

半导体敏感器件及其应用丛书

磁敏感器件及其应用

黄得星 等编著

科学出版社

73.735
579

半导体敏感器件及其应用丛书

磁敏感器件及其应用

黄得星 等 编著



科学出版社

1987

8710037

D607/28

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,并说明了半导体器件与传感器在信息摄取、检测、控制处理等方面的实际应用。

本书全面地介绍了磁敏器件原理及其应用。全书共八章,包括半导体磁敏效应的物理基础、霍尔器件、磁阻器件、磁敏二极管、磁敏三极管及其它磁敏器件、磁敏集成电路和磁敏器件的应用。书后还附有特性参数表。

本书可供从事半导体敏感器件研制、应用的科研人员、工程技术人员参考,也可供大专院校有关专业的师生阅读。

半导体敏感器件及其应用丛书

磁敏感器件及其应用

黄得星 等 编著

责任编辑 刘兴民 樊友民

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 127 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

*

1987 年 1 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32

1987 年 1 月第一次印刷 印张: 10

印数: 0001—3,400 字数: 223,000

统一书号: 15031·767

本社书号: 5024·15—7

定 价: 2.35 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,以及家用电器等各方领域。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八十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一九八三年八月召开了“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。

为了加快编写进度,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,委托半导体敏感器件技术攻关组赵志刚、张博新、吕家骧、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

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》;

《传感器与微型机》;

《半导体致冷器件及其应用》;

《太阳能电池及其应用》。

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

半导体磁敏器件以及由其构成的传感器技术是一门别具一格的新学科。本书意在系统、全面地论述各种半导体磁敏器件的原理、设计、制备、特性及其应用,是作者多年在该领域从事科研、生产工作的总结。

全书第一章为基础篇,它详细地叙述了各种磁敏感效应原理;在第二章至第六章中,结合各种半导体磁敏器件,叙述设计原理、制备工艺、特性参数、实用线路、测试方法和典型应用实例。第七章介绍了近几年来出现的强磁性金属磁阻器件、韦根德磁敏器件及约瑟夫逊超导量子干涉器件等非半导体磁敏器件。考虑到用户使用方便,第八章专门介绍了磁敏器件应用,书后并附有半导体磁敏器件的特性参数表,以备查阅。

本书由黑龙江大学物理系黄得星教授任主编。书中有关双注入型霍尔集成电路的章节由南京半导体总厂马德和蒋炳撰写,其它章节由黄得星执笔。

本书由西安交通大学刘恩科副教授和哈尔滨工业大学刘振茂副教授主审,参加会审的还有张博新、周立、齐丕智、梅良森、陆瑞良、王晓兵、孙传书等同志。在此,仅向参加审稿、会审及提供资料和修改意见的同志致以深切谢意。

由于编者水平有限,本书缺点错误在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编著者

目 录

绪论	1
第一章 半导体磁敏感效应的物理基础	5
1.1 霍尔效应	5
1.2 物理磁阻效应	23
1.3 热磁效应	28
1.4 光磁电效应	32
1.5 长二极管的磁敏感效应	37
1.6 长基区三极管的磁敏感效应	51
第二章 霍尔器件	62
2.1 霍尔器件的设计原理	62
2.2 霍尔器件的参数及测试	70
2.3 霍尔器件的制备	83
2.4 特种霍尔器件	86
第三章 磁阻器件	93
3.1 几何磁阻效应	93
3.2 长方形磁阻器件	99
3.3 栅格结构的磁阻器件设计原理	102
3.4 InSb-NiSb 共晶磁阻器件	107
3.5 磁阻器件的制备	110
3.6 灵敏度的温度特性及补偿法	112
第四章 磁敏二极管	118
4.1 磁敏二极管的设计原理	118
4.2 磁敏二极管的制备	122
4.3 磁敏二极管伏安曲线	124
4.4 磁敏二极管的特性及测试原理	127

