

MIKRO BOLOMETER (II: MERITVE KARAKTERISTIK IN PRIMERJAVA Z RAČUNI)

Marijan Maček

Fakulteta za Elektrotehniko, Laboratorij za mikroelektroniko, Ljubljana

Ključne besede: bolometri polisilicijevi, bolometri mikro, mikroelektronika, NETD razlika temperaturna ekvivalenta šumnega, NEP moč šuma ekvivalentna, osnove teoretične, meje temeljne, detektivnost, odzivnost, Johnson šum, šum fononski, IR sevanja infrardeča, IR detektorji sevanja infrardečega, IR senzori sevanja infrardečega, ločljivost temperaturna

Povzetek: Izdelani so bili polisilicijevi mikro bolometri velikosti $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, katerih osnovne značilnosti so: toplotna konduktanca v vakuumu okrog $3 \mu\text{W/K}$, odzivnost pri upornosti $22.5 \text{ k}\Omega$ je okrog 1.000 V/W in 3.000 V/W pri upornosti $195 \text{ k}\Omega$, medtem ko je njihova detektivnost omejena s tokovnim $1/f$ šumom in dosega vrednost $5 \times 10^6 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, medtem ko je najmanjša zaznavna temperaturna razlika NETD ocenjena na $1^\circ\text{C}/\text{Hz}^{1/2}$.

Micro Bolometer (Part II: Measurements of Characteristics and Comparison with Calculations)

Keywords: polysilicon bolometers, micro bolometers, microelectronics, NETD, Noise Equivalent Temperature Difference, NEP, Noise Equivalent Power, theoretical backgrounds, fundamental limits, detectivity, responsivity, Johnson noise, phonon noise, IR radiation, InfraRed radiation, IR detectors, InfraRed detectors, IR sensors, InfraRed sensors, temperature resolution

Abstract: Polysilicon micro bolometers with dimension $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ have been successfully realized. Their basic properties are: heat conductance in vacuum about $3 \mu\text{W/K}$, responsivity at resistance $22.5 \text{ k}\Omega$ about 1.000 V/W and 3.000 V/W at resistance of $195 \text{ k}\Omega$, while the detectivity limited by current $1/f$ noise reaches value of about $5 \times 10^6 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$. Noise equivalent temperature difference NETD is estimated to $1^\circ\text{C}/\text{Hz}^{1/2}$.

1. UVOD

Postopki mikromehanske obdelave so prinesli nesluten razvoj pri izdelavi toplotnih detektorjev, predvsem bolometrov, tako da se njihove lastnosti že lahko primerjajo z dosedaj običajnimi fotonimi detektorji /1/. Ker so ti postopki razviti na osnovi mikroelektronskih tehnologij, jih je sorazmerno preprosto vklopiti v proces izdelave mikroelektronskega vezja. Po drugi strani pa je včasih primernejše, če lahko mikromehanske dele izdelamo naknadno, po izgotovitvi električnega vezja /2/. Seveda je izbira postopkov pri naknadnem procesiranju omejena z največjo temperaturo, ki jo prenese spoj kovina-Si na kontaktih. Ta znaša za standardno metalizacijo Al-x%Si-y%Cu med 420 in 490°C , odvisno od globine difuzije na kontaktih. Lahko pa se poveča do okrog 600°C , če se uporabi primerna zaporna plast (običajno TiN) ali metalizacija na osnovi W.

Za izdelavo bolometrov se uporabljajo razni materiali, ki si izbrani predvsem z željo po čim večjem odzivu na spremembo temperature detektorja. Uporabljajo se predvsem razni kovinskooksidni polprevodniki katerih tipični predstavnik je VO_x . Temperaturni koeficient upora ($\beta = 1/R(dR/dT)$) za ta polprevodnik znaša okrog -2% pri plastni upornosti okrog $20 \text{ k}\Omega/\square$ /1/. Poroča se tudi o uporabi polikristaliničnega Si-Ge, ki ima lastnosti primerljive polisiliciju /3/, njegov temperaturni koeficient pa znaša prav tako približno -2% pri specifični upornosti $10 \Omega\text{cm}$.

Podoben temperaturni koeficient (-1.6% pri upornosti $p = 10 \Omega\text{cm}$) imajo tudi polisilicijeve nizko dopirane plasti, kar kažejo naši rezultati /4/. Po drugi strani je polisilicij

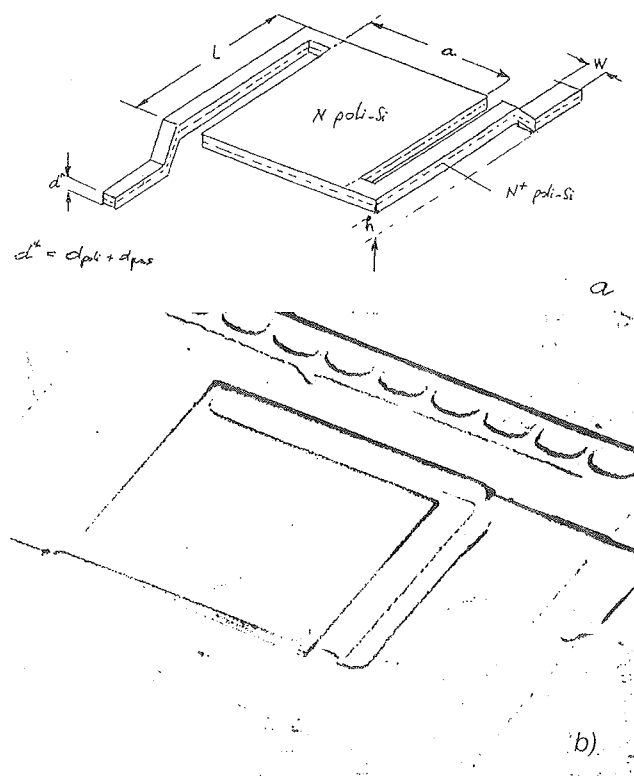
tehnološko zelo primeren, saj je standardno uporabljan material v mikroelektroniki, tako da se pri izdelavi lahko uporabljajo dobro poznani postopki. Zaradi navedenih dejstev smo se odločili, da bomo realizirali bolometer na osnovi polisilicija.

2. POSTOPEK IZDELAVE

2.1 Geometrija

Tipične velikosti bolometrov se sučejo v razponu od 25 - $100 \mu\text{m}$ /1/. V prvem delu /5/ je bilo pokazano, da sta najpomembnejši lastnosti bolometra detektivnost D in minimalna zaznavna temperaturna razlika NETD obratno-sorazmerne s korenom iz površine bolometra. Zato smo se odločili, da ostanemo pri tipični velikosti $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, ki zagotavlja primerno detektivnost, primerno gostoto senzorskih elementov, ni pa še pričakovati tehnoloških problemov, kot je zlepljenje proustoječe strukture zaradi površinske napetosti izpirala med postopki jedkanja nosilne plasti žrtvovanega oksida. Ker smo se želeli izogniti vsem nepredvidenim težavam med postopki izdelave, smo se odločili za izdelavo niza 8, med seboj neodvisnih bolometrov, pri čemer smo namerno povečali razmik med njimi na $50 \mu\text{m}$. Shematično je bolometer prikazan na sliki 1a. Njegov izgled v vrstičnem elektronskem mikroskopu pa je prikazan na sliki 1b.

