

半导体传感器

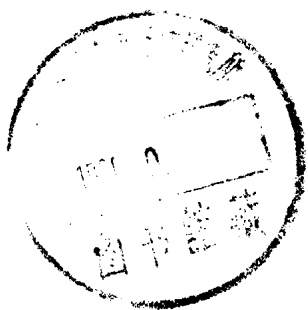
张维新 朱秀文 毛贛如 编

天津大学出版社



半 导 体 传 感 器

张维新 朱秀文 毛贛如 编



天 津 大 学 出 版 社

9110208

1022/52
内 容 简 介

本书对磁敏、光敏、温敏、压力敏、离子敏、气敏等半导体传感器的工作原理、设计与制造及其特性作了系统全面的论述，并介绍了半导体传感器技术的新发展。

本书可作为高等学校半导体、微电子、生物医学、自动化等专业的教学用书，也可供从事传感器技术、微电子技术、自动化工程等工作的专业人员参考。

半 导 体 传 感 器

张维新 朱秀文 毛贻如 编

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：9 7/8 字数：255千字

1990年12月第一版 1990年12月第一次印刷

印数：1-3000

ISBN 7-5618-0216-1

TP·27

定价：2.60元

前 言

传感器技术是构成现代信息技术系统的主要内容之一。信息技术系统包括三个主要组成部分：传感器、通信系统和计算机。它们相当于人的“感官”、“神经”和“大脑”。70年代微电子技术的发展，促进了通信系统和计算机的迅速发展，而传感器技术却没有得到相应的发展。于是在80年代出现了“信息处理能力过剩，信息获取能力不足”的问题。为了适应现代科学技术的发展，许多国家都把传感器技术列为80年代的关键技术之一。

传感器的定义有广义的和狭义的两种。广义的定义为：能感受外界信息并按一定规律转换成可用信号的装置称为传感器；狭义的定义为：能将外界信息转换成电信号的装置称为传感器。传感器的分类方法很多。按其功能可分为：力敏、光敏、磁敏、温敏、湿敏、气敏、离子敏、生物敏等；按制作材料可分为：半导体、陶瓷、金属、光纤、高分子材料等；按构成原理可分为：结构型和物性型。

早期的传感器大多属于结构型。随着科学技术的发展，传感器向物性型发展，其发展趋势是集成化、多功能化、智能化。半导体传感器具有体积小、响应快、灵敏度高、成本低等特点，便于实现集成化、多功能化、智能化。因此，愈来愈受到人们的普遍重视。

为了促进半导体传感器技术的发展，我们在广泛收集国内外先进技术资料的基础上，结合教学和科研的实践，编写了本书。本书按照半导体传感器的功能分类进行论述。主要论述各种半导体传感器的物理和化学效应；介绍各类半导体传感器的设计、制作工艺、敏感特性及其应用；还介绍了半导体传感器技术近年来的最新研究成果。

郭维廉教授审阅了本书初稿，提出不少宝贵意见，在此表示衷

心的感谢。

由于作者水平有限，书中的缺点与错误在所难免，恳切希望读者批评指正。

编 者

1990年初

目 录

第一章 半导体磁敏传感器	(1)
第一节 半导体中的电磁效应	(2)
一、霍尔效应	(8)
二、载流子的偏转和磁阻效应	(4)
第二节 霍尔板	(5)
一、理想霍尔板	(5)
二、集成霍尔板	(7)
三、霍尔板的性能参数	(10)
第三节 MOS磁敏传感器	(16)
一、MOS 霍尔板	(16)
二、分裂漏极 (Split-Drain) MOS磁敏晶体管	(19)
三、集成MOS磁敏传感器	(23)
第四节 磁敏晶体管	(24)
一、洛伦兹力对载流子的偏转效应	(25)
二、磁敏晶体管的霍尔效应	(27)
三、磁敏晶体管的磁集中效应	(30)
四、集成磁敏晶体管	(31)
五、磁敏晶体管的品质因数	(32)
第五节 磁敏二极管	(35)
一、非平衡载流子的复合	(35)
二、磁敏二极管的工作原理	(36)
三、磁敏二极管的特性	(37)
四、集成磁敏二极管	(37)
第六节 长基区磁敏晶体管	(39)
一、长基区磁敏晶体管的结构	(39)

