

# SMŪGINIO VAMZDŽIO PANAUDOJIMAS MIKROMECHANINIŲ SILICIO SLĖGIO JUTIKLIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMUI

V.Stankevič, Č.Šimkevičius

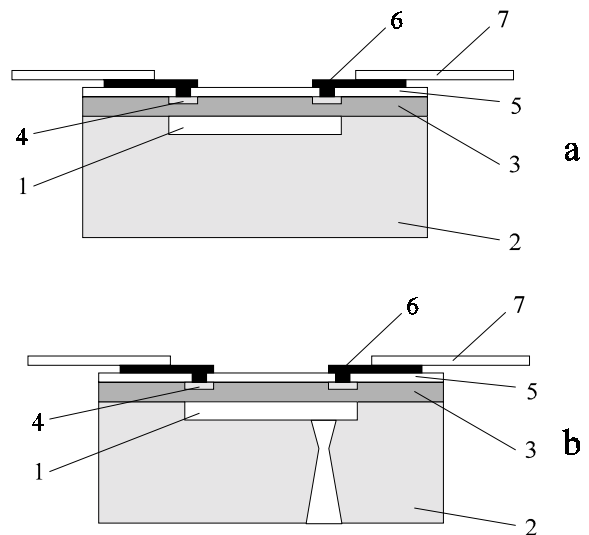
## Įvadas

Dinaminio slėgio matavimas yra aktualus daugelyje pramonės šakų: aeronautikoje, medicinoje, akustikoje, automobilių, karinėje pramonėje ir kitur. Slėgio keitiklių dinaminė charakteristikų nustatymui yra naudojama daug įvairių kintamo slėgio generatorių. Iš jų galima išskirti smūginį vamzdį, kuris, nežiūrint paprastos konstrukcijos, leidžia nustatyti svarbiausias dinamines charakteristikas plačiame dažnių ruože [1, 2].

Mikromechaninių sistemų technologijos (angl. *micromachining*) vystymasis paskutiniaisiais metais leido sukurti mažus ir labai patikimus slėgio jutiklius. Šie jutikliai gaminami panaudojant anizotropinį silicio ėsdinimą, tiesioginį silicio plokštelių suauginimą ir standartinius planarinės puslaidininkių technologijos procesus. Gabaritų mažėjimas leidžia gaminti vis greitaeiškesnius jutiklius. Be to mikromechaniniai silicio slėgio jutikliai pasižymi daugeliu specifinių bruožų, kurie gali turėti įtakos jutiklių dinaminėms charakteristikoms. Todėl mikromechaninių silicio slėgio jutiklių dinaminė charakteristikų tyrimas išlieka aktualus.

## Silicio slėgio jutikliai

Mikromechaninių sistemų technologijos pagalba suformuoto jutiklio pjūvis yra parodytas 1 pav. Jutiklio pagrindinis elementas yra diafragma, kurios periferijoje yra suformuoti pjezorezistoriai. Diafragmos deformacija veikiant slėgiui sukelia rezistorių varžos pasikeitimą ir atitinkamo signalo atsiradimą tilde linėje schemeje. Absoliutinio slėgio jutiklis (1a pav.) turi hermetišką ertmę, iš kurios yra pašalintas oras. Ši ertmė suformuota suauginant dvi silicio plokšteles: viršutinę (diafragmos) ir pagrindinę (padėklą), kurioje yra suformuota kvadratinė duobutė. Perteklinio slėgio jutiklio pagrindinėje plokštelėje yra išėsdinama skylutė ertmės sujungimui su atmosfera (1b pav.). Diafragma yra formuojama šlifuojant ir poliruojant viršutinę plokštelę. Jutiklių technologija yra išsamiai aprašyta [3-5]. Diafragmos storis ( $h$ ) ir ertmės gylis ( $H$ ) priklauso nuo slėgio matavimo diapazono. Buvo pagaminti silicio slėgio jutikliai įvairiems matavimo diapazonams nuo 0 iki  $p_m$ .  $H$  buvo parenkamas taip, kad veikiant slėgiui  $\cong 3,3 \cdot p_m$ , diafragmos centras atsiremtų į ertmės dugną. Pagamintų jutiklių parametrai yra pateikti 1 lentelėje. Visais atvejais kvadratinės ertmės kraštinė buvo lygi 2 mm.



