



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Tomas Tamulionis

**INTEGRINIŲ GRANDYNŲ APSAUGŲ NUO ELEKTROSTATINIŲ
IŠKROVŲ PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS**

**DESIGN AND RESEARCH OF ELECTROSTATIC DISCHARGE
PROTECTION FOR INTEGRATED CIRCUIT**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003

Mikro ir nano elektronikos specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2015

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)

Algirdas Baškys

(Vardas, pavardė)

(Data)

Tomas Tamulionis

**INTEGRINIŲ GRANDYŲ APSAUGŲ NUO ELEKTROSTATINIŲ
IŠKROVŲ PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS**

**DESIGN AND RESEARCH OF ELECTROSTATIC DISCHARGE
PROTECTION FOR INTEGRATED CIRCUIT**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003

Mikro ir nano elektronikos specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Vaidotas Barzdėnas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė dr. A. Žemienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2015

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

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

TVIRTINU

Kompiuterių inžinerijos katedros vedėjas
prof. Algirdas Baškys

2014 m. spalio mėn. d.

Studentui (ei) **Tomui Tamulioniui**

(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: **Apsaugos nuo elektrostatinės iškrovos tyrimas**

(lietuvių kalba)

Research of electrostatic discharge protection for integrated circuit

(anglų kalba)

Patvirtinta 201 ____ m. ____ mėn. ____ d. dekanų įsakymu Nr. ____

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2014 m. birželio mėn. ____ d.

Darbo tikslas: Ištirti elektrostatinių iškrovų apsaugas naudojamas integriniuose grandynuose.

Suprojektuoti bei išanalizuoti apsaugas nuo elektrostatinės iškrovos grandinę tinkančią ~4-5GHz dažnio integriniam grandynui.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Apžvelgti dažniausiai naudojamus elektrostatinių iškrovų testavimo modelius. Išanalizuoti apsaugų nuo elektrostatinių iškrovų grandines. Pasinaudojant programiniu paketu „Cadence“ suprojektuoti apsaugas nuo elektrostatinės iškrovos grandinę, tinkančią ~4-5GHz integriniam grandynui. Ištirti bei sumodeliuoti suprojektuotos grandinės pagrindinius parametrus. Parinkti tinkamiausias apsaugas aptartiems testavimo modeliams. Atlikti gautų modeliavimo rezultatų analizę bei palyginimą su kitais tokio pobūdžio tyrimais. Atlikus modeliavimo rezultatų analizę, pateikti išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Vadovas:

(parašas)

Vaidotas Barzdėnas, doc. dr.

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Užduotį gavau:

(studento parašas)

(data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Kompiuterių inžinerijos katedra

ISBN
Egz. sk.
Data-.....-..... ISSN

Antrosios pakopos studijų **Elektronikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Integrinių grandynų apsaugų nuo elektrostatiinių iškrovų projektavimas ir tyrimas**

Autorius **Tomas Tamulionis**

Vadovas **doc. dr. Vaidotas Barzdėnas**

Kalba:
lietuvių

Anotacija

Baigiamojo magistro darbo tikslas – suprojektuoti ir ištirti integriniuose grandynuose naudojamas apsaugas nuo elektrostatiinių iškrovų. Darbas susideda iš testavimo modelių ir tipinės bei aukštadažnių ESD apsaugų tyrimų.

Atlikta žmogaus kūno (HBM), įrenginių (MM), įkrauto įrenginio (CDM) ir impulsinės perdavimo linijos (TLP) modelių analizė. Išanalizuotos tipinės bei aukštadažinės ESD apsaugos grandinės. Suprojektuoti testavimo modeliai ir tipinė ESD apsaugos principinė elektrinė schema su topologija. Ištirtas modelių generuojamų impulsų poveikis tipinės apsaugos grandinei. Atlikti tyrimai keičiant žmogaus kūno modelio parametrus. Suprojektuotos trys tipinės ESD apsaugos principinės elektrinės schemos ir topologijos, galinčios atlaikyti skirtingų modelių sroves ir turinčios skirtingas pralaidumo dažnių juostas: HBM – 1,3 A srovė, 8,56 GHz juosta; MM – 3,6 A srovė, 4,71 GHz juosta; CDM – 10 A srovė, 3,72 GHz juosta. Sumodeliuotos suprojektuotų apsaugų dažninės amplitudinės charakteristikos. Ištirtas nuosekliai jungiamų diodų poveikis praleidžiamų dažnių juostos pločiui. Suprojektuotos aukštadažnių apsaugų principinės elektrinės schemos su lygiagrečiais ir nuosekliais LC kontūrais, skirtos 5 GHz grandynams apsaugoti.

Darbo apimtis – 83 p. teksto be priedų, 63 iliustr., 7 lentelės, 18 bibliografinių šaltinių, 1 priedas.

Prasminiai žodžiai: Apsauga nuo elektrostatinės iškrovos, Cadence, CDM, ESD, HBM, integriniai grandynai, MM.

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Electronics Department of Computer Engineering	ISBN _____ ISSN _____ Copies No. Date-.....-.....
--	--

Master Degree Studies Title Author Academic supervisor	Electronics Engineering study programme Master Graduation Thesis 4 Design and Research of Electrostatic Discharge Protection for Integrated Circuit Tomas Tamulionis Assoc Prof Dr Vaidotas Barzdėnas
---	--

Thesis language:
 Lithuanian

Annotation The aim of final master thesis is to design and research electrostatic discharge protection for integrated circuits. The work consists of testing models, typical protection and high frequency ESD protection researches. Tests models of human body (HBM), machine (MM), charged device (CDM) and transmission line pulse (TLP) have been analyzed there as well as typical and high frequency ESD protection circuits. Test models and principal electric scheme with topology of standard ESD protection have been designed. Typical ESD protection was tested with designed models. The research with different human body model parameters has been made. Three electric schemes and topologies of typical ESD protection, which may withstand different models, with different currents and bandwidth frequency bands: HBM - 1.3 A current, 8.56 GHz band; MM - 3.6 A current, 4.71 GHz band; CDM - 10 A current, 3.72 GHz band have been designed. Also designed protections frequency amplitude characteristics have been simulated. High frequency ESD protections with sequential and parallel LC circuits for 5 GHz frequency circuits have been designed. The thesis consists of: 83 p. text without extras, 63 pictures, 7 tables, 18 bibliographical entries, 1 supplement.
--

Keywords: Cadence, CDM , ESD, HBM, integrated circuit, MM, protection of electrostatic discharge.

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

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas Tamulionis, 20093732

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Elektronikos inžinerija, MNEfm-13

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2015 m. gegužės 29 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Integrinių grandynų apsaugų nuo elektrostatiinių iškrovų projektavimas ir tyrimas“ patvirtintas 2013 m. lapkričio 14 d. dekanų potvarkiu Nr. 398el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas doc. dr. Vaidotas Barzdėnas.

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

(Parašas)

Tomas Tamulionis

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

IVADAS	12
1. INTEGRINIUOSE GRANDYNUOSE NAUDOJAMI ELEKTROSTATINIŲ IŠKROVŲ MODELIAI	14
1.1. Žmogaus kūno modelis	15
1.2. Įrenginių modelis	16
1.3. Įkrauto įrenginio modelis	18
1.4. Testavimas impulsine perdavimo linija	19
1.5. Apsaugų nuo elektrostatinės iškvrovų specifikacijos	20
1.6. Modelių palyginimas	21
1.7. Apsaugos nuo elektrostatinės iškvrovos strategija	22
1.8. Tipinė ESD apsaugos grandinė	23
1.8.1. Diodais pagrįsta ESD apsauga	24
1.8.2. Maitinimo šaltinio ir žemės ESD apsaugos grandinė	25
2. ESD APSAUGOS PROJEKTAVIMAS	26
2.1. Apsaugos, skirtos apsaugoti vidines grandines nuo HBM ir MM įvykių, projektavimas	26
2.2. Apsaugos, skirtos apsaugoti vidines grandines nuo CDM įvykio, projektavimas	28
2.3. Apsaugos tarp maitinimo ir žemės magistralių projektavimas	29
2.4. Galutinės grandinės projektavimas	31
3. SUPROJEKTUOTŲ ESD MODELIŲ TESTAVIMAS IR TYRIMAS	33
3.1. Tyrimai, atlikti naudojant žmogaus kūno modelį	33
3.1.1. Žmogaus kūno modelio grandinė	33
3.1.2. ESD apsaugos modeliavimas, panaudojant žmogaus kūno modelį	34
3.1.3. Žmogaus kūno modelio testavimas panaudojant, impulsinę perdavimo liniją	36
3.1.4. Modeliavimai, atlikti varijuojant žmogaus kūno modelio parametrais	38
3.2. Tyrimai, atlikti naudojant įrenginių modelį	42
3.2.1. Įrenginių modelio grandinė	42
3.2.2. ESD apsaugos modeliavimas, panaudojant įrenginių modelį	43
3.2.3. Įrenginių modelio testavimas, panaudojant impulsinę perdavimo liniją	45
3.3. Tyrimai, atlikti naudojant įkrauto įrenginio modelį	47
3.3.1. Įkrauto įrenginio modelio testavimas, panaudojant impulsinę perdavimo liniją	47
3.4. Modeliavimų apibendrinimas	49
4. GRANDINĖS DAŽNINIŲ CHARAKTERISTIKŲ MODELIAVIMAS	51
4.1. Dažninių charakteristikų modeliavimas, sumažinus apsaugos diodų topologijas	55

4.2. Optimalaus dydžio apsaugų projektavimas	57
4.2.1. Optimali apsauga, apsauganti nuo žmogus kūno modelio, įkraunamo 2000 V įtampa ...	57
4.2.2. Optimali apsauga, apsauganti nuo įrenginių modelio, įkraunamo 200 V įtampa	59
4.2.3. Optimali apsauga, apsauganti nuo įkrauto įrenginio modelio, įkraunamo 500 V įtampa	60
5. AUKŠTADAŽNĖS ESD APSAUGOS GRANDINĖS	62
5.1. Apsaugos grandinė su nuosekliai prijungtais papildomais diodais	62
5.2. Rezonansiniu LC kontūru pagrįstos apsaugos	63
5.3. Apsaugos grandinės su impedansų suderinimu	66
5.4. Aukštadažnių ESD apsaugų palyginimas	67
5.5. Aukštadažnių ESD apsaugų projektavimas ir modeliavimas	69
5.5.1. Aukštadažnė ESD apsauga su papildomais nuosekliai prijungtais diodais	69
5.5.2. Aukštadažnė ESD apsauga su lygiagrečiais LC kontūrais.....	71
5.5.3. Aukštadažnė ESD apsauga su nuosekliais LC kontūrais	74
IŠVADOS.....	80
NAUDOTA LITERATŪRA	82
PRIEDAI	84

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Žmogaus kūno modelio ekvivalentinė grandinė	15
1.2 pav. Žmogaus kūno modelio generuojamas srovės impulsas	16
1.3 pav. Įrenginių modelio ekvivalentinė grandinė.....	17
1.4 pav. Įrenginių modelio generuojamas srovės impulsas, modelį įkrovus 400 V įtampa	17
1.5 pav. Įkrauto įrenginio modelio testavimo principas ir srovės impulso oscilograma.....	18
1.6 pav. Impulsinės perdavimo linijos modeliavimo schema	19
1.7 pav. Integrinių grandynų ESD projektavimo sritis	22
1.8 pav. ESD srovės keliai integriniame grandyne	24
1.9 pav. ESD apsaugos grandinė.....	25
1.10 pav. Maitinimo šaltinio ir žemės ESD apsaugos grandinė.....	25
2.1 pav. N^+ / SX diodo struktūra.....	26
2.2 pav. Dviejų nuosekliai sujungtų P^+ / NW diodų struktūra	27
2.3 pav. Suprojektuota ESD apsaugos diodų grandinė a) ir jos simbolis b).....	27
2.4 pav. ESD apsaugos diodų topologija	28
2.5 pav. Sudaryta apsaugos tarp maitinimo ir žemės magistralių schema a) ir simbolis b).....	30
2.6 pav. Maitinimo ir žemės apsaugos grandinės topologija	30

2.7 pav. ESD apsaugos grandinė.....	31
2.8 pav. ESD apsaugos grandinės topologija.....	32
3.1 pav. Žmogaus kūno modelio grandinė a) ir jos simbolis b).....	33
3.2 pav. Žmogaus kūno modelio grandinės generuojamas srovės impulsas.....	34
3.3 pav. ESD apsaugos modeliavimo grandinė, panaudojant žmogaus kūno modelį.....	35
3.4 pav. Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos.....	35
3.5 pav. Impulsine perdavimo linija modeliuojama ESD apsaugos grandinė, panaudojant žmogaus kūno modelį apibūdinantį srovės šaltinį	36
3.6 pav. Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos.....	37
3.7 pav. Žmogaus kūno modeliavimo grandinė	38
3.8 pav. Įtampų pereinamosios charakteristikos, varijuojant HBM varžomis	39
3.9 pav. Srovių pereinamosios charakteristikos, varijuojant HBM varžomis.....	40
3.10 pav. Įtampų pereinamosios charakteristikos, varijuojant HBM talpomis	41
3.11 pav. Srovių pereinamosios charakteristikos, varijuojant HBM talpomis	41
3.12 pav. Įrenginių modelio grandinė a) ir jos simbolis b)	42
3.13 pav. Įrenginių modelio grandinės generuojamas srovės impulsas	43
3.14 pav. ESD apsaugos modeliavimo grandinė, panaudojant įrenginių modelį	44
3.15 pav. Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos.....	44
3.16 pav. Impulsine perdavimo linija modeliuojama ESD apsaugos grandinė, panaudojant įrenginių modelį apibūdinantį srovės šaltinį	45
3.17 pav. Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos.....	46
3.18 pav. Impulsine perdavimo linija modeliuojama ESD apsaugos grandinė, panaudojant įkrauto įrenginio modelį apibūdinantį srovės šaltinį.....	47
3.19 pav. Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos.....	48
4.1 pav. Suprojektuota tipinė ESD apsaugos grandinė	51
4.2 pav. ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, neįvertinant parazitinių parametrų ...	52
4.3 pav. Tipinės ESD apsaugos grandinės topologija	52
4.4 pav. ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, įvertinant parazitinius parametrus	53
4.5 pav. ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, neįvertinant parazitinių parametrų, kai apkrova 1 pF	54
4.6 pav. ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, įvertinant parazitinius parametrus, kai apkrova 1 pF	54
4.7 pav. ESD apsaugų topologijos: a) pradinė topologija; b) sumažinta topologija	55
4.8 pav. Sumažintos ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, įvertinant parazitinius parametrus	56

4.9 pav. Apsaugos topologija, apsauganti nuo žmogaus kūno modelio sukeltos iškvovos.....	58
4.10 pav. Optimalios ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika.....	58
4.11 pav. Apsaugos topologija, apsauganti nuo įrenginių modelio sukeltos iškvovos.....	59
4.12 pav. Optimalios ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika.....	60
4.13 pav. Apsaugos topologija, apsauganti nuo įkrauto įrenginio modelio sukeltos iškvovos	60
4.14 pav. Optimalios ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika.....	61
5.1 pav. Apsaugos grandinės blokinė schema su nuosekliai prijungtais papildomais diodais	62
5.2 pav. Apsaugos grandinės blokinė schema su lygiagrečiu LC kontūru	63
5.3 pav. Apsaugos grandinės blokinė schema su lygiagrečiais LC kontūrais prie diodų	64
5.4 pav. Apsaugos grandinės blokinė schema su nuosekliu LC kontūru: a) kai naudojamos dvi ritės; b) kai naudojama viena ritė	65
5.5 pav. Apsaugos grandinės blokinė schema pagrįsta impedansų suderinimu.....	66
5.6 pav. Paskirstyta apsaugos grandinės blokinė schema	67
5.7 pav. ESD apsaugos grandinė su trim nuosekliai sujungtais diodais	70
5.8 pav. Apsaugos grandinių, su papildomais diodais, dažninės amplitudinės charakteristikos	70
5.9 pav. ESD apsaugos grandinė su lygiagrečiais LC kontūrais.....	71
5.10 pav. Apsaugos su lygiagrečiais LC kontūrais dažninė amplitudinė charakteristika	73
5.11 pav. ESD apsaugos grandinė su nuosekliais LC kontūrais	74
5.12 pav. Apsaugos su lygiagrečiais LC kontūrais dažninė amplitudinė charakteristika	76

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Elektrostatinės iškvovos modelių apžvalga	14
2 lentelė. Pramonėje naudojami modelių standartiniai parametrai	20
3 lentelė. ESD modelių specifikacijos	20
4 lentelė. ESD įvykių palyginimas	21
5 lentelė. Modeliavimų metu gautų pereinamųjų charakteristikų maksimalios reikšmės	49
6 lentelė. Diodų parametrai, IBM 0,18 μm technologijoje	57
7 lentelė. Apsaugos nuo elektrostatinės iškvovų, naudojamos aukštadažniuose grandynuose	68

SANTRUMPOS

ESD (angl. *electrostatic discharge*) – elektrostatinė iškrava;

HBM (angl. *human body model*) – žmogaus kūno modelis;

MM (angl. *machine model*) – įrenginio modelis;

CDM (angl. *charged device model*) – įkrauto įrenginio modelis;
TLP (angl. *transmission line pulse*) – impulsinė perdavimo linija;
DUT (angl. *device under test*) – testuojamas įrenginys;
IG – integrinis grandynas;
KMOP – komplementinė metalas – oksidas – puslaidininkis technologija;
LC kontūras – grandinė sudaryta iš talpinių ir induktyvinių elementų;
RC grandinė – grandinė sudaryta iš varžinių ir talpinių elementų;
IBM (angl. *International Business Machines Corporation*) – viena iš lustus gaminančių kompanijų;
DACH – dažninė amplitudinė charakteristika.

IVADAS

Šiuolaikinė elektronika sparčiai tobulėja. Atsiranda naujų gamybos technologijų, leidžiančių mažinti elektronikos vartojamas galias, mažinti elektroninius elementus, didinti jų integraciją ir spartas, bet svarbiausia – mažinti integrinių grandynų kainas. Mikroelektronikoje dažniausiai naudojamos KMOP technologijos. Viena iš problemų, mažinančių integrinių grandynų išeigą, yra gamybos metu atsirandančios elektrostatinės iškrovos, kurios gali paveikti gaminius. Elektrostatinė iškrova – staigus elektros energijos srautas tarp dviejų skirtingus elektros krūvius turinčių objektų. Kai iškrova patenka į integrinį grandyną, ji gali negrįžtamai jį sugadinti. Iškrovos gali atsirasti tarp įvairių objektų – tarp žmogaus, įrenginio ir lusto. Net vadovaujantis griežtomis taisyklėmis gamybos procesuose neišvengiamai atsiranda sugadintų grandynų. Norint sumažinti tokio pobūdžio gedimų skaičių būtina imtis visų galimų apsaugos priemonių. Praktikoje dažnai naudojamos apsaugos nuo elektrostatinės iškrovos, kurios projektuojamos pačiame integriniame grandyne.

Vienas iš integrinių grandynų projektavimo etapų yra apsaugos nuo elektrostatinės iškrovos projektavimas. Tai svarbus etapas, kuris turi būti apsvarstytas pradedant projektuoti integrinį grandyną. Apsaugos projektavimas paskutiniuose etapuose dažnai lemia prastą atsparumą elektrostatinėms iškrovoms arba suprastėjusius grandyno parametrus.

Elektrostatinės iškrovos apsaugos gali ne tik apsaugoti grandynus nuo nepageidaujamų iškrovų, tačiau ir daryti neigiamą įtaką vidiniams grandynams dėl nepageidaujamų parazitinių efektų. Parazitinės talpos – tai vienas svarbiausių projektavimo klausimų projektuojant aukštadažnius integrinius grandynus. Paprastai didelių matmenų ESD apsaugos turi per dideles parazitines talpas, kurios negali būti naudojamos aukštadažnėms grandinėms. Taigi projektuojant apsaugas dėmesį atkreipti reikia ne tik į apsaugos lygį, bet ir į nepageidaujamų efektų poveikį vidiniams grandynams.

Visi išvadai – net didelės spartos ar analoginiai – privalo turėti apsaugas nuo elektrostatinės iškrovos. Prastos ESD apsaugos lemia pakavimo, testavimo ar kituose gamybos procesuose atsirandančius gedimus, o kartu mažina gaminių išeigą.

Darbo tikslas – suprojektuoti ir ištirti integriniuose grandynuose naudojamas apsaugas nuo elektrostatinės iškrovos.

Darbo uždaviniai:

- Suprojektuoti ir apžvelgti elektrostatinės iškrovos testavimo modelius: žmogaus kūno, įrenginių ir impulsinės perdavimo linijos modelius.
- Apžvelgti integriniuose grandynuose naudojamą tipinę apsaugą nuo elektrostatinės iškrovos.

- Suprojektuoti tipinę ESD apsaugos grandinę, skirtą panaudoti IBM 0,18 μm technologijoje.
- Iširti apsaugos grandinės atsaką į modelių generuojamus impulsus.
- Suprojektuoti optimalias apsaugas kiekvienam modeliui.
- Nustatyti suprojektuotų ESD apsaugų praleidžiamų dažnių juostų pločius.
- Apžvelgti apsaugos grandines naudojamas aukštadažniuose grandynuose.
- Suprojektuoti pasirinktas aukštadažnes ESD apsaugų grandines, skirtas 5 GHz dažnio grandynams.
- Sumodeliuoti aukštadažnių ESD apsaugų dažnines amplitudines charakteristikas.

Taikyti metodai ir būdai. Remiantis teorinėmis žiniomis, suprojektuota tipinė apsauga nuo elektrostatinės iškrovos. Tyrimams atlikti, sudarytos dažniausiai naudojamų modelių grandinės: žmogaus kūno modelio ir įrenginio modelio. Panaudojus modelius ištestuota suprojektuota apsauga. Pakartotinai atlikti testavimai panaudojus impulsinės perdavimo linijos modelį. Šiuo atveju, skirtingais impulsiniais srovės šaltiniais apibūdinami prieš tai ištestuoti modeliai. Sumodeliavus dažnines charakteristikas nustatytos kiekvienos grandinės pralaidumo juostos ribos. Remiantis technologijoje pateiktomis maksimaliomis impulsinių srovių reikšmėmis, sudarytos trys optimalios apsaugos grandinės. Kiekviena grandinė gali apsaugoti nuo skirtingų modelių ir atitinkamai turi skirtingas pralaidumo juostas. Galiausiai, atlikta aukštadažnių ESD apsaugos grandinių apžvalga. Suprojektuotos pasirinktos aukštadažnės ESD apsaugos grandinės. Atlikti modeliavimai, skirti išsiaiškinti, grandinių praleidžiamų dažnių juostų riboms.

Darbo struktūra. Darbas susideda iš tipinės ESD apsaugos, aukštadažnių ESD apsaugų ir testavimo modelių tyrimų. Tyrimus sudaro teorinės bei praktinės dalys. Teorinėje dalyje analizuojami elektrostatinės iškrovos modeliai, apsaugos nuo elektrostatinės iškrovos strategijos, apžvelgiamos tipinė ir aukštadažnės ESD apsaugos grandinės. Praktinė dalis susideda iš: testavimo modelių projektavimo, tipinės apsaugos nuo elektrostatinės iškrovos projektavimo, tyrimų atliktų naudojant suprojektuotus testavimo modelius, grandinės dažninių charakteristikų modeliavimo, aukštadažnių ESD apsaugų projektavimo ir aukštadažnių ESD apsaugos grandinių dažninių amplitudinių charakteristikų modeliavimo.

Darbo praktinė ir mokslinė reikšmė. Suprojektuotas apsaugas galima panaudoti kuriant įvairios paskirties integrinius grandynus, kurie gaminami IBM 0,18 μm technologijoje. Projektuojant grandynus rekomenduojama pasirinkti optimalią apsaugą, kuri geba apsaugoti nuo reikiamų modelių ir užtikrina pakankamą praleidžiamų dažnių juostos plotį. Kai siūlomų grandinių praleidžiamų dažnių juosta per maža, rekomenduojama rinktis aukštadažnes apsaugas.

1. INTEGRINIJOSE GRANDYNUOSE NAUDOJAMI ELEKTROSTATINIŲ IŠKROVŲ MODELIAI

Elektrostatinės iškvos įvykis – tai didelis srovės impulsas, kuris gali paveikti integrinį grandyną įvairiuose gamybos lygmenyse. Mikroelektronikos pramonėje išskiriami du pagrindiniai elektrostatinių iškvos tipai:

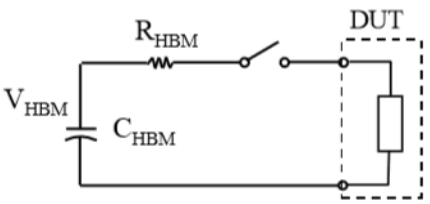
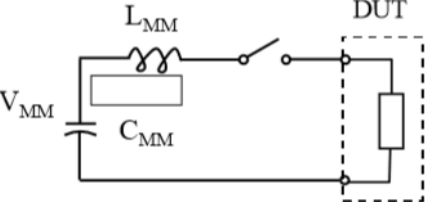
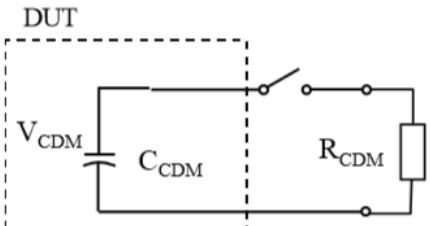
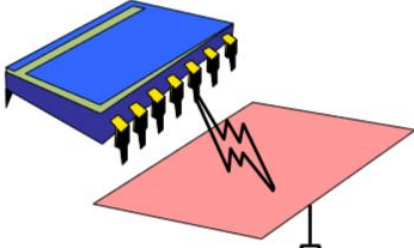
- įkrautas žmogus arba įkrautas įrenginys priliečia lustą ir šis per lustą išsikrauna į žemę;
- lusto talpa įsikrauna arba išsikrauna, kai įvyksta lusto ir aplinkos sąlytis.

Apibūdinti šiuos ESD įvykius buvo sukurti trys modeliai. Jie apibūžiami nacionalinių ir tarptautinių standartų tokių kaip „JEDEC“, „MIL–Spec“ ir „ESD Association“. Šie modeliai:

- Žmogaus kūno modelis (angl. *Human Body Model* – HBM);
- Įrenginių modelis (angl. *Machine Model* – MM);
- Įkrauto įrenginio modelis (angl. *Charged Device Model* – CDM).

Trumpa elektrostatinių iškvos modelių apžvalga pateikta 1 lentelėje. Lentelėje esantys trys modeliai gali būti apibūdinami ekvivalentinėmis grandinėmis bei iškvos pobūdžiu. Žmogaus kūno modelis apibūdina įvykį, kai žmogus priliečia lustą ir žmogaus kūnas sukelia ESD. Tokį įvykį galima apibūdinti ekvivalentine grandine, sudaryta iš nuosekliai sujungto rezistoriaus ir kondensatoriaus. Įrenginio modelis apibūdina įvykį, kai įrenginys priliečia lustą ir įrenginys sukelia ESD įvykį. Šį įvykį galima apibūdinti ekvivalentine grandine susidedančia iš nuosekliai sujungtos

1 lentelė. Elektrostatinės iškvos modelių apžvalga [1]

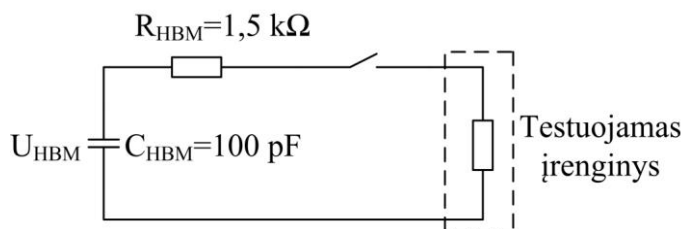
Modelis	Ekvivalentinė grandinė	ESD įvykis
Lustą priliečia žmogus. Žmogaus kūnas sukelia ESD įvykį.		
Lustą priliečia įrenginys. Įrenginys sukelia ESD įvykį.		
Lusto talpa įsikrauna/išsikrauna per kontaktą. Įkrauto įrenginio ESD įvykis		

ritės ir kondensatoriaus. Tiek žmogaus kūno modelio, tiek įkrauto įrenginio modelio atvejais, kondensatorius yra įkraunamas numatyta įtampa ir uždarius jungiklį kondensatorius iškraunamas per rezistorių, ar ritę bei testuojamą įrenginį (angl. Device Under Test – DUT). Testuojamas įrenginys – tai lustas, kuriame pasirenkami du kontaktai, per kuriuos teka ESD įvykio srovė. Įkrauto įrenginio modelis apibūdina įvykį, kai lusto talpa įsikrauna / išsikrauna per vieną iš lusto kontaktų. Šį įvykį galima apibūdinti ekvivalentine grandine susidedančia tik iš kondensatoriaus. Šiuo atveju testuojamas įrenginys (lustas) yra įkraunamas tam tikra įtampa ir uždarius jungiklį – talpos iškaunamos per vieną lusto kontaktą ir mažą varžą į žemę.

Pramonėje, kiekvienas iš šių modelių turi apibrėžtus reikalavimus ir specifikacijas, kurie gali skirtis priklausomai nuo ESD apsaugos lygio, skirto apsaugoti elektroninius komponentus [1].

1.1. Žmogaus kūno modelis

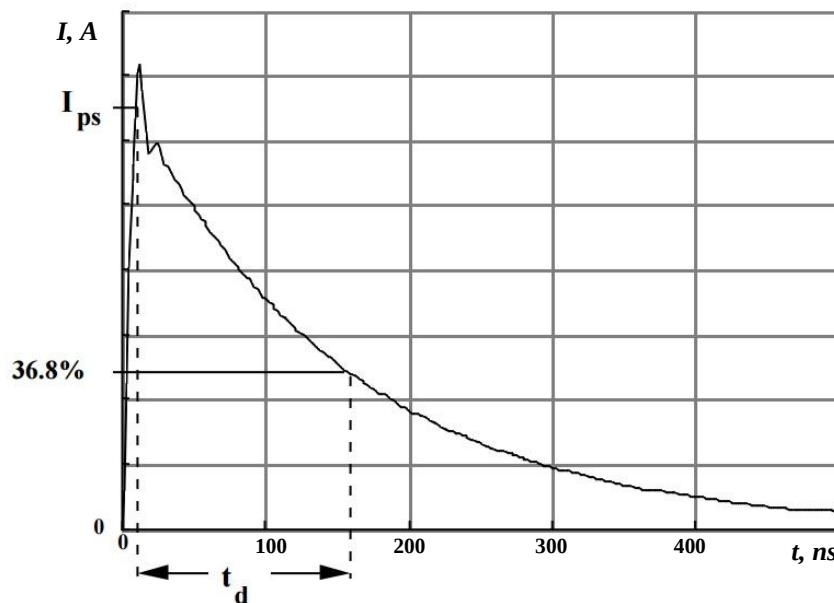
Žmogaus kūno modelis charakterizuoja žmogaus kūno sukeliama elektrostatinę iškvovą, kai įsikrovęs žmogaus kūnas tiesiogiai prisiliečia prie įrenginio, elektrostatinis krūvis iš žmogaus išsikrauna į įrenginį. Neįmanoma atkartoti lygiai tokių pačių žmogaus kūno iškvovų, nes kiekvieno žmogaus kūnas turi skirtingas elektrines charakteristikas. Tačiau gali būti sudaryta apytikslė HBM ESD situacija, paremta sukurtais standartizuotais testavimo modeliais. Vienas seniausių (1989 metais publikuotas) ir iki dabar plačiai naudojamų modelių yra apibrėžtas kariuomenės standarte *MIL-STD-883E* metode 3015.7 [2]. Modeliui naudojama supaprastinta ekvivalentinė grandinė, apibūdinti HBM ESD įvykį, kur įkrautas žmogaus kūnas yra pakeičiamas kondensatoriumi $C_{HBM} = 100\text{pF}$ ir rezistoriumi $R_{HBM} = 1500\Omega$ [2]. 1.1 paveiksle pateikta žmogaus kūno modelio ekvivalentinė grandinė.



1.1 pav. Žmogaus kūno modelio ekvivalentinė grandinė [1]

Atliekant HBM testavimą kondensatorius įkraunamas iki nustatytos ESD įtampos (kurią pasirenka gamintojai, priklausomai nuo to, koks reikalingas ESD atsparumo lygis), ir kai jungiklis uždaromas didelis apibrėžtos trukmės srovės impulsas yra iškraunamas per rezistorių ir testuojamą įrenginį.

Žmogaus kūno modelis apibūdina iškrovą tarp dviejų išvadų. Modelio generuojamas impulsas pateiktas 1.2 paveiksle. HBM įvykis apibūdinamas kaip ilgiausiai trunkantis ESD įvykis. Impulso kilimo trukmė – 2 – 10 ns, o impulso plotis – $t_d = 150 \pm 20$ ns. Be to šis įvykis pasižymi mažiausiomis srovėmis, palyginus su kitų modelių įvykiais. Maksimalios srovės vertės gali būti: $I_{ps} = 0,67$ A ($\pm 10\%$), kai modelis įkraunamas 1000 V įtampa; $I_{ps} = 1,33$ A ($\pm 10\%$), kai modelis įkraunamas 2000 V įtampa; $I_{ps} = 2,67$ A ($\pm 10\%$), kai modelis įkraunamas 4000 V įtampa. Srovės teka viena kryptimi [3].



1.2 pav. Žmogaus kūno modelio generuojamas srovės impulsas [3]

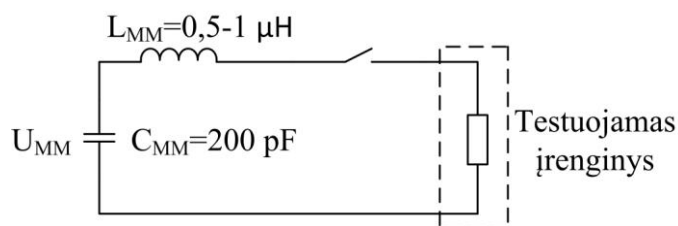
Tekančios srovės maksimalią reikšmę galima paskaičiuoti pagal omą dėsnį $I = U/1500 \Omega$. Pavyzdžiui veikiant 2 kV žmogaus kūno modelio įtampai, srovės impulso maksimali srovė bus apie 1,33 A.

1.2. Įrenginių modelis

ESD gali pasireikšti ne tik sąveikaujant žmogui. Iškvėra gali atsirasti tarp bet kokių įsielektrinusių objektų. Dažnai tokie reiškiniai pasireiškia, kai metalinė technika, įrenginiai priliečia integrinį grandyną gamybinėje aplinkoje. Skirtingai nei žmogaus kūno modelio atveju, metalinė technika turi labai mažas varžas, todėl momentinės srovės tampa daug didesnės. Dėl to buvo sukurtas atskiras įrenginius apibūdinantis modelis [4].

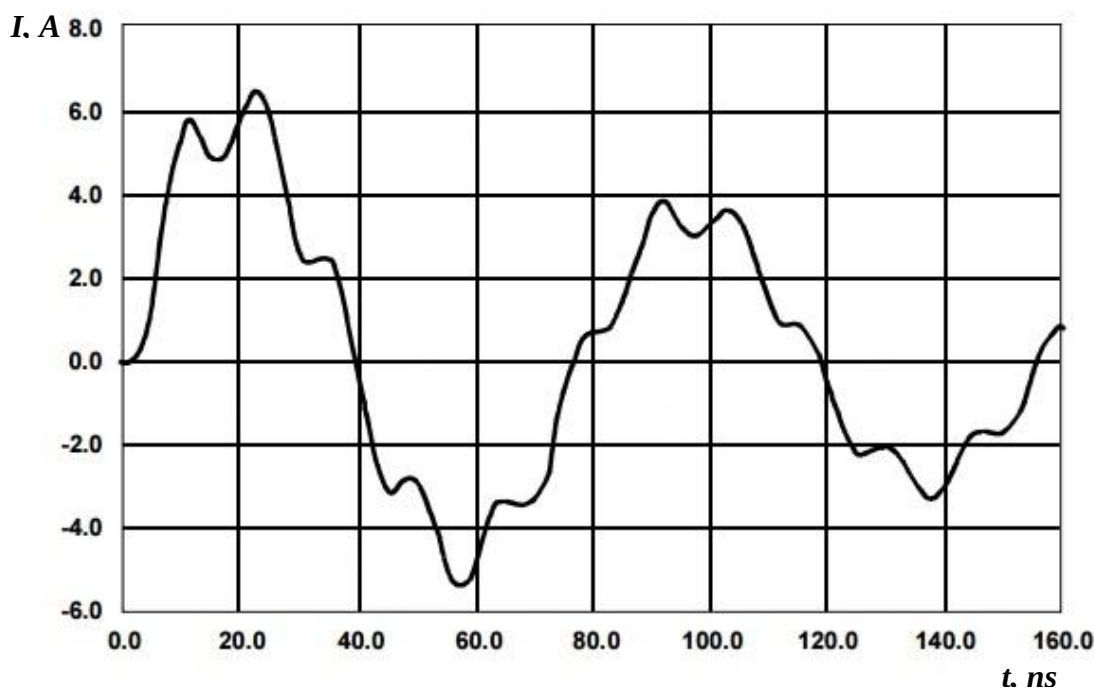
Kaip ir žmogaus kūno modelis, taip ir įrenginių modelis apibūdina iškrovą tarp dviejų išvadų. Įrenginių modelio ekvivalentinė grandinė susideda iš 0,5 – 1 μ H induktyvinės ritės nuosekliai

prijungtos prie 200 pF talpos kondensatoriaus. Įrenginių modelio ekvivalentinė grandinė pateikta 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Įrenginių modelio ekvivalentinė grandinė [1]

Atliekant MM testavimą kondensatorius įkraunamas iki nustatytos ESD įtampos ir kai jungiklis uždaromas didelis slopstantis kintamosios srovės virpesys yra iškraunamas per testuojamą įrenginį. 1.4 paveiksle pateiktas įrenginių modelio generuojamas srovės impulsas, kai modelis įkraunamas 400 V įtampa.