二、长基区磁敏晶体管的工作原理	(40)
三、长基区磁敏晶体管的特性	(40)
第七节 载流子域磁敏传感器	(43)
一、纵向四层载流子域磁敏传感器	(43)
二、环形四层载流子域磁敏传感器	(45)
三、环形三层载流子域磁敏传感器	(46)
参考资料	(47)
第二章 半导体光敏传感器	(50)
第一节 半导体中的光电效应	(50)
一、半导体的光吸收	(50)
二、半导体的光电导效应	(51)
三、半导体的光生伏特效应	(53)
第二节 光敏电阻	(54)
一、CdS 光敏电阻的工作原理	(54)
二、CdS 光敏电阻的制备	(55)
三、CdS 光敏电阻的特性	(55)
第三节 光敏二极管	(58)
一、光敏二极管的概述	(58)
二、p-i-n型光敏二极管	(65)
三、金属-半导体光敏二极管	(66)
四、雪崩光敏二极管	(68)
第四节 光敏晶体管	(70)
一、光敏晶体管概述	(70)
二、异质结光敏晶体管	(75)
三、光敏场效应晶体管	(82)
第五节 固态图象传感器	(87)
一、电荷耦合器件	(87)
二、固态图象传感器	(90)
参考资料	(102)
第三章 半导体温度传感器	(105)

第一节 热敏电阻器	(105)
一、NTC热敏电阻器	(106)
二、PTC热敏电阻器	(110)
三、CTR热敏电阻器	(112)
第二节 硅温度传感器	(112)
一、硅温度传感器的工作原理	(112)
二、硅温度传感器的结构和制作工艺	(115)
三、硅温度传感器的特性	(116)
第三节 p-n结温度传感器	(118)
一、p-n结正向电压与温度的关系	(118)
二、晶体管e-b结压降与温度的关系	(120)
三、晶体管温度传感器	(123)
第四节 集成温度传感器	(124)
一、电流型PTAT集成温度传感器	(125)
二、电压型PTAT集成温度传感器	(126)
三、具有内部参考电压的温度传感器 ^[11]	(127)
第五节 塞贝克效应红外温度传感器	(132)
一、塞贝克(Seebeck)效应	(132)
二、硅的塞贝克系数	(135)
三、品质因数	(138)
四、硅热电偶	(139)
五、红外探测器	(142)
第六节 MOS场效应晶体管红外探测器	(144)
一、IRFET的结构	(144)
二、IRFET的工作原理	(144)
三、IRFET的特性	(148)
参考资料	(154)
第四章 半导体压力传感器	(156)
第一节 半导体的压阻效应	(156)
一、压阻效应	(156)

二、压阻系数	(158)
第二节 压力敏感器件的设计	(160)
一、压阻全桥原理	(160)
二、压敏电阻的设计	(162)
三、硅膜片上的压阻全桥设计	(163)
四、压敏电阻电桥的特性及补偿	(171)
第三节 集成压阻式压力传感器	(178)
一、带温度补偿的集成压力传感器	(178)
二、带温度补偿和放大电路的集成压力传感器	(180)
三、频率和数字输出型集成压力传感器	(182)
第四节 电容式压力传感器	(188)
一、基本结构	(188)
二、工作原理	(189)
三、电容变化常用检出电路	(194)
参考资料	(203)
第五章 半导体离子敏传感器	(205)
第一节 MOSFET的基本原理	(205)
一、MOSFET的阈值电压	(205)
二、MOSFET的电流-电压特性	(206)
第二节 ISFET的结构和工作原理	(207)
第三节 ISFET的基本理论	(210)
一、电解液-绝缘体界面的相互作用	(210)
二、理想的EIS结构	(214)
三、EISFET的漏电流-电压特性	(216)
第四节 离子敏感膜的种类及其响应	(218)
一、离子敏感膜的种类	(218)
二、ISFET的响应与选择性	(221)
第五节 ISFET的设计与制造	(225)
一、ISFET的设计原则	(225)
二、单个ISFET的设计与制造	(228)

