

Robustni, visoko občutljivi senzor za THz-območje

Aleksander Sešek, Janez Trontelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: aleksander.sesek@fe.uni-lj.si

Povzetek. Prispevek predstavlja glavne lastnosti terahercnega senzora in slikovnega sistema, razvitega v Laboratoriju za mikroelektroniko na Fakulteti za elektrotehniko. Senzor, ki deluje na principu mikrobolometra, z ustrezno anteno zazna elektromagnetno valovanje v območju od 80 GHz pa vse tja do 1.2 THz. V tem območju spada v sam vrh THz senzorjev v svetovnem merilu, saj dosega občutljivost do 1000 V/W ter ekvivalentno šumno moč do 5 pW/√Hz pri sobni temperaturi. V prispevku so predstavljeni nekateri osnovni koraki pri izbi in izdelavi senzora in sistema, izbira materiala, nekatere meritve ter aplikativna uporabnost sistema. Prikazani so slikovni rezultati zajema THz-slike različnih prikritih predmetov v oddaljenosti od vira z uporabo odbojne in presvetlitvene metode.

Ključne besede: THz-senzor, mikrobolometer, THz slikovni sistem

A robust highly sensitive sensor for the THz frequency range

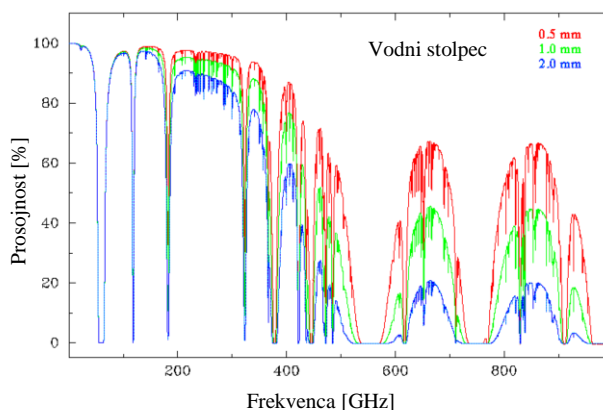
The paper presents the main parameters of a THz sensor and THz vision system designed and assembled in the Laboratory for microelectronic, Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana. The THz sensor consists of a microbolometer coupled with different antennas covering the 80 GHz to 1.2 THz frequency range. One of the microbolometer best performances is in its frequency range, reaching the sensitivity of up to 1000 V/W and NEP down to 5 pW/√Hz at a room temperature. Some basic steps of the sensor and THz vision system implementation are given and the main considerations for the microbolometer material selection are highlighted. Finally, some THz imaging results of hidden objects are shown using the reflection and transmission mode.

Keywords: THz sensor, microbolometer, THz imaging system

1 UVOD

Za vizualizacijo zakritih predmetov v embalaži oziroma za volumsko sliko nehomogenega telesa se največkrat uporablja rentgensko slikanje. Rentgensko valovanje je ionizirajoče ter povzroča spremembo tkiva, saj vpliva na osnovne gradnike celic. Pri opazovanju predmetov v embalaži, kot so pošne pošiljke, prtljaga potnikov ipd., je opazovanec neživo telo, žal pa je temu valovanju izpostavljen operater [1], [2]. Kot ena od alternativ se je v zadnjih letih zaradi velikega tehnološkega napredka, uveljavila terahercna (THz) tehnologija. THz-območje EM valovanja je nekje od 100 GHz pa tja do 10 THz. THz-tehnologija ponuja novo orodje za vizualizacijo, odkrivanje, prepoznavanje in analizo predmetov, ki jih

ni mogoče opazovati v vidnem spektru svetlobe. Ker je THz-valovanje neionizirajoče in celic ne poškoduje, je človeku neškodljivo, prodira pa skozi večino vrst tkanin, plastike, papirja in kartona [3]. Glavna slabost THz-valovanja pa je velika občutljivost na vsebnost vode predmeta in tudi količino vodne pare v okolici. Vsebnost vode oziroma vodne pare v atmosferi je pomembna, ko izbiramo frekvenčno območje aplikacije oziroma da lahko predvidimo zahtevano izhodno moč osvetljevalnega THz vira za želeno razdaljo opazovanja. Na sliki 1 je predstavljen frekvenčni spekter, kjer so vidna t. i. »okna«, pri katerih je THz-valovanje uporabno za opazovanje oddaljenih predmetov, na drugih območjih pa moramo zagotoviti kontrolirano atmosfero ali pa opazovati predmete v bližini ali z neposrednim stikom.