Osnovni geometrijski podatki za študirani bolometer in podatki za toplotne prevodnosti in kapacitete uporabljenih materialov povzetih iz /6/, so zajeti v tabeli 1. Za učinkovito absorpcijo so bili upoštevani preliminarni



Slika 1. Polisilicijev bolometer.
a) Shematični prikaz polisilicijevega bolometra s pomembnimi dimenzijami.
b) Vrstično mikroskopska slika delno spodjedkanega polisilicijevega bolometra.

rezultati meritev absorpcije IR svetlobe na Kemijskem inštitutu /7/. Po njih se v 1 μm debeli plasti silicijevega oksinitrida absorbira okrog 50% IR svetlobe (razpon valovnih dolžin 8-13 μm), okrog 40% svetlobe se odbije, razlika pa vpade na substrat, kjer se deloma spet odbije,

deloma pa absorbira. Te ugotovitve podpirajo tudi računi, narejeni v FOTONI /8/.

2.2 Opis izdelave

Polisilicijeve bolometre smo izdelali v skladu z procesnimi koraki, kakršni se uporabljajo za izdelavo našega standardnega procesa CMOS z dvema nivojema polisilicija, s tem da smo drugi nivo uporabili za izvedbo detektorja. Zaradi poenostavitve (trenutno so nas zanimale le možnosti izvedbe polisilicijevega bolometra v okviru obstoječega proces) smo se omejili le na postopke po IV (poli I) maski procesa CMOS. Seveda pa je bilo potrebno vrniti dodatne procesne module. To so:

- Depozicija žrtvovanega oksida debeline 2-2.5 μm in ustrezno masko. Na ta način dvignemo bolometer nad nivo rezine (slika 1), saj se žrtvovani oksid na koncu procesiranja odstrani v "počasem" jedkalu.
- Depozicija absorpcijske plasti za IR svetlobo. Uporabili smo plazemski oksinitrid, ki ima zadovoljivo absorpcijo, kar kaže slika 4 /7/.
- Po končanem procesiranju je potrebno s posebno masko odpreti področje bolometra. Ker je čas jedkanja žrtvovanega oksida v "počasem" jedkalu okrog 60 min, je potrebno pasivacijo iz plazemskega nitrida z lomnim količnikom $N_2 = 2.00-2.05$ in bondirne blazinice iz Al dodatno zaščititi s tanko plastjo plazemskega nitrida z $N_2 = 2.2$, ki je mnogo odpornejši na "počasno" jedkalo.

Kritična faza izdelave bolometra je jedkanje žrtvovanega oksida v "počasem" jedkalu, oziroma naknadno izpiranje v vodi. Poteka v dveh fazah:

- najprej smo delno pojedkali oksid, tako da je ostala vsa struktura podprta s stebričkom oksida dimenzije $\approx 10 \times 10 \mu\text{m}^2$. Po zaščiti sprednje strani s fotorezistom (FR) smo rezino zažagali, tako da je ostalo še okrog 100 μm Si.
- Po odstranitvi FR smo odlomili posamezne čipe in jih dokončno pojedkali. Zlepljenje strukture s podlago smo uspešno rešili z uporabo končnega izpiranja v metilnem alkoholu.

Tabela 1. Osnovni geometrijski in snovni podatki uporabljeni pri načrtovanju polisilicijevega bolometra. Materialne konstante so vzete iz /6/, medtem ko temelji absorpcija na rezultatih preliminarnih meritev /7/.

ime količine	oznaka	velikost	enota
spec. upornost N^+ poli Si povezav	ρ_{Si}	1.00E-05	Ωm
spec. topl. prevodnost polisilicija	λ_{Si}	22	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
spec. topl. prevodnost dušika pri 1 baru	$\lambda_{N_2(o)}$	2.62E-02	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
širina poli Si povezave	W	5E-6	m
rob detektorja	a	50E-6	m
debelina polisilicija	d_{poli}	1.0E-6	m
debelina žrtvovanega oksida	d_{ox}	2.0E-6	m
debelina SiO_xN_y pasivacije	d_{pas}	1E-6	m
efektivna absorpcija pasivacijske plasti	η_{eff}	50%	
specifična toplota poli Si	c_{psi}	1.6E+6	$\text{WsK}^{-1}\text{m}^{-3}$
specifična toplota pasivacije	c_{pp}	1.5E+6	$\text{WsK}^{-1}\text{m}^{-3}$

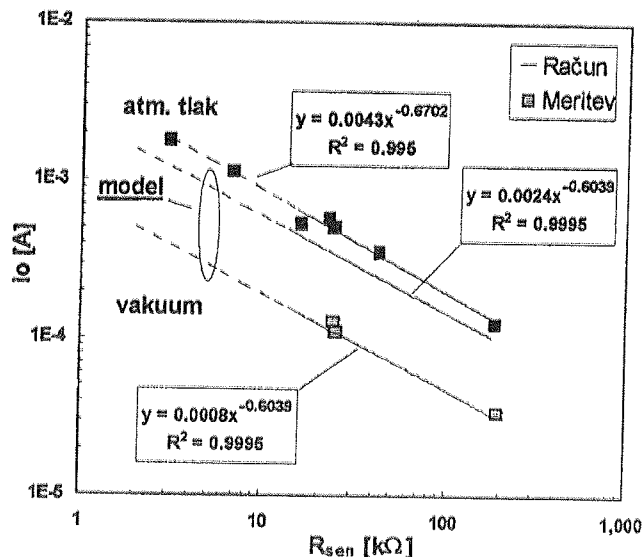
3. IZRAČUNANE KARAKTERISTIKE BOLOMETROV

Račun karakteristik bolometra s parametri, določenimi v tabeli 1, je temeljil na teoretičnih predpostavkah, podanih v prvem delu /5/ in so zajeti v tabeli 2.

Izračunana toplotna konduktanca izračunana za navedeno strukturo znaša okrog 3.7 $\mu\text{W/K}$ v vakuumu in 35 $\mu\text{W/K}$ na zraku. V vakuumu je prevladujoče prevajanje po nosilni strukturi, medtem ko je na zraku odločilno prevajanje skozi 2 μm režo proti substratu. Prevajanje toplote v vakuumu je namreč mnogo slabše kot pri zračnem tlaku (glej naprimer referenco /9/).

Na sliki 2 je prikazana odvisnost izračunanega karakterističnega toka $I_0 = \sqrt{G/\beta_0} R_0$ (enačba (5) v ref. /5/) od plastne upornosti, oziroma upornosti bolometra. Prikazani sta karakteristika za vakuum, nižji od 10^{-3} mbar, in za zračni tlak. Vidimo, da je karakteristični tok I_0 za bolometer v vakuumu približno trikrat manjši kot za isti bolometer na atmosferskem tlaku, kar potrjujejo tudi rezultati meritev (krogci).

Izračunana frekvenca ($2\pi\nu_0 = 1/\tau_0$), s katero lahko bolometri učinkovito zaznavajo spremembe svetlobnega fluksa, znaša v vakuumu okrog 68 Hz in na zraku 652 Hz.

