



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

STUDIUM TEPLOTNÍCH PARAMETRŮ NANOSTRUKTUROVANÉHO SENZORU PRO DETEKCI IR

THERMAL PARAMETERS STUDY OF NANOSTRUCTURED IR SENSOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Šalomoun

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vojtěch Svatoš

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Vojtěch Šalomoun **ID:** 136587 **Ročník:** 2 **Akademický rok:** 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Studium teplotních parametrů nanostrukturovaného senzoru pro detekci IR

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku IR detekce. Provedte simulace teplotních a mechanických vlastností struktury bolometru. Realizujte závěrečný výrobní proces nutný k měření a charakterizace bolometru. Změřte teplotní vlastnosti (teplotní kapacitu, teplotní vodivost a časovou konstantu). Tyto měření proveďte bez i s nanostrukturami jako absorpční vrstvou. Provedte libovolné měření IR.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Svatoš

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Lukáš Fujcik, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

ABSTRAKT

Úkolem této diplomové práce je studium problematiky detekce infračerveného záření termálními detektory. Teoretická část práce poskytuje úvod do problematiky termálních detektorů IR záření.

KLÍČOVÁ SLOVA

termální detektor, infračervené záření, bolometr

ABSTRACT

Goal of this thesis is to study infrared detection by means of thermal. Theoretical part of this work gives an introduction to thermal detectors.

KEYWORDS

thermal detector, infrared radiation, bolometer

ŠALOMOUN, V. Studium teplotních parametrů nanostrukturovaného senzoru pro detekci IR. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 28 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vojtěch Svatoš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Design a simulace nanostrukturovaného senzoru pro detekci IR“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 26. 5. 2016

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu své práce Ing. Vojtěchu Svatošovi za cenné rady, kterých se mi od něj dostalo a za jeho zkušenosti, které mi předal. Děkuji také své rodině, která mi umožnila studium na VUT v Brně. A děkuji své partnerce Daně Stiborové za podporu a pochopení.

V Brně dne 26. 5. 2016

.....

podpis autora



Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	9
1 Teorie	10
1.1 Historie snímání infračerveného záření	10
1.2 Infračervené záření	11
1.3 Fyzika záření	12
1.3.1 Planckův vyzařovací zákon	12
1.3.2 Wienův posunovací zákon	13
1.3.3 Stefan-Boltzmannův zákon	14
1.3.4 Kirchhoffův zákon tepelného vyzařování	14
1.4 Technologie detektorů IR záření	14
1.4.1 Mikro-elektro-mechanické systémy	15
1.4.2 Termoelektrický senzor	15
1.4.3 Pyroelektrický senzor	16
1.4.4 Bolometr	17
1.4.5 Senzorické pole	18
1.4.6 Pouzdření termálních senzorů	19
1.5 Sledované parametry detektorů IR záření	19
1.5.1 Šířka pásma	19
1.5.2 Časová konstanta	19
1.5.3 Citlivost	20
1.5.4 Práh citlivosti	20
1.6 Model termálního detektoru	21
1.6.1 Ustálený stav	22
1.6.2 Přejídné děje	22
1.6.3 Parametry termálního detektoru	23
1.7 Fyzika bolometru	23
1.7.1 Parametry bolometru	23
1.7.2 Self-heating efekt a jeho kompenzace	25
1.8 Materiály pro výrobu mikrobolometru	26
1.8.1 Konvenční materiály	26

Seznam informačních zdrojů	27
----------------------------------	----

ÚVOD

Senzorická pole termálních detektorů infračerveného záření (IR) nabývají v posledních letech na významu. Dnes je již možné realizovat citlivé senzory IR záření, které nevyžadují kryogenické chlazení, jako tomu je u fotonových detektorů. Moderní technologie zobrazování IR záření je založená na termálních detektorech, ve většině případů na bolometrech. Absence nutnosti chlazení dává bolometrům velký potenciál pro komerční úspěch. Tlak na zlepšování jejich parametrů je tedy značný.

První kapitolu práce představuje teoretický úvod do problematiky IR detekce. Teoretický úvod se zaměřuje pouze na termální detektory a podává základní přehled o jejich parametrech.

1 TEORIE

1.1 HISTORIE SNÍMÁNÍ INFRAČERVENÉHO ZÁŘENÍ

V roce 1800 William Herschel objevil infračervené (IR) záření. Učinil tak, když měřil teplotu barev ve spektru slunečního záření rozloženého optickým hranolem. Použil k tomu rtuťového teploměru se začerněnou jímkou. Když si povšiml, že teplota vzrůstá od modré barvy směrem k červené, posunul teploměr až za hranici viditelné červené barvy, kde naměřil ještě vyšší teplotu. Herschel tedy usoudil, že musí existovat další typ světla, který není vidět, ale projevuje se tepelnými účinky [1].

Tepelné projevy nového typu záření poskytly možnost, jak jej detekovat. Zpočátku vycházela konstrukce detektorů z konvenčních teploměrů. Jejich citlivost však nebyla dostatečná. Termoelektrický jev objevený roku 1821 T. J. Seebeckem otevřel cestu pro konstrukci citlivějšího zařízení, složeného z řady termočlánků, jak jej v roce 1831 představili Italové Nobili a Melloni. Citlivost a časová konstanta jejich přístroje (v angličtině běžně nazývaného thermopile) byla o řád větší než do té doby používaných teploměrů. IR záření vydávané lidským tělem bylo možné detekovat až na vzdálenost osmi metrů. Na druhé straně však přístroj ještě neumožňoval spektroskopické studium IR záření, protože rozměry a tvar jeho citlivé vrstvy nebyly kompatibilní s disperzním spektrometrem, potřebným pro rozklad světla [2].

To umožnil až roku 1880 S. P. Langley svým přístrojem, který nazval bolometr (což v řečtině znamená doslova měřič záření). Bolometr využíval závislosti elektrického odporu materiálu na teplotě, v tomto případě úzkého platinového pásku, zapojeného jako jedno rameno Wheatstoneova můstku. Otevřela se tím cesta pro měření závislosti intenzity záření připadající na konkrétní vlnové délky ve spektru slunečního záření. Citlivost bolometru byla mnohem větší než tehdy používaných termočlánků. Uvádí se, že Langley byl s pomocí bolometru schopen detekovat krávu až na 400 m. Na tehdejší dobu vysoká citlivost přístroje podnítila konstruktéry k dalšímu zvyšování citlivosti již dobře známých termočlánků [3].