4.5	磁敏二极管温度补偿原理和补偿电路	137
第五章	磁敏三极管	146
5.1	磁敏三极管的设计原理	146
5.2	磁敏三极管的制备	149
5.3	磁敏三极管的特性及测试原理	152
5.4	磁敏三极管的温度补偿原理和补偿电路	160
5.5	双集电极磁敏三极管	165
第六章	磁敏集成电路	168
6.1	双极型霍尔开关集成电路	168
6.2	双极型霍尔线性集成电路	182
6.3	霍尔 MOS 场效应晶体管	185
6.4	霍尔 MOS 集成电路	195
6.5	磁敏三极管差分电路	201
第七章	其它磁敏器件	206
7.1	强磁性金属磁阻器件	206
7.2	韦根德磁敏器件	213
7.3	约瑟夫逊超导量子干涉器件	215
第八章	磁敏器件的应用	232
8.1	磁场测量	234
8.2	电流测量	245
8.3	无触点开关	247
8.4	微位移测量	255
8.5	无触点电位器	256
8.6	磁敏器件加速度传感器	259
8.7	无刷直流电机	262
8.8	三角函数发生器	269
8.9	霍尔乘法器及其应用	273
8.10	霍尔平方器及其应用	287
8.11	霍尔倒数运算器	288
8.12	霍尔除法器、开方器和开立方器	289

8.13 速度函数发电机	293
附录.....	297
1 我国霍尔器件参数表.....	297
2 外国有代表性的霍尔器件参数表.....	298
3 磁阻器件参数表(西门子公司产品).....	299
4 GeSMD 和 SiSMD 参数表(日本索尼公司产品).....	300
5 我国 2DCM 型硅磁敏二极管参数表.....	300
6 3CCM 型硅磁敏三极管的主要参数表.....	301
7 3BCM 型锗磁敏三极管的主要参数表.....	301
8 CS 型霍尔开关集成电路参数表	302
9 DN835 型霍尔线性集成电路参数表	303
10 CX736 型霍尔 MOS 集成电路的特性	304
11 强磁性磁阻器件及其传感器参数表	305
参考文献.....	306

绪 论

磁敏器件是对磁场敏感且又能把磁信号转换成电信号的一种器件。目前,磁敏器件的种类繁多,其中最主要的是半导体磁敏器件,如霍尔器件、磁阻器件、磁敏二极管、磁敏三极管、磁敏集成电路;其它材料制成的磁敏器件有强磁性金属磁阻器件、韦根德磁敏器件、约瑟夫逊超导量子干涉器件等。这些磁敏器件根据它们的工作原理可以分为体内效应器件(如霍尔器件、磁阻器件、韦根德器件等)、表面效应器件(如 MOS 场效应晶体管)、P-N 结注入和表面复合效应器件(如磁敏二极管和磁敏三极管)、量子效应器件(如核磁共振仪、约瑟夫逊器件等)、磁致伸缩效应光纤磁传感器等。

众所周知,用磁感应线圈制成的磁传感器是利用磁通量的变化产生感应电动势的原理做成的,它的感应电动势与磁通量的变化率有关。

霍尔器件、磁阻器件、韦根德器件是一种有源电阻体,是基于外界磁场作用所产生的各种物理效应原理上制成的敏感器件。因此,如同电子转移效应的耿氏体效应器件一样,把它们看成有源器件。

制备磁敏器件的材料有半导体材料、铁镍钴合金的强磁性金属、超导金属等。用半导体材料制成的磁敏器件称为半导体磁敏器件。这些半导体材料有锗、硅、III-V 族化合物(如砷化镓、磷化镓、砷化铟等)。

1879 年霍尔(Hall)在研究电流通过有磁场垂直其平面的长方形金属片所发生的现象时,发现了金属片侧面产生微

弱电位差。这种物理现象人们称为霍尔效应。由于金属中自由电子浓度很大,它的霍尔效应十分微弱,所以,当时没有引起人们的重视。1910年人们用铍金属制成了霍尔器件,试图用以测量磁场。由于当时未找到更合适的材料,致使霍尔器件的研制工作处于停顿状态;磁阻器件的情况也不例外。

四十年代末,半导体材料制造工艺和半导体应用技术的迅速发展,推动研究人员找到了霍尔效应比较显著的半导体材料锗。五十年代后半期,对化合物半导体的研究,开发了高迁移率的新型半导体材料,进一步促进了霍尔器件、磁阻器件的研究、开发和应用。