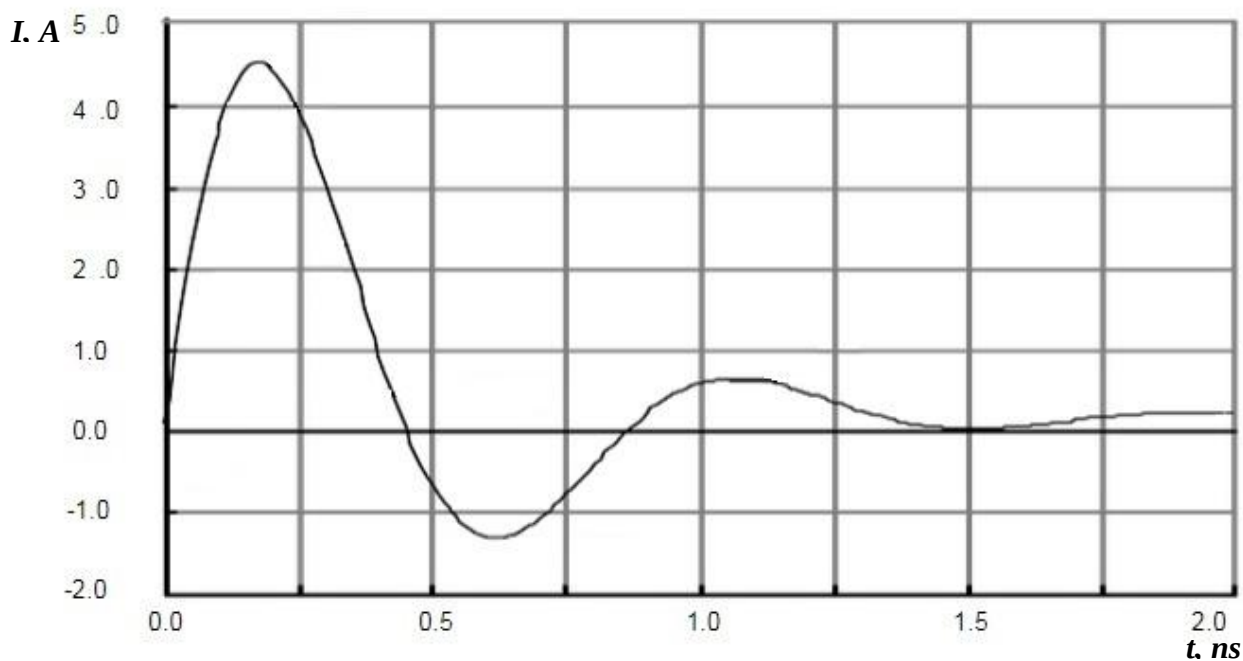


1.4 pav. Įrenginių modelio generuojamas srovės impulsas, modelį įkrovus 400 V įtampa [5]

MM įvykis yra trumpesnės trukmės, palyginus su HBM įvykiu. Tekančios srovės lygis yra didesnis, palyginus su HBM įvykio srovės impulso lygiu. JEDEC specifikacija apibrėžia šiam modeliui tarp 2,8 – 3,8 A srovės esant 200 V įtampai. Taip pat, gali būti atliekami modeliavimai, modelį kraunant nuo 100 V iki 400 V įtampa, tuomet atitinkamai gaunamos nuo 1,5 – 2,0 A iki 5,8 – 8,0 A srovės [5,6].

1.3. Įkrauto įrenginio modelis

Įkrauto įrenginio modelis apibūdina įvykį, kuriame įsikrovusi integrinio grandyno talpa išsikrauna, kai išvadas priliečiamas prie žeminto objekto ar laidaus paviršiaus. CDM ESD įvykio pobūdis skiriasi nuo HBM, kadangi, įkrauto įrenginio modelis apibrėžiamas kaip savęs iškrovimo procedūra. Nors krūviai yra kaupiami santykinai mažose grandyno parazitinėse talpose, CDM iškrova yra labai greita ir sukuria labai didelę ESD srovę (gali siekti virš 10 amperų), dėl labai mažos iškrovos varžos ir induktyvumo. Taigi CDM ESD gali būti labai pavojinga ir tampa vis aktualesnė, dėl IG technologijų pažangos. Kadangi, kuo mažesnės naudojamos KMOP technologijos, tuo plonesni dielektrikų sluoksniai ir kartu didesnė tikimybė į CDM ESD pažeidimus [1]. 1.5 paveiksle pateiktas įkrauto įrenginio modelio generuojamas srovės impulsas.



1.5 pav. Įkrauto įrenginio modelio testavimo principas ir srovės impulso oscilograma [7]

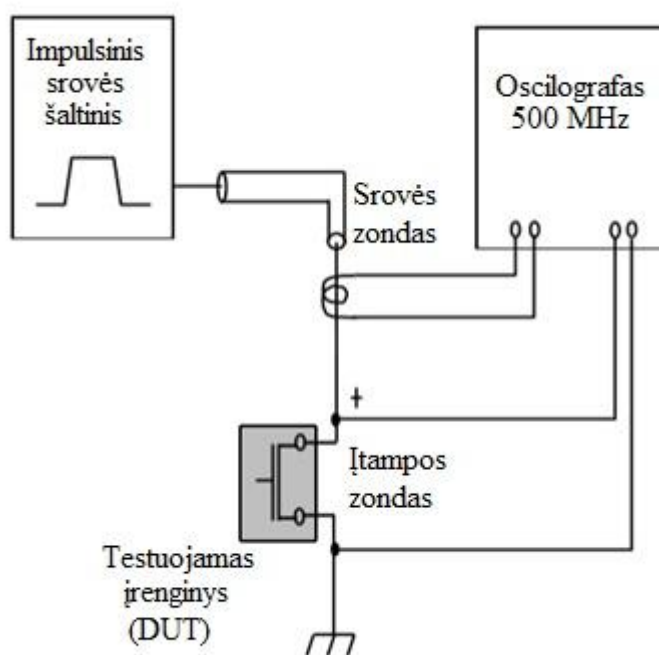
CDM ESD įvykis įvyksta, kai įrenginys iškrauna savo energiją į žemę per vieną išvadą. Prieš tai aptartuose modeliuose (HBM ir MM), iškrova vyko tarp bet kurių dviejų išvadų. CDM pasižymi trumpiausios trukmės įvykiu. Impulso trukmė yra apie 1 – 2 ns, kai fronto kilimo laikas gali būti vos 100 ps. Palyginus CDM ir HBM, kai juos veikia 100 V įtampa, pamatytume, jog HBM atveju būtų pasiekta 66 mA maksimali impulso srovė, CDM atveju – net 1 – 2 A srovė [1]. Modelis gali būti įkraunamas mažesnėmis nei 125 V įtampomis, o maksimalios įkrovimo įtampos gali viršyti 2000 V. Pagal įkraunamų įtampų vertes įrenginiai gali būti klasifikuojami į atsparumo klases.

Modelis pasižymi didelėmis srovėmis. Maksimali srovės vertė gali viršyti 10 A, priklausomai nuo grandinės parametrų ir testuojamų įtampų [7].

1.4. Testavimas impulsine perdavimo linija

Impulsinės perdavimo linijos modelis – tai naujesnis, už prieš tai aptartus, testavimo modelis, ir paprastai jis nėra būtinas deklaruojant produkto apsaugos nuo elektrostatinės iškvos lygį. TLP modelio tikslas sukurti srovės impulsus, kurie galėtų pakeisti prieš tai aptartų modelių sukeltas iškvos.

Didelės srovės stačiakampis impulsas gali skirtingai veikti grandinę, palyginus su įprastais modeliais. Todėl reikia tiksliai parinkti TLP šaltinio parametrus. TLP dažniausiai naudojamas atskirų įrenginių analizei plokštelės lygmenyje. 1.6 paveiksle pateikta TLP modeliavimo schema.



1.6 pav. Impulsinės perdavimo linijos modeliavimo schema [1]

TLP testavimas atliekamas siunčiant stačiakampį impulsą į testuojamą įrenginį ir matuojant srovę, tekančią per įrenginį, bei įtampą, krintančią ant šio įrenginio. Sumodeliuoti skirtingiems ESD įvykiams gali būti naudojami skirtingo pločio impulsai. Paprastai HBM modeliavimui naudojamas 100 ns trukmės impulsas, o MM modeliavimui – 30 ns trukmės impulsas. Norint ištirti CDM įvykio atsparumą naudojama 1 – 2 ns trukmės impulsas, su stačiais 100 – 500 ps kylančiu bei krentančiu frontais [1, 8].

1.5. Apsaugų nuo elektrostatinių iškrovų specifikacijos

ESD apsaugos lygį paprastai nustato produkto savininkai atsižvelgdami, į aplinką ir sąlygas, kuriose bus surenkamos mikroschemos, ir į pirkėjų poreikius. 2 lentelėje pateikti standartiniai apsaugų testavimo įtampų lygiai, naudojami pramonėje.

2 lentelė. Pramonėje naudojami modelių standartiniai parametrai [1]

ESD modelis	Pramonėje naudojamas standartas
Žmogaus kūno modelis (HBM)	2000V
Įrenginių modelis (MM)	200V
Įkrauto įrenginio modelis (CDM)	500V

Žmogaus kūno modelio kondensatoriui įkrauti naudojamas 2000 V šaltinis, įrenginių modeliui – 200 V šaltinis, o įkrauto įrenginio modeliui – 500 V šaltinis. Vieniems produktams reikia stipresnių, kitiems silpnesnių apsaugų, priklausomai nuo grandynų specifinių aplinkybių. Svarbu parinkti reikalingą apsaugos lygį projektuojamiems grandynams [1].

Kaip jau buvo minėta kiekvieną ESD modelį apibrėžia „JEDEC“, „MIL – spec“ ir „ESDA“ ir kt. standartai. Specifikacijose pateikta detali informacija apie modelius. Specifikacijos atitinkančios skirtingus modelius pateiktos 3 lentelėje [1].

3 lentelė. ESD modelių specifikacijos [1]

ESD modelis	Specifikacija
Žmogaus kūno modelis (HBM)	JEDEC JESD22–A114–B MIL–STD–883E Method 3015.7 ESDA STM5.1–1998
Įrenginių modelis (MM)	JEDEC EIA/JESD22–A115–A 1997 ESDA STM5.2–1999
Įkrauto įrenginio modelis (CDM)	JEDEC JESD22–C101B.01 2004 ESDA STM5.3.1–1999
Impulsinė perdavimo linija (TLP)	ESDA SP5.5.1-2008

Kiekvienas modelis yra skirtingas, todėl apsauga nuo kiekvieno iš modelių užtikrina skirtingus apsaugos lygius nuo iškrovų. Kai kurios iš lentelėje pateiktų specifikacijų sudarytos prieš daug metų (pvz.: *MIL–STD–883E*), tačiau naudojamos iki šių dienų. Remiantis jomis gamintojai gali įvertinti savo grandinių apsaugos lygius.

1.6. Modelių palyginimas

Trumpai apžvelgus naudojamus modelius galima juos palyginti tarpusavyje. Modelių palyginimas pateiktas 4 lentelėje.

4 lentelė. ESD įvykių palyginimas [1]

Charakteristika	HBM	MM	CDM
Ekvivalentinė grandinė	$1,5\text{k}\Omega + 100\text{pF}$ nuosekliai	$0,5\text{--}1,0\mu\text{H} + 200\text{pF}$ nuosekliai	Plokštelė į kurią iškraunamas lusto talpose sukauptas krūvis
Iškrovos kelias	Tarp bet kurių dviejų išvadų	Tarp bet kurių dviejų išvadų	Tik per vieną išvadą
Modelis	Žmogaus krūvis iškraunamas per lustą	Metalinis įrankis iškraunamas per lustą	Įkrautas lustas iškraunamas į žemę
Iškrovos signalo forma	EkspONENTIŠKAI slopstanti, laiko konstanta $\sim 150\text{ ns}$	$\sim 11 - 16\text{ MHz}$ slopstanti osciliacija	$\sim 1\text{ GHz}$ slopstanti osciliacija
Lustą veikiantys veiksniai	Mažiausia srovė ir įtampa, ilgiausia įvykio trukmė	Tarpinės srovės, įtampos ir trukmė, lyginant su kitų dviejų modelių	Didžiausia srovė, įtampa ir trumpiausia įvykio trukmė
Galimi gedimai	Šiluminiai pažeidimai, sujungimų lydymasis, užtūros oksido pažeidimai	Sandūros pažeidimai, sujungimų lydymasis, užtūros oksido pažeidimai	Uztūros oksido ir sujungimų pažeidimai

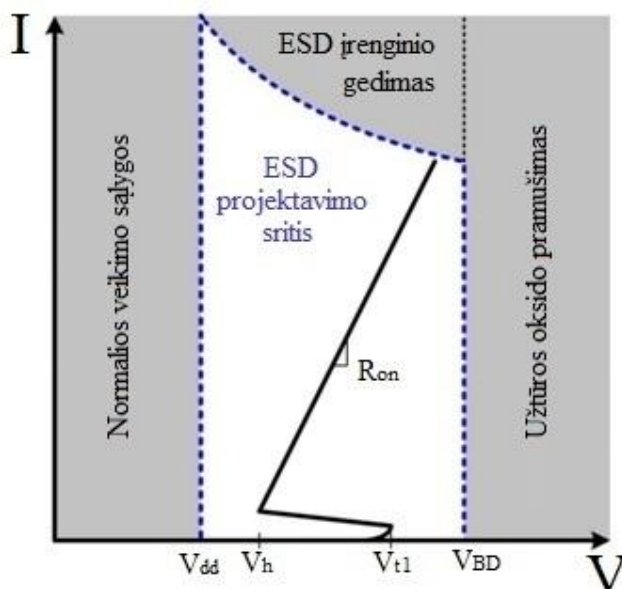
Modeliai apibrėžia skirtingus įvykius. Žmogaus kūno modelis apibrėžia įvykį, kai žmogaus krūvis iškraunamas per lustą. Įrenginių modelis apibrėžia įvykį, kai metalinis įrankis iškraunamas per lustą. Įkrauto įrenginio modelis apibrėžia įvykį, kai įkrautas lustas iškraunamas į žemę. Kiekvienas modelis turi skirtingas ekvivalentines grandines: žmogaus kūno modelio grandinę sudaro $1,5\text{ k}\Omega$ rezistorius nuosekliai sujungtas su 100 pF kondensatoriumi; įrenginio modelio grandinę sudaro $0,5\text{--}1,0\text{ }\mu\text{H}$ ritė nuosekliai sujungta su 200 pF kondensatoriumi; įkrauto įrenginio modelio atveju įkraunamos lusto talpos, kurios iškraunamos per mažos varžos rezistorių į žemę. Žmogaus kūno ir įrenginio modelių atvejais iškrova vyksta tarp bet kurių dviejų išvadų, o įkrauto įrenginio modelio atveju iškrova vyksta per vieną išvadą. Visi trys modeliai generuoja skirtingos formos, trukmės ir amplitudės impulsus. Žmogaus kūno modelis generuoja eksponentiškai slopstantį impulsą, kurio laiko konstanta yra apie 150 ns . Tai ilgiausios trukmės įvykis. Paprastai žmogaus kūno modelis pasižymi mažiausiomis srovėmis, kadangi ekvivalentinėje grandinėje

panaudotas 1,5 k Ω varžos rezistorius. Įrenginio modelis generuoja slopstantį osciliuojantį signalą, kurio dažnis paprastai yra apie 11 – 16 MHz. Šio modelio generuojamos srovės lygis yra didesnis nei žmogaus kūno modelio atveju, net ir veikiant mažesnėms įtampoms. Įkrauto įrenginio modelis generuoja slopstantį osciliuojantį signalą, kurio dažnis yra apie 1 GHz. Šis impulsas yra trumpiausios trukmės ir didžiausios srovės amplitudės. Visi aptartieji įvykiai gali sukelti grandynų gedimus, tokius kaip užtūros oksido pramušimai, sujungimų pažeidimai, lydymasis. Kuo stipresnė elektrostatinės iškrovos signalo srovė veikia grandyną, tuo didesnės įtampos krenta ir tuo didesnė galimybė įvykti gedimui.

1.7 Apsaugos nuo elektrostatinės iškrovos strategija

Norint suprojektuoti efektyvią ESD apsaugą reikia kruopščiai parinkti apsaugos elementus. Nes ESD įvykio metu atsirandanti įtampa gali viršyti bet kurių įtaisų, pagamintų silicio technologijoje, didžiausias pramušimo įtampas. Apsaugų tikslas nėra apsaugoti grandinę nuo srovės tekėjimo, tikslas – nukreipti srovę tekėti per grandines, kurios suprojektuotos atlaikyti dideles sroves be pažeidimų [1].

1.7 paveiksle pateikta integrinio grandyno ESD projektavimo sritis, kuri apibūdinama maitinimo šaltinio įtampa (V_{DD}), ESD apsaugos įrenginio gedimo lygiu, ir lauko tranzistoriaus užtūros oksido pramušimo įtampa (V_{BD}).



1.7 pav. Integrinių grandynų ESD projektavimo sritis [9]

Pirmiausia, ESD apsaugos įrenginio įsijungimo įtampa (V_{t1}) ir išlaikymo įtampa (V_h) turi būti mažesnės nei tranzistoriaus užtūros oksido pramušimo įtampa, tam kad išvengti vidinės grandinės

sugadinimo prieš tai, kai ESD apsaugos įrenginys įsijungs veikiant ESD įvykiui. Antra, ESD apsaugos įrenginio įsijungimo įtampa ir išlaikymo įtampa turi būti didesnė už IG maitinimo šaltinio įtampą, tam kad išvengti ESD apsaugos įrenginio klaidingų perjungimų esant normalioms grandinės darbo sąlygoms. Be to, atidaryto ESD apsaugos įrenginio varža (R_{on}) turėtų būti mažinama, tam kad mažinti ESD apsaugos įrenginyje atsirandančią šilumą ir krentančią įtampą, veikiant elektrostatinės kilmės įvykiams.

Kadangi KMOP technologija nuosekliai mažinama (mažteliojama), maitinimo šaltinių įtampa mažėja ir užtūros oksidas tampa vis plonesnis, kas lemia mažesnes tranzistoriaus užtūros oksido pramušimo įtampas. Paprastai, užtūros oksido pramušimo įtampa yra vos apie 5 V 65 nm KMOP technologijoje, kur užtūros oksido storis apie 20 Å. To pasekoje, ESD projektavimo sritis tampa daug siauresnė KMOP technologijose, kai kalbama apie nanometrines sistemas. Be to, ESD apsaugos grandinės turi greitai įsijungti veikiant ESD įvykiams, tam kad suteikti efektyvų iškrovimo kelią laike [9, 10].

Grandinės projektuotojai turi įvertinti įvairius iškrovimo kelius – kur srovė įtekės ir ištekės grandinėje su galimomis keliomis srovės kryptimis – ir suprojektuoti apsaugos tinklą, kuriame šios srovės tekės saugiai, nepažeisdamos vidinių grandinių. Srovė tekės per kelią (ar kelius), kuris turės mažiausią varžą kelyje į žemę. Parinktas kelias neturėtų sukurti didelių įtampų kritimo (pagal Omo dėsnį krintanti įtampa lygi srovės ir varžos sandaugai), kas nulemtų srovės kelio nuvedimą per vidines grandines [1].

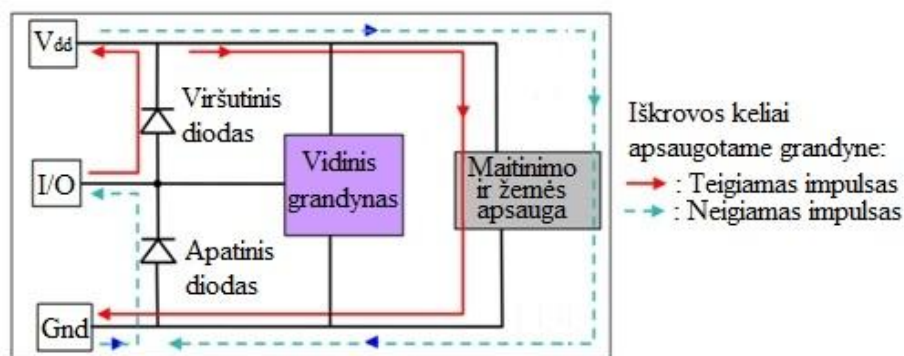
1.8. Tipinė ESD apsaugos grandinė

Viena iš dažniausiai naudojamų ESD apsaugų yra panaudojant du diodus, jungiamus prie įėjimo / išėjimo išvado. Vienas diodas išvadą jungia su maitinimo magistrale, kitas – su žemės magistrale. 1.8 paveiksle pateikti galimi srovės tekėjimo keliai integriniame grandyne, esant keturioms skirtingoms iškrovoms tarp išvado, maitinimo ir žemės magistralių. Maitinimo ir žemės apsauga veikiant normalioms integrinio grandyno sąlygoms yra išjungiama, o veikiant ESD įvykiui įjungiama tam, kad atidaryti mažos varžos kelią tarp maitinimo ir žemės.

Kai įėjimo / išėjimo (angl. *Input / Output* – I/O) išvadą veikia teigiamas potencialas maitinimo išvado atžvilgiu, srovė teka per viršutinį diodą į maitinimo šaltinio išvadą. Kai įėjimo / išėjimo išvadą veikia neigiamas potencialas maitinimo išvado atžvilgiu, srovė teka iš maitinimo šaltinio per maitinimo ir žemės apsaugos grandinę ir per apatinį diodą pasiekia įėjimo / išėjimo išvadą.

Kai įėjimo / išėjimo išvadą veikia teigiamas potencialas žemės išvado atžvilgiu, srovė teka per viršutinį diodą į maitinimo magistralę ir per maitinimo ir žemės apsaugos grandinę pasiekia žemės

išvadą. Kai įėjimo / išėjimo išvadą veikia neigiamas potencialas žemės išvado atžvilgiu, srovė, tekėdama per apatinį diodą, pasiekia įėjimo / išėjimo išvadą [1].



1.8 pav. ESD srovės keliai integriniame grandinyje [1]

Geras ESD apsaugos rezultatas pasiekiamas tuomet, kai srovės tekėjimas yra grindžiamas aptartais iškrovimo keliais. Jeigu, dėl jungiamųjų takelių, maitinimo ir žemės apsaugos arba apsaugos diodų varžų susidaro per didelės įtampos įėjime / išėjime ar maitinimo grandinėje, iškrovimo srovė gali pakeisti tekėjimo kelią, ir tekėti per vidines grandines. Iškrovos kelias turi ne tik atlaikyti didelės srovės, bet ir nesudaryti didelių įtampos potencialų skirtumų.

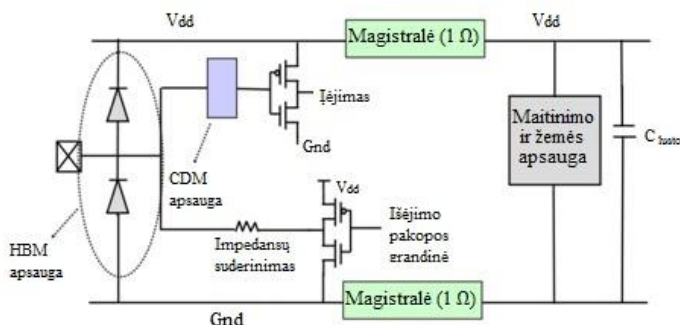
Kadangi diodai turi parazitines talpas, todėl jų naudojimas prie įėjimų / išėjimų išvadų gali suprastinti visos grandinės savybes dažnių srityje. Apsaugos diodų matmenys turėtų būti mažinami, tam kad sumažinti parazitines talpas ir didinti integrinio grandyno greitaveiką. Tačiau apsaugos elementų minimalių matmenų mažinimas turi būti ribojamas, tam kad apsauga atlaikytų elektrostatinę iškrovą. Projektuojant derėtų parinkti optimalų ESD apsaugos lygio ir grandyno greitaveikos santykį [1, 10].

1.8.1. Diodais pagrįsta ESD apsauga

Įėjimo / išėjimo išvadams naudojami taip vadinamieji dvigubi diodai (angl. *double-diode*). 1.9 paveiksle šie diodai pažymėti punktyrine linija. Viršutinis diodas skirtas praleisti srovę iš įėjimo / išėjimo išvado į maitinimo grandinę. Apatinis diodas skirtas praleisti srovę iš žemės į įėjimo / išėjimo išvadą. Iš diodų sudaryta ESD apsauga yra viena plačiausiai naudojamų apsaugų.

Naudojamų diodų dydis priklauso nuo reikalingo apsaugos lygio ir signalų dažnių, kurie bus naudojami grandyne. Kuo didesni diodai, tuo jie gali užtikrinti didesnę srovės pralaidumą be gedimų. Tačiau diodų dydis gali įtakoti susidarančias dideles parazitines talpas, kurios gali riboti

praleidžiamų dažnių juostos plotį. Norint sumažinti parazitines apsaugos elementų talpas, vietoj diodų praktikoje dar naudojami tiristoriai [1, 11].



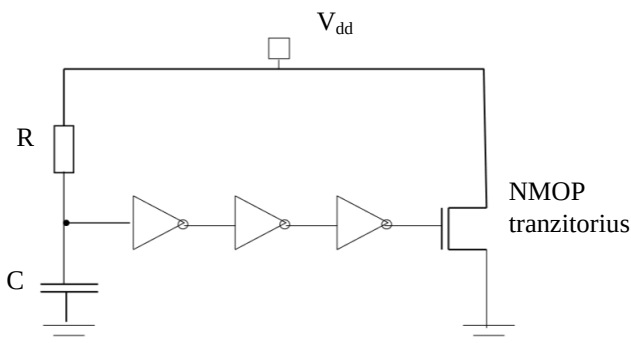
1.9 pav. ESD apsaugos grandinė [1]

Tam kad ESD diodai nesuveiktų grandinei dirbant normaliomis darbo sąlygomis vietoj vieno viršutinio diodo jungiami keli diodai nuosekliai. Taip padidinama slenkstinė viršutinių diodų atidarymo įtampa, kuri turi viršyti maitinimo grandinės įtampą. Svarbu, kad diodų varža nebūtų didelė, kadangi didelė varža užtikrins didesnę susidarančią įtampą, kuri nėra pageidaujama [1].

1.8.2. Maitinimo šaltinio ir žemės ESD apsaugos grandinė

Maitinimo šaltinio ir žemės ESD apsaugos grandinė (angl. *power clamp*) tai grandinė naudojama apsaugoti nuo ESD įvykio, kurio metu srovė teka iš maitinimo grandinės į žemę.

Dažnai naudojamos RC grandinė valdomos maitinimo šaltinio ir žemės ESD apsaugos. Tokia apsaugos grandinė pateikta 1.10 paveiksle.



1.10 pav. Maitinimo šaltinio ir žemės ESD apsaugos grandinė [1]

Šiose struktūrose RC grandinė suprojektuojama taip, kad esant normalioms darbinėms sąlygoms tranzistorius, per kurį sudaromas kelias srovei, yra uždaromas, o esant ESD įvykiui jis – atidaromas. Lauko tranzistorius su n kanalu turi būti pakankamai didelio pločio, tam, kad gebėtų praleisti didelę ESD srovę [12].

2. ESD APSAUGOS PROJEKTAVIMAS

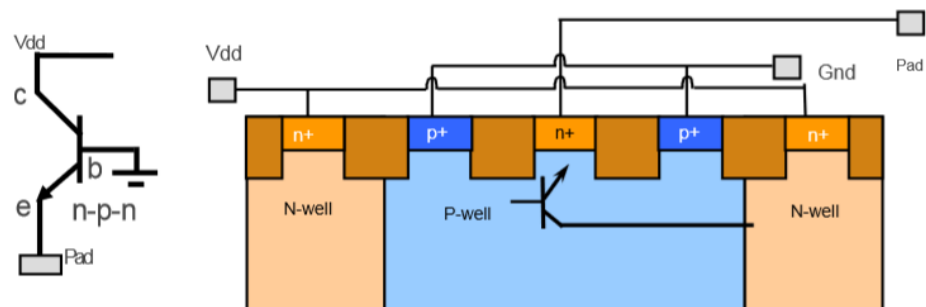
Pirmajame projektavimo etape nuspręsta sudaryti tipinę ESD apsaugos grandinę. Šios grandinės projektavimo eigą galima išskaidyti į tris etapus: apsaugos skirtos apsaugoti vidines grandines nuo HBM ir MM įvykių projektavimas; apsaugos skirtos apsaugoti nuo CDM įvykio projektavimas; ESD apsaugos projektavimas tarp maitinimo ir žemės grandinių. Apsauga projektuojama „Cadence“ programiniu paketu, IBM 0,18 μ m technologijoje.

2.1. Apsaugos, skirtos apsaugoti vidines grandines nuo HBM ir MM įvykių, projektavimas

Apsaugą nuo HBM ir MM įvykių sudaro du diodai. Vienas diodas viršuje tarp įėjimo / išėjimo ir maitinimo išvadų, ir kitas diodas apačioje, tarp įėjimo / išėjimo ir žemės išvadų.

Apatiniam diodui sudaryti panaudota N^+ / SX struktūra, kaip pateikta 2.1 paveiksle. Struktūroje susidaro šoninis $n-p-n$ dvipolis tranzistorius, su n kišenės apsauginiu žiedu aplink diodą. Prie emiterio (n^+ srities) prijungiamas įėjimo / išėjimo kontaktas, o prie bazės (p^+ srities) prijungiamas žemės kontaktas. Taip gaunama pn sandūra (apatinis diodas), kuri, šiuo atveju gali praleisti srovę iš žemės kontakto į įėjimo / išėjimo kontaktą. β yra daug mažiau už vienetą.

Vienas šios struktūros privalumų yra mažos talpos (KMOP technologijoje sunku pasiekti mažesnes talpas nei diodo, kurio sritį riboja U tipo izoliacija, nebent naudojant tiristorius). Taip pat ši struktūra nereikalauja didelio ploto luste. Be to, tarp žemės išvado ir apsauginio žiedo, prijungto prie maitinimo, susidaro kita pn sandūra, kuri praleistų srovę, kai ESD įvykis įvyktų tarp žemės ir maitinimo, o srovės tekėjimo kryptis būtų iš žemės į maitinimo grandinę [1].

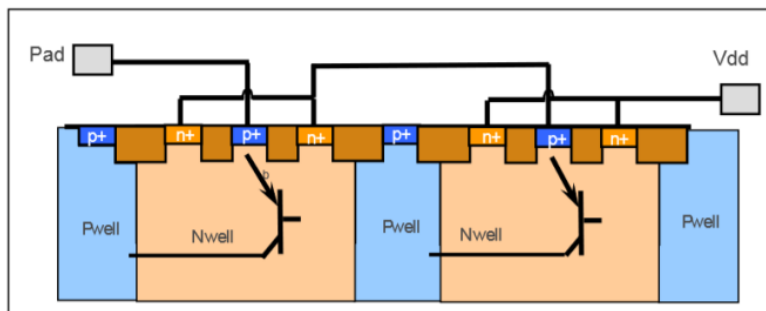


2.1 pav. N^+ / SX diodo struktūra [1]

Viršutinis diodas jungia įėjimo / išėjimo ir maitinimo išvadų magistralės. Šiuo atveju per diodą srovė tekėtų iš įėjimo / išėjimo į maitinimo išvadą. Tačiau ši sąlyga reikalinga tik tuomet, kai veikia ESD įvykis. Normaliomis sąlygomis per diodą turi netekėti srovė, jis turi būti uždarytas, kad įeinantys ar išeinantys signalai nepatektų į maitinimo magistralę. Būtent dėl šios sąlygos

viršutiniam diodui įgyvendinti paprastai naudojami keli nuosekliai sujungti diodai, nes jungiant juos nuosekliai, diodų atsidarymo įtampos sumuojamos. Taigi, nuosekliai sujungtų diodų turi būti tiek, kad jų atsidarymo įtampa viršytų grandinės maitinimo įtampą, ar įėjimų / išėjimų signalų maksimalias leistinas įtampos vertes. Taip sujungti diodai atsidarys tik esant ESD įvykiui.

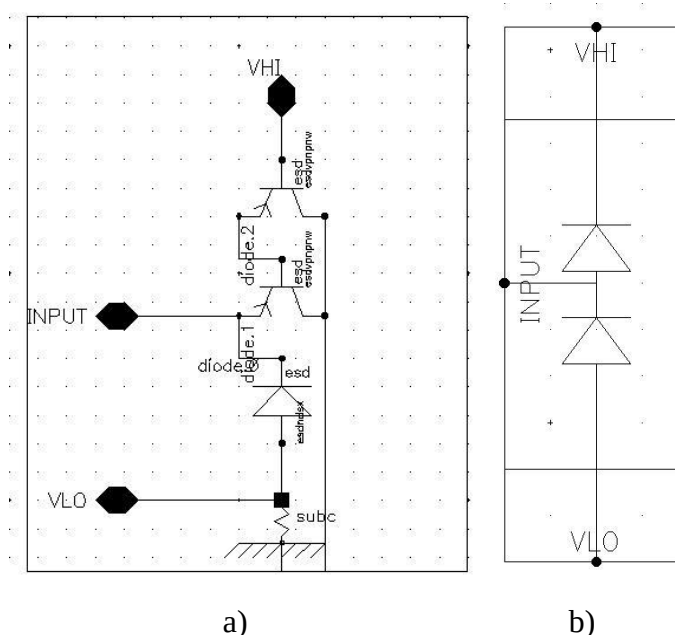
Viršutiniams diodams sudaryti panaudotos P^+ / NW struktūros. Dviejų nuosekliai sujungtų diodų struktūra pateikta 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Dviejų nuosekliai sujungtų P^+ / NW diodų struktūra [1]

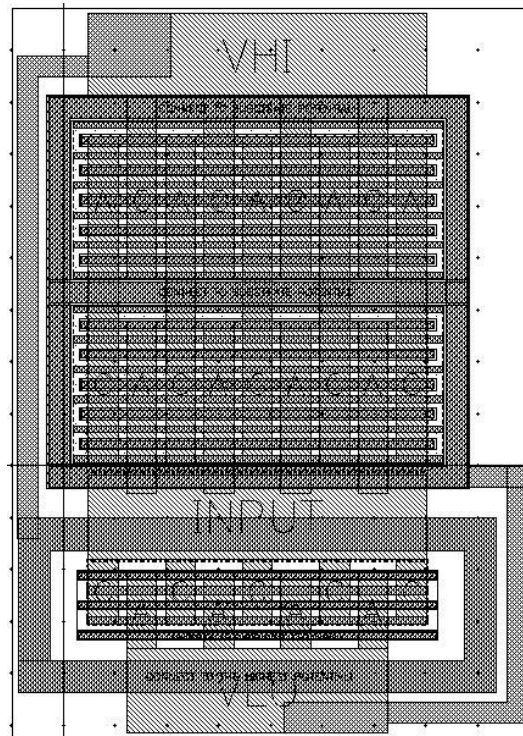
Struktūrose susidaro šoniniai pnp dvipoliai tranzistoriai su n bei p kišenėmis. Prie emiterio (p^+ srities) prijungiamas įėjimo / išėjimo kontaktas, o prie bazės (n^+ srities) prijungiamas sekančio nuosekliai jungiamo diodo emiterio (p^+ sritis) kontaktas. Antrojo diodo bazę (n^+ sritis) jungiama prie maitinimo kontakto. Taip gaunamos dvi nuosekliai sujungtos pn sandūros (viršutiniai nuosekliai sujungti diodai), kurios kaip jau buvo minėta praleidžia srovę iš įėjimo / išėjimo išvado į maitinimo išvadą. Taip sujungtos tranzistorių poros vadinamos Darlingtono poromis [1].

„Cadence“ programiniame pakete buvo parinkti aptarti diodai tiek apatinei tiek viršutinei grandinės dalims. Suprojektuota diodų grandinė bei jos simbolis pateikti 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Suprojektuota ESD apsaugos diodų grandinė a) ir jos simbolis b)

Suprojektuotos gandinės diodų topologija pateikta 2.4 paveiksle.



2.4 pav. ESD apsaugos diodų topologija

Apatinio diodo topologija sudaryta iš 2 katodų ir 3 anodų. Kiekvieno katodo ilgis $33,04\mu\text{m}$, o plotis 720nm . Kiekvieno iš viršutinių diodų topologija sudaryta iš 5 anodų ir 6 katodų. Vieno anodo ilgis $34,08\mu\text{m}$ ir plotis 720nm . Suprojektuota diodų apsauga užima $3527,25\mu\text{m}^2$ lusto ploto.

