VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vaidotas BARZDĖNAS

ELEMENTARIŲJŲ DALELIŲ REGISTRAVIMO SISTEMŲ PIRMINIŲ GRANDINIŲ TYRIMAS IR TAIKYMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, Elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

Vilnius, 2008

Disertacija rengta 2004–2008 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Romualdas Navickas (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

http://leidykla.vgtu.lt
VGTU leidyklos TECHNIKA 1523-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-317-1

© Barzdėnas, V., 2008

Padėka

Noriu padėkoti disertacijos darbo vadovui prof. habil. dr. Romualdui Navickui už išsamias konsultacijas, komentarus ir vertingas pastabas, skatinimą ir pagalbą rašant šią disertaciją.

Taip pat noriu padėkoti VGTU Elektronikos fakulteto Kompiuterių inžinerijos katedros vedėjui prof. habil. dr. Juliui Skudučiui ir visiems katedros dėstytojams, darbuotojams, kurie ketverius metus padėjo kryptingai gilinti žinias, ruošiant šią disertaciją.

Esu dėkingas visiems žmonėms, tiesiogiai ir netiesiogiai padėjusiems parašyti šį darbą, už šių žmonių indėlį, kuris man padėjo tobulėti.

Noriu padėkoti savo šeimai už paramą, padrąsinimą, o svarbiausiai – kantrybę.

Ačiū visiems
Vaidotas Barzdėnas

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama elementariųjų dalelių pirminių registravimo sistemų analoginė elektronika. Pagrindiniai tyrimo objektai yra aktyviuose taškiniuose jutikliuose naudojami krūviui jautrūs stiprintuvai. Disertacijos tikslas yra sukurti metodikas ir algoritmus, skirtus mažos galios ir mažų triukšmų krūviui jautrių stiprintuvų projektavimui. Pagal šias metodikas iš teorinių modelių ir grafinių priklausomybių, rišančių krūviui jautrių stiprintuvų parametrus su tranzistorių matmenimis, jų parametrais bei darbo režimais, būtų galima nustatyti tranzistorių matmenis minimalios vartojamosios galios ir triukšmų atžvilgiu.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: krūviui jautrių stiprintuvų triukšmų ir vartojamosios galios minimizavimas, bei naujų krūviui jautrių stiprintuvų konstrukcijų paieška. Pirmasis uždavinys suformuluotas atsižvelgiant į tai, kad mažėjant aktyviųjų taškinių jutiklių plotui, būtina mažinti sistemos vartojamąją galią, o tai savo ruožtu sumažina sistemos „signalas/triukšmas“ santykį. Antrasis uždavinys suformuluotas siekiant suprojektuoti naujų KMOP technologijų krūviui jautrius stiprintuvus su nuotėkio srovės kompensavimo grandinėmis, kurios leistų sumažinti triukšmus.

Disertaciją sudaro šeši skyriai, iš kurių paskutinis – rezultatų apibendrinimas.

Pirmajame skyriuje nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra.

Antrasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame nagrinėjamos skaitmeninės elementariųjų dalelių registravimo sistemos. Analizuojami aktyvieji taškiniai jutikliai ir juose naudojamų krūviui jautrių stiprintuvų struktūra, veikimo principai, pagrindiniai keliami techniniai reikalavimai.

Trečiajame skyriuje analizuojami krūviui jautrių stiprintuvų triukšminiai parametrai, krūvio stiprintuvų kokybės funkcija, leidžianti nustatyti optimalius įėjimo tranzistoriaus matmenis, minimalios galios ir triukšmų atžvilgiu.

Ketvirtajame skyriuje pateikiami suprojektuotų 90 nm, 130 nm ir 0,25 μm KMOP technologijos diferencinių, pakopinių krūviui jautrių priešstiprintuvių skaičiavimo ir modeliavimo rezultatai.

Penktajame skyriuje aprašomi krūviui jautrūs stiprintuvai su GaAs elementais, pateikiamas suprojektuotas GaAs krūviui jautrus stiprintuvas su sumažintu ekvivalentiniu triukšmu, registravimo trukme ir vartojamąja galia.

Disertacijos tema perskaityta 14 pranešimų Lietuvos bei kitų šalių konferencijose ir paskelbta 14 straipsnių: du – straipsnių rinkiniuose, įtrauktuose į Thomson ISI Web of Science, trys – konferencijų medžiagose, referuotose Thomson ISI Masters Journal List duomenų bazėse, du – Inspec duomenų bazėje cituojamuose žurnaluose, keturi – recenzuojamose tarptautinių konferencijų medžiagose bei trys – respublikinių konferencijų medžiagose.

Abstract

The analog electronics of primary registration systems of elementary particles is considered in the thesis. The main investigation objects are charge sensitive amplifiers used in active pixel detectors. The aim of the thesis is to develop the methodology and algorithms intended for the design of low power and low noise charge sensitive amplifiers. According to this methodology the transistor dimensions can be determined from theoretical models and graphical dependences relating parameters of the charge sensitive amplifiers to the transistor dimensions in respect of the minimal used power and noises.

The main tasks solved in the work are the following: minimization of noises and used power of charge sensitive amplifiers as well as search for new constructions of charge sensitive amplifiers. The first task was formulated taking into account the fact that with the increase of the area of active pixel detectors the used power of the system should be reduced, and this in its turn reduces the signal-to-noise ratio. The second task was formulated to design new CMOS technology charge sensitive amplifiers with the leakage current compensation circuits allowing reduction of noises.

The thesis is divided into six chapters, including the chapter of conclusions.

In the first chapter the scientific novelty of the work is described as well as the aims and tasks of the work are formulated and the author‘s publications and structure of the thesis are presented.

The second chapter covers the review of literature. The digital systems of elementary particle registration are considered. The active pixel detectors as well as the structure of used charge sensitive amplifiers, operation principles and the main technical specifications are analyzed.

In the third chapter noise parameters of charge sensitive amplifiers, the quality function of charge amplifiers allowing determination of optimal input transistor dimensions in respect of the minimal power and noises are analyzed.

In the fourth chapter the results of calculation and modeling of the designed differential stage charge sensitive preamplifiers of the 90 nm, 130 nm and 0.25 μm KMOP technologies are presented.

In the fifth chapter charge-sensitive amplifiers with GaAs elements are described as well as the designed GaAs charge sensitive amplifier with the reduced equivalent noise, the registration duration and the used power is presented.

The results of the thesis were presented at 14 conferences in Lithuania and Ukraine. Besides, 14 scientific papers were published, two of which are registered in the Thomson ISI Web of Science database, three papers are published in Thomson ISI Masters Journal List, two publications are quoted in Inspec database, four papers are published in reviewed conference proceedings and three papers are published in other conference proceedings.

Žymėjimai

Simboliai

τ_p	krūviui jautraus stiprintuvo registravimo trukmė;
C_{det}	aktyviojo taškinio jutiklio talpa;
C_{fb}	krūviui jautraus stiprintuvo grįžtamojo ryšio talpa;
C_{gs}	tranzistoriaus užtūra – ištaka talpa;
C_{gd}	tranzistoriaus užtūra – santaka talpa;
C_{in}	krūviui jautraus stiprintuvo įėjimo talpa;
ENC	ekvivalentinis triukšmų krūvis *(angl. Equivalent Noise Charge)*;
g_m	tranzistoriaus statumas;
g_{ds}	tranzistoriaus laidumas;
$I_{leakage}$	aktyviojo taškinio jutiklio nuotėkio srovė;
K	krūviui jautraus stiprintuvo perdavimo koeficientas;
K_f	tranzistoriaus mirgėjimo triukšmo energijos konstanta;
K_{ch}	aktyviojo taškinio jutiklio kanalų skaičius;
L	tranzistoriaus kanalo ilgis;
P	krūviui jautraus stiprintuvo vartojamoji galia;
Q_{det}	aktyviojo taškinio jutiklio generuojamas krūvis;
$Q(W)$	krūviui jautraus stiprintuvo kokybės funkcija;
R_{fb}	krūviui jautraus stiprintuvo grįžtamojo ryšio varža;
S_{noise}	spektrinis triukšmo tankis krūviui jautraus stiprintuvo išėjime;
SNR	„signalas/triukšmas“ santykis *(angl. SNR – signal to noise ratio)*;
T_{ap}	aplinkos temperatūra;
V_{dd}	krūviui jautraus stiprintuvo maitinimo įtampa;
V_{noise}	triukšmo įtampa krūviui jautraus stiprintuvo išėjime;
V_{out}	krūviui jautraus stiprintuvo išėjimo signalo amplitudė;
V_{th}	tranzistoriaus atkirtos įtampa;
W	tranzistoriaus kanalo plotis.

Santrumpos

ATJ	aktyvusis taškinis jutiklis;
CCD	surištojo krūvio prietaisas *(angl. Charge Coupled Device)*;
CERN	Europos mokslinių branduolinių tyrimų organizacija;
IF	impulsų formuotuvas;
IG	integrinis grandynas;
KJP	krūviui jautrus priešstiprintuvis;
KJS	krūviui jautrus stiprintuvas;
PTJ	pasyvusis taškinis jutiklis;
SEDRS	skaitmeninė elementariųjų dalelių registravimo sistema.

Turinys

Padėka iii

Reziumė iv

Abstract v

Žymėjimai vi

1. Įvadas 1
1.1. Darbo aktualumas 1
1.2. Problemos formulavimas 2
1.3. Tyrimų objektas 4
1.4. Darbo tikslas 4
1.5. Darbo uždaviniai 4
1.6. Tyrimų metodai 5
1.7. Mokslinis darbo naujumas 5
1.8. Ginamieji disertacijos teiginiai 6
1.9. Darbo rezultatų aprobavimas 6
1.10. Disertacijos struktūra 7

2. Skaitmeninių elementariųjų dalelių registravimo sistemų analizė 9
2.1. Skaitmeninių elementariųjų dalelių registravimo sistemų konstrukcijos 10
2.2. Šiuolaikinių aktyviųjų taškinių jutiklių sistemos 12
2.3. Aktyvieji taškiniai jutikliai ir jų registravimo elektronikos architektūra 14
2.4. Krūviui jautrūs stiprintuvai ir pagrindiniai jų parametrai 16
2.5. Antrojo skyriaus išvados 22

3. Krūviui jautrių stiprintuvų triukšmų ir vartojamosios galios minimizavimas.....25
3.1. KMOP krūviui jautrių stiprintuvų triukšmai.....26
3.1.1. Krūviui jautraus stiprintuvo mirgėjimo triukšmas.....31
3.1.2. Minimalių tranzistoriaus perėjimo C_{gs} ir C_{gd} talpų paieška.....33
3.2. Krūviui jatrių stiprintuvų vartojamoji galia.....34
3.3. Kokybės funkcija.....35
3.4. Trečiojo skyriaus išvados.....40

4. KMOP krūviui jautrių priešstiprintuvių projektavimo ir skaičiavimo rezultatai bei jų analizė.....43
4.1. Diferencinio, pakopinio krūviui jautraus priešstiprintuvio projektavimas su aktyviojo taškinio jutiklio nuotėkio srovės kompensavimo grandine 44
4.2. Aktyviųjų taškinių jutiklių krūviui jautrių priešstiprintuvių valdymo struktūrinė schema.....51
4.3. 130 nm krūviui jautraus priešstiprintuvio modeliavimo ir skaičiavimo rezultatai.....54
4.3.1. 130 nm KMOP krūviui jautraus priešstiprintuvio technologija.....54
4.3.2. 130 nm KMOP krūviui jautraus priešstiprintuvio modeliavimo ir skaičiavimo rezultatai.....56
4.3.3. Krūviui jautraus priešstiprintuvio statistikiniai Monte Karlo modeliavimo rezultatai ir jų analizė.....60
4.4. 90 nm krūviui jautraus priešstiprintuvio modeliavimo rezultatai ir jų analizė.....63
4.5. 0,25 μm krūviui jautraus priešstiprintuvio modeliavimo rezultatai ir jų analizė.....68
4.6. Ketvirtojo skyriaus išvados.....69

5. GaAs lauko tranzistorių su Šotki barjeru elementariųjų dalelių registravimo sistemų krūviui jautrių stiprintuvų modeliavimo ir projektavimo ypatumai.....71
5.1. Reikalavimai pagrindiniams elektriniams parametrams.....73
5.2. Reikalavimai GaAs krūviui jautrių stiprintuvų elementams.....74
5.3. Modeliuojamo GaAs krūviui jautraus stiprintuvo funkcinė schema.....77
5.4. GaAs krūviui jautriaus stiprintuvo elementų parametrai.....79
5.5. GaAs krūviui jautraus stiprintuvo modeliavimo rezultatai ir jų analizė...81
5.6. Penktojo skyriaus išvados.....88

6. Rezultatų apibendrinimas.....91

Literatūros sąrašas.....93

Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema 103

Priedai

A priedas. Pakopinio KMOP stiprintuvo stiprinimo koeficiento skaičiavimas 105

B priedas. Krūviui jautraus priešstiprintuvio perdavimo funkcijos skaičiavimas..... 109

C priedas. Tranzistorių modeliai 113

D priedas. GaAs krūviui jautraus stiprintuvo principinė elektrinė schema 129

1

Įvadas

1.1. Darbo aktualumas

Rentgeno diagnostiniai tyrimo metodai yra reikalingi, dažnai tiesiog būtini, ligai diagnozuoti. Tiek Lietuvoje, tiek Vakarų Europoje kas antram gyventojui kasmet atliekama po vieną rentgenogramą, o 90 proc. stacionaruose gydomų ligonių yra tiriami rentgeno spinduliais [1, 2]. Rentgeno spinduliai, naudojami diagnostinėje radiologijoje, gali pakenkti žmogaus ląstelėms. Rentgeno spinduliavimo biologinis poveikis žmogaus organizmui priklauso nuo gautosios dozės. Analogines rentgenogramas dėl jų nepakankamos diagnostinės vertės tenka kartoti dėl įvairių priežasčių: rentgeno aparatų kokybės ir/arba rentgeno laborantų kompetencijos. Todėl pacientai gauna padidintą apšvitos dozę.

Geresnės kokybės rentgenogramos gaunamos esant mažesnei išsklaidytajai spinduliuotei, taigi ir mažesnei anodinei rentgeno vamzdžio įtampai. Tačiau naudojant nedidelę įtampą, gerokai sumažėja rentgenologiniam vaizdui formuoti jonizuojančiosios spinduliuotės srauto dalis ir reikia padidinti ekspozicijos (apšvitos) trukmę, kuri atitinkamai padidina apšvitą jonizuojančiaisiais spinduliais. Todėl dažniausiai naudojama maksimali rekomenduojama įtampa, ir taip gaunamos blogesnės kokybės rentgenogramos.

Mamografijoje krūties liaukinis audinys geriausiai sugeria spinduliuotę ir kartu yra jautriausias kancerogeniniam spinduliuotės poveikiui, todėl mamografija atliekama, esant žemai generuojamos spinduliuotės įtampai.

Rentgeno vamzdžio anodinės įtampos diapazonas yra nuo 25 kV iki 31 kV, o ekspozicijos trukmė (švitinimo trukmė) – nuo 0,1 iki 6,0 s. Šiame įtampų diapazone, esant minimaliai paciento gaunamai dozei, būtina pasiekti maksimaliai tikslų normalių ir patologiškai pakitusių audinių rentgenografinį vaizdą. Mamografijos diagnostinėse sistemose kontrastingumas, esant 6 mm detalių matomumui, turi būti mažesnis kaip 1,3 %. t. y. maksimalus vieno vaizdo elemento dydis turi būti apie 75 μm.

Dėl pastarųjų priežasčių buvo pradėtos kurti skaitmeninės elementariųjų dalelių registravimo sistemos (SEDRS), kurios pagerina rentgeno vaizdų kokybę ir gauna kur kas didesnį jų kiekį per tą pačią ekspozicijos trukmę, užtikrinant vaizdo jutiklių kokybės reikalavimus.

Šias skaitmenines sistemas kuria įvairūs mokslo centrai [6]. Šiuo metu Lietuvoje, tokias sistemas kuriančių mokslo įstaigų ar įmonių nėra, tačiau 1992 – 1993 m., mikroelektronikos įmonėje „Venta“, buvo sukurti pirmieji pasaulyje GaAs integriniai krūviui jautrūs stiprintuvai (KJS), tokioms SEDRS sistemoms. Taip pat, pagal nacionalinę programą „Mikroelektronika elementariųjų dalelių tyrimams“ (1994–1997 m.), Tarptautinio Mokslo ir Kultūros Centro Pasaulinės Laboratorijos Lietuvos skyriaus projektus ir Europos Sąjungos Copernicus CP 9441180 projektą buvo toliau tobulinami ir kuriami GaAs KJS. Šiuose projektuose dalyvavo, vadovaujami akademiko J. Požėlos, prof. A. Matulionio iš PFI, prof. J. Vaitkaus iš VU, prof. R. Navicko iš „Ventos“ ir VGTU grupės mokslininkai [7–10].

SEDRS, kuriose naudojami puslaidininkiniai jutikliai, taip pat plačiai naudojamos didelių energijų fizikoje, naujos kartos elementariųjų dalelių, atsirandančių susiduriant hadronams kelių šimtų teravoltų greitintuvuose, tyrimuose. Didžiajame hadronų priešpriešinių srautų greitintuve (*angl. Large Hadron Collider, LHC*) CERN laboratorijoje Ženevoje, yra įdiegtos SEDRS, kurios leidžia stebėti elementariųjų dalelių skriejimo trajektorijas, energijas, jų pasirodymo laikus, nustatyti jų greičius ir gyvavimo trukmes [3–5].

1.2. Problemos formulavimas

Krintanti dalelė SEDRS aktyviajame taškiniame jutiklyje indukuoja elektrinį krūvį, kurio dydis nusako dalelės parametrus jutiklyje. Kadangi vienos dalelės indukuotas elektros krūvis yra palyginti mažas, tai jutiklio signalas iš pradžių apdorojamas (sustiprinamas ir suformuojamas) tiesiog švitinimo zonoje ir tik tada perduodamas toliau.

Norint SEDRS gauti didelę skiriamąją gebą, būtina mažinti jutiklio vaizdo taško matmenis ir didinti jutiklių skaičių (daromos daugiakanalės sistemos). Todėl keliami griežti reikalavimai pirminio signalo apdorojimo grandinės vartojamajai galiai ir matmenims viename kanale. Dėl šios priežasties reikia

sukurti minimalios vartojamosios galios integrines grandines. Tačiau projektuojant mažos galios SEDRS susiduriama su „signalas/triukšmas“ santykio mažėjimo problema, todėl reikalingos projektavimo metodikos ir algoritmai, leidžiantys surasti šių dviejų parametrų tarpusavio sąryšio taškus. Mažinant SEDRS vaizdo taškų matmenis, naudotinos naujausios nanometrinės ir submikroninės technologijos, ir nauji schemotechniniai ir/arba technologiniai sprendimai.

Aukštų energijų fizikos tyrimuose, kai stebimos atskiros dalelės, daugiakanalė registracijos sistema turi būti pasiruošusi patikimai fiksuoti įvykį, išskirti jį iš fono. Dalelės registravimo patikimumą lemia ribinis detektoriaus jautris ir pirminio signalo apdorojimo grandinės triukšmai. Be to, pirminio signalo apdorojimo sparta turi būti pakankama – didesnė kaip (1...100) MHz [11–14], taip pat turi būti (1...100) MRad atsparumas radiaciniam poveikiui, nes sistemos veikia galingos spinduliuotės srityse [15, 16].

Dauguma šiuolaikinių SEDRS yra gaminamos Si KMOP technologijų pagrindu, nes iš KMOP tranzistorių dažniausiai gaminami jungikliai arba raktai, kurie yra loginio vieneto arba loginio nulio būsenoje, vienas iš tranzistorių būna uždarytas ir srovė lygi nuliui. Energija naudojama tik rakto persijungimo iš vienos būsenos į kitą metu. Taigi, vienas iš pagrindinių KMOP schemų pranašumų – labai mažos grandine tekančios srovės. Tai leidžia kuriamoms SEDRS vartoti labai mažą galią ir naudoti mažų įtampų maitinimo šaltinius.

Tačiau vienas iš esminių Si KMOP technologijų trūkumų – atsparumas jonizuojančiai spinduliuotei, kuris yra (1...10) MRad [15, 16] ir tai yra nepakankamai didelis atsparumas. Žinoma, kad GaAs yra apie 10 kartų atsparesnis rentgeno spinduliuotei negu Si. Atsparumo padidėjimas priklauso nuo radiacijos tipo, tačiau numatomas prietaisų ilgaamžiškumas padidėja nuo 5 iki 10 kartų, palyginti su Si KMOP. Kiti GaAs prietaisų privalumai yra (4...5) kartus didesnis jų ribinis dažnis, esant tai pačiai prietaiso geometrijai ir srovės tankiui, ir galimybė veikti aukštesnėje aplinkos temperatūroje. Todėl GaAs tipo tranzistoriai dažnai taikomi SEDRS aktyviuose jutikliuose ir jų krūviui jautriuose stiprintuvuose [8, 14, 16, 35–39].

Taigi disertacijoje išnagrinėti SERDS aktyvieji taškiniai jutikliai ir jų pirminė, analoginė registravimo elektronika – krūviui jautrūs stiprintuvai. Sprendžiama krūviui jautrių stiprintuvų vartojamosios galios ir triukšmų mažinimo ir šių parametrų bendrų taškų radimo problema, siekiant sukurti tokių krūviui jautrių stiprintuvų projektavimo metodiką. Pagal pateiktą projektavimo metodiką bus suprojektuoti 90 nm, 130 nm ir 0,25 μm KMOP technologijų, mažų triukšmų ir mažos vartojamosios galios krūviui jautrūs stiprintuvai.

1.3. Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektai yra pirminėse elementariųjų dalelių registravimo sistemose naudojami aktyvieji taškiniai jutikliai ir jų krūviui jautrūs stiprintuvai/priešstiprintuviai.

1.4. Darbo tikslas

Šio darbo tikslas yra sukurti pirminių elementariųjų dalelių registravimo sistemose naudojamų aktyviųjų taškinių jutiklių ir jų krūviui jautrių stiprintuvų/priešstiprintuvių projektavimo metodiką ir algoritmus, skirtus mažos galios ir mažų triukšmų krūviui jautrių stiprintuvų projektavimui. Pagal šias metodikas iš teorinių modelių ir grafinių priklausomybių, aprašančių krūviui jautrių stiprintuvų/priešstiprintuvių parametrus, jų funkcines priklausomybes, būtų galima nustatyti optimalius tranzistorių matmenis minimalios vartojamosios galios ir triukšmų atžvilgiu.

1.5. Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti skaitmeninių elementariųjų dalelių registravimo sistemų ir juose naudojamų aktyviųjų taškinių jutiklių konstrukcijų vystymosi raidos analizę, kuri leistų nustatyti jų pagrindinių techninių parametrų gerinimo kryptis.
2. Ištirti KMOP krūviui jautrių priešstiprintuvių pagrindines triukšmines dedamąsias ir jų priklausomybes nuo krūviui jautrių priešstiprintuvių pagrindinių elektrinių parametrų.
3. Sukurti krūviui jautrių priešstiprintuvių tranzistorių geometrijos apskaičiavimo metodiką, kuri leistų nustatyti optimalius įėjimo tranzistoriaus matmenis ekvivalentinio triukšmų krūvio ir vartojamosios galios atžvilgiu.
4. Sukurtos projektavimo metodikos teisingumui patikrinti, suprojektuoti diferencinius, pakopinius krūviui jautrius priešstiprintuvius.
5. Krūviui jautrių priešstiprintuvių projektavimui naudoti naujausias 0,25 μm, 130 nm ir 90 nm KMOP technologijas.
6. Ekvivalentinių triukšmų nuotėkio srovės triukšminei dedamajai sumažinti suprojektuoti krūviui jautrius priešstiprintuvius su nuotėkio kompensavimo grandinėmis.
7. Atlikti suprojektuotų krūviui jautrių priešstiprintuvių modeliavimą ir skaičiavimus plačioje jų veikimo juostoje.
8. Ištirti ir suprojektuoti GaAs krūviui jautrų stiprintuvą, atliekantį pirminį krūvio signalo apdorojimą su ekvivalentiniu triukšmų krūviu mažiau nei

200 elektronų, registravimo trukme < 10 ns, vartojamąja galia < 1 mW.

1.6. Tyrimų metodai

Disertacijoje naudojami analitiniai ir skaitiniai tyrimo metodai. Elementariųjų dalelių registravimo sistemoms modeliuoti ir signalams skaičiuoti buvo sukurti nauji algoritmai, sudarytos analitinės lygtys ir programų tekstai. Rezultatams papildyti taikytos automatizuoto projektavimo programiniai paketai „MathCAD“, „Cadence Orcad“, „Slivaco SmartSpice, TCAD“ ir kiti. Gauti rezultatai apibendrinami ir lyginami su kitų autorių rezultatais.

1.7. Mokslinis darbo naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Teoriškai ir kompiuteriniu modeliavimu įvertinti krūviui jautrių stiprintuvų su KMOP tranzistoriais triukšminiai parametrai, jų priklausomybės nuo pagrindinių krūviui jautrių parametrų, tranzistorių matmenų ir jų elektrinių režimų.
2. Optimalaus krūviui jautraus priešstiprintuvio įėjimo tranzistorių matmenų apskaičiavimui, įvesta kokybės funkcija, leidžianti gauti optimalius tranzistoriaus matmenis ekvivalentinio triukšmų krūvio ir vartojamosios galios atžvilgiu.
3. Sukurti nanometrinės 90 nm ir submikroninės 130 nm ir 0,25 μm KMOP technologijos diferenciniai, pakopiniai krūviui jautrūs priešstiprintuviai su mažesniu ekvivalentiniu triukšmų krūviu bei padidintu perdavimo koeficientu, esant labai žemai vartojamajai galiai.
4. Submikroninei 130 nm ir nanometrinei 90 nm KMOP technologijai suprojektuota, apskaičiuota ir išanalizuota aktyviojo taškinio jutiklio nuotėkio srovės kompensavimo grandinė, kuri ženkliai sumažino krūviui jautraus priešstiprintuvio ekvivalentinį triukšmų krūvį.
5. Pasiūlyta nauja aktyviųjų taškinių jutiklių analoginės elektronikos architektūra, kuri leistų sumažinti jutiklių nuotėkio sroves bei sumažinti krūviui jautrių priešstiprintuvių triukšmus ir valdyti perdavimo koeficientą, atraminę įtampą, darbinę srovę bei vartojamąją galią.
6. Suprojektuoti GaAs krūviui jautrūs stiprintuvai su sumažintu ekvivalentiniu triukšmų krūviu iki 184 elektronų, registravimo trukme iki 10 ns, vartojamąja galia iki 1 mW.

1.8. Ginamieji disertacijos teiginiai

1. Originali KMOP krūviui jautrių priešstiprintuvių inžinerinio projektavimo ir skaičiavimo metodika, pagal kurią iš teorinių modelių ir grafinių priklausomybių, susiejančių krūviui jautrių priešstiprintuvių pagrindinius parametrus, galima apskaičiuoti optimalius tranzistorių matmenis vartojamosios galios ir triukšmų atžvilgiu.

2. Nauji nanometrinių 90 nm ir submikroninių 130 nm, 0,25 μm KMOP technologijų diferenciniai, pakopiniai krūviui jautrūs priešstiprintuviai su aktyviųjų taškinių jutiklių nuotėkio srovės kompensavimo grandinėmis, kurių kokybės funkcija yra atitinkamai 80 μWē, 98,4 μWē, 297 μWē.

3. Originali aktyviųjų taškinių jutiklių analoginės elektronikos architektūra su jutiklių nuotėkio srovės kompensavimo grandinių, krūviui jautraus priešstiprintuvių perdavimo koeficiento, darbinės srovės ir vartojamosios galios valdymo grandinėmis.

4. Eksperimentiniai krūviui jautrių priešstiprintuvių projektavimo, skaičiavimo ir modeliavimo rezultatai, atvaizduoti tokiomis priklausomybėmis, iš kurių analizės matyti krūviui jautrių priešstiprintuvių pagrindinių elektrinių parametrų gerinimo kryptys.

5. GaAs krūviui jautrūs stiprintuvų pagrindinių elektrinių parametrų funkcinės priklausomybės ir suprojektuoti krūviui jautrūs stiprintuvai su sumažintu ekvivalentiniu triukšmų krūviu iki 200 elektronų, registravimo trukme iki 10ns ir mažesne nei 1 mW vartojamąja galia.

1.9. Darbo rezultatų aprobavimas

Darbo rezultatai buvo paskelbti keturiolikoje mokslinių konferencijų Lietuvoje bei užsienyje. Disertacijos tematika yra atspausdinti 14 mokslinių straipsnių: du – straipsnių rinkiniuose, įtrauktuose į Thomson ISI Web of Science sąrašą [1A, 2A]; trys konferencijų medžiagoje, referuotoje Thomson ISI Masters Journal List duomenų bazėje [3A, 4A, 5A]; du – respublikiniame žurnale, cituojamame Inspec duomenų bazėje [6A, 7A], keturi – recenzuojamose tarptautinių konferencijų medžiagose [8A, 9A, 10A, 11A], trys – respublikinėse konferencijų medžiagose [12A, 13A, 14A].

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šiose mokslinėse konferencijose:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities*“ 2004, 2005, 2006 m., Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijose *„Mokslas – Lietuvos ateitis“* Vilniuje 2007 ir 2008 metais.

- Tarptautinėje konferencijoje *„Elektronika“* Vilniuje 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 metais.
- Tarptautinėje konferencijoje „*Mechatronic Systems and Materials*“, 2005 m., Vilniuje ir 2007 m., Kaune.
- Tarptautinėje konferencijoje „*13th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors“* 2007 m., Vilniuje.
- Tarptautinėje konferencijoje *„XXVI Международная научно-техническая конференция «Проблемы электроники»“* 2006 m., Kijeve, Ukrainoje.

1.10. Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro šeši skyriai, iš kurių pirmasis yra įvadas, o paskutinysis – rezultatų apibendrinimas. Taip pat yra keturi priedai.

Darbo apimtis yra 113 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 56 numeruotos formulės, 46 paveikslai ir 7 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudotas 101 literatūros šaltinis.

2

Skaitmeninių elementariųjų dalelių registravimo sistemų analizė

Šiame skyriuje nagrinėjamos SEDRS sistemos, jų konstrukcijų ypatybės. Išsamiai analizuojamos dvi pagrindinės šių sistemų grupės: aktyvieji taškiniai jutikliai (ATJ) ir pasyvieji taškiniai jutikliai (PTJ), pagrindiniai šių sistemų parametrai, jų registravimo elektronikų trūkumai ir privalumai. Detaliai analizuojamos ATJ sistemų, sukurtų ir pagamintų KMOP ir MESFET technologijomis, detektavimo principai, architektūra ir vystymosi raidos ypatybės. Pateikiamos ir palyginamos kelios CERN organizacijos SEDRS sistemos, pagrindiniai jų parametrai. Taip pat šiame skyriuje detaliai nagrinėjama ATJ jutikliuose naudojamų KJS struktūra, veikimo principai, pagrindiniai jiems keliami techniniai reikalavimai.

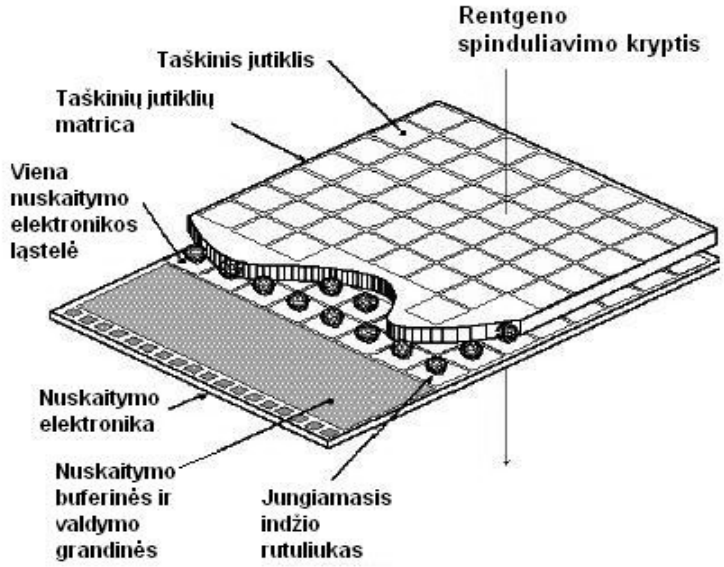
Šiame skyriuje pateikiami rezultatai buvo pristatyti tarptautinėse konferencijose: „Mechatronic Systems and Materials“ 2005 m., Vilniuje, „Elektronika“ 2004 m., 2005 m., Vilniuje, „XXVI Международная научно-техническая конференция «Проблемы электроники»“ 2006 m., Kijeve, Ukrainoje, Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2005 m., Vilniuje, bei publikuoti šiuose moksliniuose leidiniuose: [1A, 5A, 6A, 8A, 9A, 11A–13A].

2.1. Skaitmeninių elementariųjų dalelių registravimo sistemų konstrukcijos

Galimos dvi SEDRS konstrukcijos: dvilustė (hibridinė), kai jutiklių matrica gaminama atskirai viename luste ir sujungiama su registravimo elektronika, kuri yra kitame luste, ir monolitinė arba vienlustė, kai jutiklių matrica ir registravimo elektronikos elementai yra formuojami viename luste. Monolitinės sistemos konstrukcija teoriškai yra paprastesnė, sumažėja parazitinės jutiklio ir registravimo elektronikos talpos, o kartu sumažėja triukšmai ir didėja jautris. Tačiau praktikoje sunku suderinti jutiklio ir registravimo elektronikos elementų gamybos technologijas.

Hibridiniame, arba dviejų lustų, variante dažniausiai taikomas „apversto lusto“ būdas, kai ant registravimo elektronikos lusto kontaktinių aikštelių užauginami stulpeliniai išvadai, kurie sujungiami su jutiklių matrica. Pastaruoju metu stulpelinius išvadus keičia indžio (In) arba aukso (Au) rutuliukai, kurie sulydomi su jutiklių matrica (2.1 pav.) [17–20].

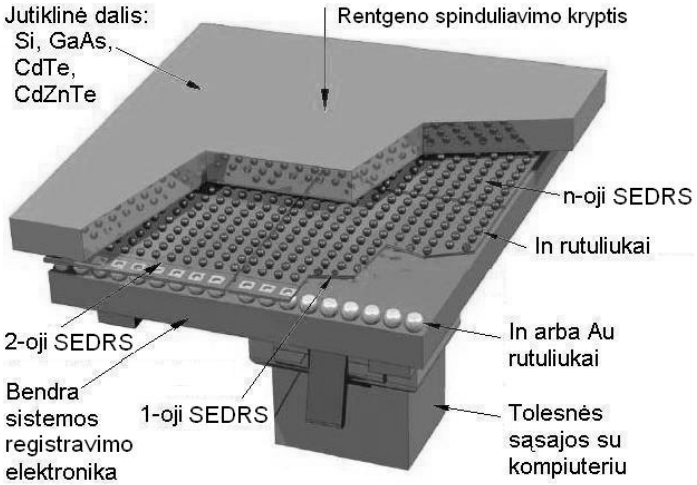
Šios taškinės jutiklių matricos viena ląstelė kartu su „nuosava“ registravimo elektronika yra vadinama vaizdo tašku *(angl. pixel)*. Kadangi registravimo elektronika gaminama KMOP ar GaAs MESFET technologijomis, tai sąlygoja didesnį šių darinių integracijos laipsnį, viename luste galima sutalpinti vaizdo jutiklį kartu su analoginio signalo apdorojimo ir analoginio signalo keitimo į skaitmeninį, programinio valdymo, įvesties/išvesties grandynais. Tokio tipo SEDRS yra vadinamos aktyviaisiais taškiniais jutikliais (ATJ).



2.1 pav. *Dvilustė skaitmeninė elementariųjų dalelių registravimo sistema*

Pasyviojo taškinio jutiklio (PTJ) pavyzdys yra CCD *(angl. Charge Coupled Device)* jutiklinės sistemos. CCD sistemose elementariųjų dalelių srautas indukuoja kiekviename vaizdo elemente δ – „delta“ srovės impulsą, kuris įkrauna savąjį MOP kondensatorių. Prijungus prie pernešimo elektrodų atitinkamo dydžio įtampą, kondensatoriai dirba nuskurdinto sluoksnio režimu. Taigi, PTJ neturi „nuosavos“ registravimo elektronikos, todėl CCD jutikliuose negalima kreiptis į kiekvieną vaizdo elementą ar jų grupę, o norint gauti informacijos iš konkrečios CCD vaizdo elementų grupės, reikia skaityti visą matricą. CCD jutikliuose į kiekvieną eilutės kreipties liniją kreipiamasi tiek kartų, kiek yra eilučių, todėl CCD jutiklių matricoje išsklaidoma gerokai daugiau galios nei ATJ sistemose. Taip pat ATJ vaizdo jutikliams nereikia tiek daug įtampos išvadų, kaip CCD, nes pastaruosiuose norint pernešti krūvį, prie pernešimo elektrodų prijungiama atitinkamo takto ir dydžio įtampa. „Nuosavos“ elektronikos neturėjimas ir lemia tai, kad pastaruoju metu CCD netobulą registravimo technologiją keičia ATJ dariniai KMOP ir GaAs MESFET technologijų pagrindu.

Mamografijoje SEDRS yra tipinio 18×24 cm^2 dydžio, dentografijoje – 2×3 cm^2 [21]. Todėl SEDRS sistemos (2.1 pav.) jungiamos į atitinkamo dydžio sistemų matricas, taip sudarant reikiamų matmenų SEDRS struktūras (2.2 pav.). Sujungimas su bendra sistemos registravimo elektronika yra analogiškas, kaip ir jungiant jutiklį su „nuosava“ vaizdo elemento elektronika, t. y. sulydoma su In arba Au rutuliukais. Toliau bendra sistemos registravimo elektronika per atitinkamą sąsają sujungiama su kompiuteriu. 2.2 paveiksle pavaizduotos SEDRS struktūros gaunamas rentgenografinis vaizdas yra dvimatis (2D). Tačiau yra sistemų, kurios įgalina gauti ir trimatį (3D) rentgenografinį vaizdą [11, 22–26].



2.2 pav. *Reikiamų matmenų SEDRS struktūrų sudarymas*

SEDRS jutikliams panaudojamos Si, GaAs, CdTe, CdZnTe medžiagos (chronologine tvarka pirmosios SEDRS buvo pagamintos Si pagrindu). 300 μm – 500 μm storio Si jutiklių matricos geru detektavimo efektyvumu pasižymi tik iki 12 keV. Toks detektavimo efektyvumas nėra tinkamas mamografijoje, kur rekomenduojamas anodinės įtampos diapazonas yra nuo 25 keV iki 31 keV. Todėl Si jutikliai dažniausiai naudojami γ – gama spinduliuotės mokslinio tyrimo srityse. Geresniu detektavimo efektyvumu nei Si pasižymi GaAs jutikliai, todėl jie naudojami rentgeno vaizdams formuoti, esant anodinės įtampos diapazonui nuo 15 keV iki 40 keV. CdZnTe jutikliai dėl savo draustinės juostos ypatumų, esant didesnei anodinei įtampai, pasižymi didesniu detektavimo efektyvumu nei Si, GaAs [27–30]. Pavyzdžiui, kai anodinė įtampa yra lygi 60 keV, detektavimo efektyvumas bus lygus: Si–5 %, GaAs–30 %, CdZnTe–80 %.

2.2. Šiuolaikinių aktyviųjų taškinių jutiklių sistemos

ATJ sistemų kūrimo pradininkė yra Europos branduolinių tyrimų organizacija CERN. Vienas iš pirmųjų jos projektų buvo OmegaD, skirtas elementariųjų dalelių savybėms, padėčiai, jų energiniam spektrui matuoti. Viename iš jo vėlesnių tobulinimų pagal 3 μm KMOP technologiją buvo pagaminta Omega-2 sistema, kurios pagrindiniai parametrai buvo toliau gerinami. Viena iš naujausių CERN OmegaD sistemos modifikacijų yra MEDIPIX-2 sistema, kuri plačiai taikoma mamografijoje, dentografijoje [11, 31–33].

2007 metų pabaigoje, buvo pristatytas ir pats naujausias CERN organizacijos projektas MEDIPIX-3 SEDRS [34], tačiau pagrindiniai šios sistemos parametrai kol kas konfidencialūs ir neskelbiami.

CERN projektuose dalyvavo ir Lietuvos atstovai, vadovaujami akademiko J. Poželos, prof. A. Matulionio iš PFI, J. Vaitkaus iš VU, R. Navicko iš „Ventos“ ir VGTU grupės [35, 36].

2.1 lentelėje palyginimui yra pateikti įvairių ATJ sistemų pagrindiniai parametrai.

Medipix-2 projekte, pagal 0,25 μm KMOP technologiją, sukurtas ir pagamintas didelio tikslumo rentgeno spinduliuotės ATJ, veikiantis, esant anodinės įtampos diapazonui nuo 0,1 iki 65 keV [6, 11, 31]. Medipix-2 sistema sudaryta iš 256×256 taškinių jutiklių matricos (2.1 pav.). Vienas vaizdo taškas ir registravimo elektronika yra 55×55 μm^2 dydžio. Visos buferinės ir valdymo grandinės suformuotos registravimo elektronikos lusto viename iš šonų ir tiesioginio sąlyčio su taškinių jutiklių matrica neturi. Šios valdymo ir buferinės grandinės užima apie 13 % viso registravimo elektronikos lusto ploto. Bendras jautriosios dalies plotas – 14,08×14,08 mm^2. Visa sistema sudaryta iš 33 mln.

tranzistorių ir jos vartojamoji galia yra apie 500 mW. Jutikliui panaudojamos medžiagos Si, GaAs, CdTe, CdZnTe.

KMOP ir MESFET technologijų tobulėjimas, tolesnis matmenų mažėjimas, didina ATJ sistemų architektūros sudėtingumą: gerokai padidėja tranzistorių skaičius viename vaizdo taške (500 tranzistorių, kai vaizdo taškas 55×55 μm^2 dydžio), sudėtingėja registravimo elektronikos schemotechnika. Norint tiksliau nustatyti jonizuojančiųjų dalelių padėtį erdvėje, reikia mažinti vaizdo taško plotą bei didinti registruojančiosios elektronikos „signalas/triukšmas“ santykį. Todėl žvelgiant į 2.1 lentelę, sistemų evoliucijoje pastebimas vaizdo elementų, vartojamosios galios ir triukšmų mažėjimo tendencijos. Vėlesniuose skyriuose mes įrodysime, kad mažėjant jutiklios talpai, mažinami ir triukšmai, t. y. ekvivalentinis triukšmų krūvis (*ENC*):

$$ENC \sim W_V \cdot L_V \sim C_{det}, \tag{2.1}$$

čia W_V – vaizdo taško plotis, L_V – vaizdo taško ilgis, C_{det} – jutiklio talpa.

Mažinant jutiklio plotą, reikia mažinti ir vieno vaizdo taško vartojamąją galią. Tačiau sistemos triukšmai yra atvirkščiai proporcingi vartojamajai galiai:

$$P \sim \frac{1}{ENC}, \tag{2.2}$$

čia P – sistemos vartojamoji galia.

Taigi, iš (2.1) ir (2.2) formulių galime pastebėti, kad būtina ieškoti optimalių taškų, siekiant sumažinti tiek sistemos triukšmus, tiek sistemos vartojamąją galią.

Viena vertus, vaizdo elementų mažinimas technologiškai nesudaro didesnių problemų, o kita vertus, kai sujungimų ir kitos parazitinės talpos yra panašių dydžių kaip jutiklio talpa, toliau ploto mažinti nėra prasmės, nes parazitinių talpų neįvertinimas gali duoti dideles paklaidas ir didelius neatitikimus tarp teorinių ir eksperimentinių rezultatų.