1961年苏联科学家史塔也夫(В.И. Стафеев)研究 P^+-N-M 型长二极管的磁敏感效应时,发现了这种长二极管具有更高的磁灵敏度。1961年他用锗长二极管制成了磁敏二极管。六十年代末,日本索尼(Sony)公司研制成功了具有高复合区的 P^+-I-N^+ 型锗、硅磁敏二极管,进入了实用化阶段。从此,人们开始研究各种 $P-N$ 结磁敏管,如磁敏三极管、磁敏闸流管等。

随着半导体技术的发展,在半导体磁敏器件制造工艺的集成化、阵列化、超微型化方面也取得了巨大进展。超微型化和阵列化的磁敏器件能够检测磁泡的大小和磁场分布。

图 0.1 给出各种磁敏器件检测磁场的极限。从图中可以看到,霍尔器件(如磁罗盘磁通计)检测磁场的极限为 $10^{-9}T$,磁敏二极管检测磁场的极限为 $10^{-8}-10^{-10}T$,核磁共振仪检测磁场极限为 $10^{-11}T$,约瑟夫逊超导量子干涉器件(简称为 SQUID)能够检测 $10^{-13}T$ 。

核磁共振仪实际上是利用核磁共振吸收的量子效应制成的一种传感器,它能够检测比地球磁场小千万分之一(10^{-7})的弱磁场。六十年代,利用这种高灵敏度的核磁共振仪发现

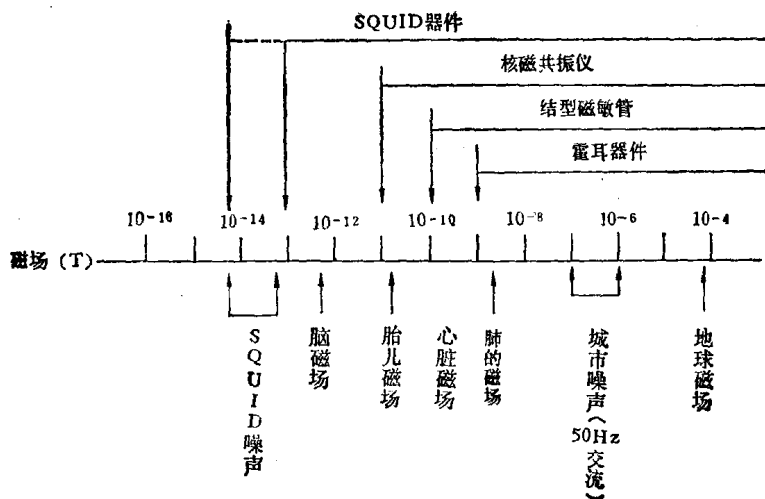


图 0.1 磁敏器件的检测磁场极限

了地球上的大陆缓慢移动的现象。

利用约瑟夫逊效应制成的超导量子干涉器件检测弱磁场的灵敏度比核磁共振仪高几个数量级，可以检测为地球磁场的千亿分之一 (10^{-11}) 的弱磁场。

利用量子效应的传感器有可能检测磁场同量子论基本常数——普朗克 (Planck) 常数 h 相比拟的原子磁矩的变化。因此，有人说约瑟夫逊效应的发现，在现代科学技术中继半导体晶体管出现后又一个革命性转折点。

1961 年，22 岁的约瑟夫逊 (B. D. Josephson) 在剑桥大学念书时，听过美国贝尔 (Bell) 实验室安德森 (H. Anderson) 教授关于超导体理论方面的讲学之后，对于两超导体金属间夹一层 $10 \text{ \AA}$ 左右的极薄绝缘体之层状结构伏安特性进行了理论推算，结果表明即使两端电压为零，仍会有超导电流通过，当其电流达到某一临界值时才会出现电压降。安德森教授看

过他的理论推导之后，认为结果是正确的。1962 年安德森教授回到贝尔实验室之后立即进行了实验，结果完全证实了约瑟夫逊理论推导的正确性。

这种约瑟夫逊效应实质上是超导金属之间的量子隧道效应。这效应解决了在科学技术领域内长期无法解决的极微弱电磁场的测量问题。同时，开辟了更高灵敏度传感器的研制，以便能够对电磁场作更高精度的测量。根据约瑟夫逊对物理学的贡献，他于 1973 年被授与诺贝尔物理学奖。