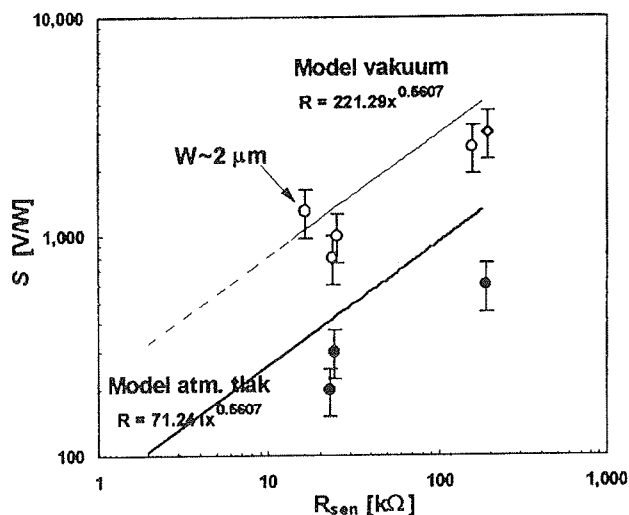


Slika 2. Izračunana odvisnost karakterističnega toka I_0 v odvisnosti od upornosti polisilicijevega bolometra R_{sen} na atmosferskem tlaku in v vakuumu. Kvadratici predstavljajo meritve v vakuumu in na zračnem tlaku.

Tabela 2 Primerjava izračunanih in izmerjenih parametrov za tri primerjane polisilicijeve bolometre. Bolometer z upornostjo 16.5 k Ω ima povezave z nominalno širino 2 μm .

	Ime količine	oznaka	velikost količine					enota
M e r i t e	upornost senzorja	R_{senzor}	185	185	16.5	22.5	22.5	k Ω
	nom. širina povezav	W_{nom}	5	5	2	5	5	μm
	pritisk	p	0.001	1000	0.001	0.001	1000	mbar
	toplotna konduktanca	G	3.67E-6	3.54E-5	1.76E-6	3.67E-6	3.54E-5	WK ⁻¹
	temp. koeficient spr. upornosti pri 25°C	TC_s	-1.8%	-1.8%	-1.2%	-1.3%	-1.3%	K ⁻¹
	karakteristični tok za senzor	I_0	34.1E-6	104E-6	95E-6	114E-6	354E-6	A
	karakteristična el. moč	P_0	208E-6	2.01E-3	149E-6	292E-6	3E-3	W
	term. časovna konstanta	τ	2.36E-3	244E-6	4.91E-3	2.36E-3	244E-6	s
	kritična frekvenca skeniranja	ν	68	652	32	68	652	Hz
	šum zaradi temp. fluktuacij V_t pri $I=I_0$	$V_t @ I_0, \nu_0$	967E-9	3.00E-6	156E-9	311E-9	936E-9	V
	odzivnost pri $I = I_0, \nu = \nu_0$	$S @ I_0, \nu_0$	3,690	1,188	796	1,175	362	VW ⁻¹
	detektičnost upošteva V_t	$D_t @ I_0, \nu_0$	1.9E+7	2.0E+6	2.5E+7	1.9E+7	1.9E+6	cmHz ^{1/2} W ⁻¹
	temp. razlika ekv šumu	$NETD_t @ I_0, \nu_0$	0.33	3.2	0.2	0.33	3.2	K
M e r i t e v	upornost senzorja-povp. meritev	R_{senzor}	194	188	16.5	24	23	k Ω
	upornost senzorja-std. dev meritev	R_{senzor}	14	7	0.6	0.7	0.9	k Ω
	toplotna konduktanca-povp. meritev	G	3.80E-6	5.08E-5	2.95E-6	4.05E-6	8.83E-5	WK ⁻¹
	toplotna konduktanca-std. dev. meritev	G	781E-9	14E-6	4E-6	977E-9	12E-6	WK ⁻¹
	karakteristični tok za senzor-povp. meritev	I_0	33.4E-6	124E-6	123E-6	115E-6	548E-6	A
	karakteristični tok za senzor-std. dev. meritev	I_0	4.58E-6	15.7E-6	15E-6	15E-6	69E-6	A
	kritična električna moč-povp. meritev	P_0	216E-6	2.88E-3	250E-6	323E-6	7.04E-3	W
	šum pri $I=I_0, \nu = \nu_0$	$V_t @ I_0, \nu_0$	5.85E-6	4.3E-6	888E-9	728E-9	647E-9	VHz ^{1/2}
	odzivnost pri $I = I_0, \nu = \nu_0$	$S @ I_0, \nu_0$	1,928	/	919	707	/	V/W
	Izmerjena detektičnost	$D_t @ I_0, \nu_0$	1.6E+6	2.9E+5	5.2E+6	4.9E+6	3.7E+5	cmHz ^{1/2} W ⁻¹
kritična frekvenca skeniranja	ν_0	95	941	37	53	890	Hz	
temp. razlika ekv. šumu	$NETD V_t @ I_0, \nu_0$	4.1	/	1.2	1.3	16.9	K	

Odzivnost S (enačba (9) v ref. /5/) je sorazmerna padcu napetosti na upor ($\propto IR$), temperaturnemu koeficientu β in obratno-sorazmerna konduktanci G . Za bolometre z enako geometrijo, kar pomeni enako konduktanco G , je odzivnost v prvem približku sorazmerna z $R^{1/2}$, saj je temperaturni koeficient β sorazmerno šibko ($\beta \propto \ln(\rho)$, /4/) odvisen od specifične upornosti polisilicija. Odvisnost S od upornosti pri obremenitvi bolometra s karakterističnim tokom I_0 v vakuumu ali na zraku in pri frekvenci ν_0 nam prikazuje slika 3. Vidimo, da je odzivnost S odvisna od upornosti z eksponentom 0.56. Odstopanje od eksponenta 0.5 je posledica odvisnosti β od specifične upornosti polisilicija.



Slika 3. Izračunana odvisnost odzivnosti S pri obremenitvi s karakterističnim tokom I_0 in frekvenci ν_0 od upornosti polisilicijevega bolometra na atmosferskem tlaku in v vakuumu. Krogci predstavljajo meritve pri različnem tlaku in v vakuumu.

Mejna detektivnost bolometra D_j (določena s Johnsonovim šumom) (enačba (13) v ref. /5/) je sorazmerna s tokom skozi bolometer, temperaturnim koeficientom in obratno sorazmerna s konduktanco. V primeru, ko obremenimo bolometer s karakterističnim tokom I_0 , bo detektivnost za različne upornosti polisilicija sorazmerna s temperaturnim koeficientom β . Kakor s specifično upornostjo narašča β , narašča tudi mejna detektivnost. Za bolometer, zaprt v vakuumu, znaša teoretična mejna detektivnost od 3.5×10^8 ($R_{sen} = 22.5 \text{ k}\Omega$) do 4×10^8 $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ($R_{sen} = 185 \text{ k}\Omega$) pri frekvenci $\omega = 1/\tau$, (Tabela 2).

