Vilniaus universitetas Fizikos fakultetas Lazerinių tyrimų centras

Dominyka Stonytė

STIKLINIŲ MIKROMECHANINIŲ SISTEMŲ FORMAVIMAS ULTRATRUMPAISIAIS LAZERIO IMPULSAIS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų

studijų programa

 $Student \dot{\rm e}$

Darbo vadovas

Recenzentas

Centro direktorius

Dominyka Stonytė

doc. dr. Domas Paipulas dr. Simas Butkus doc. dr. Aidas Matijošius

Vilnius 2020

Turinys

Įv	adas			3				
1	Mikron	nechani	nių stiklinių sistemų ir jų gamybos lazeriu asistuotu cheminiu ėsdinimu ap-					
	žvalga	•••••		4				
	1.1	Femtosekundinis skaidrių medžiagų apdirbimas						
		1.1.1	Vyraujantys sugerties mechanizmai	4				
			1.1.1.1 Daugiafotonė sugertis ir jonizacija	4				
			1.1.1.2 Tunelinė jonizacija	5				
			1.1.1.3 Griūtinė jonizacija	6				
		1.1.2	Skaidrių terpių modifikacijų tipai	7				
			1.1.2.1 Nestabilios modifikacijos	7				
			1.1.2.2 Vienalytis lūžio rodiklio pokytis	8				
			1.1.2.3 Sritis su dvejopu lūžio rodikliu	9				
			1.1.2.4 Mikroertmės	13				
		1.1.3	Pagrindinių spinduliuotės ir fokusuojančios optikos parametrų įtaka me-					
			džiagos modifikavimui	14				
			1.1.3.1 Impulso trukmė	14				
			1.1.3.2 Bangos ilgis	15				
			1.1.3.3 Impulso energija (intensyvumas)	15				
			1.1.3.4 Impulsų pasikartojimų dažnis	16				
			1.1.3.5 Skaitinė apertūra NA	17				
	1.2	Mikro	mechaninės stiklinės sistemos	17				
		1.2.1	Lydyto kvarco savybės	18				
		1.2.2	Lanksčių elementų kinematikos aprašymo būdai	19				
		1.2.3	Įtampa valdomos mikromechaninės atsilenkiančios svirties analitiniai mo-					
			deliai	23				
		1.2.4	Iteracinis sprendimas - baigtinės elementų analizės metodas (FEM)	25				
2	Įtampa	a valdor	na mikromechaninė atsilenkianti svirtis	27				
	2.1	Baigti	nių elementų analizės modelis (FEM) "Comsol" programiniu paketu	27				
		2.1.1	Uždavinio 3D modelis ir pagrindiniai parametrai	27				
		2.1.2	Sąsajų pasirinkimas, tinklelio sudarymas ir simuliacijos vykdymas	29				
		2.1.3	Modeliavimo rezultatų aptarimas	31				
	2.2	Mikro	Mikrosvirčių gamyba lazeriu asistuotu cheminiu ėsdinimu					
		2.2.1	Gamybai naudojama sistema	40				
		2.2.2	Detalės ir bandinių modeliavimas	41				
		2.2.3	Aktuatoriaus gamyba	42				
Iš	vados		~ ~	47				

Literatūros sąrašas	48
Santrauka	52
Summary	53

Įvadas

Pastaruoju metu skaidrių medžiagų lazerinis mikroapdirbimas tapo sparčiai augančia mokslo sritimi, o progresuojant miniatiūrizavimo procesui mikrosistemose integruojama vis daugiau funkcijų, todėl pritaikymas apima daugybę sričių: mechanika, medicina, kosmoso technologijos, robotika, pramonė, mokslas ir t.t. [1]. Šiuolaikinių lazerinių sistemų didelio intensyvumo femtosekundiniai impulsai leidžia preciziškai be terminių defektų fabrikuoti trimačius darinius stikle. Sufokusuota į skaidrią medžiagą, lazerinė spinduliuotė dėl netiesinės daugiafotonės sugerties, tunelinės bei griūtinės jonizacijos poveikio zonose pakeičia medžiagos optines bei chemines savybes taip atveriant galimybes formuoti bangolaidžius bei selektyviai rūgštimi išėsdinti norimus trimačius darinius.

Išnaudojant skirtingų femtosekundinės spinduliuotės sąveikos su skaidria terpe modifikacijų tipų privalumus galima gaminti daugiafunkcinius monolitinius prietaisus, susidedančius iš mikromechaninių, mikrooptinių, mikroelektroninių, skysčių mikrokanalų komponentų. Sistemų pavyzdžiai: navigavimo, oro pagalvių jutikliai, kompaktinių diskų nuskaitymo galvutės, laikrodžių detalės, šaudmenų nukreipimo sistemos ir t.t. [2]. Suformuotais skysčių mikrokanalų prietaisais galima turėti mikrolaboratoriją, joje maišyti ir analizuoti labai nedidelius chemikalų kiekius, atskirti pavienes biomolekules. Stikle galima formuoti optinius elementus, bangolaidžius, fotoninius elementus, o sukomponavus viską vienoje plokštėje galima pagaminti net ir miniatiūrinį lazerį.

Kelių mikrometrų eilės matmenų iš lydyto kvarco išėsdinti dariniai pasižymi gan didelės amplitudės lankstumu be išliekamųjų deformacijų [3], nes juose esantys įtempiai neviršija medžiagos tamprumo ribos. Aktuatoriai su atsilenkiančiais strypais integruojami didžiojoje dalyje mikroelektromechaninių sistemų, o atskirai jie taip pat gali būti pritaikyti įvairioms funkcijoms: preciziškam kelių mikrometrų tikslumo poslinkio nustatymui, mikrodarinių deformacijų juos veikiant jėga nustatymui, atominiuose mikroskopuose, mikropincetuose ir t.t. [4].

Šio darbo tikslas – naudojantis lazeriu asistuoto cheminio ėsdinimo metodu iš monolitinio lydyto kvarco bloko pagaminti mikrometrinių skersinių matmenų svirtį ir realizuoti jos atsilenkimą išoriniu elektriniu lauku, teoriškai išanalizuoti tokios svirties kinematines ir dinamines savybes.

1 Mikromechaninių stiklinių sistemų ir jų gamybos lazeriu asistuotu cheminiu ėsdinimu apžvalga

1.1 Femtosekundinis skaidrių medžiagų apdirbimas

Medžiagų mikroapdirbimas femtosekundiniais impulsais, kurių intensyvumas yra TW/cm² eilės, skiriasi nuo apdirbimo mažo intensyvumo (kW/cm² eilės) nanosekundiniais nuolatinės veikos lazeriais. Didelio intensyvumo impulsai, jei jų energija viršija medžiagos draustinės juostos plotį, dėl netiesinių procesų suteikia galimybę modifikuoti net ir šiai spinduliuotei skaidrias medžiagas. Sufokusavus tokią spinduliuotę medžiagoje, židinio aplinkoje vyksta daugiafotonė sugertis, tunelinė ir griūtinė jonizacijos. Modifikacijų lokalizacija židinio aplinkoje leidžia suformuoti norimus geometrinius darinius skaidrios medžiagos tūryje nepažeidžiant paviršiaus. Taip pat femtosekundiniai impulsai bent dviem eilėmis trumpesni nei elektrono-fonono relaksacijos laikas, todėl poveikio zona modifikuojama greičiau nei įvyktų energijos pernaša į aplinkines sritis – taip pasiekiamas preciziškumas. Šiame poskyryje detaliau apžvelgiami skaidrioje medžiagoje vykstantys procesai ją apšvietus femtosekundine spinduliuote, šių procesų sukeltų modifikacijų tipai bei spinduliuotės parametrų įtaka.

1.1.1 Vyraujantys sugerties mechanizmai

Femtosekundiniame lazeriniame apdirbime elektronų sužadinimas - jonizacija, gali būti sukelta net ir skaidriose lazerio spinduliuotei medžiagose dėl joje vykstančių netiesinių procesų impulsui sąveikaujant su medžiaga. Skaidriose medžiagose pagrinde vyrauja trys netiesinės sugerties mechanizmai: daugiafotonė sugertis, tunelinė jonizacija ir griūtinė jonizacija. Tiesinė vienafotonė sugertis naudojant regimąjį arba artimą IR spektrus stikluose nevyksta, nes skaidrios medžiagos pasižymi dideliu draustinės energijų juostos pločiu ir vieno fotono energijos nepakanka norint sužadinti elektroną iš valentinės į laidumo juostą, kaip pavaizduota 1 pav. Norint sukelti netiesinę sugertį, lazerio impulso elektrinio lauko stipris turi būti apytiksliai lygus elektrinio lauko, laikančio valentinius elektronus atome, stipriui – 10^9 V/m eilės, kurį atitinkantis lazerio intensyvumas $\approx 5 \times 10^{20}$ W/m² [5]. Taigi, norint pasiekti tokius lazerio impulso elektrinio lauko stiprius, reikia didelių intensyvumų ir aštraus fokusavimo.

1.1.1.1 Daugiafotonė sugertis ir jonizacija

Daugiafotonė jonizacija – vienalaikė kelių fotonų sugertis, sužadinant elektroną iš valentinės į laidumo juostą (žr. 1 pav.). Šis sugerties mechanizmas pasireiškia kai intensyvumas yra palyginti nedidelis, tačiau vieno fotono energija (dažnis) yra didelė [7]. Daugiafotonė sugertis galima tik jei bendra į elektroną krintančių fotonų energija viršija draustinių energijų juostos tarpą, taigi procesui sukelti reikalingas didelis fotonų tankis. Sužadinimas vyksta per



1 pav. Elektronų sužadinimas medžiagoje vieno fotono ir daugiafotonės sugerties atveju. Pritaikyta pagal [6].

virtualius lygmenis, kurių gyvavimo trukmė yra labai trumpa, dėl to fotonai turi sąveikauti su terpe vienu metu, taigi tikimybė, kad tokia sugertis įvyks, smarkiai priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo. Daugiafotonei sugerčiai sukelti reikalingas didelis intensyvumas pasiekiamas femtosekundiniais lazeriais dėl jų ultratrumpų impulsų pločio.

1.1.1.2 Tunelinė jonizacija

Tunelinės jonizacijos režimas (žr. 2 pav.) pasireiškia esant nedideliam optinės spinduliuotės dažniui ir dideliam intensyvumui [7]. Tuneliavimo atveju lazerinės spinduliuotės elektrinis laukas iškreipia potencinę duobę, kuri laiko elektroną prie atomo. Potencinis barjeras, suformuotas valentinės ir laidumo juostų struktūrų drastiškai deformuojamas intensyvaus femtosekundinių impulsų elektrinio lauko ir barjero ilgis sumažėja [8]. Kai taip atsitinka, elektronas gali tuneliuoti per barjerą ir galiausiai atitrūkti nuo molekulės ir būti išlaisvintas iš valentinės į laidumo juostą [9].



2 pav. Femtosekundinio lazerinio apšvietimo sukelta tunelinė jonizacija. Pritaikyta pagal [9].

Galimas ir tarpinis jonizacijos atvejis, kai elektronas sugėręs keletą fotonų vienu metu tuneliuoja. Kuris fotojonizacijos mechanizmas dominuos galima nustatyti apskaičiuojant Keldišo parametrą γ :

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \sqrt{\frac{m_e c n \epsilon_0 E_g}{I}},\tag{1}$$

čia ω – lazerio dažnis, I – lazerio intensyvumas, m_e – efektinė elektrono masė, e – elementarus elektrono krūvis, c – šviesos greitis, n – tiesinis lūžio rodiklis, ϵ_0 – vakuumo dielektrinė skvarba, E_g – medžiagos draustinės juostos plotis. Kai $\gamma >> 1$, dominuoja daugiafotonė sugertis, kai $\gamma << 1$, dominuoja tunelinė jonizacija, kai $\gamma \approx 1$, fotojonizaciją sukelia abiejų procesų kombinacija [9]. 3 pav. pateikti lydyto kvarco jonizacijos režimai, jonizacijos spartos bei Keldišo parametro priklausomybė nuo kritusios spinduliuotės intensyvumo.



3 pav. Jonizacijos spartos (viršuje) ir Keldišo parametro priklausomybė (apačioje) nuo kritusios spinduliuotės intensyvumo lydytame kvarce [10].

1.1.1.3 Griūtinė jonizacija

Itin trumpų šviesos impulsų atveju kritinė laisvųjų elektronų tankio vertė reikalinga sukelti optiniam pažeidimui gali būti pasiekiama vien dėl fotojonizacijos, tačiau šviesos impulsams, kurių trukmių ribos yra nuo 10 fs iki 10 ps, griūtinė jonizacija taip pat tebėra svarbi [7]. Jos metu laisvųjų elektronų skaičius auga eksponentiškai:

$$n(t) = n_0 e^{\beta t},\tag{2}$$

čia n_0 - pradinis elektronų tankis, o β nusako griūtinės jonizacijos spartą [11].

Bet kurioje medžiagoje visada egzistuoja tam tikras nedidelis kiekis laisvų elektronų, taip pat laisvi elektronai generuojami ir prieš tai aptartais sugerties mechanizmais. Kai laisvų elekt-

ronų tankis laidumo juostoje padidėja, tolimesnė sugertis padidina kinetinę elektronų plazmos energiją [12]. Sąveikos su lazerio spinduliuote metu, laisvi elektronai įgyja energijos ir yra greitinami. Įgreitintų elektronų susidūrimai su valentiniais taip pat didina plazmos tankį [13]. Jei laisvų elektronų įgyta energija viršija medžiagos draustinės energijų juostos plotį, šie elektronai gali išlaisvinti surištuosius elektronus per smūginę jonizaciją. Jei lazerinio impulso energijos perdavimas būtų nulemtas tik netiesinės jonizacijos, slenkstinis intensyvumas netiesiškai priklausytų nuo apšviečiamos medžiagos draustinės juostos pločio. Tikimybė šviesai būti sugertai medžiagoje, kurios draustinės juostos plotis lygus N fotonų dėl netiesinės sugerties proceso yra I^N , kur I – elektrinio lauko intensyvumas [5]. Kadangi draustinės juostos plotis (tuo pačiu ir N) skirtingoms medžiagoms skiriasi, netiesinė sugertis priklausomai nuo medžiagos stipriai skirtųsi. Tačiau eksperimentiškai slenkstinis intensyvumas, reikalingas pažeisti medžiagą, labai nedaug skiriasi skirtingiems draustinės juostos pločiams, kas parodo griūtinės jonizacijos svarbą, kuri tiesiškai priklauso nuo intensyvumo [5]. Dėl nedidelės priklausomybės nuo draustinės juostos pločio, femtosekundinis lazerinis mikroapdirbimas gali būti naudojamas plačiame medžiagų intervale.

Lydytame kvarce sukeliant antro tipo modifikacijas su dvejopolaužiškumu ir nanogardelėmis dominuoja daugiafotonės sugerties bei griūtinės jonizacijos procesai, o elektronų sužadinimas tunelinės jonizacijos principu neturi reikšmingos įtakos.

1.1.2 Skaidrių terpių modifikacijų tipai

Femtosekundine spinduliuote paveikus skaidrią medžiagą, laisvųjų elektronų plazmos sukūrimo mechanizmas per netiesinės fotojonizacijos ir griūtinės jonizacijos procesus yra gan aiškus ir visuotinai priimtas. Tačiau kai elektronai relaksuodami perduoda savo energiją gardelei, fizikiniai medžiagos modifikacijos mechanizmai nėra iki galo pilnai suprasti. Nors pats skaidrios medžiagos modifikuotos srities pobūdis dažnai priklauso nuo medžiagos fizikinių savybių, iš esmės galima išskirti tam tikrus modifikacijų tipus, būdingus didžiajai daliai skaidrių medžiagų: nestabilios modifikacijos, vienalytis lūžio rodiklio pakitimas, sritis su dvejopo lūžio rodikliu, mikroertmės [11]. Modifikacijos tipas ir medžiagos morfologiniai pokyčiai priklauso ne tik nuo spinduliuotės parametrų (energijos, impulso trukmės, impulsų pasikartojimų dažnio, bangos ilgio, poliarizacijos, židinio ilgio, skenavimo greičio ir t.t.), bet ir nuo medžiagos parametrų (draustinės juostos pločio, terminio laidumo ir t.t.). Lydytame kvarce visų tipų modifikacijas galima pasiekti paprasčiausiai keičiant energiją (intensyvumą).

