dalelės siekis dujose tūkstantį kartų didesnis nei kietajame kūne [8].

Kad pasirinkti tinkamą kietąjį kūną jonizuojančiai spinduliuotei detektuoti, reikia gerai žinoti to kūno fizikines savybes. Viena iš pagrindinių – tinkamas medžiagos laidumas. Be to, visų pirma nešvitinama medžiaga turi būti dielektrikas, o veikiant spinduliuotei – virsti laidininku. Antra – pasirinktoje medžiagoje spinduliavimo sukurti krūvininkai turi greitai susirinkti prie įšorinės įtampos elektrodų, kai tarp jų prijungiama įtampa [8]. Tokiomis savybėmis geriausiai pasižymi puslaidininkiai, todėl jie pradėti naudoti SEDRS aktyviuosiuose taškiniuose jutikliuose.

Puslaidininkių SEDRS jutiklių gamybai yra nemažai. Anksčiau buvo plačiai naudotas germanis Ge. Šiuo metu plačiausiai naudojamos medžiagos yra silicis Si, galio arsenidas GaAS, kadmio telūridas CdTe ir kadmio cinko telūridas CdZnTe. Tačiau silicio ir germanio medžiagų fundamentinių savybių apribojimai jau paskatino tyrimus tokių naujų medžiagų junginių kaip silicio karbidas Si [10,11].

Silicis puslaidininkiniuose jutikliuose, ypač CCD (angl. Coupled Charge Device) – pasyviuosiuoje taškiniuose jutikliuose, plačiai naudojamas todėl, kad yra pigus, jis nesunkiai apdorojamas, paprastos sudėtingų litografinių struktūrų konstravimo galimybės. Tačiau Silicio jutiklio matricos geras detektavimo efektyvumas esti tik iki 10 – 12 keV, be to krūvio pernašos koeficientas yra labai jautrus bet kokiems taškinio jutiklio pažeidimams. Detektavimo efektyvumą galima padidinti panaudojus storesnį Si sluoksnį. Tačiau ir toks sprendimas turi tam tikrų trūkumų. Vienas iš jų – padidinus Si jutiklio sluoksnio storį, lemia didesnę anodinę įtampą, stipresnę nuotėkio srovę, krūvio detektavimo procesas tampa lėtesnis. Dėl padidėjusio jutiklio storio dalelės indukuojamas elektrinis krūvis gali išsisklaidyti didesniame plote, ko pasekoje krūvis nutekės į gretimų vaizdo taškų registravimo elektronikos grandines. Geresniais detektcijos efektyvumais 10keV- 500 keV diapazone pasižymi GaAs, CdTe, CdZnTe [9-11].

GaAs elementariųjų dalelių apsorbcijos koeficientas yra žymiai didesnis negu silicio Si, todėl GaAS geras detektavimo efetyvumas yra diapazone nuo 15 keV iki 60 keV. Toks platus detektavimo efektyvumas leidžia GaAs jutiklius panaudoti tokiose detektavimo srityse, kaip

sinchrotroninės rentgeno spindulių detektavimo sistemos (pvz.:žiedinis dalelių greitintuvas) ar diagnostinės medicinos rentgeno spindulių detektavimo sistemos. GaAs kaip ir Si yra pigus, nesunkiai gaunamas, jo taipogi paprastos sudėtingų litografinių struktūrų konstravimo galimybės [9-11].

Detektoriams naudojami puslaidininkiniai CdZnTe ir CdTe darinai buvo sukurti, kaip „kambario temperatūros“spektometras, naudoti gama ir rentgeno spinduliuotei branduolinėje medicinoje. Geras funkcionalumas kambario temperatūroje, kurį įtakoja plati draustinė juosta – 1,52 eV, padarė šių puslaidininkinių darinių detektorius plačiai naudojamus, todėl savo tinkamomis savybėmis šis lidinys pradėtas naudoti skaitmeninėje mamografijoje. Didelis tokio darinio tankis (5,8 g/cm^3) ir atominis numeris (Cd^{48},Zn^{30},Te^{52}) užtikrina labai gerą absorbcijos efektyvumą net ir labai plonuose detektoriuose – 98% efektyvumas esant 20 keV apšvitai ir 0,4 mm detektoriaus jutiklio storiui. Taipogi ši medžiaga turi didelę varžą, nuo 10 iki 100 GΩ gigaomų, kurios dėka gaunamos labai nedidelės tamsinės srovės. Šioje medžiagoje išgaunama aukšta signalo kokybė, apie 4000 elektronų-skylių porų prie 20 keV apšvitos, kas lemia puikų signalo triukšmo santykį. Tačiau šio CdZnTe lydinio struktūra pasižymi mažu skylių judrumu ir jų gyvavimo trukme (skylių judrumas CdZnTe darinyje – $\tau_h = 0{,}05 \cdot 10^{-6}$ sec, kai tuo tarpu elektronų gyvavimo trukmė – $\tau_e = 1 \cdot 10^{-6}$ sec), ko rezultatas gaunamas žymus krūvio „praradimas“, t.y. ne visos krūvininkų poros susikaupia ties detektoriaus elektrodais (anodo ir katodo). Visa tai lemia mažesnę jutiklio energijos skiriamąją gebą ir apriboja šios medžiagos panaudojimą. Todėl, gaminant detektorius iš šios medžiagos, jie turi būti kuo plonesni, kad prijungus išorinę valdymo įtampą, skylės link detektoriaus elektrodo judėtų kuo trumpesniu keliu [9-14].

1.3. Dvilustės aktyviųjų taškinių jutiklių sistemos

Pagal konstrukcijos tipą gaminamos vienlustės arba dvilustės (hibridinės) SEDRS. Vienlustėse sistemose pusladininkinis jutiklis ir registravimo elektronika realizuoti viename luste. Šios SEDRS konstrukcijos yra paprastesnės, jų privalumai lyginant su dvilustėmis konstrukcijomis yra mažesnės parazitinės jutiklio, registruojančios elektronikos, sujungimų talpos. Tai lemia mažesnius triukšmus, didesnį sistemos jautrį. Šios konstrukcijos trūkumas – sudėtinga gamyba, dėl sunkiai suderinamų puslaidininkinio jutiklio ir registravimo elektronikos technologijų.

Pastaruoju metu labai plačiai naudojamas kitas konstrukcijos tipas – dvilustė arba hibridinė SEDRS. Šioje konstrukcijoje puslaidininkinių jutiklių matrica ir registravimo elektronika esti skirtinguose lustuose, kurie tarpusavyje sujunti [10,11].

Dvilustėje konstrukcijoje puslaidinikinis jutiklis su registruojančia elektronika sujungiamas/sulydomas „apversto lusto“ (angl. *flip-chip*) būdu. Šio metodo esmė – ant registravimo

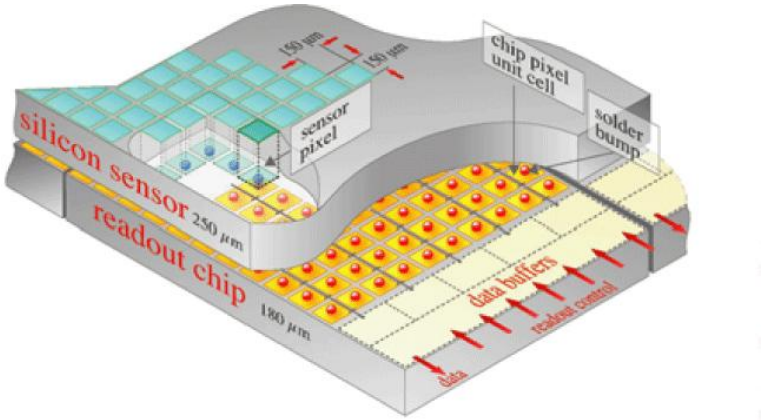
elektronikos lusto kontaktinių aikštelių suformuojami gūburiniai išvadai, kurie sulydomi su detektoriaus jutiklio matrica (1.2 pav.) [10,11].

Gūburiniai išvadai sujungimams tarp jutiklio ir registruojančios elektronikos gaminami iš įvairių metalų ar jų lydinių. Populiariausi metalai yra Auksas (Au), Indis (In), Alavas (Sn), o lydiniai – Sn-Pb (alavo-švino), Sn-Ag (alavo-sidabro), Sn-Ag-Cu (alavo-sidabro-vario), Sn-Cu (alavo-vario), Sn-Bi (Alavo-bismuto), Sn-Cu (alavo-vario). Lydiniai tarpusavyje gali būti maišomi įvairiomis proporcijos, bet dažniausiai naujodamos šios: 63Sn-37Pb ir 96.5Sn-3.5Ag [22,26].

Pagrindiniai hibridinės konstrukcijos privalumai yra galimybė nepriklausomai vienas nuo kito tobulinti ir geriau optimizuoti tiek jutiklinę dalį, tiek registravimo elektronikos dalį. Tai reiškia, kad visa detektoriaus jutiklio dalis gali būti išnaudojama sąveikai su šviesos dalelėmis, o tai lemia didesnį puslaidininkinio jutiklio detektavimo efektyvumą, nei yra vienlustėje SEDRS, kur registravimo elektronikos tranzistoriai esti tame pačiame luste, kaip ir detektoriaus jutiklis ir užima vietą, kuri galėtų būti panaudojama jutikliui. Registravimo elektronikos patalpinimas kitame luste leido padidinti skiriamąją gebą, lengviau nufiltruoti sistemos triukšmus. Kitas privalumas – galimybė taikyti Si KMOP arba GaAs MESFET technologijas, dėl žymiai didesnio integracijos laipsnio, galimybė sutalpinti tame pačiame luste ir signalo apdorojimo ir valdymo ir įvesties/išvesties grandynus [10,11].

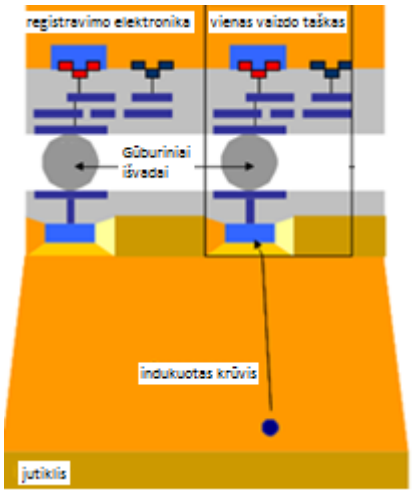
Analizuojant dvilustę SEDRS detaliau, iš 1.2 – 1.3 pav. galime matyti, jog ji iš esmės susideda iš jutiklių (vaizdo taškų) matricos, prilydytos prie registravimo elektronikos lusto. Viena jutiklio matricos „ląstelė“ su prijungta nuosava registravimo elektronika vadinama vaizdo tašku (angl. *PIXEL*) arba aktyviuoju taškiniu jutikliu (ATJ) (1.3 pav.). Kuo daugiau apjungtų ATJ, tuo didesnė gaunama SEDRS struktūra (1.2 pav.). Priklausomai nuo panaudojimo srities SEDRS aktyviųjų taškinių jutiklių matricos esti įvairių dydžių: nuo – 2×3 cm^2 naudojamų dendografijoje, iki 18×24 cm^2 dydžio naudojamų mamografijoje ir pan. [4,11].

Kaip buvo minėta, elementarioji dalelė patekusi į SEDRS vaizdo taško jutiklinę dalį jame indukuoja elektrinį krūvį, kurio dydis proporcingas tai kritusiai dalelei. Jutiklinėje dalyje arba detektoriuje indukuotas elektrinis krūvis, prie detektoriaus prijungtos išorinės įtampos dėka, per gūburinį išvadą ir kontaktinę aikštelę nukreipiamas į registruojančios elektronikos įėjimą. Kadangi vienos dalelės indukuotas elektros krūvis yra labai mažas, tai jutiklio signalas iš pradžių sustiprinamas ir suformuojamas tiesiog švitinimo zonoje ir tik tada perduodamas toliau [10,11].



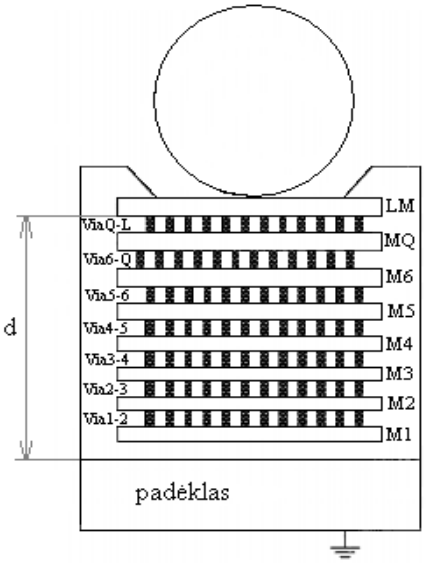
1.2 pav. Dvilustė skaitmeninė elementariųjų dalelių registravimo sistema [16]

Gūburinis išvadas ir kontaktinė aikštelė yra tarsi ATJ „įėjimas“. Šie komponentai veikia kaip laidininkas, kurio pagalba elektrinis krūvis, sužadintas į jutiklį krintančios dalelės energijos, perduodamas į registruojančios elektronikos lustą tolesniam apdorojimui (1.3 pav.) [10,11].



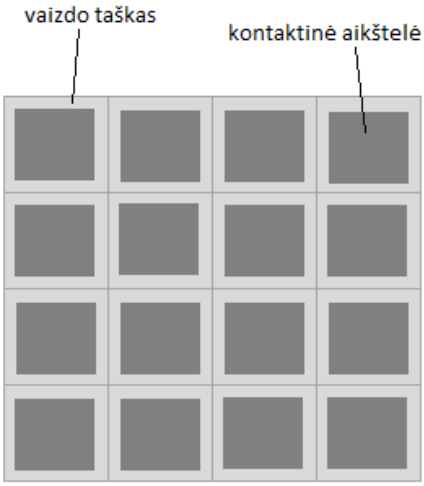
1.3 pav. ATJ skerspjūvio vaizdas [5]

Detektoriaus jutiklių ir nuskaitymo elektronikos kontaktinių aikštelių sudarymui naudojamas metalizacijos procesas. Tarp kontaktinės aikštelės ir NMOP ir PMOP tranzistorių, kuriuose vyksta signalų apdorojimo procesai, priklausomai nuo naudojamos technologijos yra sudaryta kelių metalinių sluoksnių konstrukcija (1.4 pav.), pvz.: 0,13 μm technologijoje naudojami 8 metalų sluoksniai, 0.25 μm technologijoje – 6 metalo sluoksniai. Šie metaliniai sluoksniai sumažina triukšmus atsirandančius dėl vaizdo taškų sąveikos, bei ekranuoja puslaidininkinį jutiklį nuo nuskaitymo elektronikos [14].



1.4 pav. 0,13 µm KMOP technologijos (SCN013 8RF_IBM) kristalo skersinis pjūvis [14].

Kitas svarbus aspektas nagrinėjant aktyviųjų taškinių jutiklių ATJ sujungimus su registruojančia elektronika, yra puslaidininkinio jutiklio vaizdo taško ir jį atitinkančios kontaktinės aikštelės dydžių skirtumas (1.5 pav.).



1.5 pav. ATJ vaidas iš viršaus

Vieno vaizdo taško puslaidininkinio jutiklio ląstelės matmenys yra didesni už vieno vaizdo taško kontaktinės aikštelės matmenis. Esant vienodiems jų dydžiams kontaktinės aikštelės tarpusavyje susilietų, sudarydamos vientisą kontaktinę plokštumą. To pasekmė – elektrinis impulsas, ateinantis iš puslaidininkinės ląstelės, patektų ne vien į jam skirtą registruojančios elektronikos grandinę, bet ir į greta esančių vaizdo taškų grandines [9]. Tačiau vieno vaizdo taško kontaktinės aikštelės matmenys turi būti parinkti atsižvelgiant į parazitinės talpas atsirandančias tarp jų bei efektyvųjį darbinį plotą, kuris yra tuo didesnis, kuo mažesnis kontaktinės aikšelės ir puslaidinikinio jutiklio dydžių skirtumas.

1.4. SEDRS registravimo elektronikos sandara

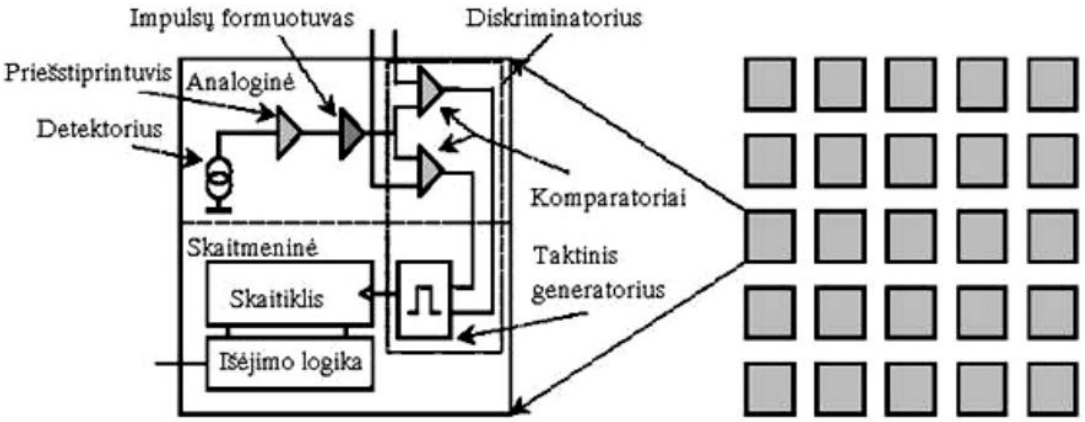
Kievienas SEDRS vaizdo taškas turi ne tik jutiklinę dalį, bet ir nuosavą registravimo elektroniką. Registravimo elektronika susideda iš krūviui jautraus priešstiprintuvio (KJP), impulsų formuotuvo (IF), diskriminatoriaus, skaitiklio, postūmio registro bei taktinio generatoriaus (1.6 pav.) [10].

Krūviui jautriame priešstiprintuvyje (KJP) iš detektoriaus atėjęs srovės impulsas per grįžtamojo ryšio talpą C_{fb} transformuojamas į įtampos pokytį. Kaip buvo minėta KJP nestiprina krūvio jo įėjimo metu, o sustiprina krūvio sukeltą įtampą, kuri KJP išėjime yra tiesiogiai proporcinga grįžtamojo ryšio kondensatoriaus C_{fb} krūviui. Tokiu būdu KJP veikia kaip srovės-įtampos keitiklis. Susikaupęs krūvis nuimamas per grįžtamojo ryšio varžą R_{fb}, t.y. R_{fb} iškrauna C_{fb}. R_{fb} yra lygiagrečiai sujungta su integruojančia grįžtamojo ryšio talpa C_{fb},. Šiam procesui neįvykus stiprintuvas labai greitai įsisotintų [10].

Iš KJP signalas patenka į impulsų formuotuvą (IF). Paprastai impulsų formuotuvas – tai iš RC-CR grandinių sudarytas filtas. Impulsų formuotuvas signalą diferencijuoja ir integruoja. KJP signalo diferenciavimas padeda sumažinti paklaidas, atsiradusias dėl detektoriaus jutiklio ir KJP nuotėkio srovių. KJP signalo integravimas padeda susiaurinti sistemos praleidžiamųjų dažnių juostą. Tokiu būdu sumažinamas sistemos triukšmas ir padidėja sistemos „signalas/triukšmas“ santykis [4,10].

Iš impulsų formuotuvo signalas dviejomis atskiromis atšakomis patenka dviejų lygių diskriminatorių, kuriame formuojamas energinis langas. Energininis langas, priklausomai nuo dalelių energijos arba praleis signalą arba ne. Dviejų lygių diskriminatoriaus atšakos yra nepriklausomos viena nuo kitos ir kiekvieno lygio energinis langas, priklausomai nuo taikymo srities gali būti nustatytas skirtingai. Jei naudojamas dviejų lygių diskriminatorius, skirtumas tarp dvieju energinių lygmenų (komparatorių slenksčių) $W_{th} = W_{thHigh} - W_{thLow}$ nustato energinį langą W_{th}, į kurį patekusių dalelių energija turi būti mažesnė už energinio lango energiją, norint padidinti skaitiklio reikšmę. Lygmenų energija nustatoma remiantis dvigubos diskriminacijos logika (angl. DDL – Double Discrimination Logic). Jeigu dviejų lygių diskriminatoriaus V_{thHigh} energinio lango slenkstis nustatomas žemesnis negu V_{thLow} slenkstis, diskriminatorius veikia vieno lygmens režimu ir skaitiklio reikšmė vienetu padidinama tada, kai atėjusios dalelės energija viršija V_{thLow} energinio lango slenkstį. Taip valdant komparatorių slenksčius, užtikrinamas pakankamai platus energinis langas, kuris salygoja didesnį sistemos atsparumą triukšmams. Kiekviena diskriminatoriaus atšaka susideda iš diferencialinio stiprintuvo, kuris veikia kaip operacinis transinpedanso stiprintuvas (angl. OTA – Operational Transimpedance Amplifier), trijų nepriklausomai parinktų srovės šaltinių ir srovės diskriminatoriaus [10,11,35].

Iš diskriminatoriaus signalas siunčiamas į skaitiklį. Skaitiklis, priklausomai nuo taktinio generatoriaus signalo, veikia dviem režimais. Kai generatoriuje nustatomas žemas lygis, skaitiklis veikia kaip 13 bitų pseudo-atsitiktinių skaičių skaitiklis, skaičiuojantis dinaminiame diapazone iki 8001. 13 bitų skaitiklyje priklausomai nuo dalelės energijos suformuojamas stačiakampis siganalas, kuris skaitmeninėje dalyje užfiksuojamas ir įsimenamas. Esant tokiam režimui kiekvienas pro energinį langą praėjęs krūvis padidina skaitiklio reikšmę vienetu. Kai taktinio generatoriaus signalas yra aukšto lygio, skatiklis veikia kaip atminties ląstelė, kuri geba perduoti duomenis iš vieno vaizdo elemento į kitą. Šis režimas naudojamas tiek nustatant 8 sistemos konfiguracinius bitus, tiek nuskaitant 13 bitų skaitiklio informaciją. Tokiu būdu informacija persiunčiama į sistemos periferiją [10,11,35].



1.6 pav. Aktyviųjų taškinių jutiklių registravimo elektronikos architektūra [11]

1.5. Skyriaus išvados

SEDRS veikimo principas pagrįstas šviesos dalelių indukuotu elektriniu krūviu, kuris, prie detektoriaus jutiklio elektrodų prijungus įšorinę įtampą, patenka į SEDRS registravimo elektroniką – krūviui jautrų priešstiprintuvį KJP. Tai yra puslaidininkinis dalelių registravimo metodas. Šio metodo esmė – metodas paremtas tuo, kad jonizacijos metu, švitinant puslaidininkį sukuriamos elektronų-skylių poros, kurių skaičius proporcingas sugertai spinduliuotės energijai.

SEDRS jutiklių gamybai plačiausiai naudojamos medžiagos yra silicis (Si), kadmio zinko telūridas (TdZnCe), galio arsedinas (GaAs).

SEDRS jutiklyje indukuotas krūvis – tai srovės nuo laiko integralas. Todėl norint išmatuoti indukuoto krūvio dydį, detektorius yra prijungiamas prie krūviui jautraus priesštiptuvio, kuris išėjime kuria įtampos impulsą, kuris tiesiogiai proporcingas srovės nuo laiko integralui.

Skiriamos dvilustė ir vielustė SEDRS sistemos. Dvilustė arba hibridinė SEDRS gaminama, kai ant registravimo elektronikos lusto kontaktiniu aikštelių užauginami gūburiniai išvadai, kurie

sujungiami su jutiklių matrica. Viena ląstelė kartu su prijungta registravimo elektronika vadinama vaizdo tašku arba „pikseliu“. Tokio tipo SEDRS yra vadinamos aktyviaisiais taškiniais jutikliais (ATJ).

Gūburiniai išvadai veikia kaip laidininkas, kuriuo elektrinis impulsas, sužadintas į jutiklį krintančios dalelės energijos, perduodamas per juos ir per kontaktinę aikštelę į registruojančios elektronikos lustą tolesniam apdorojimui.

SEDRS registravimo elektronika susideda iš analoginės ir skaitmenių dalių. Analoginę dalį sudaro KJP ir impulsų formuotuvas. Skaitmeninę dalį sudaro diskriminatorius, postūmio registras, skaitiklis ir taktinis generatorius.

2. Krūviui jautrus stiprintuvas ir jo parametrai

2.1. KJS sandara ir veikimas

Paparstai krūviui jautrus stiprintuvas yra sudarytas iš dviejų pagrindinių pakopų – krūviui jautraus priešstiprintuvio, ir impulsų formuotuvo. Kaip buvo minėta, krūviui jautriame priešstiprintuvyje detektoriaus jutiklio su talpa C_{det} generuojami krūvio impulsai yra integruojami grįžtamojo ryšio kondensatoriaus C_{fb}. Stiprintuvas yra charakterizuojamas įėjimo įtampos triukšmų šaltiniu e_n su balto triukšmo komponente, nustatoma pagal įėjimo tranzistoriaus statumą g_m ir *1/f* komponente, kuri yra atvirkščiai proporcinga įtaiso užimamo plotui *WL*. Tokiu atveju, KMOP ekvivalentinė triukšminė įėjimo srovė yra nedidelė [2,4].