三、集成化ISFET的设计与制造	(236)
第六节 ISFET的特点及问题	(247)
参考资料	(248)
第六章 半导体气敏传感器	(250)
第一节 电导控制型气敏传感器的机理	(251)
一、晶界势垒模型	(251)
二、表面电导模型	(252)
三、氧离子陷阱势垒模型	(253)
第二节 电导控制型气敏传感器的特性	(255)
一、初始过程和气敏响应	(255)
二、氧气分压对气敏传感器特性的影响	(256)
三、催化剂对气敏传感器特性的影响	(258)
四、温度对气敏传感器特性的影响	(259)
五、气敏传感器的选择性	(260)
六、湿度对气敏传感器特性的影响	(263)
第三节 电导控制型气敏传感器的结构与制备	(265)
一、 SnO_2 气敏传感器	(265)
二、 ZnO 气敏传感器	(269)
三、 Fe_2O_3 气敏传感器	(270)
第四节 电压控制型气敏传感器	(271)
一、气敏传感器的工作原理	(271)
二、气敏传感器的结构	(273)
第五节 催化金属栅场效应气敏传感器	(278)
一、氢气敏Pd栅MOS晶体管	(278)
二、一氧化碳气敏Pd栅MOS晶体管	(284)
三、硫化氢气敏Pd栅MOS晶体管	(290)
四、氨气敏催化金属栅MOS器件	(292)
五、氧气敏MOS晶体管	(297)
参考资料	(302)

第一章 半导体磁敏传感器

磁敏传感器是把磁学物理量转换成电信号的传感器。它广泛地应用于自动控制、信息传递、电磁测量、生物医学等各个领域。磁敏传感器的应用可以分为两大类：直接应用和间接应用。直接应用包括测量磁场强度的各种磁场计，如地磁的测量，磁带和磁盘的读出，漏磁探伤，磁控设备等。间接应用是把磁场作为媒介用来探测非磁信号，如无接触开关、无触点电位器、电流计、功率计、线位移和角位移的测量等。不同用途的磁敏传感器，对灵敏度、分辨率、线性度有不同的要求。

磁敏传感器的工作原理大多是基于载流子在磁场中受洛伦兹力的作用而发生偏转的机理（ $\mathbf{F}=q\mathbf{V}\times\mathbf{B}$ ， q 为电子电荷， $\mathbf{V}$ 为载流子运动速度， $\mathbf{B}$ 为磁感应强度）根据 $\mathbf{B}=\mu\mu_0\mathbf{H}$ （ $\mu\mu_0$ 为材料的导磁率， $\mathbf{H}$ 为磁场强度），磁敏传感器可以分为两类：1.高导磁率材料（ $\mu\gg 1$ ）制成的磁敏传感器。如利用铁镍薄膜磁阻效应、石榴石中的磁光效应及镀镍光纤的磁伸缩效应等制成的磁敏传感器。2.低导磁率材料（ $\mu\approx 1$ ）制成的磁敏传感器。利用半导体材料（如Si、GaAs、InSb等）的电磁效应制成的磁敏传感器，如霍尔器件、磁敏晶体管、磁敏电阻器等。除上述两类外，还有核磁共振、超导量子干涉器件等磁敏传感器。

目前，磁敏传感器发展的重要方向是半导体集成磁敏传感器。它可以采用集成电路工艺，把传感器和信号处理电路制作在同一芯片上，具有灵敏度高、体积小、性能可靠、成本低等优点。