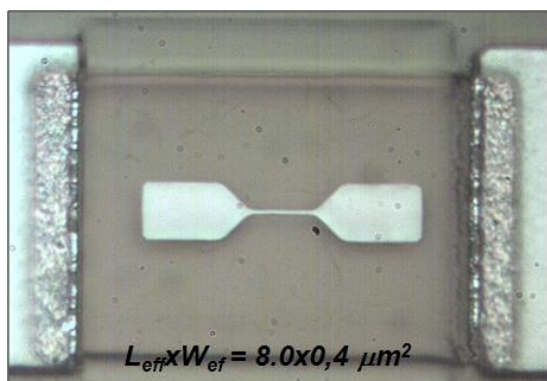
Slika 1: Slabljenje signala zaradi vsebnosti vodne pare v atmosferi

Iz slike 1 se razbere, da so atmosferska okna neenakomerno razporejena. Širša so pri nižjih frekvencah, zato aplikacije za zaznavanje zakritih predmetov na daljavo delujejo na nižjem THz- območju, medtem ko slikovni sistemi za bližnji zajem slike pri višjih THz-frekvencah, kar omogoča večjo ločljivost slike. Zajem oddaljene scene pri višjih frekvencah je tako rekoč nemogoč, razen pri uporabi vira večjih moči, kot je gyrotron [4].

Glede na fizikalno osnovo izvora THz-valov se THz-viri delijo na dve skupini, in sicer na optične in elektronske. Pri optičnih THz-virih je izvor THz-valovanja pulzni laser z nekaj ps (10^{-12}) oziroma fs (10^{-15}) pulzi [5], kjer se pulzi v THz-valovanje pretvorijo s fotoprevodno anteno. Ožji ko je pulz, više v THz-območje seže vir. Druga možnost je optično mešanje dveh laserjev, katerih razlika je valovanje v THz-območju [6]. Optični THz-viri dosegajo majhne izhodne moči v območju nekaj sto μ W. Elektronski THz-sistemi pa imajo izvor sestavljen iz elektronskih množilnikov, ki osnovno frekvenco nekaj GHz vira s sicer zelo slabim izkoristkom pomnožijo z želenim faktorjem. Največkrat so vključeni tudi aktivni množilniki [7]. S temi se poveča izhodna moč in lahko se že v osnovi doseže nekaj mW.

2 MIKROBOLOMETER

S THz-valovanjem THz-tehnologijo se v Laboratoriju za mikroelektroniko (LMFE) ukvarjamo od leta 2007. Najprej je bil cilj prikaz dvodimenzionalne slike, zajete pri frekvenci 300 GHz, s katere bi se lahko ugotovila pozicija predmeta, skritega pod tkanino ali embalažo. V ta namen je bil v LMFE razvit THz-senzor na osnovi mikrobolometra, ki še dandanes po svojih karakteristikah spada v sam vrh THz-senzorjev v frekvenčnem območju od 100 GHz do 1.2 THz [8].



Slika 2: THz mikrobolometer

Na sliki 2 je predstavljen THz-mikrobolometer, ki je narejen s tankoplastno tehnologijo na silicijevi rezini [9].

Najpomembnejša parametra, ki ju moramo spremljati, sta občutljivost \mathfrak{R} in ekvivalentna šumna moč NEP.

2.1 Občutljivost elementa \mathfrak{R}

Občutljivost \mathfrak{R} je podana z enačbo:

$$\mathfrak{R} \approx \frac{I \cdot TC \cdot R}{G_{th}} \quad (1)$$

Iz enačbe se lahko razbere, da je občutljivost premo sorazmerno odvisna od delovnega toka I skozi senzorski element, temperaturnega koeficienta TC materiala elementa ter upornosti R elementa, in obratno sorazmerna njegovi termični prevodnosti G_{th} . Pri izbiri materiala, iz katerega bo senzorski element izdelan, moramo torej zagotoviti, da bo imel sicer dimenzijsko zelo majhen senzorski element dovolj veliko upornost ter visok temperaturni koeficient, hkrati pa bo moral prenesti tudi zadosten delovni tok ter se čim manj hladiti. V tabeli 1 so predstavljeni različni materiali, ki so bili analizirani in preizkušeni, da bi zagotovili čim boljšo občutljivost. V stolpcih so predstavljeni najpomembnejši podatki, kot so: termična prevodnost λ , električna upornost ρ in temperaturni koeficient TC . Iz tabele je razvidno, da bi bil najboljši material za izdelavo senzorskega elementa bizmut. Za potrditev parametrov so bili iz bizmuta narejeni poskusni mikrobolometri, kar pa je zahtevalo kar nekaj sprememb klasičnega procesa mikroobdelave silicija ter dodatne procesne korake.

Tabela 1: Seznam materialov, primernih za THz-senzor

Material	λ [W/mK]	ρ [$\mu\Omega$ m]	TC [% / K]
Cu	400	17	0.4
Al	235	26.5	1.1
Sn	67	110	0.5
Pb	35	210	/
Pt	72	106	3.9
Ti	22	400	1.3
Bi	8	1300	-3

Bizmutov senzor je pri osnovnih meritvah dokazoval, da je ta material najboljši glede občutljivosti in šumnih lastnosti, žal pa se je zaradi izjemno tanke plasti bizmuta izkazal za neprimerne, ker je prišlo do velike elektromigracije materiala. Upornost elementa se je v 24 urah delovanja kljub najmanjšemu mogočemu delovnemu toku skoraj podvojila. Zato je bil za nove teste uporabljen naslednji najprimernejši material – titan.

Titanov mikrobolometer (prikazan na sliki 2) je izkazoval izjemno stabilno delovanje, prav tako pa je tehnologija uporabe in izdelave titanovih elementov veliko bolj združljiva z osnovno, standardizirano silicijevo tehnologijo.

Velikost senzorja je pogojena z zahtevanimi termičnimi lastnostmi in omejitvami tehnologije obdelave silicija. Končna velikost (prostornina) senzorja mora biti najmanjša mogoča. Tu je zelo pomembna debelina materiala, ki se najteže nadzira, saj se določi s časovnim trajanjem nanašanja. Pri številnih ponovitvah

postopka je bilo dokazano, da se lahko zagotovi najtanjša plast titana 50 nm, če želimo zagotovljeno ponovljivost v območju nekaj odstotkov. Končne dimenzije načrtanih senzorjev so od $12 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ pa do $10 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$. Že iz slike 2 pa je razvidno, da so po izdelavi (zaradi procesov obdelave silicija) končne efektivne dimenzije lahko še nekoliko manjše, kar je za občutljivost ugodno (manjša termična prevodnost in večja upornost). THz-senzor z zgoraj opisanimi dimenzijami ima povprečno upornost 500Ω . Z uporabo delovnega toka v območju $200 \mu\text{A} - 300 \mu\text{A}$ dosegajo senzorji, izdelani v LMFE, občutljivosti do 500 V/W brez vakuumске enkapsulacije ter do 1000 V/W z uporabo vakuumskega ohišja. Z uporabo dodatnega namenskega ojačevalnika je skupna občutljivost senzorja 1 MV/W .

2.2 Ekvivalentna šumna moč NEP

Ekvivalentna šumna moč je določena z enačbo

$$NEP_n = \frac{V_n}{\Re}, \quad (2)$$

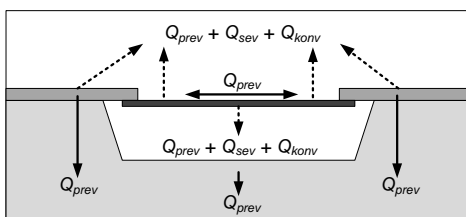
pri čemer je V_n šumna napetost, \Re pa občutljivost senzorja. Kot vidimo, sta parametra med seboj zelo povezana, saj je šumna napetost pri kovinah neposredno odvisna od upornosti sledi, prav tako pa je od upornosti odvisna tudi občutljivost senzorja. Tako lahko napišemo enačbo za približek NEP:

$$NEP_j \propto \left(G_{th} / TC \right)^{1/2} \quad (3)$$

Enačba (3) nam pove, da je ekvivalentna šumna moč premo sorazmerna s toplotno prevodnostjo – senzor mora biti čim bolj toplotno izoliran od okolice – ter obratno sorazmerna s temperaturnim koeficientom materiala – čim večji je TC, tem boljši je NEP. Da zagotovimo čim manjši toplotni tok iz senzorja v okolico, je element izdelan tako, da lebdi v zraku oziroma v vakuumu. To mu zagotavlja dobro toplotno izoliranost.