Kitas grįžtamojo ryšio elementas yra varža R_{fb}, kuri iškrauna grįžtamojo ryšio kondensatorių ir prideda triukšmą, kurį būtina įvertinti. Apie sistemos skiriamąją gebą yra sprendžiama pagal įėjimo ekvivalentinį triukšmų krūvį (*ENC*):

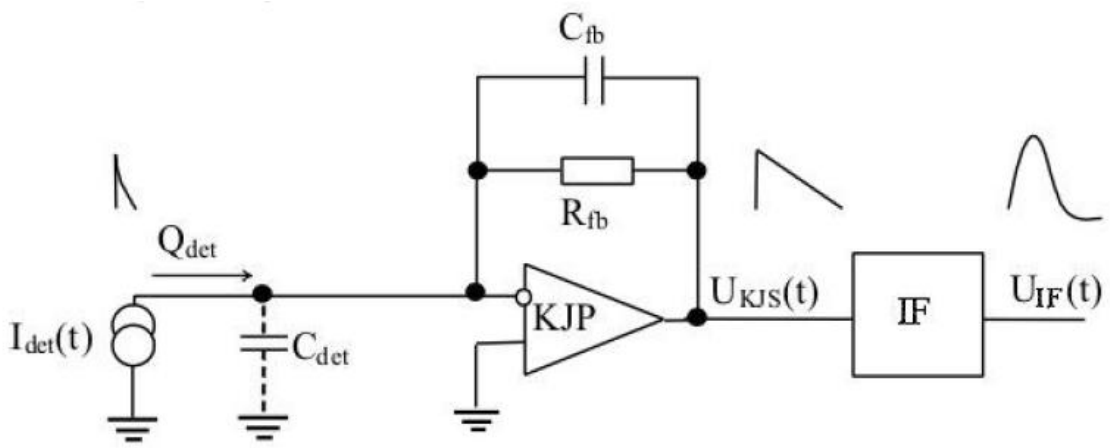
$$ENC^2 = \left(C_{\text{det}} + C_{in}\right)^2 \left(\frac{a_1 2kTR_s}{t_s} + \frac{a_2 \pi K_f}{C_{ox}WL}\right) + \frac{a_3 2kTt_s}{R_p} \quad (9)$$

čia C_{in} – įėjimo tranzistoriaus talpa, R_S – ekvivalentinė nuoseklaus triukšmo varža, R_p – grįžtamojo ryšio varžos R_{fb} efektinė triukšminė varža, t_S – charakteringoji laiko konstanta išėjimo filtro(formavimosi laikas), K_f – tranzistoriaus mirgėjimo triukšmo energijos konstanta, įėjimo tranzistoriaus *1/f* triukšmo koeficientas, a_1, a_2 ir a_3 yra formos faktoriai (dažniausiai artimi 1) atitinkamai susiję su nuosekliu baltuoju, nuosekliu *1/f* ir lygiagrečiu baltuoju triukšmais. Tipiškas nuoseklus baltas triukšmas 3dominuoja esant trumpam formavimosi laikui, R_p ilgam formavimosi

laikui ir *1/f* triukšmas tarpiniame diapazone. Didelės talpos jutikliai lemia nuoseklius triukšmus. Žematriukšmiuose KJS pagamintuose pagal KMOP technologija dominuoja įėjimo tranzistoriaus *1/f* triukšmas [2,4].

Iš KJP siganalas patenka į antrąją KJS pakopą – impulsų formuotuvą. Impulsų formuotuvas priešstiprintuvio signalą išskaido į dedamąsias, taip atskirdamas KJP signalo dedamąsias nuo detektoriaus jutiklio ir KJP nuotėkio srovių. Paskui KJS signalo dedąmiosios vėl suintegruojamos ir vientisą signalą, kas leidžia gauti reikalingų dažnių juostos signalą. Tokiu būdu sumažinamas sistemos triukšmas ir padidėja sistemos „signalas/triukšmas“ santykis. Signalams formuoti yra panaudojami CR ir RC grandynai, kurie lemia įvairius KJS įšėjimo signalus su įvairiomis τ_p registravimo trukmėmis. Kitaip tariant, KJS paskirtis yra sustiprinti detektoriuje indukuotą krūvį ir suformuoti tinkamą signalą, kuris bus perduotas į diskriminatorių. Tačiau, jei KJS stiprinimo koeficientas yra pakankamas, impulsų formuotuvo galima nenaudoti. Tokiu būdu galima sumažinti sistemos vartojamąją galią ir užimamą plotą [4,10].

Iš KJS signalas patenka į skaitmeninę loginę dalį, kuri neturi didelės įtakos pagrindiniams parametrams: jautriui, ekvivalentiniam triukšmų krūviui, registravimo laiko trukmei ir t.t. [2,4].



2.1. pav. Blokinė krūviui jautraus stiprintuvo schema [4]

2.1 pav. KJP komponenų paaiškinimai: KJP – krūviui jautrus priešstiprintuvis, IF – impulsų formuotuvas, Q_{det} – jutiklio generuojamas krūvis KJP įėjime, C_{det} – jutiklio talpa, C_{fb} – grįžtamojo ryšio talpa, R_{fb} – grįžtamojo ryšio varža.

Šiandien 9 formulė yra nepakankamo tikslumo, nes mažėjant KJS matmenims, maitinimo įtampai, tekančioms srovėms reikia įvertinti ir grįžtamojo ryšio kondensatoriaus generuojamą triukšminę dedamąją. Taip pat šioje formulėje nėra įvertinama nuotėkio srovės triukšminė dedamoji, šiluminiai tranzistorių triukšmai ir dar keletas parametrų [4].

2.2. KJS parametrai

Pagrindiniai krūviui jautraus stiprintuvo parametrai yra:

- „signalas/triukšmas“ santykis;
- perdavim koeficientas K;
- registracijos trukmė τ;
- vartojamoji galia;
- triukšmai.

2.2.1. Parametras „signalas/triukšmas“ santykis

KJS parametras yra „signalas/triukšmas“ santykis SNR vienas iš pagrindinių KJS parametrų. Jis apskaičiuojamas taip:

$$SNR = \frac{\frac{E}{\varepsilon_{pair}}}{ENC} \quad (10)$$

čia E – spinduliuojama elementariųjų dalelių energija, ε_{pair} – vienos krūvininkų poros susidarymui sunaudojama energija (jonizacijos energija), o ENC – ekvivalentinis triukšmų krūvis KJS įėjime.

Nustatant ekvivalentinį triukšmų krūvį ENC, iš pradžių spektro analizatoriumi išmatuojams spektrins triukšmų tankis KJS išėjime $S_{triukšmu}(f)$. Išmatuotas tankis suintegruojamas baigtinėje dažnių juostoje Δf ir ištraukiama kvadratinė šaknis (11 formulė). Gaunama triukšmų įtampa $U_{triukšmu}$ [3,4]:

$$U_{triuksmu} = \sqrt{\int_{\Delta f} S_{triuksmu}(f)\,df} \quad (11)$$

Apskaičiavus triukšmų įtampą, galima apskaičiuoti ekvivalentinį triukšmų krūvį ENC. ENC randamas iš 12 formulės, t. y. KJS triukšmų įtampa $U_{triukšmu}$ padalinama iš perdavimo koeficiento *K*:

$$ENC = \frac{U_{triuksmu}}{K} \quad (12)$$

Ekvivalentinis triukšmų krūvis ENC, tai triukšmas KJS įėjime, kuris sukuria triukšmą KJS išėjime. ENC dimensija išreiškiama elektronų [ē] skaičiumi, kuris nusako KJS triukšminį krūvį. Ekvivalentinis triukšmų krūvis ENC pagrinde yra sudarytas iš kelių triukšminių dedamųjų, kurios priklauso tiek nuo naudojamo jutiklio, tiek nuo KJS technologinių, struktūrinių ypatumų [4].

Norint didinti sistemos „signalas/triukšmas“ santykį SNR reikia mažinti ekvivalentinį triukšmų krūvį ENC.

2.2.2. Krūviui jautraus stiprintuvo perdavimo koeficientas

Kitas svarbus KJS parametras yra KJS perdavimo koeficientas K. Šis koeficientas turi užtikrinti kuo didesnį sistemos tiesiškumą. Didelis sistemos tiesiškumas reikštų gerą KJS detektavimo efektyvumą plačiame įėjimo krūvių diapazone. Todėl labai svarbu tinkamai parinkti perdavimo koeficientą K. K apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$K = \frac{U}{Q_{\text{det}}} \quad (13)$$

čia U – KJS išėjimo signalo įtampos amplitudė, Q_{det} – jutiklio generuojamas krūvis KJS įėjime.

Remiantis literatūros duomenimis šis perdavimo koeficientas GaAs krūviui jautriuose stiprintuvuose kinta ribose tarp (30...50) mV/fC. Didelio jautrumo ir mažo tiesiškumo KMOP sistemose šis perdavimo koeficientas yra (80...150) mV/ke ribose, o mažo jautrumo ir didelio tiesiškumo KMOP sistemose – (10...30) mV/ke [4].

2.3. Krūviui jautraus stiptintuvo registracijos trukmė τ

Vienas iš pagrindinių laikinių KJS parametrų, užtikrinantis didelę laikinę skiriamąją gebą ir nusakantis sistemos greitaveiką, yra registracijos trukmė τ_p. Registracijos trukmė τ_p – tai KJS išėjimo impulso priekinio fronto trukmė: nuo to laiko momento, kai išėjimo įtampa yra 10 % maksimalios išėjimo įtampos vertės, iki laiko momento, kai išėjimo įtampa pasiekia 90 % maksimalios išėjimo įtampos vertės.

Ši registracijos trukmė priklauso nuo KJP grįžtamojo ryšio varžos R_{fb}, grįžtamojo ryšio talpos C_{fb}, jutiklio C_{det} ir KJP įėjimo C_{in} talpų, KJP įėjimo tranzistoriaus statumo [4]. Kadangi tranzistoriaus statumas priklauso nuo krūvininkų judrio tranzistoriaus kanale, tranzistoriaus užtūrinio dielektriko savitosios talpos C_{ox}, tranzistoriaus geometrinių matmenų bei tranzistoriaus srovės tankio, todėl registracijos trukmė taip pat priklauso nuo šių parametrų. KJS registracijos trukmė τ_p dažniausiai būna nuo 10 ns iki 100 ns, nes KJS darbinis dažnis yra nuo maždaug 10 MHz iki 100 MHz [4].

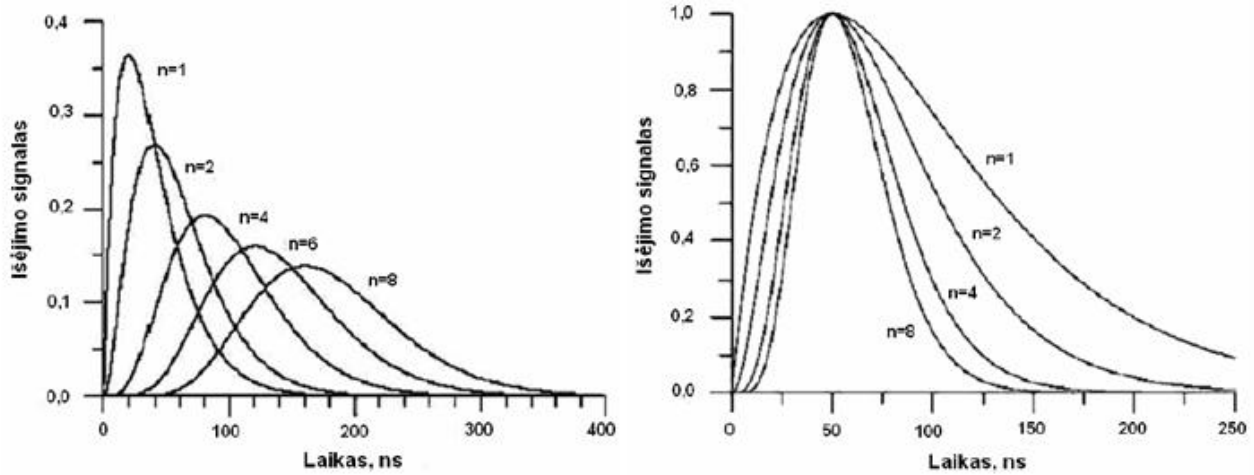
Naudojant kelis integratorius (impulsų foumuotuve) su ta pačia laiko pastoviaja τ, išėjimo impulsas vis labiau tolsta nuo Puasono funkcijos ir artėja prie Gauso funkcijos (2.2. a pav.). Iš 2.2. a. paveikslo galima daryti išvada, kad KJS registracijos trukmė τ_p yra apytiksliai lygi:

$$\tau_p = n\tau \quad (14)$$

Taigi, τ_p yra apytiksliai lygi visų aktyviajame filtre naudojamų integratorių integravimo trukmių sumai. Didinant integratoriu skaičių, artėjama prie Gauso funkcijos išėjimo signalo, t. y. išėjimo signalas tampa vis simetriškesnis. Taip pat reiktų pastebėti ir tai, kad tokios formos išėjimo signalas pasižymi mažiausiais triukšmais. Tačiau, didelis integratorių skaičius didina registracijos trukmę, o tai nėra pageidautina, nes mažėja sistemos skiriamoji geba ir greitaveika. Nagrinėjant kitą atvejį, kai integratorių laiko pastovioji yra mažinama (2.2. b pav.):

$$\tau_n = \frac{\tau_{n=1}}{n} \quad (15)$$

gaunama, kad KJS registravimo trukmė išlieka tokia pati ir signalo forma praktiškai nesikeičia, ji yra artima Puasono funkcijai. Tačiau naudojant daug integratorių, IF tampa sudėtingu: didėja elementų skaičius, didėja KJS vartojamoji galia bei didėja ir užimamas plotas.

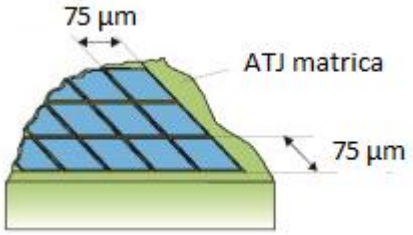


2.2. pav. KJS išėjimo impulso priklausomybė nuo naudojamų integratorių skaičiaus [3]

2.4. Krūviui jautraus stiprintuvo vartojamoji galia

KJS vartojamoji galia – labai svarbus krūviui jautrių stiprintuvų parametras. Nuo KJS vartojamosios galios tiesiogiai priklauso KJS skiriamoji geba, nuo kurios priklausomo gaunamų vaizdų kokybė. Skiriamąją gebą lemia aktyvinio taškinio jutiklio vieno vaizdo taško dydis ir jutiklių skaičius ploto vienete. Taigi, norint padidinti SEDRS skiriamąją gebą (t.y. rentgeno vaizdų kokybę), reikia mažinti aktyvinio taškinio jutiklio vieno vaizdo taško dydį ir didinti jutiklių skaičių ploto vienete. Jungiant ATJ į blokus yra sudaromos elementinės jutiklių matricos (2.3. pav.). ATJ matricų dydžiai būna patys įvairiausi nuo 10^5 iki $2 \cdot 10^6$ elementų. Tai priklauso nuo detektoriaus naudojimo pobūdžio. Pavyzdžiui medicinoje, mamografijos diagnostinėse sistemose maksimalus

vieno taškinio jutiklio dydis turi buti apie 75x75 μm^2, o jutiklinės sistemos gali būti sudarytos nuo 1 iki 50 mln. matricos elementų [4].



2.3. pav. Aktyviųjų taškinių jutiklių matrica [18]

Matyti, jog esant tokiam dideliam vaizdo taškų skaičiui, reikia projektuoti KJS su kuo mažesne vartojamąja galia. Todėl galios minimizavimas yra vienas iš pagrindinių keliamų reikalavimų projektuojant KJS. Kad minimizuot KJS vartojamąją galią reikia naudoti didelės varžos rezistorius (0,1...100) MΩ.

ATJ vaido taškų (dar vadinamų kanalais) skaičių galima apskaičiuoti remiantis 16 formule:

$$K_{ch} = \frac{\pi D^2}{4a^2} ..(16)$$

čia D– lusto diametras, a – vieno vaizdo taško kraštinis matmuo, K_{ch} – kanalų skaičius [4].

Leistina galia vienam vaizdo taškui (vienam kanalui) apskaičiuojama pagal formulę:

$$P_k = \frac{P_w \pi D^2}{4K_{ch}} = P_W \cdot a^2 ..(17)$$

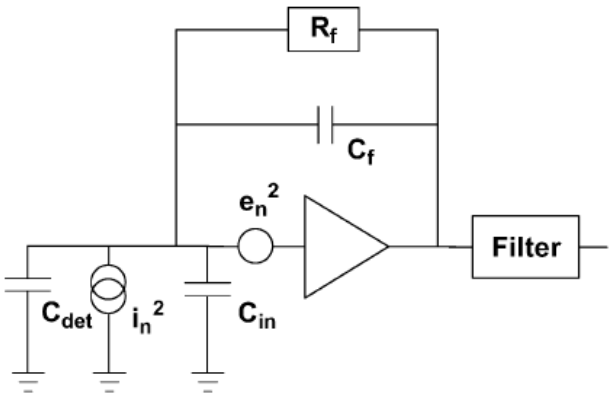
čia P_W – leistina lusto galia ploto vienetui, P_k – leistina viena vaizdo taško galia [4].

Literatūros duomenimis, registravimo elektronikos integrinių grandynų vartojamoji galia 1 kanalui turi buti nuo 3 µW iki 50 mW.

2.5. KMOP Krūviui jautraus stiprintuvo triukšmai

Kaip ir visi stiprintuvai, taip ir krūviui jautrūs stiprintuvai reaguoja į triukšmus, kuriuos kuria jų aktyvieji arba pasyvieji elementai. KMOP krūviui jautriuose stiprintuvuose žemuose dažniuose vyrauja mirgėjimo triukšmas, kuris labai stipriai prisideda prie viso KJS atsirandančio triukšmo.

KMOP krūviui jautrių stiprintuvų triukšmus galima suskirstyti į tokias grupes: nuoseklaus triukšmo dedamoji (triukšminis įtampos šaltinis 2.4. pav.), lygiagretaus triukšmo dedamoji (triukšminis srovės šaltinis 2.4. pav.).



2.4. pav. Blokinė triukšmų poveikio schema [2]

Stiprintuvo įėjimo nuoseklaus triukšminės įtampos šaltinio spektrinis tankis aprašomas formule:

$$\frac{de_n^2}{df} = a_b + \frac{a_f}{|f|} \quad (18)$$

čia e_n – triukšmo generatoriaus įtampa, a_b – tranzistoriaus baltojo nuoseklaus triukšmo konstanta, a_f – tranzistoriaus nuoseklaus mirgėjimo triukšmo konstanta [2, 4].

Stiprintuvo įėjimo lygiagretaus triukšminės srovės šaltinio spektras aprašomas formule:

$$di_n^2 = b_b + \frac{b_f}{|f|} \quad (19)$$

čia i_n – triukšmo generatoriaus srovė, b_b – tranzistoriaus baltojo lygiagretaus triukšmo konstanta, b_f – tranzistoriaus lygiagretaus mirgėjimo triukšmo konstanta [2, 4].

Šios abi formulės yra universalios. Plačiajuosčių stiprinančių elementų (bipolinių, lauko, KMOP tranzistorių bei kitokio tipo tranzistorių), naudojamų krūviui jautriuose stiprintuvuose, triukšmų spektre dažniausiai galima išskirti tris sritis: mirgėjimo, pastovaus triukšmo ir aukšto dažnio[4].

Mirgėjimo triukšmas yra būdingas visiems stiprinantiems elementams. Mirgėjimo triukšmas yra atvirkščiai proporcingas dažniui, t.y. didėjant dažniui, šis triukšmas mažėja. Po mirgėjimo triukšmo srities yra pastovaus triukšmo sritis. Toliau didinant dažnį ir artėjant prie elemento ribinio dažnio fr, dėl stiprinančio elemento talpų įtakos, mažėja elemento stiprinimas ir didėja jo triukšmai. Aukštų dažnių srityje, tranzistorių pradeda veikti parazitinės talpos tarp tranzistoriaus užtūros ir ištakos sričių, ir tarp tranzistoriaus užtūros ir santakos. Nagrinėjant tranzistorių dažnines savybes, reikia įvertinti ir tai, kad tarp užtūros ir kanalo susidaro talpa, kuri per kanalo varžą persikrauna. Tai nulemia tranzistoriaus maksimalų darbo dažnį. Šių talpų dydžiai nulemia tiek triukšmines, tiek dažnines tranzistoriaus savybes. Tačiau, KJS maksimalus darbo dažnis yra keletą kartų mažesnis už

elemento ribinį dažnį, todėl tiriant KJS triukšmą lemia mirgėjimo ir pastovios triukšmo srities triukšmai [4,10].

KMOP tranzistorių atveju skiriamos tokios pagrindines nuoseklaus triukšmo dedamosios: nuoseklusis baltas triukšmas, nuoseklusis kanalo šiluminis triukšmas, nuoseklusis mirgėjimo triukšmas.

1. Ekvivalentinio triukšmų krūvio nuosekliojo baltojo triukšmo dedamoji išreiškiama tokia formule:

$$ENC_s^2 = \frac{e^2 kTR_s \left(C_{\text{det}} + C_{in} + C_f\right)^2}{q^2 \tau_p} \quad (20)$$

čia k– Bolcmano konstanta, T– aplinkos temperatūra, R_s – nuoseklių varžų suma, q– elektrono krūvis, τ_p – krūviui jautraus stiprintuvo registracijos trukmė [4,10].

Ši triukšminė dedamoji sudaro apie 15 % viso KJS ENC_{tot} triukšmo. Kaip matome iš formulės, ši triukšminė dedamoji yra tiesiogiai proporcinga detektoriaus talpai C_{det}, grįžtamojo ryšio talpai C_f, stiprintuvo įėjimo talpai C_{in}. Šių talpų mažinimas yra apribojamas technologijų. Kitas dydis tiesiogiai proporcingas ENC_s triukšminei dedamajai yra nuosekliosios varžos R_s. Mažinant šias varžas mažėja ENC_s tačiau norint gauti mažą KJS vartojamą galią, jų schemose naudojamos didelės varžos rezistoriai nuo 0,1 MΩ iki 100 MΩ. Todėl šių varžų mažinimas, didintų KJS vartojamąją galią, o tai nėra pageidautina. ENC_s taip pat yra proporcinga aplinkos temperatūrai, kurią lemia įvairūs KJS aplinkos veiksniai [9-15].

2. Ekvivalentinio triukšmų krūvio nuosekliojo tranzistoriaus kanalo šiluminio triukšmo dedamoji išreiškiama tokia formule:

$$ENC_{ch}^2 = \frac{e^2 kTR \left(C_{\text{det}} + C_{in} + C_f\right)^2}{3q^2 \tau_p g_m} \quad (21)$$

Nuoseklusis įėjimo tranzistoriaus kanalo šiluminis triukšmas, sudaro nuo 15 % iki 20 % viso KJS ENC_{tot} triukšmo. Todėl norint sumažinti šią dedamąją būtina mažinti įėjimo tranzistoriaus statumą g_m, kuris priklauso nuo tranzistoriaus matmenų ir darbo srovės. Toks įėjimo tranzistoriaus statumas gaunamas, kai tranzistorius veikia ties užsidarymo riba, t. y. kai tranzistoriaus užtūra ištaka įtampa U_{UI} artėja prie atkirtos įtampos [4,10].

3. Ekvivalentinio triukšmų krūvio nuosekliojo mirgėjimo triukšmo dedamąją galima išreikšti taip:

$$ENC_{1/f}^2 = \frac{K_f e^2 \left(C_{\text{det}} + C_{in} + C_f\right)^2}{2C^2 WLq^2} \quad (22)$$

čia K_f – tranzistoriaus mirgėjimo triukšmo energijos konstanta, C_{ox} – dielektrinio oksido savitoji talpa, *W*– krūviui jautraus stiprintuvo įėjimo tranzistoriaus kanalo plotis, *L*– krūviui jautraus stiprintuvo įėjimo tranzistoriaus kanalo ilgis. Šis triukšmas sudaro nuo 30 % iki 35 % viso triukšmo, todėl būtina rasti šio triukšmo mažinimo kelius. Iš $ENC_{1/f}$ išraiškos matome, kad ši triukšmo dedamoji yra tiesiog proporcingas mirgėjimo triukšminiam koeficientui K_f, kuris priklauso tik nuo KJS gamybos technologijos ir pradinės plokštelės kokybės, todėl šis koeficientas dažniausiai yra fiksuotas. Šios triukšminės dedamosios sumažinimas galimas tik parinkus tinkamus įėjimo tranzistoriaus matmenis ir mažinant C_{det}, C_{in} *ir* C_f talpas.

Įėjimo tranzistoriaus statumas išreiškiamas formule:

$$g_m = \sqrt{2\mu C_{ox}\frac{W}{L}I_{ds0}} \quad (23)$$

čia μ– krūvininkų judris, I_{ds0} – įėjimo tranzistoriaus darbo srovės tankis.

Įstačius g_m išraišką į ENC_{ch} išraišką gauname, kad ENC_{ch} ir $ENC_{1/f}$ triukšminės dedamosios atvirkščiai proporcingos įėjimo tranzistoriaus kanalo pločiui *W*. Todėl vienas iš galimų triukšmo mažinimo būdų yra optimalaus įėjimo tranzistoriaus pločio suradimas, šių triukšmo dedamųjų atžvilgiu [4,10].

KMOP tranzistorių lygiagretusis triukšmas turi dvi pagrindines dedamąsias, t. y. nuotėkio srovės triukšmas ir lygiagretusis šiluminis triukšmas.

1. Ekvivalentinio triukšmų krūvio nuotėkio srovės dedamoji išreiškiama tokia formule:

$$ENC^2_{nuotekio} = \frac{e^2\tau_p I_{nuotekio}}{4q} \quad (24)$$

kur $I_{nuotekio}$ – jutiklio nuotėkio srovės stipris.

