

# TALPINIŲ MIKROMONTUOJAMŲ ULTRAGARSINIŲ KEITIKLIŲ TAIKYMAS

*Evaldas Sapeliauskas<sup>ab</sup>, Rima Strelčiūnienė<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> *Panevėžio kolegija, Lietuva*

<sup>b</sup> *Kauno Technologijos Universitetas, Lietuva*

**Anotacija.** Straipsnyje apžvelgiami rezonansiniai talpiniai mikromontuojami ultragarsiniai keitikliai (CMUT), jų panaudojamas biodetekcijai, skysčių atpažinimui, dujų detekcijai. Tai vienos svarbiausių tyrimų kryptių kuriant pigią pirminę laboratoriją (lab on chip) integruojamą į mikroschemą.

**Raktiniai žodžiai:** Talpiniai mikromontuojami ultragarsiniai keitikliai; CMUT.

## ĮVADAS

Pjezoelektriniu pjezokristalų efektu veikianti įranga pademonstruota 1917 metais, kaip detektorius povandeniams laivams aptikti. Vėliau šiuo principu veikianti įrangos taikomumas plėtėsi ir į kitas sritis. Viena iš pagrindinių jos pritaikymo sričių – medicina. Ilgą laiką šios technologijos tobulinimas buvo skirtas įrangos matmenų mažinimu, tačiau pasiekti jutiklio matmenis, su kuriais galima sumontuoti ant mikroschemos neįmanoma dėl kristalo fizinių savybių. CMUT (Talpiniai mikromontuojami ultragarsiniai keitikliai) veikimo principas grindžiamas elektrostatine sąveika tarp elektrodų aprašoma Kulono dėsnio skirtingai nei pjezoelektrinių mikroelektromechaninių įtaisų atveju, kai veikimas grindžiamas elektrinio lauko poveikiu į jautrią kristalo gardelę. Nuo šios technologijos sukūrimo 1994 metais CMUT gali būti montuojami, ant mikroschemos ir gali tenkinti laboratorijos mikroschemoje reikalavimus. Straipsnyje apžvelgiami prototipai remiasi CMUT struktūra. Tobulėjant modernioms kompiuterinėms moduliavimo priemonėms ANSYS, COMSOL, COVENTOR, tiek analitiniai, tiek skaitmeniniai CMUT modeliai tapo pakankamai tikslūs ir patikimi pramoniniam realizavimui (Roh, 2000). Per tuos pačius 10 metų keitėsi ir gamybos procesai, ir elektroninės integracijos priemonės, tad masiškai gaminti CMUT technologija paremtus jutiklius su integracine elektronika tapo ekonomiškai įmanoma (Brenner, 2019).

## TALPINIO MIKROMONTUOJAMO ULTRAGARSINIO KEITIKLIO SANDARA

CMUT bazinį struktūros elementą sudaro mikromembraninė celė turinti du elektrodus. Vienas iš elektrodų yra nejudantis (paprastai sutapdinamas su pagrindu), o kitas elektrodas judantis (sutapdinamas su membrana). Elektrodus skiria vakuumo tarpelis, dėl kurio membrana gali judėti. Tarp elektrodų sukūrus elektrinį lauką, atsiranda Kulono sąveikos jėga, kurią dalinai atsveria membranos mechaninio tamprumo jėga. Iš esmės Kulono sąveikos jėga ir tamprumo jėgos balansas nulemia membranos ir judančio elektrodo padėtį, greitį, pagreitį, bei elektrines įtaiso savybes (Pappalardo ir kt., 2006). Celės vertikalus struktūros pjūvis schematiškai pateiktas 1 pav. Viršutinį judrųjį elektrodą iš apačios dengia kritinis membranos sluoksnis tiesiogiai kontaktuojantis su vakuumo tarpeliu, o iš viršaus elektrodą nuo mechaninio, cheminio ar elektrinio išorinio poveikio apsaugo apsauginis sluoksnis (Dirksen, 2012).

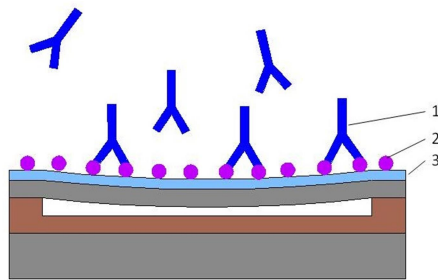


1 pav. CMUT bazinės struktūros vertikalus skerspjūvis

Vakuomo tarpelis yra suformuojamas izoliaciniame sluoksnyje, kuris apsaugo įtaisą nuo trumpojo jungimo, kuris būtų neišvengiamas, kai įlinkusi membrana susiliečia su apatine tarpelio sienele. Dažniausiai CMUT celės yra jungiamos į masyvus siekiant padidinti mechaniškai aktyvų įtaiso plotą.