2.1 lentelė. *Įvairių SEDRS sistemų palyginimas*

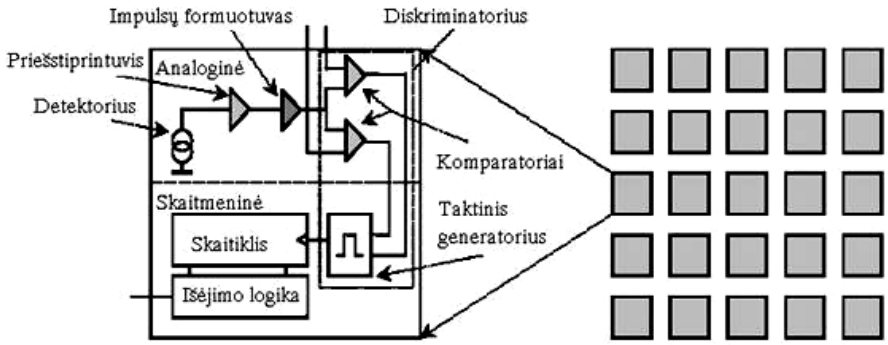
Parametrai	**Omega-2**	**Medipix-1**	**MPEC-2.1**	**PilatusXFS**	**Medipix- 2**
Metai	1993 m.	1998 m.	1999 m.	2002 m.	2002 m.
Matrica	16×63 taškų	64×64 taškų	32×32 taškų	256×256 taškų	256×256 taškų
Vaizdo taško dydis	75×500 μm^2	170×170 μm^2	200×200 μm^2	75×75 μm^2	55×55 μm^2
Tranzistorių kiekis vaizdo taške	~ 80	~ 400	———	~ 450	~ 504
Jautriosios dalies plotas	0,38 cm^2	1,2 cm^2	0,41 cm^2	3,14 cm^2	1,98 cm^2
Visas plotas	———	1,7 cm^2	0,48 cm^2	3,69 cm^2	2,27 cm^2
Tranzistorių skaičius luste	———	~1,6 mln.	———	~30 mln.	~33 mln.
Analoginės dalies triukšmai	———	170 ē	———	———	141 ē
Sistemos vartojamoji galia	———	———	———	300 mW	500 mW
Jutiklių medžiaga	Si	Si, GaAs	Si arba CdTe	Si, GaAs, CdTe, CdZnTe	Si, GaAs, CdTe, CdZnTe
Vaizdo taško skaitiklis-postūmio registras	nėra	15 – bitų skaitiklis taškui	Du 18 – bitųskaitiklia i taškui	12 – bitų skaitiklis taškui	13 – bitų skaitiklis taškui
Duomenų registravimo greitis	———	10 MHz lygiagrečiaj ą per 384 μs	>10 MHz lygiagrečiają per 250 μs	200 MHz lygiagrečiają per 123 μs	100 MHz lygiagrečiają per 266 μs
Gamybos technologija	CMOS 3 μm	SACMOS 1 μm	CMOS 0,8 μm	CMOS 0,25 μm	CMOS 0,25 μm

2.3. Aktyvieji taškiniai jutikliai ir jų registravimo elektronikos architektūra

Šiuolaikinių ATJ vieno taško registravimo elektronika susideda iš dviejų dalių (2.3 pav.): analoginės ir skaitmeninės dalies [11, 40–42]. Krintanti dalelė indukuoja elektrinį krūvį, kurio dydis nusako dalelės parametrus jutiklyje. Šis krūvio pokytis analoginėje dalyje iš pradžių sustiprinamas ir transformuojamas į įtampos pokytį vadinamajame krūviui jautriame priešstiprintuvyje (KJP). Vėliau

signalas patenka į impulsų formuotuvą (IF). Jis priešstiprintuvio išėjimo signalą vieną ar kelis kartus diferencijuoja ir kelis kartus integruoja. Diferencijuojant priešstiprintuvio signalą, sumažinamos paklaidos dėl jutiklio ir integratoriaus nuotėkio srovių [37, 43]. Neretai sistemose impulsų formuotuvas nenaudojamas, siekiant sumažinti sistemos vartojamąją galią [11].

Vėliau Gauso pavidalo signalas patenka į vieno arba dviejų lygių diskriminatorių (komparatorių). Jei naudojamas pastarasis, skirtumas tarp dviejų energinių lygmenų (komparatorių slenksčių) $W_{th}=W_{high}-W_{low}$, nustato taip vadinamą energinį langą W_{th}. Šiuolaikiniuose ATJ kiekvienas diskriminatoriaus slenkstis nustatomas keliais bitais. Taip valdant komparatorių slenksčius, užtikrinamas pakankamai platus energinis langas, kuris sąlygoja didesnį sistemos atsparumą triukšmams.



2.3 pav. *Aktyviųjų taškinių jutiklių registravimo elektronikos architektūra*

Pro energinį langą patenkanti dalelės energija įvertinama 13 arba 15 bitų skaitiklyje, t. y. suformuojamas atitinkamas stačiakampis signalas, kuris antrinėje skaitmeninėje dalyje fiksuojamas ir įsimenamas. Dažniausiai tas pats skaitiklis būna ir postūmio registras, kuris perstumia duomenis iš vieno vaizdo elemento į kitą ir taip perduoda informaciją į sistemos periferiją. Skaitiklį valdo taktinis generatorius, kuris ir lemia, ar skaitiklis dirbs postūmio registro ar skaitiklio režimu.

Pavyzdžiui Medipix-2 sistemos nuskaitančiojoje elektronikoje pirminis signalo stiprinimas ir integravimas atliekamas priešstiprintuvyje per grįžtamojo ryšio talpą C_{fb}=8 fC. Perdavimo koeficientas yra apie 81 mV/fC, o registravimo trukmė τ_p<150 ns. Priešstiprintuvio vartojamoji galia, esant maitinimo įtampai 2,2 V, yra 8 μW. Iš priešstiprintuvio signalas patenka į dviejų slenksčių diskriminatorių, kurio lange suformuojamas stačiakampis signalas, vėliau antrinėje skaitmeninėje (13 bitų skaitiklyje – postūmio registre) dalyje fiksuojamas ir įsimenamas.

ATJ sistemų periferija susideda iš *n* bitų (jei sistema susideda iš 256×256

jutiklių matricos, tai n=256) postūmio registrų [11, 44–48], skirtų registruoti/įrašyti duomenis iš/į jautriosios jutiklio dalies, ir iš dviejų sąsajų: lėtesnės – nuosekliosios, kurios paskirtis duomenų įvedimas/išvedimas, ir greitesnės – lygiagrečiosios, skirtos tik duomenims išvesti.

ATJ jutiklių ir registravimo elektronikos architektūra turi daug pranašumų lyginant su PTJ, o konkrečiau su CCD jutiklinėmis sistemomis. Kaip jau minėjome, CCD neturi „nuosavos“ registravimo elektronikos. Šis trūkumas lemia ir vaizdo registravimo spartą t_{RS}. Vaizdo registravimas iš ATJ $t_{RS} < 0{,}2$ s [11, 46]. O tokio pat dydžio CCD matricose $t_{RS} <$ (0,5...100) s [49–51]. Tuo tarpu analoginių rentgeno juostų, filmų ryškinimas užtrunka net $t_{RS} <$ (5..20) min. Be to, reikėtų atminti tai, kad ekspozicijos trukmė t_{EK} mamografijoje, dentografijoje – vos kelios sekundės ar net sekundžių dalys.

Taigi:

- ATJ: $t_{RS} << t_{EK}$;
- PTJ: $t_{RS} \leq t_{EK}$;
- Analoginės rentgeno juosto: $t_{RS} >> t_{EK}$.

Kaip jau anksčiau buvo minėta, šis privalumas ATJ suteikia galimybę gauti didesnį rentgeno nuotraukų skaičių per tą pačią ekspozicijos trukmę t_{EK}. Taip sumažinama rentgenoskopinių procedūrų skaičius ir padidinamas atliekamų rentgenogramų kiekis, užtikrinant tuos pačius vaizdo jutiklių kokybės reikalavimus. Be mažų matmenų ir mažos vartojamosios galios, ATJ KMOP sistemos vaizdo jutikliai turi dar vieną privalumą. Jų gamybai taikomi tie patys technologiniai procesai, kaip ir mikroprocesoriams bei atminties lustams, todėl jų savikaina gerokai mažesnė už CCD jutiklų.

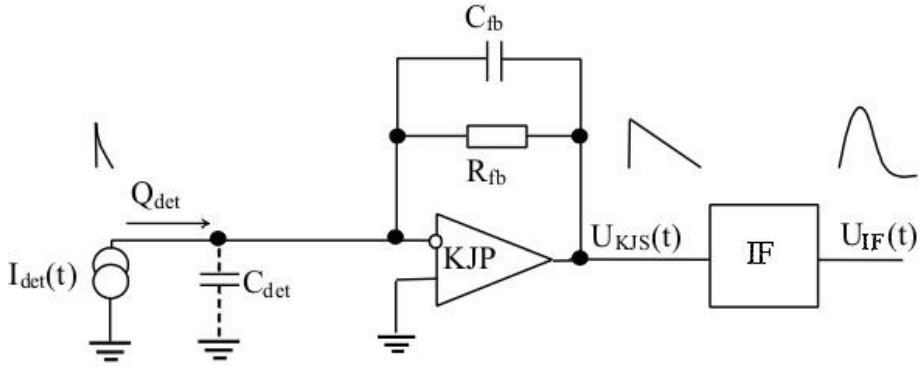
Tačiau CCD jutikliai turi ir kelis esminius privalumus. Vienas iš jų didesnė skiriamoji geba, kadangi vienas vaizdo elementas yra MOP kondensatorius. Pavyzdžiui, ATJ jutiklio matrica sudaryta iš 50×50 μm^2 dydžio vaizdo elementų, o CCD vaizdo elemento dydis yra mažesnis – 15×15 μm^2. Tiesa, mamografijai tinkamas vaizdas gaunamas esant 50×50 μm^2... 80×80 μm^2 vaizdo taškui. Dėl pastarosios savybės CCD jutikliai yra plačiai taikomi didelės skiriamosios gebos medicinos diagnostikoje ir mokslinio tyrimo srityse [51]. Kitas CCD privalumas yra mažesnės tamsinės srovės ir triukšmų lygis. Tačiau tobulėjant KMOP sistemoms, šis skirtumas greitai mažėja.

2.4. Krūviui jautrūs stiprintuvai ir pagrindiniai jų parametrai

Kaip jau anksčiau minėjome, dalelė, praėjusi pro jutiklį, jame generuoja krūvį, kurio dydis nusako dalelės parametrus. Literatūros duomenimis [42, 43, 52–57] tradiciškai jutiklio krūvis stiprinamas KJS, kuris sudarytas iš dviejų pakopų (2.4 pav.). Pirmoji pakopa – KJP, kuris sustiprina jutiklio įtampą ir

ją integruoja. Antroji pakopa – IF. Jis priešstiprintuvio išėjimo signalą vieną ar kelis kartus diferencijuoja ir kelis kartus integruoja. Diferencijuojant priešstiprintuvio signalą, sumažinamos paklaidos dėl jutiklio ir KJP nuotėkio srovių. Tokios sistemos išėjimo impulsas yra *n+1* (čia *n* integratorių skaičius) eilės Puasono funkcija, arba unipolinė funkcija, jei naudojame vieną diferencijavimą. Jei naudojame du diferencijavimus, gauname šios funkcijos išvestinę arba bipolinę funkciją. Šio signalo integravimas susiaurina sistemos praleidžiamųjų dažnių juostą ir tokiu būdu sumažina sistemos triukšmą ir padidina sistemos „signalas/triukšmas“ santykį.

Toliau signalas iš KJS patenka į skaitmeninę loginę dalį, kuri neturi įtakos pagrindiniams parametrams: jautriui, ekvivalentiniam triukšmų krūviui, registravimo laiko trukmei. Jai sukurti galima panaudoti tradicinius būdus ir toliau mes jos nenagrinėsime.



2.4 pav. *Krūviui jautraus stiprintuvo (KJS) blokinė schema: KJP – krūviui jautrus priešstiprintuvis, IF – impulsų formuotuvas. Čia Q_{det} – jutiklio generuojamas krūvis KJP įėjime, C_{det} – jutiklio talpa, C_{fb} – grįžtamojo ryšio talpa, R_{fb} – grįžtamojo ryšio varža*

Vienas iš pagrindinių KJS parametrų yra „signalas/triukšmas“ santykis *SNR (angl. "signal to noise" ratio)*, kuris surandamas iš tokios lygybės [58]:

$$SNR = \frac{\frac{E}{\eta}}{ENC}, \tag{2.3}$$

čia E – spinduliuojama elementariųjų dalelių energija, η – vienos krūvininkų poros susidarymui sunaudojama energija (pvz.: Si – 3,76 eV, GaAs – 4,2 eV, CdZnTe – 4,64 eV), o *ENC* – ekvivalentinis triukšmų krūvis KJS įėjime *(angl. Equivalent Noise Charge)*.

Ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC* nustatomas taip. Spektro analizatoriumi

išmatuojamas spektrinis triukšmo tankis KJS išėjime $S_{noise}(f)$ ir jį suintegravus baigtinėje dažnių Δf juostoje bei ištraukus kvadratinę šaknį, gaunama triukšmų įtampa V_{noise}:

$$V_{noise} = \sqrt{\int_{\Delta f} S_{noise}(f)df} \ . \tag{2.4}$$

Po to apskaičiuojamas ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC*, t. y. gauta KJS triukšmų įtampa V_{noise} padalinama iš perdavimo koeficiento K:

$$ENC = \frac{V_{noise}}{K} . \tag{2.5}$$

Kitaip tariant, ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC* suprantamas kaip *KJS* triukšmas įėjime, kuris sukuria realų triukšmą *KJS* išėjime. Kadangi *KJS* triukšmų įtampos V_{noise} dimensija yra [mV], o perdavimo koeficiento K – [mV/kē], todėl *ENC* dimensija išreiškiama elektronų [ē] skaičiumi, kuris nusako KJS triukšminį krūvį.

Pateiksime pavyzdį, kuris detaliai apibūdins KJS „signalas/triukšmas“ *SNR* santykį. Atliekant medicinoje mamografinius tyrimus, kai rentgeno spinduliuotės energija yra apie 28 keV ir kai jutiklis pagamintas iš CdZnTe, puslaidininkyje sukuriama apie 6000 krūvininkų porų, kurios ir sudaro naudingą, būtiną detektuoti, informaciją. Tačiau, kai KJS ekvivalentinis triukšmų krūvis yra apie 200 ē, „signalas/triukšmas“ santykis SNR gaunamas tik apie 30 kartų. Todėl, norint padidinti KJS *SNR* santykį, būtina mažinti *ENC* triukšminį krūvį arba ieškoti naujų, didelio detektavimo efektyvumo jutiklinių medžiagų. Literatūros duomenimis [11, 27], šiuolaikinių ATJ ir jų KJS *SNR* yra 40...60 kartų.

Ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC* pagrinde yra sudarytas iš kelių triukšminių dedamųjų, kurios priklauso tiek nuo naudojamo jutiklio, tiek nuo KJS technologinių, struktūrinių ypatumų [53, 59–61]. Detali *ENC* analizė, bus pateikiama sekančiuose skyriuose (žr. 3 skyrių).

Viena iš pagrindinių jutiklio *ENC* triukšminių dedamųjų – nuotėkio srovės dedamoji, kuri aprašoma šia išraiška:

$$ENC_{leakage}^2 = \frac{e^2 I_{leakage} \tau_p}{4q} , \tag{2.6}$$

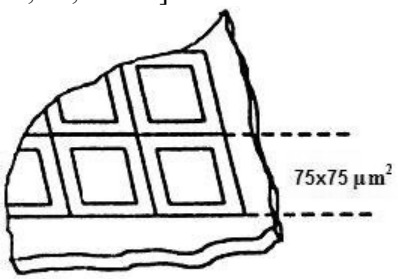
čia q – elektrono krūvis, e – Neperio konstanta, $I_{leakage}$ – jutiklio nuotėkio srovė, τ_p – KJS registracijos trukmė.

Į (2.6) išraišką įstatę tipines jutiklių nuotėkio sroves (10...100) nA/mm^2 [11, 14, 62, 63], kai ATJ vaizdo taško matmenis 55×55 μm^2, o registracijos trukmė (50...100) ns, matom, kad natūrali žemutinė *ENC* riba yra apie (5...100) ē. Tačiau reiktų atminti ir tai, kad visi stiprintuvai, bei tie elementai, kurie atlieka

signalo stiprinimą, yra sudaryti iš aktyviųjų bei pasyviųjų elementų ir visi šie elementai generuoja triukšmus ir yra jautrūs triukšmams. Tuomet suminė ENC_{tot} bus didesnė, nes bus sudaryta iš papildomų, KJS būdingų triukšminių dedamųjų. Todėl projektuojant KJS yra siekiama sumažinti KJS triukšmus iki žemutinės, jutiklio generuojamos triukšmo ribos [64].

Tačiau ir ši, jutiklio generuojama, *ENC* žemutinė riba gali būti sumažinta, panaudojus KJS su nuotėkio srovės kompensavimo grandinėmis [61–63]. KJS su nuotėkio srovės kompensavimo grandinėmis struktūra bus nagrinėjama vėlesniuose skyriuose (žr. 4.1 poskyrį).

Vienas iš pagrindinių krūviui jautrių stiprintuvų parametrų yra maža vartojamoji galia, nes labai didelis jų skaičius turi būti išdėstytas nedideliame plote. Iš ATJ jautriųjų zonų yra sudaromos elementinės matricos (2.5 pav.). Matricų dydžiai gali būti patys įvairiausi. Tai priklauso nuo detektoriaus naudojimo pobūdžio. Pavyzdžiui medicinoje, mamografijos diagnostinėse sistemose kontrastingumas, esant 6 mm detalių matomumui, turi būti mažesnis kaip 1,3 % [65], t. y. maksimalus vieno taškinio jutiklio dydis turi būti apie 75×75 μm^2, o jutiklinės sistemos sudaromos iš daugiau kaip (1...50) mln. matricos elementų [11, 21, 31, 66–69].



2.5 pav. *Aktyviųjų taškinių jutiklių matrica*

Kiekvienas toks taškinis jutiklis yra sujungiamas su elementarias daleles registruojančia elektronika. Taigi matricos dydis nulemia elementų gausą ATJ, o registruojamos informacijos kokybė priklauso nuo kanalų skaičiaus.

Atsižvelgiant į visus, aukščiau paminėtus aktyviųjų taškinių jutiklių ypatumus, jų registravimo elektronikos integrinių grandynų vartojamoji galia 1 kanalui turi būti nuo 5 µW iki 50 mW [11, 39, 42, 43, 70].

Norint gauti mažą galią, jų elementariųjų dalelių registravimo schemose reikia naudoti didelės varžos rezistorius (0,1...100) MΩ [8, 11, 39, 43, 71]. Kadangi schemos laiko konstantos, nusakomos šių rezistorių ir schemos talpų, yra nedidelės (10...100) ns, schemos kondensatorių vertės irgi yra labai mažos (1...100) fF. Integrinės mikroschemos parazitinės talpos yra irgi panašaus dydžio. Neįvertinus šių parazitinių talpų, gali būti didelis nesutapimas tarp teorinių ir eksperimentinių rezultatų. Todėl norint teisingai modeliuoti krūviui jautrius

stiprintuvus, reikia tiksliai įvertinti parazitines talpas.

Kaip jau ankščiau buvo paminėta, KJS paskirtis: informacijos apie krūvį, pataikiusį į jautriąją jutiklio dalį, formavimas į įtampos impulso amplitudę, t. y. priešstiprintuvyje yra vykdomas jutiklio impulsų integravimas: jutiklio generuojamas srovės impulsas yra integruojamas ir KJS išėjime gaunama įtampos amplitudė. Todėl KJS perdavimo koeficiento K dimensija yra mV/fC, o didelio jautrumo sistemose mV/kē [27, 71, 72]:

$$K = \frac{V_{out}}{Q_{\text{det}}}, \tag{2.7}$$

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

Šis perdavimo koeficientas K turi būti parinktas taip, kad užtikrintų reikiamą sistemos tiesiškumą ir viršytų minimalų, toliau naudojamų komparatorių (diskriminatorių) slenkstį. Šis perdavimo koeficientas GaAs KJS turi būti (30...50) mV/fC, kadangi šiuolaikinių GaAs komparatorių, kurie dažniausiai yra jungiami registravimo sistemose po KJS, jautrumas yra per 30 mV/fC, o KMOP sistemose, kurios pasižymi dideliu jautrumu ir mažu tiesiškumu, K yra nuo (80...150) mV/kē, mažo jautrumo ir didelio tiesiškumo sistemose – (10...30) mV/kē [8, 11, 42, 61, 70–73].

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 maksimumą [8, 14].

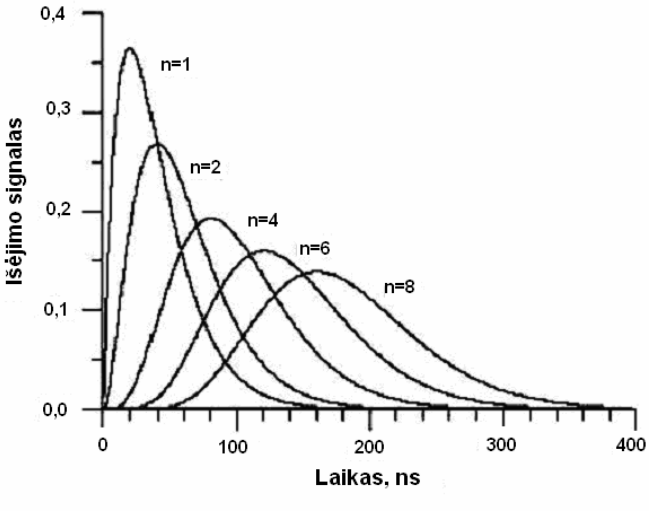
Ši registracijos trukmė priklauso nuo KJP grįžtamojo ryšio elementų, jutiklio C_{det} ir KJP įėjimo C_{in} talpų, KJP įėjimo tranzistoriaus matmenų ir kitų parametrų, kurių įtaką τ_p trukmei, aptarsime sekančiuose skyriuose. Literatūros duomenimis [11, 37, 71], KJS registracijos trukmė τ_p dažniausiai būna apie (10...100) ns, nes kaip jau ankščiau buvo minėta, KJS darbinis dažnis yra apie (10...100) MHz.

Jei KJP perdavimo koeficientas K gaunamas per mažas, naudojamas papildomas stiprinimas, taikant papildomas KJP pakopas ir/arba impulso formuotuvus IF. Šie IF, kaip jau ankščiau buvo minėta, atlieka triukšmų filtravimo ir signalo formavimo funkciją. Signalui suformuoti, IF yra naudojami keli CR arba RC grandynai, kurių dėka gaunami įvairaus tipo KJS išėjimo signalai su įvairiomis τ_p registravimo trukmėmis.

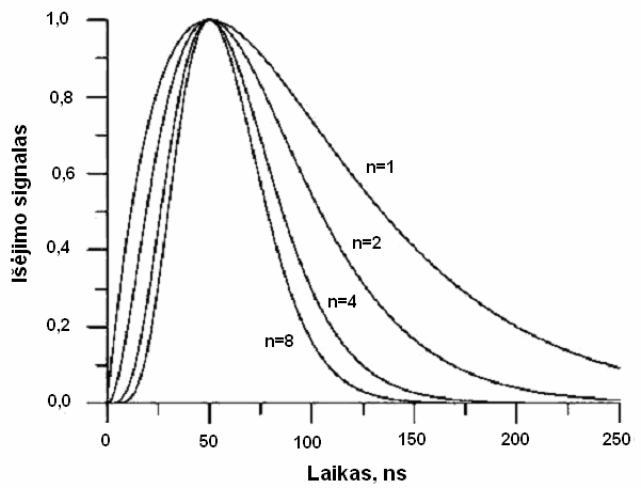
Naudojant kelis integratorius su ta pačia laiko pastoviąja τ, išėjimo impulsas vis labiau tolsta nuo Puasono funkcijos ir artėja prie Gauso funkcijos (2.6 a pav.). Iš 2.6 a. paveikslo galima daryti išvadą, kad KJS registracijos trukmė τ_p yra apytiksliai lygi:

$$\tau_p = n\tau. \tag{2.8}$$

Taigi, τ_p yra apytiksliai lygi visų aktyviajame filtre naudojamų integratorių integravimo trukmių sumai. Didinant integratorių skaičių, artėjama prie Gauso



a



b

2.6 pav. *KJS išėjimo impulso priklausomybė nuo naudojamų integratorių skaičiaus: (a) esant tai pačiai integratorių integravimo konstantai τ_p; (b) mažinant integratorių integravimo konstantą $\tau_n=\tau_{n=1}/n$*

funkcijos išėjimo signalo, t. y. išėjimo signalas tampa vis simetriškesnis. Taip pat reiktų pastebėti ir tai, kad tokios formos išėjimo signalas pasižymi mažiausiais triukšmais [71, 74, 75]. 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 (2.6 b pav.):

$$\tau_n = \tau_{n=1} / n, \tag{2.9}$$

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.

Apibendrinant, galima pastebėti tai, kad mažiausia registracijos trukmė τ_p yra išėjimo funkcija artima Puasono funkcijai. Puasono funkcijos eilė apsprendžia integratorių skaičių sistemoje. Norint gauti kuo paprastesnį IF, reikia minimizuoti sistemos integratorių skaičių $N=n-1$. Pagal literatūrą [14, 71, 74] žinoma, kad Puasono funkcijos eilė silpnai veikia į sistemos triukšmus ir $N=2$ yra pakankama. Todėl IF galima konstruoti su vienu integravimu ir vienu diferencijavimu. Praktikoje toks IF dažniausiai ir naudojamas, o tai elektronikos požiūriu yra aktyvusis juostinis filtras, kurio teorija gerai žinoma.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Elementariųjų dalelių tyrimuose, o taip pat medicinoje: mamografijoje ir dentografijoje, siekiant sumažinti gaunamas dozes ir užtikrinti gerą nuotraukų/vaizdų kokybę, plačiai naudojami SEDRS ATJ. Jie pasižymi dideliu radiaciniu atsparumu, ilgalaikiu patikimumu, didele skiriamąja geba ir vaizdo kontrastingumu. ATJ architektūra ir technologiškumas užtikrina didelę veikimo spartą ir mažą savikainą.
2. Medicinoje, norint gauti didesnį reikiamos kokybės rentgenografinių nuotraukų/vaizdų skaičių, esant tai pačiai ekspozicijos trukmei, reikia projektuoti SEDRS su kuo mažesniu ($< 55\times55$ μm^2) ATJ vaizdo elementu ir triukšmų lygiu < 100 ē.
3. Mažinant SEDRS ATJ jutiklio plotą, reikia mažinti ir vieno vaizdo taško vartojamąją galią. Tačiau sistemos triukšmai yra atvirkščiai proporcingi vartojamajai galiai, todėl būtina ieškoti optimalių taškų, siekiant sumažinti tiek sistemos triukšmus, tiek sistemos vartojamąją galią.
4. Veikiant padidinto radiacinio poveikio aplinkoje, didėja ATJ nuotėkio srovės, kurios turi didelę įtaką KJS „signalas/triukšmas“ santykiui. Todėl norint

minimizuoti KJS nuotėkio srovės triukšminę dedamąją, būtina projektuoti krūviui jautrų stiprintuvą su nuotėkio srovės kompensavimo grandine.

5. Naujų schemotechninių sprendimų, mažos galios ir triukšmų krūviui jautrių stiprintuvų projektavimas, siekiant optimaliai valdyti jų pagrindinius parametrus, verčia ieškoti naujų ATJ registravimo elektronikos architektūros sprendimų.

6. GaAs yra apie 10 kartų atsparesnis rentgeno spinduliuotei negu Si, o tai sąlygoja jų ilgaamžiškumo padidėjimą. Kiti GaAs prietaisų privalumai (4...5) kartus didesnis jų ribinis dažnis, esant tai pačiai tranzistoriaus geometrijai ir srovės tankiui, galimybė veikti aukštesnėje aplinkos temperatūroje, daro GaAs tipo tranzistorius perspektyvius ir plačiai naudojamus KJS projektavime. Tuo tarpu, Si KMOP technologijos vienas iš pagrindinių trūkumų, nedidelis krūvininkų judris, kuris sąlygoja, sistemos greitaveikos sumažėjimą. Todėl toliau reiktų ieškoti naujų schemotechninių ir/arba technologinių sprendimų.

7. Būtina sukurti KJS inžinerinio skaičiavimo, projektavimo metodiką, pagal kurią iš teorinių modelių ir grafinių priklausomybių, rišančių krūviui jautrių stiprintuvų parametrus su tranzistorių matmenimis bei tranzistorių darbo režimais, būtų galima nustatyti tranzistorių matmenis, vartojamą galią, minimalius triukšmus.

3

Krūviui jautrių stiprintuvų triukšmų ir vartojamosios galios minimizavimas

Visi stiprintuvai, bei tie elementai, kurie atlieka signalo stiprinimą, yra sudaryti iš aktyviųjų ir pasyviųjų elementų. Visi šie elementai generuoja triukšmus ir yra jautrūs triukšmams, todėl šiame skyriuje bus detaliai analizuojami krūviui jautrių stiprintuvų su KMOP tranzistoriais, triukšminiai parametrai, jų priklausomybės nuo registracijos trukmės, tranzistoriaus matmenų ir elektrinių režimų.

Žemų dažnių diapazone, tarp visų triukšminių šaltinių KMOP tranzistoriams, pagamintiems standartine technologija, vyrauja mirgėjimo *(angl. flicker)* triukšminė komponentė, kuri daro didelę įtaką visam KJS triukšmui. Šiame skyriuje atliksime mirgėjimo triukšmo analizę, modeliuosime funkcines priklausomybes nuo KMOP tranzistorių geometrinių matmenų ir jų veikimo režimų, ieškant pagrindinių mirgėjimo triukšmo parametrų gerinimo krypčių.

Tranzistoriaus užtūra – ištaka C_{gs} talpa šuntuoja aktyviojo taškinio jutiklio talpą C_{det} ir todėl gali smarkiai keisti tiek KJS registravimo trukmę τ_p, tiek ekvivalentinį triukšmų krūvį *ENC*. Todėl bus modeliuojami ir analizuojami tranzistorių darbo režimai, ieškant C_{gs} talpos minimumų bei jos kitimo ribų.

Kaip jau ankščiau buvo minėta, didelis ATJ vaizdo taškų kiekis mažame plote verčia projektuoti sistemas su maža vartojamąja galia ir jos minimizavimas

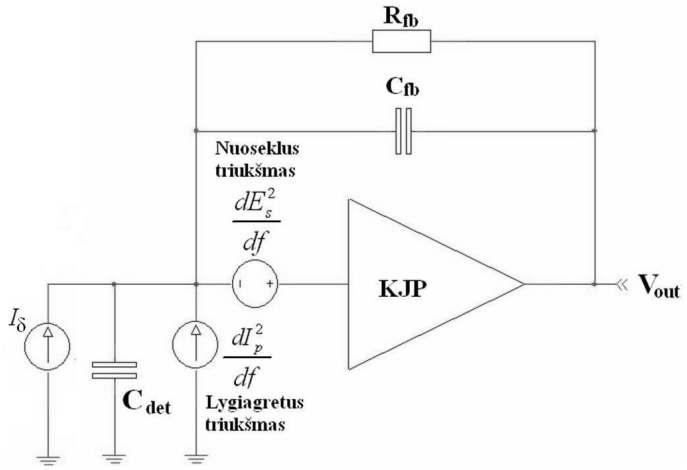
yra vienas iš pagrindinių keliamų reikalavimų projektuojant KJS. Tačiau mažėjanti vartojamoji galia didina KJS „signalas/triukšmas“ santykį. Todėl šiame skyriuje nurodysime KJS keliamus reikalavimus vartojamajai galiai, įvesime naują KJS kokybės funkciją, kuri leis surasti optimalius įėjimo tranzistoriaus matmenis, minimalaus ekvivalentinio triukšmų krūvio ir minimalios galios atžvilgiu.

Visi šiame skyriuje pateikiami rezultatai buvo pristatyti konferencijose: tarptautinėje konferencijoje „13th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors“ 2007 m., Vilniuje, tarptautinėje konferencijoje „Mechatronic Systems and Materials“ 2007 m., Kaune, tarptautinėje konferencijose „ELEKTRONIKA“ 2007 m., Vilniuje, Jaunųjų Mokslininkų Konferencijose „MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“ 2007 m., Vilniuje, bei publikuoti šiuose moksliniuose leidiniuose: [2A–4A, 14A].

3.1. KMOP krūviui jautrių stiprintuvų triukšmai

3.1 paveiksle aktyvusis taškinis jutiklis vaizduojamas krūvio šaltiniu, duodančių δ tipo srovės impulsą, kurio krūvis Q_{det} ir talpa C_{det}. Triukšmas yra suskirstomas į dvi pagrindines dedamąsias:

- Nuoseklaus triukšmo dedamoji (triukšminis įtampos šaltinis);
- Lygiagretaus triukšmo dedamoji (triukšminis srovės šaltinis).



3.1 pav. *Blokinė triukšmų poveikio schema*

Įėjimo stiprintuvo nuoseklaus triukšminės įtampos šaltinio spektrinis tankis aprašomas formule:

$$\frac{dE_S^2}{df} = a_b + \frac{a_f}{|f|}, \tag{3.1}$$

čia E_S – triukšmo generatoriaus įtampa, a_b – tranzistoriaus baltojo nuoseklaus triukšmo konstanta, a_f – tranzistoriaus nuoseklaus mirgėjimo triukšmo konstanta.

Stiprintuvo įėjimo lygiagretaus triukšminės srovės šaltinio spektras aprašomas formule:

$$\frac{dI_P^2}{df} = b_b + \frac{b_f}{|f|}, \tag{3.2}$$

čia I_P – triukšmo generatoriaus srovė, b_b – tranzistoriaus baltojo lygiagretaus triukšmo konstanta, b_f – tranzistoriaus lygiagretaus mirgėjimo triukšmo konstanta.

Šios abi formulės, nežiūrint į jų paprastumą, yra universalios. Plačiajuosčių stiprinančių elementų (bipolinių, lauko, KMOP, GaAs MESFET tranzistorių bei kitokio tipo tranzistorių), naudojamų krūvio stiprintuvuose, triukšmų spektras pagrinde turi tris sritis: mirgėjimo, pastovaus triukšmo ir aukšto dažnio.

Mirgėjimo triukšmas yra būdingas visiems stiprinantiems elementams. Mirgėjimo triukšmo ypatybė yra ta, kad jis yra atvirkščiai proporcingas dažniui, t. y. didėjant dažniui, jis mažėja. Po mirgėjimo triukšmo srities seka pastovaus triukšmo sritis, kurioje pakanka įskaityti tik tranzistoriaus ekvivalentinės schemos triukšmus (pvz. KMOP atveju varžų R_s, R_g, R_d varžas ir kanalo varžos R_{ch}=1/g_m triukšmus). Toliau didinant dažnį ir artėjant prie elemento ribinio dažnio f_r, dėl stiprinančio elemento talpų įtakos, mažėja elemento stiprinimas ir didėja jo triukšmai, perskaičiuoti į įėjimą. Aukštų dažnių srityje, tranzistorių pradeda veikti parazitinės talpos C_{gs}, C_{gd}, susidarančios tarp užtūros ir ištakos bei užtūros ir santakos. Nagrinėjant tranzistorių dažnines savybes, reikia įvertinti ir tai, kad tarp užtūros ir kanalo susidaro talpa C_{gch}, kuri per kanalo varžą R_{ch} persikrauna. Tai nulemia tranzistoriaus maksimalų darbo dažnį. Šių talpų dydžiai nulemia tiek triukšmines, tiek dažnines tranzistoriaus savybes. Tačiau, krūvio stiprintuvų maksimalus darbo dažnis yra 10 ir daugiau kartų mažesnis už elemento ribinį dažnį ir stiprintuvo triukšmą lemia mirgėjimo ir pastovios triukšmo srities triukšmai.

KMOP tranzistorių atveju būtų galima išskirti tokias tris pagrindines nuoseklaus triukšmo dedamąsias:

a. Nuoseklusis baltasis triukšmas

$$ENC_s^2 = \frac{e^2 kT_{ap} R_S (C_{det} + C_{in} + C_{fb})^2}{q^2 \tau_p}, \tag{3.3}$$

čia k – Bolcmano konstanta, T_{ap} – aplinkos temperatūra, R_S – nuoseklių varžų

suma.

Ši triukšminė dedamoji sudaro apie 15 % viso KJS ENC_{tot} triukšmo [61, 76]. Kaip matome iš (3.3) formulės, ši triukšminė dedamoji tiesiogiai priklauso nuo C_{det}, C_{fb}, C_{in} talpų ir KJS esančių nuosekliųjų varžų R_S. Šių talpų mažinimas yra apribojamas technologijų (pvz.: C_{det}=(8...100) fF, C_{fb}=(1...40) fF), tačiau kita vertus, šios talpos yra panašaus dydžio kaip ir sujungimų tarp ATJ ir KJS bei kitų parazitinių talpų, todėl projektuojant KJS būtina įvertinti šių talpų įtaką.

Kitas dydis tiesiogiai proporcingas ENC_s triukšminei dedamajai – nuosekliosios varžos R_S. Tačiau norint gauti mažą KJS galią, jų schemose naudojamos didelės varžos rezistoriai (0,1...100) MΩ [14, 70]. Todėl šių varžų mažinimas, didintų KJS vartojamąją galią, o tai nėra pageidautina.

b. Nuoseklusis tranzistoriaus kanalo šiluminis triukšmas

$$ENC_{ch}^2 = \frac{e^2 kT_{ap}(C_{det} + C_{in} + C_{fb})^2}{3q^2 \tau_p g_m}. \tag{3.4}$$

Nuoseklusis įėjimo tranzistoriaus kanalo terminis triukšmas, sudaro apie (15...20) % viso KJS ENC_{tot} triukšmo ir šiai dedamajai 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 V_{gs} įtampa artėja prie atkirtos įtampos V_{th}.

c. Nuoseklusis mirgėjimo triukšmas

$$ENC_{1/f}^2 = \frac{K_f}{2C_{ox}^2 WL} \frac{e^2 (C_{det} + C_{in} + C_{fb})^2}{q^2}, \tag{3.5}$$

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 plotis.

Literatūros duomenimis [61, 76], šis triukšmas sudaro apie (30...35) % viso triukšmo, todėl būtina rasti šio triukšmo mažinimo kelius. $ENC_{1/f}$ iš (3.5) išraiškos 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. (3.5) kaip ir (3.4) triukšminės dedamosios sumažinimas galimas tik parinkus tinkamus įėjimo tranzistoriaus matmenis. Įėjimo tranzistoriaus statumas išreiškiamas formule:

$$g_m = \sqrt{2\mu C_{ox} \frac{W}{L} I_{ds0}}, \tag{3.6}$$

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

Detaliai mirgėjimo triukšminė dedamoji analizuojama 3.1.1 poskyryje. Įstačius (3.6) išraišką į (3.4) gauname, kad ENC_{ch} ir $ENC_{1/f}$ triukšminės dedamosios atvirkščiai proporcingos įėjimo tranzistoriaus kanalo pločiui W. Todėl būtina surasti optimalų įėjimo tranzistoriaus plotį W_{opt}, ENC_{ch} ir $ENC_{1/f}$ atžvilgiu. Gauti sąryšiai, inžinerinio krūvio stiprintuvo projektavimo metu, įgalintų pasirinkti optimalius įėjimo tranzistorių matmenis vartojamosios galios ir triukšmų atžvilgiu.

KMOP tranzistorių lygiagretusis triukšmas turi dvi pagrindines dedamąsias:

a. Nuotėkio srovės triukšmas

$$ENC_{leakage}^2 = \frac{e^2 \tau_p I_{leakage}}{4q}. \tag{3.7}$$

Pastaroji triukšminė dedamoji sudaro apie (25...30)% viso triukšmo [61, 76]. Ši lygiagretaus triukšmo dedamoji priklauso tik nuo jutiklio nuotėkio srovės $I_{leakage}$, nes realūs puslaidininkiniai jutikliai turi nuotėkį, kuris yra apie (0,04...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 projektuojamas KJS su nuotėkio srovės kompensavimo grandinėmis, kurios nukreipia jutiklio nuotėkio sroves nuo KJP įėjimo link žemės potencialo, taip išvengiant jų integravimo su naudingu signalu. Šios nuotėkio srovės kompensavimo grandinės sumažina pagrindinių KJS pagrindinių elektrinių parametrų paklaidas bei padidina „signalas/triukšmas“ santykį.

b. Lygiagretusis šiluminis arba Džonsono triukšmas

$$ENC_{therm}^2 = \frac{e^2 \tau_p k T_{ap}}{2q^2 R_P}, \tag{3.8}$$

čia R_P – lygiagrečių varžų suma.

Šis šiluminis triukšmas priklauso tik nuo KJS lygiagrečių varžų sumos R_P. Kaip jau ankščiau buvo minėta, 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 (1...100) MΩ eilės, todėl ši triukšminė dedamoji nėra didelė lyginant su kitomis, ankščiau paminėtomis. Literatūros duomenimis [61, 76], o taip pat ir modeliuojant buvo įsitikinta, kad ENC_{therm} sudaro tik apie 5 % viso triukšmo, todėl projektuojant KJS į šią triukšminę dedamąją galime nekreipti dėmesio.

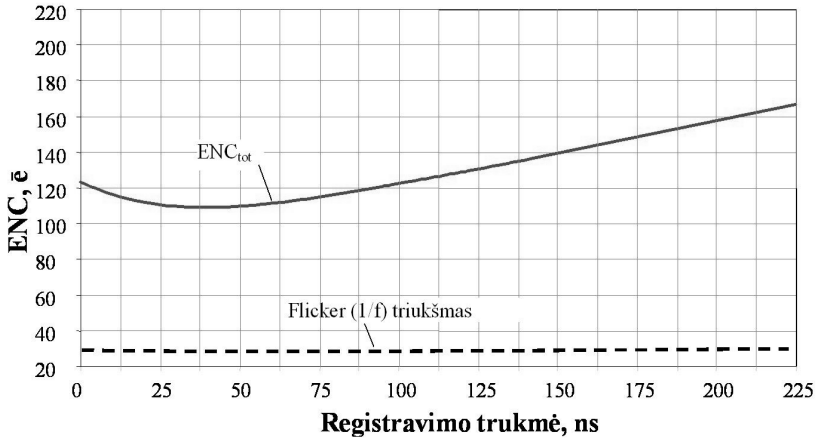
Žvelgiant į (3.4), (3.3) ir (3.7) išraiškas, skirtingos ENC komponentės skirtingai priklauso nuo registracijos trukmės τ_p. Nuoseklaus baltojo triukšmo komponentė ENC_s ir įėjimo tranzistoriaus kanalo šiluminis triukšmas ENC_{ch} mažėja proporcingai didinant registracijos trukmę τ_p, o lygiagretaus nuotėkio

srovės triukšminė dedamoji $ENC_{leakage}$ – tiesiog proporcinga τ_p, o mirgėjimo komponentė $ENC_{1/f}$ visiškai nepriklauso nuo registracijos trukmės. Dėl tokio triukšmų komponenčių kitimo egzistuoja optimali registracijos trukmė τ_p, duodanti sumarinio ENC_{tot} minimumą. Ši sumarinis ENC_{tot} išreiškiamas tokia formule:

$$ENC_{tot} = \sqrt{ENC_s^2 + ENC_{ch}^2 + ENC_{1/f}^2 + ENC_{leakage}^2 + ENC_{therm}^2} \ . \quad (3.9)$$

Tokia optimalios registravimo trukmės τ_p reikšmė gauta atlikus 130 nm technologijos krūviui jautraus priešstiprintuvio skaičiavimo rezultatų analizę. Ekvivalentinio triukšmų krūvio priklausomybė nuo registracijos trukmės pavaizduota 3.2 paveiksle. Kaip matyti, $ENC(\tau_p)$ funkcija yra kvadratinė su vienu globaliu minimumu, kuris ir atitinka optimalią registracijos trukmę, *ENC* atžvilgiu. Minimalus ENC=108 ē gaunamas, kai τ_p yra apie 45 ns.

