

Vladimír Lysenko

DETEKTORY PRO BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLŮT

Praha 2005



Kniha pojednává o detektorech, principech jejich činnosti a aplikacích při bezdotykovém měření teplot. Více je věnováno kvantovým typům detektorů, jejich parametrům a nestabilitám. Závěr je věnován metodám bezdotykového měření teploty. Pro snadnější pochopení je text doplněn velkým množstvím tabulek a grafů. Použitý matematický aparát odpovídá rozsahu přednášeném na technic-kých vysokých školách.

Kniha je určena studentům, technikům a inženýrům pracujícím v oblasti měřicí a řídicí techniky.

Fyzikálně-technologické problémy zmiňovaných detektorů nejsou náplní této knihy.

Vladimír Lysenko

Detektory pro bezdotykové měření teplot

Bez předchozího písemného svolení nakladatelství nesmí být kterákoli část kopírována nebo rozmnožována jakoukoli formou (tisk, fotokopie, mikrofilm nebo jiný postup), zadána do informačního systému nebo přenášena v jiné formě či jinými prostředky.

Autor a nakladatelství nepřejímají záruku za správnost tištěných materiálů. Předkládané informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Všechny registrované nebo jiné obchodní známky použité v této knize jsou majetkem jejich vlastníků. Uvedením nejsou zpochybněna z toho vyplývající vlastnická práva.

Veškerá práva vyhrazena

© Vladimír Lysenko, Ostrava 2005

© Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Vladimír Lysenko: Detektory pro bezdotykové měření teplot

BEN – technická literatura, Praha 2005

1. vydání

ISBN 80-7300-180-2

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAKŮ A SYMBOLŮ	8
1 DETEKTORY ZÁŘENÍ	11
2 FOTODETEKTORY	15
2.1 Fotoelektrický jev a jeho fyzikální podstata [2]	15
2.2 Typy fotodetektorů [10]	15
2.2.1 Podmínky fotoelektrického jevu	16
2.2.2 Fotodetektory s podélným elektrickým polem	17
2.3 Vnitřní fotoelektrický jev [12]	17
2.4 Ideální fotodetektor	18
2.4.1 Voltampérová (VA) charakteristika ideálního FD	18
2.5 Reálný fotodetektor	20
2.6 Parametry reálného FD	22
2.6.1 Neidealita a její měření	22
2.6.2 Výstupní napětí naprázdno	24
2.6.3 Výstupní proud nakrátko	26
2.6.4 Závěrný proud	27
2.6.5 Charakteristický odpor	29
2.6.6 Odpor za tmy	30
2.6.7 Napětí a proud maximálního výkonu	31
2.6.8 Činitel zaplnění (FF – Fill Factor)	34
2.6.9 Citlivost proudová, napěťová, spektrální	34
2.6.10 Kvantová účinnost	35
2.6.11 Pohltivost	35
2.6.12. Šumové parametry [10]	37
2.6.13 Parazitní parametry	38
2.6.14 Parametry dynamického režimu	43
2.7 Citlivost fotodetektoru	46
2.7.1 Mezní hodnota vlnové délky	46
2.7.2 Mezní hodnota citlivosti	47
2.8 Vliv vstupního ozáření na parametry FD	48

3	NESTABILITY FOTODETEKTORU	53
3.1	Vliv teploty na úroveň Fermiho hladiny	53
3.2	Vliv teploty na koncentraci nosičů	55
3.2.1	Pro vlastní polovodič	55
3.2.2	Pro nevlastní polovodič	55
3.3	Spektrální citlivost a vlivy na její velikost	57
3.3.1	Teplotní závislost pohltivosti	58
3.3.2	Teplotní závislost kvantové účinnosti	58
3.3.3	Změna spektrální citlivosti vlivem vnějšího napětí	58
3.3.4	Změna spektrální citlivosti vlivem teploty FD	59
3.3.5	Vliv zátěže na spektrální charakteristiku	60
3.4	Závěrný proud a jeho nestability	63
3.5	VA charakteristika a vlivy na ní	65
3.5.1	Absolutní citlivost výstupního proudu na teplotě	65
3.5.2	Absolutní citlivost výstupního napětí na teplotě	67
3.5.3	Absolutní citlivost výstupního napětí naprázdno na teplotě 68	
3.5.4	Teplotní kompenzace pracovního režimu	70
3.6	Modely fotodetektoru	73
3.6.1	Elektrický model FD	73
3.6.2	Teplotný model FD	78
4	TEPELNÉ DETEKTORY	85
4.1	Princip funkce tepelného detektoru	86
4.1.1	Zářivý tok tvaru jednotkového skoku	87
4.1.2	Zářivý tok tvaru harmonického signálu	87
4.1.3	Tepelná kapacita detektoru	89
4.1.4	Tepelná vodivost detektoru	89
4.1.5	Mezní kmitočet detektoru	90
4.1.6	Dynamické chování detektoru	90
4.2	Termoelektrické detektory	91
4.2.1	Emise elektronů	91
4.2.2	Kontaktní napětí	92
4.2.3	Rozdíl kontaktních potenciálů	93
4.2.4	Seebeckův jev	93

4.3	Bolometry	95
4.3.1	Princip bolometru	95
4.3.2	Spektrální citlivost	96
4.3.3	Integrální citlivost	96
4.3.4	Náhradní zapojení	97
4.3.5	Časová konstanta	97
4.3.6	Mezní kmitočet	98
4.4	Pyroelektrické detektory	99
4.4.1	Elektrická polarizace	99
4.4.2	Vektor polarizace	100
4.4.3	Princip pyrodetektoru	100
4.4.4	Stanovení výstupního signálu	101
4.4.5	Určení časové změny teploty	102
4.4.6	Prahová citlivost	103
4.4.7	Vlastnosti pyrodetektorů	104
4.5	Termokamery	104
4.5.1	Aplikace termovizního systému	105

