

半导体敏感器件及其应用丛书

半导体致冷器件 及其应用

钟广学 等 编著

科学出版社

半导体敏感器件及其应用丛书
半导体致冷器件及其应用

钟 广 学 等 编著

科 学 出 版 社

1 9 8 9

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。

本书主要从应用的角度出发,对半导体致冷技术作了系统的介绍,内容包括基本原理、半导体致冷器和半导体热泵的设计计算,半导体温差电材料的性质及有关参数的测量方法,半导体致冷器的构造和散热方法,最后举例说明了半导体致冷器的应用。

本书可供从事电子技术和器件制造的工程技术人员及具有高中以上文化水平的技术工人参考。

半导体敏感器件及其应用丛书

半导体致冷器件及其应用

责任编辑:樊惠民 魏玲 刘晓融

科学出版社出版

北京昌平第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1989年11月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1989年11月第一次印刷 印张:11 1/8

印数:0001-1,570 字数:234,000

ISBN 7-03-001450-2/TN·71

定 价: 10.40 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、化学和生物量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 and 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的领导下成立了该《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,编写工作是在广泛地收集国内外先进技术资料的基础上,结合作者们多年来积累的实际

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	吕家骧	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	虞悖	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

半导体致冷器件是一种换能器件,通过它能够将电能直接转换为热能,其作用类似于冰箱这一类制冷机械,可以达到致冷的目的.不过,在结构与工作原理上,它与机械式制冷却是截然不同的.

这种器件的工业生产,约有近 40 年的历史.器件的应用,几乎遍及理、工、农、医各个领域,名目繁多不胜枚举.如果粗略地予以分类,那么可以分为四种情形:(1)用于冷却某一对象,或者对某个特定对象进行散热.这种情况大量出现在工业电子领域中;(2)用于恒温,小到对个别电子器件维持恒温,大到如制造恒温槽、空调器等;(3)制造成套仪器设备,如环境试验箱、小型冰箱、各种热物性测试仪器等;(4)民用产品,如冷藏烘烤两用箱、冷暖风机等.

半导体致冷在许多领域内的应用,常常是由它本身的一系列优点所决定的.这些优点可以列举如下:尺寸小,可以制成体积不到 1cm^3 那样小的致冷器;重量轻,微型致冷器的重量往往能够小到只有几克或几十克;无任何机械转动部分,工作中没有噪声;不必使用液态或气态工质,因而不造成环境污染;致冷器参数不受空间方向的影响,即不受重力场的影响;在大的机械过载条件下,能够正常工作;通过调节工作电流的大小,可以方便地调节致冷速率;切换电流方向,能够使致冷器从致冷工作状态转变为致热工作状态,“致冷”、“致热”可运用自如;作用速度快,使用寿命长,且易于控制等等.以上这些长处,都是机械式制冷机难以与之媲美的.半导体致冷的缺点是产冷量低,效率也比较低,而单位产冷量的价格又比较高.

本书由西北大学钟广学教授主编,参加本书编写的还有西安交通大学方培生副教授和天津致冷器厂的赵厚福工程师.

本书由北京电子管厂张澄高级工程师和吉林大学康昌鹤副教授主审,参加审稿的还有赵志刚、孙良彦和吕家骝等同志.为了本书的计算机排版,马松涛讲师进行了大量计算机软件的研究和开发工作.本书编写过程中郝林莉、张爱珍、曾琳辉等同志帮助将全稿录入微机并绘制了全部图表.在此,谨向参加审稿及提供资料和修改意见的同志以及在本书的事务性处理工作中付出大量劳动的所有同志,致以深切谢意.

由于编者水平有限,错误之处在所难免,请读者批评指正.