V roce 1917 T. W. Case zkonstruoval nový typ IR detektoru, který na rozdíl od předchozích nevyužíval tepelných projevů záření. Namísto toho využíval jevu, který byl objeven v roce 1873 W. Smithem, fotovodivosti. Ta je důsledkem vnitřního fotoelektrického jevu a projevuje se změnou elektrické vodivosti materiálu, na který dopadá elektromagnetické záření. Podporován americkou armádou zkonstruoval Case IR signalizační zařízení, které umožňovalo předávat zprávy vzduchem až na vzdálenost 30 km. Toto zařízení však trpělo mnoha nedostatky, zejména pomalou odezvou a vysokou hodnotou šumu [4].

Přes své nedostatky ukázal Caseův detektor, kudy se bude ubírat technologie detektorů IR záření. Možnost přímé přeměny optického signálu na elektrický dala za vznik myšlenky konvertoru IR záření na viditelný obraz. Ve 30. letech 20. století se objevila zařízení založená na vakuových fotonkách, ve kterých se využilo vnějšího fotoelektrického

jevu. Na kovový materiál, zapojený jako katoda, se nechalo dopadat záření, důsledkem čehož dochází k emisi elektronů. Anodu zařízení pak tvořilo fluorescentní stínítko, na kterém vznikal viditelný obraz korespondující s dopadajícím IR zářením. Tím bylo umožněno noční vidění, o které měla enormní zájem armáda [4].

Vývoj po druhé světové válce podporovala nejen armáda. S využitím IR senzorů se počítalo i v protipožární ochraně a v telekomunikacích. Tlak na vývoj přinášel své výsledky v podobě využití nových materiálů pro konstrukci fotonových detektorů. Nejperspektivnějším materiálem se postupně ukázala sloučenina rtuti, kadmia a teluru HgCdTe, která má polovodivé vlastnosti.

Na konci 60. let 20. století se objevily první detektory IR záření, které využívaly pole senzorů umístěné v ohniskové rovině optické čočky (angl. Focal Plane Array – FPA). V FPA jsou jednotlivé senzory uspořádány maticovým způsobem a každý tak tvoří jeden pixel výsledného obrazu. Pozdější technologie CCD (z angl. Charge-coupled Device) pak umožnila integraci dvourozměrného maticového pole fotonových detektorů s elektronickými obvody. Vývoj těchto zařízení pokračuje dodnes.

V průběhu 20. století dominovaly ve vývoji IR detektorů fotonové detektory. Jejich velkým nedostatkem je, že vyžadují intenzivní chlazení, v konkrétních případech až na teplotu kapalného dusíku. To brání jejich širší komercializaci. Oproti tomu termální detektory záření, jakým je třeba výše zmíněný bolometr, mohou fungovat i za pokojových teplot.

Termální detektory IR záření našly uplatnění ve specifických aplikacích. Jedním z nich je spektrometr s Golayovými buňkami, ve kterých se využívá tepelného rozpínání plynu. Dále pyroelektrický vidikon (PEV), používaný v protipožární ochraně, který funguje podobně jako klasická televizní CRT obrazovka, ve které je však fotovodivé stínítko nahrazeno pyroelektrickým materiálem [5], [6].

Technologie mikro-elektro-mechanických systémů (MEMS) umožnily vytvořit na čipu tepelně izolovanou strukturu. Tím se otevřela možnost realizovat termální senzor IR záření integrovaný s elektronickým obvodem. Na čipu tak lze vyrobit jak bolometr, tak termočlánek a lze využít i dalších jevů jako třeba pyroelektrického.

Stejně jako s fotonovými detektory existují FPA termálních detektorů. Více jak 95 % termálních senzorů na trhu jsou pole mikrobolometrů. Tato zařízení nacházejí široké uplatnění ve sledovacích systémech, automobilovém průmyslu a samozřejmě v armádě [4].

1.2 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ

Infračervené (IR) záření je elektromagnetické záření v intervalu vlnových délek větších než má viditelné světlo, za jehož hranici se považuje vlnová délka 700 nm, až po vlnovou délku 1 mm. Dále se dělí na jednotlivá pásma, která však nejsou jednotně standardizována. Jedno z používaných rozdělení je uvedeno v tab. 1:

pásmo IR	zkratka pásma	vlnová délka λ [μm]	frekvence f [THz]
blízké	NIR	0,7 - 1	$\approx 300 - 430$
krátké vlny	SWIR	1 - 3	$\approx 100 - 300$
střední vlny	MWIR	3 - 8	$\approx 37 - 100$
dlouhé vlny	LWIR	8 - 15	$\approx 20 - 37$
velmi dlouhé vlny	VLWIR	14 - 30	$\approx 10 - 20$
vzdálené	FIR	30 - 100	$\approx 3 - 10$

tab. 1 Rozdělení pásem IR záření [4]

Výše uvedené rozdělení pásem má vazbu na tzv. atmosférická okna. Jedná se o pásma, ve kterých zemská atmosféra téměř neovlivňuje šíření IR paprsků. Jedno okno se nachází v pásmu MWIR v intervalu vlnových délek 3 až 5 μm . Druhé okno leží v pásmu LWIR mezi vlnovými délkami 8 a 14 μm . Toto pásmo má velký význam pro termální zobrazovací technologie, protože objekty o pokojové teplotě 300 K vyzařují spektrum vlnových délek, jejichž maximum má hodnotu přibližně 10 μm [7].

1.3 FYZIKA ZÁŘENÍ

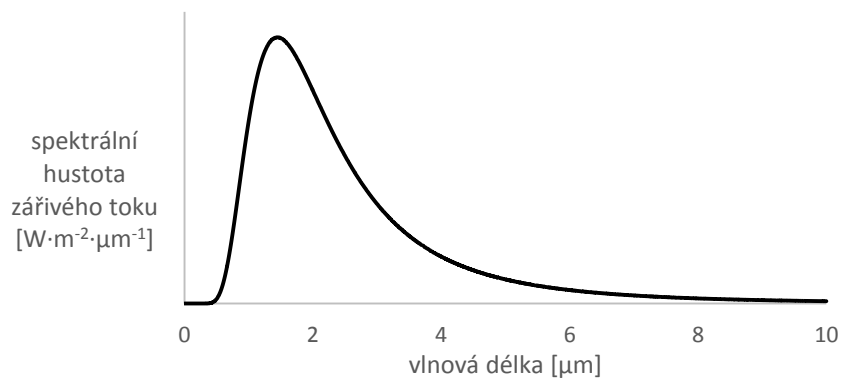
Z pohledu přenosu energie je chování záření popsáno čtyřmi fyzikálními zákony. Jedná se o Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon, Stefan-Boltzmannův zákon a Kirchhoffův zákon tepelného vyzařování.

