

半导体敏感器件及其应用丛书

温度敏感器件 及其应用

马英仁 等 编著

科学出版社

半导体敏感器件及其应用丛书

温度敏感器件及其应用

马英仁 等 编著

科学出版社

1988

内 容 简 介

本书是半导体敏感器件及其应用丛书之一。这套丛书系统地介绍了各类半导体敏感器件的原理、设计、工艺、测试等方面的内容,并阐述了半导体敏感器件与传感器在信息摄取、检测和控制处理等方面的实际应用。

本书集中讨论PN结型半导体温敏器件和集成电路温度传感器及其应用。全书共分五章,第一章给出了与半导体温敏器件有关的半导体物理和器件物理基础,后四章分别叙述温敏二极管、温敏晶体管和温敏闸流管及集成电路温度传感器的原理、特性、结构和工艺,并给出典型应用实例。

本书可供从事半导体敏感器件研制、应用工作的科研、工程技术人员和管理干部参考,也可供大专院校有关专业的师生作教学参考书。

半导体敏感器件及其应用丛书

温度敏感器件及其应用

马英仁 等 编著

责任编辑 樊友民

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1988 年 11 月第一次印刷 印张: 11 5/8

印数: 0001—8,940 字数: 261,000

ISBN 7-03-000588-0/TN·41

定 价: 6.50 元

半导体敏感器件及其应用丛书

序 言

半导体敏感技术是一门新兴技术,近几年发展较快。各种半导体敏感器件及其传感器日新月异,在国防、国民经济各部门以及人们的日常生活中得到越来越广泛的应用。

半导体敏感器件及其传感器能够把力、热、光、磁、气、湿度、射线、离子等物理、化学和生物等非电量转换成电信息。它具有体积小、精度高、灵敏度高、成本低、便于集成化、多功能化、易与微机接口等特点,从而被广泛用于国防建设、工农业生产、交通监控、灾害报警、医疗监护、自动控制和机器人、生命与宇宙科学研究,以及家用电器等各个领域。特别是作为摄取信息的功能部件,它已成为计算机检测与控制系统中不可缺少的重要组成部分,越来越受到人们的普遍重视。许多国家都把它列为 80 年代的关键技术之一。

为了促进这门新兴技术的发展,电子工业部中国电子器件工业总公司于 1983 年 8 月召开了“全国半导体敏感器件工作会议”。会议商定集中全国部分高等院校、研究所和工厂中多年从事半导体敏感器件与传感器研究、生产和应用的专家、学者共同编写一套半导体敏感器件及其应用丛书。

为了加快编写速度,使这套丛书尽快与读者见面,在中国电子器件工业总公司领导下成立了该丛书编审组,由半导体敏感器件技术攻关组赵志刚、张博新、吕家骝、周立等人具体负责丛书编审的组织工作。编写工作是在广泛搜集国内外先

进技术资料的基础上，并结合作者们多年来积累的实践经验进行的。在编写过程中，始终贯彻百花齐放，百家争鸣的方针。力求使该丛书具有科学性、系统性、先进性和实用性。从编写大纲的确定、编写、修改、直至终审定稿，始终采用个人撰写、集体会审和专家学者终审相结合的方法，从而进一步保证这套丛书的质量。