1 pav. Absoliutinio (a) ir perteklinio (b) slėgio jutikliai: 1 – ertmė, 2 - padėklas, 3 - diafragma, 4 - pjezorezistorius, 5 - izoliatorius, 6 - metalizacija, 7 – laidas.

## Slėgio jutiklių dinaminės charakteristikos

Paprasčiausiu diafragminio slėgio jutiklio modeliu gali būti mechaninė sistema, susidedanti iš inertinės masės, spyruoklės ir demferio (klampuminės varžos). Šiuo atveju pereinamoji charakteristika (atsakas į slėgio šuolį) yra analitiškai aprašoma [2]:

$$x(t) = X \{1 - (1 - \xi^2)^{-1/2} \exp(-2\pi \zeta f_n t) \cos[2\pi(1 - \xi^2)^{1/2} f_n t - \phi]\}, \quad (1)$$

kur  $x(t)$  yra jutiklio atsako akimirkinė vertė,  $X$  – nuostovioji vertė,  $\zeta$  - slopinimo koeficientas,  $f_n$  – nuosavas (fundamentinis) dažnis,  $\phi$  - fazės postūmis. Nuosavas dažnis priklauso nuo diafragmos matmenų ir silicio mechaninių savybių [6]:

$$f_n = 1.654[E/\rho(1-\nu^2)]^{1/2}h/L^2 \quad (2)$$

kur  $L$  – kvadratinės diafragmos kraštinė,  $E, \nu$  - silicio Jungo modulis ir Poissono koeficientas. 1 lentelėje yra pateiktos apskaičiuotos  $f_n$  reikšmės, kai  $L = 2$  mm. Slopinimo koeficientas yra sunkiai teoriškai įvertinamas, nes priklauso nuo diafragmą supančios aplinkos.

Iš eksperimentinės pereinamosios charakteristikos galima nustatyti visus slėgio jutiklio dinamiką aprašančius parametrus (pvz., pagal JAV standartą MIL ST 883C): rezonansinį dažnį ( $f_r$ ), didėjimo trukmę, išmetimą, dažninę amplitudės (DACH) ir dažninę fazės charakteristikas. Dvi pastarosios charakteristikos yra gaunamos atlikus pereinamosios charakteristikos Fourier transformaciją.

Būtina pažymėti, kad: 1) jutiklio atsakas, t.y. elektrinis signalas, nebūtinai turi atkartoti visus diafragmos virpėjimus, nes tam tikrais diafragmos išsilenkimo atvejais pjezorezistoriaus deformacija gali būti maža, 2) esant nekokybiškam plokštelių suaugimui ertmės pakraščiuose, parametras  $L$  formulėje (2) gali būti nelygus išsėdintos ertmės kraštinei, 3)  $f_n$  priklauso nuo diafragmos įtempimų, kurie gali atsirasti formuojant jutiklį aukštoje temperatūroje [6, 8].

## Eksperimentas

Smūginis vamzdis susideda iš aukšto slėgio kameros, užpildomos stumiančiomis He arba Ar dujomis, ir kanalo, užpildyto darbinėmis dujomis (mūsų atveju, oras) su slėgiu  $p_1$ . Kamera ir kanalas yra atskirti specialia metaline diafragma. Pasiekus tam tikrą slėgį kameroje, diafragma

1 lentelė. Slėgio jutiklių parametrai ir charakteristikos

Tipas	$p_m$ , MPa	$h$ , $\mu\text{m}$	$H$ , $\mu\text{m}$	$f_n$ , kHz	$f_r$ , kHz	$\zeta$
Pertekl.	0,1	25	22	84,2	82,1-86,8	0,066-0,080
Absol.	0,2	40	14	134,8	131,9-140,4	0,010-0,018
Pertekl.	0,2	40	14	134,8	129,8-138,0	0,059-0,077
Absol.	0,4	56	10	188,7	186,4-197,6	0,013-0,018
Pertekl.	0,4	56	10	188,7	184,1-196,2	0,061-0,078
Absol.	1,0	85	7	287	282 – 299	0,013-0,020
Pertekl.	1,0	85	7	287	279 – 299	0,060-0,074
Absol.	4,0	170	5	573	558 – 594	0,012-0,021
Absol.	10	260	4	876	847 – 909	0,013-0,022