Rezultati računov kažejo, da je detektivnost D_t v realnem primeru, ko je šum določen s fononskim šumom, oziroma z napetostnim šumom zaradi fluktuacij temperature ($V_t = (\Delta T^2)^{1/2} \beta R$) neodvisna od upornosti bolometra in znaša okrog 1.9×10^7 $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, kar je približno 20 krat slabše od vrednosti za D_j . V primeru, če bi bil bolometer na zraku, pa je detektivnost še za približno 10 krat manjša. Termični šum namreč narašča sorazmerno s tokom ($I_0 \propto G^{-1/2}$) in upornostjo (enačba (11) v ref /5/) in obratno sorazmerno s toplotno kapaciteto $C^{-1/2}$. Zmanjšanje konduktance v vakuumu za

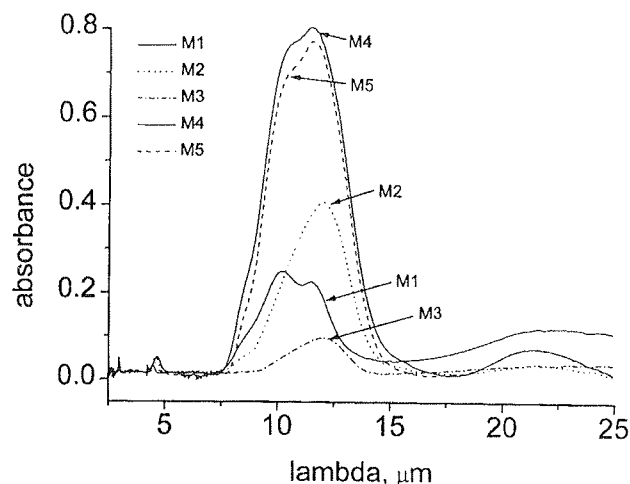
približno 10 krat zniža potemtakem šum zaradi termičnih fluktuacij za $10^{-1/2}$, obenem pa poveča odzivnost S za približno isti faktor. Rezultat je približno 10 kratna razlika v detektivnosti, kar jasno sledi iz uvodoma navedenih vrednosti za toplotno konduktanco.

Iz navedenih rezultatov nedvoumno izhaja, da je potrebno za doseganje optimalnih lastnosti bolometre zapreti v vakuumsko tesna ohišja in zmanjšati toplotno konduktanco povezav in toplotno kapaciteto celotne strukture na vrednost, ki bo še zagotavljala dovoljšno frekvenco.

4. IZMERJENE KARAKTERISTIKE BOLOMETRA

4.1 Meritve absorpcije IR svetlobe

Meritve absorpcije IR svetlobe v pasu od 8-13 μm so bile opravljene na Kemijskem inštitutu /7/. Primer meritve absorpcijskih lastnosti uporabljene pasivacije (oznaka M4) sestojee iz 500 nm plazemskega SiO_xN_y z lomnim količnikom $N_2 = 1.64$, 500 nm Si_xN_y z $N_2 = 2.06$ in 100 nm Si_xN_y z $N_2 = 2.2$ je prikazan na sliki 4. Rezultati so podani v poljubnih enotah in so primerani le za primerjavo med različnimi plastmi. Iz izmerjene krivulje vidimo, da uporabljeni absorber maksimalno absorbira pri $\lambda = 11.5 \text{ nm}$, dočim mu absorbanca upada proti nižjim valovnim dolžinam. Računi narejeni v FOTONI /8/ kažejo, da je spektralna odvisnost absorpcije zelo odvisna od debeline plasti SiN .



Slika 4. Absorbanca v IR območju za različne plasti pasivacije na osnovi plazemskega Si nitrida. $N_2(M1, 500 \text{ nm}) = 1.64$, $N_2(M2, 500 \text{ nm}) = 2.06$, $N_2(M3, 100 \text{ nm}) = 2.20$. Plast M4 se sestoji iz 500 nm plast M1, 500 nm M2 in 100 nm M3.

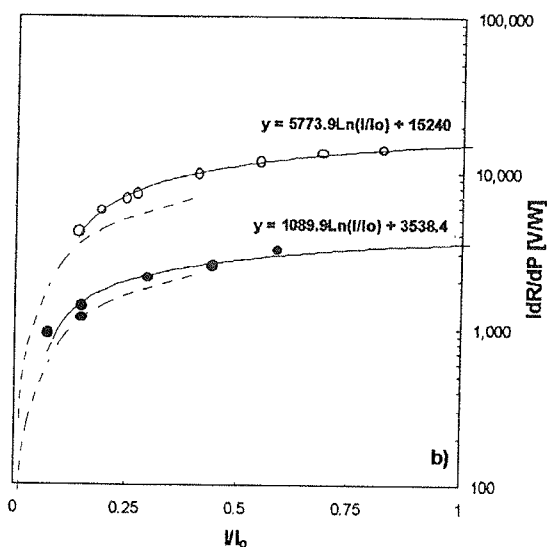
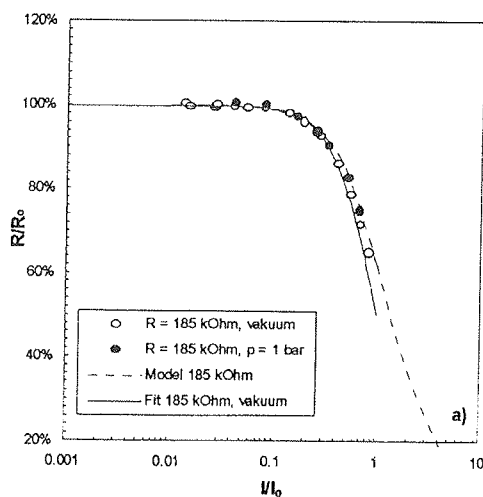
4.2 Meritve električnih parametrov

Upornost in temperatura bolometra pod konstantno tokovno obremenitvijo se spreminjata, kakor to napovedujeta enačbi (3, 4) v ref. /5/. Če bi bil temperaturni koeficient β konstanten in negativen, bi bila upornost pri obremenitvi s kritičnim tokom $I = I_0$ samo še 50%. V resnici je upornost pri obremenitvi s karakterističnim

tokom zaradi temperaturne odvisnosti koeficienta $\beta = \beta(T)$ od 50-60% začetne vrednosti, odvisno od upornosti polisilicija.

Iz meritve karakteristike $R = R(I)$ lahko določimo karakteristični tok I_0 in konduktanco $G = \beta I_0^2 R_0$ iz enačb (4, 5) v ref. /5/. Odvisnost upornosti od toka v vakuumu in na atmosferskem tlaku je prikazana na sliki 5a. Izmerjene odvisnosti upornosti se dobro ujema z izračunano, ki jo predstavlja prekinjena črta (upoštevata temperaturno odvisnost za koeficient upornosti). Polna črta pa predstavlja krivuljo najboljšega ujemanja za meritev v vakuumu ob predpostavki, da je β konstanten. Iz nje se določi kritični tok I_0 , in konduktanca G , katerih povprečne vrednosti so prikazane tudi v tabeli 2. Vidimo, da je doseženo dokaj dobro ujemanje med izračunanimi in izmerjenimima karakteristikama I_0 in G .

