



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

Dovydas Barauskas

**PLATAUS MATAVIMO RUOŽO REZONANSINIO SLĖGIO
JUTIKLIO SUKŪRIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Prof. dr. Darius Viržonis

PANEVĖŽYS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS
TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas doc. Arūnas Tautkus

(parašas)

(data)

PLATAUS MATAVIMO RUOŽO REZONANSINIO SLĖGIO
JUTIKLIO SUKŪRIMAS IR TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas prof. dr. Darius Viržonis

(parašas)

(data)

Recenzentas

(parašas)

(data)

Projektą atliko Dovydas Barauskas

(parašas)

(data)

PANEVĖŽYS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Dovydas Barauskas

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio sukūrimas ir tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. birželio 1 d.
_____ Panevėžys _____

Patvirtinu, kad mano **Dovydas Barauskas** baigiamasis projektas tema „**Plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio sukūrimas ir tyrimas**“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

201..... ..

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Dovydas Barauskas PME-3

1. Darbo tema:
Lietuvių kalba: Plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio sukūrimas ir tyrimas

Anglų kalba: Wide range resonant pressure sensor fabrication and research

Patvirtinta 201__ m. _____ mėn. _____ d. dekanų potvarkiu Nr. _____

2. Darbo tikslas: *Ištirti talpinių mikromontuojamų ultragarso keitiklių konstrukcijos panaudojimą plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio sukūrimui, pagaminti jo prototipą ir atlikti charakteristikų matavimus*

3. Reikalavimai ir sąlygos: *Jutiklis turi būti paremtas talpinių mikromontuojamų ultragarso keitiklių konstrukcijos principu. Naudojami programavimo paketai MatLab, SolidWorks bei matavimų įranga Agilent 4395A, Agilent N5752A*

4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.

*1. Analitinė dalis
Išanalizuoti talpinio mikromontuojamo ultragarso keitiklio konstrukciją, veikimo principą, panaudojimą rezonansinio slėgio jutiklio sukūrimui.*

*2. Metodologinė dalis
Nustatyti plataus matavimo ruožo slėgio jutiklio paremtą CMUT struktūrą matmenis pasinaudojant baigtinių elementų metodais ir analitiniais skaičiavimo metodais.
Sukurti prototipo gamybos procesą paremtą aukojamojo sluoksnio mikromontavimo technologijomis.
Pagaminti jutiklio prototipą.*

*3. Tiriamoji dalis
Ištirti pagaminto prototipo savybes ir charakteristikas, panaudojimą slėgio matavimams.*

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas _____ (data)

Užduotį gavau: Dovydas Barauskas _____ (data)
(studento vardas, pavardė, parašas)

Vadovas: prof. dr. Darius Viržonis _____ (data)
(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Barauskas, D. Plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio sukūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Darius Viržonis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, Technologijų katedra.

Panevėžys, 2015. 55 psl.

SANTRAUKA

Baigiamajame darbe atliktas talpinių mikromontuojamų ultragarso keitiklių, skirtų atmosferos slėgio matavimui plačiame darbo ruože, modeliavimas, projektavimas, gamyba ir eksperimentiniai tyrimai.

Panaudojant SolidWorks bei MatLab programinę įrangą sudarytas baigtinių elementų modelis, su kuriuo nustatyti jutiklio konstrukcijos parametrai. Aprašyta jutiklio gamybos technologiniai procesai paremti mikromontavimo ir aukojamojo sluoksnio metodais. Naudojant šiuos metodus pagamintas ir pilnai surinktas rezonansinio slėgio jutiklio prototipas. Šio jutiklio matavimams pagaminta speciali kamera bei parašyta programinė įranga pritaikyta matavimams su grandinių analizatoriumi Agilent 4395, mikrovaldikliu STM32, bei dažnomačiu *U3-63*. Atlikus prototipo charakteristikų analizę surasta, jog optimalus darbo taškas pasiekiamas naudojant 50-55 V įtampą. Nustatyta, jog jutiklio vieno iš masyvų jautris yra ne mažesnis nei 240 Hz/kPa.

Raktiniai žodžiai: talpinis mikromontuojamas ultragarso keitiklis, slėgio jutiklis, rezonansinis slėgio jutiklis.

Dovydas, B. Wide range resonant pressure sensor fabrication and research. Masters final project / supervisor prof. dr. Darius Viržonis; Kaunas University of Technology, Panevėžys Faculty of Technology and Business, Department of Technologies.

Panevėžys, 2015. 55 pages.

SUMMARY

This thesis carried out study of capacitive micromachined ultrasound transducers for wide range ambient pressure measurements development, design, fabrication and experimental research.

Finite element models were created using SolidWorks and MatLab software to determine the parameters of the design. Fabrication process using micromachining and sacrificial release methods are described. Using these methods, resonant pressure sensor prototypes were fabricated and fully assembled. To do measurements with the sensor special chamber and software were created for circuit analyzer Agilent 4395A, microcontroller STM32 and frequency meter 43-63. After the prototype performance analysis it was found that optimal operating point is achieved using 55-60 V. It was also determined that one of the sensor array sensitivities is not less than 240 Hz/kPa.

Keywords: capacitive micromachined ultrasound transducers, resonant pressure sensors, sensors.

TURINYS

ĮVADAS	8
1. ANALITINĖ DALIS	10
1.1 Talpinis ultragarso keitiklis	10
1.2 CMUT struktūros panaudojimas slėgio matavimams	11
1.3 Skyriaus apibendrinimas	11
2. METODINĖ DALIS	12
2.1 Rezonansinio slėgio jutiklio paremto CMUT konstrukcija modeliavimas	12
2.2 Konstrukcinių parametrų radimas	14
2.3 Rezonansinio slėgio jutiklio konstrukcija	15
2.4 Aukojamojo sluoksnio ėsdinimo technologija	17
2.5 Rezonansinio slėgio jutiklio prototipo gamybos procesai	17
2.6 Skyriaus apibendrinimas	24
3. TIRIAMOJI DALIS	25
3.1 Plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio tyrimo įranga	25
3.1.1 Testavimo kamera.....	25
3.1.2 Matavimų įranga.....	25
3.1.3 Matavimų programinė įranga	27
3.2 Slėgio jutiklio priklausomybių tyrimas	28
3.2.1 Dažnio priklausomybės nuo įtampos tyrimas.....	28
3.2.2 Rezonansinio dažnio priklausomybės nuo slėgio tyrimas.....	30
3.2.3 Jutiklio jautrio tyrimas.....	31
3.3 Skyriaus apibendrinimas	33
IŠVADOS	34
LITERATŪRA	35
PRIEDAI	37

PAAIŠKINIMAI

CMUT – Talpiniai mikromontuojami ultragarso keitikliai (*Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers* - angl.)

PECVD - plazma aktyvuotas cheminis nusodinimas iš garų (dujų) fazės (*Plasma-enhanced chemical vapor deposition* - angl.)

BEM – baigtinių elementų metodas (*Finite Element Method* - angl.)

RIE – reaktyvusis joninis ėsdinimas (Reactive Ion Etch – angl.)

MEMS – Mikroelektromechaninės sistemos (*Micro-Electro-Mechanical Systems* - angl.)

IVADAS

Mikrosistemos yra viena iš labiausiai plintančių technologijų visame pasaulyje. Jau dabar aplink mus pilna mikro-nano technologijų. Beveik visi mus supantys daiktai turi begalę mikro įtaisų, kompiuteriai, išmanieji telefonai, planšetiniai kompiuteriai jų turi dar daugiau ir neatrodo, jog mikro įtaisų paklausa mažės. Tendencijos numato, jog mikro-nano sistemų ir įvairių mikroelektromechaninių sistemų, tobulėjant technologijoms, daugės, įtaisai mažės, jos bus geresnės kokybės, vartos vis mažiau energijos.

Kadangi mikrosistemų rinka nuolatos auga todėl auga ir poreikis jų konstrukcijų gerinimui bei tobulinimui. MEMS sistemų kūrimas nėra labai paprastas ir ganėtinai brangus, tačiau dėl galimybių juos gaminti dideliais kiekiais gaunama maža vieneto kaina.

Viena iš didžiausių mikro sistemų pritaikymo sričių yra slėgio jutikliai. Jų yra įvairių tipų priklausomai nuo gamybos technologijų ir veikimo principo, tačiau rezonansinių slėgio jutiklių rinkoje nėra daug ir daugelis jų yra skirti matuoti tik tam tikruose atmosferos slėgio ruožuose, pavyzdžiui vakuume lygyje tarp 10^{-6} Pa ir 10^{-4} Pa ar auštuose slėgiuose nuo 100 kPa iki 1500 kPa [1-3]. Plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio rinkoje nėra ir tokio jutiklio sukūrimas turėtų potencialą išvystyti jį iki konkretaus gaminio.

Rezonansinius jutiklius dažniausiai sudaro laisvai judančios mikroelektromechaninės konstrukcijos, kurių virpesių dažnis gali būti lengvai fiksuojamas. Talpinius mikromontuojamus ultragarso keitiklius sudaro tokių laisvai virpančių struktūrų masyvai. Šie keitikliai pasižymi plačiomis konstrukcijos galimybėmis, galima tuo pačiu technologiniu procesu bei mažame plote integruoti skirtingų techninių savybių turinčias CMUT struktūras. Tai leidžia suprojektuoti jutiklį turintį specifines struktūras, kurios galėtų nustatyti slėgį plačiame ruože tiek esant vakuumui ar aukštam slėgiui.

Pirmieji talpiniai ultragarso keitikliai buvo sukurti Stanfordo universitete 1994-1996 metais naudojant aukojamojo sluoksnio technologiją (angl. – sacrificial release), kuri yra naudojama iki šiol [4-6]. Nors gamybos procesas išlieka maždaug panašus, medžiagų parinkimas nulemia keitiklio dizainą, procesų kontrolę bei išėigą [7]. Šis metodas buvo pasirinktas jutiklio prototipo gamybai kaip pigiausias metodas.

Tyrimo objektas – talpiniai mikromontuojami ultragarso keitikliai.

Tyrimo tikslas: sukurti ir eksperimentiškai ištirti didelį automatizavimo potencialą turintį plataus matavimo ruožo rezonansinį slėgio jutiklį ir atlikti jo charakteristikų tyrimus bei analizę.

Tyrimo uždaviniai:

1. Panaudojant SolidWorks bei MatLab programinę įrangą bei modeliavimo įrankius nustatyti plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio konstrukcinius elementų parametrus.
2. Suprojektuoti slėgio jutiklį bei jo pagaminimui reikalingą fotošablonų komplektą.
3. Suprojektuotam CMUT slėgio jutikliui pritaikyti paviršinio mikromontavimo technologiją
4. Panaudojant aukojamojo sluoksnio technologiją pagaminti suprojektuoto rezonansinio slėgio jutiklio prototipą.
5. Eksperimentiškai iširti pagaminto prototipo technines savybes ir atlikti eksperimentus susijusius su rezonansinio slėgio jutiklio parametrų nustatymu.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, eksperimentai.

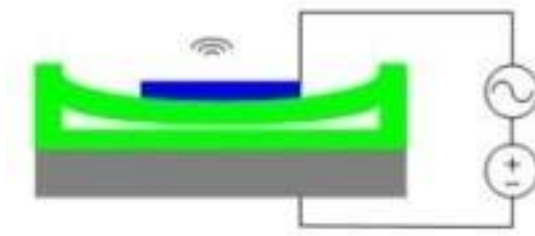
Darbe eksperimentiškai iširtas rezonansinis slėgio jutiklio, grįsto CMUT konstrukcija, koncepcija, kuri gali būti naudojama tolimesnių darbų eigoje vystant komercinę įtaiso versiją.

1. ANALITINĖ DALIS

1.1 Talpinis ultragarso keitiklis

Talpinis mikromontuojamas ultragarso keitiklis yra intensyviai nagrinėjamas daugelio mokslininkų pastaruosius dešimtmečius. Dėl savo patrauklių savybių šiandien jis yra naudojamas daugiausia medicininiam vizualizavimui, skysčio ir dujų debito matavimuose, mikro siurbliuose, cheminiuose ir biologiniuose jutikliuose [8]. Įvairios šio keitiklio savybės gali būti panaudojamos ne tik vaizdų generavimui bet ir kitiems parametrams nustatyti. Būtent šiame darbe apžvelgiama galimybė panaudoti šį keitiklis atmosferinio slėgio nustatymams. Visų pirma apžvelgiama keitiklio konstrukcija ir veikimo principas.

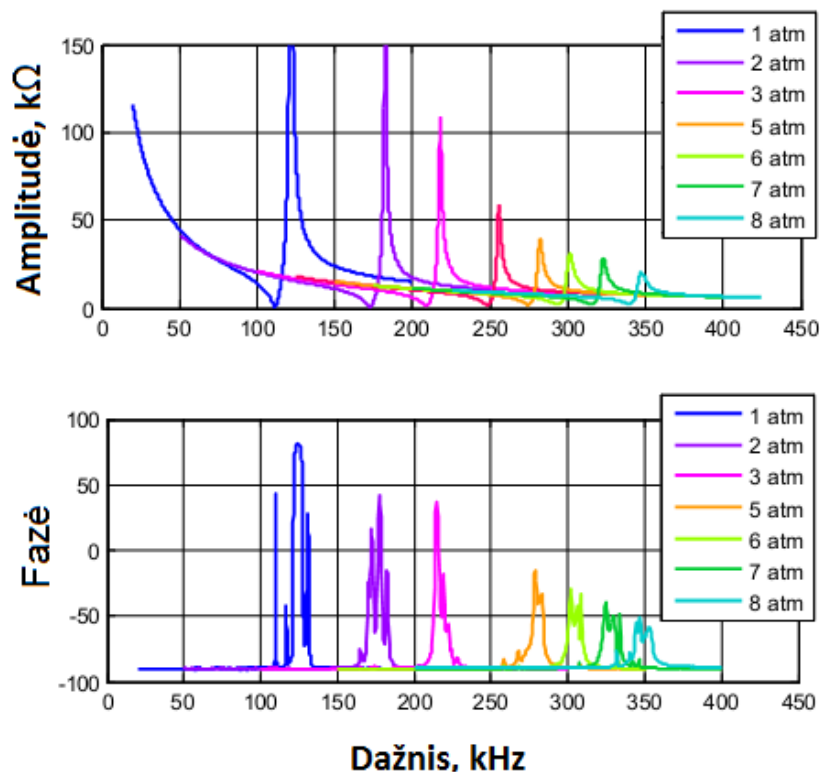
Talpinio mikromontuojamo ultragarso keitiklio veikimas yra pagrįstas kondensatoriaus su viena judančia plokštele veikimu. Ši plokštelė nuo struktūrinio pagrindo yra atskirta vakuomo tarpeliu ir izoliuojančiais laikikliais, dažniausiai iš silicio nitrido ar silicio dioksido. Membranų struktūra gali būti įvairi: disko formos, keturkampė, daugiakampė ar bet kokios kitokios formos. Forma dažniausiai priklauso nuo pritaikymo pobūdžio. Pati CMUT struktūra yra formuojama ant silicio plokštelės, kuri gali būti ir kaip apatinis elektrodas. Tai priklauso ar silicio plokštelė yra legiruota. Prie suformuotų viršutinio ir apatinio elektrodų prijungus įtampą, nepriklausomai nuo poliškumo, membrana įlinksta į pagrindo pusę veikiama elektrostatinių jėgų. Kontroliuojant membranos įlinkį kintančiu elektriniu lauku gaunamas vibravimas ir ultragarsinė banga. Priėmimo režime elektrinis signalas gaunamas dėl ultragarsinės bangos slėgio sukkelto membranos įlinkio ir talpos pokyčio. Taip suformuojamas laike kintantis elektrinis signalas. Talpinio ultragarso keitiklio veikimo principinė schema pavaizduota 1 pav.