Ši triukšminė dedamoji sudaro nuo 25 % iki 30 % viso triukšmo. Ši lygiagretaus triukšmo dedamoji priklauso tik nuo jutiklio nuotėkio srovės $I_{nuotekio}$, nes realūs puslaidininkiniai jutikliai turi nuotėkį, kuris yra nuo 0,04 nA iki 100 nA. Jutikliams veikiant padidinto radiacinio poveikio aplinkoje, šios nuotėkio srovės didėja ir jų neįvertinimas gali duoti didelius neatitikimus tarp modeliavimo ir realių matavimų. Todėl šiai triukšminei dedamajai sumažinti yra projektuojami KJS su nuotėkio srovės kompensavimo grandinėmis, kurios nukreipia jutiklio nuotėkio sroves nuo KJP įėjimo link žemės potencialo, taip išvengiant jų integravimo su naudingu signalu [9-15].

2. Ekvivalentinio triukšmų krūvio lygiagrečiojo šiluminio triukšmo dedamąją galima išreikšti taip:

$$ENC^2_{therm} = \frac{e^2\tau_p kT}{2q^2 R_p} \quad (25)$$

čia R_P – lygiagrečių varžų suma.

Šis šiluminis triukšmas priklauso tik nuo KJS lygiagrečių varžų sumos R_P. KJS schemose naudojamos didelės varžos rezistoriai ir be to į šią varžų sumą R_P yra įskaičiuojama KJS grįžtamojo ryšio varža R_{fb}, kurios dydis yra nuo 1 MΩ iki 100 MΩ eilės, todėl ši triukšminė dedamoji nėra didelė lyginant su kitomis, ankščiau paminėtomis. ENC_{therm} sudaro apie 5 % viso triukšmo, todėl projektuojant KJS į šią triukšminę dedamąją galime nekreipti dėmesio [4].

Žvelgiant į ENC_{ch}, ENC_s ir ENC_{therm} išraiškas, skirtingos *ENC* komponentės skirtingai priklauso nuo registracijos trukmės τ_p. Nuoseklaus baltojo triukšmo komponentė ENC_s ir įėjimo tranzistoriaus kanalo šiluminis triukšmas ENC_{ch} mažėja proporcingai didinant registracijos trukmę τ_p, o lygiagretaus nuotėkio srovės triukšminė dedamoji $ENC_{nuotekio}$ – tiesiog proporcinga τ_p, o mirgėjimo komponentė $ENC_{1/f}$ visiškai nepriklauso nuo registracijos trukmės. Registravimo trukmė taip pat priklauso nuo grįžtamojo ryšio varžos bei talpos, jutiklio talpos, įėjimo tranzistoriaus statumo, t. y. nuo parametrų, kurie jau yra aprašytosiose išraiškose. Suminis ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC* išreiškiamas tokia formule:

$$ENC_{tot} = \sqrt{ENC_s^2 + ENC_{ch}^2 + ENC_{1/f}^2 + ENC_{nuotekio}^2 + ENC_{therm}^2} \quad (26)$$

Iš šių išraiškų aptarimo matome, kad siekiant minimizuoti triukšmus reikia tobulinti gamybos technologijas, tobulinti jutiklius ir ieškoti geriausio KJS parametrų santykio, kuriems esant triukšminės dedamosios pasiskirsto taip, kad gautas bendras triukšmas yra mažiausias [4,10].

2.6. Skyriaus išvados

KJS yra sudarytas iš dviejų pagrindinių pakopų – krūviui jautraus priešstiprintuvio, ir impulsų formuotuvo. Krūviui jautriame priešstiprintuvyje iš detektoriaus jutiklio atėjęs krūvis sustiprinamas ir integruojamas (suformuojamas signalas). Iš KJP siganalas patenka į antrąją KJS pakopą – impulsų formuotuvą. Impulsų formuotuvas priešstiprintuvio diferencijuoja ir integruoja. Taip gaunamas reikalingos dažnių juostos ir tinkamo sistemos „signalas/triukšmas“ santykio signalas.

KJP signalams formuoti yra panaudojami CR ir RC grandynai, kurie lemia įvairius KJS įšėjimo signalus su įvairiomis τ_p registravimo trukmėmis. Tačiau, jei KJS stiprinimo koeficientas yra pakankamas, impulsų formuotuvo galima nenaudoti. Tokiu būdu galima sumažinti sistemos vartojamąją galią ir užimamą plotą.

Pagrindiniai krūviui jautraus stiprintuvo parametrai yra: „signalas/triukšmas“ santykis; perdavimo koeficientas K; registracijos trukmė τ; vartojamoji galia; triukšmai.

Siekiant užtikrinti didelę SEDRS skiriamąją geba, KJP „signalas/triukšmas“ santykis SNR turi būti kuo didesnis, todėl tam reikia mažinti ekvivalentinį triukšmų krūvį ENC. Norint mažinti ENC reikia mažinti KJP triukšmus. Siekiant minimizuoti triukšmus reikia tobulinti gamybos technologijas, tobulinti jutiklius ir ieškoti geriausio KJS parametrų santykio, kuriems esant triukšminės dedamosios pasiskirsto taip, kad gautas bendras triukšmas yra mažiausias.

KJP triukšmų mažinimas atvirkščiai proporcingas vartojamajai galiai. Mažinant KJP vartojamąją galią, didėja sistermos triukšmai. Todėl reikia rasti būdų, kaip tinkamai mažinti šiuos abu parametrus.

Vienas iš pagrindinių laikinių KJS parametrų registracijos trukmė τ_p. Ši trumė užtikrina didelę laikinę skiriamąją gebą ir nusakantis sistemos greitaveiką, todėl turi būti kuo mažesnė. Ši registracijos trukmė priklauso nuo KJP grįžtamojo ryšio varžos R_{fb}, grįžtamojo ryšio talpos C_{fb}, jutiklio C_{det} ir KJP įėjimo C_{in} talpų, KJP įėjimo tranzistoriaus statumo.

KJP perdavimo koeficientas K turi užtikrinti kuo didesnį sistemos tiesiškumą. Didelis sistemos tiesiškumas reiškia gerą KJS detektavimo efektyvumą plačiame įėjimo krūvių diapazone.

3. ATJ sujungimų talpos ir varžos

3.1. Parazitinių talpų įtaka SEDRS registruojančiai elektronikai

Aiškinantis detektoriaus jutiklio sujungimo su registruojančia elektronika (ATJ) veiklą reikia atkreipti dėmesį į parazitinės talpas, atsirandančias tarp jutiklio ir registravimo elektronikos lusto. Parazitinės talpos, tai tokios talpos, kurių poveikis aktyviniam taškiniam jutikliui yra žalingas. Todėl būtina atsižvelgti į šias parazitines talpas, nes jos įtakoja KJS registracijos trukmę, vartojamąją galią ir triukšmus, o tiksliau – ekvivalentinį triukšmų krūvį (ENC) KJP įėjime, kas padidina sistemos “signalas/triukšmas” santykį [19-22].

Taigi, parazitinės talpos tiešiskai įtakoja KJS triukšmus:

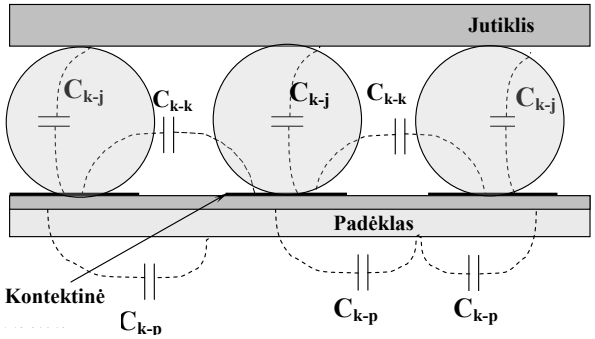
$$ENC \sim W_V \cdot L_V \sim C_{\text{det}} + C_{par} \quad (27)$$

čia W_v –vaizdo taško plotis, L_v – vaizdo taško ilgis, C_{det} – jutiklio talpa, C_{par} – parazitinė talpa.

ATJ sujungimuose atsirandančios parazitinės talpos skirstomos į tris pagrindines grupes:

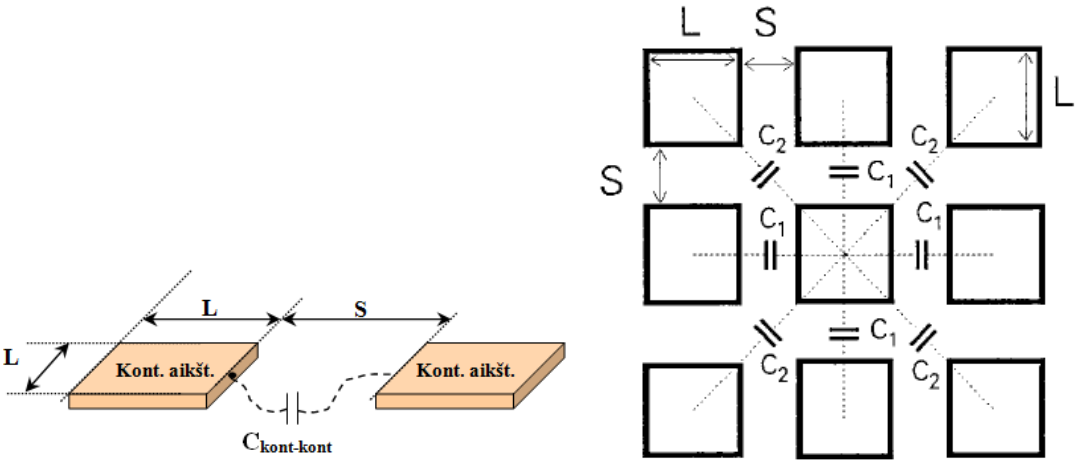
$$C_{par} = C_{kont-jutiklis} + C_{k-ksum} + C_{kont-pad} \quad (28)$$

čia $C_{kont-jutiklis}$ – talpa, atsirandanti tarp kontaktinės aikštelės ir puslaidininkinio jutiklio, C_{k-ksum} – suminė talpa tarp gretimų kontaktinių aikštelių, $C_{kont-pad}$ – talpa, atrirandanti tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo [19,22]. Šios talpos pavaizduotos 3.1 pav.



3.1 pav. Parazitinės talpos, atsirandančios tarp jutiklio ir kontakto [22]

Žvelgiant į vaizdo taškų matricą iš viršaus (3.2 pav.) matome pavaizduotas kontaktines aikšteles ir parazitines talpas tarp jų. Čia L – kontaktinės aikštelės ilgis, S – atstumas tarp gretimų aikštelių. Nesunku pastebėti, jog vieno kanalo kontaktinę aikštelę supa aštuonios gretimos kontaktinės aikštelės. Parazitinės talpos C_1 susidaro tarp „priešais“ esančių aikštelių, o talpos C_2 – tarp „įstrižai“ viena kitos atžvilgiu esančiu aikštelių [12]. Laikykime, kad $C_1 = C_2 = C_{kont-kont}$.



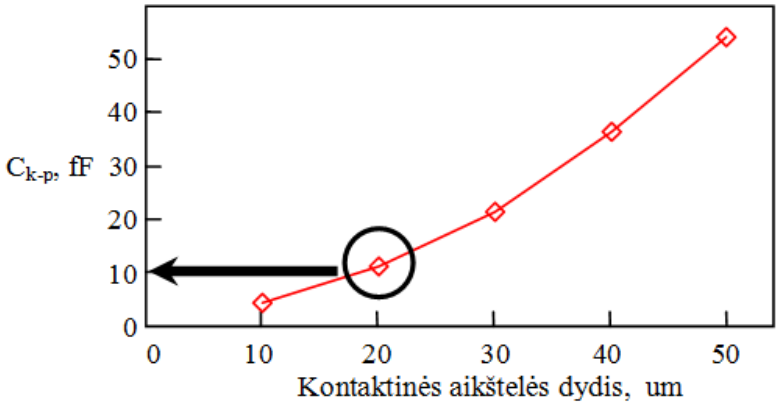
3.2 pav. Parazitinės talpos tarp gretimų kontaktinių aikštelių [19, 23]

3.3 pav. pavaizduota priklausomybė tarp parazitinės talpos, atsirandančios tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo bei aikštelės dydžio. Matyti, jog kuo didesnė kontaktinė aikštelė, tuo didesnė parazitinė talpa pradeda veikti (28 formulė). Tai lemia, didesnius triukšmus KJS.

Taipogi yra svarbu parinkti tinkamus kontaktinių aikštelių matmenis, tarp kontaktinių aikštelių esančius atstumus. Šie dydžiai svarbūs skaičiuojant $C_{k\text{-}ksum}$ parazitinę talpą, kuri apskaičiuojama pagal formulę:

$$C_{k-ksum} = 8 \cdot C_{kont-kont} \quad (29)$$

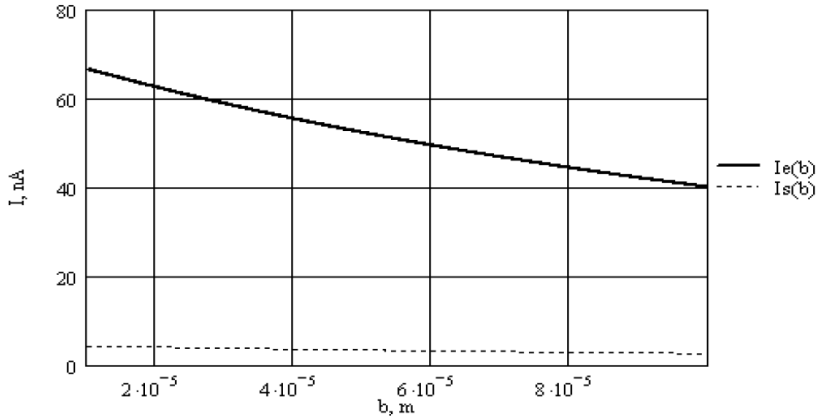
Vieno vaizdo taško parazitinė talpa $C_{kont\text{-}pad}$, atsirandanti tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo yra dominuojanti prieš $C_{kont\text{-}jutiklis}$ ir $C_{kont\text{-}kont}$ parazitines talpas. Tokį $C_{kont\text{-}pad}$ ir kitų taplų dydžių skirtumą lemia metalo sluoksnių konstukcija (priklausomai nuo panaudojamos technologijos) tarp registravimo elektronikos padėklo ir KJP kontaktinės aikštelės. Ši talpa yra tuo didesnė, kuo didesnė kontaktinė aikštelė (3.3 pav.). Be to, šios talpos dydį labai daug lemia tarpmetaliniai izoliaciniai sluoksniai, kurie yra labai ploni [19, 22].



3.3 pav. $C_{kont\text{-}pad}$ parazitinės talpos prilausomybė nuo vaizdo taško dydžio [19]

3.2. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}jutiklis}$ tarp kontaktinės aikštelės ir jutiklio skaičiavimas

SEDRS jutikliai su lustais, kuriose talpinami KJS tarpusavyje jungiami gūburiniais išvadais, kurių skersmuo turi didelę įtaką iš jutiklio atėjusiam signalui. 3.5. pav. matome jutiklio srovės impulso dedamųjų priklausomybę nuo gūburinio išvado skersmens, kai Q_{in} = 1 kē, L = 300 μm, CdZnTe jutiklis. Matyti, kad didėjant išvado skersmeniui tiek elektroninės, tiek skylinės srovių impulso stipriai mažėja. Taipogi matyti, jog kintantis gūburinio išvado skersmuo žymiai labiau įtakoja elektroninę srovę, t.y. išvado skersmeniui padidėjus ribose (0 – 100 μm), elektroninė srovė sumažėja nuo 67 nA iki 40 nA, kai tuo tarpu skylinė srovė pakinta labai nežymiai.



3.5. pav. Jutiklio srovės impulso dedamųjų priklausomybė nuo gūburinio išvado skersmens [31]

Taip yra todėl, kad didėjant gūburinio išvado skersmeniui krūvininkų lėkio trukmė per jutiklį ir gūburinį išvadą didėja, nes ilgėja kelias kurį turi įveikti krūvininkai kol pasieks KJP įėjimą. Šios priežastys ir lemia elektroninės ir skylinės srovių impulsų amplitūdžių mažėjimą.

Norint sumažinti krūvininkų lėkio trukmę, reikia didinti prie detektoriaus elektrodų prijungtą išorinę įtampa arba mažinti detektoriaus jutiklio ir/ar gūburinių išvadų storius. Didesnė išorinė įtampa lemia didesnį elektrinio lauko stiprį jutikliyje. Tai reiškia, kad krūvininkams suteikiama didesnė energija, kurios dėka trumpėja laikas per kurį jie įveikia kelią link registravimo elektronikos lusto. Jutiklio storio ir gūburinių išvadų skersmens mažinimas lemia trumpesnį krūvininkų kelią link KJP įėjimo. Tačiau gūburinių išvadų mažinimas lemia didesnes parazitines talpas tarp jutiklio ir registravimo elektronikos kontaktinės aikštelės. Šias talpas būtina įvertinti.

Parazitinė talpa $C_{kont\text{-}jutiklis}$ (3.6 pav.) priklausomai nuo atstumo tarp jutiklio (gūburinio išvado skermens) ATJ kontaktinės aikštelės dydžio ir apskaičiuojama, pagal šią erdvinę formulę:

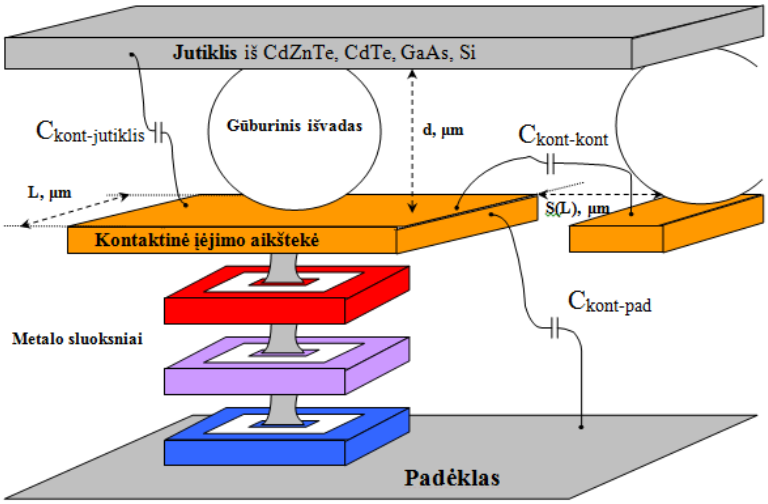
$$C_{kont-jutiklis}(R,d) = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\int_0^d \int_0^1 r \cdot \frac{z}{(z^2 + r^2 \cdot R^2)^{\frac{3}{2}}} drdz} \quad (30)$$

Čia: R – kontaktinės aikštelės spindulys; $R=L/2$

L – kontaktinės aikštelės ilgis;

d – atstumas tarp jutiklio ir kontaktinės aikštelės (gūburinio išvado skersmuo);

ε_0 – vakuumo dielektrinė konstanta.



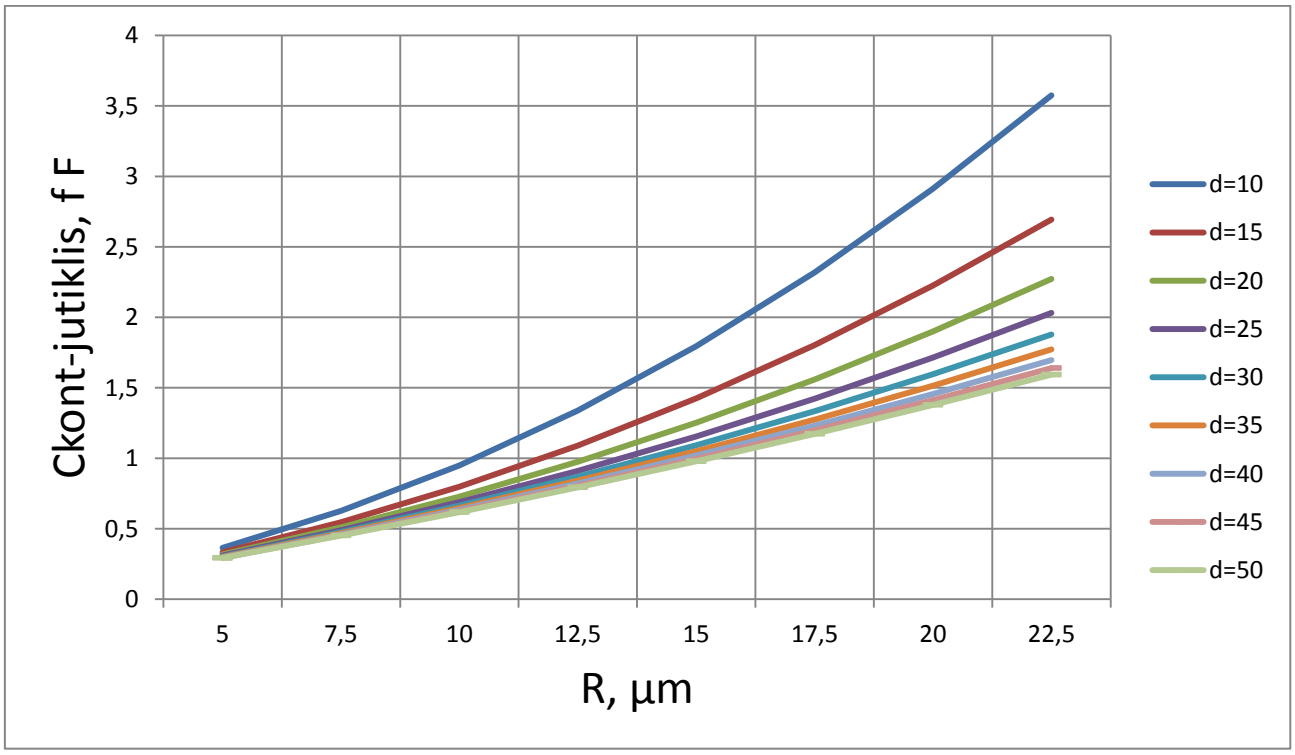
3.6 pav. Parazitinės talpos, atsirandančios tarp jutiklio ir kontakto

Apskaičiuotos parazitinių $C_{kont-jutiklis}$ talpų reikšmės priklausomai nuo kontaktinės aikštelės spindulio ir gūburinio išvado skersmens pateiktos 1 lentelėje. Skaičiavimuose kontaktinės aikštelės spindulys buvo keičiamas nuo 5 µm iki spindulio, artimo vienam AJT vaizdo taškui – 22,5 µm. Gūburinio išvado skersmuo buvo keičiamas nuo 10 µm iki, pagal užduoties sąlygas, 50 µm. Toks platus dyžių diapazonas pasirinktas norint tiksliau įvertinti šios talpos įtaką KJP signalui.

1 lentelė. Parazitinės talpos $C_{kont-jutiklis}$ dydis kintant gūburinio išvado skersmeniui ir kontaktinės aikštelės matmenims

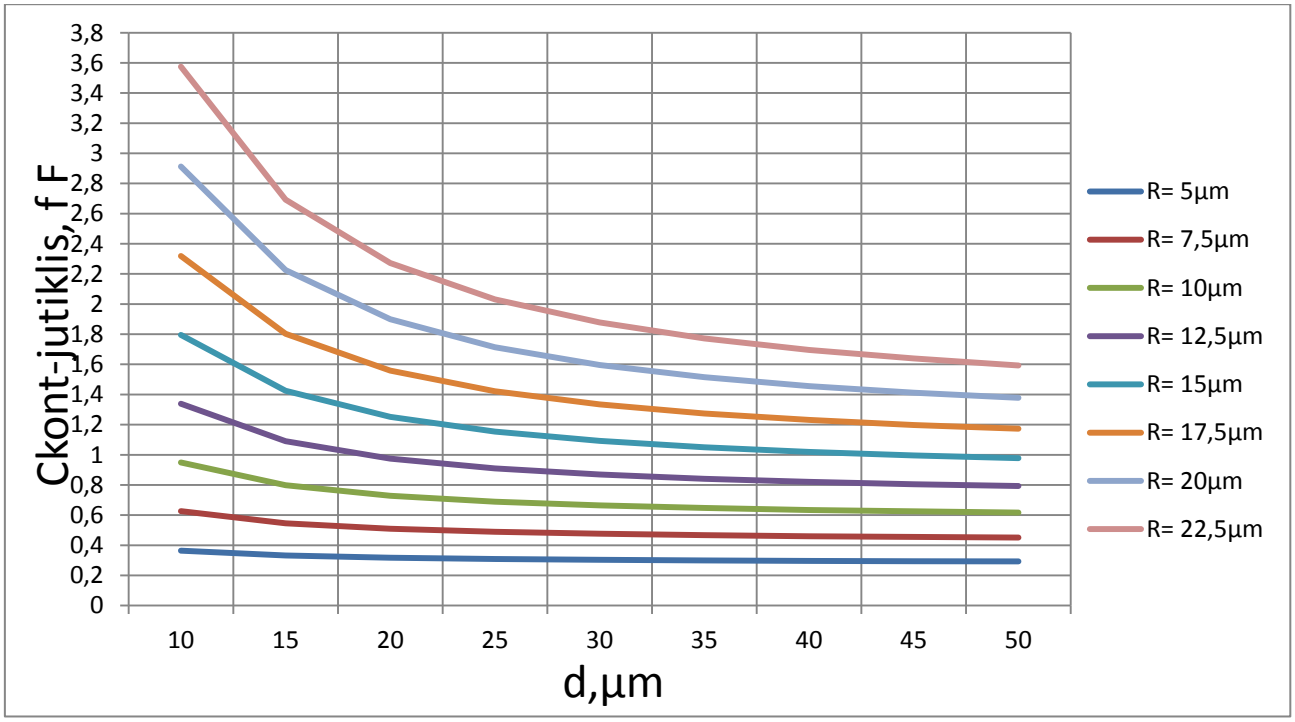
d, µm	$C_{kont-jutiklis}$, fF							
	R= 5µm	R= 7,5µm	R= 10µm	R= 12,5µm	R= 15µm	R= 17,5µm	R= 20µm	R= 22,5µm
10	0,364	0,626	0,949	1,339	1,795	2,319	2,913	3,575
15	0,332	0,546	0,798	1,09	1,425	1,803	2,225	2,693
20	0,317	0,509	0,728	0,975	1,252	1,559	1,899	2,272
25	0,309	0,489	0,689	0,91	1,154	1,422	1,714	2,031
30	0,303	0,476	0,664	0,869	1,092	1,334	1,596	1,878
35	0,299	0,467	0,647	0,841	1,05	1,274	1,515	1,772
40	0,296	0,459	0,634	0,821	1,019	1,231	1,456	1,696
45	0,294	0,455	0,625	0,805	0,996	1,198	1,412	1,639
50	0,293	0,451	0,617	0,793	0,978	1,173	1,378	1,593

Parazitinės $C_{kont\text{-}jutiklis}$ talpos prilausomybė nuo kontaktinės aikštelės ir gūburinio išvado skersmens grafikai:



3.7 pav. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}jutiklis}$ priklausomybė nuo kontaktinės aikštelės spindulio R

3.7 pav. ir 1 lentelėje matome, kad didinant aktyvinio taškinio jutiklio kontaktinės aikštelės spindulį R, parazitinė talpa didėja. Esant atstumui tarp jutiklio ir kontaktinės aikštelės (gūburinio išvado skersmeniui) d=50 µm, o kontaktinės aikštelės spinduliui R=22,5 µm (kontaktinės aikštelės dydis artimas vaizdo taško dydžiui), parazitinė talpa lygi 1,593 fF. Tačiau kai kontaktinės aikštelės spindulys R=5 µm, parazitinė talpa $C_{kont\text{-}jutiklis}$ sumažėja iki 0,293 fF. Taigi, gūburinio išvado skersmeniui esant 50 µm, parazitinių talpų skirtumas tarp mažiausios kontaktinės aikštelės (R=5 µm) ir didžiausios (R=22,5 µm) yra apie 5,4 karto. Kai gūburinio išvado skersmuo yra d=10 µm parazitnių talpų skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios kontaktinių yra apie 9,8 karto.Taipogi matyti priklausomybė tarp $C_{kont\text{-}jutiklis}$ talpos ir gūburinio išvado skermens *d* (atstumo tarp jutiklio ir kontaktinės aikštelės). Kuo mažesnis išvado skersmuo tuo didesnė parazitinė talpa susidaro. Ši priklausomybė aptarta sekenčiame grafike.



