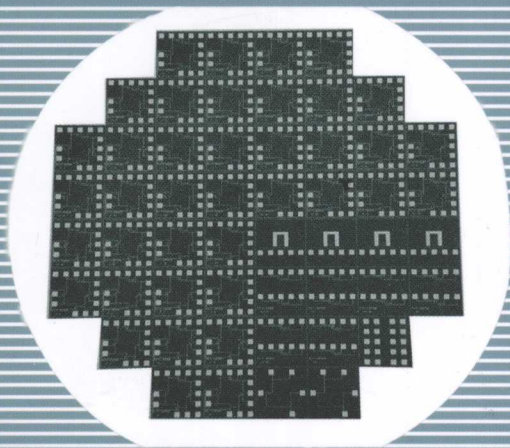


纳米硅 / 单晶硅

异质结 MOSFETs 压 / 磁

多功能传感器研究

赵晓锋 著



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

纳米硅 / 单晶硅 异质结 MOSFETs 压 / 磁 多功能传感器研究



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器研究/
赵晓锋著. —哈尔滨:黑龙江大学出版社,2009.8
(黑龙江大学学术文库)

ISBN 978-7-81129-126-1

I. 纳… II. 赵… III. ①压力传感器-研究②磁性传感器-研究 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 055666 号

责任编辑 陈雪峰

封面设计 集云观止

纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器研究
赵晓锋 著

出版发行 黑龙江大学出版社

地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号 邮编 150080

电 话 0451-86608666

经 销 新华书店

印 刷 黑龙江省委党校印刷厂

版 次 2009 年 8 月 第 1 版

印 次 2009 年 8 月 第 1 次印刷

开 本 880 × 1230 毫米 1/32

印 张 8

字 数 200 千字

书 号 ISBN 978-7-81129-126-1

定 价 25.00 元

凡购买黑龙江大学出版社图书,如有质量问题请与本社发行部联系调换
版权所有 侵权必究

前 言

随着科学技术的飞速发展,在航空航天、环境监测、工业生产、医学、军事等领域,经常需要对压力、磁场、温度、湿度、加速度和流速等多个参数进行同时测量。因此,针对环境适应性、体积、成本和功能的限定,传感器的小型化、多功能化、集成化和一体化受到了广泛关注。本书对采用 CMOS 工艺和 MEMS 技术设计、制作以纳米硅/单晶硅异质结为源极(S)和漏极(D)的 MOSFETs 压/磁多功能传感器进行了理论和实验研究。

本书第 1 章综述多功能传感器、MOSFET 压力传感器、MOSFET 磁传感器和纳米硅/单晶硅异质结国内外研究现状,在此基础上,开展了 MOSFETs 压/磁多功能传感器理论和实验研究;第 2 章介绍纳米硅薄膜制备,通过拉曼光谱(Raman spectroscopy)、X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)对纳米硅薄膜微结构进行研究;第 3 章提出 MOSFETs 压/磁多功能传感器基本理论模型,对 MOSFETs 压/磁多功能传感器在外加压力 $P=0$ 、外加磁场 $B=0$,外加压力 $P \neq 0$ 、外加磁场 $B=0$,外加压力 $P=0$ 、外加磁场 $B \neq 0$,外加压力 $P \neq 0$ 、外加磁场 $B \neq 0$ 等四种情况进行理论分析;第 4 章给出纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器压敏结构设计和电源激励方式;第 5 章给出纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器磁敏结构设计和工作原理,采用惠斯通电桥结构中一个纳米硅/单晶硅异质结 p-MOSFET,构成纳

米硅/单晶硅异质结 p -MOSFET Hall 磁传感器,完成对外加磁场 B 的测量,为提高磁传感器灵敏度特性,设计采用惠斯通电桥中两个纳米硅/单晶硅异质结 p -MOSFET 霍尔输出端构成串联输出方式;第 6 章给出纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器基本结构与制作工艺,在兼顾纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器中压力传感器特性和磁传感器特性基础上,设计给出纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器基本结构,采用 CMOS 工艺和 MEMS 技术实现纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器芯片的集成和一体化制作与封装;第 7 章给出纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器实验结果,主要从当外加压力 $P=0$ 、外加磁场 $B=0$ 时,当外加压力 $P\neq 0$ 、外加磁场 $B=0$ 时,当外加压力 $P=0$ 、外加磁场 $B\neq 0$ 时,当外加压力 $P\neq 0$ 、外加磁场 $B\neq 0$ 时等四个方面对纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器基本特性进行实验研究;第 8 章给出结论。