Na osnovi meritve odvisnosti upornosti od toka lahko sklepamo tudi na to, kakšna bo odvisnost odzivnosti S na tok skozi bolometer. Odzivnost (električna) bo

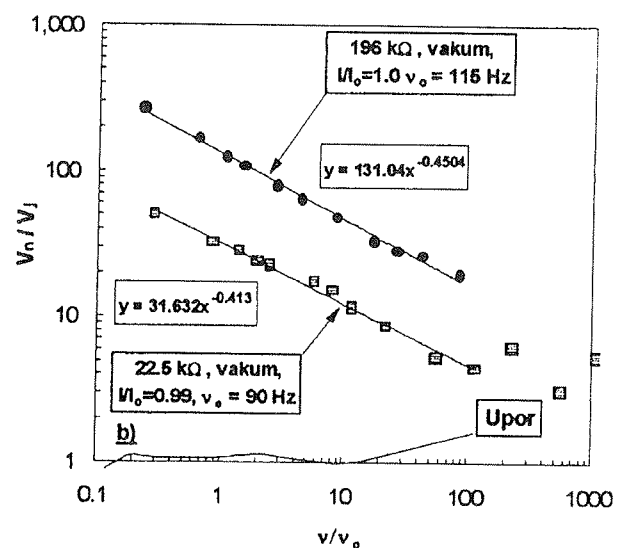
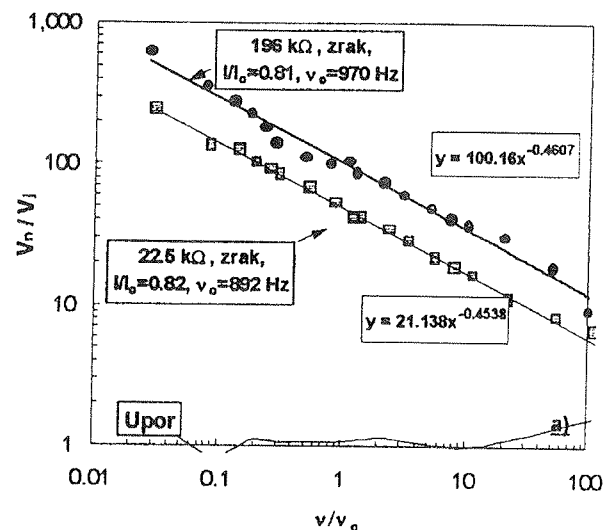


Slika 5. Primerjava izmerjene in izračunane odvisnosti upora od toka skozi bolometer.
a) Odvisnost upornosti $R/R(I=0)$ in
b) odvisnost spremembe padca napetosti $(dV_s/dP) = IdR/dP_{el} \propto S$ od toka skozi bolometer. Merjeno v dušiku pri tlaku 1.000 mbar in v vakuumu nižjim od 10^{-3} mbar.

sorazmerna padcu napetosti $dV_s/dP = IdR/d(I^2R)_{I=konst}$ pri konstantnem toku in je prikazana na sliki 5b. Ta količina je sorazmerna odzivnosti S bolometra na vpadlo in absorbirano IR svetlobo ($S_{IR} = \epsilon S_{eff}(\omega)$). Odzivnost na IR svetlobo pa bo približno 2-3 krat manjša zaradi nepopolne absorpcije in zaradi frekvenčne odvisnosti. Prav tako lahko sklepamo, da morajo biti bolometri obremenjeni s tokom, ki je vsaj 20% karakterističnega toka I_0 , če ne želimo prevelike odvisnosti S od toka.

4.3 Meritve šuma bolometrov

Šum smo izmerili na večih bolometrih z upornostmi $R = 16.5, 22.5$ in 195 k Ω na zračnem tlaku in v vakuumu, v odvisnosti od toka in pri različnih frekvencah. Merili smo s spektralnim analizatorjem, za referenco pa smo izmerili tudi šum na standardnem uporu z enako nominalno upornostjo na sobni temperaturi. Ker je bil šum

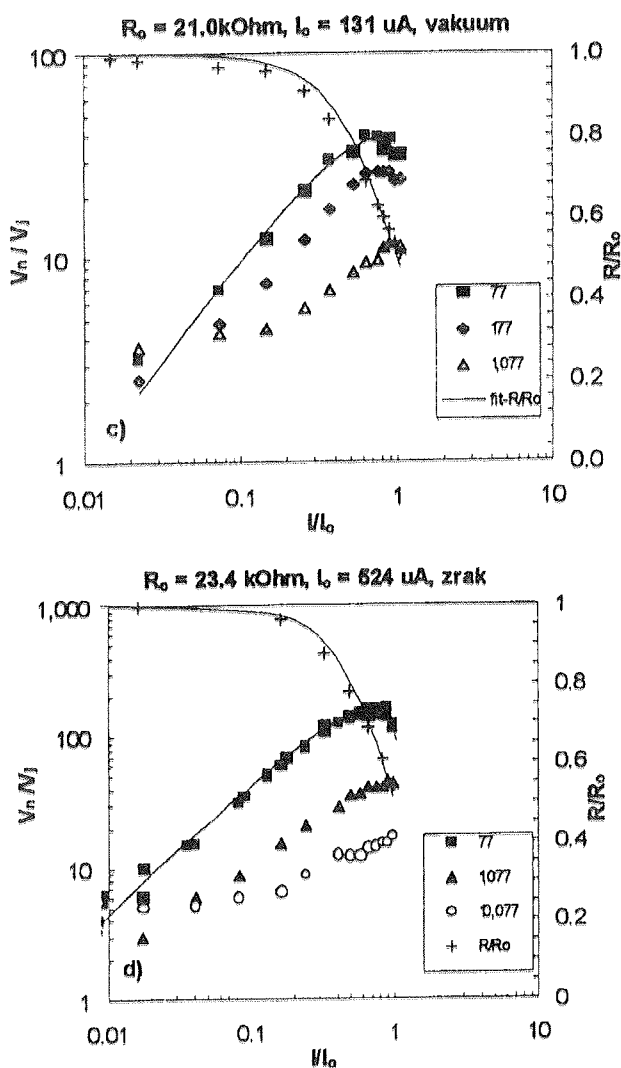


Slika 6. Odvisnost šuma od frekvence. a) na zraku, b) v vakuumu. Šum je podan kot razmerje med merjenim šumom V_n in izračunanim Johnsonovim šumom V_j , frekvenca pa kot razmerje med frekvenco meritve v in frekvenco v_0 podano po en. (9) v ref /5/ na uporu z upornostjo 22.5 k Ω .

izmerjen na uporah pod vsemi pogoji skorajda enak izračunanemu šumu, lahko smatramo te meritve kot zelo zanesljive.