1.1.2.1 Nestabilios modifikacijos

Intensyvumui neviršijus pirmojo intensyvumo slenksčio ($\langle I_{T1},$ čia T1 - pirmasis energijos slenkstis), stebimos nestabilios modifikacijos – dariniai, kurie išnyksta savaime arba gali būti



4 pav. Pagrindiniai femtosekundinio lazerio skaidriose medžiagose indukuoti struktūriniai pokyčiai. a) Spinduliuotė fokusuojama medžiagos tūryje, židinio aplinkoje pasiekiamas didelis intensyvumas. b) Energija sugeriama per netiesinius procesus ir dėl daugiafotonės/tunelinės bei griūtinės fotojonizacijų susigeneruoja laisvųjų elektronų plazma. c) Plazma perduoda savo energiją gardelei ≈ 10 ps laiko intervale ir gaunamas vienas iš trijų ilgalaikės modifikacijos tipų: d) izotropinis lūžio rodiklio pokytis, esant mažai impulso energijai; dvejopalaužiškumu pasižyminčios nanostruktūros, esant vidutinei energijai; tuščios mikroertmės, esant didelei impulso energijai. Pritaikyta pagal [14].

ištrinti ir neturi jokio liekamojo poveikio medžiagai. Šie dariniai atsiranda tada, kai intensyvumo dar nepakanka sukelti kritiniam laisvųjų elektronų tankiui, reikalingam pažeisti medžiagą, todėl pasibaigus impulsui sugeneruoti laisvieji elektronai rekombinuoja. Relaksuojantys elektronai formuoja surištuosius eksitonus [13], kurie didina terpės lūžio rodiklį, bet šis pokytis trumpalaikis, nes defektų gyvavimo laikas < 1 ms [15].

1.1.2.2 Vienalytis lūžio rodiklio pokytis

Viršijus pirmąjį modifikacijos energijos slenkstį T1, jau atsiranda ilgalaikė pirmo tipo optinė modifikacija – lazerio poveikio zonoje atsiranda lokalizuotas vienalytis lūžio rodiklio padidėjimas, siekiantis 10^{-2} eilės pokytį [13]. Izotropinio lūžio rodiklio modifikacijos dažniausiai naudojamos bangolaidžiams įrašyti. Energijai šiek tiek viršijus pirmąjį modifikacijos slenkstį (≈ 100 nJ fokusuojant 0.6 NA 800 nm, 100 fs impulsus) lydytame kvarce pasiekiama tolydi lūžio rodiklio modifikacija, atsirandanti, kai židinio aplinkoje perlydyta medžiaga sparčiai atvėsta [16]. Galima išskirti tris pagrindinius modifikacijas paaiškinančius mechanizmus:

1. Mikro-Ramano spektroskopija patvirtino 3 ir 4 narių žiedų koncentracijos padidėjimą lydyto kvarco cheminėje struktūroje dėl įvykusio perlydymo lazerio paveiktoje zonoje, kas indikuoja stiklo sutankėjimą [16].

- 2. Dėl gardelei perduotos energijos atsiradęs termoelastinis įtempis relaksuodamas medžiagoje gali sukelti akustines bangas, kurios taip pat lemia medžiagos sutankėjimą [17].
- Diskutuotina ir lazerio indukuotų spalvinių centrų įtaka lazerio indukuotam lūžio rodiklio pokyčiui per Kramers-Kronig mechanizmą (sugerties pokytis lemia lūžio rodiklio pokytį) [18].

Nors ir nėra visiško femtosekundinės lazerio spinduliuotės sąveikos su materija formuojant optinius bangolaidžius supratimo, visi trys minėti mechanizmai (terminis, deformacinis ir spalvinių centrų) iš dalies aprašo šią sąveiką.

1.1.2.3 Sritis su dvejopu lūžio rodikliu

Lydytame kvarce esant didesnėms impulso energijoms ($\approx 150 - 500$ nJ fokusuojant 0.6 NA 800 nm, 100 fs impulsus) viršijus antrąjį energijos slenkstį T2 pastebėti dvejopalaužiai lūžio rodiklio pokyčiai [19] – antrojo tipo modifikacija, susijusi su periodinių nanostruktūrų, kurių tankis mažesnis nei jas supantis stiklas formavimusi [13].



5 pav. Nanogardelių susidarymo nanoplazmoninis modelis [18].

- 5 pav. pateikto nanogardelių susidarymo nanoplazmoninio modelio etapai:
- a) Židinio aplinkoje dėl defektų ar spalvinių centrų susidariusios sritys, kuriose efektyviai vyksta daugiafotonė jonizacija.
- b) Impulsams pataikant į tą pačią vietą, šie taškai tampa sferinės formos nanoplazmomis dėl atminties efekto [20].

- c) Dėl "vietinio elektrinio lauko padidėjimo" (angl. *local field enhancement*) nanoplazmos sričių kraštuose sferinės sritys asimetriškai auga kryptimi, kuri statmena lazerio poliarizacijai [19], todėl susiformuoja nanoelipsoidai, kurie galiausiai išauga į nanoplokštumas.
- d) Kai elektronų plazmos tankis nanoplokštumose viršija kritinį tankį, jos tampa metališkos ir išsirikiuoja lygiagrečiose nanoplokštumose su periodu $\lambda_0/2n$ (čia n medžiagos lūžio rodiklis, λ_0 spinduliuotės bangos ilgis) [21].

Nepaisant fakto, kad sufokusuoto lazerio pluošto mažiausias dėmės dydis artimas spinduliuotės bangos ilgiui, suformuotų nanoplokštumų storis ≤ 10 nm, t.y. elektriniai laukai gali būti sukoncentruoti nanometrų skalėje [21]. Geriausios formos nanogardelės susidaro intensyvumui šiek tiek viršijant nanogardelių susidarymo intensyvumo slenkstį. Manoma, kad dvejopalaužiškumo priežastis – šios periodinės nanostruktūros, atsirandančios lazeriniam laukui interferuojant su indukuota elektronų plazmos banga [22].



6 pav. Nanogardelių susidarymas priklausomai nuo impulsų kiekio, esant 90 nJ impulso energijai [23].

6 pav. pavaizduota nanogardelių susidarymo evoliucija priklausomai nuo impulsų kiekio su 90 nJ impulsine energija. Matyti, kad po pirmojo impulso poveikio zonoje (kuri mažesnė nei sufokusuoto pluošto sąsmaukos diametras) atsiranda keli atsitiktinai išsidėstę krateriai. Paleidus 4 impulsus, trys grioveliai pastebimai išsidėsto statmenai lazerio elektriniam laukui kaip vienas didesnis centrinis kartu su dviem mažesniais jam iš šonų. Pakėlus impulsų kiekį iki 6, išlieka prieš tai pastebėta tendencija - du kraštiniai grioveliai pailgėja ir pradeda atsirasti antra griovelių pora (pažymėta rodyklėmis). Paleidus 9 impulsus, pradeda atsirasti nauja griovelių pora netoli centro (pažymėta rodyklėmis). Po 13 impulsų prieš tai suformuoti grioveliai siaurėja, o naujai atsiradę ilgėja. Po šios ribos nebepastebima jokių esminių pokyčių, kaip ir parodyta su 500 impulsų, įrašytų su 10 kHz pasikartojimo dažniu. Skerspjūvio vaizdai (6 pav., h)) su 6 impulsais ir (6 pav., i)) su 14 impulsų iliustruoja nanogardelių siaurėjimą ir gilėjimą didinant impulsų skaičių.

Skaidriose medžiagose spinduliuotės poveikio zonose indukuotų nanogardelių srityse padidinėja imlumas ėsdinimui HF ir KOH rūgštyse, o tai suteikia galimybę selektyviai apdirbti ir išėsdinti norimas sritis (pirmą kartą parodyta [24]). Atrankus spinduliuotės poveikis leidžia gaminti labai mažų (mikrometrų eilės) matmenų tikslius, kompleksinius, lanksčius 3D darinius. Kristalinės bei amorfinės struktūros lydytas kvarcas skirtingai reaguoja į rūgštis. Dėl HF difuzijos į modifikuotoje srityje susidariusias poras, reaguojantis paviršius padidėja šimtus kartų lyginant su nemodifikuotu [25]. Į modifikuotose srityse esančias nanoporas ir mikroįtrūkimus, įsiskverbia rūgšties molekulės ir ištirpina stiklą iš vidaus. 7 pav. pateikti lazeriu modifikuotos ir HF paveiktos srities "atominių jėgų mikroskopo" (angl. *atomic force microscope, AFM*) dviejų projekcijų vaizdai, kur a) paveikslėlyje matyti, kad nanoplokštumos tęsiasi apie 20 µm į gylį, t.y. spinduliuotės sklidimo kryptimi, o b) pateikta XY projekcija (vaizdas iš viršaus) rodo, kad nanoplokštumų ilgis siekia kelias dešimtis mikrometrų ir šiuo atveju yra mažesnis dėl esančio nedidelio kampo tarp E ir X ašies.



7 pav. AFM vaizdai lazeriu modifikuotas zonas chemiškai ėsdinant 4 min 1% HF rūgštyje, kai lazerio poliarizacija statmena transliacijos krypčiai. Čia K - lazerio spinduliuotės sklidimo kryptis, E - spinduliuotės elektrinio lauko kryptis, S - transliacijos kryptis. a) Skersinis XZ plokštumos vaizdas. b) Vaizdas iš viršaus (XY plokštumos). Impulso energija lygi 250 nJ. Pritaikyta pagal [21].

Ėsdinimo gylis tiesiškai priklauso nuo ėsdinimo laiko. Didesnėms nei 5 mW lazerio galioms didinant skenavimo greitį, ėsdinimo greitis šiek tiek mažėja. Ėsdinimo greitis ir selektyvumas reikšmingai priklauso nuo impulsų poliarizacijos (8 pav.). Kaip jau minėta, susiformuojantys periodiniai nanogardelių tipo dariniai visada orientuoti statmenai lazerio pluošto poliarizacijai.



8 pav. Nanogardelių tipo dariniai. Kairėje poliarizacija lygiagreti fabrikavimo krypčiai, centre – statmena. Ėsdinta 20 min 0,5 % HF rūgštyje [8]. Dešinėje – nanogardelės, suformuotos apskritimine poliarizacija [21].

Šios nanogardelės susideda iš periodiškai besikeičiančių sričių su dideliu ir mažu ėsdinimo laipsniu. 9 pav. vaizduojama ėsdinimo greičio R (apibrėžto kaip mikrokanalo ilgis L padalintas iš ėsdinimo laiko T) priklausomybė nuo impulso energijos (E_p) skirtingoms poliarizacijoms.



9 pav. Ėsdinimo greičio R sąryšis su impulso energija E_p , esant skirtingoms poliarizacijoms. Pritaikyta pagal [26].

 E_p čia matuota prieš femtosekundiniams impulsams įeinant į stiklo bandinį ir gali kisti impulsui sklindant stikle dėl netiesinių optinių reiškinių. Visoms keturioms poliarizacijoms išskiriamos trys skirtingos sritys: mažos, vidutinės ir aukštos energijos. Mažos energijos sritys 9 pav. apibrėžtos nuo slenkstinės impulso energijos iki brūkšninių linijų, pažymėtų A, B, C, D. Matome, kad mažos energijos srityse ėsdinimo greitis visoms poliarizacijoms sparčiai kyla. Norint pasiekti efektyviausią ėsdinimą, nanogardelės turi būti orientuotos lygiagrečiai fabrikavimo krypčiai, o tai pasiekiama turint statmeną poliarizaciją ($\Theta = 90^{\circ}$). Esant $\Theta = 0^{\circ}$ poliarizacijai, nanogardelės orientuotos statmenai fabrikavimo krypčiai ir čia ėsdinimo greitis yra mažiausias, nes periodiškai besikeičiantys didesnio ir mažesnio ėsdinimo laipsnio dariniai apribos efektyvų HF molekulių įsiskverbimą. Apskritiminės poliarizacijos atveju susiformuoja atsitiktinai išsidėsčiusios nanogardelės, kur HF įsiskverbimas dalinai ribojamas, bet efektyvesnis nei ėsdinant su Θ $= 0^{\circ}$ poliarizacija, nes atsitiktinai išsidėsčiusios nanogardelės kai kuriose srityse jungiasi viena su kita. Esant $\Theta = 45^{\circ}$ poliarizacijai, susiformuoja 45° kampu fabrikavimo krypčiai orientuotos nanogardelės, kurių ėsdinimo greitis taip pat didesnis nei formuojant su $\Theta = 0^{\circ}$ poliarizacija, nes jos gaunasi didesnio ilgio. Vidutinės energijos sritis prasideda nuo impulso energijų, pažymėtų A, B, C, D ir tęsiasi iki E. Pastarojoje srityje ėsdinimo greitis pastebimai sumažėja visoms poliarizacijoms, nes femtosekundine lazerine spinduliuote indukuotų nanogardelių formavimasis nuo tam tikros energijos vertės toliau ją didinant išlieka gan stabilus. Femtosekundiniame mikroapdirbime tai yra tinkamiausias impulso energijos intervalas, nes ėsdinimo greitis čia yra pakankamai aukštas ir stabilus. Aukštos energijos srityje, kuri prasideda nuo impulso energijos, pažymėtos E, pastebimas staigus ėsdinimo greičio sumažėjimas, nes nanogardelių išsidėstymas tampa nebe toks tolygus ir padaugėja ėsdinimui atsparios srities. Nors didžiausias ėsdinimo greitis gali būti pasiekiamas esant $\Theta = 90^{\circ}$ poliarizacijai ir vidutinei impulso energijai, ėsdinant kompleksinius 3D darinius būtų per daug sudėtinga keisti poliarizaciją fabrikavimo metu taip, kad E visada būtų statmena S. 10 pav. matome, kad ėsdinant su tiesine poliarizacija, bet jos nekeičiant pasikeitus fabrikavimo krypčiai, ėsdinimas vyksta daug greičiau viena kryptimi nei kita, o ėsdinant su apskritimine poliarizacija, ėsdinimo greitis būna beveik vienodas visomis kryptimis, dėl to mikroapdirbime dažniausiai ir renkamasi naudoti apskritiminę poliarizaciją.



10 pav. Du identiški lygiašoniai trikampiai mikrokanalų dariniai, ėsdinti naudojant (a) tiesinę ir (b) apskritiminę poliarizacijas su $E_p = 1.6 \ \mu J \ 2.5 \ \%$ HF 8 val. [26].

1.1.2.4 Mikroertmės

Impulso energijoms viršijus trečiąjį energijos slenkstį T3 (> 500 nJ fokusuojant 0.6 NA 800 nm, 100 fs impulsus), kur intensyvumas viršija 10^{14} W/cm², židinio srityje slėgis viršija Jungo modulį, atsiranda smūginės bangos, kai elektronai perduoda savo energiją jonams (≈ 10 ps) [18]. Po šios smūginės bangos atsiranda mažesnio tankio tuščiavidurės ertmės, priklausančios nuo spinduliuotės ir medžiagos savybių [27]. Ertmės apgaubtos didesnio lūžio rodiklio apvalku. Šias ertmes galima naudoti 3D atminties talpykloms, kur binarinis kodas įrašomas plokštumomis (žr. 11 pav.), kas suteikia potencialią galimybę gauti labai daug informacijos talpinančias, bet nedidelių matmenų talpyklas arba fotoniniams kristalams [28].



11 pav. Binarinis kodas, įrašytas lydyto kvarco bandinyje su 100 fs spinduliuote. Naudojami 2 µm tarpai tarp bitų [29].

1.1.3 Pagrindinių spinduliuotės ir fokusuojančios optikos parametrų įtaka medžiagos modifikavimui

Femtosekundiniais impulsais paveiktos skaidrios medžiagos modifikacijos pobūdis bei morfologija priklauso ne tik nuo lazerio parametrų (impulso trukmė, bangos ilgis, intensyvumas, pasikartojimų dažnis, poliarizacija), bet ir medžiagos parametrų (draustinės juostos pločio, terminio plėtimosi koeficiento ir t.t.) bei fokusuojančios optikos skaitinės apertūros NA. Šiame poskyryje trumpai apžvelgiama keleto pagrindinių parametrų įtaka medžiagos modifikavimui. Šviesos poliarizacijos įtaka aptarta 1.1.2.3 poskyryje.

1.1.3.1 Impulso trukmė

Modifikuojant skaidrią medžiagą impulsais, kurių trukmė daug trumpesnė nei elektronofonono sąveikos laikas, terminės difuzijos ilgis yra toks mažas [9], kad fabrikuojamoje srityje karščio paveiktos zonos beveik nesiformuoja – išvengiama šilumos difuzijos į aplinkines sritis, kas pagerina mažų matmenų darinių erdvinę skiriamąją gebą. Kiekvienas taškas apdirbamoje vietoje beveik atitinka sufokusuoto lazerinio pluošto diametrą. Sufokusuoto pluošto dydis ω_0 apibūdinamas difrakcijos riba ($\omega_0 = 0.61\lambda/NA$), kur λ – lazerio bangos ilgis, NA – lęšio skaitine apertūra). Taigi, fabrikuojant femtosekundiniais impulsais galima pasiekti mažesnę nei pusės bangos ilgio erdvinę skiriamąją gebą. Femtosekundiniai impulsai lyginant su ilgesnės trukmės impulsais turi labai didelę smailinę galią ir aukštą intensyvumą, kuris suteikia galimybę kokybiškai abliuoti net ir skaidrias spinduliuotei medžiagas dėl atsiradusių prieš tai aptartų netiesinės sugerties procesų. Elektronų pasiskirstymui pasiekti terminę pusiausvyros padėtį po apšvietimo femtosekundiniais impulsais reikia tik nuo kelių šimtų femtosekundžių iki kelių pikosekundžių [9].