Kairysis funkcijos kritimas yra dėl nuosekliojo triukšmo daromos įtakos, dešinysis kilimas – lygiagrečiojo triukšmo. Didinant registracijos trukmę, mažėja nuoseklaus triukšmo įtaka, bet jį mažinti yra prasmė tol, kol jis nepasidaro artimas mirgėjimo triukšmui. Reiktų pastebėti ir tai, kad mirgėjimo triukšmas nepriklauso nuo registracijos trukmės, t. y. jis yra pastovus ir yra apie 32 ē. Tai galima stebėti 3.2 paveiksle. Lygiagretusis triukšmas yra atvirkščias nuosekliajam, t. y. didinant registracijos trukmę lygiagretaus triukšmo įtaka mažėja. Taigi, yra optimalus ENC triukšmo lygis, kuris atitinka tiek nuoseklaus, tiek lygiagretaus triukšmo dedamųjų minimumą. Šis minimumas ir nusakytų optimalią sistemos erdvinę ir laikinę skiriamąją gebą, bei leistų padidinti sistemos „signalas/triukšmas“ santykį.

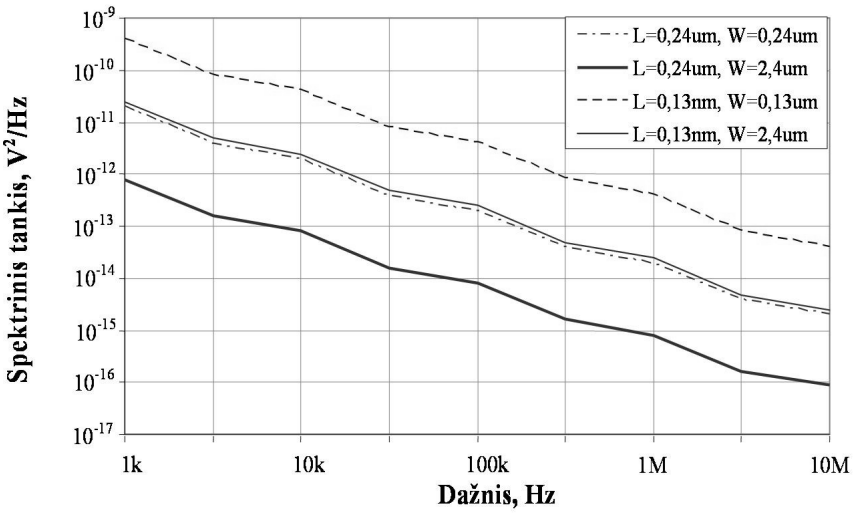


3.2 pav. *130 nm technologijos krūviui jautraus priešstiprintuvio ekvivalentinio triukšmų krūvio priklausomybė nuo registracijos trukmės*

3.1.1. Krūviui jautraus stiprintuvo mirgėjimo triukšmas

Kaip jau ankščiau buvo minėta, krūviui jautrių stiprintuvų veikimo dažnių diapazonas apytikriai yra nuo (1...100) MHz. Šiame diapazone tarp visų triukšmų šaltinių KMOP tranzistoriams, pagamintiems standartine technologija, vyrauja mirgėjimo (1/f) triukšmo komponentė [76], kuri turi lemiamą įtaką KJS triukšmui. Todėl būtina ištirti mirgėjimo triukšmo priklausomybes nuo įėjimo tranzistoriaus matmenų ir veikimo režimo.

Buvo ištirtos 130 nm ir 0,24 μm užtūros ilgio tranzistoriaus triukšmų įtampos spektrinio tankio priklausomybės nuo dažnio, norint įsitikinti, kad tranzistoriaus triukšmas yra mirgėjimo pobūdžio. 130 nm ir 0,24 μm užtūros ilgio tranzistoriaus triukšmų spektrinio tankio priklausomybė nuo dažnio, parodyta 3.3 paveiksle. Modeliavimas buvo atliktas 1 kHz...10 MHz dažnių intervale, gautas 1/f pavidalo triukšmų spektrinis tankis, kas būdinga mirgėjimo triukšmui. Tranzistoriaus, kurio L=130 nm ir W=130 nm, mirgėjimo triukšmų spektrinis tankis yra net apie 500 kartus didesnis lyginant su L=0,24 μm, W=2,4 μm, 21 kartus lyginant su L=0,24 μm, W=0,24 μm, 17 kartų lyginant su L=130 nm, W=2,4 μm. Tai paaiškinama tuo, kad mirgėjimo triukšmų spektrinis tankis yra atvirkščiai proporcingas užtūros ilgiui ir pločiui, nes pagal Hooge teoriją [78], mirgėjimo triukšmas atvirkščiai proporcingas krūvininkų, esančių po užtūra, skaičiui.



3.3 pav. *130 nm ir 0,24 μm užtūros ilgio tranzistorių mirgėjimo triukšmų spektrinio tankio priklausomybė nuo dažnio*

Hooge teoriją mirgėjimo triukšmų atžvilgiu, paaiškina ir mūsų aukščiau minėta KMOP KJS mirgėjimo triukšminė dedamoji (3.5), kuri yra atvirkščiai proporcinga įėjimo tranzistoriaus kanalo pločiui W ir ilgiui L, bei priklauso nuo įėjimo talpos C_{in}.

Tuo tarpu mirgėjimo triukšminė dedamoji $ENC_{1/f}$ taip pat priklauso ir nuo mirgėjimo triukšminės energijos K_f. Šis dydis yra universalus, nes jis nepriklauso nuo tranzistoriaus užtūros ilgio ir tranzistoriaus pločio, o priklauso tik nuo konkrečios technologijos. Pagal šį koeficientą yra sprendžiama apie KMOP technologijos, joninės implantacijos kokybę.

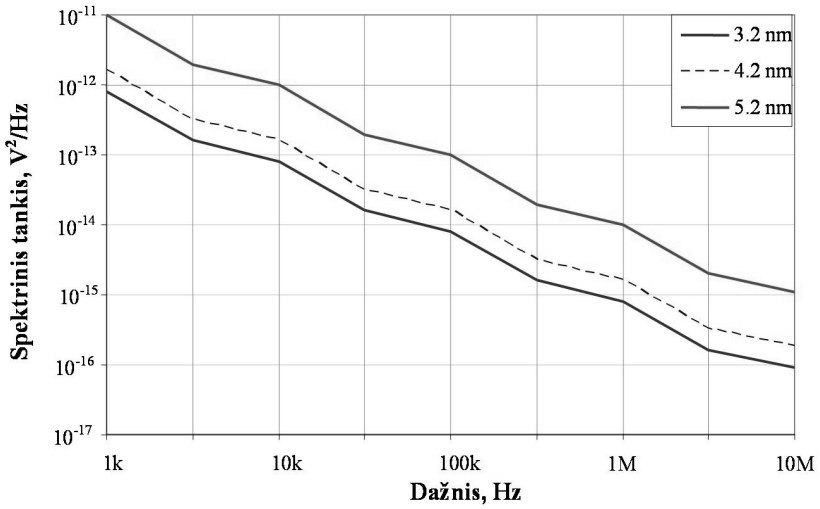
Į C_{in} talpą yra įskaičiuota ir krūviui jautraus priešstiprintuvio įėjimo tranzistoriaus C_{gs} talpa, kuri lygi:

$$C_{gs} = \frac{2}{3} C_{ox} WL . \tag{3.10}$$

KMOP tranzistoriuose, mirgėjimo triukšminė dedamoji priklauso nuo užtūrinio dielektriko (3.5), (3.10) ir jo storio. Tranzistoriaus užtūros storis T_{ox} su savitąja talpa yra susijęs tokia išraiška:

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_o \varepsilon_d}{T_{ox}} , \tag{3.11}$$

čia ε_0 – vakuumo dielektrinė konstanta, ε_d – užtūrinio dielektriko dielektrinė skvarba.



3.4 pav. *W/L=2,4/0,24 µm tranzistoriaus mirgėjimo triukšmų spektrinio tankio priklausomybė nuo dažnio, esant skirtingiems užtūros dielektriko storiams T_{ox}*

Įvertinus (3.10) ir (3.11) lygybes, galime daryti išvadą, kad ir T_{ox} kitimas turės didelę įtaką mirgėjimo triukšmo dedamajai, t. y. didinant užtūrinio dielektriko storį, didėja ir mirgėjimo triukšmas.

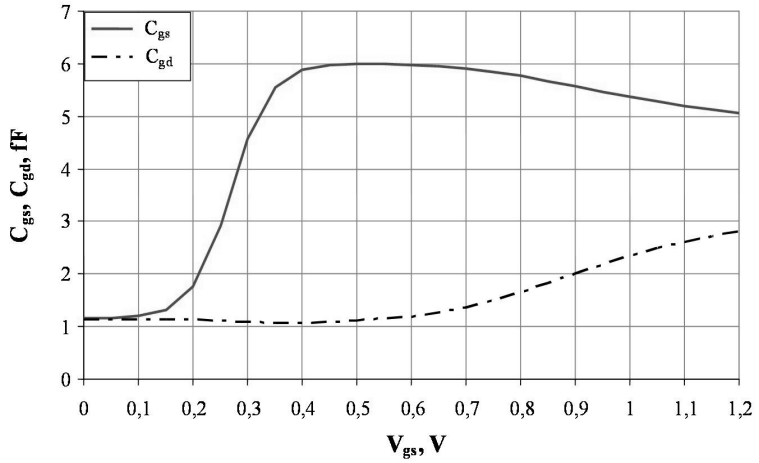
3.4 paveiksle pavaizduota W/L=2,4/0,24 μm tranzistoriaus mirgėjimo triukšmų spektrinio tankio priklausomybė nuo dažnio, esant skirtingiems užtūros dielektriko T_{ox} storiams. 3,2 nm použtūrinio dielektriko storį turinčio KMOP tranzistoriaus mirgėjimo triukšmo dedamoji net 12,2 karto mažesnė, negu turint 5,2 nm storį. Tai paaiškinama tuo, kad mažėjant dielektriko sluoksnio storiui ir veikiant tranzistoriaus V_{gs} įtampai, didėja krūvininkų koncentracija kanale, kas savo ruožtu, padidina krūvininkų pagavimo tikimybę [76, 81–84].

Minimali mirgėjimo triukšmo dedamoji gaunama esant ploniausiam dielektriko sluoksniui. Tačiau reiktų atminti ir tai, kad užtūrinio dielektriko storis apsprendžia ir tranzistoriaus nuotėkio sroves, kurių neįvertinimas gali duoti didelius neatitikimus tarp teorinių ir realių matavimo rezultatų.

Apibendrinant būtų galima pasakyti, kad toks mirgėjimo triukšminės dedamosios modeliavimas leis parinkti optimalią tranzistoriaus geometriją bei technologiją ir įgalins dar labiau sumažinti ekvivalentinį triukšminį krūvį, padidinti „signalas/triukšmas“ santykį.

3.1.2. Minimalių tranzistoriaus perėjimo C_{gs} ir C_{gd} talpų paieška

Tranzistoriaus perėjimo užtūra-ištaka talpa C_{gs} yra lygiagreti aktyviojo taškinio jutiklio talpai C_{det} ir gali smarkiai keisti KJS parametrus. Didėjant šiai talpai, didėja KJS registracijos trukmė τ_p, mažėja stiprintuvo greitaveika bei didėja *ENC* nuoseklioji dedamoji, o tai nepageidautina.



3.5 pav. *Tranzistoriaus W/L=1,2/0,13 μm talpų C_{gs}, C_{gd} priklausomybės nuo V_{gs}, esant įtampai V_{ds}=0,25 V*

Tranzistoriaus užtūra – ištaka talpa C_{gd} šuntuoja KJS grįžtamojo ryšio talpą C_{fb} ir taip pat gali smarkiai keisti stiprintuvo parametrus. Todėl būtina teisingai nustatyti C_{gs}, C_{gd} talpas, rasti tranzistorių darbo režimus, atitinkančius šių talpų minimumus.

Tranzistoriui, esant pilnai uždaros būsenos, C_{gs} talpa dažniausiai išreiškiama plokščiojo kondensatoriaus formule (3.10), kuri buvo pateikta 3.1.1 poskyryje. Kita šios formulės išraiška atrodo taip:

$$C_{gs} = C_{gs0}W , \tag{3.12}$$

čia C_{gs0} – užtūros – ištakos sanklotos talpa.

Akivaizdu, kad tranzistoriui esant uždaram, C_{gs} talpa, didinant tranzistoriaus plotį W, kinta tiesiškai. Tačiau tranzistoriui, veikiant tiek tiesiniame, tiek soties regione, į C_{gs} talpą būtina įskaičiuoti uždaro tranzistoriaus užtūros – ištakos sanklotos C_{gs0} talpą, ištaka – padėklas C_{bs} talpą, užtūra – padėklas C_{gb} talpą [85]. Analogiškai ir su C_{gd} talpa. C_{gs} ir C_{gd} talpų priklausomybės nuo įtampos užtūra – ištaka V_{gs} tranzistoriui su W/L=1,2/0,13 μm matmenimis parodyta 3.5 paveiksle.

Matome, kad talpa C_{gs} mažai kinta, kol tranzistorius yra uždaras, ir pradeda staigiai kisti, jam atsidarius. Esant įtampai V_{gs} diapazone nuo 2 V iki 3 V, C_{gs} talpa padidėja net 2,5 karto, nuo 1,8 fF iki 4,7 fF. Tai yra dėl nedidelio nuskurdinto sluoksnio storio vertikalia kryptimi kitimo, kanalo būsenai kintant nuo pilnai atviros iki pilnai uždaros, ir nedidelio nuskurdinto sluoksnio kitimo horizontalia kryptimi, kai įtampa V_{gs} didinama virš atkirtos įtampos V_{th}. Taip pat šiame paveiksle parodyta talpa C_{gd}. Pastaroji talpa, didinant V_{gs}, nežymiai didėja, dėl palaipsniui didėjančio nuskurdinto sluoksnio storio, ties santaka. Veikiant V_{gs} įtampai diapazone nuo 2 V iki 3 V įtampai, C_{gd} talpa padidėja tik nežymiai nuo 1,1 fF iki 1,3 fF. Ir jos įtaka KJS grįžtamojo ryšio talpai C_{fb} bus minimali.

Matome, kad modeliavimo metu, tranzistoriui veikiant ties uždarymo riba, C_{gs} talpa yra apie 3,2 fF, kai atkirtos įtampa V_{th} =0,27 V, o C_{gd} apie 1,14 fF, ir gerai atitinka su gamintojo pateiktomis atitinkamai 3,5 fF ir 1,2 fF [86]. Gautas nedidelis skirtumas (apie 4 %) gali būti dėl matematinio modelio skaičiavimo paklaidų. Tačiau 4 % tranzistoriaus talpos įvertinimo netikslumas gali duoti tik 2 % „nuoseklaus“ triukšmo įvertinimo netikslumą, nes nuosekliojo baltojo triukšmo ENC_s, nuoseklaus mirgėjimo triukšmo $ENC_{1/f}$ ir nuoseklaus tranzistoriaus kanalo šiluminio triukšmo ENC_{ch} išraiškos tiesiogiai proporcingos C_{det}, C_{in}, C_{fb} talpų sumai.

3.2. Krūviui jatrių stiprintuvų vartojamoji galia

ATJ skiriamoji geba gaunama didelė, mažinant vaizdo taškų dydį. ATJ matricų dydžiai būna patys įvairiausi (0,1...20) mln. elementų. Toks didelis vaizdo taškų kiekis mažame plote, verčia projektuoti sistemas su maža

vartojamąja galia ir jos minimizavimas yra vienas iš pagrindinių keliamų reikalavimų projektuojant KJS.

ATJ vaizdo taškų arba kanalų skaičių galima apskaičiuoti pagal šią formulę:

$$K_{ch} = \frac{\pi D^2}{4 \cdot a^2}, \tag{3.13}$$

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

Jeigu vienas vaizdo taško dydis būtų 50×50 μm^2, o standartinio gaminamo lusto diametras 8 colių (20,32 cm), tuomet luste būtų galima išdėstyti net $13 \cdot 10^6$ vaizdo taškų. 130 nm KMOP technologijų leistina lusto galia ploto vienetui P_W yra nuo 1,2 iki 1,5 kW/m^2, nesant aušinimo [87]. Tuomet leistina galia vienam vaizdo taškui būtų galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$P_K = \frac{P_W \cdot \frac{\pi D^2}{4}}{K_{ch}} = P_W \cdot a^2 \approx 4\ \mu\text{W}. \tag{3.14}$$

Leistina galia vienam kanalui, kai vaizdo taško dydis 50×50 μm^2, yra apie 4 μW/kanalui. Taigi ATJ elektronikos vartojamoji galia yra labai ribojama. Viename vaizdo taške patalpinama analoginio signalo apdorojimo, analoginio signalo keitimo į skaitmeninį, programinio valdymo ir įvesties/išvesties grandynai.

Esant 130 nm KMOP technologijai, standartinė maitinimo įtampos V_{dd} yra 1,2 V. Tuomet visos paminėtos nuskaitymo elektronikos darbo srovė neturi viršyti 3,35 μA. Taigi tranzistorių darbo srovės turi būti mažos – keli mikroamperai ir atitinkamai nedideli srovės tankiai – (1...10) μA/μm^2. Tokie srovės tankiai gaunami, kai tranzistorių užtūros – ištakos įtampų V_{gs} vertės artėja prie jų atkirtos įtampos V_{th} reikšmių.

Literatūros duomenimis [77], ATJ nuskaitymo elektronikos analoginė dalis suvartoja apie (30...40) % visos vartojamosios galios, todėl projektuojamo KJS vartojamoji galia turi būti (1,2...1,5) μW.

3.3. Kokybės funkcija

KMOP krūviui jautraus stiprintuvo vartojamoji galia turi būti minimali, KJS tenkinant tokius reikalavimus:

1. KJS turi turėti kuo mažesnį ekvivalentinį triukšmų krūvį *ENC*, kadangi šis dydis nusako sistemos „signalas/triukšmas“ santykį. Minimalūs KJS reikalavimai *ENC* pateikti 2.4 poskyryje.

2. KJS registracijos trukmė τ_p sąlygoja sistemos laikinę skiriamąją gebą ir turi būti mažesnė už minimalų įėjimo impulsų pasikartojimo periodą. KMOP KJS reikalavimai τ_p parametrui, pateikti 2.4 poskyryje.

3. KJS turi turėti kuo mažesnę įėjimo C_{in}, aktyviojo taškinio jutiklio C_{det} talpą bei grįžtamojo ryšio C_{fb} talpą, nes šių talpų suma tiesiog proporcinga nuosekliojo *ENC* triukšmo dedamosioms. Šios triukšminės dedamosios detaliai nagrinėjamos 3.1 poskyryje. Antra vertus, norint gauti didesnį ir mažiau nuo parazitinių sujungimo talpų priklausantį KJS perdavimo koeficientą *K*, įėjimo talpa C_{in} turi būti kuo didesnė. *K* paklaidos priklausomybė nuo jutiklio ir sujungimo parazitinių talpų C^*_{det} ($C^*_{det}=C_{det}+C_{par}$) ir įėjimo talpos C_{in} išreiškiama tokia formule:

$$\Delta K = K_0\left(1-\frac{C_{in}}{C_{in}+C^*_{det}}\right), \tag{3.15}$$

čia K_0 – perdavimo koeficientas, esant nulinei jutiklio ir parazitinių sujungimų talpai C^*_{det}.

Kaip matome iš (3.15), kuo didesnė C_{in}, tuo mažesnės perdavimo koeficiento paklaidos dėl jutiklio ir jo sujungimo su registravimo sistema parazitinių talpų. Puslaidininkinių ATJ šios parazitinės talpos yra (10...50) fF eilės [70], todėl KJS įėjimo talpa C_{in} turi būti (0,1...0,5) pF eilės (esant 10 % perdavimo koeficiento paklaidai).

Dar gali būti papildomų reikalavimų, tokių kaip atsparumas jutiklio nuotėkio srovei $I_{leakage}$ (nes realūs detektoriai turi nuotėkį), išėjimo signalo forma (kad išėjimo signalas neturėtų išmetimų, osciliacijų, kurie tolesnės schemos gali būti suprasti, kaip jutiklio išėjimo signalai), minimalus lusto plotas, naudojamų tranzistorių užtūrų ilgiai ir pločiai, varžų ir kondensatorių nominalai ir t.t.

Visas šias sąlygas įgyvendinti pakankamai sudėtinga, nes tarp šių sąlygų yra nesuderinamumų, t. y. mažinant KJS vartojamąją galią, didėja „signalas/triukšmas“, didinant KJS įėjimo talpą C_{in}, aktyviojo taškinio jutiklio talpą C_{det}, didėja registravimo trukmė τ_p, o savo ruožtu didėjanti registravimo trukmė gali tiek mažinti, tiek didinti „signalas/triukšmas“ santykį. Tad *ENC* ir *P* parametrų optimizavimas yra matematiškai pakankamai sudėtingas.

Apibendrinant, galima apibrėžti tikslo funkcijų sistemą, kuri atrodys taip:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^3 ENC}{\partial\tau_p\partial C_{inTOT}\partial W}=0 \\ \dfrac{\partial P}{\partial W}=0 \end{cases}, \tag{3.16}$$

čia $C_{inTOT}= C_{det}+C_{in}+C_{fb}$.

(3.16) pirmoji lygtis leistų surasti ekvivalentinio triukšmų krūvio *ENC* minimumą nuo KJS registracijos trukmės τ_p, nuo KJS įėjimo C_{in}, grįžtamojo ryšio C_{fb} ir ATJ C_{det} talpų sumos, bei nuo įėjimo tranzistoriaus kanalo pločio *W*. Šis *ENC* minimumas padidintų KJS „signalas/triukšmas“ santykį. O tuo tarpu tikslo funkcijos (3.16) antroji lygtis, leistų surasti minimalią KJS galią, įėjimo tranzistoriaus pločio atžvilgiu.

Ankstesniame poskyryje (žiūr. 3.1 poskyrių) buvo nagrinėjamos KJS ekvivalentinio triukšmų krūvio *ENC* triukšminės dedamosios. Dvi nuosekliojo *ENC* triukšminės dedamosios: įėjimo tranzistoriaus kanalo šiluminio triukšmo ENC_{ch} ir mirgėjimo $ENC_{1/f}$ priklauso nuo KJS įėjimo tranzistoriaus pločio *W*. Kadangi šios funkcijos turi vieną bendrą kintamąjį *W*, tam tikslui įvedama šių dedamųjų geometrinės sumos funkcija $ENC_{ch+1/f}(W)$, kuri leis surasti vieną bendrą, optimalų įėjimo tranzistoriaus plotį W visoms šioms dedamosioms. Šių funkcijų geometrinė suma atrodys taip:

$$ENC_{ch+1/f}(W) = \sqrt{ENC_{ch}^2(W) + ENC_{1/f}^2(W)}\,. \tag{3.17}$$

Į (3.17) išraišką įstačius anksčiau aprašytas ENC_{ch} (3.4), $ENC_{1/f}$ (3.5) triukšminių dedamųjų bei įėjimo tranzistoriaus statumo g_m (3.6) išraiškas, gauname šių dviejų triukšminių dedamųjų geometrinės sumos išraišką:

$$ENC_{ch+1/f}(W) =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{e^2 kT_{ap}(C_{\det} + C_{in} + C_{fb})}{3q^2\tau_p\sqrt{2\mu C_{ox}\frac{W}{L}I_{ds}}}\right)^2 + \left(\frac{K_f}{2C_{ox}^2 WL}\frac{e^2(C_{det} + C_{in} + C_{fb})^2}{q^2}\right)^2}\,. \tag{3.18}$$

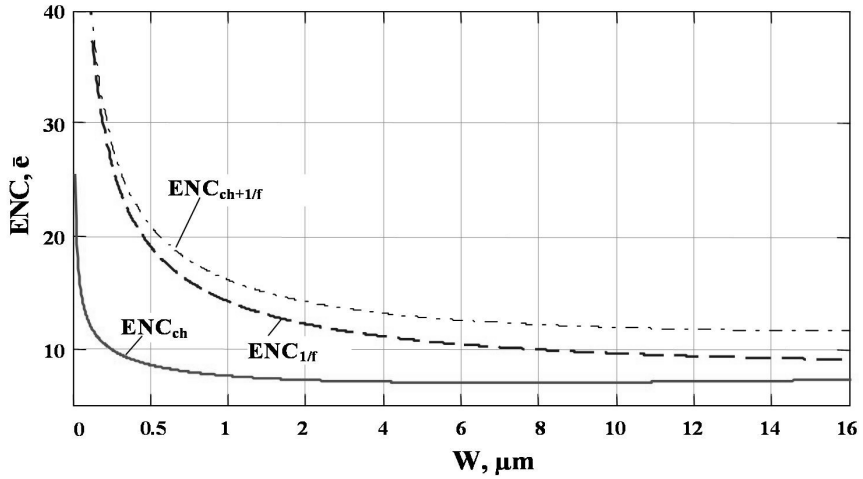
Norint sužinoti optimalų KJS įėjimo tranzistoriaus plotį *W*, reikia apskaičiuoti $ENC_{ch+1/f}(W)$ funkcijos minimumą, t. y. tam pločiui esant taške funkcijos išvestinė yra lygi nuliui:

$$\frac{\partial ENC_{ch+1/f}}{\partial W} = 0\,. \tag{3.19}$$

Funkciją $ENC_{ch+1/f}(W)$ išdiferencijavus *W* atžvilgiu, gauname, kad šios funkcijos minimumas yra, kai KJS įėjimo tranzistoriaus plotis *W* artėja link begalybės, t. y. $W \to \infty$. Taigi, kuo didesnis įėjimo tranzistoriaus kanalo plotis, tuo mažesnis gaunamas ekvivalentinis triukšmų krūvis KJS įėjime.

Funkcijoje $ENC_{ch+1/f}(W)$ (3.18) yra daug dydžių, tokių kaip K_f, C_{ox}, μ, kurie priklauso tik nuo konkrečios, krūviui jautriam stiprintuvui naudojamos, technologijos. Dydis C_{det} priklauso nuo naudojamo ATJ medžiagos ir jo storio.

Tipinės ATJ jutiklių talpos, kaip jau anksčiau buvo minėta, yra (10...50) fF eilės. Tuo tarpu C_{in} talpa, priklausanti nuo krūviui jautraus stiprintuvo įėjimo tranzistoriaus pločio W, yra žymiai mažesnė už C_{det} ir yra apie (3…6) fF. Tai bus įrodyta ir 4 skyriuje. Grįžtamojo ryšio talpa C_{fb}, projektuojant KJS, yra (1…8) fF, nes kuo mažesnė ši talpa, tuo gaunamas didesnis perdavimo koeficientas. Todėl talpų C_{det}, C_{in}, C_{fb} suma, pagrinde priklauso nuo C_{det} talpos.



3.6 pav. *Įėjimo tranzistoriaus kanalo šiluminio triukšmo dedamosios ENC_{ch}, mirgėjimo $ENC_{1/f}$ dedamosios ir jų geometrinės sumos priklausomybė $ENC_{ch+1/f}$ nuo įėjimo tranzistoriaus kanalo pločio W (skaičiavimai atlikti nMOP tranzistoriui su minimaliu kanalo ilgiu L=130 nm, C_{det}=30 fF ir T_{ap}=27 ºC)*

Šiuo teiginiu taip pat galima įsitikinti, atlikus $ENC_{ch+1/f}(W)$ funkcijos grafinę analizę. KJS įėjimo tranzistoriaus kanalo šiluminio triukšmo dedamosios ENC_{ch}, mirgėjimo $ENC_{1/f}$ dedamosios ir jų geometrinės sumos priklausomybė $ENC_{ch+1/f}$ nuo įėjimo tranzistoriaus kanalo pločio W pavaizduota 3.6 paveiksle. Kaip matyti iš šio paveikslo, tiek ENC_{ch}, tiek $ENC_{1/f}$ dedamosios atvirkščiai proporcingos įėjimo tranzistoriaus kanalo pločiui, t. y. didinant W, KJS $ENC_{ch+1/f}$ triukšmai mažėja. Esant įėjimo tranzistoriaus kanalo pločiui W=130 nm, $ENC_{ch+1/f}$ gaunamas apie 40 ē, o kai W=12 µm, $ENC_{ch+1/f}$ sumažėja apie 3,5 kartus ir yra tik apie 12 ē.

Kaip matyti iš šių priklausomybių, minimumas yra ganėtinai stipriai išreikštas ir tranzistoriaus plotį, projektuojant krūviui jautrų stiprintuvą, galima pasirinkti vienos dekados ribose (1,2...12) µm, $ENC_{ch+1/f}(W)$ triukšmą pabloginant apie 20 %. Žinoma, norint gauti geresnę išeigą ir mažesnį lusto plotą bei kuo mažesnę KJS vartojamąją galią, būtina pasirinkti minimalaus užtūros pločio tranzistorių.

Tačiau didinant KJS įėjimo tranzistoriaus kanalo plotį W, didėja ir tranzistoriaus vartojamoji galia. Tranzistoriaus vartojamoji galia P_t yra aprašoma tokia formule:

$$P_t(W) = I_{ds0} \cdot W \cdot V_{ds}, \tag{3.20}$$

čia I_{ds0} yra tranzistoriaus darbo srovės tankis, V_{ds} – tranzistoriaus santaka – ištaka įtampa. Kaip matyti iš (3.20) lygybės, tranzistoriaus vartojamoji galia tiesiškai priklauso nuo kanalo pločio. Šios funkcijos minimumas

$$\frac{\partial P_t(W)}{\partial W} = 0 \tag{3.21}$$

gaunamas, kai tranzistoriaus plotis W yra artimas 0, t. y. $W \rightarrow 0$. Taigi, būtina surasti vieną bendrą, optimalų KJS įėjimo tranzistoriaus W, minimalaus ENC (3.19) ir minimalios P (3.21) atžvilgiu. Tam tikslui įvedama nauja KJS kokybės funkcija:

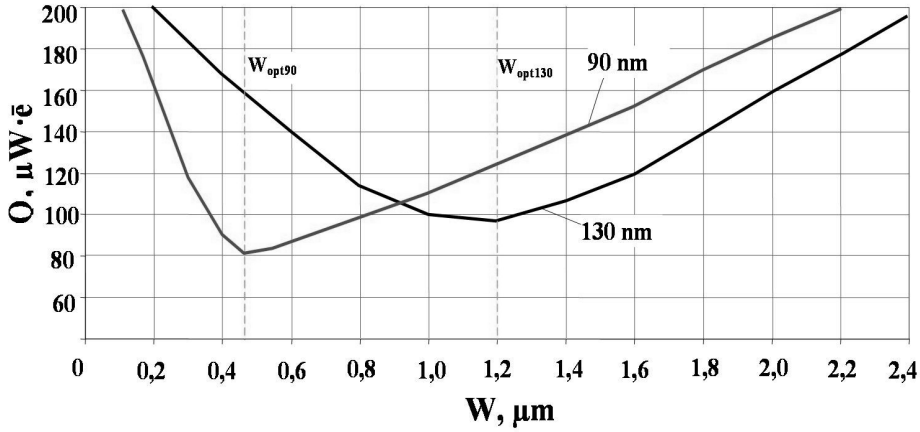
$$Q(W) = P(W) \cdot ENC_{tot}(W). \tag{3.22}$$

Ši ekvivalentinio triukšmų krūvio $ENC_{tot}(W)$ ir vartojamosios galios $P_t(W)$ sandauga suformuotų kvadratinę funkciją. Šios (3.22) funkcijos minimumo

$$\frac{\partial Q(W)}{\partial W} = 0 \tag{3.23}$$

paieška leistų surasti optimalų įėjimo tranzistoriaus kanalo plotį W KJS triukšmų ir galios atžvilgiu.

Įvertinus tai, kad KJS turi ir daugiau triukšminių dedamųjų, kurios nepriklauso nuo įėjimo tranzistoriaus pločio W (žr. 3.1 poskyrį), t. y. visas KJS ENC_{tot} yra randamas pagal ankščiau nurodytą (3.9) formulę, funkcija $ENC_{tot}(W)$ turės tokį pat kitimo pobūdį kaip ir $ENC_{ch+1/f}(W)$ funkcija. Todėl (3.23) funkcijos minimumo radimui buvo naudojamas grafinis sprendimo būdas, t. y. buvo sudauginti $ENC_{tot}(W)$ funkcijos ir $P(W)$ funkcijos grafikai. Tokios Q kokybės funkcijos priklausomybės nuo įėjimo tranzistoriaus kanalo pločio W, esant skirtingoms 130 nm, 90 nm technologijoms, pavaizduotos 3.7 paveiksle. Šios funkcijos yra kvadratinio pobūdžio su vienu globaliu minimumu, kuris ir atitinka optimalų tranzistoriaus plotį minimalios galios ir minimalių triukšmų atžvilgiu. 130 nm technologijos atveju KJS kokybės funkcijos minimumas yra apie 98,4 μWē, kai optimalus įėjimo tranzistoriaus plotis W_{opt} yra apie (1...1,2) μm ribose, 90 nm tranzistoriaus ilgio technologijoje, minimumas yra 80 μWē, o W_{opt} – apie (430...450) nm.



3.7 pav. *KJS kokybės funkcijos Q priklausomybė nuo įėjimo tranzistoriaus kanalo pločio W, esant 130 nm, 90 nm technologijos tranzistoriams (kai ATJ talpa C_{det}=30 fF, aplinkos temperatūra T_{ap}=27 ºC)*

Kaip matyti 3.7 paveiksle, kokybės *Q(W)* funkcijos įvedimas, ne tik leistų surasti optimalų įėjimo tranzistoriaus plotį ekvivalentinio triukšmų krūvio ir vartojamosios galios atžvilgiu, bet ir palyginti skirtingų technologijų ir skirtingų schemotechninių sprendimų KJS. Vėlesniuose skyriuose (žr. 4 skyrių) bus pateikiami gauti 90 nm, 130 nm, 0,25 µm technologijos KJP, kurių ekvivalentinis triukšmų krūvis ir vartojamoji galia atitinkamai yra lygūs 160 ē ir 0,5 µW (90 nm technologijos), 82 ē ir 1,2 µW (130 nm technologijos), 110 ē ir 2,7 µW (0,25 µm technologijos). Sulyginant 90 nm ir 130 nm KJP, galima pastebėti, kad kai 90 nm KJP vartojamoji galia yra 2,4 karto mažesnė už 130 nm KJP, ekvivalentinis triukšmų krūvis padidėja tik apie 2 kartus.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Detaliai nagrinėti krūviui jautrių stiprintuvų su KMOP tranzistoriais, triukšminiai parametrai, jų priklausomybės nuo pagrindinių krūviui jautrių priešstiprintuvių parametrų. Šie sąryšiai įgalintų pasirinkti tranzistorių matmenis bei vartojamą galią inžinerinio krūvio priešstiprintuvio projektavimo metu.

2. Optimalaus KJS įėjimo tranzistorių matmenų parinkimui, įvesta KJS kokybės funkcija, leidžianti parinkti optimalius tranzistoriaus matmenis, ekvivalentinių triukšmų krūvio ir vartojamosios galios atžvilgiu. KJS *ENC(W)* ir *P(W)* funkcijų sandauga duoda kokybės funkciją, kuri yra kvadratinio pobūdžio su vienu globaliu minimumu, kuris ir atitinka optimalų tranzistoriaus plotį.

130 nm technologijos atveju, optimalus įėjimo tranzistoriaus plotis W_{opt} yra apie (1...1,2) µm ribose. 90 nm tranzistoriaus ilgio technologijoje, W_{opt} – apie (430...450) nm.

3. Mirgėjimo triukšminė dedamoji proporcinga krūvininkų, esančių po užtūra skaičiui, t. y. kuo tranzistoriaus geometrija mažesnė, tuo šis triukšmas mažesnis. Modeliavimo metu, tranzistoriaus, kurio geometrija *W/L*=130/130 nm, mirgėjimo triukšmų spektrinis tankis yra apie 500 kartus didesnis, lyginant su *W/L*=2,4/0,24 µm geometrijos tranzistoriumi.

4. Mažėjant použtūrinio dielektriko sluoksniui ir veikiant tranzistoriaus V_{gs} įtampai, didėja krūvininkų koncentracija kanale, kas savo ruožtu, padidina krūvininkų pagavimo tikimybę bei sumažina mirgėjimo triukšminę dedamąją. *W/L*=2,4/0,24 µm geometrijos tranzistoriaus mirgėjimo triukšmų spektrinis tankis, esant použtūrinio dielektriko storiui 3,2 nm, net 12,2 karto mažesnis negu turint 5,2 nm storį.

5. *W/L*=2,4/0,24 µm geometrijos tranzistoriui veikiant ties atkirtos įtampa V_{th}, C_{gs} talpa kinta nuo 1,14 fF iki 3,2 fF ir gerai atitinka su gamintojo pateiktomis (nuo 1,2 fF iki 3,5 fF). O šis 4 % tranzistoriaus talpos įvertinimo netikslumas įrodo, kad ši skaičiavimo metodika praktiškai identiška realiams matavimams ir duos tik 2 % „nuoseklaus“ ekvivalentinio triukšmų krūvio įvertinimo netikslumą.

4

KMOP krūviui jautrių priešstiprintuvių projektavimo ir skaičiavimo rezultatai bei jų analizė

Šiame skyriuje projektuojami diferenciniai, pakopiniai KJP su nuotėkio srovės kompensavimo grandinėmis, plačiai taikytini elementariųjų dalelių registravimo bei medicininėse diagnostinėse sistemose. Tokių KJP privalumai – žemas triukšmo lygis, didelė greitaveika, o panaudotos pakopos leidžia sumažinti Milerio efektą, t. y. sumažinti įėjimo talpą ir padidinti perdavimo koeficientą, esant labai mažai vartojamajai galiai.

ENC nuotėkio srovės triukšminei dedamajai minimizuoti būtina naudoti nuotėkio srovės kompensavimo grandines, kurios minimizuoja ATJ nuotėkio srovės įtaką KJP. Todėl šiame skyriuje pateikiami nuotėkio srovės kompensavimo grandinės projektavimo ir skaičiavimo rezultatai, analizuojamos gautos funkcinės priklausomybės.

Šiame skyriuje taip pat pateikiama nauja ATJ analoginės elektronikos architektūra, kuri leistų sumažinti jutiklių nuotėkio sroves bei sumažinti krūviui jautrių priešstiprintuvių triukšmus, valdyti perdavimo koeficientą, atraminę įtampą, darbinę srovę, bei vartojamąją galią.

Visi šiame skyriuje skaičiavimai atlikti su SPICE programiniais paketais, naudojant IBM kompanijos 0,25 μm, 130 nm, 90 nm KMOP technologijų BSIM3V3 ir BSIM4 [90, 91] tranzistorių modelius. KJP skaičiavimo rezultatai

pateikiami įvairiose KJP aplinkos ir darbo režimų sąlygose. ATJ talpų C_{det} diapazonas buvo (0...200) fF, t. y. esant įvairaus storio CdZnTe jutikliams. Įėjimo signalų diapazonas Q_{det}=(1...20) kē, o aplinkos temperatūra T_{ap} buvo keičiama nuo -120 ºC iki +120 ºC. Ieškant *ENC* minimumo, pateikiami KJP modeliavimo rezultatai su nuotėkio srovės kompensavimo grandinėmis ir be jų, esant ATJ nuotėkio srovių diapazonui $I_{leakage}$=(-10...+10) nA.

Šiame skyriuje taip pat pateikiami KJP statistikiniai Monte-Karlo modeliavimo rezultatai, pagrindinių KJP parametrų išsibarstymo nustatymui, dėl jų elementų parametrų variacijų.

Modeliavimo metu gauti rezultatai atvaizduoti tokiomis priklausomybėmis, iš kurių analizės galima surasti KJP pagrindinių elektrinių parametrų gerinimo kelius.

Šiame skyriuje pateikiami rezultatai buvo pristatyti konferencijose: tarptautinėje konferencijoje „13th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors“ 2007 m., Vilniuje, tarptautinėje konferencijoje „Mechatronic Systems and Materials“ 2007 m., Kaune, tarptautinėse konferencijose „Elektronika“ 2006 m., 2007 m., 2008 m., Vilniuje, jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2006 m., Vilniuje, jaunųjų mokslininkų konferencijose „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2007 m., 2008 m., Vilniuje, bei publikuoti šiuose moksliniuose leidiniuose: [2A–4A, 7A, 10A, 14A]

4.1. Diferencinio, pakopinio krūviui jautraus priešstiprintuvio projektavimas su aktyviojo taškinio jutiklio nuotėkio srovės kompensavimo grandine

KJP panaudotas diferencinis, pakopinis stiprintuvas pavaizduotas 4.1 paveiksle. Diferencinio stiprintuvo išėjime gaunamas signalas yra dviejų įėjimo signalų skirtumas. Ši stiprintuvo savybė plačiai taikoma minimizuojant maitinimo šaltinių, srovių atsitiktinių fliuktuacijų sukeliamus trukdžius. Tokio tipo stiprintuvai naudojami ten, kur reikia gauti didelį perdavimo koeficientą, t. y. didelį KJP jautrumą ir kur reikalinga galimybė varijuoti KJP išėjimo signalo amplitudę, atraminės įtampos V_{offset} dėka.

Šis priešstiprintuvis sudarytas iš įėjimo NMOP tranzistorių poros T1A ir T1B, apkrovos PMOP tipo tranzistorių T3A ir T3B poros bei pakopinių NMOP tranzistorių T2A ir T2B. Naudojama pakopa, leidžia padidinti KJP perdavimo koeficientą ir sumažinti Milerio efektą, t. y. KJP įėjimo talpą C_{in}, kuri gauta artima T1A tranzistoriaus C_{gd} talpai:

$$C_{in} \approx 3C_{gd} . \tag{4.1}$$

Modeliavimo metu, kai įėjimo tranzistoriaus geometrija W/L=1,2 µm/130 nm (žr. 3.1.2 poskyrį), o atkirtos įtampa V_{th}=0,27 V, C_{gd} talpa gaunama apie 1,14 fF, o tuo tarpu diferencinio pakopinio stiprintuvo įėjimo C_{in} talpa yra apie 3,5 fF.

Nepanaudojus pakopų, įėjimo C_{in} talpa yra keliasdešimt kartų didesnė už C_{gd} talpą. Ši talpa priklauso nuo diferencinio, pakopinio stiprintuvo stiprinimo A koeficiento ($A >> 1$) ir yra lygi:

$$C_{in} = C_{gd}(A+1). \tag{4.2}$$

Didelė įėjimo talpa C_{in}, didina KJP registravimo trukmę τ_p ir ekvivalentinį triukšmų krūvį *ENC* (žr. 3.1 poskyrį).

Projektuojant didelio jautrumo sistemas, būtinas didelis KJP perdavimo koeficientas. Tokio diferencinio, pakopinio stiprintuvo perdavimo koeficientas A_{DC} žemų dažnių srityje išreiškiamas tokia formule:

$$A_{DS} \approx \frac{-g_{mT1A}}{g_{dsT1A} \cdot \dfrac{g_{dsT2A}}{g_{mT2A}} + g_{dsT3A}}, \tag{4.3}$$

čia g_{mT1A} ir g_{dsT1A} tranzistoriaus T1A atitinkamai statumas ir laidumas; g_{mT2A} ir g_{dsT2A} atitinkamai tranzistoriaus T2A, g_{dsT3A} apkrovos tranzistoriaus T3A laidumas.

