



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH A OVĚŘENÍ TERMODYNAMICKÉHO SNÍMAČE SE ZAMĚŘENÍM NA VYSOKOU CITLIVOST

DESIGN AND VERIFICATION OF A THERMODYNAMIC SENSOR WITH A FOCUS ON HIGH SENSITIVITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Starošík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Petr Starošík

ID: 230427

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a ověření termodynamického snímače se zaměřením na vysokou citlivost

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku měření tepla bolometry, kalorimetry a srovnajte jejich parametry s termodynamickým snímačem. Zaměřte se na získání nejen informací o konstrukci snímačů a měření, ale také na jejich limitní parametry z pohledu citlivosti a rozlišení. Získané poznatky ze semestrální práce použijte pro vytvoření senzoru s větší citlivostí na teplený tok, resp. teplo. Optimalizujte použité zapojení pro měření a aplikaci pro ověření dosažených parametrů vytvořeného senzoru. Výsledky zpracujte v bakalářské práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 1.6.2023

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření teploty a tepla pomocí bolometrů, kalorimetrů a termodynamickým snímačem. U bolometrů a kalorimetrů jsou popsány jejich vlastnosti a limitní parametry. Blíže se práce zaměřuje na konstrukci termodynamického snímače z diskrétních součástí, se zaměřením na dosažení vysoké citlivosti. Citlivost termodynamického snímače je následně měřena na experimentu s definovanou změnou tepla a vyhodnocena. Pomocí tohoto experimentu byla nastavena metodologie měření, která byla následně upravena. V rámci bakalářské práce byl navržen nový senzor pro termodynamický snímač a byla ověřena jeho citlivost.

Klíčová slova

Teplo, teplota, měření, bolometr, kalorimetr, parametry, citlivost, termodynamický snímač, senzor.

Abstract

This work deals with the issue of using bolometers, calorimeters a thermo-dynamic sensor in measuring temperature and heat. In the case of bolometers and microcalorimeters are described their properties and limit parameters. The work focuses more closely on the construction of a thermodynamic sensor from discrete components with a focus on achieving high sensitivity. The sensitivity of the thermodynamic sensor was measured in an experiment with a defined heat change and evaluated. Using this experiment was set the measurement methodology, which was subsequently modified. As part of the bachelor's thesis was designed a new sensor for a thermodynamic sensor and was measured its sensitivity.

Keywords

Heat, temperature, measuring, bolometer, calorimeter, parameters, sensitivity, thermo-dynamic sensor.

Bibliografická citace

STAROŠTÍK, P. *Návrh a ověření termodynamického snímače se zaměřením na vysokou citlivost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2023. 57 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Petr Starošík*

VUT ID studenta: *230427*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2022/23*

Téma závěrečné práce: *Návrh a ověření termodynamického snímače se zaměřením na vysokou citlivost*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 1. června 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Alexandru Otáhalovi, Ph.D. a všem ostatním, kteří mi pomohli, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při řešení a zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 1. června 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	9
ÚVOD	10
1. MĚŘENÍ TEPLoty A TEPLA	11
1.1 TEPLOTNÍ SENZORY	12
1.2 BOLOMETR.....	13
1.2.1 <i>Infratermočlánky</i>	13
1.2.2 <i>Pyroelektrické senzory</i>	13
1.2.3 <i>IR bolometry</i>	13
1.3 KALORIMETR	16
1.4 TERMODYNAMICKÝ SNÍMAČ	17
1.4.1 <i>Zapojení termodynamického snímače</i>	19
1.4.2 <i>Termodynamický snímač a jeho konstrukce</i>	20
1.4.3 <i>Stanovení změny teploty</i>	21
1.4.4 <i>Měření citlivosti termodynamického snímače</i>	24
1.5 OPTIMALIZACE MĚŘENÍ CITLIVOSTI.....	28
1.5.1 <i>Úprava měřicího obvodu</i>	28
1.5.2 <i>Návrh a výroba DPS sloužící k měření</i>	28
1.5.3 <i>Ověření zapojení a kontrolní měření citlivosti</i>	31
1.5.4 <i>Úprava zdroje tepla pro měření</i>	34
1.6 NÁVRH SNÍMAČE PRO TERMODYNAMICKÝ SENZOR	36
1.6.1 <i>Návrh snímače</i>	37
1.6.2 <i>Konstrukce snímače</i>	38
1.6.3 <i>Vytvoření snímače</i>	44
1.7 OVĚŘENÍ CITLIVOSTI SNÍMAČE A TERMODYNAMICKÉHO SENZORU	48
1.7.1 <i>Průběh měření</i>	48
1.7.2 <i>Výsledky měření citlivosti</i>	50
1.7.3 <i>Vyhodnocení zjištěných výsledků</i>	51
2. ZÁVĚR	53
LITERATURA	55
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schéma struktury IR bolometru [4]	14
Obrázek 2: Schématická reprezentace mikrok calorimetru [6]	17
Obrázek 3: Výkonově teplotní charakteristika ideálního pozitivně aktivního RTDS [1]	18
Obrázek 4: Jednoduchý RTDS v ideálním bilančním zapojení [1]	19
Obrázek 5: Zapojení termodynamického snímače na nepájivém poli	21
Obrázek 6: Zapojení rezistoru pro měření oteplení	22
Obrázek 7: Zapojení měřicích přístrojů pro měření oteplení rezistoru	23
Obrázek 8: Závislost oteplení rezistoru na výkonu	24
Obrázek 9: Připevnění senzoru k rezistoru	24
Obrázek 10: Měření citlivosti termodynamického snímače	25
Obrázek 11: Měření citlivosti termodynamického snímače	26
Obrázek 12: schématická značka operačního zesilovač AD8629 [10]	29
Obrázek 13: Schéma zapojení operačního zesilovače termodynamického snímače	29
Obrázek 14: Finální podoba vodičových cest na DPS	30
Obrázek 15: DPS pro termodynamický snímač	30
Obrázek 16: Opravená DPS pro termodynamický snímač	32
Obrázek 17: DPS pro měření s původním zesilovačem LM272M	32
Obrázek 18: Expozice fotorezistu nalaminovaného na DPS	33
Obrázek 19: Odleptání mědi u DPS (vlevo pro zesilovač LM272M, vpravo pro AD8629ARZ)	33
Obrázek 20: Osazení a oživení DPS termodynamického snímače (pro OZ LM272M vlevo a AD629ARZ vpravo)	34
Obrázek 21: Měření povrchové teploty pomocí termočlánku	35
Obrázek 25: Graf závislosti oteplení rezistoru na výkonu	36
Obrázek 23: Čip pro termodynamický snímač (1×1 mm, šířka cesty 5 μm)	39
Obrázek 24: Varianty čipů pro termodynamický snímač (1×1 mm)	40
Obrázek 25: Čipy různých velikostí (4×4, 2×2 a 1×1 mm)	41
Obrázek 26: Rozmístění čipů s odporovou vrstvou na waferu	43
Obrázek 27: Senzory vyrobené na waferu	43
Obrázek 28: Nařezané čipy umístěné na plastové podložce	44
Obrázek 29: Jednotlivé čipy v petriho misce (velikost čipů 2×2 mm)	44
Obrázek 30: Přilepení čipů na ohebnou DPS	45
Obrázek 31: Přilepení čipu (4×4 mm) na DPS	46
Obrázek 32: Připojení čipu (1×1 mm) pomocí mikrodrátků	47
Obrázek 33: Připájení vodičů na snímač (4×4 mm)	47
Obrázek 34: Umístění snímače (4×4 mm) na výkonový rezistor	48
Obrázek 35: Měření citlivosti termodynamického senzoru	49
Obrázek 36: Umístění snímače (1×1 mm) na výkonový rezistor	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Závislost oteplení rezistoru na výkonu	23
Tabulka 2: Závislost oteplení rezistoru na výkonu	35
Tabulka 3: Velikosti odporů pro čipy o rozměrech 1×1 mm	41
Tabulka 4: Velikosti odporů pro čipy o rozměrech 2×2 mm	42
Tabulka 5: Velikosti odporů pro čipy o rozměrech 4×4 mm	42

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření teploty a tepla pomocí bolometrů, kalorimetrů, a především pomocí termodynamického snímače.

V rámci první části bakalářské práce a jejich jednotlivých kapitol a podkapitol jsou popsány různé metody měření teploty, respektive tepla a různé principy funkce jednotlivých senzorů. Podrobněji jsou rozepsány bolometry a kalorimetry. U nich je popsána nejen jejich funkce, ale v obou případech i jejich konstrukce. Tato práce se věnuje shrnutí jejich parametrů, především shrnutí citlivosti a nejmenší možné zaznamenané změně tepla.

Druhá část bakalářské práce se zabývá konstrukcí termodynamického snímače, a to z dostupných diskrétních součástek, se zaměřením na co nejvyšší možnou dosažitelnou citlivost. Zkonstruovaný senzor, respektive termodynamický snímač, je následně otestován, aby bylo možné stanovit, jaká změna teploty a tepla je tímto senzorem měřitelná. Za tímto účelem byl proveden experiment měření změny teploty a tepla způsobené průchodem elektrického proudu přes rezistor. Tím byla stanovena metodologie měření.

V třetí části byla navržena DPS pro termodynamický snímač, aby byl omezen vliv přechodových odporů při měření na nepájivém poli. V rámci bakalářské práce bylo cílem i zvýšit citlivost použitím operačního zesilovače s vyšším zesílením. Dále byla upravena metodologie měření změnou velikosti výkonového odporu.

Další část bakalářské práce se zabývá návrhem nového senzoru pro termodynamický snímač. Je proveden návrh, včetně výběru použitých materiálů, konstrukce samotného senzoru včetně rozměrů a hodnot odporů senzoru.

Navržený senzor je následně vyroben, zkonstruován a pomocí upravené metodologie je experimentálně zjištěna nejmenší hodnota teploty, tepla a tepelného toku, kterou je možné pomocí termodynamického senzoru měřit.

1. MĚŘENÍ TEPLoty A TEPLA

Termodynamickou soustavou se rozumí ohraničená soustava objektů, jež si mezi sebou a na hranici s okolím vyměňují teplo.

Stav, ve kterém se daná termodynamická soustava nachází, je charakterizován pomocí vhodných veličin, jako je například teplota jednotlivých objektů v soustavě. Termodynamická soustava se může nacházet buď v ustáleném či neustáleném stavu. V ustáleném stavu je soustava tehdy, pokud všechny stavové veličiny charakterizující objekty v soustavě nabývají konstantních hodnot a v čase se nemění. Jde například o konstantní teplotu. Naopak v neustáleném stavu se během času teplota, či jiné stavové veličiny jednotlivých objektů v soustavě budou měnit, a to z několika možných příčin.

V neustálené soustavě může docházet k výměně tepla mezi jednotlivými objekty či částmi, většinou na základě jejich rozdílných teplot. Každý objekt v soustavě je složen z atomů, které se neustále neuspořádaně pohybují a naráží na sebe. Tepelnou výměnou rozumíme děj, při kterém si jednotlivé objekty termodynamické soustavy těmito srážkami předávají energii. Jelikož teplo je skalární veličina, tak jím lze popsat pouze množství vyměněné energie. Stejně množství tepla může být předáno mezi malými, ale i velkými objekty. Pokud je potřeba vzít v úvahu i rozměry plochy, na které dochází k výměně tepla, je nutné použít veličinu tepelný tok, jež vztahuje množství tepla na jednotku plochy.

Soustava také nemusí být ustálená kvůli vnějším vlivům. Soustavy proto rozdělujeme na otevřené, uzavřené či izolované. Otevřený termodynamický systém může se svým okolím vyměňovat jak energii, tak látku. Uzavřený systém může se svým okolím vyměňovat pouze energii, zatímco izolovaný systém nemůže se svým okolím vyměňovat ani energii ani látku.

Ani soustava, která je izolovaná, nemusí být vždy ustálená. V termodynamické soustavě mohou být totiž dva druhy prvků, a to aktivní prvky, které jsou schopné přeměňovat různé formy energie (např. přeměna elektrické energie na teplo), a prvky pasivní, které pouze akumulují energii získanou z okolí či vlastní naakumulovanou energii okolí předávají. V neposledním případě mohou mít vliv přechodné děje.

Termodynamická soustava přirozeně přechází z neustáleného stavu do ustáleného, ale v některých případech to není možné. Takovou soustavu nazýváme trvale neustálenou. Soustava bude trvale neustálená, pokud některý aktivní prvek bude vykazovat v čase spojitě proměnnou aktivitu. [1]

Stav, ve kterém se termodynamická soustava nachází, lze zjistit především pomocí změření jednotlivých stavových veličin v soustavě. Jednou z těchto veličin je teplota. Pro zjištění stavu termodynamické soustavy se rozmístí v daných bodech jednotlivé senzory pro měření teploty v soustavě. Teplotu je vhodné měřit delší dobu a tím zjistit, zda a případně jak se teplota v soustavě mění. Další veličinou je tepelný tok, jehož měřením je možné zjistit, jaké jsou tepelné toky uvnitř soustavy (případně mezi soustavou a okolím) a zda jsou konstantní, anebo zda jsou v čase proměnné.

Ke změření teploty je možné použít několik různých způsobů, které jsou založeny na odlišných fyzikálních příkladech (například rtuťové či bimetalové teploměry, termistory, termočlánky atd.).

Z fyzikálního hlediska je možné změřenou změnu teploty v některých případech převést na odpovídající změnu tepla, a to pomocí použití kalorimetrické rovnice. Změna tepla ΔQ je přímo úměrná hmotnosti m , měrné tepelné kapacitě c a změně teploty ΔT dle vztahu (1).

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

V případě, že není jedna z veličin známá, např. když je změřena změna teploty u neznámé látky, či neznámého objemu, není možné touto jednoduchou metodou změnu tepla odvodit a je nutné postupovat jinak.

1.1 Teplotní senzory

Dříve byly velmi rozšířené teploměry založené na principu teplotní roztažnosti. Při zvyšování teploty se u různých materiálů mění jejich objem a rozměry. Změna jejich objemu, či délky, je dána fyzikální konstantou, která se odlišuje dle materiálu. Díky tomu je možné vypočítat, o kolik se rozměry materiálu změní a podle toho vytvořit stupnici, ze které jde přímo odečíst naměřenou teplotu.

Měření teploty je možné na základě teplotní změny odporu. Použité senzory se nazývají teplotně závislé odpory, anebo termistory. Teplotně závislé odpory se tak většinou označují na základě složení, a to v případě, že jsou z jednoho čistého kovu, například platina či nikl. Termistory jsou elektrotechnické součástky, odporové či polovodičové, které mají stanovený odpor, jež je závislý na teplotě. Závislost změny odporu na teplotě v obou případech určuje teplotní koeficient odporu (TKR), v anglické literatuře bývá značen TCR, případně α . Podle něj dělíme termistory na NTC (negative temperature coefficient) a PTC (positive temperature coefficient). Teplotní závislost odporu termistoru může být zadána pomocí vzorce, či pomocí grafu naměřených odporů při různých teplotách. Ze změřených hodnot odporů pak lze zjistit měřenou hodnotu teploty T , přičemž se ve většině případů vychází ze vztahu (2), znalosti velikosti odporu R a odporu R_0 při teplotě T_0 .

$$R = R_0 \cdot [1 + TCR \cdot (T - T_0)] \quad (2)$$

Dalším velmi rozšířeným senzorem pro měření teploty je termočlánek. Jeho základem je využití termoelektrického jevu, který říká, že pokud je aplikován teplotní gradient podél kovového vodiče, začnou elektrony difundovat z jednoho konce vodiče na druhý a tím vzniká elektrický proud, respektive napětí. Spojením dvou vybraných vodičů vzniká takzvaný termočlánek. Čím vyšší je rozdíl teplot, tím větší je rozdíl potenciálů mezi

oběma vodiči a mezi těmito veličinami je přímá úměra. Díky tomu je možné s pomocí termočlánků měřit napětí a z dané závislosti určit teplotu, případně i termočlánek použít jako zdroj tepla při dodávání elektrické energie nebo ho naopak využít jako zdroj elektrické energie generované teplem.

Každé těleso, které má vyšší teplotu než 0 K, vyzařuje do svého okolí energii ve formě záření. Vyzařovaná energie je dle Stefan-Boltzmannova zákona úměrná čtvrté mocnině teploty. Při zvyšování teploty tělesa dochází k vyzařování většího množství energie. Pomocí různých senzorů je tedy možné měřit na dálku teplotu daného tělesa.

1.2 Bolometr

Název vycházející z řečtiny (bolē) definuje bolometr jako přístroj měřící paprsky, respektive záření.

Fyzikální princip, na kterém mohou bolometry fungovat je termoelektrický či pyroelektrický jev, anebo mohou využívat k detekci infračerveného záření závislost elektrického odporu na teplotě.

1.2.1 Infratermočlánky

Tyto senzory jsou založené na stejném principu jako klasické termočlánky, a to generování napětí na rozhraní dvou materiálů. Oproti klasickým termočlánkům je infratermočlánek uzpůsobený pro vzdálené měření teploty pomocí absorpce záření, a to ve vlnových délkách infračerveného spektra. Při dopadu měřeného záření na infratermočlánek dojde ke zvýšení jeho teploty, a teplotu zdroje je poté možné odvodit na základě generovaného napětí.

1.2.2 Pyroelektrické senzory

Při změně teplot může u materiálu dojít ke spontánní polarizaci a tím i ke vzniku elektrického potenciálu, což se nazývá pyroelektrický jev. Na tomto principu fungují pyroelektrické senzory, a to měřením změn napětí, které jsou úměrné změnám teploty, jež vznikají při dopadu a absorpci záření na senzoru.