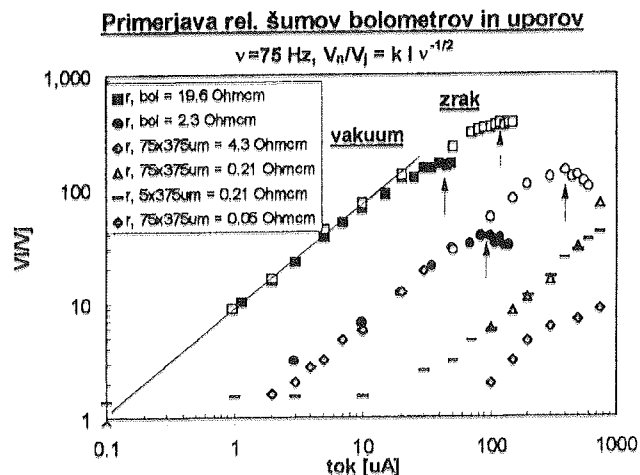
Odvisnost šuma (razmerje med šumom zaradi termičnih fluktuacij V_t in izračunanim Johnsonovim šumom V_j) od frekvence (razmerje med frekvenco ν , pri kateri merimo šum in kritično frekvenco $\nu_0 = G/C$ (enačba (7) v ref. /5/) je prikazana na slikah 6a (zračni tlak) in 6b (vakuum). Takoj opazimo, da ima šum v obeh senzorjih enako frekvenčno odvisnost ($\propto \nu^{-0.45}$), vendar bistveno različen nivo.

Odvisnost razmerja šuma (V_n/V_j) od normaliziranega toka (I/I_0) je prikazana na sliki 7 a in b za dva različna bolometra z nominalno upornostjo 22.5 k Ω . Opazimo, da je šum sorazmeren s tokom do toka približno 0.3 $\cdot I_0$, nakar pride do nekakšnega zasičenja in, da pri višjih tokovih ($I/I_0 > 1$) celo rahlo upadeta, verjetno zaradi



Slika 7. Odvisnost šuma od toka pri različnih frekvencah na zraku (a) in v vakuumu (b). Šum je podan kot razmerje med merjenim šumom V_n in izračunanim Johnsonovim šumom V_j ; tok pa kot razmerje med tokom I in izmerjenim karakterističnim tokom I_0 . Dodana je tudi izmerjena relativna sprememba upornosti R/R_0 .

dvigovanja temperature in s tem poveze ga znižanja upornosti. Podobna meritev za bolometer z upornostjo 195 k Ω je prikazana tudi na sliki 8.



Slika 8. Razmerje med tokovnim $1/f$ šumom in Johnsonovim šumom V_n/V_j za bolometre (50x50 μm) in upore (5x375 in 75x375 μm) z različnimi specifičnimi upornostmi v razponu od 0.05 - 19.6 Ωcm merjeno pri 75 Hz. Navpična puščica označuje kritični tok za bolometer, $I_c^2 = G/R\beta$.

Medtem ko je na zraku za senzor z upornostjo $R=195 \text{ k}\Omega$ ($V_j = 46 \text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$), šum pri frekvenci 100 Hz in obremenitvi s tokom I_0 okrog 285 krat večji od V_j , je za senzor z $R=22.5 \text{ k}\Omega$ ($V_j = 21 \text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$) to razmerje samo še 57. Pri meritvah v vakuumu je razmerje med šumoma nekoliko nižje in znaša 140, oziroma 30. Ker kaže šum izrazito frekvenčno odvisnost, to ne more biti fononski šum, ki je beli šum. Prav tako je velikost izmerjenega šuma mnogo večja od vrednosti za termični šum. Na osnovi enačbe (11) v ref. /5/ bi moralo biti razmerje med šumoma okrog 51 - 72 na zraku, oziroma okrog 16 - 23 v vakuumu. Medtem, ko bolometer z upornostjo 22.5 k Ω kaže 2 krat višji nivo šuma kot račun, kaže visokouporovni za 4-8 kratno odstopanje nivoja šuma od izračunanega.

Na osnovi navedenih dejstev in meritve šuma na polisilicijevih uporih dolžine 375x75 oziroma 5 μm , ki kažejo podobno frekvenčno in tokovno odvisnost (slika 8) sklepamo, da gre za tokovni $1/f$ šum, za katerega velja naslednja zveza; $V_n \propto I \nu^{-1/2} / I_0$. Iz rezultatov, prikazanih na sliki 8, sledi, da je kritični tok, pri katerem je tokovni šum enak Johnsonovemu, povezan s specifično upornostjo ρ z naslednjo zvezo: $I_c = 2.8 \times 10^{-6} \rho [\Omega\text{cm}]^{0.95}$. Rezultati kažejo, da je tokovni šum neodvisen od geometrije ($L/W = 1 - 75$) in debeline (meritve v teku). Zato ga lahko znižamo na željeno vrednost z zmanjšanjem debeline detektorske plasti pod 100 nm, in/ali s povečanjem razmerja L/W iz 1 za dosedanja strukturo na več kot 10. Računi kažejo, da doseže tokovni šum nivo fononskega šuma pri $L/W = 30$ in 50 nm debeli plasti polisilicija z $\rho = 1 \text{ }\Omega\text{cm}$ ($\beta = -1.1\%$) in ob predpostavki, da je $G = 1 \text{ mW}/\text{K}$ in frekvenca skeniranja $\nu = 35 \text{ Hz}$.

4.4 Odzivnost in detektivnost za IR svetlobo od 8-13 μm

Odzivnost in detektivnost smo merili v laboratoriju FOTONE, pri čemer smo uporabili kalibrirani izvor IR svetlobe s konstantno temperaturo 500 K, nekaj začetnih meritev pa je bilo narejenih tudi pri temperaturi 873 K. Gostota energijskega toka P_{pk} v razponu valovnih dolžin od 8-13 μm na mestu detektorja ($R = 3.0 \text{ cm}$) je pri teh pogojih $48 \text{ Wm}^{-2}/11\%$. Vse vrednosti za odzivnost (S_{pk}) in detektivnost (D_{pk}) bodo izračunane za ta del energijskega spektra in ne za celotno izsevano energijo. Med izvorom in detektorjem je bil "čoper" s premerom zaslonke 1.3 cm in maksimalno frekvenco 1.000 Hz. Meritev smo zasledovali na spektralnem analizatorju.