2.2. Apsaugos, skirtos apsaugoti vidines grandines nuo CDM įvykio, projektavimas

CDM įvykis pasižymi trumpiausiu, tačiau didžiausiu srovės impulsu, lyginant su kitų modelių įvykiais. Atliekant CDM testavimą, visas lustas (lusto talpos) yra įkraunamas įtampa ir tuomet iškraunamas per vieną išvadą. Nenaudojant papildomos apsaugos srovė tekanti į įėjimo / išėjimo išvadą turi du kelius išsikrauti į lustą – per viršutinius diodus į maitinimo magistralę arba priešinga kryptimi per apatinį diodą į žemės magistralę. Kai testavimo metu įėjimą / išėjimą veikia teigiamas impulsas, pasirenkamas kelias yra per viršutinį diodą. Atsparūs ESD diodai skirti apsaugai nuo HBM įvykio turi nedideles, apie 1Ω , atidaryto diodo varžas. CDM srovė gali siekti $10 - 20\text{A}$, o tai sudarys $10 - 20\text{V}$ įtampos kritimą tarp įėjimo / išėjimo ir maitinimo ar žemės magistralių. Taigi, susidariusi įtampa kris ir ant įėjimo grandinės tranzistoriaus užtūros. Ši įtampa pakankamai didelė

priversti tekėti srovei priešinga kryptimi per apatinį diodą, bet svarbiausia – ji pramuš tranzistoriaus užtūros oksidą ir taip sugadins imtuvą. Norint apsisaugoti nuo tokios didelės srovės reikia panaudoti papildomą apsaugą.

Apsaugai nuo CDM įvykio įgyvendinti galima panaudoti įtampų daliklį tarp įėjimo / išėjimo kontakto ir imtuvo tranzistoriaus užtūros. Todėl CDM apsaugai panaudojamas rezistorius ir papildomi apatinis bei viršutiniai diodai. Rezistorius jungiamas nuosekliai tarp įėjimo / išėjimo ir vidinės grandinės (įėjimo užtūros). Tokioje grandinėje rekomenduojama naudoti didesnės nei $50\ \Omega$ varžos rezistorius. Normaliomis darbo sąlygomis rezistorius yra nuosekliame jungime su imtuvo įėjimo impedansu ir įprastų diodų apkrovos talpa, tad neturėtų ženkliai paveikti užtūros persikrovimo greičio. Šiuo atveju įkrovus įrenginį neigiama įtampa ir iškraunant jį per įėjimo / išėjimo išvadą, didelės įtampos susidaro tarp išvado ir maitinimo bei žemės magistralių, tačiau rezistorius ir tiesioginę srovę praleidžiantys viršutiniai diodai padalina šią įtampą atitinkamai pagal tai kokia yra rezistoriaus varža ir atidaryto diodo varža [1].

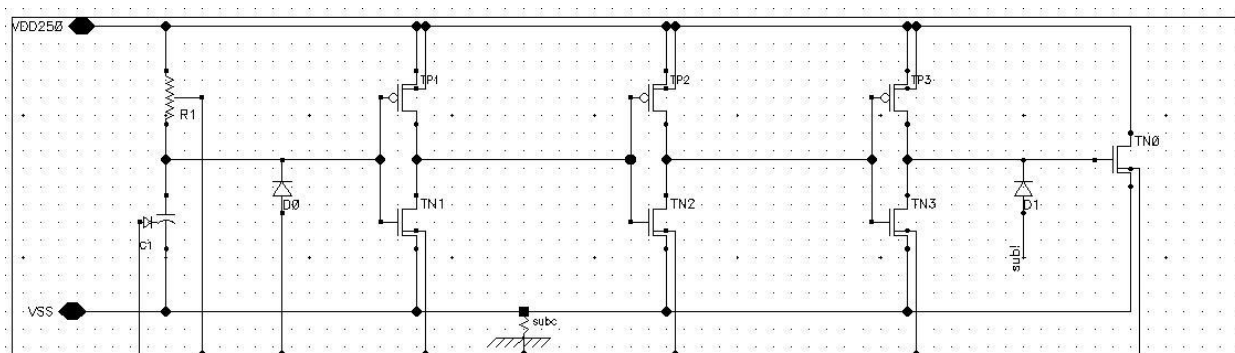
CDM apsaugai sudaryti panaudoti toki pat diodai, kaip buvo panaudoti HBM apsaugai (aptarti prieš tai buvusiame skyriuje). Parinktas $212,79\ \Omega$ nuoseklus rezistorius, kuris užtikrina mažesnę įtampą įėjime. Panaudotas $3\ \mu\text{m}$ pločio ir $2\ \mu\text{m}$ ilgio $p+$ polisilicio rezistorius, kurio paviršinė varža $260\ \Omega/\square$.

2.3. Apsaugos tarp maitinimo ir žemės magistralių projektavimas

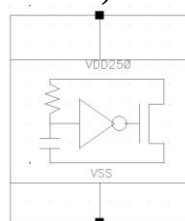
Maitinimo ir žemės magistralių apsaugos pagrindą sudaro RC valdymo grandinė, trys inverteriai ir pagrindinis tranzistorius, per kurį tekės ESD įvykio srovė. „Cadence“ aplinkoje sudaryta schema ir simbolis pateikti 2.5 paveiksle. Maitinimo ir žemės magistralių apsaugai valdyti naudojama RC grandinė. RC grandinė suprojektuojama taip, kad esant normalioms darbinėms sąlygoms tranzistorius, per kurį sudaromas kelias srovei, yra uždaromas, o esant ESD įvykiui – jis atidaromas.

Valdymo grandinei panaudotas $431,776\ \text{k}\Omega$ $p+$ polisilicio rezistorius, kurio paviršinė varža $260\ \Omega/\square$. Rezistorius padalintas į keturias dalis, kurių kiekvienos plotis $760\ \text{nm}$ ir ilgis $50\ \mu\text{m}$. Taip pat valdymui panaudotas kondensatorius, kurio talpa $4,38\ \text{fF}/\mu\text{m}^2$. Kondensatorius padalintas į 20 dalių, kurių kiekvienos plotis $5\ \mu\text{m}$ ir ilgis $4,9\ \mu\text{m}$. Vienos dalies maksimali talpa, krentant $3,3\text{V}$ įtampai, yra $109,512\ \text{fF}$, atitinkamai bendra maksimali kondensatoriaus talpa yra apie $2,19\ \text{pF}$. Nuo šios grandinės priklauso laiko konstanta, po kurios uždaromas ESD srovę praleidžiantis tranzistorius. Šios grandinės laiko konstanta yra $\sim 945\ \text{ns}$, tad šio laiko turėtų užtekti praleisti srovę per tranzistorių, veikiant bet kuriam iš aptartų modelių įvykiui.

Grandinėje taip pat panaudotas trijų pakopų inverteris, kuris susideda iš lauko tranzistorių su p ir n tipo kanalais.



a)



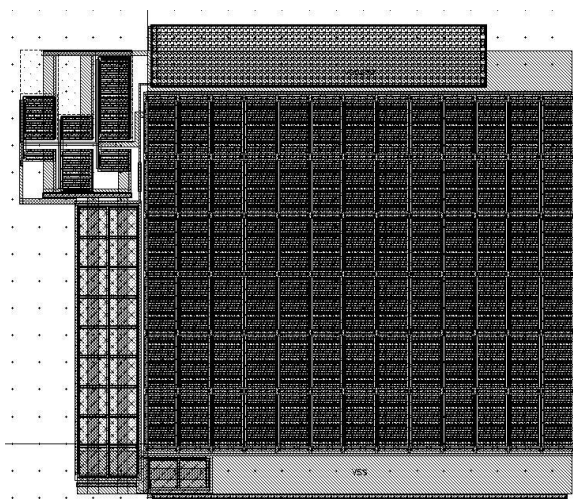
b)

2.5 pav. Sudaryta apsaugos tarp maitinimo ir žemės magistralių schema (a) ir simbolis (b)

Inverterių tranzistoriams naudojamos vienodo ilgio užtūros, o užtūrų pločiai skiriasi:

- pirmojo inverterio tranzistoriaus su p kanalu užtūros plotis – $40\ \mu\text{m}$, o tranzistoriaus su n kanalu užtūros plotis – $10\ \mu\text{m}$;
- antrojo inverterio tranzistoriaus su p kanalu užtūros plotis – $20\ \mu\text{m}$, o tranzistoriaus su n kanalu užtūros plotis – $40\ \mu\text{m}$;
- trečiojo inverterio tranzistoriaus su p kanalu užtūros plotis – $80\ \mu\text{m}$, o tranzistoriaus su n kanalu užtūros plotis – $20\ \mu\text{m}$.

2.6 paveiksle pateikta maitinimo ir žemės apsaugos grandinės topologija.

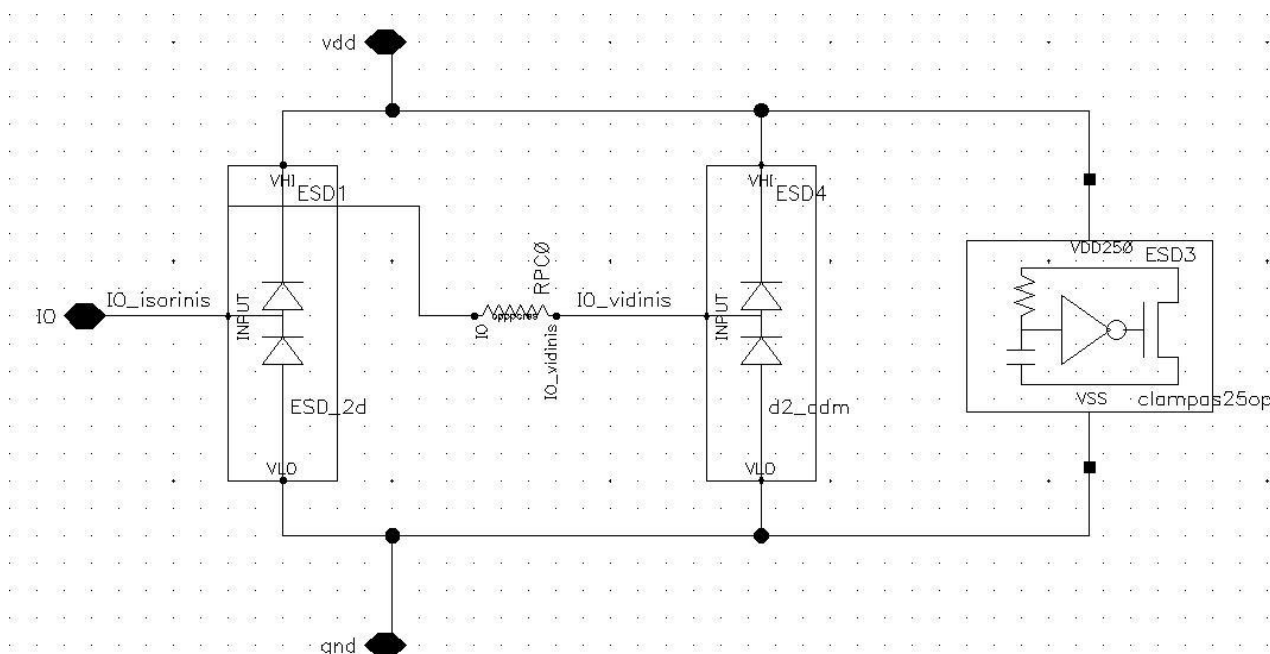


2.6 pav. Maitinimo ir žemės apsaugos grandinės topologija

Vienas svarbiausių elementų šioje apsaugoje – didelis lauko tranzistorius su n tipo kanalu. Šis tranzistorius susideda iš 780 pirštelių, kurių kiekvieno ilgis 320 nm, o plotis 5,24 μm . Bendras tranzistoriaus plotis siekia net 4,0872 mm. Suprojektuota maitinimo ir žemės apsauga užima 9005,70 μm^2 lusto ploto.

2.4. Galutinės grandinės projektavimas

Galiausiai visos trys ESD apsaugos grandinės sujungiamos į vieną bendrą grandinę, gebančią apsaugoti vidines grandines nuo skirtingos kilmės ESD įvykių. Suprojektuota grandinė pateikta 2.7 paveiksle. Pirmoji diodų apsauga (ESD1) apsaugo nuo žmogaus kūno sukeltos iškrovos.

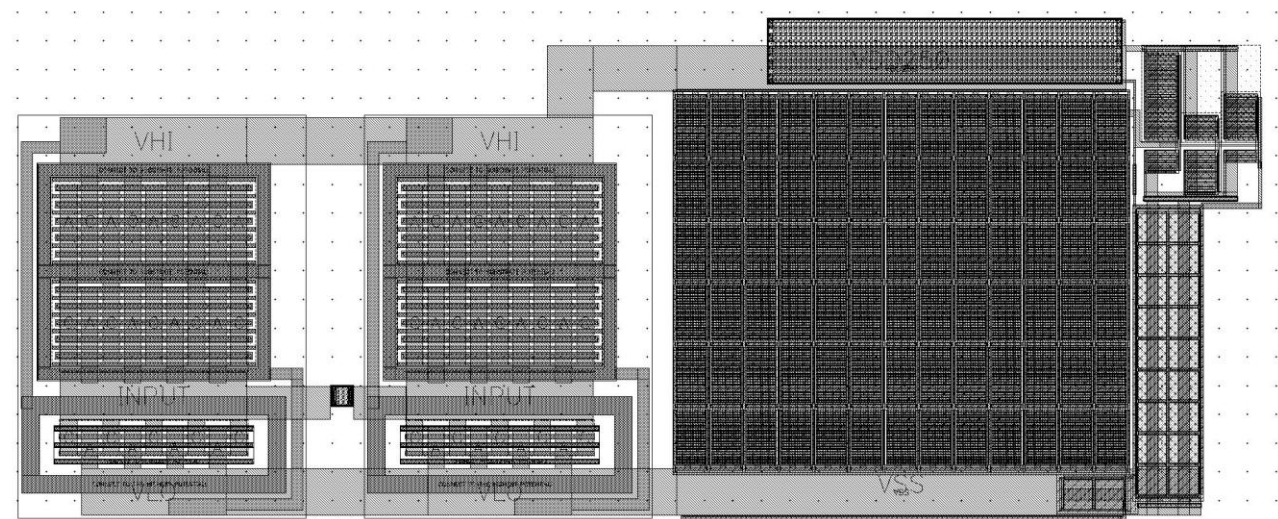


2.7 pav. ESD apsaugos grandinė

Rezistorius (RPC0) su antrąja diodų apsauga (ESD4) apsaugo nuo įrenginio ar įkrauto įrenginio modelių srovės, kuri nespėja išsikrauti per pirmąją apsaugą. Žemės bei maitinimo apsauga (ESD3) praleidžia ESD srovę, kai ji teka iš maitinimo į žemės grandinę.

2.8 paveiksle pateikta sudaryta ESD apsaugos grandinės topologija. Topologija užima 18757,79 μm^2 lusto ploto. Beveik pusę, net 9005,70 μm^2 , šio ploto užima maitinimo ir žemės apsauga, kurios didžiąją dalį sudaro srovę praleidžiantis tranzistorius. Pirmoji ir antroji diodų apsaugos užima po 3527,25 μm^2 .

Sudarius galutinę topologiją ir atlikus jos ekstrahavimą gaunami parazitinei grandinės parametrai. Tik įvertinus parazitinius parametrus, galima gauti tikslesnius projektuojamos grandinės modeliavimo rezultatus.



2.8 pav. ESD apsaugos grandinės topologija

Suprojektuota viena apsaugos grandinė neužima daug lusto ploto. Tačiau įvertinus tai, kad norint pasaugoti grandyną, apsaugas reikia projektuoti prie kiekvieno įėjimo / išėjimo išvado, bendras apsaugų užimamas plotas nepasirodytų toks mažas. Kai projektuojamas lustas turi šimtus išvadų, reikia panaudoti šimtus apsaugos grandinių. Tarkime, kad suprojektuota apsaugos grandinė ketiname apsaugoti šimtą grandyno išvadų. Tokiu atveju bendras apsaugų užimamas plotas sieks daugiau kaip $1,87 \text{ mm}^2$.

Norint sumažinti apsaugos užimamą plotą reikėtų mažinti apsaugos naudojamus elementus ir projektuoti topologiją taip, kad tarp elementų liktų kiek įmanoma mažiau neišnaudotos vietos. Tobulinant topologiją derėtų neužmiršti, kad elementų minimalūs matmenys turi būti ribojami, kitaip apsauga gali neatlaikyti per ją tekančios elektrostatinės iškrovos srovės.

3. SUPROJEKTUOTŲ ESD MODELIŲ TESTAVIMAS IR TYRIMAS

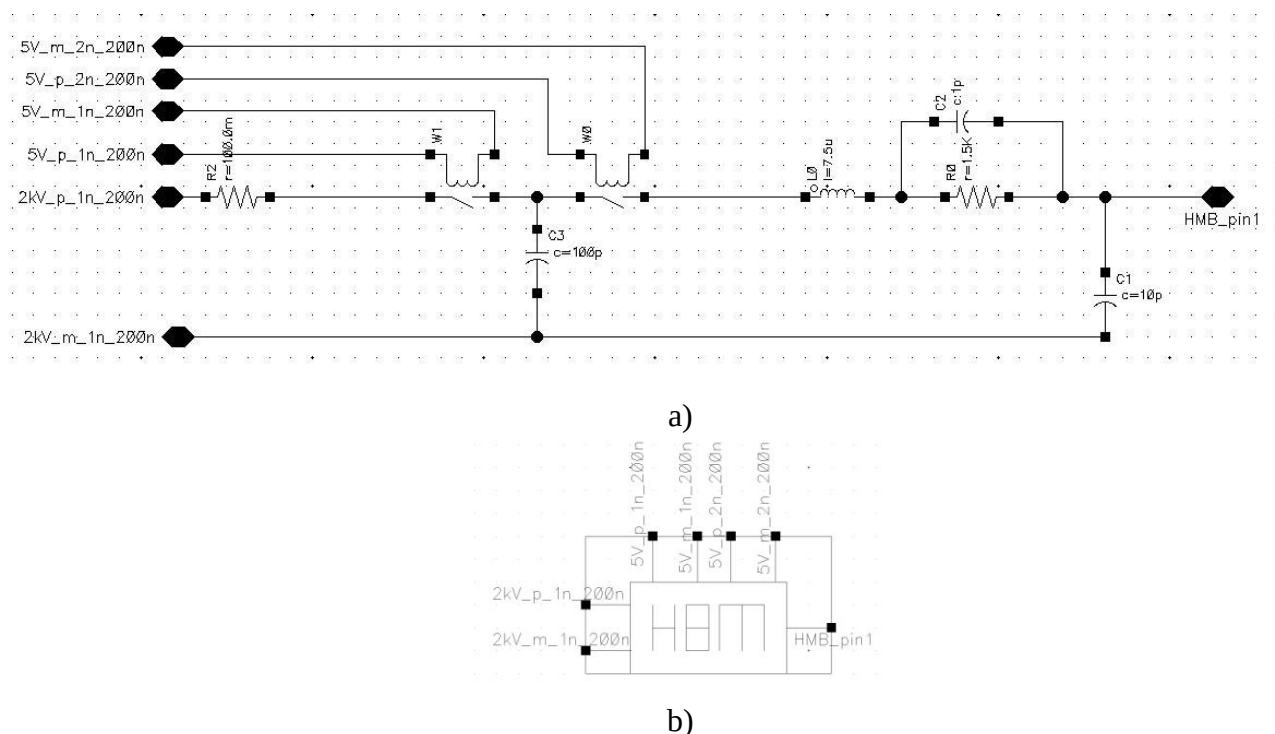
Suprojektavus ESD apsaugą, norint įsitikinti jos funkcionavimu, reikia atlikti modeliavimus. Tam reikalinga į grandinę siųsti žinomą signalą ir stebėti grandinės atsaką, t.y. stebėti kas vyksta išėjime. Modeliavimus įgyvendinti galima keliais būdais. Vienas jų – panaudojant standartinius ESD testavimo modelius. Kitas būdas – panaudoti aptartą impulsinės perdavimo linijos modelį. Grandinės modeliavimams atlikti, naudosime abu būdus, tam, kad būtų galima palyginti gautus rezultatus ir įvertinti modelių atitikimą.

3.1. Tyrimai, atlikti naudojant žmogaus kūno modelį

Norint gauti reikiamus signalus ESD įvykiams testuoti, kurie bus siunčiami į apsaugos grandinės įėjimą, reikia sudaryti atitinkamų modelių grandines. Tam sudaromos modelių grandinės: HBM ir MM grandinės. Sudarant modeliavimo grandines atsižvelgiama į parazitinius testavimo įrangos parametrus.

3.1.1. Žmogaus kūno modelio grandinė

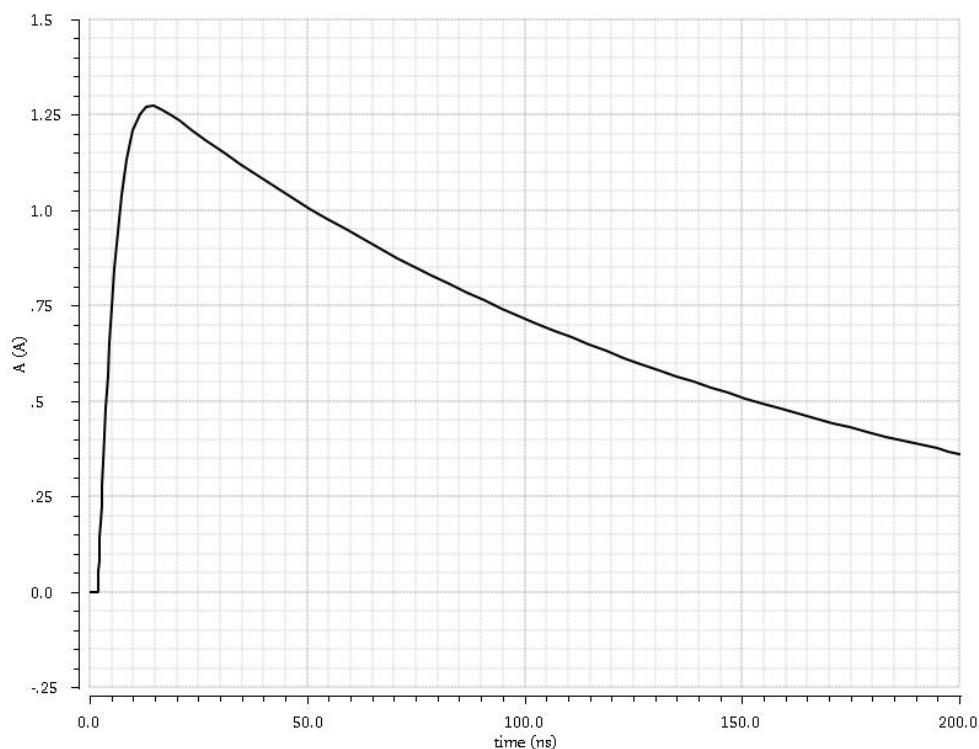
3.1 paveiksle pateikta sudaryta žmogaus kūno modelio grandinė ir jos simbolis. Grandinė sudaryta iš $C3$ kondensatoriaus ir $R0$ rezistoriaus. Uždarus jungiklį $W1$ ir atvėrus jungiklį $W0$ kondensatorius $C3$ įkraunamas iki 2 kV testuojamos įtampos. Tuomet atvėrus jungiklį $W1$ ir užvėrus – $W0$, kondensatorius $C3$, per rezistorių $R0$, iškraunamas į testuojamos grandinės išvadą.



3.1 pav. Žmogaus kūno modelio grandinė a) ir jos simbolis b)

Projektuojant grandinę taip pat buvo atsižvelgta į parazitinius parametrus: nuosekli induktyvinė ritė $L0$, parazitinė talpa $C2$ ir testavimo plokštės talpa $C1$. Grandinės parametrai $U_{HBM} = 2000 \text{ V}$, $C3 = 100 \text{ pF}$, $R0 = 1500 \Omega$, $L0 = 7.5 \mu\text{H}$, $C2 = 1 \text{ pF}$, $C1 = 10 \text{ pF}$ [14].

Prie grandinės išvadų, esančių dešinėje, jungiami maitinimo šaltiniai: 2000 V šaltinis įkraunantis kondensatorių, o du 5 V šaltiniai – skirti perjunginėti jungikliams. Grandinės dešinėje esantis išvadas jungiamas prie testuojamos grandinės. 3.2 paveiksle pateikta signalo forma gauta sumodeliavus sudarytą žmogaus kūno modelio grandinę.



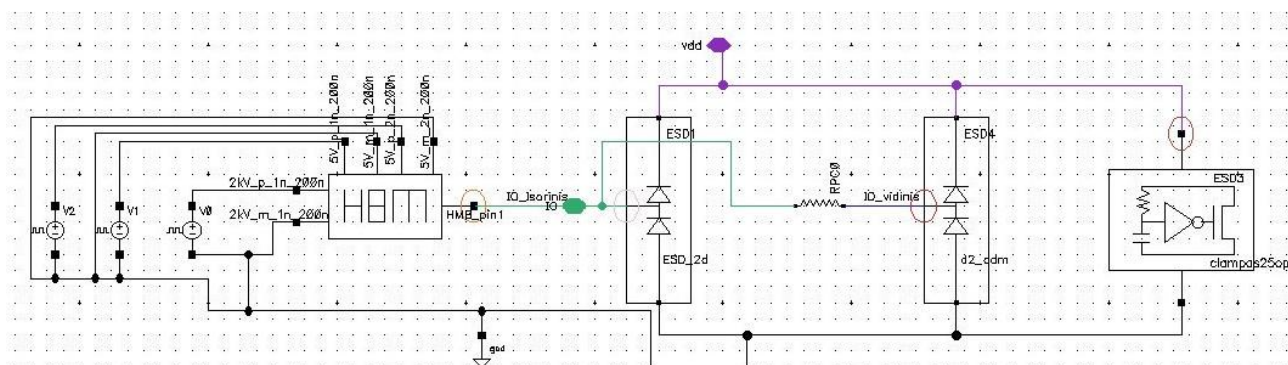
3.2 pav. Žmogaus kūno modelio grandinės generuojamas srovės impulsas

Remiantis „MIL–STD“ specifikacija, HBM signalo forma turi turėti mažesnę nei 10 ns kylantį signalo frontą ir $150 \pm 20 \text{ ns}$ kritimo laiką [2]. Kilimo laikas priklauso nuo parazitinio induktyvumo ir talpos. Įkrovus kondensatorių 2000 V ir panaudojus 1Ω rezistorių apkrovai, gauto signalo maksimali reikšmė siekia $1,27 \text{ A}$. Remiantis 2 lentelėje pateiktomis specifikacijomis, galima priimti, kad sudaryto modelio generuojamas signalas apibūdina žmogaus kūno modelio sukeltą iškrovą.

3.1.2. ESD apsaugos modeliavimas, panaudojant žmogaus kūno modelį

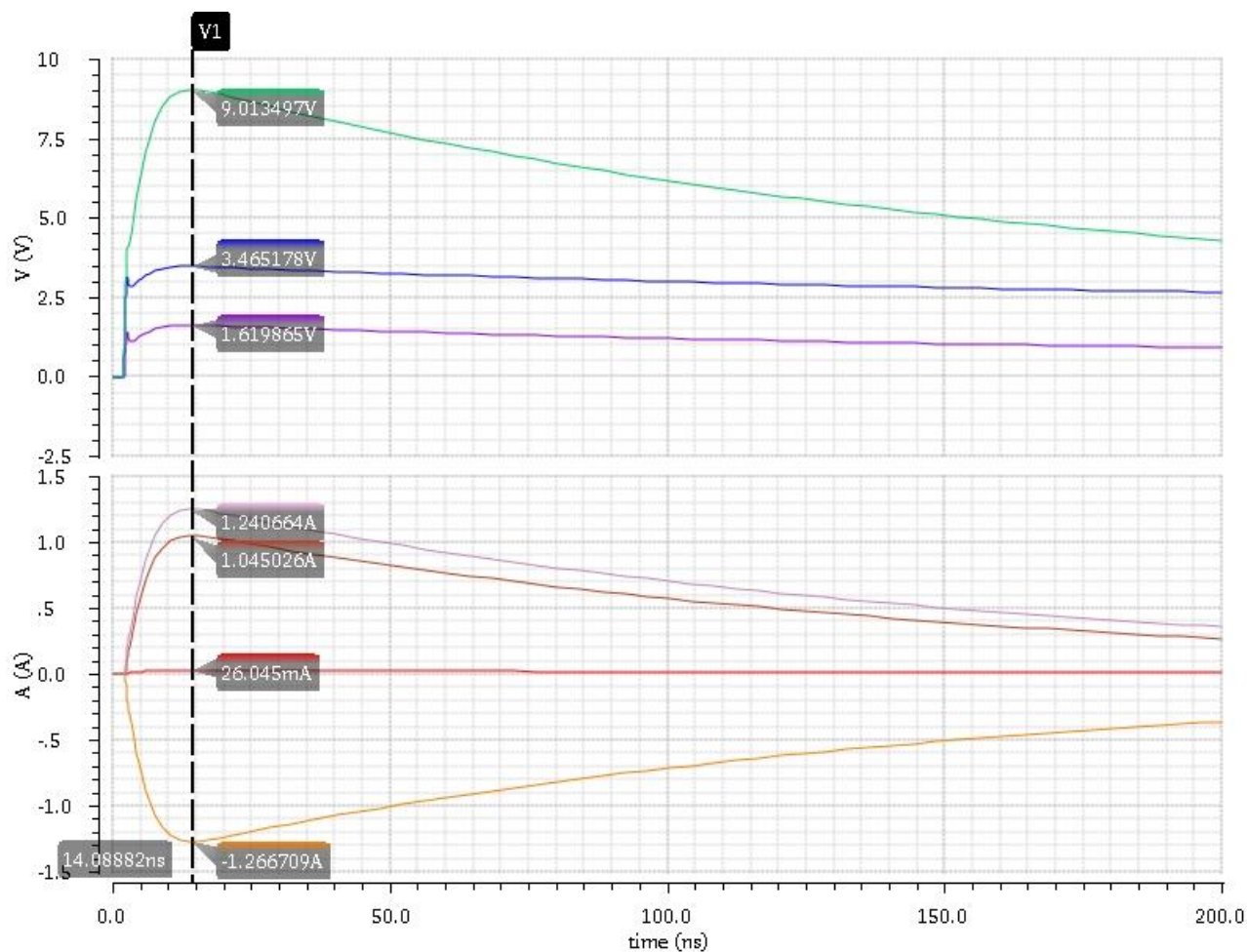
Sudarius modelio grandinę atliekami modeliavimai. 3.3 paveiksle pateikta ESD apsaugos grandinė, prie kurios prijungtas žmogaus kūno modelis. Prie žmogaus kūno modelio grandinės prijungti impulsiniai šaltiniai, skirti grandinei valdyti (5 V) bei kondensatoriui įkrauti (2000 V).

Grandinėje skirtingomis spalvomis pažymėti taškai, kuriuose bus matuojamos tekančios srovės. Skirtingomis spalvomis pažymėtuose sujungimuose – matuojamos įtampos.



3.3 pav. ESD apsaugos modeliavimo grandinė, panaudojant žmogaus kūno modelį

Atlikus modeliavimus gavome sroves, tekančias per pasirinktus taškus, bei įtampas, krentančias ant paveiksle pažymėtų sujungimų. Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos pateiktos 3.4 paveiksle. Paveiksle kreivės pažymėtos atitinkamomis spalvomis, kaip ir taškai ar sujungimai, kuriuose jos matuojamos modeliavimo grandinėje (3.3 pav.).



3.4 pav. Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos

Iš kreivių matyti, kad į grandinę patenka srovė, kurios maksimali momentinė vertė siekia 1,27 A. Kadangi modeliavimas atliekamas, kai ESD įvykis veikia tarp įėjimo / išėjimo ir žemės kontakto, srovė teka iš įėjimo / išėjimo per pirmos pakopos viršutinius diodus bei srovę ribojantį rezistorių ir antros pakopos diodus į maitinimo magistralę, o iš šios – per maitinimo ir žemės apsaugos grandinę į žemės magistralę. Didžioji į grandinę patekusios srovės dalis teka per pirmos pakopos apsaugos diodus (1,24 A). Dėl rezistoriaus tik maža dalis srovės (26 mA) teka per antros pakopos apsaugos diodus. Iš maitinimo grandinės per maitinimo ir žemės apsaugą srovė (1,04 A) patenka į žemės magistralę.

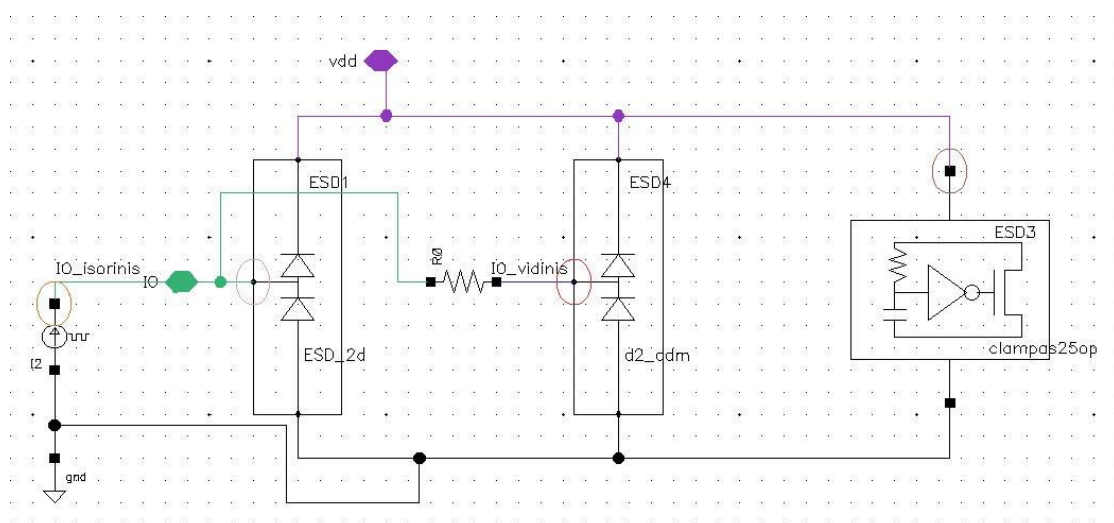
Išorinėje įėjimo / išėjimo grandinėje krenta 9,15 V įtampa. Tačiau ši įtampa sumažinama maitinimo grandinėje (1,75 V) ir vidinėje įėjimo / išėjimo grandinėje (3,60 V).

3.1.3. Žmogaus kūno modelio testavimas panaudojant, impulsinę perdavimo liniją

Atlikti modeliavimai remiantis impulsinės perdavimo linijos modeliu. Šiam modeliavimui vietoj prieš tai naudotos HBM grandinės generavusios ESD impulsą panaudojamas impulsinis srovės šaltinis. Skirtingiems modeliams modeliuoti naudojami skirtingi impulsinio srovės šaltinio parametrai.

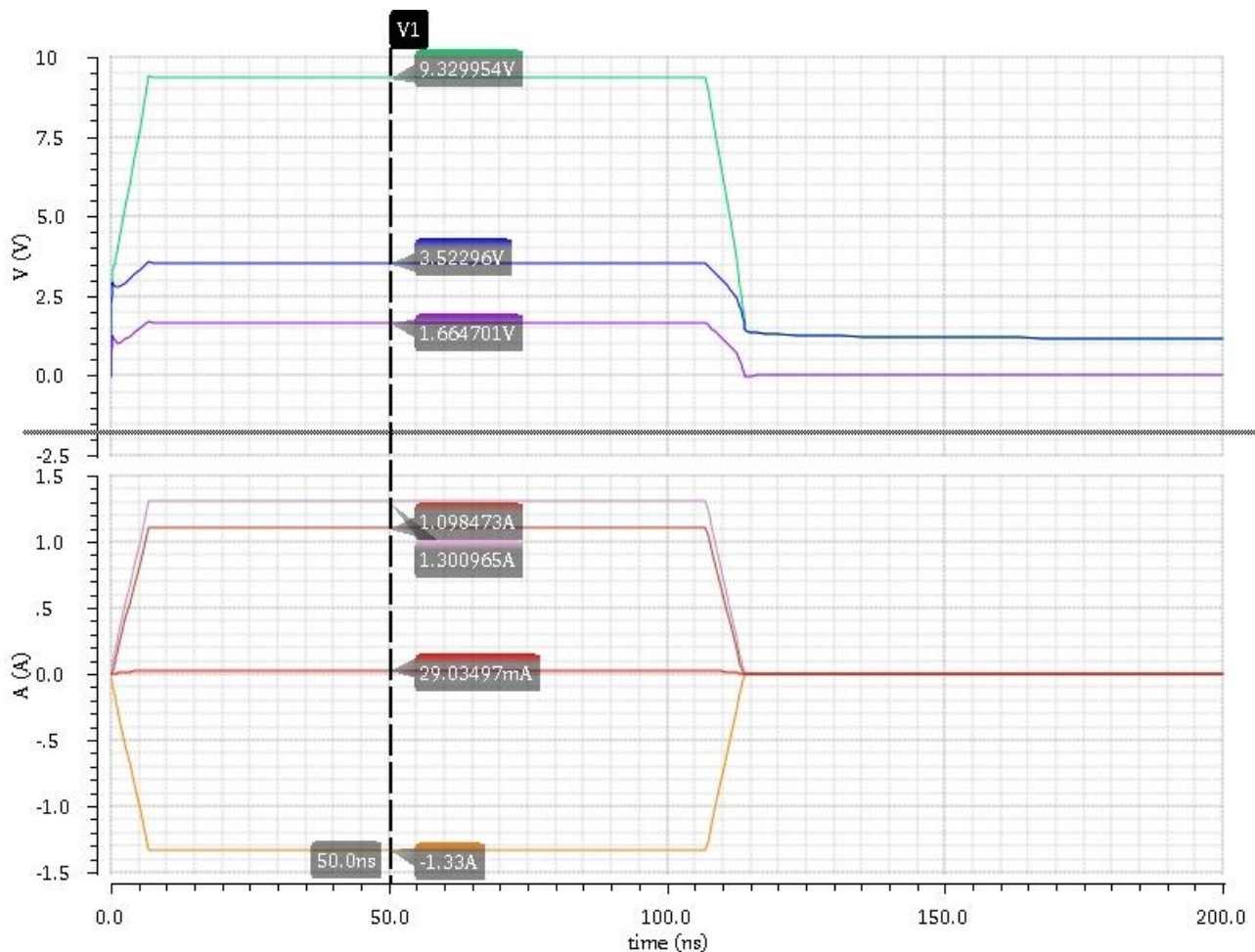
Žmogaus kūno modeliui panaudoto impulsinio srovės šaltinio parametrai: kylančio ir krentančio frontų trukmės – 7 ns, impulso plotis – 100 ns ir impulso srovės amplitudė – 1,33 A, kadangi tiriamė 2000 V įtampa įkrautą, žmogaus kūno modelio ESD įvykį [13].