(4.3) lygybė detaliai išvesta ir pateikta šios disertacijos A priede. Iš (4.3) lygybės galima daryti išvadą, kad KMOP diferencinio, pakopinio stiprintuvo stiprinimas žemų dažnių srityje priklausys ne tik nuo įėjimo tranzistoriaus T1A kanalo matmenų W/L santykio, bet ir nuo pakopinio tranzistoriaus T2A laidumo g_{mT2A} ir statumo g_{dsT2A} santykio. Esant sąlygai

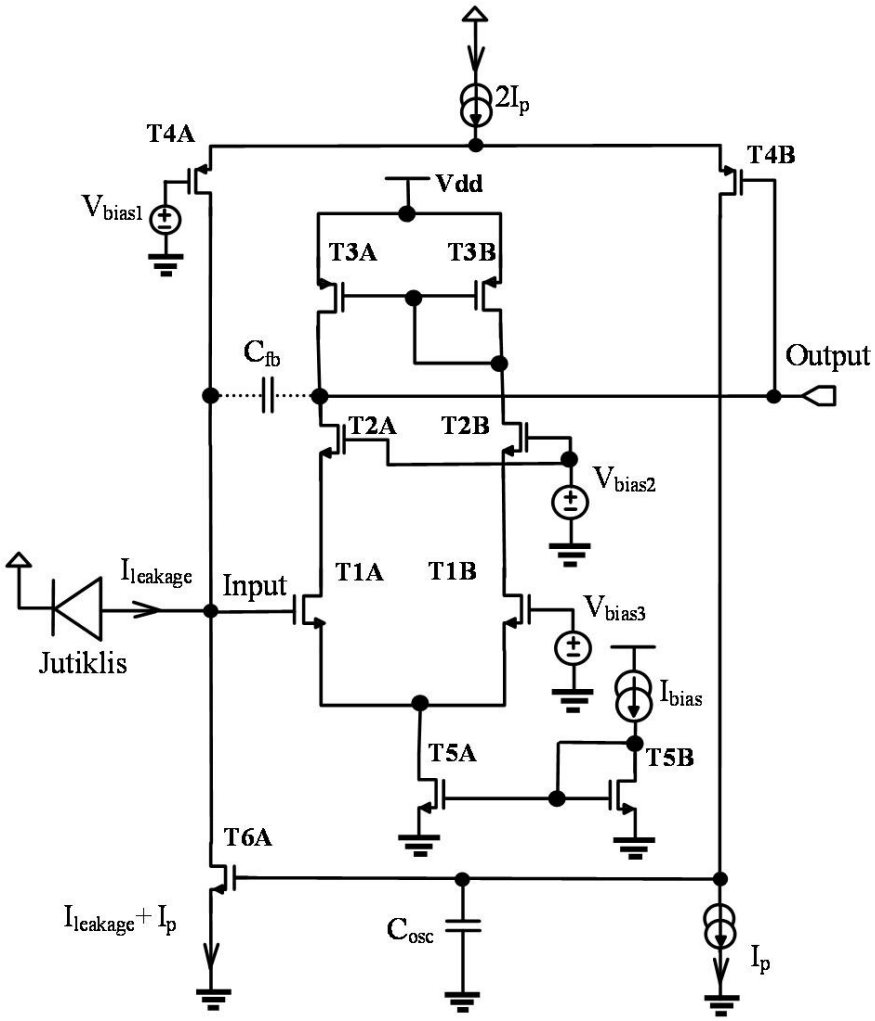
$$\frac{g_{dsT2A}}{g_{mT2A}} << 1, \tag{4.4}$$

KMOP diferencinio, pakopinio stiprintuvo stiprinimas žemų dažnių srityje bus maksimalus. Toks tranzistoriaus statumas gaunamas, kai tranzistoriaus kanalo plotis W žymiai didesnis už kanalo ilgį L, taip pat šie pakopiniai tranzistoriai, didinantys perdavimo koeficientą, jautrūs triukšmams, todėl jų geometrija parenkama artima įėjimo T1A ir T1B tranzistoriams.

Valdant T2A ir T2B tranzistorių statumus bei laidumus, galima valdyti ir KJP perdavimo koeficientą. Šis valdymo principas pateikiamas 4.2 poskyryje.

3 skyriuje, buvo detaliai aprašyta mūsų naujai įvesta KJP kokybės funkcija, leidžianti surasti optimalų KJP įėjimo tranzistoriaus plotį, minimalių triukšmų ir galios atžvilgiu. Buvo gauta, kad optimali įėjimo tranzistoriaus geometrija, kai KJP 90 nm – W/L=450 nm/90 nm, kai KJP 130 nm – W/L=1,2 µm/130 nm.

Atlikus ir 0,25 μm technologijos kokybės funkcijos skaičiavimus, gauta, kad šios technologijos optimalus įėjimo tranzistoriaus turi būti *W/L*=2,4 μm/0,25 μm.



4.1 pav. *Diferencinis, pakopinis KJP su ATJ nuotėkio srovės kompensavimo grandine*

KJP grįžtamojo ryšio eksponentinė laikinė konstanta τ_d yra lygi grįžtamojo ryšio talpos C_{fb} ir varžos R_{fb} sandauga. Tai trukmė, kuris nusako per kiek laiko priešstiprintuvis grįžta į pradinę padėtį ir yra nustatomas iš vidutinio signalų pasikartojimo dažnio f_s. Kad priešstiprintuvis nebūtų išvestas iš darbo taško dideliu kiekiu vienas po kito besikartojančių impulsų, jo integravimo konstanta

turi būti arba apie 10 kartų mažesnė už dažnio f_s periodą [14]. Literatūros duomenimis [11, 27, 61], šią grįžtamojo ryšio laikinę konstantą siekiama gauti mažesnę nei <150 ns, t. y. C_{fb} ir R_{fb} sandauga turi būti mažesnė už 150 ns

B priede pateikiamas KJP perdavimo charakteristikos skaičiavimas, kuriame išvedėme matematinę KJP registracijos trukmės išraišką τ_p, nuo KJP pagrindinių parametrų, o 3.1 poskyryje įrodėme, kad egzistuoja optimali KJP registracijos trukmė τ_p, duodanti sumarinio ENC_{tot} minimumą. Buvo gauta, kad 90 nm technologijos KJP optimali registracijos trukmė τ_p yra lygi 35 ns, 130 nm technologijos – 45 ns, 0,25 μm – 50 ns. Todėl apkrovos tranzistorių T3A ir T3B geometrija apskaičiuota, siekiant gauti šias KJP registracijos trukmės τ_p reikšmes. 90 nm KJP apskaičiuoti apkrovos T3A ir T3B tranzistorių matmenys yra W/L=90 nm/540 nm.

ATJ veikiant padidinto radiacinio poveikio aplinkoje, ima didėti jutiklio nuotėkio srovės, kurios daro poveikį tiek KJP tiek perdavimo koeficientui, tiek triukšmams. Kaip jau ankščiau buvo minėta (žr. 3 skyrių), viena iš pagrindinių KJS *ENC* dedamųjų yra nuotėkio srovės triukšminė dedamoji, kuri sudaro apie 30% viso triukšmo. Todėl šiai triukšminei dedamajai sumažinti yra projektuojamos KJP nuotėkio srovės kompensavimo grandinės [61, 63]. Vienas iš pagrindinių šių nuotėkio srovių kompensavimo grandinių trūkumų didelis elementų kiekis, kuris sąlygoja didelę vartojamąją galią ir užimamą plotą luste. Kitas trūkumas yra tai, kad šios kompensavimo grandinės dažniausiai būna sukonfiguruotos vienai nuotėkio srovei ar vienam ATJ tipui, o dėl ilgalaikio radiacinio poveikio didėjanti nuotėkio srovė nėra įvertinama. Todėl būtina projektuoti mažos galios ir reguliuojamos nuotėkio srovės kompensacines grandines.

Jutiklio nuotėkio srovei sumažinti buvo suprojektuota nuotėkio srovės kompensavimo grandinė, kuri pavaizduota 4.1 paveiksle. KJP nuotėkio srovės grandinei ir grįžtamojo ryšio integravimui valdyti yra panaudotas srovės šaltinis $2I_p$. Jutiklio generuojami krūvio impulsai yra integruojami grįžtamojo ryšio kondensatoriumi C_{fb}, kurio dydis yra atvirkščiai proporcingas perdavimo koeficientui K. Grįžtamojo ryšio varžai R_{fb}, panaudoti T4A ir T4B PMOP tranzistoriai, veikiantys tiesinėje srityje. Šie tranzistoriai yra vienodų matmenų ir kai jie atviri, juose teka I_p srovė, tuomet jų statumai yra lygūs g_{mT4A}=g_{mT4B}=g_{mT4} ir grįžtamojo ryšio varža R_{fb} apskaičiuojama pagal tokią išraišką:

$$R_{fb} = \frac{1}{g_{mT4A}} + \frac{1}{g_{mT4B}} = \frac{2}{g_{mT4}}, \tag{4.5}$$

čia g_{mT4A} ir g_{mT4B} atitinkamai tranzistorių T4A ir T4B statumai.

Šių tranzistorių statumus galima valdyti srovės šaltiniu $2I_p$, taip parenkant tinkamą grįžtamojo ryšio R_{fb} varžą. Šios varžos valdymas, suteikia galimybę valdyti ir KJP išėjimo signalo grįžtamojo ryšio laikinę konstantą τ_d, kuri yra lygi:

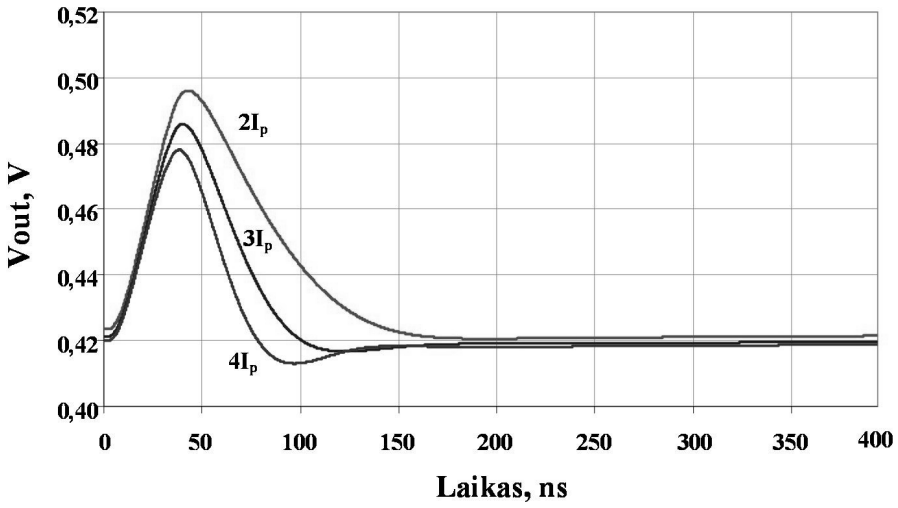
$$\tau_d = \frac{2C_{fb}}{g_{mT4}} = C_{fb}R_{fb}. \tag{4.6}$$

Išėjimo signalo τ_d valdymas srovės šaltiniu $2I_p$ pavaizduotas 4.2 paveiksle. Kaip matyti šiame paveiksle, didinant nuotėkio srovės kompensavimo srovę $2I_p$, didėja tranzistorių T4A ir T4B statumai ir taip mažėja KJP grįžtamojo ryšio varža R_{fb}.

Didinant kompensacinės srovės $2I_p$ šaltinį, didinamas statumas g_{mT4} ir taip sumažinama τ_d. Tačiau ir per mažos grįžtamojo ryšio laikinės konstantos parinkimas nėra pageidautinas. Kai τ_d artėja prie KJP išėjimo signalo priekinio fronto laikinės konstantos τ_r, sumažėja išėjimo signalo amplitudė (perdavimo koeficientas K) ir atsiranda signalo osciliacijos, t. y. pasireiškia grandyno nestabilumas. Kaip matyti iš 4.2 paveikslo, esant $4I_p$ nuotėkio kompensavimo grandinės srovei, jau pastebimas ir KJP išėjimo signalo ypatumas: išėjimo signalas tampa bipoliu ir atsiranda signalo osciliacijos. Norint to išvengti – būtina sąlyga:

$$\tau_r << \tau_d. \tag{4.7}$$

Taigi, norint išvengti KJP išėjimo signalo osciliacijų, priekinio fronto išėjimo laikinė konstanta τ_r turi būti daug kartų mažesnė už išėjimo signalo grįžtamojo ryšio laikinę konstantą τ_d. Ši KJP sąlyga išvesta B šio darbo priede.



4.2 pav. *KJP išėjimo signalas, esant skirtingam grįžtamojo ryšio srovės šaltiniui* $2I_p$

Kai tranzistoriai T4A ir T4B yra atviri, įkraunamas kondensatorius C_{osc},

kuris atidaro tranzistorių T6A, o šis yra suderintas taip, kad juo tekėtų $I_p + I_{leakage}$ srovė. Taigi, nuotėkio srovė $I_{leakage}$ neintegruojama, o nukreipiama per T6A tranzistorių link žemės potencialo, taip minimizuojant nuotėkio srovės triukšminę dedamąją.

Kadangi KJP nuotėkio srovės kompensavimo grandinės I_p srovė yra tokios pat eilės kaip ir nuotėkio $I_{leakage}$ srovė, t. y. apie (1...100) nA, o esant 130 nm technologijos maitinimo įtampai V_{dd}=1,2 V, tokios nuotėkio srovės kompensavimo grandinės vartojamoji galia irgi yra nanovatų dydžio, o PMOP tranzistorių T4A ir T4B suformuojama grįžtamojo ryšio varža R_{fb} yra šimtai, dešimtys megaomų. Pavyzdžiui 130 nm technologijos KJP modeliavimo metu gaunama R_{fb} varža yra (80...150) MΩ intervale.

Tačiau KJP nuotėkio srovės kompensavimo grandinės grįžtamajame ryšyje atsiranda nauja laikinė konstanta, kuri lygi:

$$\tau_{osc} = \frac{C_{osc}}{g_{mT6A}}, \tag{4.8}$$

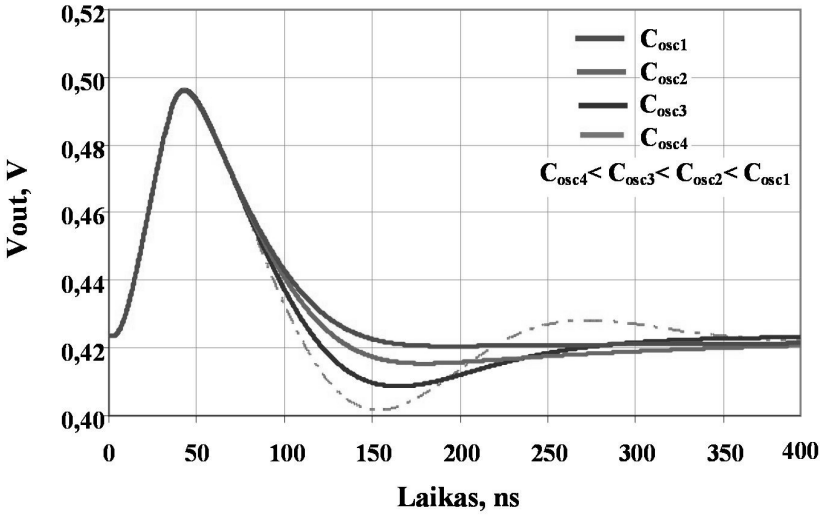
čia g_{mT6A} tranzistoriaus T6A statumas.

4.3 paveiksle pavaizduota KJP išėjimo signalo priklausomybė nuo C_{osc} įkrovos kondensatoriaus kitimo. Mažinant C_{osc} talpą, ima ryškėti KJP išėjimo signalo osciliacijos. Šios τ_d ir τ_{osc} grįžtamojo ryšio laikinės konstantos bus KJP perdavimo funkcijos vienos iš polių. Kad šie poliai nedarytų įtakos vienas kitam ir grandinė būtų stabili, t. y. nebūtų signalo osciliacijų, turi būti tenkinama tokia sąlyga:

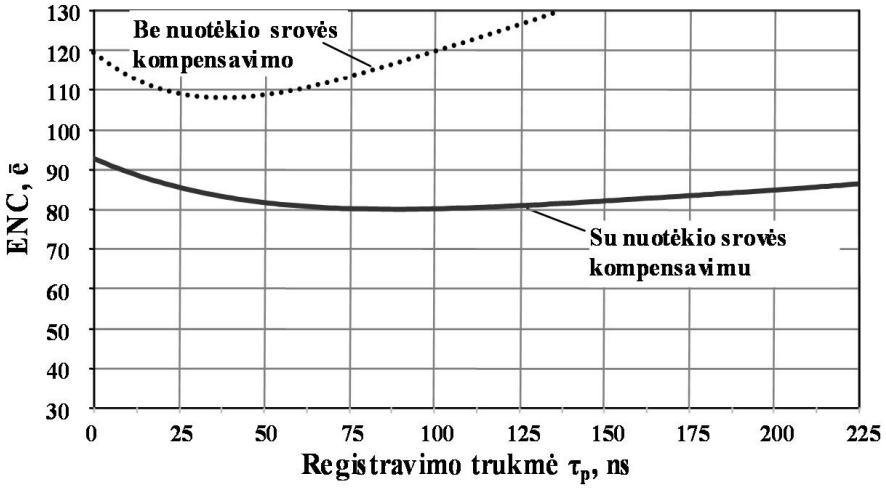
$$\frac{2C_{fb}}{g_{mT4}} << \frac{C_{osc}}{g_{mT6A}}. \tag{4.9}$$

Iš (4.9) formulės seka, kad norint išvengti išėjimo signalo osciliacijų, kurios stebimos 4.3 paveiksle, C_{osc} turi būti žymiai didesnė už C_{fb}, nes tranzistorių T4A, T4B ir T6A statumai yra panašaus dydžio. Atliekant 130 nm technologijos KJP nuotėkio srovės kompensacinės srovės skaičiavimus ir modeliavimus gauta, kad esant grįžtamojo ryšio C_{fb} talpai diapazone (1...2) fF, išėjimo signalo osciliacijų išvengiama, kai C_{osc} yra diapazone (120...130) fF.

4.4 paveiksle pavaizduota ENC priklausomybė nuo registravimo trukmės τ_p. Modeliuojant KJP be nuotėkio srovės kompensavimo grandinės, gaunama kvadratinė priklausomybė su ENC minimumu, lygiu 108 ē. Tačiau panaudojus nuotėkio srovės kompensavimą, minimizuojama dešinioji šios kreivės pusė (nuotėkio srovės dedamoji) ir minimalus ENC gaunamas apie 82 ē. Taigi, nuotėkio srovės kompensavimo grandinė sumažina ENC 26 %. Modeliuojant 90 nm technologijos KJP be nuotėkio srovės kompensavimo grandinės ENC gaunamas apie 195 ē, su nuotėkio srovės kompensavimo grandine triukšmas sumažinamas apie 22 %, iki 160 ē.



4.3 pav. *KJP išėjimo signalo kitimas laike, esant skirtingiems C_{osc} įkrovos kondensatoriams*



4.4 pav. *130 nm technologijos KJP ekvivalentinio triukšmų krūvio ENC priklausomybė nuo registravimo trukmės, kai KJP su nuotėkio srovės kompensavimo grandine ir be kompensacinės grandinės*

4.2. Aktyviųjų taškinių jutiklių krūviui jautrių priešstiprintuvių valdymo struktūrinė schema

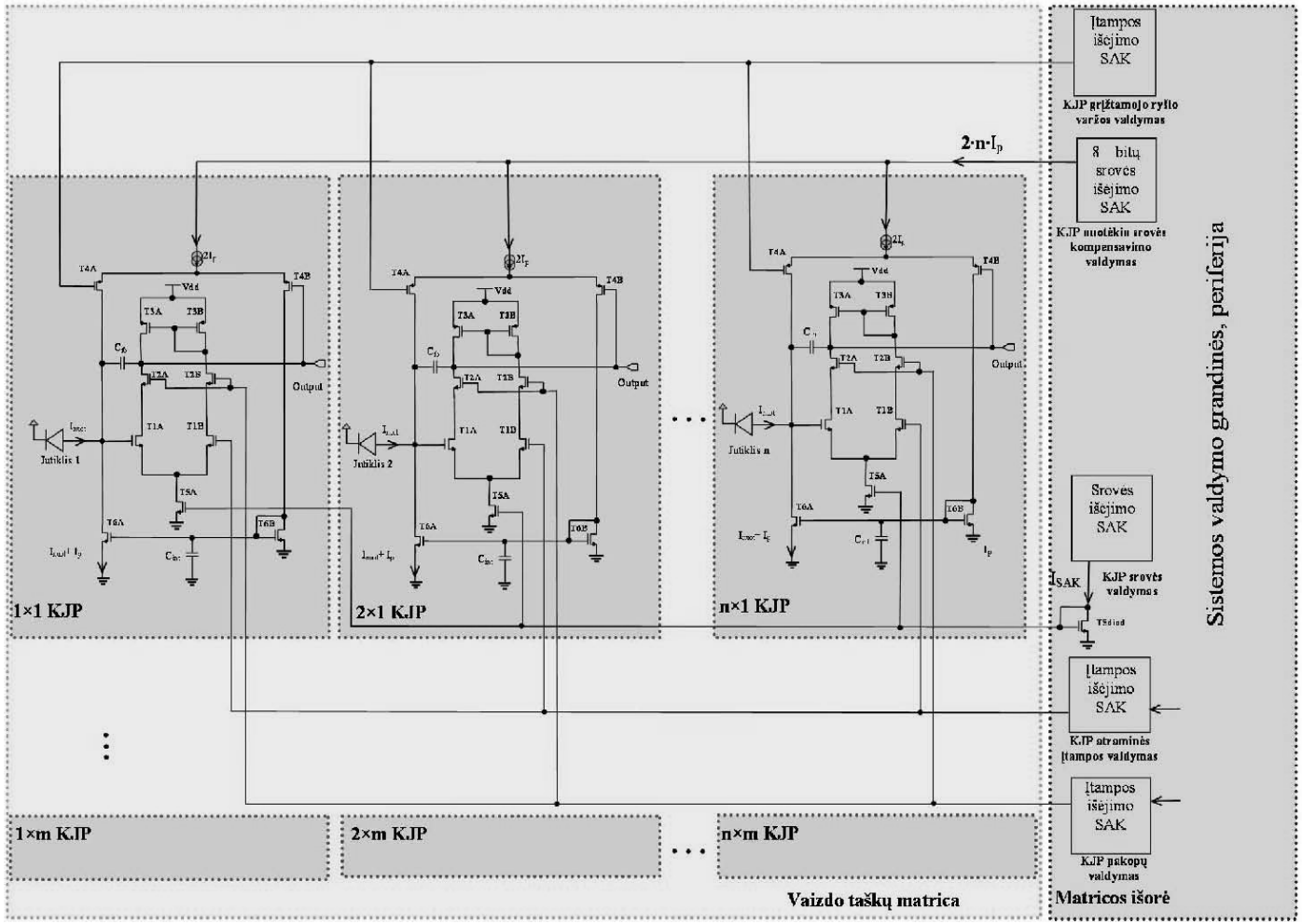
Nauja aktyviųjų taškinių jutiklių registruojančiosios elektronikos krūviui jautraus priešstiprintuvių valdymo struktūrinė schema pavaizduota 4.5 paveiksle. Šiame paveiksle, pilnai pavaizduota tik viena vaizdo jutiklių matricos eilutė, tačiau ATJ matrica gali turėti *m* eilučių. Vienoje vaizdo taškų matricos eilutėje gali būti *n* vaizdo taškų, t. y. vaizdo taškų matrica gali būti sudaryta iš *n* stulpelių. Visos ATJ vaizdo taškų matricos dydis yra $n \times m$ dydžio, tiek pat sistemoje yra ir KJP, kurių valdymo grandynai yra vaizdo taškų matricos išorėje.

Kaip jau anksčiau buvo minėta (žr. 4.1 poskyrį), KJP projektuojamas su nuotėkio srovės kompensavimo grandine, kuri valdoma $2I_p$ srovės šaltiniu. Šis srovės šaltinis taip pat naudojamas ir KJP grįžtamojo ryšio integravimui valdyti. Nuotėkio srovės kompensavimo grandinės srovė $2I_p$ yra nustatoma iš vaizdo taškų matricos išorės, 8-bitų skaičius – analogas keitikliu (SAK) su srovės išėjimu. 8-bitų srovės išėjimo SAK panaudojimas srovės valdymui, leistų sukomutuoti 255 galimų KJP $2I_p$ srovės kombinacijų, t. y. nuo 0 nA iki 255 nA, kas 1 nA, o kiekvienos iš nuotėkio kompensavimo grandinių šakos I_p srovė būtų valdoma nuo 0 nA iki 128 nA. Toks nuotėkio srovės kompensavimo grandinės $2I_p$ srovės valdymas apimtų platų ATJ nuotėkio srovės diapazoną (žr. 2.4 poskyrį), leistų sumažinti KJP *ENC*, parinkti optimalią grįžtamojo ryšio varžą R_{fb} bei KJP grįžtamojo ryšio, eksponentinę laikinę konstantą τ_d. Šie grįžtamojo ryšio dydžiai taip pat valdomi matricos išorėje esančiu įtampos išėjimo SAK keitikliu, valdant T4A tranzistoriaus darbo režimus.

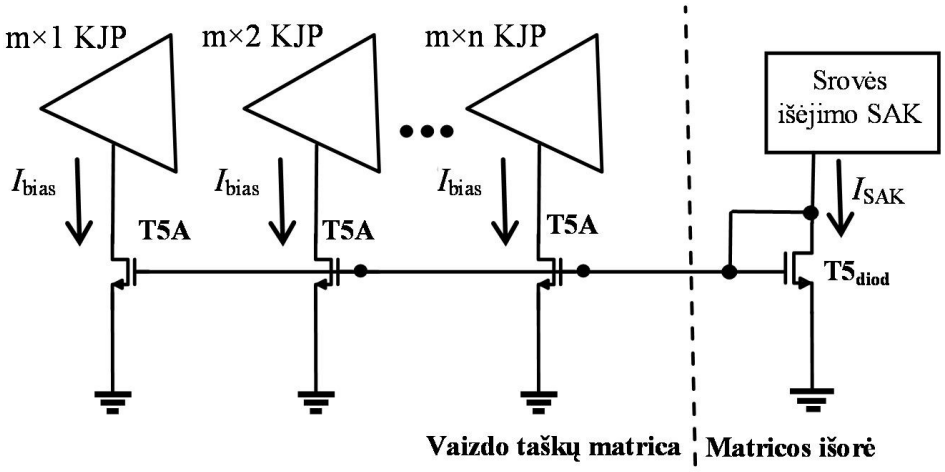
Projektuojant didelio jautrumo sistemas, būtinas didelis KJP perdavimo koeficientas *K*. Šis koeficientas valdomas iš vaizdo taškų matricos išorės, įtampos išėjimo SAK (žr. 4.5 paveikslą), valdant pakopinių tranzistorių T2A ir T2B statumus ir laidumus. Toks tranzistorių darbo režimų valdymas, suteiktų galimybę parinkti tinkamiausią KJP jautrumą bei tiesiškumą.

KJP atraminė V_{offset} įtampa taip pat yra valdoma matricos išorėje esančiu įtampos išėjimo SAK keitikliu (žr. 4.5 paveikslą) ir suteikia galimybę KJP išėjimo signalą valdyti *y* ašies atžvilgiu. Tokia atraminės V_{offset} įtampos variacija leidžia parinkti tinkamą KJP išėjimo signalo amplitudę komparatorių slenksčio atžvilgiu, kurie registravimo sistemoje yra ASK integrinių grandynų sudėtyje ir jungiami po KJP.

KJP I_{bias} srovės valdymo supaprastinta blokinė schema pavaizduota 4.6 paveiksle. I_{bias} srovė valdoma su vaizdo taškų matricos išorėje esančiu srovės išėjimo SAK.



4.5 pav. *Aktyviojo taškinio jutiklio registruojančiosios elektronikos krūviui jautraus priešstiprintuvių valdymo struktūrinė schema*



4.6 pav. *ATJ krūviui jautrių priešstiprintuvių I_{bias} srovės valdymas su vaizdo taškų matricos išorėje esančiu srovės išėjimo SAK*

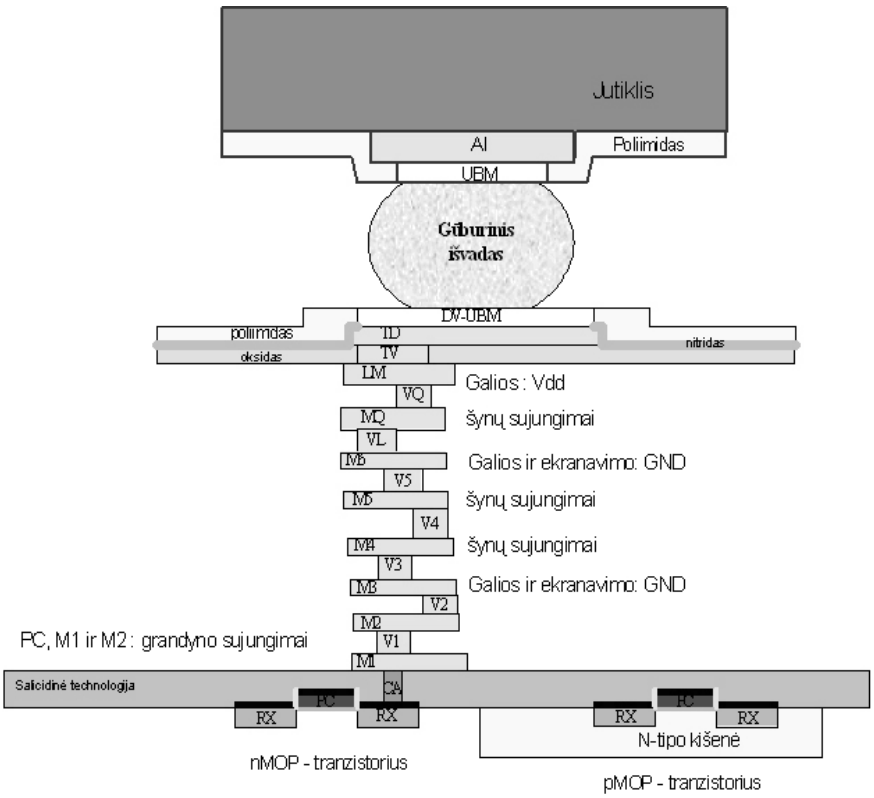
Kiekvienas KJP turi srovę reguliuojantį tranzistorių T5A. Šie tranzistoriai kartu su vaizdo taškų matricos išorėje esančiu, diodiniame režime įjungtu, tranzistoriumi $T5_{diod}$ veikia „srovės veidrodžio“ režime. Tokiu būdu, I_{SAK} srovė yra proporcinga I_{bias} srovei ir ją valdo. Kai tranzistoriai T5A ir $T5_{diod}$ yra visiškai identiški, tuomet SAK generuojama srovė I_{SAK} yra lygi KJP I_{bias} srovei, t. y. $I_{SAK}=I_{bias}$. Kitaip tariant, kai iš matricos valdymo grandinių atėjęs dvejetainis kodas SAK keitiklyje sukomutuoja I_{SAK}=1 µA srovę, savo ruožtu, tokia pati srovė I_{bias}=1 µA tekės ir KJP. Esant KJP srovei I_{bias}=1 µA, o maitinimo įtampai V_{dd}=1,2 V, KJP vartojamoji galia bus apie 1,2 µW.

Pagrindinių KJP parametrų valdymas atliekamas su įtampos arba srovės išėjimo SAK. Kadangi, viename ATJ viename vaizdo taške yra projektuojami analogas – skaičius keitikliai (ASK), įvesties/išvesties, programinio valdymo grandynai. Šių SAK skiltiškumui parinkti, būtina atlikti detalius skaičiavimus ir modeliavimus, atsižvelgiant į norimą gauti KJP parametrų tikslumą, projektuojamų ATJ vaizdo taškų dydį.

4.3. 130 nm krūviui jautraus priešstiprintuvio modeliavimo ir skaičiavimo rezultatai

4.3.1. 130 nm KMOP krūviui jautraus priešstiprintuvio technologija

Krūviui jautrių priešstiprintuvių skaičiavimas atliktas naudojant 130 nm užtūros ilgio SCN013 CMRF8SF integrinių schemų gamybos technologiją, naudojamą IBM kompanijos [86, 88]. Šios technologijos skersinis pjūvis parodytas 4.7 paveiksle, NMOP ir PMOP tranzistorių BSIM4 modeliai pateikti šio darbo C1 priede.



4.7 pav. *SCN013 CMRF8SF technologijos (žemiau gūburinio išvado) ir jutiklinės sistemos (aukščiau gūburinio išvado) skersinis pjūvis. Čia PC – polisilicio sluoksnis, RX – aktyvusis silicio sluoksnis, M1 – M6, MQ, LM – aštuoni metalų sluoksniai, VX – perėjimų kiaurymės, TV, TD – metalo sluoksniai kontaktinės aikštelės formavimui, DV arba UMB – galutinė trijų metalų sluoksnių kontaktinė aikštelė*

4.1 lentelėje pateikti pagrindiniai šios technologijos parametrai.

4.1 lentelė. *130 nm SCN013 technologijos pagrindiniai parametrai*

Technologija	SCN013 CMRF8SF
Litografija	130 nm
Padėklas	Epitaksinis p- elektrinio laidumo
Kanalo plotis L	125 nm
Užtūros tipas	polisilicis (p+ arba n+)
Užtūros dielektrikas	SiO_2
Užtūros oksido storis T_{ox}	3,2 nm
Šoninis dielektriko sluoksnis	Si_3N_4
Salicidinė technologija	$CoSi_2$
Tarpelementinė izoliacija	Griovelinė
Metalizacijų skaičius	6+2(Cu: 6×0,32 μm + 2×0,55 μm)
Tarpsluoksninė izoliacija	6+2 (6×SILK polimeras + 2×SiO_2)
Kontaktinės aikštelės metalų skaičius	2 (Al)+3 (Ti/Ni/Au)
Pasyvacija	Trisluoksnė (SiO_2/Si_3N_4/poliimidas)
Maitinimo įtampa	V_{dd}=1,2 V

CN013 CMRF8SF KMOP procese yra 8 (6 ploni – 0,32 μm storio ir 2 storų – 0,55 μm storio) vario (Cu) metalo sluoksniai (M1, M2, M3, M4, M5, M6, MQ, LM) ir TD, TV (Al) ir DV (Ti/Ni/Au) kontaktinės aikštelės sudarymui. Izoliacijai tarp metalų M1–M6 panaudotas SILK polimeras (aromatinis hidrokarbonas), kuris turi mažą dielektrinės skvarbos koeficientą ε_{SILK}, lygų 2,62. Šio polimero panaudojimas leidžia sumažinti tarp metalų susidarančias parazitines talpas 37 %, lyginant su SiO_2.

UBM – *(angl. under bump metallurgy)* metalizacija, jutiklio ir nuskaitymo elektronikos kontaktinių aikštelių sudarymui. UMB yra trisluoksnė, t. y. susideda iš trijų metalo sluoksnių. Apatiniui sluoksniui, naudojamas titanas (Ti), kuris užtikrina mažą kontaktinę varžą, gerai sukimba su aliuminiu (Al) ir sukuria pakankamai aukštą potencialinį barjerą, apsaugantį nuo difuzijos iš gūburinio išvado į IG. Vidurinysis – smulkiai grūdėtas nikelis (Ni), kuris gerai sukimba tiek su Ti, tiek su sulydymo gūburiniu išvadu. Viršutinis laidusis sluoksnis sudaromas iš metalo, turinčio mažą savitąją varžą, gerai besiderinančiu su kitais pasluoksniais ir apsaugančio kitus sluoksnius nuo oksidacijos. Viršutinis sluoksnis gaminamas iš aukso (Au).

ATJ ir nuskaitymo elektronikos pasyvacijai naudojamas poliimidas, kadangi šiame polimere su derintos įvairios savybės: aukštas atsparumas temperatūrai, geros dielektrinės ir elektroizoliacinės savybės bei atsparumas radiaciniam

spinduliavimui, kuris gali būti net iki 700 MRad [89].

4.3.2. 130 nm KMOP krūviui jautraus priešstiprintuvio modeliavimo ir skaičiavimo rezultatai

130 nm KMOP technologijos modeliuojamo krūviui jautraus priešstiprintuvio schema su jutiklio nuotėkio srovės kompensavimo grandine pateikta 4.1 poskyryje.

Skaičiavimai atlikti su Cadence PSpice ir Silvaco kompanijos SmartSpice programiniais paketais, naudojant KMOP tranzistorių BSIM4 modelius.

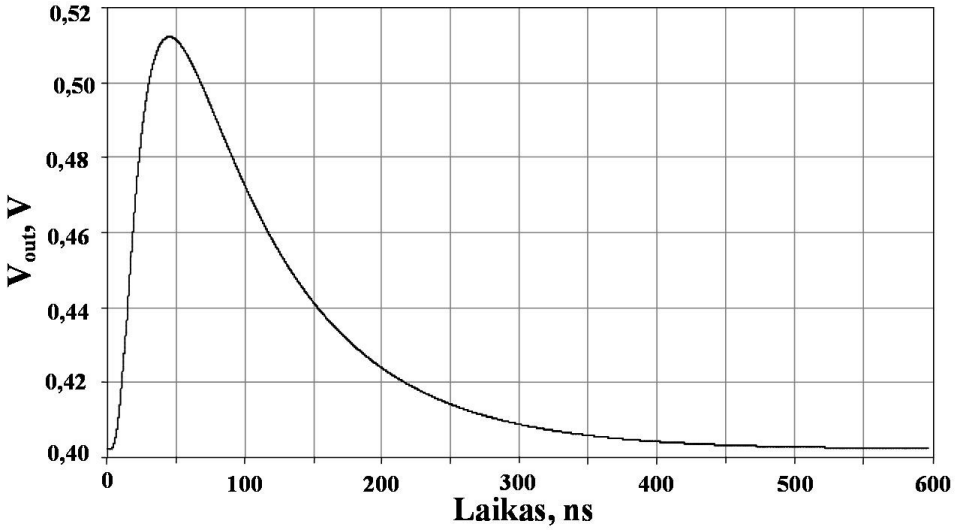
KJP įėjimo tranzistoriaus geometrija parinkta pagal 3 skyriuje pateikiamą metodiką. Pagal šią metodiką gauta, kad KJP įėjimo tranzistoriaus optimalus plotis *W*, *ENC* ir vartojamosios galios atžvilgiu yra 1,2 μm, kai tranzistoriaus ilgis *L*=130 nm. Pagrindiniai KJP elektriniai parametrai yra pateikti 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. *130 nm SCN013 CMRF8SF KJP pagrindiniai elektriniai parametrai*

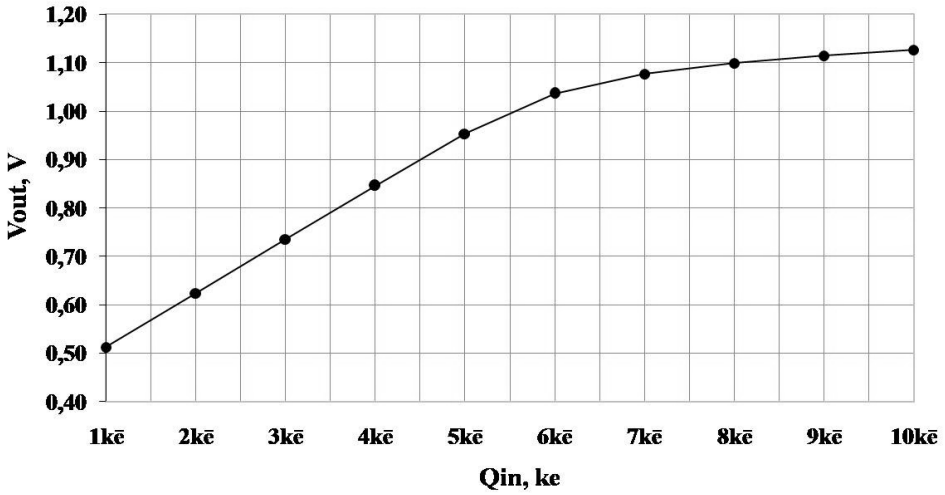
Technologija	SCN013 CMRF8SF
Maitinimo įtampa	V_{dd}=1,2 V
KJP srovė	1 μA
Vartojamoji galia *P*	1,2 μW
Įėjimo tranzistoriaus matmenys	W/L=1,2 μm/130 nm
Perdavimo koeficientas *K*	(115...167) mV/kē
Registracijos trukmė τ_p	≈45 ns
Grįžtamojo ryšio laikinė konstanta τ_d	≈80 ns
Ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC*	≈82 ē
Kokybės funkcija *Q(W)*	98,4 μWē

KJP išėjimo signalas parodytas 4.8 paveiksle, kai priešstiprintuvio įėjime yra 1000 ē dydžio δ srovės impulsas. Matome, kad signalas yra vienpolis, o registravimo trukmė τ_p, t. y. laikas, per kurį signalas jo išėjime padidėja nuo 10 % iki maksimumo, yra apie 45 ns, perdavimo koeficientas *K* yra lygus 115 mV/kē.

Norint įsitikinti, kad priešstiprintuvis veikia tiesiniu režimu, būtina modeliuoti plačiame įėjimo krūvių diapazone. Tuo tikslu, buvo atliktas KJP skaičiavimas kai Q_{det}=(1...10) kē, esant jutiklio talpai 30 fF ir aplinkos temperatūrai 27 ºC. Gautas netiesiškumas, esant įėjimo krūvio diapazonui 1...7 kē ir KJP maitinimo įtampai 1,2 V, yra apie ± 0,8 %. Toks KJP netiesiškumas leis tiksliai įvertinti detektuojamų elementariųjų dalelių energijas pakankamai plačiame įėjimo krūvio diapazone ir projektuoti priešstiprintuvius be tiesiškumą koreguojančių grandynų, taip sumažinant KJP vartojamąją galią bei naudojamų elementų skaičių.



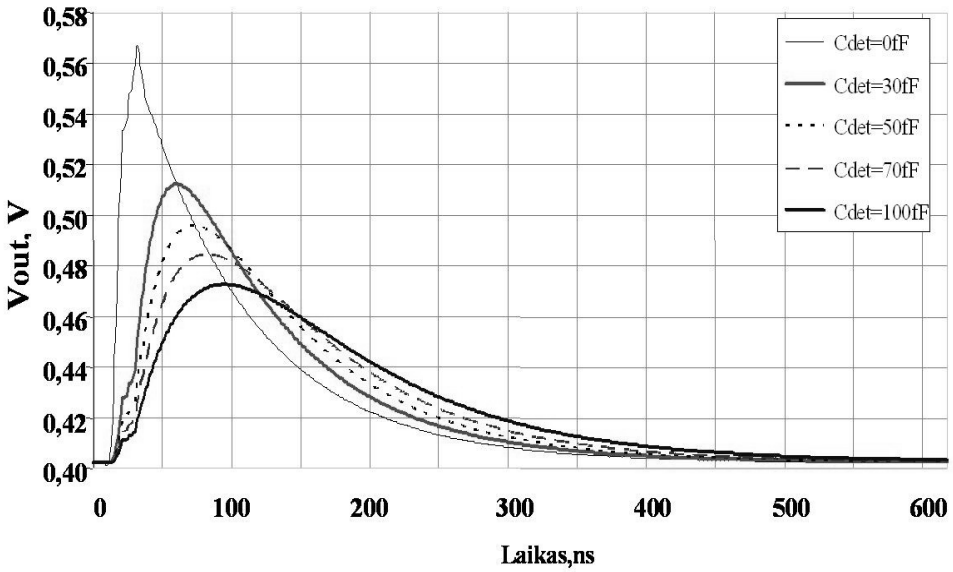
4.8 pav. *KJP išėjimo signalas, kai Q_{det}=1 kē, C_{det}=30 fF, T_{ap}=27 ºC, CdZnTe jutiklis*



4.9 pav. *KJP išėjimo signalo priklausomybė nuo įėjimo signalo Q_{det} dydžio, kai C_{det}=30 fF, T_{ap}=27 ºC, CdZnTe jutiklis*

4.10 paveiksle pavaizduoti KJP išėjimo signalai, esant skirtingoms CdZnTe ATJ C_{det} talpoms. Idealiu atveju, kai CdZnTe jutiklio talpa yra lygi 0 fF, gaunamas didžiausias perdavimo koeficientas K=167 mV/kē ir trumpiausia

registravimo trukmė τ_p=36 ns. Kai ATJ yra CdZnTe 300 μm storio, o jo talpa C_{det} lygi 30 fF, tai perdavimo koeficientas yra apie K=115 mV/ kē, o τ_p=45 ns. O kai jutiklio C_{det} lygi 50 fF, tai perdavimo koeficientas sumažėja apytikriai 2 kartus, lyginant su idealiu atveju, iki 87 mV/ kē, o registracijos trukmė pailgėja taip pat apie 2 kartus, iki 67 ns.