1 pav. Talpinio mikromontuojamo ultragarso keitiklio principinė schema [9].

1.2 CMUT struktūros panaudojimas slėgio matavimams

Yra įrodyta, jog keičiantis atmosferos slėgiui talpinio mikromontuojamo ultragarso keitiklio parametrai kinta [10]. Šio pokyčio priklausomybės pavaizduotos 2 pav., kuriame parodyta kaip kinta keitiklio kompleksinės varžos amplitudės ir fazės charakteristikos, aplinkos slėgiui kintant nuo 1 atmosferos iki 8 atmosferų. Nustačius priklausomybę tarp pagrindinio CMUT parametro – rezonansinio dažnio ir slėgio, būtų galima pagaminti keitiklio prototipą, kuris galėtų matuoti atmosferos slėgį plačiame darbo ruože, tiek vakuume esant 10^{-5} Pa atmosferos slėgiui tiek aukštuose slėgiuose iki 800 kPa.



2 pav. CMUT amplitudės ir fazės priklausomybė nuo atmosferos slėgio [10].

1.3 Skyriaus apibendrinimas

Skyriuje trumpai aptariamas talpinis ultragarso keitiklis ir jo veikimo principas. Nustatyta galimybė panaudoti CMUT konstrukciją kuriant plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio prototipą panaudojant jo rezonansines charakteristikas.

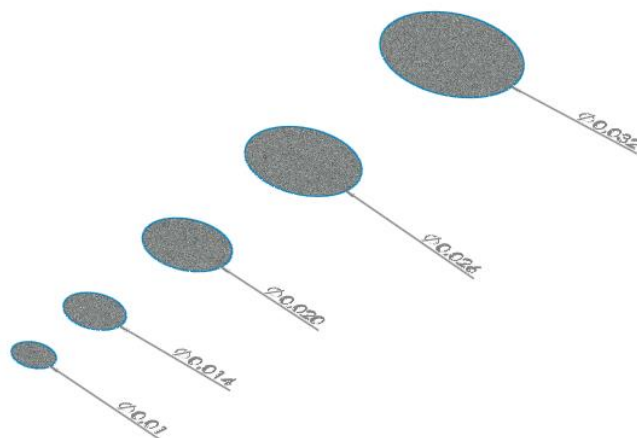
2. METODINĖ DALIS

2.1 Rezonansinio slėgio jutiklio paremto CMUT konstrukcija modeliavimas

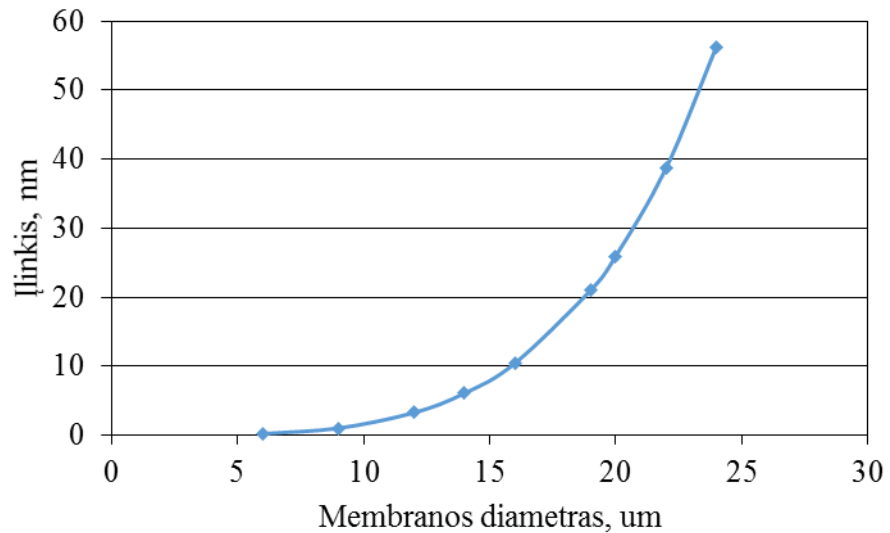
Prieš gaminant mikro-elektromechanines sistemas yra itin svarbu patikrinti kaip sistema naudojantis įvairiais modeliavimo įrankiais, bei naudojant analitinius skaičiavimus. Tik juos atlikus bus galima tikėtis, jog pagaminta struktūra veiks taip kaip buvo numatyta.

Plataus matavimo ruožo slėgio jutiklio prototipo gamybos parametrų nustatymui buvo panaudota SolidWorks (Waltham, MA) programinė įranga, su kuria buvo suprojektuotos įvairių dydžių CMUT membranos (3 pav.) norint pamatyti kokią įtaką joms turės atmosferinis slėgis bei nustatyti kokio dydžio membranų reikės slėgio jutiklio prototipo gamybai.

Panaudojant SolidWorks netiesinio modeliavimo įrankius skirtingų diametrų membranoms priskirti medžiagų savybių parametrai: elastingumo modulis - $1.48 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$; Puasono santykis - 0.1773; tankis - 2329 kg/m^3 . Membranų kraštai nurodomi, jog yra fiksuoti iš visų pusių („*perimeter fixed*“ funkcija) panaudojant modeliavimo įrankius. Tuomet pridedamas išorinis 800 kPa atmosferinis slėgis tolygiai paskirstytas ant membranos paviršiaus. Modelis yra suskaidomas į baigtinius elementus ir naudojant automatinio skaidymo įrankius nustatomas elementų kiekis ir tolerancija. Galiausiai atliekama netiesinis statinis skaičiavimas ir randama įlinkio funkcija, kuri parodo membranos įlinkio priklausomybę nuo slėgio. Taip rasta funkcija aprašanti membranos dydžio ir įlinkio priklausomybę (4 pav.).



3 pav. Baigtinių elementų modelis SolidWorks programoje, atvaizduotos skirtingų dydžių CMUT struktūrų membranos



4 pav. Membranos įlinkis esant 800 kPa atmosferos slėgiui

Pagal literatūros šaltinį [11] maksimalus įlinkis apvalios membranos priimant, jog slėgio pasiskirstymas yra tolygus visame jos plote gali būti aprašomas formule:

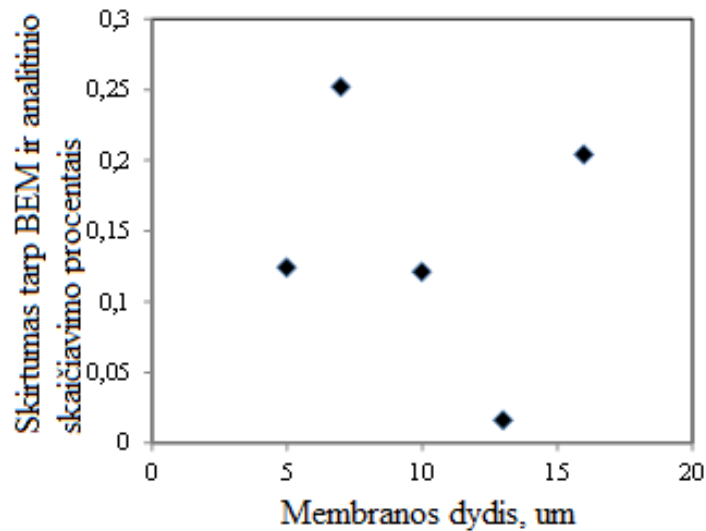
$$\omega_{pk} = \frac{P_0 a^4}{64D}$$

čia: P_0 jėga dėl atmosferinio slėgio, a – membranos spindulys, D – medžiagos standumas
Standumas gali būti paskaičiuojamas:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu)^2}$$

čia: t – membranos storis, E – Jungo modulis, ν – Puasono koeficientas.

Norint palyginti sukurto modelio baigtiniais elementai adekvatumą buvo palyginti rezultatai gaunami skaičiuojant panaudojus pateiktas formules bei SolidWorks programinę įrangą. Rezultatų palyginimas (5 pav.) parodė, jog rezultatai gauti skaičiuojant analitiniu metodu ir panaudojus baigtinių elementų modelį skiriasi ne daugiau nei 0,25 %.



5 pav. Baigtinių elementų modelio ir analitinio modelio rezultatų palyginimas

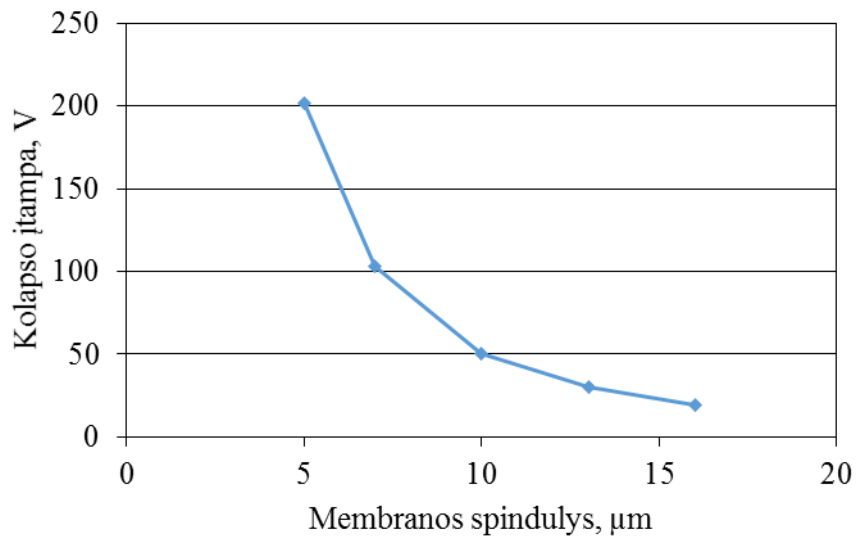
Šis sukurtas baigtinių elementų modelis leidžia nesunkiai rasti įlinkio funkcijas skirtingiems membranų dydžiams kuomet atmosferinis slėgis ant membranos pasiskirsto tolygiai. Šis modelis gali būti naudojamas įvairioms skirtingos formos ir dydžio membranų dizainams.

2.2 Konstrukcinių parametų radimas

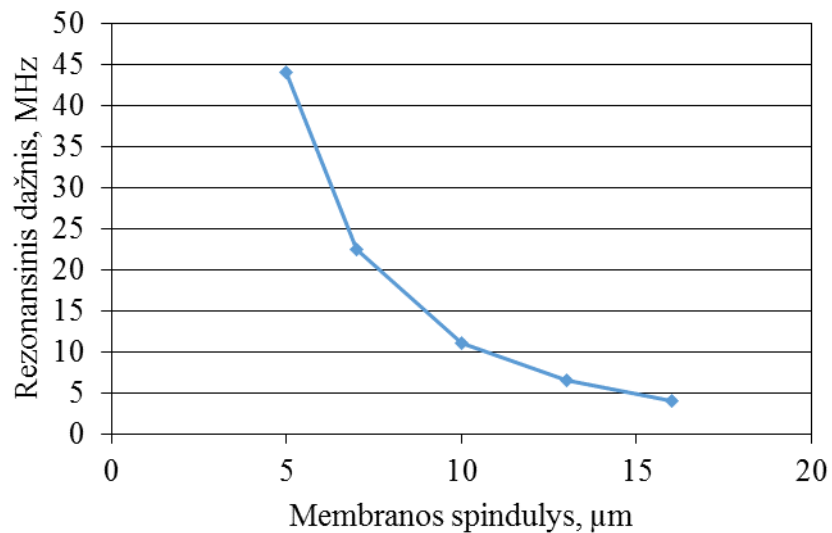
CMUT elektrostatinio keitiklio vienas iš pagrindinių parametų aprašančių jo veikimą yra kolapso įtampa. Analitiškai apskaičiavus membranų su skirtingais matmenimis kolapso įtampos vertes surasta, jog optimalu norint pritaikyti turimą įrangą, parinkti membranų dydžius, kurių kolapso įtampos vertė nėra didesnė negu 60 V (6 pav.).

CMUT slėgio jutiklio konstrukcijos parametų radimui buvo panaudota MatLab Simulink programinė įranga, kurios metu buvo rastos charakteristikos ir parametrai pasinaudojus integralinio skaičiavimo metodais. Sudarytame skaičiavimo algoritme gaunamos charakteristikos apibūdina, kuriuose slėgio ruožuose keitiklio membranų masyvai bus jautriausi ir jų įlinkis bei tuo pačiu talpa tarp elektrodų bus didžiausia prieš pasiekiant kolapsą t.y. membranų pritraukimą prie pagrindo paviršiaus dėl elektrostatiinių jėgų ir Van der Valso jėgų.

Pagal visus skaičiavimo duomenis nuspręsta sukurti rezonansinį slėgio jutiklį su 5 skirtingais membranų masyvais, kurių dydžiai yra 16, 18, 19, 21 ir 23 μm . Parinktas rezonansinis dažnis nuo 15 iki 30 MHz (7 pav.).



6 pav. Kolapso įtampos priklausomybė nuo membranos dydžio



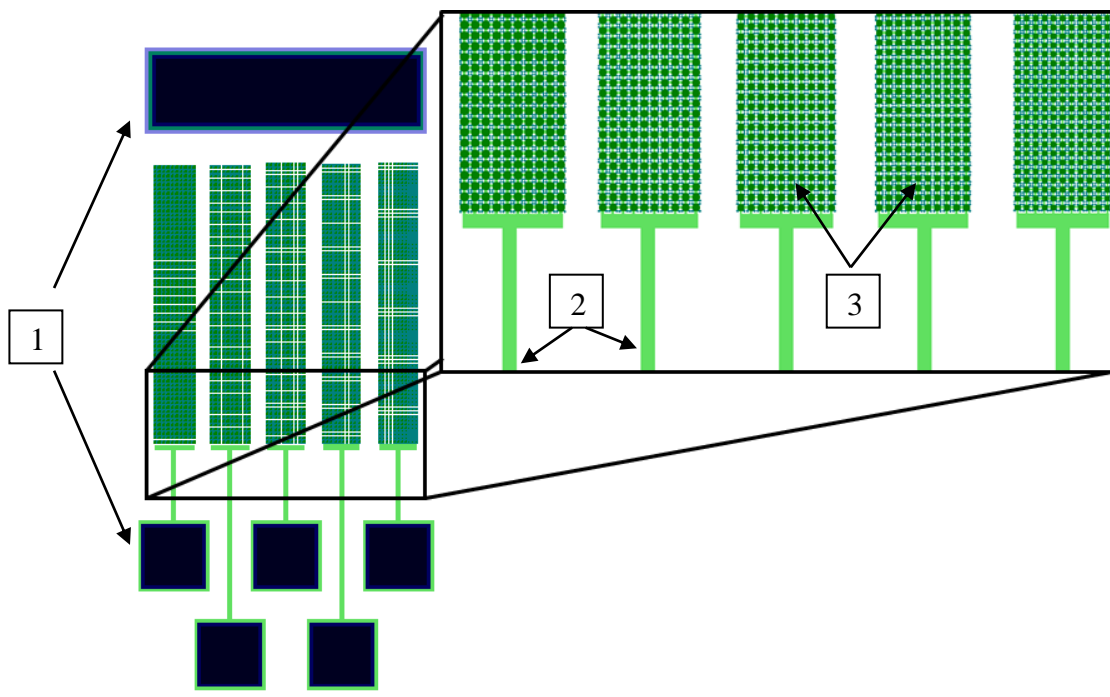
7 pav. Rezonansinio dažnio priklausomybė nuo membranos spindulio

2.3 Rezonansinio slėgio jutiklio konstrukcija

Talpiniai ultragarso jutikliai dažniausiai yra gaminami panaudojant aukojamojo sluoksnio technologiją (angl. sacrificial release). Šis mikromontavimo metodas palyginus su kitais yra pigiausias bei visi reikalingi gamybos procesai yra atliekami mažose temperatūrose, kas leidžia atsirasti galimybei integruoti jutiklį kartu su kuriama elektronika. Šiame skyrelyje pateikiama rezonansinio slėgio jutiklio prototipo konstrukcija, kuri buvo pagaminta naudojant aukojamojo sluoksnio technologiją.