2.3 Simulacije temperaturnih razmer na senzorju

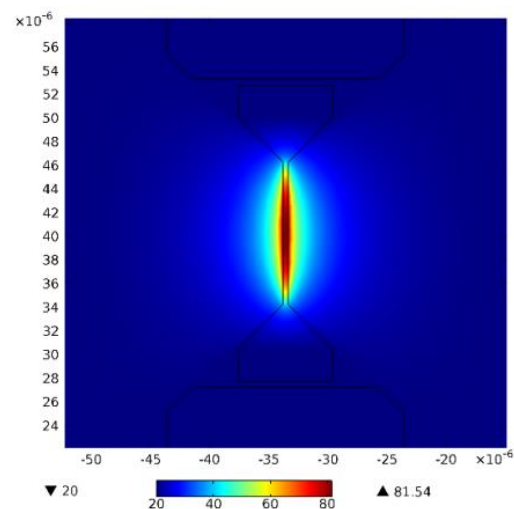
Za boljše razumevanje vpliva segrevanja THz-elementa na občutljivost je bil razvit in simuliran element v programskem okolju COMSOL® Multiphysics FEM (metoda končnih elementov) [10].



Slika 3: Toplotni tokovi v okolici mikrobolometra

Ker THz-energija, prejeta po anteni, povzroči segrevanje senzorskega elementa in posledično spremenjeni padec napetosti direktno izkazuje prejeti THz-signal, je najpomembnejše dobro poznavanje vseh toplotnih tokov. Na sliki 3 so predstavljeni vsi toplotni tokovi iz mikrobolometra v okolico, ki jih sestavljajo tri glavne komponente – prevodna, sevalna in konvekcijska.

Vse tri komponente sicer pomembno vplivajo na toplotne izgube, vendar zaradi posebne izdelave opisanega mikrobolometra prevladuje prevodna komponenta prek priključkov in naprej v osnovo in zrak. Pri upoštevanju tega dejstva je bila pri simulacijah segrevanja mikrobolometra upoštevana le prevodna komponenta.



Slika 4: Segrevanje THz-mikrobolometra

Na sliki 4 je prikazan mikrobolometer v realnih dimenzijah – enote na oseh x in y so metri, barvna lestvica za temperaturo pa je prikazana pod sliko. Simulacija upošteva realno oddaljenost bolometra od podlage in realne površine naležnih ploskev oziroma kontaktov na sprejemno anteno. Efektivna površina bolometra je $10 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$. Kot se vidi iz temperaturne lestvice in tudi najvišje izmerjene temperature, ki je napisana desno od lestvice, je najvišja temperatura na sredini bolometra, in sicer $81,54 \text{ }^\circ\text{C}$, do konca aktivnega dela bolometra se temperatura spusti pod $50 \text{ }^\circ\text{C}$, kar pomeni, da se je večina prejete energije pretvorila v segrevanje metala v efektivnem delu, torej v spremembo upornosti prek TC.

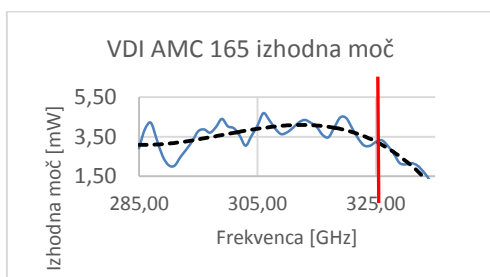
3 THZ-SENZOR

Mikrobolometer sam še ne zadostuje za učinkovito zaznavo THz valov, zato mu moramo dodati tudi sprejemni element – anteno, kot je bilo omenjeno že v prejšnjem poglavju. Antena je izdelana iz aluminija, standardne plasti metala v tehnologiji CMOS. Za različna frekvenčna območja je treba uporabiti različne vrste anten, tako po dimenzijah kot po tipu. Za zajem

THz-slike pri določeni frekvenci se uporabljajo ozkopasovne antene, v našem primeru dipolne antene [11], za širokopasovni zajem pa je bila uporabljena log-periodična antena.