半导体敏感器件及其应用丛书共有九册：

《力学量敏感器件及其应用》；

《光敏感器件及其应用》；

《磁敏感器件及其应用》；

《气、湿敏感器件及其应用》；

《离子敏感器件及其应用》；

《温度敏感器件及其应用》；

《传感器的信号处理及接口》；

《半导体致冷器件及其应用》；

《光电池及其应用》。

半导体敏感器件及其应用丛书编审组成员为：

陈文华、赵志刚、张博新、吕家骝、周立、

刘恩科、黄得星、刘振茂、钟广学、程道喜、

张澄、牛德芳、马英仁、齐丕智、康昌鹤、

唐省吾、黄德培、方培生、张联铎、虞惇、

陆瑞良、马德和、寇云起。

半导体敏感器件及其应用丛书

编 审 组

• • •

前 言

最近十几年来, PN 结型半导体温敏器件(如温敏二极管、温敏晶体管、温敏闸流管以及集成电路温度传感器)的研制和生产获得了迅速的发展, 在国外已经实现商品化和大批量生产并得到广泛应用。可以说, 这类新型的半导体温敏器件和较早的电阻型温敏器件(即热敏电阻)构成了当前温敏器件的两个主要分支。近年来, 国内也开展了这类新型温敏器件的研制生产和应用工作, 但从工作的规模和深度上看, 基本上仍处于初期阶段。在这方面的实际工作中, 常常苦于资料的零散和缺乏, 迫切需要一本在理论上和实践上较系统地介绍这类器件及其应用的参考书。正是出于这种考虑, 我们编写了这本书。

全书共分五章。第一章简要介绍了与半导体温敏器件有关的半导体物理和器件物理基础, 其余四章分别叙述温敏二极管、温敏晶体管、温敏闸流管和集成电路温度传感器的原理、特性、结构和工艺, 以及它们的典型应用实例。

本书由马英仁担任主编并编写绪论和第一、三、四章, 王吉玉编写第二、五章。全书由马英仁统一整理并最后定稿。本书由半导体敏感器件及其应用丛书编审组集体审定, 主审为哈尔滨工业大学刘振茂教授和西安交通大学方培生副教授。作者对他们及其他有关同志在审稿过程中提出的宝贵意见和建议深表谢意。作者也愿借此机会对在本书编写过程中曾在精神上 and 物质上给作者以大力支持的黑龙江大学物理系及辽宁宽甸晶体管厂的领导同志表示感谢。

限于作者的水平和经验，本书难免有疏漏不妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

编著者

1986年10月

目 录

绪论.....	1
第一章 半导体温敏器件的物理基础.....	8
1.1 半导体导电性的温度特性	8
1.1.1 能带与半导体导电性	8
1.1.2 本征半导体的导电性与温度的关系	12
1.1.3 杂质半导体的导电性与温度的关系	15
1.1.4 简并半导体和杂质带电导	24
1.1.5 极低温度下的跳跃电导	27
1.2 载流子的产生-复合与输运过程	28
1.2.1 载流子的产生-复合	28
1.2.2 表面产生-复合	32
1.2.3 载流子的扩散与电流密度方程	33
1.2.4 连续性方程	35
1.3 二极管的电流-电压及温度特性	36
1.3.1 关于 PN 结的定性讨论	36
1.3.2 理想 PN 结的电流-电压及温度特性.....	40
1.3.3 实际二极管的特性及影响因素	45
1.4 晶体管电流-电压及温度特性	56
1.4.1 理想晶体管结构和特性	56
1.4.2 实际晶体管的特性及影响因素	65
1.4.3 电流增益及其温度特性	67
1.5 闸流晶体管的电流-电压及温度特性	73
1.5.1 闸流晶体管的结构和工作原理	73
1.5.2 静态电流-电压特性	75
1.5.3 温度特性	80

1.5.4 dV/dz 效应	81
1.6 传热学基础与器件的热学特性	83
1.6.1 传热的基本方式	83
1.6.2 导热与热阻	84
1.6.3 自热效应与结型器件的热学模型	87
1.6.4 弛豫过程与热时间常数	90
参考文献	92
第二章 温敏二极管及其应用	94
2.1 工作原理	94
2.2 基本特性	96
2.2.1 不同电流模式下的 V_F-T 关系	96
2.2.2 V_F-T 关系的线性	98
2.2.3 灵敏度特性	100
2.2.4 自热特性	102
2.2.5 低温特性	103
2.2.6 磁场的影响	107
2.3 基本电路	108
2.3.1 恒流源电路	108
2.3.2 简单的串联电路	110
2.3.3 电桥电路	111
2.4 互换性	112
2.4.1 互换性及互换误差	112
2.4.2 解决互换性的方法	115
2.5 设计、工艺与稳定性	116
2.5.1 设计考虑	116
2.5.2 材料与结构	117
2.5.3 工艺	120
2.5.4 长期稳定性	124
2.6 参数与特性曲线及其测试	125
2.6.1 基本参数	125