plyšta ir stumiančios dujos, besiverždamos į kanalą, stumia darbinės dujas ir suformuoja jose smūginę bangą, kurios amplitudė yra  $p_2$ . Kai smūginė banga pasiekia vamzdžio kanalo galinę sienelę, ji atsispindi. Slėgis atsispindėjusioje smūginėje bangoje  $p_5$  yra gerokai didesnis už  $p_2$ . Slėgiai  $p_2$  ir  $p_5$  yra lengvai apskaičiuojami, jei yra žinomas smūginės bangos sklidimo kanale virš-

garsinis greitis. Slėgio augimo laikas smūginės bangos fronte yra mažesnis už 10 ns, todėl tiriamų dažnių diapazono viršutinė riba yra didesnė už kelis MHz.

Mūsų eksperimentuose naudotas smūginis vamzdis leido pasiekti (esant  $p_1=0,1$  MPa)  $p_2=0,16\div 1,8$  MPa ir  $p_5=0,25\div 9$  MPa.. Matavimo įrenginys susidėjo iš smūginio vamzdžio, tiriamųjų jutiklių, smūginės bangos greičio matavimo sistemos ir signalo registravimo ir analizavimo aparatūros (oscilografo, keitiklio analogas-kodas ir kompiuterio). Smūginės bangos sklidimo greitis buvo matuojamas panaudojus du greitaveikius AlGaAs slėgio jutiklius [7], sumontuotus šoninėje kanalo sienelėje. Greičio matavimo paklaida sudarė apie 1% Tiriamieji jutikliai buvo montuojami tiek šoninėje, tiek galinėje kanalo sienelėje [9].

## Rezultatai ir jų aptarimas

Tipiškas absoliutinio slėgio jutiklio, sumontuoto šoninėje kanalo sienelėje atsakas, pateiktas 2 pav. Oscilogramoje matyti labai ilga jutiklio diafragmos svyravimų trukmė, o tai rodo kad slopinimo koeficientas yra labai mažas. Atsako didėjimo trukmė ( $t_m$ ) priklauso nuo jutiklio montavimo vietos. Kai jutiklis sumontuotas šoninėje sienelėje, tai  $t_m$  buvo 1,8-3,5 $\mu$ s didesnė negu to paties jutiklio, sumontuoto galinėje sienelėje, nes reikalingas tam tikras laikas, kol smūginė banga nubėga atstumą, lygų jutiklio diafragmos kraštinės ilgiui.

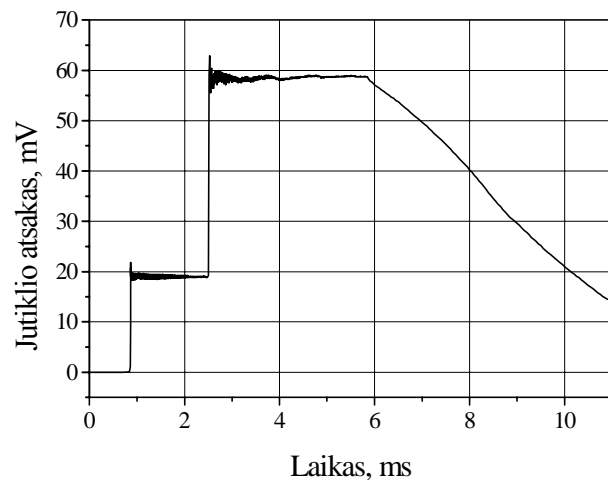
Smūginio vamzdžio galinėje sienelėje sumontuotų slėgio jutiklių atsakai į slėgio  $p_5$  laiptelį pateikti 3 pav., o jų atitinkamos DACH - 4 pav. Matyti, kad absoliutinio slėgio (3a, 4a pav.) jutiklis turi kelis kartus mažesnę slopinimo koeficientą, negu perteklinio slėgio (3b, 4b pav.) jutiklis. Nustatytas rezonansinis dažnis abiem atvejais labai gerai sutampa su apskaičiuotu  $f_n$  pagal (2) formulę. 3c, 4c pav. pavaizduoti atsakas ir DACH perteklinio slėgio jutiklio, veikiamo didelės slėgio perkrovos ( $p_m = 0,2$  MPa,  $p_5 - p_1 = 0,56$  MPa), t.y. kai jutiklio diafragma atsiremia į ertmės dugną. Matyti greitas atsako chaotiškų svyravimų gesimas (per  $\approx 27$   $\mu$ s), o tai įrodo sudėtingą diafragmos formos kitimą atsirėmus į ertmės dugną.