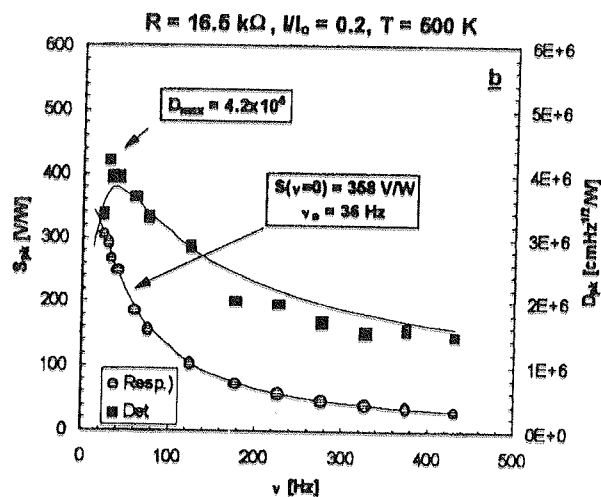
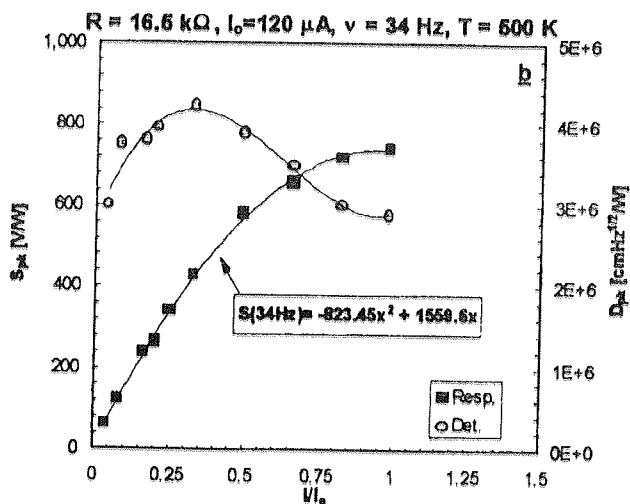
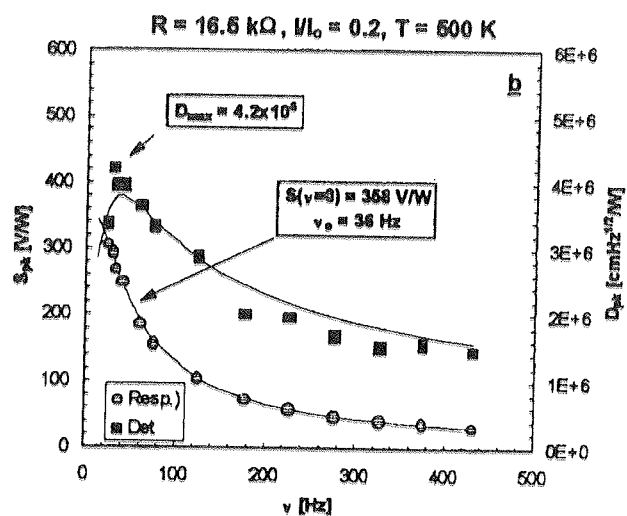
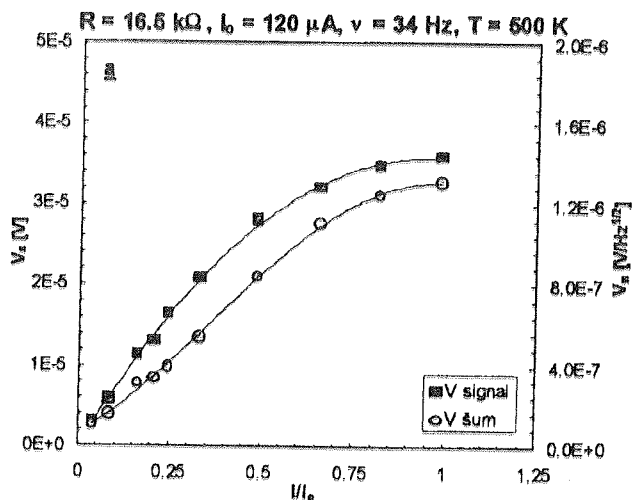
Prve meritve so bile opravljene z uporabo nizkošumnega transimpedančnega ojačevalnika z ojačenjem $A=50$, ki je bil skupaj z detektorjem in napajalnimi baterijami vgrajen v posebno zaščitno ohišje. Zaradi zahtev po merjenju z različnimi tokovnimi obremenitvami smo morali vsakokrat zamenjati baterije, prilagoditi upor na željeno vrednost ($R = f(I)$), tako, da

izmerjene vrednosti za signal in šum niso bile več absolutno zanesljive (izvedena detektivnost ni odvisna od faktorja ojačanja), poleg tega pa se je izkazalo, da so merjene napetosti dovolj velike, tako, da smo kasneje napajali detektor direktno preko napetostnega napajalnika in predupora z upornostjo vsaj 5x večjo od upora bolometra. Signal smo direktno odčitali na spektralnem analizatorju. Na ta način dobljene vrednosti so absolutno natančne.

Večina meritev je bila narejena v vakuumu (kovinsko ohišje s transparentnim okencem povezano na rotacijsko črpalo), le nekaj preliminarnih meritev je bilo opravljenih pri zračnem tlaku.

Rezultati (povprečja več meritev) za tri bolometre so prikazani v tabeli 2, v kateri so za primerjavo podani tudi rezultati simulacij.

Odvisnost izmerjenega signala V_s in šuma V_n od normaliziranega toka I/I_0 za senzor z upornostjo $16.5 \text{ k}\Omega$ ($I_0=120 \mu\text{A}$), ki je imel nosilne povezave dimenzije okrog $2 \mu\text{m}$, je prikazana na sliki 9a, medtem ko je na sliki 9b prikazana odvisnost izpeljanih karakteristik bolome-



Slika 9. a) Odvisnost izmerjenega signala V_s ($T_{izv} = 500\text{K}$) in šuma V_n od toka I/I_0 . b) Odvisnost odzivnosti S_{pk} in detektivnosti D_{pk} od normaliziranega toka I/I_0

Slika 10. a) Odvisnost izmerjenega signala V_s ($T_{izv} = 500\text{K}$) in šuma V_n od frekvence "čoperja". b) Odvisnost odzivnosti S_{pk} in detektivnosti D_{pk} od frekvence ν

tra $S_{pk} = V_s/P_{pk}$ in detektivnosti $D_{pk} = A_d^{1/2}(V_s/V_n)/P_{pk}$ od normaliziranega toka I/I_0 . Meritev je bila opravljena pri temperaturi izvora 500 K in frekvenci "čoperja" 34 Hz.

Na sliki 10 je prikazana odvisnost izmerjenih količin V_s , V_n (a) in S_{pk} in D_{pk} (b) od frekvence pri obremenitvi s tokom $I/I_0 = 0.2$. Šum izkazuje znano $1/f$ odvisnost (poglavje 4.3), medtem ko sledi signal (in seveda tudi odzivnost S) frekvenčni odvisnosti, napovedani v enačbi (9) ($V_s, S_{pk} \propto (1 + (\omega\tau)^2)^{-1/2}$) prvega dela tega prispevka /5/. Detektivnost ($\propto V_s/V_n$) doseže maksimum blizu frekvence $\nu_0 = 36$ Hz ($= 1/(2\pi\tau)$), ker pri nižjih frekvencah $1/f$ šum močno naraste. S povečevanjem frekvence pa detektivnost zlagoma pada, približno s $\nu^{-1/2}$.

Podobne rezultate smo izmerili tudi za ostala dva bolometra, le da so meritve bile opravljene pri temperaturi izvora 873 K. Njihove frekvence ν_0 so se sukale od 53 do 115 Hz za meritve v vakuumu, medtem ko so bile na zraku izmerjene od 800-1000 Hz, kar se dokaj dobro ujema z napovedmi.

5. DISKUSIJA

Bolometri, narejeni iz polisilicija s plastno upornostjo od 16-200 k Ω , absorpcijsko plastjo iz plasti Si_xON_y in z geometrijo, opisano v poglavju 2.1, imajo odzivnost določeno pri karakterističnem toku $I=I_0$ in pri frekvenci $\nu=\nu_0$ od 700 do 2000 V/W, odvisno od upornosti in toplotne konduktance strukture (tabela 2), kar se dokaj dobro ujema z napovedanimi rezultati, še posebej pri bolometru z upornostjo 16.5 k Ω ($S_{mer} = 919$ V/W, $S_{rač} = 796$ V/W). Ta meritev je bila opravljena z direktno meritvijo brez ojačevalnika. Ostala dva rezultata (22.5 in 185 k Ω) nekoliko odstopata navzdol, verjetno zaradi težav pri prilagoditvi transimpedančnega ojačevalnika tokovno odvisnemu uporju.

