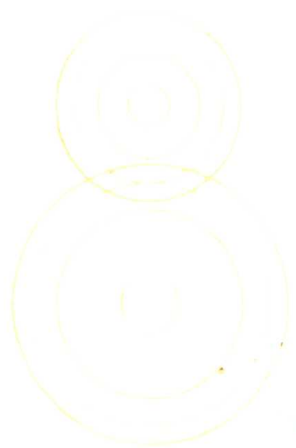


仪表元件丛书

半导体磁电转换元件



仪表元件丛书

半导体磁电转换元件

高永祥 编



机械工业出版社

本书对半导体磁电转换元件的理论和应用作了全面的阐述。主要讨论了霍尔元件和磁阻元件的工作原理、特性及其在测量技术和自动化技术等方面的应用。其次,还简要介绍了磁敏二极管、方向性磁电元件、磁抗元件和磁敏三极管等一些新发展起来的半导体磁电转换元件,并对当前发展趋势也作了简单介绍。

本书可供研制和使用磁电转换元件的技术人员和工人阅读,也可供自动化仪表、测量技术和半导体器件等专业的师生作参考。

本书由高逊之同志审阅。在定稿过程中得到饶夫基、刘洛同志的帮助。

仪器元件 半导体磁电转换元件

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄阜成门内大街)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $13^{1/8}$ · 字数 287 千字

1985年3月北京第一版·1985年3月北京第一次印刷

印数 0,001—8,000 · 定价 2.10 元

*

统一书号: 15033 · 5106

出版者的话

仪器仪表是实现四个现代化必不可少的技术装备，而仪器仪表元件（简称仪表元件）是仪器仪表中具有独立功能的最基本的单元，它是仪器仪表的基础，能完成信号的检测、传递、转换、放大、贮存、运算、控制和显示等功能。仪表元件的品种和质量直接影响着仪器仪表的性能。

目前，仪器仪表已广泛应用于国民经济各部门。为了适应仪器仪表工业发展的需要，进一步做好仪表元件基础知识的普及工作，在机械工业部仪器仪表工业局的大力支持下，我们编辑出版了这套《仪表元件丛书》。

本丛书预定为十一分册，分别为《热敏电阻器》、《集成电路在仪器仪表中的应用》、《半导体光电器件》、《宝石支承》、《仪表齿轮》、《金刚石压头》、《数据采集系统中的放大器》、《半导体磁电转换元件》、《自动平衡仪表放大器》、《自动平衡仪表电机》、《集成运算放大器》等，将陆续出版。

本丛书以介绍各类仪表元件的结构原理、特性、设计计算为主，对制造工艺、性能测试和应用知识也作了简单的阐述。在写法上，力求通俗易懂，深入浅出，从基础概念出发，对仪表元件的有关问题进行论述。

值此《仪表元件丛书》出版之际，我们向为丛书的编写做了大量组织、指导工作的沈阳仪器仪表工艺研究所的领导及从事具体工作的同志表示深切的谢意，并向大力支持丛书编写的各有关单位领导及编者，表示衷心的感谢。

目 录

出版者的话

第一章 绪论	1
第一节 半导体的磁电转换现象及其发展	1
第二节 磁电转换元件的定义、分类及特点	2
第三节 半导体物理的基本概念简介	4
第二章 磁电效应	11
第一节 霍尔效应	11
一、真空中载流子的磁电效应	11
二、载流子在大尺寸半导体中的磁电效应	13
三、半导体片内的霍尔效应	17
四、霍尔效应的一些关系式	20
五、霍尔系数的作用	22
第二节 磁阻效应	22
一、磁阻率效应和形状磁阻效应	22
二、磁阻效应的机理	22
第三节 其他磁电效应	25
一、厄廷好森 (Ettingshausen) 效应	26
二、能斯特 (Nernst) 效应	28
三、里纪-勒杜克 (Righi-Leduc) 效应	29
第三章 磁电效应的理论	33
第一节 概述	33
一、磁电效应的理论基础	33
二、磁电效应的张量表示	33
三、两种处理方法	36
第二节 霍尔效应	36
一、弱磁场特性 $\omega_c \tau^2 \ll 1$	38