12 pav. parodyta visų modifikacijų tipų slenkstinės energijos ir jų modifikacijų susidarymo intervalai impulsų trukmėms nuo 40 iki 500 fs (impulsų trukmė čia keičiama keičiant atstumą tarp gardelių impulsų plėstuve-spaustuve, o impulsas charakterizuojamas interferometrinės autokoreliacijos būdu). Impulso laikinis išplitimas mikroskopo objektyve dėl grupinių greičių dispersijos kompensuojamas čirpuojant impulsus impulsų spaustuve. Trumpiems ($\tau_p < 150$ fs) impulsams, kurių energija viršija medžiagos modifikavimo slenkstį ($E_p \approx 50$ nJ) susidaro tolygi I tipo modifikacija su 5×10^{-3} eilės lūžio rodiklio pokyčiu. Esant didesnėms impulsų energijoms (≥ 150 nJ) pasiekiamas antrasis, nuo τ_p priklausantis modifikacijos slenkstis $E_{sl}(\tau_p)$, kur tolygios modifikacijos zonoje atsiranda nanogardelės, kurių kvaziperiodiškumas nepriklauso nuo τ_p ir E_p . Ilgesniems impulsams ($\tau_p \geq 185$ fs) nanogardelių formavimosi energijos slenkstis mažesnis $-E_{sl}(\tau_p) = 75 - 100$ nJ. Su šios trukmės impulsais ir 50 nJ energija medžiaga nesimodifikuoja, o tai rodo, kad energijos intervalas, leidžiantis susidaryti I tipo modifikacijoms siaurėja didinant impulso trukmę ir galiausiai užsidaro, kai $\tau_p > 185$ fs. Esant energijoms, didesnėms nei 300 nJ ir didesnėms nei 185 fs trukmėms, modifikacijos morfologija tampa sutrikdyta ir medžiagoje

atsiranda skilimai.



12 pav. Femtosekundine lazerine spinduliuote indukuotų skirtingų modifikacijų tipų slenkstinės energijos. I tipas – tolygi modifikacija, II tipas – tolygios modifikacijos srityje išsidėsčiusios nanogardelės, III tipas – kompleksinė modifikacijos sandara, susidedanti iš tolygios modifikacijos, nanogardelių ir sutrikdytų sričių su skilimais. Pritaikyta pagal [30].

1.1.3.2 Bangos ilgis

Pastebėta, kad su didelio pasikartojimo dažnio fundamentiniu 1045 nm bangos ilgiu lydytame kvarce įrašant bangolaidžius gaunamas mažas lūžio rodiklio pokytis [31], tačiau įrašant juos su antros harmonikos 522 nm bangos ilgiu, gauti reliatyviai nedidelių nuostolių ($\approx 1 \text{ dB/cm}$) bangolaidžiai su gan dideliu lūžio rodiklio pokyčiu ($\Delta n = 0.01$) [18]. Remiantis Keldyšo teorija, trumpesnis bangos ilgis padidina daugiafotonės jonizacijos tikimybę, tačiau esant ilgesnėms bangoms atitinkamai išauga tunelinės jonizacijos sparta, todėl bendrasis netiesinės sugerties koeficientas mažai kinta, keičiantis bangos ilgiui [11]. Trumpinant bangos ilgį, galima spinduliuotę medžiagoje sufokusuoti į mažesnių matmenų dėmę, taip pat trumpesniais bangos ilgiais apdirbtos medžiagos paviršiaus šiurkštis daug mažesnis.

1.1.3.3 Impulso energija (intensyvumas)

Nors smailinis intensyvumas yra labai didelis (GW/mm² ar net TW/mm² eilės), vidutinė galia norint sukelti modifikacijas skaidriose terpėse nedidelė, siekianti kelis šimtus mW. Idealiu atveju erdvinis lazerio energijos, kurią sugėrė medžiaga intensyvumo pasiskirstymas esant tiesinei sugerčiai atitinka Gauso profilį (13 pav. pavaizduotą plona brūkšnine linija). Daugiafotonei sugerčiai sugertos energijos intensyvumo pasiskirstymas tampa siauresnis. Efektyvus pluošto dydis ω n-fotonei sugerčiai išreiškiamas taip:

$$\omega = \omega_0 / \sqrt{n},\tag{3}$$

kur ω_0 – realus sufokusuoto lazerio pluošto dydis [32]. 13 pav. taip pat vaizduojamas erdvinis skaidrios medžiagos sugertos lazerio energijos pasiskirstymas dvifotonei (linija) ir trifotonei (siauresnė brūkšninė linija) sugerčiai. Iš 3 lygties matyti, kad esant daugiafotonei sugerčiai viršijamas pradinis difrakcijos ribojamas sufokusuoto lazerio pluošto dydis ω_0) ir pasiekiama sub-difrakcijos ribojama skiriamoji geba.



13 pav. Realus pluošto profilis (storesnė brūkšninė linija) ir erdviniai pasiskirstymai skaidrių medžiagų sugertos lazerio energijos dvifotone (netrūki linija) ir trifotone (siaura brūkšninė linija) sugertimi. Horizontali linija vaizduoja reakcijos slenkstį). Pritaikyta pagal [9].

Norint pagerinti fabrikavimo skiriamąją gebą, galima taikyti slenkstinį efektą. Kai turime lazerio intensyvumo slenkstį, virš kurio po sugerties įvyksta reakcija, fabrikavimo skiriamoji geba gali būti gerinama reguliuojant intensyvumą šalia slenksčio. Pavyzdžiui, jei slenkstinis reakcijos intensyvumas atitinka horizontalią liniją (13 pav.), fabrikavimo plotis gali būti sumažintas iki $2/5 \omega_0$. Tada netiesinė daugiafotonė sugertis gali viršyti lazerio bangos ilgio difrakcijos limitą ir pasiekiama subdifrakcinė skiriamoji geba [9].

1.1.3.4 Impulsų pasikartojimų dažnis

Esant pakankamai nedideliam impulsų pasikartojimų dažniui (< 100 kHz) terminė difuzija nuneša šilumą iš židinio srities dar prieš atkeliaujant sekančiam impulsui [14], todėl kadangi impulsų poveikis medžiagai laike nepersikloja, galima laikyti, kad impulsų vaidmuo šiuo atveju yra nepriklausomas vienas nuo kito. Esant didesniam impulsų pasikartojimų dažniui (> 100 kHz), trukmė tarp impulsų trumpesnė nei šilumos difuzijos trukmė, todėl židinio aplinkoje vyksta šilumos akumuliacija. Jei impulsų energijos pakanka, veikiant femtosekundinei spinduliuotei stiklas židinio aplinkoje išlydomas ir kuo daugiau impulsų sugeriama, tuo išlydytos srities tūris didėja iki kol išjungiama spinduliuotė, tada išlydytos sritys staigiai atvėsta, formuodamos pakitusio lūžio rodiklio sritis. Išlydytas skaidrios medžiagos tūris gali būti kontroliuojamas parenkant tinkamą impulsų skaičių fokusavimo taškui:

$$N = 2\omega_0 R/\nu,\tag{4}$$

čia $2\omega_0$ – sufokusuotos dėmės diametras (1/e²), R – impulsų pasikartojimo dažnis, ν – skanavimo greitis.

1.1.3.5 Skaitinė apertūra NA

Fokusuojančios optikos skaitinė apertūra NA taip pat turi įtakos medžiagos modifikacijai. Visų pirma, ji apibrėžia sufokusuotos spinduliuotės židinio aplinkos dydį, kuris lemia fabrikuojamų darinių skiriamąją gebą. Kuo didesnė skaitinė apertūra, tuo aštriau vyksta fokusavimas ir tuo didesnis bus intensyvumas, todėl mažiau galios reikės norint pasiekti slenkstinį intensyvumą, tačiau didėja darbinis atstumas. Esant mažoms skaitinės apertūros vertėms, medžiagoje atsiranda netiesinės optikos reiškiniai: savifokusavimas (filamentacija) ir baltos šviesos superkontinuumas (spektro išplitimas). Esant mažesniems nei 0.1 NA, intensyvumo slenkstis šiems netiesiniams procesams yra mažesnis nei slenkstinis modifikacijos intensyvumas [5]. Esant didesniems nei 1 NA, medžiagoje jau sukeliamos trečiojo tipo modifikacijos – mikroertmės. Todėl norint sukelti antrojo tipo modifikacijas reikia vidutinio fokusavimo objektyvo (NA ≈ 0.4).

1.2 Mikromechaninės stiklinės sistemos

Femtosekundinės spinduliuotės sąveika su skaidria medžiaga, kaip jau minėta, suteikia galimybę preciziškai modifikuoti medžiagos struktūrą bei savybes. Išnaudojant skirtingų modifikacijų tipų privalumus galima gaminti mikromechaninius multifunkcinius monolitinius prietaisus, susidedančius iš judančių mikroelementų. Mažiausių darinių matmenys gali siekti kelis mikrometrus ar net nanometrus, jei gaminama litografiniu būdu. Pagal poreikį susiejus integrinę optiką, opto-fluidiką, mikromechaniką galima gaminti įvairias kompleksines mikrosistemas, kurių pavyzdžiai pateikti 14 pav.



14 pav. Mikromechaninės stiklinės sistemos. Kairėje – poslinkio matavimo sistema [1]. Viduryje – FEMTOprint pagaminta mikroadatos sistema akies tinklainės venų kanuliavimui [33]. Dešinėje - DNR nanoinjektorius [34].

Monolitinis integravimas iš vienos medžiagos leidžia pagaminti daugiafunkcinį prietaisą, kurio nereikia surinkti iš daug atskirų detalių. Projektuojant mikroprietaisus, reikia atsižvelgti į skirtingus veikimo aspektus. Keičiantis fizikinių jėgų santykiui pereinant prie mikromastelio, paviršinės jėgos tampa labai svarbios, o gravitacinė ir inercijos jėgos pasidaro beveik visiškai nereikšmingos dėl trumpų atstumų bei paviršinės sąveikos [4]. Matmenys didelę įtaką turi ir šilumos pernašoje bei skysčių dinamikoje. Šiame poskyryje bus apžvelgiamos pagrindinės mikromechaninių sistemų gamybai naudojamo lydyto kvarco savybės, lanksčių elementų kinematinis aprašymas, dažniausiai naudojamos lanksčios jungtys bei įtampa valdomos atsilenkiančios mikromechaninės svirties su skirtingomis jungtimis veikimo principas ir analitiniai modeliai.

1.2.1 Lydyto kvarco savybės

Mikromechaninių sistemų gamybai dažnai naudojamas lydytas kvarcas – stiklas, sudarytas iš silicio dioksido amorfinės (nekristalinės) formos (SiO₂). Tai yra visiškai sintetinė medžiaga, techniškai tyriausias stiklas, neturintis jokių papildomų priemaišų, kurios dažniausiai pridedamos gaminant kitus stiklus, norint sumažinti lydymosi temperatūrą. Lydytas kvarcas turi itin geras optines savybės – kadangi gaminamas iš labai švarių silicio dujų, geriau praleidžia ultravioletinę šviesą nei kiti stiklai, todėl yra naudojamas gaminant lęšius bei kitą optiką ultravioletiniam spektrui ir yra inertinis beveik visiems chemikalams [35]. Taip pat ši medžiaga turi puikias elastines, mechanines savybės, dėl to yra labai tinkama mikromechaninių sistemų gamybai. Mažas terminio plėtimosi koeficientas leidžia naudoti didelius temperatūros pokyčius nesuskaldant medžiagos. Lydytas kvarcas yra biologiškai suderinama medžiaga, o amorfinis silicio dioksidas formuoja didžiosios dalies planktono skeletą.

Mechanikoje jėga, tenkanti ploto vienetui, vadinama įtempiu: $\sigma = \frac{F}{S}$, o formos ar dydžio pokytis, atsiradęs dėl šios jėgos poveikio – deformacija: $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$. Šiuos dydžius susieja Jungo modulis (elastingumo, tamprumo modulis), nusakantis medžiagos atsparumą gniuždymui ar tempimui, apibrėžiamas kaip įtempio ir santykinio pailgėjimo santykis: $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$, kuris lydytam kvarcui lygus 71.7 GPa. Išorinių jėgų atliktas darbas esant elastinėms deformacijoms pereina į medžiagos vidinę energiją, kuri vadinama deformacijos energija. Šios energijos dalinė išvestinė pagal deformaciją lygi įtempiui: $\sigma = \frac{\partial U_0}{\partial \epsilon}$. Medžiagos charakterizuojamos sąlygine tempimo diagrama, susiejančia normalinį įtempį su santykine išilgine deformacija $\sigma(\epsilon)$. Šioje diagramoje yra keletas ypatingų taškų, vadinamų ribomis, į kurias atsižvelgiama projektuojant mechanines sistemas. Norint gaminti lanksčius mechanizmus, reikia projektuoti apkrovas taip, kad neviršytų medžiagos proporcingumo-tamprumo ribos, t.y. sistema turi veikti elastingumo intervale, kuriame neatsiranda jokių liekamųjų deformacijų. Viršijus šią ribą, medžiagoje atsiranda liekamosios plastinės deformacijos. Lydytam kvarcui ši riba lygi 48.3 MPa [36], tačiau svarbu sistemas projektuoti taip, kad maksimalūs įtempiai būtų bent eile mažesni už šią teorinę vertę, nes dėl įvairių medžiagos netobulumų ir taškinių defektų reali maksimali įtempių vertė bus mažesnė. Nesunku pastebėti, kad tempiant lanksčią medžiagą ji plonėja, o spaudžiant ją – storėja. Tokį medžiagos plėtimąsi arba traukimąsi apkrovoms statmenomis kryptimis apibūdina Puasono konstanta – vienas esminių medžiagos parametrų, naudojamų modeliuojant elgseną esant įvairioms apkrovoms. Puasono konstanta yra nekintantis medžiagos parametras, lygus šoninio ir išilginio įtempių santykiui: $\nu = \frac{-\epsilon_{||}}{\epsilon_{=}}$. Lydyto kvarco Puasono konstanta $\nu = 0.17$.

1.2.2 Lanksčių elementų kinematikos aprašymo būdai

Mikromechanikoje bei mikrorobotikoje mechaninius vyrius pakeičia "lanksčios jungtys" (angl. *flexures*), o kombinuojant skirtingų tipų lanksčias jungtis, gaunami "paslankūs mechanizmai" (angl. *compliant mechanisms*), perduodantys jėgą ir poslinkį iš įėjimo vietos į išėjimo vietą. Paslankių mechanizmų panaudojimo galimybės beveik neribotos – nuo specializuotų mikroelektromechaninių sistemų (MEMS) miniatiūriniams jutikliams ir aktuatoriams iki kasdienybėje naudojamų monolitinių replių, griebtuvų, spyruoklių, valytuvų menčių, lapų spaustukų, atsidarančių dangtelių ir t.t. Plonų lanksčių jungčių veikimo principas – medžiagos elastinė deformacija veikiant jėgai. Lanksčios jungtys atlieka vyrio funkciją, tik šiuo atveju gaunamas monolitinis vyris, o mechanikoje jis susideda iš kelių detalių. Tarp atskirų detalių lieka tarpeliai, yra trintis, todėl vyrius reikia tepti, taip pat kiekviena detalė įveda savo judėjimo paklaidas. Monolitinės jungties atveju šių problemų nėra, todėl jų susidėvėjimas ženkliai mažesnis, judėjimo tikslumas didesnis, taip pat supaprastinama gamyba, jei gaminamas ilgas gaminys, kurį supjausčius gaunami keli mechanizmai. Tinkamai suprojektavus norimą mechanizmą, t.y. užtikrinant, kad besilankstančių medžiagos sričių ciklinė apkrova neviršytų elastiškumo ribos, šie mechanizmai nesusidėvi, nes medžiagoje nesukeliamos jokios išliekamosios deformacijos. Paslankių mechanizmų trūkumas - elastiškumo ribojama judėjimo eiga. Nors stiklinės medžiagos turi dideles teorines elastines ribas, jos lūžta esant daug mažesnėms apkrovoms (kelioms dešimtims MPa) dėl paviršiaus netobulumų iš kurių susiformuoja lūžiai.