Apibendrinti jutiklių dinaminių charakteristikų matavimo rezultatai pateikti 1 lentelėje [10]. Matyti geras visų jutiklių išmatuotų  $f_r$  atitikimas apskaičiuotoms  $f_n$ , tačiau yra žymus skirtumas tarp absoliutinio ir perteklinio slėgio jutiklių slopinimo koeficientų. Skirtingų matavimo diapazonų jutiklių  $\zeta$  mažai skiriasi. Minėtos ypatybės gali būti paaiškintos oro tarpo ertmėje ir skylutės, suformuotos perteklinio slėgio jutiklio padėkle (1b pav.), įtaka. Papildomi eksperimentai parodė, kad  $\zeta$  priklauso nuo vakuumo lygio absoliutinio slėgio jutiklio ertmėje.

Jutiklių išmatuotas rezonansinis dažnis sutampa su apskaičiuotu  $f_n$ , o tai leido mums panaudoti šio tipo matavimus diafragmos storio nustatymui silicio plokštelėje prieš ją padalinant į atskirus jutiklius. Be to eksperimentiškai buvo nustatyta, kad jutiklio veikimas slėgio laipteliu, kurio amplitudė 3-4 kartus viršija matavimo diapazono viršutinę ribą, yra labai geras blogo plokštelių suauginimo indikatorius. Po vieno tokio poveikio ryškiai pasikeičia nekokybiško jutiklio pradinis signalas ("nulis") ir jautrumas slėgiui. Analogišką efektą galima pasiekti tik ilgai veikiant jutiklį didele perkrova (9-10  $p_m$ ) esant paaukštintai temperatūrai.

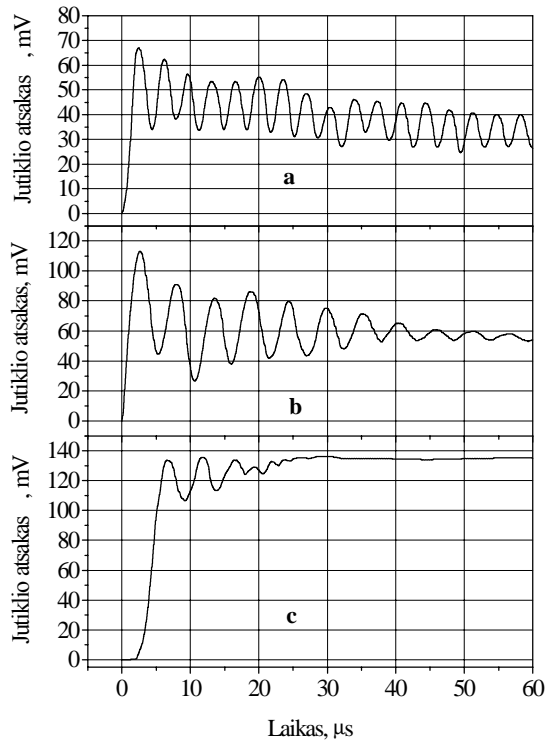
## Išvados

Parodyta, kad panaudojant smūginį vamzdį galima nustatyti silicio pjezorezistyvinių slėgio jutiklių, pagamintų panaudojant mikromechaninių sistemų technologiją, ne tik visas dinamines charakteristikas, bet ir kai kuriuos technologinius parametrus. Nustatyta, kad jutiklių charakteristikos gali būti adekvačiai aprašomos paprastu mechaniniu modeliu. Išmatuotų absoliutinio ir perteklinio slėgio jutiklių pereinamųjų charakteristikų slopinimo koeficientai pastebimai skiriasi. Šį skirtumą nulemia oro tarpas ertmėje ir oro stulpas perteklinio slėgio jutiklio skylutėje, kuri yra suformuota padėkle. Gautas geras teorinių ir eksperimentinių