1.3.1 PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON

Všechna tělesa emitují za všech okolností záření na všech vlnových délkách. Jejich emisní spektrum je tedy spojitě (obr. 1). Spektrální hustota zářivého toku B dokonale černého tělesa je závislá na teplotě T tělesa a na vlnové délce λ záření podle vztahu v rovnici 1:

$$B = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (1)$$

kde c je rychlost světla, k je Boltzmannova konstanta a h představuje Planckovu konstantu [8].



obr. 1 Grafické znázornění Planckova vyzařovacího zákona pro teplotu $T = 2000 \text{ K}$

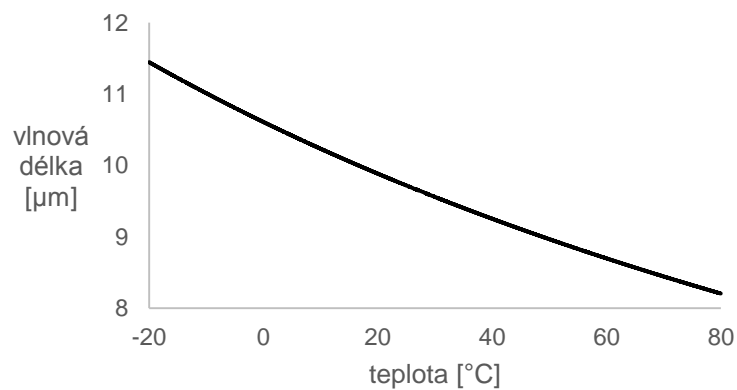
1.3.2 WIENŮV POSUNOVACÍ ZÁKON

Vlnová délka λ_{max} , se kterou je spektrální hustota zářivého toku B pro danou teplotu T maximální, je nepřímo úměrná teplotě T tělesa podle rovnice 2.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (2)$$

kde b je Wienova posunovací konstanta a má hodnotu $b = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ [8].

Z grafického znázornění Wienova zákona na obr. 2 lze zjistit, že objekt o pokojové teplotě $T = 20 \text{ °C}$ emituje zářivý tok, jehož spektrální hustota je maximální na vlnové délce $\lambda = 9,89 \mu\text{m}$ a spadá tedy do IR záření.



obr. 2 Grafické znázornění Wienova posunovacího zákona

1.3.3 STEFAN-BOLTZMANNŮV ZÁKON

Celkový výkon P záření emitovaného tělesem je přímo úměrný čtvrté mocnině teploty T podle rovnice 3.

$$P = \sigma \varepsilon AT^4, \quad (3)$$

kde A je plocha tělesa a σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, která má hodnotu $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Emisivita ε , která má pro absolutně černé těleso hodnotu $\varepsilon = 1$, je definována rovnicí 4:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0}, \quad (4)$$

kde M je plošná hustota zářivého toku emitovaného z plochy tělesa A a M_0 je plošná hustota zářivého toku emitovaného ze stejné plochy A absolutně černým tělesem za stejné teploty T . Emisivita tedy vyjadřuje schopnost tělesa vyzařovat energii [8].

1.3.4 KIRCHHOFFŮV ZÁKON TEPELNÉHO VYZAŘOVÁNÍ

Spektrální emisivita vyjadřuje nejen schopnost tělesa záření o určité vlnové délce emitovat, ale také jej absorbovat. Zjednodušeně řečeno to znamená, že těleso, které je dobrým zářičem, je také dobrým absorbérem. [7]

1.4 TECHNOLOGIE DETEKTORŮ IR ZÁŘENÍ

Pro detekci IR záření se využívá jeho interakce s prostředím. Energie, kterou záření přenáší, může být transformována na elektrickou a takto pak dále zpracována jako elektrický signál. To je základním principem každého senzoru záření. Pro transformaci energie IR záření se v senzorech využívá fyzikálních jevů, které mají buď optický, nebo termální charakter.

V optických senzorech, nazývaných fotonové detektory, dochází k interakci fotonů záření s elektrony v detekčním materiálu. Použití fotonových detektorů je značně limitováno nutností je chladit. Oproti tomu termální detektory jsou schopny pracovat i za pokojové teploty. I přestože parametry termálních detektorů IR záření nejsou na takové úrovni, jako parametry fotonových detektorů, absence nutnosti intenzivního chlazení termálních detektorů umožňuje jejich širší komercializaci. Tato diplomová práce si klade za cíl popsat technologii termálních senzorů IR záření, a proto se v dalším textu už bude věnovat pouze těmto.

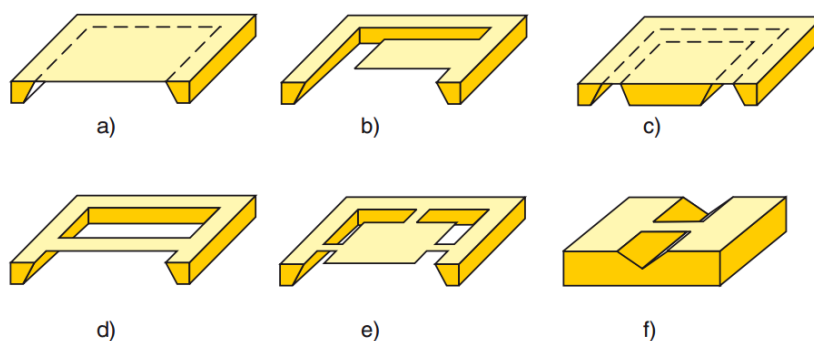
Termální detektor absorbuje IR záření, čímž se ohřeje. Změnu jeho teploty lze využít prostřednictvím některého tepelně-elektrického jevu pro generaci elektrického signálu korespondujícího s dopadajícím IR zářením.

Současné termální detektory se vyrábí jako diskrétní součástky i jako součásti větších elektronických systémů pro detekci, vyhodnocení a zobrazení IR záření. Využívá

se proto technologií, které jsou kompatibilní s technologiemi výroby elektronických obvodů.