目 录

第一章 半导体致冷器的基本原理	(1)
1.1 金属的温差电效应	(1)
1.1.1 金属的塞贝克效应	(2)
1.1.2 帕耳帖效应	(7)
1.1.3 汤姆逊效应	(8)
1.1.4 金属的开耳芬关系式	(9)
1.2 半导体的塞贝克效应	(13)
1.2.1 一种载流子的温差电动势率	(13)
1.2.2 两种载流子的温差电动势率	(18)
1.3 半导体的帕耳帖效应	(21)
1.4 半导体的汤姆逊效应	(26)
1.5 半导体材料的开耳芬关系式	(28)
1.6 温差电电路	(30)
1.6.1 温差电单元	(30)
1.6.2 温差电路接头处焦耳热和汤姆逊热的影响	(31)
1.7 温差电致冷器的效率	(35)
1.8 温差电优值系数	(40)
1.9 温差电材料性质概述	(43)
1.9.1 材料参数随温度的变化	(45)
1.9.2 Bi_2Te_3 材料	(48)
1.9.3 温差电材料的辅助性质	(49)
第二章 半导体致冷器的设计计算	(56)
2.1 基本计算公式	(56)
2.1.1 最大致冷效率($\varepsilon_{\text{最大}}$)状态下的计算公式	(57)

2.1.2 最大产冷量($Q_{\text{最大}}$)状态下的计算公式	(60)
2.2 器件两臂的几何尺寸	(62)
2.2.1 器件两臂的最佳截面比	(62)
2.2.2 器件的几何尺寸	(65)
2.3 热工计算举例	(67)
2.4 以温差表示的器件参数	(73)
2.5 偏离最佳条件的影响	(82)
2.6 接触和导流损耗的估算	(83)
2.6.1 接触电阻	(83)
2.6.2 导流电阻	(86)
2.7 半导体致冷器近似计算的诺谟图	(87)
2.8 考虑到焊端换热时的计算	(100)
2.9 汤姆逊效应的影响以及电导率和热导率随温度变化的估计	(104)
2.10 级联	(107)
2.11 拼接温差电器件	(113)
参考文献	(134)
第三章 半导体热泵	(135)
3.1 简单模型	(136)
3.2 半导体热泵的效率和产热量	(138)
3.3 焊端热交换的考虑	(142)
3.4 影响致热系数的其他因素	(146)
3.5 温差电致热的过渡过程	(147)
3.6 应用范围	(153)
参考文献	(154)
第四章 温差电材料的性质及有关参数的测量方法	(157)
4.1 用于温差电器件的材料	(157)
4.1.1 Bi_2Te_3	(157)
4.1.2 $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$	(167)

4.1.3	$\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{--Bi}_2\text{Se}_3$	(169)
4.1.4	铋和 Bi-Sb 合金	(172)
4.2	温差电材料参数的测量方法	(174)
4.2.1	温差电动势率的测定方法	(174)
4.2.2	电导率的测定方法	(179)
4.2.3	热导率的测量方法	(184)
4.2.4	温差电优值系数的测量	(187)
4.3	提高半导体温差电优值系数的途径	(190)
4.3.1	最佳载流子浓度的选择	(190)
4.3.2	最佳温度间隔的选择	(194)
4.3.3	禁带宽度	(197)
4.3.4	借助于改变载流子迁移率与晶格热导率 的比值的方法提高优值系数	(198)
4.3.5	改变散射机构提高 Z 值的可能性	(199)
4.3.6	晶体取向对于温差电材料优值系数的影响	(200)
4.3.7	提高粉末状温差电材料优值系数的方法	(202)
4.3.8	提高材料温差电优值的其他途径	(205)
	参考文献	(206)
	第五章 半导体致冷器的构造	(211)
5.1	单级温差电单元	(211)
5.2	多级温差电单元	(214)
5.3	致冷效率的测定	(216)
5.4	温差电堆	(219)
5.5	温差电堆的热耦合	(224)
5.6	致冷器的散热方法和工作室	(229)
5.6.1	致冷器的散热	(229)
5.6.2	致冷器的工作室	(230)
5.7	与焊接质量有关的几个问题	(231)
5.7.1	影响焊接质量的因素	(231)