1.2.3 IR bolometry

Ve většině případů se bolometrem pro detekci IR záření myslí právě bolometr na principu teplotně citlivého odporu, kdy při dopadu elektromagnetického záření na odpor dojde k jeho absorpci, čímž vzroste teplota a tím i samotný elektrický odpor. První bolometr zkonstruoval S. P. Langley v roce 1880. Použit byl úzký platinový pásek pro snímání absorbovaného záření, který byl zapojen do Wheatstoneova můstku pro zlepšení přesnosti měření. [2][3]

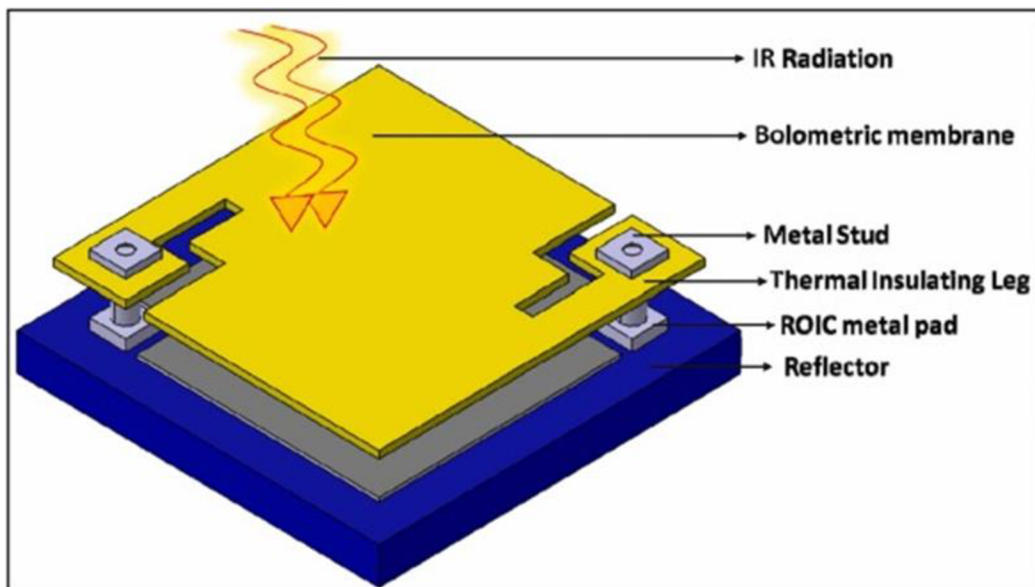
Každé těleso s vyšší teplotou než 0 K vyzařuje energii ve formě elektromagnetického záření. Při měření pomocí bolometrů může být problematické, že každé těleso, materiál či barva může vyzařovat jiné množství energie při stejné teplotě. Vyzařování tělesa je

dáno tzv. emisivitou. Kvůli tomu je u přesných měření pomocí termokamer důležité znát emisivitu daného tělesa, nebo na těleso nanést kvůli měření barvu s určenou emisivitou.

Aby byly bolometry co nejcitlivější, a nejpřesnější, je důležitá jejich konstrukce. Při dopadu záření je důležité, aby došlo k co největší změně odporů, a proto musí mít bolometry malou teplotní kapacitu. Často se konstruuji jako membrány či velmi tenké vrstvy, případně jako meandry, aby došlo k co největšímu zachycení elektromagnetického záření.

U bolometru je taktéž důležité, aby nedocházelo k teplotním ztrátám. Ty mohou být způsobeny například odvodem tepla přes substrát bolometru či prouděním vzduchu. Bolometr a okolí proto musí být dobře odizolováno. Za tímto účelem je možné bolometr umístit nad substrát pomocí tenkých termoizolačních podložek či podpěr s velkým teplotním odporem, viz obrázek 1. Díky tomu jsou zmenšeny ztráty tepla vedením. Pro zvýšení množství pohlcené energie je možné pod strukturu bolometru umístit vrstvu odrážející infračervené záření. [2] [3]

Měření změny odporu je prováděno pomocí měření úbytku napětí na odporu při průchodu daného proudu. Průchodem proudu přes odpor vzniká jouleovo teplo a tím dochází k jeho zahřívání, což je pro měření bolometrem nežádoucí především při přesném měření. Tento jev se u bolometrů označuje anglickým pojmem self-heating. Kompenzace je možná pomocí zapojení bolometru do Wheatsonova můstku. Druhou možností je snížení procházejícího proudu, které je podmíněné přesnějším měřením proudu a napětí.



Obrázek 1: Schéma struktury IR bolometru [4]

Pro další zlepšení vlastností bývají bolometry provozovány v pouzdře se sníženým tlakem, až na úroveň 0,01 mbaru, respektive 1 Pa, aby nedocházelo k přenosu tepla prouděním či absorbování energie vzduchem. [3]

Bolometry, které mají dostatečně malé rozměry (v řádech μm), je možné uspořádat do matice a vytvořit z nich pole měřících senzorů. Každý bolometr pak představuje jeden pixel zobrazení při infračerveném snímání obrazu, přičemž je možné dosahovat rozlišení až 2048×1536 bodů. Bolometry pro tento účel bývají integrovány do jedné součástky, tzv. mikrobolometru a využívají se především v tzv. termovizích, respektive termokamerách. [2]

Pro popis bolometru je důležité několik jeho základních parametrů, a to:

Šířka pásma bolometru není fyzikálně omezena principem absorpce záření, který je nezávislý na vlnové délce. Šířka pásma je proto závislá pouze na dopadajícím záření, přičemž detekované infračervené záření je standartně v rozmezí vlnových délek $\lambda = 8 \div 14 \mu\text{m}$. [2]

Časová konstanta τ charakterizuje, za jakou dobu dojde k ustálení teploty. Při absorbování záření nedojde k okamžité změně teploty kvůli tepelné kapacitě, přičemž průběh děje má exponenciální charakter. K ustálení teploty dojde až po několikanásobně delším čase, než je časová konstanta τ . V praxi se za ustálenou hodnotu považuje doba 3krát až 5krát delší. U komerčních bolometrů či mikrobolometrů může mít časová konstanta typicky velikost v řádu jednotek ms.

Citlivost (anglické literatuře označována responsivity) udává, jak se změní elektrický signál na výstupu bolometru při dopadu jednotkového výkonu záření, kde K_V je citlivost senzoru, ΔV je napětí na výstupu detektoru a P je výkon dopadajícího záření dle vztahu (3). Větší citlivost bolometru znamená, že i malý dopadající výkon záření bude znamenat velkou hodnotu napěťové odezvy. [2]

$$K_V = \frac{\Delta V}{P} \quad (3)$$

U velmi kvalitních bolometrů může být hodnota citlivosti až v jednotkách MV/W, díky čemuž je možné rozlišit minimální dopadající výkony.

Doslovný překlad citlivosti do angličtiny je sensitivity, čímž se ale v anglické literatuře označuje nejmenší možný měřitelný dopadající výkon, označovaný též zkratkou NEP (noise-equivalent power), v české literatuře ekvivalentní šumový výkon, který může u velmi přesných bolometrů s velmi nízkou teplotní vodivostí a nízkou hladinou šum dosahovat až 10 pW. U komerčních bolometrů či mikrobolometrů se v katalogových listech většinou neuvádí. [5]

Práh (teplotní) citlivosti je nejmenší oteplení, které detektor rozezná a je dáno hladinou šumu. Označuje se zkratkou NETD (z angl. noise equivalent temperature difference) a udává, o kolik musí při dopadu záření vzrůst teplota, aby poměr šumu k užitečnému signálu byl roven jedné a tato teplota je považována za nejmenší detekovatelnou. Práh citlivosti je tudíž udáván v jednotkách teploty. Typicky se u citlivých bolometrů či mikrobolometrů pohybuje v rozmezí 35 až 50 mK. [2] [3]

Měření změny tepla pomocí bolometru je problematické. Změna odporu bolometru je úměrná dopadajícímu výkonu záření, ze kterého je možné určit teplo dodané zářením do bolometru. Bez znalosti vlastností tělesa (např. emisivita), které záření vyzařuje, ale není možné stanovit jím vyzařované teplo. Při definované vzdálenosti od měřeného objektu a se známou emisivitou objektu je však možné měřit dálkově teplotu.

1.3 Kalorimetr

Pomocí kalorimetru je možné měřit změny teploty kapaliny, které jsou spojené s fyzickou změnou, chemickou či biochemickou reakcí a tím i měřit změny v přeměnách tepla či výměnu tepla mezi jednotlivými látkami.

Základním principem měření pomocí kalorimetru je sledování teploty v izolované soustavě pomocí teplotního senzoru uvnitř kalorimetru. V ideálním případě neboli když je soustava izolovaná a nedochází k přestupu tepla z okolí do zkoumané látky ani do kalorimetru, jsou změny teplot způsobeny pouze ději v měřené látce.

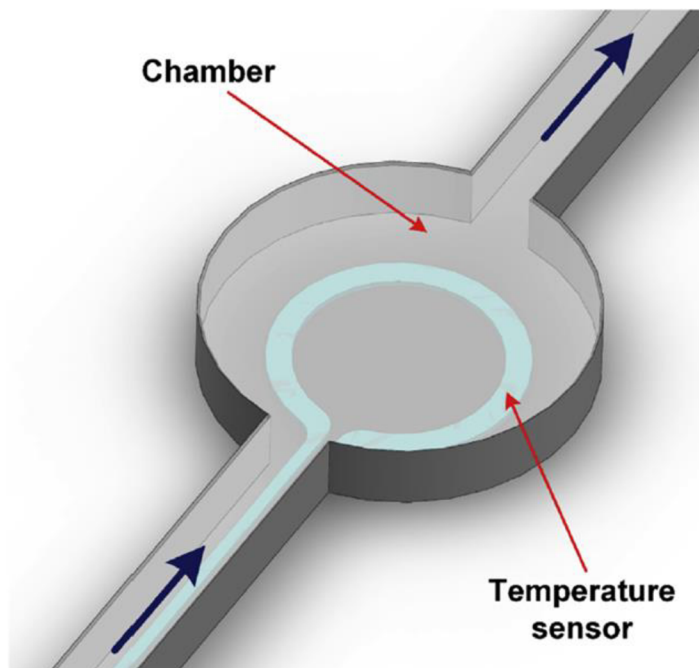
Pro vyšší citlivost a přesnost měření kalorimetrem (především u malého objemu měřených vzorků) je nutné zmenšení rozměrů kalorimetru. Konvenční kalorimetry nejsou pro tak malé rozměry vhodné, proto se používají tzv. mikrokalorimetry, vyráběné MEMS technologií (z angl. micro electromechanical system) neboli mikroobráběním umožňujícím výrobu senzoru přímo na polovodičovém čipu.

Mikrokalorimetry se používají například pro biologické či chemické aplikace, a to na měření entalpie či měření tepla při chemických reakcích mezi látkami.

MEMS struktury jsou v masové výrobě méně nákladné a díky malým rozměrům mají menší teplotní kapacitu. Mají ale i několik nevýhod, a to větší teplotní ztráty a nutnost citlivějšího a přesnějšího teplotního senzoru pro měření teploty v kalorimetru.

Kalorimetr obsahuje čtyři základní části, a to samotnou komoru mikrokalorimetru, teplotní senzor, izolaci a přívod, respektive odvod měřené kapaliny, viz obrázek 2.

Při konstrukci je nejdůležitějším parametrem teplotní vodivost, která musí být co nejmenší, aby nevznikaly ztráty odvodem tepla. Kanály přivádějící kapalinu jakož i samotná komora musí být z dobrého teplotního izolantu. V technologii MEMS původně převládaly materiály SiO_2 , Si, či nitridy křemíku, ale kvůli velké teplotní vodivosti byly nahrazeny polymery (PMMA, polyimidy atd.). Kromě ztrát tepla vedením skrze substrát mohou nastat i ztráty vedením skrze vzduch, a proto bývají přesné kalorimetry provozovány ve vakuu. Mikrokalorimetry provozovány ve vakuu mohou mít teplotní vodivost velmi nízkou, a to až 200 nW/K. [6]



Obrázek 2: Schématická reprezentace mikrokalorimetru [6]

Pro měření teploty v kalorimetru se používají termočlánky nebo termistory, případně teplotně závislé odpory vyrobené z čistých kovů (platina, nikl, zlato či titan), anglicky označovány RTD (resistance temperature detector). Měření pomocí RTD je přesnější a stabilnější, ačkoli oproti termistorům mohou mít výrazně menší hodnotu TCR a je nutné měřit jejich odpor přesnějšími přístroji. Při měření teploty založeném na teplotní změně odporu je nutné uvažovat možné ovlivnění měřené soustavy při průchodu proudu přes odpor, které způsobí ztrátový výkon a ohřívání měřícího odporu. Mikrokalorimetry mohou v optimalizovaných případech měřit výkony s rozlišením až 0,57 nW. [6]

Při známých rozměrech mikrokalorimetru a znalosti látky, která je podrobena zkoumání, je možné ze změřené změny teploty vypočítat celkovou změnu tepla, respektive energie. U mikrokalorimetru s objemy měřících komor 3, respektive 3,5 nl, byly změřeny změny energie až 10 nJ. [6]

Pro měření s takovou přesností je ale nutné kalorimetr dostatečně optimalizovat, například zamezit přestupu tepla, dostatečně malou tepelnou kapacitu samotného mikrokalorimetru a dostatečně přesně měřit změnu teploty.

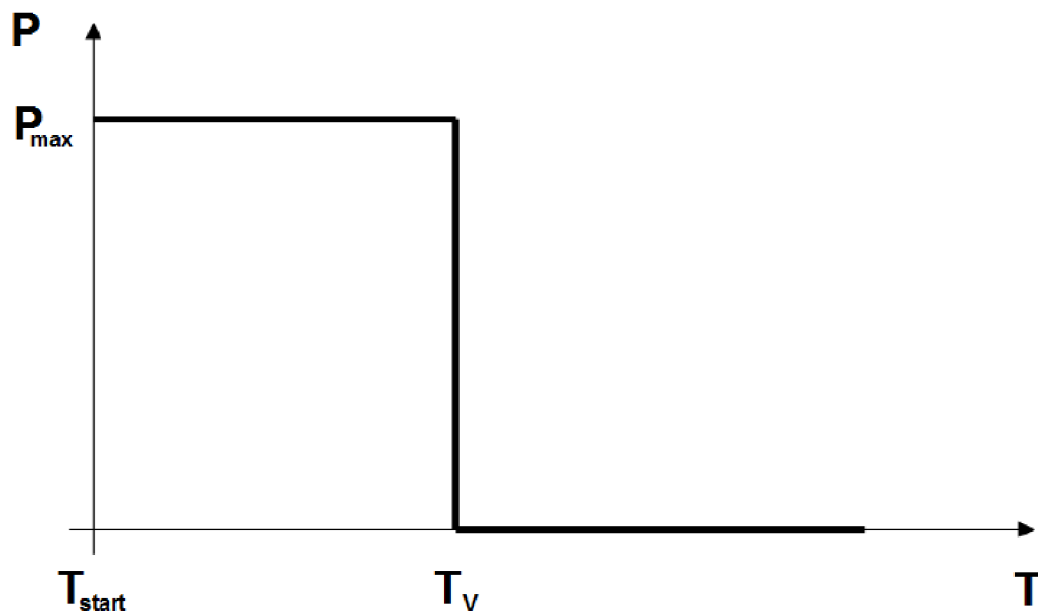
1.4 Termodynamický snímač

Ideální teplotní senzor by neměl ovlivňovat měřenou termodynamickou soustavu. Neměl by tedy akumulovat teplo ani vykazovat termickou aktivitu, zatímco by měl mít ideální tepelný kontakt s měřenou soustavou.

Jelikož teplotní senzory nemají nulovou hmotnost a nulovou tepelnou kapacitu, může při změně stavu termodynamické soustavy dojít vlivem tepelné kapacity k akumulaci energie a tím k ovlivnění výsledku měření.

Aktivní odporový termodynamický snímač (RTDS) je termo-aktivní prvek termodynamické soustavy udržovaný vlastní poznatelnou termo-aktivitou v trvale rovnovážné, stavu, tedy trvale na jemu vlastní konstantní teplotě.

Samotný termodynamický snímač zůstává v ustáleném stavu (na nastavené ustálené teplotě) i v případě, že okolní soustava je v neustáleném stavu a na změnu okolní teploty reaguje okamžitým příkonem senzoru. Pokud je teplota okolí vyšší než vlastní teplota senzoru, nebude dodáván příkon a teplota senzoru se bude stabilizovat na teplotu okolí. Pokud bude teplota okolí nižší, bude senzoru dodáván maximální příkon a senzor se bude zahřívat až na charakteristickou vlastní teplotu. Ideální charakteristika pozitivně aktivního termodynamického snímače (senzor s kladnou hodnotou TCR) pak má tvar viz obrázek 3, kde P je okamžitý příkon senzoru, P_{max} je maximální disponibilní příkon zapojení, T okamžitá teplota senzoru, T_V je charakteristická vlastní teplota senzoru a T_{start} počáteční klidová teplota senzoru. [1]



Obrázek 3: Výkonově teplotní charakteristika ideálního pozitivně aktivního RTDS [1]

Díky tomu je termodynamický snímač teplotně ustálený i v případě neustáleného stavu termodynamické soustavy a nachází se termicky v proměnné bilanční rovnováze. Užitečný signál (výstupní) díky tomu popisuje okamžitý vývoj a změny teplotních toků mezi termodynamickým snímačem a bezprostředním okolím soustavy.

Termodynamický snímač se udržuje na konstantní teplotě, což je nutné zohlednit při jeho použití tak, aby nedošlo k nežádoucímu ovlivnění soustavy. Tuto vlastnost je případně možné využít a termodynamický snímač použít i jako samotný topný element v soustavě, kde je požadováno udržování konstantní teploty.

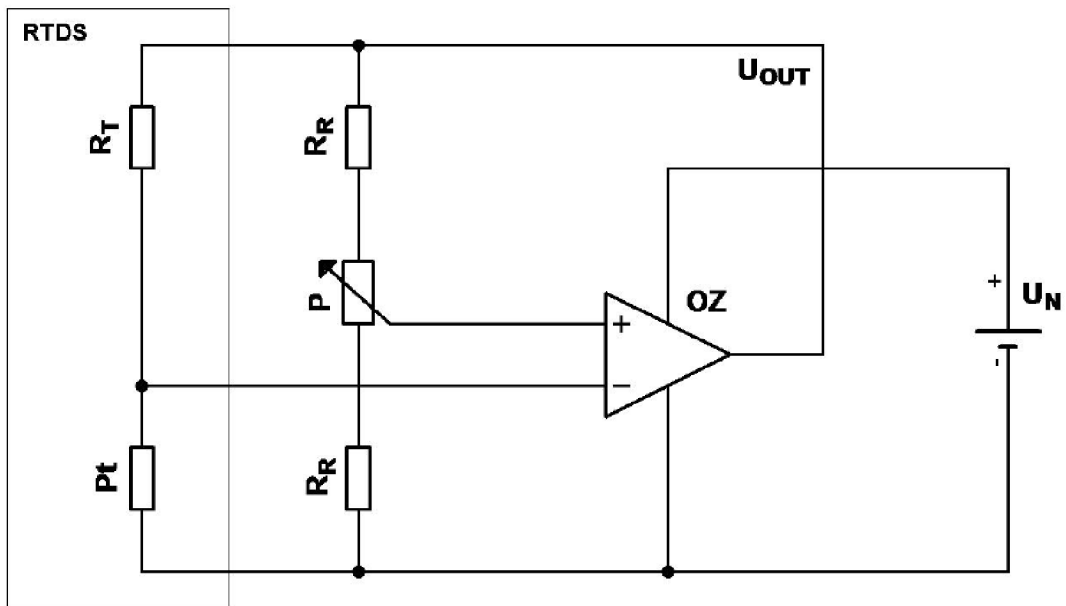
V reálných podmínkách není charakteristika dodávaného výkonu pravoúhlá, což vychází z použití reálných součástek a chování operačního zesilovače. Příkon dodávaný

do senzoru se proto nemění skokově. Při dodávání příkonu se mění teplotní rozdíl mezi rezistory a přibližuje se k přednastaveným hodnotám, díky čemuž postupně klesá dodávaný příkon až dojde ke stabilizaci na nastavené hodnotě. [7]

Výstupem z termodynamického snímače pak je napětí na výstupu OZ, které dodává výkon senzoru a měřením napětí lze zjišťovat, v jakém stavu se snímač nachází.