5 TEPLOTA A JEJÍ MĚŘENÍ 109

5.1	Modely záření [2]	109
5.2	Kvantová povaha záření [2], [3]	110
5.3	Tepelné záření [2], [3]	110
5.4	Metody bezdotykového měření teploty	113
5.4.1	Objektivní metody měření teploty	113
5.5	Emisivita	114
5.6	Chyby bezdotykového měření teploty	115
5.7	Citlivosti parametrů	117
5.7.1	Absolutní citlivost měření teploty	119
5.7.2	Relativní citlivost měření teploty	120
5.7.3	Semirelativní citlivost měření teploty	121
5.7.4	Citlivost poměrového měření teploty	122
5.7.5	Maximum poměru $R(T, I_2)$	125
5.7.6	Absolutní citlivost poměru $R_0(T, I_{2max})$ na teplotě	126
5.7.7	Relativní citlivost poměru $R_0(T, I_2)$ na teplotě	128

PŘÍLOHA I

POJMY A VELIČINY POUŽÍVANÉ V PYROMETRII 132

A.	Vybrané pojmy	132
A.1	Záření	132
A.2	Směr záření	132
A.3	Rychlost šíření záření	133
A.4	Bodový zdroj záření	133
A.5	Izotropní zdroj záření	133
A.6	Tepelný zářič	133
A.7	Tepelné záření	133
A.8	Teplo	133
A.9	Teplotní záření	134
A.10	Teplota	134
A.11	Infračervené záření	134
A.12	Ochlazování těles	135
A.13	Černé těleso (zářič)	135
A.14	Černé těleso – černý zářič	135
B.	Vybrané veličiny	135
B.1	Zářivá energie	135
B.2	Spektrální zářivá energie	136
B.3	Objemová hustota zářivé energie	136
B.4	Spektrální hustota zářivé energie	136
B.5	Zářivý tok	136
B.6	Plošná hustota zářivého toku	137
B.7	Spektrální zářivý tok	137
B.8	Plošná hustota spektrálního zářivého toku	137
B.9	Intenzita vyzařování	137
B.10	Spektrální intenzita vyzařování	138
B.11	Zářivost	138
B.12	Spektrální zářivost	138
B.13	Zář	139
B.14	Spektrální zář	139
C.	Poměrné veličiny	139
C.1	Emisivita	140
C.2	Směrová emisivita	140

C.3	Spektrální emisivita	140
C.4	Pásmová emisivita	140
C.5	Pohltivost (absorpce)	141
C.6	Spektrální pohltivost (absorpce)	141
C.7	Odrazivost (reflektance)	141
C.8	Spektrální odrazivost (reflektance)	141
C.9	Propustnost (transmitance)	141
C.10	Spektrální propustnost (transmitance)	142
D.	Zákony teplotního záření	142
D.1	Kirchhoffův zákon	142
D.2	Stefanův-Boltzmannův zákon	144
D.3	Wienův zákon posuvu	144
D.4	Planckův zákon	144
E.	Významné konstanty [5], [9]	144
	Závěr	146
	Literatura	146

PŘÍLOHA II

TABULKY DETEKTORŮ	147
P2.1 Porovnávací tabulka Si fotodiod	147
P2.2 Křemíkové PIN fotodiody	147
P2.3 InGaAs fotodiody	148
P2.4 InGaAs-PIN detektory	148
P2.5 Infra termočlánky	148
P2.6 CHOPPERS – optické prerušovače	148
P2.7 Germaniové fotodiody (Judson Technologies)	149
P2.8 Sendvičové (dvoumateriálové) detektory	149
P2.9 Pyroelektrické detektory	150
P2.10 Detektory termokamer	150

PŘÍLOHA III

MEZINÁRODNÍ TEPLTNÍ STUPNICE ITS-90	152
--	------------

ADRESY PRODEJEN TECHNICKÉ LITERATURY	155
---	------------

PÁR SLOV O NAKLADATELSTVÍ	156
--	------------

Úvodní slovo

Veškerá hmota – živá nebo neživá v pevném, kapalném nebo v plynném skupenství si trvale vyměňují se svým okolím tepelnou energii formou elektromagnetického záření.

Znalost matematických vztahů popisujících vyzářování vyšla z Planckovy kvantové teorie. Z této teorie vyplynulo, že emitované záření je složeno z nespojitého monochromatického vlnění s rozdílnou distribucí pro jednotlivé vlnové délky.

Rozsah sledovaných vlnových délek je tzv. *elektromagnetické spektrum*. Záření ve sledované spektrální oblasti i jeho spektrální distribuce je závislé jak na teplotě, tak i na vlastnostech emitujícího povrchu látky. Množství záření nese „v sobě“ informaci o teplotě emitujícího povrchu.

Měření emitované energie je podstatou bezdotykové měření teploty, tzv. *radiační termometrie*.

Převod zářivé energie na energii elektrickou zajišťují *detektory*. Podle způsobu jejich interakce s látkou detektoru je lze rozdělit do dvou základních skupin – na *tepelné* a *kvantové*.

Mým zájmem je problematika bezdotykového měření teplot v rozsahu 1000 K až 2000 K, což představuje hutní podmínky. Jako bývalý pracovník odboru Automatizace hutních procesů jsem projektoval tzv. stacionární typy pyrometrů. Neoptimálnějšími typy detektorů se ukázaly typy kvantové, zapojené v hradlovém módu, tj. jako zdroje elektromotorického napětí. Proto se jimi převážně zabývám i v této knize.