5.7.2 焊接工艺中的几个问题	(236)
5.7.3 接触电阻的测量方法	(237)
5.8 用在半导体致冷器中的焊料	(241)
5.8.1 可焊性的意义	(241)
5.8.2 焊料应当满足的一般条件	(243)
5.8.3 BLH 系列半导体焊料性能简介	(246)
参考文献	(252)
第六章 半导体致冷器的散热方法	(253)
6.1 自然对流散热	(253)
6.2 针状散热系统	(257)
6.3 自然循环的充液系统	(261)
6.4 熔化潜热的利用	(264)
6.5 蒸发潜热的利用	(267)
6.6 利用热容的散热系统	(270)
6.7 利用低共熔冰-盐溶液散热	(272)
6.8 热管散热器	(276)
第七章 半导体致冷器的应用	(281)
7.1 半导体温差电模块	(282)
7.1.1 国产致冷模块	(284)
7.1.2 国外半导体致冷模块简介	(291)
7.2 半导体致冷器在无线电电子仪器中的应用	(313)
7.3 辐射接受器致冷器	(317)
7.4 半导体致冷器在测量仪器中的应用	(326)
7.5 半导体致冷器在生物医学领域内的应用	(335)
7.6 空调器及其他应用	(340)
参考文献	(344)

第一章 半导体制冷器的基本原理

早在一百多年前,物理学家们就发现了金属的温差电效应,不过金属的温差电效应相当微弱,用途有限,它除了在热电偶测温方面得到应用之外,在其他领域内的应用长时期未受到重视.一直到半导体材料获得发展以后,人们在研究半导体材料的温差电效应时发现,与金属材料相比,这种材料的温差电效应比较强,颇具实用价值,从而产生了利用温差电效应制成的温差电器件.例如能够把热能转变成电能的温差发电器件,以及能把电能转变成“热”或“冷”的半导体致冷器件.这类半导体温差电器件,目前已在许多领域获得应用.

无论是温差发电,或者是半导体致冷器件,都是一种换能器件,其工作原理均涉及到三种温差电效应.比如,温差发电器利用塞贝克效应,它能够将热能转变为电能;而半导体致冷器则利用帕耳帖效应,它能够把电能转变为“冷”或“热”.与上述两种温差电效应伴生的还有另一种温差电现象,即汤姆逊效应.

本章将对以上三种温差电效应作一介绍.然后,利用热力学方法导出有关半导体致冷器的基本关系式.接着将引用统计物理学理论的某些结果,从微观的角度给出有关宏观温差电参量的量子表达式.最后对温差电材料作一简单说明.

1.1 金属的温差电效应

当物体受热时,其中的原子以及载流子(电子、空穴)的运动就活跃起来,这种运动向周围传播而发生所谓的热传导现

象.载流子的移动,同时伴随有电荷移动而形成电流,这种现象称为温差电效应.

1.1.1 金属的塞贝克效应

两种不同的导体 A 和 B 两端相接触,构成一个闭合回路,如图 1.1(a) 所示.

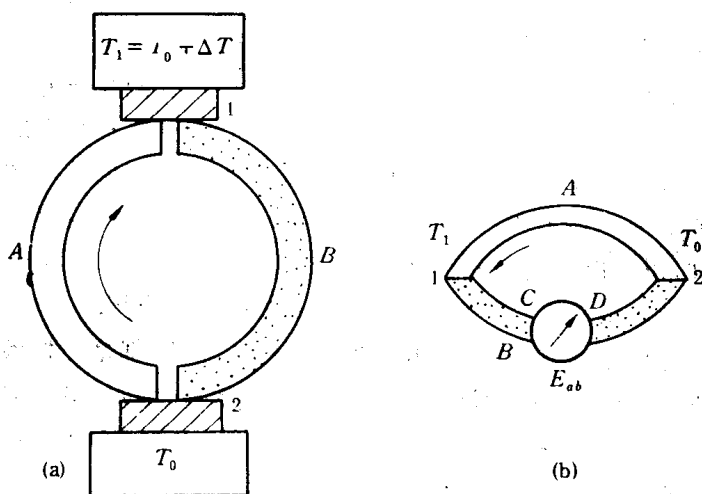


图 1.1 塞贝克效应

如果两个接头 1 和 2 具有不同的温度,则回路中就出现电流,此电流称为温差电流,此闭合回路便组成温差电偶,产生电流的电动势称为温差电动势.如材料选定,温差电动势的数值只与两个接头所处的温度有关.这种现象是塞贝克于 1821 年发现的,故称为塞贝克效应,而温差电动势亦称塞贝克电动势.