1.4.1 Zapojení termodynamického snímače

Pro nenáročné aplikace je možné využít zapojení, které kromě samotného senzoru obsahuje pouze operační zesilovač, potenciometr P a dva rezistory R_R . Senzor pak je složen ze samotného snímače (P_t , R_T), dvou odporů a potenciometru, viz obrázek 4.



Obrázek 4: Jednoduchý RTDS v ideálním bilančním zapojení [1]

Pokud je při připojení napájecího napětí U_N na operační zesilovač (OZ) dělicí poměr větve rezistorů R_R+P+R_R (definován polohou jezdce potenciometru) větší, než dělicí poměr $P_t/(P_t+R_T)$ rezistorů RTDS, objeví se na výstupu operačního zesilovače plné napětí U_N snížené o saturační úbytek na otevřeném výstupu zesilovače. Výstupní napětí dodává senzoru maximální možný výkon a ten se účinkem průchodu proudu ohřívá. Teplota RTDS roste a tím dochází ke zvětšování odporu P_t a napětí $-I_n$ na záporném vstupu OZ a to až do okamžiku, kdy bude napětí na kladném (+ I_n) i záporném (- I_n) vstupu OZ shodné. Poté napětí na výstupu klesne na úroveň, kterou bude senzoru dodáván výkon potřebný k udržení na teplotě zaručující shodu napětí na vstupech OZ. Podmínku shody napětí lze vyjádřit dle rovnice (4). Poměrné nastavení jezdce potenciometru označuje parametr α . [1]

$$U_{out} \cdot \frac{P_t}{R_t+P_t} = U_{out} \cdot \frac{R_R+\alpha \cdot P}{R_R+P+R_R} \quad (4)$$

Teplotu z ní lze vyjádřit upravením do tvaru:

$$T = \frac{1}{TCR} \cdot \frac{R_T - 1 - \alpha \cdot P \cdot R_T}{Pt_0 \cdot (2 \cdot R_R + P)} \quad (5)$$

Při nastavení jezdce potenciometru do poloviny ($\alpha = 0,5$), bude senzoru nastavena teplota vycházející z rovnice:

$$R_T = Pt_0 \cdot (1 + TCR \cdot T) \quad (6)$$

Přenasazením jezdce potenciometru dojde ke změně teploty senzoru, a to symetricky a lineárně v rozsahu s poloměrem $\frac{P}{2 \cdot R_R}$. [1]

1.4.2 Termodynamický snímač a jeho konstrukce

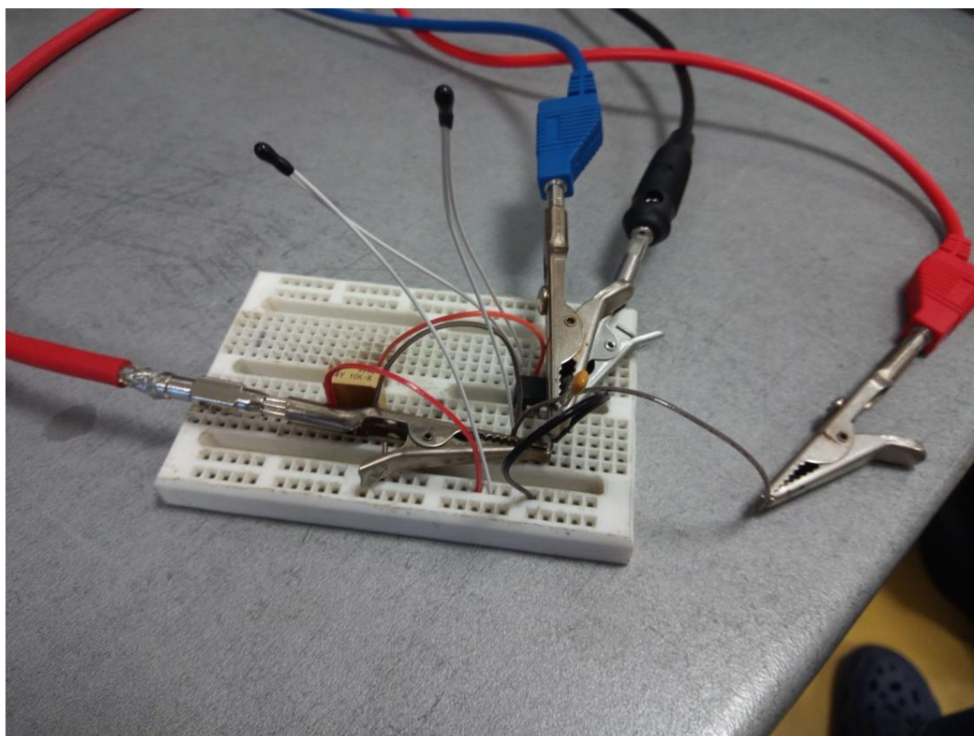
Samotný senzor termodynamického snímače se skládá ze dvou odporů, které při změně teploty mění svůj odpor a je proto důležitý jejich parametr TCR.

Pro zkonstruování jednoduchého termodynamického snímače za použití diskretních dostupných součástek proto byly zvoleny kapkové termistory. Malé kapkové termistory mají dostatečně velký odpor, zároveň velkou hodnotu TCR a jsou dostatečně malé. Jejich rozměr je důležitý kvůli citlivosti. Čím má termistor menší rozměry, tím má menší teplotní kapacitu, menší časovou konstantu a je schopen zaznamenat menší změnu tepla, respektive teploty. Proto byly použity termistory TTS-1.8KC7-BZ od výrobce TEWA TEMPERATURE SENSORS.

Pro nastavení teploty, na kterou bude senzor reagovat, byl použit trimmer o velikosti odporu 10 k Ω . Tato velikost odporu je vhodná, jelikož jde relativně přesně nastavovat pracovní teplota snímače.

Za účelem měření bylo použito zjednodušené zapojení, ve kterém oproti schématu na obrázku 4 nebyly použity rezistory R_R . Dle katalogového listu použitého operačního zesilovače L272M byl navíc přidán na napájecí vstup blokovací kondenzátor o velikosti 100 nF. Termodynamický snímač byl napájen z laboratorního zdroje napětím 15 V.

Jako první před započítím měření bylo provedeno zapojení snímače a jeho oživení, viz obrázek 5. Zapojení bylo provedeno na nepájivém poli, aby bylo případně možné při zjištění nedostatku či poruchy provedení rychlé opravy a opětovné oživení obvodu. Pro další experimenty a přesnější měření by bylo vhodné za tímto účelem použít plnohodnotnou desku plošných spojů, která by měla být rozšířena o možnost propojení se senzorem pomocí vodičů a kontaktních plošek za tímto účelem na desce vytvořených.



Obrázek 5: Zapojení termodynamického snímače na nepájivém poli

Odezva na výstupu termodynamického snímače poté byla měřena pomocí multimetru. Při prvním oživení zapojení nebylo nijak definováno množství tepla, na které by měl senzor zareagovat. Experimentálně byla nastavena hodnota trimmeru tak, aby na výstupu OZ bylo napětí přibližně 2 až 3 V. Díky tomu byl do senzoru stále dodáván výkon, avšak z jeho poklesu či nárůstu bylo možné sledovat, zda se zvýšila či snížila teplota.

1.4.3 Stanovení změny teploty

Aby bylo možné stanovit, jakou hodnotu změny teploty je možné pomocí zkonstruovaného termodynamického snímače měřit, je potřebné definovat změnu tepla, respektive změnu teploty pro experiment. Důležité je také, aby bylo změnu tepla možné jednoduše regulovat a aby byl experiment reprodukovatelný.

Při přiložení napětí na rezistor dojde ke vzniku elektrického proudu. Na odporové zátěži vzniká průchodem proudu ztrátový výkon dle rovnice (7).

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R \quad (7)$$

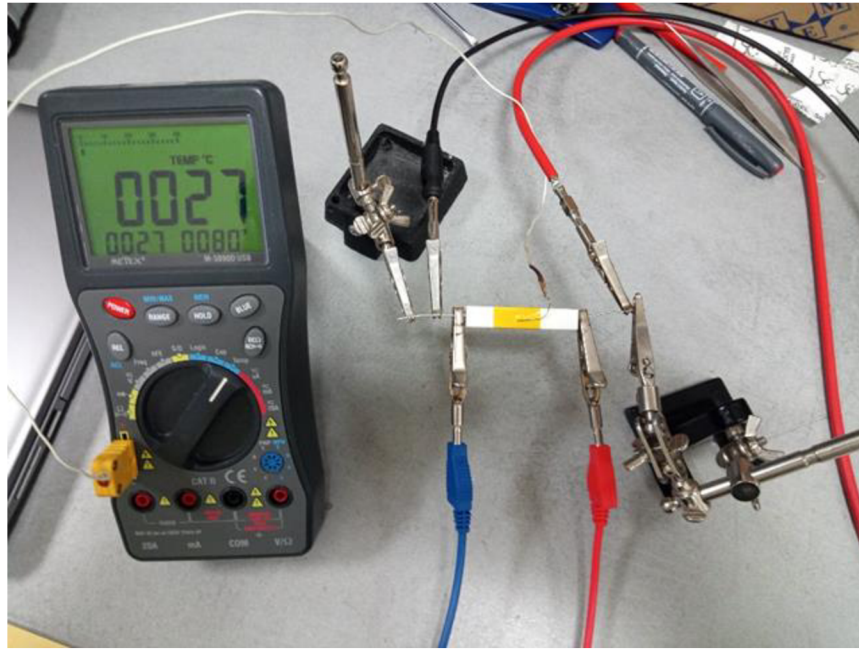
Daným výkonem se bude rezistor ohřívat a bude se zvyšovat jeho teplota. Jelikož okolní vzduch bude chladnější, dojde po určité době k ustavení tepelné rovnováhy, kdy všechna energie ztrátového výkonu bude vyměňována s okolím a rezistor bude mít konstantní teplotu.

Proto byl zvolen experiment, kdy je senzor termodynamického snímače připevněn na rezistor, kterým bude protékat daný proud.

Dle empirického vztahu je ohřátí rezistoru přímo úměrné dodávanému výkonu a je možné toto ohřátí změřit.

Pro definování změny teploty byl použit 10W výkonový rezistor o hodnotě odporu 1Ω CRL10W-1R od výrobce SR PASSIVES.

Během měření byl k rezistoru připevněn pomocí kaptonové pásky termočlánek typu K zapojený do multimetru METEX M-3890D USB, kterým byla měřena teplota na povrchu rezistoru, viz obrázek 6.



Obrázek 6: Zapojení rezistoru pro měření oteplení

Při měření byla teplota v laboratoři $23 \text{ }^\circ\text{C}$, která byla změřena pomocí stejného termočláneku a multimetru jako teploty rezistoru během měření. Použitý odpor měl hodnotu $1,04 \Omega$, která byla změřena pomocí multimetru UNI-T UT804. Stejným multimetrem byla měřena hodnota úbytku napětí na rezistoru při průchodu proudem, aby bylo možné dopočítat výkon, viz obrázek 7. Změřené a vypočtené hodnoty dle rovnice (7) byly zaznamenány do tabulky 1.



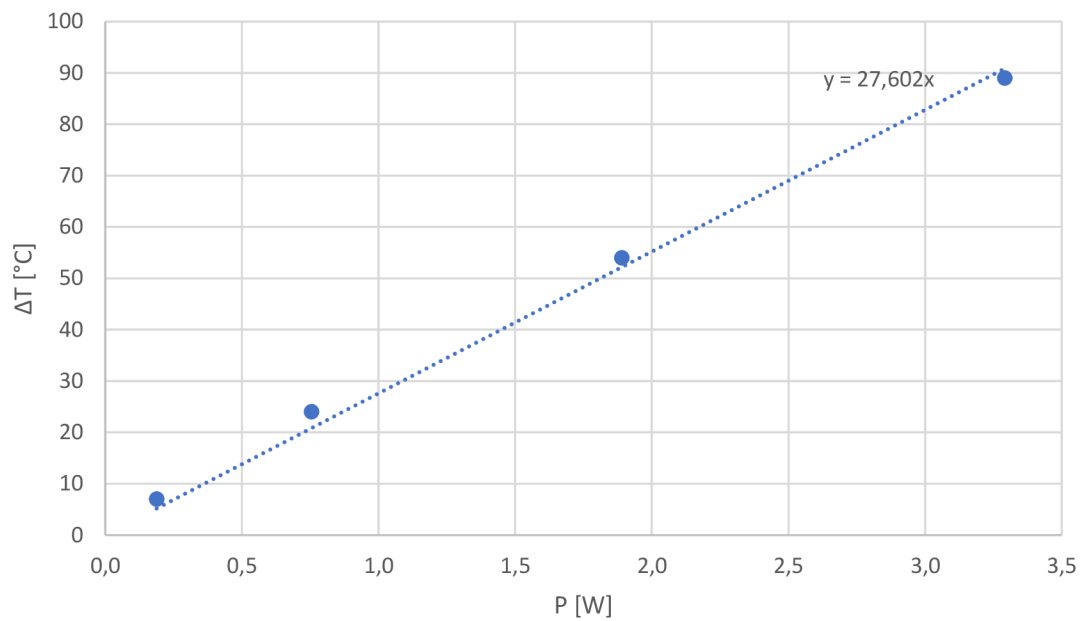
Obrázek 7: Zapojení měřicích přístrojů pro měření oteplení rezistoru

Tabulka 1: Závislost oteplení rezistoru na výkonu

T [°C]	ΔT [°C]	U [V]	P [W]
30	7	0,442	0,188
47	24	0,8859	0,755
77	54	1,4023	1,891
112	89	1,8503	3,292

Změřené závislost oteplení rezistoru na dodávaném výkonu byla vynesena do grafu, viz obrázek 8. Změřená data byla proložena přímkou, zobrazující lineární závislost oteplení na výkonu dle rovnice (8). Pomocí ní je možné stanovit teplotu, o kterou se ohřeje povrch rezistoru při určitém dodávaném výkonu.

$$\Delta T = 27,602 \cdot P \quad (8)$$

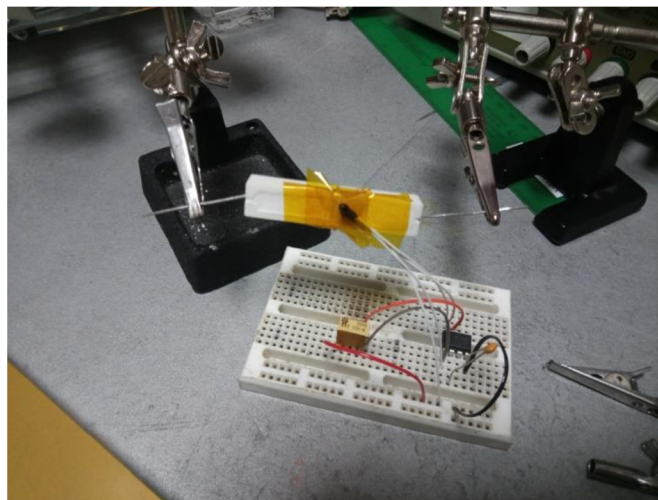


Obrázek 8: Závislost oteplení rezistoru na výkonu

1.4.4 Měření citlivosti termodynamického snímače

Kapkové termistory byly jako senzor termodynamického snímače připevněny na měřený rezistor. První termistor byl připevněn přímo k rezistor pomocí kaptonové lepicí pásky. Druhý termistor byl připevněn na něj, přičemž mezi nimi byla kromě lepicí kaptonové pásky o tloušťce 50 μm i jedna vrstva kaptonové fólie o tloušťce 120 μm , viz obrázek 9. Celková tloušťka izolační vrstvy mezi termočlánky tedy byla přibližně 120 μm .

Aby bylo vyzařování tepla z rezistoru srovnatelné s měřením změny teploty, byl rezistor taktéž umístěn ve vzduchu pomocí držáků.