3.8 pav. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}jutiklis}$ priklausomybė nuo atstumo tarp jutiklio ir kontaktinės aikštelės

3.8 pav. matome, kad didinant atstumą tarp kontaktinės aikštelės ir jutiklio – gūburinio išvado skersmenį (esant tam pačiam kontaktinės aikštelės spinduliui R), talpa $C_{kont\text{-}jutiklis}$ mažėja. Esant kontaktinės aikštelės spinduliui R=22,5 µm, o gūburinio išvado skersmeniui d=10 µm, parazitinė talpa lygi 3,575 fF. Tačiau, kai atstumas tarp kontaktinės aikštelės ir jutiklio padideja iki d=45 µm, parazitinė talpa $C_{kont\text{-}jutiklis}$ sumažėja iki 1,639 fF, o išvado skersmeniui padidėjus iki maksimalaus leistino dydžio užduoties sąlygoje – 50 µm, parazitinė talpa sumažėja iki 1,593 fF. Parazitinių talpų skirtumas tarp didžiausio ir mažiausio gūburinių išvadų skersmenų yra apie 2,24 karto.

3.3. Talpos tarp gretimų kanalų kontaktinių aikštelių $C_{kont\text{-}kont}$ skaičiavimas

Parazitinė talpa $C_{kont\text{-}kont}$ susidaranti tarp gretimų kanalų kontaktinių aikštelių 3.9 pav. apskaičiuojama taip:

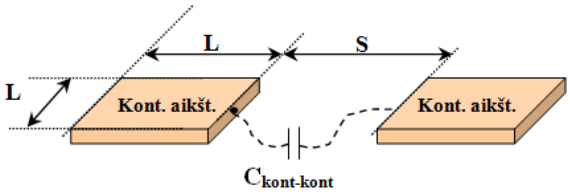
$$C_{kont-kont}(S,L) = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\int_{2\cdot10^{-10}}^{\frac{S}{2}} \int_{-0.5}^{0.5} \frac{z}{(z^2 + x^2 \cdot L^2)^{\frac{3}{2}}} dxdz} \quad (31)$$

Čia L– kontaktinės aikštelės matmenys (kontaktinė aikštelė yra kvadratinė);

ε_0 – vakuumo dielektrinė konstanta;

ε – dielektriko esančio tarp kontaktinių aikštelių dielektrinė skvarba;

S – atstumas tarp kontaktinių aikštelių.



3.9 pav. Talpa tarp gretimų kanalų kontaktinių aikštelių [19]

Atstumas tarp kontaktinių aikštelių turi būti parinktas taip, kad aikštelių talpinimo žingsnis – aikštelė ir tarpas tarp jų, būtų ne didesnis už jutiklio vieno vaizdo taško matmenis. Taip yra todėl, kad kontaktinės negali tarpusavyje liestis, nes tai lemtų krūvio nutekėjimą į gretimą aikštelę, dideles parazitines talpas tarp aikštelių. Tarpai tarp kontaktinių aikštelių gali būti iš silicio oksido SiO_2, silicio nitrido Si_3N_4 ar poliimido. Dielektrikų parametrai parodyti 2 lentelėje.

2 lentelė. Dielektrikų dielektrinės skvarbos

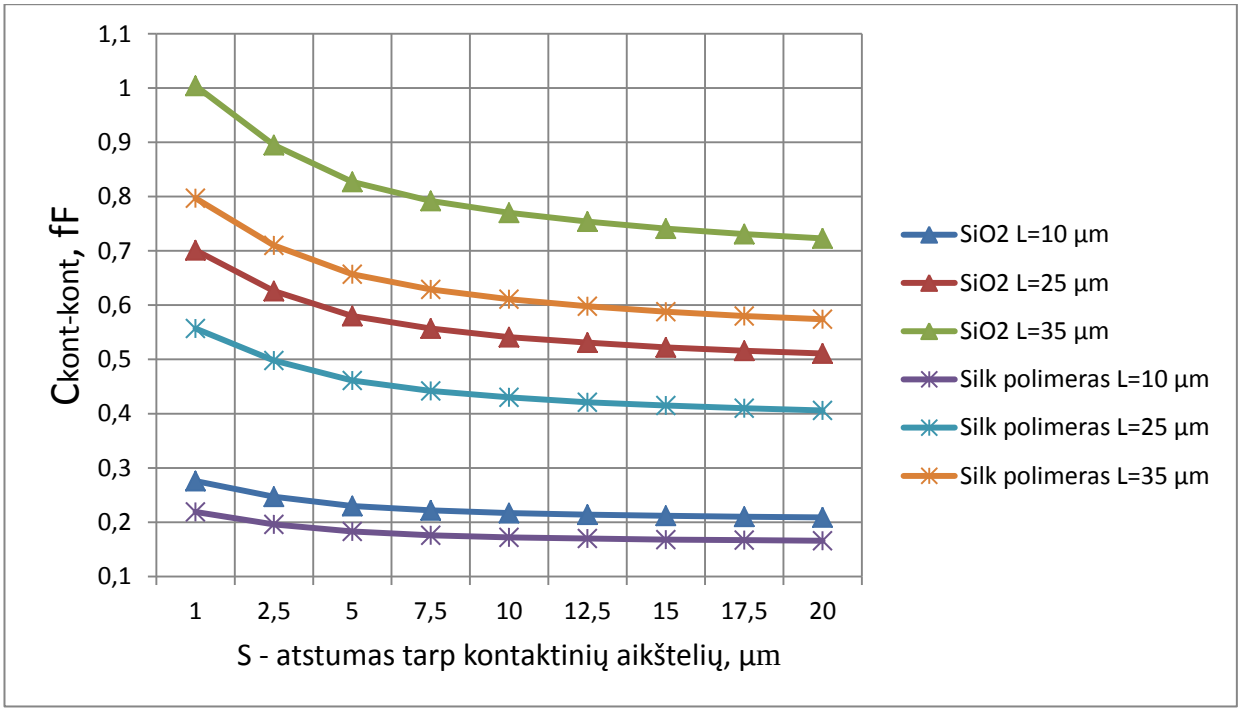
Dielektrikas	Dielektrinė skvarba, ε
SiO_2	3,902
Poliimidas	3,098

Apskaičiuotos parazitinių $C_{kont\text{-}kont}$ talpų reikšmės priklausomai nuo kontaktinės aikštelės dydžio, atstumo tarp jų ir panaudojamo dielektriko pateiktos 3 lentelėje ir 3.10 pav.

Gauti rezultatai:

3 lentelė. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}kont}$ priklausomybės nuo atstumo tarp kontaktinių aikštelių

S, µm	$C_{kont\text{-}kont}$, fF					
	SiO_2			Poliimidas		
	L=10 µm	L=25 µm	L=35 µm	L=10 µm	L=25 µm	L=35 µm
1	0,276	0,701	1,004	0,219	0,557	0,797
2,5	0,247	0,626	0,895	0,196	0,498	0,710
5,0	0,230	0,580	0,827	0,183	0,461	0,657
7,5	0,222	0,557	0,792	0.176	0,442	0,629
10	0,217	0,541	0,770	0,172	0,430	0,611
12,5	0,214	0,531	0,754	0,170	0,421	0,598
15,0	0,212	0,522	0,741	0,168	0,415	0,588
17,5	0,210	0,516	0,731	0,167	0,410	0,580
20,0	0,209	0,511	0,723	0,166	0,406	0,574



3.10 pav. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}kont}$ priklausomybė nuo atstumo tarp kontaktinių aikštelių

3.10 pav. ir 3 lentelėje matome, jog didinant atstumą tarp kontaktinių aikštelių talpa $C_{kont\text{-}kont}$ mažėja. Kai kontaktinė aikštelė yra 35×35 µm^2 dydžio, o atstumui tarp kontaktinių aikštelių kintant nuo 1 µm iki 20 µm, parazitinė talpa $C_{kont\text{-}kont}$ atitinkamai sumažėja nuo 1 fF iki 0,723 fF, kai dielektrikas tarp aikštelių iš silicio oksido SiO_2. Dielektriką pakeitus poliimidu talpa kinta nuo 0,797 µm iki 0,574 µm. Matyti, jog parazitinė talpa labiau įtakojama naudojant poliimidą, kurio dielektrinė skvarba mažesnė.

Taipogi nesunku pastebėti ir tai, jog kuo didesnė kontaktinė aikštelė, tuo didesnė talpa susidaro tarp kontaktinių aikštelių. Kai kontaktinės aikštelės matmenys pakinta nuo 10×10 µm^2 dydžio iki 35×35 µm^2 dydžio, o atstumas tarp kontaktinių aikštelių yra 20 µm, parazitinė talpa $C_{kont\text{-}kont}$ atitinkamai padidėja nuo 0,209 fF iki 0,723 fF, kai dielektrikas tarp aikštelių iš silicio oksido SiO_2.

Be to, kaip buvo minėta anksčiau, vieno kanalo vidurinę kontaktinę aikštelę supa keturios gretimos ir keturios įstrižai esančios kontaktinės aikštelės. Todėl suminė C_{k-ksum} parazitinė talpa apskaičiuojama pagal formulę $C_{k\text{-}ksum.} = 8 \cdot C_{kont\text{-}kont}$. $C_{k\text{-}ksum.} = 8 \cdot 0{,}557 = 4{,}456$ fF, kai aikštelės matmenys yra 35×35 µm^2 dydžio ir tarpas tarp aikštelių yra 1 µm ir iš Poliimido.

Taigi galime daryti išvadą, jog labai svarbu tinkamai suderinti kontaktinės aikštelės matmenis ir atstumą tarp aikštelių, kad būtų gauta kuo mažesnė parazitinė talpa $C_{kont\text{-}kont.}$

3.4. Talpos tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo $C_{kont-pad}$ skaičiavimai

Talpa $C_{kont-pad}$ apskaičiuojama panašiai kaip ir talpa $C_{kont-jutiklis}$, tik šiuo atveju dar į formulę įsistatom dielektriko esančio tarp kontaktinės aikštelės ir silicio padėklo dielektrinės skvarbos ε reikšmę. Gauname tokią išraišką:

$$C_{k-p}(R,d) = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon}{\int_0^d \int_0^1 r \cdot \frac{z}{(z^2 + r^2 \cdot R^2)^{\frac{3}{2}}} dr dz} \quad (32)$$

Čia: R – kontaktinės aikštelės spindulys;

d – atstumas tarp kontaktinės aikštelės ir Si padėklo;

ε_0 – vakuumo dielektrinė konstanta;

ε - dielektriko esančio tarp kontaktinės aikštelės ir Si padėklo dielektrinė skvarba.

Kaip buvo minėta nuskaitymo elektronikos kontaktinių aikštelių sudarymui naudojamas metalizacijos procesas. Tarp kontaktinės aikštelės ir NMOP ir PMOP tranzistorių, kuriuose vyksta signalų apdorojimo procesai, priklausomai nuo naudojamos technologijos yra sudaryta kelių metalinių sluoksnių konstrukcija (1.4. pav.). Šie metaliniai sluoksniai sumažina triukšmus atsirandančius dėl vaizdo taškų sąveikos, bei ekranuoja puslaidininkinį jutiklį nuo nuskaitymo elektronikos.

Pagal literatūrą 0.13 μm KMOP technologijoje naudojami 6 metalo sluoksniai, atstumas tarp padėklo ir kontaktinės aikštelės yra apie 6.2 μm. 0.25 μm KMOP technlogojoje naudojami 3 – 5 metalo sluoksniai, atstumas nuo padėklo iki aikštelės gali būti 3.2 – 7 μm. 90 nm KMOP technologijoje esant 7 metalo sluoksniams atstumas esti 5 μm.

Izoliacijai tarp metalų sudaryti panaudomi SiO_2 arba Silk polimeras (aromatinis hidrokarbonas). Silk polimeras pasižymi nedidele dielektrine skvarba (5 lentelė). Šias dielektrikų dielektrines skvarbas naudosime parazitinei talpai $C_{kont-pad}$ skaičiuoti.

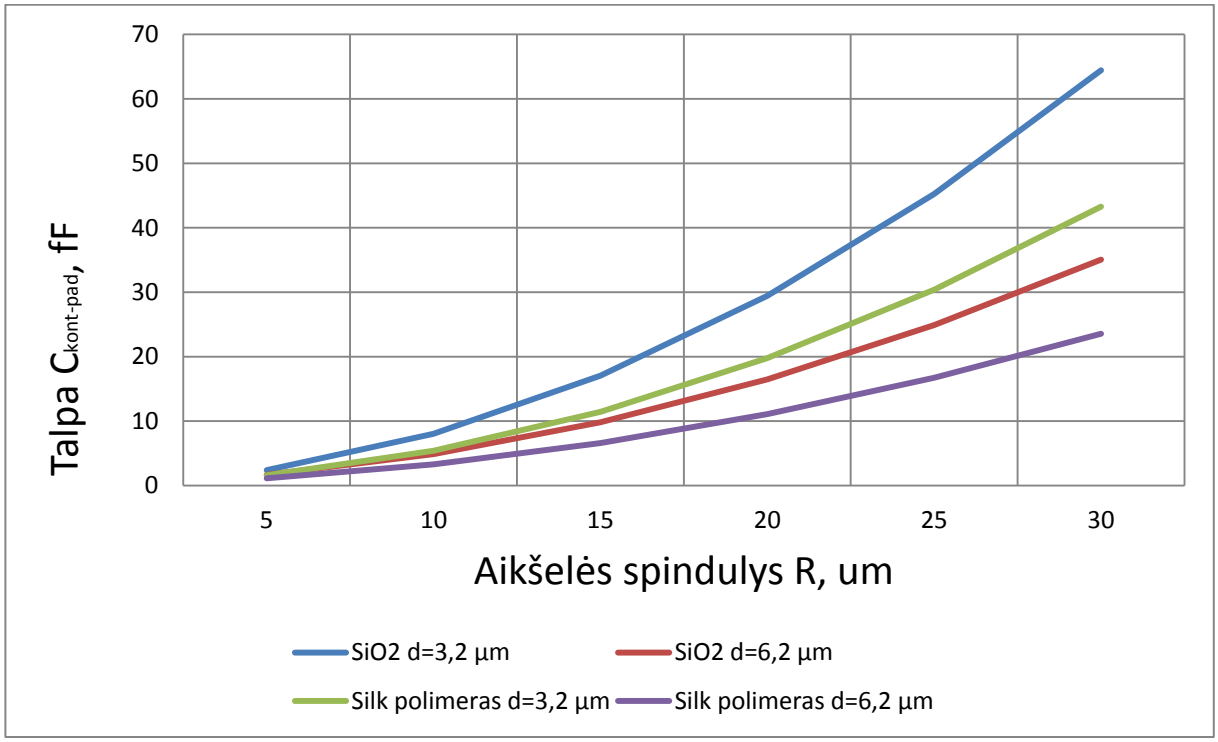
Gauti rezultatai:

4 lentelė. Dielektrikų dielektrinės skvarbos

Dielektrikas	Dielektrinė skvarba, ε
SiO_2	3.9
Silk polimeras	2.62

5 lentelė. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}pad}$ dydis kintant kontaktinės aikštelės spinduliui R

R, µm	$C_{kont\text{-}pad}$, fF			
	SiO_2		Silk polimeras	
	d=3,2 µm	d=6,2 µm	d=3,2 µm	d=6,2 µm
5	2,395	1,676	1,609	1,126
10	8,03	4,891	5,395	3,286
15	17,05	9,819	11,45	6,596
20	29,45	16,49	19,78	11,08
25	45,24	24,9	30,39	16,73
30	64,42	35,06	43,27	23,56



3.11 pav. Parazitinės talpos $C_{kont\text{-}pad}$ priklausomybė nuo atstumo tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo

Kaip matome iš 3.11 pav. $C_{kont\text{-}pad}$ parazitinės talpos priklausomybė nuo atstumo tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo yra eksponentinio pobūdžio. Kai kontaktinės aikštelės spindulys yra 25 µm, izoliacija iš Silk polimero, o atstumas tarp kontaktinės aikštelės ir Si padėklo kinta nuo 3,2 µm iki 6,2 µm, parazitinė talpa $C_{kont\text{-}pad}$ sumažėja nuo 30,39 µm iki 16,73 µm, o tai yra apie 1,8 karto. Analogiškai parazitinė talpa sumažėja ir, kai izoliacija tarp metalų yra iš SiO_2– nuo 45,24 µm iki 24,9 µm. Tai taipogi yra apie 1,8 karto. Mažinant aikštelės spindulį, parazitinė talpa nepriklausomai nuo izoliatoriaus tarp metalų taipogi mažėja. Taigi norint sumažinti parazitinę talpą

tarp kontaktinės aikštelės ir registravimo elektronikos padėklo reik naudoti KMOP technologiją su daugiau metalo sluoksnių.

Vieno vaizdo taško parazitinė talpa $C_{kont\text{-}pad}$, atsirandanti tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo yra keletą kartų didesnė už $C_{kont\text{-}jutiklis}$ ir $C_{kont\text{-}kont}$ talpas. Tokį $C_{kont\text{-}pad}$ ir kitų talpų dydžių skirtumą lemia konstukcija, esanti tarp nuskaitymo elektronikos padėklo ir KJS kontaktinės aikštelės (1.4. pav.).

Suskaičiavę visas parazitines talpas, galime apskačiuoti suminę parazitinę talpą. Suminė parazitinė talpa C_{par} gaunama sudėjus visas ankčiau apskaičiuotas parazitines talpas.

Gaminant kontaktinę aikštelę artimą vieno vaizdo taško dydžiui, t.y. aikštelės spindulys R=25 μm, o gūburinio išvado skermuo 50 μm, suminė parazitinė talpa C_{par} yra lygi:

$$C_{par25} = C_{kont-jutik} + C_{kont-kont} + C_{kont-pad} = 1{,}82fF + 1{,}51fF + 45{,}24fF = 48{,}47fF$$

Gaminant 2,5 karto mažesnę kontaktinę aikštelę, t.y. aikštelės spindulys R=10 μm, o gūburinio išvado skermuo 50 μm, suminė parazitinė talpa C_{par} yra lygi:

$$C_{par10} = C_{kont-jutik} + C_{kont-kont} + C_{kont-pad} = 0{,}62fF + 0{,}58fF + 8{,}03fF = 9{,}23fF$$

Matome, jog kai kontaktinės aikštelės matmenys yra 20×20 μm^2, parazitinė talpa sumažėja daugiau kaip 5 kartus. Taigi parazitinių talpų dydis labai stipriai priklauso nuo kontaktinės aikštelės matmenų.

3.5. Gūburinio išvado, kontaktinės aikštelės ir UBM sluoksnių varžos skaičiavimas

Gūburiniai išvadai sujungimams tarp jutiklio ir registruojančios elektronikos gaminami iš įvairių metalų ar jų lydinių. Populiariausi metalai yra auksas Au, indis In, alavas Sn, o lydiniai – Sn-Pb (alavo-švino), Sn-Ag (alavo-sidabro), Sn-Ag-Cu (alavo-sidabro-vario), Sn-Cu (alavo-vario), Sn-Bi (Alavo-bismuto), Sn-Cu (alavo-vario). Kalbant apie lydinius, jie gali būti maišoti tarpusavyje įvairiomis proporcijos, bet šiuose skaičiavimo naudosime dažniausiai pasitaikančius: 63Sn-37Pb ir 96.5Sn-3.5Ag [29].

Tarp gūburinio išvado ir jutiklio bei gūburinio išvado ir registruojančios elektronikos lusto yra aliuminio kontaktinė aikštelė ir UMB (ang. Under bump metallization) – metalizacijos sluoksniai, 6 lentelė. UBM sluoksnis gali būti sudarytas naudojant įvairių metalų ir ar metalų lydinių kombinacijas. Dažniausiai UMB metalizacija yra trisluoksnė [29].

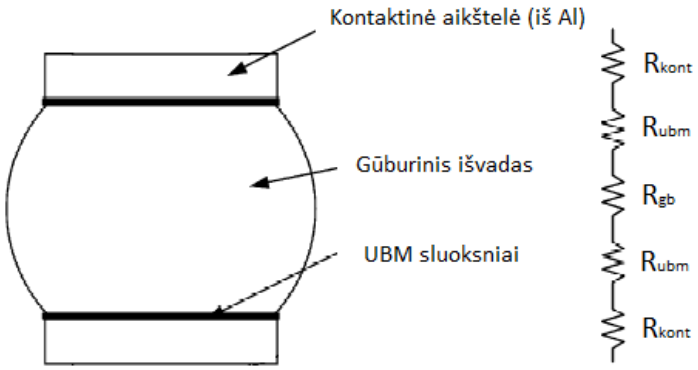
Šiame darbe mes naudosime trijų metalo sluoksnių UBM, t.y. titanas, nikelis ir auksas. Apatiniui sluoksniui, naudojamas titanas (Ti), kuris užtikrina mažą kontaktinę varžą, gerai sukimba su aliuminiu (Al) ir sukuria pakankamai aukštą potencialinį barjerą, apsauganti nuo difuzijos iš guburinio išvado į integrinį grandyną. Vidurinysis – smulkiai grudėtas nikelis (Ni), kuris gerai

sukimba tiek su Ti, tiek su sulydymo guburiniu išvadu. Viršutinis laidusis sluoksnis sudaromas iš metalo, turinčio maža savitąja varžą, gerai besiderinančiu su kitais pasluoksniais ir apsaugančio kitus sluoksnius nuo oksidacijos. Viršutinis sluoksnis gaminamas iš aukso (Au).

6 lentelė. Galimi UBM metalizacijos sluoksniai [29]

UBM
TiW/Cu/electroplated Cu
Cr/Cr-Cu/Cu
NiV/Cu
TiW/NiV
Ti/Cu
Ti/Ni/Au
CU
TiW/Cu
Cr/Cu
Cu/Ta/Cu
Co
Ni/Cu
Ti/Cu/Ni
Ni
Ni/Au

Norint apskaičiuoti sujungimo tarp jutiklio ir registruojančios elektronikos varžą, reikia įvertinti ne tik gūburinio išvado varžą, bet ir kontaktinės aikštelės ir UBM sluoksnių varžas. Kad tai padaryti reikia pasidaryti jutiklio ir registruojančios elektronikos sujungimo ekvivalentinės varžos schemą [27], 3.12 pav.:



3.12 pav. Jutiklio ir registruojančios elektronikos sujungimas ir ekvivalentinė varžų schema [27]

Pagal šį 3.12 pav. matome kad sujungimo varža bus lygi:

$$R_{total} = 2 \cdot (R_{kont} + R_{ubm}) + R_{gb} \quad (33)$$

Kontaktinės aikštelės varža apskaičiuojama taip:

$$R_{kont} = \frac{\rho_k \cdot h_k}{A_k} \cdot \ 1 + \beta_k \cdot \Delta T \qquad (34)$$

Čia ρ_k – kontaktinės aikštelės, šiuo atveju Aliuminio savitoji varža; h_k – aikštelės aukštis; A_k – aikštelės plotas; β_k – aliuminio temperatūrinis varžos koeficientas prie 20 °C; ΔT – temperaturų skirtumas. $\Delta T = T - T_0$. Temperatūrų skirtumą pasirenkame nuo $T = 0°C$ iki $T_0 = 27°C$, t.y. skaičiuosime varžą, kai temperatūra kis nuo nulio laipsnių Celsijaus iki kambario temperatūros.