1.4.1 MIKRO-ELEKTRO-MECHANICKÉ SYSTÉMY

Mikro-elektro-mechanický systém (MEMS) je struktura na čipu, vytvořená mikroobráběním, která umožňuje integraci senzorů s vyhodnocovacími obvody na jednom čipu. Typické tvary struktur ilustruje obr. 3.



obr. 3 Typické struktury realizované mikroobráběním: a) uzavřená membrána, b) mikronosník, c) membrána se seismickou hmotou, d) mikromůstek, e) zavěšená membrána, f) mikrokanálek [9]

Z pohledu konstrukce termálních detektorů je MEMS technologie důležitá, protože umožňuje na čipu vytvořit tepelně izolovanou strukturu. Toho se dosáhne podleptáním nosné vrstvy. Mikroobrábění zahrnuje celou škálu leptacích technik s různým stupněm sofistikovanosti vytvořené struktury. Pro realizaci termálního detektoru je nutná vysoká přesnost geometrie vzhledem k vyžadovanému rozlišení. Vhodné leptací techniky jsou: reaktivní leptání, případně reaktivní leptání asistované plazmou.

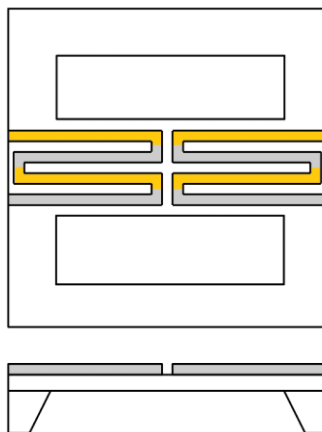
Depozice funkčních vrstev termálního detektoru probíhá pomocí standardních mikroelektronických technologií. Materiál a tvar citlivé vrstvy detektoru, která je absorberem tepla, závisí na fyzikálním jevu, kterého se pro tuto konverzi využije.

1.4.2 TERMOELEKTRICKÝ SENZOR

Vytvoření dvou vzájemných spojů dvou různých vodivých materiálů a uvedení těchto spojů na různé teploty vyvolá průtok elektrického proudu obvodem uzavřeným z těchto dvou vodičů. Tento jev, nazývaný jako Seebeckův, je základem termočlánku. Pokud se dva různé materiály zhotoví ve formě tenkých drátků, jejich spoje mají jen malou tepelnou kapacitu. Jen malá tepelná energie pak stačí k tomu, aby obvodem protékal elektrický proud.

Zapojením mnoha takových spojů za sebe do série vznikne citlivější přístroj, v angl. nazývaný thermopile. Tzv. horké spoje jsou vystaveny působení IR záření, zatímco tzv. chladné spoje jsou udržovány na teplotě okolí, nebo mohou být chlazeny.

V technologii MEMS lze realizovat termoelektrický senzor jako podleptanou strukturu, např. můstek (obr. 4). Horké spoje se umístí do středu podleptané, a tedy tepelně izolované části, zatímco chladné spoje jsou umístěny na substrát udržovány na teplotě okolí.

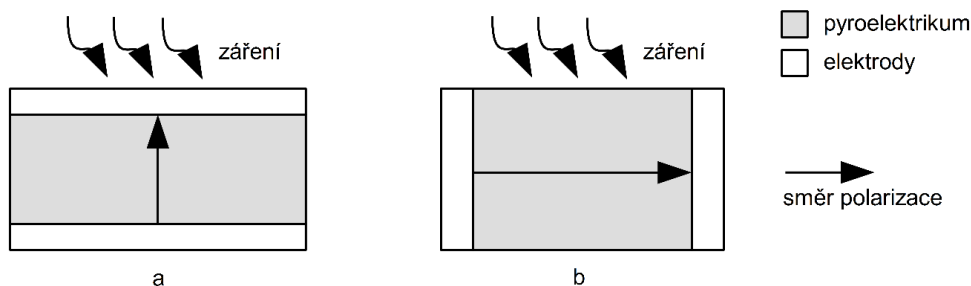


obr. 4 Schématické znázornění realizace termočláňku v technologii MEMS. Nahoře je pohled shora na podleptaný můstek, na němž jsou umístěny tzv. horké spoje termočláňku. Dole je řez strukturou.

1.4.3 PYROELEKTRICKÝ SENZOR

Pyroelektrický senzor využívá závislosti spontánní polarizace materiálu na teplotě. Na zahřátém nebo ochlazeném pyroelektriku je generován potenciálový rozdíl, který je úměrný změně teploty.

MEMS pyroelektrický senzor se zhotovuje depozicí pyroelektrické vrstvy na podleptanou strukturu. Elektrody lze na pyroelektrikum umístit buď vertikálně, čímž vznikne tzv. sendvičová struktura, nebo horizontálně (obr. 5). Adekvátně k zvolené geometrii musí být orientována krystalografická mřížka pyroelektrika, aby směr polarizace souhlasil s umístěním elektrod [10].

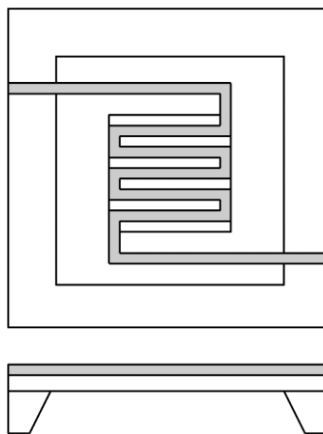


obr. 5 Typická konfigurace elektrod v pyroelektrickém mikrosenzoru: a) tenká vrstva pyroelektrika je vložena mezi dvěma vertikálně deponovanými elektrodami (tzv. sendvičová struktura) b) vrstva pyroelektrika je deponována mezi dvě horizontální elektrody [10].

1.4.4 BOLOMETR

Bolometr využívá k detekci IR záření závislosti elektrického odporu na teplotě. Jelikož je výstupní veličinou korespondující s dopadajícím zářením změna elektrického odporu, je nutné bolometr napájet. Na rozdíl od pyroelektrického, nebo termoelektrického senzoru, které generují napětí sami.

V MEMS technologii se mikrobolometr realizuje jako podleptaná membrána, jejíž plochu pokrývá meandr z materiálu s vysokou hodnotou teplotního součinitele odporu (TCR). Vytvořením meandru je maximalizována absorpční plocha bolometru, což má pozitivní vliv na jeho citlivost.