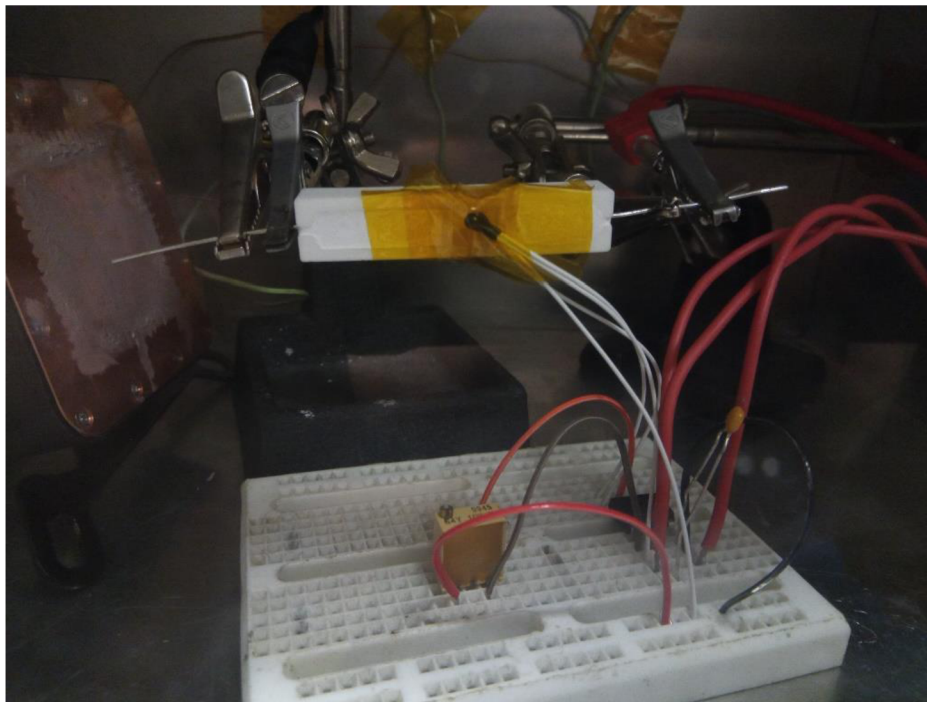


Obrázek 9: Připevnění senzoru k rezistoru

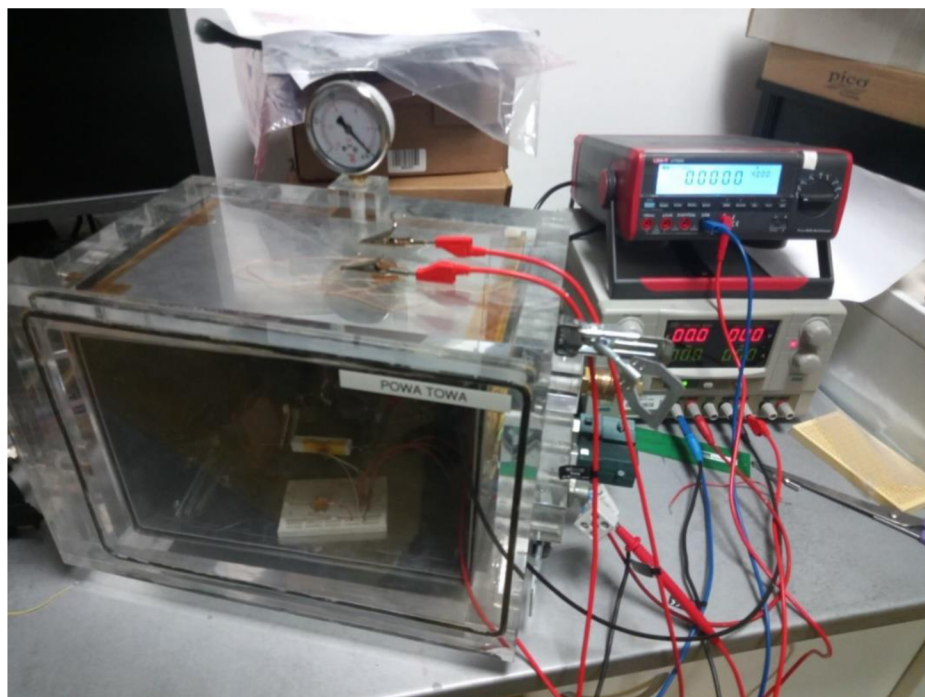
Cílem měření bylo zjistit hodnotu dodávaného výkonu a následně změnu teploty a tepla, při kterém bude na výstupu OZ patrné a průkazné zvýšení či snížení napětí.

Termodynamický snímač byl při prvotním nastavení citlivý na změny teploty způsobené pohybem osob v jeho blízkosti a proudění vzduchu. Z tohoto důvodu bylo nutné umístit při dalším měření senzor termodynamického snímače a měřený rezistor do uzavřené soustavy, aby nedošlo k ovlivnění měření.

Měření se podařilo zrealizovat po zapůjčení vhodné schránky z laboratoře. Kvůli nedostatečné délce přívodních vodičů senzoru bylo nutné umístit pro měření do uzavřené schránky celý termodynamický snímač, viz obrázek 10. Jelikož ze schránky nebylo vyvedeno dostatečné množství vodičů pro zapojení celé měřicí soustavy, musela zůstat dvířka, skrz které procházely vodiče otevřená a vzniklá mezera musela být utěsněna lepicí páskou pro dosažení alespoň částečně uzavřené soustavy, viz obrázek 11. Tento způsob měření se ukázal jak nevhodný, proto by v dalším měření v rámci bakalářské práce bylo vhodné senzor konstruovat s delšími přívodními vodiči.



Obrázek 10: Měření citlivosti termodynamického snímače



Obrázek 11: Měření citlivosti termodynamického snímače

Na provedení experimentu byl použit multimetr UNI-T UT804 a laboratorní zdroj napětí. Během měření byla nejdříve nastavena teplota, na kterou by termodynamický snímač reagoval a to tak, aby na jeho výstupu bylo napětí přibližně 2 až 3 V. Díky tomu bylo možné pozorovat změny napětí na výstupu, a to jak zvýšení napětí při oteplení nebo snížení oteplení při ochlazení.

Vlivem změn teploty a následného ohřívání senzoru docházelo ke kmitání napětí na výstupu, a proto bylo nutné po přenastavení vždy vyčkat na ustálení napětí na výstupu OZ a teploty.

Jelikož neustále docházelo ke změnám napětí na výstupu vlivem funkce termodynamického snímače (zahřívání senzorů následované změnou napětí), musela být stanovena hranice, kdy je možné prohlásit změnu napětí na výstupu za způsobenou vnějším zdrojem tepla.

Napětí na výstupu OZ se pohybovalo kolem průměrné hodnoty 2 V s rozkmitem 0,1 v rozmezí 1,9 až 2,1 V. Kvůli tomu byla hranice s dostatečnou rezervou stanovena na 1,5, respektive 2,5 V.

Na laboratorním zdroji bylo nastavováno napětí způsobující tepelné ztráty na rezistoru, přičemž bylo postupně zvyšováno napětí a tím i dodávaný výkon do doby, kdy dojde k překročení stanoveného napětí.

Kvůli velkým rozměrům použitého výkonového rezistoru bylo předpokládáno, že ustálení změny teploty a tím i možnost pozorovat změnu napětí na výstupu nebude okamžitá. Během měření byl potvrzen předpoklad, že doba je příliš dlouhá na rychlé a přesné měření, z tohoto důvodu by bylo vhodné při příštím měření použít zdroj mnohem

menších rozměrů a menší tepelné kapacity, aby bylo možné pozorovat reakci termodynamického snímače rychleji.

Po nalezení hodnoty napětí, při které zareaguje termodynamický snímač dostatečnou změnou na výstupu byla změřena pomocí multimetru UNI-T UT804 přesná hodnota napětí na rezistoru, aby bylo pomocí rovnice (7) možné stanovit přesnou hodnotu dodávaného výkonu. Při napájení výkonového rezistoru hodnotou napětí 69 mV došlo ke změně výstupu o 0,4 V na hodnotu 2,4 s výskytem maxima 2,5 V při zákmitech výstupního napětí. Proto byla hodnota napětí zvýšena, přičemž při vstupním napětí 99 mV došlo po ustálení teploty k nárůstu napětí na výstupu OZ o 0,5 V na 2,5 V s maximální špičkovou hodnotou 2,8 V. Hodnoty dodávaných výkonu pak byly 4,6, respektive 9,4 mW.

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = \frac{0,069^2}{1,04} = 4,6 \text{ mW} \quad (7)$$

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = \frac{0,099^2}{1,04} = 9,4 \text{ mW} \quad (7)$$

Takto zjištěnou hodnotu výkonu je pomocí rovnice (8) ze změřené teplotní charakteristiky možné přepočítat na změnu teploty na povrchu výkonového rezistoru. Jelikož však jde o využití empirického vzorce, nelze považovat vypočtenou hodnotu za zcela přesnou. Vypočtená změna teploty tedy byla 0,13 respektive 0,26 °C.

$$\Delta T = 27,602 \cdot P = 27,602 \cdot 0,0046 = 0,13 \text{ °C} \quad (8)$$

$$\Delta T = 27,602 \cdot P = 27,602 \cdot 0,0094 = 0,26 \text{ °C} \quad (8)$$

Při znalosti o měřeném objektu (zdroji tepla), tedy jeho hmotnosti m a měrné tepelné kapacity c , je možné z kalorimetrické rovnice (1) vyjádřit změnu tepla způsobenou přeměnou energie, která měla za důsledek zvýšení teploty o ΔT .

V laboratoři byl měřen výkonový rezistor 1 Ω CRL10W-1R od výrobce SR PASSIVES. Jde o tmelený rezistor, u něž není v katalogovém listu uvedena hodnota měrné tepelné kapacity, což je zásadní nedostatek pro toto měření a bylo nutné tuto hodnotu odhadnout. Jelikož se tmelené rezistory skládají ve většině případů z keramiky či skla, jež mají měrnou tepelnou kapacitu v rozmezí 500 až 1000 J/kg·K, byla odhadnuta měrná tepelná kapacita rezistoru jako 800 J/kg·K, se kterou bylo dále počítáno. [8][9]

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,01 \cdot 800 \cdot 0,13 = 1,04 \text{ J} \quad (1)$$

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,01 \cdot 800 \cdot 0,26 = 2,08 \text{ J} \quad (1)$$

Kvůli všem zjednodušením, které byly využity pro měření, nejde o přesnou hodnotu. Hodnoty změřeného tepla byly v jednotkách J. Pro další experiment a přesnější ověření by bylo nutné provést měření se vzorkem s danou hodnotou měrné tepelné kapacity.

Provedením tohoto experimentu byla stanovena metodologie, která bude po optimalizaci senzoru využita pro měření jeho citlivosti během realizace bakalářské práce.

1.5 Optimalizace měření citlivosti

Aby bylo možné dosáhnout při měření citlivosti senzoru lepších výsledků, bylo nutné, aby byla měřicí aparatura upravena a aby byly odstraněny nedostatky zjištěné při prvním měření citlivosti.

1.5.1 Úprava měřicího obvodu

Samotný měřicí obvod se ukázal jako správná koncepce. Při použití operačního zesilovače však nastává problém s definováním jeho parametrů. Zesílení OZ se může při použití typově shodného zesilovače mírně lišit a měření citlivosti by pak nebylo jednoduše opakovatelné.

Kvůli tomu byla do měřicího obvodu snímače přidána zpětná vazba, kterou bylo zesílení OZ zeslabeno a nastaveno na konstantní hodnotu i v případě že by se zesílení použitých různých operačních zesilovačů měnilo.

Na vstupu operačního zesilovače se při změně tepelného toku změní hodnota odporů a vlivem protékajícího proudu i napětí. Aby bylo měření přesnější, je vhodné použít zesilovač s co nejmenším rozdílem napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem. Zároveň by kvůli lepšímu výsledku citlivosti bylo vhodné, aby měl co nejnižší výstupní napětí při shodném vstupním napětí (nízké offsetové napětí) s co nejmenší změnou offsetu vlivem teploty.

Proto byl vybrán operační zesilovač AD8629ARZ. U tohoto operačního zesilovače je udáváno offsetové napětí maximálně $10 \mu\text{V}$ s typickou hodnotou $1 \mu\text{V}$ a driftem offsetu maximálně $0,02 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ s typickou hodnotou $0,002 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

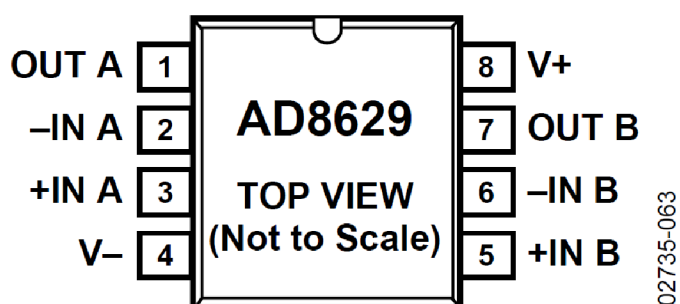
Rozsah napájecích napětí zesilovač je 0 až 5 V. Dříve použitý zesilovač měl napájecí napětí do 15 V, s čímž bylo nutné počítat při samotném měření a při stanovování pracovního bodu snímače. [10]

1.5.2 Návrh a výroba DPS sloužící k měření

Původní zapojení bylo realizováno pomocí nepájivého pole a za použití vývodových součástek. Během prvotního měření byly zjištěny nedostatky tohoto zapojení. U některých součástek nebyl kontakt v nepájivém poli dostatečný a samotné použití nepájivého pole mohlo vyvolávat šum nežádoucí při přesném měření citlivého termodynamického snímače.

Vybraný operační zesilovač je dodáván v SMD provedení ve standardizovaném pouzdře SOIC8. Použití patice pro umístění do nepájivého pole by z důvodu šumu taktéž nebylo vhodné, a kvůli tomu bylo nutné pro měření vytvořit desku plošných spojů (DPS).

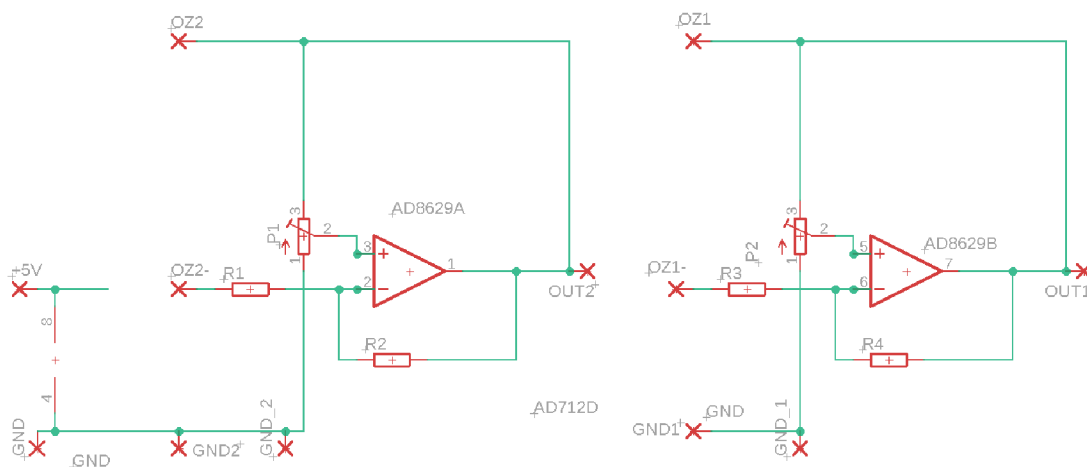
Zapojení jednotlivých výstupů pouzdra operačního zesilovače z katalogového listu, viz obrázek 12.



Obrázek 12: schématická značka operačního zesilovače AD8629 [10]

Na desku plošných spojů byly kromě operačního zesilovače umístěny plošky pro rezistory pro nastavení zpětné vazby a velikosti zesílení výstupního napětí, potenciometry pro nastavení pracovního bodu operačního zesilovače, a dostatečný počet kontaktních pájecích plošek pro připojení senzoru, napájecího napětí a pro připojení měřícího přístroje.

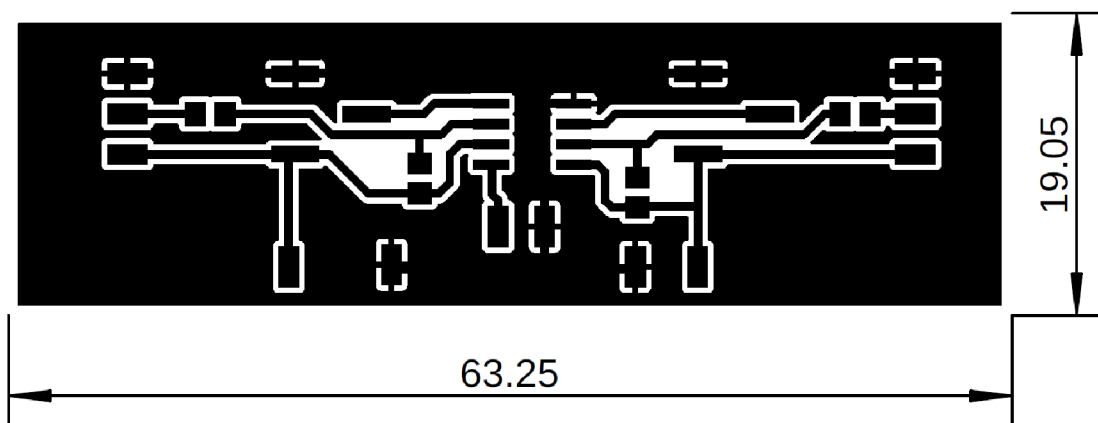
Návrh DPS byl proveden v programu EAGLE (verze 9. 6. 2), a to jak návrh schématu zapojení, viz obrázek 13 , tak návrh samotné desky plošných spojů.



Obrázek 13: Schéma zapojení operačního zesilovače termodynamického snímače

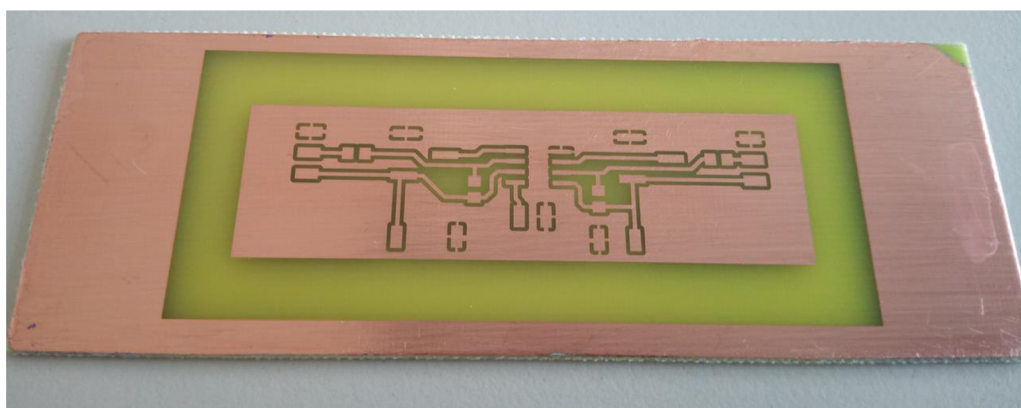
Při rozmístování součástek a navrhování desky bylo nutné dbát na co nejkratší cesty mezi součástkami a samotné vodivé cesty byly navrženy o šířce 0,5 mm, aby měly co nejmenší odpor a bylo zamezeno případným nežádoucím úbytkům napětí, které by mohly ovlivnit měření pomocí operačního zesilovače. Na okraje desky byl umístěny pájecí plošky pro připojení senzorů, následně také plošky pro připojení napájecího napětí a pro měření přístroji.