本书是在导师温殿忠教授指导下所取得的博士学位论文基础上修改而成,研究得到了国家自然科学基金项目资助(60676044),向国家自然科学基金委员会表示感谢。从 1996 年到 2008 年,在导师温殿忠教授指导下先后取得学士、硕士和博士学位,多年来导师对我的培养倾注了大量精力和心血,在此对导师温殿忠教授表示衷心的感谢。

由于本人水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评斧正。

赵晓锋
2009 年 4 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 多功能传感器研究现状	2
1.3 MOSFET 压力传感器研究现状	11
1.4 MOSFET 磁传感器研究现状	17
1.5 纳米硅/单晶硅异质结研究现状	21
1.6 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能 传感器研究目的和意义	23
1.7 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能 传感器研究的主要内容	24
第 2 章 纳米硅薄膜制备及表征研究	27
2.1 纳米硅薄膜	27
2.2 PECVD 制备多晶硅薄膜	28
2.3 LPCVD 制备纳米硅薄膜	33
2.4 小结	48
第 3 章 MOSFETs 压/磁多功能传感器理论分析	49
3.1 MOSFETs 压/磁多功能传感器理论模型	49
3.2 MOSFETs 压/磁多功能传感器理论分析	50

3.3	小结	59
第4章	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁 多功能传感器压敏结构设计和电源激励 方式	61
4.1	半导体材料压阻效应基本理论	62
4.2	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能 传感器压敏结构设计	70
4.3	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能 传感器压敏结构电源激励方式	96
4.4	小结	99
第5章	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁 多功能传感器磁敏结构设计和工作原理	101
5.1	霍尔效应	101
5.2	纳米硅/单晶硅异质结 p - MOSFET Hall 器件 基本结构及工作原理	103
5.3	纳米硅/单晶硅异质结 p - MOSFET Hall 器件 串联输出结构及工作原理	105
5.4	小结	107
第6章	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁 多功能传感器基本结构与制作工艺	109
6.1	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能 传感器基本结构	109
6.2	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能	

传感器制作工艺	110
6.3 小结	117
第 7 章 实验结果与讨论	118
7.1 纳米多晶硅薄膜压阻特性	119
7.2 纳米硅/单晶硅异质结 p-MOSFET 特性	140
7.3 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能 传感器压敏特性	159
7.4 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能 传感器磁敏特性	189
7.5 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能 传感器压/磁特性	223
7.6 小结	224
第 8 章 结论	228
参考文献	234

第1章 绪论

1.1 引言

近年来,多功能集成化传感器研究受到国内外的广泛关注,国内外文献报道,已经有益于环境监测、化学分析、生物保护等方面的集成传感器。随 MEMS 技术和 IC 技术的不断发展,实现传感器的集成化、多功能化成为可能。

1995 年,黑龙江大学温殿忠教授提出 JFET 压/磁电效应基本理论^[1-2],用标准的松弛方法研究了结型场效应晶体管的压/磁电效应。1995 年,论文“Sensitivity analysis of junction field effect-pressure Halltron”发表在《REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS》上,采用四个 JFET 组成惠斯通电桥,制作在 C 型硅杯硅膜上,该结构不但具有较高的压力灵敏度和磁灵敏度,而且可以用来测量磁场旋转角度。

本书主要论述采用 CMOS 工艺和 MEMS 技术研究设计、制作以纳米硅/单晶硅异质结为源极(S)和漏极(D)的 MOSFETs 压/磁多功能传感器。该传感器既能检测压力,也能检测磁场。目前,对研究设计、制作纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器尚未见到国内外相关文献报道。