UBM sluoksnių varžą skaičiuosime taip pat kaip kontaktinės aikštelės varžą, tik imsime kitus aukščius, savitąsias varžas ir temperatūrinius varžos koeficientus.

Gūburinio išvado varžą apskaičiuoti ne taip paprasta, jei jis yra ne stulpelinis, t.y. cilindro formos. Jei gūburinis išvadas yra nupjauto rutulio formos, jo varžą galima skaičiuoti „kontaktų tūrių metodu“ [26] arba pagal šią formulę:

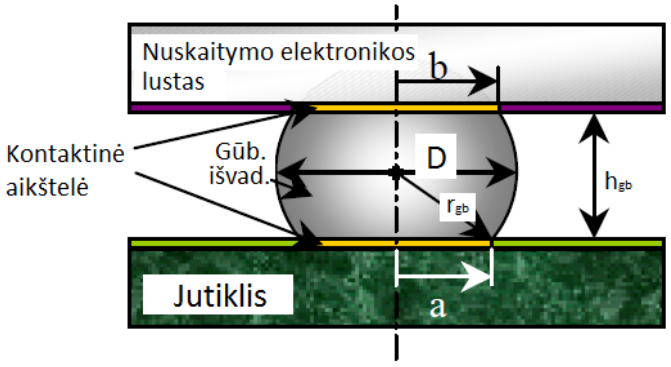
$$R_{gb} = \frac{3 \cdot \rho_{gb} \cdot h_{gb}^2}{4 \cdot \pi \cdot r_{gb}^3} \cdot \ 1 + \beta_{gb} \cdot \Delta T \qquad (35)$$

Čia ρ_{gb} – gūburinio išvado savitoji varža; h_{gb} – gūburinio išvado aukštis; r_{gb} – gūburinio išvados sferinis spindulys; β_{gb} – gūburinio išvado temperatūrinis varžos koeficientas; ΔT reikšmę imame tokią pačią, kaip praeitoje formulėje [13].

Gūburinio išvado aukštį apskaičiuosime pagal formulę (3.13 pav.):

$$h_{gb} = \ \overline{r_{rg}^2 - a^2} + \ \overline{r_{gb}^2 - b^2} \qquad (36)$$

Čia a – gūburinio išvado lietimosi su UBM sluoksniais iš jutiklio pusės spindulys; b – gūburinio išvado lietimosi su UMB sluoksniais iš elektronikos lusto pusės spindulys. Šiuose skaičiavimuose priėmėm sąlygą, jog šie spinduliai yra lygūs, a = b, t.y. gūburinis išvadas riboja vienodą plotą tiek su jutikliu, tiek su registruojančios elektronikos lustu [28], 7 lentelė.

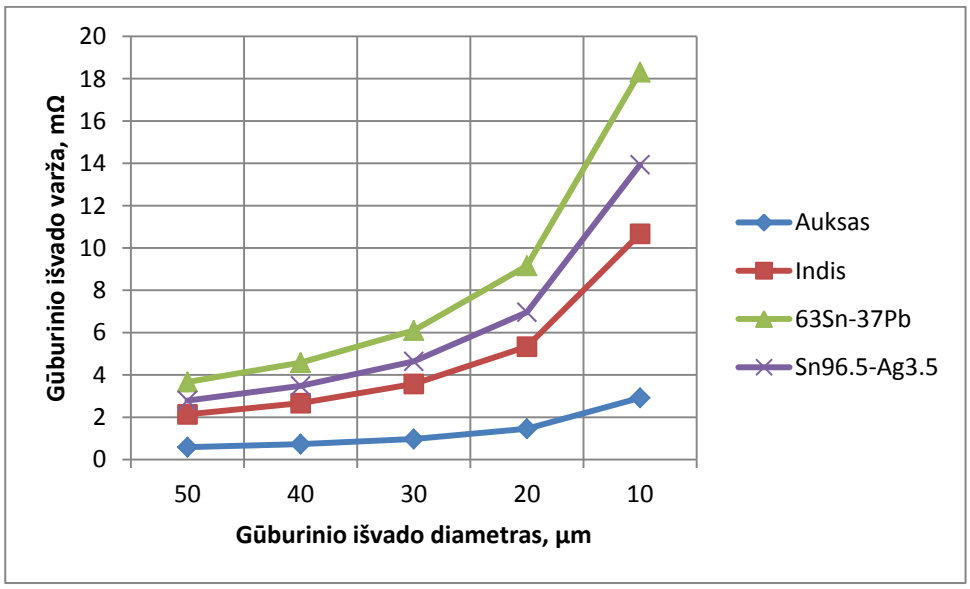


3.13 pav. Gūburinio išvado matmenys [28]

Gauti tokie skaičiavimų rezultatai:

7 lentelė. Gūburinio išvado varžos priklausomybė nuo jo geometrijos ir medžiagos

Medžiaga	Diametras, µm	Sferinis spindulys, µm	Aukštis , µm	Savitoji varža, ·10^-8 Ω•m	Temperatūrinis varžos koeficientas, 1/°C	Varža, mΩ
Auksas	50	25	43,3	2,24	0,0034	0,583
	40	20	34,64			0,7288
	30	15	25,98			0,9733
	20	10	17,32			1,4576
	10	5	8,66			2,9153
Indis	50	25	43,3	8,61	0,005	2,1345
	40	20	34,64			2,6681
	30	15	25,98			3,575
	20	10	17,32			5,3363
	10	5	8,66			10,6727
63Sn-37Pb	50	25	43,3	14,5	0,0044	3,662
	40	20	34,64			4,5776
	30	15	25,98			6,1034
	20	10	17,32			9,1552
	10	5	8,66			18,3104
Sn96.5-Ag3.5	50	25	43,3	11	0,0043	2,786818
	40	20	34,64			3,483523
	30	15	25,98			4,644697
	20	10	17,32			6,967046
	10	5	8,66			13,93409

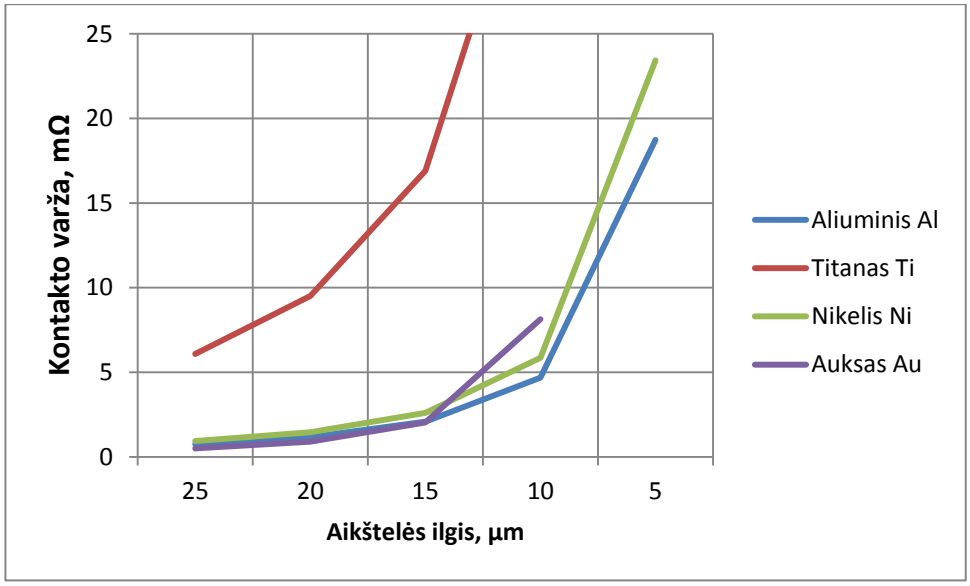


3.14 pav. Gūburinio išvado varža, priklausomai nuo jo geometrijos

Iš 7 lentelės ir 3.14 pav. matome, jog gūburinio išvado varža didėja mažėjant gūburinio išvado skersmeniui. Pastebėta, kad gūburinio išvado diametrui sumažėjus 5 kartus, t.y. nuo 50 µm iki 10 µm, varža taipogi, nepriklausomai nuo gūburinio išvado medžiagos, padidėja 5 kartus. Grafike matome, jog šiuo atveju didžiausią varžą turi 63Sn-37Pb – alavo ir švino lydinio guburinis išvadas, kuri kinta 2,78 - 18,31 mΩ diapazone. Mažiausią varža turi auksas – 0,58 - 2,91 mΩ. Tokį skirtumą lemia kiekvienos medžiagos ar lydinio savitoji varža. Matome, kad kuo ji mažesnė tuo medžiagos ar lydinio elektrinė varža mažesnė. Temperatūrinis varžos koeficientas nedaug įtakoja gūburinio išvado varžos dydį, nes visų medžiagų esti tik tūkstantųjų dalių dydžio.

8 lentelė. Kontaktinės aikštelės ir UBM sluoksnių varžos priklausomybė nuo geometrijos ir medžiagos

Kontakto medžiaga	Aikštelės ilgis, µm	Aikštelės plotas, µm^2	Aikštelės aukštis, µm	Savitoji varža, ·10^-8 Ω•m	Temperatūrinis varžos koeficientas, 1/°C	Kontakto varža, mΩ
Aliuminis Al	25	625	2	2,65	0,004308	0,7493
Titanas Ti			1	42	0,0035	6,0849
Nikelis Ni			1	6,99	0,006	0,9372
Auksas Au			1	2,24	0,0034	0,3254
Aliuminis Al	20	400	2	2,65	0,004308	1,1708
Titanas Ti			1	42	0,0035	9,5077
Nikelis Ni			1	6,99	0,006	1,4644
Auksas Au			1	2,24	0,0034	0,5085
Aliuminis Al	15	225	2	2,65	0,004308	2,0815
Titanas Ti			1	42	0,0035	16,9026
Nikelis Ni			1	6,99	0,006	2,6033
Auksas Au			1	2,24	0,0034	0,9041
Aliuminis Al	10	100	2	2,65	0,004308	4,6835
Titanas Ti			1	42	0,0035	38,031
Nikelis Ni			1	6,99	0,006	5,8576
Auksas Au			1	2,24	0,0034	2,0343
Aliuminis Al	5	25	2	2,65	0,004308	18,7341
Titanas Ti			1	42	0,0035	152,124
Nikelis Ni			1	6,99	0,006	23,4304
Auksas Au			1	2,24	0,0034	8,1374



3.15 pav. Kontaktinės aikštelės ir UBM sluoksnių varža, priklasuomai nuo jų geometrijos

Iš 8 lentelės ir 3.15 pav. matome, jog nepriklausomai nuo naudojamo metalo, mažėjant kontaktinių sujungimų ilgiui, jų varža didėja. Taipogi matyti, kad temperatūrinis varžos koeficientas šiuo atveju irgi neturi didelės įtakos, nes jis labai nedidelis. Čia vėlgi labiausiai varžą įtakoja specifinė savitoji varža. Titano savitoji varža gerokai didesnė lyginant su kitais metalais, todėl iš UBM sluoksnių Titano sluoksnis duoda didžiausią varžą. Atliekant šiuos skaičvimus taipogi buvo pastebėta, kad kontaktinei aikštelei sumažėjus nuo 25 iki 5 µm, t.y. 5 kartus, kontakto varža padidėdavo daugiau kaip 25 kartus, nepriklausomai nuo naudojamo metalo, pvz.: nikelio varža padidėjo nuo 0,937 mΩ iki 23,430 mΩ, o tai yra 25,005 karto.

3.6. Skyriaus išvados

Parazitinės talpos tarp aktyviųjų taškinių jutiklių ATJ sujungimų skirstomos į tris pagrindines grupes: gūburinio išvado parazitinė talpa, parazitinė talpa tarp gretimų kanalų kontaktinių aikštelių ir parazitinė talpa tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo, kuriame formuojami registruojančios elektronikos NMOP ir PMOP tranzistoriai. Šių talpų poveikis aktyviniam taškiniam jutikliui ATJ yra žalingos, todėl projektuojant krūviui jautrų priešstiprituvį KJP į jas reikia atsižvelgti ir įvertinti.

Skaičiuojant parazitinę talpą tarp jutiklio ir registravimo elektronikos kontaktinės aikštelės (gūburinio išvado skersmuo) nustatyta, jog didinant gūburinio išvado skersmenį, jo kuriama parazitinė talpa mažėja. Kai kontaktinės aikštelės dydis artimas vieno vaizdo taško dydžiui (45x45 µm), gūburinio išvado skersmeniui padidėjus 5 kartus (nuo 10 µm iki 50 µm), parazitinė talpa sumažėjo daugiau kaip du kartus.

Skaičiuojant parazitinę talpą tarp kontaktinių aikštelių nustatyta, jog didėjant atstumui tarp jų parazitinė talpa mažėja. Skaičiuojant parazitinę talpa tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo, pastebėta, jog didėjant atstumui tarp aikštelės ir padėklo parazitinė talpa mažėja. Kai kontaktinė aikštelė yra 50x50 μm, metalo sluoksniams sudaryti panaudojus 0,25 μm 5 metalo sluoksnių technologiją parazitinė talpa yra apie 1,8 karto didesnė nei panaudojus 0,13 μm 6 metalo sluoksnių technologiją. Toks skirtumas išsilaiko izoliacijai tarp metalų panaudojus tiek $Si0_2$, tiek Silk polimerą.

Susumavus visas šias parazitines talpas gaunama suminė ATJ sujungimuose atsirandanti parazitinė talpa. Norint, kad ji būtų kuo mažesnė reikia mažinti kontaktinių aikštelių matmenis ir didinti gūburinius išvadus. Tačiau tobulėjant technologijoms išvadai yra mažinami, todėl siekiant gauti kuo mažesnes parazitines talpas, reikia tinkamai parinkti gūburinių išvadų ir aikštelių dydžius.

4. KJP principinės elektrinės schemos projektavimas ir tyrimas Cadence programiniu paketu

4.1. Krūviui jautraus priešstiprintuvio schemos analizė, reikiamų parametrų nustatymas

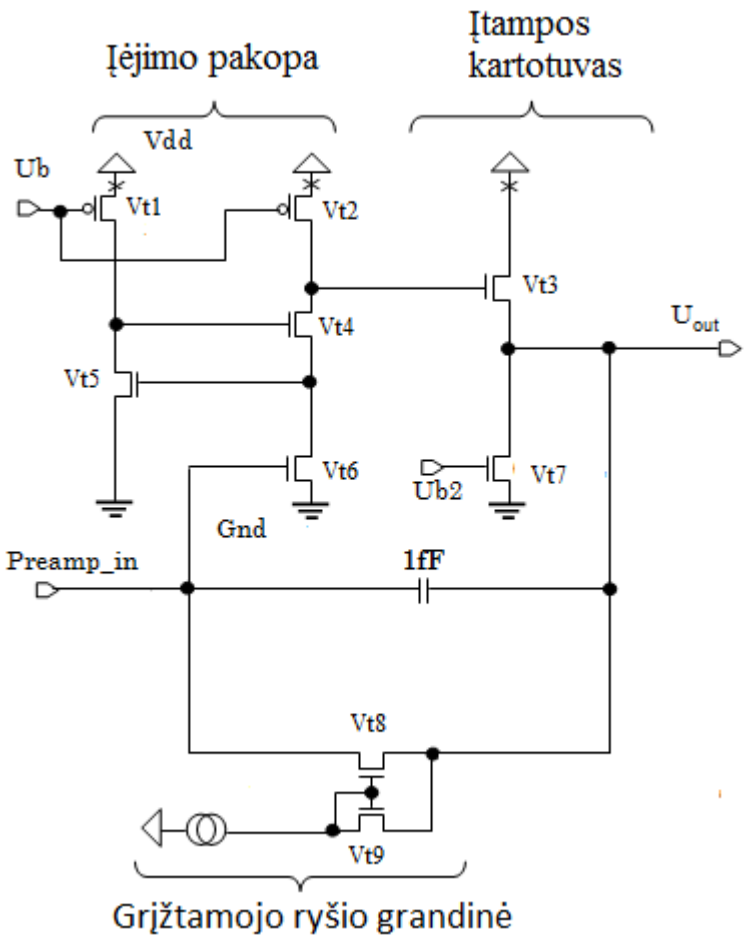
Krūviui jautraus priešstiprintuvio principinę elektrinę sudaro trys esminiai blokai: įėjimo pakopa, įtampos kartotuvas ir grįžtamojo ryšio grandinė (4.1 pav.).

Per įėjimo pakopą vyksta srovės impulso atėjusio iš jutiklio stiprinimas. Kaip matome iš 4.1 pav., įėjimo pakopa susideda iš PMOP vt1, vt2 tranzistorių ir NMOP vt4, vt5 ir vt6 tranzistorių Įėjimuose Ub ir Ub2 buvo nustatytos valdymo įtampos, kurios turi nustatyti tokias per tranzistorius vt1, vt2 ir vt7 tekančias sroves, kad esant maitinimo įtampai vdd = 2.5 V, schemos vartojamoji galia būtų mažesnė už 3 μW. Kad tai atlikti ant įėjimų Ub ir Ub2 yra prikabinti naudojamos bibliotekos elementai – nuolatinės įtampos šaldiniai vdc.

Įtampos kartotuvą sudaro NMOP vt3 ir vt4 tranzistoriai. Įtampos kartotuvas (buferis) naudojamas perduotį įtampai iš grandinės su dideliu įšėjimo impedansu į grandinę su mažu įėjimo impedansu, t.y. jis sumažina KJP įšėjimo signalo impedansą. Kartotuvas nekeičia KJP įšėjimo signalo amplitūdės ir formos, o tik ją atkartoja. Kartotuvų išėjimo varža yra nedidelė, todėl jie jungiami prie signalo šaltinių, kurių vidaus varža taip pat didelė.

Grįžtamojo ryšio grandinė susideda iš NMOP vt8 ir vt9 tranzistorių ir C_f kondensatoriaus. Grįžtamojo ryšio grandinė, kaip buvo minėta, reikalinga tam, iškrautų grįžtamojo ryšio kondesatorių C_f, kuriame sukauptas krūvis. Krūvio iškrovimas (nuėmimas) vyksta per grįžtamojo

ryšio varžą R_f. Šiam procesui neįvykus krūviui jautrus priešstiprintuvis greitai įsisotintų ir nestiprintų jutiklio srovės impulso. Grįžtamojo ryšio varžą R_f, sudaro du - vt8 ir vt9, srovės veidrodžio jungimu sujunti NMOP tranzistoriai. Šie tranzistoriai yra suderinti, jų vienodos geometrijos ir juos valdančios įtampos – vienodos, per juos teka tokio pat didumo srovės.



4.1 pav. KJP principinė elektrinė schema

„Cadence“ programiniu paketu suprojektuota krūviui jautrus priešstiprintuvio schema parodyta 4.2 paveiksliuke. Projektavimui panaudota NCSU_TechLib_TSMC03 biblioteka. Ši biblioteka yra Šiaurės Karolinos valstijos universiteto (NCSU) ir kompanijos MOSIS mokymo tikslams sukurta, submikroninė 0,25 µm užtūros ilgio, TSMC kompanijos, KMOP technologinio proceso integrinių grandynų biblioteka. Pagal NCSU_TechLib_TSMC03 technologijos biblioteką, minimalus tranzistoriaus užtūros plotis yra 450 nm, o minimalus ilgis 300 nm.

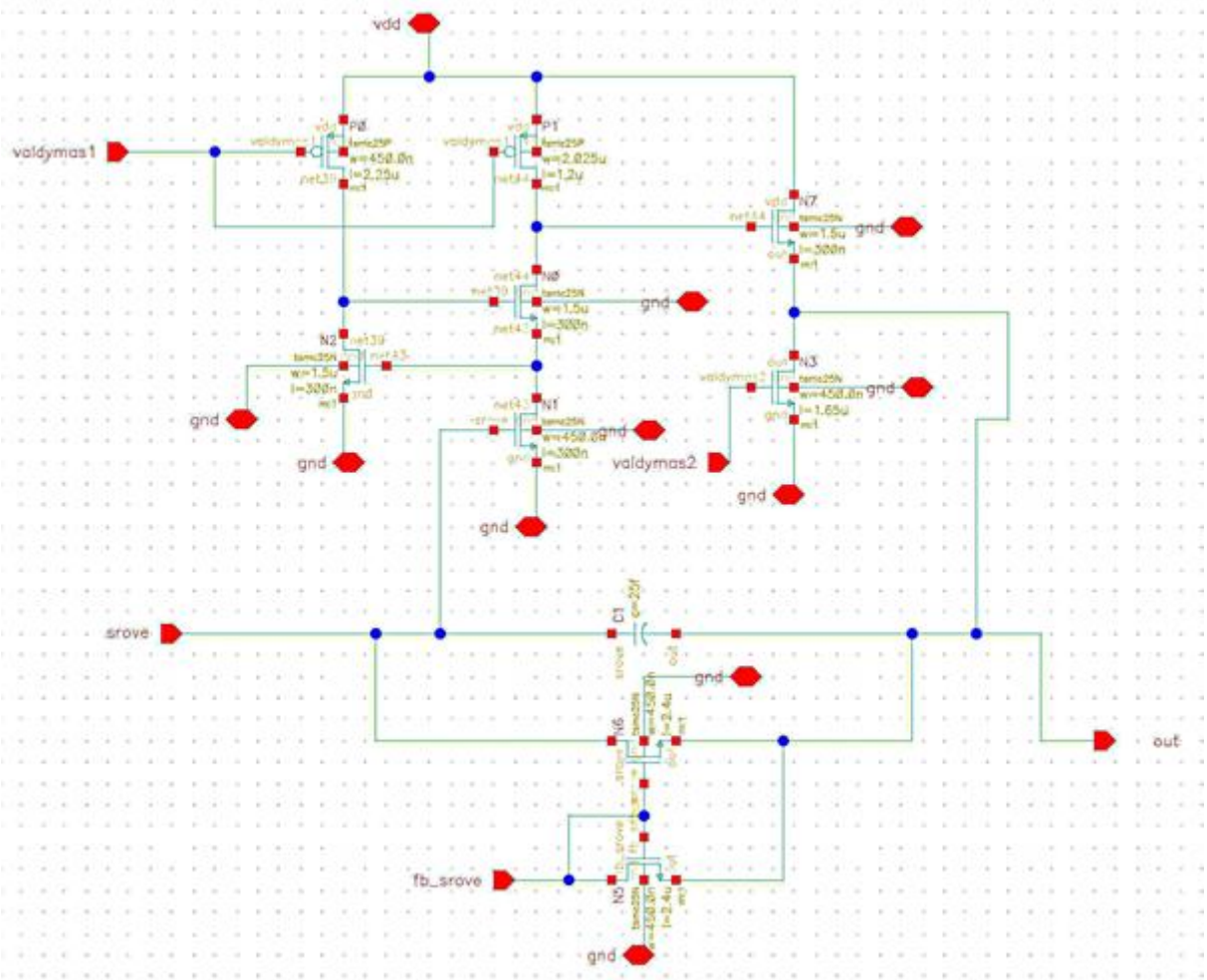
Į KJP preamp_in įėjimą (4.2 pav.) patenka δ srovės impulsas iš jutiklio (1.1 pav.). Modeliuojant schemą ant preamp_in įėjimo prikabintas programos naudojamos bibliotekos elementas ipulse, kurio pagalba bus formuojamas, iš jutiklio atėjęs srovės imlpulsas. Ipulse elemente nurodome apskaičiuotąją jutiklio srovę ir impulso kritimo ir kilimo laikus. Kilimo laiką pasirenkame labai mažą – 1 ps, kad išeitų suformuoti srovės impulso „trikampį“.

KJP įėjimo signalo (δ srovės impulso) apskaičiavimas.

Prie 500 µm storio (remiantis literatūros duomenimis storį pasirenkame patys) jutiklio elektrodų paduodama 500 V įtampa. Ši išorinė įtampa priverčia, jonizacijos metu atsiradusius laisvuosius krūvininkus kryptingai judėti link jutiklio elektrodų. Sugeneruotų krūvininkų skaičius randamas iš 1 formulės. Krūvininkų kuriamas krūvis randamas iš 3 formulės. Jutiklyje pradėjusi tekėti srovė lygi elektoninės dedamosios ir skylinės dedamosios srovių sumai: $I = I_{e0} + I_{h0}$. Elektroninė ir skylinės srovės apskaičiuojamos pagal 4 ir 5 formules. Laikas per kurį krūvininkai patenka į nuskaitymo elektroniką, randamas iš 6 ir 7 formulių.

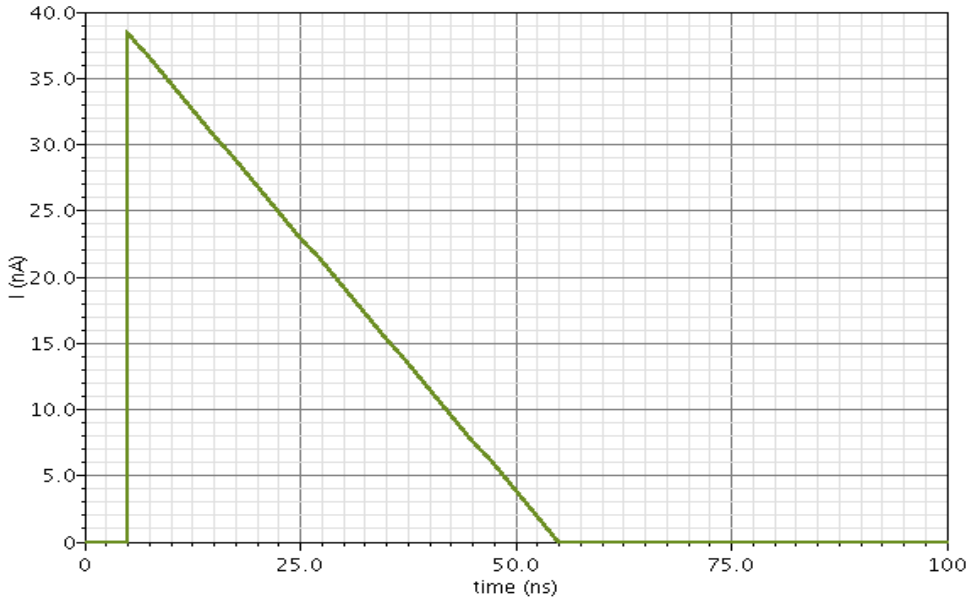
Apskaičiavus KJP įėjimo signalą ir nurodžius aukščiau aprašytus pradinius dydžius galima pradėti KJP modeliavimą.