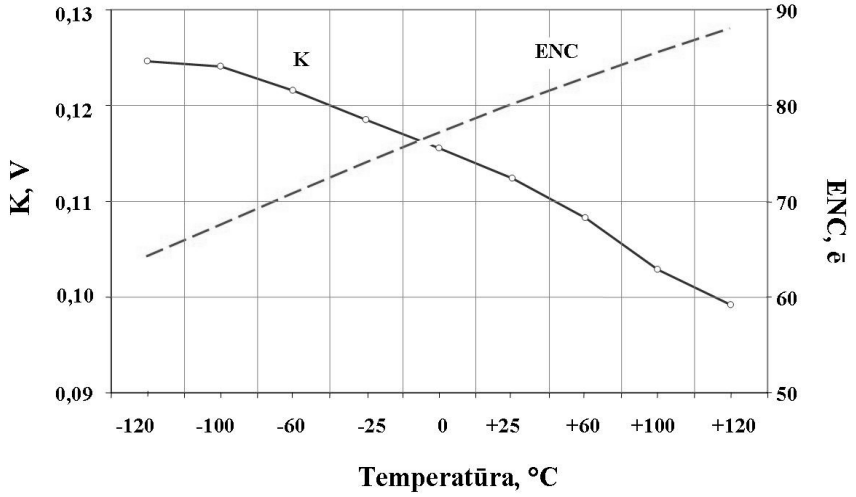
4.10 pav. *KJP išėjimo signalas laike, esant skirtingoms detektoriaus talpoms, kai įėjimo krūvis Q_{det}=1 kē, T_{ap}=27 ºC, CdZnTe jutiklis*

KJP perdavimo koeficiento K priklausomybė nuo temperatūros pateikta 4.11 paveiksle. Kylant temperatūrai, KJP perdavimo koeficientas mažėja. Esant -60 ºC, perdavimo koeficientas K=122 mV/kē, tačiau temperatūrai pakilus iki +60 ºC, jis sumažėja iki 108 mV/kē. Kaip matyti iš šio paveikslo, ši priklausomybė yra tiesinio pobūdžio ir gali būti aprašyta tiesine funkcija $K(T_{ap})$=116 mV/kē -0,1 mV/kē/ºC.

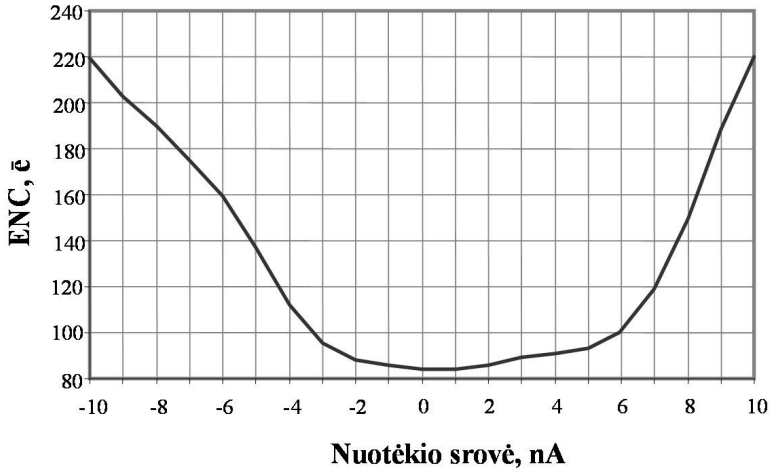
Kylant temperatūrai, mažėja ir KJP „signalas/triukšmas“ santykis. Iš 4.11 paveikslo galime matyti, kad didėjant aplinkos temperatūrai T_{ap}, auga KJP ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC*. Kai aplinkos temperatūra lygi -60 ºC, *ENC*=72 ē, o jai pakilus iki + 60 ºC, *ENC* padidėja iki 84 ē, t. y. apie 17 %. Šį temperatūrinį kitimą taip pat būtų galima aprašyti tiesine funkcija, kuri turės tokį pavidalą $ENC(T_{ap})$=76 ē + 0,1 ē/ºC.

ENC priklausomybė nuo nuotėkio srovės, panaudojus nuotėkio srovės kompensavimo grandinę, pavaizduota 4.12 paveiksle. Šiame paveiksle nuotėkio srovės kompensavimo grandinės kompensacinė srovė I_p yra apie 3 nA. Tokia kompensacinė srovė I_p yra artima realių puslaidininkinių taškinių jutiklių

nuotėkio srovėms [11, 14, 62, 63].



4.11 pav. *KJP perdavimo koeficiento K ir ekvivalentinio triukšmų krūvio ENC priklausomybės nuo aplinkos temperatūros, kai Q_{det}=1 kē, C_{det}=30 fF, T_{ap}=27 ºC, CdZnTe jutiklis*



4.12 pav. *KJP ekvivalentinio triukšmų krūvio ENC priklausomybė nuo ATJ nuotėkio $I_{leakage}$ srovės, kai Q_{det}=1 kē, C_{det}=30 fF, T_{ap}=27 ºC, CdZnTe jutiklis*

Nuotėkio srovė buvo modeliuojama diapazone nuo -10 nA iki +10 nA, esant 1 kē įėjimo krūviui, o *ENC* priklausomybė gaunama kvadratinio pobūdžio su minimu, kuris yra diapazone (-3...+6) nA ir lygus (82...100) ē. Toliau didinant

nuotėkio srovę, sparčiai didėja ekvivalentinių triukšmų krūvis, ir kai ji yra lygi ±10 nA, tai triukšmai padidėja apie 3 kartus ir yra lygūs 218 ē.

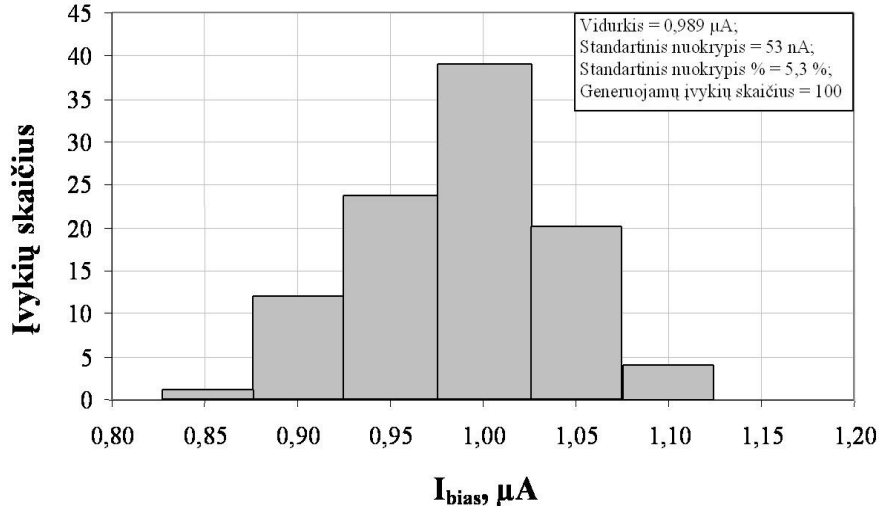
4.3.3. Krūviui jautraus priešstiprintuvio statistikiniai Monte Karlo modeliavimo rezultatai ir jų analizė

Gaminant mikroschemas KMOP ir GaAs technologijomis praktiškai identiški schemos elementai negaunami, dėl jų parametrų išsibarstymo. Todėl projektuojant KJP būtina žinoti pagrindinių parametrų kitimo ribas aprašančius dydžius: vidurkius, standartinius nuokrypius ir t.t. Nustatant šiuos parametrus plačiai taikomos statistikinės analizės metodai. Vienas iš pagrindinių statistinių modeliavimų analizės metodų, įtrauktų į SPICE modeliavimo programas, yra Monte Karlo. Šio metodo analizės metu programa daugybę kartų skaičiuoja schemos parametrus. Schemos elementų modelių parametrai yra keičiami pagal normalinio (Gauso) arba tolydų pasiskirstymo dėsnį apibrėžtose šių parametrų išsibarstymo ribose. Atsitiktinių skaičių generatorius modeliuoja elementų parametrų skaitinių verčių išsibarstymą. Tai atitinkamai veikia analizuojamos schemos pasirinktus skaičiuojamus dydžius. Taip modeliuotas teorinis eksperimentas nereikalauja kitų, sudėtingesnių ir imlesnių laikui grandyno tyrimo būdų.

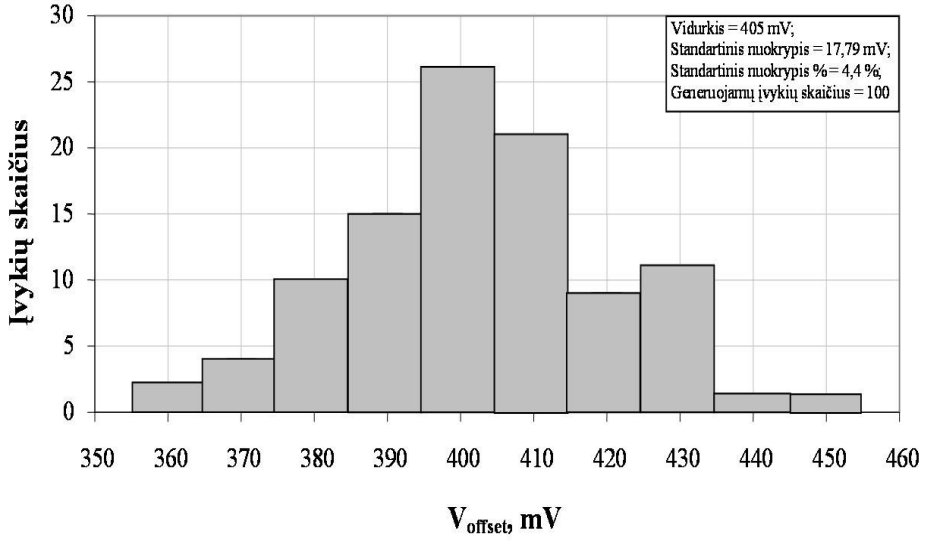
Monte Karlo metodu buvo sumodeliuoti pagrindinių KJP parametrų išsibarstymai: darbinės I_{bias} srovės (4.13 pav.), atraminės V_{offset} įtampos (4.14 pav.), perdavimo K koeficiento (4.15 pav.), ekvivalentinio triukšmų krūvio ENC (4.16 pav.).

Statistikinei Monte Karlo analizei buvo pasirinktas 100 generuojamų atsitiktinių įvykių. Gamintojas, pateikdamas tranzistorių modelius, pateikia ir pagrindinių parametrų, tokių kaip atkirtos įtampos V_{th}, pločio W ir ilgio L, KMOP tranzistorių použtūrinio oksido storio T_{ox}, kanalo nesutapimo parametrų standartines nuokrypius, matematinius vidurkius, jų galimo kitimo ribas (žr. C2 priedą). Pastaruosius statistikinius dydžius gamintojas pateikia apdorojęs didelį skaičių matavimo rezultatų.

4.13 paveiksle pavaizduota KJP darbinės srovės I_{bias} išsibarstymo histograma, kai I_{bias} srovė kito nuo 0,8 μA iki 1,2 μA. Šis srovės diapazonas buvo pasirinktas, atsižvelgiant į KJP galiai keliamus reikalavimus (žr. 3.2 poskyrį). Gauta, kad iš 100 sugeneruotų atsitiktinių įvykių, 24 įvykiai buvo srovės I_{bias} intervale [0,925 μA; 0,975 μA), 39 įvykiai [0,975 μA; 1,025 μA), 20 įvykių [1,025 μA; 1,075 μA), likusios srovės ribos tesudaro 17 % generuojamų įvykių. Gautas srovės I_{bias} vidurkis m_{Ibias}=0,989 μA, standartinis nuokrypis σ_{Ibias}=53 nA arba $\sigma_{Ibias\%}$=5,4 %. Galime daryti išvadą, kad esant pasikliovimo intervalui [$m_{Ibias} - 3\sigma_{Ibias}$; $m_{Ibias} + 3\sigma_{Ibias}$], KJP darbinė srovė I_{bias} bus intervale [0,83 μA; 1,148 μA] su p=98 % tikimybe, o vartojamoji galia P su tokia pat tikimybe kis intervale [0,996 μW; 1,378 μW], esant maitinimo įtampai V_{dd}=1,2 V.



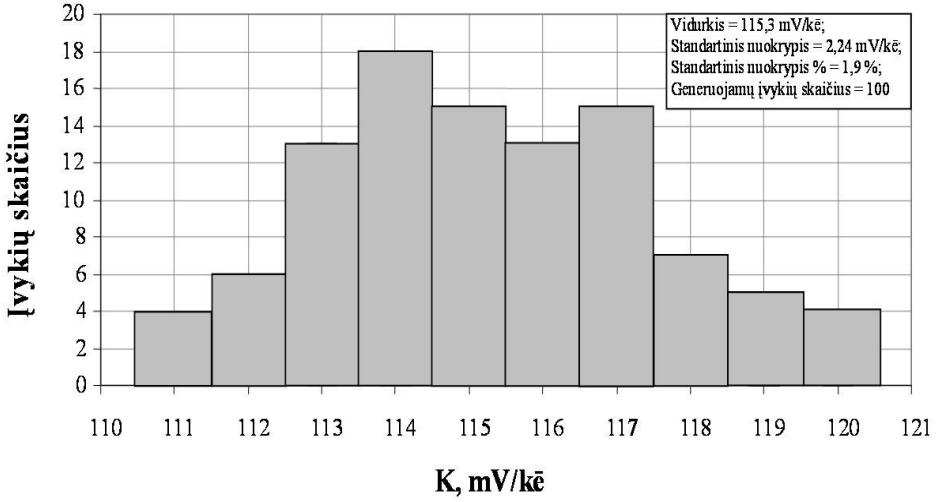
4.13 pav. *Monte Karlo statistikinė analizė: KJP darbinės I_{bias} srovės išsibarstymo histograma*



4.14 pav. *Monte Karlo statistikinė analizė: KJP atraminės V_{offset} įtampos išsibarstymo histograma*

4.14 paveiksle pavaizduota KJP atraminės įtampos V_{offset} išsibarstymo histograma. Šios atraminės įtampos išsibarstymo parametrai nulems

diskriminatoriaus slenksčio parinkimą, t. y. galimas slenksčio variacijas. Sumodeliavus gauta, kad iš 100 sugeneruotų atsitiktinių įvykių, 15 įvykių buvo įtampos intervale [385 mV; 395 mV), 26 įvykiai - [395 mV; 405 mV), 21 įvykių [405 mV; 415 mV), 9 įvykiai [415 mV; 425 mV), o likusieji te sudaro 29 %. Tikimybė, kad KJP V_{offset} įtampa bus diapazone [$m_{Voffset} - 3\sigma_{Voffset}$; $m_{Voffset} + 3\sigma_{Voffset}$] yra lygi 99 % , su matematiniu vidurkiu $m_{Voffset}$=405 mV, standartiniu nuokrypiu $\sigma_{Voffset}$=17,79 mV, $\sigma_{Voffset\%}$= 4,4 %. Iš procentinio standartinio nuokrypio galime spręsti, kad V_{offset} išsibarstymas yra nežymiai mažesnis, lyginant su KJP I_{bias} srove.

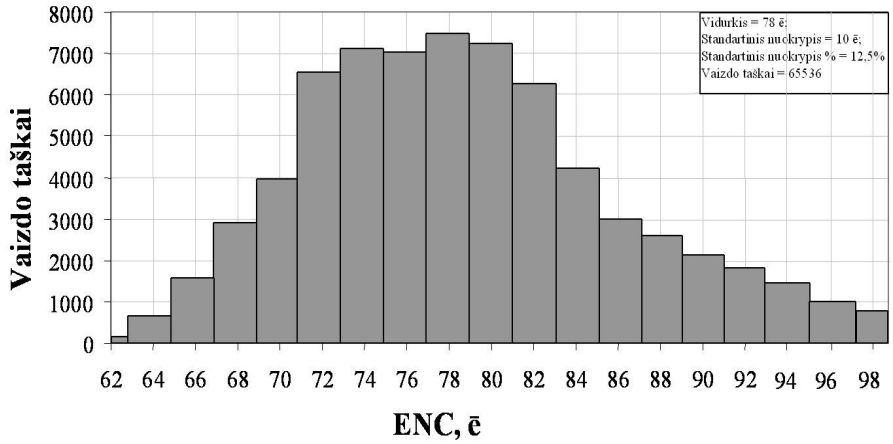


4.15 pav. *Monte Karlo statistikinė analizė: KJP perdavimo K koeficiento išsibarstymo histograma*

Maksimalus KJP perdavimo koeficientas gautas apie 115 mV/kē. Monte Karlo statistikinės analizės rezultatai pavaizduoti 4.15 paveiksle. Gautas matematinis vidurkis m_K=115,3 mV/kē, o standartinis nuokrypis nuo vidurkio σ_K=2,24 mV/kē, šio nuokrypio procentinė išraiška $\sigma_{K\%}$=5,4 %. Daugiausia įvykių – 18, buvo intervale [113,5 mV/kē; 114,5 mV/kē). Taigi, esant KJP perdavimo koeficiento variacijos intervalui [$m_K - 3\sigma_K$; $m_K + 3\sigma_K$], ir matematiniu vidurkiu m_K=115,3 mV/kē bei σ_K=2,24 mV/kē, tikimybė, kad K koeficientas bus šiame intervale yra lygi 98 %.

KJP erdvinę, laikinę skiriamąją gebą ir sistemos „signalas/triukšmas“ santykį nusako ekvivalentinis triukšmų krūvis įėjime *ENC*. Ankstesniuose skyriuose nustatėme šio dydžio funkcines priklausomybes nuo jutiklio ir KJP parametrų, tačiau projektuojant daugiakanalines sistemas reikia įvertinti ir šio dydžio išsibarstymo statistikinius duomenis. Buvo atlikta šio dydžio Monte Karlo

statistikinė analizė ATJ matricai, kurios dydis 256×256 (65536) vaizdo taškų. Generuojamų atsitiktinių įvykių skaičius buvo lygus vaizdo taškų skaičiui. Gauti rezultatai pavaizduoti 4.16 paveiksle. Apskaičiuota, kad *ENC* vaizdo jutiklių matricoje yra pasiskirstęs pagal Gauso (normalinį) pasiskirstymą, matematinis vidurkis m_{ENC}=78 ē, standartinis nuokrypis σ_{ENC}=10 ē, standartinis nuokrypis procentais $\sigma_{ENC\%}$=12,5 %. Daugiausia vaizdo taškų – 7453 buvo intervale [77 ē; 79 ē). Tikimybė, kad *ENC* bus intervale [$m_{ENC} - 3\sigma_{ENC}$; $m_{ENC} + 3\sigma_{ENC}$], yra lygi 99,94 %.



4.16 pav. *Ekvivalentinio triukšmų krūvio ENC Monte Karlo statistikinė analizė, 256×256 vaizdo taškų ATJ sistemai*

4.4. 90 nm krūviui jautraus priešstiprintuvio modeliavimo rezultatai ir jų analizė

Šiame poskyryje pateikti KJP modeliavimo rezultatai pagal 90 nm komercinę 90SRF IBM kompanijos technologiją, kurios tranzistorių užtūros dielektriko storis T_{ox}=2,5 nm, savitoji talpa C_{ox} – 14,8 fF/μm^2, maitinimo įtampa V_{dd}=+ 1,0 V. Naudojome standartu tapusius KMOP tranzistorių BSIM4 modelius ir HSPICE, Cadence PSpice ir Silvaco SmartSPICE programinę įrangą. PMOP ir NMOP 90 nm BSIM4 tranzistorių modeliai yra pateikti šio darbo C1 priede.

KJP schema tokia pat, kaip ir sukurtų bei suprojektuotų 4.1 poskyryje išdėstytais principais ir metodika. Įėjimo tranzistoriaus matmenys apskaičiuoti taip, kad KJP srovė būtų lygi 500 nA. Tokia srovė ir maža maitinimo įtampa +1,0 V sąlygoja labai mažą priešstiprintuvio vartojamąją galią *P*=0,5 μW/kanalui. Tranzistorių statumas yra (5...7) μSm, slenkstinė užtūros

įtampa (0,26 ...0,27) V, soties srovė (100...500) nA, tranzistorių užtūrų pločių ir ilgių diapazonas buvo apskaičiuotas ir gautas intervale nuo 90 nm iki 450 nm. Įėjimo tranzistoriaus geometrija gauta taikant 3 skyriuje pateiktą metodiką, ir yra lygi *W/L*=450 nm/90 nm.

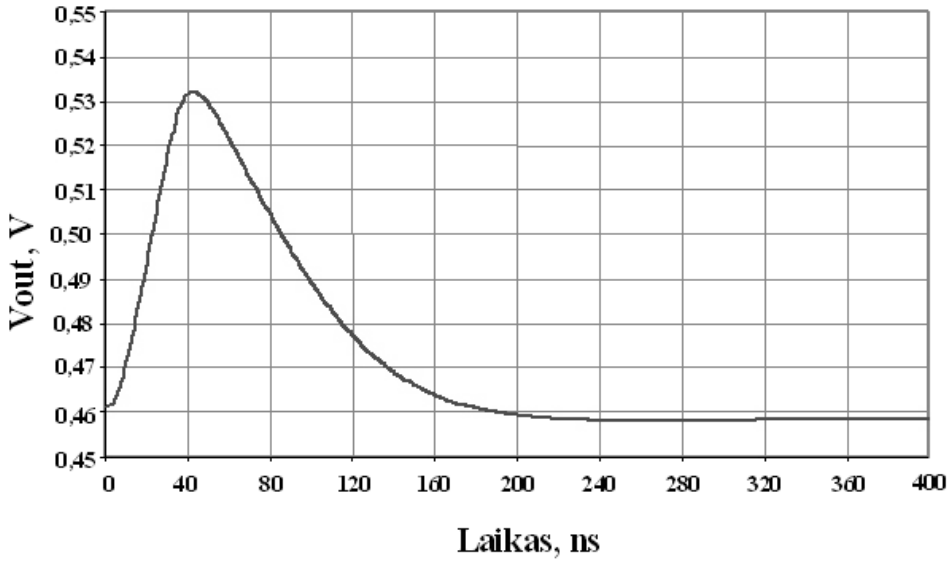
Priešstiprintuvio pagrindiniai elektriniai parametrai yra pateikti 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. *90SRF 90nm KJP pagrindiniai elektriniai parametrai*

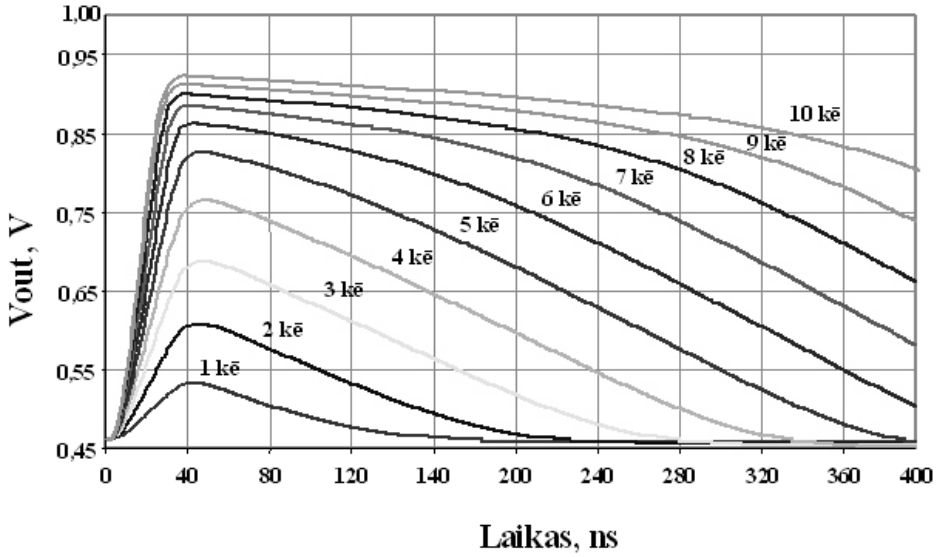
Technologija	90SRF 90 nm CMOS
Maitinimo įtampa	V_{dd}= +1 V
KJP srovė	500 nA
Vartojamoji galia *P*	500 nW
Įėjimo tranzistoriaus matmenys	W/L= 450 nm/90 nm
Perdavimo koeficientas *K*	(60...80) mV/kē
Registracijos trukmė τ_p	≈35 ns
Grįžtamojo ryšio laikinė konstanta τ_d	≈80 ns
Ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC*	≈160 ē
Kokybės funkcija *Q(W)*	80 μWē

Išėjimo signalas parodytas 4.17 paveiksle, kai įėjime yra 1 kē (160 aC), jutiklio talpa 30 fF, grįžtamojo ryšio talpa C_{fb} ir varža R_{fb} atitinkamai lygi 1 fF ir 80 MΩ. Matome, kad signalo forma yra vienpolio atsako su registravimo trukme $\tau_p \approx 35$ ns, o perdavimo koeficientas *K* lygus 71 mV/kē.

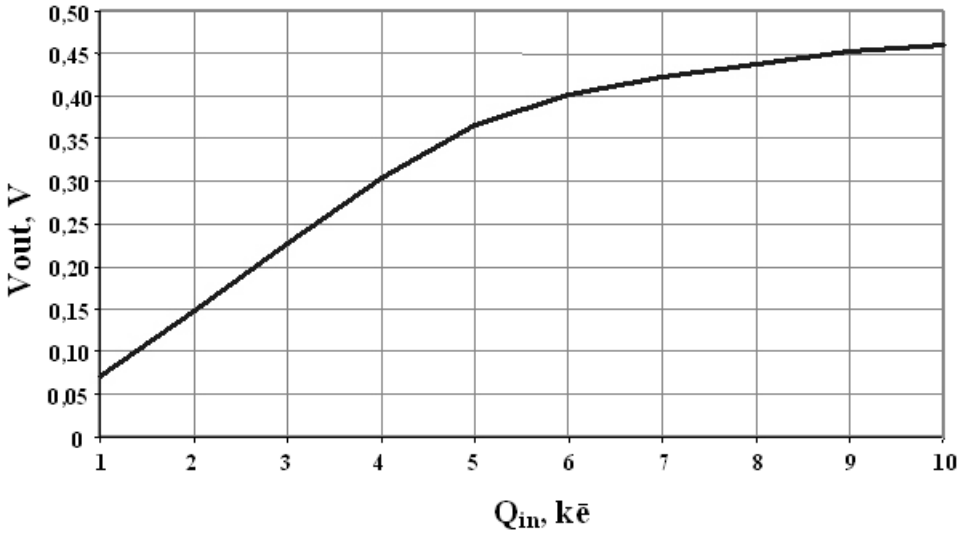
4.18 paveiksle pateikti 90 nm KJP išėjimo signalai, esant skirtingiems krūviams įėjime. Išėjimo signalai yra vienpolio atsako, t. y. jie turi vieną globalų maksimumą. Matyti, kad visais atvejais registravimo trukmė τ_p yra apie 35 ns. Didinant įėjimo krūvį nuo 1 iki 5 kē, signalo forma praktiškai nekinta, o perdavimo koeficientas nuo 71 mV/kē palaipsniui didėja iki 76 mV/kē. Kai KJP įėjime veikia 5 kē dydžio krūvis, jo perdavimo koeficientas yra maksimalus ir lygus 76 mV/kē (4.18 pav. 5 kē kreivė). Toliau didinant įėjimo krūvį, perdavimo koeficientas ima mažėti ir kai įėjimo krūvis yra lygus 7 kē, tai *K*=61 mV/kē. Be to, jau galima pamatyti išėjimo signalo specifinį ypatumą, kai pasiekus amplitudės maksimumą, jis „plokštėja“. Šį signalo amplitudės apribojimą nulemia KJP perdavimo koeficiento maksimalios reikšmės riba. Taip pat padidėja išėjimo signalo trukmė. Dar aiškiau tai stebima, kai įėjimo signalas yra 10 kē. Tada perdavimo koeficientas yra vos 46 mV/kē. Šiuos išėjimo signalo kitimus galima detaliai stebėti ir 4.19 paveiksle. Išėjimo signalo reikšmės priklauso nuo įėjimo krūvio ir tiesiškai kinta 1...5 kē (160...800 aC) intervale. Išėjimo signalo netiesiškumas šiame įėjimo signalų diapazone yra apie 1,6 %. Toliau – išėjimo signalas „plokštėja“ ir perdavimo koeficientas yra ribojamas KJP maitinimo įtampos V_{dd} bei schemos elementų darbo režimų.



4.17 pav. *90 nm KJP išėjimo signalas, kai Q_{det}=1 kē, C_{det}=30 fF, T_{ap}=27 ºC, CdZnTe jutiklis*



4.18 pav. *90 nm KJP įėjimo signalai, esant skirtingiems įėjimo krūviams, kai C_{det}=30 fF, T_{ap}=27 ºC, CdZnTe jutiklis*



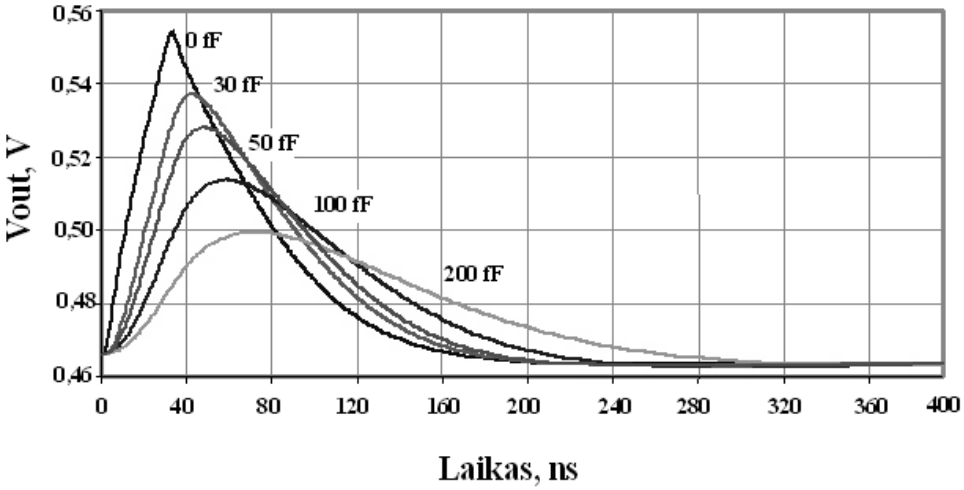
4.19 pav. *90 nm KJP tiesiškumas t. y. išėjimo signalo amplitudės kitimas, esant skirtingam įėjimo krūviui, kai C_{det}=30 fF, T_{ap}=27 ºC, CdZnTe jutiklis*

4.20 paveiksle yra parodyta KJP perdavimo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo krūvio, esant skirtingoms jutiklio talpoms, kai aplinkos temperatūra yra lygi +27 ºC. Matome, kad esant mažiausiai jutiklio talpai, lygiai 0 fF, KJP pasižymi didžiausiu perdavimo koeficientu. Kai įėjimo krūvis yra lygus 1 kē, tai pardavimo koeficientas padidėja iki 80 mV/kē. Šį perdavimo koeficiento padidėjimą sąlygoja mažos jutiklio nuotėkio srovės, kurių vertės tiesiai proporcingos jutiklio plotui arba jo talpai. Didinant jutiklio talpą, didėja nuotėkio srovės, o tai sąlygoja perdavimo koeficiento kritimą. Kai jutiklio talpa C_{det}=30 fF, tai perdavimas sumažėja iki 71 mV/kē, o esant 200 fF talpai, perdavimo koeficientas sumažėja iki 33 mV/kē. Taigi, perdavimo koeficientas priklauso nuo jutiklio talpos: kuo ji mažesnė, tuo mažesnės nuotėkio srovės ir didesnis KJP perdavimo koeficientas. Iš kitos pusės, kuo mažesnis jutiklio plotas, tuo geresnė registravimo sistemos erdvinė skiriamoji geba, t. y. tuo tiksliau galima nustatyti pažeidimo vietą. Jutiklių talpos ir ploto mažinimą riboja gamybos technologijos. Šiuolaikinių jutiklių talpos yra (8...200) fF. Aptartą perdavimo koeficiento kitimą nuo jutiklio talpos detaliau galima stebėti ir 4.21 paveiksle.

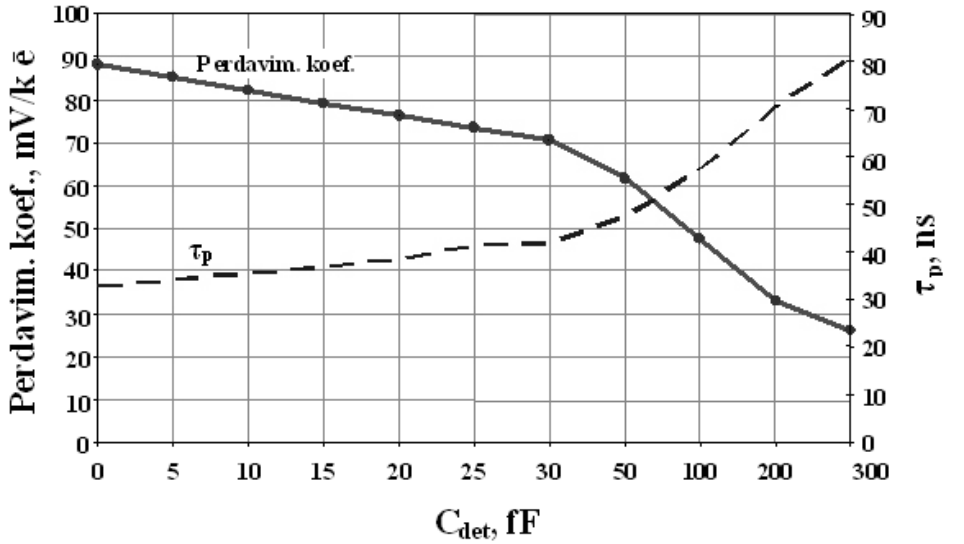
4.21 paveiksle galima stebėti ir KJP registracijos trukmės τ_p kitimą nuo jutiklio talpos C_{det}. Didinant jutiklio talpą C_{det} arba parazitines, sujungimo tarp jutiklio ir nuskaitymo elektronikos, talpas C_{par}, KJP registravimo trukmė didėja. Esant jutiklio talpai 0 fF registravimo trukmė minimali ir lygi 32 ns, toliau didinant, registravimo trukmė sparčiai didėja ir kai C_{det}=300 fF, ši trukmė padidėja 2,5 karto ir yra lygi 81 ns. Šis registravimo trukmės didėjimas nėra pageidautinas, kadangi mažina sistemos laikinę skiriamąją gebą bei sistemos

greitaveikiškumą.

KJP ekvivalentinio triukšmų krūvio *ENC* priklausomybė nuo ATJ talpos yra tiesinio pobūdžio, t. y. $ENC(C_{det}) \approx 40 + 4$ ē/fF. Kai jutiklis yra idealus, t. y. C_{det}=0 fF, KJP ekvivalentinis triukšmų krūvis yra apie 40 ē. Realiu atveju, kai jutiklio talpai 30 fF, *ENC* padidėja 4 kartus ir yra lygus 160 ē.



4.20 pav. *90 nm KJP išėjimo signalai, esant skirtingoms jutiklio talpoms, Q_{det}=1kē,T_{ap}=27 ºC, CdZnTe jutiklis*



4.21 pav. *90 nm KJP perdavimo koeficiento ir registravimo trukmės kitimas, esant skirtingoms jutiklio talpoms, kai Q_{det}=1 kē,T_{ap}=27 ºC, CdZnTe jutiklis*

4.5. 0,25 µm krūviui jautraus priešstiprintuvio modeliavimo rezultatai ir jų analizė

Taip pat buvo atlikta ir 0,25 µm KMOP technologijos diferencinio, krūviui jautraus priešstiprintuvio pagrindinių parametrų skaičiavimas ir modeliavimas su Cadence PSPICE programiniu paketu, naudojant kompanijos MOSIS CMOS SCN 0,25 µm technologijos KMOP tranzistorius ir jų BSIM3V3 modelius. PMOP ir NMOP tranzistorių BSIM3V3 modeliai yra pateikti šio darbo C3 priede. Šioje technologijoje tranzistorių užtūros dielektriko storis T_{ox} yra 32 angstremai (3,2 nm), savitoji talpa C_{ox} – 6,64 fF/µm^2, NMOP tranzistorių atkirtos V_{th} įtampa yra intervale nuo 0,553 V iki 0,556 V, PMOP – (-0,462...-0,468) V. Modeliuojamų tranzistorių statumai g_m yra (3,9...11,4) µSm yra diapazone, laidumai g_{ds} – (0,04...0,7) µSm. Įėjimo tranzistoriaus geometriniai matmenys gauti W/L=2,4 µm/0,245 µm pagal 3 poskyryje pateiktą metodiką. Šiame įėjimo tranzistoriaus geometrijos taške gaunamas KJP kokybės funkcijos ekstremumas, t. y. kokybės funkcijos minimumas, kuris yra apie 297 µWē.

4.4 lentelė. *0,25 µm KJP pagrindiniai elektriniai parametrai*

Technologija	0,25 µm CMOS
Maitinimo įtampa	V_{dd}=+2,2 V
KJP srovė	1,2 µA
Vartojamoji galia P	2,7 µW
Įėjimo tranzistoriaus matmenys	W/L=2,4 µm/0,245 µm
Perdavimo koeficientas K	125 mV/kē
Registracijos trukmė τ_p	≈50 ns
Grįžtamojo ryšio laikinė konstanta τ_d	≈120 ns
Ekvivalentinis triukšmų krūvis ENC	≈110 ē
Kokybės funkcija $Q(W)$	297 µWē

Visi 0,25 µm KMOP KJP skaičiavimai ir modeliavimai, kaip ir aukščiau aprašytų modeliuotų KJP, atlikti įvairiose jų veikimo sąlygose. Pagrindiniai 0,25 µm KMOP technologijos KJP gauti parametrai pateikiami 4.4 lentelėje. KJP perdavimo koeficientas K=125 mV/kē, kai ATJ talpa C_{det}=30 fF, aplinkos temperatūra T_{ap}=27 ºC. Maksimalus K gaunamas, kai C_{det}=0 fF, ir lygus 159 mV/kē. KJP netiesiškumas, kai įėjimo signalo Q_{det} diapazonas (1...15) kē yra apie 2%. Ekvivalentinis triukšmų krūvis ENC, panaudojus nuotėkio srovės kompensavimo grandines, gautas apie 110 ē, esant KJP registravimo trukmei τ_p apie 50 ns ir ATJ nuotėkio srovei (-4 ...+5) nA. Gauta maža vartojamoji galia kuri lygi 2,7 µW/priešstiprintuviui, kai KJP maitinimo įtampa V_{dd}=2,2 V.

4.6. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Sukurti 90 nm, 130 nm ir 0,25 μm KMOP technologijos diferenciniai, pakopiniai krūviui jautrūs priešstiprintuviai su mažesniu ekvivalentiniu triukšmų krūviu bei padidintu perdavimo koeficientu, esant labai žemai vartojamajai 1,2 μW(130 nm), 500 nW (90nm), 2,7 μW(0,25 μm) galiai.

2. Pasiūlyta nauja ATJ analoginės elektronikos architektūra, kuri leistų sumažinti jutiklių nuotėkio sroves bei sumažinti KJP triukšmus ir valdyti perdavimo koeficientą, atraminę įtampą, darbinę srovę bei vartojamąją galią.

3. Modeliavimo rezultatai gauti, esant įvairioms KJP darbo sąlygoms: kai jutiklių talpų C_{det} diapazonas buvo (0...200) fF, įėjimo signalų intervalas Q_{det}=1...20 kē, veikimo temperatūrų T_{ap}= (-120...+120) ºC diapazonas, esant nuotėkio srovių diapazonui $I_{leakage}$=(-10...+10) nA. Gauti skaičiavimo rezultatai buvo atvaizduoti funkcinėmis priklausomybėmis, kurių analizė leido nustatyti KJP pagrindinių elektrinių parametrų gerinimo kryptis.

4. Submikroninei 130 nm SCN013 CMRF8SF KMOP technologijai apskaičiuotas ir išanalizuotas KJP su detektoriaus nuotėkio srovės kompensavimo grandine, kuri sumažino ekvivalentinį triukšmų krūvį *ENC* 23 %, t. y. iki 82 ē. Šis *ENC* minimumas gautas, kai nuotėkio srovė keitėsi nuo -3 nA iki +6 nA. Skaičiavimai atlikti su SPICE programiniais paketais, naudojant IBM kompanijos 130 nm technologijos KMOP tranzistorių BSIM4 modelius su triukšminiais parametrais. KJP perdavimo koeficientas lygus K=115 mV/kē, o registravimo trukmė τ_p=45 ns, vartojamoji galia vienam kanalui gauta apie 1,2 μW, kokybės funkcija 98,4 μWē.

5. Atlikus 130 nm SCN013 CMRF8SF KMOP KJP statistikinę Monte-Karlo analizę, pagrindinių KJP elektrinių parametrų kitimo ribos yra tokios:

• darbinės srovės I_{bias} vidurkis m_{Ibias}=0,989 μA, standartinis nuokrypis σ_{Ibias}=53 nA, o tikimybė, kad ši srovė bus intervale [$m_{Ibias} - 3\sigma_{Ibias}$; $m_{Ibias} + 3\sigma_{Ibias}$] p=98%, vartojamoji galia P su tokia pat tikimybe kis intervale [0,996 μW; 1,378 μW], esant maitinimo įtampai V_{dd}=1,2 V;

• atraminės įtampos V_{offset} vidurkis $m_{Voffset}$=405 mV, standartinis nuokrypis $\sigma_{Voffset}$=17,79 mV, tikimybė, kad jis bus intervale [$m_{Voffset} - 3\sigma_{Voffset}$; $m_{Voffset} + 3\sigma_{Voffset}$] p=99 %;

• perdavimo koeficiento K vidurkis m_K=115,3 mV/kē, standartinis nuokrypis σ_K=1,9 mV/kē, tikimybė, kad jis bus intervale [$m_K - 3\sigma_K$; $m_K + 3\sigma_K$] yra lygi 98 %;

• atliktas 256×256 dydžio ATJ krūviui jautrių priešstiprintuvių *ENC* Monte Karlo statistikinė analizė. Gauti tokie rezultatai: m_{ENC}=78 ē, standartinis nuokrypis σ_{ENC}=10 ē, tikimybė, kad jis bus intervale [$m_{ENC} - 3\sigma_{ENC}$; $m_{ENC} + 3\sigma_{ENC}$] p=99,94 %.

6. Suprojektuotas nanometrinės 90 nm 90SRF technologijos krūviui jautrus priešstiprintuvis su labai maža vartojamąja galia, kuri yra apie

500 nW/priešstiprintuviui. Modeliavimo metu gauti tokie pagrindiniai KJP parametrai: vienpolis išėjimo signalas, kurio registravimo trukmė τ_p yra apie (35...40) ns, perdavimo koeficientas (60...90) mV/kē, kokybės funkcija 80 μWē. Išėjimo signalo netiesiškumas (1...5) kē įėjimo signalo intervale yra apie 1,6 %. Ekvivalentinis triukšmų krūvis, kai įėjimo signalas Q_{det} diapazone (1...10) kē ir jutiklio talpa C_{det}=30 fF, mažesnis nei 160 ē.

7. Atlikta 0,25 μm technologijos KJP įvairiuose veikimo sąlygose analizė. Visi rezultatai gauti, naudojant kompanijos MOSIS 0,25 μm technologijos KMOP tranzistorius ir jų BSIM3V3 modelius. Atlikto projektavimo metu gauti tokie pagrindiniai KJP parametrai: perdavimo koeficientas K=125 mV/kē, registracijos trukmė $\tau_p \approx 50$ ns, vartojamoji galia yra apie 2,2 μW/priešstiprintuviui, ekvivalentinis triukšmų krūvis įėjime mažesnis nei 110 ē, kokybės funkcija 297 μWē.