Kinematinį atsilenkiančių svirčių veikimą aprašo įvairios teorijos, iš kurių pagrindinės: Eulerio-Bernulio [37] ir Timošenko [38]. Šios teorijos pritaikomos įvairiuose modeliuose, aprašančiuose kompleksinius, iš kelių besilankstančių elementų sudarytus mechanizmus (pvz. "pseudo-kieto kūno modelis" (angl. *pseudo-rigid-body-model PRBM*) arba "kieto kūno modelis" (angl. *rigid-body-model RBM*), kur lanksčios vietos aproksimuojamos mechanikoje įprastai naudojamais sujungimais). Eulerio-Bernulio teorijos prielaida: plokštumos skerspjūviai, kurie statmeni svirties centrinei ašiai, vykstant deformacijai išlaiko tą pačią plokštumą ir statmenumą neutraliai ašiai po deformacijos [40] (žr. 15 pav.). Ši teorija apima nedaug atsilenkiančias svirtis su šonine apkrova ir neįskaito šlyties deformacijų, bet daugeliui inžinerinių atvejų gaunami pakankamai tikslūs rezultatai – ja naudotasi Eifelio bokšto, Ferris apžvalgos bokšto statymui, tiltų, pastatų bei įvairių kitų žymių konstrukcijų statybai. Eulerio-Bernulio teorijos lygtis:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 \delta}{dx^2} \right) = q,\tag{5}$$



15 pav. Eulerio-Bernulio teoriją aiškinanti atsilenkiančios svirties iliustracija – kairėje, Timošenko – dešinėje. Čia b – skerspjūvis, A – skerspjūvio plotas, I – inercijos momentas. Pritaikyta pagal [39].

čia δ – svirties atsilenkimas z ašies kryptimi, q – paskirstyta apkrova (jėga tenkanti ilgio vienetui), E – Jungo modulis, I – inercijos momentas. Iš šios lygties išreikštas lenkimo momentas:

$$M = -EI\frac{d^2\delta}{dx^2} \tag{6}$$

bei įtempis:

$$\sigma = \frac{Mz}{I} = -zE\frac{d^2\delta}{dx^2},\tag{7}$$

čia z – atstumas nuo neutralios ašies iki norimo taško. Iš (5), (6) ir (7) lygčių galima padaryti išvadą, kad norint pasiekti didelį atsilenkimą, reikia:

- Mažinti lanksčios jungties inercijos momentą. Maksimali apkrova yra atsilenkimo ir inercijos momento funkcija. Sumažinus inercijos momentą, jungties standumas taip pat sumažėja.
- Didinti lanksčios jungties ilgį. Taip padidinamas atsilenkimas nepadidinant įtempių.
- Didinti lanksčių jungčių kiekį, taip tinkamai jas sukombinavus iš vienos jungties reikalaujama mažesnio poslinkio.

Timošenko teorijoje plokštumos skerspjūviai taip pat išlieka plokšti, bet nebe statmeni išilginei ašiai (žr. 15 pav.). Taip įskaitomos šlyties deformacijos ir sukimo inercijos poveikis, todėl šiuo modeliu galima aprašyti trumpus strypus. Klasikinė Eulerio-Bernulio svirties teorija nepaiso skersinių šlyties įtempių, bet yra žemesnės eilės ir paprastesnė, tačiau kai išilginisskersinis santykis yra didelis, gaunami rezultatai netikslūs. Tokiais atvejais taikoma Timošenko teorija, kuri jau įskaito šlyties įtaką.

Analiziškai aprašinėjant jungtį, kurios vienas galas įtvirtintas, o kitas gali judėti, turime 6 laisvės laipsnius: 3 transliacinius ir 3 rotacinius, kurie pavaizduoti 16 pav.



16 pav. Viename gale įtvirtintos lanksčios jungties laisvės laipsniai [41].

Kiekvienai jungčiai galima išvesti lankstumo lygtis arba spyruoklės konstantas, kurios apibrėžia mechaninį atsaką į apkrovą. Šios lygtys yra labai patogus įrankis lanksčių jungčių charakterizavimui ir jomis galima nustatyti atsilenkimo intervalą, lenkimosi tikslumą, jautrumą pašalinėms jėgoms ir maksimalius įtempius. Norint itin tikslių rezultatų, reikia įskaityti ir šlyties jėgas, kurios ypač svarbios trumpoms jungtims. [41] knygoje pateiktos įvairių jungčių lankstumo matricos, esant apkrovoms, kurios susideda iš kelių jėgų ar momentų.

Jei laikysime, kad vienintelė jėga, veikianti jungtį yra lenkimo momentas M_z apie ašį z ir neįskaitysime šlyties jėgos daromos įtakos, kuri mažiems atsilenkimams didelio poveikio neturi, lankstumą galima aprašyti vienu lankstumo matricos nariu. Jei x ašies koordinačių pradžios tašku laikysime įtvirtintą vietą, lankstumo išraiška svirties lanksčiai daliai:

$$C_l = \frac{12}{Et} \int_0^l \frac{dx}{w(x)^3},$$
(8)

čia E – Jungo modulis, t – svirties storis, l – jungties ilgis, w(x) - jungties geometrinio kontūro (pločio kitimo) lygtis [39]. Atvirkštinė lankstumo išraiška lygi spyruoklės konstantai:

$$K_l = C^{-1}. (9)$$

Pagal Huko dėsnį, svirtį į pusiausvyros padėtį bandantis grąžinti sukimo momentas:

$$M_l = -K\Theta,\tag{10}$$

čia Θ – atsilenkimo kampas.

Yra bent keliasdešimt skirtingų lanksčių jungčių geometrijų, tačiau dėl nedidelio kompleksiškumo, gamybos patogumo, galimybės panaudoti plokščiuose paslankiuose mechanizmuose, ypač kinematinėse grandinėse su daugiau jungčių, dažniausiai naudojamos "lanksčios įpjovos jungtys" (angl. notch flexure hinges) [42], kurių modelis pateiktas (17 pav.). Šio tipo jungtys klasifikuojamos pagal kontūro pločio kitimą w(x). Dažniausiai naudojami trys šių jungčių tipai: apskritiminė jungtis, kai reikia tikslaus poslinkio; užapvalintų kampų jungtis, kai reikia didelio poslinkio; eliptinė jungtis, kai reikia tarpinio varianto.



17 pav. "Lanksčios įpjovos jungties" (angl. *notch flexure hinge*) pagrindiniai geometriniai parametrai.

1 lentelėje pateikta keletos jungčių kontūro pločio kitimo funkcijos w(x).

Tipas	Pločio kitimas			
Apskritiminė	$w(x) = w + 2(r - \sqrt{x(2r - x)})$, kai r = 0.51			
Užapvalintų kampų	$\mathbf{w}(\mathbf{x}) = \begin{cases} w + 2r - 2\sqrt{r^2 - \left(x + \frac{l}{2} - r\right)^2}, & \text{kai } -\frac{l}{2} \le x < -\frac{l}{2} + r, \\ w, & \text{kai } -\frac{l}{2} + r \le x \le \frac{l}{2} - r, \\ w + 2r - 2\sqrt{r^2 - \left(x - \frac{l}{2} + r\right)^2}, & \text{kai } \frac{l}{2} - r < x \le \frac{l}{2}. \end{cases}$			
Eliptinė	$w(x) = w + 2r_y \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{r_x^2}}\right)$, kai $r_x = 0.5l$ ir $r_y = \frac{W - w}{2}$			
Sukryžiuota	$w(\mathbf{x}) = \begin{cases} 2w, & \text{kai } -\frac{l}{2} \le x < -\frac{w}{2}, \\ w, & \text{kai } -\frac{w}{2} \le x \le \frac{w}{2}, \\ 2w, & \text{kai } \frac{w}{2} < x \le \frac{l}{2}. \end{cases}$			

1 lentelė. Skirtingų jungčių kontūrų pločio kitimo funkcijos

Analitiškai nagrinėjant skirtingų tipų jungtis, bus daromos tokios prielaidos:

- Deformacijos (atsilenkimas) yra mažos.
- Jungtys yra elastiškos, todėl deformacijos, remiantis Huko dėsniu, proporcingos apkrovai.
- Jungtys homogeninės ir izotropinės.

1.2.3 Įtampa valdomos mikromechaninės atsilenkiančios svirties analitiniai modeliai

"Atsilenkianti svirtis" (angl. cantilever beam) yra dažniausiai mikroelektromechaninėse sistemose naudojamas mikrodarinys (atominių jėgų mikroskopas AFM, jutikliai, dažnių filtrai, rezonatoriai). Principinis įtampa valdomos atsilenkiančios svirties modelis pateiktas 18 pav. Svirtį su uždengtais kontaktais ir pridedama įtampa galime laikyti kaip plokščią kondensatorių, sudarytą iš dviejų plokštelių ir jas skiriančio dielektriko – oro. Vienas kontaktas – besilankstančios svirties šoninė kraštinė, kitas – stacionari jai lygiagreti kraštinė. Kadangi plokščiojo kondensatoriaus talpa $C = \frac{q}{U} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$, kur q – krūvis, ϵ_0 – dielektrinė konstanta, d – atstumas tarp plokštelių, S – vienos plokštelės plotas, tai krūvis vienoje plokštelėje:

$$q = \frac{\epsilon_0 SU}{d}.\tag{11}$$

Kadangi kondensatoriaus plokštelėse patalpintas priešingų ženklų krūvis, jos traukia viena kitą jėga F. Elektrinis laukas tarp plokštelių išreiškiamas $E = \frac{U}{d}$, o vienos plokštelės kuriamas elektrinis laukas bus dvigubai mažesnis: $E_x = \frac{U}{2d}$. Viena kondensatoriaus plokštelė traukia kitą plokštelę jėga $F = qE_x = \frac{qU}{2d}$. Į pastarąją formulę įstačius išraišką (11), gauname jėgą, kuria plokštelės traukia viena kitą, kai svirtis yra pusiausvyros padėtyje:

$$F = \frac{\epsilon S U^2}{2d^2} = \frac{\epsilon t L U^2}{2d^2},\tag{12}$$

čia t – svirties storis, L – nelanksčios dalies ilgis. Laikysime, kad kondensatorių sudaro nelanksti svirties dalis ir prieš ją esanti plokštuma. Pridėjus įtampą, svirtis dėl šios jėgos lenkiasi link prieš ją esančios plokštumos ir, jai atsilenkus, skirtingos vietos traukiamos skirtinga jėga. Svirtis atsilenkusi sustos tada, kai traukos jėga bus lygi svirtį į pusiausvyros padėtį bandančiai grąžinti jėgai ((10) išraiška). Laikysime, kad visą kondensatorių sudaro daug nykstamai mažo ploto kondensatorių, kur atstumas tarp kiekvieno iš jų plokštelių priklauso nuo koordinatės x. Tada vieno iš tokių kondensatorių plotą galima užrašyti kaip s = tdx. Atstumas tarp plokštelių d(x)priklausys nuo svirties atsilenkimo ir bus lygus $d(x) = g - \delta = g - x \sin \Theta$. Įstačius šias išraiškas į (12) formulę, gauname:

$$F(x) = \frac{\epsilon_0 U^2}{2} \frac{t dx}{(g - x \sin \Theta)^2}.$$
(13)

Svirties sukimo momentas, darant prielaidą, kad jėga visad veikia statmenai neutraliai svirties ašiai, lygus jėgos ir atstumo iki jos sandaugai. Išreiškiame sukimo momentą taške, arčiausiame lanksčiai daliai kaip visų momentų sumą:

$$M_1 = \frac{\epsilon_0 t U^2}{2} \int_l^{L_s} \frac{x dx}{(g - x \sin \Theta)^2},\tag{14}$$

čia L_s – bendras svirties ilgis (žr. 18 pav.).

(10) išraikoje momentas veikia lanksčios dalies pabaigoje, prasidedant stacionariai svirties daliai. Įdėjus į šią išraišką (9), o tada ir (8), gauname į pusiausvyros padėtį svirtį bandantį grąžinti momentą:

$$M_2 = -K\Theta = -C^{-1}\Theta = -\left(\frac{Et\Theta}{12}\frac{1}{\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}}\frac{dx}{w(x)^3}}\right).$$
 (15)

Sudėjus (15) išraikos grąžinantį momentą su (14) išraiškos apkrovos momentu, gauname lygtį, iš kurios galima išreikšti atsilenkimą pusiausvyros padėtyje, t.y. svirties atsilenkimo kampo priklausomybę nuo geometrinių parametrų ir įtampos – analitinį lankstumo modelį:

$$\left|\frac{\epsilon_0 t U^2}{2} \int_l^{L_s} \frac{x dx}{(g - x \sin \Theta)^2} = \frac{E t \Theta}{12} \frac{1}{\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{dx}{w(x)^3}}\right|$$
(16)

Į pusiausvyros padėtį svirtį grąžinantį momentą galima išreikšti ir naudojantis Castigliano metodu, pagrįstu dalinėmis energijos išvestinėmis. Antroji Castigliano teorema, skirta poslinkiams elastinėje struktūroje nustatyti teigia, kad vidinės (deformacijų) energijos pirmos eilės dalinė išvestinė pagal jėgą, veikiančią tą tašką lygi to taško atsilenkimo komponentei suteiktos jėgos kryptimi: $\delta_n = \frac{\partial U}{\partial P_n}$, čia δ_n – poslinkis apkrovos taške. Atsilenkimo kampo išraiška šiuo atveju: $\Theta = \frac{\partial U}{\partial M_2}$. Lenkiant svirtį, joje susikaupusi vidinė deformacijų energija: $U = \int_0^l \frac{M^2}{2EI_x} dx$, kur I_x – inercijos momentas x ašies atžvilgiu. Tada atsilenkimo kampą galima išreikšti taip:

$$\Theta = \frac{\partial U}{\partial M_2} = \frac{\partial}{\partial M_2} \left(\frac{M_2^2 l}{2EI} \right) = \frac{M_2 l}{EI}.$$
(17)

Inercijos momentus skirtingų tipų jungtims galima suskaičiuoti taip:

$$I_x = \int \int y^2 dA = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{-\frac{w(x)}{2}}^{\frac{w(x)}{2}} y^2 dy dx = \frac{1}{12} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} w(x)^3 dx.$$
(18)

Iš (17) išreiškus grąžinantį momentą ir sulyginus jį su apkrovos momentu bei įstačius (18) inercijos išraišką, gauname analitinį Castigliano modelį:

$$\frac{\epsilon_0 t U^2}{2} \int_l^{L_s} \frac{x dx}{(g - x \sin \Theta)^2} = \frac{\Theta E \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} w(x)^3 dx}{12l}$$
(19)

Analitiniame lankstumo modelyje (žr. (16) lygtį) grąžinantis jėgos momentas skaičiuojamas pagal medžiagos lankstumą – dydį, atvirkščią spyruoklės konstantai. Šiame modelyje teigiama, kad sukimo momentas tiesiškai priklauso nuo atsilenkimo kampo. Analitiniame Castigliano modelyje (žr. (19) lygtį) grąžinantis momentas išreiškiamas per energiją, kuri kaupiasi medžiagoje esant apkrovai. Čia taip pat laikoma, kad medžiaga yra tiesiškai elastinė.

1.2.4 Iteracinis sprendimas - baigtinės elementų analizės metodas (FEM)

Mikromechaninės sistemos dažniausiai susideda iš keletos skirtingų jungčių, o jas jungiant skirtingais būdais formuojami skirtingi mechanizmai. 14 pav. kairėje esančioje poslinkio matavimo sistemoje integruotas mechanikoje dažnai naudojamas (pvz. transliaciniuose staleliuose) paslankus mechanizmas. Du identiški 4 identiškų lanksčių jungčių keturgrandžiai mechanizmai sujungti lygiagrečiai. Tokiu mechanizmu gaunamas itin tikslus judėjimas viena ašimi, o judėjimas visomis kitomis ašimis apribotas. 14 pav. viduryje esanti mikroadatos sistema bei dešinėje esanti DNR nanoinjektoriaus sistema labiau kompleksinės – čia integruotos daugybės skirtingų tipų lanksčios jungtys.

Projektuojant kompleksinius mechanizmus, susidedančius iš daugelio skirtingų lanksčių jungčių, pirma identifikuojami lankstūs elementai, tada daromas kinematinis modelis, kur kiekvienas elementas pakeičiamas charakteristiniu sukamuoju mechaniniu vyriu ir nagrinėjama tokios sistemos elgsena [40]. Pagrindinė prielaida – deformacijos vyksta tik jungtyse, o kitos vietos yra nelanksčios. Kiekvienai jungčiai apskaičiuojamos įvairios apkrovos ir pagal jas parenkama tai vietai tinkanti lanksti jungtis. Modeliuojant siekiama apsibrėžti mechanizmo galimo judesio intervalą, atsižvelgiant į netiesiškumus, medžiagos savybes, standumą laisvės ir apribojimo laipsnių kryptimis bei jo variaciją didinant apkrovą ar poslinkį, judėjimo paklaidas apribojimo laipsnių kryptimis. Koncentruota apkrova apriboja sistemos judėjimo intervalą ir ilgaamžiškumą, todėl apskaičiuoti įtempių vertes optimizuojant lanksčių jungčių topologiją yra būtina. Taip pat siekiama suprasti, kaip visos mechanizmo savybės priklauso nuo geometrinių parametrų keitimo – reikia atlikti parametrų optimizavimą. Analitiniai modeliai padeda suvokti parametrų priklausomybes, vykdant parametrinę analizę naudoja nedaug kompiuterio skaičiavimo resursų, todėl programos vykdymo trukmė nedidelė, tačiau dėl naudojamų prielaidų ir netiesiškumų neiskaitymo jais gaunamas rezultatas nėra tikslus. Didesnį tikslumą galima pasiekti skaitiniais metodais, pavyzdžiui, netiesiniu baigtinių elementų analizės metodu (FEM).