3.1 Ozkopasovna dipolna antena

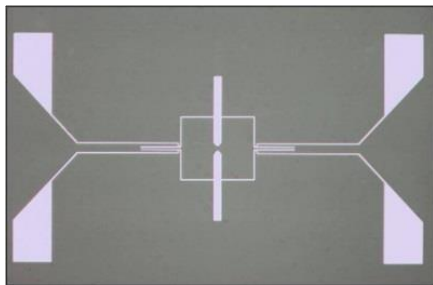
Za obliko ozkopasovne antene je bil izbran dipol. Ta je narejen iz aluminija, njegova velikost pa je odvisna od frekvenčnega območja, za katero je načrtovan. Izbrana centralna frekvenca osnovnega frekvenčnega območja za zajem THz-signala zakritih predmetov na oddaljenosti 5 m je bila 300 GHz, nato pa se je širina frekvenčnega pasu, ki ga pokriva antena, določila glede na frekvenčni pas, ki ga pokriva THz-izvor podjetja VDI (Virginia Diodes) [12], to pa je od 285 GHz pa do 335 GHz. Na sliki 5 je prikazana moč THz-izvora v izbranem frekvenčnem območju.



Slika 5: Moč VDI-izvora v območju dipolne antene

Kot se vidi iz slike 5, moč VDI-vira (modro) niha okoli povprečne vrednosti (črno) za povprečno 0,5 mW. To mora biti pozneje upoštevano pri meritvah, prav tako pa je treba frekvenčno območje ustrezno zmanjšati, kajti vir ima po meji 325 GHz velik padec v izhodni moči, kar vpliva na nivo sprejetega signala in s tem na največjo razdaljo zaznavanja in ločljivost opazovanih predmetov. Tako je pričakovana povprečna moč v območju antene 3,5 mW.

Slika 6 prikazuje dipolno anteno s senzorskim elementom, kar pomeni eno slikovno točko (piksel).



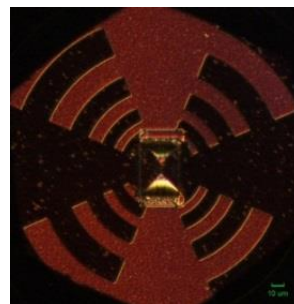
Slika 6: THz dipolna antena s THz-senzorjem

Dipolna antena je dimenzij 680 μm x 40 μm in je 160 μm oddaljena od prilagoditvene strukture ter 800 μm od priključnih blazinic – električnih priključkov. Vsaka slikovna točka ima štiri priključke, in sicer sta dva potrebna za dovod pomožnega toka, dva pa za odzvem

prejetega signala. Priklop povezovalnih vodnikov na dipolno anteno mora biti na točno določenem mestu na anteni, saj vpliva na smerni diagram antene. Poleg povezovalnih vodnikov je potrebna tudi struktura za prilagoditev impedance. Dobitek take ozkopasovne antene je 11 dB pri dobri prilagoditvi (antena ima impedanco okoli 500 Ω pri 300 GHz), sevalni izkoristek pa je 88-odstoten.

3.2 Širokopasovna log-periodična antena

Širokopasovna antena je uporabna v širšem frekvenčnem pasu in je namenjena opazovanju spektralnega odziva materiala na THz-valovanje ali pa za uporabo pri različnih frekvenčnih območjih glede na aplikacijo. Frekvenčno območje izbrane log-periodične antene je od 100 GHz pa do 1200 GHz. Cena širokopasovnosti je seveda manjši dobiček, kar pa bistveno ne zmanjša njene uporabnosti. Na sliki 7 je predstavljena širokopasovna log-periodična antena s senzorjem.