Aby byly omezeny chyby při měření, byla na desce ponechána plátovaná měď, připojená na zem, viz obrázek 14. Díky tomu je odpor vodiče (ve schématu označen GND) minimalizován a případný úbytek napětí způsobený proudy tekoucími zemní smyčkou minimalizován.



Obrázek 14: Finální podoba vodivých cest na DPS

Z návrhu byly následně vygenerovány data a byla vytvořena pozitivní předloha vrchní vodivé vrstvy pro výrobu jednovrstvé DPS. Jelikož byla pro výrobu nutná negativní předloha, musela být vyroben negativ vygenerované pozitivní předlohy. Pomocí ní byla následně vyrobena DPS. Byla vyrobena pouze jednovrstvá DPS bez nepájivé masky i bez povrchové úpravy, kterou bylo možné zhotovit v laboratoři, viz obrázek 15.



Obrázek 15: DPS pro termodynamický snímač

Jelikož nebyla na desku plošných spojů nanášena povrchová úprava, byla DPS bez zbytečných časových prodlev osazena. Na plošky určené pro přivedení napájecího napětí byly přímo připájeny vodiče, které budou následně při experimentu připojeny ke zdroji napětí. Na plošky určené pro kontaktování senzoru byla nanášena pájka, aby nedocházelo vlivem času a atmosférických podmínek k oxidaci.

1.5.3 Ověření zapojení a kontrolní měření citlivosti

Po osazení DPS bylo provedeno první kontrolní zapojení a měření pomocí dříve použitých termistorů TTS-1.8KC7-BZ s odporem 1,8 k Ω . Pro první měření byly použity odpory $R_1 = 0 \Omega$ a odpor R_2 nebyl zapojený, viz obrázek 13. Tím bylo dosaženo stejného schématu zapojení, jako v případě původního zapojení s operačním zesilovačem LM272M. Po připojení na napájecí napětí byla nastavována hodnota výstupního napětí. Aby bylo možné odečítání a byla zachována možnost poklesu i nárůstu hodnoty výstupního napětí při změně tepelného toku, bylo cílem dosáhnout napětí na výstupu přibližně 2 V. Pro experiment nebyl použit definovaný zdroj tepla.

Při nastavování výstupního napětí však nebylo možné nastavit hodnotu napětí jinak než na plné napájecí napětí nebo 0 V. Teoreticky bylo možné, že by tento problém byl způsoben příliš velkým zesílením, jelikož maximální zesílení operačního zesilovače AD8629ARZ je 120 dB neboli 1 000 000 oproti zesílení operačního zesilovače LM272M, jež je 80 dB což odpovídá zesílení 10 000. [10] [11]

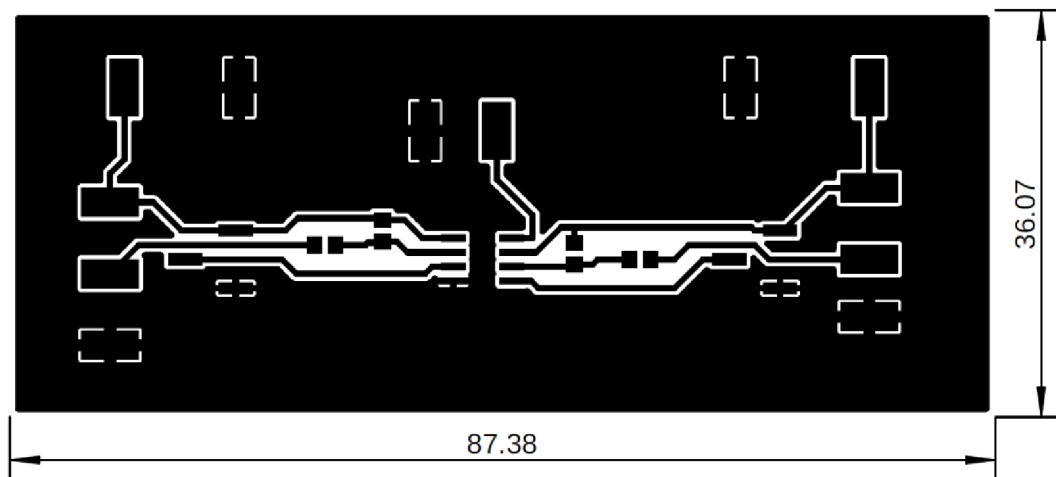
Zesílení by tedy bylo asi 100krát vyšší. Proto byly připájeny rezistory nastavující zpětnou vazbu, a to o velikosti 100 Ω a 1 M Ω . Ani při takto nastavené zpětné vazbě nedošlo ke změně, a nastavení výstupního napětí bylo stále možné pouze 0 nebo 5 V. Ani při zvyšování odporu R_1 , viz obrázek 13, se tento jev nikterak nezměnil.

Z toho bylo vydedukováno, že nejde o chybu při zavádění zpětné vazby. Jelikož se ani při zeslabování zpětné vazby tento jev neměnil, musela by tedy chyba být v operačním zesilovači nebo špatném zapojení.

Byla proto provedena výměna operačního zesilovače za jiný zesilovač stejného označení AD8629ARZ. Po výměně zesilovače a opětovném experimentu nedošlo ke změně jeho chování, a proto bylo vydedukováno, že chyba je především v zapojení.

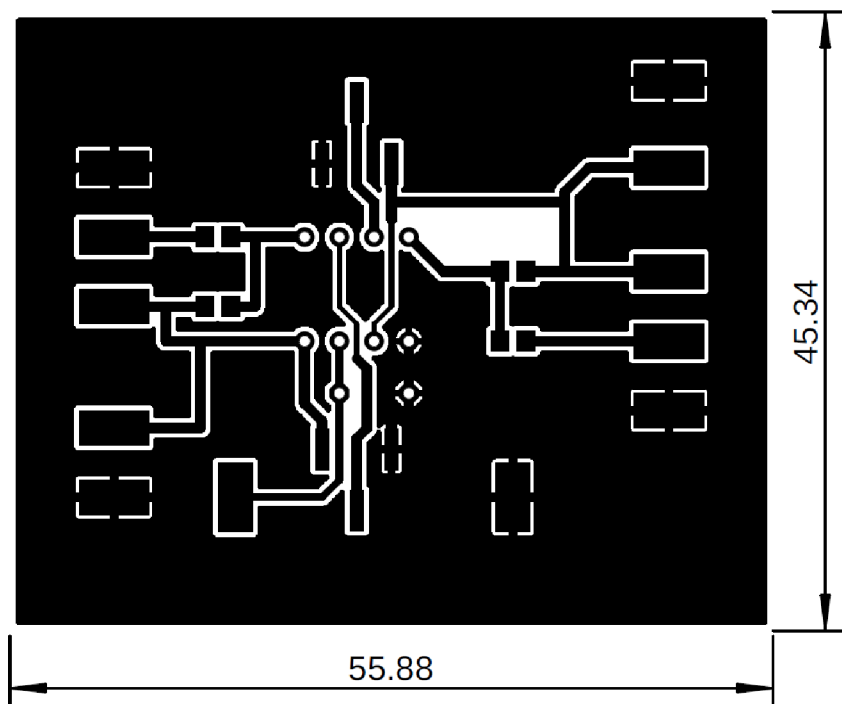
To, že výstupní napětí nabývalo pouze hodnot plného napájecího napětí nebo 0 V by značilo, že byla zavedena kladná zpětná vazba místo záporné. Při zkoumání samotného zapojení nebyla chyba na první pohled patrná ani ze schématu zapojení, viz obrázek 13, ani ze zapojení DPS, viz obrázek 15. Až po delším zkoumání a porovnání se schématickou značkou z katalogového listu byla nalezena chyba v podobě špatného modelu součástky, u kterého byly prohozeny vstupy.

Proto byla navržena nová DPS s modelem pouzdra SOIC8 součástky AD8629ARZ, u kterého byly správně rozmístěny jeho vývody, viz obrázek 16. Navíc byly použity větší pájecí plošky pro kontaktování přírodních vodičů pro napájení, pro kontaktování samotného senzoru a taktéž plošky pro umístění vývodu na měření výstupního napětí. Vytvořená DPS pak měla finální rozměry 9×4 cm.



Obrázek 16: Opravená DPS pro termodynamický snímač

Z časových důvodů byla taktéž zároveň vytvořena předloha pro DPS, ve které by byl použit původní operační zesilovač LM272M, viz obrázek 17, u kterého by tímto byly alespoň omezeny přechodové odpory, které mohou mít při zapojení na nepájivém poli nemalý vliv.



Obrázek 17: DPS pro měření s původním zesilovačem LM272M

Z programu byla vygenerována data pro výrobu motivu, aby bylo možné jednotlivé desky plošných spojů vytvořit. Byla objednána negativní filmová předloha, pomocí které byla následně vyrobena DPS pro termodynamický snímač.

Při výrobě byla použita DPS s plátovanou mědí o tloušťce 18 μm . Jelikož nebyly procházející proudy velké, byla tato tloušťka mědi dostatečná. Zároveň nebylo problematické leptání, které by v případě větší tloušťky mohlo být problematické kvůli několika tenkým vodičům.

Nejdříve byla DPS očištěna, následně vysušena a byl nalaminován negativní fotorezist. Poté byl fotorezist naexponován pomocí negativní filmové předlohy, viz obrázek 18. Následně byl motiv vyvolán a odstraněn přebytečný fotorezist, viz obrázek 19.



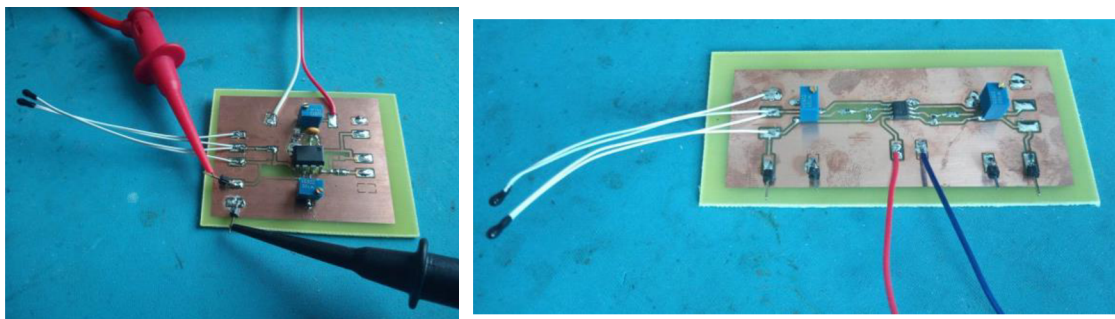
Obrázek 18: Expozice fotorezistu nalaminovaného na DPS



Obrázek 19: Odleptání mědi u DPS (vlevo pro zesilovač LM272M, vpravo pro AD8629ARZ)

Následujícím krokem bylo odleptání přebytečné mědi a poté odstranění (tzv. stripování) fotorezistu. Po optické kontrole byla deska očištěna a vysušena.

Po vyrobení byla DPS osazena součástkami, viz obrázek 20 a bylo provedeno její oživení. Nejdříve byla osazena a otestována deska pro zesilovač AD8629ARZ.



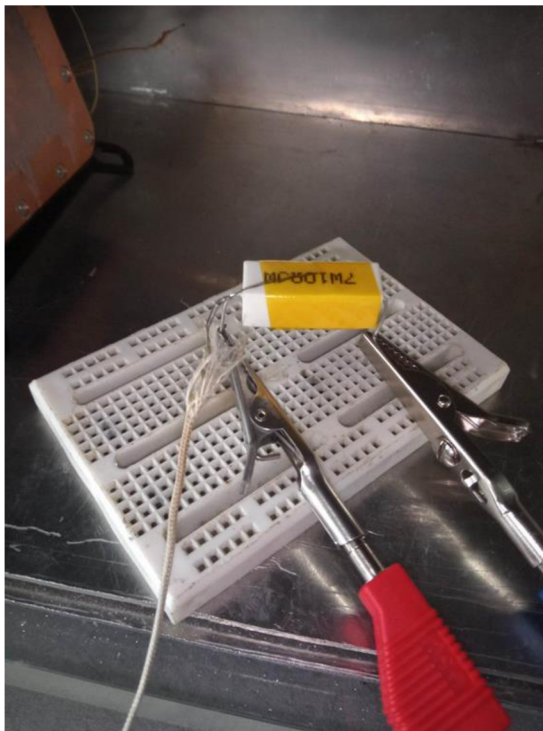
Obrázek 20: Osazení a oživení DPS termodynamického snímače (pro OZ LM272M vlevo a AD629ARZ vpravo)

Stejně jako v předchozím případě bylo nastavováno napětí na výstupu zesilovače tak, aby mělo hodnotu 2 V. Této hodnoty však nebylo možné dosáhnout ani s nově vyrobenou DPS, u které se nevyskytovala chyba zapojení. Jelikož byl použit stejný operační zesilovač, jako v případě první vyrobené desky plošných spojů, bylo teoreticky možné, ač nepříliš pravděpodobné, že byl při špatném zapojení poškozen. Kvůli této možnosti byl operační zesilovač AD8629ARZ nahrazen operačním zesilovačem LM358DT. Tento zesilovač byl vybrán kvůli momentální nedostupnosti zesilovače AD8629ARZ, a jelikož nebyl dostupný ani žádný jiný operační zesilovač s podobnými vlastnostmi, který by měl stejné rozvržení výstupních kontaktů. Ani po zapojení zesilovače LM358DT však k nápravě nedošlo, a proto byla použita pro měření DPS s operačním zesilovačem LM272M.

1.5.4 Úprava zdroje tepla pro měření

Při prvním měření se potvrdilo, že pomocí rezistoru je možné definovat množství tepla, respektive tepelného toku, díky ztrátovému výkonu na rezistoru, kterým bylo možné měnit velikost napětí na rezistoru. Jelikož byl použit výkonový rezistor o relativně velkých rozměrech $9,5 \times 48$ mm, trvalo při měření dlouhou dobu (cca 15 minut), než došlo k ustálení teploty po změně výkonu a bylo tedy problematické určit přesnou hodnotu výkonu, respektive následně dopočteného tepelného toku, kterou byl termodynamický snímač schopný zaznamenat. Proto byla při dalším experimentu zvolena alternativa, a při měření byl jako zdroj tepla použit výkonový rezistor o menších rozměrech ($10 \times 10 \times 26$ mm) s označením SQP7S-10RJB15 od výrobce TT Electronics. Výkonový rezistor SQP7S-10RJB15 měl katalogovou hodnotu odporu 10Ω , přičemž reálná hodnota byla změřena pomocí multimetru UNI-T UT 804 jako $9,95 \Omega$.

Následně bylo nutné provést měření povrchové teploty nového zdroje tepla, aby bylo možné také stanovit ze změřeného výkonu teplotu, jejíž změnu snímač zaznamená. Proto byl použit termočlánek typu K. Ten byl připevněn na povrch výkonového rezistoru pomocí kaptonové lepicí pásky. Pro zlepšení přestupu tepla mezi rezistorem a termočlánkem bylo nanášeno malé množství teplovodivé elektricky izolační pasty, viz obrázek 21.



Obrázek 21: Měření povrchové teploty pomocí termočlánku

Termočlánek byl zapojen do záznamníku dat TC-08, který byl přes USB propojen s počítačem. Na počítači byla změřená data zobrazována pomocí softwaru PicoLog od výrobce zařízení Pico Technology. Měření bylo provedeno při teplotě okolí 21,603 °C.

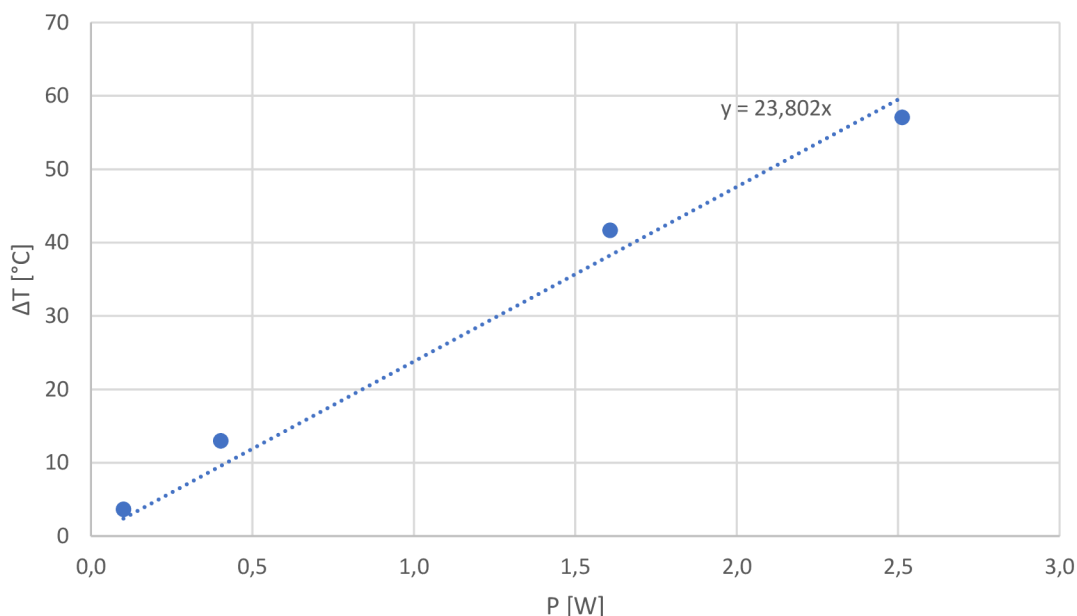
Tabulka 2: Závislost oteplení rezistoru na výkonu

T [°C]	ΔT [°C]	U [V]	P [W]
25,23	3,63	0,99949	0,1004
34,55	12,95	1,99943	0,4018
63,25	41,65	3,9996	1,6077
78,64	57,04	4,9997	2,5123

Během experimentu bylo měřeno napětí na rezistoru pomocí multimetru UNI-T UT 804, přičemž na rezistor bylo připojeno napětí ze zdroje Agilent E3631A. Díky

menšímu rezistoru probíhalo měření rychleji (doba ustálení teploty byla 8 minut). Výkon dodávaný do rezistoru byl vypočten dle rovnice (7).

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = \frac{0,99949^2}{9,95} = 0,1004 \text{ W} \quad (7)$$



Obrázek 22: Graf závislosti oteplení rezistoru na výkonu

Z grafického zpracování naměřených dat byla odečtena závislost oteplení na dodávaném výkonu dle rovnice (8).

$$\Delta T = 273,802 \cdot P \quad (8)$$

1.6 Návrh snímače pro termodynamický senzor

Aby bylo možné dosáhnout větší citlivosti termodynamického senzoru, bylo nutné zvolit koncept konstrukce snímače termodynamického senzoru.