8. 4.5 lentelėje pateikiami mūsų suprojektuotų KJP ir CERN MEDIPIX-2 KJP pagrindinių parametrų palyginimo rezultatai. Iš šios lentelės matome, kad su ta pačia 0,25 μm technologija mūsų gauti KJP pagrindiniai parametrai yra žymiai geresni, už šiuo metu artimiausio žinomo analogo MEDIPIX-2.

4.5 lentelė. *Mūsų projektuojamų KJP palyginimas su CERN MEDIPIX-2 KJP*

Parametrai	VGTU EF250	VGTU EF130	VGTU EF90	CERN MEDIPIX-2
Technologija	0,25 μm KMOP	130 nm KMOP	90 nm KMOP	0,25 μm KMOP
K, mV/kē	125	115	71	12,5
τ_p, ns	≈ 50	≈ 45	≈ 35	≈ 150
ENC, ē	110	82	160	141
P, μW	≈ 2,7 (V_{dd}=2,2 V)	≈ 1,2 (V_{dd}=1,2 V)	≈ 0,5 (V_{dd}=1 V)	≈ 8 (V_{dd}=2,2 V)
Q(W), μWē	297	98,4	80	1128

5

GaAs lauko tranzistorių su Šotki barjeru elementariųjų dalelių registravimo sistemų krūviui jautrių stiprintuvų modeliavimo ir projektavimo ypatumai

Jau paskutiniajame 20-ojo amžiaus dešimtmetyje, daugelis Vakarų Europos Centrų (Bolonijoje, Modenoje – Italijoje, Šefilde, Glazgo – Didž. Britanijoje, Freiburge – Vokietijoje, Ženevoje – Šveicarijoje) intensyviai pradėjo tirti GaAs jutiklių efektyvumą, „signalas/triukšmas“ santykį, vartojamosios galios mažinimą, radiacinį atsparumą, kurie atskleidė didelį jų perspektyvumą [94].

Plačiai GaAs jutikliai buvo tyrinėjami ir Lietuvoje. Jau 1992–1993 metais Vilniuje, mikroelektronikos įmonėje „Venta“, buvo sukurti pirmieji pasaulyje GaAs integriniai krūviui jautrūs stiprintuvai mikrostrypiniams jutikliams. Jų aktyvieji elementai – GaAs lauko tranzistoriai su Šotki barjeru [7, 8]. Tačiau pagrindinius jų parametrus: jautrį < 1 mV/fC, registravimo trukmę τ_p – 20...100 ns, ekvivalentinį triukšmų krūvį *ENC* – 1000...3500 ē, reikėjo patobulinti. Ypač tai pasidarė aktualu pradėjus kurti ATJ, kuriems reikėjo žymiai jautresnių, dar mažesnės vartojamosios galios ir didesnio „signalas/ triukšmas“ santykio KJS.

Lietuvoje, pagal nacionalinę programą „Mikroelektronika elementariųjų dalelių tyrimams“, Tarptautinio Mokslo ir Kultūros Centro Pasaulinės Laboratorijos Lietuvos skyriaus projektus ir Europos Sąjungos Copernicus CP 9441180 projektą buvo toliau tyrinėjami GaAs dariniai ir projektuojami naujos klasės GaAs integriniai grandynai – KJS aktyviųjų taškinių jutiklių sistemoms [9, 10, 35, 36]. Nacionalinės programos tikslams pasiekti buvo numatyti tolimesni fizikiniai, technologiniai GaAs lauko tranzistorių su Šotki barjeru tyrimai mažų srovių tankių diapazone (50...150) $\mu A/mm^2$ ir naujų integrinių grandynų, skirtų jutikliams pirminio signalo pilnam apdorojimui. Tokiu būdu buvo sukurti dviejų tipų KJS. Pirmojo stiprintuvo tipo lusto matmenys buvo 340×900 mm^2, o antrojo – 200×500 mm^2. Jie vartojo 1 mW galią, o KJS įėjimo ekvivalentinis triukšmų krūvis ENC buvo apytikriai lygus 250 elektronų, kai registravimo trukmė τ_p=9,5 ns. Šie KJS buvo suprojektuoti su netiesiniais grįžtamojo ryšio elementais, kurių užimamas plotas keliasdešimt kartų mažesnis nei rezistorių.

Pastaruoju metu, panašūs KJS taikomi rentgeno spindulių registravimo sistemose medicinoje: mamografijoje ir dentografijoje [11, 31, 32]. Suprantama, kad medikams reikia ne tik tiksliai nustatyti pažeidimo vietą, bet ir sumažinti apšvitos dozę, kurią gauna pacientai. Tam projektuojamos labai jautrios daugiakanalės (64×64, 256×256) sistemos.

Savaime aišku, tai verčia kurti daugiakanales sistemas su kuo mažesne vartojamąja galia ir mažinti jų dydį, o vartojamosios galios mažinimas savo ruožtu mažina ir „signalas/triukšmas“ santykį. Todėl buvo nuspręsta toliau nagrinėti aukščiau paminėtus GaAs KJS, siekiant nustatyti jų pagrindinių parametrų gerinimo galimybes, funkcines priklausomybes ir sukurti tokių stiprintuvų modeliavimo metodiką.

Šiame skyriuje aprašomi elementariųjų dalelių registravimo sistemų KJS su GaAs elementais, taikomi mamografijoje ir dentografijoje, nurodomi jų pagrindiniai techniniai reikalavimai elektriniams parametrams ir KJS elementų optimizavimo kriterijai. Taip pat šiame skyriuje pagal pasiūlytą KJS struktūrą ir optimizavimo kriterijus, pateikiamas suprojektuotas GaAs KJS su sumažintu ekvivalentiniu triukšmų krūviu iki 184 elektronų, registravimo trukme 8,4 ns ir vartojamąja galia apie 0,94 mW, o taip pat pagrindinių elektrinių parametrų funkcinės priklausomybės, skaičiavimo ir modeliavimo rezultatų analizė.

Šiame skyriuje pateikiami rezultatai buvo pristatyti konferencijose: tarptautinėje konferencijose „Mechatronic Systems and Materials“ 2005 m., Vilniuje, tarptautinėje konferencijoje „XXVI Международная научно-техническая конференция «Проблемы электроники»“ 2006 m., Kijeve, Ukrainoje, tarptautinėse konferencijose „Elektronika“ 2004 m, 2005 m, Vilniuje, jaunųjų mokslininkų konferencijose „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2004 m., 2005 m., 2006 m., Vilniuje bei publikuoti šiuose moksliniuose leidiniuose: [1A, 5A, 6A, 8A, 9A, 11A–13A].

5.1. Reikalavimai pagrindiniams elektriniams parametrams

Vieną GaAs registruojančios sistemos kanalą galima suskirstyti į tokias pagrindines dedamąsias dalis: jutiklis, krūviui jautrus priešstiprintuvis KJP, filtras–stiprintuvas FS ir tolesnio skaitmeninio apdorojimo SA įtaisai [9, 43] (žr. 2.4 poskyrį). Vadinasi, KJS=KJP+FS. Krintančios elementariosios dalelės indukuoja KJP įėjime, mažo ploto jutiklyje, nedidelį elektrinį krūvį, todėl būtina tokį signalą sustiprinti. Toliau FS formuoja varpo pavidalo impulsus, kurie po to keičiami į skaitmeninius signalus ir skaitmeniškai apdorojami.

Si KMOP analoginėse elementariųjų dalelių registravimo sistemose, priešingai negu GaAs grandynuose, nėra naudojamas FS siekiant dar labiau minimizuoti registravimo sistemos analoginių IG vartojamąją galią. Toks FS atsisakymas leidžia sumažinti KJS vartojamąją galią apie (20...40) %. Todėl Si IG dažniausiai KJS=KJP. Tačiau šis vartojamosios galios sumažėjimas atitinkamai padidina registravimo sistemos „signalas/triukšmas“ santykį. GaAs MESFET tranzistorių ribiniai srovės tankiai yra pakankamai dideli (50...150) $\mu A/mm^2$, lyginant su Si KMOP ir projektuojant GaAs KJS pagrindinis dėmesys skiriamas triukšmų sumažinimui, naudojant įvairių tipų FS.

Tokių GaAs KJS reikalavimus pagrindiniams elektriniams parametrams galima apibrėžti taip [8–10, 14, 16, 35, 39, 42, 1A, 5A, 12A]:

• krūvio stiprintuvo ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC* turi būti 200 ē ar mažesnis, nes tik tokiu atveju galima gauti gerą sistemos erdvinę ir laikinę skiriamąją gebą, padidinti sistemos „signalas/triukšmas“ santykį (įėjimo signalų juosta nuo 10000 iki 100000) ē arba 1,6...16 fC, o *ENC* turi būti bent 50 kartų mažesnis už minimalų įėjimo signalą). Reiktų atminti tai, kad natūralią *ENC* žemutinę ribą lemią pačių puslaidininkinių detektorių triukšmas, kuris yra (10...100) ē intervale;

• maža krūvio stiprintuvo vartojamoji galia (0,5...1,5) mW, nes didelį jų skaičių (64×64 ar 256×256 ir daugiau) reikia išdėstyti kuo mažesniame plote;

• krūvio stiprintuvo registracijos trukmė turi būti apie (1...10) ns, nes jų darbinis dažnis apie 100 MHz. Ši trukmė užtikrina pakankamai didelę laikinę skiriamąją gebą bei sistemos greitaveiką;

• perdavimo koeficientas turi būti (30...50) mV/fC, kadangi šiuolaikinių GaAs komparatorių, kurie registravimo sistemose yra ASK integrinių grandynų sudėtyje ir jungiami po KJS, jautris yra per 30 mV/fC;

• kadangi ATJ veikia padidintos radiacijos aplinkoje, KJS pageidautinas didelis (iki 100 MRad) radiacinis atsparumas matavimo sistemos ilgaamžiškumui užtikrinti.

5.2. Reikalavimai GaAs krūviui jautrių stiprintuvų elementams

Elementų, gaminamų GaAs darinių pagrindu, technologija turi būti pakankamai paprasta ir pigi. Tokia yra GaAs epitaksinių lauko tranzistorių su Šotkio barjeru, dirbančių nuskurdinimo režime, gamybos technologija.

KJS vartojamoji galia yra labai ribojama. Todėl tranzistorių darbo režimų srovės turi būti mažos – vos keli mikroamperai ir atitinkamai nedideli srovės tankiai – (50..150) μA/mm^2. Tokie srovių tankiai yra, kai tranzistorių užtūros įtampų reikšmės artėja prie jų atkirtos arba slenksčio įtampos reikšmių.

Nuotėkio srovės didina *ENC* lygiagretaus „baltojo“ triukšmo dedamąją:

$$ENC_{leakage} \approx 2{,}5\sqrt{I_{leakage}\tau_p}\ . \tag{5.1}$$

Atlikus paskaičiavimus, kai τ_p yra 8,5 ns, o ATJ nuotėkio srovės $I_{leakage}$=3 nA, 6 nA, 9 nA, tuomet $ENC_{leakage}$ atitinkamai bus lygus 13, 18, 22 ē. Ir kaip matyti, būtina parinkti tiek technologinius būdus, mažinančius nuotėkio sroves, tiek parinkti mažų nuotėkio srovių ATJ.

Kita lygiagretaus triukšmo dedamoji išreiškiama tokia išraiška:

$$ENC_{therm} \approx 17{,}8\sqrt{\frac{\tau_p}{R_P}}\ . \tag{5.2}$$

Kai τ_p=8,5 ns, o R_P=0,5 MΩ, 1 MΩ, 5 MΩ, 10 MΩ, tuomet ENC_{therm} bus atitinkamai lygi 74 ē, 52 ē, 23 ē, 16 ē. Galima daryti išvadą, kad krūviui jautraus stiprintuvo grįžtamojo ryšio varža turėtų būti ne mažiau už 1 MΩ. Be to, didžiavaržių elementų paieška ir tyrimas reikalingi krūviui jautrių stiprintuvų lustų matmenų sumažinimui.

Kai užtūros įtampa artėja link tranzistoriaus uždarymo ribos, užtūros talpa C_{gs} netiesiškai mažėja. Šios talpos kitimo tyrimai buvo reikalingi naudojamų modelių adekvatumui patikslinti ir nuosekliajai „baltojo“ triukšminei dedamajai ENC_s įvertinti:

$$ENC_s^2 = 4kT_n a_n C_{\det}\left[\left(\frac{C_{det}}{C_{gs}}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{C_{gs}}{C_{det}}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^2 \frac{\tau_\alpha}{\tau_p}, \tag{5.3}$$

čia T_n – ekvivalentinė triukšmų temperatūra, a_n=2/3, τ – tranzistoriaus laiko pastovioji.

Nuosekliojo mirgėjimo triukšmo $ENC_{1/f}$ indėlis yra aprašomas formule:

$$ENC_{1/f}^2 = 4A_f C_{det} C_{gs} \left[\left(\frac{C_{det}}{C_{gs}} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{C_{gs}}{C_{det}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2, \quad (5.4)$$

čia A_f – mirgėjimo triukšmo konstanta. Ji charakterizuoja mirgėjimo triukšmų spektrinį pobūdį vienam tranzistoriui.

Kadangi į KJS grandyną be tranzistorių įeina dar varžos ir diodai, tad reiktų atsižvelgti į šiuos elementų terminius triukšmus. Bet remiantis literatūra [7, 8, 39] pastebėta, kad šių elementų triukšmai yra keliomis eilėmis mažesnis už GaAs tranzistorių triukšmus ir skaičiuojant stiprintuvus, į šių elementų generuojamus triukšmus galime nekreipti dėmesio.

Ekvivalentinių triukšmų formulėse (5.3) ir (5.4) galima pastebėti, kad didelę reikšmę triukšmams turi įėjimo tranzistoriaus talpa (šiuo atveju C_{gs}). Triukšmo minimumas bus pasiektas tuomet, kai tiek jutiklio, tiek KJP įėjimo tranzistoriaus talpos bus lygios. Nes talpų nesuderinamumo faktorius K_n, kuris yra lygus:

$$K_n = \left[\left(\frac{C_{det}}{C_{gs}} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{C_{gs}}{C_{det}} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (5.5)$$

bus mažiausias tuomet, kai talpos bus lygios, o E*NC* minimumas bus gaunamas, kai K_n koeficientas bus lygus 2. Taigi, galime padaryti išvadą, kad vienas iš ekvivalentinių triukšmų mažinimo būdų, siekti šių talpų suderinamumo:

$$C_{det} = C_{gs}, \quad (5.6)$$

ir suderinimo koeficiento K_n reikšmės turėtų būti artimos 2, o tai atliekama projektuojant KJS įėjimo tranzistorius, jų topologijas.

Įvertinus (5.6) ir supaprastinus (5.3), (5.4) lygtis, gauname, kad optimalus „nuoseklus baltas“ triukšmas $ENC_{s(opt)}$ yra lygus:

$$ENC_{s(opt)}^2 = 16kT_n a_n C_{\det} \frac{\tau_\alpha}{\tau_p}, \quad (5.7)$$

o optimalus mirgėjimo triukšmas $ENC_{1/f(opt)}$ supaprastėja ir yra lygus:

$$ENC_{1/f(opt)}^2 = 16A_f C_{det} C_{gs}. \quad (5.8)$$

Kadangi C_{det} ir τ_p yra apribojami išoriniais reikalavimais, tai ENC_s, esantį lygybėje (5.7) sumažinti galima tik mažinant τ.

Tuo tarpu mirgėjimo triukšminė dedamoji (5.8) pagrinde priklauso nuo mirgėjimo triukšminės konstantos A_f, arba kitaip vadinamos „mirgėjimo

triukšminės energijos“ K_f:

$$K_f = A_f C_{gs} . \tag{5.9}$$

Tuomet įvertinus (5.9), lygtis (5.8) supaprastėja ir gauname:

$$ENC^2_{1/f(opt)} = 16 K_f C_{det} . \tag{5.10}$$

Iš (5.1), (5.2), (5.7), (5.10) išraiškų matematiškai apskaičiuotos skirtingos ENC komponentės ir jų geometrinė suma pavaizduota 5.1 paveiksle. Kaip ir KMOP tranzistorių atveju (žr.3.1 poskyrį), ši $ENC(\tau_p)$ funkcija yra kvadratinė su vienu globaliu minimumu (185..190) ē, kuris ir atitinka optimalią registracijos trukmę τ_p=10 ns, ENC atžvilgiu.

Tačiau, naudojant krūviui jautrius stiprintuvus, labai dažnai registracijos trukmė yra fiksuota. Todėl būtina rasti galios minimumą, esant fiksuotai matavimo trukmei.

Įvedame ribinę tranzistoriaus pastoviąją τ_r, kuriai esant, nuosekliojo „baltojo“ (5.7) triukšmo komponentė yra 1,42 karto didesnė už nuosekliąją mirgėjimo (5.10) triukšminę dedamąją (tai $ENC(\tau_p)$ funkcijos minimumo taškas), kuri apytikriai lygi:

$$\tau_r \approx \frac{3K_f \tau_p}{2{,}28 kT_n} . \tag{5.11}$$

GaAs MESFET tranzistoriaus I_{ds} srovė yra proporcinga įtampos užtūra-ištaka V_{gs} kvadratui [8, 71], todėl jo statumas g_m ir tranzistoriaus laiko pastovioji τ_α bus proporcingi šios srovės kvadratinei šakniai:

$$g_m = g_{m0} \sqrt{\frac{I_{ds}}{I_{ds0}}} \tag{5.12}$$

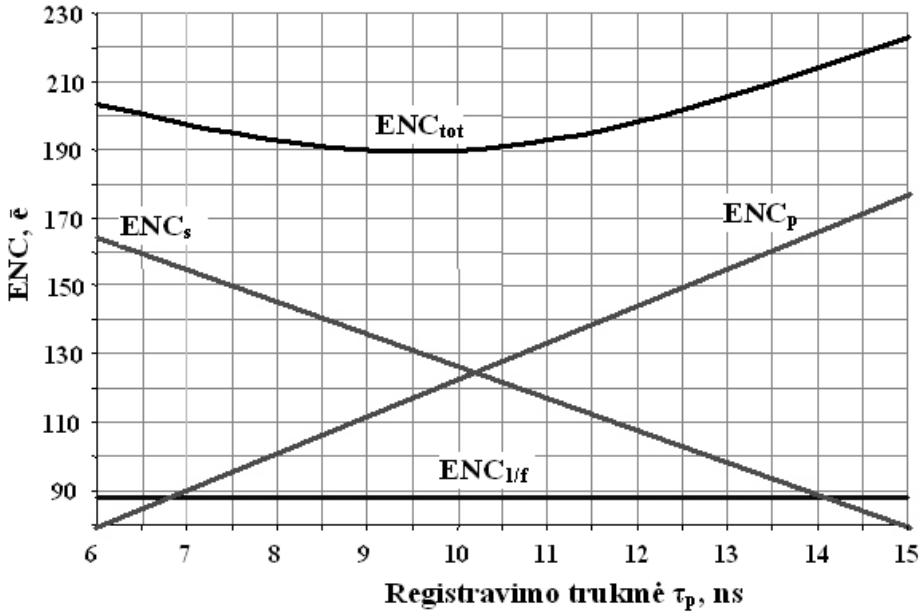
ir

$$\tau_\alpha = \tau_{\alpha 0} \sqrt{\frac{I_{ds}}{I_{ds0}}} , \tag{5.13}$$

čia g_{m0} yra tranzistoriaus statumas, $\tau_{\alpha 0}$ – tranzistoriaus laiko pastovioji, I_{ds0} – tranzistoriaus srovė. Visi šie dydžiai yra kai V_{gs}=0.

Iš (5.11), (5.12) ir (5.13) gauname ribinę įėjimo tranzistoriaus srovę, kuriai tekant ekvivalentinis triukšmų krūvis bus mažiausias:

$$I_r = \frac{I_{dso}}{g^2_{m0}} \left(\frac{2{,}84 kT_n}{3K_f \tau_p} \right)^2 . \tag{5.14}$$



5.1 pav. *Skirtingų ekvivalentinio triukšmo krūvio ENC komponenčių priklausomybė nuo registracijos trukmės*

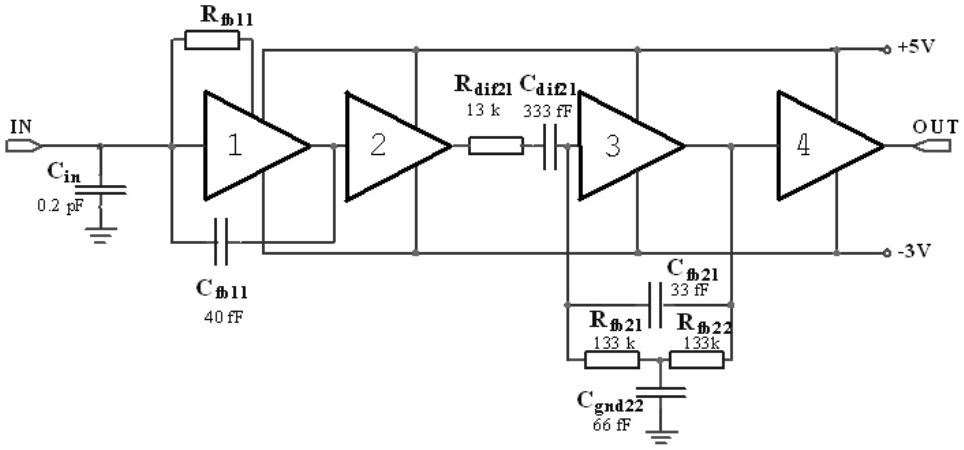
Įvertinus KJS keliamus reikalavimus (žr. 5.1 poskyrį), t. y. kad KJS vartojamoji galia neturėtų viršyti 1mW, esant minimaliam ekvivalentiniam triukšmų krūviui, gauname, kad įėjimo tranzistoriaus užtūros ilgis turėtų būti 1...1,2 μm.

Taigi, atlikti skaičiavimai rodo, kad galima sukonstruoti KJS su epitaksiniais GaAsFET tranzistoriais, kurio vartojamoji galia yra mažiau 1 mW, triukšmas mažiau nei 200 ē, esant 10 ns registracijos trukmei. Tokie parametrai gerai tenkina reikalavimus, keliamus krūviui jautriems stiprintuvams.

5.3. Modeliuojamo GaAs krūviui jautraus stiprintuvo funkcinė schema

Modeliuojamo GaAs KJS funkcinė schema parodyta 5.2 paveiksle. Norint gauti realią schemą, į blokinę schemą (5.2 pav.) įjungti aktyvieji elementai (pažymėti 1 ir 3) ir buferiniai elementai (pažymėti 2 ir 4). Pirmoji (1) – įėjimo grandinė – KJP, kuriame integruojamas ir sustiprinamas iš jutiklio patenkantis krūvis. Antroji (2) – KJP kartotuvas – buferis. Šis kartotuvas būtinas, norint gauti minimalią KJP vartojamąją galią, nes tik tuomet FS diferenciatoriaus įėjimas

neapkrauna KJP ir nesukelia papildomų fazės postūmių. Šio kartotuvo vartojamoji galia parenkama iš reikalavimų jo išėjimo varžai ir srovei. Trečioji (3) – filtras stiprintuvas, kuris priešstiprintuvio išėjimo signalą vieną kartą diferencijuoja ir vieną kartą integruoja, nes tai leidžia sumažinti paklaidas dėl jutiklio ir KJP nuotėkio srovių, bei sumažinti praleidžiamųjų dažnių juostą, padidinant „signalas/triukšmas“ santykį. FS naudojamas vienas diferencijavimas ir vienas integravimas todėl, kad tokio filtro impulsinė charakteristika artima lygiašonio trikampio formai, kuri yra optimaliausia krūvio detekcijai. Ketvirtasis (4) – išėjimo grandinė – buferis, kuris kaip ir (2) naudojamas norint išvengti KJS fazės postumių.



5.2 pav. *GaAs krūviui jautraus stiprintuvo blokinė schema. 1 – krūviui jautrus priešstiprintuvis (KJP), 2 – buferinis elementas, 3 – filtras stiprintuvas (FS), 4 – išėjimo grandinė*

Literatūroje nurodyta [9, 10, 14], kad KJS dažninė charakteristika aprašoma šia perdavimo funkcija:

$$H(s)=\frac{1}{C_{fb}R_dC_{in}}\left(\frac{1}{s+\frac{1}{\tau_f}}\right)\left(\frac{1}{s+\frac{1}{\tau_d}}\right)\left(\frac{s+2\alpha\frac{1}{\tau_2}}{s^2+2\alpha\frac{1}{\tau_2}s+\frac{1}{\tau_1}\frac{1}{\tau_2}}\right), \qquad (5.15)$$

čia $\tau_f=R_{fb11}C_{fb11}$, $\tau_d=R_{dif21}C_{dif21}$, $\tau_1=R_{fb21}C_{fb21}$, $\tau_2=R_{fb22}C_{gnd22}$, $\alpha=0{,}5(1+R_{fb21}/R_{fb22})$.

Visi KJS blokinės funkcijos elementai gauti pagal (5.15) formulę, parenkant tokias elementų vertes, kad stiprintuvo perdavimo koeficientas K ($H(S)$ funkcijos maksimumas), būtų artimas užduotam t. y. 30...50 mV/fC, o FS diferenciavimo ir

integravimo laiko konstantos τ_f, τ_d ir τ_1, τ_2 parinktos taip, kad KJS registracijos trukmė τ_p ($H(S)$ funkcijos maksimo padėtis laiko ašyje) būtų mažiau nei 10 ns. Aktyviųjų elementų matmenys parinkti, norint gauti reikiamą ekvivalentinį triukšmų krūvį ir vartojamąją galią. Detali GaAs KJS principinė elektrinė schema pateikta D priede. Šio KJS elektrinėje principinėje schemoje yra 14 tranzistorių, kurių užtūrų ilgis yra 1 μm, o plotis varijuoja nuo 10 iki 200 μm, 10 μm pločio 27 diodai, 6 kondensatoriai, kurių talpos nuo 0,033 iki 0,333 pF, 9 rezistoriai, kurių varžų reikšmės kinta nuo 7 kΩ iki 1MΩ.

5.4. GaAs krūviui jautriaus stiprintuvo elementų parametrai

Visi modeliuojamo KJS aktyvieji elementai gaminami epitaksine GaAs lauko tranzistorių su Šotkio barjeru ir 1 μm ilgio užtūros pradinės mikrostruktūros technologija. Modeliavimui tranzistorių lygiu buvo naudojamos SPICE modeliavimo sistemos. Žemiau pateikiame W/L=200/1 μm geometrijos tranzistoriaus modelio parametrus (5.3 pav.), įvertinus parametrus, kurie yra apskaičiuoti ir pateikti 5.1 lentelėje. Visa GaAs tranzistorių parametrų skaičiavimo metodika pateikta ankstesniuose darbuose [A15, A16]. Kitos geometrijos tranzistorių parametrus automatiškai apskaičiuoja ir įvertina programa.

5.1 lentelė. *Apskaičiuoti 200 μm užtūros pločio tranzistoriaus parametrai*

C_{gs}, F	$0{,}113 \cdot 10^{-12}$
C_{gd}, F	$0{,}032 \cdot 10^{-12}$
g_m, S	0,023
R_g, Ω	5,67
R_s, Ω	4,8
R_d, Ω	4,8
R_i, (atviro kanalo varža) Ω	2,2
τ, s	$3{,}857 \cdot 10^{-12}$
A_f, V^2/Hz	$15 \cdot 10^{-12}$
K_f, J	$1{,}695 \cdot 10^{-24}$

```
.model MESFET GASFET - tranzistoriaus tipas;
+LEVEL=3 - "TriQuint" arba "TQM" modelis;
+W=200E-6 - užtūros plotis, m;
+L=1E-6 - užtūros ilgis, m;
+VTO=-0.75 - tranzistoriaus atkirtos įtampa, V;
+VTOTC=-9.0E-03 - VT0 temperatūrinis koeficientas,
V/°C;
+VBI=.755 - užtūros vidinis potencialas, V;
+ALPHA=3.6 - soties įtampą nustatanti konstanta, V-1;
+BETA=0.023 - statumo koeficientas A/V;
+BETATCE=-.488 - BETA eksponentinis temperatūrinis
koeficientas;
+RG=5.67 - ištakos ominė varža, Ω;
+RD=4.8 - santakos ominė varža, Ω;
+RS=4.8 - ištakos ominė varža, Ω;
+CGD=0.032E-12- sandūros užtūra - santaka talpa, F;
+CGS=0.113E-12 - sandūros užtūra - ištaka talpa, F;
+IS=3.01060000E-15 - soties srovė, A/mm;
+TAU=3.85700000E-12 - krūvininkų lėkio trukmė, s;
+N=1.17 - emisijos koeficientas;
+DELTA=1 - išėjimo grįžtamojo ryšio parametras,(A▪V)-1;
+GAMMA=.083 - statinis grįžtamojo ryšio parametras;
+VDELTA=.1 - dydis naudojamas talpų skaičiavime, V;
+EG=.9 - barjero aukštis, eV;
+XTI=2.34 - eksponentinis IS koeficientas;
+KF=1.695E-24 - mirgėjimo triukšmo energijos
konstanta, J;
+AF=15E-12 - tranzistoriaus mirgėjimo konstanta,
V2/Hz);
.END
```

5.3 pav. *Krūviui jautraus stiprintuvo įėjimo tranzistoriaus SPICE modelis*

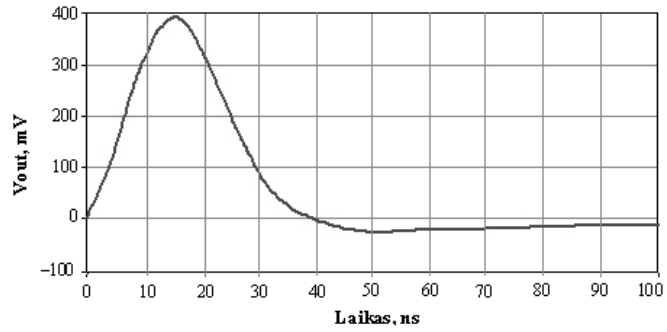
5.5. GaAs krūviui jautraus stiprintuvo modeliavimo rezultatai ir jų analizė

Žemiau skaičiuosime ir analizuosime KJS įvairiose veikimo sąlygose: ATJ talpų C_{det} diapazonas bus (0,05...1) pF, įėjimo signalų diapazonas – Q_{det}=(1...100) fC, išėjimo apkrova – R_L=50Ω, 1 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ ir 1 MΩ, C_L=2,5 pF, kai aplinkos temperatūra kis nuo -60 ºC iki +125 ºC. Gautus rezultatus atvaizduosime tokiomis priklausomybėmis:

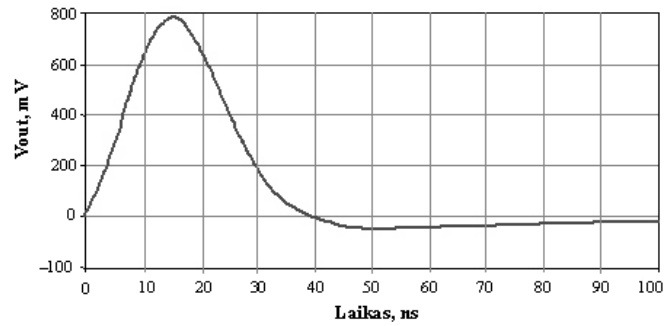
- išėjimo signalų amplitudės prie įvairių Q_{det} ir R_L, C_L ir įvairios aplinkos temperatūros T_{ap}=(-60...+125) ºC;
- perdavimo koeficientas $K=f(Q_{det})$, kai T_{ap}=(-60...+125) ºC;
- $K=f(T_{ap})$, kai Q_{det} ir R_L, C_L=const.;
- vartojamoji galia $P=f(R_L)$, kai Q_{det} ir C_L=const.;
- ekvivalentinis triukšmų krūvis $ENC=f(T_{ap})$, $ENC=f(R_L,C_L)$, $ENC=f(C_{det})$, $ENC=f(C_{gs})$;
- bei esant įvairiai nuotėkio srovei $I_{leakage}$ KJS įėjime $ENC=f(I_{leakage})$.

Išėjimo signalai pavaizduoti 5.4 paveiksle. Krūviui jautraus stiprintuvo įėjime yra atitinkamai 10 fC, 20 fC, 50 fC krūvis (Q_{det}). Stiprintuvo apkrovos varža R_L=1 MΩ, apkrovos talpa C_L=2,5 pF. Toks krūvis įėjime ir tokia apkrovos varža artima krūvio stiprintuvo darbui realiomis sąlygomis. Išėjime yra gautas bipolinis, Puasono funkcijos pavidalo signalas. Tokią signalo formą nulemia tai, kad FS buvo sukonstruotas su vienu integravimu ir vienu diferencijavimu. Matyti, kad visais atvejais registravimo trukmė τ_p yra apie 8,5 ns. Didinant įėjimo krūvį nuo 1 iki 20 fC, signalo forma išlieka tokia pati, o perdavimo koeficientas nuo 37,7 mV/fC palaipsniui didėja iki 39,4 mV/fC. Esant 10 fC dydžio krūviui, perdavimo koeficientas yra apie 39,1 mV/fC (5.4 a pav.). Kai KJS įėjime veikia 20 fC dydžio krūvis, jo perdavimo koeficientas yra maksimalus ir lygus 39,4 mV/fC (5.4 b pav.). Toliau didinant įėjimo krūvį, perdavimo koeficientas ima mažėti. Kai įėjimo krūvis yra lygus 50 fC, tai K=27,0 mV/fC. Be to, jau išryškėja išėjimo signalo „plokštėjimas“ (5.4 c pav.). Šis išėjimo signalo amplitudės apribojimas yra nulemiamas KJS perdavimo koeficiento maksimalios reikšmės ribos. Išėjimo signalo „plokštėjimas“ dar labiau išryškėja, kai įėjimo signalas yra 100 fC, tuomet perdavimo koeficientas yra vos 13,5 mV/fC.

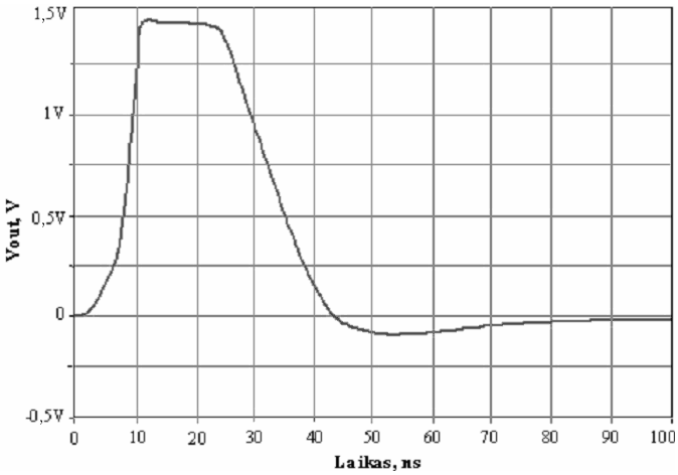
KJS perdavimo arba stiprinimo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo krūvio, esant įvairioms aplinkos temperatūroms, pavaizduota 5.5 paveiksle. Perdavimo koeficientas, pasiekęs maksimumą, po to praktiškai tiesiškai mažėja. Šio modeliavimo rezultatai patvirtina, kad KJS galima naudoti žemose temperatūrose. Esant aplinkos temperatūrai -60 ºC, gaunamas didžiausias stiprinimas, kuris yra lygus 40,7 mV/fC. Toliau aukštėjant temperatūrai, perdavimas palaipsniui mažėja: +27 ºC – 39,4 mV/fC, +100 ºC – 36,2 mV/fC,



a



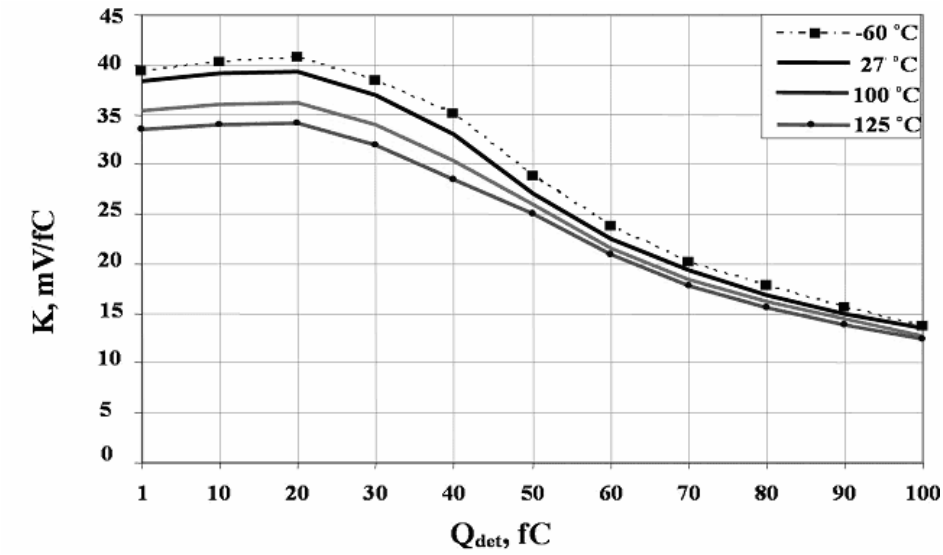
b



c

5.4 pav. *Krūviui jautraus stiprintuvo išėjimo signalas, kai R_L=1 MΩ, C_L=2,5 pF: (a) Q_{det}=10 fC, (b) Q_{det}=20 fC, (c) Q_{det}=50 fC*

+125 ºC – 34,1 mV/fC, kai įėjime signalas yra lygus 20 fC.

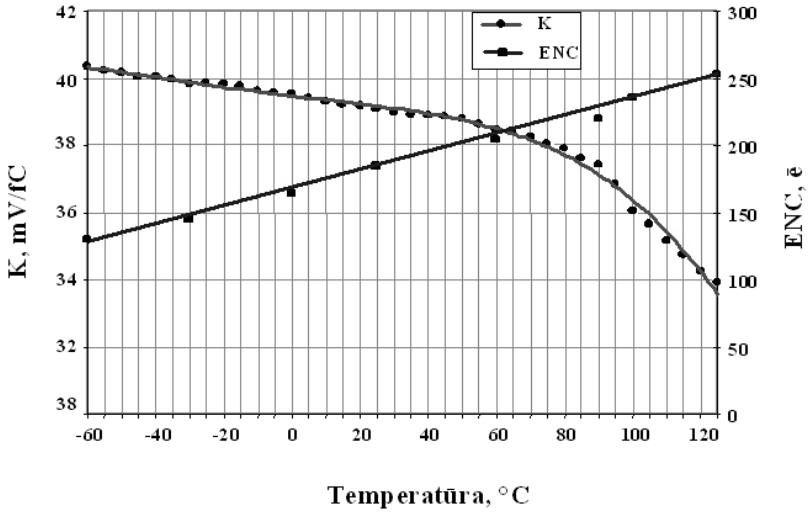


5.5 pav. *Perdavimo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo krūvio, esant skirtingoms aplinkos temperatūroms (C_{det}=0,2 pF, Q_{det}=20 fC, R_L=1 MΩ, C_L=2,5 pF)*

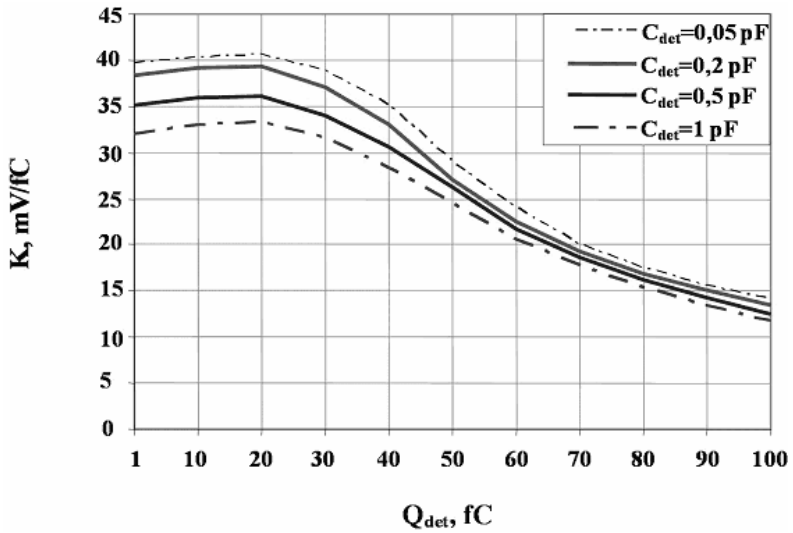
5.7 paveiksle yra parodyta KJS perdavimo koeficiento *K* priklausomybė nuo įėjimo krūvio, esant skirtingoms jutiklio talpoms, kai aplinkos temperatūra yra lygi +27 ºC. Matome, kad esant mažiausiai jutiklio talpai, lygiai 0,05 pF, KJS pasižymi didžiausiu perdavimo koeficientu. Kai įėjimo krūvis yra lygus 20 fC, tai perdavimo koeficientas padidėja iki 40,6 mV/fC. Šį perdavimo koeficiento padidėjimą sąlygoja mažos jutiklio nuotėkio srovės, kurių vertės tiesiai proporcingos jutiklio plotui arba jo talpai. Didinant jutiklio talpą, didėja nuotėkio srovės, o tai sąlygoja perdavimo koeficiento kritimą. Kai jutiklio talpa C_{det}=1 pF, tai perdavimas sumažėja iki 33,3 mV/fC. Taigi, perdavimo koeficientas priklauso nuo jutiklio talpos: kuo ji mažesnė, tuo mažesnės nuotėkio srovės ir didesnis perdavimo koeficientas. Iš kitos pusės, kuo mažesnis jutiklio plotas, tuo geresnė registravimo sistemos erdvinė skiriamoji geba. Jutiklių talpos ir ploto mažinimą riboja gamybos technologijos. Šiuolaikinių GaAs jutiklių talpos yra 50...200 fF.

5.8 paveiksle yra pavaizduotos KJS *ENC* ir vartojamosios galios priklausomybės nuo apkrovos varžos. Kai apkrovos varža yra lygi 50 Ω, tai triukšmas yra vos 99 ē, tačiau vartojamoji galia padidėja iki 2,41 mW, t. y. apie 2,5 karto, lyginant su reikšmėmis, kai R_L=5 kΩ, ir didesnėmis. Šis vartojamosios galios padidėjimas labiausiai susijęs su išėjimo srovės padidėjimu. Galios augimas nepageidautinas, kadangi iš jutiklių ir stiprintuvų sudaroma didelė iki

256×256 elementų matrica. Pagrindinis modeliavimo tikslas dažniausiai ir yra sumažinti vartojamąją galią ir ekvivalentinį triukšmų krūvį arba surasti šių reikalavimų optimumą.

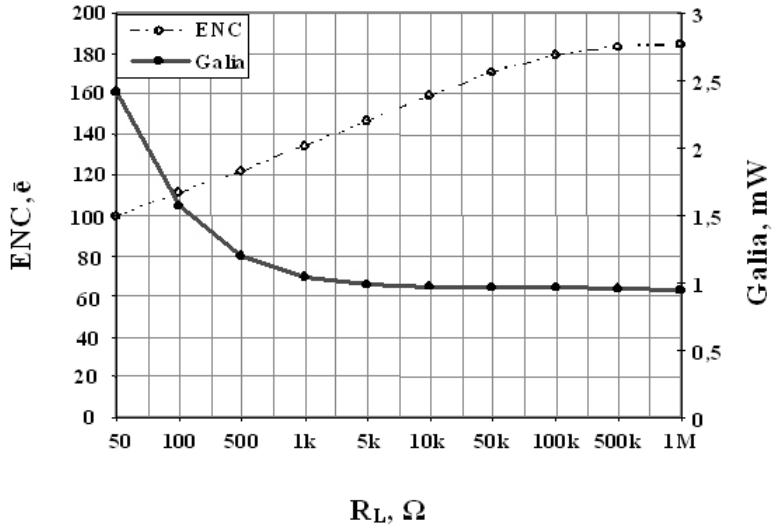


5.6 pav. *Ekvivalentinio triukšmo krūvio ENC ir perdavimo koeficiento priklausomybė nuo aplinkos temperatūros (Q_{det}=10 fC, R_L=1 MΩ, C_L=2,5 pF)*



5.7 pav. *Perdavimo priklausomybė nuo įėjimo krūvio, kai skirtingos jutiklio talpos (R_L=1 MΩ, C_L=2,5 pF, T_{ap}=+27 ºC)*

Didinant apkrovą, ENC palaipsniui didėja. Esant apkrovai 1 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ ir 1MΩ, triukšmai yra atitinkamai apie 134, 147, 159 ir 184 ē, o galia sumažėja nuo 1,04 iki 0,94 mW.