4.2 pav. parodyta KJP principinė elektrinė schema suprojektuota „Cadence“ aplinkoje.



4.2 pav. KJP principinė schema, suprojektuota Cadence

Modeliavimo metu buvo stebėta kokia bus KJP reakcija į δ srovės impulsą. Pradiniai duomenys buvo užduoti tokie: krūvininkų porų skaičius 1000, tada apskaičiuotas srovės impulsas 38,4 nA, o laikas per kurį jis patenka į KJP – 50 ns (4.3 pav.).



4.3 pav. srovės ilpulso „trikampis“ suformuotas ipulse elemente

4.2. KJS perdavimo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo krūvio Qdet

KJS perdavimo koeficientą galimą apskaičiuoti iš šių dviejų formulių:

$$C_{in} = \frac{Q_{det}}{V_{in}} = C_f \cdot \ 1 + K \quad (37\ 40), \qquad K = \frac{V_{out}}{Q_{det}} \quad (38\ 41), \qquad V_{out} = \frac{Q_{det}}{C_f} \quad (39)$$

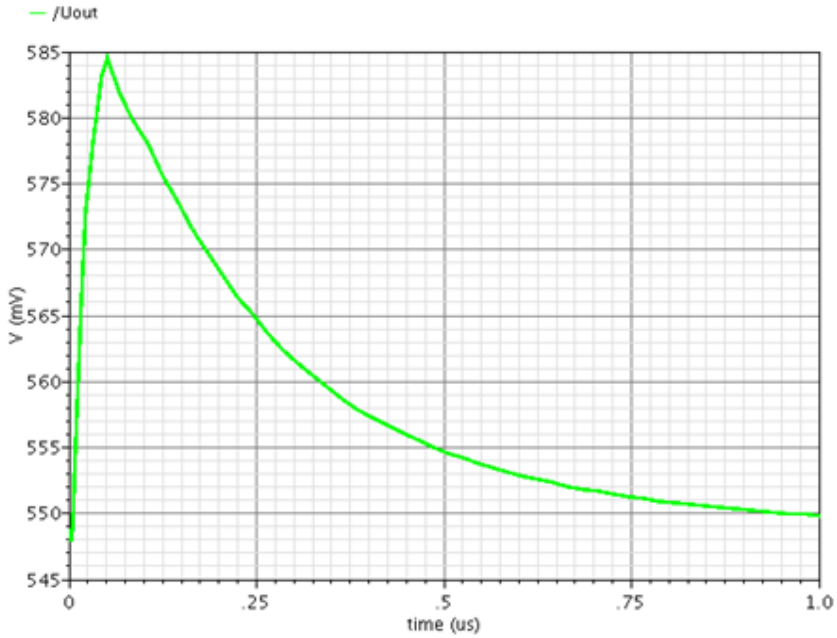
Čia C_{in} – KJP įėjimo talpa; Q_{det} – detektoriaus jutiklio generuojamas krūvis KJP įėjime; V_{in} – įtampos kritimas KJP įėjime; C_f – KJP grįžtamojo ryšio talpa; V_{out} – KJS išėjimo signalo įtampos amplitude.

Mes skaičiuodami remėmės 38 – aja formule.

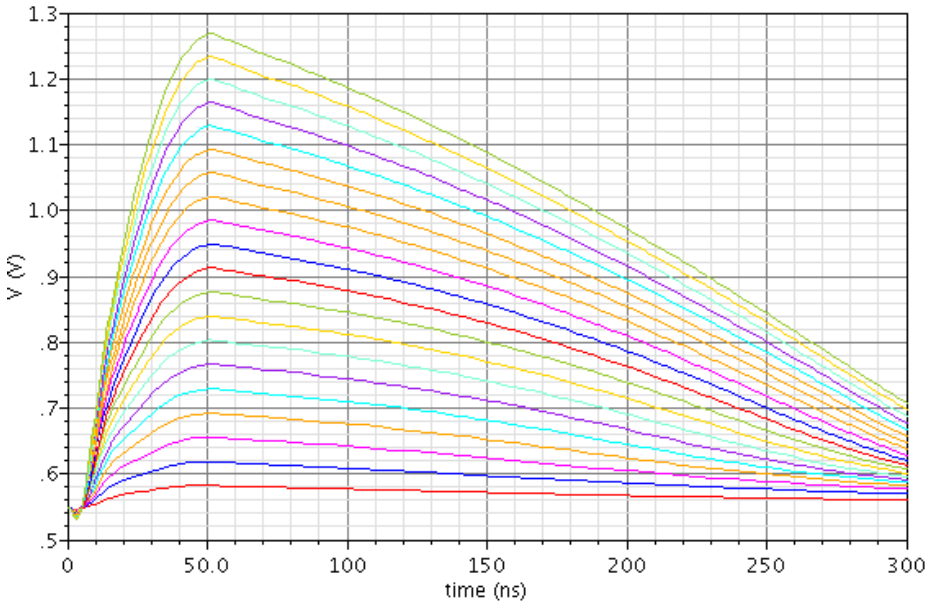
Programiniu paketu „CADENCE“ modeliuojant KJP schemą buvo stebima, kokia KJP įšėjimo signalo įtampos reakcija į delta δ srovės impulsą KJP įėjime. Kadangi delta δ srovės impulso dydis priklauso nuo elektronų skaičiaus atėjusių iš ATJ jutiklio, tai modeliavimo metu detektoriaus jutiklio generuojamą krūvį keitėme plačiame diapazone nuo 1000 elektronų iki 50000 elektronų, t.y. nuo 1 kē – iki 50 kē. Plačiame įėjimo krūvių diapazone modeliuosime siekdami įsitikinti, kad KJP veikia tiesiniu režimu.

Kaip buvo minėta KJP maitinimo įtampa nustatyta 2,5 V, valdymo įtampa Ub = 1804 mV, valdymo įtampa Ub2 = 529 mV. Kai Q_{det} yra 1 kē, o detektoriaus jutiklio storis 500 μm ir prie

detektoriaus jutiklio elektrodų prijungta 500 V įtampa, δ srovės impulsas lygus 38,4 nA, o laikas per kurį impulsas ateina į KJP yra 50 ns. Gauti rezultatai pateikti 9 lentelėje ir 4.4 – 4.5 pav.:



4.4 pav. KJP išėjimo signalas, kai Q_{det} = 1 kē, T = 27 °C, C_{det} = 30 fF, C_{fb} = 25 fF, CdZnTe jutiklis



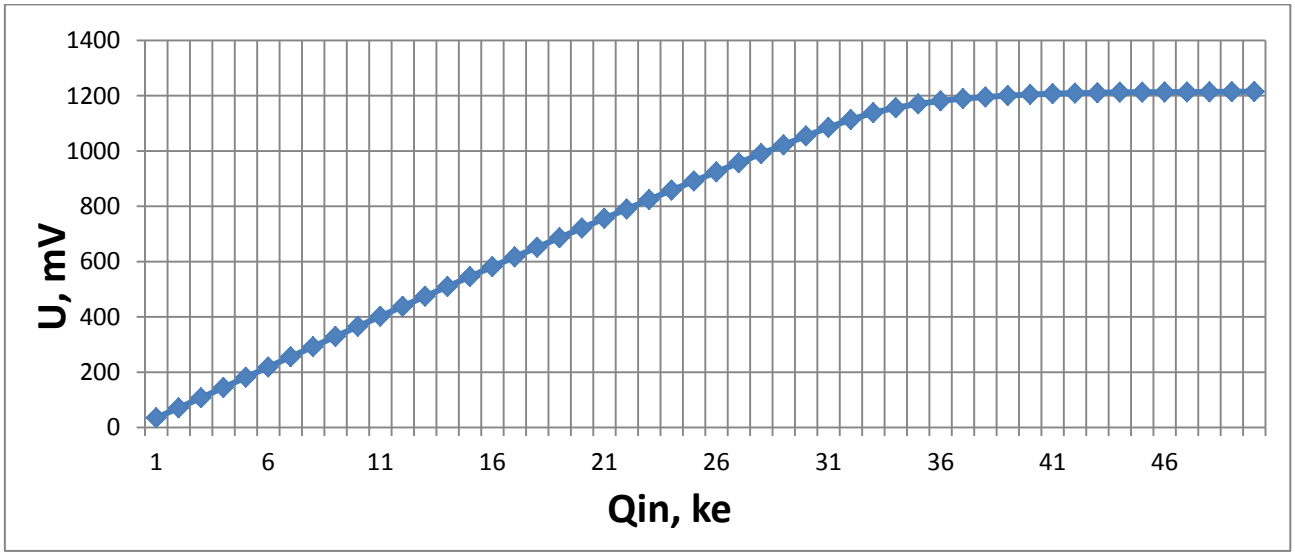
4.5 pav. KJP išėjimo signalai, kai Q_{det} kinta nuo 1 kē iki 20 kē, T = 27 °C, C_{det} = 30 fF, C_{fb} = 25 fF, CdZnTe jutiklis

4.4 - 4.5 pav. matyti KJP įšėjimo signalai, kai įėjimo krūvis yra 1 kē, ir kai kinta nuo 1 kē iki 20 kē. KJP signalo galinio fronto nusistovėjimo laikas kelis kartus ilgesnis nei KJP registracijos trukmės laikas. Tai lemė grįžtamojo ryšio talpa ir varža, nes KJS signalo nusistovėjimo laikinė konstanta τ_d lygi grįžtamojo ryšio talpos ir varžos sandaugai: $\tau_d = R_{fb} \cdot C_{fb}$ (40). Sumažinus grįžtamojo ryšio talpą arba varžą galima gauti mažesnį galinio fronto nusistovėjimo trukmę. Tačiau

esant šiai talpai, KJP tiesiškumas esti labai geras, ir 20 kē KJP stiprinimui dar ne riba. Mažinant grįžtamojo ryšio varžą didėtų KJP vartojamoji galia.

9 lentelė. KJP modeliavimo rezultatai

Q_{in}, kē	U, mV	K, mV/kē	Q_{in}, kē	U, mV	K, mV/kē
1	583,77	35,02	26	1473	35,55
2	619,8	35,53	27	1506	35,45
3	656,5	35,92	28	1539	35,37
4	693,3	36,14	29	1571	35,25
5	730,6	36,37	30	1603	35,14
6	767,6	36,48	31	1634	35,01
7	804,5	36,54	32	1662	34,79
8	841,2	36,56	33	1687	34,49
9	877,9	36,57	34	1705	34,01
10	914,5	36,58	35	1719	33,44
11	950,93	36,56	36	1730	32,81
12	987,11	36,53	37	1738	32,14
13	1023,1	36,49	38	1744	31,45
14	1058,9	36,44	39	1749	30,78
15	1094,5	36,38	40	1753	30,11
16	1130,2	36,34	41	1756	29,45
17	1165,5	36,28	42	1758	28,79
18	1200,5	36,21	43	1759	28,15
19	1235,4	36,14	44	1761	27,55
20	1270	36,06	45	1761,3	26,95
21	1305	36,01	46	1761,8	26,37
22	1339	35,92	47	1762	25,81
23	1373	35,84	48	1762,6	25,29
24	1407	35,76	49	1763,1	24,78
25	1440	35,65	50	1763,4	24,29



4.6 pav. KJP perdavimo koeficientas K, kai C_{det} = 30 fF, C_{fb} = 25 fF, T = 27 °C

Iš 9 lentelės ir 4.6 pav. matome, jog mūsų projektuojamo KJP išėjimo signalo įtampos amplitūdė tiesiškai didėja nuo 1 kē iki 32 kē, šiame diapazone netiesiškumas yra lygus 0,65 %. Toks didelis tiesiškumas rodo, jog mūsų KJP geba išskirti ir sustiprinti plačiame diapazone ATJ jutiklio sugeneruotą krūvį.

Apibendrinus galime teigti, jog kuo kuo didesnis krūvis t.y. kuo didesnis srovės impulsas – tuo striprinimas KJP įšėjime buvo didesnis. Tačiau buvo pasiekta tokia krūvio dydžio riba, kai ją didinant įtampa priešstiprintuvyje praktiškai nestiprinama, t.y. KJP įsisotina. Mūsų atveju KJP įsisotino tik ties maždaug 50 kē riba. Visame šiame plačiame Q_{in} kitimo diapazone KJP registravimo trukmė τ_p esti 42 – 47 ns, o perdavimo koeficientas kinta nuo 24,29 mV/kē iki 36,58 mV/kē.

4.3. KJS perdavimo koeficiento priklausomybė nuo detektoriaus talpos Cdet

Detektoriaus jutiklio talpa Cdet įtakoja tiek KJP perdavimo koeficientą K tiek KJP išėjimo signalo formą (4.7 pav.). Taip yra todėl, kad detektoriaus jutiklio talpa yra viena iš dedamųjų įtakojančių išėjimo signalo priekinio fronto trukmę, 41 formulė, ir taipogi KJS registravimo trukmę, 42 formulė. Išėjimo signalo priekinio fronto trukmė yra tiesiogiai proporcinga detektoriaus jutiklio talpai.

KJS signalo priekinio fronto laikinė konstanta:

$$\tau_r = \frac{R_{fb} \cdot C_{det} \cdot C_0}{g_m} \quad (41)$$

čia R_{fb} – grįžtamojo ryšio varža, C_{det} – jutiklio talpa, C_0 – apkrovos talpa, g_m – įėjimo tranzistoriaus statumas.

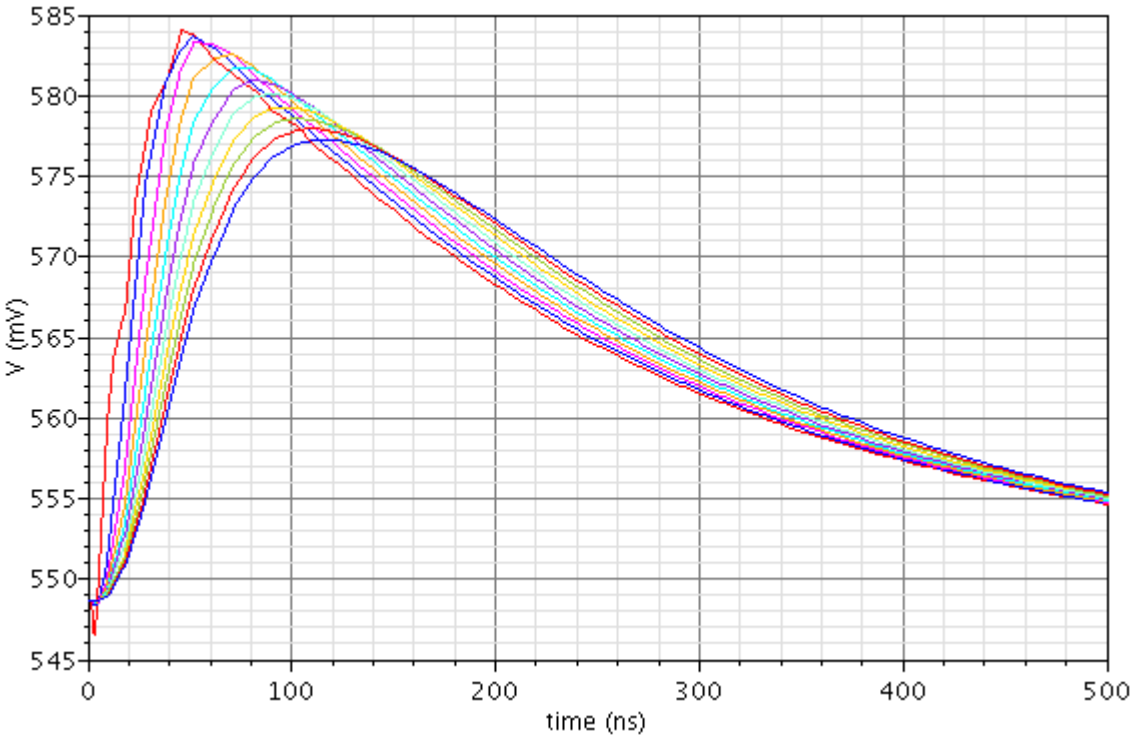
KJS signalo registravimo trukmė:

$$\tau_p = \frac{\tau_r \cdot \tau_d}{\tau_d - \tau_r} \ln \frac{\tau_r}{\tau_d} \quad (42)$$

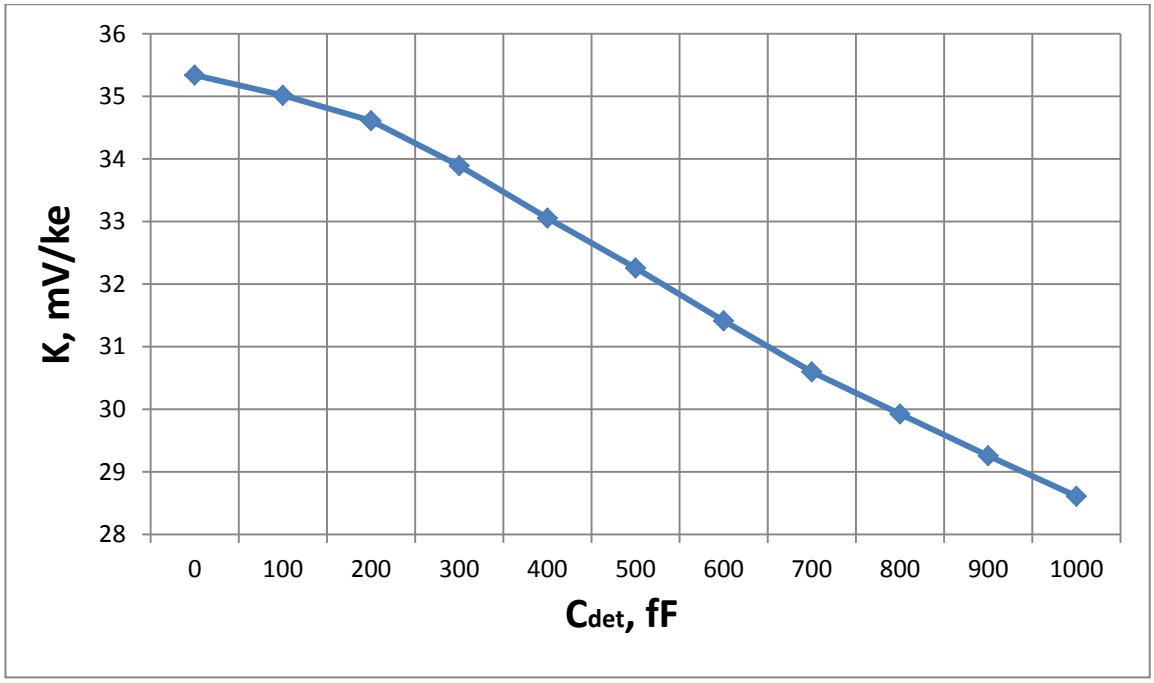
Todėl modeliuojant KJP schemą, detektoriaus talpa buvo keičiama plačiame diapazone nuo 0 fF iki 1 pF, siekiant nustatyti, kaip ji įtakoja perdavimo koeficientą K. Įvairių detektorių gamintojų talpos skiriasi, todėl modeliavimui buvo parinktas platus detektoriaus talpos kitimo diapazonas. Gauti rezultatai pateikti 10 lentelėje ir 32 pav.

10 lentelė. KJP išėjimo įtampos ir perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo C_{det}

C_{det}, fF	U_{out}, mV	K, mV/kē
0	584,089	35,339
100	583,766	35,016
200	583,36	34,61
300	582,64	33,89
400	581,804	33,054
500	581,006	32,256
600	580,163	31,413
700	579,347	30,597
800	578,673	29,923
900	578,006	29,256
1000	577,359	28,609



4.7 pav. KJP išėjimo įtampos laikinės chrakteristikos, kai C_{det} kinta nuo 0 fF iki 1000 fF



4.8 pav. KJP perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo Cdet, kai T=27°C, C_f=25 fF, Q_{in}= 1kē, jutiklis – CdZnTe

Iš 10 lentelės ir 4.7, 4.8 pav. matome, kad detektoriaus talpa Cdet mūsų projektuojamam KJP turi nedidelę įtaką perdavimo koeficientui K. Keičiant detektoriaus talpą plačiame diapazone, perdavimo koeficientas K kinta nedaug. Kitimas, kai detektriaus jutiklio talpa yra 200 fF ir daugiau, yra praktiškai tiesinio pobūdžio. Kai detektoriaus talpa Cdet = 0 fF , perdavimo koeficientas esti 35,34 mV/kē, o detektoriaus talpą padidinus iki 1 pF, perdavimo koeficientas K sumažėjo tik iki 28,61 mV/kē, o tai yra tik 6,73 mV/ē, t.y. tai sudaro tik 19,04 % sumažėjimą. Akivaizdu, jog ši talpa mūsų projektuojamo krūviui jautraus priešstiprintuvio perdavimo koeficientui didelės įtakos neturi, tačiau šią talpą vistiek būtina įvertinti.

Taigi mūsų projektuojamoje schemoje naudojamo detektoriaus jutiklio talpa yra 30 fF. Matome, jog tokia talpa patenka į tą sritį, kur net ir žymus talpos pokytis (tarkim padidėjimas iki 200 fF) nesukelia staigaus perdavimo koeficiento pokyčio (sumažėjimo). Galima teigti, jog šis KJP yra beveik nejautrus detektoriaus jutiklio talpų pokyčiams iki 200 fF, kas reiškia, jog galima naudoti plonesnius detektoriaus jutiklius.

Tačiau ši talpa, tai matyti iš 4.7 pav., labai įtakoja KJP registracijos trukmę. Talpai pakitus nuo 0fF iki 1 pF, KJP registracijos trukmė padidėjo nuo 38 ns iki 80 ns. Taip yra todėl, kad didėjant jutiklio talpai didėja KJP signalo priekinio fronto laikinė konstanta. Matome, jog is rezultatas atspindi 41 ir 42 formulių prasmę.

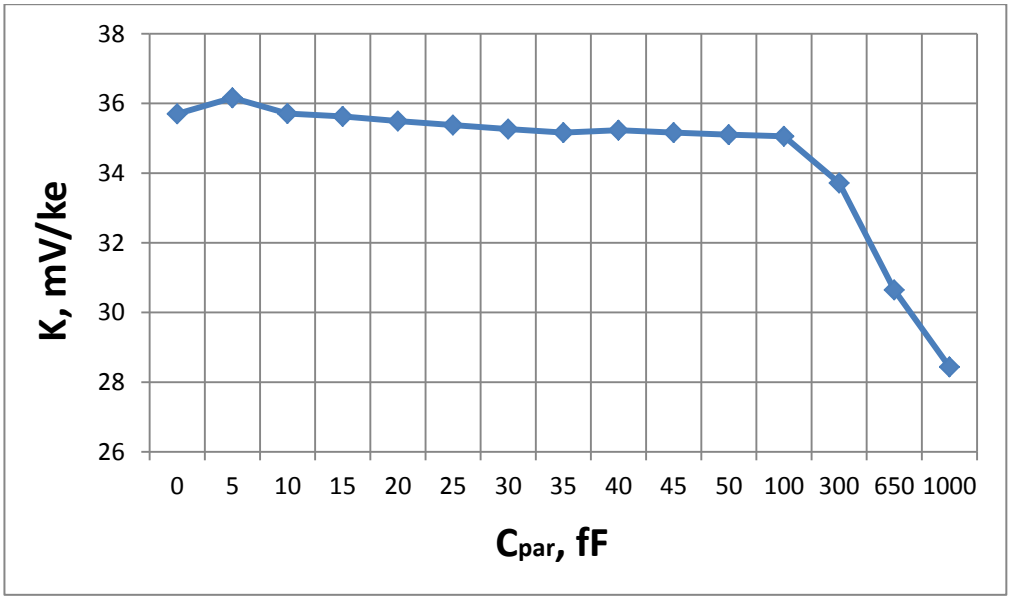
4.4. KJS perdavimo koeficiento priklausomybė nuo detektoriaus parazitinės talpos Cpar

Parazitinių detektoriaus talpų tarp jutiklio ir KJS registruojančios elektronikos įtaką KJS perdavimo koeficientui taipogi būtina įvertinti. Kaip buvo skaičiuota ir aptarta praeitame skyrelyje, modeliuojant krūviui jautrius stiprintuvus parazitinių talpų neįvertinimas gali padidinti neatitikimus tarp teorinių ir eksperimentinių rezultatų t.y. sumažinti KJP perdavimo koeficiento tiklsumą, padidinti sistemos registravimo trukmę, padidinti ekvivalentinį triukšmą, taip sumažinant sistemos erdvinę ir laikinę skiriamąją gebą, bei padidinant“signalas/triukšmas” santykį.

Parazitinė talpa buvo keičiama plačiame diapazone nuo 0 fF iki 1000 fF. Tokiu būdu galima geriau pamatyti kaip ši talpa įtakoją perdavimo koeficientą. Gauti rezultatai parodyti 11 lentelėje ir 4.9 pav.