3.5 paveiksle pateikta impulsinė perdavimo linija modeliuojama ESD apsaugos grandinė, panaudojant žmogaus kūno modelį apibūdinantį srovės šaltinį. Grandinėje skirtingomis spalvomis pažymėti taškai, kuriuose bus matuojamos tekančios srovės. Skirtingomis spalvomis pažymėtuose sujungimuose – matuojamos įtamos.



3.5 pav. Impulsinė perdavimo linija modeliuojama ESD apsaugos grandinė, panaudojant žmogaus kūno modelį apibūdinantį srovės šaltinį

Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos pateiktos 3.6 paveiksle. Paveiksle kreivės pažymėtos atitinkamomis spalvomis, kaip ir taškai ar sujungimai, kuriuose jos matuojamos modeliavimo grandinėje (3.5 pav.).



3.6 pav. Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos

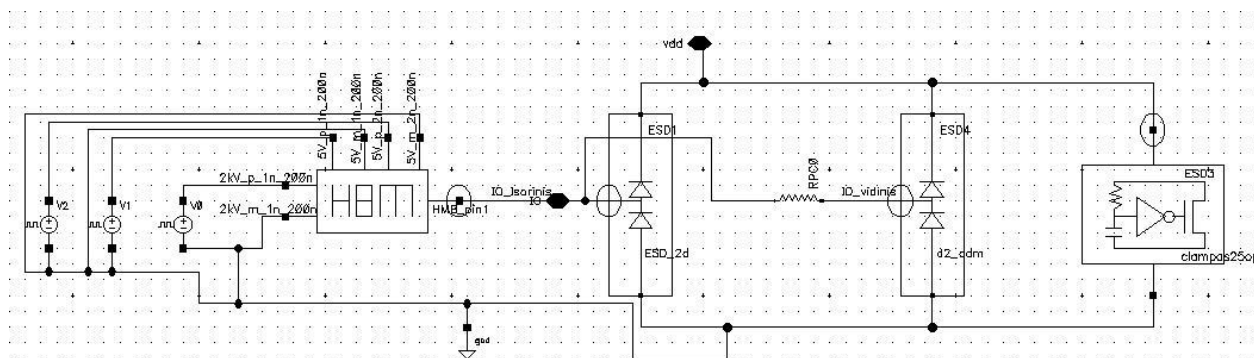
Iš kreivių matyti, kad į grandinę patenka srovė, kurios maksimali momentinė vertė siekia 1,33 A. Kadangi modeliavimas atliekamas, kai ESD įvykis veikia tarp įėjimo / išėjimo ir žemės kontakto, srovė teka iš įėjimo / išėjimo per viršutinius diodus bei CDM apsaugos rezistorių ir CDM apsaugos diodus į maitinimo grandinę, o iš šios – per maitinimo ir žemės apsaugos grandinę į žemės kontaktą. Didžioji į grandinę patekusios srovės dalis teka per pirmuosius HBM apsaugos diodus (1,30 A). Dėl rezistoriaus tik maža dalis srovės (29 mA) teka per CDM apsaugos diodus. Iš maitinimo grandinės per maitinimo ir žemės apsaugą srovė (1,09 A) patenka į žemės kontaktą.

Išorinėje įėjimo / išėjimo grandinėje krenta 9,47 V įtampa. Tačiau ši įtampa sumažinama maitinimo grandinėje (1,80 V) ir vidinėje įėjimo / išėjimo grandinėje, esančioje už antros pakopos diodų apsaugų (3,66 V).

3.1.4. Modeliavimai, atlikti varijuojant žmogaus kūno modelio parametrais

Modeliavimams buvo sudaryta bei panaudota žmogaus kūno modelio grandinė, kuri yra apibrėžta standartiniais parametrais ir plačiai naudojama pramonėje. Modeliavimui supaprastinti taip pat galima panaudoti impulsinę perdavimo liniją. Tačiau tiek vienu, tiek kitu atveju gausime standartais apibrėžtus rezultatus. Realiam gyvenime – kiekvienas žmogus yra skirtingas. Todėl kiekvienas žmogus gali turėti skirtingas varžas ir talpas, kurios gali neatitikti standartais apibrėžtų modelių. Todėl atlikti modeliavimai įvertinant skirtingas varžų bei talpų vertes, kurios gali būti ir didesnės, ir mažesnės už apibrėžtas standartiniame modelyje.

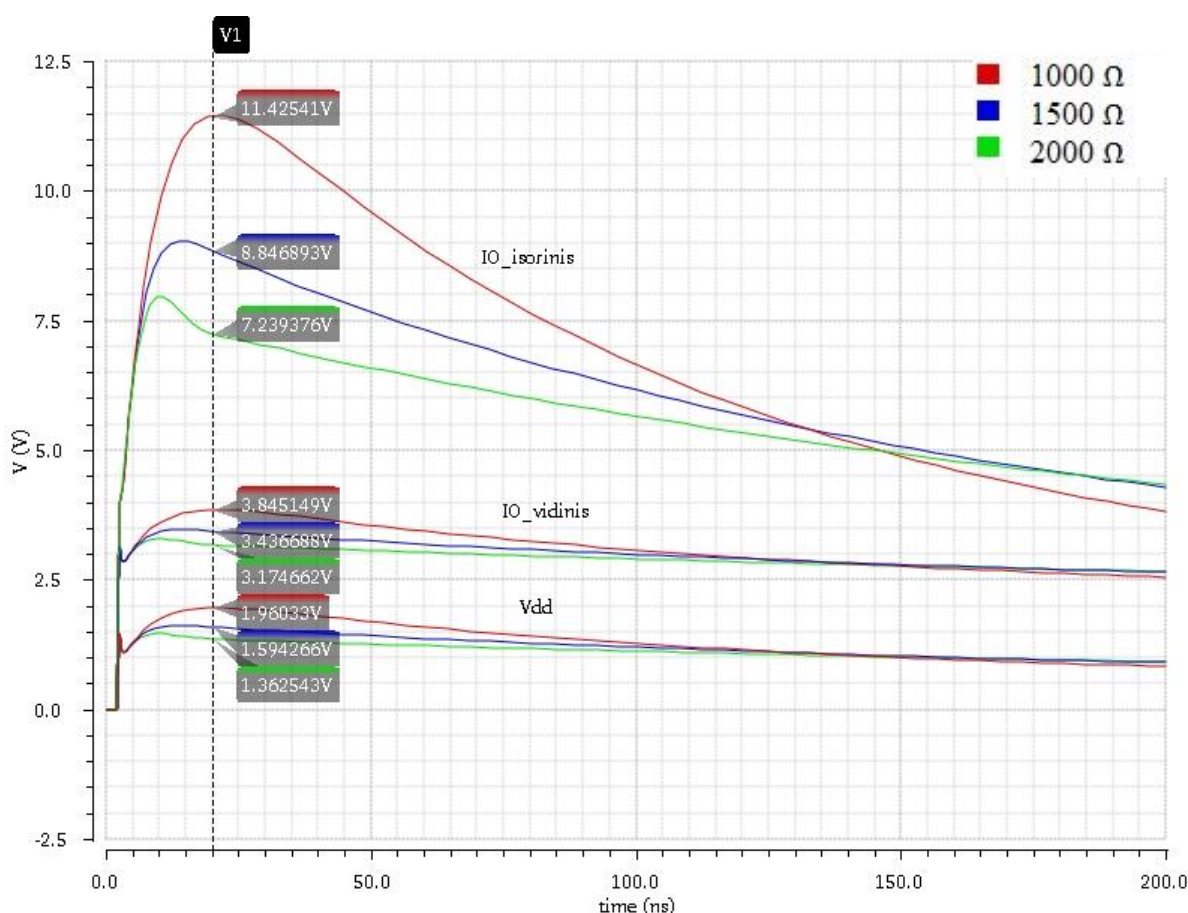
Modeliavimams naudojama standartinė žmogaus kūno modelio grandinė, kuri pateikta 3.7 paveiksle. Pereinamosios įtampų bei srovių charakteristikos, varijuojant žmogaus kūno modelio varžą, pateiktos 3.8 bei 3.9 paveiksluose. Tyrimui panaudotos trys skirtingos varžos: 1000 Ω , 1500 Ω , 2000 Ω . Paveiksluose pateiktos kreivės pažymėtos skirtingomis spalvomis, kurios atitinka skirtingas varžas žmogaus kūno modelyje.



3.7 pav. Žmogaus kūno modeliavimo grandinė

Iš 3.8 paveikslo matyti, kad nuo modelio varžos priklauso maksimalios įtampų reikšmės krentančios tiek išoriniame įėjime, tiek įėjime į vidinius grandynus bei maitinimo grandinėje. Kai varža lygi 1000 Ω išoriniame įėjime krenta 11,43 V įtampa, vidiniame įėjime krenta 3,85 V, o maitinimo grandinėje 1,96 V. Kai varža lygi 2000 Ω išoriniame įėjime krenta 7,24 V įtampa, vidiniame įėjime krenta 3,17 V, o maitinimo grandinėje 1,36 V. Taigi du kartus padidinus modelio varžą išoriniame įėjime įtampą sumažiname apie 1,58 karto, vidiniame įėjime įtampą sumažiname apie 1,21 karto ir maitinimo grandinėje įtampą sumažiname apie 1,44 karto. Remiantis rezultatais, galima teigti, kad kuo didesnė žmogaus kūno modelio varža – tuo mažesnė įtampa kris tiek įėjime, tiek kitose grandinės srityse.

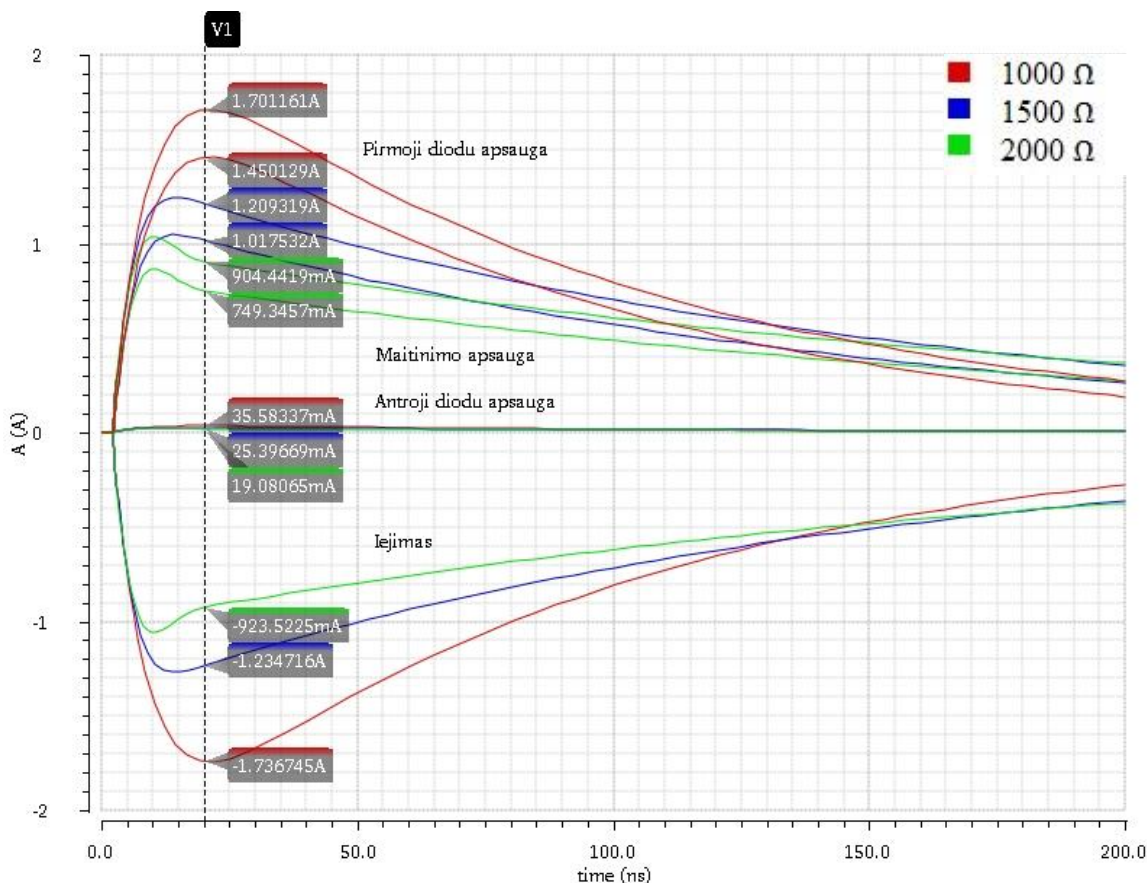
Iš 3.9 paveikslo matyti, kad nuo modelio varžos priklauso per apsaugą tekanči srovė. Kadangi modeliuojant kiekvienu atveju kondensatorius įkraunamas tokia pat 2000 V įtampa, remiantis Omo dėsniu, matyti, kad tekanči srovė priklauso nuo modelyje naudojamos nuoseklios varžos. Kai varža lygi $1000\ \Omega$ į grandinę įteka 1,74 A, per pirmąją diodų apsaugą teka 1,70 A, per antrąją diodų apsaugą teka 36 mA, o per maitinimo ir žemės apsaugą teka 1,45 A. Kai varža lygi $2000\ \Omega$ į grandinę įteka 0,92 A, per pirmąją diodų apsaugą teka 0,90 A, per antrąją diodų apsaugą teka 19 mA, o per maitinimo ir žemės apsaugą teka 0,75 A. Taigi du kartus padidinus modelio varžą į apsaugos grandinę įteka 1,89 karto mažesnė srovė, per pirmąją bei antrąją diodų apsaugas teka 1,89 karto mažesnės srovės, o per maitinimo ir žemės apsaugą teka 1,93 karto mažesnė srovė. Taigi varžai didėjant mažėja per apsaugą tekančios srovės.



3.8 pav. Įtampų pereinamosios charakteristikos, varijuojant HBM varžomis

Iš gautų rezultatų galima daryti išvadą, kad grandynui mažiau pavojingas tas žmogus, kurio varža yra didesnė, kadangi tokiu atveju grandinėje krentančių įtampų ir tekančių srovių maksimalios vertės yra mažesnės. O mažesnės įtampos bei srovės kelia mažesnę pavojų grandyno sugadinimui.

Pereinamosios įtampų bei srovių charakteristikos, varijuojant žmogaus kūno modelio talpa, pateiktos 3.10 bei 3.11 paveiksluose. Tyrimui panaudotos trys skirtingos talpos: 50 pF, 100 pF, 150 pF. Paveiksluose pateiktos kreivės pažymėtos skirtingomis spalvomis, kurios atitinka skirtingas talpas žmogaus kūno modelyje.

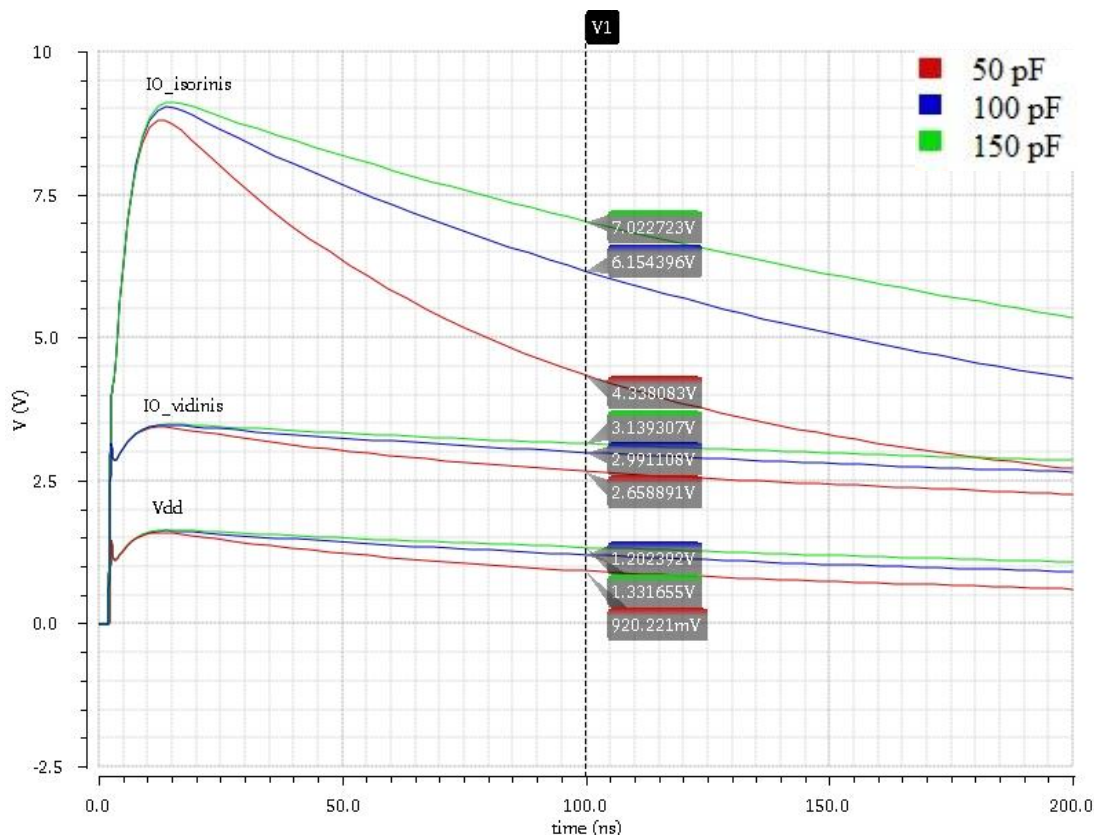


3.9 pav. Srovių pereinamosios charakteristikos, varijuojant HBM varžomis

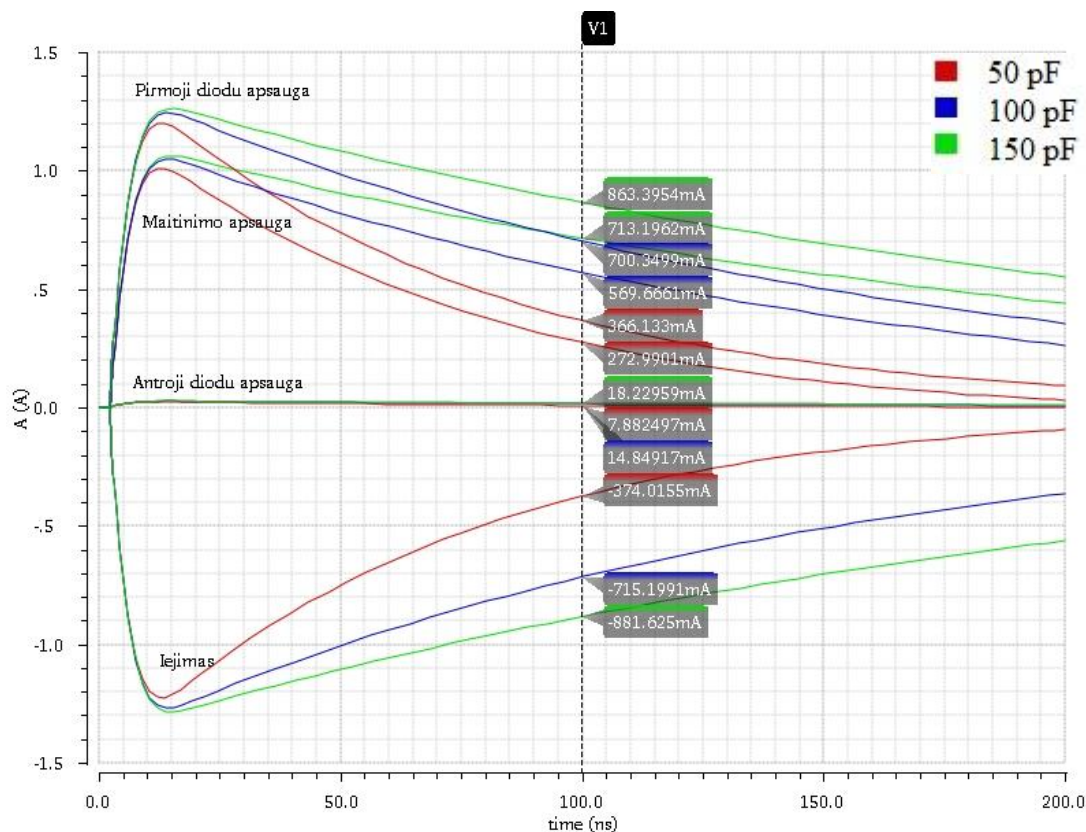
Iš 3.10 paveikslo matyti, kad nuo modelio talpos maksimalios įtampų reikšmės beveik nepriklauso. Tačiau nuo talpos priklauso impulso trukmė, t.y. trukmė per kurią talpa išsikauna. Kai talpa lygi 150 pF praėjus 100 ns išoriniame įėjime krenta 7,02 V įtampa, vidiniame įėjime krenta 3,14 V, o maitinimo grandinėje 1,33 V. Kai talpa lygi 50 pF praėjus 100 ns išoriniame įėjime krenta 4,34 V įtampa, vidiniame įėjime krenta 2,66 V, o maitinimo grandinėje 0,92 V. Taigi tris kartus sumažinus modelio talpą praėjus 100 ns išoriniame įėjime įtampą sumažėja apie 1,62 karto, vidiniame įėjime įtampą sumažėja apie 1,18 karto ir maitinimo grandinėje įtampą sumažiname apie 1,44 karto. Remiantis rezultatais galima teigti, kad kuo didesnė žmogaus kūno modelio talpa – tuo ilgesnės trukmės impulsas veiks grandyną.

Iš 3.11 paveikslo matyti, kad nuo modelio talpos taip pat priklauso per apsaugą tekančių srovių slopimo greitis. Kai talpa lygi 150 pF praėjus 100 ns per pirmąją diodų apsaugą teka 863 mA, per antrąją diodų apsaugą teka 18 mA, o per maitinimo ir žemės apsaugą teka 713 mA.

Kai talpa lygi 50 pF praėjus 100 ns per pirmąją diodų apsaugą teka 366 mA, per antrąją diodų apsaugą teka 8 mA, o per maitinimo ir žemės apsaugą teka 272 mA.



3.10 pav. Įtampų pereinamosios charakteristikos, varijuojant HBM talpomis



3.11 pav. Savių pereinamosios charakteristikos, varijuojant HBM talpomis

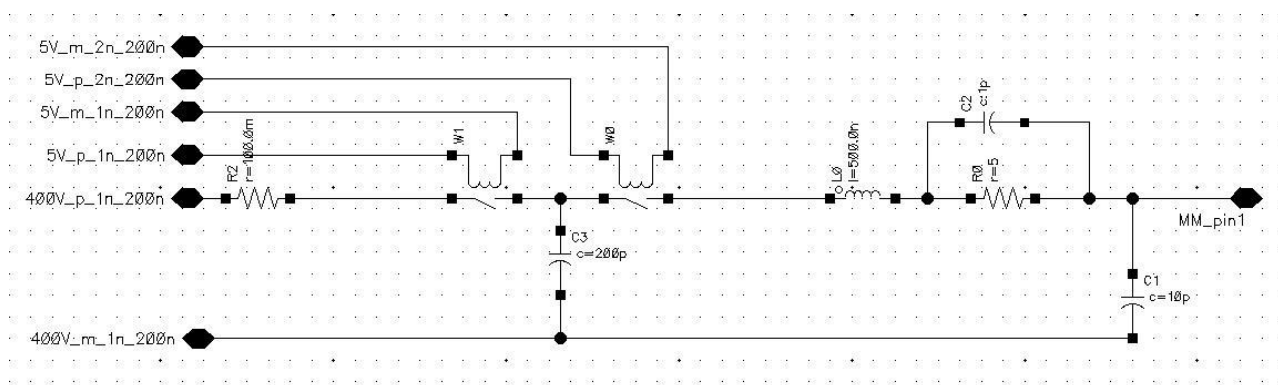
Iš gautų rezultatų galima daryti išvadą, kad grandynui mažiau pavojingas tas žmogus, kurio talpa yra mažesnė, kadangi tokiu atveju įtampų ir srovių impulsai veiksiantys grandinę greičiau išsikraus ir bus trumpesni. O kuo trumpesnis impulsas, tuo jis kelia mažesnę pavojų grandynui.

3.2. Tyrimai, atlikti naudojant įrenginių modelį

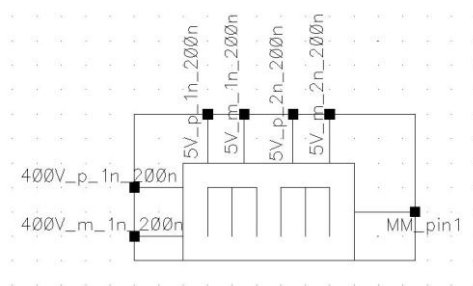
Kaip ir žmogaus kūno modelio atveju, taip ir įrenginių modeliui ištirti reikia sudaryti modelio grandinę. Tik sudarius grandinę galima ištirti modelio poveikį suprojektuotai apsaugos grandinei. Taip pat, modeliavimai atliekami panaudojant impulsinę perdavimo liniją, tam, kad būtų galima palyginti rezultatus.

3.2.1. Įrenginių modelio grandinė

Nors MM grandinės pagrindiniai elementai yra kondensatoriai ir ritė, įvertinus parazitinius parametrus, MM grandinės sandara tampa tokia pat, kaip ir HBM grandinės. Skiriasi tik elementų nominalai. Sudaryta MM grandinė pateikta 3.12 a) paveiksle, o jos simbolis 3.12 b) paveiksle.



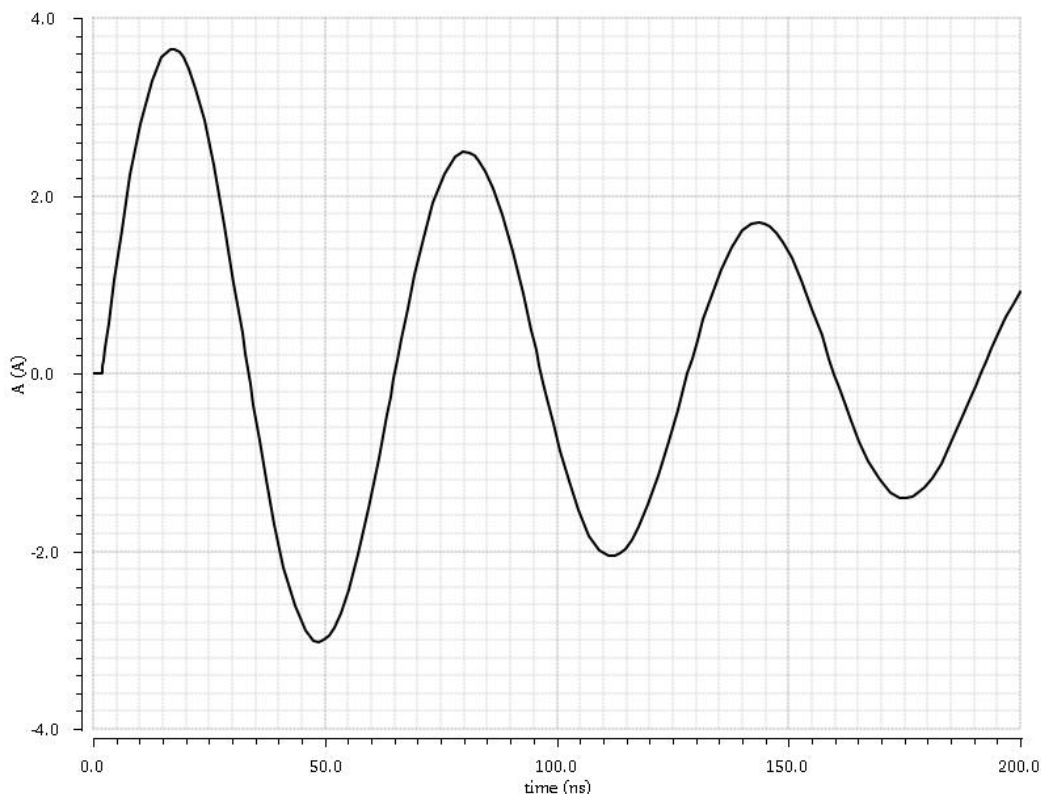
a)



b)

3.12 pav. Įrenginių modelio grandinė a) ir jos simbolis b)

Grandinės parametrai: $U_{MM} = 200 \text{ V}$, $C3 = 200 \text{ pF}$, $R0 = 5 \Omega$, $L0 = 0,5 \mu\text{H}$, $C2 = 1 \text{ pF}$, $C1 = 10 \text{ pF}$ [14]. Įrenginių modelio grandinės generuojamas srovės impulsas pateiktas 3.13 paveiksle. Nors įrenginių modelio ir žmogaus kūno modelio schemas panašios, įrenginių modelio generuojamo signalo forma skiriasi nuo žmogaus kūno modelio signalo formos.



3.13 pav. Įrenginių modelio grandinės generuojamas srovės impulsas

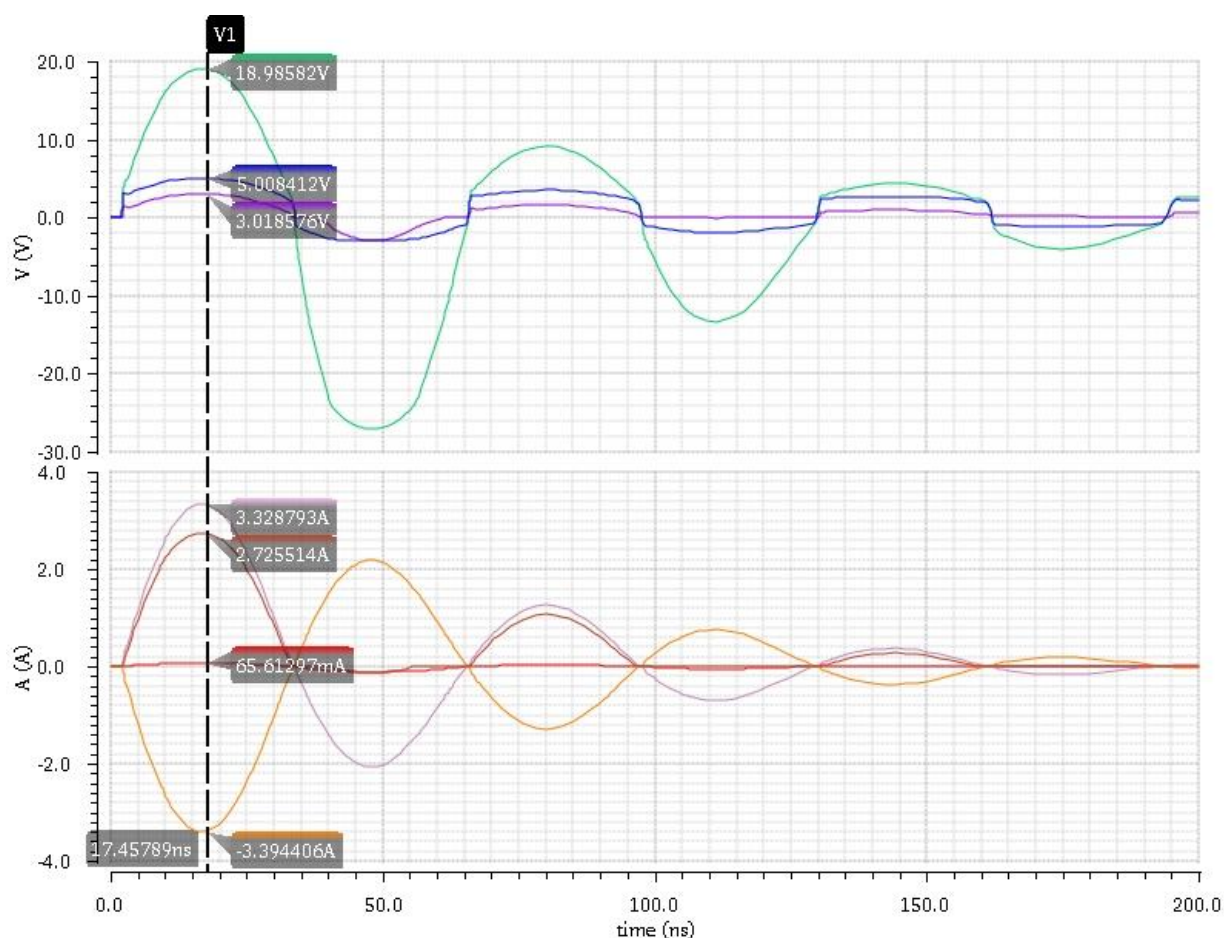
Įrenginių modelio generuojamas signalas yra osciliuojantis ir srovė gali tekėti tiek teigiama, tiek neigiama kryptimi. Kadangi modelis pasižymi mažesnėmis varžomis, net 200 V įtampa įkrovus kondensatorių ženkliai padidėjo maksimali srovė. Maksimali srovės vertė siekia 3,65 A. Maksimalios srovės vertę ir pulsacijos dažnį lemia naudojamo induktyvumo nominalas. Remiantis IBM instrukcijomis modeliavimai atlikti naudojant 200 V šaltinį, kuris įkrauna modelio talpą [1]. Remiantis 2 lentelėje pateiktomis specifikacijomis, galima priimti, kad sudaryto modelio generuojamas signalas apibūdina įrenginių modelio sukeltą iškvapą.

3.2.2. ESD apsaugos modeliavimas, panaudojant įrenginių modelį

3.14 paveiksle pateikta ESD apsaugos grandinė, prie kurios prijungtas įrenginių modelis. Prie įrenginių modelio grandinės prijungti impulsiniai šaltiniai skirti grandinei valdyti (5 V) bei kondensatoriui įkrauti (200 V). Grandinėje skirtingomis spalvomis pažymėti taškai, kuriuose bus

3.14 pav. ESD apsaugos modeliavimo grandinė, panaudojant įrenginių modelį

Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos pateiktos 3.15 paveiksle. Paveiksle, kreivės pažymėtos atitinkamomis spalvomis, kaip ir taškai ar sujungimai, kuriuose jos matuojamos modeliavimo grandinėje (3.14 pav.). Kaip jau buvo minėta, šio modelio įvykio metu gaunama osciliuojanti signalo forma.



3.15 pav. Itampu ir srovių pereinamosios charakteristikos

Iš kreivių matyti, kad į grandinę patenka srovė, kurios maksimali momentinė vertė siekia 3,4 A. Be to, srovė teka tiek teigiama, tiek neigiama kryptimi. Modeliavimas atliekamas, kai ESD įvykis veikia tarp įėjimo / išėjimo ir žemės kontakto. Analizuojant teigiamą pusperiodį, didžioji į grandinę patekusios srovės dalis teka per pirmuosius HBM apsaugos diodus (3,33 A). Dėl rezistoriaus tik maža dalis srovės (66 mA) teka per CDM apsaugos diodus. Iš maitinimo grandinės per maitinimo ir žemės apsaugą srovė (2,71 A) patenka į žemės kontaktą.