2.6.2	主要特性曲线	127
2.6.3	测试方法与装置	128
2.6.4	参数的测定	129
2.6.5	特性曲线的测试与描绘	130
2.7	几种主要的温敏二极管	131
2.7.1	硅温敏二极管	131
2.7.2	砷化镓温敏二极管	133
2.7.3	碳化硅温敏二极管	135
2.7.4	与其它温敏元器件的比较	136
2.8	典型应用	140
2.8.1	锗温敏二极管温度计	141
2.8.2	高精度数字温度计	143
2.8.3	简易桥式温度计	144
2.8.4	频率输出温度传感器	144
2.8.5	简易温度调节器	146
2.8.6	晶体管的温度补偿	147
2.8.7	热电偶冷端温度补偿器	148
2.8.8	气体点火器	148
2.8.9	低温液体液位传感器	149
2.8.10	低温液体液位调节系统	151
	参考文献	152
第三章 温敏晶体管及其应用		153
3.1	工作原理和基本电路	153
3.1.1	基极-发射极电压的温度特性	154
3.1.2	基本电路	155
3.2	本征非线性与线性化	158
3.2.1	本征非线性	158
3.2.2	不同反馈函数的线性化效果	160
3.2.3	一种实用的线性化设计	163
3.3	温敏差分对管	165

3.3.1	电流阶跃法	165
3.3.2	温敏差分对管和电路	167
3.4	参数和特性曲线	169
3.4.1	基本参数和特性曲线	169
3.4.2	MTS 系列参数和特性曲线	170
3.4.3	MMBTS 系列参数和特性曲线	173
3.5	温敏晶体管的选择与互换性	176
3.6	材料、工艺与结构设计	180
3.6.1	材料和工艺	180
3.6.2	管芯设计	181
3.6.3	封装与探头结构	182
3.7	晶体管温度传感器	185
3.7.1	整体结构	185
3.7.2	自热与工作电流的选择	187
3.7.3	传感器定标	188
3.8	典型应用	189
3.8.1	基本晶体管温度传感器	189
3.8.2	桥式晶体管温度传感器	190
3.8.3	温差传感器	192
3.8.4	精密晶体管温度计	193
3.8.5	精密晶体管温度传感器	195
3.8.6	简易对管温度传感器	197
3.8.7	对管温度传感器	199
3.8.8	频率输出温度传感器	202
参考文献		203
第四章	集成电路温度传感器及其应用	204
4.1	PTAT 核心电路	205
4.2	温度补偿与摄氏(华氏)温度传感器	209
4.2.1	零输出温度与温度补偿	209
4.2.2	本征带隙参考电压源	211

4.2.3	本征参考电流及其电路应用	211
4.3	工艺、定标和封装	215
4.3.1	制造工艺	215
4.3.2	定标和电阻微调	216
4.3.3	封装	220
4.4	四端温度传感器及其应用	223
4.4.1	电路分析与设计考虑	223
4.4.2	基本参数规范	226
4.4.3	封装与热学特性	227
4.4.4	典型应用	230
4.5	三端温度传感器及其应用	236
4.5.1	性能特点	236
4.5.2	电路分析与设计	237
4.5.3	基本参数规范	238
4.5.4	典型应用	240
4.6	摄氏温度传感器及其应用	250
4.6.1	性能特点	250
4.6.2	电路分析与设计	251
4.6.3	典型应用	255
4.7	高灵敏度温度传感器	257
4.7.1	电路原理和设计考虑	258
4.7.2	设计计算	260
4.7.3	参数规范	260
4.7.4	典型应用	261
4.8	电流输出型温度传感器	262
4.8.1	性能特点	262
4.8.2	电路分析与设计	263
4.8.3	版面设计	265
4.8.4	电学特性	266
4.8.5	电参数规范	268
4.8.6	封装与热学特性	270