N

二、强磁场特性 $\omega_c^2 \tau^2 \gg 1$	47
三、任意磁场	42
第三节 磁阻率效应	44
一、弱磁场特性 $\omega_c \tau \ll 1$	44
二、强磁场特性 $\omega_c \tau \gg 1$	48
第四节 形状磁阻效应	49
一、长方形元件	49
二、柯比诺 (Corbino) 元件	51
第五节 热磁效应	52
一、厄廷好森系数	59
二、能斯脱系数	56
三、里纪-勒杜克系数	57
第六节 平面霍尔效应	57
一、纵向和横向磁阻	57
二、弱磁场条件下磁电特性的一般关系式	58
三、平面霍尔电势	58
第四章 磁电转换用半导体材料	60
第一节 锗	60
第二节 硅	65
第三节 锑化铟	66
第四节 砷化铟	71
第五节 磷砷化铟 ($\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$)	75
第六节 锑化铟和锑化镓的共晶体	75
第七节 锑化铟和铟的共晶薄膜	77
第五章 磁电效应的测量方法	78
第一节 测量技术的基础	78
一、试样的结构和形状	78
二、磁场的产生和磁通密度的测量	80
三、试样的电流	86

四、电压的测量	80
五、温度的控制	81
第二节 霍尔效应的测量方法	82
一、直流法测量	82
二、交流法测量	83
三、其他特殊测量法	84
第三节 磁阻效应的测量方法	88
一、磁阻率效应的测量	88
二、磁阻效应的测量	89
第六章 霍尔元件	90
第一节 概述	90
第二节 基本特性	92
一、直线性	92
二、灵敏度	97
三、最大输出	99
四、最大效率	100
五、负载特性	104
六、温度特性	105
七、频率特性	109
八、四端网络和它的非互易性	113
第三节 元件的误差和补偿	116
一、零位误差及其补偿	116
二、温度误差及其补偿	125
三、热电势的误差及消除	139
四、元件的噪声误差	144
五、元件的稳定误差	147
六、磁路误差	148
第四节 元件的设计和制造工艺	148
一、元件的设计	148

二、制造工艺	155
第五节 元件参数的测量	162
一、普通参数	162
二、专用参数	164
第六节 霍尔元件的实际产品	166
一、锗霍尔元件	166
二、硅霍尔元件	168
三、锑化铟霍尔元件	172
四、砷化铟霍尔元件	174
五、砷化镓霍尔元件	180
六、其他的霍尔元件	181
第七章 霍尔元件的应用	184
第一节 概述	184
一、应用霍尔电势与磁场成比例的特性	184
二、乘法作用的应用	184
三、非互易性的应用	184
四、霍尔效应和其他效应的组合应用	185
第二节 应用霍尔电势与磁场成比例的特性	185
一、磁量测量	185
二、非电量转变成磁量的测量	201
三、电量转变成磁量的测量——电流计	222
四、感测磁量的变化值——无触点发信	226
第三节 乘法作用的应用	232
一、霍尔效应乘法器	232
二、频率变换	240
三、模拟运算器	247
第四节 非互易性的应用	252
一、回转器	253
二、隔离器	254