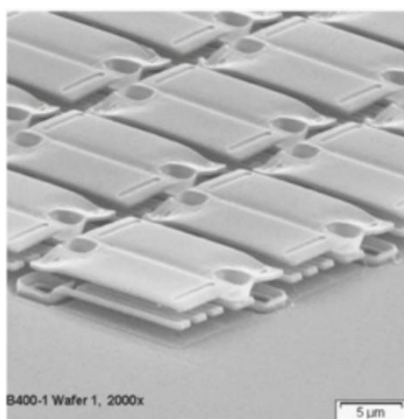
obr. 6 Schématické znázornění mikrobolometru. Nahoře je pohled shora na podleptanou membránu s meandrem z materiálu s vysokou hodnotou TCR. Dole je řez strukturou.

Bolometry jsou ze všech termálních detektorů nejpoužívanější technologií na trhu. Jsou totiž snáze vyrobitelné než pyroelektrické senzory a jsou citlivější než termočlánky [11].

Podrobněji je popis činnosti bolometru a volby materiálů pro jeho výrobu popsán v dalších kapitolách.

1.4.5 SENZORICKÉ POLE

Uspořádání jednotlivých termálních sensorů do matice, ve které každý sensor představuje jeden pixel (obr. 7), je nejpoužívanější technologií zobrazování IR záření. Maticové pole sensorů se umísťuje do ohniskové roviny optické čočky. Odtud pochází anglické označení této technologie: Focal Plane Array (FPA).



obr. 7 Mikroskopická fotografie pole bolometrů od firmy Raytheon [4]

Současná komerční pole termálních sensorů dosahují rozlišení 2048 x 1536 bodů. Jeden pixel je typicky tvořen bolometrem, jehož rozměry klesají až na 17 x 17 μm . Zmenšování rozměrů jednotlivých pixelů je hlavním vývojovým trendem současnosti, protože tak lze dosáhnout zvýšení citlivosti senzoru. Snímek pořízený polem bolometrů je na obr. 8 [4].



obr. 8 Termální snímek pořízený polem bolometrů s rozlišením 240 x 80 bodů (termální kamera FLIR Scout TS24) [12]

1.4.6 POUZDŘENÍ TERMÁLNÍCH SENZORŮ

Tepelná izolace termálního detektoru, která vzniká podleptáním struktury na čipu, není sama o sobě dostačující. Na zřetel je totiž třeba vzít, že tepelná energie je z detektoru předávána mechanismem vedení tepla do okolí, což je obecně nežádoucí. Proto se termální detektory vakuově zapouzďují. Tlak uvnitř pouzdra je snížen na hodnoty řádově jednotek Pa [13].

Vstup optických paprsků do zapouzďeného čipu se realizuje přes krycí sklíčko. To funguje jako filtr vlnových délek. Podle konkrétní aplikace se mohou filtrované délky lišit, typicky se však nachází v intervalu atmosférického okna $\lambda = 8 \div 14 \mu\text{m}$. K materiálům, ze kterých se krycí sklíčka vyrábí, patří germanium Ge, selenid zinku ZnSe, safír Al_2O_3 , křemenné sklo SiO_2 [14].

1.5 SLEDOVANÉ PARAMETRY DETEKTORŮ IR ZÁŘENÍ

1.5.1 ŠÍŘKA PÁSMA

Tepelné projevy záření, které jsou detekovány termálním senzorem, jsou obecně nezávislé na vlnové délce. Výstupní signál termálního detektoru proto závisí pouze na intenzitě dopadajícího záření, nikoliv na jeho spektrálním složení.

Jak bylo již uvedeno výše, detekované pásmo vlnových délek leží obvykle v oblasti atmosférického okna. Takže standardní šířka pásma termálního detektoru IR záření je $\lambda = 8 \div 14 \mu\text{m}$.

1.5.2 ČASOVÁ KONSTANTA

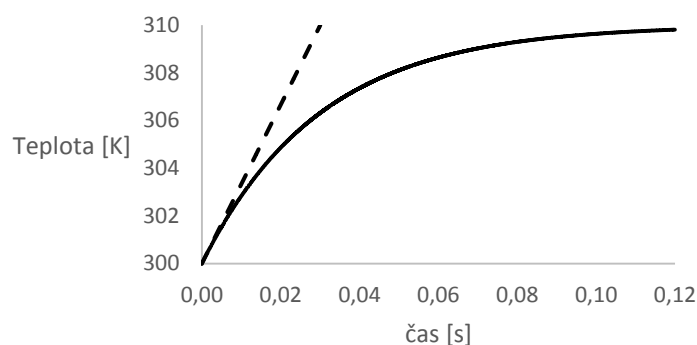
Nárůst teploty detektoru v důsledku dopadajícího záření má exponenciální průběh. Je to dáno tím, že časová odezva detektoru na změnu jeho teploty, je zpomalována jeho tepelnou kapacitou. Rovnice popisující změnu teploty detektoru má tvar:

$$T = T_0 + \Delta T \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (5)$$

kde T je teploty detektoru, T_0 je teplota okolí, ΔT je oteplení v důsledku dopadajícího záření a τ je časová konstanta [15].

Časová konstanta τ udává dobu, za jakou by teplota detektoru dosáhla maximální hodnoty, pokud by nárůst teploty probíhal po celou dobu s počáteční strmostí (čárkovaný průběh na obr. 9). Maximální teploty ve skutečnosti detektor dosáhne až za dobu rovnou několikanásobku časové konstanty, standardně se počítá s pětinasobkem.

Typická hodnota časové konstanty mikrobolometru je v řádu 10^{-3} s [15].



obr. 9 Časová odezva termálního detektoru. Čárkovaně je zobrazen průběh odezvy s počáteční strmostí. Časová konstanta je v tomto případě 0,03 s.

1.5.3 CITLIVOST

Citlivost termálního detektoru udává, jak moc se změní elektrický signál na jeho výstupu, pokud na něj dopadá jednotkový výkon záření. Matematické vyjádření poskytuje rovnice 6:

$$K_V = \frac{\Delta V}{P}, \quad (6)$$

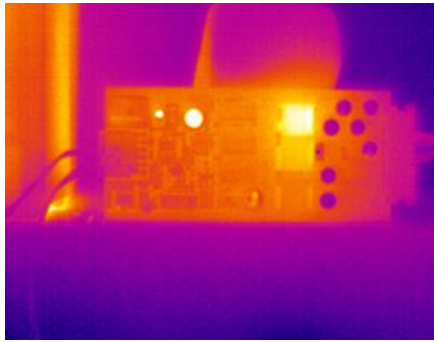
kde K_V je citlivost senzoru, ΔV je napětí na výstupu detektoru a P je výkon dopadajícího IR záření absorbovaný detektorem. Citlivý senzor je tedy takový, na němž malá změna dopadajícího výkonu záření vyvolá velkou napěťovou odezvu [16].