本章从多功能传感器、MOSFET 压力传感器、MOSFET 磁传感器、纳米硅/单晶硅异质结四个方面对以纳米硅/单晶硅异质

结为源极(S)和漏极(D)的 MOSFETs 压/磁多功能传感器相关的国内外研究现状进行介绍。

1.2 多功能传感器研究现状

随着传感器及微加工技术的发展,人们可以在同一衬底材料上制作几种敏感元器件,制成能够检测多个参量的集成化多功能传感器。多功能传感器主要有以下几种不同的工作原理及结构形式:几种不同的敏感元器件制作在同一个硅片上,制成集成化多功能传感器,该种传感器集成度高、体积小,各个敏感元器件的工作氛围相同,容易实现补偿和校正,这是多功能传感器发展的一个方向;几种不同的敏感元器件组合在一起形成一个传感器,可以同时测量几个参数,各敏感元器件是独立的,如将测量温度和测量湿度敏感元件组合在一起,构成温湿度多功能传感器;用同一个敏感元器件的不同效应,得到不同的信息,如将线圈作为敏感元件,在具有不同磁导率或介电常数物质的作用下,表现出不同的电容和电感。同一个敏感元件在不同激励下表现出不同特性,例如传感器施加不同的激励电压、电流,在不同温度下,其特性不同,有时可相当于几个不同的传感器。有的多功能传感器检测出的几个信息混在一起,需要用信号处理的方法将各种信息进行分离。

1.2.1 多功能传感器国内研究现状

1.2.1.1 加速度、压力和温度多参数硅微复合传感器

2004年,中国华北工学院提出一种集成加速度、压力和温度多参数硅微复合传感器^[3],采用半导体压阻效应制作三维加速度传感器、采用极间电容变化制作压力传感器和利用PN结温度效应制作温度传感器。图1-1给出三维加速度传感器的

SEM 照片,图 1-2 给出硅电容压力传感器基本结构。



图 1-1 三维加速度传感器的 SEM 照片

Fig. 1-1 SEM photograph of three-dimensional acceleration sensor

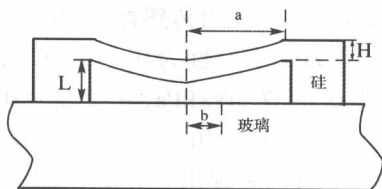


图 1-2 硅电容压力传感器基本结构

Fig. 1-2 Basic structure of silicon capacitance pressure sensor

1.2.1.2 加速度、绝对压力和温度多功能传感器

2007 年,《半导体学报》报道西安交通大学在 $(4.0 \times 6.0 \times 0.9) \text{ mm}^3$ 芯片上集成加速度、绝对压力和温度的多功能传感器^[4],其中加速度、绝对压力传感器基于掺杂硅压阻效应,温度传感器基于掺杂硅电阻温度效应,图 1-3 给出多功能传感器剖面结构示意图,图 1-4 给出多功能传感器照片。

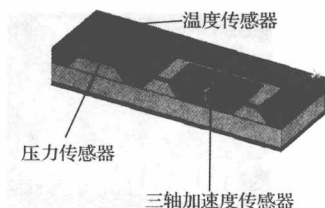


图 1-3 多功能传感器的结构
Fig. 1-3 Basic structure of multi-sensor

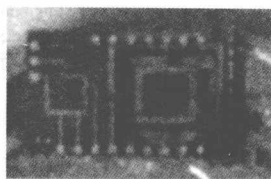


图 1-4 制作的多功能传感器照片
Fig. 1-4 Photograph of fabricated multi-sensor

采用 5 V 恒压源,在测量温度为 20 ℃ 时,加速度传感器中 z 轴传感器的输出灵敏度为 0.508 mV/g,输出非线性小于 2%

F. S.; x 轴传感器的输出灵敏度为 0.071 mV/g , 输出非线性小于 1% F. S. 压力传感器在 20°C 的温度下, 输出灵敏度为 0.1087 mV/kPa , 非线性为 0.04% F. S.; 在 70°C 的温度下, 输出灵敏度为 0.0987 mV/kPa , 非线性为 0.01% F. S. 温度传感器的灵敏度为 $5.617 \times 10^{-3} \text{ k}\Omega/^\circ\text{C}$, 非线性为 0.48% F. S., 而且在 120°C 以上时仍表现出了良好的温度线性。该传感器集成三轴加速度、绝对压力和温度传感器, 具有良好性能。