V rámci prvotního experimentu byl použit kapkový termistor TTS-1.8KC7-BZ. Kapkové termistory se ve většině případů vyrábí nanešením tlusté vrstvy na nosný substrát, například sítotiskem termistorových past.

Aby bylo možné dosáhnout větší citlivosti, měl by nový snímač obsahovat menší množství teplocitlivého materiálu.

1.6.1 Návrh snímače

Vzhledem k nutnosti použití menšího množství materiálu bylo vhodné místo tlustovrstvé technologii využít technologii tenkovrstvou, a to vytvoření motivu pomocí jedné z vakuových metod, například metodou napařování či naprašování.

Při nanášení vakuovou metodou vyvstávají požadavky na kompatibilitu procesu. Jako substrát bylo možné použít křemíkový wafer, v případě použití materiálu, který bude vhodný k nanesení. Na křemíkovém waferu by bylo možné vytvořit struktury dostatečně jemné s malou tloušťkou nanesené vrstvy.

Materiál pro konstrukci snímače termodynamického senzoru by tedy musel být vhodný pro zvolenou metodu, případně by musela být zvolena metoda vhodná pro daný materiál. Zvolený materiál zároveň musí mít dostatečnou teplotní závislost odporu na teplotě, a tedy co nejvyšší hodnotu TKR, a zároveň by měla být hodnota TKR změřena i pro konkrétní materiál nanesený na wafer tenkovrstvou technologií, v ideálním případě pro tloušťku, kterou bude snímač následně tvořen. Snímač vytvořený pro termodynamický senzor musí mít dostatečnou velikost odporu, především ale musí být hodnota odporu předem dána. Zvolený materiál tedy musí mít změřenou hodnotu měrného odporu. Velikost vrstevového odporu musí být změřena i pro nanesenou tenkou vrstvu o zvolené tloušťce, kterou bude vytvořen snímač, jelikož se velikost vrstevového odporu může při nanesení tenké vrstvy velmi lišit oproti tabulkové hodnotě daného materiálu, a to i o několik desítek procent.

Jeden z materiálů, které bylo možno využít pro konstrukci, byl titan, především kvůli jeho dostupnosti pro výrobu senzoru, jež byla provedena ve výzkumném středisku CEITEC.

Titan je taktéž využíván k výrobě bolometrů díky teplotnímu koeficientu odporu $TKR = 3,5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ a měrnému odporu $\rho = 4,2 \times 10^{-7} \text{ } \Omega\text{m}$. Z důvodu vhodné velikosti měrného odporu, TKR a dostupnosti pro výrobu byl zvolen jako odporový materiál pro výrobu snímače termodynamického senzoru právě titan.

Ve výzkumném centru byl již proveden výzkum depozice tenké vrstvy titanu o tloušťce 80 nm, přičemž na těchto vzorcích byla změřena rezistivita takto naneseného titanu $\rho = (9,2 \pm 0,1) \times 10^{-7} \text{ } \Omega\text{m}$ a taktéž teplotní koeficient odporu $TKR = (2,6 \pm 0,2) \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. [12]

Tenkovrstvý materiál nanesený touto technologií tedy má větší rezistivitu, a to přibližně dvojnásobnou, a menší závislost odporu na teplotě, přibližně o jednu čtvrtinu. S těmito parametry bude nutné při návrhu senzoru počítat.

Po zvolení funkčního materiálu, který bude tvořit teplotně závislý odpor bylo nutné vyřešit izolaci, a to jak teplotní, tak elektrickou. Jelikož se ve většině případů u výroby polovodičových čipů na waferu využívá oxidu křemíku jako elektrické izolace obvodu od nosného křemíku, bude tento oxid vhodně izolovat od podkladu i navržený rezistor. Jelikož je oxid křemičitý zároveň dobrý teplotní izolant, zajistí částečně tepelnou izolaci mezi podkladním křemíkem a samotnou funkční vrstvou senzoru.

Posledními dvěma nejdůležitějšími parametry nutnými pro návrh konstrukce senzoru je jeho velikost a odpor. Teorie říká, že čím menší bude snímač, tím menší změnu tepla, respektive tepelného toku, zaznamená, protože dané množství tepla ohřeje menší snímač o větší teploty, zatímco to stejné množství tepla u většího snímače způsobí menší změnu teploty a tím menší změnu odporu. Zároveň je ale nutné, aby samotná citlivá vrstva odporu zabírala co největší plochu na vytvořeném čipu a aby byla odporová cesta dostatečně dlouhá, aby měl snímač termodynamického senzoru dostatečně velký odpor.

Jedním ze způsobů, jak dosáhnout dostatečně velkého odporu a zároveň velké plochy je vytvořením dlouhého odporového meandru z daného vodivého materiálu s dostatečně tenkou vodivou cestou. Tohoto principu vytváření odporové struktury se využívá například u bolometrů.

Velikost odporu závisí pak na délce a šířce cesty odporového meandru. Velikost meandru bude u konstruovaného senzoru omezena především jeho rozměry.

Jelikož je na čipu možné vytvořit nejen planární strukturu, ale i vytvořit strukturu 3D, bylo při návrhu nového snímače nutné rozhodnout o využití této možnosti. Samotný snímač pro termodynamický sensor, jak je patrné z obrázku 4, má tři vývody. U konstrukce z diskretních součástek však byly použity 2 dvouvývodové součástky. Při konstrukci 3D snímače pro termodynamický sensor by mohly být umístěny oba odporové meandry nad sebou. Bylo by možné toho využít a vytvořit součástku se 3 vývody a zjednodušit tak zapojování senzoru. Při tvorbě a následně při výrobě by však musela být vytvořena termoizolační vrstva mezi jednotlivými meandry, a návrh, především určení správné tloušťky termoizolační vrstvy, by bylo velmi problematické a ryze experimentální. Kvůli větší náročnosti by během výroby mohly vzniknout nejrůznější defekty a proces výroby by byl mnohem komplikovanější. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto o návrhu planárního snímače, kdy bude na jednom čipu vytvořen jeden odporový meandr a spojením dvou čipů nad sebou vznikne snímač pro termodynamický sensor.

Aby byl snímač jednoduše zkonstruovatelný, měl by být osově či středově symetrický. Symetrií bude zajištěna i větší homogenita průchodu tepla snímačem. Proto byl navržen čip ve tvaru čtverce, a jeho dva vývody byly umístěny do protilehlých rohů.

1.6.2 Konstrukce snímače

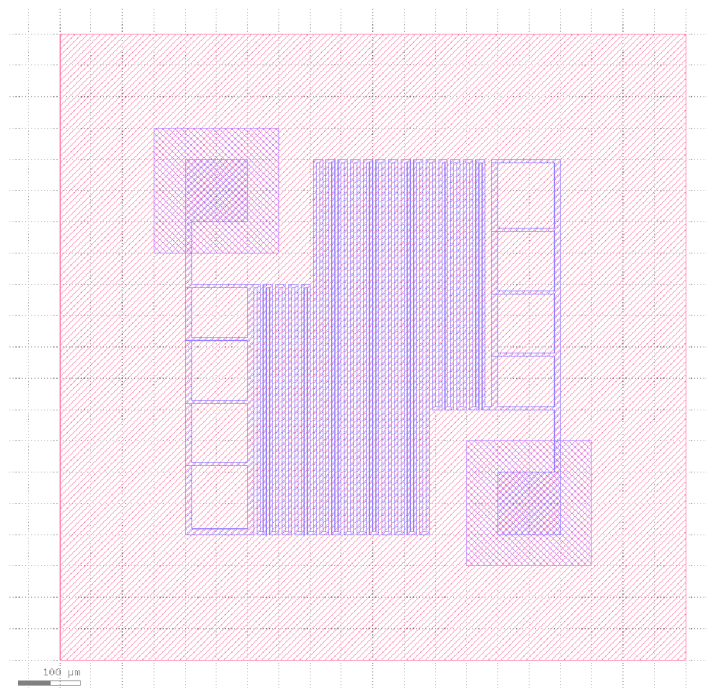
Při návrhu snímače bylo nejdříve rozhodnuto o jeho základním uspořádání. Na kraji čtvercového čipu nebyla umístěna žádná funkční část, ale na okraji čipu se nachází mezera z důvodu ochrany proti případnému poškození.

V protilehlých rozích se nachází kontaktní plošky, přes které bude čip připojen do obvodu termodynamického senzoru. Z kontaktních plošek vede samotná odporová cesta. Odporová cesta je na začátku u kontaktních plošek zesílena a propojena s další rovnoběžnou zesílenou vodivou cestou. Pod kontaktní ploškou je taktéž ploška z titanu, ze které přímo vychází odporová cesta z důvodu lepšího kontaktu mezi titanem a ploškou

určenou ke kontaktování snímače. Díky tomu je možné předejít případným poruchám, které by mohly při výrobě vzniknout.

Tyto dvě vodivé cesty o vyšší šířce jsou propojeny. Díky tomu je možné, aby byl případně výsledný odpor meandru dostaven, například pomocí laseru, v případě velké odchylky mezi jednotlivými čipy. Dále již pokračuje samotný odporový meandr, a to cestou o dané šířce.

Podle tohoto návrhu byl následně vytvořen model čipu v programu KLayout, viz obrázek 23. Základní návrh byl proveden s výslednými rozměry čipu 1×1 mm a s šířkou cesty $5 \mu\text{m}$. Šířka cesty $5 \mu\text{m}$ byla zvolena kvůli použité technologii. Výzkumném centru, kde byla posléze provedena výroba, udalo minimální šířku čára – mezera $3 \mu\text{m}$. V rámci návrhu proto byl zvolen s rezervou rozměr $5 \mu\text{m}$ pro šířku vodivé cesty, stejně tak pro mezeru mezi vodivými cestami, viz obrázek 23.



Obrázek 23: Čip pro termodynamický snímač (1×1 mm, šířka cesty $5 \mu\text{m}$)

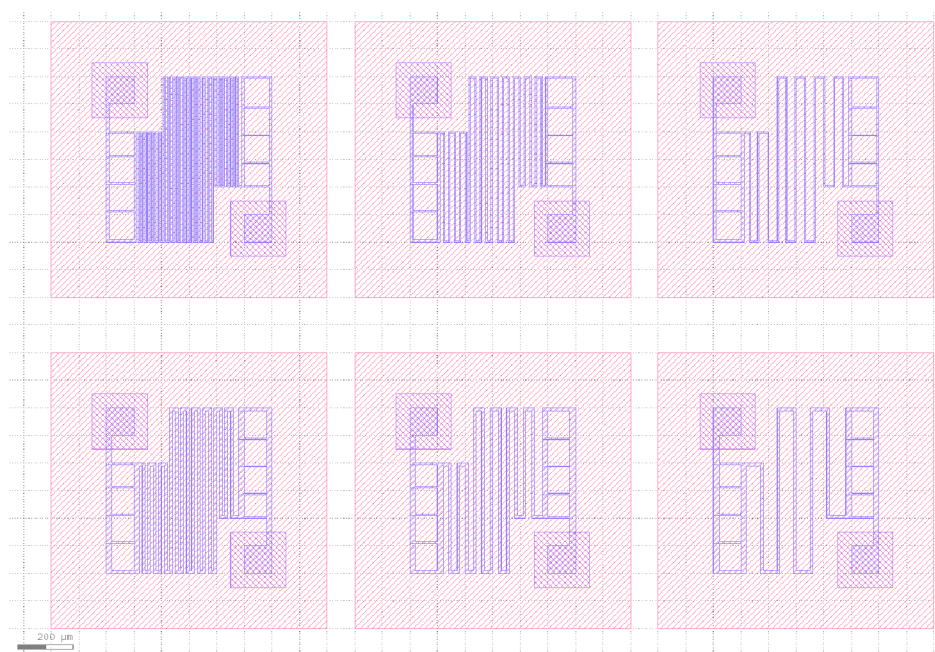
Po provedení návrhu pak bylo možné ze známých rozměrů vodivé cesty (délka, šířka a tloušťka nanosené vrstvy) vypočítat výsledný odpor vytvořené struktury, a to dle rovnice pro výpočet odporu (9). Byla změřena délka meandru $19,2$ mm, ostatní parametry byly buď nastaveny výrobou či jsou konstantami.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} = \rho \cdot \frac{l}{t \cdot w} = 9,2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{19,2 \cdot 10^{-3}}{80 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 44,2 \text{ k}\Omega \quad (9)$$

Navržené čipy pro termodynamický senzor měly být následně vyrobeny na waferu o průměru 8 cm. Díky tomu bylo možné navrhnout několik variant čipů, kvůli dostatku prostoru na waferu.

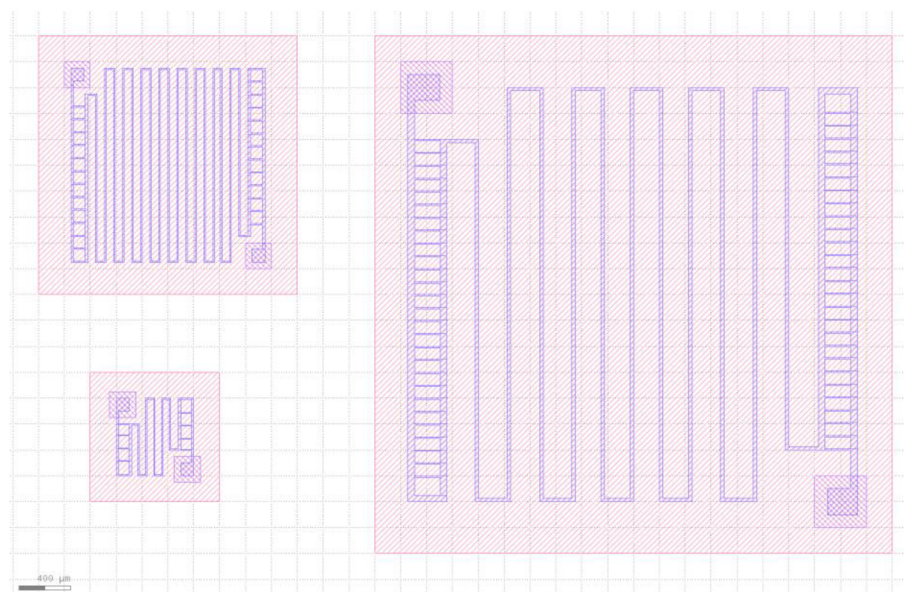
Proto byly u čipů pro termodynamický snímač provedeny modifikace. Byly navrženy čipy, u kterých byla zkracována délka meandru a tím byl snižován jejich odpor. Snižování délky bylo provedeno zvětšením vzdáleností mezi jednotlivými cestami. Tímto způsobem byly navrženy 3 čipy pro snímač s různými hodnotami odporů.

Druhou variantou byla změna šířky vodivé cesty. Ta byla zvýšena na dvojnásobek původní šířky, tedy 10 μm . Tímto byl zdvojnásoben počet variant ze 3 na 6, jak je patrné na obrázku 24.



Obrázek 24: Varianty čipů pro termodynamický snímač (1×1 mm)

Posledním způsobem, jak bylo vytvořeno více variant čipů pro snímač bylo zvětšení rozměrů samotných čipů. Základní rozměr byl 1×1 mm, proto byly navrženy varianty o rozměrech 2×2 a 4×4 mm, viz obrázek 25.



Obrázek 25: Čipy různých velikostí (4×4, 2×2 a 1×1 mm)

U snímače s rozměry 1×1 a 2×2 mm byla zvolena stejná šířka vodivých cest (5 a 10 µm), ale pro snímač 4×4 mm by tyto šířky vodivých cest vedly k velmi vysokým odporům, a z tohoto důvodu byla u varianty 4×4 mm navržena cesta o šířce 25 µm. Kvůli mnohem větším rozměrům čipu pak u této varianty nebyla navržena varianta s větší šířkou (50 µm), aby snímač odpovídal dvojnásobnou šířkou cesty postupu návrhu u předchozích, ale byly navrženy pouze 3 varianty s rozměrem 4×4 mm.

Stejně jako u prvního navrženého čipu byly následně změřeny délky vodivých cest a dle rovnice (9) dopočteny výsledné odpory pro jednotlivé konfigurace. Tyto vypočtené hodnoty pak byly zaznamenány do tabulek, pro čipy o rozměrech 1×1 mm do tabulky 3, pro čipy o rozměrech 2×2 mm do tabulky 4 a pro čipy o rozměrech 4×4 mm do tabulky 5. Do stejných tabulek pak byly zaznamenány hodnoty odporů, které byly změřeny na vyrobených čipech.

Tabulka 3: Velikosti odporů pro čipy o rozměrech 1×1 mm

Šířka cesty [µm]	Délka cesty [mm]	Vypočtený odpor [kΩ]	Změřený odpor [kΩ]
5	6,0	13,8	17,0
	10,0	23,0	28,9
	19,2	44,2	55,4
10	3,2	3,7	4,6
	6,0	6,9	8,8
	9,2	10,6	12,9

Tabulka 4: Velikosti odporů pro čipy o rozměrech 2×2 mm

Šířka cesty [μm]	Délka cesty [mm]	Vypočtený odpor [kΩ]	Změřený odpor [kΩ]
5	38,6	88,8	112,6
	88,1	202,6	243,9
	172,8	397,4	483,0
10	26,6	30,6	36,9
	52,8	60,7	74,9
	91,8	105,6	120,5

Tabulka 5: Velikosti odporů pro čipy o rozměrech 4×4 mm

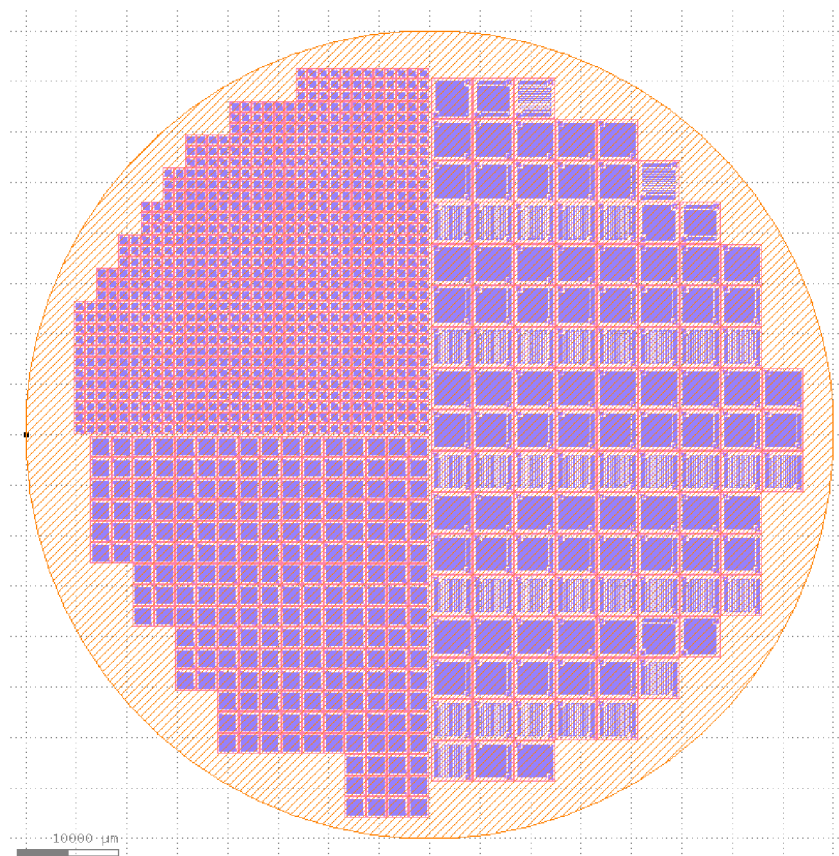
Šířka cesty [μm]	Délka cesty [mm]	Vypočtený odpor [kΩ]	Změřený odpor [kΩ]
25	37,8	17,4	20,8
	69,8	32,1	37,1
	181,8	83,6	103,4

Po dokončení návrhu byla provedena kontrola a všechny varianty čipů pro termodynamický senzor byly znovu ověřeny, zda během návrhu nevznikla někde v zapojení chyba.