三、环行器	256
第五节 其他方面的应用	258
一、磁控型半导体等离子体器件(等离子磁性控制开关 元件)	258
二、红外线检测器(光磁电装置)	259
三、冷却器(热磁电装置)	260
第八章 磁阻元件	262
第一节 各种磁阻元件的特性	262
一、长方形元件的特性	262
二、高灵敏度元件的基本特性	271
三、柯比诺元件	276
四、磁场比例型磁阻元件	278
五、可控特性的磁阻元件	278
六、负磁阻元件	283
七、体型元件	287
八、薄膜元件	288
九、InSb-NiSb 共晶体磁阻元件	290
十、非均匀磁阻元件	291
十一、各向异性磁阻元件(坡莫合金的磁阻元件)	291
第二节 磁阻元件的温度特性及其补偿	293
一、弱磁场时平方灵敏度和温度的关系	293
二、强磁场时线性灵敏度和温度的关系	295
三、温度补偿	296
第三节 频率特性	297
第四节 磁阻元件的设计和制造	299
一、元件的设计	299
二、制造方法	300
三、材料的选用	302
第五节 磁阻元件的实际产品	303

VI

第六节 磁阻元件的乘法作用	307
一、平方特性下的乘法作用	307
二、线性特性下的乘法作用	309
三、乘法作用的性能指标	312
四、偏置磁场不稳定的影响	317
五、温度补偿电路	319
第九章 磁阻元件的应用	320
第一节 概述	320
一、磁阻元件的应用范围	320
二、与霍尔元件应用的比较	320
第二节 在测量技术中的应用	321
一、磁通计	321
二、位移计和振动拾音器及其他	324
三、电流计	325
四、直、交流功率计	325
五、微波功率计	328
第三节 在计算技术中的应用	331
一、函数发生器	331
二、乘法器	335
三、模拟运算器	339
第四节 在无线电技术中的应用	344
一、信号转换(直-交流转换和频率转换)	344
二、微波混频器	345
三、波形分析	347
四、负阻元件——非线性元件	348
五、振荡器	352
六、放大器	352
第五节 在控制技术中的应用	354
第十章 其他磁电元件	357

第一节 磁敏二极管	357
一、概述	357
二、磁性整流器(磁性二极管)原理	357
三、SMD 的结构、原理与特点	360
四、锗SMD	362
五、硅SMD	367
六、温度补偿的线路及其灵敏度	369
七、特点和应用范围	371
八、应用举例	372
第二节 磁抗元件	376
一、原理	376
二、结构和特性	378
三、应用	380
第三节 方向性磁电元件	382
一、原理和基本特性	382
二、应用	385
第四节 磁敏三极管	385
一、硅平面管式的磁敏三极管	385
二、面积式磁敏三极管(简称SCM)	385
三、特殊磁敏三极管(简称NSMT)	387
第十一章 磁电元件的发展趋势	393
第一节 磁电元件的集成化	393
一、磁电元件集成化的类型	394
二、磁电组件简例	395
第二节 磁电元件的功能化	395
一、概述	395
二、多功能霍尔元件	396
三、功能化磁阻元件和磁敏二极管元件	398
第三节 新材料、新工艺和新元件的研究	398

X

一、检测磁泡的新型霍尔元件	400
二、采用软磁性或半硬磁性材料作基片的霍尔元件	402
三、双磁性体的高灵敏度霍尔元件	402
四、InSb 薄膜霍尔元件保护膜SiO ₂ 的加工方法	403
五、不平衡电势的补偿	404
六、用氧化膜保护元件的锡焊工艺	404
七、减小端部效应的霍尔元件	404
参考文献	406

第一章 绪 论

第一节 半导体的磁电转换现象 及其发展〔1〕〔2〕〔3〕

磁电转换原理早为人们所熟悉。1879年美国霍尔(E. H. Hall)在探索电动机原理时发现:磁场中的导体,当有电流流过时,其横方向不仅受到力的作用,同时还出现电压。这个现象后来被称之为霍尔效应。随后,1883年英国开尔文(Kelvin)又发现磁场中导体的电阻会发生改变的磁阻效应。这些就是人们认识磁电转换现象的开端。

但是,导体中的磁电效应实在是太微弱了,所以长期以来,磁电转换现象未能在工程上得到实际应用。随着半导体的出现,由于半导体的磁电现象比较显著,才开始在工业上应用这一现象。到了五十年代,Ⅲ-V族化合物半导体出现以后,这些化合物的电子迁移率比锗和硅大得多,磁电转换现象非常显著,因而半导体的磁电转换现象便愈加受到人们的重视。