在讨论温差电动势时,常采用开路的情况,如图 1.1(b) 所示.若接头 1 和 2 的温度分别为 T_1 和 T_0 ,且在 C、D 点开路,

则在断开的回路中产生的电势差,即温差电动势 E_s , 可以表示为

$$E_s = (\bar{\alpha}_a - \bar{\alpha}_b)(T_1 - T_0) \quad (1.1)$$

式中

$$\bar{\alpha}_a = \frac{1}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} \alpha_a(T) dT$$

$$\bar{\alpha}_b = \frac{1}{T_1 - T_2} \int_{T_0}^{T_1} \alpha_b(T) dT$$

式中 $\alpha_a(T)$, $\alpha_b(T)$ 分别为材料 A 和 B 相对于某种标准材料的温差电动势率;

$\bar{\alpha}_a$ 是温差电偶支路 A 的电动势率 $\alpha_a(T)$ 的平均值;

$\bar{\alpha}_b$ 是温差电偶支路 B 的电动势率 $\alpha_b(T)$ 的平均值;

T_0, T_1 是接触界面处的温度.

因而, 式 (1.1) 可以改写为

$$E_s = B_{ab}(T_1 - T_0) \quad (1.2)$$

式中 $\alpha_{ab} = \bar{\alpha}_a - \bar{\alpha}_b$.

当 $T_1 - T_0 = \Delta T$ 足够小时, 可定义由材料 A 和 B 构成的电偶的温差电动势率为

$$\alpha_{ab} = \frac{dE_s}{dT} = \left(\frac{dE}{dT} \right)_a - \left(\frac{dE}{dT} \right)_b \quad (1.3)$$

α_{ab} 是材料 A 和 B 之间的相对塞贝克系数, 在数值上等于当温差为 1°C 时所产生的电位差, 单位为 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. 其脚注 a, b 的次序表示 $T_1 > T_0$, 且在温度为 T_1 的接头处, 电流由导体 A 流向导体 B 时, α_{ab} 为正, 反之为负.

实验表明, 任何一对遵守欧姆定律的均匀导体, 其塞贝克

电动势的大小,只取决于这两种不同的均匀导体的性质和两个接点的温度,而与沿导体的温度分布无关.于是,可以写出下式

$$E_s T_0 T_1 = E_s T_0 T_3 + E_s T_3 T_1 \quad (1.4)$$

式中, T_0 和 T_1 分别是电偶两端的温度,而 T_3 则是两个导体 A 和 B 上任意一点的温度.

式 (1.4) 所表明关系,叫做“中间温度定律”,这是得到广泛使用的金属热电偶在测量温度时的一个依据.

如果对于一对导体 A 和 B , $E_{s\ ab} = \alpha_{ab} \Delta T$,而对于另一对导体 B 和 C , $E_{s\ bc} = \alpha_{bc} \Delta T$,则由导体 A 和 C 所组成的电路中,电动势为

$$E_{sac} = E_{sab} + E_{sbc} = (\alpha_{ab} + \alpha_{bc}) \Delta T \quad (1.5)$$

式 (1.5) 所表明关系,叫做“中间导体定律”.这意味着相对塞贝克系数具有代数上相加的性质.由此可以推断,任何一对导体的相对塞贝克系数,可以表示成绝对塞贝克系数之差

$$\alpha_{ab} = \alpha_a - \alpha_b \quad (1.6)$$

温差电动势的产生,可以定性地解释为是由于电子的能量和速度随温度梯度变化的结果.当沿导体存在有温度梯度时,电子在热端 (T_1) 比在冷端 (T_0) 具有较大的能量和速度,这就促使它们沿与温度梯度相反的方向扩散.在电子导电的导体中,电子力图向冷端集中,使冷端呈负电性,而在热端则留下了未得到补偿的正电荷.在产生的电位差未能抵消扩散电子的电流,即在没有建立起稳定平衡以前,上述扩散过程将继续进行.该温差电偶电路的这些电位差的代数和,构成温差电动势的一个组成部分.