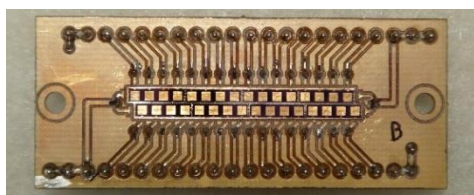


Slika 7: Širokopasovna THz-antena s THz-senzorjem

Impedanca te antene je nekoliko nižja (okoli 150 Ω), zato je tudi ujemanje z mikrobolometrom slabše. Dobitek antene narašča od 2 dB do 5 dB pri 200 GHz, nato pa ostaja skoraj konstanten do 900 GHz, ko zopet nekoliko naraste na končnih 6 dB pri 1,2 THz. Sevalni izkoristek pa pada od začetnih 98 % pri 100 GHz do 92 % pri 240 GHz, nato se padanje umiri in doseže najmanjšo vrednost 90 % pri 700 GHz. Proti višjim frekvencam zopet konstantno narašča ter doseže 93 % pri 1,2 THz.

3.3 THz senzorsko polje

Iz opisanih slikovnih točk se lahko sestavijo skorajda poljubna slikovna polja, vseeno pa obstajajo nekatere omejitve. Prva omejitev je velikost polja, ki zagotavlja dober izkupiček ter hkrati omogoča hitro in zadovoljivo ponovljivost izdelave. Druga omejitev pa je dosegljivost priključnih sponk na vsaki slikovni točki. Če je zahtevana čim večja modularnost, se uporabljajo vrstična polja, tehnološko pa se je izkazalo, da so skupine 4 x 1 najugodnejše glede izkupička ter kontrole procesa. Kljub temu so se za dovolj robustna izkazala tudi polja 8 x 1. Iz omenjenih linijskih polj je bilo sestavljeno slikovno polje 16 x 2 in bilo uporabljeno v demonstracijskem THz slikovnem sistemu, ki bo opisan v naslednjem poglavju. Polje je prikazano na sliki 8.

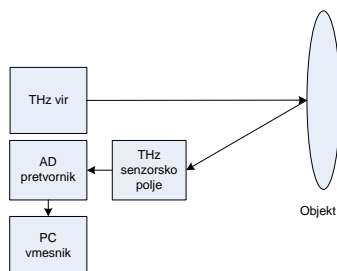


Slika 8: THz senzorsko polje 16 x 2

Senzorske točke so pri polju razmaknjene za 2mm (med središči), uporabljeno je osnovno polje 4 x 1. Druga vrstica polja je glede na prvo zamaknjena za 1 mm, s čimer dosežemo, da je razdalja med sosednjimi senzorji v zgornji in spodnji vrstici 1 mm (valovna dolžina pri 300 GHz je 1 mm). To senzorsko polje lahko deluje tudi kot polje 32 x 1 z upoštevanjem premika vrstice pri obdelavi in prikazu sprejetega signala.

4 THZ-SISTEM

THz-sistem, ki je bil zasnovan v laboratoriju za mikroelektroniko v okviru Centra odličnosti NAMASTE, zajame THz-sliko z ločljivostjo 32 x 32 slikovnih točk. Blokovni diagram sistema je prikazan na sliki 9.