半导体的磁电转换现象对近代半导体物理的发展也起着重要作用。根据对半导体材料霍尔系数的大小和符号的测定,人们可确定其载流子的浓度和它的种类,而由半导体材料与温度的关系,又能确定其禁带的宽度和杂质的能级。同样,通过对磁阻效应的实验,人们能够研究半导体的能带结构,从而推断出载流子的散射机理。所以,迄今为止,磁电现象仍然是半导体物理学研究上最常用的基础实验之一。

如今,磁电转换元件已达实用阶段,而由磁电转换元件制成的组件正逐渐形成一种新的更可靠的固体装置。磁电元件所以能迅速地发展,原因之一是六十年代到七十年代以来,集成电路的发展促使半导体制造技术的迅速发展,解决了制造磁电转换元件的工艺问题。随着半导体提纯技术的发展以及传感器的半导体化,特别是随着发光二极管的出现,使制造Ⅲ-V族化合物半导体材料的技术有所发展,从而为磁电元件的发展打下了坚实基础。其次,工业水平的发展,也不能缺少磁电转换元件。电子线路固体化后,剩下的外围部件就是起动和执行机构,如果要求小型化并用电去控制,就必须使用磁电元件。例如无刷电机及各种无触点装置和开关等等。此外,与元件普遍应用相适应,还要求解决磁量的测量技术,并提高测量精度,这也促使人们对磁电转换元件进行研究。例如,对新的高精密度的记忆元件磁泡畴的检测,按传统的方法,利用线圈磁感应的原理,对小于 $10\text{ }\mu\text{m}^2$ 以下面积的测量很困难,而利用集成化磁电固体装置,发挥其微型化的技术特点,便很容易解决这一测量问题。

可以预言,随着测量的数字化、自动化和系统计算机控制的发展,半导体传感器及磁电转换元件也将迅速发展。

第二节 磁电转换元件的定义、 分类及特点〔4〕

凡利用固体中的磁电转换效应构成的元件都称为磁电转换元件。磁电转换元件是半导体传感器的一种,其种类很多,有霍尔元件、磁阻元件、磁敏二极管、磁抗元件、方向性磁电元件、磁敏三极管等,又因其表现方式和采用的方法不同,故实际元件的特性有很大差别。

图 1-1 是各种磁电元件特性的简单比较。由图可见,霍尔元件、磁阻元件、方向性磁电元件是纯电阻性的,并且都是体结构型,符合欧姆定律,三者的输出电压与电流成正比,电阻值是常数,与电流、电压无关,由元件大小和形状决定,并可在一定范围内自由选择。磁敏二极管和三极管则是一种结型元件,其电压和电流特性是非线性的。为了使磁敏二极