1.2.2 多功能传感器国外研究现状

1.2.2.1 压力、流速、温度和电导率多功能传感器

1998 年,《Sensors and Actuators B》报道瑞典工业微电子中心 (Industrial Microelectronics Center) 设计制作的微分析系统^[5], 该微分析系统由多功能传感器芯片、微机械流动单元和光纤界面组成, 完成对流动液体六个物理/化学参量的测量, 即压力、流速、温度、电导率、紫外吸收和荧光性测量。

图 1-5 给出微分析系统示意图, 图 1-6 给出测量压力、流速、温度和电导率的多功能传感器芯片示意图。

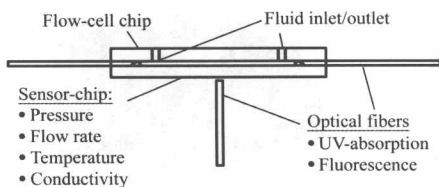


图 1-5 微分析系统示意图

Fig. 1-5 Schematic picture of the micro analysis system

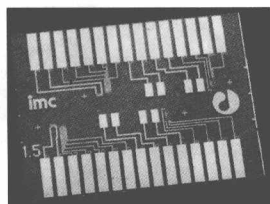


图 1-6 测量压力、流速、温度和电导率的多功能传感器芯片

Fig. 1-6 Multi-sensor chip for measurement of pressure, flow rate, temperature and conductivity

多功能传感器芯片上集成测量压力、流速、温度、电导率等4个参量的多功能传感器。该传感器采用石英衬底,一方面石英衬底具有低的热传导率,另一方面石英衬底易于光纤检测。该多功能传感器中压力测量采用掺杂多晶硅电阻;液体流速测量采用液体流动温度偏差进行测量,液体流速是液体流动温度差的函数;温度测量采用Pt电阻;电导率测量采用两个邻近的Pt电极,典型电极尺寸为 $(0.5 \times 1.0) \text{ mm}^2$,电极之间距离为 0.4 mm 。该微分析系统在液体套色版系统(liquid chromatography system)中有重要应用。图1-7给出微分析系统装配样机示意图。

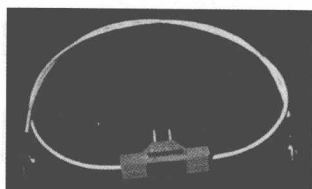


图1-7 微分析系统装配样机
Fig. 1-7 An assembled prototype
of the micro analysis system

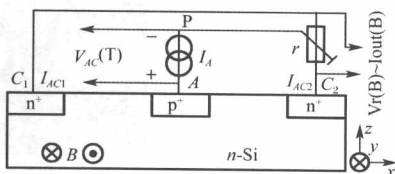


图1-8 温度和磁场新型多功能
传感器剖面图和偏置电路
Fig. 1-8 Cross-section and bias
circuitry of the new multi-sensor for
temperature and magnetic field

1.2.2.2 温度、磁场多功能传感器

1999年,《Sensors and Actuators》报道保加利亚科学研究院设计制作用于温度、磁场测量的多功能传感器,图1-8给出传感器剖面示意图和偏置电路^[6]。该结构由两个差分二极管构成,温度输出信号为恒流源 I_A 正负极输出电压值,在 $77 \sim 393 \text{ K}$ 范围内是线性的。磁场测量基于 I_{AC1} 和 I_{AC2} 不同电流值。

1.2.2.3 三维加速度、压力、温度和湿度多功能传感器

2002 年,《Sensors and Actuators A》报道日本姬路技术学院(Himeji Institute of Technology)采用 Deep - RIE 微机械工艺和双极型工艺在 SOI 上制作多功能传感器和外围接口电路^[7],该多功能传感器芯片尺寸为 $(10 \times 15) \text{ mm}^2$,用于三维加速度、压力、温度和湿度等参量测量,该传感器被用于环境监测。图 1-9 给出集成多功能传感器芯片平面示意图。