Norint išspręsti realų uždavinį, reikia jį aprašyti matematiškai ir parinkti sukurto modelio sprendimo metodą. Sudėtingiems modeliams tikslių analitinių metodų išvis nėra, todėl parenkami skaitiniai metodai, į kuriuos įeina netiesinės diferencialinės ir integralinės lygtys, apdorojama labai daug duomenų. Sprendžiant realius uždavinius, atliekama milijonai aritmetinių veiksmų ir jei nebus siekiama sumažinti skaičiavimo paklaidų, sprendinį šios paklaidos gali iškreipti neatpažįstamai. Tiesioginiuose metoduose gaunamas tikslus sprendinį sprendinų paklaidų, bet šie metodai netinka netiesinių lygčių problemoms spręsti arba modeliams su daug nežinomųjų. Skaičiuojamojoje matematikoje iteracinis metodas – matematinė procedūra, kuria randamas apytikslis sprendinys bet kokiu norimu tikslumu. Generuojama seka apytikslių sprendinių, kur kiekvienas sekantis po to yra suskaičiuotas naudojant esantį prieš tai. Jei atlikus pakankamai daug iteracijų artinio paklaida bus mažesnė už norimą iš anksto nustatytą paklaidą, tai iteracinis procesas konverguoja – artinių seka artėja prie tikslaus sprendinio. Norint greitesnio modelio suskaičiavimo, galima pasirinkti mažesnį tikslumą su mažesniu iteracijų skaičiumi, bet randamas sprendinys jau bus mažiau tikslus.

Pagrindiniai realaus uždavinio sprendimo etapai:

- 1. Sudaromas matematinis uždavinį aprašantis modelis netiesinių diferencialinių lygčių sistema.
- 2. Jos sprendimui taikomi skaitiniai metodai. Diferencialinių lygčių sistema baigtinių tūrių elementų metodu (FEM) pakeičiama tiesinių lygčių sistema.
- 3. Skaitmeninis 3D modelis suskaidomas į tūrinį tinklelį, kur priklausomai nuo metodo kiekvieną tūrį atitinka nuo 1 iki 5 tiesinių lygčių, t.y. gaunamas labai didelis lygčių kiekis.
- 4. Lygčių sistemos sprendžiamos parinktais skaitiniais metodais.

Matematiniuose modeliuose dažnai naudojami apytiksliai duomenys ar koeficientai, o kompiuterio atliekamuose skaičiavimuose skaičiai taip pat yra apvalinami. Sudarinėjant skaitinius metodus ar algoritmus reikia kontroliuoti pradines ir apvalinimo paklaidas taip, kad jos nesikauptų ir neišaugtų žymiai iškreipiant sprendinį, t.y. siekiamybė – modelio stabilumas. Apytiksliai skaičiai ir paklaidos yra vienas iš veiksnių, dėl kurių skaitiniuose metoduose lyginami keli metodai tam pačiam uždaviniui spręsti.

2 Įtampa valdoma mikromechaninė atsilenkianti svirtis

Šis skyrius susideda iš dviejų poskyrių. Pirmajame aptariamas teorinis modeliavimas, o antrajame – mikromechaninių svirčių gamyba bei eksperimentinių rezultatų palyginimas su pirmajame poskyryje aptarto modelio rezultatais.

2.1 Baigtinių elementų analizės modelis (FEM) "Comsol" programiniu paketu

Šiame poskyryje bus aptariamas baigtinių elementų analizės modelio kūrimas, svirčių su skirtingomis jungtimis parametrų optimizavimas bei skaitinio ir analitinio modeliavimo rezultatai su optimaliais parametrų rinkiniais.

2.1.1 Uždavinio 3D modelis ir pagrindiniai parametrai



18 pav. Principinis uždavinio 3D modelis su pagrindiniais parametrais.

Principinis uždavinio modelis pateiktas 18 pav., o 2 lentelėje pateikti pagrindiniai parametrai bei jų varijavimo intervalai. Svirtis sudaryta iš jungties – plonesnės ir trumpesnės dalies, per kurią vyksta lenkimasis ir nelanksčios storesnės bei ilgesnės dalies, kuri sudaro didesniąją svirties masės dalį. Simuliacijos atliktos jungtims, kurių pločio kitimo funkcijos pateiktos 1 lentelėje taip pat ir stačiakampei jungčiai, kurios geometrinis kontūras nekintantis (w(x) = w).

Modeliuojant uždavinį, svirtis įtvirtinta trumpajame gale, o aplink ją pridėta erdvė – oras. 18 pav. modelio viršus įžemintas, o svirčiai pridėta įtampa. Elektrostatinė jėga, atsiradusi dėl potencialų skirtumo tarp elektrodų lenkia svirtį link virš jos esančios plokštumos. Svirčiai lenkiantis, oro tarpo geometrija bei atstumas tarp elektrodų keičiasi kartu keisdamas ir elektrinio lauko pasiskirstymą. Mažėjant tarpui, didėja elektrostatinės jėgos, o esant tam tikrai įtampai jos viršija įtempių jėgas ir sistema tampa nestabili – svirtis prisitraukia maksimaliai. Ši įtampos vertė vadinama "pritraukimo įtampa" (angl. *pull-in voltage*). Pridėjus mažesnę įtampą nei ši vertė, svirtis šiek tiek atsilenkusi lieka pusiausvyros padėtyje, kurioje yra įtempių ir elektrostatinių jėgų balansas. Pridėjus didesnę įtampą nei ši vertė, modelyje rezultatas nekonverguoja, nes nebėra stabilaus stacionaraus sprendimo, todėl šiose simuliacijose $U_{\text{pull-in}}$ verte laikysime tą, ties kuria simuliacija nebekonverguoja.

Parametras	Išraiška/intervalas	Apibūdinimas						
Varijuojami parametrai								
U	$U \le 30 V$	Įtampa						
1	L _s - L	Jungties ilgis						
$W\left(\frac{l}{2}\right)$	$4 \ \mu m \le w \le 8 \ \mu m$	Jungties plotis viduryje						
g	$g(U_{\text{pull-in}} = 15 \text{ V}) \le g \le g(U_{\text{pull-in}} = 30 \text{ V})$	Tarpas tarp kontaktų						
Nekeičiami parametrai								
L	L _s - l	Svirties nelanksčios dalies ilgis						
L_s	$l+L=3100~\mu m$	Svirties ilgis						
W	$25~\mu{ m m}$	Svirties nelanksčios dalies plotis						
t	200 µm	Svirties storis (bandinio stikliuko storis)						

2 lentelė. Modelyje naudojami parametrai

Kiekvienai geometrijai buvo atliekamas parametrų optimizavimas, t.y. keičiami geometriniai parametrai bei įtampa ir ieškoma optimaliausio varianto, su kuriuo pasiekiamas kuo didesnis stabilus atsilenkimas, o įtempių vertės toleruotinos.

Įtampos apribojimas parinktas atsižvelgiant į turimą šaltinį, bet siekiamybė parametrus optimizuoti taip, kad kuo mažiau įtampos reikėtų, norint atlenkti svirtį iki maksimalios vertės (kad kontaktai nesusiliestų, realiame fiziniame modelyje padarytos iškyšos netoli svirties galo į kurias ji atsiremia). Mažesnė įtampa leistų pasirinkti patogesnį įtampos šaltinį. Atliekant simuliacijas, įtampa keičiama 1 – 30 V intervale su 1 V žingsniu.

Svirties ilgio apribojimas parinktas atsižvelgiant į bandinio, kontaktų garinimo kaukių ir pozicionavimo detalės matmenų apribojimus. Varijuojama tik atskirai abiejų ilgių vertėmis, tačiau bendra suma išlieka ta pati.

Svirties lanksčios dalies plotis pasirinktame intervale keičiamas kas 1 µm ir atskirai ties

šiais 5 žingsniais atliekamos simuliacijos minėtame įtampos intervale skirtingoms l vertėms. Mažesnės nei 4 µm kojelės išsiėsdina netolygiai bei būna ne tokios stabilios, todėl modeliavimai su mažesnėmis vertėmis neatliekami. Svarbu atlikti modeliavimus ties keliomis vertėmis, nes fabrikuoto ir išėsdinto darinių matmenys nesutampa – kraštų iš abiejų pusių nuėsdinimo plotis esant tiems patiems spinduliuotės parametrams priklauso ne tik nuo rūgšties koncentracijos, bet ir nuo kambario temperatūros ir ėsdinimo laiko. Numatyti gauto darinio matmenis pavyksta 0.5 - 1 µm tikslumu.

Nelanksčios dalies pločio keitimas atsilenkimui daro ne itin didelę įtaką – ties keliais parametrų rinkiniais padidinus 10 µm, maksimalus atsilenkimas vidutiniškai sumažėjo 0.02 µm, sumažinus 10 µm – padidėjo 0.03 µm, todėl dėl patogumo atsižvelgiant į pagamintos kaukės matmenis buvo nuspręsta palikti tą pačią W = 25 µm vertę, išskyrus apskritiminei jungčiai, kurios W = 15 µm. Apskritiminei jungčiai W pakeistas, nes čia jis susietas su jungties ilgiu l: l = 2r = W - w.

Atlikus simuliacijas keičiant užapvalintos jungties užapvalinimo spindulio vertę į mažesnes ir į maksimalią (simetriniam variantui), buvo nuspręsta pasirinkti maksimalią vertę. Su maksimalia verte gautas atsilenkimas keliomis dešimtimis nm mažesnis, tačiau maksimalaus įtempio vertė sumažėja keliomis dešimtosiomis N/m^2 . Varijuojant kitais parametrais įtempių vertės gali ženkliai išaugti, todėl geriau stengtis išlaikyti juos kiek įmanoma mažesnius, o didesnį atsilenkimą pasiekti keičiant kitus parametrus.

Tarpas tarp kontaktų pasirinktam plonos dalies pločiui ir ilgiui keičiamas intervale, kur $U_{\text{pull-in}} \approx 15 \text{ V}$, iki šiek tiek didesnės vertės nei tos, kuriai $U_{\text{pull-in}} = 30 \text{ V}$, išskaidžius šį intervalą į 10 – 20 žingsnių. Kiekvienam žingsniui atliekamos simuliacijos keičiant įtampą minėtame intervale.

Modelyje naudojamos 2 medžiagos: aplink svirtį esančiai erdvei – oras, kurio santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_0 = 1$, svirčiai – lydytas kvarcas, kurio Jungo modulis E = 71.7 GPa, Puasono konstanta $\nu = 0.17$, santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon = 3.75$.

2.1.2 Sąsajų pasirinkimas, tinklelio sudarymas ir simuliacijos vykdymas

Modeliui naudojama elektromechanikos multifizikos "sąsaja" (angl. *interface*), sujungianti kieto kūno mechanikos ir elektrostatikos sąsajas ir sprendžianti susietas struktūrinės deformacijos ir elektrinio lauko lygtis. Modeliuojama sąveika tarp deformuojamų kietų kūnų ir elektrinių laukų, kai struktūros deformacijos keičia elektrinio lauko pasiskirstymą. Kieto kūno mechanikos sąsaja leidžia atlikti struktūrinę 3D atsilenkiančio strypo analizę. Ši sąsaja sprendžia judėjimo lygtis kieto kūno modeliui ir generuoja pasirinktus rezultatus, pavyzdžiui, atsilenkimus, įtempius, deformacijas ir t.t. Elektrostatikos sąsaja skaičiuoja elektrinį lauką, potencialo pasiskirstymą dielektrike ir t.t.

Kiekviena sąsaja turi "mazgus" (angl. *nodes*) – fizikines prielaidas ir apribojimus. Kieto kūno mechanikos sąsajoje pridėti 4 mazgai. Pirmasis – tiesinė elastinė medžiaga, pridedantis

lygtis tiesiniam elastiniam kietam kūnui, šiuo atveju – svirčiai bei jį apibrėžiančias medžiagos savybes. Laisvumo mazgas daro prielaidas, kad pridėtoms riboms nėra jokių apribojimų ar apkrovų. Galutinių verčių mazgas prideda galutines poslinkio vertes, t.y. netiesinės analizės galutinių sprendinių kintamuosius. Fiksuoto apribojimo mazgas pridėtam geometriniam vienetui, šiuo atveju, svirties galo plokštumai prideda apribojimą, kad plokštumos tiesiniai bei rotaciniai poslinkiai visomis kryptimis yra lygūs nuliui.

Elektrostatikos sąsajoje pridėti 5 mazgai. Nulinio krūvio mazgas pridėtoms riboms daro prielaidą, kad jose nėra krūvio. Ši sąlyga taikoma visoms išorinėms geometrinėms riboms, darant prielaidą, kad joks poslinkis negali kirsti ribos ir kad elektrinis potencialas išilgai ribos yra nenutrūkstamas. Galutinių verčių mazgas leidžia pridėti galutinę įtampos vertę. Krūvio pasiskirstymo mazgas prideda lygtis krūvio pasiskirstymui, šiuo atveju, pridedama oro tūriui, kurio santykinė dielektrinė skvarba lygi 1. Terminalo mazgas leidžia pridėti įtampą pasirinktai geometrijai. Įžeminimo mazgas pasirinktai ribai prideda nulinio potencialo sąlygą.



19 pav. Modelio tinklelio elementų pasiskirstymas.

19 pav. vaizduojamam tinkleliui naudojamas trikampis pasiskirstymas plokštumoje, statmenoje įžeminimo plokštumai, ištemptas į 4 elementų y ašiai tūrinį pasiskirstymą lygiagrečiai įžeminimo plokštumai, t.y. elementų aukštis žymiai didesnis nei skersiniai matmenys. Toks elementų pasiskirstymas pasirinktas todėl, kad daroma prielaida, kad tarp elektrodų sudaryto potencialų skirtumo nulemti poslinkiai ir elektrinio lauko pasiskirstymas labiau kinta statmena jiems kryptimi nei lygiagrečia. Ištempto tinklelio lyginant su paprastu elementų pasiskirstymu naudojimas leidžia ženkliai sumažinti elementų skaičių taip sutrumpinant ir simuliacijos sprendimo laiką. Modelio tinklelį priklausomai nuo jungties geometrijos vidutiniškai sudaro 10000 elementų. Tinklelio parametrai:

- Maksimalus elemento dydis: svirčiai 50 µm, oru
i 248 µm
- Minimalus elemento dydis: svirčiai 5 µm, orui 31 µm
- Maksimali elemento augimo konstanta (nusako elemento augimo greitį nuo mažus elementus sudarančios srities iki didesnių elementų): svirčiai 1.5, orui 1.45

- Kreivumo faktorius (nusako prie ribos esančių elementų dydį lyginant su ribos kreivumu, t.y. mažesnis faktorius duoda smulkesnį tinklelį prie išlenktų ribų): svirčiai – 0.3, orui – 0.5
- Siaurų sričių skiriamoji geba (kontroliuojamas siaurose srityse esančių sluoksnių skaičius, t.y. didesnė vertė duoda smulkesnį tinklelį siaurose srityse): svirčiai – 1, orui – 0.6

Oro terpei pritaikytas judantis tinklelis, kuriam taikomos hiperelastinio lyginimo metodo lygtys.

Atliekama stacionari modelio studija. Sprendinių gavimo procesas suskirstytas į elektrinio potencialo, poslinkio bei erdvinio tinklelio poslinkio žingsnius, kuriems atskirai atliekamos iteracijos. Simuliacijos nutraukimui naudojama tolerancijos technika, kuri riboja iteracijas, kai suskaičiuota reliatyvi paklaida mažesnė nei apsibrėžta tolerancija. Maksimalus iteracijų skaičius – 20, kai jis pasiekiamas, metodas nutraukiamas, net jei tolerancijos sąlyga netenkinama. Pasirinktas vidutiniškai 3 iteracijų ties vienu verčių rinkiniu atliekamas skaičius. Kiekvienam iš 3 minėtų žingsnių atliekama po vieną iteraciją. Jei modelis ties ta verte iki nustatytos tolerancijos nekonverguoja, daroma daugiau iteracijų, bet jų kiekis neviršija 20. Jei po 20 iteracijų modelis vistiek nekonverguoja, sumažinamas parametro didinimo žingsnis nustatyta norima verte. Modelio paklaidos sumažėja, didėjant iteracijų skaičiui. Keičiant iteracijų skaičių bei jų skaičiavimų būdus, buvo pasiektas modeliui pakankamas tikslumas. Daugiau iteracijų atlikti nebeapsimoka, nes išaugs programos vykdymo laikas. Esant poreikiui, su pasirinkta verte atskirai buvo atliekamos tikslesnės simuliacijos padidinant iteracijų skaičių.