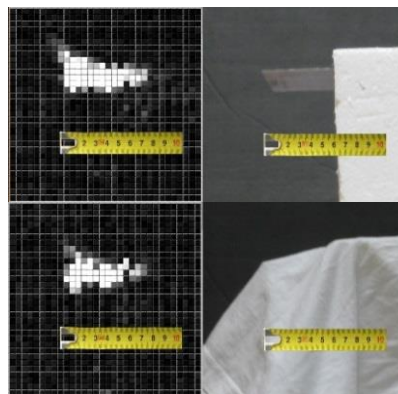
Slika 9: Blokovna shema THz-sistema

Sistem vsebuje kompakten elektronski THz-izvor, ki seva amplitudno moduliran ($f_{AM} = 1$ kHz) THz-žarek proti opazovanemu predmetu. THz-žarek se odbije od objekta ter se vrača proti THz-sistemu, kjer ga prestreže gibajoče se zrcalo in ga usmeri na THz senzorsko polje. THz-žarek pa lahko objekt tudi presvetli ter se nato odbije od dodatnega ogledala za objektom nazaj na THz-sistem. Tako iz osnovnega vrstičnega polja (32 x 1) s pomočjo premičnega zrcala dobimo sliko z 32 x 32 slikovnimi točkami. Napetostni signal senzorskega polja se prenese kot digitalna beseda v program na osebni računalnik prek analogno-digitalnega pretvornika, ki z visoko frekvenco vzorči vsakega od 32 kanalov. Slikovni rezultat je viden kot amplituda na 1 kHz nosilcu ter se kot tak lahko prikaže v dvodimenzionalni (2D) sliki. Tako zajete slike podajo osnovno predstavo oblike predmetov, zakritih za vidno območje svetlobe. 2D sistem omogoča zajem treh slik na sekundo. Sistem za boljšo sliko ter doseganje večjih razdalj uporablja tudi THz-leče, ki so bile prav tako izdelane v Laboratoriju za mikroelektroniko. Kadar želimo natančne in širokopasovne slike, uporabljamo zvezne

leče, ko pa je pomembna čim večja razdalja, pasovna širina pa ne toliko, se uporabljajo Fresnelove leče, ki so fizično manjše in lažje ter kot take primernejše za prenosne sisteme.

4.1 Odbojna metoda

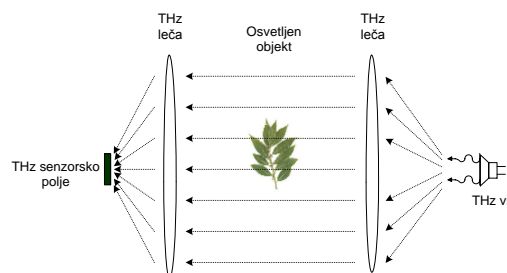
Pri odbojni metodi se na senzorskem polju opazuje odbiti THz-signal opazovanega predmeta. Tako pridobljene slike so kontrastno sicer dobre, če sta odbojnost in odbojna površina ravni in dovolj veliki. Robovi predmetov pa niso ostri, saj senzorsko polje sprejema odboje vseh površin, ki so pravokotne na polje, pravi kot pa žarke razprši. Kot primer odbojne slike je na sliki 11 prikazano zakrito rezilo tapetniškega noža na razdalji 5 m, nameščeno na stiropor, ki je za THz valovanje popolnoma prosojen. Rezilo je dolgo 7 cm in široko 1,5 cm. THz-slika rezila je bila najprej posneta brez zakritja (zgornja vrstica slike 10), nato pa je bilo rezilo zakrito s štirimi sloji tkanine (spodnja vrstica slike 10). Opaziti je, da robovi razpršijo THz-valove, zato je na zgornjem levem robu rezila slika nejasna. Kljub zakritju s tekstilom pa se oblika rezila prepozna tudi na spodnji sliki. Nivo in dinamično območje prejetega signala se z debelino tekstila in vsebnostjo vlage v zraku ali tkanini zmanjšujeta.



Slika 10: THz-slika rezila tapetniškega rezila na razdalji 5m

4.2 Presvetlitvena metoda

Pri tej metodi gre za ugotavljanje spremembe prosojnosti materiala za THz-valovanje. Za zajem slike s to metodo sta bila uporabljena isti THz-vir in isti detektor, ki sta stala na nasprotnih straneh, kot kaže slika 11.



Slika 11: Slika postavitve THz-vira, objekta, THz-leč in senzorskega polja pri uporabi preselitvene metode

Predmet pri tej metodi lahko leži med virom in senzorskim poljem, lahko pa se uporabita zrcalo ter enaka postavitev, kot pri odbojni metodi. THz-žarek gre v tem primeru najprej mimo opazovanega predmeta, se odbije od zrcala, postavljenega za predmetom, in nato na poti proti senzorskemu polju presvetli opazovani objekt. Kot dokaz delovanja je bilo zajetih veliko presvetlitvenih THz-slik, ena teh je prikazana na sliki 12. Presvetlili smo registracijsko kartico (RFID), ki je bila na razdalji 20 cm od THz-sistema.



Slika 12: Slikovni rezultat presvetlitve RFID-kartice s THz-valovanjem

Kartica dimenzij 54 mm x 84 mm je narejena iz plastike, v katero sta zalita navitje in integrirano vezje. Na sliki 12 je prikazan le del kartice, da se razloči del z integriranim vezjem. Prav tako se lahko opazijo debelejši robovi, kjer je kartica spojena, ter delno tudi povezave med integriranim vezjem in navitjem.