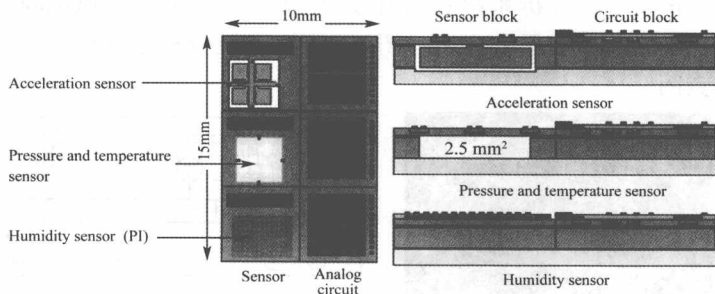


图 1-9 集成多功能传感器芯片平面图

Fig. 1-9 Chip plan of integrated multi-sensor

图 1-10 给出加速度传感器结构示意图,该多功能传感器中加速度传感器设计基于压阻效应;图 1-11 给出压力传感器结构,压力传感器设计基于压阻效应,压力传感器硅膜面积为 2.5 mm^2 ,硅膜厚度为 $25 \text{ }\mu\text{m}$;图 1-12 给出湿度传感器结构示意图,湿度传感器采用 PI (Polyimide Capacitor) 材料;图 1-13 给出温度传感器电路原理图,温度传感器基于三极管基极与发射极之间的电压温度系数,设计由一对三极管作为温敏器件的温度传感器,并集成温度传感器接口电路(TMP35)。

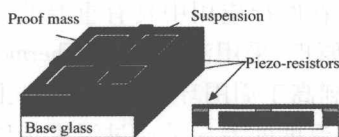


图 1-10 加速度传感器结构

Fig. 1-10 Structure of acceleration sensor

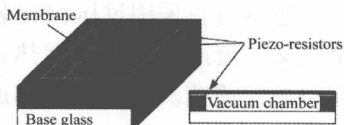


图 1-11 压力传感器结构

Fig. 1-11 Structure of pressure sensor

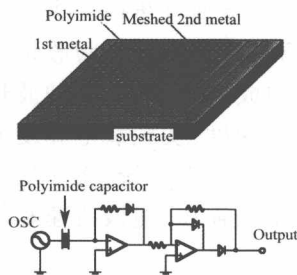


图 1-12 湿度传感器结构示意图

Fig. 1-12 Structure and schematic diagram of humidity sensor

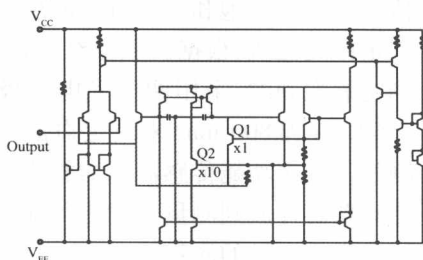


图 1-13 温度传感器电路原理图

Fig. 1-13 Circuit schematic diagram of temperature sensor

1.2.2.4 压力、流速和氧饱和多功能传感器

2002 年,《Sensors and Actuators A》报道荷兰代尔夫特技术大学(Delft University of Technology)在 $(0.9 \times 7.0) \text{ mm}^2$ 芯片上集成压力、流速、氧饱和测量的多功能传感器芯片^[8],图 1-14 给出血液传感器芯片示意图,该传感器用于血管中血液血压、血液流速和血液氧饱和度等参数测量。

该多功能传感器中压力传感器包含一个厚度 $4 \mu\text{m}$ 的密封空腔谐振器薄膜,由于谐振器的参考压力和血液压力的不同会使这个薄膜产生偏移,用惠斯通电桥上的压敏电阻来测量薄膜的形变,桥的输出电压的改变量就是对血压的测量。厚度 $4 \mu\text{m}$