Změna teploty, kterou na detektoru vyvolá dopadající IR záření, je obvykle malá oproti teplotě okolního prostředí. Z tohoto důvodu je citlivost termálních detektorů malá. Dá se však zvýšit počtem senzorů, které jsou pro snímání použity. Trend vývoje proto směřuje k většímu rozlišení polí senzorů FPA [4].

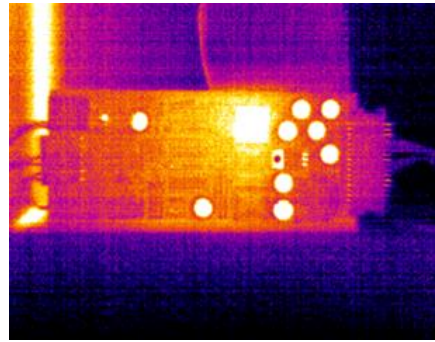
1.5.4 PRÁH CITLIVOSTI

Nejmenší oteplení, jaké je detektor schopen rozeznat, je udáno hladinou šumu. Změna teploty ekvivalentní šumu (z angl. noise equivalent temperature difference – NETD) udává hodnotu teploty, o jakou musí v důsledku dopadajícího záření vzrůst teplota detektoru, aby poměr šumu k užitečnému signálu na výstupu detektoru byl roven jedné. Tato hodnota je pak považována za nejmenší detekovatelnou a udává tím práh citlivosti senzoru [16].

Vliv NETD na výsledný termografický snímek ilustruje obr. 10. Na snímku vlevo (NETD = 60 mK), jsou patrné detaily, které na snímku vpravo (NETD = 80 mK) vůbec zachyceny nejsou.



NETD = 60 mK

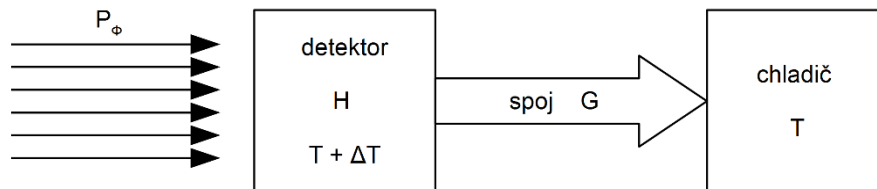


NETD = 80 mK

obr. 10 Srovnání termálních snímků pořízených termálními kamerami s různou hodnotou NETD [17]

1.6 MODEL TERMÁLNÍHO DETEKTORU

Chování bolometru může být popsáno pomocí schématu obecného termálního detektoru (obr. 11). Energie absorbovaná detektorem je skrz tepelnou vodivost G spoje přenášena do chladiče. Tato energie je následně z chladiče předána okolí, se kterým tak chladič setrvává ve stavu rovnováhy.



obr. 11 Schéma obecného termálního detektoru

Proces přeměny energie dopadajícího záření na tepelnou energii předávanou z detektoru do chladiče je popsán rovnicí tepelné bilance (rovnice 7), která je vyjádřením zákona zachování energie.

$$P_{\phi} = G\Delta T + H \frac{d\Delta T}{dt}, \quad (7)$$

kde P_{ϕ} je výkon dopadajícího záření, ΔT je změna teploty detektoru vyvolaná dopadajícím zářením, H je tepelná kapacita detektoru a G je tepelná vodivost spoje mezi detektorem a chladičem. Typické hodnoty tepelné kapacity a tepelné vodivosti mikrobolometru jsou $H = 10^{-9}$ J/K a $G = 10^{-7}$ W/K [13][15].

1.6.1 USTÁLENÝ STAV

Když na detektor začne dopadat záření o konstantím výkonu P_ϕ , začne se naplňovat tepelná kapacita H detektoru a teplota detektoru T proto začne stoupat. Po čase rovném několikanásobku časové konstanty τ se tepelná kapacita H detektoru naplní a jeho teplota se ustálí na maximální hodnotě. Hodnotu změny teploty ΔT detektoru v důsledku dopadajícího záření pak lze popsat rovnicí 8 [15]:

$$\Delta T = \frac{P_\phi}{G} \quad (8)$$

1.6.2 PŘECHODOVÉ DĚJE

V okamžiku, kdy začne na detektor dopadat záření, začne jeho teplota narůstat s exponenciální křivkou. Časový průběh odezvy už byl ilustrován v podkapitole Časová konstanta na obr. 9. Rovnici, popisující změnu teploty, lze získat řešením rovnice tepelné bilance (rovnice 7). Řešení má tvar dle rovnice 9 [15]:

$$\Delta T = \frac{P_\phi}{G} \left(1 - e^{-\frac{t \cdot G}{H}} \right) \quad (9)$$

Porovnáním řešení rovnice tepelné bilance s rovnicí 5, popisující změnu teploty v podkapitole Časová konstanta, lze najít vztah udávající hodnotu časové konstanty (rovnice 10):

$$\tau = \frac{H}{G} \quad (10)$$

Rovnici 9 lze dosazením z rovnice 10 upravit do tvaru dle rovnice 11:

$$\Delta T = \frac{P_\phi}{G} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (11)$$

Přestane-li po dosažení maximální teploty na detektor dopadat záření, začne detektor chladnout. Průběh změny teploty lze najít řešením rovnice tepelné bilance (rovnice 7) pro $P_\phi = 0$. Jejím řešením je potom rovnice 12 [15]:

$$\Delta T = -\frac{P_H}{G} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (12)$$

kde P_H představuje výkon, který bylo potřeba dodat, aby detektor dosáhl ustáleného stavu.

1.6.3 PARAMETRY TERMÁLNÍHO DETEKTORU

Citlivost termálního detektoru lze definovat jako poměr velikosti změny jeho teploty v důsledku dopadajícího IR záření k výkonu dopadajícího IR záření (rovnice 13) [13]:

$$K_T = \frac{\Delta T}{P_\phi}, \quad (13)$$

kde K_T je citlivost termálního detektoru a ΔT je změna teploty vyvolaná dopadajícím výkonem záření P_ϕ .