本章简要阐述半导体的电磁效应，重点讨论以硅材料为基体的各种磁敏传感器，包括霍尔板、MOS磁敏传感器、双极磁敏晶体管、磁敏二极管、载流子域磁敏传感器及其集成化。

第一节 半导体中的电磁效应

已经知道,带电粒子在磁场中运动时,受到洛伦兹力的作用。假设n型半导体,当不加磁场时($B=0$),电子电流密度为 $J_n(0)$ 。若温度梯度为零,可以求得玻尔兹曼输运方程的近似表达式

$$J_n(0) = \sigma_n E + q D_n \nabla n \quad (1-1)$$

式中 σ_n —— $B=0$ 时的电导, $\sigma_n = q \mu_n n$;

E ——电场强度;

q ——电子电荷;

D_n ——电子扩散系数;

n ——电子浓度;

μ_n ——电子漂移迁移率。

当磁场不为零时,电子电流密度为

$$J_n(B) = J_n(0) - \mu_n^* (J_n(B) \times B) \quad (1-2)$$

式中 μ_n^* ——电子霍尔迁移率, $\mu_n^* = \gamma_n \mu_n$;

γ_n ——散射因子, $\gamma_n = \langle \tau_n^2 \rangle / \langle \tau_n \rangle^2$;

τ_n ——两次碰撞之间的自由时间,其值与能带结构和散射机理有关。

对于低掺杂n型硅,在室温下 γ_n 约为1.15。由式(1-2)可以得到

$$J_n(B) = \frac{(J_n(0) + \mu_n^* (B \times J_n(0)) + (\mu_n^*)^2 (B \cdot J_n(0)) B)}{1 + (\mu_n^* B)^2} \quad (1-3)$$

上式表示电子在绝热系统下的电磁效应,它包含温度对载流子浓度、扩散和迁移率的影响,但是没有包含热磁或热电效应的作用。

对于p型半导体,可以得到类似的空穴电流密度方程。

式(1-3)表示洛伦兹力对载流子有两种作用:包含 E 的项表示对载流子的漂移作用,包含 ∇n 的项表示对载流子的扩散作用。在磁

场集中或空间电荷存在的情况下, 载流子的扩散起主导作用。如磁敏二极管(有电子和空穴两种载流子的注入)。如果载流子的浓度梯度可以忽略不计, 载流子的漂移起主导作用, 式(1-3)则变为

$$\mathbf{J}_n(\mathbf{B}) = \sigma_{nB}(\mathbf{E} + \mu_n^*(\mathbf{B} \times \mathbf{E}) + \mu_n^{*2}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{E})\mathbf{B}) \quad (1-4)$$

其中

$$\sigma_{nB} = \frac{\sigma_n}{1 + (\mu_n^* \mathbf{B})^2}$$

当磁场与电场平时, $\mathbf{B} \times \mathbf{E} = 0$, 则可以得到: $\mathbf{J}_n(\mathbf{B}) = \sigma_n \mathbf{E} = \mathbf{J}_n(0)$, 在各向同性的半导体中, 不存在纵向电磁效应。当磁场与电场垂直时, $\mathbf{B} \cdot \mathbf{E} = 0$, 则有

$$\mathbf{J}_n(\mathbf{B}) = \sigma_{nB}(\mathbf{E} + \mu_n^*(\mathbf{B} \times \mathbf{E})) \quad (1-5)$$

上式表示忽略载流子扩散情况下的横向电磁效应。根据 $\mathbf{B} = (0, 0, B)$, $\mathbf{E} = (E_x, E_y, 0)$, 和 $\mathbf{J}_n(\mathbf{B}) = (J_{nx}, J_{ny}, 0)$, 式(1-5)可以写成

$$\left. \begin{aligned} J_{nx} &= \sigma_{nB}(E_x - \mu_n^* B E_y) \\ J_{ny} &= \sigma_{nB}(E_y + \mu_n^* B E_x) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