Anksčiau pateikto skyriaus duomenimis buvo nustatyta, jog mano kuriamas rezonansinis slėgio jutiklis turi būti sudarytas iš keleto skirtingas technines savybes turinčių CMUT elementų,

kurie skirti skirtingam slėgio matavimo ruožui, juos suformuojant viename kristale. Lentelėje nr. 1 pateikti parametrai aprašantys membranų masyvų dydžius ir projektuotas matavimų ruožo ribas. 8 pav. parodytos kontaktinės aikštelės, laidininkai bei CMUT masyvai, turintys skirtingo dydžio mikromembranines celes. Tokia jutiklio konstrukcija leistų skirtingiems masyvų elementams reaguoti į tam tikrą slėgio pokyčių ruožą, kuriame jis būtų pats jautriausias. Didesnių membranų masyvas būtų jautrus vakuume esant 10^{-5} Pa atmosferos slėgiui, o mažesnių membranų masyvas – didesnių slėgių ruože esant 800 kPa atmosferos slėgiui.



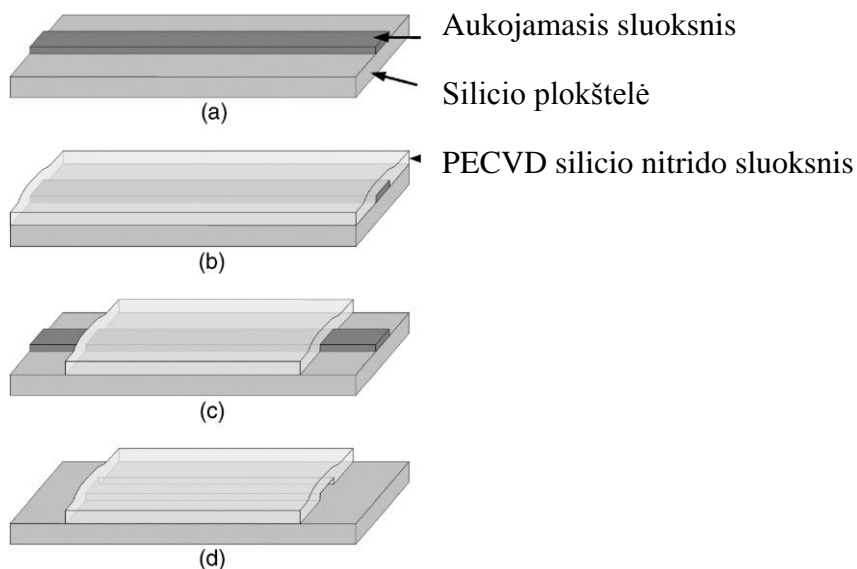
8 pav. Plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio konstrukcija: 1 – kontaktinės aikštelės; 2 – laidininkai; 3 – membranų masyvai

Projektuojamų masyvų dydžiai ir slėgio ruožas

Membranos masyvo numeris	Membranos diametras, μm	Projektuotas slėgių ruožas
1	23	10^{-5} Pa – 1 Pa
2	21	1 Pa – 200 kPa
3	19	200 kPa – 400 kPa
4	18	400 kPa – 600 kPa
5	16	600 kPa – 800 kPa

2.4 Aukojamojo sluoksnio ęsdinimo technologija

Pirmieji talpiniai ultragarso keitikliai buvo pagaminti naudojant aukojamojo sluoksnio technologiją, kuris ir iki šiol yra jų gaminimo standartas [12]. Daugybę skirtingų jo variacijų buvo pristatyta įvairiuose straipsniuose, tačiau naudojo tuos pačius žingsnius ir buvo gaminami panaudojant tuos pačius principus. Vakuumo tarpelis po membrana yra sukuriama dengiant aukojamąjį sluoksnį ar jį užauginant ant nešančiosios plokštelės (9 pav.). Po selektyvaus sluoksnio nusodinimo, kuris yra mūsų membrana, atveriamos ęsdinimo kiaurymės ir aukojamasis sluoksnis yra pašalinamas naudojant ęsdiklį, kuris selektyviai ęsdina po membrana esančią medžiagą, bet visiškai nepaliečia membranos medžiagos. Įvairios medžiagos gali būti naudojamos kaip aukojamasis sluoksnis todėl yra daugybę skirtingų kombinacijų tiek membranos medžiagos tiek aukojamosios medžiagos. Nors gamybos procesas išlieka maždaug panašus, medžiagų parinkimas nulemia keitiklio dizainą, procesų kontrolę bei išeią, todėl yra būtinas jų optimizavimas.



9 pav. Aukojamojo sluoksnio technologijos principinė schema

2.5 Rezonansinio slęgio jutiklio prototipo gamybos procesai

Šiame skyrelyje yra aprašomi CMUT plataus matavimo ruožo slęgio jutiklio prototipo gamybos technologiniai procesai, kurie buvo vykdomi Twente universitete, Olandijoje. Pateikiami visi talpinio mikromontuojamo ultragarso keitiklio gamybos žingsniai, inversinės bei paprastos fotolitografijos tyrimas ir optimizavimas, fotorezistų procesai, kurie leidžia gauti reikiamą kaukės krašto kampą su ruošinio plokštuma, aukojamojo sluoksnio formavimas,

panaudojant cheminių procesų vonias, chromo bei buferizuoto oksido ėsdiklius, aukojamojo ėsdinimo bei kritinio taško džiovinimo tyrimas, kuris leidžia gauti laisvai judėti galinčias struktūras.

Talpinių mikromontuojamų ultragarso keitiklių gamybos procesas prasideda nuo fotošablonų projektavimo, kurie panaudojami inversinės bei paprastos fotolitografijos procesų metu. Iš viso buvo pagaminti 6 fotošablonai, kurių funkcijos yra pateiktos lentelėje nr. 2.

Fotošablonų komplektas

Nr.	Fotošablono paskirtis
1	Pomembraninių tuštumų suformavimui
2	Žemės elektrodo atvėrimui
3	Elektrodų suformavimui
4	Ėsdinimo skylių suformavimui
5	Elektrodų atvėrimui
6	Elektrodų metalizavimui

1 lentelė

Mikromontavimo technologija pradedama panaudojant oksiduotas bei legiruotas ($<0,005 \Omega\text{-cm}$) $330 \mu\text{m}$ storio, 100 mm skersmens n-tipo silicio plokšteles, kurios atlieka apatinio elektrodo vaidmenį. Plokštelė parengiama litografijos procesams plaunant standartiniu RCA ($1:1:5, \text{NH}_4 \text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$, 80°C temperatūroje) tirpalu 10 minučių.

Legiruotos ir oksiduotos silicio plokštelės yra padengiamos inversiniu rezistu ir panaudojant fotošabloną nr. 1 atliekamas litografijos procesas, kurio metu suformuojamos struktūros skirtos oksido ėsdinimui buferizuotame oksidų ėsdiklyje (BHF). Norint, jog struktūros turėtų reikiamą kaukės krašto kampą su ruošinio plokštuma reikia teisingai parinkti tokius parametrus kaip eksponavimo laikas, stabilizacijos laikas. Taip pat turi būti teisingai parinkti ir optimizuoti ryškinimo ir atkaitinimo laikai. Šių parametru nustatymui buvo paimta bandomoji silicio plokštelė ir padengta negatyviniu fotorezistu bei atlikti matavimai, kurių metu nustatyti parametrai, su kuriais gaunamos reikalingos struktūros. Silicio plokštelės skersinis pjūvis po litografijos pavaizduotas 10 pav.



10 pav. Struktūros skersinis pjūvis po litografijos proceso

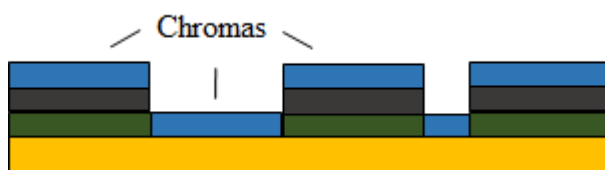
Toliau plokštelės yra pamerkiamos į buferzuotą oksidų ęsdiklį (BHF) tam, kad būtų išęsdintos vietos aukojamojo sluoksnio įterpimui kaip pavaizduota 11 pav.



11 pav. Struktūros skersinis pjūvis po ęsdinimo BHF tirpale

Kitame gamybos žingsnyje yra formuojamas aukojamasis chromo sluoksnis. Chromas turi labai gerą selektyvumą silicio nitridui ir jo paviršius pasižymi mažu šiurkštumu, todėl yra puiki medžiaga aukojamosios technologijos proceso sudarymui.

Aukojamajam sluoksniui sudaryti naudojami plonų sluoksnių nusodinimo metodai, kuriuos galima suskirstyti į dvi dideles grupes: cheminis ir fizikinis nusodinimas iš garų fazės. Šiame etape naudojamas fizikinis nusodinimas iš garų fazės. Nusodinimo metodas yra atliekamas vakuuminėje kameroje, kurioje naudojant skirtingus fizikinius reiškinius kietos medžiagos vakuume yra paverčiamos į atominę būseną. Atomai (dalelės) nesutikdamos pasipriešinimo nukeliauja iki plokštelės paviršiaus, ant jo nusėda ir suformuoja ploną sluoksnį. Sluoksnio savybės labai priklauso nuo pasirinkto metodo ir nusodinimo proceso parametrų: dujų slėgio vakuuminėje kameroje, medžiagos atomų įgyjamos energijos, nuo silicio plokštelės tipo, plokštelės paviršiaus paruošimo ir jos švarumo, taip pat nuo temperatūros. Todėl norint išvengti defektų ir kontaminacijos ant plokštelių paviršiaus, buvo atlikti standartiniai valymo žingsniai SC1 ir SC2 (1:1:5, HCl:H₂O₂:H₂O, 80° C temperatūroje), bei atitinkamai optimizuoti garinimo parametrai. 12 pav. pateiktas struktūros skersinis pjūvis po užgarinimo.



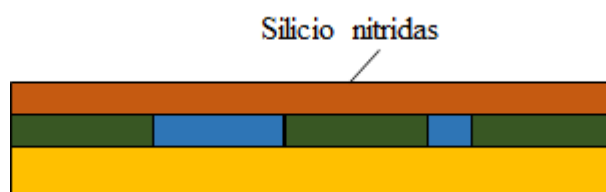
12 pav. Struktūros skersinis pjūvis po chromo nusodinimo

Inversinio rezisto panaudojimas gamybos procesų eigoje reikalingas norint atlikti atkėlimo angl. „lift-off“ procesą. Atkėlimo procedūra pašalina vietas, kuriose chromo sluoksnis nėra reikalingas kaip pavaizduota 13 pav. Gaunamos chromo aukojamojo sluoksnio struktūros apsuptos silicio dioksidu.



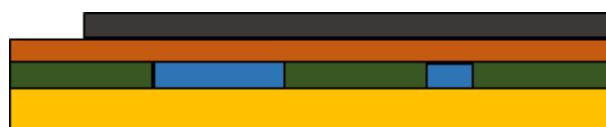
13 pav. Struktūros skersinis pjūvis po atkėlimo procedūros

Kitas CMUT gamybos žingsnis yra plazma aktyvuotas cheminis nusodinimas iš garų (dujų) fazės (angl. PECVD), kurio metu nusodinamas plonas silicio nitrido sluoksnis. Šis sluoksnis yra reikalingas pagrindiniam keitiklio elementui – membranoms, todėl silicio nitrido įtempiai turi būti minimalūs, siekiant išvengti membranos deformacijos ir trūkių. Norint gauti sluoksnį su mažais vidiniais įtempiais tokie parametrai kaip temperatūra, slėgis, dujų srautas, galia bei nusodinimo dažnis buvo nustatyti pagal literatūroje rastas reikšmes, su kuriomis gaunami mažus vidinius įtempius turintys sluoksniai. Pirmiausia su šiais parametrais plonas silicio nitrido sluoksnis buvo nusodintas ant bandomosios plokštelės. Išmatavus šio sluoksnio įtempius po nusodinimo buvo nustatyta, jog vidutiniai šio sluoksnio įtempimai yra apie 90 MPa, kas atitinka literatūroje rastas reikšmes ir tuo pačiu yra puikus sluoksnis CMUT struktūroms. Pernelyg mažo įtempio sluoksnis reikštų membranų atsirėmimą į pagrindą po aukojamojo sluoksnio ėsdinimo, o per didelės reikšmės reikštų, jog gausime įskilusias arba suskilinėjusias struktūras. Po bandomosios plokštelės rezultatų su tokiais pat parametrais buvo nusodintas silicio nitrido sluoksnis ant plokštelių su silicio dioksidu ir chromo struktūromis (14 pav.).



14 pav. Struktūros skersinis pjūvis po PECVD silicio nitrido nusodinimo

Kitame etape buvo reikalinga suderinti pozityvinio fotorezisto parametrus, kad būtų galima atlikti žemės elektrodų atidengimo procesą panaudojant šabloną nr. 2. Buvo optimizuojami tokie parametrai kaip eksponavimo, ryškinimo ir atkaitinimo laikai. 15 pav. pavaizduotas skersinis struktūros pjūvis po litografijos.



15 pav. Struktūros skersinis pjūvis po litografijos

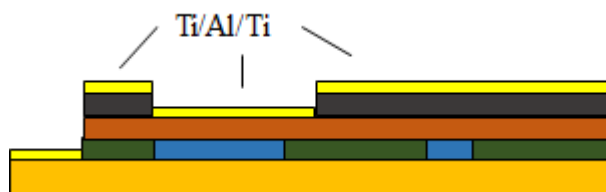
Turint fotolitografijos būdu suformuotas aikšteles reikia padaryti priėjimą prie apatinio elektrodo t.y. panaudoti sauso ėsdinimo procesą, kuris panaikintų silicio nitrido ir silicio dioksido sluoksnius ir atidengtų prisijungimą prie apatinio elektrodo, kuris šiuo atveju yra silicio

paviršius. Tam yra naudojamas reaktyvusis joninis ėsdinimas (angl. RIE – Reactive Ion Etch). Kadangi šis procesas yra gerai optimizuotas ir buvo žinomi ėsdinimo greičiai, reikia tik parinkti laiką, kurio metu proceso eigoje panaikinami sluoksniai, tačiau nėra paliečiamas fotorezistas. 16 pav. pavaizduotas plokštelės skersinis pjūvis po sauso ėsdinimo proceso.