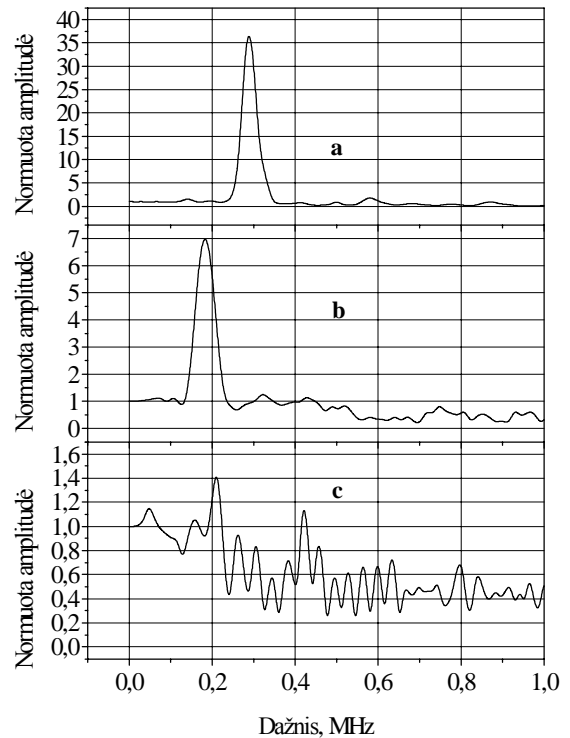


**2 pav.** Absoliutinio slėgio jutiklio, sumontuoto šoninėje sienelėje, atsakas ( $h=85$   $\mu$ m,  $p_2=0,345$  MPa,  $p_5=0,86$  MPa).

parametų sutapimas rodo, kad jutiklių formavimo metu yra pasiektas kokybiškas plokštelių suauginimas, o diafragma neturi pradinių mechaninių įtempimų.



**3 pav.** Pereinamosios charakteristikos: a - absoliutinio slėgio jutiklis  $h=86 \mu\text{m}$ ,  $p_5=0,85 \text{ MPa}$ ; b - perteklinio slėgio jutiklis  $h=55 \mu\text{m}$ ,  $p_5=0,35 \text{ MPa}$ ; c - perteklinio slėgio jutiklis,  $h=40 \mu\text{m}$ ,  $p_5=0,66 \text{ MPa}$ .



**4 pav.** Dažninės amplitudės charakteristikos, apskaičiuotos iš pereinamųjų charakteristikų, pavaizduotų 3 pav.

## Literatūra

1. **J.P.Damion**, "Means of dynamic calibration for pressure transducers", *Metrologia*, V. 30, p. 743-746 (1994).
2. **V.E.Bean**, "Dynamic pressure metrology", *Metrologia*, V. 30, p. 737-741 (1994).
3. **В.Станкевич, Ч.Шимкевичюс**, "Перспективные датчики абсолютного давления", *Приборы и системы управления*, №-6, с. 25-27 (1996).
4. **V.Rudaitis, V.Stankevič, Č.Šimkevičius** "Silicio plokštelių tiesioginio suauginimo panaudojimas jutiklių gamyboje", *Mokslo darbai. Radioelektronika*, T. 30, Nr. 3, p. 59-64 (1994).
5. **V.Stankevič, Č.Šimkevičius**, "Application of aluminum films as temperature sensors for the compensation of output thermal shift of silicon piezoresistive pressure sensors", *Sensors and Actuators*, V. A71, p. 161-166 (1998).
6. **S.Bouwstra, P.Kemna, R.Legtenberg**, "Thermally excited resonating membrane mass flow sensor", *Sensors and Actuators*, V. 20, p. 213-223 (1989).
7. **V.Stankevič, Č.Šimkevičius**, "Semiconductor pressure-pulse sensor", *Sensors and Actuators*, V. A51, p. 159-163 (1996).
8. **V.Stankevič, Č.Šimkevičius**, "Thermal errors in media-separating housings of pressure sensors", *Sensors and actuators*, V. A75, p. 215-221 (1999).
9. **Č.Šimkevičius, V.Stankevič**, "Investigation of micromachined pressure sensors by means of shock tube", in: *Proc. of VI Nexspan workshop "Microsystems technology activities in Baltic region"*, Vilnius, April 23-24 1999, (Kaunas, 1999), p. 109-112.
10. **V.Stankevič, Č.Šimkevičius**, "Use of a shock tube in investigations of silicon micromachined piezoresistive pressure sensors", *Sensors and Actuators A* (spaudoje).