的传感器薄膜采用过压保护装置,在医疗应用中具有重要的安全意义。流速传感器根据热迁移原理,采用温差电堆(Thermopile)测定流速。血液被局部加热到高于周围环境温度两度,上下温度的不同就是对流速的测量,温度的差异是通过温度传感器来测量的。传感器被放置在一个外延多晶硅的薄膜上,这和压力传感器所应用的工艺相似,采用牺牲层技术,实现衬底热隔离,避免了由于外部压力产生的薄膜形变的相关问题。氧饱和传感器测定氧饱和度,氧饱和度定义为去氧血红蛋白和含氧血红蛋白的比值,根据去氧血红蛋白和含氧血红蛋白光吸收情况测定氧饱和度,采用两组光电二极管构成传感器,用两种波长(660 nm 和 800 nm)来决定血液颜色的深度,实现氧饱和度的测量。该多功能传感器在血管中采用电磁导航系统,将多功能传感器芯片放到测量位置进行血管中血液血压、血液流速和氧饱和度等参量的测量。

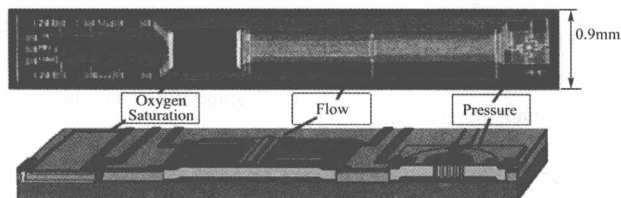


图 1-14 血液传感器芯片

Fig. 1-14 Complete blood sensor chip

1.2.2.5 压力、剪应力和温度多功能传感器

2005 年,《Sensors and Actuators A》报道美国韦恩州大学(Wayne State University)利用 MEMS 技术制作用于流动气体测量的多功能传感器芯片^[9],在微通道内对流动气体的压力、剪应力和温度进行测量。图 1-15(a)给出一个由压力传感器、剪应力传感器和温度传感器组合的传感器串,图 1-15(b)为五个传感器串联组成的多功能传感器芯片照片。

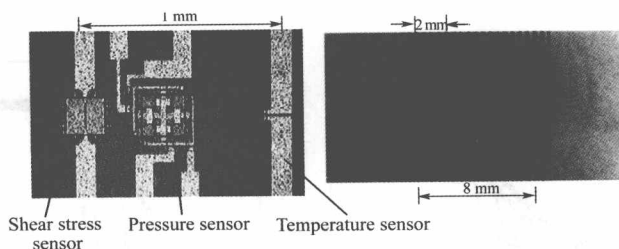


图 1-15 (a) 一个传感器的显微照片

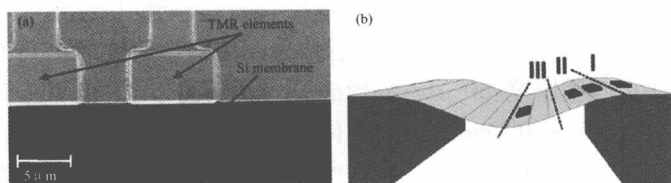
(b) 五个传感器串联组成的多功能传感器照片

Fig. 1-15 (a) Micrograph of one sensor cluster

(b) Micrograph of a multi-sensor chip containing five sensor clusters

1.2.2.6 压力和 TMR (Tunneling Magnetoresistive) 传感器

2007 年,《Journal of Magnetism and Magnetic Materials》报道德国科学研究中心结合 MEMS 技术和磁性薄膜技术制作磁伸缩隧道磁电阻 (TMR) 压力传感器^[10]。在厚度 $2\text{ }\mu\text{m}$ 、直径 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的硅膜不同位置放置 $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ 自旋阀结构的 TMR 元件。图 1-16(a) 给出厚度为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 硅膜上 TMR 元件 SEM 剖视图, (b) 给出硅膜不同位置应变分布示意图, II 表示拉应变, III 表示压应变。图 1-17 表示同一硅膜上两个不同分布位置的 TMR 的 MOKE 测量。该文给出压力传感器和 TMR 传感器结合的传感器将得到广泛应用。

图 1-16 (a) 具有两个 $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ TMR 元件, 厚度为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 硅膜的 SEM 剖视图 (b) 膜应变分布示意图Fig. 1-16 (a) SEM picture of a cross-section of the $2\text{ }\mu\text{m}$ -thick silicon membrane with two $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ TMR elements

(b) Schematic drawing of the strain distribution of a membrane