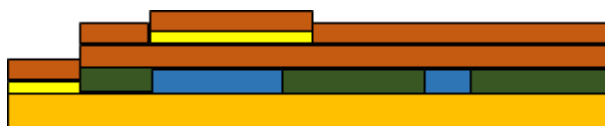
16 pav. Struktūros skersinis pjūvis po reaktyvaus joninio ėsdinimo

Atidengus apatinio elektrodo aikštelės reikia jas metalizuoti bei sudaryti struktūras reikalingas viršutinio elektrodo formavimui, todėl atliekamas fotolitografijos procesas panaudojant fotošablono nr. 3 su inversiniu fotorezistu. Panaudotas fizikinis garinimo metodas vakuumo kameroje, kurio metu padengtas paviršius metalų titano – aliuminio – titano sluoksniais. Titanu apsaugotas aliuminio elektrodas neleidžia jam oksiduotis bei padidina jo adheziją su silicio nitridu nusodintu iš dujų garų (PECVD). 17 pav. pavaizduotas struktūros skersinis pjūvis po plonų metalo sluoksnių garinimo.



17 pav. Struktūros skersinis pjūvis po viršutinio elektrodo sluoksnio suformavimo

Po garinimo procedūros buvo atlikta rezisto atkėlimo procedūra ir suformuotas viršutinis elektrodas, kuris apsaugomas antru PECVD silicio nitrido sluoksniu (18. pav.). Antrasis silicio nitrido sluoksnis yra reikalingas tam, kad viršutinis elektrodas būtų apsaugotas nuo ėsdinimo chromo ėsdiklyje, kuomet yra šalinamas aukojamasis sluoksnis.



18 pav. Struktūros skersinis pjūvis po antrojo PECVD silicio nitrido nusodinimo

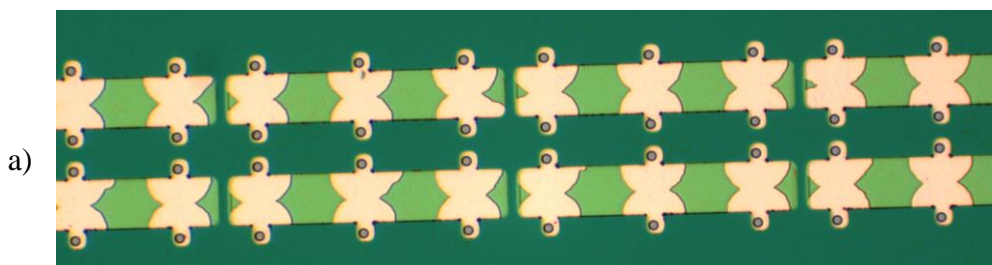
Aukojamojo sluoksnio pašalinimui yra daroma dar viena litografija naudojant fotošablono nr. 4, kurios metu sudaromos struktūros leidžiančios, panaudojant reaktyvųjį joninį

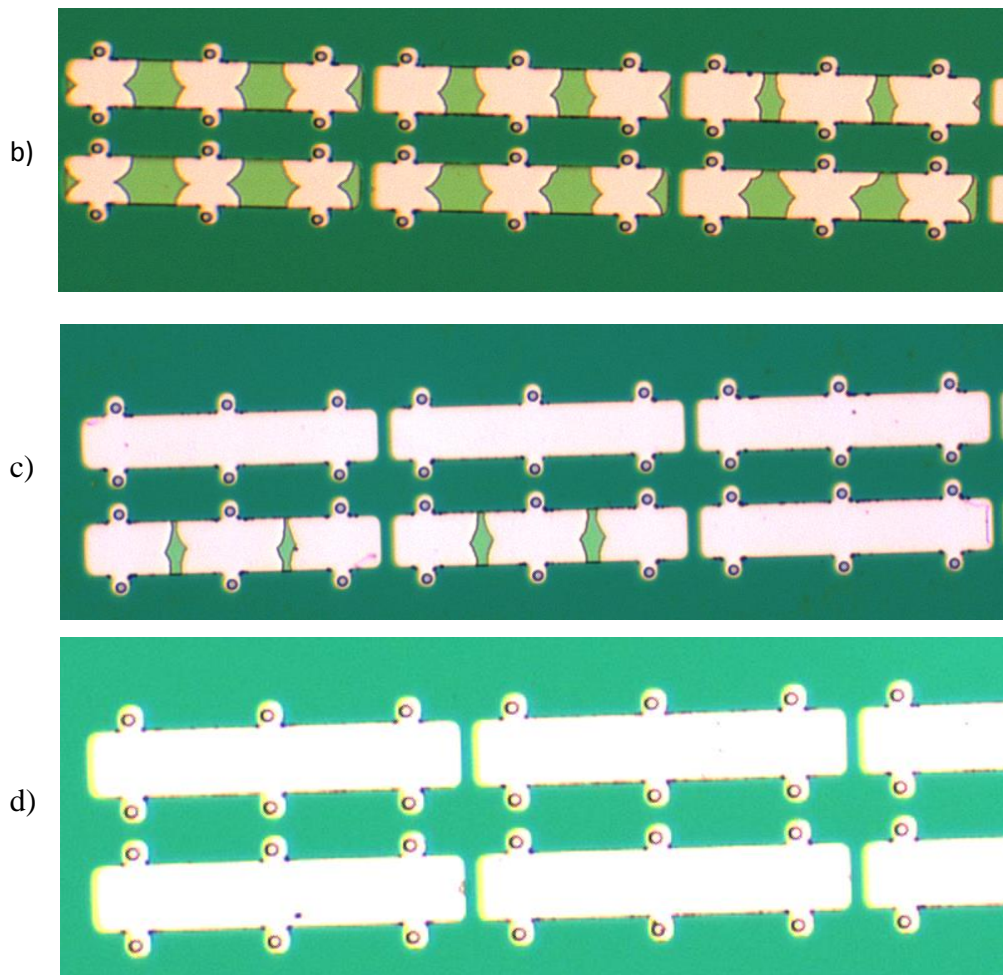
ėsdinimą, atverti skylės pro kurias būtų galima pašalinti chromo aukojamąjį sluoksnį. Fotošablonai suprojektuoti taip, kad kiekviena membrana turi individualias ėsdinimo skylutes ir ėsdinimo kanalus, norint pagreitinti atlaisvinimo procesą. Kadangi reaktyvuoja joniniu ėsdinimu yra šalinami silicio nitrido ir silicio dioksido sluoksniai, ties chromo sluoksniu ėsdinimas sustoja. Struktūros skersinis pjūvis po skylių atvėrimo pavaizduotas 19 pav.



19 pav. Struktūros skersinis pjūvis po litografijos ir ėsdinimo kiaurymių atvėrimo

Kadangi aukojamojo sluoksnio technologija yra pagrįstas CMUT struktūrų gamybos procesas, todėl reikia atsižvelgti į tai, jog šio proceso parametrų parinkimas yra kritiškas. Šio proceso optimizavimui buvo panaudotos bandomosios plokštelės su chromo struktūromis padengtomis plonu silicio nitrido sluoksniu bei padarytomis skylėmis. Dėl geresnio ėsdinimo kiekio vizualizavimo buvo panaudotos stačiakampės struktūros. Bandomoji plokštelė buvo pamerkta į chromo ėsdiklį 6 valandoms. Struktūrų praėsdinimo kiekis buvo fiksuojamas po 1, 2, 4 ir 6 valandų (20 pav.). Pasiremiant ėsdinimo rezultatais buvo nustatyta, jog struktūros atsiveria ir atsilaisvina po 6 valandų, taigi visos gerosios plokštelės su CMUT struktūromis buvo laikomos chromo ėsdiklyje 6 valandas ir 30 minučių tam, kad visiškai būtų išėsdintos visos struktūros paliekant 30 min atsargoje. Kadangi chromo ėsdiklis yra itin selektyvus siliciui ir silicio nitridui tai 6h chromo ėsdiklyje kitų struktūrų nepalietė. 20 pav. a) ir b) dalyje parodytos struktūros po laikymo chromo ėsdiklyje 1 valandą ir po 2 valandų, kaip matome chromas iš lėto yra panaikinamas iš po membraninių ertmių. 20 pav. c) ir d) dalyse matome, jog po 4 valandų ėsdiklyje šiek tiek dar yra likę nepilnai išėsdintų struktūrų, o po 6 valandų matome, jog struktūros pilnai išėsdintos.





20 pav. Aukojamojo sluoksnio ęsdinimas. a) po 1 valandos, b) po 2 valandų, c) po 4 valandų, d) po 6 valandų ęsdinimo chromo ęsdiklyje

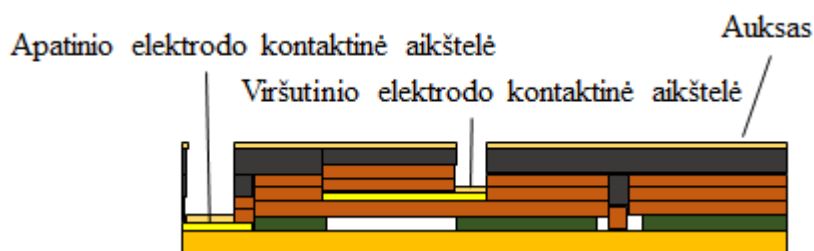
Kitas žingsnis po aukojamojo ęsdinimo yra gauti laisvai judėti galinčias struktūras. Tam yra naudojamas kritinio taško džiovinimo procesas. Šio proceso metu įvyksta skysto CO₂ difuzija į pomembranines ertmes. Atsilaisvinusios ertmės gaunamos be jokių įtempių, nes skystas CO₂ pasiekus kritinį tašką, virsta dujomis. Taip išvengiama bet kokių keitiklio struktūros pažeidimų po aukojamojo sluoksnio ęsdinimo proceso. 21 pav. pavaizduota keitiklio struktūra po šio proceso.



21 pav. Struktūros skersinis pjūvis po aukojamojo sluoksnio ir kritinio taško džiovinimo

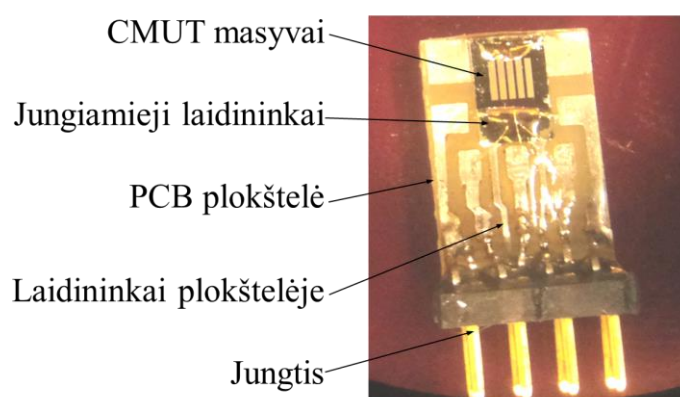
Atvertos ęsdinimo kiaurymės yra užpildomos trečiuoju PECVD silicio nitrido sluoksniu ir atliekama litografija naudojant fotošablono nr. 4. Atveriamos viršutinio elektrodo kontaktinės aikštelės naudojant reaktyvųjį joninį ęsdinimą, bei atliekamas šių aikštelių metalizavimo

fotolitografija panaudojant inversinį fotorezista ir fotošabloną nr. 6. Kontaktinių aikštelių metalizavimui panaudotas auksas, nes jis yra geras laidininkas ir atsparus oksidacijai bei chemikalams (22 pav.).



22 pav. Struktūros skersinis pjūvis po litografijos ir kontaktinių aikštelių metalizavimo

Pagal aukščiau aprašytus procesus pagaminti jutikliai buvo sumontuoti ant spausdinto montažo plokštelių montažinių plokštelių. Termokompresiniu būdu, auksinėmis 30 μm skersmens vielutėmis viršutinio elektrodo aikštelės buvo sujungtos su spausdinto montažo plokštės laidininkais. Jutiklio prijungimui prie matavimo elektronikos buvo sukonstruota speciali jungtis. Pilnai surinktas keitiklis pavaizduotas 23 pav.



23 pav. Pilnai surinktas rezonansinis slėgio jutiklis paruoštas eksperimentams

2.6 Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje buvo aprašytas CMUT membranų baigtinių elementų modelis parodantis pagrindines jų charakteristikas veikiant išoriniam atmosferos slėgiui. Palyginti BEM ir analitinio modelių rezultatai. Surasti pagrindiniai jutiklio konstrukciniai matmenys.

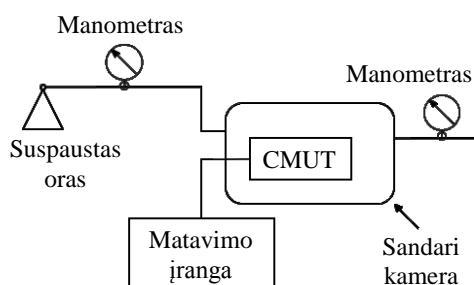
Taip pat šiame skyriuje detalai aprašyta mikromontavimo technologija, kuri buvo panaudota plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio gamyboje. CMUT technologija ir konstrukcija buvo tobulinama atliekant procesų parametrų optimizavimą bei koreguojant dizainą pagal esamas technologines sąlygas.