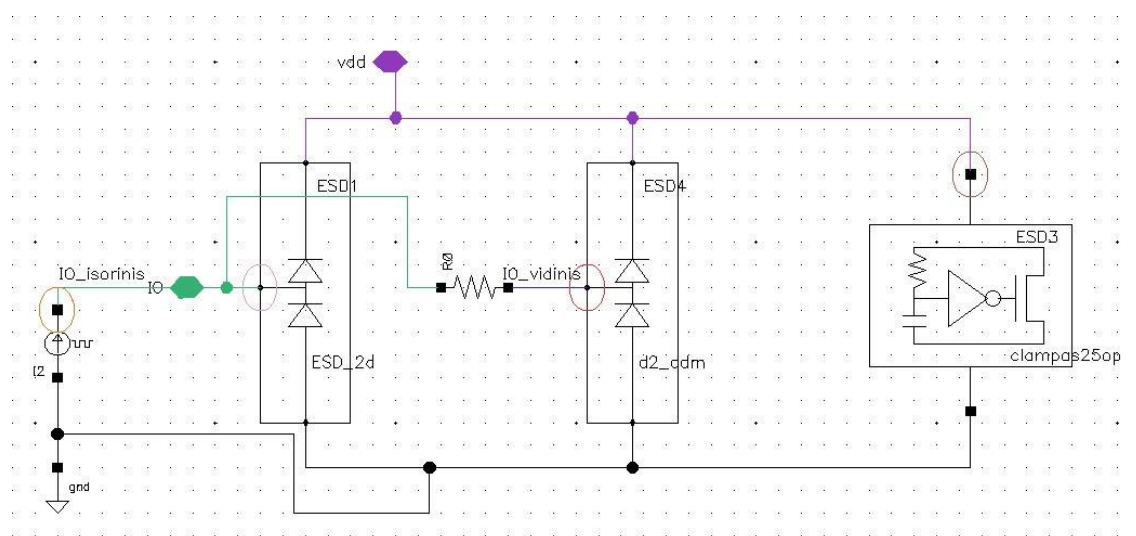
Išorinėje įėjimo/išėjimo grandinėje maksimaliai krenta 19,19 V įtampa. Tačiau ši įtampa sumažinama maitinimo grandinėje (3,22 V) ir vidinėje įėjimo / išėjimo grandinėje, esančioje už antros pakopos diodų (5,21 V).

3.2.3. Įrenginių modelio testavimas, panaudojant impulsinę perdavimo liniją

Įrenginių modeliui panaudoto impulsinio srovės šaltinio parametrai: kylančio ir krentančio frontų trukmės – 7 ns, impulso plotis – 30 ns ir impulso srovės amplitudė – 3,8 A, kadangi tiriamas 200 V įtampa įkrautas, įrenginių modelio ESD įvykis [13].

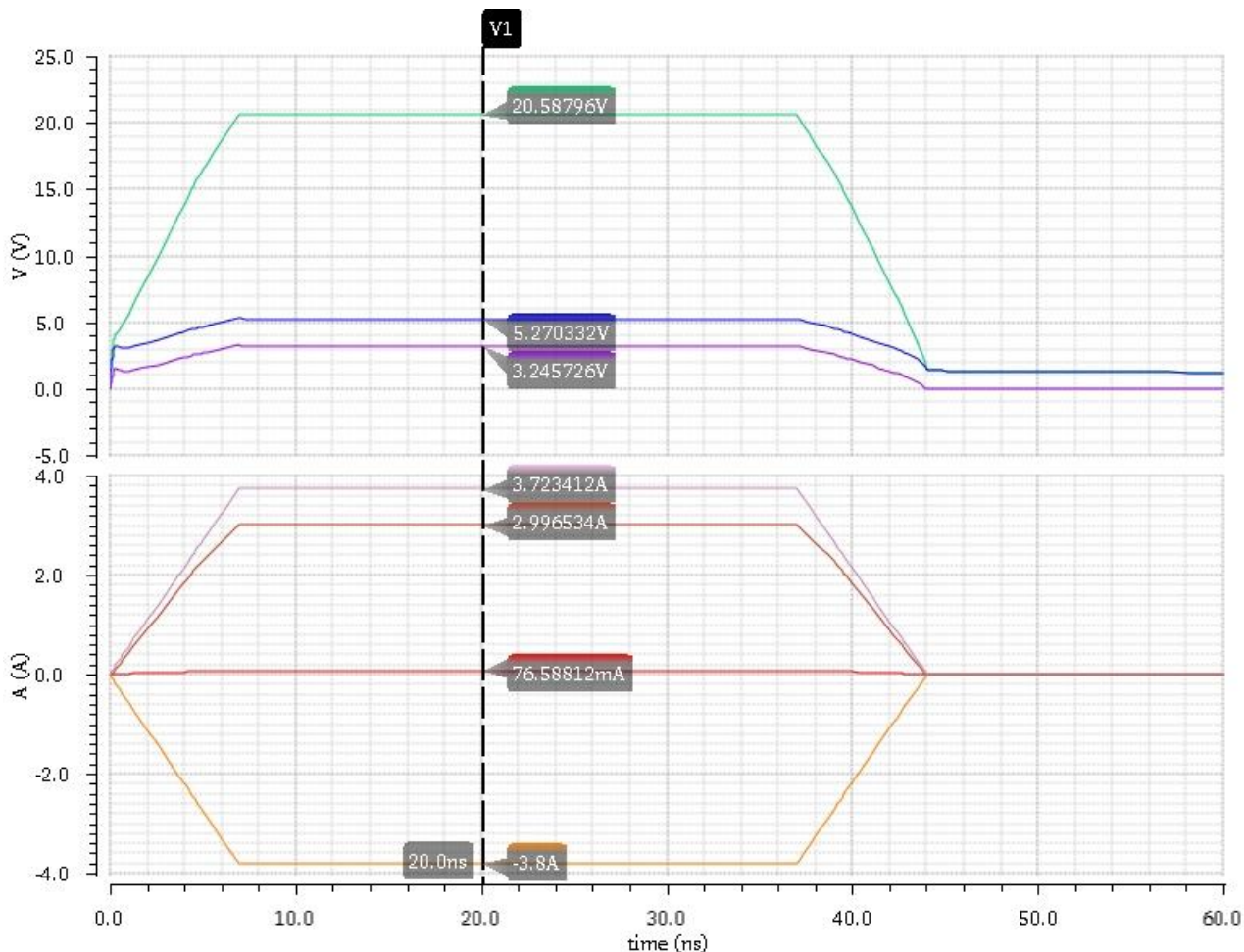
3.16 paveiksle pateikta ESD apsaugos grandinė modeliuojama impulsine perdavimo linija, panaudojant įrenginių modelį apibūdinantį srovės šaltinį. Grandinėje, skirtingomis spalvomis, pažymėti taškai, kuriuose bus matuojamos tekančios srovės. Skirtingomis spalvomis pažymėtuose sujungimuose – matuojamos įtampos.

Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos pateiktos 3.17 paveiksle. Paveiksle, kreivės pažymėtos atitinkamomis spalvomis, kaip ir taškai ar sujungimai, kuriuose jos matuojamos, modeliavimo grandinėje (3.16 paveiksle).



3.16 pav. Impulsine perdavimo linija modeliuojama ESD apsaugos grandinė, panaudojant įrenginių modelį apibūdinantį srovės šaltinį

Iš kreivių matyti (3.17 pav.), kad į grandinę patenka srovė, kurios maksimali momentinė vertė siekia 3,8 A. Kadangi modeliavimas atliekamas, kai ESD įvykis veikia tarp įėjimo / išėjimo ir žemės kontakto, srovė teka iš įėjimo / išėjimo per pirmos pakopos viršutinius diodus bei apsaugos rezistorių ir antros pakopos diodus į maitinimo grandinę, o iš šios – per maitinimo ir žemės apsaugos grandinę į žemės kontaktą.



3.17 pav. Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos

Didžioji į grandinę patekusios srovės dalis teka per pirmuosius apsaugos diodus, skirtus apsaugoti nuo žmogaus kūno modelio (3,72 A). Dėl rezistoriaus tik maža dalis srovės (77 mA) teka per antrąją apsaugos diodų pakopą. Iš maitinimo grandinės per maitinimo ir žemės apsaugą srovė (2,98 A) patenka į žemės kontaktą.

Išorinėje įėjimo / išėjimo grandinėje krenta net 20,78 V įtampa. Tačiau maitinimo grandinėje ši įtampa sumažinama iki 3,45 V, o vidinėje įėjimo / išėjimo grandinėje, esančioje už rezistoriaus įtampa sumažinama iki 5,47 V.

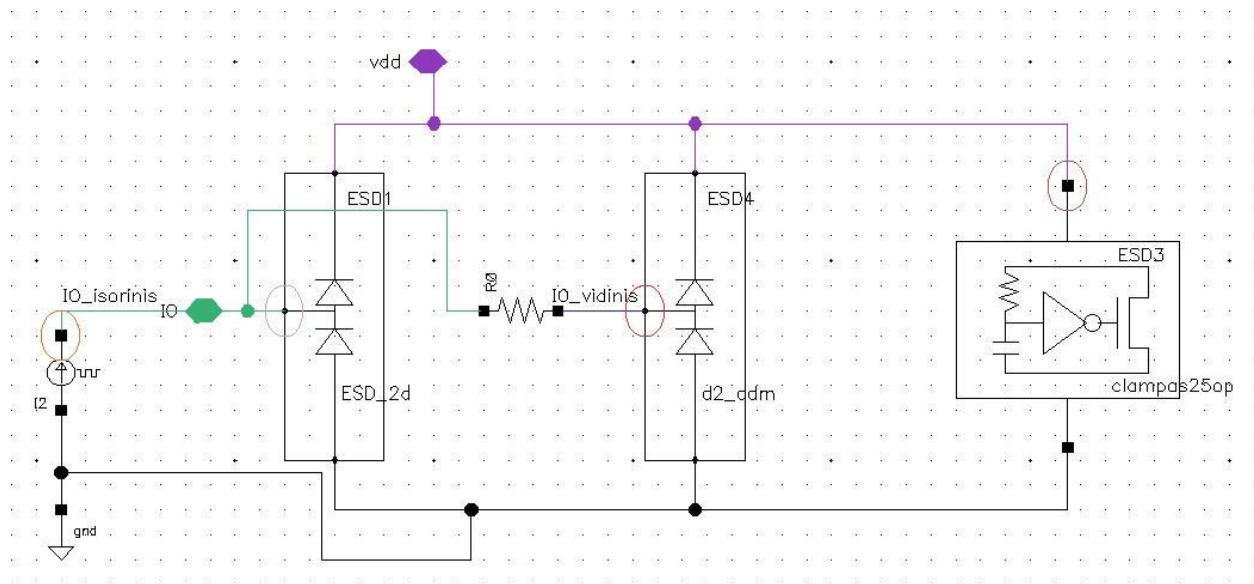
3.3. Tyrimai, atlikti naudojant įkrauto įrenginio modelį

Įkrauto įrenginio modelis skiriasi nuo žmogaus kūno modelio bei nuo įrenginių modelio tuo, kad elektrostatinė iškrova sąveikauja tik su vienu lusto kontaktu. Per šį kontaktą integrinio grandyno talpa išsikrauna į žemės potencialą. Kiekvieno integrinio grandyno vidinės talpos gali būti skirtingos, taigi labai sunku teisingai įvertinti šį modelį. Dėl šios priežasties įkrauto įrenginio modelio tyrimas atliktas naudojant impulsinę perdavimo liniją su IBM rekomenduojamomis srovės šaltinio parametrų reikšmėmis.

3.3.1. Įkrauto įrenginio modelio testavimas, panaudojant impulsinę perdavimo liniją

Įkrauto įrenginio modeliui panaudoto impulsinio srovės šaltinio parametrai: kylančio ir krentančio frontų trukmės – 250 ps, impulso plotis – 1 ns ir impulso srovės amplitudė – 10 A, kadangi tiriame 500 V įkrauto įrenginio modelio ESD įvykį [13].

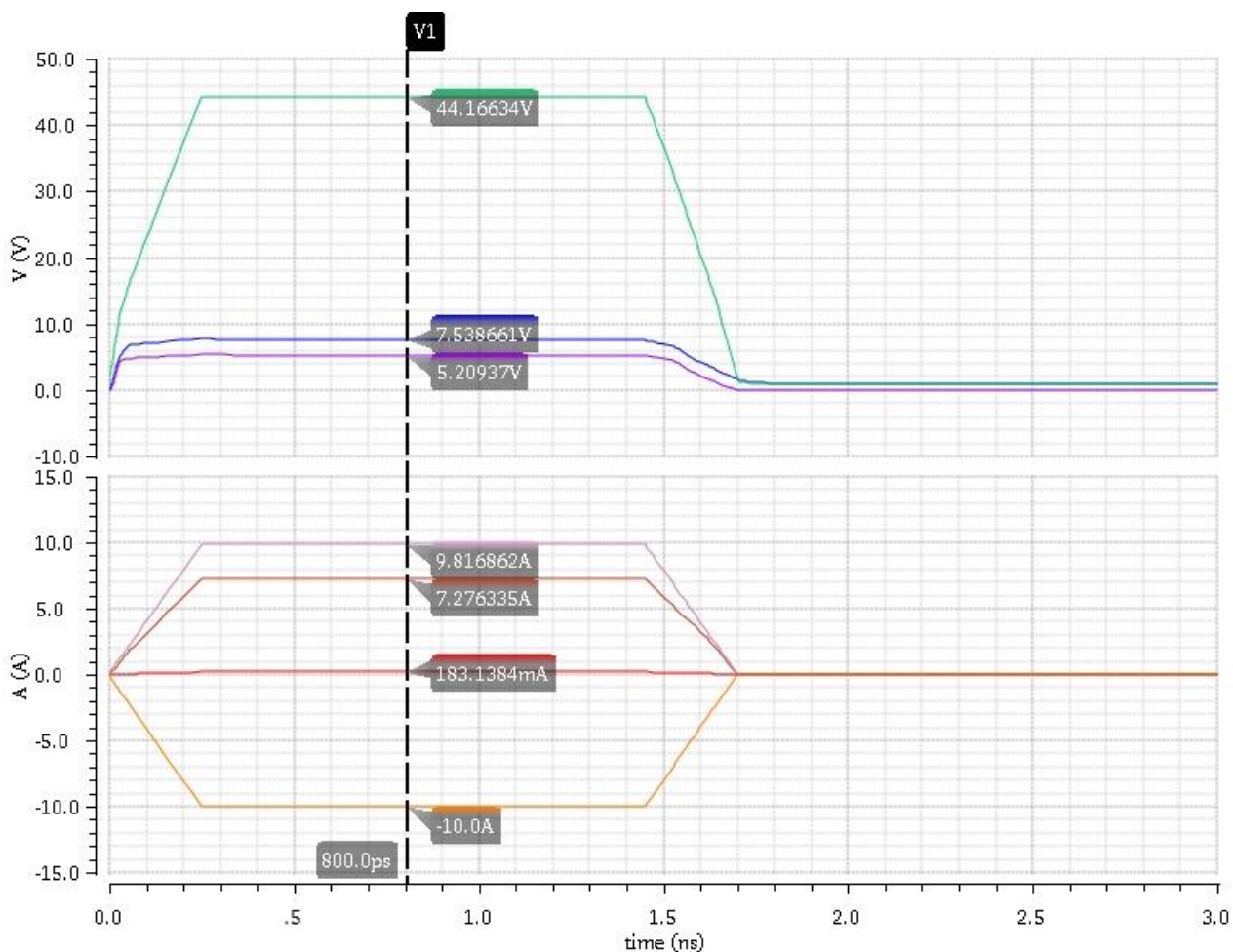
3.18 paveiksle pateikta impulsine perdavimo linija modeliuojama ESD apsaugos grandinė, panaudojant įkrauto įrenginio modelį apibūdinantį srovės šaltinį. Grandinėje skirtingomis spalvomis pažymėti taškai, kuriuose bus matuojamos tekančios srovės. Skirtingomis spalvomis pažymėtuose sujungimuose – matuojamos įtamos.



3.18 pav. Impulsine perdavimo linija modeliuojama ESD apsaugos grandinė, panaudojant įkrauto įrenginio modelį apibūdinantį srovės šaltinį

Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos pateiktos 3.19 paveiksle. Paveiksle, kreivės pažymėtos atitinkamomis spalvomis, kaip ir taškai ar sujungimai, kuriuose jos matuojamos, modeliavimo grandinėje (3.18 paveiksle).

Iš kreivių matyti, kad į grandinę patenka srovė, kurios maksimali momentinė vertė siekia 10 A. Kadangi modeliavimas atliekamas, kai ESD įvykis veikia tarp įėjimo / išėjimo ir žemės kontakto, srovė teka iš įėjimo / išėjimo per pirmos pakopos viršutinius diodus bei apsaugos rezistorių ir antros pakopos viršutinius diodus į maitinimo grandinę, o iš šios per maitinimo ir žemės apsaugos grandinę į žemės makistralę.



3.19 pav. Įtampų ir srovių pereinamosios charakteristikos

Didžioji į grandinę patekusios srovės dalis teka per pirmuosius HBM apsaugos diodus (9,82 A). Dėl rezistoriaus, tik maža dalis srovės (183 mA), teka per CDM apsaugos diodus. Iš maitinimo grandinės per maitinimo ir žemės apsaugą srovė (7,26 A) patenka į žemės kontaktą.

Išorinėje įėjimo / išėjimo grandinėje krenta 44,45 V įtampa. Tačiau ši įtampa sumažinama maitinimo grandinėje (5,41 V) ir vidinėje įėjimo / išėjimo grandinėje, esančioje už pirmos diodų apsaugos bei rezistoriaus (7,74 V).

3.4. Modeliavimų apibendrinimas

5 lentelėje pateikti modeliavimų metu gauti rezultatai. Rezultatų lentelėje pateiktos maksimalios įtampų bei srovių impulsų vertės.

5 lentelė. Modeliavimų metu gautų pereinamųjų charakteristikų maksimalios reikšmės

	Žmogaus kūno modelis	Impulsinės perdavimo linijos žmogaus kūno modelis	Įrenginių modelis	Impulsinės perdavimo linijos įrenginių modelis	Impulsinės perdavimo linijos įkrauto įrenginio modelis
Maksimali srovė išoriniame įėjime/išėjime	1,27 A	1,33 A	3,39 A	3,8 A	10 A
Maksimali srovė tekanti per HBM diodus įėjime/išėjime	1,24 A	1,30 A	3,33 A	3,72 A	9,82 A
Maksimali srovė tekanti per CDM diodus įėjime/išėjime	26 mA	29 mA	66 mA	77 mA	183 mA
Maksimali srovė tekanti per maitinimo ir žemės apsaugą įėjime/išėjime	1,04 A	1,10 A	2,73 A	3,00 A	7,28 A
Įtampa išoriniame įėjime/išėjime	9,01 V	9,33 V	18,99 V	20,59 V	44,17 V
Įtampa vidiniame įėjime/išėjime	3,46 V	3,52 V	5,01 V	5,27 V	7,54 V
Maitinimo magistralės įtampa	1,62 V	1,66 V	3,02 V	3,25 V	5,21 V

Pirmieji du modeliavimai atlikti siekiant įvertinti žmogaus kūno modelį. Nors žmogaus kūno modelio sukeltos srovės yra mažiausios (1,27 A) lyginant su kitais modeliais, jis pavojingas dėl ilgos trukmės srovės impulso. Impulsas turi mažesnę nei 10 ns kylantį signalo frontą ir 150 ± 20 ns kritimo laiką. Lyginant sudaryto žmogaus kūno modelio ir impulsinės perdavimo linijos gautus rezultatus, matyti, kad srovės bei įtampos skiriasi ne daug. Pasinaudojus impulsinę perdavimo liniją gautos srovės ir įtampos yra didesnės, nei naudojant žmogaus kūno modelį. Tačiau tiek srovių, tiek įtampų skirtumai neviršija 10 %. Taigi galima padaryti išvadą, kad norint įvertinti lusto atsparumą žmogaus kūno sukeltamai elektrostatinei iškrovai, galima naudoti paprastą impulsinę perdavimo

liniją su 1,33 A srovės šaltiniu. Jei grandinė geba atlaikyti šią iškrovą, galima teikti, kad ji atlaikys ir standartinę žmogaus kūno modelio iškrovą, kuri yra silpnesnė mažiau nei 10 %. Be to impulsinėje perdavimo linijoje naudojamas 100 ns trukmės impulsas, kurio metu į grandinę paduodama maksimali 1,33 A srovė, kai žmogaus kūno modelio grandinėje ši srovė kur kas greičiau nuslopsta.

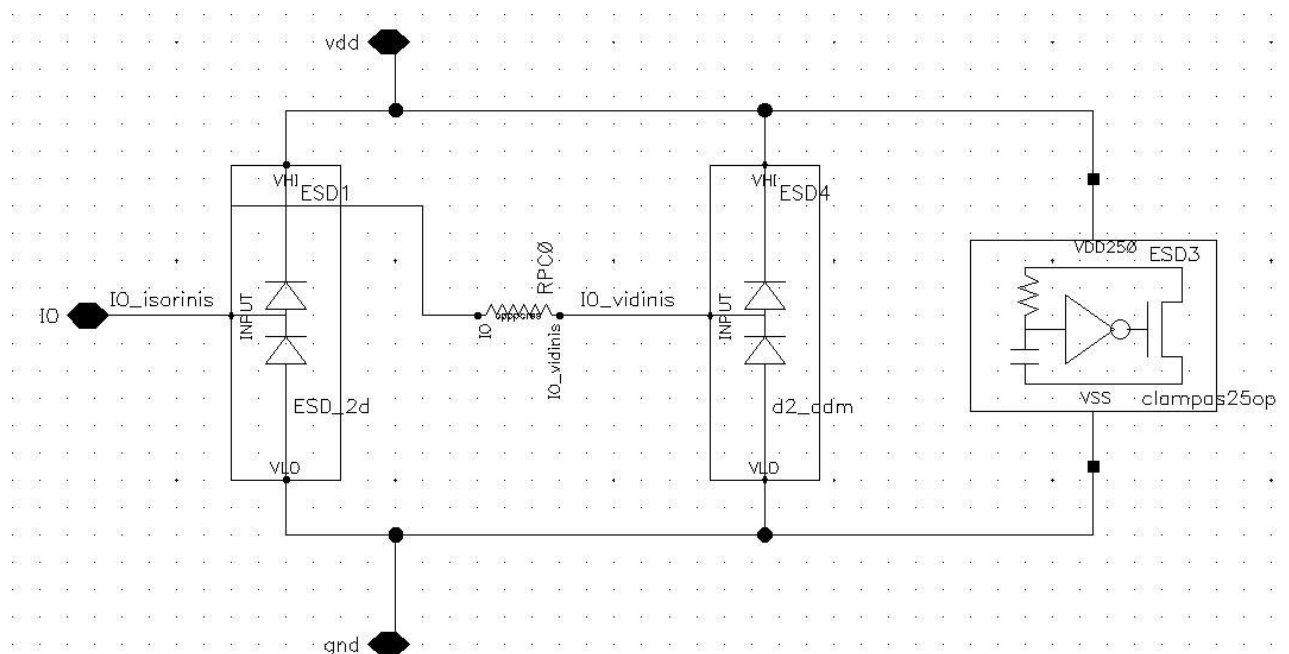
Sekantys modeliavimai atlikti panaudojant įrenginių modelį. Nors modelis įkraunamas mažesnėmis (200 V) įtampomis, dėl mažų varžų pasižymi kur kas didesnėmis srovėmis nei žmogaus kūno modelis. Maksimali srovė siekia 3,39 A. Be to signalo forma yra osciliuojanti. Šiuo atveju pasinaudojant impulsine perdavimo linija gautos srovės ir įtampos yra taip pat didesnės nei naudojant sudarytą įrenginių modelį. Tačiau tiek srovių, tiek įtampų skirtumai neviršija 15 %. Skirtumai gauti dėl to, kad šis modelis skirtinguose šaltiniuose apibrėžiamas skirtingais parametrais, todėl maksimalios srovės vertės gali skirtis ir svyruoti. Panaudojant impulsinę perdavimo liniją buvo parinkta didžiausia srovės vertė, kuri užtikrintų apsaugojimą nuo įvairių kitų konfigūracijų sudarytų įrenginio modelyje. Taigi ištestavus grandinę impulsine perdavimo linija, kurios srovės šaltinio srovė 3,8 A, o impulso plotis 30 ns, su 7 ns kilimo bei kritimo trukmėmis, galime daryti išvadą, kad grandynas atlaikys ir standartinę įrenginių modelio sukeltą iškrovą.

Įkrauto įrenginio modeliavimai atlikti naudojantis tik impulsine perdavimo linija. Čia imituojamas 500 V įtampa įkraunamos grandyno talpos. Tam panaudotas net 10 A impulsinis srovės šaltinis, kuris generuoja 1 ns pločio impulsą su 250 ps trukmės krintančiuoju bei kylančiuoju frontais. Nors modelis pasižymi labai trumpu srovės impulsu su stačiais frontais, jis pavojingas dėl itin didelių tekančių srovių, bei susidarančių įtampų.

Lyginant modelius tarpusavyje matyti, kad kiekvienas modelis yra savotiškai skirtingas, tad reikia naudoti įvairias apsaugojimo priemones norint apsaugoti nuo visų galimų modelių. Žmogaus kūno modelis pasižymi mažiausiomis srovėmis (iki 1,33 A, kai modelis įkraunamas 2000 V įtampa), tačiau ilgiausiu srovės impulsu. Pavojų grandynui lemia ne tik srovės amplitudė, tačiau ir laikas, kurį ši srovė per grandyną teka. Įrenginių modelis pavojingas dėl didelių srovių (net 3,8 A įkrovus 200 V įtampa), bei dėl to, kad srovės impulsas yra osciliuojantis (kintama srovė). Paskutinis, įkrauto įrenginio, modelis pasižymi labai trumpos trukmės iškrova (nanosekundžių eilės), tačiau srovės amplitudė gali siekti net virš dešimt amperų (gali siekti 10 A, kai grandyno talpos įkraunamos 500 V įtampa). Iš gautų rezultatų matyti, kad pats pavojingiausias yra įkrauto įrenginio modelis, kadangi jis gali pasiekti didžiausias sroves ir įtampas.

4. GRANDINĖS DAŽNINIŲ CHARAKTERISTIKŲ MODELIAVIMAS

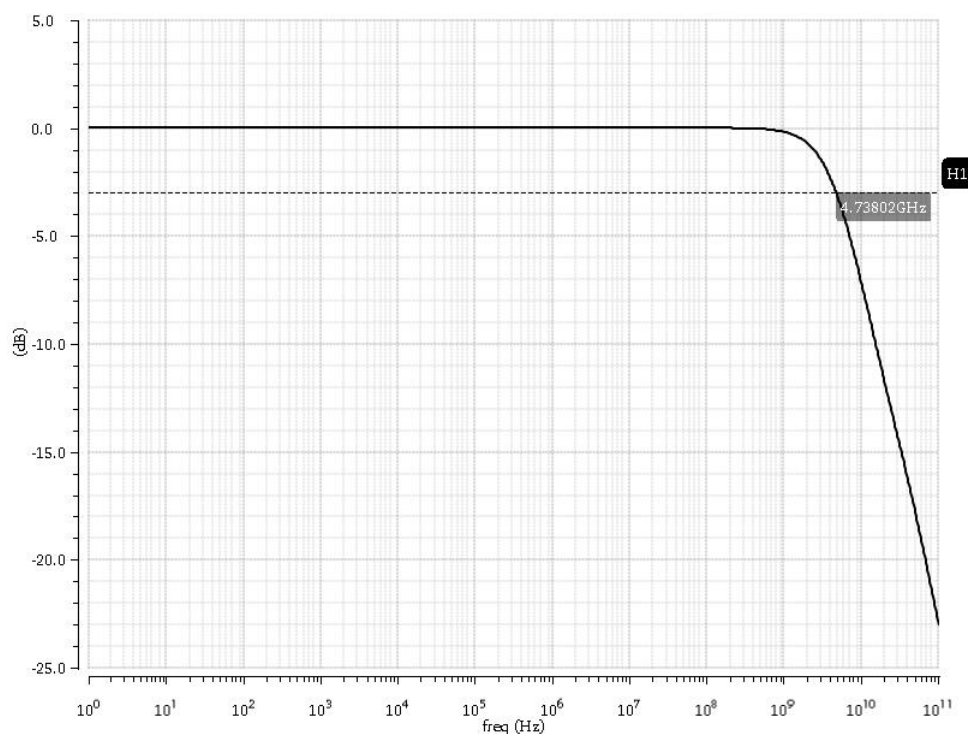
Antrame skyriuje aprašyta suprojektuota tipinė ESD apsaugos grandinė. Paprastai, tokios grandinės pasižymi siauresne nei 5 GHz praleidžiamų dažnių juosta. ESD apsaugą sudaro dideli elementai, tam kad praleistų dideles sroves. Tačiau didesni elementai, paprastai turi ir didesnes talpas. Talpos lemia grandinės praleidžiamų dažnių juostos plotį. Tad panaudojus ESD apsaugas gali sumažėti grandyno praleidžiamų dažnių juosta. 4.1 paveiksle pateikta tipinė ESD apsaugos grandinė.



4.1 pav. Suprojektuota tipinė ESD apsaugos grandinė

Šioje grandinėje praleidžiamų dažnių juostą ribojantys elementai – diodai. Diodų *pn* sandūros turi savo parazitines talpas, kurios priklauso nuo diodų dydžio. Tipinėje grandinėje panaudota po du nuosekliai sujungtus diodus tarp maitinimo ir įėjimo / išėjimo grandinių bei po vieną diodą tarp žemės ir įėjimo / išėjimo grandinių. Grandinėje panaudoti pakankamai dideli diodai, tam, kad praleisti dideles ESD sroves.

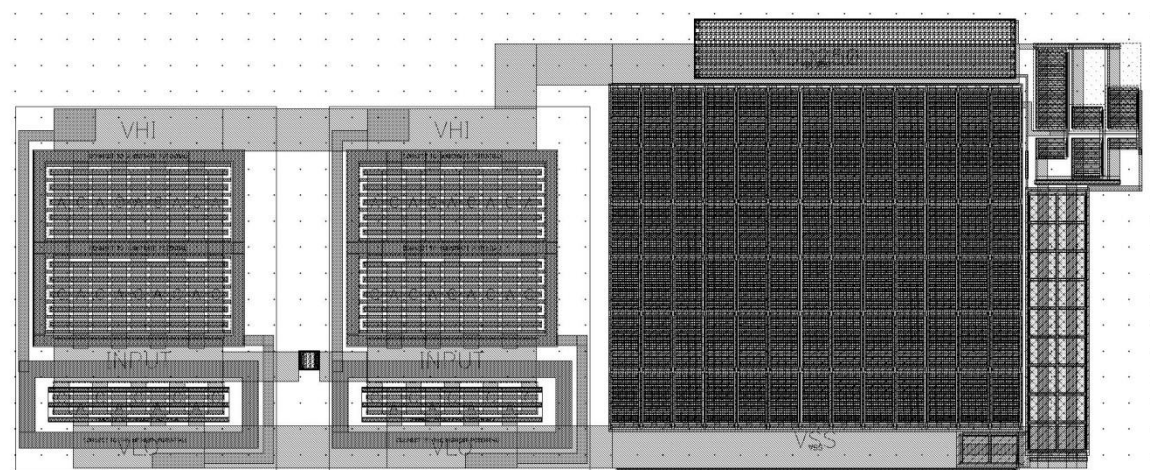
Norint sužinoti suprojektuotos tipinės ESD apsaugos praleidžiamų dažnių juostos plotį reikia sumodeliuoti apsaugos grandinės dažninę amplitudinę charakteristiką. 4.2 paveiksle pateikta sumodeliuota tipinės ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika.



4.2 pav. ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, neįvertinant parazitinių parametrų

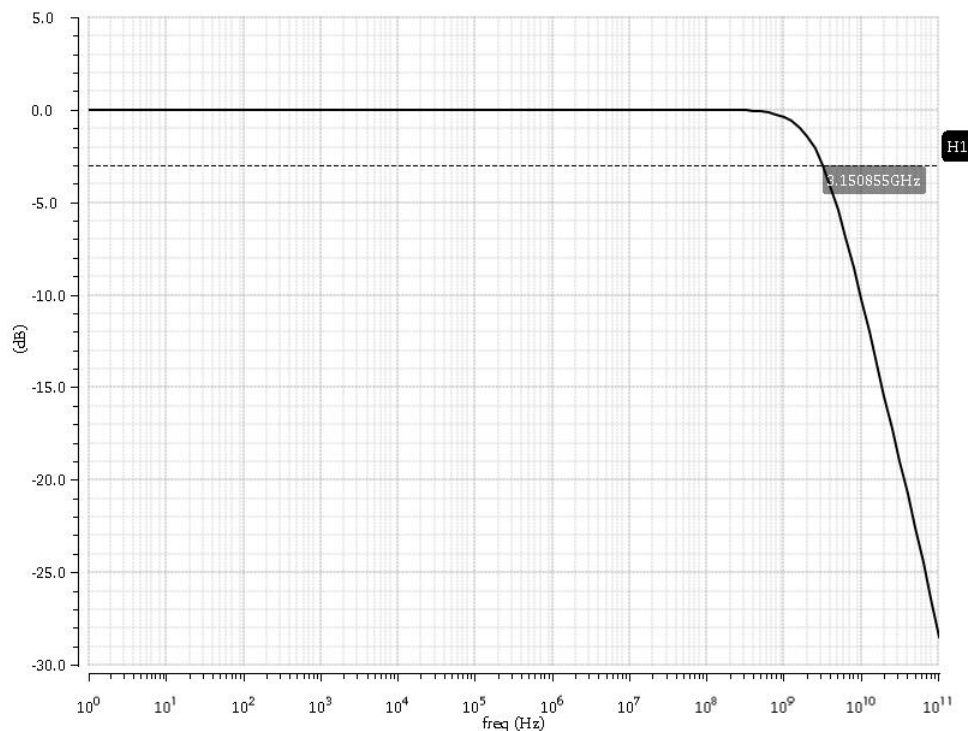
Charakteristika gauta neįvertinant parazitinių galutinės topologijos parametrų. Taip pat modeliavimo metu neįvertinta apkrova, tai yra vidinės grandinės talpa. Tokios grandinės praleidžiamų dažnių juosta 4,74 GHz.

4.2 paveiksle gauta dažninė amplitudinė charakteristika neatspindi realios grandinės praleidžiamų dažnių juostos, nes ji neįvertina topologijos parazitinių parametrų. Norint juos įvertinti reikia suprojektuoti galutinę grandinės topologiją. Tipinės ESD apsaugos grandinės topologija pateikta 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Tipinės ESD apsaugos grandinės topologija

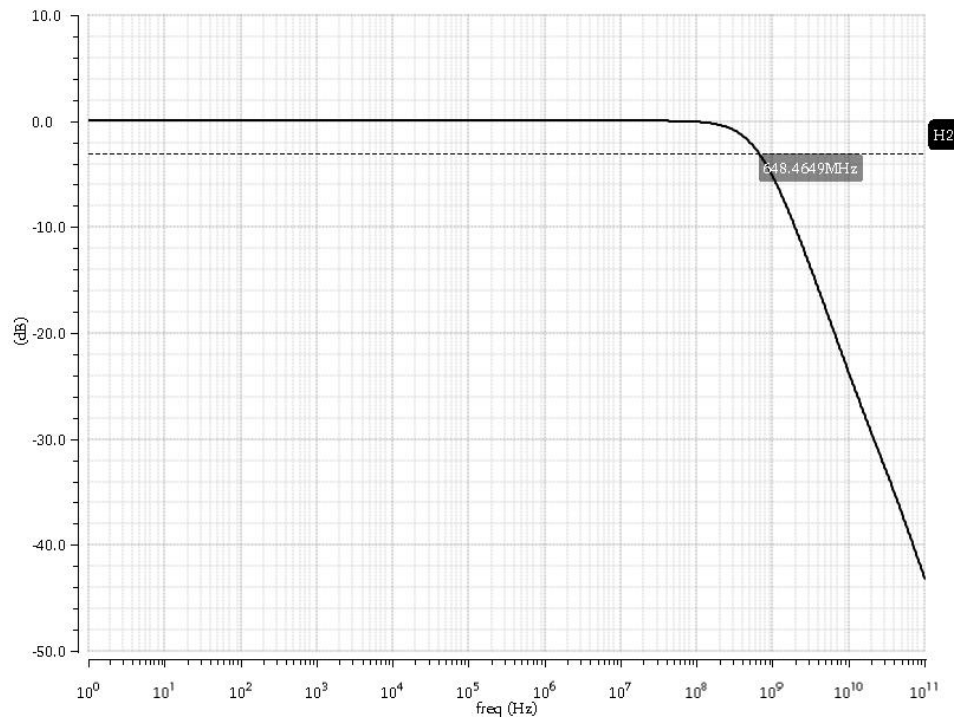
Tipinės ESD apsaugos grandinės topologija užima $18757,79 \mu\text{m}^2$ lusto ploto. Beveik pusę, net $9005,70 \mu\text{m}^2$, šio ploto užima maitinimo ir žemės apsauga, kurios didžiąją dalį sudaro srovę praleidžiantis tranzistorius. Pirmoji ir antroji diodų apsaugos užima po $3527,25 \mu\text{m}^2$. Kaip jau buvo minėta, praleidžiamų dažnių juostos plotį riboja diodų parazitinės talpos. Apatinio diodo topologija sudaryta iš 2 katodų ir 3 anodų. Kiekvieno katodo ilgis $33,04 \mu\text{m}$, o plotis 720nm . Kiekvieno iš viršutinių diodų topologija sudaryta iš 5 anodų ir 6 katodų. Vieno anodo ilgis $34,08 \mu\text{m}$ ir plotis 720nm . Suprojektavus topologiją, programiniame pakete „Cadence“, galima išekstrahuoti parazitinius jos parametrus. 4.4 paveiksle pateikta dažninė amplitudinė charakteristika įvertinant parazitinius topologijos parametrus.



4.4 pav. ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, įvertinant parazitinius parametrus

Šios grandinės praleidžiamų dažnių juosta siekia $3,15\text{GHz}$. Taigi įvertinus topologijos parazitinius parametrus praleidžiamų dažnių juosta sumažėjo 34%.