2.1.3 Modeliavimo rezultatų aptarimas

Siekiant nustatyti optimalius geometrinius parametrus, brėžiamos svirties galo atsilenkimo priklausomybės nuo įtampos su skirtingomis tarpo tarp kontaktų vertėmis visoms skirtingoms w ir l parametrų kombinacijoms nustatytuose jų intervaluose (žr. 2 lentelę). Prie skirtingų įtampos verčių lyginti svirčių stabilūs maksimalūs atsilenkimai ir nestabilūs maksimalūs atsilenkimai, šiuo atveju lygūs tarpo tarp kontaktų vertei. Suradus optimalų vienos svirties parametrų rinkinį, bandyta kitoms svirtims parametrus optimizuoti taip, kad būtų gaunamas panašaus dydžio atsilenkimas prie tų pačių pritraukimo įtampos verčių. Prie didesnių įtampos verčių pasiekiami didesni stabilūs atsilenkimai, kartu didinant ir tarpo tarp kontaktų vertę, tačiau nuspręsta optimalius variantus parinkti tokius, kurių pritraukimo įtampa būtų šiek tiek mažesnė už nustatytą maksimalią 30 V vertę. Šiame poskyryje bus aptariami svirčių su skirtingomis jungtimis modeliavimo rezultatai su optimaliais parametrų rinkiniais, kurie pateikti 3 lentelėje.

Parametrų optimizavimas pirmiausia buvo atliktas svirčiai su užapvalintų kampų jungtimi (žr. 20 pav.). Didesni atsilenkimo rezultatai modelyje buvo gauti su plonesnėmis jungtimis, tačiau pagaminus svirtis su keliomis skirtingomis jungties pločio ir ilgio vertėmis, dėl netoly-

3 lentelė. Optimalūs jungčių geometriniai parametrai ir gauti rezultatai. Čia w – jungties plotis, W – svirties nelanksčios dalies plotis, l – jungties ilgis, g – tarpas tarp kontaktų, $U_{\text{pull-in}}$ – pritraukimo įtampa, d – atsilenkimas su pritraukimo įtampos verte, σ – tūriniai von Mises įtempiai, τ – šlyties įtempiai, f – fundamentinės virpesių modos dažnis

w, µm	W, μm	l, µm	g, µm	$U_{pull-in}, V$	$d,\mu m$	σ , MPa	τ,MPa	f, Hz	
Užapvalintų kampų jungtis									
8	25	350	25	24	12	2.88	0.55	688	
Stačiakampė jungtis									
8	25	350	26	24	10	1.35	0.63	680	
Eliptinė jungtis									
8	25	350	21	25	11	6.06	0.38	940	
Sukryžiuota jungtis									
4	25	350	26	24	11	9.93	1.18	656	
Apskritiminė jungtis									
4	15	11	20	23	9	16.96	2.74	1228	

gaus išsiėsdinimo plonesnės nei 8 µm jungtys nulūždavo arba būdavo nestabilios, todėl vėliau atliekant parametrų optimizavimą kitoms jungtims, bandyta išlaikyti tokį patį jungties plotį.

Užapvalintos jungties geometrija vaizduojama 20 pav., a). Užapvalinimas šiuo atveju nedidelis, nes jungtis apvalinama simetriškai iš abiejų pusių, todėl apvalinimo spindulys priklauso nuo nelanksčios dalies pločio. 20 pav., b) pateikta stabilaus svirties atsilenkimo priklausomybė nuo įtampos. Matyti, kad didinant įtampą svirties atsilenkimas eksponentiškai didėja. Kaip jau minėta, jei įtampos vertė neviršija pritraukimo įtampos vertės, tai su bet kuria šio intervalo įtampa svirtis atsilenkusi išliks stabili ir neprisitrauks prie kontakto, nes ties šiomis vertėmis atsiranda įtempių ir elektrostatinių jėgų balansas. Pritraukimo įtampos vertė grafike pažymėta x simboliu. Šiuo atveju pasiekiamas maksimalus 12 µm atsilenkimas ties 24 V įtampos verte, su 25 µm tarpu tarp kontaktų. Palyginimui su FEM rezultatais, pateiktos ir prieš tai išvestų (žr. (19) ir (16) lygtis) lankstumo bei Castigliano modelių kreivės. Matyti, kad lansktumo modelis attinka FEM modelį tik iki ≈ 2 µm atsilenkimo verčių. Toliau didėjant atsilenkimui, lankstumo modelis tampa nebe tikslus dėl neįskaitytų šlyties įtempių ir modelio išvedime daromų prielaidų. Castigliano modelis sutampa su FEM tik prie labai nedidelių atsilenkimų. Baigtinių elementų analizės metodas yra tiksliausias, tačiau jo programos vykdymo laikas nepalyginamai didesnis nei analitinio metodo. Matyti, kad šiuo atveju analizes būtina atlikti FEM būdu, nes



20 pav. Svirtis su užapvalintų kampų jungtimi. a) Jungties geometrija. b) Stabilaus svirties atsilenkimo priklausomybė nuo įtampos. c) Tūrinių von Mises įtempių pasiskirstymas jungtyje. d) Šlyties įtempių pasiskirstymas jungtyje.

analitiniais būdais gaunami maksimalaus atsilenkimo rezultatai skiriasi net dvigubai. Tikslesnius analitinius modelius galima gauti įskaičius šlyties deformacijas ir įvedus pataisas pagal FEM modelį.

20 pav., c) pateiktas tūrinių įtempių pasiskirstymas jungtyje su paskutine stabilia atsilenkimo įtampos verte. Vaizduojami von Mises įtempiai, kurie skirti nustatyti, ar medžiaga neviršys tamprumo ribos ir ar nesulūš. Von Mises įtempiai leidžia palyginti tridimensį įtempį su vienos ašies tamprumo riba, todėl naudojami 3D įtempių vizualizacijai. Jei esant apkrovai šių įtempių vertė lygi ar didesnė nei tos medžiagos tamprumo riba, medžiagoje liks negrįžtamos deformacijos. Šiuo atveju įtempiai, kaip ir tikėtasi, pasiskirstę lanksčios įpjovos jungtyje, o ilgesnėje svirties dalyje įtempiai beveik nesusidaro. Maksimali įtempių vertė $\sigma_{\rm von Mises} = 2.88$ MPa, o lydyto kvarco tamprumo riba lygi 48.3 MPa, todėl tokie įtempiai yra sistemai saugūs, nes jie bent eile mažesni už maksimalius. Matyti, kad didžiausi įtempiai susidaro jungties apačioje. Pasiekus ilgesniąją svirties dalį, riboje su jungtimi išlieka nedideli įtempiai, kurie tolstant išnyksta. Didinant įtampą, didėja atsilenkimas, todėl didėja ir įtempiai, bet jų priklausomybė išlieka ta pati. 20 pav., d) pateiktas šlyties įtempių pasiskirstymas jungtyje su paskutine stabi-



21 pav. Svirtis su stačiakampe jungtimi. a) Jungties geometrija. b) Stabilaus svirties atsilenkimo priklausomybė nuo įtampos. c) Tūrinių von Mises įtempių pasiskirstymas jungtyje. d) Šlyties įtempių pasiskirstymas jungtyje.

lia atsilenkimo įtampos verte. Maksimali šlyties įtempių vertė $\tau = 0.63$ MPa. Kaip ir tūriniai von Mises įtempiai, taip ir šlyties įtempiai daugiausia pasiskirstę jungties pradžioje. Šlyties įtempių vertė maždaug 5 kartus mažesnė nei tūrinių įtempių, tačiau ji vistiek turi didelę įtaką maksimalaus atsilenkimo vertei prie didesnių atsilenkimo verčių.

Stačiakampės jungties geometrija vaizduojama 21 pav., a). Jungties plotis nekinta visam jungties ilgiui. 21 pav., b) pateikta stabilaus svirties su stačiakampe jungtimi atsilenkimo priklausomybė nuo įtampos. Šiuo atveju pasiekiamas maksimalus 10 µm atsilenkimas ties 24 V įtampos verte su 26 µm tarpu tarp kontaktų. Lyginant su užapvalintų kampų jungties rezultatu, atsilenkimas 2 µm mažesnis, bet ir tarpas tarp kontaktų čia 1 µm didesnis. Šio tipo svirtis, nors skiriasi ir nedaug, yra mažiau stabili prie didesnių įtampos verčių nei svirtis su užapvalintų kampų jungtimi. Skirtumas dar labiau išryškėja su nesimetrine užapvalintų kampų jungtimi. Padidinus apvalinimo kampo spindulį, reikia daugiau įtampos arba mažesnio tarpo tarp kontaktų, norint atlenkti svirtį, tačiau ji gali sustoti tokioje stabilioje padėtyje, kur atstumas tarp kontaktų liks mažesnis nei svirties su stačiakampe jungtimi. Lankstumo modelis, taip pat kaip ir svirčiai su užapvalintų kampų jungtimi, atitinka tik iki 2 µm atsilenkimo verčių,



22 pav. Svirtis su eliptine jungtimi. a) Jungties geometrija. b) Stabilaus svirties atsilenkimo priklausomybė nuo įtampos. c) Tūrinių von Mises įtempių pasiskirstymas jungtyje. d) Šlyties įtempių pasiskirstymas jungtyje.

o Castigliano modelis čia taip pat su FEM vertėmis sutampa tik prie labai nedidelių atsilenkimų.

21 pav., c) maksimali tūrinių von Mises įtempių vertė $\sigma_{\rm von Mises} = 1.35$ MPa. Ši vertė šiek tiek daugiau nei dvigubai mažesnė nei svirties su užapvalintų kampų jungtimi, bet ir atsilenkimas čia 2 µm mažesnis. Esant tokiam pačiam atsilenkimui įtempių vertė šiek tiek padidėja, bet vistiek išlieka beveik dvigubai mažesnė. Kampų apvalinimas tolygiau paskirsto įtempius visoje jungtyje. Tai labiau išryškėtų esant didesniam apvalinimo kampui. Įtempių pasiskirstymas beveik toks pat, kaip užapvalintų kampų jungtyje. Įtempiai koncentruojasi lenkimo vietoje ir pasiskirstę jungtyje. 21 pav. d) šlyties įtempių pasiskirstymas taip pat panašus į įtempių pasiskirstymą užapvalintų kampų jungtyje, t.y. įtempiai koncentruojasi lenkimo vietoje. Maksimali šlyties įtempių vertė $\tau = 0.63$ MPa - šiek tiek daugiau nei užapvalintų kampų jungtyje, o esant tokiam pačiam atsilenkimui, šlyties įtempiai dar labiau išauga.

Eliptinės jungties geometrija vaizduojama 22 pav., a). Elipsės spinduliai priklauso nuo jungties ilgio bei nelanksčios dalies pločio. 22 pav., b) pateikta stabilaus svirties su eliptine jungtimi atsilenkimo ptiklausomybė nuo įtampos. Šiuo atveju pasiekiamas maksimalus 11 µm atsilenkimas ties 25 V įtampos verte su 21 µm tarpu tarp kontaktų. Lyginant su svirtimis



23 pav. Svirtis su sukryžiuota jungtimi. a) Jungties geometrija. b) Stabilaus svirties atsilenkimo priklausomybė nuo įtampos. c) Tūrinių von Mises įtempių pasiskirstymas jungtyje. d) Šlyties įtempių pasiskirstymas jungtyje.

su užapvalintų kampų ir stačiakampe jungtimis, toks atsilenkimas pasiekiamas prie gerokai mažesnės tarpo tarp kontaktų vertės – svirties standumo koeficientas čia didesnis, todėl reikia daugiau jėgos norint ją atlenkti. Lankstumo modelis su FEM modeliu sutampa tik iki 1.5 µm verčių, o Castigliano modelis nuo FEM verčių čia nutolęs dar labiau nei prieš tai aptartose svirtyse.

22 pav., c) maksimali tūrinių von Mises įtempių vertė $\sigma_{\rm von Mises} = 6.06$ MPa. Ši įtempių vertė ≈ 2 kartus didesnė lyginant su užapvalintų kampų jungtimi bei net ≈ 4.5 karto didesnė lyginant su stačiakampe jungtimi. Matyti, kad įtempiai šio tipo jungtyje pasiskirsto ne taip tolygiai, kaip prieš tai aptartose jungtyse. Įtempiai čia koncentruojasi svirties centre ir labai greitai nuslopsta artėjant link kraštų. 22 pav., d) šlyties įtempių maksimali vertė $\tau = 0.38$ MPa šiek tiek mažesnė nei prieš tai nagrinėtų jungčių.

Sukryžiuotos jungties geometrija vaizduojama 23 pav., a). Jungtis susideda iš dviejų sukryžiuotų pastovaus pločio dalių ir yra simetrinė, t.y. sukryžiuotos dalys kertasi jungties centre, o susikirtimo kampas priklauso nuo nelanksčios dalies pločio. 23 pav., b) pateikta stabilaus svirties su sukryžiuota jungtimi atsilenkimo priklausomybė nuo įtampos. Šiuo atveju pasiekia-



24 pav. Svirtis su apskritiminė jungtimi. a) Jungties geometrija. b) Stabilaus svirties atsilenkimo priklausomybė nuo įtampos. c) Tūrinių von Mises įtempių pasiskirstymas jungtyje. d) Šlyties įtempių pasiskirstymas jungtyje.

mas maksimalus 11 µm atsilenkimas ties 24 V įtampos verte su 26 µm tarpu tarp kontaktų. Šiuo atveju svirtį teko ploninti – susikertančių plokštumų pločiai ir plotis centre lygūs 4 µm. Tokio plonumo jungties svirtis ne visada pavykdavo pagaminti, nes dėl netolygaus išsiėsdinimo dažnai nulūždavo. Lankstumo modelis čia kaip ir svirčių su užapvalintų kampų ir stačiakampe jungtimis atitinka FEM vertes tik iki 2 µm atsilenkimo.

23 pav., c) maksimali tūrinių von Mises įtempių vertė $\sigma_{\rm von Mises} = 9.93$ MPa. Tokia įtempių vertė jau per didelė (tos pačios eilės kaip lydyto kvarco tamprumo riba) ir didelė tikimybė, kad tokios svirtys pridėjus apkrovą nulūžtų. Įtempiai čia pasiskirsto dar labiau koncentruotai lyginant su eliptine jungtimi. Įtempių koncentravimąsis centre kai kuriais atvejais gali būti ir naudingas, jei jie neviršija leistinų verčių. Gaminant kompleksinius mechanizmus, kurie susideda iš skirtingų jungčių, tokia jungtis tiktų tose vietose, kur reikia tikslios svirties galo judėjimo trajektorijos. 23 pav., d) šlyties įtempių maksimali vertė $\tau = 1.18$ MPa – šiek tiek daugiau nei dvigubai didesnė lyginant su visomis kitomis prieš tai nagrinėtomis jungtimis.

Apskritiminės jungties geometrija vaizduojama 24 pav., a). Jungtis simetrinė, todėl jos ilgis bei pločio kitimas priklauso nuo nelanksčios dalies pločio. 24 pav., b) pateikta stabilaus svirties su apskritimine jungtimi atsilenkimo priklausomybė nuo įtampos. Šiuo atveju pasiekiamas maksimalus 9 µm atsilenkimas ties 23 V įtampos verte su 20 µm tarpu tarp kontaktų. Šiuo atveju jungtį reikėjo ne tik ploninti, kaip ir sukryžiuotą, bet ir pakeisti jos ilgį bei nelanksčios dalies plotį. Svirties ilgis šiuo atveju lygus 11 µm, o nelanksčios dalies plotis lygus 15 µm. Abu analitiniai modeliai čia labai nutolę nuo FEM verčių.

24 pav., c) maksimali tūrinių von Mises įtempių vertė $\sigma_{\rm von Mises} = 16.96$ MPa – didžiausia iš visų jungčių. Tokia įtempių vertė netoleruotina, kaip ir sukryžiuotoje jungtyje. Įtempiai čia koncentruojasi ties viduriu kaip ir sukryžiuotoje jungtyje. 24 pav., d) šlyties įtempių maksimali vertė $\tau = 2.74$ MPa – daugiau nei dvigubai didesnė lyginant su sukryžiuota jungtimi.

Kiekvienai svirčiai taip pat atlikta virpesių analizė ir rastos rezonansinės modos. Fundamentinės rezonansinės modos dažniai pateikti 3 lentelėje. Prijungus kintamos įtampos šaltinį svirtims su šiais dažniais, judėjimo amplitudė padidėtų ir svirtis periodiškai virpėtų į abi puses.