3. tiriamoji dalis

3.1 Plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio tyrimo įranga

3.1.1 Testavimo kamera

Pagaminto talpinio mikromontuojamo ultragarso keitiklio prototipo savybėms ir charakteristikoms nustatyti buvo sukonstruota sandari kamera su išoriniais prijungimo išvadais, kurioje galima patalpinti jutiklį ir testuoti jo charakteristikas realiu laiku fiksuojant jo charakteristikas. Kameros principinė schema ir konstrukcija pavaizduota 24 pav. Kameroje esančiam slėgiui nustatyti panaudoti manometrai.



a)

b)

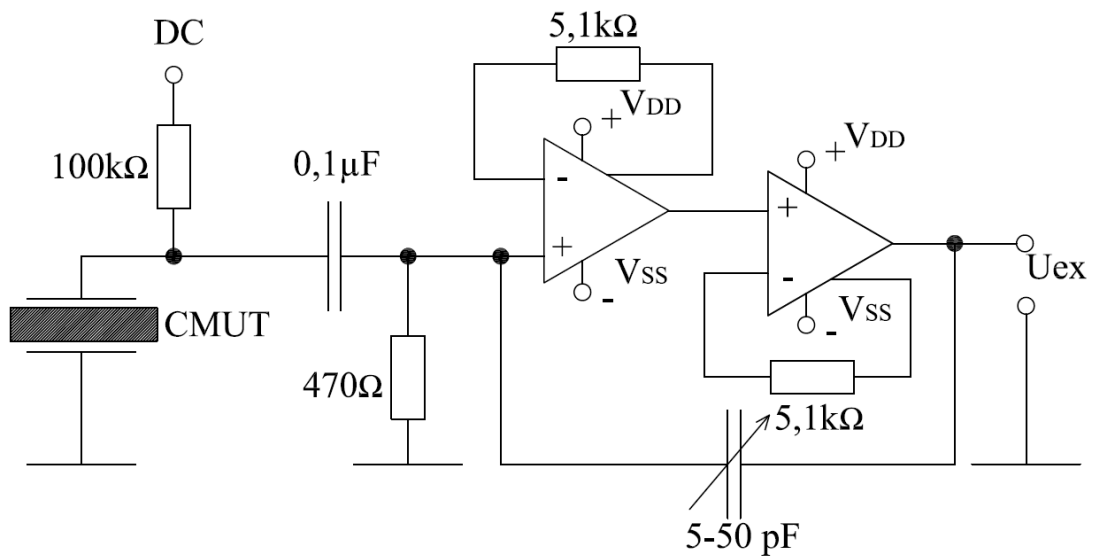
24 pav. Prototipo testavimo kamera: a) principinė testavimo kameros schema, b) testavimo kamera paruošta darbui su slėgio jutikliais

3.1.2 Matavimų įranga

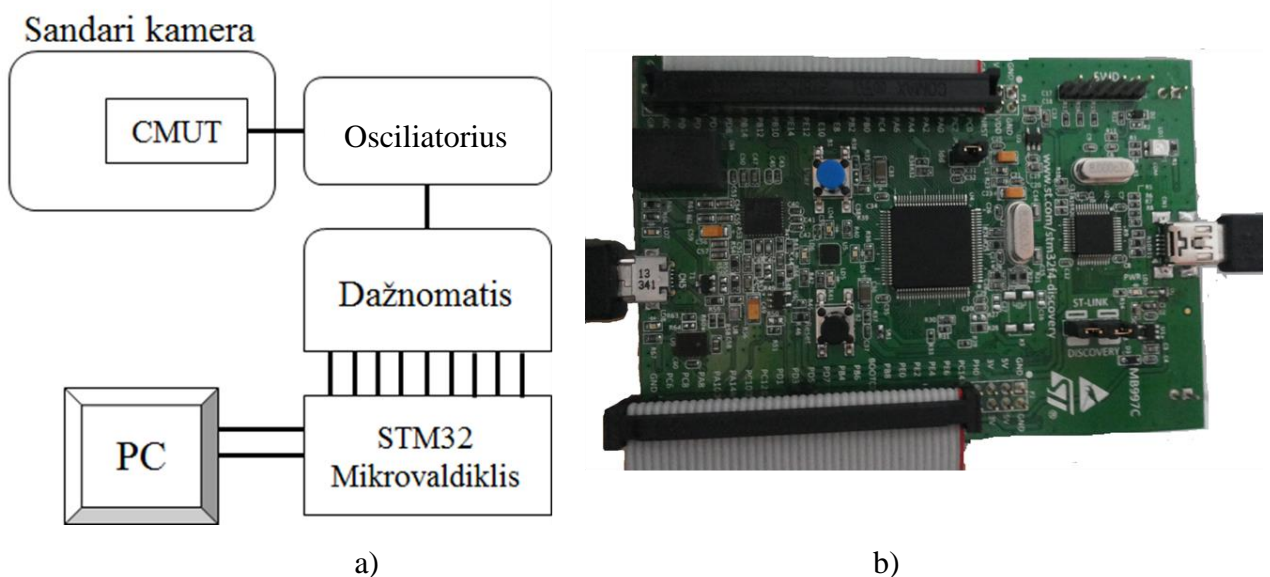
Rezonansinio slėgio jutiklio vienas iš pagrindinių informatyvių signalų yra jo rezonansinis dažnis. Jo matavimui buvo panaudotas grandinių/spektrų/impedanso analizatorius Agilent 4395A bei nuolatinės srovės įtampos šaltinis Agilent N5752. Grandinių analizatoriumi matuojamas dažninis kompleksinio elektromechaninio impedanso spektras. Jutiklio elemento rezonansinis dažnis šiame spektre atskaitomas ties lokaliai išreikštu kompleksinės varžos ekstremumu.

Matavimus atliekant grandinių/spektrų/impedanso analizatoriumi Agilent 4395A gaunamas ganėtinai didelis triukšmo lygis, todėl siekiant sumažinti rezonansinio dažnio matavimo triukšmą, buvo sukurtas osciliatorius, naudojantis CMUT elementą kaip elektromechaninį rezonatorių [13,14]. Šio osciliatoriaus grandinė pateikta 25 pav., kuriame parodyta RC grandinė skirta dreifo mažinimui ir stiprintuvų apsaugai, kad paduodamas BIAS signalas nesugadintų

stiprinančiosios grandies elementų. Du operaciniai stiprintuvai su grįžtamaisiais ryšiais yra skirti signalu stiprinimui, iš kurių pirmasis pasuka signalo fazę 90 laipsnių kampu, kad grįžtamojo ryšio kanale sutaptų signalų fazės. Kadangi CMUT elementas turi savo virpesių dažnį tai yra reikalingas oscilatoriaus suderinimas, kuris atliekamas panaudojant grįžtamajame ryšyje esantį paderinamą kondensatorių. Oscilatoriaus išėjimo dažniui matuoti buvo panaudotas dažnomatis 43-63. Dažnomatnio duomenų nuskaitymui realiu laiku buvo parašyta programa mikrovaldikliui *STM32F400 Discovery*. 26a pav. pavaizduota principinė matavimo įrenginių sujungimo schema, naudota eksperimentų metu. Mikrovaldiklis su sukonstruota jungtimi prijungimui prie dažnomatnio parodytas 26b pav.

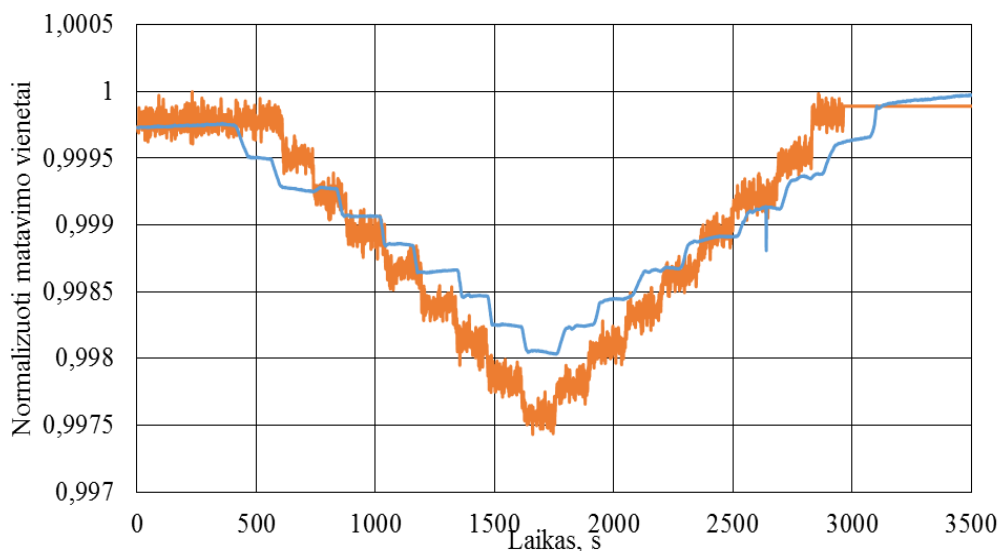


25 pav. Oscilatoriaus grandinė naudojanti CMUT kaip elektromechaninį rezonatorių



26 pav. Testavimo įranga: a – principinė schema naudota matavimams realiu laiku; b – *STM32F400 Discovery* mikrovaldiklis su jungtimis

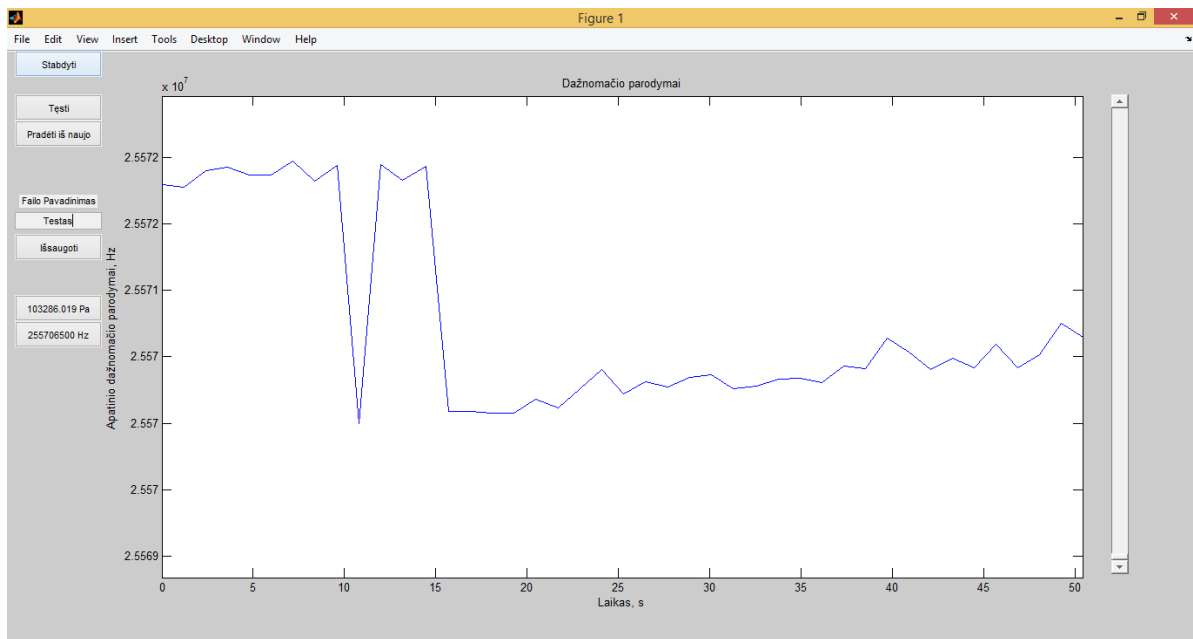
27 pav. pateiktas rezultatas parodantis kaip keitiklio matavimai pasikeitė panaudojant mikrovaldiklį ir oscilatoriaus grandinę. Kaip matome triukšmo lygis žymiai sumažėjo.



27 pav. Triukšmo lygio palyginimas naudojant grandinių analizatorių ir naudojant oscilatoriaus grandinę

3.1.3 Matavimų programinė įranga

Matavimų fiksavimui realiu laiku buvo parašytas programos kodas MatLab programiniu paketu. Ši programa leidžia realu laiku matyti keitiklio dažninę charakteristiką, parodo keitiklio rezonansinį dažnį bei turi galimybę išsaugoti surinktus duomenis. Šios programos langas MatLab aplinkoje pateiktas 28 pav. Programa buvo suderinta kartu su STM32 mikrokontrolerio programine įranga ir elektronika.

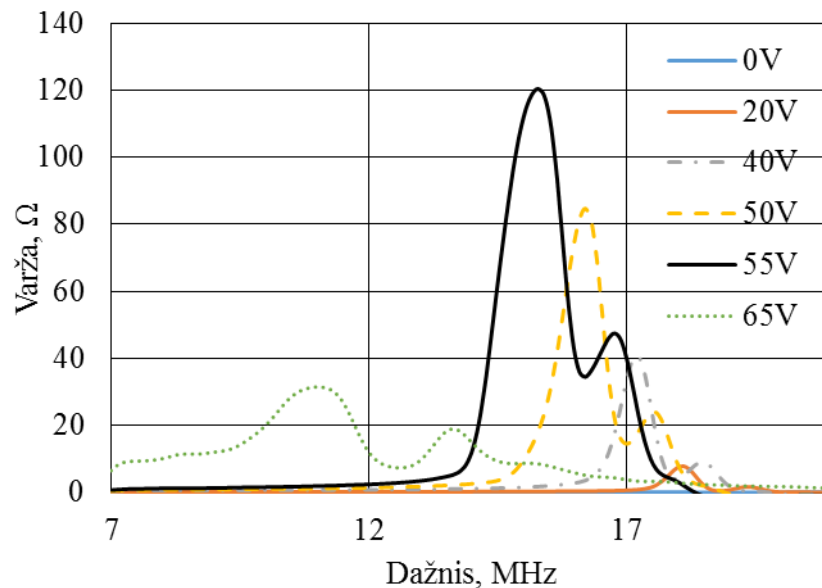


28 pav. Programos langas MatLab aplinkoje realiu laiku rodantis dažnomačio parodymus

3.2 Slėgio jutiklio priklausomybių tyrimas

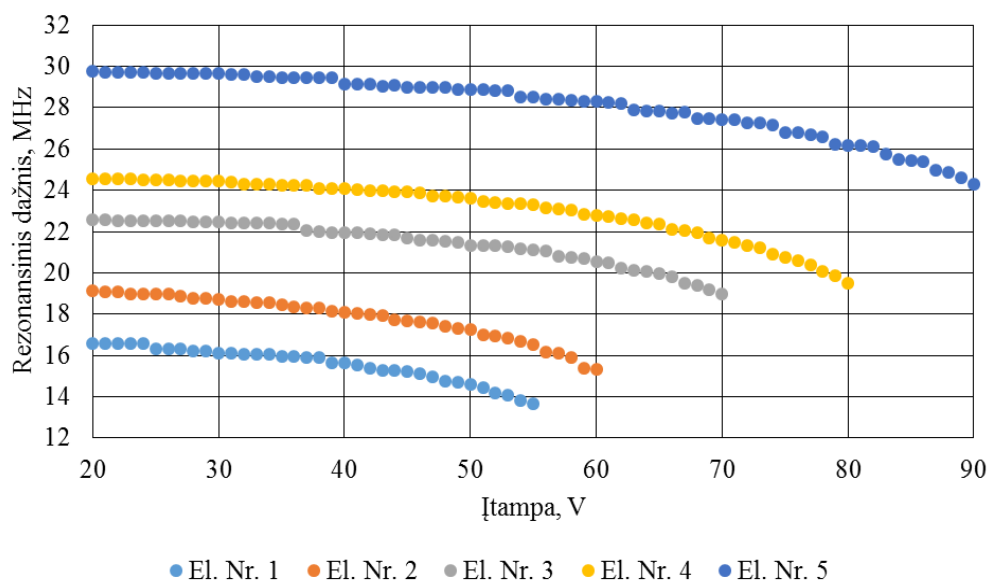
3.2.1 Dažnio priklausomybės nuo įtampos tyrimas

Pagamintą jutiklį prijungus prie Agilent 4395A grandinių/spektra/impedanso analizatoriaus ir išorinio maitinimo šaltinio Agilent N5752A buvo ištyrinėtas membranų masyvų elektromechaninio impedanso realiosios dalies, CMUT veikiant ore, esant skirtingoms priešįtampos vertėms, dažnio priklausomybės. Realiosios varžos dalies dažnių juostoje ryškus padidėjimas leidžia nustatyti CMUT mikromembranų virpesių rezonansines vertes atitinkančias skirtingas įtampas. Ši įtampa prie, kurios matomas maksimumas parodo keitiklio darbo tašką. 29 pav. matome, jog membranų kolapsas įvyksta viršijus 60 V ribą. Esant 90% kolapso priešįtampos vertei membrana gali laisvai virpėti, nes įlinkusi membranos centrinė dalis nesiekia pagrindo. Padidinus priešįtampį centrinė membranos dalis yra pritraukiama prie pagrindo ir keitiklio membranos kolapsuoja, sumažėja elektromechaninio impedanso realiosios dalies varža. Matome, jog optimaliausias darbo režimas yra esant 50-55V priešįtampos vertei.