## TALPINIS MIKROMONTUOJAMAS ULTRAGARSINIS KEITIKLIS - BIODETEKTORIUS

Senstant žmonijos populiacijai didėja ir įvairių su ankstyvąja sveikatos sutrikimų diagnostika susijusios įrangos poreikis. Aplinkos užterštumas, tai dar viena biodetektorius panaudojimo sritis. Molekulinio lygio gravimetrinė detekcija galima, kai sukuriama funkciniame įtaiso sluoksnyje, kuriu modifikuojamas jutiklio paviršius. Šis modifikuotas sluoksnyje medžiagų sąveikos metu turi specifiskai ir selektyviai prisijungti tiksles molekules iš analizės. Analitė gali būti dujinė terpė, jei jutiklis naudojamas dujų molekulių detekcijai arba tirpalas skystyje, jei atliekama biodetekcija. Jautrusis elementas paprastai pasižymi aukštos kokybės savųjų virpesių rezonansu, kurį nulemia elemento storio ir medžiagos, iš kurios pagamintas elementas, savybės. Tokio įtaiso jautris jo paviršiuje imobilizuotos masės pokyčiui yra proporcingas rezonansinio dažnio kvadratui. Kad CMUT struktūra yra tinkama biodetekcijai patvirtino grupė Lietuvos mokslininkų (Ramanavičienė, 2010). Buvo pasirinktas imuninių jutiklių priklausančių afininių biologinių jutiklių grupei. Šie jutikliai pagrįsti specifine dviejų imuninės sistemos molekulių sąveika. Prototipinis jutiklis buvo modifikuojamas antigenu galvijų leukemijos virusui, pasižymintiu specifine sąveika su tuo paties viruso antikūnu (Ramanavičienė, 2013). 2 paveikslėlyje parodytas CMUT jutiklio skerspjūvis modifikuojant membraną.



2 pav. Imobilizuotos antigenais CMUT celės skerspjūvis.

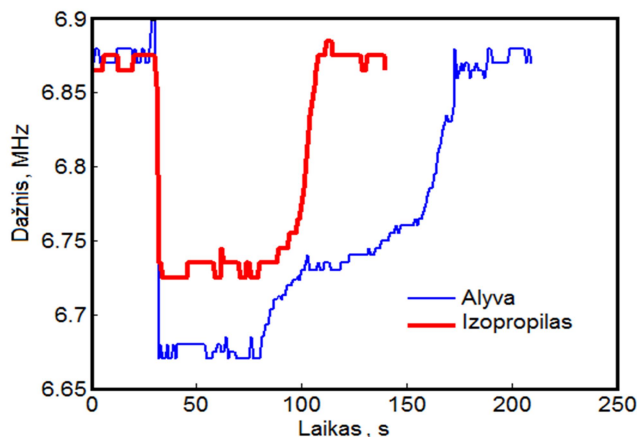
**1-viruso antikūnis, 2-imobilizuoti ant elektrodo paviršiaus antigenai, 3-elektrodas**

Prieš atliekant eksperimentą buvo atlikti nepadengto antikūniais CMUT struktūrinio rezonanso matavimai. Tik užfiksavus pradines vertes atliktas jutiklio paviršiaus modifikavimas naudojant GLV antigeną gp51 užlašinant 1,5  $\mu$ l baltymo vandeninio tirpalo (1 mg/ml). Po to sekė 20 min. džiovinimas. Po to neišimobilizavę baltymai nuplaunami dionizuotu vandeniu. Plovimo procedūra kartojama kol nelieka rezonansinio dažnio ir impedanso verčių slinkties. Šio eksperimento rezultatai parodė, kad CMUT jutiklio struktūra yra tinkama biojutikliui. Tačiau tokio tipo biojutikliu fiksuojami rezultatai gaunami tik po labai ilgo laiko. Pats ruošinių paruošimas ir jų užnešimas reikalauja didelio profesionalumo. Patogiausia biotyrimams atlikti realiu laiku yra skysta tiriamoji analizė.