一、霍尔效应

把通以电流的半导体放在均匀磁场中, 则在垂直于电场和磁场的方向产生横向电场, 这种现象称为霍尔效应。所产生的电场称为霍尔电场。假设电流密度只有X方向的分量, 即 $J_{ny} = 0$ 。如n型半导体为细长的棒状样品, 电极由两端面引出, 霍尔电场则为

$$E_y = -\mu_n^* B E_x = R_H J_{nx} B \quad (1-7)$$

式中 R_H ——霍尔系数

$$R_H = -\frac{\mu_n^*}{\sigma_n} = -\frac{\gamma_n}{qn} \quad (1-8)$$

霍尔电场使等势线旋转一个角度 θ_H , 此角称为霍尔角

$$\tan \theta_H = \frac{E_y}{E_x} = -\mu_n^* B = \sigma_n R_H B \quad (1-9)$$

对于厚度为 t 的长方形样品, 当电流为 I 时, 产生的霍尔电压为

$$V_H = \frac{R_H IB}{t} = S_H IB \quad (1-10)$$

$$S_H = \frac{R_H}{t} = \frac{\gamma_n}{qn t} \quad (1-11)$$

式中 S_H ——霍尔器件的灵敏度。由上式看出，若要提高霍尔器件的灵敏度，应减小载流子浓度。

由于半导体中的载流子浓度比金属小，所以半导体更适宜制作霍尔器件。

二、载流子的偏转和磁阻效应

把通以电流的半导体放在均匀磁场中，运动的载流子受到洛伦兹力的作用而发生偏转，呈弧形运动轨迹。于是散射机率增大，迁移率下降，电阻率增大，这种现象称为半导体的磁阻效应。假设霍尔电场为零，n型半导体为短而粗的样品，电极由两端面引出，根据式(1-6)得到载流子的偏转为

$$\frac{J_{xy}}{J_{xz}} = \mu_n^* B = \tan \theta_H \quad (1-12)$$

由于偏转使载流子的漂移轨迹增长，产生几何磁阻效应，可以用下式表示

$$\frac{\rho_{xB} - \rho_n}{\rho_n} = (\mu_n^* B)^2 \quad (1-13)$$

式中 ρ_n ——不加磁场时的电阻率；

ρ_{xB} ——加磁场时的电阻率。

对于硅，这种磁阻效应很小。当磁感应强度为1T(特斯拉)时， $\rho_{xB} \approx 1.02\rho_n$ 。对于铋化锑，磁阻效应很强，当磁感应强度为18mT(毫特斯拉)时， $\rho_{xB} \approx 1.02\rho_n$ ，因此，铋化锑更适宜制作磁敏电阻。

对于p型半导体，霍尔系数为

$$R_H = \frac{\gamma_p}{qp} \quad (1-14)$$

其中

$$\gamma_p = \frac{\mu_r}{\mu_p}$$

式中

μ_p ——空穴漂移迁移率;

μ_p^* ——空穴霍尔迁移率。

在低掺杂情况, 室温下测得 $\gamma_p \approx 0.7$ 。霍尔角为

$$\tan \theta_H = -\mu_p^* B \quad (1-15)$$

磁阻效应可用下式表示

$$\frac{\rho_{rB}}{\rho_p} = 1 + (\mu_p^* B)^2 \quad (1-16)$$

两种载流子同时存在时, 霍尔系数为

$$R_H = - \frac{\gamma_n(\mu_n/\mu_p)^2 n - \gamma_p p}{q[(\mu_n/\mu_p)n + p]^2} \quad (1-17)$$

式(1-2)~式(1-17)只适于弱磁场的情况。 n 型硅, $B \leq 2$ T(特斯拉); n 型砷化镓, $B \leq 0.6$ T(特斯拉); n 型锑化铟, $B \leq 40$ mT(毫特斯拉)。

第二节 霍 尔 板

霍尔板是最基本的半导体磁敏器件。50年代制成半导体霍尔器件, 70年代初单片集成的硅霍尔板问世。目前, 这种类型的磁敏传感器已广泛地应用于自动化技术等各个领域。

一、理想霍尔板

霍尔板是利用霍尔效应制成的磁敏器件。采用电阻率较高的半导体材料制成的薄矩形板, 如图1-1所示, 板上有4个欧姆接触点。电流 I 通过接触点 cc_1 和 cc_2 , 当与板面垂直方向存在磁场时, 在接触点 sc_1 和 sc_2 之间产生霍尔电压