29 pav. Jutiklio kompleksinis impedansas, esant skirtingai žadinimo įtampai

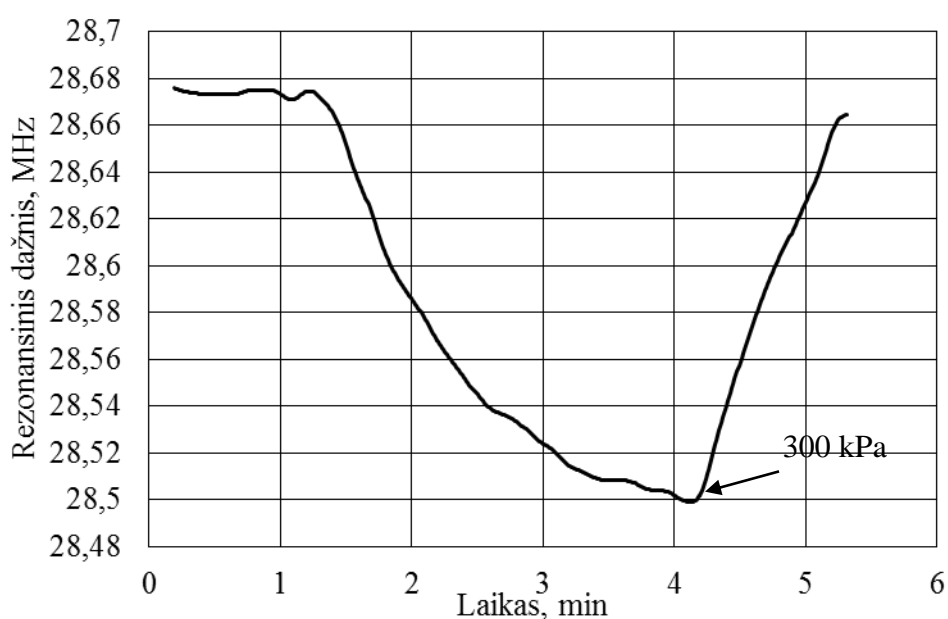
Agilent grandinių analizatoriumi matuojamas dažninis kompleksinio elektromechaninio impedanso spektras. Prototipinio jutiklio elemento rezonansinis dažnis šiame spektre atskaitomas ties lokaliai išreikštu kompleksinės varžos ekstremumu. Buvo atlikti rezonansinio slėgio jutiklio kiekvieno masyvo matavimai rezonansinio dažnio priklausomybės nuo įtampos, kurie pateikti 30 pav. Gauti duomenys parodė, jog rezonansinis dažnis keičiasi 2 MHz ribose ir įtampos vertė, su kuria gaunamas didžiausias signalas, yra 50-55 V.



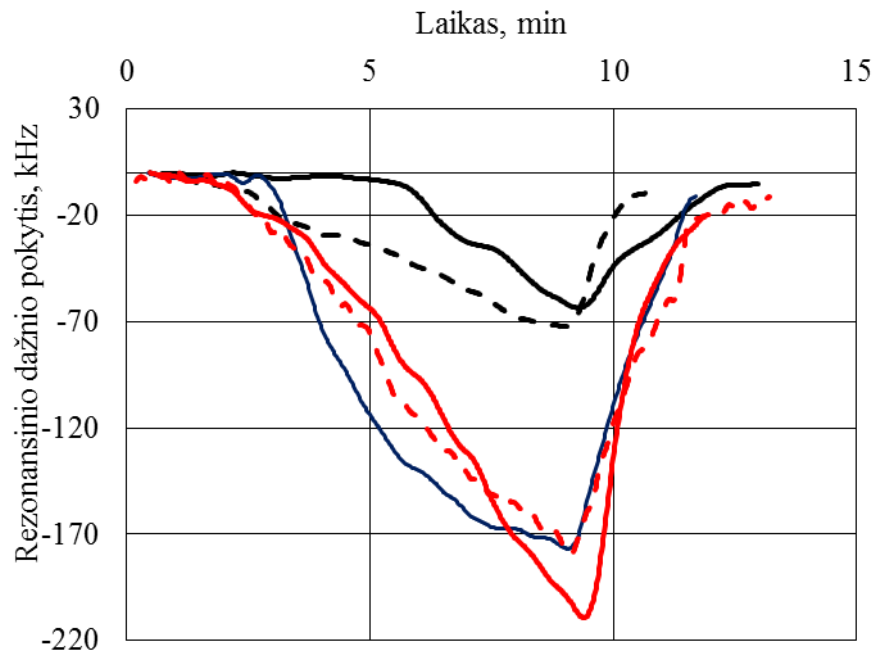
30 pav. Visų elementų rezonansinio dažnio priklausomybės nuo įtampos

3.2.2 Rezonansinio dažnio priklausomybės nuo slėgio tyrimas

Rezonansinio dažnio priklausomybės nuo slėgio pirmieji bandymai buvo atliekami prijungus vieną iš slėgio jutiklio elementų prie matavimo įrangos ir patalpinus į kamerą, kurioje buvo didinamas atmosferinis slėgis nuo 0 kPa iki 300 kPa (manometrų parodymai nuo 0 bar iki 3 bar) ir mažinamas. Šio eksperimento rezultatas pateiktas 31 pav. iš kurio matome, jog jutiklio rezonansinis dažnis sumažėjo 180 kHz. Šis eksperimentas buvo pakartotas individualiai su visais 5-iais slėgio jutiklio membranų masyvų elementais. Kaip matome iš gautų rezultatų (32 pav.), didesnes membranas turintis jutiklio elementas pasižymi didesniu jautriu tokiam pačiam slėgio pokyčiui, o mažesnių membranų masyvas turėtų būtų jautresnis didesnių slėgio pokyčių ruože.



31 pav. Jutiklio rezonansinio dažnio kitimas realiu laiku didinant slėgį kameroje



32 pav. Rezonansinio dažnio kitimas išmatuotas realiame laike didinant slėgį. Matuota su Agilent 4395A grandinių analizatoriumi: (- - -) – elem. Nr. 1; (—) – elem. Nr. 2; (—) – elem. Nr. 3; (- - -) – elem. Nr. 4; (—) – elem. Nr. 5

31 pav. ir 32 pav. pateikti duomenys po skaitmeninio filtravimo pritaikius Gauso lango funkciją bei panaudojant sąsūkos MatLab algoritmą, kuris naudojamas skaitmeninių signalų apdorojime. Signalą po lango funkcijos galima aprašyti taip:

$$s_w(n) = s(n) \cdot w(n)$$

čia: $s(n)$ – signalo funkcija; $w(n)$ – Gauso funkcija; $s_w(n)$ – filtruota funkcija.

3.2.3 Jutiklio jautrio tyrimas

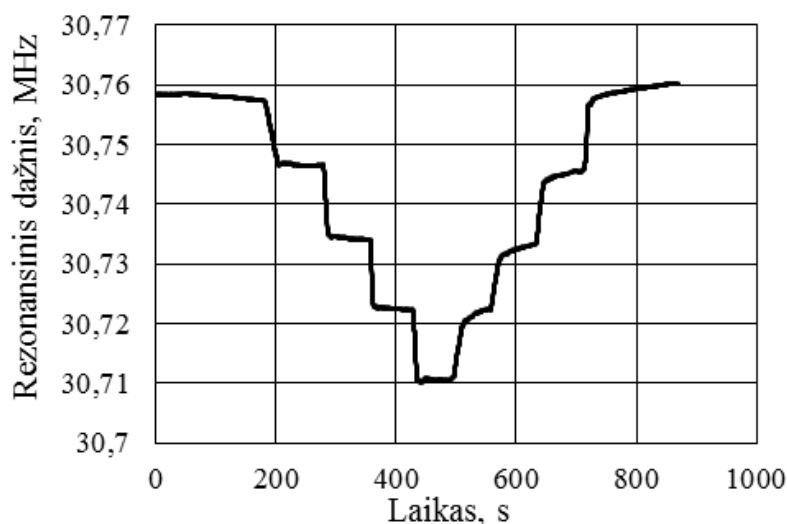
Panaudojant osciliatoriaus grandinę ir STM32 mikrovaldiklį buvo atlikti eksperimentai, kurių metu nustatytas vieno iš keitiklio masyvių jautris atmosferos slėgiui.

Eksperimentų eiga:

- CMUT rezonansinis slėgio jutiklis patalpinamas į sandarią kamerą ir prijungiamas prie matavimo įrangos;
- kameroje didinamas slėgis kol pasiekama 25 kPa;
- matuojamas jutiklio rezonansinis dažnis;
- padidinamas slėgis per 25 kPa;
- kartojami slėgio didinimo ir rezonanso matavimo žingsniai kol pasiekama 200 kPa;

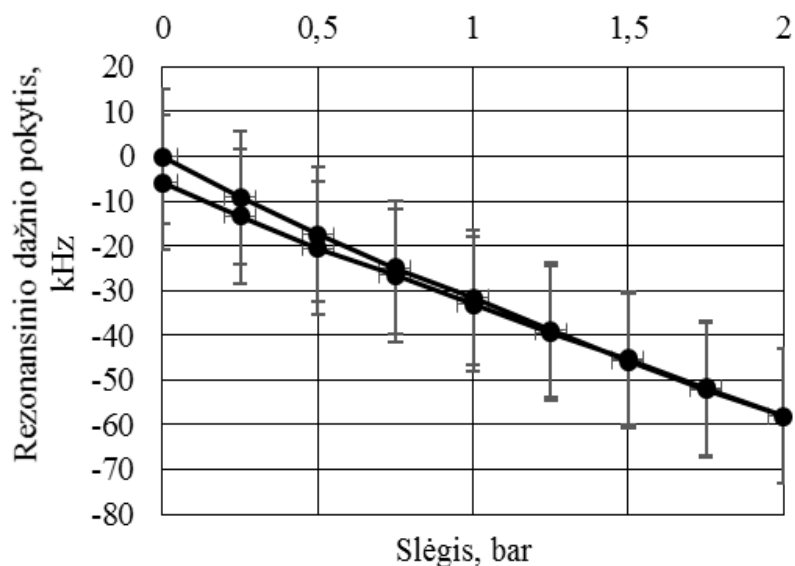
- mažinamas slėgis per 25 kPa;
- kartojami slėgio mažinimo ir rezonanso matavimo žingsniai kol grįžtame į pradinę būseną.

Taip gaunama rezonansinio dažnio priklausomybės nuo slėgio charakteristika, kuri buvo panaudota eksperimentiškai nustatyti jutiklio jautrio funkciją. Vieno iš slėgio jutiklio masyvų parodymai fiksuoti realiu laiku pateikti 33 pav.



33 pav. Vieno iš slėgio jutiklio masyvų parodymai fiksuoti realiu laiku

Šis eksperimentas su slėgio kitimu buvo atliktas su keliais skirtingais jutikliais naudojant mažiausių membranų masyvus išnaudojant tik vieną darbo ruožą, nes visų elementų matavimams osciliatoriaus darbo ruožas buvo per siauras. 34 pav. parodyta jutiklių rezonansinio dažnio priklausomybė nuo slėgio. Kaip matome, jutiklių rezonansinis dažnis tiesiškai priklauso nuo slėgio esančio kameros viduje. Esant maksimaliam 200 kPa (2 bar) slėgio pokyčiui, nustatytas nuo 48 iki 71 kHz rezonansinio dažnio sumažėjimas. Tai parodo, jog vieno iš jutiklio celių masyvo jautris yra nuo 240 iki 355 Hz/kPa.



34 pav. Jutiklio charakteristikos: a – vieno iš jutiklių parodymai fiksuoti realiu laiku; b – jutiklių rezonansinio dažnio pokyčio priklausomybė nuo slėgio

3.3 Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje aprašyti signalų detekcijos principai, testavimo kameros konstrukcija, signalų matavimo elektroniniai grandynai. Sukurta osciliatoriaus grandinė, su kuria, panaudojant mikrovaldiklį STM32 bei MatLab programinę įrangą, buvo atliktas jutiklio testavimas ir techninių savybių matavimai.

Buvo nustatinėjama jutiklio dažninės priklausomybės nuo įtampos ir slėgio. Gauti rezultatai parodė, jog CMUT konstrukcija pagrįsto slėgio jutiklio darbo taškas, kuomet gaunamas didžiausias signalas, yra ties 50-55 V.

Atlikus eksperimentinius tyrimus sukonstruotoje kameroje keičiant slėgį, nustatyta, jog jutiklio rezonansinis dažnis mažėja proporcingaikintant slėgiui ir gaunama tiesinė charakteristika.

IŠVADOS

1. Plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio koncepcija yra labai patraukli, nes dabartinėje rinkoje esančių rezonansinių slėgio jutiklių darbo ruožas yra ribotas.
2. Atlikus talpinio mikromontuojamo ultragarso keitiklio analizę surasta galimybė sukurti plataus matavimo ruožo slėgio jutiklį panaudojant rezonansines jo charakteristikas.
3. Atlikus CMUT keitiklio mikrostruktūrų analizę buvo surasti kritiniai matmenys, kurie panaudoti rezonansinio slėgio jutiklio konstrukcijos sudarymui.
4. Buvo sudaryta slėgio jutiklio, paremto CMUT konstrukcija, gamybos proceso eiga bei pagamintas prototipas panaudojant mikromontavimo technologijas aukojamojo sluoksniu metodu.
5. Buvo pagaminta speciali testavimo kamera su išoriniais išvadais leidžianti keisti slėgį nuo 1 bar iki 8 bar, kurioje gali būti patalpinamas slėgio jutiklis ir atliekami experimentiniai tyrimai.
6. Buvo sukurta signalo nuskaitymo elektronika, elektroniniai grandynai, įranga, parašyti programos kodai, kurie leidžia realiu laiku fiksuoti jutiklio dažnines charakteristikas bei jas išsaugoti.
7. Testuojant rezonansinio slėgio jutiklio prototipą, buvo surastos dažnio nuo įtampos priklausomybės, kurios parodė optimalų darbo tašką esant 50-55 V įtampai.
8. Atlikus pirmuosius matavimus grandiniu analizatoriumi nustatyta, jog pagaminto plataus matavimo ruožo rezonansinio slėgio jutiklio masyvai su skirtingo dydžio membranomis į tuos pačius slėgio pokyčius reaguoja skirtingai, t. y. didžiausių membranų masyvo rezonansinio dažnio pokytis į tą patį slėgį yra didžiausias, o mažiausių – mažiausias. Vadinasi didžiausias membranas turintis masyvas bus jautresnis mažų slėgių ruože, o mažiausias – didelių.
9. Atlikti eksperimentiniai tyrimai sandarioje kameroje panaudojant osciliatoriaus grandinę su mikrovaldikliu ir dažnomačiu parodė, jog šių slėgio jutiklių vieno iš membranų masyvų rezonansinio dažnio charakteristika nuo slėgio priklauso tiesiškai ir kintant slėgiui nuo 0 Pa iki 200 kPa rezonansinis dažnis sumažėja atitinkamai nuo 0 kHz iki 48-71 kHz. Tai reiškia, jog jutiklio masyvo jautris yra nuo 240 Hz/kPa iki 355 Hz/kPa.
10. Sukonstruotoje kameroje toliau bus atliekami eksperimentiniai tyrimai, kurie galėtų pasakyti ar tokie keitikliai gali būti panaudojami įvairių dujų detekcijai. Toliau bus tobulinama matavimų bei programinė įranga vystant jutiklį iki komercinio varianto.