以上对塞贝克效应作了定性说明.为了加深对塞贝克效应的理解,下面定量讨论,当两种不同导体相接触时的温差电动势,其大小同哪些因素有关.为了讨论问题方便起见,引用能带图.

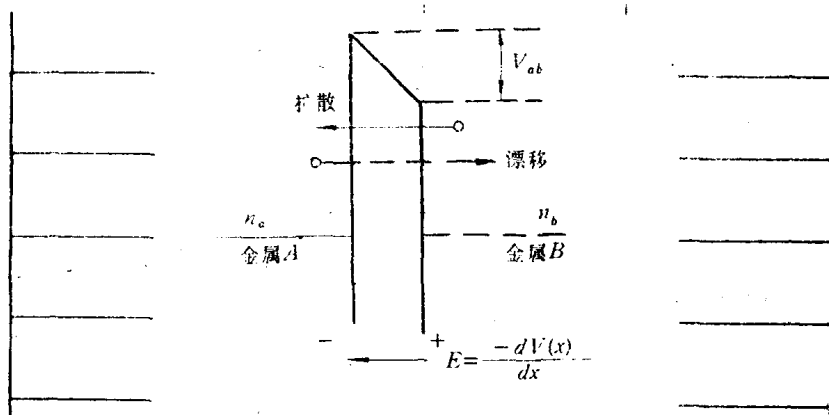


图 1.2 两种金属相接触时的能带图

设金属 A 和 B 相接触时,其能带图如图 1.2 所示.若金属 A 中的电子浓度为 n_a , 金属 B 中的电子浓度为 n_b , 且有 $n_b > n_a$. 由于二者的电子浓度不同,在界面处有电子浓度差存在,电子从右向左扩散,从而产生扩散电流;电子扩散后在 B 金属中留下带正电荷的离子实,所以右边金属边界带正电荷.左边金属 A 中由于增加了电子,所以带负电荷,这些正负电荷形成内在电场 E . 该电场形成后,一方面阻止电子从右向左继续扩散,另一方面,使左边金属 A 中的电子产生漂移运动,形成漂移电流;当扩散电流与漂移电流达到动态平衡时,则有

$$j_{\text{扩}} = j_{\text{漂}} \quad (1.7)$$

即

$$j_{\text{扩}} - j_{\text{漂}} = 0$$

此式可以写成以下形式:

$$qD_n \frac{dn(x)}{dx} - qn(x)\mu_n E = 0$$

$$q[D_n \frac{dn(x)}{dx} - n(x)\mu_n \frac{dV(x)}{dx}] = 0$$

所以

$$dV(x) = \frac{D_n}{\mu_n} \frac{dn(x)}{n(x)}$$

对此积分,得

$$V_{ab} = \int_b^a dV(x) = \int_{n_b}^{n_a} \frac{D_n}{\mu_n} \frac{dn(x)}{n(x)} = \frac{D_n}{\mu_n} \ln \frac{n_a}{n_b}$$

利用爱因斯坦关系式 $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}$, 得

$$V_{ab} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_a}{n_b} \quad (1.8)$$

V_{ab} 即为两金属接触时产生的接触电势差。

如果两金属 A 和 B 组成一个闭合回路, 如图 1.1(a) 所示, 接头 1 和 2 的温度分别为 T_1 与 T_0 , 则沿一定方向绕闭合回路一周时, 其总电势为

$$\begin{aligned} (V_{ab})_{\text{总}} &= V_{ab} + V_{ba} \\ &= \frac{kT_0}{q} \ln \frac{n_a}{n_b} + \frac{kT_1}{q} \ln \frac{n_b}{n_a} \\ &= \frac{k}{q} (T_1 - T_0) \ln \frac{n_a}{n_b} \end{aligned} \quad (1.9)$$