饶有兴趣的是，人类的生命活动也会产生极其微弱的磁场。譬如血液中所含离子的流动，会在周围产生一定强度的磁场，约瑟夫逊的 SQUID 就能够测量这些磁场的分布和变化情况。如图 0.1 所示，心脏活动产生的磁场为 10^{-9} — 10^{-10} T、脑磁场为 10^{-11} — 10^{-12} T。就像医疗诊断上使用心电图一样，SQUID 可以做心磁图的探头，将来有可能建立心磁学的新医疗诊断方法，即磁心脏学。

近几年来，我国半导体敏感器件(包括半导体磁敏器件)的研制和推广应用工作有了很大的发展。目前，半导体磁敏器件品种基本齐全，应用面也越益广泛。

从敏感器件制造和应用情况看，一个时期以来，大量的投资和研究工作主要还是集中在半导体敏感器件上。半导体磁敏器件在磁场的检测、自动控制等电子技术领域内应用得非常广泛。因此，仍需要大力开展半导体磁敏器件的制造和应用研究工作，以进一步扩大应用范围。

第一章 半导体磁敏感效应的 物理基础

半导体磁敏感效应理论是研制或制造各种半导体磁敏器件的理论基础。因此,要掌握半导体磁敏器件的工作及设计原理,首先需要了解半导体磁敏感效应的理论。本章将比较详细地讨论半导体在电场和磁场作用下表现出来的霍尔(Hall)效应、磁阻效应、热磁效应、光磁电效应,以及长二极管和长基区三极管的磁敏感效应。

1.1 霍尔效应

设有一结构如图 1.1 所示的长度为 l 、宽度为 w 、厚度为 d 的长方形半导体薄片,称它为霍尔片。一般霍尔器件是四端器件,有两个电流控制极和两个输出极。两个电流控制极分别焊接在霍尔片与 y 轴平行的两整个侧面上,而两个输出极是在与 x 轴平行的两侧面中央点焊引出,如图 1.1 所示。

如果霍尔器件的电流控制极通以电流 I_c (称为控制电流),并在其平面的法线方向(即 z 轴)上加以磁感应强度为 B 的磁场,那么载流子受洛伦兹力(Lorentz)作用向垂直于控制电流和磁场方向的某一侧面(y 轴方向)偏转。由于载流子在某一侧面积累起来,在两侧面间将产生电位差。这电位差 V_H 称为霍尔电压或霍尔电势。这种现象称为霍尔效应。

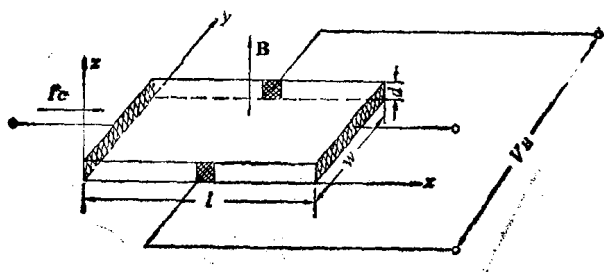


图 1.1 霍尔器件结构

1.1.1 一种载流子的霍尔效应

设如图 1.1 所示的霍尔片为均匀的 N 型半导体，而且它各处的温度也是均匀的。为讨论简单起见，先假定所有载流子电子漂移速度相等，不考虑其速度的统计分布。

在如图 1.1 所示的磁场中，通过霍尔片的电流密度 J_n 为

$$J_n = qn\mu_n E - \mu_{Hn} J_n \times B \quad (1.1)$$

式中 q 为电子电荷量， μ_n 和 μ_{Hn} 分别表示电子漂移迁移率和霍尔迁移率， E 为电场强度， n 表示电子浓度。

式(1.1)右式第一项表示电场作用产生的漂移电流，第二项表示洛伦兹力作用产生的横向漂移电流。实验发现在电场和电磁场中载流子的迁移率大小不相等，一般后者的迁移率(称霍尔迁移率)大于前者的迁移率(称漂移迁移率)。关于这问题，下面还要做具体的分析讨论。