Rezonansinio tipo CMUT panaudojimas skysčiui identifikuoti. Tyrimas atliktas realiu laiku užregistruojant osciliatoriaus išėjimo virpesių dažnio kitimą (žr. 3 pav.), kai CMUT yra 50-čiai sekundžių pamerkiamas į transformatorinę alyvą (Neste TRAF0 10X, 895 kg/m<sup>3</sup>, plonesnė mėlyna linija) bei izopropilo alkoholį (786 kg/m<sup>3</sup>, storesnė raudona linija) (Vanagas, 2013). Čia svarbus faktas yra tai, kad transformatorinės alyvos sukeltas dažnio pokytis yra didesnis, nei izopropilo alkoholio, kas gali būti paaiškinta didesniu alyvos tankiu.

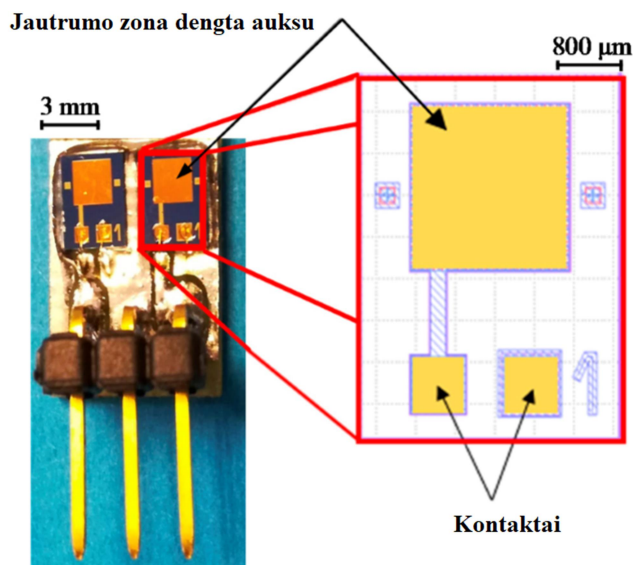
Gautas priklausomybės vertiname, kaip pagrindžiančias sukurto matavimo kanalo tinkamumą matuoti skysčio mišinio sudėčiai. Tačiau dėl žemo skystyje dirbančio CMUT struktūrinio rezonanso kokybės matavimo informatyvumas yra ribotas (Sapeliauskas, 2014).

Rezonansinio tipo CMUT panaudojimas aplinkoje esančių dujų detekcijai. Šis jutiklis panaudotas azote (N<sub>2</sub>) esančių anglies dvideginio (CO<sub>2</sub>) ir sieros dvideginio (SO<sub>2</sub>) aptikimui. Didėjanti šių dujų koncentracija aplinkoje kelia pavojų sveikatai, gali sukelti kvėpavimo takų ligas, smogą, rūgščius lietus aerozolių dalelių kaupimąsi.



3 pav. Realiam laike užregistruotas osciliatoriaus išėjimo dažnio pokytis

Paprastai tokių dujų kiekio analizė atliekama panaudojus infraraudonųjų spindulių spektroskopija, dujų chromatografiją, masės spektrometrija. Tokiems tyrimams atlikti įranga yra didelių gabaritinių matmenų, sudėtinga, sunaudojanti nemažai energijos ir reikalaujanti pastovios kvalifikuotos priežiūros. Tad panaudojus CMUT galima pasiekti tuos pačius rezultatus tik mažesniais sąnaudomis. CMUT sudaro rezonuojančių struktūrų masyvas, dažniausiai vadinamas CMUT elementais, galinčiais veikti lygiagrečiai, taip pažeidus kelias membranas arba joms neteisingai veikiant - likusios vis tiek gali pateikti duomenis signalo gavimui. Eksperimentams naudotas CMUT jutiklis su dviem auksu dengtomis jautrumo zonomis (žr. 4 pav). Abi jautrumo zonos dujų atpažinimui buvo padengtos polimeriniu-metylo polietiloaminu (mPEI). Ankstesniuose darbuose nustatyta, kad ši danga labai gerai sugeria CO<sub>2</sub> dujas (Barauskas, 2016).



4 pav. CMUT dujoms tirti (Barauskas, 2016)

Jutiklis patalpintas į specialią kamerą, kad išvengtų pašalinių dujų įtakos rezultatams. Pasirinkta funkcinė medžiaga skirtingai sąveikauja su dujų molekulėmis, todėl keičiasi ne tik CMUT rezonanso dažnis, bet ir realaus elektroakustinės varžos dalis. Matuojant CO<sub>2</sub> ir SO<sub>2</sub> parametrus, selektyviai nustatomos tikslinės dujos dujų mišinyje. Tai rodo, kad teisingai parinkus modifikavimo medžiagą, reaguojančia su dujomis, galima realiu laiku identifikuoti dujas ir jų kiekį aplinkoje. Be to skirtingomis medžiagomis funkcionavus jautriąją jutiklio zoną, galima išplėsti ir detektuojamų dujų skaičių (Barauskas, 2019).