V tabeli tudi vidimo, da se izmerjene frekvence mikrobolometrov ($\nu_0 = (1/2\pi)G/C$) dobro ujemajo z napovedanimi, in to v velikem razponu konduktanc, kar pomeni, da so izračunane vrednosti za G in C dobro zadete. V tabeli 2 prav tako opazimo, da se izmerjene vrednosti karakterističnega toka I_0 dobro ujemajo z napovedanimi. Odzivnost je obratno sorazmerna karakterističnemu toku I_0 , kar pomeni, da bi se morali tudi rezultati IR meritev ujemati vsaj v okviru merske napake, saj med efektivnimi absorbcancami posameznih bolometrov ni pričakovati velikih razlik.

Po drugi strani pa opazimo, da je izmerjena detektivnost mnogo manjša od pričakovane, zaradi prevelikega tokovnega $1/f$ šuma. Izmerjene vrednosti D_{pk} so bile v razponu od 1.6×10^6 ($R=185$ k Ω) do 5×10^6 cmHz $^{1/2}W^{-1}$, ($R = 16.5, 22.5$ k Ω), in padajo z rastočo upornostjo, kar je v nasprotju s pričakovanji, saj temperaturni koeficient β narašča. Medtem ko odzivnost S narašča $\propto R^{1/2}$, pa tokovni šum narašča sorazmerno z upornostjo.

Podobno se obnaša tudi najmanjša temperaturna razlika, NETD, ki jo zazna bolometer. Ocenimo jo na okrog 1 K/Hz $^{1/2}$, (bolometer z $R = 16.5$ k Ω), kar je seveda mnogo več od meje, ki jo postavlja Johnsonov šum, NETD $_j = 0.02$ K/Hz $^{1/2}$.

Ultimativna meja detektivnosti za navedene tri polisilicijeve bolometre (upoštevamo samo Johnsonov šum) $D_j = A^{1/2}S/V_j$ znaša na osnovi izmerjene odzivnosti S in šuma V_j okrog $1.8-2.8 \times 10^8$ cmHz $^{1/2}W^{-1}$. Če hočemo torej dobiti bolometre, katerih detektivnost se bo približevala vrednosti 10^8 cmHz $^{1/2}W^{-1}$, je torej nujno potrebno znižati nivo tokovnega šuma, kar lahko storimo s tem, da ob enaki specifični upornosti polisilicija povečamo upor bodisi tako, da povečamo razmerje L/W iz 1 na več kot 10 ali/in uporabimo vsaj 10 krat tanjšo plast polisilicija. Računi kažejo, da doseže tokovni šum nivo šuma zaradi termičnih ($V_i = V_t = 3V_j$) fluktuacij pri razmerju $L/W = 30$ in 50 nm debeli plasti polisilicija s specifično upornostjo $\rho = 1$ Ω cm ($\beta = -1.1\%$), ter ob predpostavki, da je toplotna konduktanca $G = 1$ μ W/K ($W = 1$ μ m). Pri omenjenih parametrih bi imel bolometer dimenzije 50×50 μ m 2 in naslednje karakteristike

- $\omega_0 = 35$ Hz
- $S = 10.500$ V/W
- $V_n/V_j = 2.9$
- $D = 5.8 \times 10^7$ cmHz $^{1/2}W^{-1}$

Bolometer z omenjenimi karakteristikami bi bil enakovreden dosedaj najboljšim bolometrom delujočim na sobni temperaturi narejenim na osnovi VO_x , katerih detektivnost se približuje 1×10^8 cmHz $^{1/2}W^{-1}$ /1/.

6. ZAKLJUČEK

Izdelani so bili polisilicijevi mikrobolometri v tehniki površinske mikroobdelave v razponu upornosti od 20-200 k Ω in toplotno konduktanco okrog 3 μ W/K. Rezultati, prikazani v tabeli 2 kažejo, da se njihove termične karakteristike (karakteristični tok I_0 , toplotna konduktanca G in kritična frekvenca ν_0) dokaj dobro ujemajo z izračunanimi. Nekoliko slabše je ujemanje pri odzivnosti S na IR svetlobo in predvsem pri detektivnosti D , kar je deloma posledica še nedorečenih meritev, predvsem pa posledica prevelikega tokovnega šuma $1/f$, katerega bo potrebno v prihodnje zmanjšati s povečanjem upornosti bolometra ob nespremenjeni specifični upornosti polisilicija in/ali povečati kritični tok pri katerem se pojavi neželeni tokovni $1/f$ šum, za kar so v teku dodatni poskusi.

7. ZAHVALA

Zahvaljujem se osebju laboratorija za mikroelektroniko, ki so pomagali pri izdelavi bolometrov in meritvah na FE. Posebna zahvala gre g. Hozjanu in g. Čeponu v Fotoni, ki sta mi omogočila meritve na kalibriranem izvoru IR svetlobe in izdelala ustrezen predojačevalec. Prav tako sem dolžan zahvalo g. A. Demšarju iz FOTONE za koristne računske napovedi absorbance IR svetlobe v predvideni strukturi.

Nalogo je financiralo Ministrstvo za znanost Republike Slovenije (L2-7744-781), za kar se mu najlepše zahvaljujem.

8. LITERATURA

- /1/ P.W. Kruse, Uncooled IR Focal Plane Arrays, AeroSense 1996, Los Angeles 10.Apr.1998
- /2/ J.M. Bustillo, G.K. Fedder, C.T.-C. Nguyen, R.T. Howe, Process technology for modular integration of CMOS and polysilicon microstructures, *Microsystem Technology* 1, 30-41 (1994)
- /3/ J. Wauters, doped silicon creates new bolometer material, *Laser Focus World*, 145-149, Nov. 1997
- /4/ M. Maček, Characterization of Thin Polysilicon films for Micromachining Applications, 33rd Int. conference on Microelectronics, devices and materials, Gozd Martuljk, 24.-26. Setp 1997, 255-260
- /5/ M. Maček, Polisilicijev bolometer I, teoretične osnove, *Informacije MIDEM* 28(1998)2, pp 77-80
- /6/ LESIT Final Report 1995, Modul 4 Microsensor Technology (Baltes)
- /7/ M. Klajnšek-Gunde, Privatno sporočilo o meritvah absorbcije IR svetlobe na Kemijskem inštitutu, 1998
- /8/ A. Demšar, privatno sporočilo
- /9/ S. Južnič, V. Nemanič, Termovka: odkritje in razvoj vakuumske izolacije, *Vakuumist*, 16/31, 20-21 (1996)
- /10/ H.C. Wright, Elementary Semiconductor Physics, Van Nostrand Reinhold Co., NY, 1979

*Dr. Marijan Maček, dipl.ing.
Fakulteta za Elektrotehniko,
Laboratorij za mikroelektroniko
University of Ljubljana,
Faculty of Electrical Engineering,
Laboratory for Microelectronics
SI 1000 Ljubljana, Tržaška c. 25
E-mail: marijan.macek@fe.uni-lj.si*

Prispelo (Arrived): 22.5.1998

Sprejeto (Accepted): 7.7.1998