J_n 在 x 、 y 轴的分量为

$$J_{nx} = qn\mu_n E_x - \mu_{Hn} J_{ny} B \quad (1.2)$$

$$J_{ny} = qn\mu_n E_y + \mu_{Hn} J_{nx} B \quad (1.3)$$

当输出极开路时， $J_{ny} = 0$ ，所以，由上式(1.2)和式(1.3)得

$$J_{nx} = qn\mu_n E_x \quad (1.4)$$

$$E_y = - \frac{\mu_{Hn}}{qn\mu_n} \cdot J_{nx} B \quad (1.5)$$

式中 E_y 称为横向霍尔电场。

因控制电流 I_c 和霍尔电压 V_H 为

$$I_c = J_{nx} w d \quad (1.6)$$

$$V_H = E_y w \quad (1.7)$$

所以,式(1.5)代入式(1.7)得霍尔电压 V_H 为

$$V_H = - \frac{\mu_{Hn}}{\mu_n} \cdot \frac{I_c B}{qn d} \quad (1.8)$$

令

$$R_H = - \frac{\mu_{Hn}}{\mu_n} \cdot \frac{1}{qn} \quad (1.9)$$

则

$$V_H = R_H \cdot \frac{I_c B}{d} \quad (1.10)$$

上式中 R_H 称为霍尔系数,单位是 m^3/C 。

同理,若霍尔片为P型半导体,则它的霍尔系数 $R_H = \mu_{Hp}/\mu_p q p$, 霍尔电压 V_H 为

$$V_H = \frac{\mu_{Hp}}{\mu_p} \cdot \frac{I_c B}{q p d} \quad (1.11)$$

式中 μ_p 和 μ_{Hp} 分别表示空穴漂移迁移率和霍尔迁移率, p 表示空穴浓度。

如果磁感应强度方向不在 z 轴,而与 z 轴成 θ 角时,式(1.8)、式(1.10)和式(1.11)中 $I_c B$ 应以 $I_c B \cos \theta$ 表示即可。

由上讨论可见,N型和P型半导体的霍尔系数符号相反,因此,它们的霍尔电压方向也是相反的。

由于垂直磁场的作用,电场 E 和电流 J_x 不在同一个方向,其夹角 θ_H 称为霍尔角。在霍尔电场作用力与洛伦兹力达到动态平衡时, y 轴方向没有电流,控制电流仍沿 x 轴方向流

动。这时霍尔片内部合成电场不再是 x 轴方向了。因此，霍尔角 θ_H 为

$$\operatorname{tg} \theta_H = \frac{E_y}{E_x} \quad (1.12)$$

把式 (1.4) 和式 (1.5) 代入式 (1.12) 得

$$\operatorname{tg} \theta_{Hn} = -\mu_{Hn} B \quad (1.13)$$

同理,对于空穴而言可得

$$\operatorname{tg} \theta_{Hp} = \mu_{Hp} B \quad (1.14)$$

上式中出现正、负符号,只表示载流子的偏转方向。

1.1.2 两种载流子的霍尔效应

众所周知,在半导体中总是同时存在两种载流子,即电子和空穴。设 J_n 和 J_p 分别表示通过霍尔片的电子和空穴电流密度,则

$$J_n = qn\mu_n E - \mu_{Hn} J_n \times B \quad (1.15)$$

$$J_p = qp\mu_p E + \mu_{Hp} J_p \times B \quad (1.16)$$

从上式 (1.15) 和式 (1.16) 可得

$$J_{nx} = \frac{qn\mu_n}{1 + \mu_{Hn}^2 B^2} (E_x - \mu_{Hn} B E_y) \quad (1.17)$$

$$J_{ny} = \frac{qn\mu_n}{1 + \mu_{Hn}^2 B^2} (E_y + \mu_{Hn} B E_x) \quad (1.18)$$

$$J_{px} = \frac{qp\mu_p}{1 + \mu_{Hp}^2 B^2} (E_x + \mu_{Hp} B E_y) \quad (1.19)$$

$$J_{py} = \frac{qp\mu_p}{1 + \mu_{Hp}^2 B^2} (E_y - \mu_{Hp} B E_x) \quad (1.20)$$

控制电流密度 J_x 为

$$J_x = J_{nx} + J_{px} \quad (1.21)$$

当输出极开路时,

$$J_y = J_{ny} + J_{py} = 0 \quad (1.22)$$