11 lentelė. KJP išėjimo įtampos ir perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo C_{par} talpos

C_{par}, fF	U_{out}, mV	K, mV/kē
0	584,45	35,7
5	584,91	36,16
10	584,458	35,708
15	584,376	35,626
20	584,242	35,492
25	584,128	35,378
30	584,016	35,266
35	583,913	35,163
40	583,983	35,233
45	583,912	35,162
50	583,855	35,105
100	583,806	35,056
300	582,466	33,716
650	579,395	30,645
1000	577,188	28,438



4.9 pav. KJP perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo suminės C_{par} talpos, kai T=27°C, C_{det}=30 fF, C_f=25 fF, Q_{in}= 1 kē, jutiklis – CdZnTe

Iš 11 lentelės ir 4.9 pav. esančio grafiko galime teigti, jog parazitinės talpos turi mažą įtaką KJS perdavimo koeficientui. Parazitinei talpai pakitus nuo 0 fF iki 50 fF, perdavimo koeficientas K šiame diapazone pakito tik 0,59 mV/kē, o tai sudaro 1,66 % pokytį. Parazitinei talpai kintant diapazone 0 fF iki 1 pF perdavimo koeficientas K šiame diapazone pakito 7,72 mV/kē, o tai sudaro tik 20,34 % pokytį. Ši priklausomybė yra beveik tiesiška, jei 15 pav. suskaidytume į dvi sritis. 1 sritis – parazitinei talpai pakitus nuo 0 fF iki 100 fF, ir 2 sritis – parazitinei talpai pakitus nuo 100 fF iki 1000 fF. Abiejuose srityse perdavimo koeficientas K pakinta maždaug proporcingai atitinkamai padidėjus parazitinei talpai.

Taigi darome išvadą, jog ir parazitinė talpa, kaip detektoriaus jutiklio talpa esminio pokyčio mūsų modeliuojant KJP neturi, tačiau šią talpą taipogi geriau įvertinti norint išvengti netikslumų rezultatuose.

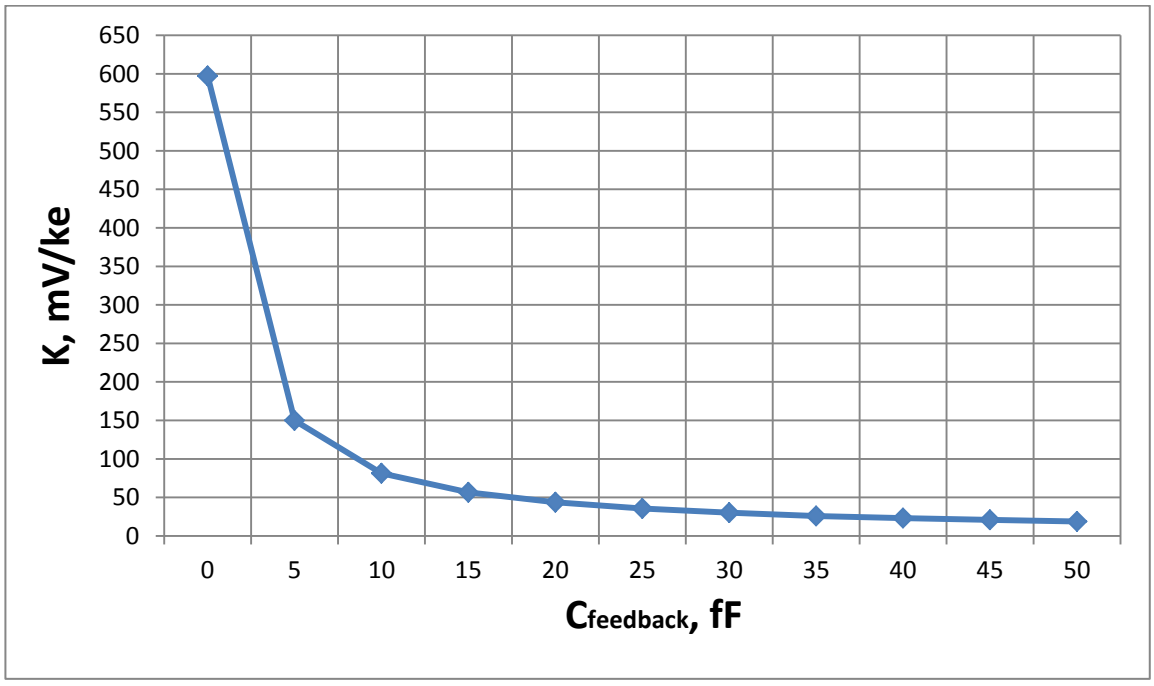
4.5. KJS perdavimo koeficiento priklausomybė nuo KJP grįžtamojo ryšio talpos C_{fb}

Pagal 40 formulę matome, jog grįžtamojo ryšio talpa C_{fb} tiesiogiai įtakoja KJS signalo nusistovėjimo laikinę konstantą τ_d, kas lemia ir KJS registravimo trukmės dydį, 42 formulė. Todėl šia talpą būtina įvertinti.

KJS išėjimo signalo ir perdavimo koeficiento K modeliavimo rezultatai kintant grįžtamojo ryšio talpai C_{fb} parodyti 12 lentelėje ir 4.10 pav.

12 lentelė. KJP išėjimo įtampos ir perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo C_{fb} talpos

C_{fb}, fF	U_{out}, mV	K, mV/kē
0	1145,80	597,05
5	698,57	149,82
10	630,16	81,41
15	605,33	56,56
20	592,42	43,67
25	584,45	35,70
30	578,98	30,23
35	574,63	25,89
40	571,98	23,23
45	569,57	20,82
50	567,62	18,87



4.10 pav. KJP perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo C_{fb} talpos, kai T=27°C, C_{det}=30fF, Q_{in}= 1 kē, jutiklis – CdZnTe

12 lentelėje ir 4.10 pav. matome, kad didėjant grįžtamojo ryšio talpai C_f perdavimo koeficientas mažėja eksponentiniu dėsniu. Lyginant šį grafiką su 33 pav. ir 34 pav. pateiktais grafikais matome, kad grįžtamojo ryšio talpos pokytis turi žymiai didesnę įtaką perdavimo koeficientui nei detektoriaus jutiklio ar parazitinės talpos pokyčiai.

Detektoriaus talpai pakitus nuo 0 fF iki 1 pF perdavimo koeficientas K sumažėja 7,73 mV/ē, t.y. tik 19,04 %, o grįžtamojo ryšio talpai kintant nuo 1 fF iki 50 fF perdavimo koeficientas sumažėja nuo 597,05 mV/kē iki 18,87 mV/kē, t.y. 560,18 mV/kē, o tai yra net 96,83 %.

Lyginant šias talpas, galime teigti, jog detektoriaus talpai kintant 20 kartų platesnėse ribose negu grįžtamojo ryšio talpos kitimo ribos, perdavimo koeficiento K sumažėjimas dėl jutiklio talpos yra net 72,47 karto mažesnis didesnis nei dėl grįžtamojo ryšio. Jeigu lyginame tą patį talpų diapazoną, t.y. nuo 1 fF iki 50 fF, matome, kad perdavimo koeficientas dėl detektoriaus jutiklio talpos pakinta 0,153 mV/kē, o dėl grįžtamojo ryšio talpos 560,18 mV/kē. Taigi perdavimo koeficiento pokyčių skirtumas net 3661 kartas.

4.6. Skyriaus išvados

Darbo metu 0,25 μm technologijos pagrindu buvo supropjektuotas KJP plačiai naudojamas SEDRS. Gautas geras stiprintuvo tiesiškumas siekia iki 32 kē. Šiame tiesiško signalo stiprinimo diapazone tiprintuvo registracijos trukmė (40 – 45) ns, vartojamoji galia 2,8 μW, perdavimo koeficientas (35,01 – 36,58) mV/kē. Tiesinio stiprinimo diapazone netiesiškumas yra lygus 0,65 %.

Tyrimo metu buvo nustatyta, jog KJP perdavimo koeficientą labiausiai įtakojo grįžtamojo ryšio talpa. Detektoriaus talpa ir parazitinė talpa, atsirandanti ATJ sujungimuose, nors ir buvo keičiamos plačiame diapazone, tačiau didelės įtakos perdavimo koeficientui neturėjo.

Detektoriaus jutiklio talpai pakitus plačiame diapazone (0 – 1000) fF perdavimo koeficientas nuo 35,34 mV/kē sumažėjo tik iki 28,61 mV/kē, o tai yra tik 6,73 mV/kē skirtumas, Tai sudaro tik 19,04 % sumažėjimą.

Šioje modeliuojamojoje schemoje naudojamo detektoriaus jutiklio talpa yra 30 fF. Matome, jog tokia talpa patenka į tą sritį, kur net ir žymus talpos pokytis (tarkim padidėjimas iki 200 fF) nesukelia staigaus perdavimo koeficiento pokyčio (sumažėjimo). Galima teigti, jog šis KJP yra beveik nejautrus detektoriaus jutiklio talpų pokyčiams iki 200 fF, kas reiškia, jog galima naudoti plonesnius detektoriaus jutiklius.

Parazitinei talpai pakitus nuo 0 fF iki 50 fF, perdavimo koeficientas K šiame diapazone pakito tik 0,59 mV/kē, o tai sudaro 1,66 % pokytį. Parazitinei talpai kintant diapazone 0 fF iki 1 pF perdavimo koeficientas K šiame diapazone pakito 7,72 mV/kē, o tai sudaro tik 20,34 % pokytį. Ši priklausomybė yra beveik tiesiška, jei 15 pav. suskaidytume į dvi sritis. 1 sritis – parazitinei talpai

pakitus nuo 0 fF iki 100 fF, ir 2 sritis – parazitinei talpai pakitus nuo 100 fF iki 1000 fF. Abiejuose srityse perdavimo koeficientas K pakinta maždaug proporcingai atitinkamai padidėjus parazitinei talpai.

Grįžtamojo ryšio talpai kintant nuo 1 fF iki 50 fF perdavimo koeficientas sumažėja nuo 597,05 mV/kē iki 18,87 mV/kē, t.y. 560,18 mV/kē, o tai yra net 96,83 %.

Palygindami skirtumą tarp grįžtamojo ryšio ir detektoriaus jutiklio talpų daromos įtakos KJP perdavimo koeficientui diapazone nuo 1 fF iki 50 fF, matome, jog skirtumas yra net 3661 kartas.

5. KJP topologijos projektavimas ir modeliavimas

5.1. Reikalavimai topologjos projektavimui

Atlikus krūviui jautraus priešstiprintuvio KJP principės elektrinės schemos kompiuterinį modeliavimą galima pereiti prie priešstiptintuvio topologijos projektavimo. Projektavimas bus atliktas Cadence programiniu paketu, pasirinkus NCSU_TechLib_TSMC03 biblioteką. Ši biblioteka yra Šiaurės Karolinos valstijos universiteto (NCSU) ir kompanijos MOSIS mokymo tikslams sukurta, submikroninė 0,25 μm užtūros ilgio, TSMC kompanijos, KMOP technologinio proceso integrinių grandynų biblioteka [3].

Topologija bus projektuojama hierarchiniu metodu, t.y. pradžioje atliekamas principinėje elektrinėje schemoje esančių topologijos elementų (šiuo atveju tranzistorių) generavimas, jų išdėstymas kuo mažesniame plote, laikantis technologijos taisyklių, o vėliau nubraižomi topologijos elementų jungiamieji takeliai. Suprojektavus topologiją bus patikrinta ar ji atitinka principinę elektrinę schemą, tada atlikta DRC (geometrinių parametrų) kontrolė, kurį įvertins ar topologija atitinka projektavimui pasirinktos technologijos taisykles, ar nenukrypta nuo technologinių normų. Vėliau bus atliekamas topologijos ekstrahavimas (topologijos verifikacija), t.y. šis procesas suformuos topologijoje naudojamų elementų ir juos jungiančių grandinių sąrašą, reikalingą topologijos sulyginimui su principine elektrine schema ir tolimesniam topologijos kompiuteriniam modeliavimui.

Projektuojant topologiją bus atsižvelgta į tranzistorių suderinamumo sąlygą, parazitinių parametrų minimizavimą, topologijos ploto minimizavimą.

Tranzistorių suderinamumas būtinas siekiant išvengti skirtingų puslaidininkinių struktūrų parametrų. Tai reikškia, kad formuojant nesuderintus tranzistorius, tranzistorių santakos ir ištakos aktyviosiose srityse bus nevienodos priemaišų koncentracijos, nevienodas jų išsibarstymas sričių kraštuose, kas lems skirtingas sričių varžas, talpas ir pan. Nesuderinamumas atsiranda dėl aktyviųjų

sričių asimetrijos ir tranzistoriaus užtūros, kuri užstoja dalį aktyviosios srities. Toje vietoje susidaro šešėlis ir ten neimplatuojami priemaišų jonai. Tranzistoriai tarpusavyje yra suderinti tada, kai jų ašys orientuotos vienodai. Nuo tranzistorių ašių orientacijos jonų implantacijos metu priklauso kritinis kampas ψ. Kritinis kampas ψ, dar kitaip vadinamas joninės implantacijos kampu, tai 7° laipsnių kampas, kurį nustačius, jonų implantacijos metu formuojamos tranzistoriaus santakos ir ištakos aktyviosios sritys. Į tranzistorinį darinį implantuojami jonai juda kanalu nesusidurdami su darinio kristalinės gardelės atomais. Juos stabdo tik elektronų sąveika. Tai vadinama kanaliniu efektu. Norint, kad kanalinis efektas būtu kuo mažesnis ir jonai giliau įsiskverbtų į tranzistorinį darinį, darinio kristalinę gardelę reikia pakreipti 7° laipsnių kampu jonų pluošto atžvilgiu. Kitaip tariant reikia išstatyti 7° laipsnių kritinį kampą ψ.

Siekiant minimizuoti parazitinius reiškinius, elementų jungiamuosius takelius reikia daryti kuo trumpesnius ir juos pravesti taip, kad būtų kuo mažiau persidengimų ir susikirtimų.

Esant dideliems integriniams grandynams MOP įtaisai yra pakankamai toli vienas nuo kito, todėl galima išvengti parazitinių reiškinių tarp jų. Tačiau esant mažiems atstumams parazitinių reiškinių tarp MOP įtaisų išvegti neįmanoma. n tipo parazitinis kanalas gali susidaryti tarp NMOP tranzistriaus n+ laidumo santakos ir n kišenės, kurioje esti PMOP tranzistorius. p tipo parazitinis kanalas gali susidaryti tarp PMOP tranzistoriaus p+ laidumo santakos ir p tipo padėklo, kuriame suformuotas NMOP tranzistorius. Tokiu atveju PMOP ir NMOP tranzistoriai turi būti ekranuojami vieni nuo kitų. Ekranavimui naudojami tranzistorių apsauginiai žiedai. PMOP tranzistoriai apjuosiami NTAP (n+ laidumo sritis) apsauginiu žiedu, kuris prijungiamas prie labiausiai teigiamo potencialo (maitinimo šaltinio). NMOP tranzistoriai apjuosiami PTAP (p+ laidumo sritis) apsauginiu žiedu, kuris prijungiamas prie labiausiai neigiamo potencialo (įžeminimo išvado) arba neigiamos įtampos. Apjuosus MOP tranzistorius apsauginiais žiedais visos priešpriešiais esančios sandūros esti užvertos ir išvengiama parazitinių kanalų.

Projektuojant topologiją taipogi bus siekiama sutalpinti ją į kuo mažesnį plotą, siekiant didesnio integracijos laipsnio. Tačiau talpinant elementus ir vedžiojant jungiamuosius takelius, bus išlaikomi minimalūs leistini pasirinktos projektavimo technologijos atstumai.

5.2. KJP topologija ir jos modeliavimo rezultatai.

5.1 pav. matome suprojektuotą krūviui jautraus priešstiprintuvio KJP topologiją. Kad būtų išpildyta sąlyga tranzistorių suderinamumui, topologijoje: visos tranzistorių ašys orientuotos vienodai – tranzistorių polikristalinės užtūros orientuotos vertikaliai, tranzistoriai sudėlioti minimaliu atstumu vienas nuo kito. Tranzistorių polikristalinės užtūros orientuotos vertikaliai, todėl, kad sugrupuotų tranzistorių užtūros yra vienodo arba labai panašaus dydžio.

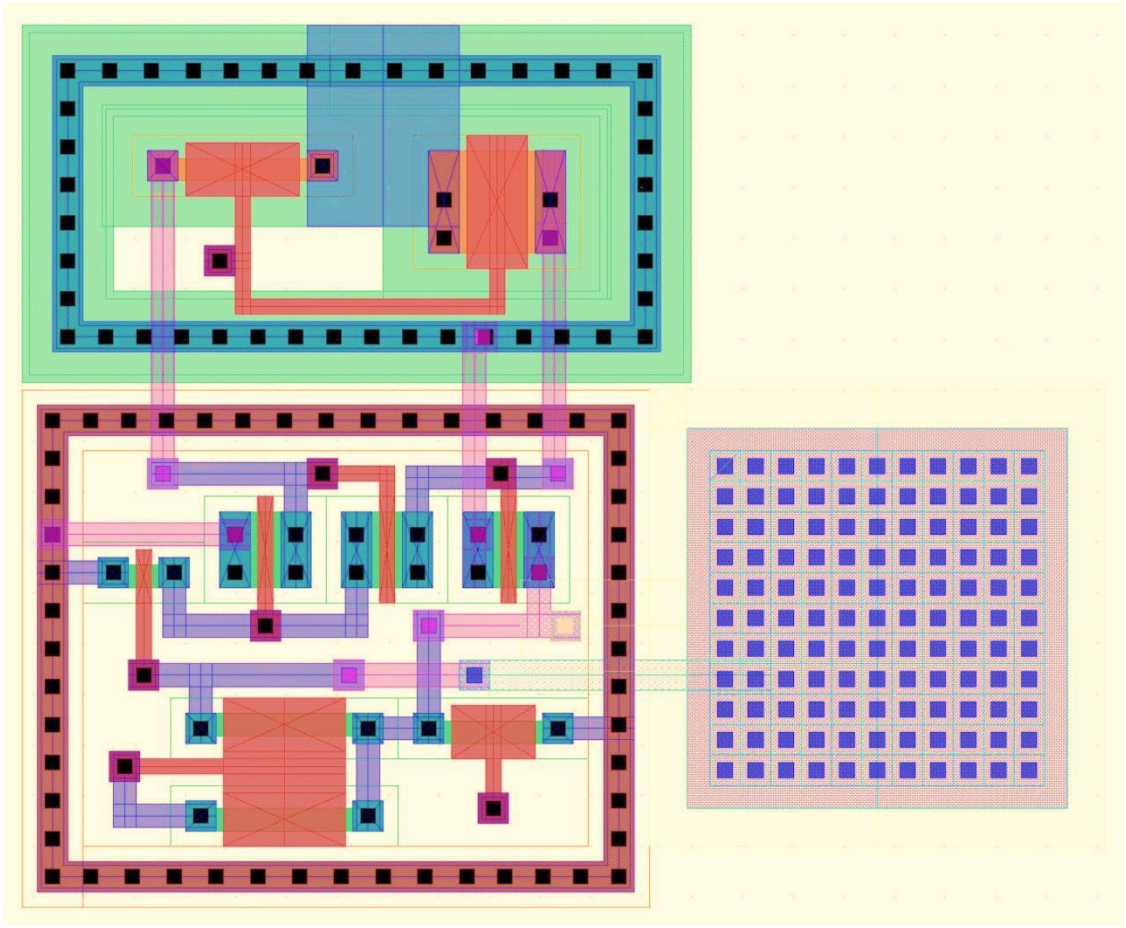
Siekiant didesnio suderinamumo jungiamieji elementų takeliai yra minimalaus leistino pločio, parinktas kaip galima mažesnis takelių susikirtimų ir persidengimo skaičius ir minimalus atstumas tarp gretimų takelių.

Siekiant išvengti parazitinių kanalų tarp gretimų grandinių, t.y. NMOP ir PMOP elementų, PMOP tranzistoriai apjuosti n+ laidumo žiedu, o NMOP tranzistoriai – p+ laidumo žiedu.

5.1 pav. dešinėje pusėje matyti suprojektuotas MDM (metalas-dielektrikas-metalas) kondensatorius. Šis kondensatorius plačiai naudojamas projektuojant KMOP integrinius grandynus (hibridinius). Tokių kondensatorių privalumas – maža talpos skaida. Kondensatoriaus metalų sluoksnių sujungimui panaudota maksimaliai leistinas sujungimo kontaktų skaičius, siekiant užtikrinti gerą kontaktą tarp metalų.

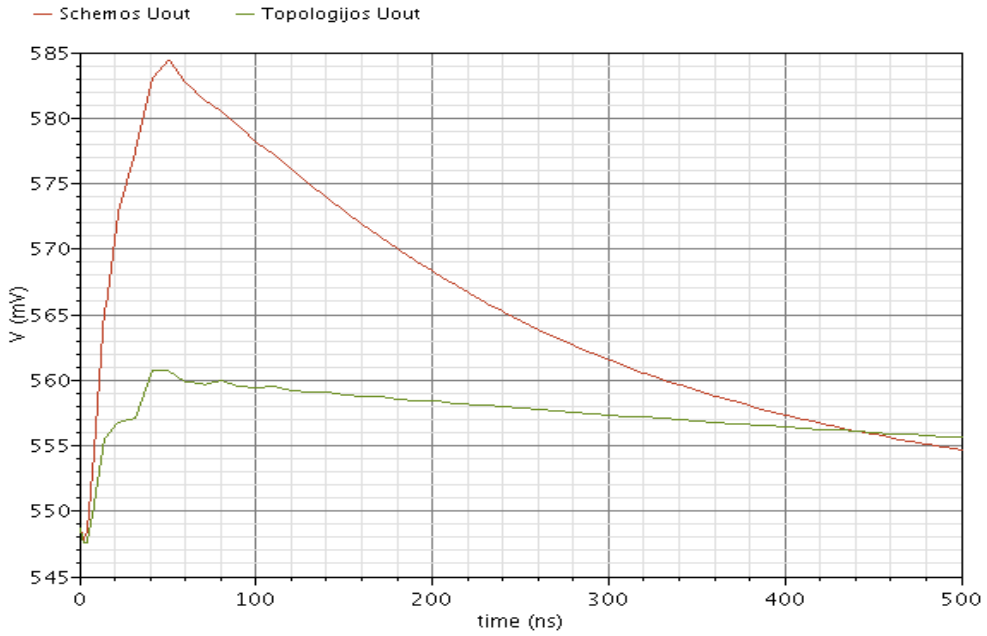
Pagal principinę elektrinę krūviui jautraus stiprintuvo KJP schemą MDM kondensatoriaus talpa turėtų būti 25 fF, tačiau tokios talpos kondensatoriaus topologijos dėl šios technologijos matmenų apribojimų negalima suprojektuoti. Minimali leistina kondensatoriaus talpa šiai TSMC kompanijos 0,25 μm technologijai yra 56,25 fF. Tokiu atveju, siekiant plačiau išmodeliuoti topologiją ir ją palyginti su principinės elektrinės schemos rezultatais, buvo suprojektuoti kondensatoriai su 56,25 fF, 65,61 fF fF ir 75,69 fF talpomis.

Visos suprojektuotos topologijos užimamas plotas yra302,265 μm^2. NMOP tranzistorių su apsauginiu PTAP žiedu ribojamas plotas yra 93,06 μm^2, tai sudaro 30,78 % viso topologijos ploto. PMOP tranzistorių su apsauginiu NTAP žiedu ribojamas plotas yra 126,23 μm^2, tai sudaro 41,75 % viso topologijos ploto. 56,25 fF MDM kondensatoriaus plotas yra 81 μm^2, o tai sudaro 26,79 % viso ploto. Likusią topologijos ploto dalį sudaro tarpas, neišnaudotas dėl technologinių apribojimų, tarp NMOP tranzistorių grandinės ir PMOP tranzistorių grandinės.