## IŠVADOS

1. Pademonstruotas rezonansinio CMUT struktūros tinkamumas biodetekcijai. Realus laiko diagnostikai, dėl tiriamųjų medžiagų specifiškumo, nepritaikomas.

2. Pademonstruota, kad rezonansinio CMUT jutiklis gali būti naudojamas, kaip detektorius ir skystoje aplinkoje, tačiau būtina toliau tobulinti detektoriaus sandarumą ir sumažinti signalo-triukšmo reikšmes.

3. Ore esančių pavojingų dujų nustatymui jautrioji jutiklio zona modifikuojama danga su kuria dujos reaguoja, taip praplečiamos dujų tipų nustatymo ribos.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Barauskas, D., Pelenis, D., Vanagas, G., Viržonis, D., Baltrušaitis, J. (2019). Methylated Poly(ethylene)imine Modified Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer for Measurements of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> in Their Mixtures. *Sensors* 2019, 19, 3236.
- Barauskas, D., Pelenis, D., Virzonis, D., Baltrus, J. P., Baltrusaitis, J. (2016). Greenhouse Gas Molecule CO<sub>2</sub> Detection Using a Capacitive Micromachined Ultrasound Transducer. *Analytical Chemistry*, vol. 88, pp. 6662-6665, 2016/07/05.
- Brenner, K., Ergun, A. S., Firouzi, K., Rasmussen, M. F., Stedman, Q., Khuri-Yakub, B. P. (2019). Advances in Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers. *Micromachines* 2019, 10, 152.
- Dirksen, P., Van Der Lugt, A. (2012). Method for production and using a capacitive micro-machined ultrasonic transducer. 2012, Google Patents.
- Pappalardo, M., ir kt. (2006). P2P-1 Multilayer cMUT Structure for Improved Sensitivity and Bandwidth. in 2006 IEEE Ultrasonics Symposium.
- Ramanaviciene, A., Ramanavicius, A., Makaraviciute, A., Virzonis, D., Vanagas, G., Mikolajunas, M. (2013). Application of micromembrane devices for immunosensor design. Presented at the Pittcon 2013, Philadelphia.
- Ramanaviciene, A., Virzonis, D., Vanagas, G., Ramanavicius, A. (2010). Capacitive micromachined ultrasound transducer (cMUT) for immunosensor design. *Journal Analyst*, volume 135, 1531 - 1534.
- Roh, Y., Khuri-Yakub, B. T. (2000). Finite element modeling of capacitor micromachined ultrasonic transducers. 2000 Ieee Ultrasonics Symposium Proceedings, Vols 1 and 2, pp. 905-908.
- Sapeliauskas, E., Vanagas, G., Barauskas, D., Virzonis, D. (2014). CMUT as a sensor in microfluidic environment. *Sensor Letters*, vol. 12, pp. 1597-1599(3).
- Vanagas, G., Barauskas, D., Virzonis, D. (2013). Analysis and testing of liquid loaded CMUT oscillator. In Intelligent technologies in logistics and mechatronics systems, ITELMS'2013 Panevezys, Lithuania, 2013, pp. 267-273.

### Summary

#### Application of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers

The main structure of the CMUT element is its capacitive cell that has one moveable and one fixed electrode. Between these electrodes (the movable one is usually structurally aligned with the membrane) there is a vacuum gap, which creates a cavity for the displacement of the membrane. When the electrical field is applied between these electrodes, the membrane is attracted towards the substrate of the structure by a Coulomb force and the induced stress within the membrane balances the attraction. The balance between these forces determines the membrane and electrode placement, speed, acceleration and electrical properties. When biosensors become a key tool in molecular diagnostics, it would change the molecular diagnostic paradigm - from lengthy and costly research laboratory operations it would be moved to a quick and informative results for different conditions: primary health care, household, military field, space and others. Such paradigmatic play has already begun in some diagnostic areas, such as the measurement of blood sugar levels, where compact and affordable biosensors, to a large extent, replaced laboratory tests. Also this same modified CMUT based gas sensing system has been shown to be used for measurement of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations in a dry nitrogen environment. Demonstration of resonant CMUT structure suitability for biodetection. Due to the specificity of the test substances, it is not suitable for real-time diagnostics. It has been shown that a resonant CMUT sensor can be used as a detector in a liquid environment, but it is necessary to further improve detector tightness and reduce signal - noise values. The sensitive sensor area for detecting hazardous gases in the air is modified by the coating with which the gas reacts, thereby extending the detection limits of the gas types.