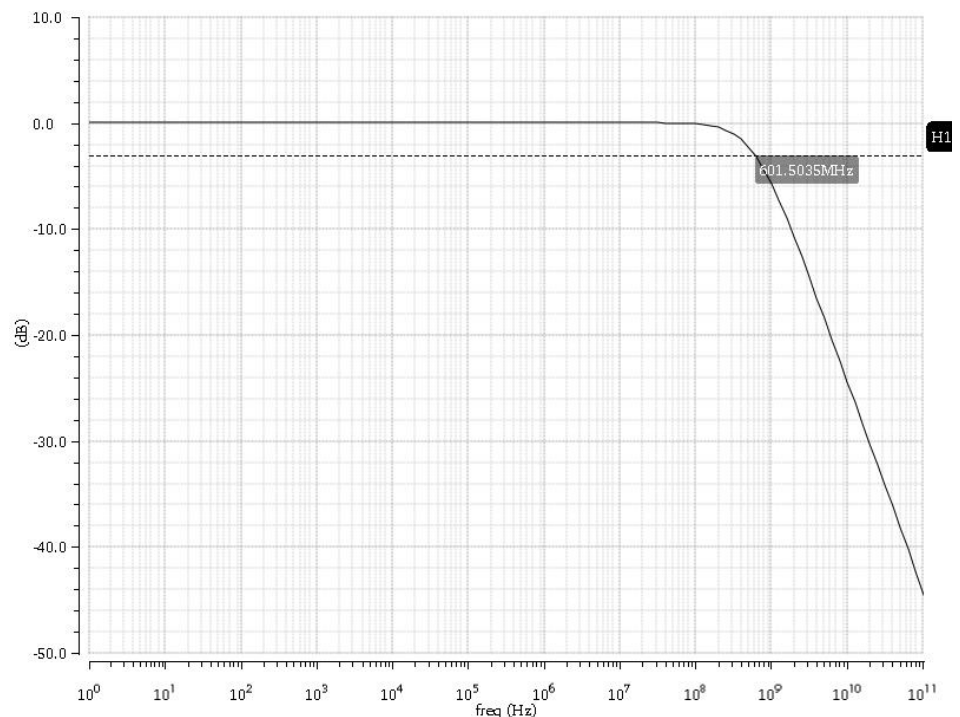
4.5 paveiksle pateikta sumodeliuota ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, kuri gauta taip pat neįvertinant parazitinių galutinės topologijos parametrų. Tačiau šiuo atveju panaudota 1pF apkrovos talpa.



4.5 pav. ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, neįvertinant parazitinių parametrų, kai apkrova 1 pF

Tokios grandinės paleidžiamų dažnių juosta siekia 648,46 MHz.

4.6 paveiksle pateikta dažninė amplitudinė charakteristika įvertinus parazitinius parametrus bei panaudojus 1 pF talpą.



4.6 pav. ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, įvertinant parazitinius parametrus, kai apkrova 1 pF

Taigi, kai vidinių grandynų apkrova yra 1 pF ir įvertinus topologijos parazitinius parametrus, praleidžiamų dažnių juosta siekia 601,50 MHz. Įvertinus topologijos parazitinius parametrus ir apkrovos talpą praleidžiamų dažnių juosta sumažėjo apie 7%.

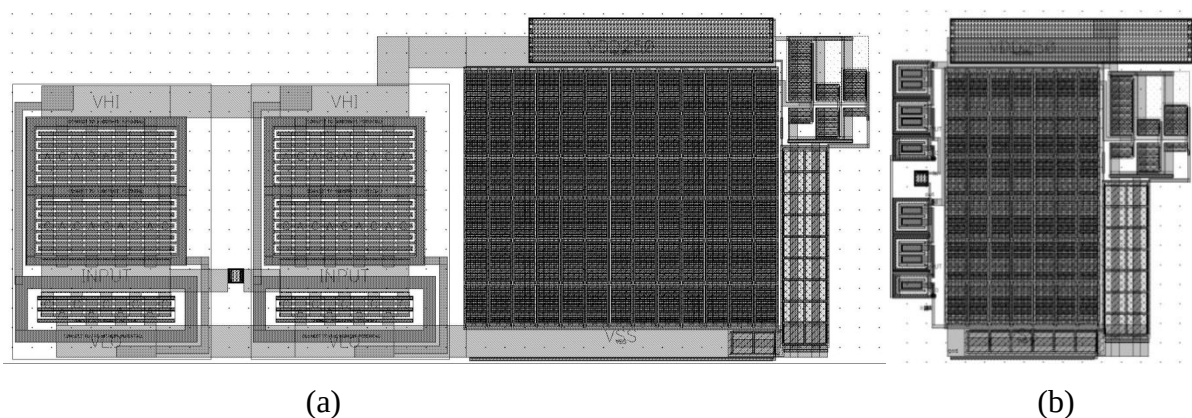
Lyginant grandinės be apkrovos (4.4 pav.) ir grandinės su 1 pF apkrova (4.6 pav.) dažnines amplitudines charakteristikas, kurios gautos įvertinus topologijų parazitinius parametrus, aiškiai matyti, kad praleidžiamų dažnių juostos plotį įtakoja apkrova. Panaudojus 1 pF talpą apkrovoje, praleidžiamų dažnių juostos plotis sumažėjo nuo 3,15 GHz iki 601,50 MHz, t.y. apie 81%.

4.1. Dažniinių charakteristikų modeliavimas, sumažinus apsaugos diodų topologijas

Kaip matyti iš gautų dažniinių amplitudinių charakteristikų ESD apsaugos grandinės gali riboti vidinių grandynų praleidžiamų dažnių juostos plotį. Vienas iš būdų padidinti praleidžiamų dažnių juostos plotį, nekeičiant schemotechnikos, yra mažinant elementų talpas. Elementų talpos priklauso nuo topologijų dydžio. Taigi vienas iš būdų praplėsti praleidžiamų dažnių juostą, mažinti elementų matmenis.

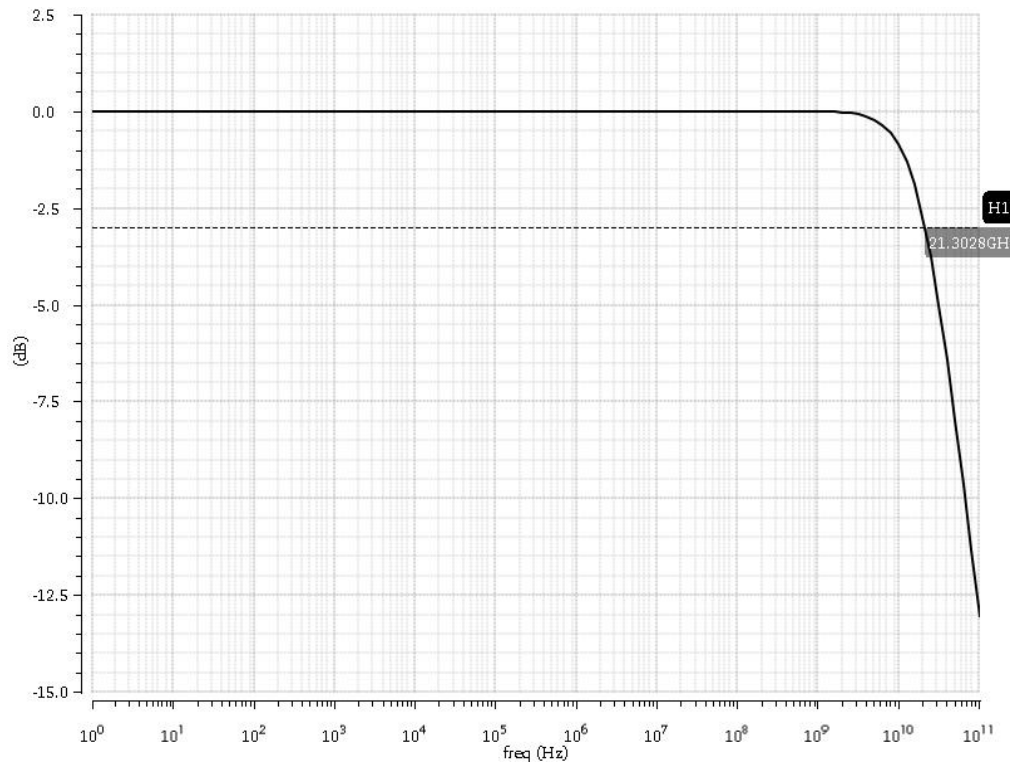
4.7 a) paveiksle pateikta sudarytos pradinės apsaugos nuo elektrostatinės iškrovos topologija. Topologija užima $18757,79 \mu\text{m}^2$ lusto ploto, iš kurių $9005,70 \mu\text{m}^2$ užima maitinimo ir žemės apsauga, $3527,25 \mu\text{m}^2$ užima pirmoji diodų apsauga.

4.7 b) paveiksle pateikta sumažinta apsaugos topologija. Topologijos užimamas plotas sumažintas iki $6806,97 \mu\text{m}^2$. Sumažinta maitinimo ir žemės apsauga iki $5588,36 \mu\text{m}^2$, kurioje du kartus sumažintas tik pagrindinio tranzistoriaus plotas. Ši apsaugos dalis didelės įtakos dažninei amplitudinei charakteristikai neturi, kadangi normaliomis grandinės sąlygomis būna užverta. Didžiausią poveikį dažninei amplitudinei charakteristikai daro apsaugos diodų talpos, kurios prijungiamos prie įėjimo / išėjimo. Todėl sumažintoje topologijoje diodų apsaugos sumažintos iki minimalių matmenų, kuriuos leidžia IBM $0,18 \mu\text{m}$ technologija. Čia pirmosios diodų apsaugos plotas yra $284,53 \mu\text{m}^2$, tai yra 12,4 karto mažesnis už pradinės apsaugos diodų užimamą plotą luste.



4.7 pav. ESD apsaugų topologijos: a) pradinė topologija; b) sumažinta topologija

4.8 paveiksle pateikta sumažintos ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, įvertinus parazitinius topologijos parametrus.



4.8 pav. Sumažintos ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika, įvertinant parazitinius parametrus

Tokios grandinės praleidžiamų dažnių juosta siekia 21,30 GHz, kai pradinės apsaugos grandinės juosta siekė 3,15 GHz. Taigi sumažinus diodų dydį 12,4 karto praleidžiamų dažnių juostos plotis padidėjo 6,8 karto. Tokia diodų apsauga turi plačią praleidžiamų dažnių juostą, tačiau dėl mažų elementų negali atlaikyti didelių srovių. Kiekvieno iš viršutinių diodų emiterių plotas siekia $16 \mu\text{m}^2$, perimetras $26,4 \mu\text{m}$. Diodo srovės kurias gali atlaikyti priklauso ir nuo to kokios laiko trukmės srovės impulsas tekės. Naudojant impulsinės perdavimo linijos imituojamą žmogaus kūno modelį, srovės impulso trukmė yra 100 ns. Taigi sumažinti diodai gali atlaikyti ne didesnę kaip 528 mA srovę. Kai žmogaus kūno modelis įkraunamas 2000 V įtampa per jį teka apie 1,33 A, todėl tokia apsauga neapsaugotų grandinės ir neatlaikytų reikiamos srovės [1].

Norint apsisaugoti nuo skirtingų elektrostatinų iškrovų šaltinių, t.y. nuo skirtingų modelių, kurie gali turėti tiek skirtingas sroves, tiek skirtingus impulso pločius reikėtų parinkti optimalaus dydžio apsaugas.

4.2. Optimalaus dydžio apsaugų projektavimas

Norint sudaryti optimalias apsaugas, reikia žinoti technologinius parametrus, apibrėžiančius maksimalias sroves, galinčias tekėti tam tikrą laiką. 6 lentelėje pateiktos pramušimo srovės naudojant skirtingos trukmės impulsus.

6 lentelė. Diodų parametrai, IBM 0,18 μm technologijoje [1]

Diodai	P+ n kišenės	N+ p kišenės	2 nuosekliai sujungti diodai P+ n kišenės	3 nuosekliai sujungti diodai P+ n kišenės
Atidarymo įtampa (V)	1,0	1,0	2,0	3,0
Varža (Ω)	90	90	130	150
100 ns TLP pramušimo srovė (mA / μm)	20	20	20	20
30 ns TLP pramušimo srovė (mA / μm)	22	22	22	22
1 ns TLP pramušimo srovė (mA / μm)	50	50	70	90

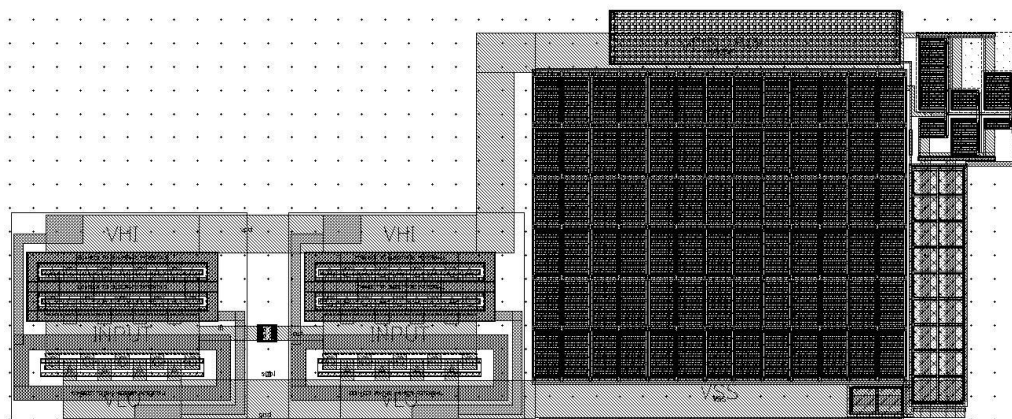
Iš lentelės matyti, kad viršutiniai ir apatiniai diodai gali atlaikyti tokias pat sroves. Diodą pramušti gali skirtingo dydžio maksimalios srovės, priklausomai nuo srovės impulso pločio ir diodo pn sandūros perimetro. Impulsinės perdavimo linijos modelio, su 100 ns trukmės impulsu, diodo pramušimo srovė yra 20 mA / μm . Impulsinės perdavimo linijos modelio, su 30 ns trukmės impulsu, diodo pramušimo srovė yra 22 mA / μm . Impulsinės perdavimo linijos modelio, su 1 ns trukmės impulsu, diodo pramušimo srovė yra 50 mA / μm . Atlikus pereinamųjų charakteristikų modeliavimus buvo nustatyta, impulsinės perdavimo linijos modeliu su 100 ns, 30 ns ir 1 ns impulsais galima apibrėžti atitinkamus žmogaus kūno, įrenginių ir įkrauto įrenginio modelius. Taigi remiantis šiomis IBM deklaruojamomis diodų pramušimo srovėmis, galima suprojektuoti optimalias apsaugas skirtingiems ESD modeliams.

4.2.1. Optimali apsauga, apsauganti nuo žmogaus kūno modelio, įkraunamo 2000 V įtampa

Pasinaudojus 6 lentelėje pateiktomis vertėmis, galima sudaryti optimalias apsaugas kiekvienam modeliui. Buvo nustatyta, kad žmogaus kūno modeliui testuoti galima naudoti

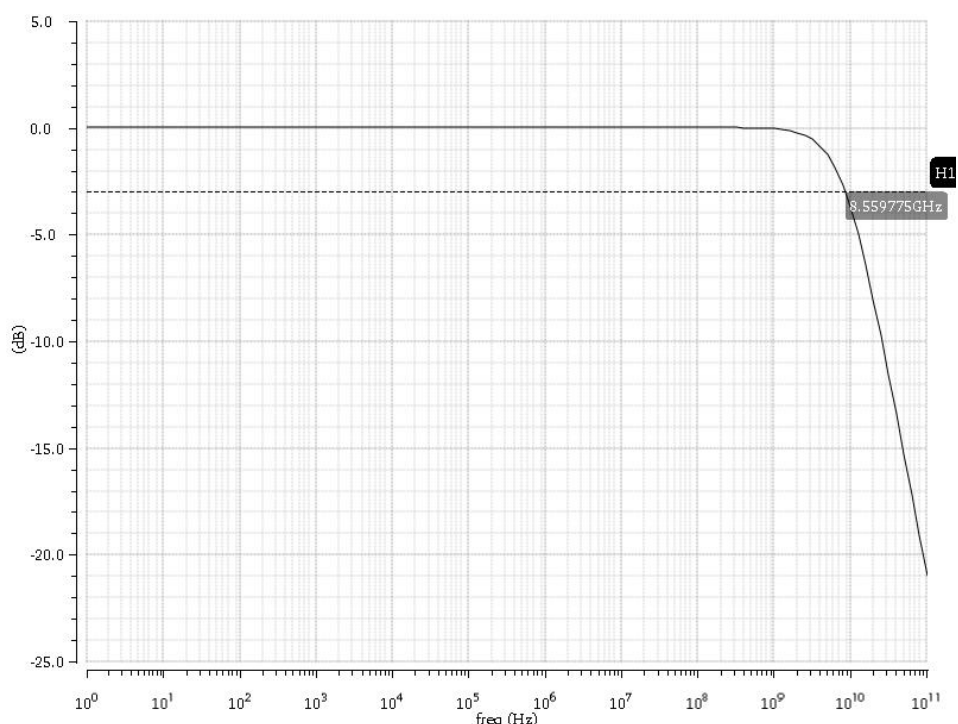
impulsinę perdavimo liniją su 1,33 A srovės šaltiniu, kuris generuoja 100 ns trukmės impulsą. Diodai naudojamoje technologijoje gali atlaikyti ne daugiau kaip 20 mA / μm , kai testuojamas 100 ns trukmės impulsas. Taigi sudaromų diodų perimetras turi būti didesnis nei 66,5 μm .

Sudaryti diodai, kurių perimetras yra 70 μm . Diodai neatlaikys didesnės kaip 1,4 A srovės. Tačiau atlaikys srovę, kuri gali susidaryti įkrovus žmogaus kūno modelį 2000 V įtampa. Tokia diodų apsauga užima mažiau lusto ploto, t. y. 2224,5 μm^2 . Sudaryta diodų apsaugos topologija pateikta 4.9 paveiksle.



4.9 pav. Apsaugos topologija, apsauganti nuo žmogaus kūno modelio sukeltos iškrovos

4.10 paveiksle pateikta suprojektuotos topologijos dažninė amplitudinė charakteristika, įvertinus parazitinius topologijos parametrus.



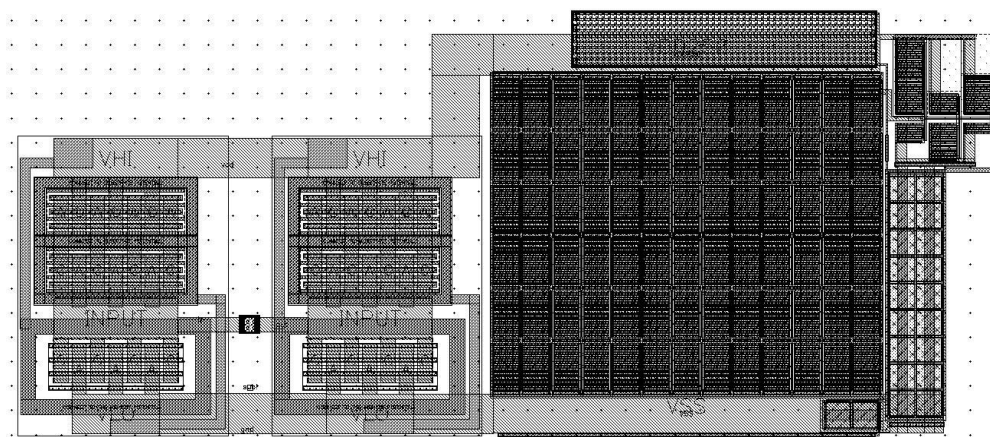
4.10 pav. Optimalios ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika

Sumažinus diodų matmenis, sumažėjo ir parazitinės talpos. Todėl padidėjo praleidžiamų dažnių juostos plotis iki 8,56 GHz. Taigi tokia grandinė gali atlaikyti mažesnę nei 1,40 A srovės 100 ns trukmės impulsą, iki 1,54 A srovės 30 ns trukmės impulsą ir iki 3,5 A srovės 1 ns trukmės impulsą. Matyti, kad suprojektuota apsauga gebėtų apsaugoti grandynus tik nuo žmogaus kūno modelio, kuris įkautas 2000 V įtampa.

4.2.2. Optimali apsauga, apsauganti nuo įrenginių modelio, įkraunamo 200 V įtampa

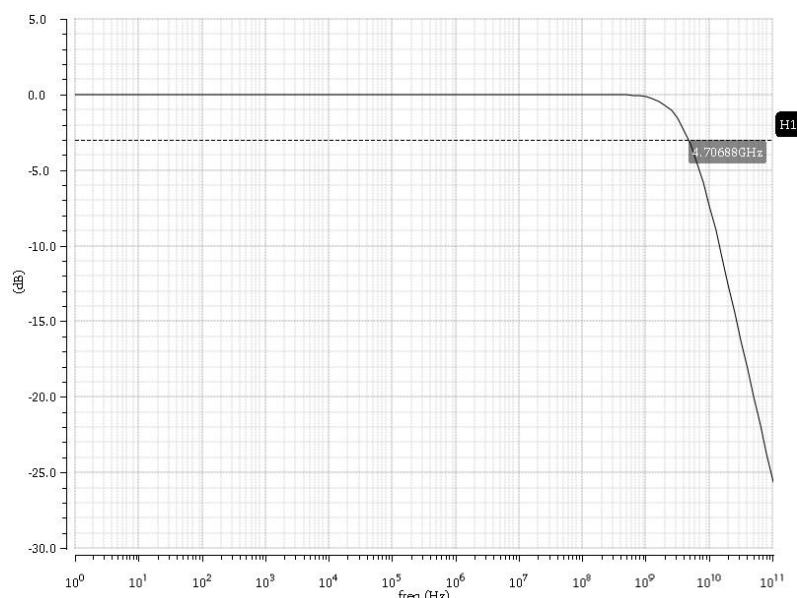
Įrenginių modelį testuoti galima naudojant impulsinę perdavimo liniją su 2,8 – 3,8 A srovės šaltiniu, kuris generuoja 30 ns trukmės impulsą. Diodai naudojamoje technologijoje gali atlaikyti ne daugiau kaip 22 mA / μm , kai testuojamas 30 ns trukmės impulsas. Ištestavus sudarytą įrenginių modelį nustatėme, kad maksimali srovė įėjime siekė 3,39 A. Todėl galime daryti išvadą, kad nuo šio modelio apsaugotume, jei diodai gebėtų atlaikyti 3,5 A srovę 30 ns. Taigi sudaromų diodų perimetras turi būti didesnis nei 159 μm .

Sudaryti diodai, kurių perimetras yra 167 μm . Diodai gali atlaikyti ne didesnes kaip 3,67 A įrenginių modelio sukeltas sroves, kurių srovės impulso plotis trunka 30 ns. Tokia diodų apsauga užima 2635,1 μm^2 lusto ploto. Sudaryta diodų apsaugos topologija pateikta 4.11 paveiksle.



4.11 pav. Apsaugos topologija, apsauganti nuo įrenginių modelio sukeltos iškrovos

4.12 paveiksle pateikta suprojektuotos topologijos dažninė amplitudinė charakteristika, įvertinus parazitinius topologijos parametrus. Šiuo atveju diodų matmenys sumažinti mažiau, todėl mažiau sumažėjo ir parazitinės talpos. Tačiau tokia topologija užtikrina, kad grandinė atlaikys didesnes sroves.



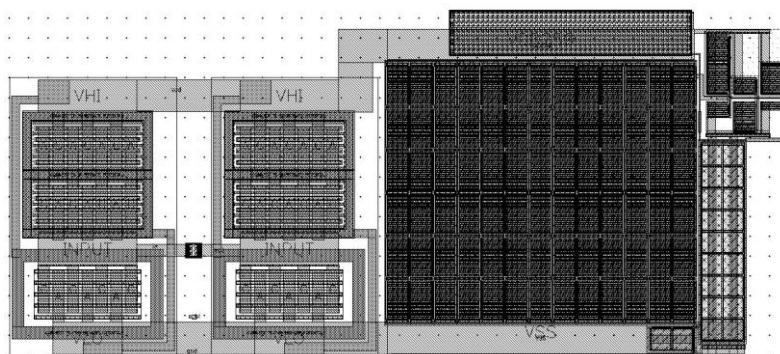
4.12 pav. Optimalios ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika

Praleidžiamų dažnių juostos plotis siekia 4,71 GHz. Grandinė gali atlaikyti iki 3,34 A 100 ns trukmės srovės impulsą, iki 3,67 A 30 ns trukmės srovės impulsą ir iki 8,35 A 1 ns trukmės srovės impulsą. Suprojektuota apsauga geba apsaugoti nuo žmogaus kūno modelio, kuris įkautas 2000 V įtampa, bei nuo įrenginių modelio, kuris įkrautas 200 V ir srovė neviršija 3,67 A.

4.2.3. Optimali apsauga, apsauganti nuo įkrauto įrenginio modelio, įkraunamo 500 V įtampa

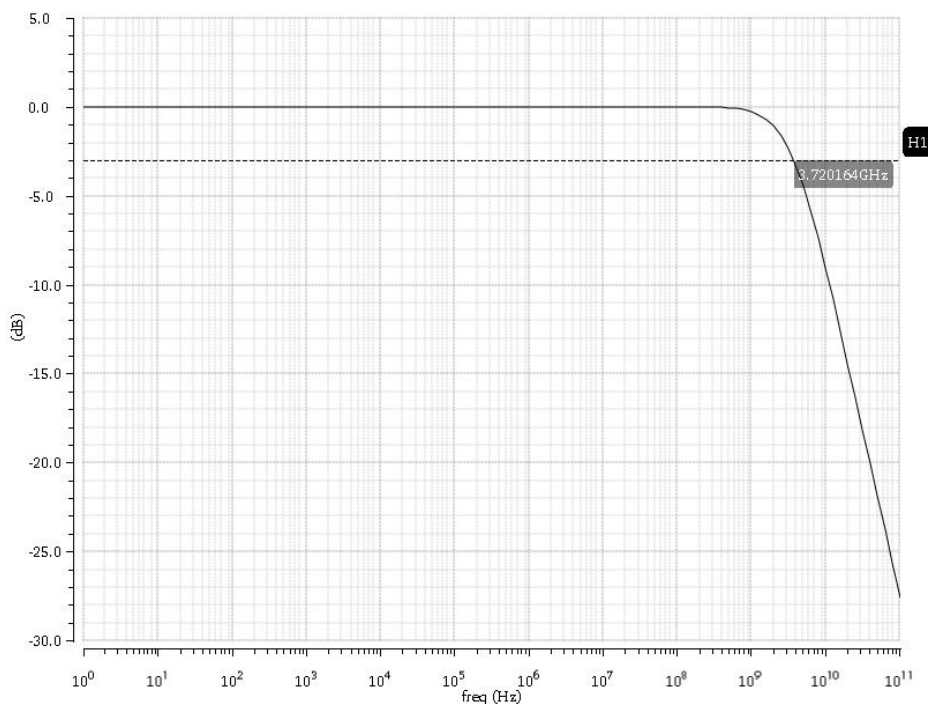
Įkrauto įrenginio modeliui testuoti galima naudoti impulsinę perdavimo liniją su 10 A srovės šaltiniu, kuris generuoja 1 ns trukmės impulsą. Diodai naudojamoje technologijoje gali atlaikyti ne daugiau kaip 50 mA / μm , kai testuojamas 1 ns trukmės impulsas. Taigi sudaromų diodų perimetras turi būti didesnis nei 200 μm .

Sudaryti diodai, kurių perimetras yra 217 μm . Diodai gali atlaikyti ne didesnes kaip 10,85 A įkrauto įrenginio modelio sukeltas sroves, kurių impulso plotis ne ilgesnis kaip 1 ns. Tokia diodų apsauga užima 3005,1 μm^2 lusto ploto. Sudaryta diodų apsaugos topologija pateikta 4.13 paveiksle.



4.13 pav. Apsaugos topologija, apsauganti nuo įkrauto įrenginio modelio sukeltos iškvovos

4.14 paveiksle pateikta suprojektuotos topologijos dažninė amplitudinė charakteristika, įvertinus parazitinius topologijos parametrus. Šiuo atveju diodų matmenys didžiausi, todėl didžiausios ir parazitinės talpos. Tačiau tokia topologija užtikrina, kad grandinė atlaikys didžiausias sroves.



4.14 pav. Optimalios ESD apsaugos dažninė amplitudinė charakteristika

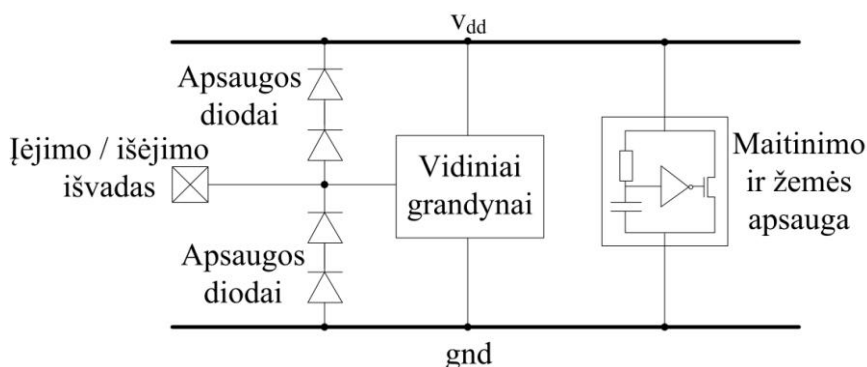
Grandinės praleidžiamų dažnių juostos plotis siekia 3,72 GHz. Grandinė gali atlaikyti iki 4,34 A 100 ns trukmės srovės impulsą, iki 4,77 A 30 ns trukmės srovės impulsą ir iki 10,85 A 1 ns trukmės srovės impulsą. Suprojektuota apsauga geba apsaugoti nuo žmogaus kūno modelio, kuris įkrautas 2000 V įtampa, nuo įrenginių modelio, kuris įkrautas 200 V, bei nuo įkrauto įrenginio modelio, kuris įkrautas 500 V įtampa ir srovė neviršija 10,8 A.

5. AUKŠTADAŽNĖS ESD APSAUGOS GRANDINĖS

Projektuojant aukštadažnius integrinius grandynus gali būti naudojamos ir kitokios ESD apsaugos grandinės: apsaugos grandinė su nuosekliai prijungtais papildomais diodais, apsauga pagrįsta lygiagrečiu arba nuosekliu LC kontūru, apsaugos grandinė naudojanti impedansų suderinamumą, indutyvinė ESD apsauga, paskirstyta ESD apsauga ir kitos. Apsaugos tipo pasirinkimą lemia projektuojamo integrinio grandyno darbiniai dažniai. Jei grandynas dirba dažniuose iki 5 GHz galima rinktis tipinę ESD apsaugos grandinę, kuri pasižymi paprastumu, pakankamai geru atsparumu elektrostatinėms iškrovoms ir užima ne daug lusto ploto. Tačiau jei grandynas turi dirbti didesniuose nei 5 GHz dažniuose, vertėtų rinktis sudėtingesnę apsaugą, kuri užtikrina didesnius dažnius, tačiau paprastai užima didesnę dalį lusto ploto. Jei projektuojamo grandyno išėjimas / įėjimas turi dirbti tik tam tikrame viename dažnyje, galima panaudoti apsaugą su siaura praleidžiamų dažnių juosta.

5.1. Apsaugos grandinė su nuosekliai prijungtais papildomais diodais

Mažinant ESD diodų dydį mažėja ne tik talpa, bet ir atsparumas iškrovoms. Norint sumažinti diodų talpas nesumažinant atsparumo elektrostatinei iškrovai, galima jungti kelis diodus nuosekliai. Panaudojus du nuosekliai sujungtus vienodus diodus, jų bendra parazitinė talpa teoriškai tampa dvigubai mažesnė, dėl to, kad parazitinės talpos tarpusavyje sujungtos nuosekliai. Tokios grandinės blokinė schema pateikta 5.1 paveiksle. Kuo daugiau diodų sudedama nuosekliai, tuo labiau mažinamos parazitinės talpos. Be to naudojant šį metodą ne tik sumažinamos parazitinės talpos, bet ir sumažėja ESD apsaugos nuotėkio srovės grandinei veikiant normaliomis darbo sąlygomis.



5.1 pav. Apsaugos grandinės blokinė schema su nuosekliai prijungtais papildomais diodais[9]

Nors sudėtiniai ESD apsaugos diodai gali sumažinti parazitines talpas ir nuotėkio sroves, šis metodas nėra pats tinkamiausias ESD apsaugai, nes kartu didėja bendra atidarytų diodų varža ir ant

šios varžos susidaranti įtampa. Be to, diodų skaičių riboja leistinos įtampos vertė įėjime / išėjime, nes pridedant papildomus diodus, jų bendra atidarymo įtampa sumuojasi ir didėja [9, 15].

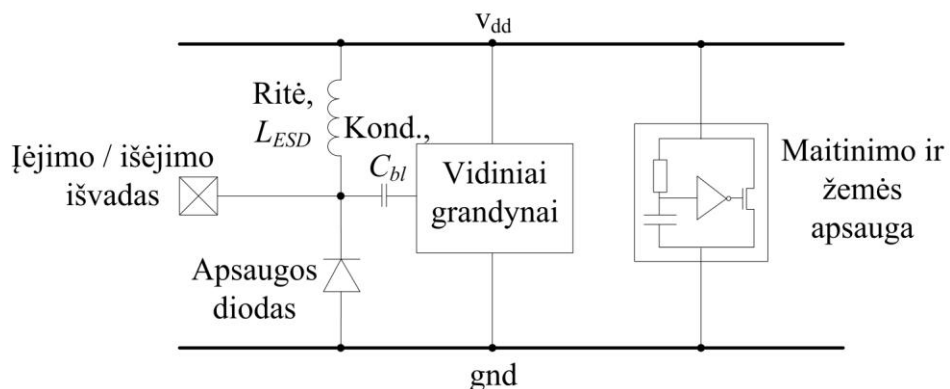
5.2. Rezonansiniu LC kontūru pagrįstos apsaugos

Diodų mažinimas ir nuoseklus jų jungimas yra apriboti iškrovų dydžiu, krentančiomis įtampomis. Tad kai įprastos apsaugos praleidžiamų dažnių juostos plotis netenkina, vertėtų ieškoti kitų sprendimų. Aukštadažnėms ESD apsaugoms įgyvendinti dažnai naudojamos induktyvinės ritės. Panaudojant ritę galima kompensuoti atsirandančias parazitines talpas. Pagrindinis ričių trūkumas yra tas, kad jos užima daug ploto luste. Panaudojant ritę ir kondensatorių galima sudaryti rezonansinį LC kontūrą. Pasinaudojus LC kontūro savybėmis galima sudaryti ESD apsaugą. Praktikoje apsaugų įgyvendinimui naudojamas tiek lygiagretus, tiek nuoseklus rezonansiniai kontūrai. Lygiagrečiame LC kontūre rezonansinis dažnis (ω_0) yra lygus:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_{ESD}}} \quad (1)$$

čia L papildomas induktyvumas, o C_{ESD} apsaugos diodų talpos.

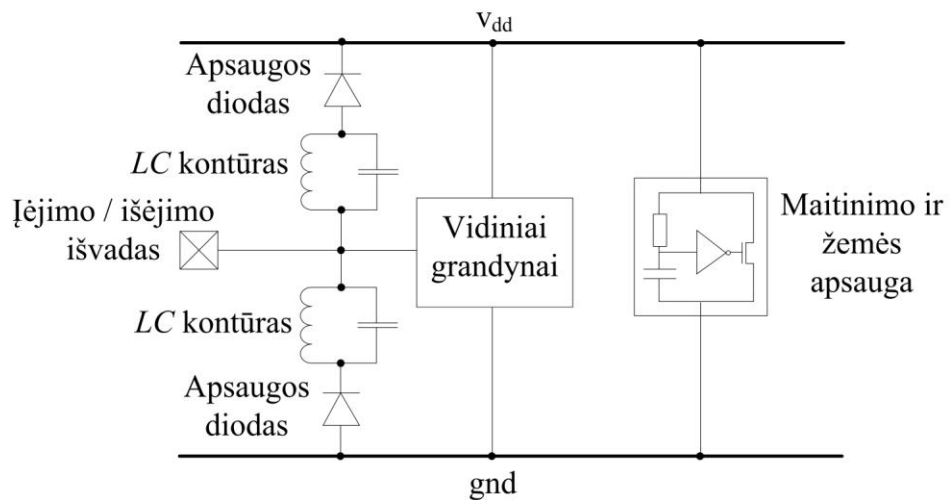
Idealiu atveju LC kontūro signalo nuostoliai esant rezonansiniam dažniui lygūs nuliui. Taigi ekvivalentinė talpa rezonanso metu taip pat lygi nuliui. Kai lygiagrečiame LC kontūre pasiekiamas rezonansinis dažnis, kontūro impedansas tampa labai dideliu ir jis gali efektyviai mažinti signalo nuostolius. ESD apsauga pagrįsta lygiagrečiu LC kontūru tinka aukštadažnėms grandinėms, kurioms reikalinga siaura praleidžiamų dažnių juosta. Remiantis apsaugos diodo parazitinės talpos dydžiu ir projektuojamo grandyno darbinio dažniu, ritę projektuojama taip, kad prie darbinio dažnių būtų pasiektas rezonansinis dažnis [9]. ESD apsauga su lygiagrečiu LC kontūru pateikta 5.2 paveiksle.