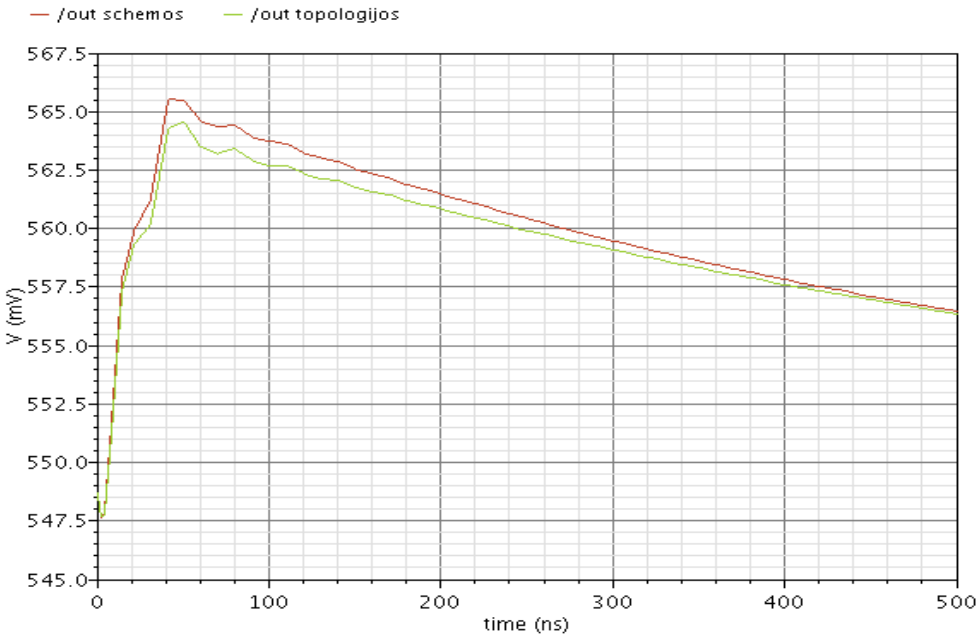


5.1. pav. Krūviui jautraus priešstiprintuvio topologija

KJP topologijos kompiuteriniai modeliavimo rezultatai, palyginimas su KJP principinės elektrinės schemos kompiuterinio modeliavimo rezultatais:

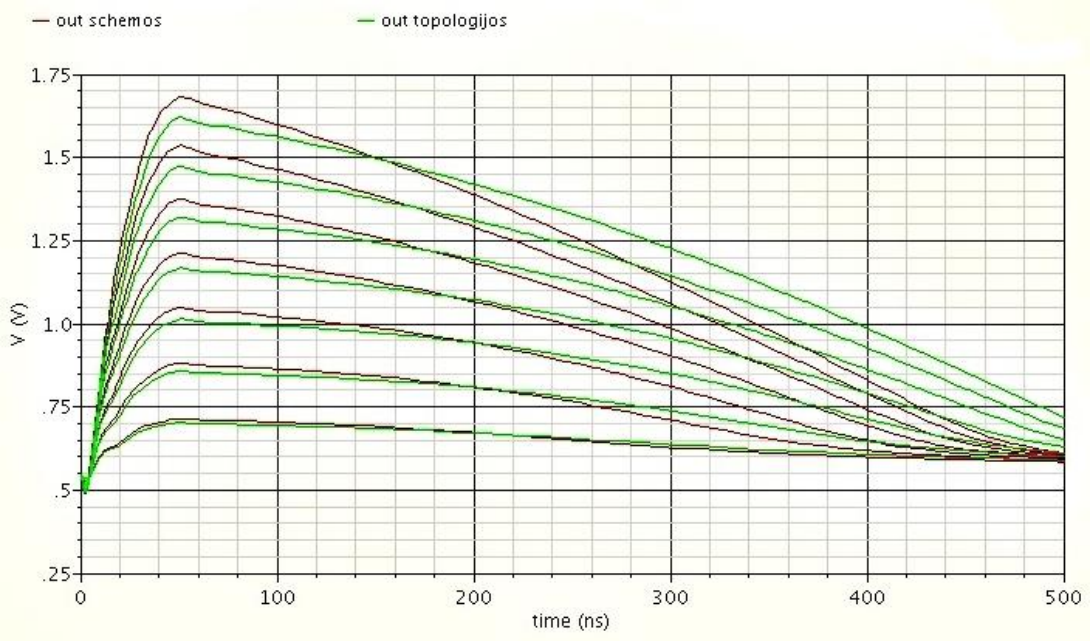


5.2 pav. KJP įšėjimo signalai, schemos C_{fb} talpa 25 fF, topologijos C_{fb} talpa 56,25 fF, Q_{det} = 1 kē, C_{det} = 30 fF



5.3 pav. KJP įšėjimo signalai, schemos ir topologijos talpa 56,25 fF, Q_{det} = 1 kė, T = 27 °C, C_{det} = 30 fF

5.2 ir 5.3 pav. pavaizduoti KJP topologijos ir principinės elektrinės schemos įšėjimo įtampos signalai. Matome, jog KJP principinės schemos ir topologijos įšėjimo įtampos (584,47 mV principinės schemos ir 564,57 mV topologijos) skiriasi apie 20 mV, t.y. apie 3,4 %. Toks skirtumas atsirado dėl, kad, kaip jau buvo minėta, dėl technologinių apribojimų topogijoje negalima buvo suprojektuoti mažesnės talpos kondensatoriaus. Todėl, kad tiksliau palyginti schemos ir topologijos veikseną (įšėjimo įtampas), KJP princinėje elektrinėje schemoje grįžtamojo ryšio kondensatoriaus talpa buvo nustatyta kaip ir suprojektuotoje topologijoje t.y. 56,25 fF. Iš 5.3. pav. matome, jog kai kondensatorių talpos yra vienodos, įšėjimo signalai (565,56 mV principinės schemos ir 564,57 mV topologijos) skiriasi tik apie 1 mV. Tai tesudaro tik apie 0,18 %.



5.4 pav. KJP principinės elektrinės schemos ir topologijos įšėjimo signalai, C_{fb} = 56,25 fF, Q_{det} kinta nuo 10 kē iki 70 kē, T = 27 °C, C_{det} = 30 fF

13 lentelė. KJP elektrinės schemos ir topologijos perdavimo koeficientai

Qin, kē	**Schemos**	**Topologijos**
	K, mV/ke	**K**, mV/ke
10	16,91	15,76
20	16,80	15,63
30	16,76	15,60
40	16,68	15,54
50	16,61	15,51
60	16,50	15,44
70	16,26	15,36

5.4 pav. ir 13 lentelėje taipogi matome KJP principinės elektrinės schemos ir topologijos įšėjimo signalus. Siekiant geriau pamatyti kompiuterinio modeliavimo skirtumus tarp principinės schemos ir topologijos įėjimo krūvis abiejuos modeliavimuose buvo keičiamas plačiame diapazone nuo 10 kē iki 70 kē. Kaip ir buvo tikėtąsi, KJP topologijos perdavimo koeficientas, dėl mažesnių KJP topologijos įšėjimo siganlo įtampos amplitūdžių esti mažesnis. 2 lentelėje aiškiai matyti, jog KJP topologijos perdavimo koeficientas K yra vidutiniškai apie 1,1 mV/kē mažesnis už KJP principinės elektrinės schemos. Tai tesudaro apie 6,6 %. Tokį skirtumą lėmė tai, kad topologijos kompiuterinis modeliavimas įvertina parazitines talpas atsirandančias tarp tranzistoriaus išvadų, tarp gretimų tranzistorių, tarp jungiamųjų takelių, perėjimo kiaurymių ir pan. Principinės elektrinės schemos kompiuterinis modeliavimas viso šito neįvertina.

5.3. Skyriaus išvados

Pagal principinę elektrinę KJP schemą 0,25 μm KMOP technologinio proceso pagrindu buvo suprojektuota topologija. Topologija projektuota laikantis tranzistorių suderinamumo sąlygos, panaudojant minimalų takelių susikirtimų ir persidengimo skaičių, laikantis minimalių atstumų tarp jų. Kad tarp PMOP ir NMOP tranzistorių grandinių nesusidarytų parazitiniai kanalai, grandinės apjuostos apsauginiais žiedais. Kondensatoriaus metalų sluoksnių sujungimui panaudota maksimaliai leistinas sujungimo kontaktų skaičius, siekiant užtikrinti gerą kontaktą tarp metalų.

Suprojektuotos topologijos užimamas plotas 302,265 μm^2. 30,78 % topologijos ploto sudaro NMOP tranzitorių grandinė su apsauginių PTAP apsauginiu žiedu, 41,75 % topologijos ploto sudaro PMOP tranzitorių grandinė su apsauginių NTAP apsauginiu žiedu. Suprojektuotas MDM kondesatorius užima 26,79 % topologijos ploto. Likusią topologijos ploto dalį, t.y. 0,68 % topologijos ploto sudaro tarpas, neišnaudotas dėl technologinių apribojimų, tarp NMOP tranzistorių grandinės ir PMOP tranzistorių grandinės.

Modeliuojant suprojektuotą topologiją, kai tiek schemos tiek topologijos kondensatoriaus talpa lygi 56,25 fF, o įėjimo krūvis Q_{in} lygus 1 kē, gauta 564,57 mV išėjimo įtampos amplitūdė. Principinės elektrinės schemos įšėjimo signalo įtampos amplitūdė esti apie 1 mV didesnė, o tai tesudaro tik 0,18 % skirtumą. Modeliuojant topologiją plačiame įėjimo krūvių diapazone (nuo 10 kē iki 70 kē) KJP perdavimo koeficientas gautas (15,36– 15,76) mV/kē diapazone, ir yra vidutiniškai apie 1,1 mV/kē mažesnis už KJP principinės elektrinės schemos ((16,26 – 16,90) mV/kē). Tai tesudaro apie 6,6 %. Tokį skirtumą lėmė tai, kad topologijos kompiuterinis modeliavimas įvertina parazitines talpas atsirandančias tarp tranzistoriaus išvadų, tarp gretimų tranzistorių, tarp jungiamųjų takelių, perėjimo kiaurymių ir pan. Principinės elektrinės schemos kompiuterinis modeliavimas viso šito neįvertina.

Atlikus KJP topologijos kompiuterinį modeliavimą ir palyginus gautus rezultatus su KJP principinės elektrinės schemos kompiuterinio modeliavimo rezultatais įsitikinta, jog jie skiriasi nežymiai.

6. Išvados

1. Šiame magistro darbe 0,25 μm KMOP technologijos pagrindu buvo suprojektuotas krūviui jautrus priešstiprintuvis (KJP), dažnai naudojamas hibridinėse (dvilustėse) skaitmeninių elementariųjų dalelių registravimo sistemose (SEDRS), jų pirminėje analoginėje registravimo elelektronikoje.
2. Darbo metu buvo apskaičiuotos parazitinės talpos tarp gretimų kanalų kontaktinių aikštelių, tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo, kuriame formuojami registruojančios elektronikos NMOP ir PMOP tranzistoriai bei gūburinio išvado parazitinė talpa.
3. Nustatyta, jog didžiausią įtaką KJS signalui daro parazitinė talpa susidaranti tarp kontaktinės aikštelės ir padėklo. Tai lemia konstukcija, esanti tarp nuskaitymo elektronikos padėklo ir KJS kontaktinės aikštelės. Nuskaitymo elektronikos kontaktinių aikštelių sudarymui naudojamas metalizacijos procesas. Tarp kontaktinės aikštelės ir NMOP ir PMOP tranzistorių, kuriuose vyksta signalų apdorojimo procesai, yra sudaryta kelių ,priklausomai nuo naudojamos technologijos, metalinių sluoksnių konstrukcija. Todėl yra svarbu parinkti tinkamus aikštelės matmenis ir atstumą tarp jų, kad parazitinės talpos darytų kuo mažesnę įtaką ne tik KJS striukšmams, bet ir perdavimo koeficientui, sistemos registravimo trukmei.
4. Skaičiuojant gūburinio išvado parazitinę talpą, nustatyta, jog esant pastoviam kontaktinės aikštelės spinduliui R=22,5 μm, o gūburinio išvado skersmeniui d=10 μm, parazitinė talpa lygi 3,575 fF. Tačiau, atstumui tarp kontaktinės aikštelės ir jutiklio padidėjus iki d=45 μm, parazitinė talpa sumažėja iki 1,639 fF, o išvado skersmeniui padidėjus iki maksimalaus leistino dydžio užduoties sąlygoje – 50 μm, parazitinė talpa sumažėja iki 1,593 fF. Parazitinių talpų skirtumas tarp didžiausio ir mažiausio gūburinių išvadų skersmenų yra apie 2,24 karto.
5. Skaičiuojant parazitinę talpą tarp gretimų kanalų kontaktinių aikštelių, nustatyta, jog kai kontaktinė aikštelė yra 35×35 μm dydžio, o atstumui tarp kontaktinių aikštelių kintant nuo 1 μm iki 20 μm, o tarpas dielektrikas tarp aikštelių iš silicio oksido SiO_2, parazitinė talpa atitinkamai sumažėja nuo 1 fF iki 0,723 fF. Dielektriką pakeitus poliimidu talpa pakinta nuo 0,797 μm iki 0,574 μm. Matyti, jog parazitinė talpa labiau įtakojama naudojant poliimidą, kurio dielektrinė skvarba mažesnė.
6. Kadangi vieno kanalo vidurinę kontaktinę aikštelę supa keturios gretimos ir keturios įstrižai esančios kontaktinės aikštelės. Todėl suminė parazitinė talpa tarp kontaktinių aikštelių yra aštuonis didesnė.
7. Skaičiuojant parazitinę talpą tarp kontaktinės aikštelės ir registravimo elektronikos padėklo nustatyta, jog didėjant atstumui tarp jų parazitinė talpa mažėja. Kai kontaktinė aikštelė yra

50x50 μm ir izoliacija tarp metalų yra iš Silk polimero, metalo sluoksniams sudaryti panaudojus 0,25 μm 5 metalo sluoksnių (3,2 μm storis) technologiją, parazitinė talpa yra 30,39 fF. Metalo sluoksniams sudaryti panaudojus 0,13 μm 6 metalo sluoksnių (6,2 μm storis) technologiją, parazitinė talpa sumažėja iki 16,73 fF, t.y. sumažėja apie 1,8 karto. Apie 1,8 karto parazitinė talpa sumažėja ir, kai izoliacija tarp metalų yra iš SiO_2– nuo 45,24 μm (panaudojus 0,25 μm 5 metalo sluoksnių technologiją) iki 24,9 μm (panaudojus 0,13 μm 6 metalo sluoksnių technologiją). Taigi norint sumažinti parazitinę talpą tarp kontaktinės aikštelės ir registravimo elektronikos padėklo reik naudoti KMOP technologiją su daugiau metalo sluoksnių.

8. Susumavus visas šias parazitines talpas gaunama suminė ATJ sujungimuose atsirandanti parazitinė talpa. Norint, kad ji būtų kuo mažesnė reikia mažinti kontaktinių aikštelių matmenis ir didinti gūburinius išvadus. Tačiau tobulėjant technologijoms išvadai yra mažinami, todėl siekiant gauti kuo mažesnes parazitines talpas, reikia tinkamai parinkti gūburinių išvadų ir aikštelių dydžius.
9. Skaičiuojant sujungimų varžas tarp detektoriaus jutiklio ir ATJ registruojančios elektronikos lusto, nustatyta, kad varžas daugiausia įtakoja sujungimo medžiagos specifinė savotoji varža ir sujungimų geometrija. Gūburinio išvado diametrui sumažėjus 5 kartus, t.y. nuo 50 μm iki 10 μm, varža, kai išvadas pagamintas iš indžio, padidėja apie 5 kartus, nuo 2,13 mΩ iki 10,67 mΩ. Kai išvadas yra iš aukso, diametrui sumažėjus 5 kartus, talpa taipogi padidėja apie 5 kartus, nuo 0,583 mΩ iki 2,91 mΩ. Matyti, jog kuo didesnė medžiagos savitoji varža, tuo didesnė sujungimo varža. Kuo didesnis sujungimo ilgis, tuo mažesnė sujungimo varža. Kuo mažesnis gūburinio išvado diametras, tuo didesnė jo varža.
10. 0,25 μm KMOP technologijos pagrindu supropjektuoto krūviui jautrus priešstiprintuvio KJP tiesinio stiprinimo diapazone registracijos trukmė (40 – 45) ns, perdavimo koeficientas (35,01 – 36,58) mV/kē. Gautas stiprintuvo tiesiškumas siekia iki 32 kē. Tiesinės dalies netiesiškumas 0,68 %. KJP vartojamoji galia apie 2,8 μW. Ekvivalentinio triukšmų krūvio išmatuoti nebuvo galimybės dėl programinės įrangos apribojimų.
11. Tyrimo metu buvo nustatyta, jog KJP perdavimo koeficientą labiausiai įtakojo grįžtamojo ryšio talpa. Ši talpa svarbi tuo, kad ATJ nuskaitymo elektronikoje – KJP per grįžtamojo ryšio talpą vyksta pirminis signalo stiprinimas ir integravimas. Kuo mažesnė ši talpa tuo didesnis perdavimo koeficientas, mažesnė sistemos registravimo trukmė, o tai lemia didesnę KJS greitąveiką, skiriamąją gebą. Šiai talpai kintant (0 – 50) fF ribose perdavimo koeficientas pakito net 96,83 %, t.y. sumažėjo nuo 597,05 mV/kē iki 18,87 mV/kē (560,18 mV/kē skirtumas).

12. Detektoriaus talpa nors ir buvo keičiama plačiame diapazone, tačiau didelės įtakos perdavimo koeficientui neturėjo. Šiai talpai pakitus nuo 0 fF iki 1 pF perdavimo koeficientas K sumažėjao tik 7,73 mV/kē, t.y. tesudaro tik 19,04 % pokytį.
13. Parazitinei talpai pakitus nuo 0 fF iki 50 fF, perdavimo koeficientas K šiame diapazone pakito tik 0,59 mV/kē, o tai sudaro 1,66 % pokytį. Parazitinei talpai kintant diapazone 0 fF iki 1 pF perdavimo koeficientas K šiame diapazone pakito 7,72 mV/kē, o tai sudaro tik 20,34 % pokytį. Taigi darome išvadą, jog parazitinė talpa esminio pokyčio mūsų projektuojamam KJP neturi, tačiau šią talpą taipogi geriau įvertinti norint išvengti netikslumų rezultatuose.
14. Pagal principinę elektrinę KJP schemą 0,25 μm KMOP technologinio proceso pagrindu suprojektuota topologija, kurios plotas $302{,}265\ \mu m^2$. Projektuojant buvo laikomasi tranzistorių suderinamumo sąlygos, PMOP ir NMOP tranzistorių grandinės apjuostos apsauginiais NTAP ir PTAP žiedais, panaudotas kaip įmanoma mažesnis jungiamųjų takelių susikirtimų ir persidengimo skaičius, minimalus atstumas tarp jų.
15. Modeliuojant KJP topologiją plačiame įėjimo krūvių diapazone (nuo 10 kē iki 70 kē) gautas perdavimo koeficientas K nuo principinės elektrinės KJP schemos vidutiniškai skyrėsi apie 1,1 mV/kē, arba tik 6,6 %.

Literatūra

1. *Charge amplifier*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-15]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Charge_amplifier>;
2. O'Connor P., De Geronimo G. *Prospects for charge sensitive amplifiers in scaled CMOS*. Nuclear Science Symposium, 1999. Conference Record. 1999 IEEE koferencijos medžiaga. Sietlas, JAV 1999 m, p. 88 – 93;
3. Barzdėnas V., Navickas R. *Dvilustės skaitmeninės diagnostinės sistemos mamo- ir dendografijoje.* Elektronika ir Elektrotechnika. Kaunas: 2006, nr. 2(66), p. 36 – 40;
4. Barzdėnas, V. *Elementariųjų dalelių registravimo sistemų pirminių grandinių tyrimas ir taikymas*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika, 2008, p.141;
5. *Capacitively coupled pixel detectors*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-15]. Prieiga per internetą: <http://sus.ziti.uni-heidelberg.de/Forschung/FGDetektoren/CCPD/>;
6. *Radiacinė sauga rentgeno diagnostikoje ir kompiuterinėje tomografijoje*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-05-01]. Prieiga per internetą: <www.rsc.lt/download.php/fileid/75>;
7. *Rentgenas: ar nauda visada didesnė už žalą?* [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-05-01]. Prieiga per internetą: http://www.ve.lt/naujienos/visuomene/sveikata/rentgenas-ar-nauda-visada-didesne-uz-zala-6942/;
8. *Jonizuojančios spinduliuotės detektoriai*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-04-15]. Prieiga per internetą: <http://aplinkotyra.vdu.lt/material/moduliai/radioekologija/paskaitu_medziaga/pRadEk%2009%20paskaita.pdf>;
9. *Charge Trapping in XR-100T-CdTe and -CZT Detectors.* [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-05-01]. Prieiga per internetą: <http://www.amptek.com/pdf/anczt2.pdf>.
10. Edling, F. *DIXI - a Hybrid Pixel Detector for X-ray Imaging*. PhD theses, Department of Radiation Sciences at Uppsala University. Uppsala, Sweden, 2004, p 65;
11. Abdalla Munir A. *Pixel detectors and electronics for high energy radiation imaging*. Ph. D. Thesis. The Royal Institute of Technology Department of Electronics, Solid State Electronics Electrum 229. Kista, Sweden, 2001, p. 69;
12. Schulman. T. *Si, CdTe and CdZnTe radiation detectors for imaging applications* Ph. D. Thesis. University of Helsinki. Helsinki, Finland 2006, p. 74;
13. *Progress in the Development of CdTe and CdZnTe Semiconductor Radiation Detectors for Astrophysical and Medical Applications*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-04-01]. Prieiga per internetą: <www.mdpi.com/1424-8220/9/5/3491/pdf >.

14. Bigasa M., Cabrujaa E., Forestb J., Salvib J. *Review of CMOS image sensors*. Microelectronics Journal, Volume 37, Issue 5. Barcelona, Spain, May 2006, p 433–451;
15. Faruqi A.R. *Electronic detectors for electron microscopy*. Advances in Imaging and Electron Physics, Volume 145. Cambridge, United Kingdom, 2007, p. 55–93;
16. *A capacitive Frisch grid structure for CdZnTe detectors*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-04-01]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=940065&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F23%2F20354%2F00940065.pdf%3Farnumber%3D940065 >.
17. *Silicon Pixels*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-05-01]. Prieiga per internetą: <http://cms.web.cern.ch/news/silicon-pixels>;
18. H. Toyokawa, Ch. Broennimann, E.F. Eikenberry, B. Henrich, M. Kawase, M. Kobas, P. Kraft, M. Sato, B. Schmitt, M. Suzuki, H. Tanida, T. Uruga. *Single photon counting pixel detectors for synchrotron radiation experiments*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 623, Issue 1. Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan, 1 November 2010, p. 204–206;
19. Gromov V.; Kluit R., Van der Graaf H. *Prototype of the Front-end Circuit for the GOSSIP (Gas On Slimmed Silicon Pixel) Chip in the 0.13 CMOS Technology*. NIKHEF, Amsterdam, Netherlands, 2006, p. 5.
20. Gromov V. *Design of the Front-end Electronics for the GOSSIPO chip*. NIKHEF, Amsterdam, Netherlands, 2005. p. 24.
21. Gromov V. *Specification of the Preamplifier for Gossipo-3 chip*. NIKHEF, Amsterdam, Netherlands 2009.
22. V. Jusel. *Aktyviųjų taškinių jutiklių sujungimų tarp registruojančios elektronikos ir puslaidininkio jutiklio talpų skaičiavimas ir analizė*. Bakalaurinis darbas, Vilnius 2009;
23. *Capacitance calculations in p+n silicon pixel sensors using three dimensional TCAD simulation approach*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-04-01]. Prieiga per internetą: <http://hasylab.desy.de/instrumentation/detectors/publications___reports/e101032/ASrivastavaCapacitancecalculations.pdf >.
24. *Analytical Expressions for the Calculation of Pixel Detector Capacitances*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-05-03]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=554825&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D554825>.
25. *Lead-Free Solder Bump Technologies for Flip-Chip Packaging Applications*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-04-01]. Prieiga per internetą; < http://www.ait.com.hk/pdf/ZKarim.pdf >.

26. *Under Bump Metallurgy Study for Pb-Free Bumping*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-04-01]. Prieiga per internetą; <http://npil.kaist.ac.kr/pdf/foreign_journal/FJ_37.pdf >.
27. *Calculation of BGA contact resistance by using the contacts volume method*. Electronics Technology, 2008. ISSE '08. 31st International Spring Seminar on medžiaga. Budapest, 7-11 May 2008, 37 – 40. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-04-01]. Prieiga per internetą; <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5276478&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5276478 >.
28. *A study on the electrical resistance of solder joint Interconnections*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-04-01]. Prieiga per internetą; <http://144.206.159.178/ft/744/64779/1105500.pdf >.
29. Chih-Tang Peng, Chang-Ming Liu, Ji-Cheng Lin, Hsien-Chie Cheng, Kuo-Ning Chiang. *The Reliability Analysis and Structure Design for the Fine Pitch Flip Chip BGA Packaging*. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on. 2004, p. 684 – 693.
30. Bigas M., Cabruja E., Lozano M. *Bonding techniques for hybrid active pixel sensors (HAPS)*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 574, Issue 2. Barcelona, 2007, p. 392-400. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-04-01]. Prieiga per internetą; <http://eil.unipv.it/vipix/documents/references/sdarticle2.pdf >.
31. Navickas R., Barzdėnas V. *GaAs krūviui jautrių stiprintuvų skaičiavimas ir analizė*. Elektronika ir elektrotechnika. kaunas, 2005. Nr. 6(62), p. 47 – 51;
32. Tūska L. *KMOP krūviui jautraus stiprintuvos projektavimas 64 nm technologijų pagrindu*. Bakalauro darbas. Vilnius, 2009;
33. Barzdėnas. V. *Integrinių grandynų projektavimas: nuo lusto iki idėjos. Mokomoji knyga*. Vilnius: Technika 2012, p 147;
34. Beikahmadi M., Mirabbasi S. A *Low-Power Low-Noise CMOS Charge-Sensitive Amplifier for Capacitive Detectors*. New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), 2011 IEEE 9th International. Bordeaux, 26-29 June 2011, p. 450 – 453;
35. Llopart X., Campbell M., San Segundo D., Pernigotti E., Dinapoli R.. *Medipix2, a 64k pixel read out chip with 55 mm square elements working in single photon counting mode.* Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE. CERN, Geneva, Switzerland. 2001, p 1484 - 1488 vol.3.
36. Pellegrini G., Chmeissani M., Maiorino M., Blanchot G., Garcia J., Lozano M., Martinez R., Puigdengoles C., Ullan M., Casado P. *Performance limits of a 55 μm pixel CdTe detector*. Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE. Geneva, Switzerland, 2004, p. 2104 - 2109vol 4;
37. Kraft P., Bergamaschi A., Brönnimann Ch., Dinapoli R., Eikenberry E. F., Graafsma H., Henrich B., Johnson I., Kobas M., Mozzanica A., Schlepütz C. M., and Schmitt B. *Characterization and Calibration of PILATUS Detectors*. Nuclear Science, IEEE Transactions on (Volume:56). 2009, p. 758 – 764;