Pokud bude změna teploty odečítána až po dosažení ustáleného stavu, lze do rovnice 13 dosadit za ΔT výraz odvozený pro ustálený stav (rovnice 8). Z výsledného vztahu (rovnice 14) je patrné, že citlivost termálního detektoru je rovna převrácené hodnotě jeho tepelné vodivosti G :

$$K_T = \frac{1}{G} \quad (14)$$

Dosažením do rovnice 14 za G z rovnice 10 popisující časovou konstantu se získá závislost citlivosti termálního detektoru na jeho časové konstantě:

$$K_T = \frac{\tau}{H} \quad (15)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že citlivost termálního detektoru je nepřímo úměrná rychlosti jeho odezvy. Citlivost termálního detektoru totiž roste s jeho časovou konstantou [13].

1.7 FYZIKA BOLOMETRU

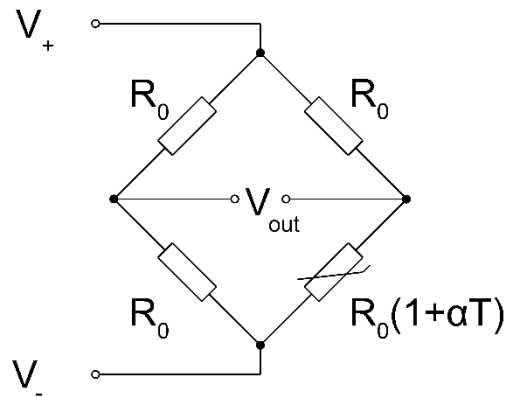
1.7.1 PARAMETRY BOLOMETRU

Bolometr je detektor IR záření, který funguje na principu změny elektrického odporu v závislosti na změně teploty. Schopnost bolometru měnit s teplotou elektrický odpor je popsána jeho teplotním součinitelem odporu (TCR). Hodnota TCR stanovuje odpor bolometru podle rovnice 16:

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (16)$$

kde $R(T)$ je odpor bolometru při teplotě T , R_0 je odpor bolometru při referenční teplotě T_0 a α je teplotní součinitel odporu [8].

Vyhodnocování změn odporu bolometru s teplotou obvykle neprobíhá na samotném bolometru. Pro větší přesnost vyhodnocení se bolometr zapojuje do Wheatstoneova můstku (obr. 12).



obr. 12 Bolometr zapojený ve Wheatstoneově můstku

Na výstupní napětí V_{out} můstku lze pohlížet jako na rozdíl napětí mezi dvěma děliči tvořenými dvěma větvemi můstku. Výstupní napětí V_{Wh} je pak dáno rovnicí 17:

$$V_{out} = (V_+ - V_-) \frac{\alpha \Delta T}{4}, \quad (17)$$

kde rozdíl napětí V_+ a V_- představuje napětí, kterým je napájen můstek [13][15].

Jak je patrné z rovnice 11, ΔT má v čase exponenciální průběh a je přímo úměrná absorbovanému výkonu záření. Proto i výstupní napětí V_{out} má v čase exponenciální průběh a je přímo úměrné absorbovanému výkonu záření.

Napěťová citlivost bolometru je definována rovnicí 6 jako poměr výstupního napětí k výkonu dopadajícího záření. V tomto případě je výstupním napětím výstupní napětí můstku V_{out} . Dosazením do rovnice 6 za výkon P výkon P_ϕ z rovnice 13, popisující teplotní citlivost termálního detektoru, se získá vztah mezi teplotní a napěťovou citlivostí bolometru, popsany rovnicí 18:

$$K_V = K_T (V_+ - V_-) \frac{\alpha}{4} \quad (18)$$

Pro teplotní citlivost K_T bylo odvozeno, že je převrácenou hodnotou tepelné vodivosti G . Proto napěťovou citlivost bolometru lze vyjádřit rovnicí 19:

$$K_V = (V_+ - V_-) \frac{\alpha}{4G}, \quad (19)$$

kde G je tepelná vodivost bolometru.

Dosazením do rovnice 19 za tepelnou vodivost G z rovnice 10 lze ukázat, že pro bolometr platí stejný závěr, jaký byl odvozen pro model termálního detektoru. Citlivost bolometru je nepřímo úměrná rychlosti jeho odezvy, protože citlivost roste s časovou konstantou, jak je patrné z rovnice 20:

$$K_V = (V_+ - V_-) \frac{\alpha}{4H} \tau, \quad (20)$$

kde H je tepelná kapacita bolometru a τ jeho časová konstanta.

1.7.2 SELF-HEATING EFEKT A JEHO KOMPENZACE

Dosud bylo na bolometr pohlíženo jako na obecný termální detektor. Pro ten platí, že jeho oteplení je vyvolané pouze absorpcí dopadajícího záření. Pro bolometr je však třeba vzít v úvahu jako zdroj oteplení také Joulovo teplo, které vzniká průchodem elektrického proudu bolometrem. Tento jev se označuje angl. termínem „self-heating“ efekt.

Pro výkon P_{Joule} , který na bolometru vzniká Joulovým teplem, lze odvodit vztah popsany rovnicí 21:

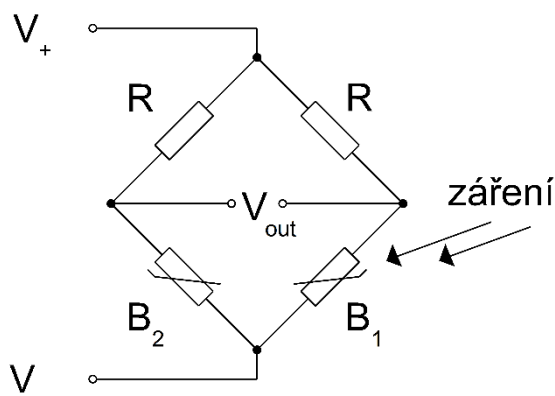
$$P_{Joule} = \frac{(V_+ - V_-)^2}{4R_0}, \quad (21)$$

kde R_0 je odpor bolometru za teploty okolí [15].