5 SKLEP

V prispevku je predstavljen THz-mikrobolometer, razvit v Laboratoriju za mikroelektroniko na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Skupaj s senzorjem je bil razvit tudi demonstracijski THz-sistem za zajetje THz-slik ter ustrezna programska koda. THz-senzor spada po svojih parametrih med najboljše senzorje v svojem frekvenčnem območju in pri sobni temperaturi. V članku so bile predstavljene le osnovne lastnosti THz-senzorja, principi delovanja THz demonstracijskega sistema ter nekaj slikovnih rezultatov. THz-senzorji, združeni v različna polja, dokazujejo uporabnost na veliko področjih, predvsem pri zagotavljanju varnosti, zajemu slik v medicini, farmaciji ter prehrabni, avtomobilski in papirni industriji itd.

LITERATURA

- [1] M. R. Neuman, G. D. Baura, S. Meldrum, O. Soykan, M. E. Valentinuzzi, R. S. Leder, S. Micera, and Y. T. Zhang, "Advances in Medical Devices and Medical Electronics," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1537–1550, May 2012.
- [2] D. Mery, "X-Ray Testing by Computer Vision," in *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2013, pp. 360–367.
- [3] P. H. Siegel, "Terahertz technology," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 910–928, Mar. 2002.
- [4] R. J. Temkin, "THz Gyrotrons and Their Applications," *Proceedings IRMMW2014*, pp. 1–2, Sep. 2014.

- [5] A. Singh, V. V. Nikesh, H. Surdi, S. S. Prabhu, and G. H. Dohler, "Improved efficiency of photoconductive THz source by selective enhancement of electric fields by patterning," in *2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2013, pp. 1–2.
- [6] L. Bergé, S. Skupin, C. Köhler, I. Babushkin, and J. Herrmann, "THz generation by filamentation of two-color femtosecond laser pulses," in *Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO EUROPE/QEC), 2013 Conference on and International Quantum Electronics Conference*, 2013, pp. 1–1.
- [7] F. Maiwald, J. C. Pearson, J. S. Ward, E. Schlecht, G. Chattopadhyay, J. Gill, R. Ferber, R. Tsang, R. Lin, A. Peralta, B. Finamore, W. Chun, J. J. Baker, R. J. Dengler, H. Javadi, P. Siegel, and I. Mehdi, "Solid-state terahertz sources for space applications," in *Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, 2004 and 12th International Conference on Terahertz Electronics, 2004*, 2004, pp. 767–768.
- [8] J. Trontelj, G. Valušis, R. Venckevičius, I. Kašalynas, A. Sešek, and A. Švigelj, "A high performance room temperature THz sensor," in *Proc. SPIE 9199, Terahertz Emitters, Receivers and Applications V, 91990K*, San Diego, USA, 2014, pp. 1–10.
- [9] J. Trontelj, M. Maček, and A. Sešek, "A Detection System and a Method of Making a Detection System," GB2513170, 22-Oct-2013.
- [10] M. Podhraški, A. Švigelj, M. Maček, and J. Trontelj, "Thermal analysis of THz microbolometer," presented at the 48th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials & the Workshop on Ceramic Microsystems, Otočec, Slovenia, 2012, pp. 421–426.
- [11] L. Pavlovič, J. Trontelj, and D. Kostevc, "300 GHz microbolometer double-dipole antenna for focal-plane-array imaging," vol. 42, no. 1, pp. 56–59, Mar. 2012.
- [12] "Custom Sources and Receivers," *VDI*. [Online]. Available: <http://vadiodes.com/index.php/en/products/custom-sources-and-receivers>.

Sešek Aleksander je diplomiral leta 2003, doktoriral pa leta 2008 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot asistent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo magnetne in druge analogne senzorje, integrirana vezja, THz senzorje in THz sisteme in polprevodniške tehnologije.

Janez Trontelj je diplomiral leta 1965, doktoriral pa leta 1971 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot vodja Laboratorija za mikroelektroniko na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo načrtovanje VLSI integriranih vezij z magnetnimi in drugimi analognimi senzorji, načrtovanje THz senzorjev in THz sistemov. Bil je vabljeni predavatelj na kar nekaj raziskovalnih inštitutih in univerzah po Evropi in svetu.