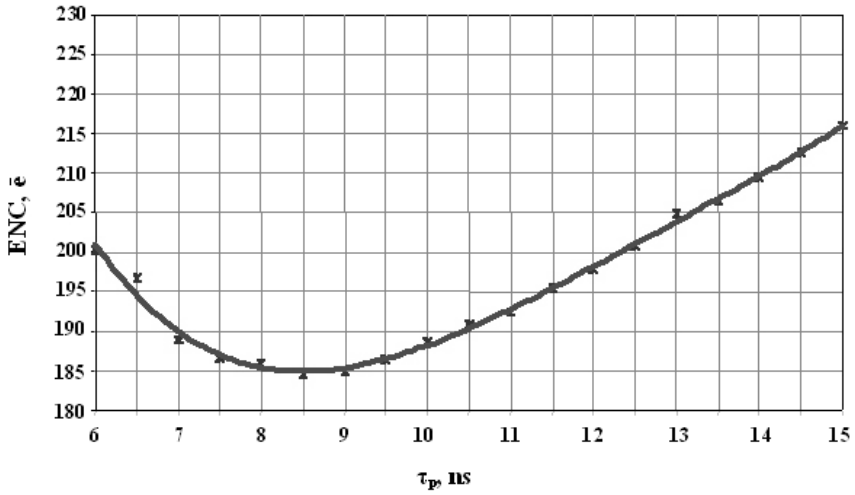


5.8 pav. *ENC ir vartojamosios galios priklausomybė nuo apkrovos varžos (C_{det}=0,2 pF, Q_{det}=10 fC, C_L=2,5 pF, išskyrus 50 Ω apkrovą, kai C_L=0 pF, T_{ap}=+27 ºC)*

Ekvivalentinio triukšmo krūvio *ENC* įėjime priklausomybė nuo registracijos trukmės τ_p pavaizduota 5.9 paveiksle. Ši funkcija, kaip ir KMOP KJS atvėju (žr. 3.1 poskyrį) yra kvadratinė, su vienu globaliu minimumu, kuris atitinka triukšmo minimumą, t.y 184 ē, esant τ_p=8,5 ns. Kairėje minimumo, funkcijos reikšmės auga dėl nuosekliojo triukšmo įtakos, o dešinėje didėja dėl lygiagrečiojo triukšmo. Reiktų pastebėti ir tai, kad mirgėjimo triukšmo dedamoji, kaip ir KMOP atveju, nepriklauso nuo registracijos trukmės, t. y. ji yra pastovi ir mūsų nagrinėjamu atveju yra apie 88 ē.

ATJ ir paties stiprintuvo nuotėkio srovės daro poveikį perdavimo koeficientui ir sukelia triukšmus. Dėl jonizuojančios spinduliuotės poveikio nuotėkio srovės padidėja, mažėja perdavimo koeficientas ir padidėja *ENC*. Ekvivalentinio triukšmų krūvio priklausomybė nuo nuotėkio srovių yra pateikta 5.10 paveiksle. Teoriškai analizuojant triukšmus, žinoma, kad ekvivalentinis triukšmų krūvis priklauso nuo nuotėkio srovių, nes lygiagretus „baltas“ triukšmas yra tiesiog proporcingas nuotėkio srovei. Atlikus modeliavimą nuotėkio srovių diapazone nuo -1 μA iki +1 μA, nustatyta tikslesnė *ENC* priklausomybė nuo nuotėkio srovės (5.10 pav.). Matyti, kad mažinant nuotėkį, ekvivalentinių

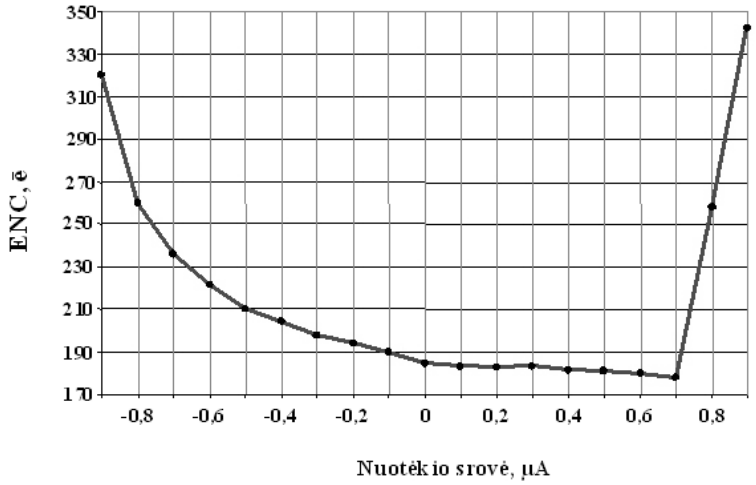
triukšmų krūvis palaipsniui mažėja. Mažiausia *ENC* reikšmė, lygi 178 ē, apskaičiuota, esant nuotėkio srovei, lygiai +0,7 μA. Toliau didinant nuotėkio srovę, sparčiai didėja ekvivalentinių triukšmų krūvis, kai ji ra lygi +0,9 μA, tai triukšmai jau yra apie 342 ē.



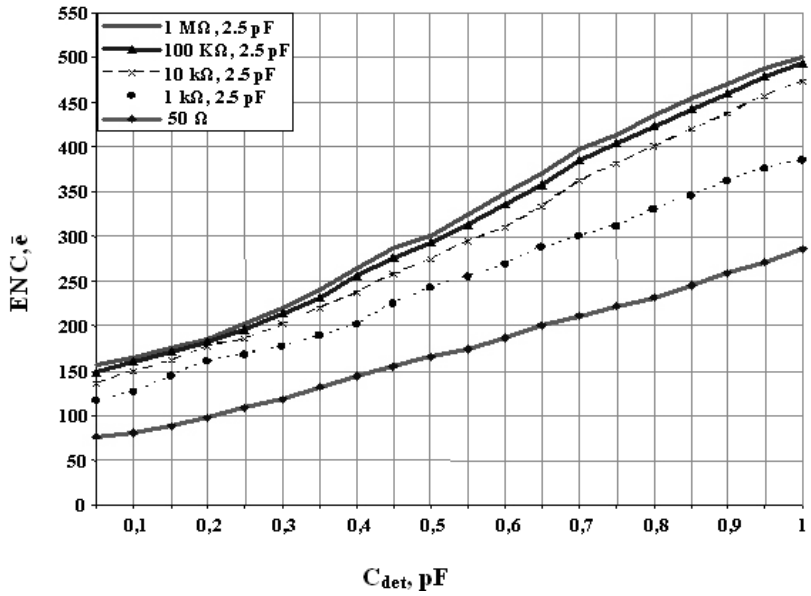
5.9 pav. *Ekvivalentinio triukšmų krūvio ENC įėjime priklausomybė nuo registracijos trukmės* τ_p

Modeliavimo rezultatai rodo, kad esant mažiausiai jutiklio talpai 0,05 pF, KJS turi ir mažiausius triukšmus (5.11 pav.). Mažinant apkrovos varžą ir esant tai pačiai apkrovos talpai, triukšmai palaipsniui mažėja, kadangi didėja vartojamoji galia. Esant 50 Ω apkrovai ir jutiklio talpai, lygiai 0,05 pF, triukšmai yra vos 77 ē. Didinant jutiklio talpą, *ENC* praktiškai didėja tiesiškai. Šį kitimą nemaža dalimi sąlygoja jutiklio nuotėkio srovės. Mažesnės talpos jutikliai pasižymi ir atitinkamai mažesnėmis nuotėkio srovėmis, todėl didinant jutiklio talpą, didėja nuotėkio srovės ir tuo pačiu didėja lygiagretus „baltasis“ triukšmas ir *ENC*.

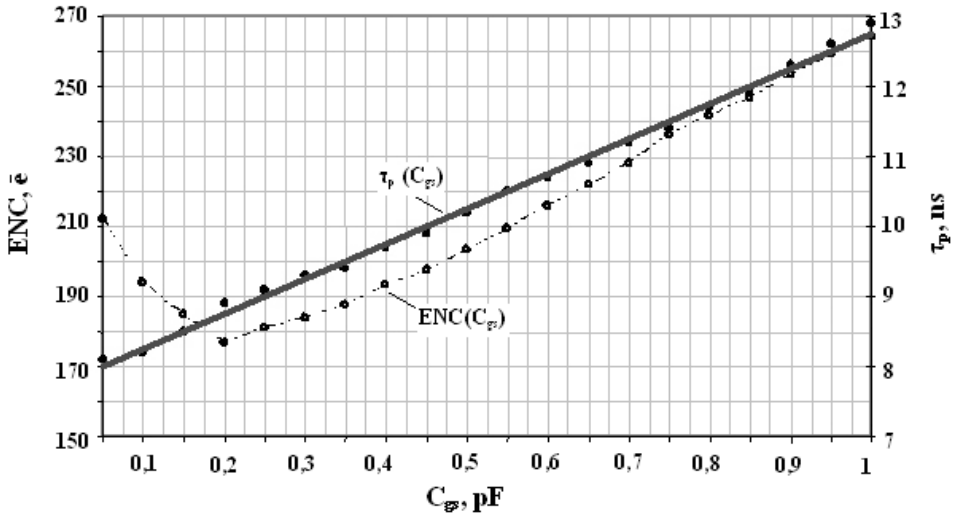
ENC priklausomybė nuo KJS įėjimo tranzistoriaus C_{gs} pateikta 5.12 paveiksle. Kaip matyti iš šio paveikslo $ENC(C_{gs})$ funkcija yra kvadratinio pobūdžio, t. y. turi vieną globalų minimumą. Atidžiau pažiūrėjus į šį grafiką, galima pastebėti, kad šis minimumas yra gaunamas kai jutiklio talpa yra artima C_{gs} talpai, t. y. apie 0,2 pF. Didinant tranzistoriaus įėjimo C_{gs} talpą, buvo pastebėtas ir registracijos trukmės kitimas. Pastaroji, didinant talpą, didėja tiesiškai. Esant talpai 0,05 pF, registracijos trukmė yra apie 8 ns, o kai 1 pF, ši padidėja iki 12,9 ns (5.12 pav.).



5.10 pav. *Ekvivalentinio triukšmų krūvio ENC priklausomyė nuo nuotėkio srovės (Q_{det}=10 fC, C_{det}=0,2 pF, R_L=1 MΩ, C_L=2,5 pF, T_{ap}=+27 ºC)*



5.11 pav. *Ekvivalentinio triukšmų krūvio ENC priklausomybė nuo jutiklio talpos, kai yra įvairios KJS apkrovos (Q_{det}=10 fC, T_{ap}=+27 ºC)*



5.12 pav. *Ekvivalentinio triukšmų krūvio ENC ir registracijos trukmės τ_p priklausomybės nuo KJS įėjimo tranzistoriaus C_{gs} talpos (Q_{det}=10 fC, C_{det}=0,2 pF, R_L=1 MΩ, C_L=2,5 pF)*

5.6. Penktojo skyriaus išvados

1. GaAs lauko tranzistorių su Šotki barjeru elektriniai parametrai arti jų uždarymo ribos, kai srovės ištaka-santaka tankis (50...150) μA/mm^2, o slenkstinės įtampos (-0,45...-0,75)V, užtūros ilgis l μm, o plotis (10...200) μm. Šioje tranzistorių veikimo srityje jų statumas g_m=(1...50) mS/mm, o išėjimo laidumas – g_{ds}=(0,02...0,10) mS/mm, kai įtampa santaka-ištaka 1,5 V.

2. GaAs krūviui jautrių stiprintuvų modeliavimo su SPICE programa rezultatai gauti įvairiose KJS darbo sąlygose, kai taškinių jutiklių talpų C_{det} diapazonas buvo (0,05...1) pF, įėjimo signalų diapazonas (1...100) fC, išėjimo apkrova R_L=50 Ω , 1 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ ir 1 MΩ, C_L=2,5pF, o aplinkos temperatūra kito nuo -60 ºC iki +125 ºC. Rezultatai buvo atvaizduoti tokiomis priklausomybėmis, iš kurių analizės matyti GaAs KJS pagrindinių elektrinių parametrų gerinimo kryptys.

3. Pagrindiniai KJS elektriniai parametrai, kai įėjimo signalas kinta nuo 1 iki 20 fC, stiprintuvo apkrovos varža – 1 MΩ, apkrovos talpa – 2,5 pF, o įėjimo talpa 0,2 pF, apskaičiuoti tokie: registracijos trukmė yra lygi 8,5 ns, perdavimo koeficientas (37,7...39,4) mV/fC. Ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC* KJS įėjime yra mažas ir lygus 184 ē, o vartojamoji galia neviršija 1 mW.

4. KJS žemose temperatūrose pasižymi mažais triukšmais ir didesniu stiprinimu. Didėjant taškinio jutiklio talpai, tiesiškai didėja KJS ekvivalentinis

triukšmų krūvis ENC ir registracijos trukmė. Be to pastarieji dydžiai yra susiję kvadratine funkcija, kuri turi vieną globalų minimumą, atitinkantį mažiausią triukšmo vertę.

5. ATJ ir KJS nuotėkio srovės daro poveikį perdavimo koeficientui bei „signalas/triukšmas“ santykiui (pastarieji dydžiai mažėja). Esant nulinei nuotėkio srovei, sumažinama lygiagretaus triukšmo dedamoji, o visas *ENC* sumažėja iki (175...185) ē.

6. KJS ekvivalentinis triukšmų krūvis *ENC* yra tiesiog proporcingas apkrovos varžai, o vartojamoji galia yra jai atvirkščiai proporcinga. Vadinasi, kai yra maža apkrovos varža, tai gaunami ir mažesni triukšmai, tačiau didesnė vartojamoji galia, pvz.: kai apkrova yra lygi 50 Ω, tai atitinkamai *ENC*=99 ē, o galia – 2,41 mW; o kai apkrova yra lygi 1 MΩ ir 2,5pF, tai – 184 ē ir 0,94 mW.

6

Rezultatų apibendrinimas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurta KJS inžinerinio skaičiavimo ir projektavimo metodika, pagal kurią iš teorinių modelių ir grafinių priklausomybių, siejančių krūviui jautrių stiprintuvų parametrus su tranzistorių matmenimis bei tranzistorių darbo režimais, galima apskaičiuoti tranzistorių matmenis, vartojamą galią bei minimalius triukšmus ir kitus parametrus. Optimalaus KJS įėjimo tranzistorių matmenų apskaičiavimui įvesta KJS kokybės funkcija, leidžianti gauti optimalius tranzistoriaus matmenis ekvivalentinių triukšmų krūvio ir vartojamosios galios atžvilgiu. KJS kokybės funkcija yra *ENC(W)* ir *P(W)* funkcijų kvadratinio pobūdžio su vienu minimumu sandauga. Minimumo taške apskaičiuojamas optimalus tranzistoriaus plotis, pvz. 130 nm technologijos atveju gauta, kad optimalus įėjimo tranzistoriaus plotis W_{opt} yra 1...1,2 µm ribose, o 90 nm tranzistoriaus ilgio technologijoje W_{opt} – apie 430...450 nm. Ji naudotina įvairių KJS palyginamajai analizei.

2. Pasiūlyta nauja SEDRS ATJ analoginės elektronikos architektūra, kuri įgalina sumažinti jutiklių nuotėkio sroves ir KJP triukšmus bei valdyti perdavimo koeficientą, atraminę įtampą, darbinę srovę bei vartojamąją galią. Nuotėkio srovės kompensavimo grandinei valdyti panaudojus 8-bitų SAK su srovės išėjimu, galima sukomutuoti 255 galimų KJP $2I_p$ srovės kombinacijų, t. y. nuo 0 nA iki 255 nA, kas 1 nA. Toks nuotėkio srovės kompensavimo grandinės $2I_p$ srovės valdymas apimtų plačią ATJ nuotėkio srovės juostą ir leistų sumažinti

KJP *ENC*.

3. Submikroninei 130 nm SCN013 CMRF8SF KMOP technologijai apskaičiuotas ir išanalizuotas KJP su detektoriaus nuotėkio srovės kompensavimo grandine, kuri sumažino ekvivalentinį triukšmų krūvį *ENC* 23 %, t. y. iki 82 ē. Šis *ENC* minimumas gautas, kai nuotėkio srovė keitėsi nuo -3 nA iki +6 nA. Skaičiavimai atlikti SPICE programiniais paketais, naudojant IBM kompanijos 130 nm technologijos KMOP tranzistorių BSIM4 modelius su triukšminiais parametrais. KJP perdavimo koeficientas lygus K=115 mV/kē, o registravimo trukmė τ_p=45 ns, vartojamoji galia vienam kanalui gauta apie 1,2 μW. Kokybės funkcija yra lygi 98,4 μWē.

4. Suprojektuotas nanometrinės 90 nm 90SRF technologijos KJP su nuotėkio srovės kompensavimo grandine, vartojantis labai mažą apie 500 nW galią, o jo kokybės funkcija yra lygi 80 μWē. Kiti pagrindiniai KJP parametrai yra tokie: vienpolis išėjimo signalas, kurio registravimo trukmė τ_p yra apie (35...40) ns, perdavimo koeficientas (60...90) mV/kē, išėjimo signalo netiesiškumas (1...5) kē įėjimo signalo intervale yra apie 1,6 %, o ekvivalentinis triukšmų krūvis, kai įėjimo signalas Q_{det} diapazone (1...10) kē ir jutiklio talpa C_{det}=30 fF, mažesnis nei 160 ē.

5. Atlikti 0,25 μm technologijos KJP įvairiose veikimo sąlygose skaičiavimai ir analizė, naudojant kompanijos MOSIS 0,25 μm technologijos KMOP tranzistorius ir jų BSIM3V3 modelius. Gauti tokie pagrindiniai KJP parametrai: perdavimo koeficientas K=125 mV/kē, registracijos trukmė τ_p≈50 ns, vartojamoji galia yra apie 2,2 μW/priešstiprintuviui, o ekvivalentinis triukšmų krūvis įėjime mažesnis nei 110 ē. Tokio KJP kokybės funkcija yra lygi 297 μWē, ir lyginant su tos pačios technologijos CERN MEDIPIX-2 KJP, yra 4 kartus mažesnė.

6. GaAs krūviui jautrių stiprintuvų skaičiavimo ir modeliavimo su ORCAD-PSPICE programa rezultatai buvo gauti įvairiose KJS darbo sąlygose, kai taškinių jutiklių talpų C_{det} diapazonas buvo (0,05...1) pF, įėjimo signalų diapazonas Q_{det}=1...100 fC, išėjimo apkrova R_L=50, 1 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ ir 1 MΩ; C_L=2,5 pF, o aplinkos temperatūra keitėsi nuo -60 ºC iki +125 ºC. Šių priklausomybių analizė parodė GaAs KJS pagrindinių elektrinių parametrų gerinimo kryptis, pvz.: KJS elektriniai parametrai, kai įėjimo signalas keitėsi nuo 1 iki 20 fC, stiprintuvo apkrovos varža – 1 MΩ, apkrovos talpa – 2,5 pF, o įėjimo talpa 0,2 pF, apskaičiuoti tokie: registracijos trukmė yra lygi 8,5 ns, perdavimo koeficientas 37,7–39,4 mV/fC, ekvivalentinis triukšmų krūvis (*ENC*) KJS įėjime yra mažas ir lygus 184 ē, o vartojamoji galia neviršija 1 mW. Kai yra maža KJS apkrovos varža, tai gaunami ir mažesni triukšmai, tačiau didesnė vartojamoji galia, pvz.: kai apkrova yra lygi 50 Ω, tai atitinkamai *ENC*=99 ē, o galia – 2,41 mW; o kai apkrova yra lygi 1 MΩ ir 2,5 pF, tai – 184 ē ir 0,94 mW.

Literatūros sąrašas

[1] Barsoum, N.; Shafik, M.; Mahfouz, M ir kt. Digital X-Ray Library: A New Concept in Radiology Education. *Information & Communications Technology, ICICT,* 2006, p. 1–2.

[2] Kolovou, L.; Vatousi, M.; Lymperopoulos, D. ir kt. Advanced Radiology Information System. *Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE–EMBS,* 2005, p. 5457–5461.

[3] Hügging F. The ATLAS Pixel Detector. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2006, Vol. 53(3), p. 1732–1736.

[4] Blanquart, L.; J. Richardson, J.; Einsweiler, K.; Fischer, P. ir kt. FE-I2: A Front-End ReadoutChip Designed in a Commercial 0.25 μm Process for the ATLAS Pixel Detector at LHC. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2004, Vol. 51(4), p. 1358–1364.

[5] Hugging, F. The ATLAS pixel detector. *IEEE Trans. Nucl. Sci.,* 2006, Vol. 53 (3), p. 1732–1736.

[6] Medipix projektų internetinis adresas: http://www.cern.ch/MEDIPIX (žiūrėta 2008-05-09)

[7] V. Bareikis, V.; Dzindzelėta, B.; Matulionis, A.; Navickas, R.; Požėla, J. Low noise and power integrated preamlifiers on GaAs MESFETs. *Proceedings of 10-th Workshop. GaAs Detectors and Electronics for High-Energy Physics*, Singapore, 1992, p. 8–15.

[8] Dzindzelėta, B.; Navickas, R.; Požėla, J. Mažatriukšmiai monolitiniai labai mažos vartojamosios galios GaAs krūvio stiprintuvai. *Elektronika ir elektrotechnika,* Kaunas, Technologija, 1995, Nr. 2, p. 27–31.

[9] Навицкас, Р.; Пожела, Ю.; Морозов, В.; Ашмонтас, С. Зарядочувствительные GaAs усилители для микрополосковых и точечных детекторов. *Электроника и связь*, 2000, No. 8, Т. 2, с. 204–207.

[10] Navickas, R.; Morozov, V. Krūviui jautrūs stiprintuvai elementariųjų dalelių fizikai tirti. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, Technologija, 1995, Nr. 3, p. 32–34.

[11] Lopart, X.; Campbell, M.; San Secundo, D.; Pernigotti, E. Medipix2: a 64k pixel readout with 55 μm square elements working in single photon counting mode. *IEEE Trans. Nucl. Sci.,* 2002, Vol. 49(5), p. 2279–2283.

[12] Jakobson, C. G.; Asa, G.; Bar Lev, S.; Nemirovsky, Y. Low noise CMOS readout for CdZnTe detector arrays. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,* 1999, Vol. 428, p. 113–117.

[13] Batignani, G.; Bettarini, S.; Bosi, F. ir kt. Recent developments in 130 nm CMOS monolithic active pixel detectors. *Nucl. Phys. Proceed., Supplem*., 2007, Vol. 172, p. 20–24.

[14] Dzindzelėta, B. Mažos galios krūvio stiprintuvų GaAs MESFET tranzistorių modeliavimas. *Disertacija daktaro moksliniam laipsniui gauti*, Kaunas, 1994.

[15] Mathieson, K. ir kt. Charge sharing in silicon pixel detectors. *Nucl. Instrum. Methods*, 2002, Vol. A487, p. 113–122.

[16] Annovazzi, A.; Amendolia, S.R; Bigongiari, A. A GaAs pixel detectors-based digital mammographic system: Performances and imaging tests results. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 2007, Vol. 576, p. 154–159.

[17] Rossi, L. Pixel detectors hybridisation. *Nucl. Instr. and Meth*., 2003, Vol. A501, p. 239–244.

[18] Broennimann, Ch.; Glaus, F.; Gobrecht, J. ir kt. Development of an IndiumBump Bond Process for Silicon Pixel Detectors at PSI. *Nucl. Instrum. Methods,* 2006, Vol. 565(1), p. 303–308.

[19] Bisogni, M. G.; Bulajic, D.; Cetronio, A. ir kt. Interconnection techniques of GaAs pixel detector on silicon ASIC electronics. *Nucl. Scien. Symp. Conf. Record, IEEE,* 2004, Vol. 7, p. 4524–4527.

[20] Bigas, M.; Cabruja, E.; Lozano, M. Bonding techniques for hybrid active pixel sensors (HAPS). *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 2007, Vol. 574, p. 392–400.

[21] Ayzenshtat, A.I.; Budnitsky, D.L.; Koretskaya, O.B. ir kt. GaAs as a material for particle detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 2002, Vol. 494(1), p. 120–127.

[22] Wright, V. A.; Davidson, W. D. ir kt. 3D Medipix - A New Generation of X-ray Detectors. *Nucl. Instrum. Methods*, 2005, Vol. A546(1-2), p. 319–323.

[23] Wright, V. A.; Davidson, W. D. ir kt. 3D Medipix - a new generation of X-ray detectors. *Nucl. Scien. Symp. Conf. Record, IEEE,* 2004, Vol. 2, p. 1336–1343.

[24] Kreisler, B.; Gisela, A.; Durst, J. ir kt. 3D simulation of induced signals in the Medipix detector. *Nucl. Scien. Symp. Conf. Record, IEEE,* 2007, Vol. 4, p. 3166–3169.

[25] Jakubek, J.; Pospisil, S.; Uher, J. ir kt. Single neutron pixel detector based on Medipix-1 device. *Nucl. Scien. Symp. Conf. Record, IEEE,* 2003, Vol. 2, p. 1444–1447.

[26] Wright, V. A.; Davidson, W. D.; Melone, J. J. Three-dimensional Medipix-a new generation of X-ray detectors. *Nucl. Scien. IEEE Transactions*, 2005, Vol. 52, p. 1873–1876.

[27] Edling, F. DIXI - a Hybrid Pixel Detector for X-ray Imaging. *PhD theses*,

Department of Radiation Sciences at Uppsala University, 2004.

[28] Campbell, M.; Heijne, E. H. M.; Llopart, X. ir kt. New gaseous detectors: the application of CMOS pixel chips as direct anode. *Nucl. Scien. Symp. Conf. Record, IEEE,* 2004, Vol. 2, p. 955–958.

[29] Batignani, G. ; Bettarini, S. ; Bosi, F. ir kt. Recent developments in 130 nm CMOS monolithic active pixel detectors. *Nuclear Physics B (Proceedings Supplements),* 2007, Vol. 172*,* p. 20–24.

[30] Denes, P.; Bussat, J. M.; Lee, Z. Active Pixel Sensors for electron microscopy. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 2007, Vol. 579, p. 891–894.

[31] Bisogni, M.G.; Delogu, P.; Fantacci, M.E. ir kt. A Medipix2-based Imaging System for Digital Mammography with Silicon Pixel Detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.,* 2004, Vol. 51(5), p. 3081–3085.

[32] Novelli, M.; Amendolia, S.R.; Bisogni, M.G. ir kt. Semiconductor pixel detectors for digital mammography. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 2003, Vol. 509, p. 283–289.

[33] Jakubeka, J.; Granja, C.; Holya, T. ir kt. Neutron Imaging and Tomography with Medipix-2 and Dental Micro-roentgenography. *Nucl. Instrum. Methods,* 2007, Vol. A571(1–2), p. 69–72.

[34] Ballabriga, R.; Campbell, M.; Heijne, E. H. M. The Medipix3 Prototype, a Pixel Readout Chip Working in Single Photon Counting Mode With Improved Spectrometric Performance. *Nucl. Scien. IEEE Transactions,* 2007, Vol. 54, p. 1824–1829.

[35] Albertz, L.; Aizenshtadt, G.J; ..., Matulionis, A.; ..., Navickas, R.; ..., Požėla, J.; ..., Vaitkus, J. ir kt. Development of GaAs Detectors for Physics at Physics at the LHC 1998*. Publ. in: Experim. CERN*, 1998, p. 299–300.

[36] Albertz, L.; Aizenshtadt, G.J; ..., Matulionis, A.; ..., Navickas, R.; ..., Požėla, J.; ..., Vaitkus, J. ir kt. Development of GaAs Detectors for Physics at Physics at the LHC. 1997. *Publ. in: Experim. CERN,* 1997, p. 379–380.

[37] Navickas, R.; Morozov, V. Design of Charge Sensitive Amplifiers in a GaAs MESFET Technology. *Information Technology and Control*, Kaunas,

Technologija, 2000, Nr. 1(14), p. 60–64.

[38] Bertuccio G.; Canali, C.; De Geronimo, G. ir kt. Integration of Front-End Electronics with GaAs Pixel Detectors: Experimental and Feasibility Analysis. *IEEE Trans. Nucl. Sci.,* 1999, Vol. 46(4), p. 1209–1214.

[39] Arnaboldi, C.; Guazzoni, C. ir kt. Integrated HEMT-Based Charge Amplifier-Design and Experiment. *IEEE Trans. Nucl. Sci.,* 2001, Vol. 48(3), p. 473–478.

[40] Manfredi, P. F.; Manghisoni, M. Front-end electronics for pixel sensors. *Nucl. Instrum. Methods,* 2001, Vol. A465, p. 140–147.

[41] Bardelloni, G.; Bertolucci, E. ir kt. A new read-out system for an imaging pixel detector. *IEEE Nuclear Science Symp. Medical Imaging Conf., Lyon, France, Oct. 15–20*, 2000, p. 57–60.

[42] Navickas, R. Taškiniai GaAs detektoriai. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, Technologija, 1998, Nr. 5(18), p. 23–25.

[43] Navickas, R.; Morozov, V. Krūviui jautrių stiprintuvų konstrukcijos ypatybės. *Elektronika ir elektrotechnika,* Kaunas, Technologija, 1999, Nr. 1(19), p. 16–19.

[44] Lindner, M.; Fischer, P.; Florin, S. ir kt. Comparison of hybrid pixel detectors with Si and GaAs sensors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 2001, Vol. 466(1), p. 63–73.

[45] Fischer, P.; Krimmel, S.; Krüger, H.; Lindner, M. ir kt. Single Photon Counting X-ray Imaging with Si and CdTe Single Chip Pixel Detectors and Multichip Pixel Modules. *IEEE Trans. Nucl. Sci.,* 2004, Vol. 51(4), p. 1717–1723.

[46] Mettivier, G. ir kt. First images of a digital autoradiography system based on a Medipix2 hybrid silicon pixel detector. *Phys. Med. Biol.,* 2003, Vol. 48, N173–N181.

[47] Faruqi, A.R.; Henderson, R. Electronic detectors for electron microscopy. *Current Opinion in Structural Biology,* 2007, Vol. 17 (5), p. 549–555.

[48] Binkley, D. M.; Puckett, B. S.; Casey, M. E.; Lecomte, R. ir kt. A power

efficient, lownoise, wideband, integrated CMOS preamplifier for LSO/APD PET systems. *IEEE Trans. Nucl. Sci.,* May 2000, Vol. 47, p. 810–817.

[49] Magnan, P. Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 2003, Vol. 504(1), p. 199–212.

[50] Damerell, C.J.S. CCD-based vertex detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,* 2005, Vol. 541(1), p. 178–188.

[51] Phillips, W.C.; Stewart, A.; Stanton, M. ir kt. High-sensitivity CCD-based X-ray detector. *Journal of Synchrotron Radiation,* 2002, Vol. 9(1), p. 36–43.

[52] Evans, D.A.; Allport, P.P.; Casse, G. ir kt. CMOS active pixel sensors for ionising radiation. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 2005, Vol. 546(1), p. 281–285.

[53] Harder, J.; Radeka, V.; Smith, G. ir kt. Low-noise, low stored energy preamplifier for highvoltage radiation detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,* 2007, Vol. 576, p. 397–420.

[54] O'Connor, P.; Gramegna, G.; Rehak, P. ir kt. Ultra Low Noise CMOS preamplifier-shaper for X-ray spectroscopy. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 1998, Vol. 409, p. 315–321.

[55] Aspell, P.; Barney, D.; Bloch, P. ir kt. Delta: a charge sensitive front-end amplifier with switched gain for low-noise, large dynamic range silicon detector. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,* 2001, Vol. 461(1), p. 449–455.

[56] O'Connor P; De Geronimo, G. Prospects for charge sensitive amplifiers in scaled CMOS. *Nucl. Instrum. Methods,* 2002, Vol. A480, p. 713–726.

[57] Baturitsky, M. A.; Yu. P. Yurenya. The multichannel amplifier/ discriminator CMOS ASIC for visual light photon counters. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,* 2002, Vol. 492, p. 147–159.

[58] Pettersen, D.M.; Mikkelsen, S.; Talebi, J. A Readout ASIC for SPECT. *IEEE Trans. Nucl. Sci.,* 2004, Vol. 4, p. 2204–2210.

[59] Young Soo Kim, Gyuseong Cho, Jun-Hyung Bae. Analysis of noise

characteristics for the active pixels in CMOS image sensors for X-ray imaging. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 2007, Vol. 565, p. 263–267.

[60] Noulis, T.; Siskos, S.; Sarrabayrouse, G. Comparison between BSIM4.X and HSPICE flicker noise models in NMOS and PMOS transistors in all operating regions. *Micrielectronics Relaibility,* 2007, Vol. 47, p. 1222–1227.

[61] Hu, Y.; Deptuch, G. ir kt. A Low-Noise, Low-Power CMOS SOI Readout Front-End for Silicon Detectors Leakage Current Compensation With Capability. *IEEE Trans. Circuits Syst.,* Aug. 2001, Vol. 48, p. 1022–1030.

[62] Dirks, B.P.F.; Blondel, C.; Daly, F. ir kt. Leakage current measurements on pixelated CdZnTe detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,* 2006, Vol. 567(1), p. 145–149.

[63] Krummenacher, F. Pixel detectors with local intelligence: An IC designer point of view. Nucl. *Instrum. Methods Phys. Res*., 1991, Vol. A305, p. 527–532.

[64] Ulrici, J.; Fischer, P.; Klein, P. Imaging performance of a DEPFET pixel Bioscope system in Tritium autoradiography. *Nucl. Instrum. Methods*, 2004, Vol. A547, p. 424–436.

[65] Lietuvos Higienos Norma HN 94:2004 „Paprastosios ir kompiuterinės tomografijos bei profilaktinės mamografijos kokybės kontrolės reikalavimai ir vertinimo kriterijai“. Patvirtinta 2004 m. gruodžio 9 d. Nr. V–888, galioja nuo 2004 m. gruodžio 22 d.

[66] Tümer, T.O.; Yina, S.; Cajipea, V. High-resolution pixel detectors for second generation digital mammography. *IEEE Trans. Nucl. Sci.,* 2004, Vol. 51, p. 2379–2385.

[67] Yin, S.; Tumer, T.O. Hybrid direct conversion detectors for digital mammography. *IEEE Trans. Nucl. Sci*., 1999, Vol. 46, p. 2093–2097.

[68] Bisogni, M. G.; Boscardin, M.; Bulajic, D. Performance of an imaging system based on silicon pixel detectors of different thickness. *Nucl. Scien. IEEE Transactions*, 2005, Vol. 52, p. 1989–1993.

[69] Velthuis, J. J.; Allport, P.P.; Casse, G. A monolithic active pixel sensor for

particle detection in 0.25 μm CMOS technology. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res*., 2006, Vol. 560, p. 40–43.

[70] Gromov, V.; Kluit, R. Prototype of the Front-end Circuit for the GOSSIP (Gas On Slimmed Silicon Pixel) Chip in the 0.13 μm CMOS Technology, submitted to the proceedings of LECC06, September 25–29, 2006, Valencia, Spain.

[71] Radeka, V. Low-noise techniques in detectors. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.,* 1988, Vol. 38, p. 217–277.

[72] Rossi, L.; Fischer, P.; Rohe, T.; Wermes, N. Pixel Detectors: From Fundamentals to Applications. *Springer,* 2005.

[73] Passeri, D.; Marras, A.; Biagetti, D. ir kt. Characterization of Active Pixel Sensors fabricated in CMOS 0.18 _m technology. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,* 2007, Vol. 582 (3), p. 871–875.

[74] Tae Hoon Lee; Gyuseong Cho; Hee Joon Kim; Seung Wook Lee ir kt. Analysis of 1/f noise in CMOS preamplifier with CDS circuit. *Nuclear Science Symposium Conference Record, 2001 IEEE*, 2001, Vol. 2, p. 792–796.

[75] Ratti, L.; Manghisoni, M.; Re, V. ir kt. Monolithic pixel detectors in a 0,13 μm CMOS technology with sensor level continuous time charge amplification and shaping. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,* 2006, Vol. 568(1), p. 159–166.

[76] Anelli, G.; Faccio, F.; Florian, S.; Jarron, P. Noise characterization of a 0.25 μm CMOS technology for the LHC experiments. *Nucl. Instrum. Methods*, 2001, Vol. A457, p. 361–368.

[77] De Geronimo, G.; O'Connor, P.; Radeka, V. Front-end electronics for imaging detectors. *Nuclear Instrum. Methods*, 2001, Vol. A471 p. 192–199.

[78] Hooge, F. N. 1/f noise sources. *IEEE Trans. Electron Devices,* Nov. 1994, Vol. 41(11), p. 1926–1935.

[79] Manghisoni, M.; Ratti, L.; Speziali, V. Submicron CMOS technologies for low-noise analog front-end circuits. *IEEE Trans. Nucl. Sci*., Aug. 2002, Vol. 49(4), p. 1783–1790.

[80] Manghisoni, M.; Ratti, L.; Re, V.; Speziali, V. Noise Performances of 0.13 μm CMOS Technologies for Detector Front-end Applications. *IEEE Trans. Nucl. Sci.,* 2005, Vol. 18(3), p. 955–959.

[81] Chew, K.W.; Yeo, K.S.; Chu, S.F.S. ir kt. Impact of device scaling on the 1/f noise performance of deep submicrometer thin gate oxide CMOS devices. *Solid State Electronics*, 2006, Vol. 50(7), p.1219–1226.

[82] Kolhatkar, J. S.; Salm, C.; Knitel, M. J.; Wallinga, H. Constant and Switched Bias Low- Frequency Noise in p-MOSFETs with Varying Gate-Oxide Thickness. *Proceedings of 32nd ESSDERC*, Sept. 2002, p. 83–86.

[83] Chew, K. W.; Yeo, K. S.; Chu, S. F. Effect of technology scaling on the 1/f noise of deep submicron PMOS transistors. *Solid-State Electronics*, 2004, Vol. 48(7), p. 1101–1109.

[84] Kapnistis, C.; Misiakos, K. ir kt. Noise performance of pixel readout electronics using very small area devices in CMOS technology. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,* 2001, Vol. 458(3), p. 729–737.

[85] Baishya, S.; Mallik, A.; Sarkar, C.K. A threshold voltage model for short-channel MOSFETs taking into account the varying depth of channel depletion layers. *Microelectronics Reliability*, 2008, Vol. 48 (1), p. 17–22.

[86] MOSIS, Integrated Circuits Fabrication Service: http://www.mosis.org (žiūrėta 2008-05-09)

[87] Hu, S. C.; Chuah, Y. K. Power consumption of semiconductor fabs in Taiwan. *Energy, the International Journal*, 2003, 28(8), p. 895–907.

[88] IBM, IBM Semiconductor solutions: www-03.ibm.com/technology/ges/semiconductor (žiūrėta 2008-05-09)

[89] Teshigawara, M.; Kusano, J. ir Gas yield and mechanical property of super insulator (polyimide and polyester) after ray irradiation. *Teion Kogaku.* 41(3), 2006, p. 99–104.

[90] Cheng, Y. BSIM3v3 User's manual. University of California, Berkeley, 1996.

[91] Xiu, X. BSIM4.3.0 User's manual. University of California, Berkeley,

2003.

[92] Pratte, J.F.; Robert, S.; De Geronimo, G.; O'Connor, P. Design and Performance of 0.18-μm CMOS Charge Preamplifiers for APD-Based PET Scanners. *IEEE Trans. Nucl. Sci*., 2004, Vol. 51(5), p. 1979–1985.

[93] Smith, K. M; GaAs Microstrip Detector Development by the RD Collaboration. *Proc. of the 20th Workshop of the INFN Eloisatron Project "GaAs Detectors and Electronics for High-Energy Physics"*, Erice, Trapani, Italy, 12–18 Jan. 1992, World Scientific Publ. Co., p. 269–282.

[94] Noulis, T.; Siskos, S. ir kt. Comparison between BSIM4.X and HSPICE flicker noise models in NMOS and PMOS transistors in all operating regions. *Microelectronic Reliability*, 2007, Vol. 47 (8), p. 1222–1227.

[95] Jeon, J.; Lee, J.D.; Park, B.G. ir kt. An analytical channel thermal noise model for deep-submicron MOSFETs with short channel effects. *Solid State Electronics*, 2007, Vol. 51 (7), p. 1034–1038.

[96] Anelli, G.; Campbell, M. Radiation tolerant VLSI circuits in standard deep submicron CMOS technologies for the LHC experiments: Practical design aspects. *IEEE Trans. Nucl. Sci*., 1999, Vol. 45, Nr. 6, p. 1690–1696.

[97] Fang, D.; Xie, H. A low-power low-noise capacitive sensing amplifier for integrated CMOSMEMS inertial sensors. *The IASTED International Conference on Circuits, Signals, and Systems*, 2004, p. 96–101.

[98] Rizzo, G; Bettarini, S.; Calderini, G. A novel monolithic active pixel detector in 0.13 μm triple well CMOS technology with pixel level analog processing. *Nucl. Instrum. Methods Phys*. *Res*., 2006, Vol. 565, p. 195–201.

[99] Tae-Hoon Lee, Gyuseong Cho. Monte Carlo based time-domain Hspice noise simulation for CSA-CRRC circuit. *Nucl. Instrum. Methods Phys*. *Res.*, 2003, Vol. 505, p. 328–333.

[100] Manghisoni, M.; Ratti, L.; Re, V. ir kt. Low-noise design criteria for detector readout systems in deep submicron CMOS technology. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,* 2002, Vol. 478(1), p. 362–366.

[101] Kalna, K.; Droopad, R.; Passlack, M. Monte Carlo simulations of InGaAs nano-MOSFETs. *Micrielectronics Relaibility*, 2007, Vol. 84, p. 2358–2361.

Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema

Straipsniai Mokslinės informacijos instituto pagrindinio sąrašo (*Thomson ISI Web of Science*) leidiniuose

[1A] Navickas, R.; Barzdėnas, V. The hybrid pixel sensors and read-out electronics. *Trans Tech Publications: Solid State Phenomena*, ISSN 1012-0394, 2006, Vol. 113. p. 453–458. http://www.ttp.net/3-908451-21-3.html

[2A] Barzdėnas, V.; Navickas, R. Electron Noise Charge Minimization in 130 nm CMOS Preamplifiers. *Acta Physica Polonica,* ISSN 0587-4246, 2008, Vol. 113, Nr. 3. p. 825–828.

Straipsniai Mokslinės informacijos instituto duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose (*Thomson ISI Masters Journal List*)

[3A] Barzdėnas, V.; Navickas, R. The 90 nm CMOS Charge Sensitive Preamplifier. *Elektronika ir elektrotechnika*, ISSN 1392-1215, 2008, Nr. 1(81), p. 69–72.

[4A] Barzdėnas, V.; Navickas, R. Leakage Current Compensation for the 130 nm CMOS Charge Sensitive Preamplifier. *Elektronika ir elektrotechnika*, ISSN 1392-1215, 2007, Nr. 5(77), p. 33–36.

[5A] Barzdėnas, V.; Navickas, R. Simulation of Low-Noise Low-Power CMOS Readout Front-End Electronics for Mammo- and Dentography. *Elektronika ir elektrotechnika*, ISSN 1392-1215, 2006, Nr. 6 (70), p. 75–78.