4.8.7	误差与校正	271
4.8.8	典型应用	274
	参考文献	282
第五章	温敏闸流晶体管及其应用	284
5.1	工作原理、结构和基本电路	284
5.1.1	基本原理	284
5.1.2	开关温度的控制	286
5.1.3	结构	288
5.1.4	基本电路	289
5.2	基本特性	291
5.2.1	正向开关电压的温度特性和开关温度	291
5.2.2	dV/dt 特性	294
5.3	基本参数和特性曲线	297
5.3.1	基本参数	297
5.3.2	主要特性曲线	297
5.3.3	TT 201 系列的基本参数和特性曲线	298
5.4	设计与制造	314
5.4.1	设计的整体考虑	314
5.4.2	离子注入技术	316
5.4.3	开关温度的设计	320
5.4.4	制造工艺	325
5.5	特点和使用方法	328
5.5.1	温敏闸流晶体管的特点	328
5.5.2	使用方法	329
5.6	应用	334
5.6.1	应用电路	334
5.6.2	应用实例	340
5.7	研究和开发动态	347
5.7.1	综述	347
5.7.2	几种组合化、功能化和集成化器件	348
	参考文献	357

绪 论

众所周知,温度是表示物体(系统)冷热程度的物理量.作为一个重要的物理参数,它几乎影响所有的物理、化学和生物医学过程的进行,并且在许多场合常常是取得最佳结果的决定性因素.因此,无论在工农业生产、科学研究、国防和人们日常生活等各个领域,温度测量和控制都是极为重要的课题.随着电子学和材料科学技术的发展,人们正在研制发展各种新型温敏器件并力图以其构成更为先进、实用的温度传感器或温度计,以满足对温度测量和控制提出的越来越多和越来越高的要求.事实上,在种类繁多的敏感器件和传感器中,在产量和应用两方面温敏器件和温度传感器都是首屈一指的,而且继续保持着发展的势头.

可以采用不同的温度标尺对温度进行计量,就象可以使用不同的单位去计量其它物理量一样.常用的温标包括摄氏温标、华氏温标、绝对热力学温标(又称开氏温标)和国际实用温标.摄氏温标把标准大气压下水的冰点规定为 0°C ,而水的沸点为 100°C , $^{\circ}\text{C}$ 称为摄氏度.华氏温标把标准大气压下水的冰点定义为 32°F ,而水的沸点为 212°F , $^{\circ}\text{F}$ 称为华氏度.显然,摄氏温标与华氏温标的零点与单位都不相同,摄氏温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 和华氏温度 $T(^{\circ}\text{F})$ 在数值上可根据以下两式换算:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} [T(^{\circ}\text{F}) - 32]$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

开氏温标把由热力学理论导出的绝对零度作为它的零点，即 0K，而把水的三相点规定为 273.16K，K 称为开氏度。这样规定的开氏温标的单位刚好与摄氏温标的单位相同，即 $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ ，但它们的零点不同，所以开氏温度与摄氏温度在数值上仅相差一个常数。考虑到水的冰点比三相点要低 0.01K，即为 273.15K，摄氏温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 与开氏温度 $T(\text{K})$ 在数值上可做如下换算：

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

最新的国际实用温标 IPTS-68 在氢的三相点 (13.81K) 到金的冰点 (1337.58K) 范围内对 11 个固定点指定了温度值，如表 1 所示。并且还规定了标准内插仪器，定标程序和定标公式，以实现对这个温度范围的覆盖。

表 1 IPTS-68 (75 年修正) 的固定点温度值

固定点	温度指定值		固定点	温度指定值	
	$T(\text{K})$	$T(^{\circ}\text{C})$		$T(\text{K})$	$T(^{\circ}\text{C})$
平衡氢三相点	13.81	-253.94	水三相点	273.16	0.01
平衡氢沸点 (25/76 标准 大气压下)	17.042	-256.108	水 沸 点	373.15	100
平衡氢沸点	20.28	-252.87	(锡凝固点)	505.1181	231.9681
氦 沸 点	27.102	-246.048	铋凝固点	692.73	419.58
氧 三 相 点	54.361	-218.789	银凝固点	1235.08	961.93
氧 沸 点	90.188	-182.962	金凝固点	1337.58	1064.43

温度不能直接测量，但物体的许多属性都随温度变化，因此可以通过其它物理量间接地实现温度测量。原则上，物体的任何属性，只要它随温度变化而发生单调的、显著的和可以重复的变化，都可以用于温度测量。温敏器件最常用的物理量