Lydyto kvarco teorinė tamprumo riba lygi 48.3 MPa. 25 pav. pateikti visų svirčių atsilenkimai su šia įtempių verte – teoriniai maksimalūs atsilenkimai. Kiekvieno paveikslėlio kampe matyti, kokios jėgos reikia šiai įtempių vertei pasiekti. Didžiausias atsilenkimas pasiekiamas su 25 pav., b) vaizduojama stačiakampe jungtimi. Šis atsilenkimas tik 7 µm didesnis lyginant su panašios geometrijos užapvalintų kampų jungtimi (25 pav., a)), dėl didesnio standumo, nes jungtis storesnė užapvalinimo vietose. Dar mažesnis atsilenkimas pasiekiamas su eliptine jungtimi (25 pav., c)). Nors jos geometrija ir panaši į stačiakampės bei užapvalintų kampų jungties, jos plotis toks pat kaip šių jungčių tik centre. Artėjant link kraštų, jungtis platėja. Įtempiai koncentruojasi labiau centre, ju pasiskirstymas ne toks tolygus lyginant su prieš tai minėtomis jungtimis. Sukryžiuotos jungties atsilenkimas (25 pav., d)) ≈ 3 kartus mažesnis nei stačiakampės, nes ji lenkiasi per centra, t.y. įtempiai dar labiau koncentruoti nei eliptinėje jungtyje. ≈ 7 kartus mažesnis nei stačiakampės jungties atsilenkimas pasiekiamas su apskritimine jungtimi (25 pav., e)). Cia įtempiai labiausiai koncentruoti lyginant su visomis aptartomis jungtimis. Tokia jungtis, kaip jau minėta dideliems atsilenkimams pasiekti netinka, tačiau ji būtų naudinga norint pasiekti nedidelius atsilenkimus, kur reikalinga itin tiksli svirties galo judėjimo trajektorija.



25 pav. Teoriniai maksimalūs atsilenkimai svirtims su: a) užapvalintų kampų; b) stačiakampe; c) eliptine; d) sukryžiuota; e) apskritimine jungtimis.

2.2 Mikrosvirčių gamyba lazeriu asistuotu cheminiu ėsdinimu

Šiame poskyryje bus aptariamas aktuatoriaus gamybos procesas, lyginami eksperimentiniai rezultatai su sumodeliuotais.



26 pav. Eksperimento schema.

Principinė eksperimento schema pateikta 26 pav. Aktuatoriaus gamybai buvo naudotasi Vilniaus universiteto Lazerinių tyrimų centro mikroapdirbimo laboratorijos lazerine sistema. Naudotas Yb:KGW lazeris "Pharos" (gamintojas – UAB MGF "Šviesos konversija"), spinduliuojantis aukšto smailinio intensyvumo 320 fs trukmės ir 1030 nm centrinio bangos ilgio šviesos impulsus. Vidutinė lazerio spinduliuotės galia – 6 W, impulsų pasikartojimo dažnio intervalas -25-200 kHz. Lazerio pluošto galia susilpninama ateniuatoriumi, kuris sudarytas iš $\lambda/2$ fazinės plokštelės ir Briusterio kampu pastatyto poliarizatoriaus, tada dielektriniais veidrodžiais nukreipiama i bandini, prieš tai jutikliu pamatavus ateniuatoriumi susilpninta spinduliuotės galia. Pluoštas praeina pro $\lambda/4$ fazinę plokštelę, kuri padaro poliarizacija apskritimine. Spindulys į bandinį sufokusuojamas 0,4 skaitinės apertūros (NA) objektyvu. Bandinys tvirtinamas ant trimatės pozicionavimo sistemos ("Aerotech ANT180"), kurios stalų maksimalus transliavimo greitis siekia 50 cm/s, rezoliucija – 1 nm, tikslumas 150 nm, judėjimo eiga 16 cm. Virš bandinio pritvirtinta kamera leidžia fabrikuojant matyti rezultata bei padeda sufokusuoti lazerio pluošta į bandinio viršutinį bei apatinį paviršių. Lešiai, esantys po ja, skirti vaizdo sufokusavimui. Bandinio padėtis židinio atžvilgiu tiksliai keičiama naudojant kompiuterinę pozicionavimo sistemos ir lazerio valdymo programą "SCA" (UAB "Altechna").

Pagrindiniai parametrai: bangos ilgis – 515 nm, vidutinė galia – 100 mW, impulsų pasikar-

tojimo dažnis – 200 kHz, impulso energija – 500 nJ, poliarizacija – apskritiminė, greitis 2 – 5 mm/s.

2.2.2 Detalės ir bandinių modeliavimas

Atsilenkiančios svirtys gaminamos iš lydyto kvarco. Naudojami 200 µm storio, 2x2 cm matmenų stikliukai. Norint ant svirčių uždengti laidžius kontaktus, reikia pagaminti ir itin tiksliai ant bandinio pozicionuojamas kaukes, todėl reikalingas bandinių laikiklis, kuris bus naudojamas ne tik kontakto užpurškimui, bet ir laidų prijungimui.

Programa "SolidWorks" sumodeliuotas atsilenkiančios svirties modelis pateiktas 27 pav., b), kur viršuje pavaizduoti kontaktai, tarp kurių sudaromas potencialų skirtumas, o apačioje vaizduojama realiai per kaukę užsidengianti sritis, kur išpjova atskiria kontaktus vieną nuo kito. Bandinių laikiklis su ant strypelių užmautu bandiniu vaizduojamas 27 pav., a). Tikslus kaukių pozicionavimas būtinas, norint selektyviai uždengti laidininką įtampos prijungimui. Bandinys priveržiamas plastikiniais varžtais su metalinėmis poveržlėmis, prie kurių prilituojami laidai. Laikiklyje po bandiniu taip pat yra išpjova, reikalinga tam, kad svirtys galėtų laisvai lankstytis be trinties į pagrindą.



27 pav. a) Bandinių laikiklis; b) atsilenkiančios svirties 3D modelis.

Bandinys su svirtimis ir kaukės fabrikuojamos pagal programa "SCA" parašytą algoritmą. Kaip ir prieš tai aptartame FEM svirties modelyje, taip ir čia programos parašytos taip, kad būtų galimybė keisti pagrindinius fabrikuojamų darinių parametrus, nedeformuojant visos geometrijos. 28 pav. pateikti visų fabrikuojamų bandinių programos vizualizacijos langai, kuriuose kvadratinis rėmelis pateiktas tik vizualiam bandinio stikliuko matmenų parodymui.

Pirma ant 27 pav., a) laikiklio detalės dedama lydyto kvarco plokštelė – pagrindas su išpjova



28 pav. Fabrikuojami bandiniai: a) pagrindas; b) atsilenkiančios svirtys; c) ir d) kaukės, skirtos kontaktų ant svirčių užgarinimui.

toje pačioje vietoje, kaip ir detalėje esanti išpjova. Šis pagrindas reikalingas tam, kad bandinio stikliukas nesiliestų prie metalinės detalės, kuri pagaminta iš metalo ir jos paviršiaus šiurkštis didesnis nei stiklo. Ant pagrindo dedamas bandinys su 6 atsilenkiančiomis svirtimis. Trečiasis bei ketvirtasis stikliukai – kaukės, skirtos kontaktų užgarinimui ant bandinio su svirtimis. Bandiniai fabrikuojami suskirsčius juos į mažesnes detales, nes vėliau ėsdinant rūgštimi mažesnių matmenų detalės lengviau neužkliuvusios už kraštų atsiskiria nuo bandinio ir iškrenta.

2.2.3 Aktuatoriaus gamyba

Aktuatoriai fabrikuojami sistema, vaizduojama 26 pav. Lazerio pluoštas į stiklo viršutinį ir apatinį paviršius sufokusuojamas kameros pagalba keičiant bandinio poziciją statmenos lazerio pluoštui ašies atžvilgiu ir stebint, kada paviršius pasižeidžia. 3D dariniai fabrikuojami lazeriu veikiant bandinį nuo apatinio paviršiaus aukštyn, įrašant tą pačią formą kas 3 µm. Naudojami 200 µm storio 2×2 cm matmenų lydyto kvarco stikliukai.



29 pav. Fabrikavimas 3 mm/s greičiu: a) stabdant judėjimą prieš kiekvieną komandą; b) judinant mikropozicionavimo sistemą tuo pačiu pagreičiu.

29 pav., a) matyti, kad po staigių transliacinio stalelio judėjimo krypties pasikeitimų atsiranda vibracijos ir fabrikuojamos linijos tampa nelygios. 29 pav., b) ašys judinamos tuo pačiu pagreičiu, nestabdant jų prieš kiekvieną komandą taip padidinant tikslumą.



30 pav. Fabrikavimas judinant mikropozicionavimo sistemą tuo pačiu pagreičiu: a) 2 mm/s greičiu; b) 3 mm/s.

30 pav. matyti, kad netikslumai didėja ir didinant sistemos judėjimo greitį. Vėlesniems fabrikavimams vietose, kuriose reikia didesnio tikslumo pasirinktas 2 mm/s greitis, o mažesnio tikslumo reikalaujančios bei didesnių matmenų vietos fabrikuotos 5 mm/s greičiu. Taip gaunama geresnė kokybė su mažiau osciliacijų. Fabrikuojamos linijos plotis (priklauso nuo spinduliuotės parametrų) 2 – 4 μ m.

Iš pradžių buvo fabrikuojamos įvairių skirtingų formų svirtys, ėsdintos 2.5 % ir 5 % HF rūgštyje ir siekta nustatyti ėsdinimo trukmę, išėsdintų griovelių plotį bei vizualiai įvertinus išėsdintus darinius nustatyti matmenų apribojimus. Geriausia kokybė pasiekiama ėsdinant 2,5 % HF rūgštyje apie 16 val. Ėsdinant 5 % HF rūgštyje, kelių mikrometrų detalės išsiėsdindavo daug greičiau – per 4 – 6 val., bet jų kokybė buvo šiek tiek blogesnė nei ėsdinant mažesnės koncentracijos rūgštyje. 31, 33 pav. pateikiama keletas skirtingų darinių mikroskopu darytų nuotraukų.



31 pav. Nuotraukoje kairėje 3 svirčių ploniausios dalies plotis $11 \pm 0.25 \,\mu\text{m}$, nuotraukoje dešinėje – 3 svirčių ploniausios dalies plotis $9 \pm 0.25 \,\mu\text{m}$.

Realių išėsdintų darinių ploniausios dalies storiai nuo fabrikuoto darinio skyrėsi $2 - 4 \ \mu m - p$ rarandama po $1 - 2 \ \mu m$ iš abiejų kraštų lyginant su fabrikavimu. Dažnu atveju ne visos detalės iškrisdavo, kaip matoma 31 pav. antros svirties geometrijoje, todėl kitais bandymais jos buvo padalinamos į didesnį kiekį mažesnių matmenų detalių arba dar šiek tiek ilgiau palaikomos

rūgštyje. 31 pav. dešinėje pusėje paskutinė svirtis deformavusi ir prisikabinusi prie krašto. Visos 31 pav. pateiktos svirtys buvo fabrikuojamos 5 mm/s greičiu, kuris staigaus krypties pasikeitimo vietose yra per didelis, todėl struktūros gavosi nesimetrinės. Ploniausio išėsdinto darinio storis $2 \pm 0.25 \mu m$. Tokia paklaida gaunama, nes matavimai atliekami mikroskopu, su 50 kartų didinančiu objektyvu.



32 pav. Bandinys su užgarintais kontaktais.

Bandymams su įtampa pasirinktas atsilenkiančios svirties modelis pateiktas 27 ir 33 pav. Ant vieno stikliuko galima pagaminti 6 atsilenkiančias svirtis. Kiekvienas bandinys dengiamas 20 nm storio sidabro danga po 3 kartus su kiekviena kauke, naudojant įrangą "Quorum". Vienas dengimas atliekamas statmenai, kiti 2 dengimai atliekami ne statmenai, o šiek tiek pasukus bandinį, kad danga geriau nusėstų ant šoninių paviršių. Ant pozicionavimo detalės pirma dedamas pagrindo stiklas, tada bandinys ir paeiliui kaukės. 32 pav. pateiktas bandinio su užgarintais kontaktais pavyzdys. Vienos iš kontaktais uždengtų svirčių nuotrauka pateikiama 33 pav.



33 pav. Plonosios dalies storis lygus 7,4 \pm 0.25 µm, storosios dalies storis – 25 \pm 0.25 µm, atstumas tarp strypo šoninės sienelės ir krašto – 60 \pm 0.25 µm.

Bandinys su uždengtais kontaktais paliekamas ant pozicionavimo detalės. Ant metalinių poveržlių prilituojami laidai. Kadangi detalė metalinė, poveržlės su prilituotais laidais prie

kontakto prispaudžiamos suveržiant plastikiniais varžtais. Įtampa pridedama reguliuojamos (1 – 30 V) įtampos šaltiniu. Svirčių atsilenkimas pridėjus įtampą stebimas mikroskopu. 4 lentelėje pateikiami keletos toliau aptariamų atsilenkiančių svirčių parametrai bei atsilenkimo vertės.

4 lentelė. Išėsdintų jungčių geometriniai parametrai ir realūs bei teoriniai atsilenkimo pridėjus įtampą rezultatai. Čia w – jungties plotis, W – svirties nelanksčios dalies plotis, l – jungties ilgis, g – tarpas tarp kontaktų, U – pridėta įtampa, d_{realus} – realus atsilenkimas pridėjus įtampą, d_{FEM} – FEM atsilenkimas pridėjus įtampą

Nr.	$w,\mu m$	W, μm	$l,\mu m$	$g,\mu m$	U, V	$d_{\rm realus},\mu m$	$d_{\rm FEM},\mu m$
1	5.4	24.5	150	69	30	2	1.84
2	4	25	100	59	30	4.1	4.08
3	8.1	24.5	350	26	25	8.5	8.29

Iš pradžių svirtys buvo gaminamos neoptimizavus parametrų, todėl pirmaisiais dviem atvejais gauti nedideli atsilenkimai. Paskutinis aptariamas atvejis gamintas jau po parametrų optimizavimo, pasiektas dvigubai didesnis atsilenkimas.



34 pav. Svirties nr. 1 atsilenkimas pridėjus 30 V įtampą.
a) Atsilenkusios svirties nuotrauka mikroskopu, $d \approx 2 \pm 0.25 \ \mathrm{\mu m}$,
b) FEM atsilenkimas.

34 pav. svirties geometriniai parametrai parinkti dar neatlikus parametrų optimizavimo. Su šia svirtimi pasiekiamas apie 2 mikrometrų atsilenkimas su maksimalia 30 V įtampa. FEM modelis atitinka realų atsilenkimą paklaidų ribose.



35 pav. Svirties nr. 2 atsilenkimas pridėjus 30 V įtampą.
a) Atsilenkusios svirties nuotrauka mikroskopu, $d \approx 4.1 \pm 0.25 \ \mathrm{\mu m}$,
b) FEM atsilenkimas.

Norint padidinti 34 pav., a) pasiektą atsilenkimą, svirties jungtis suploninta iki $\approx 4 \,\mu\text{m}$. Kadangi tokio plonumo jungtys tokio paties $l \approx 150 \,\mu\text{m}$ ilgio būdavo nestabilios ir dažniausiai nulūždavo, jungtis patrumpinta iki $l \approx 100 \,\mu\text{m}$. Su 35 pav. svirtimi pasiektas dvigubai didesnis $4 \pm 0.25 \,\mu\text{m}$ atsilenkimas, tačiau tokios plonos jungtys net ir sutrumpinus retai išsiėsdindavo. FEM modelis atitinka realų atsilenkimą paklaidų ribose. Toliau keičiant parametrus nebuvo pasiektas didesnis atsilenkimas, todėl nuspręsta atlikti parametrų optimizavimą.



36 pav. Svirties nr. 3 atsilenkimas pridėjus 25 V įtampą.
a) Atsilenkusios svirties nuotrauka mikroskopu, $d \approx 8.5 \pm 0.25 \ \mathrm{\mu m}$,
b) FEM atsilenkimas.

Atlikus parametrų optimizavimą, bandyta pagaminti jungtį su optimaliais parametrais. Pagamintos jungties parametrai (žr. 4 lentelės 3 nr.) šiek tiek skyrėsi nuo sumodeliuotos optimalios jungties parametrų (žr. 3 lentelę, užapvalintų kampų jungtį) dėl to, kad tiksliai nenumatytas išėsdintos linijos plotis, kuris priklauso nuo lazerio spinduliuotės parametrų, fabrikavimo parametrų, rūgšties koncentracijos ir ėsdinimo laiko. 36 pav., a) pasiektas 8.5 ± 0.25 µm atsilenkimas, kur FEM modelis atitinka realų atsilenkimą paklaidų ribose.