$$V_H \approx \frac{R_H B_z I}{t} \quad (1-18)$$

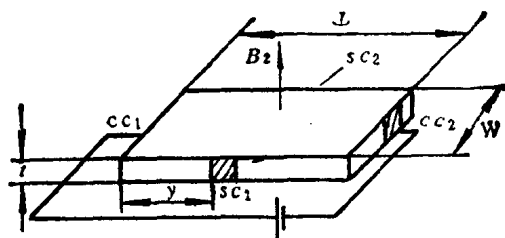


图 1-1 矩形霍尔板

式中 t ——霍尔板的厚度；

I ——偏置电流；

B_z ——磁感应强度 B 在垂直于板面方向的分量。

矩形霍尔板的霍尔电压可写成^[1]

$$V_H = \frac{R_H}{t} G \left(\frac{l}{W}, \frac{s}{W}, \frac{y}{l}, \theta_H \right) B_z I \quad (1-19)$$

式中 G ——几何修正因子，其数值由图1-1中的 t, l, W 和 s 确定。

霍尔角 θ_H 由式(1-9)给出。当有电子和空穴两种载流子同时导电时，半导体的霍尔系数 R_H 由式(1-17)确定。散射因子 γ_n 和 γ_p 近似等于 1。

实际霍尔板一般工作在强非本征条件下，即 $n \gg p$ ，将式(1-8)代入式(1-19)中，则有

$$|V_H| \approx \frac{\gamma_n}{qn t} G B_z I \quad (1-20)$$

由上式看出，霍尔电压与载流子浓度 n 及板厚度 t 成反比。因此，霍尔板通常是采用高电阻率的半导体材料制成薄板状。

几何修正因子表征无限长霍尔板 ($l/W \rightarrow \infty$) 与有限长霍尔板之间的区别，定义为

$$G \left(\frac{l}{W}, \frac{s}{W}, \frac{y}{l}, \theta_H \right) = \frac{V_H}{V_{H\infty}} \quad (1-21)$$

式中 $V_{H\infty}$ ——理想霍尔板 ($l/W \rightarrow \infty$) 的霍尔电压。如果满足假设，

(1)只有一种载流子导电；(2)不存在表面复合；(3)霍尔板的几何形状： $l/W > 1.5$ ， $s/W < 0.18$ 和 $y=l/2$ 。可以得到几何修正因子的近似表达式为〔2〕

$$G_L = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \frac{l}{W} \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \frac{s}{W} \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (1-22)$$

当 $l/W > 3$ ， $s/W < 1/20$ 时，则 $G_L \rightarrow 1$ 。对于霍尔角很小，样品较短($l < W$)， $y=l/2$ ，而且霍尔电压输出端为点接触的情况，几何修正因子可以近似为〔3〕

$$G_L \approx 0.74 \frac{l}{W} \quad (1-23)$$

采用低掺杂的半导体材料，形状为长而薄时，可以提高霍尔电压。但是，这样会使电压降增大。霍尔板上的电压降可以表示为

$$V = \frac{1}{q\mu_n n} \frac{l}{Wt} I \quad (1-24)$$

将式(1-24)代入式(1-20)中，霍尔电压为

$$V_H = \mu_n^* \frac{W}{l} G B_z V \quad (1-25)$$

由上式表明，载流子迁移率对霍尔板的性能有着重要的作用。

霍尔板置恒定偏压时，霍尔电压随 W/l 的增大而增加，并且有一个极限值。将式(1-23)代入式(1-25)中，极限值为

$$V_{H,0} \approx 0.74 \mu_n^* B_z V \quad (1-26)$$

将式(1-20)和(1-25)联立求解，并用耗散功率 $P=VI$ 表示霍尔电压，则有

$$V_H = \gamma_n \left(\frac{\mu_n W}{qn tl} \right)^{\frac{1}{2}} G B_z P^{\frac{1}{2}} \quad (1-27)$$

二、集成霍尔板

采用半导体集成电路工艺把霍尔板和信号处理电路集成在同一