Následujícím krokem bylo provedení tzv. panelizace neboli kopírování jednotlivých navržených motivů na rozměry waferu. Jelikož budou pro výrobu senzoru nutné dva čipy, a hrozí riziko poškození kvůli malým rozměrům, bylo rozmístěných čipů s nejmenším rozměrem (1×1 mm) nejvíce.

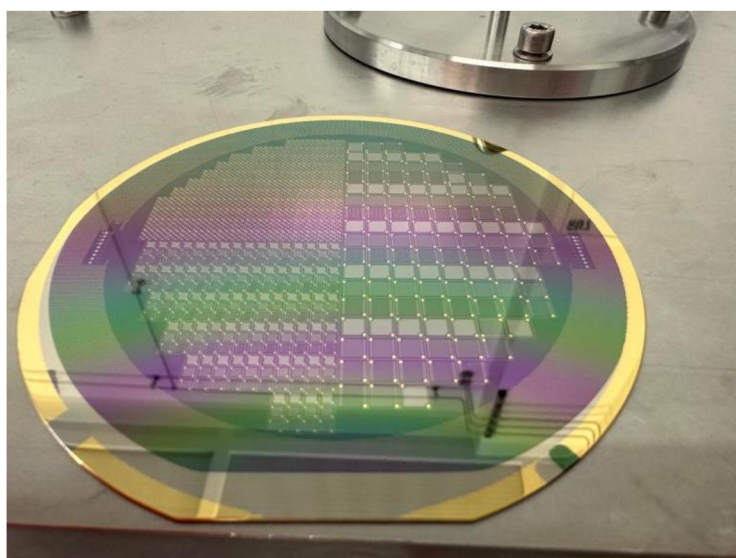
Samotný wafer byl při panelizace rozdělen na 3 části, aby bylo možné jednodušším způsobem následně jednotlivé čipy nařezat a od sebe rozdělit.

Výsledný návrh a provedená panelizace je pak patrná z obrázku 26.



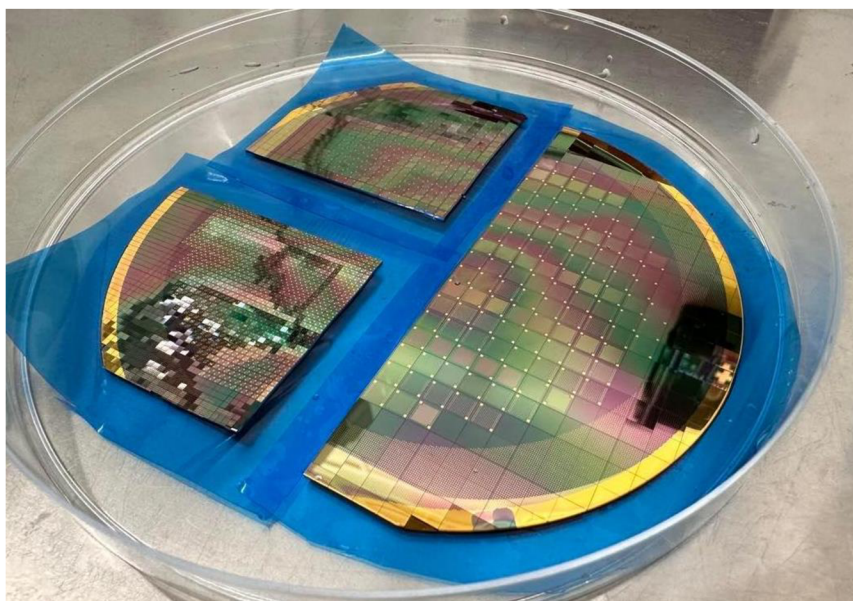
Obrázek 26: Rozmístění čipů s odporovou vrstvou na waferu

Takto vytvořené podklady s návrhem celého waferu byly odeslány do výzkumného centra, kde byla provedena výroba. Samotný vyrobený wafer se všemi čipy pak je patrný z obrázku 27.



Obrázek 27: Senzory vyrobené na waferu

Samotný wafer pak byl rozřezán, aby vznikly samotné čipy pro výrobu senzoru. Nařezaný wafer pak byl umístěn na plastovou podložku, viz obrázek 28.



Obrázek 28: Nařezané čipy umístěné na plastové podložce

1.6.3 Vytvoření snímače

Z vyrobených čipů bylo poté nutné vytvořit jednotlivé snímače pro měření. Pomocí pinzety byly z plastového podkladu, viz obrázek 28, odnímány jednotlivé čipy.

Samostatné čipy pak byly umístěny do petriho misek dle jejich rozměrů, jelikož bylo nutné před jejich používáním odstranit fotorezist nacházející se na vrchní straně čipu, viz obrázek 29.



Obrázek 29: Jednotlivé čipy v petriho misce (velikost čipů 2×2 mm)

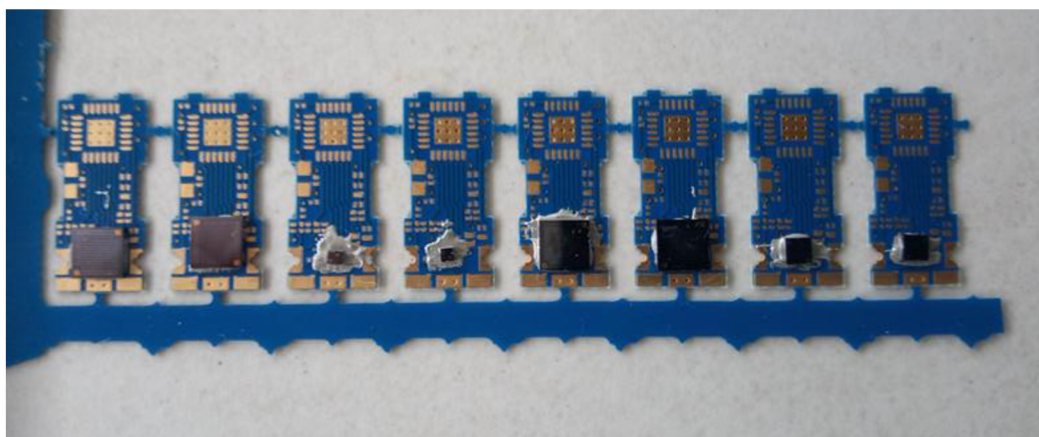
Odstranění bylo provedeno pomocí acetonu, který se nalil do petriho misek. Ty byly poté umístěny do ultrazvukové čističky naplněné vodou. Díky ultrazvuku v kombinaci s rozpouštědlem (acetonem) byl fotorezist odstraněn, přičemž odstraňování probíhalo přibližně 10 minut.

Jednotlivé petriho misky pak byly vyjmuty z ultrazvukové čističky a pomocí stlačeného vzduchu následně byly jednotlivé čipy osušeny od acetonu.

Po usušení byly jednotlivé čipy rozříděny podle velikostí odporů, které byly měřeny pomocí multimetru METEX M-3890D USB.

Změřené hodnoty odporů se lišily oproti návrhu, v některých případech o cca 25 %. Změřené hodnoty odporů byly zaznamenány do tabulky, pro čipy o rozměrech 1×1 mm do tabulky 3, pro čipy o rozměrech 2×2 mm do tabulky 4 a pro čipy o rozměrech 4×4 mm do tabulky 5. Jelikož se hodnoty mezi sebou lišily i o několik procent, byly při měření vybírány čipy s co nejbližšími hodnotami odporů, aby nebylo nutné je dostavovat. Tyto čipy byly následně použity pro vytvoření senzorů.

Vybrané čipy byly následně umístěny na nosný substrát, na který byly přilepeny pomocí epoxidového lepidla H31D 1OZ. Lepidlo bylo následně vytvrzeno při teplotě 150 °C po dobu 1 hodiny. Jelikož kontaktování probíhalo metodou bondování, a pro výrobu senzoru musí být dva čipy nad sebou, byly všechny čipy přilepeny na samostatné ohebné DPS se zlacenými kontakty, což je patrné z obrázku 30.



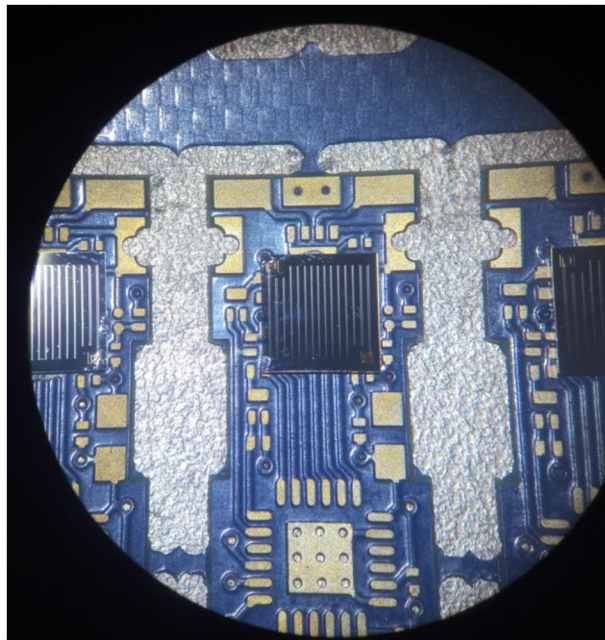
Obrázek 30: Přilepení čipů na ohebnou DPS

Při kontrole bylo zjištěno, že vodivé lepidlo, které bylo použito pro přilepení čipů na substrát, zkratovalo plošky určené pro kontaktování. Z tohoto důvodu bylo nejdříve nutné pod mikroskopem přerušit vodivé cesty k ploškám, což bylo provedeno pomocí pinzety a jehly. Čipy byly následně nakontaktovány na zlacené kontakty pomocí mikrodrátku o průměru 25 μm .

Spojením dvou vytvořených DPS proti sobě pak byl vyroben jeden nimač pro termodynamický senzor. Čipy byly přilepeny pomocí lepidla, které bylo následně vytvrzeno při teplotě 150 °C. Vytvrzení trvalo 1 hodinu.

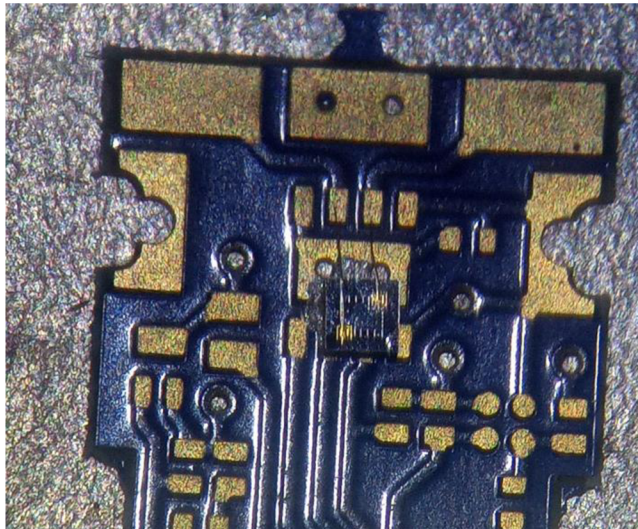
Na velké plošky na DPS následně bylo nutné připojit vodiče, které povedou k operačnímu zesilovači. Přímé připojení vodičů pájením na plošky, na které byly kontaktovány mikrodrátky nebylo možné provést bez chyby. Při každém pokusu o kontaktování se jeden z vodičů nepodařilo připájet, případně byl mikrodrátek roztaven pájkou a nebylo možné senzor opravit.

Z tohoto důvodu byly vytvořeny nové snímače na stejných DPS. Samotné čipy byly posunuty na DPS dále od kraje, viz obrázek 31.



Obrázek 31: Přilepení čipu (4×4 mm) na DPS

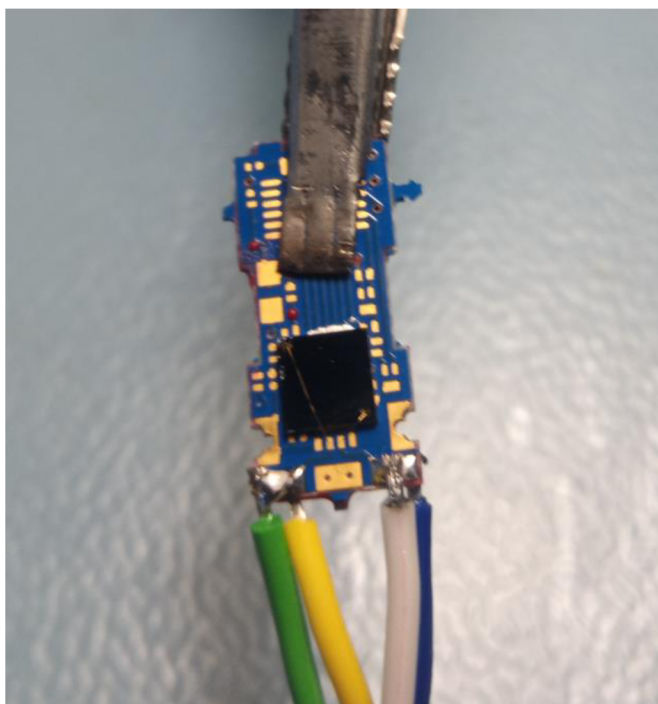
Díky posunutí čipu bylo umožněno použití malých kontaktních plošek pro přibondování mikrodrátků, viz obrázek 32 a s nimi propojené velké plošky využít pro připojení přívodních vodičů.



Obrázek 32: Připojení čipu (1×1 mm) pomocí mikrodrátků

Desky s nakontaktovanými čipy byly následně slepeny k sobě, čímž vzniknul výsledný snímač. Lepidlo bylo vytvrzeno při teplotě 150 °C po dobu dvou minut.

Na kontaktní plošky senzoru byly následně připájeny čtyři přívodní vodiče, jak je patrné z obrázku 33.



Obrázek 33: Připájení vodičů na snímač (4×4 mm)

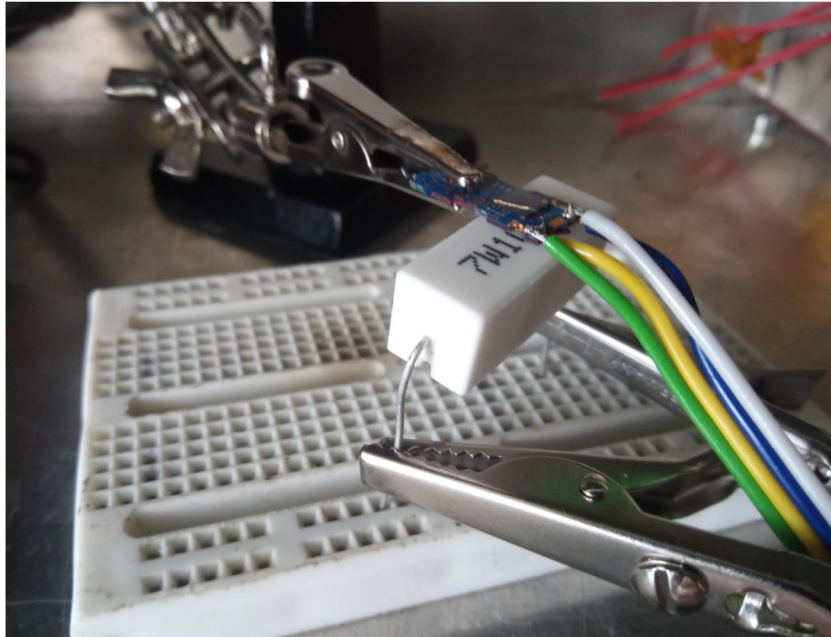
1.7 Ověření citlivosti snímače a termodynamického senzoru

U vytvořeného senzoru bylo nutné ověřit, jakou minimální hodnotu tepleného toku, respektive tepla, je schopný zkonstruovaný termodynamický snímač zaznamenat.

1.7.1 Průběh měření

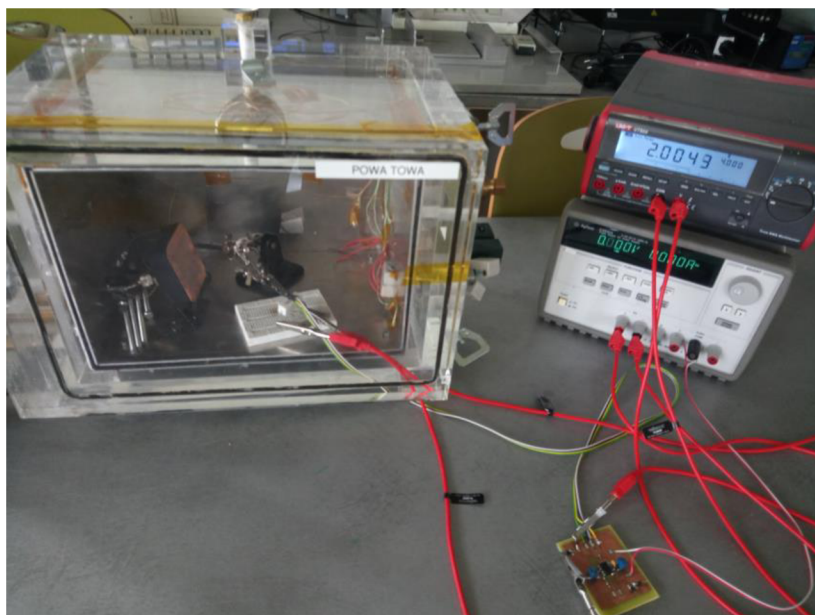
Pomocí čtyř vodičů byl snímač připojen na DPS s operačním zesilovačem (LM272M, viz obrázek 20 vlevo), pomocí kterého bylo následně provedeno měření.