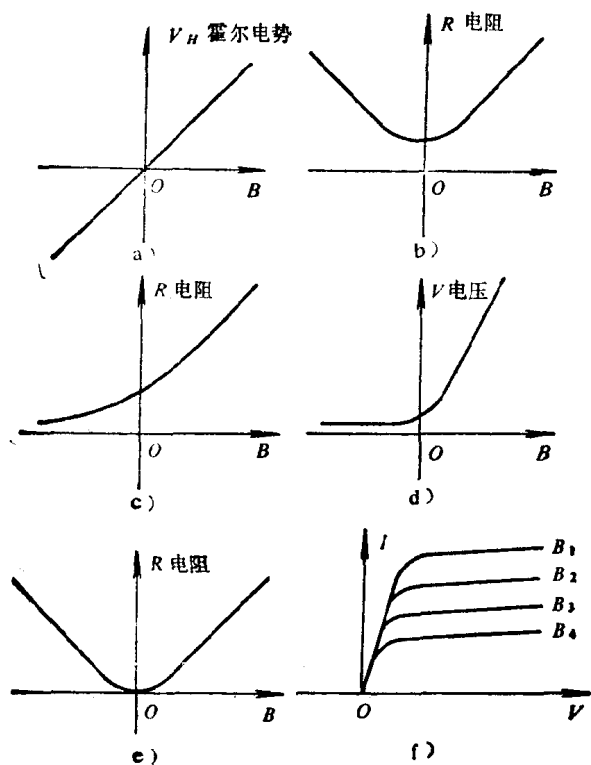


图 1-1 各种磁电元件的特性

- a) 霍尔元件 b) 磁阻元件 c) 磁敏二极管 d) 方向性元件
e) 磁抗元件 f) 磁敏三极管

管的输出大、频率响应好，元件应有一个最佳尺寸或电阻值。

磁抗元件的阻抗呈感抗特性，其值不随电流或电压变化，而由磁场的大小确定。当然，以后还会提到，它的阻抗还和电流频率有关。

从所用的半导体材料来看，各元件也有所不同。霍尔元件采用从Si、Ge到InSb、InAs以及 $\text{In}(\text{As}_y\text{P}_{1-y})$ 、GaAs等金属化合物，要求材料有较高的纯度。磁阻元件则不用Si、Ge等低迁移率的材料，而限于采用InSb或InAs，或者InSb和NiSb的共晶材料。方向性磁电元件或磁抗元件也需要用高迁移率的半导体材料，因而只限于用InSb或InAs。磁敏二极管或三极管由于靠结型注入大量载流子，可以用低迁移率材料Si或Ge制造。

磁电元件的特点可概括如下：

- (1) 小型、结构简单；
- (2) 无磨损和可动部件，因而寿命长，可靠性高；
- (3) 安装简单、易于维护；
- (4) 除结型元件外，载流子的复合极小，噪声很小，可有高的信噪比；
- (5) 频率特性在高频区域并不衰减，从直流到微波都可用；
- (6) 可以进行连续测量，并可遥测和遥控。

第三节 半导体物理的基本概念简介

导体、绝缘体和半导体的能带理论，是半导体物理的基本理论之一；半导体的本征导电和杂质导电是解释半导体导电方式的两个基本概念，但限于篇幅，本书只对与半导体磁

电效应密切相关的一些基本概念作简单介绍。

1. 晶体中电子的有效质量

为了引入有效质量的概念，现在需要简略比较自由电子和共有化电子的运动规律。

能带论把晶体中的电子运动分为原子运动和共有化运动。电子的共有化运动的基本特点和自由电子运动十分相似。电子是一种微观粒子，严格说应该用量子力学来讨论，但是在量子效应并不显著的情况下，例如自由电子的情况，就可以应用经典力学来近似。

(1) 自由电子运动规律

由经典力学，自由电子的动量：

$$\mathbf{P} = m\mathbf{v} \quad (1-1)$$

自由电子的能量：

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = P^2/2m \quad (1-2)$$

这里 m 和 $\mathbf{v}$ 分别是自由电子的质量和速度矢量。设自由电子上作用一外力 $\mathbf{F}$ ，则它和加速度 $\mathbf{a}$ 之间的关系为：

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1-3)$$

$\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{P}$ 之间的关系为：

$$\mathbf{F} = d\mathbf{P}/dt \quad (1-4)$$

因为自由电子具有粒子和波动二重性，为描写其运动状态，在量子力学中要用动量 $\mathbf{P}$ 或波矢量 $\mathbf{k}$ ，反映粒子性的动量 $\mathbf{P}$ 和波动性的 $\mathbf{k}$ ，它们之间的关系在一维情形下为：

$$P = \hbar k \quad (1-5)$$

式中 $\hbar$ 为普朗克常数。将式 (1-5) 代入式 (1-1)、(1-2) 和 (1-4) 中，可得自由电子的运动方程式：

$$\mathbf{F} = \hbar d\mathbf{k}/dt \quad (1-6)$$