Išvados

- Lazeriu asistuoto cheminio ėsdinimo technologija lydyto kvarco stikle galima pasiekti aukštos skyros pjūvius su 2 µm tikslumu, tinkamus mikromechaninių komponentų gamybai. Pjūvio kokybei didžiausią įtaką daro transliacinio mikropozicionavimo stalelio judėjimo greitis, kuris kelių mikrometrų pločio dariniuose turėtų būti ne didesnis nei 2 mm/s bei vandenilio fluorido rūgšties koncentracija, kuri neturėtų viršyti 2.5 %.
- 2. Atlikta mikrostrypų su skirtingos geometrijos jungtimis (užapvalintų kampų, stačiakampė, eliptinė, sukryžiuota, apskritiminė) (storis iki < 10 µm) skaitmeninė įtempių analizė, lenkiant mikrostrypus elektrostatinėmis žemos įtampos (< 30 V) jėgomis. Nustatyta, kad įtempiai yra mažiausi stačiakampės geometrijos jungtyje, nes tolygiai pasiskirsto visos jungties plote. Įtempiai užapvalintų kampų jungtyje šiek tiek didesni, tačiau gaunamas didesnis atsilenkimas ir nors didesniam atsilenkimui pasiekti reikės daugiau įtampos arba mažesnio tarpo tarp kontaktų, svirtis sustos mažesnio tarpo tarp kontaktų stabilioje padėtyje. Įtempiai eliptinėje, sukryžiuotoje ir apskritiminėje jungtyse didėja, nes dėl geometrijos labiau koncentruojasi ir pasiskirstymas jungtyse netolygus. Norint pasiekti didžiausią atsilenkimą prie toleruotinų įtempių labiausiai svirčiai tinka užapvalintų kampų jungtis.
- 3. Analitiniai strypų atsilenkimo modeliai palyginti su baigtinių elementų analizės modeliu. Analitiniai modeliai tikslūs tik esant mažiems atsilenkimams. Dėl šiuose modeliuose neįskaitytos šlyties jėgos įtakos bei įvairių daromų prielaidų esant didesniems nei 2 μm atsilenkimams šie modeliai tampa netikslūs, todėl atlikti skaičiavimus baigtinių elementų analizės metodu būtina.
- 4. Analizuotuose mikrostrypų atsilenkimo modeliuose su optimaliomis geometrijomis tūriniai von Mises įtempiai yra eile mažesni (užapvalintų kampų jungtyje $\sigma = 2.88$ MPa, stačiakampėje $\sigma = 1.35$ MPa, eliptinėje $\sigma = 6.06$ MPa, sukryžiuotoje $\sigma = 9.93$ MPa) nei maksimalūs ($\sigma_{max} = 48.3$), kas rodo, kad tokių mikrostrypų atsilenkimai vyksta tiesinės deformacijos sąlygomis, neviršijant proporcingumo ribos, t.y. intervale, kuriame nėra išliekamųjų deformacijų.
- 5. Sukurta ir pagaminta elektrostatine jėga valdoma atsilenkiančių mikrostrypų sistema, kuri demonstravo 8.5 ± 0.25 µm atsilenkimą (jungties plotis 5.4 ± 0.25 µm, jungties ilgis 350 µm, bendras ilgis 3100 µm, tarpas tarp kontaktų 26 ± 0.25 µm, įtampa 25 V). Šis atsilenkimas paklaidų ribose atitinka baigtinių elementų analizės metodu gautą modeliavimo rezultatą $d_{FEM} = 8.29$ µm.

Literatūros sąrašas

- Y. Bellouard, A. A. Said, P. Bado, Integrating optics and micro-mechanics in a single substrate: a step toward monolithic integration in fused silica, Opt. Express 13(17), 6635– 6644 (2005), http://dx.doi.org/10.1364/opex.13.006635
- [2] N. Maluf, K. Williams, An introduction to microelectromechanical systems engineering (Artech House, 2004)
- T. Yang, Y. Bellouard, Monolithic transparent 3D dielectrophoretic micro-actuator fabricated by femtosecond laser, J. Micromech. Microeng. 25(10), 105009(1-8) (2015), http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/25/10/105009
- [4] Y. Bellouard, *Microrobotics. Methods and Applications* (CRC Press, 2010)
- R. R. Gattass, Femtosecond-laser interactions with transparent materials: applications in micromachining and supercontinuum generation, Ph.D. thesis, Harvard University, USA (2006)
- [6] K. Sugioka, Y. Hanada, K. Midorikawa, 3D microchips fabricated by femtosecond laser for biomedical applications, Proc. of SPIE 7266, 726603(1–10) (2008), http://dx.doi.org/ 10.1117/12.817357
- [7] A. Dubietis, *Netiesinė optika* (Vilniaus universiteto leidykla, 2011)
- [8] B. Zhang, X. Liu, J. Qiu, Single femtosecond laser beam induced nanogratings in transparent media - Mechanisms and applications, J. Materiomics 5(1), 1–14 (2019), http: //dx.doi.org/10.1016/j.jmat.2019.01.002
- [9] K. Sugioka, J. Xu, D. Wu, Y. Hanada, Z. Wang, Y. Cheng, K. Midorikawa, Femtosecond laser 3D micromachining: a powerful tool for the fabrication of microfluidic, optofluidic, and electrofluidic devices based on glass, Lab Chip 14(18), 3447–3458 (2014), http://dx. doi.org/10.1039/c4lc00548a
- [10] C. B. Schaffer, A. Brodeur, E. Mazur, Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses, Meas. Sci. Technol. 12, 1784–1794 (2001), http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/12/11/305
- [11] D. Paipulas, Lūžio rodiklio modifikavimas stikluose ir kristaluose veikiant ultratrumpaisiais lazerio impulsais, Ph.D. thesis, Vilniaus universitetas, Vilnius (2011)
- S. Guizard, P. Martin, G. Petite, Hot-electron relaxation in quartz using high-order harmonics, Phys. Rev. B 61(15), 9883–9886 (2000), http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.61. 9883

- B. Poumellec, M. Lancry, P. G. Kazansky, Modification thresholds in femtosecond laser processing of pure silica: review of dependencies on laser parameters [Invited], Opt. Mater. Express 1(4), 766–782 (2011), http://dx.doi.org/10.1364/OME.1.000766
- [14] K. Itoh, W. Watanabe, S. Nolte, C. B. Schaffer, Ultrafast Processes for Bulk Modification of Transparent Materials, Opt. Mater. Express 31(8), 620–625 (2006), http://dx.doi.org/ 10.1557/mrs2006.159
- [15] C. Itoh, K. Tanimura, N. Itoh, Optical studies of self-trapped excitons in SiO2, J. Phys. C 21:26, 4693–4702 (1988), http://dx.doi.org/10.1088/0022-3719/21/26/017
- [16] J. W. Chan, T. Huser, S. Risbud, D. M. Krol, Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses, Opt. Lett 26(21), 1726–1728 (2001), http: //dx.doi.org/10.1364/OL.26.001726
- [17] M. Sakakura, M. Shimizu, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao, M. Sakakura, M. Shimizu, Y. Shimotsuma, K. Miura, Temperature distribution and modification mechanism inside glass with heat accumulation during 250 kHz irradiation of femtosecond laser pulses, Appl. Phys. Lett. 93, 231112(1–3) (2008), http://dx.doi.org/10.1063/1.3046101
- [18] R. Osellame, G. Cerullo, R. Ramponi (eds.), Femtosecond laser micromachining: photonic and microfluidic devices in transparent materials (Springer, 2012), http://dx.doi.org/10. 1007/978-3-642-23366-1
- [19] L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz, Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses, Opt. Commun. 171, 279–284 (1999), http://dx.doi.org/doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00562-3
- [20] P. P. Rajeev, M. Gertsvolf, E. Simova, C. Hnatovsky, R. S. Taylor, V. R. Bhardwaj, D. M. Rayner, P. B. Corkum, Memory in Nonlinear Ionization of Transparent Solids, Phys. Rev. Lett. 97, 253001(1–4) (2006), http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.253001
- [21] V. R. Bhardwaj, E. Simova, P. P. Rajeev, C. Hnatovsky, R. S. Taylor, D. M. Rayner, P. B. Corkum, Optically Produced Arrays of Planar Nanostructures inside Fused Silica, Phys. Rev. Lett. 96, 057404(1–4) (2006), http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.057404
- [22] Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. Qiu, K. Hirao, Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses, Phys. Rev. Lett. 91(24), 1–4 (2003), http://dx.doi. org/10.1103/PhysRevLett.91.247405
- [23] F. Liang, R. Vallée, S. L. Chin, Mechanism of nanograting formation on the surface of fused silica, Opt. Express 20(4), 4389–4396 (2012), http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.004389

- [24] A. Marcinkevičius, S. Juodkazis, M. Watanabe, M. Miwa, S. Matsuo, H. Misawa, J. Nishii, Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica, Opt. Lett. 26(5), 277–279 (2001), http://dx.doi.org/10.1364/OL.26.000277
- [25] T. Tičkūnas, M. Perrenoud, S. Butkus, R. Gadonas, S. Rekštytė, M. Malinauskas, D. Paipulas, Y. Bellouard, V. Sirutkaitis, Combination of additive and subtractive laser 3D microprocessing in hybrid glass/polymer microsystems for chemical sensing applications, Opt. Express 25(21), 26280–26288 (2017), http://dx.doi.org/10.1364/OE.25.026280
- [26] X. Yu, Y. Liao, F. He, B. Zeng, Y. Cheng, Z. Xu, K. Sugioka, K. Midorikawa, Tuning etch selectivity of fused silica irradiated by femtosecond laser pulses by controlling polarization of the writing pulses, J. Appl. Phys. 109, 053114(1–5) (2011), http://dx.doi.org/10.1063/ 1.3555080
- [27] S. Juodkazis, K. Nishimura, S. Tanaka, H. Misawa, E. G. Gamaly, L. Hallo, P. Nicolai, V. T. Tikhonchuk, Laser-Induced Microexplosion Confined in the Bulk of a Sapphire Crystal: Evidence of Multimegabar Pressures, Phys. Rev. Lett. 96, 166101(1–4) (2006), http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.166101
- [28] S. Juodkazis, H. Misawa, T. Hashimoto, E. G. Gamaly, B. Luther-davies, Laser-induced microexplosion confined in a bulk of silica: Formation of nanovoids, Appl. Phys. Lett. 88, 201909(1–3) (2006), http://dx.doi.org/10.1063/1.2204847
- [29] E. N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Huang, R. J. Finlay, T. Her, J. P. Callan, E. Mazur, Three-dimensional optical storage inside transparent materials, Opt. Lett. 21(24), 2023– 2025 (1996)
- [30] C. Hnatovsky, R. S. Taylor, P. P. Rajeev, E. Simova, V. R. Bhardwaj, D. M. Rayner, P. B. Corkum, Pulse duration dependence of femtosecond-laser-fabricated nanogratings in fused silica, Appl. Phys. Lett. 87, 014104(1–3) (2005), http://dx.doi.org/10.1063/1.1991991
- [31] S. Rajesh, Y. Bellouard, Towards fast femtosecond laser micromachining of fused silica: The effect of deposited energy., Opt. Express 18(20), 21490–21497 (2010), http://dx.doi. org/10.1364/OE.18.021490
- [32] K. Sugioka, Y. Cheng, Femtosecond Laser 3D Micromachining for Microfluidic and Optofluidic Applications (Springer, 2014), http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-5541-6
- [33] A. Steimle, 3D Micro-Printing: A new Era for Med-Tech Applications devices, Laser Technik Journal 15(1), 32–34 (2018), http://dx.doi.org/10.1002/latj.201800003

- [34] Q. T. Aten, B. D. Jensen, S. H. Burnett, L. L. Howell, A self-reconfiguring metamorphic nanoinjector for injection into mouse zygotes, Rev. Sci. Instrum. 85, 05005(1–10) (2014), http://dx.doi.org/10.1063/1.4872077
- [35] R. Kitamura, L. Pilon, M. Jonasz, Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature, Appl. Opt. 46(33), 8118–8133 (2007), http: //dx.doi.org/10.1364/AO.46.008118
- [36] M. Castillejo, P. M. Ossi, L. Zhigilei (eds.), Lasers in Material Science (Springer, 2014), http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-02898-9
- [37] L. Euler, Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes (Birkhäuser Basel, 1952)
- [38] S. P. Timoshenko, *History of Strength of Materials* (Dover Publications, 1983)
- [39] Q. Meng, A Design Method for Flexure-Based Compliant Mechanisms on the Basis of Stiffness and Stress Characteristics, Ph.D. thesis, University of Bologna, Italy (2012)
- [40] L. L. Howell, S. P. Magleby, B. M. Olsen (eds.), Handbook of Compliant Mechanisms (Willey, 2013), http://dx.doi.org/10.1002/9781118516485
- [41] N. Lobontiu, Compliant Mechanisms: design of Flexure Hinges (CRC Press, 2002), http: //dx.doi.org/10.1201/9781420040272
- [42] L. Zentner, S. Linß, Compliant systems: Mechanics of elastically deformable mechanisms, actuators and sensors (De Gruyter, 2019), http://dx.doi.org/10.1515/9783110479744

Dominyka Stonytė

STIKLINIŲ MIKROMECHANINIŲ SISTEMŲ FORMAVIMAS ULTRATRUMPAISIAIS LAZERIO IMPULSAIS

Santrauka

Pastaruoju metu skaidrių medžiagų lazerinis mikroapdirbimas tapo sparčiai augančia mokslo sritimi, o progresuojant miniatiūrizavimo procesui mikrosistemose integruojama vis daugiau funkcijų. Šiuolaikinių lazerinių sistemų didelio intensyvumo femtosekundiniai impulsai leidžia preciziškai be terminių defektų formuoti trimates tūrines modifikacijas stikle su pakitusiu lūžio rodikliu bei cheminėmis savybėmis ir išnaudoti jas mikroelektromechaninių prietaisų gamyboje.

Vienas paprasčiausių ir dažniausiai mikroaktuatoriuose naudojamų darinių – atsilenkianti svirtis, kuri gali būti naudojama preciziškam kelių mikrometrų tikslumo poslinkio nustatymui, mikrodarinių deformacijų juos veikiant jėga nustatymui, atominiuose mikroskopuose, mikropincetuose ir t.t. Mikrosvirties veikimo principas pagrįstas lydyto kvarco lankstumu be išliekamųjų deformacijų kelių mikrometrų eilės matmenų struktūrose, kai neviršijama jų tamprumo riba.

Šiame darbe aprašomas "Comsol" programiniu paketu sukurtas įtampa valdomos atsilenkiančios svirties su skirtingomis lanksčiomis jungtimis baigtinių elementų analizės modelis, atliktos parametrų optimizavimo simuliacijos. Parodoma, kodėl šiuo atveju netinka analitiniai skaičiavimo būdai ir kodėl būtina skaičiavimus atlikti baigtinių elementų analizės metodu. Pademonstruota, kad simuliacijos yra palyginamos su realiai pasiektomis atsilenkimo vertėmis. Pateikti optimaliausių svirčių parametrų rinkiniai, leidžiantys pasiekti stabilius $9 - 12 \mu m$ bei nestabilius $< 26 \mu m$ atsilenkimus. Pademonstruotas realus $\approx 8.48 \mu m$ atsilenkimas. Parodyta, kad su optimaliais parametrų rinkiniais svirčių jungtyse pasiskirstę įtempiai neviršija tamprumo ribos. Atliktos virpesių analizės ir rasti fundamentinių modų dažniai, kuriuos naudojant su kintamos įtampos šaltiniu būtų galima padidinti svirčių judėjimo amplitudę bei periodiškai jas lankstyti į abi puses.

Dominyka Stonytė

MICROMECHANICAL GLASS SYSTEM FABRICATION USING ULTRAFAST LASER PULSES

Summary

Nowadays the field of laser micro-fabrication of transparent materials is growing rapidly and as the miniaturization process progresses, micro-systems are able to integrate more functions. Currently available laser systems deliver very intensive femtosecond pulses which lets us to precisely fabricate complex three-dimensional volume modifications in glass. It works because of a residual volume modification (type II) and it's chemical properties. These modifications may be used for development of micro-electro-mechanical devices.

One of the simplest and widely used in micro-actuators structures is a cantilever beam which alone can be used in precise micro-movement detection, estimation of deformation of microstructures due to the applied forces, atomic microscopes, micro-grippers and etc. The movement of cantilever beams is based on the fused quartz bending properties without deformations in microstructures when the stress distribution doesn't overcome the tensile strength.

This work represents a finite element method analysis model made with Comsol Multiphysics software and parameter optimization simulations for a voltage-actuated cantilever beam with 5 different flexure hinges. It analyses why analytical model is not suitable in this situation and shows that the finite element method analysis there is a must. It demonstrates that the simulation results are similar to those, achieved in real manufactured models. The optimal parameter sets are given, which lets to achieve a stable $9 - 12 \mu m$ and non-stable < 26 μm displacements. The real $\approx 8.48 \mu m$ displacement is shown. It demonstrates that with these optimal parameter sets the stress distributions doesn't overcome the elastic limit of the material and that there are almost no stresses outside the hinges of cantilever. The value of the first fundamental eigenmode eigenfrequency is given which could be used with alternating voltage to enlarge beam's movement amplitude and periodically swing it to the both sides.