Jako zdroj tepla, respektive tepelného toku, byl použit výkonový rezistor SQP7S-10RJB15 o rozměrech 10×10×26 mm. Samotný snímač pro termodynamický senzor byl umístěn pomocí držáku přímo nad výkonový rezistor, a to co nejbližše ke středu, jak je patrné z obrázku 34.



Obrázek 34: Umístění snímače (4×4 mm) na výkonový rezistor

Jelikož se při prvním měření s kapkovými termistory ukázalo jako vhodné oddělit měřený snímač od okolí, tak byl spolu s výkonovým odporem umístěn do uzavíratelného boxu. Kvůli malému množství průchodek bylo nutné nechat dvířka boxu pootevřená a box samotný alespoň částečně utěsnit pomocí lepicí pásky, viz obrázek 35.



Obrázek 35: Měření citlivosti termodynamického senzoru

Pro měření byl použit multimetr UNI-T UT 804, který snímal výstupní napětí operačního zesilovače. Operační zesilovač byl napájen jedním z kanálů zdroje napětí Agilent E3631A. Napájecí napětí zesilovače bylo nastaveno na 10 V.

Druhý výstup ze zdroje napětí byl připojen na výkonový rezistor a tvořil tedy zdroj tepelného toku při měření.

Jako první byl měřen senzor o velikosti čipu 4×4 mm s nejkratší vodovou titanovou cestou o šířce $25 \mu\text{m}$ (změřený odpor senzoru $21,1 \text{ k}\Omega$).

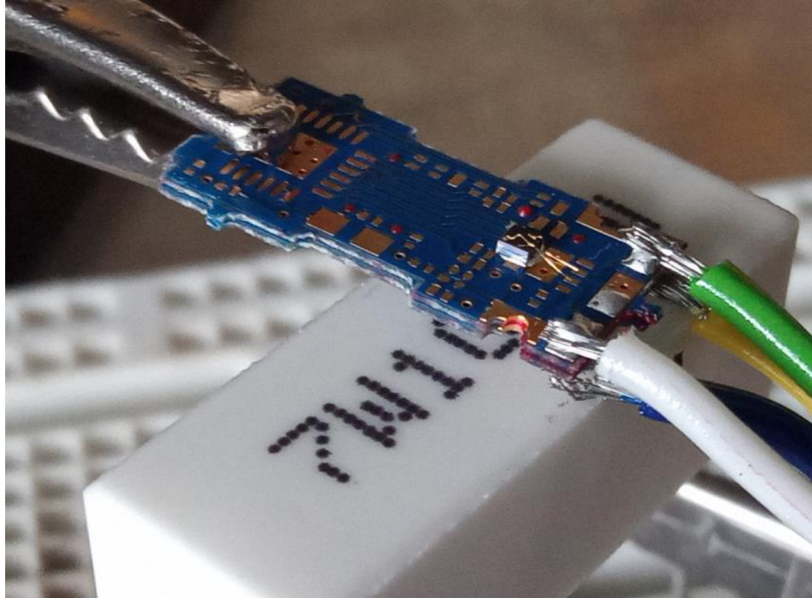
Pomocí víceotáčkového trimmeru byla nastavena napětí na výstupu $2,05 \text{ V}$. Hodnota napětí i po ustálení kolísala, a to o 5 mV , což je mnohem méně oproti původnímu měření s kapkovými termistory TTS-1.8KC7-BZ, kdy se hodnota na výstupu měnila o $0,2 \text{ V}$. Kvůli tomuto kolísání musela být stanovena hodnota odchylky od původního napětí, při které lze považovat změnu napětí za způsobenou vnější změnou měřeného parametru, a ne za šum vlivem kolísání. Těmito hodnotami bylo zvoleno napětí $2,035$ a $2,065 \text{ V}$.

Během měření byla postupně zvyšována hodnota napětí na rezistoru a byla pozorována změna hodnoty napětí na výstupu operačního zesilovače. Po zvýšení napětí na rezistoru bylo vždy nutné vyčkat, než dojde k ustálení přechodného jevu. Ke snížení hodnoty výstupního na $2,035 \text{ V}$ došlo po nastavení napětí na rezistoru $0,15 \text{ V}$ a po ustálení, které trvalo cca 8 minut.

Následně byla změřena přesná hodnota napětí na rezistoru $U = 0,1482 \text{ V}$ a přesná hodnota měřeného odporu $R = 9,95 \Omega$.

Stejným postupem byla následně ověřována nejmenší měřitelná hodnota tepelného toku u snímače o rozměrech $1 \times 1 \text{ mm}$ s nejkratší titanovou vodivou cestou o šířce $10 \mu\text{m}$

se změřeným odporem $R = 5,31 \text{ k}\Omega$, viz obrázek 36. U tohoto snímače byla změřena rozpoznatelná změna na výstupu při napětí na rezistoru $U = 0,14 \text{ V}$ (pomocí multimetru bylo změřeno napětí $0,1381 \text{ V}$).



Obrázek 36: Umístění snímače ($1 \times 1 \text{ mm}$) na výkonový rezistor

1.7.2 Výsledky měření citlivosti

Ze změřených hodnot pro dva senzory byly následně dopočteny jejich parametry. Jelikož byl senzor umístěn na DPS velkých rozměrů, nejsou tyto výsledky zcela přesné. Druhým důvodem nepřesnosti je idealizování měření za účelem zjednodušení výpočtů.

Výkon ztracený na výkonovém rezistoru se v ideálním případě celý přemění na teplo a je tedy za tohoto předpokladu možné dopočítat tepelný výkon rezistoru při známém změřeném napětí a hodnotě rezistoru dle rovnice (7)

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = \frac{0,1482^2}{9,95} = 2,21 \text{ mW} \quad (7)$$

Druhým zjednodušením je předpoklad, že ztrátový výkon rezistoru je vyzařován homogenně ve všech směrech. Ve skutečnosti vyzařování nemůže být homogenní ať už z důvodu nerovnoměrného ohřevu keramiky výkonového rezistoru, či rozdílného tepelného odporu vzduchu a DPS s měřeným snímačem. Při uvažování homogenního pole a zanedbání ztrát vedením přes vývody rezistoru pak je možné stanovit hustotu tepelného toku při známých rozměrech rezistoru. Plocha povrchu výkonového rezistoru je určena z jeho geometrických rozměrů ($10 \times 10 \times 26 \text{ mm}$) a označena $S_R = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Hustota tepelného toku pak v ideálním případě je dle rovnice (10)

$$q = \frac{P}{S_R} = \frac{2,21 \cdot 10^{-3}}{1,24 \cdot 10^{-3}} = 1,78 \text{ W/m}^2 \quad (10)$$

Tepelný tok skrze senzor je možné dopočítat z hustoty tepelného toku a známých rozměrů senzoru. Byl měřen snímač o rozměrech čipu 4×4 mm, a jeho plocha tedy je 16 mm². Samotným snímačem v ideálním případě prochází tepelný tok dle rovnice (11)

$$Q = \frac{\Delta W}{\Delta t} = P = q \cdot S_s = 1,78 \cdot 16 \cdot 10^{-6} = 28,5 \text{ } \mu\text{W} \quad (11)$$

Ze změřené charakteristiky byla následně dopočtena změna teploty, při které došlo k rozpoznatelné změně napětí na výstupu dle rovnice (8)

$$\Delta T = 23,802 \cdot P = 23,802 \cdot 0,00221 = 0,053 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

Použitý výkonový rezistor měl taktéž menší hmotnost, a to 5,264 g a díky menší hmotnosti zároveň s menší zaznamenanou změnou teploty byla zaznamenána menší změna tepla dle rovnice (1). Měrná tepelná kapacita byla uvažována stejná jako při prvním experimentu.

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,00524 \cdot 800 \cdot 0,053 = 223 \text{ mJ} \quad (1)$$

Pomocí stejného postupu byly následně hodnoty tepelného toku dopočteny i pro zkoumaný snímač o rozměrech 1×1 mm, přičemž byly vypočteny hodnoty výkonu rezistoru $P = 1,92 \text{ mW}$, hustoty tepelného toku $q = 1,55 \text{ W/m}^2$, tepelného toku skrz samotný senzor $Q = 1,59 \text{ } \mu\text{W}$, zaznamenaná změna teploty $0,046 \text{ } ^\circ\text{C}$ a změna tepla $\Delta Q = 193 \text{ mJ}$.

1.7.3 Vyhodnocení zjištěných výsledků

Pomocí navrženého senzoru byly dosaženy lepší výsledky, než jakých bylo dosaženo pomocí termistorů TTS-1.8KC7-BZ, ačkoli není výsledek tak dobrý, jak bylo předpokládáno. Je možné, že nedostatečná citlivost bylo způsobena špatným tepelným kontaktem mezi snímačem a zdrojem tepla. Zároveň je možné, že kvůli použité flexibilní DPS byla zhoršena teplotní izolace mezi jednotlivými rezistory a tím zhoršeny vlastnosti senzoru. Z tohoto důvodu by bylo vhodné vytvořit nové uspořádání citlivých rezistorů a jejich propojení mezi sebou, které by bylo speciálně koncipováno pro danou aplikaci, taktéž s ohledem na možnosti zapouzdření.

Jelikož během měření kolísalo napětí na výstupu operačního zesilovače, bylo nutné měřit s rezervou, při jejímž překročení je teprve možné považovat změnu za způsobenou vnější měřenou veličinou. Rozkmit napětí na výstupu byl přibližně 50krát menší než při použití původního termistoru.

Vyřešením problému kmitání napětí na výstupu by bylo možné měřit s mnohem větší přesností a tím i mnohem menší tepelné toky či změny teplot. Jednou z možností by mohlo být digitální zpracování dat a následné omezení rozkmitu.

Jelikož nebyly měřeny citlivosti všech vytvořených senzorů, bylo by vhodné provést měření pomocí všech vytvořených senzorů a vyhodnotit vliv tloušťky odporové cesty a odporu na vlastnosti senzoru.

2. ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byla popsána problematika měření tepla a teploty pomocí teplotních senzorů.

U nejrozšířenějšího typu bolometrů je absorpcí záření zvýšena teplota a tím změněn odpor měřeného rezistoru. V práci je popsána základní konstrukce bolometrů, nejdůležitější parametry bolometrů, a následně i mikrobolometrů a mikrokalorimetrů s uvedením jejich typických a limitních hodnot.

V rámci bakalářské práce byl zkonstruován termodynamický senzor. Jako snímač byly použity dva kapkové termistory TTS-1.8KC7-BZ. Aby byly od sebe teplotně odděleny, byla mezi ně vložena kaptonová fólie a k měřenému objektu byly připevněny kaptonovou lepicí páskou, viz obrázek 9. Takto vytvořený termodynamický snímač byl použit pro měření teploty, respektive tepelného toku. Jako definovaný zdroj sloužil rezistor, kterým protékal proud, čímž byla stanovena metodologie měření. V laboratoři byla experimentálně ověřena hodnota změny teploty, kterou je termodynamický senzor se zkonstruovaným snímačem schopen zaznamenat.

Minimální změna teploty vypočtená ze změřené závislosti byla $0,26\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž šlo o změnu tepla $2,08\text{ J}$. Jelikož bylo během měření provedeno několik zjednodušení a nebyla známa přesná hodnota tepelné kapacity rezistoru, nejsou tyto změřené hodnoty přesné, ale jsou zatíženy značnou chybou. Tímto měřením byla nastavena metodologie pro další experimentální měření.

Aby bylo možné přesněji měřit citlivost termodynamického snímače, byla v další části bakalářské práce vytvořena DPS za účelem omezení přechodových odporů oproti nepájivému poli kvůli zvýšení přesnosti měření. Bylo plánováno vytvořit i DPS se zesilovačem s lepšími parametry, aby bylo dosaženo vyšší citlivosti. Výrobu a zprovoznění této DPS provázely problémy, a proto bylo měřeno pomocí původního zesilovače LM272M.

Aby bylo možné přesněji a efektivněji měřit citlivost termodynamického snímače a nejmenší hodnotu tepla, respektive teploty, bylo nutné upravit měřící experiment. Výkonový rezistor se ukázal jako nevhodný pro jeho příliš velkou tepelnou kapacitu a tím způsobenou dlouhou dobu odezvy na změnu elektrického proudu a dodávaného výkonu. Z tohoto důvodu byl použit výkonový rezistor menšího rozměru ($10\times 10\times 26\text{ mm}$), u kterého byla následně změřena závislost změny teploty na výkonu, viz obrázek 25 a tabulka 2.

Původní senzor zkonstruovaný z diskrétních součástí měl několik nevýhod, kvůli kterým nebylo možné dosáhnout lepších výsledků. Šlo o příliš velké rozměry senzoru, množství teplocitlivého materiálu, respektive pouzdrící hmoty na kapkovém termistoru a špatný tepelný kontakt mezi senzorem a měřeným zdrojem tepla.

Za účelem dosažení vyšší citlivosti byl navržen nový senzor pro termodynamický snímač, viz obrázky 23 až 25. Senzor byl realizován pomocí odporové titanové tenké vrstvy na křemíku, viz obrázek 27.

Z jednotlivých křemíkových čipů s odporovými vrstvami byly vytvořeny snímače pro termodynamický senzor. Čipy byly následně připevněny na flexibilní DPS, které sloužily jako nosný substrát, viz obrázek 31 a pomocí zlatého mikrodrátku byly nakontaktovány na pájecí plošky, viz obrázek 32. Spojením dvou substrátů s čipy byl vytvořen samotný snímač, který byl propojen pomocí připájených vodičů, viz obrázek 33. Následně byla změřena citlivost vytvořeného senzoru. Oproti původnímu senzoru z kapkových termistorů TTS-1.8KC7-BZ bylo dosaženo menší minimální detekované změně teploty (0,053 a 0,046 °C oproti původní změně 0,26 °C). Při idealizování situace by to znamenalo hustotu tepelného toku 1,82 a 1,55 W/m² oproti původním 4,97 W/m². Pomocí vytvořeného senzoru bylo taktéž dosaženo zaznamenání menší změny tepla, a to desetinásobně (223 a 193 mJ oproti měření pomocí TTS-1.8KC7-BZ, u nichž bylo zaznamenáno 2,08 J).

V případě pokračování ve výzkumu by bylo vhodné změřit citlivost všech vytvořených senzorů a charakterizovat vliv šířky odporové vrstvy a odporu na citlivost. Aby bylo dosaženo větší citlivosti, bylo by vhodné využít operačního zesilovače s větším zesílením a nebo upravit měření a vyhodnocování výstupních dat tak, aby bylo omezeno kolísání na výstupu.

LITERATURA

- [1] ŘEZNÍČEK, M. *Optimalizovaný termodynamický senzor na bilančním principu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 63 s. Vedoucí dipolmové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, Csc.
- [2] ŠALAMOUN, V. *Studium teplotních parametrů nanostrukturovaného senzoru pro detekci IR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vojtěch Svatoš.
- [3] NIKLAUS, F. VIEIDER, CH. JAKOBSEN, H. *MEMS-Based Uncooled Infrared Bolometer Arrays – A Review*. [online]. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/6836/68360D/MEMS-based-uncooled-infrared-bolometer-arrays-a-review/10.1117/12.755128.full?SSO=1>
- [4] YADAV, P. V. K. a kolektiv. *Advancements of uncooled infrared microbolometer materials: A review*. [online]. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424722002497>
- [5] EPELDAUER, G. MIGDALL, A. *Characterization of a High Sensitivity Composite Silicon Bolometer*. [online]. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/231012692_Characterization_of_a_High_Sensitivity_Composite_Silicon_Bolometer
- [6] FENG, J. SVATOŠ, V. LIU, X. CHANG, H. *High-performance microcalorimeters: Design, applications and future development*. [online] [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165993618304217>
- [7] ŘEZNÍČEK, M. *Termodynamické senzory na principu bilanční rovnováhy*. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014. 93 stran, 5 příloh. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [8] SR PASSIVES. *Cement resistor*. [online]. [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/d2d66de62be8f045452af502fd3b634f/SR-Passives-CR-W.pdf>
- [9] XICON. *Cement power resistor (RoHS Compliant)*. [online]. [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/catalog/specsheets/XC-600041.pdf>
- [10] AD8628/AD8629/AD8630 (Rev. K) [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/4eaf0c682e3035ab5714e0bb38289705/AD8628_8629_8630.pdf
- [11] Fairchild Semiconductor. *L272M datasheet* [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/114191/FAIRCHILD/L272M.html>
- [12] GABLECH, I. et al., *Preparation of [001] oriented titanium thin film for MEMS applications by Kaufman ion beam source*. [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solidstateionics.2023.101000>

z: <https://www.confer.cz/nanocon/2017/291-preparation-of-001-oriented-titanium-thin-film-for-mems-applications-by-kaufman-ion-beam-source>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
NTC	záporný teplotní součinitel odporu
PTC	kladný teplotní součinitel odporu
IR	infračervené záření
NETD	práh teplotní citlivosti
NEP	ekvivalentní šumový výkon
MEMS	mikro elektromechanický systém
PMMA	polymethylmetakrylát
RTD	teplotně závislý odpor
RTDS	aktivní odporový termodynamický snímač
OZ	operační zesilovač
SMD	součástka pro povrchovou montáž
DPS	deska plošných spojů

Symboly:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
Q	teplo	(J)
m	hmotnost	(kg)
c	měrná tepelná kapacita	(J/kg·K)
T	teplota	(°C)
α, TCR, TKR	teplotní součinitel odporu	(1/K)
R	odpor	(Ω)
λ	vlnová délka	(m)
K_V	citlivost	(V/W)
P	výkon	(W)
q	hustota tepelného toku	(W/m ²)