LITERATŪRA

1. TERPS (Trench Etched Resonant Pressure Sensor). Prieiga per internetą:<<http://www.gemeasurement.com/se>> [žiūrėta: 2015-03-23].
2. KELLER Sensors. Prieiga per internetą:<www.keller-pressure.co.uk> [žiūrėta: 2015-03-23].
3. Resonant Pressure Transducers. Prieiga per internetą: <<http://veronics.com/products/pres>> [žiūrėta: 2015-03-23].
4. **M. Mikolajūnas, R. Kaliasas, M. Andrulevičius, V. Grigaliūnas, J. Baltrušaitis, D. Viržonis**, A study of stacked PECVD silicon nitride films used for surface micromachined membranes // *Thin Solid Films*, 23, 516, 10/1/, p. 8788-8792.
5. **I. Morkvenaite-Vilkonciene, D. Virzonis, G. Vanagas, V. Krikscikas**, Operating point of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers with Sub-structural Elements // *Electronics and Electrical Engineering*, 9, 18, p.
6. **M. Mikolajūnas, J. Baltrušaitis, V. Kopustinskas, G. Vanagas, V. Grigaliūnas, D. Viržonis**, Plasma etching of virtually stress-free stacked silicon nitride films // *Thin Solid Films*, 19, 517, p. 5769-5772.
7. **X. C. Jin, I. Ladabaum, B. T. Khuri-Yakub**, The microfabrication of capacitive ultrasonic transducers // 1, p. 437-440.
8. **Oralkan, O.; Hansen, S.T.; Bayram, B.; Yaralioglu, G.G.; Ergun, A.S.; Khuri-Yakub, B.T.**, "High-frequency CMUT arrays for high-resolution medical imaging," *Ultrasonics Symposium, 2004 IEEE* , vol.1, no., pp.399,402 Vol.1, 23-27 Aug. 2004, doi: 10.1109/ULTSYM.2004.1417747
9. Operating Principles of CMUTs, 2013 [interaktyvus] [žiūrėta 2013-05-31]. Prieiga per internetą: <http://www-kyg.stanford.edu/khuriyakub/opencms/en/research/cmuts/Principles/index.html>
10. **Min-CHieh Ho, Mario Kupnik, Kwan Kyu Park, Kristian Eckhoff, Butrus T. Khuri-Yakub**, Wide pressure range operation of air-coupled CMUTs, Fluenta AS, Bergen, Norvegija, IEEE Ultrasonics Symposium 2012.
11. **Ira. O. Wygant, Mario Kupnik, Burus T. Khuri-Yakub**, "Analytically Calculating Membrane Displacement and the Equivalent Circuit Model of a Circular CMUT Cell" IEEE, 2008, International Ultrasonics Symposium Proceedings, pp.
12. **M. I. Haller, B. T. Khuri-Yakub**, A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1, 43, p. 1-6.

13. **E. Sapeliauskas, G. Vanagas, D. Barauskas, D. Viržonis**, Capacitive Micromachined Ultrasound Transducer as a Sensor in Microfluidic Environment // *Sensor Letters*, 11, 12, p. 1597-1599.
14. **H. J. Lee, K. K. Park, M. Kupnik, B. T. Khuri-Yakub**, Functionalization layers for CO₂ sensing using capacitive micromachined ultrasonic transducers // *Sensors and Actuators B: Chemical*, 0, 174, 11, p. 87-93.

PRIEDAI

1. PRIEDAS

Gamybos procesų eiga bei įranga naudota Twente universitete Olandijoje CMUT struktūrų gamybai, receptų kodai.

100mm Silicio P/B <100> plokštelė su 300nm Terminiū SiO₂ Standartinis valymas (clean1001)



1

Padengimas rezistu Ti35 ES (reversinis procesas) (lith140)



2

Eksponavimas ir ryškinimas (lith140) Fotošablonas #1



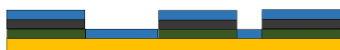
3

Ėsdinimas SiO₂ (BOE/BHF) (etch1020)



4

Chromo garinimas 100nm (film128)



5

Atkėlimas (lith144)



6

1st Si_xN_y sluoksnis 250nm, PECVD Oxford 80, vidiniai įtempiai 40-60 MPa (film133)



~20 min
temperatūra ~300°ST/STC PECVD receptas:
HF 13.56MHz ~5min
MF 13.56MHz+380kHz

7

Padengimas Oir 907-17 pozityviniu rezistu (lith1002)



8

Eksponavimas ir ryškinimas (lith1002) Fotošablonas #2



9

Įsadinimas SiO₂ ir Si_xN_y su RIE, Si_xN_y su CHF3-02 (Tetske) (etch193)



10

Rezisto šalinimas (lith1142) (su metalais)



11

Dengimas Ti35 ES (reversinis procesas) (lith140)



12

Eksponavimas ir ryškinimas (lith140)
Fotošablonas #3



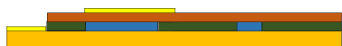
13

Elektrodų formavimas Al/Ti/Al 25/150/25nm
garinimu BAK 600 (film127)



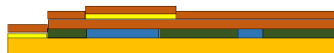
14

Atkėlimas (lith144)



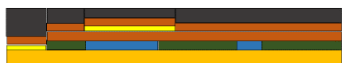
15

2nd Si_xN_y sluoksnio formavimas 100nm,
PECVD Oxford 80, (film133)



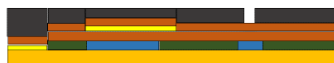
16

Dengimas Oir 907-17 pozityviniu rezistu
(lith1002)



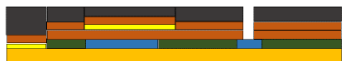
17

Eksponavimas ir ryškinimas (lith1002)
Fotošablonas #4 IW



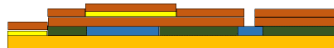
18

Ėsdinimas Si_xN_y su RIE, SiO₂, Si_xN_y
sluoksnių su CHF3-02 (Tetske) (etch193)



19

Rezisto pašalinimas (lith1142)



20

CR-7 aukojamojo sluoksnio atlaisvinimas ir
kritinio taško džiovinimas (etch1023) (clean126)



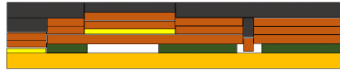
21

3rd Si_xN_y sluoksnio padengimas 300nm,
PECVD Oxford 80, (film133)



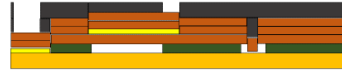
22

Dengimas Oir 907-17 pozityviniu rezistu (lith1002)



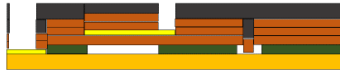
23

Eksponavimas ir ryškinimas (lith1002) Fotošablonas #5



24

Ėsdinimas Si_xN_y su RIE SiO_2 , Si_xN_y sluoksniu naudojant CHF₃-02 (Tetske) (etch193)



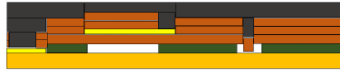
25

Rezisto panaikinimas (su metalais) (lith1142)



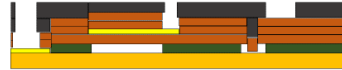
26

Dengimas Ti35 ES (reversinis procesas) (lith140)



27

Eksponavimas ir ryškinimas (lith140) Fotošablonas #6



28

Aukso garinimas 100-120nm BAK 600 (film144)



29

Atkėlimas (lith144)



30

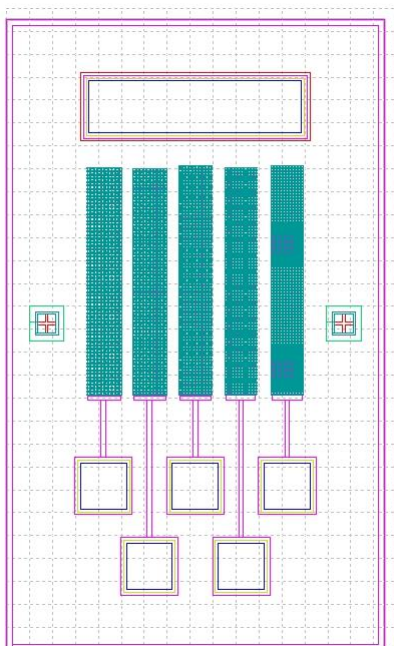
Pjaustymas (back101)



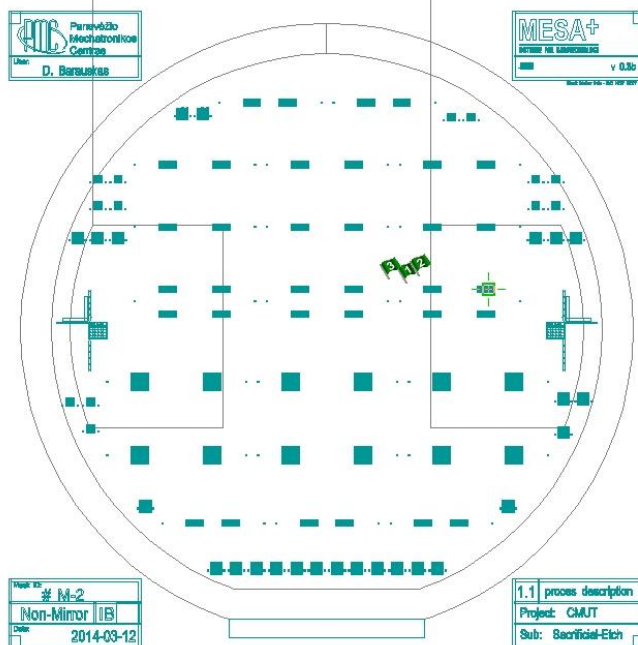
31

2. PRIEDAS

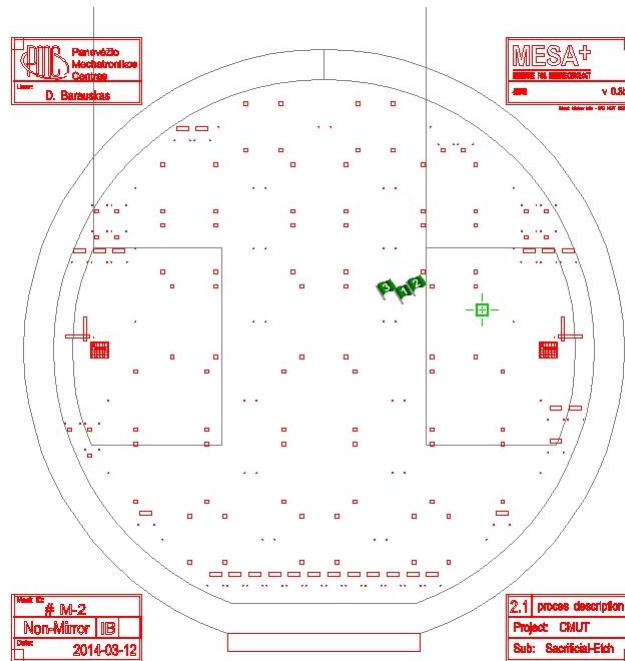
Fotošablonų kompleksas. Slėgio jutiklis (sudėti visi sluoksniai, sluoksnių spalvos pagal šablono spalvą):



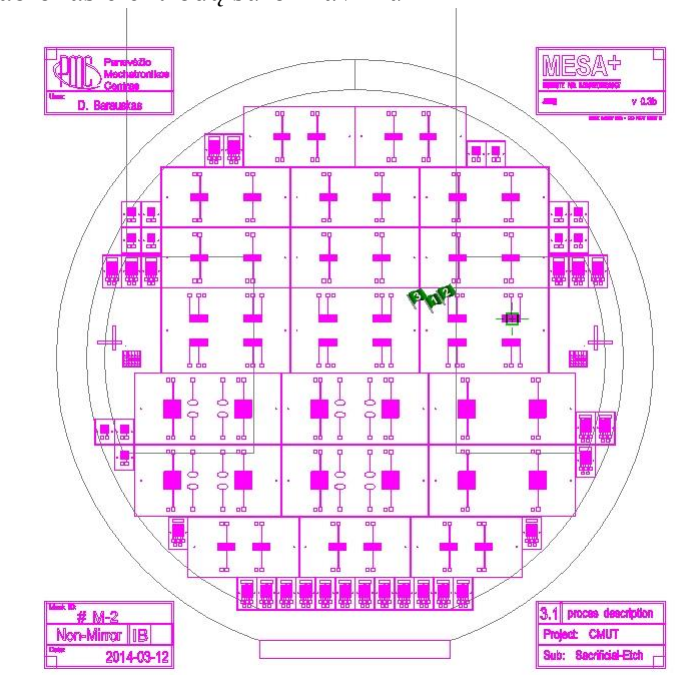
1. Šablonas pomembraninių tuštumų suformavimui:



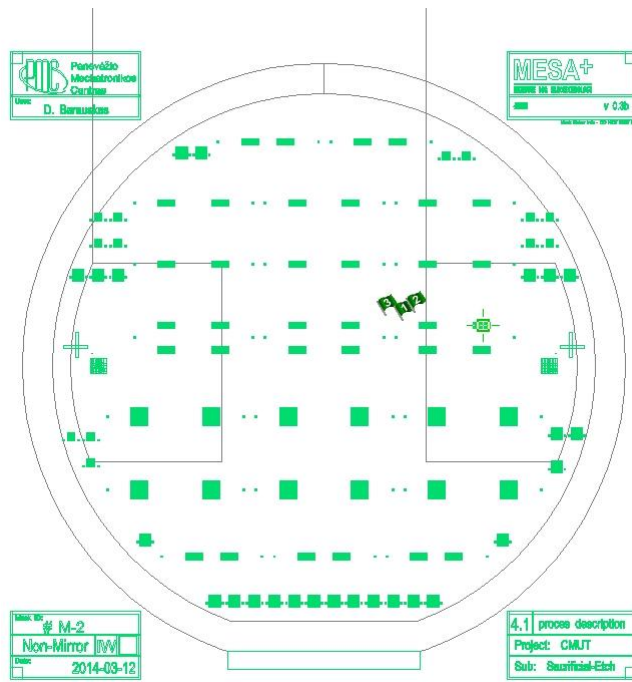
2. Šablonas žemės elektrodo atvėrimui



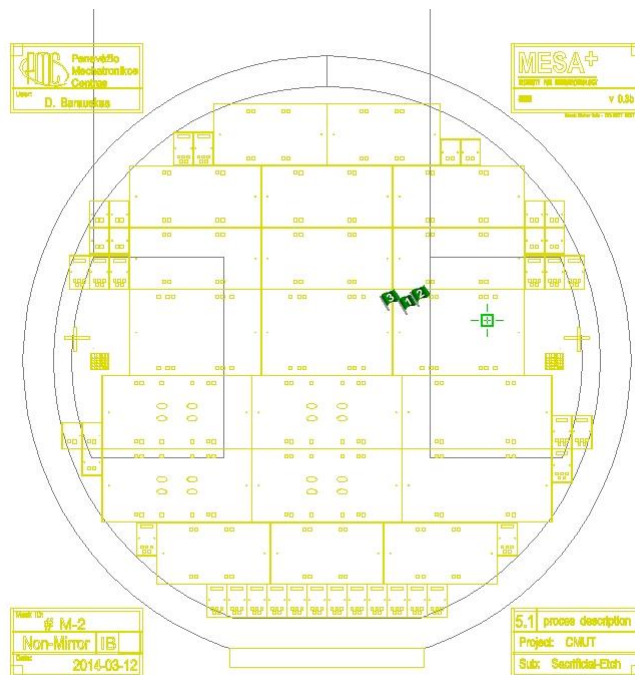
3. Šablonas elektrodų suformavimui



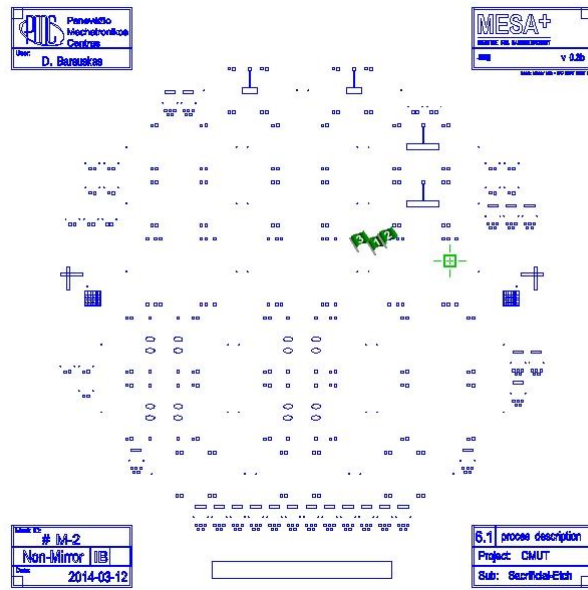
4. Šablonas ėsdinimo skylių suformavimui