Straipsniai *INSPEC* tarptautinėje duomenų bazėje referuojamuose leidiniuose

[6A] Navickas, R.; Barzdėnas, V. GaAs krūviui jautrių stiprintuvų skaičiavimas ir analizė. *Elektronika ir elektrotechnika,* ISSN 1392-1215, 2005, Nr. 6(62), p. 47–51.

[7A] Barzdėnas, V.; Navickas, R. Dvilustės skaitmeninės diagnostinės sistemos mamo- ir dentografijoje. *Elektronika ir elektrotechnika,* ISSN 1392-1215, 2006, Nr. 2 (66), p. 36–40.

Straipsniai kituose užsienio ar tarptautinių organizacijų recenzuojamuose leidiniuose

[8A] Барзденас, В.; Навицкас, Р. Гибридные точечные детекторы для формирования рентгеновского изображения. *Известия Белорусской инженерной академии*, 2005, № 1(19)/1, с. 123–126.

[9A] Барзденас, В.; Навицкас, Р. Моделирование зарядочувствительных GaAs усилителей. *Известия Белорусской инженерной академии*, 2005, № 1(19)/4, с. 131–133.

[10A] Barzdėnas, V.; Navickas, R. Simulation of 0.13 μm CMOS charge sensitive preamplifier. *Инженерный вестник*, 2006, № 1(21)/1, с. 5–8.

[11A] Барзденас, В.; Навицкас, Р. Малошумящие зарядочувствительные GaAs усилители для гибридных точечных детекторов. *Электроника и связь,* ISSN 1811-4512, 2006, Тематический выпуск «Проблемы электроники», Т. 1, с. 23–26.

Straipsniai kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose

[12A] Barzdėnas, V. Krūviui jautrių stiprintuvų taikymas medicinoje. Iš *7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2004 m. kovo 19 d., medžiaga. Elektronika ir elektrotechnika,* ISBN 9986-05-803-1, Vilnius: Technika, 2004, p. 84–89.

[13A] Barzdėnas, V. Šiuolaikinių mamografijos ir dentografijos diagnostinių sistemų analizė. Iš *8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2005 m. kovo 18 d., medžiaga. Elektronika ir elektrotechnika,* ISBN 9986-936-4, Vilnius: Technika, 2005, p. 66–71.

[14A] Barzdėnas, V. 130 nm diferencinis, pakopinis krūviui jautrus priešstiprintuvis. Iš *10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateisis“, įvykusios Vilniuje 2007 m. kovo 16 d., medžiaga. Elektronika ir elektrotechnika,* ISBN 9986-9955-28-184-9, Vilnius: Technika, 2007, p. 29–36.

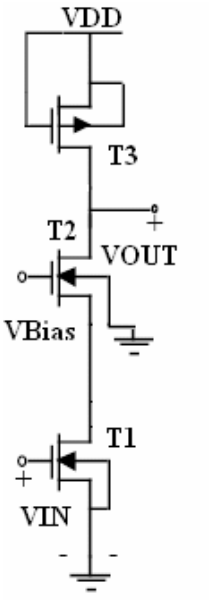
A PRIEDAS

Pakopinio KMOP stiprintuvo stiprinimo koeficiento skaičiavimas

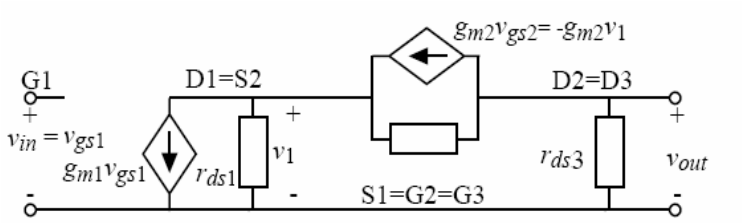
A1 PRIEDAS. Pakopinio KMOP stiprintuvo stiprinimo koeficiento skaičiavimas

A1 PRIEDAS. PAKOPINIO KMOP STIPRINTUVO STIPRINIMO KOEFICIENTO SKAIČIAVIMAS

Norint gauti didesnį stiprinimo koeficientą, būtina naudoti pakopas, kurių stiprinimo koeficientas yra didesnis. A1.1 pav. pavaizduotas KMOP pakopinis stiprintuvas, kuriame kaip pakopa panaudotas T2 tranzistorius.



a.



b.

A1.1 pav. *Pakopinis KMOP stiprintuvas: a. principinė elektrinė schema; b. pakopinio stiprintuvo ekvivalentinė schema*

Norint surasti tokio tipo stiprintuvo stiprinimo koeficientą, sudarykime lygčių sistemą:

$$\begin{cases} v_1 \cdot g_{ds1} + v_{in} \cdot g_{m1} + (v_1 - v_{out}) g_{ds2} + v_1 \cdot g_{m2} = 0 \\ v_{out} \cdot g_{ds3} + (v_{out} - v_1) \cdot g_{ds2} - v_1 \cdot g_{m2} = 0 \end{cases}. \qquad \text{(A1.1)}$$

Iš (A1.1) antrosios lygties gauname v_1:

$$v_{out} \cdot (g_{ds3} + g_{ds2}) = v_1 \cdot (g_{m2} + g_{ds2}), \qquad \text{(A1.2)}$$

$$v_1 = \frac{v_{out} \cdot (g_{ds3} + g_{ds2})}{(g_{m2} + g_{ds2})}. \quad \text{(A1.3)}$$

Persitvarkome (A1.1) pirmąją išraišką ir įsistatome gautą v_1 išraišką:

$$v_1(g_{ds1} + g_{ds2} + g_{m2}) - v_{out} \cdot g_{ds2} = -v_{in} g_{m1}, \quad \text{(A1.4)}$$

$$v_{out} \cdot \left(\frac{(g_{ds3} + g_{ds2})(g_{ds1} + g_{ds2} + g_{m2})}{(g_{m2} + g_{ds2})} - g_{ds2} \right) = -v_{in} \cdot g_{m1}. \quad \text{(A1.5)}$$

Tuomet stiprintuvo stiprinimo koeficientas A bus lygus:

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{-g_{m1}}{\left(\frac{(g_{ds3} + g_{ds2})(g_{ds1} + g_{ds2} + g_{m2})}{(g_{m2} + g_{ds2})} - g_{ds2} \right)} = \quad \text{(A1.6)}$$

$$= \frac{-g_{m1} \cdot (g_{m2} + g_{ds2})}{g_{ds2} \cdot g_{ds1} + g_{ds3} \cdot (g_{ds1} + g_{ds2} + g_{m2})}$$

Kadangi tranzistorius T2 parinktas taip, kad $g_{m1} >> g_{ds1}$ ir $g_{m2} >> g_{ds2}$, tai (A1.6) išraiška ir pakopinio KMOP stiprintuvo stiprinimo koeficientas bus lygus:

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} \approx \frac{-g_{m1}}{g_{ds1} \cdot \frac{g_{ds2}}{g_{m2}} + g_{ds3}}. \quad \text{(A1.7)}$$

B PRIEDAS

Krūviui jautraus priešstiprintuvio perdavimo funkcijos skaičiavimas

B1 PRIEDAS. Krūviui jautraus priešstiprintuvio perdavimo funkcijos skaičiavimas

B1 PRIEDAS. KRŪVIUI JAUTRAUS PRIEŠSTIPRINTUVIO PERDAVIMO FUNKCIJOS SKAIČIAVIMAS

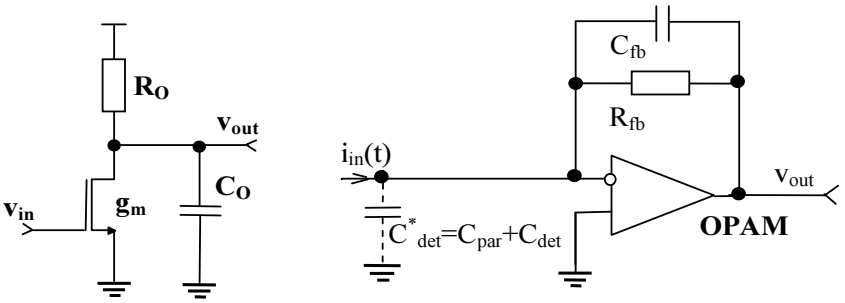
Šios skyriaus matematiniams skaičiavimams atlikti remsimės B1.1 paveiksle pavaizduotomis grandinėmis. B1.1 a. pav. pavaizduotas paprastas invertuojantis stiprintuvas, su tranzistoriaus statumu g_m ir apkrovos varža R_0 bei talpa C_0. Aukštų dažnių srityje perdavimo koeficientas bus išreikštas:

$$V(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{V_0}{1 + s/\omega_0}, \tag{B1.1}$$

čia $s=j\omega$, V_0 – stiprintuvo perdavimo koeficientas žemų dažnių srityje (DC sritis); ω_0– stiprintuvo ribinis dažnis. Pastarieji du dydžiai išreiškiami šiomis lygybėmis:

$$V_0 = g_m \cdot R_0, \tag{B1.2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{R_0 \cdot C_0}. \tag{B1.3}$$



a. *b.*

B1.1 pav. *Supaprastintos stiprintuvo a. ir krūviui jautraus priešstiprintuvio (KJP) b. principinės elektrinės schemos*

Akivaizdu, kad KJP srovių suma įėjime bus užrašoma taip:

$$I_{in} = s \cdot C^*_{det} \cdot V_{in} + (V_{in} - V_{out}) \cdot \left(\frac{1}{R_{fb}} + s \cdot C_{fb} \right), \tag{B1.4}$$

Eliminavus iš (B1.4) lygybės V_{in} gauname, kad

$$-\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{V_0}{\frac{1+V_0}{R_{fb}} + s\cdot\left[\frac{1}{\omega_0\cdot R_{fb} + C^*_{det} + (1+V_0)\cdot C_{fb}}\right] + s^2\cdot\frac{C^*_{det}+C_{fb}}{\omega_0}}. \quad \text{(B1.5)}$$

Kaip ankščiau buvo įrodyta, KJP efektinė įėjimo talpa yra žymiai didesnė nei jutiklio talpa. Be to, KJP perdavimo koeficientas visada yra daug didesnis už vienetą, o norint gauti maksimaliai didelį perdavimo koeficientą, C_{fb} talpa turi būti žymiai mažesnė už C_{det}. Šias visas sąlygas galima užrašyti taip:

$$V_0\cdot C_{fb} >> C^*_{det} >> C_{fb} \text{ ir } V_0 >> 1. \quad \text{(B1.6)}$$

Į (B1.5) lygybę įstačius (B1.2), (B1.3) reikšmes, KJP perdavimo charakteristika bus lygi:

$$H(s) = -\frac{V_{out}}{I_{in}} \approx \frac{R_{fb}}{1 + s\cdot\left(\frac{C_0}{g_m} + R_{fb}\cdot C_{fb}\right) + s^2\cdot\frac{R_{fb}\cdot C^*_{det}\cdot C_0}{g_m}}. \quad \text{(B1.7)}$$

Šios funkcijos vardiklį pertvarkius taip, kad

$$H(s) = -\frac{V_{out}}{I_{in}} \approx \frac{R_{fb}}{1 + s\cdot a + s^2\cdot b}, \quad \text{(B1.8)}$$

čia koeficientai a ir b yra lygūs:

$$a = \tau_d = R_{fb}\cdot C_{fb}, \quad \text{(B1.9)}$$

$$b = \tau_r = \frac{R_{fb}\cdot C^*_{\text{det}}\cdot C_0}{g_m}, \quad \text{(B1.10)}$$

čia τ_r – KJP signalo priekinio fronto laikinė konstanta (*angl. the rise time*), τ_d – KJP signalo nusistovėjimo laikinė konstanta (*angl. the decay time*).

Taigi, KJP kilimo laikinę konstantą τ_r galima sumažinti, sumažinus jutiklio talpą (į jutiklio talpą įskaičiuojama ir sujungimo su registruojančia elektronika parazitinės talpos) bei KJP išėjimo talpa. O KJP τ_d nusistovėjimo laikinė konstanta, yra grįžtamojo ryšio varžos ir talpos sandauga.

Iš (B1.8) charakteristikos mes galime apskaičiuoti KJP išėjimo signalą. Įėjimo signalo Laplaso transformacija, kai įėjimo signalas δ srovės impulsas $i_{in}(t)=Q\cdot\delta(t)$, yra konstanta $I_{in}(s)=Q$. Todėl

$$v_{out}(t) = L^{-1}\left\{Q \cdot \frac{V_{out}(s)}{I_{in}(s)}\right\} \approx \frac{Q}{C_{fb}} \cdot \frac{\tau_d}{\tau_d - \tau_r} \cdot \left(\exp\left(\frac{t}{\tau_d}\right) - \exp\left(\frac{t}{\tau_r}\right)\right). \quad \text{(B1.11)}$$

KJP registracijos trukmė τ_p randama iš (B1.11), suradus šios funkcijos maksimumą:

$$\frac{dv_{out}(t)}{dt} = 0. \quad \text{(B1.12)}$$

Gauname, kad registravimo trukmė τ_p bus lygi:

$$\tau_p = \frac{\tau_r \cdot \tau_d}{\tau_d - \tau_r} \ln\left(\frac{\tau_r}{\tau_d}\right). \quad \text{(B1.13)}$$

Iš (B1.11) ir (B1.13) lygčių galime surasti ir KJP išėjimo amplitudės dydį, kuri bus lygi:

$$v_{out}(\tau_p) = \frac{Q}{C_{fb}} \cdot \left(\frac{\tau_r}{\tau_d}\right)^{\frac{\tau_r}{\tau_d - \tau_r}}. \quad \text{(B1.14)}$$

(B1.11) ir (B1.14) lygybės įrodo tai, kad maksimali išėjimo amplitudė bus gaunama tuomet, kai KJP laikinių konstantų santykis bus kuo didesnis t. y. $\tau_d >> \tau_r$. Esant šiai sąlygai KJP signalas priklausys tik nuo Q/C_{fb} santykio ir visiškai nepriklausys nuo įėjimo signalo formos ir trukmės, nebent įėjimo signalo trukmė bus artima τ_d laikinei konstantai.

C PRIEDAS

Tranzistorių modeliai

C1 PRIEDAS. 90 nm KMOP 90SRF technologijos BSIM4 modelis

C2 PRIEDAS. 130 nm KMOP CMRF8SF technologijos BSIM4 modelis

C3 PRIEDAS. 0,25 μm KMOP SCN025 technologijos BSIM3V3 modelis

C1 PRIEDAS. 90 NM KMOP 90SRF TECHNOLOGIJOS BSIM4 MODELIS

```
.model  nmos  nmos  level=54

+version=4.0          binunit=1            paramchk= 1
mobmod =0
+capmod =2            igcmod =1            igbmod =1
geomod =1
+diomod =1            rdsmod =0            rbodymod= 1
rgatemod= 1
+permod =1            acnqsmod= 0            trnqsmod= 0

+tnom   =27           toxe= 2.5e-9           toxp= 1.4e-9
toxm   =2.5e-9
+dtox   =0.65e-9      epsrox =3.9          wint   =5e-009
lint   =7.5e-009
+ll     =0            wl     =0            lln    =1
wln    =1
+lw     =0            ww     =0            lwn    =1
wwn    =1
+lwl    =0            wwl    =0            xpart  =0
toxref =2.5e-9
+xl     =-40e-9
+vth0   =0.397        k1     =0.4          k2     =0.01
k3     =0
+k3b    =0            w0     =2.5e-006     dvt0   =1
dvt1   =2
+dvt2   =-0.032       dvt0w  =0            dvt1w  =0
dvt2w  =0
+dsub   =0.1          minv   =0.05         voffl  =0
dvtp0  =1.2e-009
+dvtp1  =0.1          lpe0   =0            lpeb   =0
xj     =2.8e-008
+ngate  =2e+020       ndep   =1.94e+018    nsd    =2e+020
phin   =0
+cdsc   =0.0002       cdscb  =0            cdscd  =0
cit    =0
+voff   =-0.13        nfactor=1.7          eta0   =0.0074
etab   =0
+vfb    =-0.55        u0     =0.0547       ua     =6e-010
ub     =1.2e-018
+uc     =-3e-011      vsat   =113760       a0     =1.0
ags    =1e-020
+a1     =0            a2     =1            b0     =-1e-020
b1     =0
+keta   =0.04         dwg    =0            dwb    =0
pclm   =0.06
```

```
+pdiblc1=0.001        pdiblc2=0.001        pdiblcb=-0.005
drout  =0.5
+pvag   =1e-020       delta  =0.01         pscbe1
=8.14e+008    pscbe2 =1e-007
+fprout =0.2          pdits  =0.08         pditsd =0.23
pditsl =2.3e+006
+rsh    =5            rdsw   =180          rsw    =90
rdw    =90
+rdswmin=0            rdwmin =0            rswmin =0
prwg   =0
+prwb   =6.8e-011     wr     =1            alpha0 =0.074
alpha1 =0.005
+beta0  =30           agidl  =0.0002       bgidl  =2.1e+009
cgidl  =0.0002
+egidl  =0.8

+aigbacc=0.012        bigbacc=0.0028       cigbacc=0.002
+nigbacc=1            aigbinv=0.014        bigbinv=0.004
cigbinv=0.004
+eigbinv=1.1          nigbinv=3            aigc   =0.012
bigc   =0.0028
+cigc   =0.002        aigsd  =0.012        bigsd  =0.0028
cigsd  =0.002
+nigc   =1            poxedge=1            pigcd  =1
ntox   =1

+xrcrg1 =12           xrcrg2 =5
+cgso   =1.9e-010     cgdo   =1.9e-010     cgbo   =2.56e-
011    cgdl   =2.653e-10
+cgsl   =2.653e-10    ckappas=0.03         ckappad=0.03
acde   =1
+moin   =15           noff   =0.9          voffcv =0.02

+kt1    =-0.11        kt1l   =0            kt2    =0.022
ute    =-1.5
+ua1    =4.31e-009    ub1    =7.61e-018    uc1    =-5.6e-
011    prt    =0
+at     =33000

+fnoimod=1            tnoimod=0

+jss    =0.0001       jsws   =1e-011       jswgs  =1e-010
njs    =1
+ijthsfwd= 0.01         ijthsrev= 0.001        bvs    =10
xjbvs  =1
+jsd    =0.0001       jswd   =1e-011       jswgd  =1e-010
njd    =1
```

```
+ijthdfwd= 0.01         ijthdrev= 0.001        bvd    =10
xjbvd  =1
+pbs    =1              cjs    =0.0005         mjs    =0.5
pbsws  =1
+cjsws  =5e-010         mjsws  =0.33           pbswgs =1
cjswgs =3e-010
+mjswgs =0.33           pbd    =1              cjd    =0.0005
mjd    =0.5
+pbswd  =1              cjswd  =5e-010         mjswd  =0.33
pbswgd =1
+cjswgd =5e-010         mjswgd =0.33           tpb    =0.005
tcj    =0.001
+tpbsw  =0.005          tcjsw  =0.001          tpbswg =0.005
tcjswg =0.001
+xtis   =3              xtid   =3

+dmcg   =0e-006         dmci   =0e-006         dmdg   =0e-006
dmcgt  =0e-007
+dwj    =0.0e-008       xgw    =0e-007         xgl    =0e-008

+rshg   =0.4            gbmin  =1e-010         rbpb   =5
rbpd   =15
+rbps   =15             rbdb   =15             rbsb   =15
ngcon  =1

.model  pmos  pmos  level=54

+version=4.0            binunit=1              paramchk= 1
mobmod =0
+capmod =2              igcmod =1              igbmod =1
geomod =1
+diomod =1              rdsmod =0              rbodymod= 1
rgatemod= 1
+permod =1              acnqsmod= 0              trnqsmod= 0

+tnom   =27             toxe   =2.5e-009     toxp   =1.4e-009
toxm   =2.5e-009
+dtox   =0.75e-9        epsrox =3.9            wint   =5e-009
lint   =7.5e-009
+ll     =0              wl     =0              lln    =1
wln    =1
+lw     =0              ww     =0              lwn    =1
wwn    =1
+lwl    =0              wwl    =0              xpart  =0
toxref =2.15e-009
+xl     =-40e-9
```

```
+vth0   =-0.339       k1     =0.4          k2     =-0.01
k3     =0
+k3b    =0            w0     =2.5e-006     dvt0   =1
dvt1   =2
+dvt2   =-0.032       dvt0w  =0            dvt1w  =0
dvt2w  =0
+dsub   =0.1          minv   =0.05         voffl  =0
dvtp0  =1e-009
+dvtp1  =0.05         lpe0   =0            lpeb   =0
xj     =2.8e-008
+ngate  =2e+020       ndep   =1.43e+018    nsd    =2e+020
phin   =0
+cdsc   =0.000258     cdscb  =0            cdscd  =6.1e-008
cit    =0
+voff   =-0.126       nfactor=1.7          eta0   =0.0074
etab   =0
+vfb    =0.55         u0     =0.00711      ua     =2.0e-009
ub     =0.5e-018
+uc     =-3e-011      vsat   =70000        a0     =1.0
ags    =1e-020
+a1     =0            a2     =1            b0     =0
b1     =0
+keta   =-0.047       dwg    =0            dwb    =0
pclm   =0.12
+pdiblc1=0.001        pdiblc2=0.001        pdiblcb=3.4e-008
drout  =0.56
+pvag   =1e-020       delta  =0.01         pscbe1
=8.14e+008    pscbe2 =9.58e-007
+fprout =0.2          pdits  =0.08         pditsd =0.23
pditsl =2.3e+006
+rsh    =5            rdsw   =200          rsw    =100
rdw    =100
+rdswmin=0            rdwmin =0            rswmin =0
prwg   =3.22e-008
+prwb   =6.8e-011     wr     =1            alpha0 =0.074
alpha1 =0.005
+beta0  =30           agidl  =0.0002       bgidl  =2.1e+009
cgidl  =0.0002
+egidl  =0.8

+aigbacc=0.012        bigbacc=0.0028       cigbacc=0.002
+nigbacc=1            aigbinv=0.014        bigbinv=0.004
cigbinv=0.004
+eigbinv=1.1          nigbinv=3            aigc   =0.69
bigc   =0.0012
+cigc   =0.0008       aigsd  =0.0087       bigsd  =0.0012
cigsd  =0.0008
```

```
+nigc   =1            poxedge=1            pigcd  =1 ntox
=1

+xrcrg1 =12           xrcrg2 =5
+cgso   =1.8e-010     cgdo   =1.8e-010     cgbo   =2.56e-
011    cgdl   =2.653e-10
+cgsl   =2.653e-10    ckappas=0.03         ckappad=0.03
acde   =1
+moin   =15           noff   =0.9          voffcv =0.02

+kt1    =-0.11        kt1l   =0            kt2    =0.022
ute    =-1.5
+ua1    =4.31e-009    ub1    =7.61e-018    uc1    =-5.6e-
011    prt    =0
+at     =33000

+fnoimod=1            tnoimod=0

+jss    =0.0001       jsws   =1e-011       jswgs  =1e-010
njs    =1
+ijthsfwd= 0.01         ijthsrev= 0.001        bvs    =10
xjbvs  =1
+jsd    =0.0001       jswd   =1e-011       jswgd  =1e-010
njd    =1
+ijthdfwd= 0.01         ijthdrev= 0.001        bvd    =10
xjbvd  =1
+pbs    =1            cjs    =0.0005       mjs    =0.5
pbsws  =1
+cjsws  =5e-010       mjsws  =0.33         pbswgs =1 cjswgs
=3e-010
+mjswgs =0.33         pbd    =1            cjd    =0.0005
mjd    =0.5
+pbswd  =1            cjswd  =5e-010       mjswd  =0.33
pbswgd =1
+cjswgd =5e-010       mjswgd =0.33         tpb    =0.005
tcj    =0.001
+tpbsw  =0.005        tcjsw  =0.001        tpbswg =0.005
tcjswg =0.001
+xtis   =3            xtid   =3

+dmcg   =0e-006       dmci   =0e-006       dmdg   =0e-006
dmcgt  =0e-007
+dwj    =0.0e-008     xgw    =0e-007       xgl    =0e-008

+rshg   =0.4          gbmin  =1e-010       rbpb   =5 rbpd
=15
```

```
+rbps    =15            rbdb    =15            rbsb    =15 ngcon
=1
```

C2 PRIEDAS. 130 NM KMOP CMRF8SF TECHNOLOGIJOS BSIM4 MODELIS

```
.model  nmos  nmos  level=54

+version=4.0          binunit=1           paramchk= 1
mobmod =0
+capmod =2            igcmod =1           igbmod =1
geomod =1
+diomod =1            rdsmod =0           rbodymod= 1
rgatemod= 1
+permod =1            acnqsmod= 0           trnqsmod= 0

+tnom   =27           toxe   =3.2e-9      toxp   =1.6e-9
toxm   =3.2e-9
+dtox   =0.65e-9      epsrox =3.9         wint   =5e-009
lint   =10.5e-009
+ll     =0            wl     =0           lln    =1
wln    =1
+lw     =0            ww     =0           lwn    =1
wwn    =1
+lwl    =0            wwl    =0           xpart  =0
toxref =2.25e-9
+xl     =-60e-9
+vth0   =0.3782       k1     =0.4         k2     =0.01
k3     =0
+k3b    =0            w0     =2.5e-006    dvt0   =1
dvt1   =2
+dvt2   =-0.032       dvt0w  =0           dvt1w  =0
dvt2w  =0
+dsub   =0.1          minv   =0.05        voffl  =0
dvtp0  =1.2e-010
+dvtp1  =0.1          lpe0   =0           lpeb   =0
xj     =3.92e-008
+ngate  =2e+020       ndep   =1.54e+018   nsd    =2e+020
phin   =0
+cdsc   =0.0002       cdscb  =0           cdscd  =0
cit    =0
+voff   =-0.13        nfactor=1.5         eta0   =0.0092
etab   =0
+vfb    =-0.55        u0     =0.05928     ua     =6e-010
ub     =1.2e-018
+uc     =0            vsat   =100370      a0     =1
ags    =1e-020
+a1     =0            a2     =1           b0     =0
b1     =0
```

```
+keta   =0.04         dwg    =0           dwb    =0
pclm   =0.06
+pdiblc1=0.001        pdiblc2=0.001       pdiblcb=-0.005
drout  =0.5
+pvag   =1e-020       delta  =0.01        pscbe1
=8.14e+008    pscbe2 =1e-007
+fprout =0.2          pdits  =0.08        pditsd =0.23
pditsl =2.3e+006
+rsh    =5            rdsw   =200         rsw    =100
rdw    =100
+rdswmin=0            rdwmin =0           rswmin =0
prwg   =0
+prwb   =6.8e-011     wr     =1           alpha0 =0.074
alpha1 =0.005
+beta0  =30           agidl  =0.0002      bgidl  =2.1e+009
cgidl  =0.0002
+egidl  =0.8

+aigbacc=0.012        bigbacc=0.0028      cigbacc=0.002
+nigbacc=1            aigbinv=0.014       bigbinv=0.004
cigbinv=0.004
+eigbinv=1.1          nigbinv=3           aigc   =0.012
bigc   =0.0028
+cigc   =0.002        aigsd  =0.012       bigsd  =0.0028
cigsd  =0.002
+nigc   =1            poxedge=1           pigcd  =1
ntox   =1

+xrcrg1 =12           xrcrg2 =5
+cgso   =2.4e-010     cgdo   =2.4e-010    cgbo   =2.56e-
011    cgdl   =2.653e-10
+cgsl   =2.653e-10    ckappas=0.03        ckappad=0.03
acde   =1
+moin   =15           noff   =0.9         voffcv =0.02

+kt1    =-0.11        kt1l   =0           kt2    =0.022
ute    =-1.5
+ua1    =4.31e-009    ub1    =7.61e-018   uc1    =-5.6e-
011    prt    =0
+at     =33000

+fnoimod=1            tnoimod=0

+jss    =0.0001       jsws   =1e-011      jswgs  =1e-010
njs    =1
+ijthsfwd= 0.01         ijthsrev= 0.001       bvs    =10
xjbvs  =1
```

```
+jsd    =0.0001       jswd   =1e-011       jswgd  =1e-010
njd    =1
+ijthdfwd= 0.01         ijthdrev= 0.001        bvd    =10
xjbvd  =1
+pbs    =1            cjs    =0.0005       mjs    =0.5
pbsws  =1
+cjsws  =5e-010       mjsws  =0.33         pbswgs =1
cjswgs =3e-010
+mjswgs =0.33         pbd    =1            cjd    =0.0005
mjd    =0.5
+pbswd  =1            cjswd  =5e-010       mjswd  =0.33
pbswgd =1
+cjswgd =5e-010       mjswgd =0.33         tpb    =0.005
tcj    =0.001
+tpbsw  =0.005        tcjsw  =0.001        tpbswg =0.005
tcjswg =0.001
+xtis   =3            xtid   =3

+dmcg   =0e-006       dmci   =0e-006       dmdg   =0e-006
dmcgt  =0e-007
+dwj    =0.0e-008     xgw    =0e-007       xgl    =0e-008

+rshg   =0.4          gbmin  =1e-010       rbpb   =5
rbpd   =15
+rbps   =15           rbdb   =15           rbsb   =15
ngcon  =1

.model  pmos  pmos  level=54

+version=4.0          binunit=1            paramchk= 1
mobmod =0
+capmod =2            igcmod =1            igbmod =1
geomod =1
+diomod =1            rdsmod =0            rbodymod= 1
rgatemod= 1
+permod =1            acnqsmod= 0            trnqsmod= 0

+tnom   =27           toxe   =3.2e-009    toxp   =1.6e-009
toxm   =3.2e-009
+dtox   =0.75e-9      epsrox =3.9          wint   =5e-009
lint   =10.5e-009
+ll     =0            wl     =0            lln    =1
wln    =1
+lw     =0            ww     =0            lwn    =1
wwn    =1
+lwl    =0            wwl    =0            xpart  =0
toxref =2.35e-009
```

```
+xl     =-60e-9
+vth0   =-0.321       k1     =0.4          k2     =-0.01
k3     =0
+k3b    =0            w0     =2.5e-006     dvt0   =1
dvt1   =2
+dvt2   =-0.032       dvt0w  =0            dvt1w  =0
dvt2w  =0
+dsub   =0.1          minv   =0.05         voffl  =0
dvtp0  =1e-009
+dvtp1  =0.05         lpe0   =0            lpeb   =0
xj     =3.92e-008
+ngate  =2e+020       ndep   =1.14e+018    nsd    =2e+020
phin   =0
+cdsc   =0.000258     cdscb  =0            cdscd  =6.1e-008
cit    =0
+voff   =-0.126       nfactor=1.5          eta0   =0.0092
etab   =0
+vfb    =0.55         u0     =0.00835      ua     =2.0e-009
ub     =0.5e-018
+uc     =-3e-011      vsat   =70000        a0     =1.0
ags    =1e-020
+a1     =0            a2     =1            b0     =-1e-020
b1     =0
+keta   =-0.047       dwg    =0            dwb    =0
pclm   =0.12
+pdiblc1=0.001        pdiblc2=0.001        pdiblcb=3.4e-008
drout  =0.56
+pvag   =1e-020       delta  =0.01         pscbe1
=8.14e+008    pscbe2 =9.58e-007
+fprout =0.2          pdits  =0.08         pditsd =0.23
pditsl =2.3e+006
+rsh    =5            rdsw   =240          rsw    =120
rdw    =120
+rdswmin=0            rdwmin =0            rswmin =0
prwg   =3.22e-008
+prwb   =6.8e-011     wr     =1            alpha0 =0.074
alpha1 =0.005
+beta0  =30           agidl  =0.0002       bgidl  =2.1e+009
cgidl  =0.0002
+egidl  =0.8

+aigbacc=0.012        bigbacc=0.0028       cigbacc=0.002
+nigbacc=1            aigbinv=0.014        bigbinv=0.004
cigbinv=0.004
+eigbinv=1.1          nigbinv=3            aigc   =0.69
bigc   =0.0012
```

```
+cigc   =0.0008       aigsd  =0.0087       bigsd  =0.0012
cigsd  =0.0008
+nigc   =1            poxedge=1            pigcd  =1
ntox   =1

+xrcrg1 =12           xrcrg2 =5
+cgso   =2.4e-010     cgdo   =2.4e-010     cgbo   =2.56e-
011    cgdl   =2.653e-10
+cgsl   =2.653e-10    ckappas=0.03         ckappad=0.03
acde   =1
+moin   =15           noff   =0.9          voffcv =0.02

+kt1    =-0.11        kt1l   =0            kt2    =0.022
ute    =-1.5
+ua1    =4.31e-009    ub1    =7.61e-018    uc1    =-5.6e-
011    prt    =0
+at     =33000

+fnoimod=1            tnoimod=0

+jss    =0.0001       jsws   =1e-011       jswgs  =1e-010
njs    =1
+ijthsfwd= 0.01         ijthsrev= 0.001        bvs    =10
xjbvs  =1
+jsd    =0.0001       jswd   =1e-011       jswgd  =1e-010
njd    =1
+ijthdfwd= 0.01         ijthdrev= 0.001        bvd    =10
xjbvd  =1
+pbs    =1            cjs    =0.0005       mjs    =0.5
pbsws  =1
+cjsws  =5e-010       mjsws  =0.33         pbswgs =1
cjswgs =3e-010
+mjswgs =0.33         pbd    =1            cjd    =0.0005
mjd    =0.5
+pbswd  =1            cjswd  =5e-010       mjswd  =0.33
pbswgd =1
+cjswgd =5e-010       mjswgd =0.33         tpb    =0.005
tcj    =0.001
+tpbsw  =0.005        tcjsw  =0.001        tpbswg =0.005
tcjswg =0.001
+xtis   =3            xtid   =3

+dmcg   =0e-006       dmci   =0e-006       dmdg   =0e-006
dmcgt  =0e-007
+dwj    =0.0e-008     xgw    =0e-007       xgl    =0e-008
```

```
+rshg   =0.4          gbmin  =1e-010       rbpb   =5 rbpd
=15
+rbps   =15           rbdb   =15           rbsb   =15
ngcon  =1
```

C3 PRIEDAS. 0,25 µM KMOP SCN025 TECHNOLOGIJOS BSIM3V3 MODELIS

```
.MODEL CMOSN NMOS (                    LEVEL  =49
+VERSION=3.1          TNOM   =27          TOX    =3.2E-9
+XJ     =1E-7         NCH    =2.3549E17   VTH0   =0.5539103
+K1     =0.7920863    K2     =3.846594E-5 K3     =0.2586715
+K3B    =-10          W0     =3.883281E-6 NLX    =3.913384E-8
+DVT0W  =0            DVT1W  =0           DVT2W  =0
+DVT0   =1.6599679    DVT1   =1           DVT2   =-0.3378021
+U0     =357.0541903  UA     =-9.22968E-10 UB    =2.789582E-18
+UC     =6.226526E-11 VSAT   =1.092353E5  A0     =1.7055543
+AGS    =0.3155091    B0     =-6.500771E-9 B1    =-8.130562E-8
+KETA   =-4.964409E-3 A1     =9.469275E-4  A2    =0.6858894
+RDSW   =200          PRWG   =0.4833128    PRWB  =-0.2
+WR     =1            WINT   =3.147536E-8  LINT  =3.857379E-8
+DWG    =-5.252897E-9 DWB    =-2.425392E-8 VOFF  =-0.1051189
+NFACTOR=1.5533666    CIT    =0            CDSC  =2.4E-4
+CDSCD  =0            CDSCB  =0            ETA0  =2.00509E-3
+ETAB   =2.127509E-4  DSUB   =4.403171E-3  PCLM  =1.159857
+PDIBLC1=0.3720376    PDIBLC2=3.755751E-4   PDIBLCB=-0.1
+DROUT  =0.9722553    PSCBE1 =4.093581E8    PSCBE2 =1.984792E-6
+PVAG   =0            DELTA  =0.01          RSH   =5
+MOBMOD =1            PRT    =0            UTE   =-1.5
+KT1    =-0.11        KT1L   =0            KT2   =0.022
+UA1    =4.31E-9      UB1    =-7.61E-18    UC1   =-5.6E-11
+AT     =3.3E4        WL     =0            WLN   =1
+WW     =0            WWN    =1            WWL   =0
+LL     =0            LLN    =1            LW    =0
+LWN    =1            LWL    =0            CAPMOD =2
+XPART  =0.5          CGDO   =5E-10        CGSO  =5E-10
+CGBO   =1.56E-10     CJ     =1.342288E-3  PB    =0.913908
+MJ     =0.4855485    CJSW   =1E-10        PBSW  =0.8
+MJSW   =0.5585698    CJSWG  =3.29E-10     PBSWG =0.8
+MJSWG  =0.5585698    CF     =0            PVTH0 =-2.763687E-3
+PRDSW  =-10          PK2    =-5.640759E-4 WKETA =-5.676329E-3
+LKETA  =-6.513967E-3  )
*
.MODEL CMOSP PMOS (                    LEVEL  =49
+VERSION=3.1          TNOM   =27          TOX    =3.2E-9
+XJ     =1E-7         NCH    =4.1589E17   VTH0   =-0.46254418
```

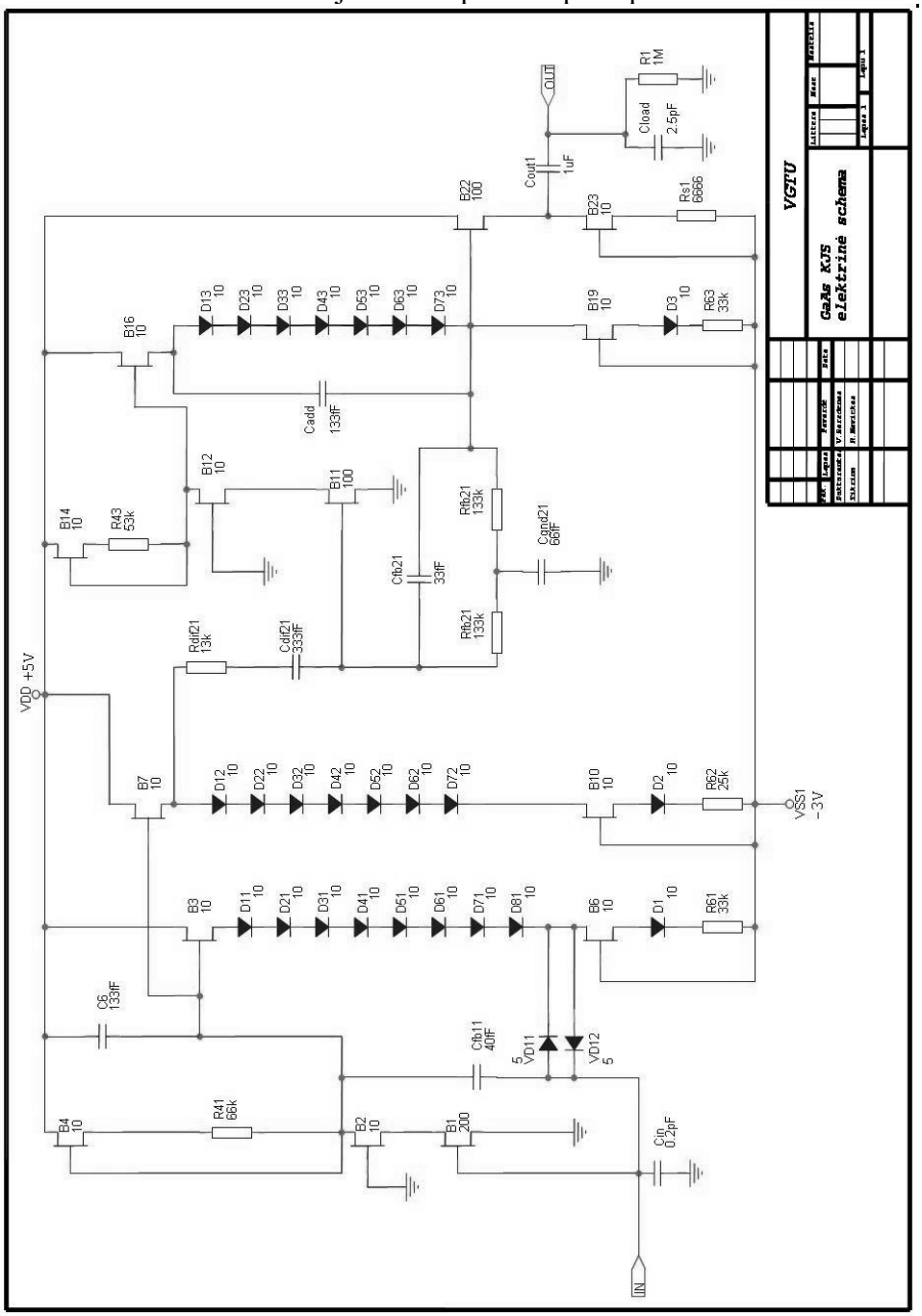
```
+K1    =0.8268184     K2    =-3.199609E-3   K3    =0.0997756
+K3B   =16.6481005    W0    =1.003165E-6    NLX   =1.081366E-8
+DVT0W =0             DVT1W =0              DVT2W =0
+DVT0  =2.0217504     DVT1  =1              DVT2  =-0.3
+U0    =114.0643135   UA    =1.244138E-9    UB    =1.373142E-21
+UC    =-9.40376E-11  VSAT  =1.038833E5     A0    =0.9603481
+AGS   =0.1462664     B0    =7.65625E-7     B1    =5E-6
+KETA  =-1.052444E-3  A1    =0.0578616      A2    =0.3
+RDSW  =1.58232E3     PRWG  =-0.0860589     PRWB  =-0.147902
+WR    =1             WINT  =0              LINT  =5.233256E-8
+DWG   =-1.777512E-8  DWB   =-2.56804E-9    VOFF  =-0.1099184
+NFACTOR=1.1904815    CIT   =0              CDSC  =2.4E-4
+CDSCD =0             CDSCB =0              ETA0  =0.1733069
+ETAB  =-0.1067733    DSUB  =1.0951178      PCLM  =1.3993013
+PDIBLC1=7.790593E-3  PDIBLC2=2.229505E-5   PDIBLCB=-1E-3
+DROUT =0.0942961     PSCBE1 =7.869271E10   PSCBE2 =1.896539E-8
+PVAG  =5.659713E-5   DELTA =0.01           RSH   =4.9
+MOBMOD =1            PRT   =0              UTE   =-1.5
+KT1   =-0.11         KT1L  =0              KT2   =0.022
+UA1   =4.31E-9       UB1   =-7.61E-18      UC1   =-5.6E-11
+AT    =3.3E4         WL    =0              WLN   =1
+WW    =0             WWN   =1              WWL   =0
+LL    =0             LLN   =1              LW    =0
+LWN   =1             LWL   =0              CAPMOD =2
+XPART =0.5           CGDO  =9E-10          CGSO  =9E-10
+CGBO  =1.56E-10      CJ    =1.082211E-3    PB    =0.873325
+MJ    =0.4083998     CJSW  =1E-10          PBSW  =0.8
+MJSW  =0.6018955     CJSWG =2.5E-10        PBSWG =0.8
+MJSWG =0.6018955     CF    =0              PVTH0 =-1.701459E-3
+PRDSW =48.1086782    PK2   =1.909214E-3    WKETA =0.0106647
+LKETA =-0.0199575
```

D PRIEDAS

GaAs krūviui jautraus stiprintuvo principinė elektrinė schema

D1 PRIEDAS. GaAs krūviui jautraus stiprintuvo principinė elektrinė schema

D1 PRIEDAS. GaAs krūviui jautraus stiprintuvo principinė elektrinė schema



ELEMENTARIŲJŲ DALELIŲ REGISTRAVIMO SISTEMŲ PIRMINIŲ GRANDINIŲ TYRIMAS IR TAIKYMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2008 08 06. 8,25 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius
Spausdino UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius

http://leidykla.vgtu.lt
VGTU leidyklos TECHNIKA 1523-M mokslo literatūros knyga
ISBN 978-9955-28-317-1
© Barzdėnas, V., 2008
© VGTU leidykla TECHNIKA, 2008