Celkový výkon P_ϕ pohlcený bolometrem je roven součtu výkonu absorbovaného záření a výkonu P_{Joule} elektrického proudu způsobující oteplení Joulovým teplem. Rovnici tepelné bilance (rovnice 7) lze potom přepsat do tvaru:

$$P_\phi + P_{Joule} = G\Delta T + H \frac{d\Delta T}{dt} \quad (22)$$

Výkon P_{Joule} proudu procházejícího bolometrem je mnohem větší než výkon P_ϕ záření absorbovaného bolometrem. Pro vyhodnocení dopadajícího záření je nutné z výstupního signálu Wheatstoneova můstku odstranit složku vyvolanou „self-heating“ efektem. Toho je možné dosáhnout zapojením referenčního bolometru do můstku způsobem, jaký ilustruje obr. 13 [13][15].



obr. 13 Wheatstoneův můstek s bolometrem B_1 a referenčním bolometrem B_2

Na referenční bolometr (bolometr B_2 na obr. 13) nedopadá IR záření. Do můstku je zařazen pouze proto, aby jím procházel stejný proud, jako detekčním bolometrem (bolometr B_1 na obr. 13).

Změna odporu, kterou vyvolává změna teploty způsobená Joulovým teplem, je pro oba bolometry stejná. Proto se do výstupního napětí můstku nepromítne. Výstupní napětí můstku je tak udáno pouze výkonem dopadajícího záření.

1.8 MATERIÁLY PRO VÝROBU MIKROBOLOMETRU

Mikrobolometry se vyrábí jako součásti integrovaných elektronických obvodů. Proto se materiály na jejich výrobu volí takové, které jsou kompatibilní s technologií výroby integrovaných obvodů. Pro dosažení vysoké citlivosti senzoru se používají materiály s vysokou hodnotou teplotního součinitele odporu (TCR). Zároveň se při volbě materiálu zohledňují jeho šumové vlastnosti. Všeobecným požadavkem na elektronické systémy je nízká spotřeba. Proto materiál bolometru má mít nízký elektrický odpor [4].

1.8.1 KONVENČNÍ MATERIÁLY

Nejpoužívanějšími materiály citlivé vrstvy bolometru jsou oxid vanadu VO_x , amorfní křemík aSi a barium-stroncium-titanát BST.

První komerčně úspěšnou technologií byly BST bolometry. Jejich citlivost však již nedostačuje moderním trendům. Navíc možnost zmenšování rozměrů jednoho BST bolometru je omezená a senzorické pole BST bolometrů nejde integrovat s elektronickým obvodem [18].

Kvůli těmto omezením byl BST nahrazen oxidem vanadu VO_x , jehož TCR dosahuje hodnot 3%/K. Pole VO_x mikrobolometrů se vyrábí mikroobráběním jako integrovaná součást elektronických obvodů. VO_x technologie je v současnosti nejpoužívanější [18][19].

Parametry amorfního křemíku aSi byly zpočátku považovány za nedostatečné. Výzkum postupně ukazuje, že hodnoty TCR amorfního křemíku mohou dosáhnout až 5%/K. Proto se očekává, že v nejbližší budoucnosti bude VO_x nahrazen amorfním křemíkem aSi [18].

SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] HERSCHEL, W. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the Sun, Philos.Trans.Roy.Soc.London. 1800, roč. 90, str. 284-292. Dostupné z: <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/90/284.full.pdf+html>
- [2] BRAND, J. C. D. Lines of Light. Vyd. 1, CRC Press, 1995, 266 s. ISBN 978-2884491631.
- [3] LANGLEY, S. P. Bolometer. Vyd 1, Gregory Bros. Printers, New York, 7 s.
- [4] ROGALSKI, A. History of Infrared Detectors, Opto-electronics Review. 2012, roč. 20, č. 3, str. 279-308. ISSN 1896-3757.
- [5] GOLAY, M. J. E. Pneumatic infrared detector, Review of Scientific Instruments. 1947, roč. 18, str. 357-362. ISSN 0034-6748.
- [6] GOSS, A. J. The pyroelectric vidicon – A review, Proceedings of SPIE. 1987, roč. 807, str. 25-32. ISSN 1996-756X.
- [7] GOODY, R. M., YUNG, Y. L. Atmospheric Radiation: Theoretical Basis. Vyd. 2, Oxford University Press, 1995, 544 s. ISBN 978-0195102918.
- [8] WALKER, J. Fundamentals of Physics. Vyd. 10, John Wiley & Sons, 2013, 1368 s. ISBN 978-1118230725.
- [9] HUSÁK M. MEMS a mikrosystémové technologie, Automa. 2008, č. 11, str. 7-11. ISSN 1210-9592.
- [10] ALLARD M. E. Characterization of Polymer-based MEMS Pyroelectric Infrared Detector. Air Force Institute of Technology, 2007, 174 s. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a469505.pdf>
- [11] TANAKA A. et al. Infrared Focal Plane Array Incorporating Silicon IC Process Compatible Bolometer, IEEE Transactions on Electron Devices. 1996, roč. 43, č. 11, str. 1844-1850. ISSN 0018-9383.
- [12] FLIR Scout TS24 [online]. (cit. 26. 5. 2016). Dostupné z: <http://www.survivalgigant.nl/flir-scout-ts24-warmtebeeldcamera>
- [13] DERENIAK E. L., BOREMAN G. D. Infrared Detectors and Systems. John Wiley & Sons, New York, 1996, 592 s. ISBN 978-0-471-12209-8.
- [14] HENINI M. RAZEGHI M. Handbook of Infra-red Detection Technologies. Elsevier, 2002, 532 s. ISBN 9781856173889.

- [15] STETSON S. W. PSpice Modelling and Parametric Study of Microbolometer Thermal Detectors. Naval Postgraduate School, Monterey, 2001, 74 s. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a396272.pdf>
- [16] BASS M et al. Handbook of Optics, Vol 2: Design, Fabrication and Testing, Sources and Detectors, Radiometry and Photometry. Vyd 2. McGraw-Hill Education, 2009, 1264 s. ISBN 978-0071498906.
- [17] What does Sensitivity (NETD) mean when applied to a Thermal Imager? [online]. 2012 (cit. 26. 5. 2016). Dostupné z: <http://irinformir.blogspot.co.ke/2012/05/what-does-sensitivity-netd-mean-when.html>
- [18] HANSON C. IR DETECTORS: Amorphous-silicon bolometers could surpass IR focal-plane technologies, Laser Focus World. 2011, č. 4. ISSN 1043-8092. Dostupné z: <http://www.laserfocusworld.com/articles/2011/04/ir-detectors-amorphous-silicon-bolometers-could-surpass-ir-focal-plane-technologies.html>
- [19] LI C. et al. Uncooled VOx infrared sensor development and application, Proceedings of SPIE, 2011, č. 8012 8 s.