5. Šablonas elektrodų atvėrimui



6. Šablonas elektrodų metalizavimui



Realaus laiko matavimo duomenų programos kodas MatLab aplinkoje

```

if exist('g2','var') == 0
    clear
    g2=0;
end
if exist('g3','var') == 0
    g3=0;
end
if g3==1
    clear
    g2=1;
    i=1;
    g3=0;
    pradinis_laikas=clock;
pradinis_laikas_sec=pradinis_laikas(6)+pradinis_laikas(5)*60+pradinis_laikas(
4)*3600;
end
if g2==0
    figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
    i=1;

end
btn2 =
uicontrol('style','push','string','Tęsti','callback','g2=1;Vieno_Daznomacio_
nuskaitymas;','Position',[10 600 100 30]);
btn3 = uicontrol('style','push','string','Pradėti iš
naujo','callback','g3=1;Vieno_Daznomacio_nuskaitymas;','Position',[10 570
100 30]);
btn113 = uicontrol('style','push','string','reset','callback','q=duomenys(i-
1,2)','Position',[10 370 100 30]);
btn11 = uicontrol('style','push','Position',[10 340 100 30]);
g = 0;
uzdelsimas=0.1;%nuskaitymo intervalas
btn =
uicontrol('style','push','string','Stabdyti','callback','g=1;','Position',
[10 650 100 30]);
    sld = uicontrol('Style','slider',...
        'Min',1,'Max',1e7,'Value',10,...
        'SliderStep',[0.000001 0.000010], ...
        'Position',[1270 80 20 550]) ;
xlabel('Laikas');
ylabel('Dažnis, Hz');
if g2==0
pradinis_laikas=clock;
pradinis_laikas_sec=pradinis_laikas(6)+pradinis_laikas(5)*60+pradinis_laikas(
4)*3600;
pause(0.001);
end
q=3075811.6;
while g==0
dabar=clock;
praejo=dabar(6)+dabar(5)*60+dabar(4)*3600;
laikas_praejas=praejo-pradinis_laikas_sec;
laikas(i,1)=laikas_praejas;
duomenys(i,1:2) = kodash_out(labwM('daznis',0));
pause(uzdelsimas);
asisy=get(sld,'value');
asis=duomenys(i,1);
[ax]=plot(laikas(:,1),duomenys(:,1));
axis([0 laikas(i,1) asis-asisy asis+asisy]);
asis=duomenys(i,2);

```

```

xlabel('Laikas, s');
ylabel('Apatinio dažnomačio parodymai, Hz');
title(['Dažnomačio parodymai']);
virsutinis=num2str(duomenys(i,1)*10);
apatinis=num2str(duomenys(i,2)*10);
set(btn11,'String',[virsutinis ' Hz'])
x=duomenys(i,2);
i = i+1;
    slegis = ((-q+x)/(-2376.8)+1)*101325;
    lol=num2str(slegis);
duomenys2 = 'duomenys';
duomenys3 = 'skirtumas';
duomenys4 = 'absskirtumas';
duomenys5 = 'vidurkis';
duomenys6 = 'laikas';
set(btn113,'String',[lol ' Pa'])
pause(1);
end
btn5 = uicontrol('style','edit','Position',[10 475 100 20]);
g4 = get(btn5, 'String');
vardas=[g4 ' ' datestr(now, 'yyyy-mmm-dd HH-MM-SS')];
btn4 =
uicontrol('style','push','string','Išsaugoti','callback','saugojimas','Position', [10 440 100 30]);
btn6 = uicontrol('style','text','string','Failo Pavadinimas','callback','','Position',[15 500 90 15]);

```

STM32 mikrovaldiklio programos kodas

```

#define HSE_VALUE ((uint32_t)8000000) /* STM32 discovery uses a 8Mhz external
crystal */
#include "stm32f4xx_conf.h"
#include "stm32f4xx.h"
#include "stm32f4xx_gpio.h"
#include "stm32f4xx_rcc.h"
#include "stm32f4xx_exti.h"
#include "usbd_cdc_core.h"
#include "usbd_usr.h"
#include "usbd_desc.h"
#include "usbd_cdc_vcp.h"
#include "usb_dcd_int.h"
#include "stm32f4xx_usart.h"
#include "stdio.h"
#include "stdlib.h"
#include "string.h"
volatile uint32_t ticker, downTicker;
__ALIGN_BEGIN USB_OTG_CORE_HANDLE USB_OTG_dev __ALIGN_END;
void init();
void ColorfulRingOfDeath(void);
#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif
void SysTick_Handler(void);
void NMI_Handler(void);
void HardFault_Handler(void);
void MemManage_Handler(void);
void BusFault_Handler(void);
void UsageFault_Handler(void);
void SVC_Handler(void);
void DebugMon_Handler(void);
void PendSV_Handler(void);
void OTG_FS_IRQHandler(void);
void OTG_FS_WKUP_IRQHandler(void);
#ifdef __cplusplus
}
#endif
void init()
{
    GPIO_InitTypeDef LED_Config;
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOA, ENABLE);
    LED_Config.GPIO_Pin = GPIO_Pin_1 | GPIO_Pin_2 | GPIO_Pin_3 |
GPIO_Pin_4 | GPIO_Pin_5 | GPIO_Pin_6 | GPIO_Pin_7 | GPIO_Pin_10 |
GPIO_Pin_13 | GPIO_Pin_14 | GPIO_Pin_15 ;
    LED_Config.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN;
    LED_Config.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    LED_Config.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
    LED_Config.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
    GPIO_Init(GPIOA, &LED_Config);
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOB, ENABLE);
    LED_Config.GPIO_Pin = GPIO_Pin_0 | GPIO_Pin_1 | GPIO_Pin_2 |
GPIO_Pin_3 | GPIO_Pin_4 | GPIO_Pin_5 | GPIO_Pin_6 | GPIO_Pin_7 | GPIO_Pin_8
| GPIO_Pin_9 | GPIO_Pin_10 | GPIO_Pin_11 | GPIO_Pin_12 | GPIO_Pin_13 |
GPIO_Pin_14 | GPIO_Pin_15 ;
    LED_Config.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN;
    LED_Config.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    LED_Config.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
    LED_Config.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
    GPIO_Init(GPIOB, &LED_Config);
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOC, ENABLE);

```



```

        LED_Config.GPIO_Pin = GPIO_Pin_0 | GPIO_Pin_1 | GPIO_Pin_2 |
GPIO_Pin_3 | GPIO_Pin_4 | GPIO_Pin_5 | GPIO_Pin_6 | GPIO_Pin_7 | GPIO_Pin_8 |
GPIO_Pin_9 | GPIO_Pin_10 | GPIO_Pin_11 | GPIO_Pin_12 | GPIO_Pin_13 ;
        LED_Config.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN;
        LED_Config.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
        LED_Config.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
        LED_Config.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
        GPIO_Init(GPIOC, &LED_Config);
        RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOD, ENABLE);
        LED_Config.GPIO_Pin = GPIO_Pin_0 | GPIO_Pin_1 | GPIO_Pin_2 |
GPIO_Pin_3 | GPIO_Pin_4 | GPIO_Pin_5 | GPIO_Pin_6 | GPIO_Pin_7 | GPIO_Pin_8 |
GPIO_Pin_9 | GPIO_Pin_10 | GPIO_Pin_11;
        LED_Config.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN;
        LED_Config.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
        LED_Config.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
        LED_Config.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
        GPIO_Init(GPIOD, &LED_Config);
        RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOE, ENABLE);
        LED_Config.GPIO_Pin = GPIO_Pin_0 | GPIO_Pin_1 | GPIO_Pin_2 |
GPIO_Pin_3 | GPIO_Pin_4 | GPIO_Pin_5 | GPIO_Pin_6 | GPIO_Pin_7 | GPIO_Pin_8
| GPIO_Pin_9 | GPIO_Pin_10 | GPIO_Pin_11 | GPIO_Pin_12 | GPIO_Pin_13 |
GPIO_Pin_14 | GPIO_Pin_15;
        LED_Config.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN;
        LED_Config.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
        LED_Config.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
        LED_Config.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
        GPIO_Init(GPIOE, &LED_Config);
        if (SysTick_Config(SystemCoreClock / 1000))
        {
                ColorfulRingOfDeath();
        }
        USBD_Init(&USB_OTG_dev,
                USB_OTG_FS_CORE_ID,
                &USR_desc,
                &USB_D_CDC_cb,
                &USR_cb);

        return;
}

void ColorfulRingOfDeath(void)
{
        uint16_t ring = 1;
        while (1)
        {
                uint32_t count = 0;
                while (count++ < 500000);

                GPIOD->BSRRH = (ring << 12);
                ring = ring << 1;
                if (ring >= 1<<4)
                {
                        ring = 1;
                }
                GPIOD->BSRRL = (ring << 12);
        }
}

int pirm_nusk()
{
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_9);

```

```

        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_8);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_13);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_10);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }
    int pirm_nusk2 ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_1);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_3);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_2);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_1);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }
    int antr_nusk ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_15);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_14);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_11);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_10);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }
    int antr_nusk2 ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_3);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_2);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_5);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_4);
        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }
    int trec_nusk ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_0);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_12);

```

```

        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_2);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_1);
        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }
    int trec_nusk2 ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_7);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_5);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_4);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_1);
        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }
    int ketv_nusk ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_4);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_3);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_6);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_5);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }
    int ketv_nusk2 ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_0);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_2);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_7);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_8);
        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }
    int penkt_nusk ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_3);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_7);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_5);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_4);
        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
    }

```

```

        return suma ;
    }
    int penkt_nusk2 ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_9);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_10);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_11);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_12);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }

    int sest_nusk ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_7);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_6);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_9);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_8);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }

    int sest_nusk2 ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_13);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_14);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_15);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_10);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }

    int sept_nusk ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_1);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_0);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_3);

```

```

        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_2);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }

    int sept_nusk2 ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_11);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_12);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_13);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_14);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }

    int ast_nusk ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_5);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_4);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_13);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOE, GPIO_Pin_6);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }

    int ast_nusk2 ()
    {
        int sk1 , sk2 , sk3 , sk4, suma ;
        sk1 = 0;
        sk2 = 0;
        sk3 = 0;
        sk4 = 0;
        suma = 0;
        sk1 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_15);
        sk2 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_8);
        sk3 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_9);
        sk4 = GPIO_ReadInputDataBit(GPIOD, GPIO_Pin_10);

        suma = sk1*1+sk2*2+sk3*4+sk4*8;
        return suma ;
    }

    void SysTick_Handler(void)
    {
        ticker++;
        if (downTicker > 0)
        {
            downTicker--;
        }
    }

```

```

}

void NMI_Handler(void) {}
void MemManage_Handler(void) { ColorfulRingOfDeath(); }
void BusFault_Handler(void) { ColorfulRingOfDeath(); }
void UsageFault_Handler(void) { ColorfulRingOfDeath(); }
void SVC_Handler(void) {}
void DebugMon_Handler(void) {}
void PendSV_Handler(void) {}
void OTG_FS_IRQHandler(void)
{
    USBD_OTG_ISR_Handler (&USB_OTG_dev);
}
void OTG_FS_WKUP_IRQHandler(void)
{
    if(USB_OTG_dev.cfg.low_power)
    {
        *(uint32_t *) (0xE000ED10) &= 0xFFFFFFFF9 ;
        SystemInit();
        USB_OTG_UngateClock(&USB_OTG_dev);
    }
    EXTI_ClearITPendingBit(EXTI_Line18);
}
int main(void)
{
    init();
    printf("sudas \n\r");
    while (1)
    {
        if (500 == ticker)
        {
            GPIOD->BSRRH = GPIO_Pin_13;
        }
        else if (1000 == ticker)
        {
            ticker = 0;
            GPIOD->BSRRL = GPIO_Pin_13;
        }
        uint8_t theByte;
        uint8_t buferis[6];
        uint8_t len;
        int aInt1 = pirm_nusk();
        int aInt2 = antr_nusk();
        int aInt3 = trec_nusk();
        int aInt4 = ketv_nusk();
        int aInt5 = penkt_nusk();
        int aInt6 = sest_nusk();
        int aInt7 = sept_nusk();
        int aInt8 = ast_nusk();
        int bInt1 = pirm_nusk2();
        int bInt2 = antr_nusk2();
        int bInt3 = trec_nusk2();
        int bInt4 = ketv_nusk2();
        int bInt5 = penkt_nusk2();
        int bInt6 = sest_nusk2();
        int bInt7 = sept_nusk2();
        int bInt8 = ast_nusk2();

        int aInt = aInt1*1 + aInt2*10 + aInt3*100 + aInt4 * 1000
+ aInt5 *10000 + aInt6 * 100000 + aInt7 * 1000000 + aInt8 *10000000;
        int bInt = bInt1*1 + bInt2*10 + bInt3*100 + bInt4 * 1000
+ bInt5 *10000 + bInt6 * 100000 + bInt7 * 1000000 + bInt8 *10000000;
        char str[20];
        char str2[20];
    }
}

```

```
    sprintf(str, "%d", aInt);
    sprintf(str2, "%d", bInt);
    strcat(str, " ");
    strcat(str, str2);
    len = VCP_get_string(&buferis);
    if(len)
    {
        VCP_send_str(strcat(str, "\r\n"));
    }
}
return 0;
}
```