包括体积、压力、电阻(率)、磁化率和热电动势等,都可分别用于制成气体温度计、水银温度计、铂电阻温度计和热电偶等各种温度计和温度传感器。这些温度传感器和温度计经过两点或多点定标之后,即可用于温度检测或温度控制目的,这时,它们的输出表示温度。最常使用的定标温度是一些特殊的温度,如纯水在标准状态下的冰点和沸点等。实验发现,在同样温度下定标的不同的温度传感器只是在定标温度下给出相同的温度指示,而对于其它任一给定温度,它们的温度读数并不相同。这是因为用于测温的不同的物理量与温度的具体函数关系不同。换句话说,对任何实用的温敏器件,非线性是不可避免的,而且是各不相同的。为解决非线性所引入的测量误差,可对传感器进行多点定标,把结果制成数据表,然而这样做费时费事,使用也不方便。更为简单的方法是选用线性好的温敏器件,或附加线性化电路对温敏器件的非线性加以修正,使传感器给出良好的输出线性。对于这种传感器,只要经过两点(有时只要一点)定标,就会给出足够的测量精度。除线性外,对温敏器件的基本要求还包括灵敏度、稳定性、重复性、工作温度范围、互换性、尺寸、响应速度、成本及使用方便等指标,这些指标也是在具体应用条件下选择最合适的温敏器件和温度传感器的依据。

在各种传统的固体温敏器件和温度传感器中,热电偶和铂电阻是最重要的两种。它们不仅至今仍被广泛地应用于各种实际温度检测,而且被指定为国际实用温标 IPTS-68 在规定的 11 个定点温度之间的标准内插仪器。铂铑(10%)-铂热电偶适用于 $630.74\text{—}1064.43^{\circ}\text{C}$, 铂电阻适用于 -269.19°C (13.81K)— 630.74°C 。与气体和水银温度计相比,这两种传感器尺寸小且有足够的机械强度,使用方便。特别是它们给出的是电信号,因此便于进行远距离温度测量、监视、记录和控

制。不同型号的热电偶可以覆盖最宽的温度范围,从 1—3000 K,而且工作时不需要电源。它的缺点是灵敏度低、重复性不好,特别是线性很差,因此使用时要配合标准数据表,并且要求冷端温度补偿,这就造成了使用上的不便。铂电阻由铂丝(或膜)制成,作为一种贵金属,铂有良好的化学惰性、稳定性和电阻率-温度线性,又便于加工,所以铂电阻至今仍被广泛应用于 -200 — $+800^{\circ}\text{C}$ 这样宽范围的温度测量。其非线性误差仅为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,稳定性极好,漂移不超过百分之几度,精度达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。它的缺点是价格昂贵、灵敏度低、低温线性只能保持到 50K,而且 20K 以下灵敏度变得很低。

30年代初期,由于工业过程自动控制和通讯系统补偿的要求,刺激了热敏电阻的最初发展,这是第一次出现的半导体敏器件。50年代以后,以 MnO , CoO , NiO 等过渡族金属氧化物为基本成分的热敏电阻获得巨大发展和广泛应用,其典型的工作温度范围是 -60 — 300°C 。后来又发展了 Al_2O_3 和 ZrO_2 - Y_2O_3 系列材料,把工作温度上限提高到 600°C ,甚至 1000°C 以上,以满足高温应用的要求。这类热敏电阻多采用烧结工艺制成,是尖晶石结构多晶体——一种陶瓷半导体,其典型的电阻温度系数约为 $-4\% \text{K}^{-1}$ 。另一种陶瓷半导体是 50年代中期发展的 BaTiO_3 系列铁电体,在居里点以上取钙钛矿结构,这时它具有正的温度系数。以 VO_2 系列为代表的是第三类热敏电阻,它有一个临界温度,电阻在此温度附近可发生几个数量级的变化,这种临界特性使得这种电阻可以作为一种温度开关。由于热敏电阻具有灵敏度高、输出电平高、尺寸小、响应速度快和成本低等优点,这些陶瓷半导体热敏电阻,特别是 NTC 热敏电阻,已经成为各种温敏器件和温度传感器中产量最大、应用最广泛的一类。它们不仅大量应用于工业过程检测、控制、保护和补偿等目的,而且开始