5.2 pav. Apsaugos grandinės blokinė schema su lygiagrečiu LC kontūru [9]

Ritė, turinti induktyvumą (L_{ESD}), tarnauja kaip ESD apsaugos įrenginys tarp įėjimo / išėjimo išvadų ir maitinimo, tuo tarpu apsaugos diodas, turintis parazitinę talpą (C_{ESD}), numato srovės kelią tarp žemės ir įėjimo / išėjimo išvadų. Skirtingais atvejais ritė ir diodas gali būti sukeičiami vietomis. Kadangi induktyvumas sudaro trumpą nuolatinės srovės jungimą, reikalingas nuolatinę dedamąją blokuojantis kondensatorius (C_{bl}).

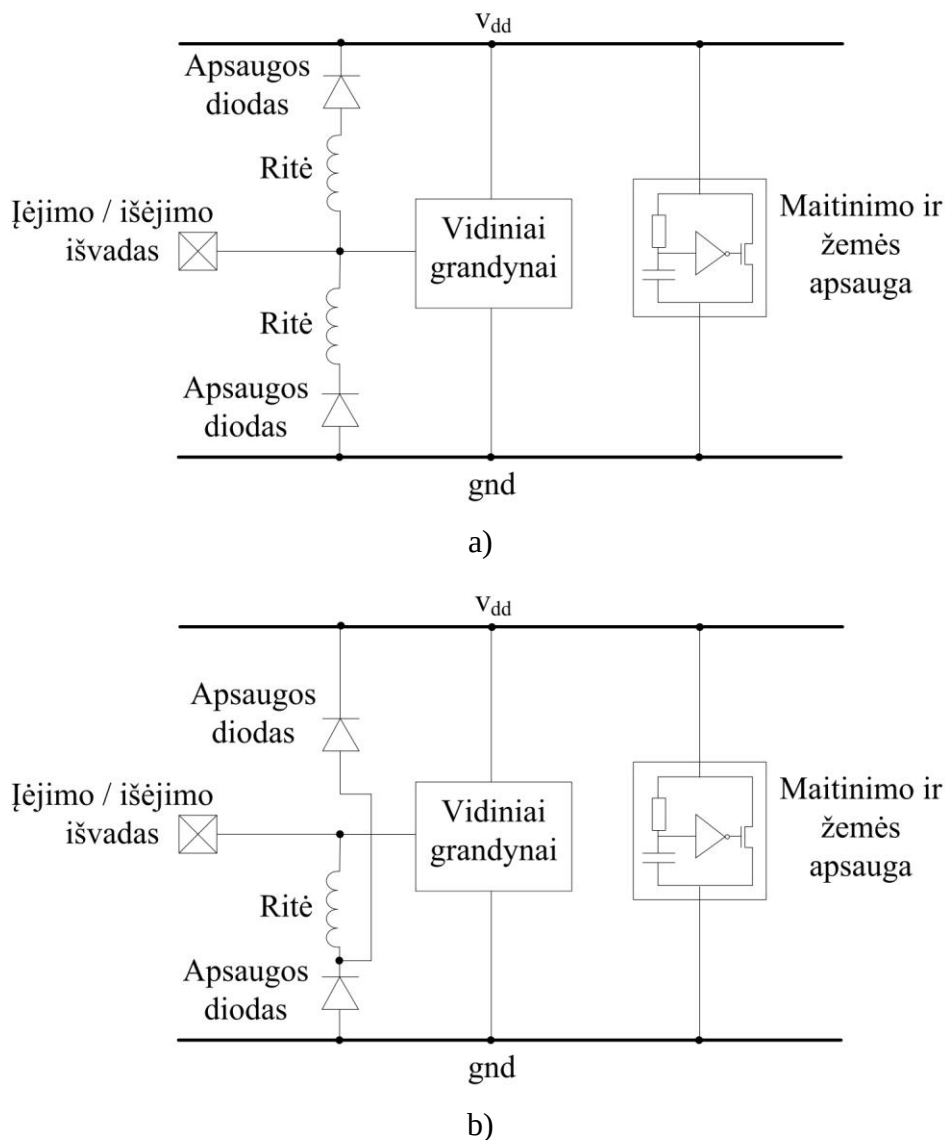
Taip pat lygiagretus LC kontūras gali būti įterpiamas tarp ESD apsaugos diodų. Tokia apsauga pateikta 5.3 paveiksle. Kiekvienas iš LC kontūrų susideda iš induktyvumo ir talpos, kurie projektuojami tarp įėjimo / išėjimo išvadų ir diodų. ESD apsaugos diodai naudojami blokuoti nuolatinio nuotėkio srovės kelią tarp maitinimo ir žemės grandinių, esant normalioms grandinės darbo sąlygoms. Be to, LC kontūro talpoms įgyvendinti taip pat gali būti panaudoti ESD diodai. Idealiu atveju, pasiekus tokio kontūro rezonansinį dažnį, kontūro impedansas artėja prie begalybės. Taigi ESD apsaugos diodų parazitinės talpos yra izoliuojamos nuo įėjimo / išėjimo. Tokiu principu sumažinami parazitiniai efektai. Norint dar sumažinti parazitines talpas galima panaudoti du ar daugiau lygiagrečių LC kontūrų. Taip esant rezonansiniam dažniui būtų gaunamas didesnis impedansas ir geresnė izoliacija [9].



5.3 pav. Apsaugos grandinės blokinė schema su lygiagrečiais LC kontūrais prie diodų [9]

Kai reikalinga platesnė praleidžiamų dažnių juosta, apsaugai įgyvendinti galima panaudoti nuoseklų LC rezonansinį kontūrą. Šiuo atveju rezonansinis dažnis apskaičiuojamas taip pat, kaip lygiagretaus LC rezonansinio kontūro atveju (1 formulė). Tačiau skirtumas tarp lygiagretaus ir nuoseklaus rezonansinių kontūrų tas, kad esant rezonansiniam dažniui, nuoseklaus LC kontūro impedansas kinta priešingai, t. y. tampa artimu nuliui. Taigi ties rezonansiniu dažniu signalas gali būti visiškai prarandamas. Dažniuose didesniuose už rezonansinį dominuoja induktyvumai.

Veikiant ESD įvykiui srovė iškraunama per ritę ir diodą. 5.4 a) paveiksle pateikta ESD apsauga įgyvendinta panaudojant nuoseklų LC rezonansinį kontūrą. Šioje apsaugoje panaudoti du nuoseklūs LC kontūrai, kurie prijungti tarp įėjimo / išėjimo išvadų ir žemės bei maitinimo grandinių [9, 16].

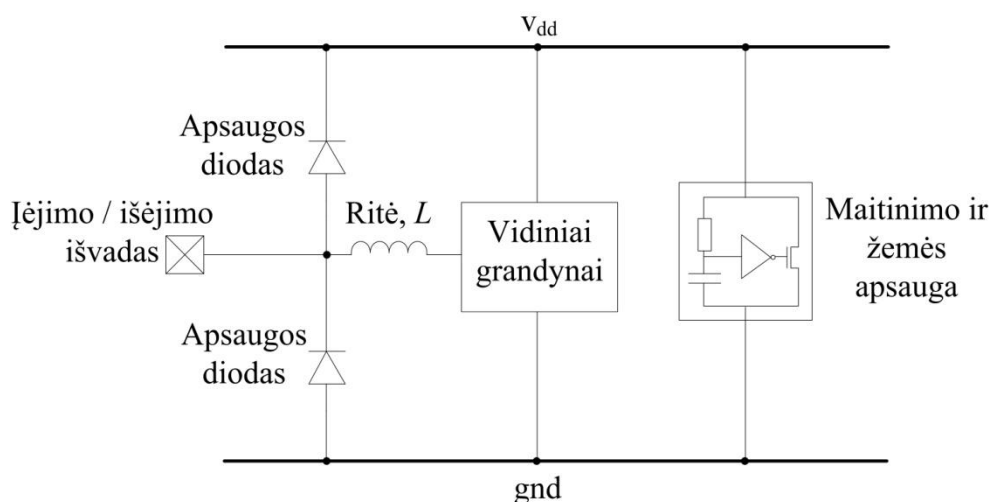


5.4 pav. Apsaugos grandinės blokinė schema su nuosekliu LC kontūru: a) kai naudojamos dvi ritės; b) kai naudojama viena ritė [9]

Kadangi induktyvinės ritės užima daug lusto ploto, vietoj dvejų ričių galima panaudoti – vieną. Tokia apsaugos grandinė pateikta 5.4 b) paveiksle. Vienas induktyvumas prijungiamas prie dviejų ESD apsaugos diodų. Be to, naudojant šią grandinę, talpa nuosekliame LC kontūre dvigubai didesnė, nes ji susideda iš dviejų ESD apsaugos diodų parazitinių talpų. Todėl norint išlaikyti tą patį rezonansinį dažnį, induktyvumas turi būti atitinkamai sumažinamas, todėl sumažėja ritės užimamas plotas [9, 16].

5.3. Apsaugos grandinės su impedansų suderinimu

Norint pasiekti patenkinamą atsparumą elektrostatinėms iškrovoms, apsaugos elementų dydis turi būti pakankamai didelis. Tačiau, kaip jau buvo minėta, kuo didesni elementai – tuo didesnės jų parazitinės talpos. Tam, kad išspręsti šią problemą, ESD apsaugos elementai gali būti traktuojami kaip impedansų suderinimo grandinės elementai, prie įėjimo / išėjimo išvadų. Šiuo atveju, net naudojant didelius ESD apsaugos diodus, galima suderinti grandinę ir gauti gana gerus dažninius parametrus. 5.5 paveiksle pateikta ESD apsaugos grandinė su impedansų suderinimu. Grandinėje ESD srovė iš įėjimo / išėjimo išvado iškraunama per diodus į maitinimą arba žemę. Lygiagretūs ir nuoseklūs elementai projektuojami taip, kad apkrova būtų suderinama apsaugos grandine.



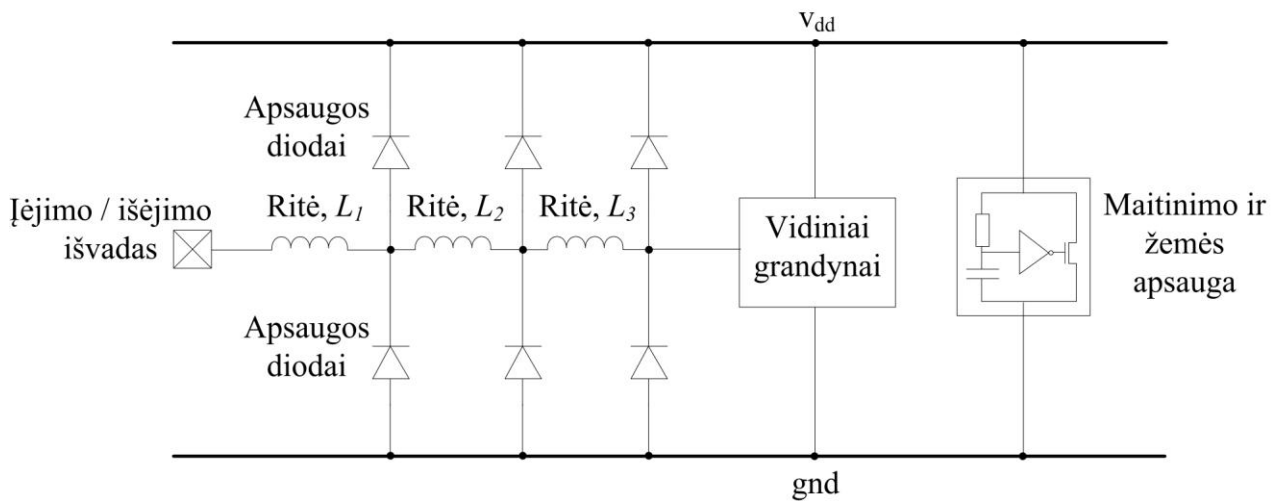
5.5 pav. Apsaugos grandinės blokinė schema pagrįsta impedansų suderinimu [9]

ESD diodų parazitinėms talpoms suderinti paprastai naudojami induktyviniai elementai. Šio metodo tikslas neutralizuoti ESD apsaugos įrenginių talpą prie darbinių dažnių panaudojant induktyvumą.

Norint pasiekti plačiajuostį impedansų suderinamumą su ESD apsaugos įrenginiais, naudojama paskirstyta ESD apsauga. ESD apsaugos įrenginiai yra padalijami į kelias sekcijas ir jų impedansai suderinami induktyvinių elementų pagalba. ESD apsaugos įrenginių skaičius gali būti įvairus, tam, kad optimizuoti grandinės funkcionalumą.

5.6 paveiksle ESD apsaugos diodai yra lygiai padalinti į tris sekcijas. Didžioji ESD srovės dalis šioje grandinėje teka per pirmąją diodų pakopą, kuri yra arčiausiai įėjimo / išėjimo išvadų. Kadangi toliant nuo įėjimo / išėjimo per diodus tekančios srovės mažėja, toliančių pakopų diodus galima atitinkamai mažinti.

Šios grandinės pasižymi geriausiomis dažninėmis savybėmis, kadangi apsauga tampa suderinimo grandine.



5.6 pav. Paskirstyta apsaugos grandinės blokinė schema [9]

Tačiau tokios apsaugos trūkumas yra tas, kad suprojektuota apsauga negali būti taikoma universaliai, skirtingiems grandynams. Kiekvienu atveju apsauga turi būti projektuojama iš naujo derinant apsaugos elementus su vidiniais grandynais. Be to, apsaugai sudaryti turi būti žinomi vidinių grandynų parametrai, kad grandinės būtų galima suderinti tarpusavyje [9, 16, 17].

5.4. Aukštadažnių ESD apsaugų palyginimas

Projektuojant aukštadažnius integrinius grandynus galima naudoti įvairias ESD apsaugas. Apsauga nuo elektrostatinės iškrovos turi užtikrinti tiek vidinių grandynų greitaveiką, tiek jų apsaugą. Renkantis ESD apsaugos grandinės tipą derėtų atsižvelgti į šiuos parametrus: reikalingas apsaugos lygis, vidinių grandynų darbiniai dažniai, išnaudojamas lusto plotas. Apžvelgtų aukštadažnių ESD apsaugų palyginimas pateiktas 7 lentelėje.

Kiekviena apsaugos grandinė nuo elektrostatinės iškrovos yra skirta dirbti prie skirtingų dažnių. Tipinės apsaugos grandinės paprastai naudojamos grandynuose, kurie dirba dažniuose mažesniuose nei 5 GHz. Jungiant apsaugos diodus nuosekliai, dažnių juostą galima praplėsti iki 10 GHz. Kai grandyno veikimo dažnis viršija 5 GHz rekomenduojama rinktis apsaugą su induktyviniais elementais, kadangi tokios apsaugos bus maži nuostoliai aukštuose dažniuose. Apsaugų, kurias sudaro tik diodai, signalų nuostoliai didinant dažnį didėja. Taip pat reikėtų atsižvelgti į tai, kokio dažnių juostos pločio reikės. Jei grandinė projektuojama darbui su vieno dažnio signalais, galima pasirinkti siaurajuostę apsaugą (pavyzdžiui: su lygiagrečiu LC kontūru). Jei grandinė projektuojama darbui su kelių dažnių signalais, reikėtų pasirinkti platesnės juostos apsaugą (pavyzdžiui: su nuosekliu LC kontūru arba su suderintais impedansais) [9].

Nuo praleidžiamų dažnių juostos priklauso apsaugos projektavimo sudėtingumas. Įprastinė apsauga nepasižymi sudėtingais projektavimo etapais. Joje nėra induktyvinių elementų. Apsauga su papildomais diodais taip pat neturi induktyvinių elementų, tačiau reikalauja daugiau kruopštumo, kadangi su šia apsauga dažnai norima pasiekti didesnius dažnius ir reikia tiksliai parinkti diodų dydį ir skaičių, kuris užtikrintų grandinės apsaugą. Grandinių, kuriose naudojamos induktyvinės ritės, projektavimas yra dar sunkesnis, kadangi reikia atlikti sudėtingus skaičiavimus, kruopščiai apgalvoti topologijas, parinkti tinkamus elementų nominalus, įvertinti parazitinius parametrus bei užtikrinti vidinių elementų apsaugą.

7 lentelė. Apsaugos nuo elektrostatinė iškrovų, naudojamos aukštadažniuose grandynuose [9]

Apsaugos tipas	Dažniai	Projektavimo sudėtingumas	Ekvivalentinės parazitinės talpos	Signalų nuostoliai	Atsparumas HBM / CDM	Užimamas plotas luste
Įprastinė apsauga	<5 GHz	Nesudėtingas	Dešimtys – šimtai fF	Prasčiausi prie didelių dažnių	Vidutinis / vidutinis	Mažas
Apsauga su papildomais diodais	<10 GHz	Vidutinis	Dešimtys – šimtai fF	Prasti prie didelių dažnių	Geras / geras	Mažas
Apsauga su lygiagrečiu LC kontūru	>5 GHz	Sudėtingas	~0 prie suprojektuotų dažnių	~0 prie numatytų dažnių	Vidutinis / vidutinis	Didelis
Apsauga su nuoseklus LC kontūru	>5 GHz	Sudėtingas	~0 prie suprojektuotų dažnių	~0 prie numatytų dažnių	Geras / prastas	Didelis
Apsauga su suderintu impedansu	>5 GHz	Sudėtingas	~0 prie suprojektuotų dažnių	~0 prie numatytų dažnių	Vidutinis / vidutinis	Didelis

Mažesnės ekvivalentinės talpos gaunamos apsaugose, kuriose naudojami induktyvumai. Taip yra dėl to, kad, induktyvumais kompensuojamos parazitinės talpos. Panaudojant rezonansinius kontūrus parazitinės talpos eliminuojamos induktyvinių elementų pagalba. Taip pat gali būti naudojamos kombinuotos apsaugos, kuriose naudojami tiek tipiniai apsaugų diodai, tiek rezonansiniai kontūrai. Apsaugos diodų parazitinės talpos gali siekti dešimtis ar šimtus fF. Priklausomai nuo projektuojamų darbinių dažnių ir naudojamos grandinės tipo, tokioms talpoms eliminuoti gali prireikti nuo keleto šimtų piko henrių iki kelių dešimčių nano henrių induktyvumų.

Dar vienas svarbus parametras yra apsaugos užimamas plotas. Paprastai visos apsaugos, kuriose naudojami induktyvumai užima didelį plotą. Taip yra dėl to, kad norint pasiekti reikiamus induktyvumus reikalingos nemažo dydžio ritės. Šiuo atveju apsaugos su diodais užima kur kas

mažiau ploto. Induktyvinių ričių matmenys paprastai užima didelį plotą, lyginant su apsaugos diodais. IBM 0,18 technologijoje minimalus ritės diametras 100 μm .

Nuo apsaugos grandinę sudarančių elementų varžų priklauso įėjimuose / išėjimuose susidaranti įtampa. Mažiausios įtampos susidaro įprastose apsaugos grandinėse ir grandinėse su suderintu impedansu. Didesnės įtampos susidaro apsaugose su nuosekliai sujungtais diodais, nes pridedant papildomus diodus padidėja apsaugos atidarymo įtampa ir didėja bendra diodų varža.

Geriausiu atsparumu nuo elektrostatinių iškrovų modelių pasižymi apsauga su nuosekliai sujungtais diodais. Tačiau vidutiniu atsparumu pasižymi ir kitos nagrinėtos apsaugos grandinės.

Pagal šiuos aspektus projektuotojai gali pasirinkti tinkamiausią apsaugą specifiniam aukštadažniui grandynui. Žinant, kad elektronikai tobulėjant grandynų darbiniai dažniai vis didėja, ir norinti neatsilikti nuo elektronikos vystymosi tempų, reikėtų mažinti parazitinius reiškinius tiek pačiuose grandynuose, tiek aptartose apsaugose. Tik optimizuoti ir inovatyvūs grandynai gali atitikti šiuolaikinius žmonių poreikius, kurie dažnai remiasi į kainos ir kokybės santykį.

5.5. Aukštadažnių ESD apsaugų projektavimas ir modeliavimas

Iš aukštadažnių grandinių apžvalgos matyti, kad praktikoje gali būti naudojamos įvairios apsaugos. Tačiau kiekviena apsauga turi savų privalumų ir trūkumų. Projektuojant grandyną derėtų pasirinkti tinkamiausią apsaugą. Šio darbo atveju projektuojama tik apsauga nuo iškrovų, nežinant kokie bus vidiniai grandynai. Todėl nuspręsta neprojektuoti apsaugos grandinių su impedansų suderinimu. Tolimesniuose poskyriuose pateiktos trys apsaugos grandinės ir jų dažninės amplitudinės charakteristikos.

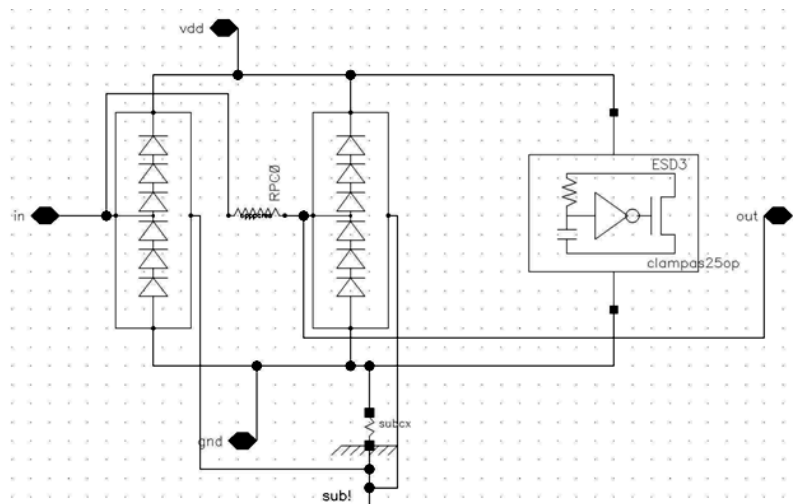
5.5.1. Aukštadažnė ESD apsauga su papildomais nuosekliai prijungtais diodais

Apsaugai įgyvendinti naudojama tipinės apsaugos grandinė. Tipinėje grandinėje talpoms sumažinti naudojami du nuosekliai sujungti diodai tarp įėjimo / išėjimo ir maitinimo grandinės, ir vienas diodas tarp įėjimo / išėjimo ir žemės grandinės. Norint daugiau sumažinti talpas, galima dar nuosekliai jungti papildomų diodų. Apsaugos grandinė su trimis nuosekliai sujungtais diodais pateikta 5.7 paveiksle.

Reikia atsižvelgti į tai, kad naudojant 3 nuosekliai sujungtus diodus didėja bendra diodų atidarymo įtampa. Kai naudojami trys diodai įtampa lygi 3 V. Be to, padidėja nuosekli atidarytų diodų varža, todėl didėja ant šios varžos krentanti įtampa.

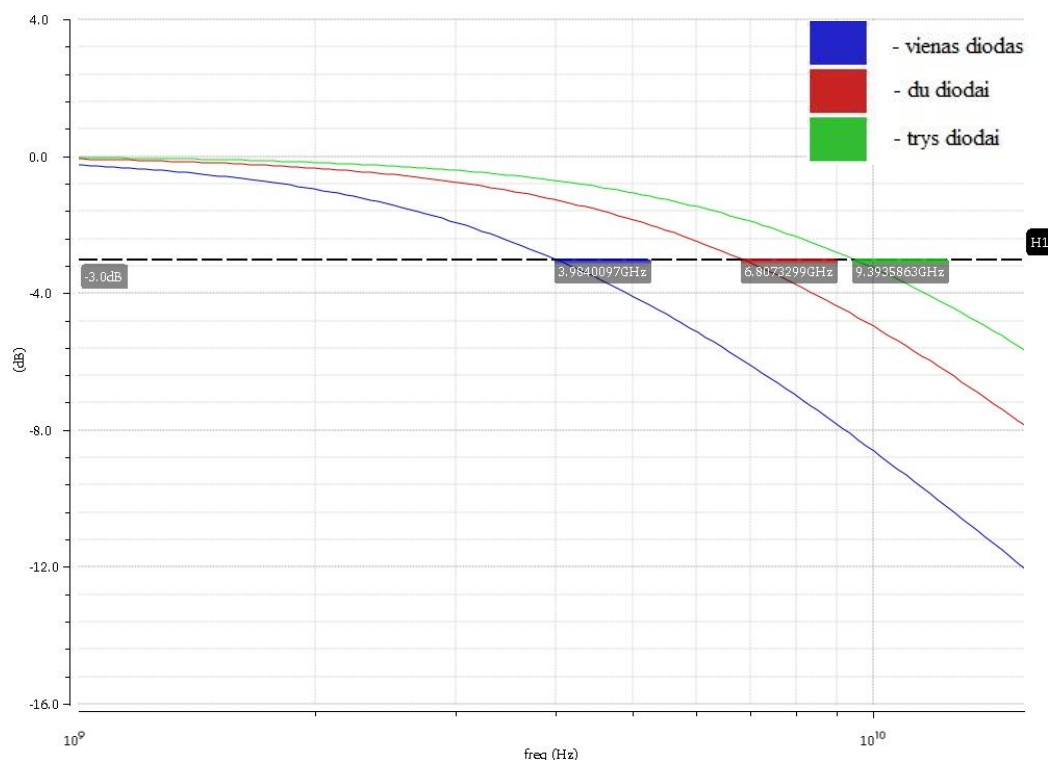
Kad būtų galima įvertinti nuosekliai jungiamų diodų efektyumą platinant dažnių juostą, suprojektuotos trys grandinės su panaudotais vienodo dydžio diodais: pirmoje grandinėje panaudota

po vieną apatinį ir po vieną viršutinį diodą, antroje – po du, trečioje – po tris diodus. Viršutiniai diodai sudaryti iš 4 katodų ir 5 anodų. Kiekvieno katodo ilgis 34,08 μm , o plotis 720 nm. Kiekvieno iš apatinių diodų topologija sudaryta iš 4 anodų ir 5 katodų. Kiekvieno anodo ilgis 34,08 μm , o plotis 720 nm.



5.7 pav. ESD apsaugos grandinė su trim nuosekliai sujungtais diodais

Suprojektuotų grandinių su papildomais diodais dažninės amplitudinės charakteristikos pateiktos 5.8 paveiksle. Charakteristikos gautos neįvertinant parazitinių parametų, tad praleidžiamų dažnių juosta realiame grandyne sumažėtų. Tačiau dėsningumas pridedant papildomus diodus realiame grandyne išliktų.

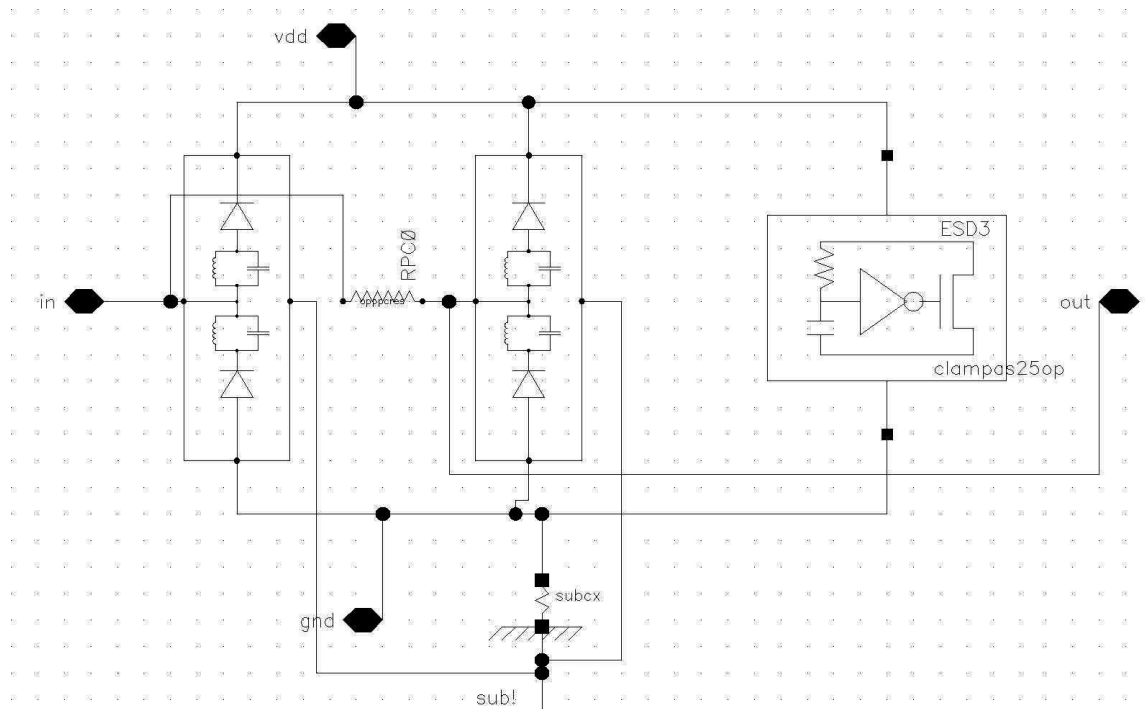


5.8 pav. Apsaugos grandinių, su papildomais diodais, dažninės amplitudinės charakteristikos

Naudojant tipinės ESD apsaugos struktūrą buvo atlikti modeliavimai su vienu, dviem bei trim nuosekliai sujungtais diodais. Kai naudojamas vienas diodas, apsaugos praleidžiamų dažnių juosta siekia 3,98 GHz. Kai naudojama po du nuosekliai sujungtus diodus tarp įėjimų / išėjimų ir žemės bei maitinimo grandinių, apsaugos praleidžiamų dažnių juosta siekia 6,81 GHz. Kai naudojama po tris diodus, praleidžiamų dažnių juosta padidėja iki 9,39 GHz. Iš rezultatų matyti, kad naudojant tokio pat dydžio diodus, sudedant juos nuosekliai, galima praplatinti praleidžiamų dažnių juostos plotį.

5.5.2. Aukštadažnė ESD apsauga su lygiagrečiais LC kontūrais

Apsaugos su lygiagrečiu LC kontūru pagrindą sudaro tipinė apsauga, kurioje tarp apsaugos diodų ir įėjimo / išėjimo išvado įterpiami lygiagretūs LC rezonansiniai kontūrai. Kaip jau buvo minėta, kontūrų paskirtis – izoliuoti diodų parazitines talpas nuo įėjimo / išėjimo grandinės. Tai galima pasiekti tuomet, kai projektuojamo LC kontūro rezonansinis dažnis sutampa su grandinės darbinio dažniu. Taigi, prieš projektuojant apsaugą reikia žinoti kokiais dažniais dirbs vidinis grandynas. Tariant, kad projektuojama grandinė veiks ties 5 GHz dažniu, kontūro rezonansas taip pat turi vykti ties 5 GHz dažniu. Suprojektuotos grandinės schema pateikta 5.9 paveiksle.



5.9 pav. ESD apsaugos grandinė su lygiagrečiais LC kontūrais

Sudarytoje grandinėje panaudoti suprojektuotos tipinės apsaugos diodai bei žemės ir maitinimo apsauga. Viršutinis diodas sudarytas iš 4 katodų ir 5 anodų. Kiekvieno katodo ilgis

34,08 μ m, o plotis 720nm. Apatinis diodas sudarytas iš 4 anodų ir 5 katodų. Kiekvieno anodo ilgis 34,08 μ m, o plotis 720nm. LC kontūrai sudaryti naudojama ritė ir kondensatorius. Kadangi kondensatoriaus talpa gali būti keičiama mažais intervalais, todėl kondensatorius parenkamas paskutinis. Ritės induktyvumo varijavimas turi didesnę žingsnį, kadangi induktyvumas priklauso nuo apvijų skaičiaus, o šis gali būti keičiamas 0,5 vijos žingsniu. Be to induktyvumas priklauso nuo kitų parametrų, kurie yra ribojami: ritės diametro, vijų pločio, tarpų tarp vijų.

Šio kontūro prasmė – padidinti impedansą, ir taip atskirti diodus nuo įėjimo / išėjimo grandinės. Didžiausias impedansas pasiekiamas esant LC kontūro rezonansiniam dažniui. Tačiau kelių LC kontūrų impedansai gali skirtis, nors rezonansiniai dažniai vienodi. Taigi reikia suprojektuoti kontūrą, kuris suteiktų LC grandinei kuo didesnę impedansą veikiant rezonansui.

Impedansas šiuo atveju priklauso nuo kontūro kokybės. O kontūro kokybė priklauso nuo kiekvieno iš elementų kokybių. Tad kuo didesnės kokybės suprojektuosime grandinę, tuo didesnę impedansą gausime veikiant rezonansui, ir tuo mažiau įėjimą / išėjimą veiks parazitinės diodų talpos [18].

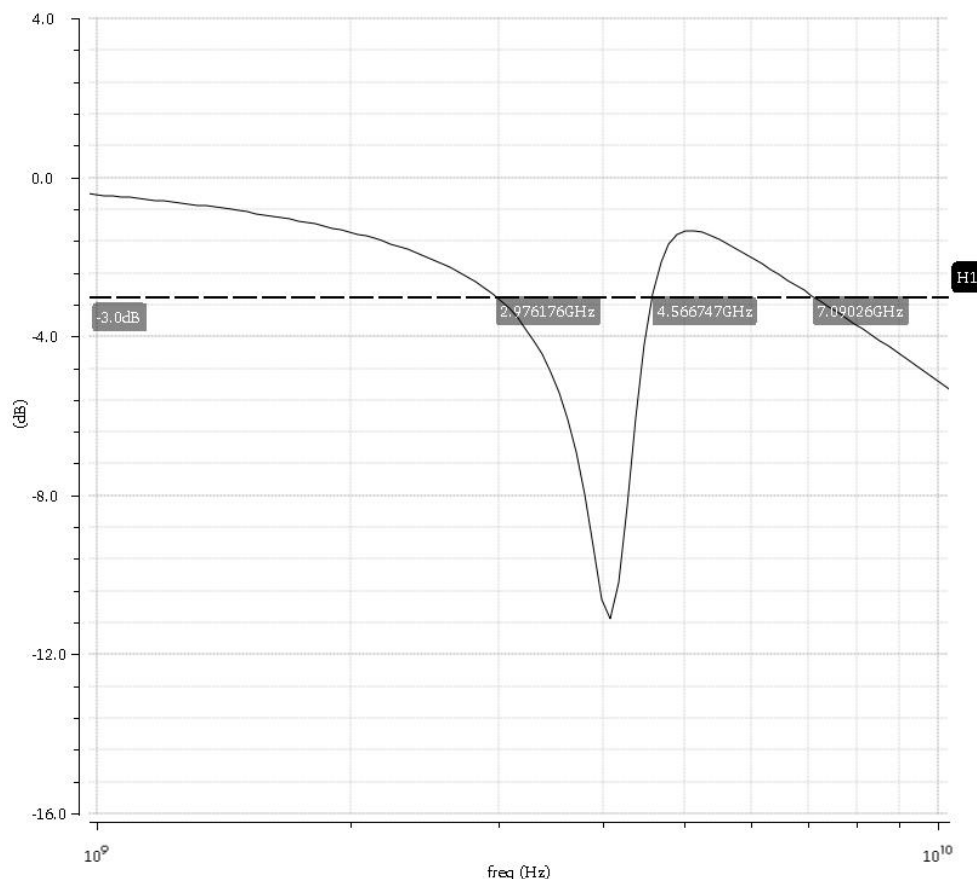
Projektuojant induktyvumą ESD apsaugai, svarbu gauti kuo didesnę jo kokybę. Ritės kokybė priklauso nuo daugelio parametrų. Kuo mažesnis vijų skaičius, tuo didesnė kokybė. Kuo mažesnis ritės diametras, tuo didesnė kokybė. Kokybė taip pat priklauso ir nuo vijų pločio, tačiau ji gali tiek didėti, tiek mažėti, priklausomai nuo kitų parametrų. Be to, kokybė turi savo maksimalią reikšmę, kuri priklauso nuo visų parametrų ir pasireiškia ties tam tikru dažniu. Todėl projektuojant ritę parametrus reikia parinkti taip, kad maksimali kokybės vertė būtų ties projektuojamu rezonansiniu dažniu. Verta pastebėti, kad maksimaliai sumažinus ritės diametrą ir sumažinus vijų skaičių turėtume gauti maksimalią ritės kokybę. Taip ir yra, tačiau ritės kokybės maksimali reikšmė bus ties dideliais dažniais (pavyzdžiui, sumažinus ritę iki 100 μ m diametro ir panaudojus 1,5 apvijos, kurios plotis 5 μ m, kokybės maksimali reikšmė būtų ties 25,2 GHz dažniu). Todėl nepataikius į šį maksimalios kokybės reikšmės dažnį negausime didelės kokybės. Vadinasi norint pasiekti maksimalią kokybę reikia derinti parametrus tarpusavyje taip, kad ritės kokybės maksimalios reikšmės dažnis būtų kuo artimesnis rezonansiniam dažniui. Be to, maksimalios kokybės vertės bei maksimalių verčių dažniai priklauso ir nuo sluoksnių, kuriuose projektuojamos ritės. IBM 0,18 μ m technologijoje galima pasirinkti vieno arba dviejų sluoksnių ritę. Su vieno sluoksnio ritėmis galima pasiekti didesnes kokybes.

Taigi žinant, kad rezonansinis dažnis 5 GHz, galima parinkti likusius ritės parametrus. Suprojektuotos ritės parametrai: diametras – 200 μ m, vijų skaičius – 3,5, vijos plotis – 3,24 μ m, tarpai tarp vijų – 5 μ m, maksimalios kokybės dažnis – 5 GHz. Tokios ritės induktyvumas lygus 3,778 nH.

Parinkus induktyvumą, ir žinant rezonansinį dažnį, iš 1 formulės, galima pasiskaičiuoti kondensatoriaus talpą:

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 25 \cdot 3,778 \cdot 10^9} = 268,46 \text{ fF}.$$

Suprojektuoto kondensatoriaus parametrai: ilgis – 8 μm, plotis – 16,66 μm, talpa – 268,48 fF. Tiek viršutinei, tiek apatinei apsaugos grandinėms sudaromi toki pat LC kontūrai. Grandinės su lygiagrečiais LC kontūrais dažninė amplitudinė charakteristika pateikta 5.10 paveiksle.



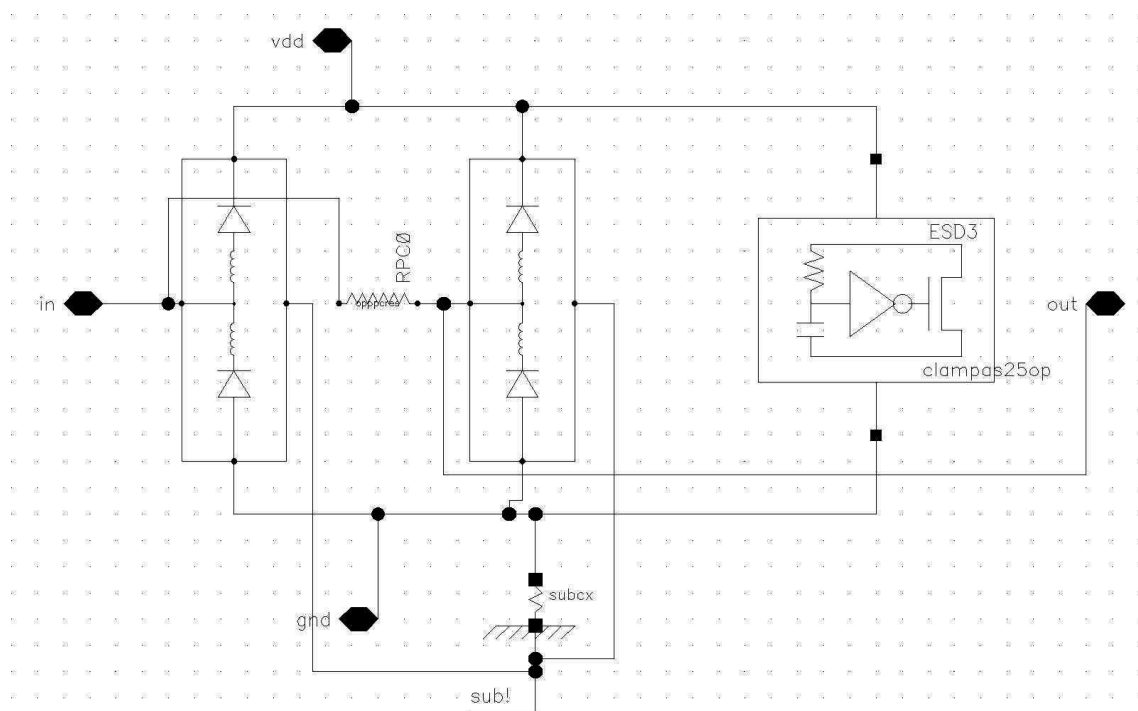
5.10 pav. Apsaugos su lygiagrečiais LC kontūrais dažninė amplitudinė charakteristika

Iš charakteristikos matyti, kad praleidžiamų dažnių juostos plotis siekia 2,83 GHz. Viršijus šį dažnį signalas slopinamas, nes prie dažnių mažesnių nei rezonansinis dominuoja talpos. Kai pasiekiamas LC kontūro rezonansinis dažnis induktyvinė dalis susilygina su talpine dalimi. Tuomet grandinės impedansas padidėja ir per LC kontūrą srovė beveik neteka. Signalas patenka į vidinius grandynus. Projektuojamos grandinės rezonansinis dažnis 5 GHz. Prie 4,57 GHz ribos signalo slopinimas pakyla virš -3 dB ir slopinimas mažėja. Ties rezonansiniu dažniu gautas mažiausias 1,36 dB signalo slopinimas. Didinant dažnį virš rezonansinio, signalo slopinimas vėl didėja ir ties 7,09 GHz riba pasiekia -3dB. Šiuo atveju gaunama siaura 2,52 GHz praleidžiama dažnių juosta,

kurios pradžia ties 4,56 GHz ir pabaiga ties 7,09 GHz dažniu. Ši apsauga turėtų būti naudojama tik tuo atveju, kai reikalinga siaura dažnių juosta.

5.5.3. Aukštadažnė ESD apsauga su nuosekliais LC kontūrais

Apsaugos, su nuosekliomis LC grandinėmis pagrindą sudaro tipinė apsauga, kurioje prie apsaugos diodų nuosekliai prijungiamos ritės. Apsaugos diodai turi savo parazitines talpas, kurios su ritėmis sudaro nuoseklius LC rezonansinius kontūrus. Šiuo atveju, kai pasiekiamas rezonansinis LC kontūro dažnis, grandinės impedansas tampa labai mažu. Taigi, ties rezonansiniu dažniu srovė tekės per diodus ir signalas įėjime / išėjime bus slopinamas. Projektuojant apsaugą reikia žinoti kokių dažnių juostoje dirbs vidinis grandynas. Viršijus rezonansinį dažnį, LC kontūro impedansas ima didėti, o slopinimas įėjime / išėjime – mažėti. Grandinėje ima dominuoti induktyvumai. Todėl integrinio grandyno darbiniai dažniai turi viršyti LC kontūro rezonansinį dažnį. Tariant, kad projektuojama grandinė veiks ties 5 GHz dažniu, kontūro rezonansas turi vykti mažesniame nei 5 GHz dažnyje. Suprojektuotos grandinės schema pateikta 5.11 paveiksle.



5.11 pav. ESD apsaugos grandinė su nuosekliais LC kontūrais

Grandinėje panaudoti pirmosios suprojektuotos tipinės apsaugos diodai bei žemės ir maitinimo apsauga. LC kontūrams sudaryti papildomai naudojamos ritės. LC kontūrų talpas sudaro apsaugos diodų parazitinės talpos. Apytikslės diodų talpas galima pasiskaičiuoti sudarius RC grandinę iš diodų bei rezistorių. Programiniame pakete „Cadence“ galima rasti RC grandinės

laiko konstantą τ . Skaičiavimams buvo panaudotas 300,34 Ω rezistorius. Žinant laiko konstantą bei varžos dydį galima paskaičiuoti diodo parazitinę talpą:

$$\tau = RC \quad (2)$$

Sumodeliavus RC grandinę, viršutinio diodo laiko konstanta lygi 41,62 ps. Pagal 2 formulę paskaičiuojama diodo talpa:

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{41,62 \cdot 10^{-12}}{300,34} = 138,58 fF.$$

Sumodeliavus RC grandinę su apatiniu diodu, diodo laiko konstanta lygi 33,49 ps. Pagal 2 formulę paskaičiuojama diodo talpa:

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{33,49 \cdot 10^{-12}}{300,34} = 111,51 fF.$$

Tariant, kad vidiniai grandynai veiks 5 GHz dažniu, rezonansas turi vykti ties mažesniu nei 5 GHz dažniu. Keičiant induktyvumus galima patikrinti esant kokiam rezonansiniam dažniui gaunamas mažiausias slopinimas ties 5 GHz riba. Tokiu būdu buvo parinktas 2,8 GHz rezonansinis dažnis. Panaudojant šį rezonansinį dažnį, bandymų metu, buvo gautas mažiausias slopinimas ties 5 GHz riba. Nuoseklaus rezonansinio kontūro rezonansinis dažnis apskaičiuojamas pagal tą pačią formulę, kaip ir lygiagretaus rezonanso. Taigi panaudojus 1 formulę galima paskaičiuoti reikalingus induktyvumus.

Viršutinės ritės induktyvumas:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 7,84 \cdot 138,58 \cdot 10^3} = 23,38 nH.$$

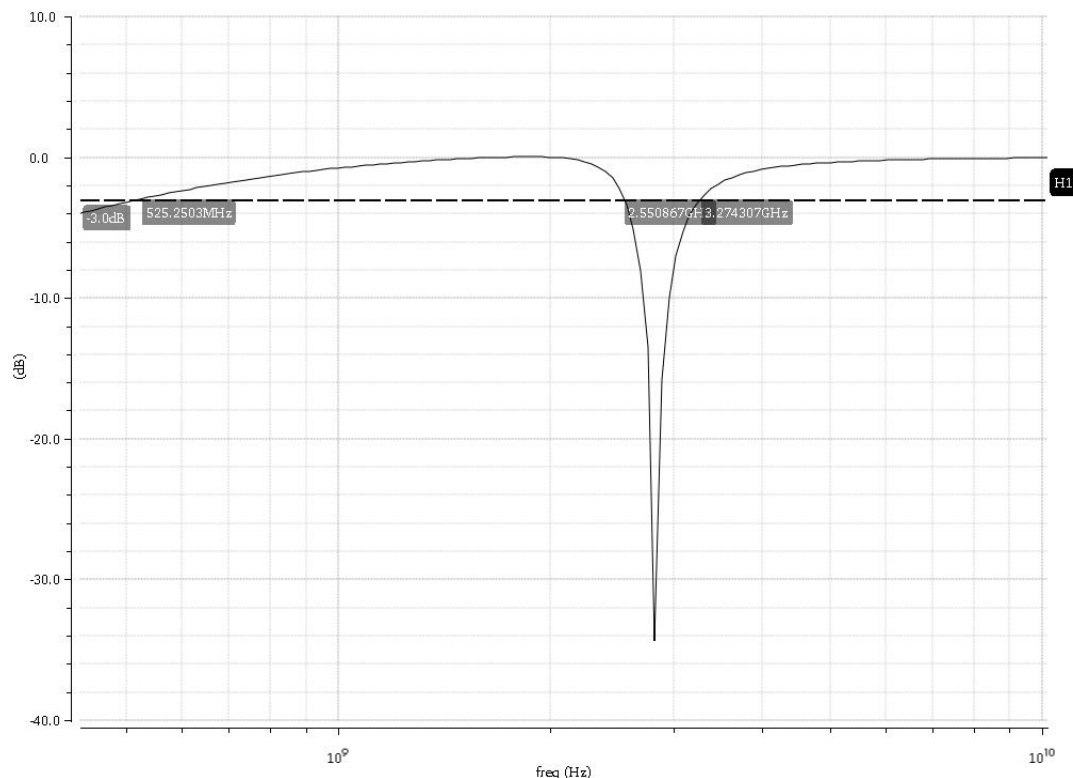
Apatinės ritės induktyvumas:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 7,84 \cdot 111,51 \cdot 10^3} = 29,00 nH.$$

Gauti induktyvumai yra pakankamai dideli, todėl norint juos įgyvendinti reikalingos didelio diametro ritės. Apskaičiavus visų elementų nominalus atliekamas grandinės dažninės amplitudinės charakteristikos modeliavimas. Kadangi elementų nominalai paskaičiuoti teoriškai, neįvertinant realių elementų, atliekamas modeliavimas su idealiais induktyvumais bei talpomis. 5.12 paveiksle pateikta, sudarytos ESD apsaugos su idealiais elementais, dažninė amplitudinė charakteristika.

Iš charakteristikos matyti, kad naudojant idealius elementus gaunamas rezonansinis dažnis yra lygus 2,8 GHz, toks pat koks buvo paskaičiuotas teoriškai. Veikiant rezonansiniam dažniui nuoseklių LC kontūrų impedansas sumažėja, todėl srovė teka per apsaugos diodus, o ne į vidinius grandynus, todėl gaunamas įėjimo / išėjimo signalo slopinimas. Dažniuose mažesniuose už rezonansinį, t. y. tostant nuo rezonansinio dažnio į mažų dažnių sritį, grandinės impedansas didėja. Talpos ima dominuoti ir įėjimo / išėjimo signalai yra slopinami. Tik artėjant prie rezonansinio dažnio talpas kompensuoja induktyvumai ir slopinimas mažėja. Dažniuose didesniuose už

rezonansinį, t. y. tolstant nuo rezonansinio dažnio į aukštų dažnių sritį, grandinės impedansas taip pat didėja.



5.12 pav. Apsaugos su lygiagrečiais LC kontūrais dažninė amplitudinė charakteristika

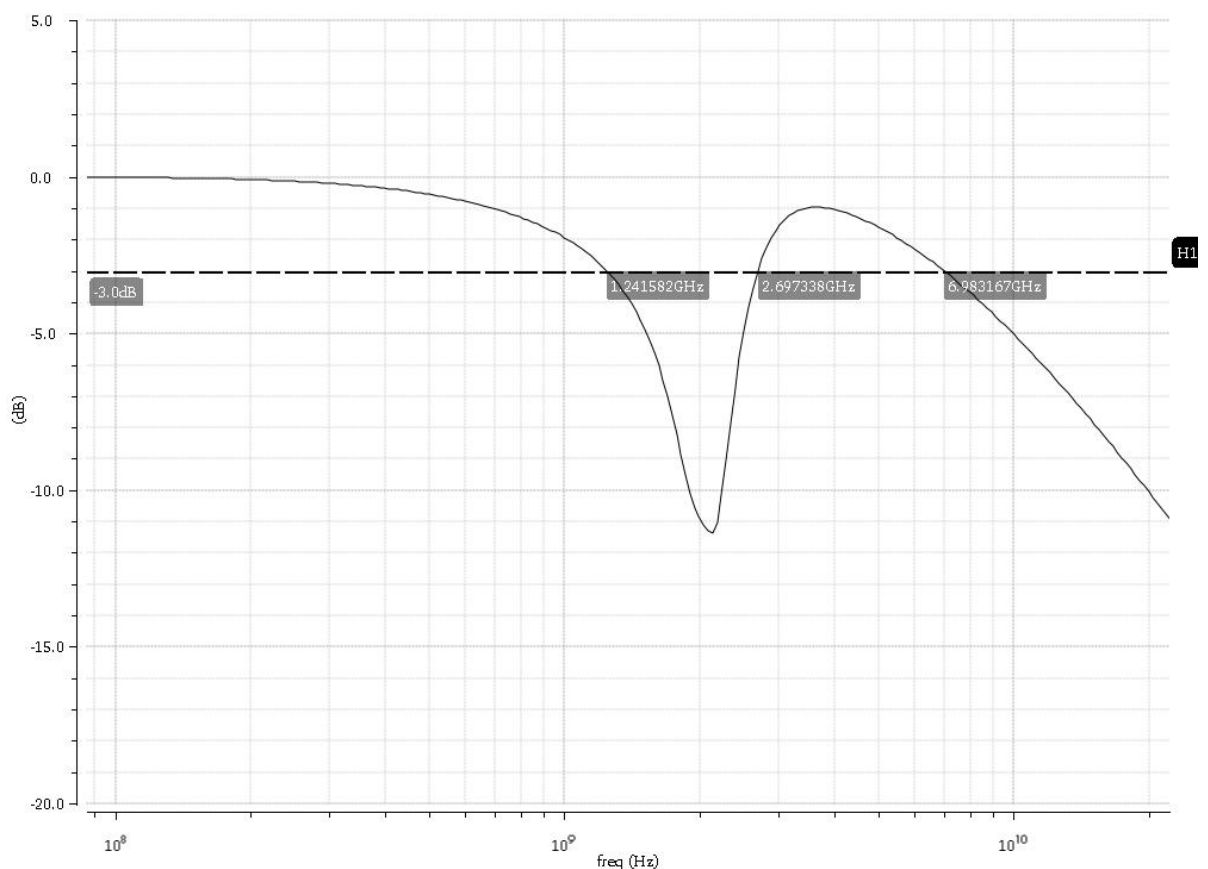
Tačiau šiuo atveju, grandinėje dominuoja induktyviniai elementai, ir todėl įėjimo / išėjimo signalai nėra slopinami. Idealiu atveju, kai rezonansas vyksta ties 2,8 GHz dažniu, kaip pateikta charakteristikoje, signalai, kurių dažniai viršija 3,27 GHz pasiekia 3dB slopinimo ribą, ir slopinimas didėjant dažniui mažėja. Taigi idealiu atveju, tokia apsauga tiktų grandynams veikiantiems didesniuose kaip 3,27 GHz dažniuose.

Naudojant idealius arba realius elementus grandinėms, jų charakteristikos gali skirtis. Todėl sekantys modeliavimai atlikti su realiais elementais, naudojamais IBM 0,18 μm technologijoje.

Grandinei sudaryti panaudoti diodai, pagal kuriuos, buvo atlikti talpų skaičiavimai. Viršutinis diodas sudarytas iš 4 katodų ir 5 anodų. Kiekvieno katodo ilgis – 34,08 μm , o plotis – 720 nm. Viršutinio diodo parazitinė talpa yra apie 138,58 fF. Apatinis diodas sudarytas iš 4 anodų ir 5 katodų. Kiekvieno anodo ilgis – 34,08 μm , o plotis – 720 nm. Apatinio diodo parazitinė talpa yra apie 111,51 fF.

Kontūrams buvo panaudotos dvi ritės – viršutinė ir apatinė. Kadangi skaičiavimų metu buvo gautos didelės induktyvumų vertės, joms gauti reikalingos didelio diametro ritės su daug apvijų. Suprojektuotos viršutinės ritės parametrai: diametras – 400 μm , vijų skaičius – 6, vijos plotis – 3,5 μm , tarpai tarp vijų – 5 μm , maksimalios kokybės dažnis – 735 MHz, induktyvumas –

23,453 nH. Suprojektuotos apatinės ritės parametrai: diametras – 450 μm , vijų skaičius – 6, vijos plotis – 3,24 μm , tarpai tarp vijų – 5 μm , maksimalios kokybės dažnis – 622 MHz, induktyvumas – 28,439 nH. Projektuojant rites reikėtų gauti kuo didesnę kokybę, taip būtų gaunamas didesnis slopinimas ties rezonansiniu dažniu ir slopinimo „pikas“ ties rezonansiniu dažniu būtų siauresnis. O tai reikštų statesnį slopinimo mažėjimą, viršijus rezonansinį dažnį, ir platesnę praleidžiamų dažnių juostą. Tačiau dėl didelių induktyvumų, neįmanoma padidinti ritės maksimalios kokybės dažnio, kadangi ritės matmenys beveik siekia maksimaliai leistinus, naudojamoje technologijoje. Suprojektuotos apsaugos grandinės, su realiais komponentais, dažninė amplitudinė charakteristika pateikta 5.13 paveiksle.

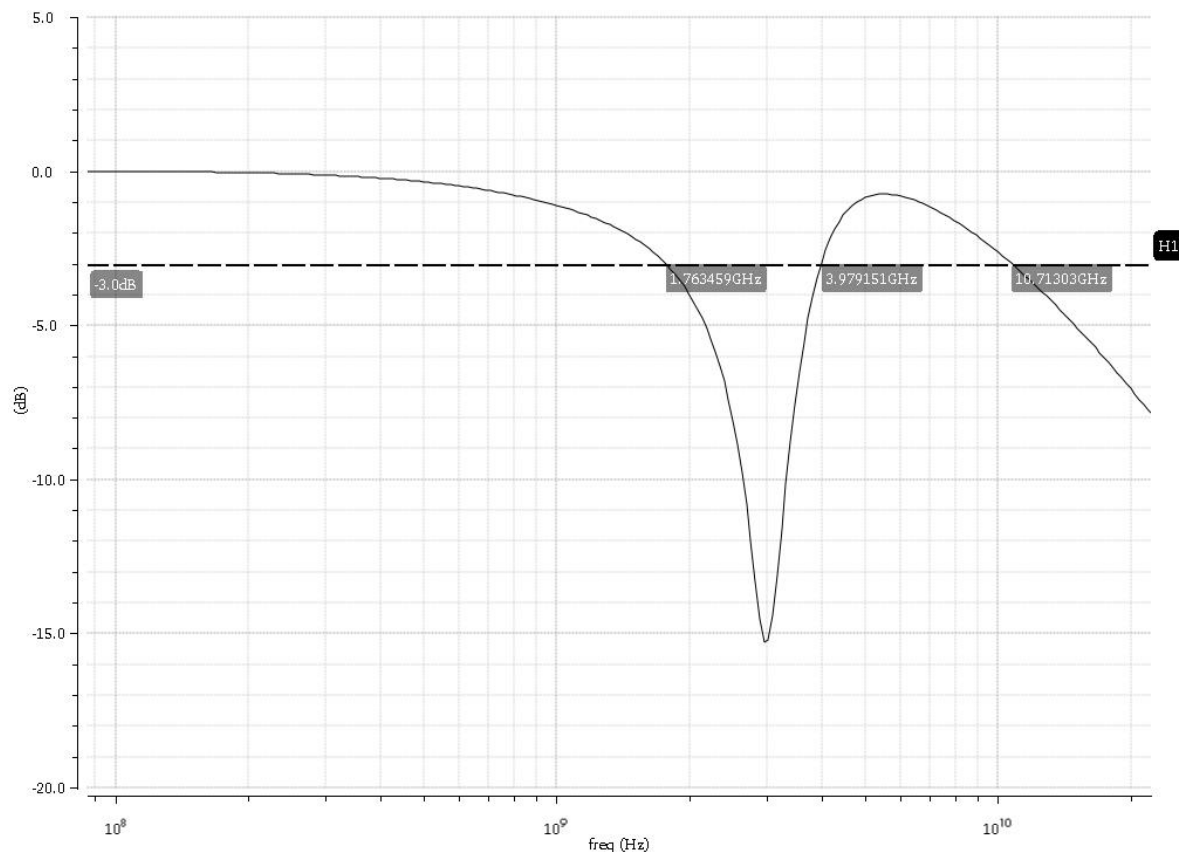


5.13 pav. Apsaugos su lygiagrečiais LC kontūrais dažninė amplitudinė charakteristika

Kaip matyti iš 5.12 ir 5.13 paveikslų, naudojant idealius ir realius elementus, apsaugos grandinei sudaryti, dažninės amplitudinės charakteristikos akivaizdžiai skiriasi. Visų pirma, iš 5.13 paveikslo matyti, kad naudojant realius elementus rezonansinis dažnis neatitinka paskaičiuoto. Skaičiavimų metu buvo parinktas 2,8 GHz rezonansinis dažnis, o atlikus modeliavimus, iš dažninės amplitudinės charakteristikos matyti, kad rezonansas vyksta ties 2,14 GHz dažniu. Todėl praleidžiamų dažnių juosta, esanti virš rezonansinio dažnio, persislinko į žemesnių dažnių sritį. Tokia grandinė galėtų būti naudojama, kai įėjimo išėjimo signalų dažnis yra nuo 2,70 GHz iki

6,99 GHz. Šioje 4,29 GHz pločio juostoje mažiausias slopinimas 0,984 dB veikiant 3,65 GHz dažniui. Kaip jau buvo minėta, grandinėje panaudotos labai didelės ritės. Norint gauti mažiausią slopinimą ties 5 GHz dažniu, dažnių juostą reikėtų perstumti į didesnius dažnius. Tai galima padaryti mažinant induktyvumus, t. y. mažinant ričių dydį ir apvijų skaičių, o kartu didinant rezonansinį dažnį.

Išlaikius tuos pačius diodų matmenis, grandinėje keičiami ričių parametrai. Suprojektuotos viršutinės ritės parametrai: diametras – 300 μm , vijų skaičius – 6, vijos plotis – 3,5 μm , tarpai tarp vijų – 5 μm , maksimalios kokybės dažnis – 1,11 GHz, induktyvumas – 14,928 nH. Suprojektuotos apatinės ritės parametrai: diametras – 310 μm , vijų skaičius – 6, vijos plotis – 3,5 μm , tarpai tarp vijų – 5 μm , maksimalios kokybės dažnis – 1,06 GHz, induktyvumas – 15,744 nH. Atlikus modeliavimus su suprojektuotomis ritėmis gauta dažninė amplitudinė charakteristika, kuri pateikta 5.14 paveiksle.



5.14 pav. Apsaugos su lygiagrečiais LC kontūrais dažninė amplitudinė charakteristika

Iš paveikslo matyti, kad sumažinus ričių matmenis (induktyvumus) pavyko perstumti praleidžiamų dažnių juostą į didesnius dažnius. Iš charakteristikos matyti, kad gautas apie 3 GHz rezonansinis dažnis. Tokia grandinė galėtų būti naudojama, kai įėjimo / išėjimo signalų dažnis yra nuo 3,98 GHz iki 10,71 GHz. Be to, panaudojus mažesnius, didesnės kokybės, induktyvumus,

praplėtėme dažnių juostos plotį. Šiuo atveju ji siekia 6,73 GHz. Praleidžiamų dažnių juostoje, kurios dažniai didesni už grandinės rezonansinį dažnį, mažiausias slopinimas gaunamas 0,752 dB veikiant 5,5 GHz dažniui.

Iš rezultatų matyti, kad didelio diametro ritės, su didėjančiu skaičiumi apvijų, prastina induktyvumo kokybę, be to, užima labai daug ploto. Kadangi diodai yra mažesni už rites geriau didinti diodų talpas. Diodų talpas padidinti galima didinant diodų dydį arba jungiant diodus lygiagrečiai. Tokiu būdu būtų galima sumažinti daug ploto užimančias rites, ir padidinti diodų talpas, kurie užima kur kas mažiau ploto.

IŠVADOS

1. Išanalizuota literatūra ir sudaryta tipinė ESD apsauga, žmogaus kūno, įrenginių bei impulsinės perdavimo linijos modeliai.
2. *Žmogaus kūno modelio tyrimų rezultatai:*
 - a) Sumodeliuota tipinė apsaugos grandinė, kurią veikia 2000 V įkrautas žmogaus kūno modelis. Modelis generuoja srovės impulsą, kurios maksimali srovė siekia 1,27 A. Per pirmąją apsaugos diodų pakopą teka 1,24 A srovė, per maitinimo ir žemės apsaugą teka 1,05 A srovė. Tarp apsaugos įėjimo / išėjimo ir žemės taškų susidaro 9,15 V įtampa. Maitinimo grandinėje ji sumažinta iki 1,75 V, o tarp įėjimo / išėjimo į vidines grandines ir žemės – iki 3,6 V.
 - b) Atlikti ESD apsaugos modeliavimai, panaudojant impulsinę perdavimo liniją, su impulsiniu srovės šaltiniu, kurio impulso plotis – 100 ns, o impulso srovės amplitudė – 1,33 A. Tarp apsaugos įėjimo / išėjimo ir žemės taškų susidaro 9,47 V įtampa. Maitinimo grandinėje ji sumažinta iki 1,8 V, o tarp įėjimo / išėjimo į vidines grandines ir žemės taškų – iki 3,66 V.
 - c) Suprojektuota optimali apsauga nuo žmogaus kūno modelio, kurioje panaudoti 70 μm perimetro diodai. Tokia diodų apsauga užima 2224,5 μm^2 lusto ploto. Apsauga gali atlaikyti iki 1,40 A 100 ns trukmės srovės impulsą. Taigi apsauga geba apsaugoti nuo žmogaus kūno modelio, įkrauto 2000 V įtampa. Apsaugos praleidžiamų dažnių juostos plotis – 8,56 GHz.
3. *Įrenginių modelio tyrimų rezultatai:*
 - a) Sumodeliuota tipinė apsaugos grandinė, kurią veikia 200 V įkrautas įrenginių modelis. Modelis generuoja kintamos srovės impulsą, kurio maksimali srovė siekia 3,4 A. Per pirmąją apsaugos diodų pakopą teka 3,30 A srovė, per maitinimo ir žemės apsaugą teka 2,43 A srovė. Tarp apsaugos įėjimo / išėjimo ir žemės taškų susidaro 19,19 V įtampa. Maitinimo grandinėje įtampa sumažinta iki 3,22 V, o tarp įėjimo / išėjimo į vidines grandines ir žemės – iki 5,21 V.
 - b) Įrenginių modeliui imituoti, panaudotas impulsinis srovės šaltinis, kurio impulso plotis – 30 ns, o impulso srovės amplitudė – 3,8 A. Tarp apsaugos įėjimo / išėjimo ir žemės taškų susidaro 20,78 V įtampa. Maitinimo grandinėje įtampa sumažinta iki 3,45 V, o tarp įėjimo / išėjimo į vidines grandines ir žemės taškų – iki 5,47 V.
 - c) Suprojektuota optimali apsauga nuo įrenginių modelio, kurioje panaudoti 167 μm perimetro diodai. Diodų apsauga užima 2635,1 μm^2 lusto ploto. Grandinė gali atlaikyti mažesnius nei 3,67 A srovės ir 30 ns trukmės impulsus. Suprojektuota apsauga geba apsaugoti nuo žmogaus kūno modelio, kuris įkrautas 2000 V įtampa, bei nuo įrenginių modelio, kuris įkrautas 200 V ir srovė mažesnė už 3,67 A. Apsaugos praleidžiamų dažnių juostos plotis siekia 4,71 GHz.
4. *Įkrauto įrenginio modelio tyrimų rezultatai:*
 - a) Įkrauto įrenginio modeliui panaudotas impulsinis srovės šaltinis, kurio impulso plotis – 1 ns, impulso srovės amplitudė – 10 A. Sumodeliavus 500 V ESD įvykį gauta, kad tarp apsaugos

- įėjimo / išėjimo ir žemės taškų susidaro 44,45 V įtampa. Maitinimo grandinėje įtampa sumažinta iki 5,41 V, o tarp įėjimo / išėjimo į vidines grandines ir žemės taškų – iki 7,74 V.
- b) Suprojektuota optimali apsauga nuo įkrauto įrenginio modelio, kurioje panaudoti 217 μm perimetro diodai. Diodai gali atlaikyti mažesnius nei 10,85 A srovės impulsus, kurių trukmė neviršija 1 ns. Tokia diodų apsauga užima 3005,1 μm^2 lusto ploto ir geba apsaugoti nuo žmogaus kūno modelio, kuris įkrautas 2000 V įtampa, nuo įrenginių modelio, kuris įkrautas 200 V, bei nuo įkrauto įrenginio modelio, kuris įkrautas 500 V įtampa ir srovė mažesnė nei 10,85 A. Tokios apsaugos praleidžiamų dažnių juostos plotis siekia 3,72 GHz.
5. Nustatyta, kad pavojingiausias yra įkrauto įrenginio modelis, kadangi jis pasižymi didžiausiomis srovėmis (10 A srovė, modelį įkraunant 500 V įtampa). Įrenginių modelis pavojingas dėl kintamos srovės (2,8–3,8 A srovė, modelį įkraunant 200 V įtampa). Mažiausiai pavojingas žmogaus kūno modelis (1,3 A srovė, modelį įkraunant 2000 V įtampa).
6. *Tipinės ESD apsaugos praleidžiamų dažnių juostos tyrimų rezultatai:*
- a) Neįvertinus topologijos parazitinių parametrų, iš tipinės ESD apsaugos DACH nustatyta, kad praleidžiamų dažnių juostos plotis siekia 4,74 GHz. Įvertinus topologijos parazitinius parametrus, praleidžiamų dažnių juostos plotis sumažėjo iki 3,15 GHz, t. y. sumažėjo 34 %.
- b) Įvertinus topologijų parazitinius parametrus ir panaudojus 1 pF talpą apkrovoje, praleidžiamų dažnių juostos plotis sumažėjo nuo 3,15 GHz iki 601,50 MHz, t. y. apie 81 %. Matyti, kad praleidžiamų dažnių juostos plotį įtakoja apkrovos talpa.
7. Atlikta aukštadažnių ESD apsaugos grandinių analizė. Suprojektuotos trijų tipų aukštadažnės grandinės ir atlikti jų dažninių amplitudinių charakteristikų modeliavimai.
8. *Aukštadažnių apsaugų dažninių amplitudinių charakteristikų modeliavimų rezultatai:*
- a) Atlikti DACH modeliavimai, keičiant apsaugos diodų kiekį. Kai naudojamas vienas diodas, apsaugos praleidžiamų dažnių juosta siekia 3,98 GHz., kai naudojami du – 6,81 GHz, kai naudojami trys – 9,39 GHz. Iš rezultatų matyti, kad naudojant tokio pat dydžio diodus, sudedant juos nuosekliai, galima praplatinti praleidžiamų dažnių juostos plotį.
- b) Suprojektuota aukštadažnė apsauga, su lygiagrečiais LC kontūrais. Apsauga pasižymi siaura – 2,52 GHz praleidžiama dažnių juosta, kurios pradžia ties 4,56 GHz ir pabaiga ties 7,09 GHz. Mažiausias signalo slopinimas šioje juostoje yra 1,36 dB, veikiant rezonansui.
- c) Suprojektuota aukštadažnė apsauga, su nuosekliomis LC grandinėmis. Sudaryta apsauga turi 6,73 GHz praleidžiamą dažnių juostą, kurios pradžia 3,98 GHz dažnis ir pabaiga 10,71 GHz dažnis. Mažiausias slopinimas 0,75 dB veikiant 5,5 GHz dažniui.
9. Tipinės ESD apsaugos užima kur kas mažiau lusto ploto nei aukštadažnės apsaugos su ritėmis. Aukštadažnės ESD apsaugas rekomenduojama naudoti tik tuomet, kai norima pasiekti didesnius nei 5 GHz grandinės darbinius dažnius.

NAUDOTA LITERATŪRA

1. *CMRF7SF ESD Reference Guide*. IBM Corporation. 2012. 130 p.
2. *MIL–STD–883E Department of defense. Test method standard microcircuit. Method 3015.7*. 1989. 6 p.
3. *ANSI/ESD STM5.1ESD-2001. ESD Association Standard Test Method. For Electrostatic Discharge Sensitivity Testing –Human Body Model (HBM) Component Level*. United States of America, 2001. 13 p.
4. Wang, A. Z. H. 2002. *On–Chip ESD Protection for Integrated Circuits: An IC Design Perspective*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 303 p.
5. *ANSI/ESD STM5.2-2012. ESD Association Standard Test Method. For Electrostatic Discharge Sensitivity Testing – Machine Model (MM) – Component Level*. United States of America, 2013. 14 p.
6. *JESD22-A115-A. Test Method A115A Electrostatic Discharge (ESD) Sensitivity Testing Machine Model (MM)*. Arlington, 1997. 9 p.
7. *ANSI/ESD S5.3.1-2009. ESD Association Standard Test Method. For Electrostatic Discharge Sensitivity Testing – Charged Device Model (CDM) – Component Level*. United States of America, 2009. 14 p.
8. *ANSI/ESD SP5.5.1-2008. ESD Association, Electrostatic Discharge Sensitivity Testing – Transmission Line Pulse (TLP) – Component Level*. New York, 2008. 17 p.
9. Ker, M. D.; Lin, C. Y.; Hsiao, Y. W. 2011. Overview on ESD Protection Designs of Low–Parasitic Capacitance for RF ICs in CMOS technologies. *Device and Materials Reliability*. 207 – 218 p.
10. Amerasekera, A.; Duvvury, C. 2002. *ESD in Silicon Integrated Circuits*. England: John Wiley & Sons, Ltd. 401 p.
11. Li, J.; Gauthier, R.; Chatty, K. et al. 2007. Capacitance Investigation of Diodes and SCRs for ESD Protection of High Frequency Circuits in Sub-100nm Bulk CMOS Technologies, in *29th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*. 4A.2-1 –7 p.
12. Voldman, S. H. 2006. *ESD RF Technology and Circuits*. Vermont: John Wiley & Sons Ltd. 398 p.
13. Beebe, S. G. 1998. *Characterization, modeling, and design of ESD protection circuits*. California. 206 p.

14. *Design Kit and Technology Training CMOS7RF V1800*. IBM Corporation. United States of America, 2010. 268 p.
15. Ker M. D.; Chang C. Y. 2002. ESD protection design for CMOS RF integrated circuits using polysilicon diodes, in *Microelectronics Reliability* 42. 863 – 872 p.
16. Voldman, S. H. 2011. *ESD Design and Synthesis*. Vermont: John Wiley & Sons Ltd. 270 p.
17. Semenov, O.; Sarbishaei, H.; Sachdev, M. 2008. *ESD Protection Device and Circuit Design for Advanced CMOS Technologies*. Canada: Springer. 227 p.
18. Štaras, S. 2003. *Puslaidininkinės ir funkcinės elektronikos įtaisai*. Vilnius: Technika. 627 p.

PRIEDAI

A priedas. Pažyma, už perskaitytą pranešimą, XVIII-toje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“.. **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

XVIII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“
ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Tomas Tamulionis

*Elektronikos (T170) ir Mikroelektronikos (T171) jungtinėje
sekcijoje perskaitė pranešimą*

**INTEGRINIŲ GRANDYNŲ APSAUGŲ NUO
ELEKTROSTATINIŲ IŠKROVŲ
PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS**

Mokslo komiteto pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas

dr. Jevgenij Charlamov

2015 m. kovo 20 d.
Vilnius