

现代物理基础丛书

49

自旋电子学

翟宏如 等 编著



科学出版社

现代物理基础丛书 49

自旋电子学

翟宏如 等 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书由十余位国内对自旋电子学前沿有研究经验的著名学者撰写,共10章.较深入地论述了自旋电子学的主要内容、形成与展望,兼顾理论、实验和应用.包括,多层膜与颗粒体系的磁性和巨磁电阻;磁性隧道结,特别是最新发展的 MgO 单晶隧道结的结构、理论和应用;庞磁电阻材料的理论、实验与应用;稀磁半导体的磁性、磁输运等以及相关的异质结构和自旋注入等研究;磁电阻理论,包括铁磁金属的散射理论、界面效应和介观体系中的磁电路理论;铁磁/反铁磁界面的交换偏置在器件中的作用和基本性能,主要的实验研究和理论模型;自旋动量矩转移效应、电流引起磁化的原理和在自旋阀、隧道结、铁磁体-量子点耦合等系统中的研究,自旋动量矩转移引起的磁畴转动、畴壁位移、自旋波激发、自旋泵浦、自旋流等的原理和应用,电流引起磁化与传统的磁场引起磁化的比较;自旋电子学的应用及代表性的器件,包括传感器、读出头、磁电阻随机存储器以及自旋晶体管等.

本书适用于从事物理和自旋电子学领域学习和研究的大学本科高年级学生、研究生、教师、工程师和相关的科研教学工作.

图书在版编目(CIP)数据

自旋电子学/翟宏如等编著. —北京:科学出版社,2013

(现代物理基础丛书;49)

ISBN 978-7-03-034982-8

I. ①自… II. ①翟… III. ①磁性-研究 IV. ①O441.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 135219 号

责任编辑:刘凤娟 尹彦芳/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

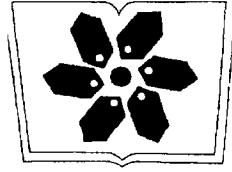
2013年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张:43 1/4

字数:824 000

定价:148.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



中国科学院科学出版基金资助出版

《现代物理基础丛书》编委会

主 编 杨国桢

副主编 阎守胜 聂玉昕

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 牧 王鼎盛 朱邦芬 刘寄星

邹振隆 宋菲君 张元仲 张守著

张海澜 张焕乔 张维岩 侯建国

侯晓远 夏建白 黄 涛 解思深

序

电子学和微电子学是 20 世纪的重大成就. 半导体和晶体管的出现使电子学的发展发生质变, 并为微电子学的大发展奠定了基础. 近几十年来, 集成电路和大规模集成电路技术突飞猛进、日新月异, 使人类进入信息时代. 信息技术和微电子学进入人类社会的各个方面, 科学技术、工农业生产、军事与国防、交通运输、文化教育、医疗卫生、通信、金融、贸易、商业、服务性行业以及家庭生活等都受其影响, 迅速发生变化. 但是传统的微电子学的发展, 仅仅利用了电子具有电荷这一特征. 早在 80 年前, 理论物理学家狄拉克将量子力学与爱因斯坦的相对论相结合, 建立了相对论量子力学, 明确指出电子不仅具有电荷, 还具有自旋 $\pm\hbar$ ($\hbar = h/2\pi$, h 为普朗克常量). 近 20 年来人们发展了与自旋有关的电子学, 构成一个新的科技分支, 即自旋电子学 (spintronics) 或磁电子学 (magneto-electronics), 它是磁学、材料科学和电子学新进展的一项重大成果. 传统的导电过程和电子学均基于电子电荷的移动, 而与电子自旋无关. 自旋电子学的核心是自旋相关导电, 电导或电阻随导电电子自旋而异. 新近的发展进而实现了利用传导电子散射过程自旋动量矩的转移引起纳米磁体磁化的变化, 而不需要通过磁场. 将电子自旋引入电子学增加了电子运动的维度和调节了电子学性能的参数, 并增加了电子学中自旋的动力学作用, 大大丰富了电子学的功能, 使电子学和微电子学发生很大的变化. 把这个新的科技分支称为自旋电子学是名副其实的.

自旋相关导电可追溯到 1964 年 Mott 对过渡族金属电导的解释, 20 世纪六七十年代 Fert 与 Campbell 通过对铁磁金属电导的系统研究, 提出了自旋相关散射的两通道导电机制. 此外, 1975 年 Jullière 发现 Fe/Ge/Co 隧道结的电阻也依赖于传导电子的自旋. 1988 年巨磁电阻现象的发现及其规律的确认奠定了自旋电子学的基础. 1986 年德国 Grünberg 等采用布里渊光散射和磁光克尔效应技术, 首次发现了在人工制备的纳米尺度单晶 Fe/Cr/Fe 磁性三层膜中, 铁磁层间可形成反铁磁耦合状态; 随后又于 1989 年发表了文章, 发现这种反铁磁排列的 Fe/Cr/Fe 三明治结构在磁场作用下磁化为铁磁排列时, 电阻发生远比 Fe 的超薄膜各向异性磁电阻大得多. 1988 年法国 Fert 等利用分子束外延 (MBE) 方法制备了 (001) 晶向 [Fe/Cr] 纳米磁性多层膜, 在低温 $T = 4.2\text{K}$ 时观测到高达 50% 的磁电阻, 比传统的各向异性磁电阻 (AMR) 大了一个数量级以上, Fert 在文中将其命名为巨磁电阻效应 (giant magneto resistance, GMR), 并用自旋相关导电的原理给予了解释. 1990 年美国的 Parkin 等利用磁控溅射方法制备了多种纳米多晶磁性多层膜, 观测到巨磁电阻, 为

巨磁电阻材料的大规模生产迈出了关键性的一步. Parkin 在多种纳米磁性多层膜中发现层间反铁磁与铁磁交换耦合和磁电阻的强弱随中间层厚的变化而振荡变化, 它不仅是一个基础研究的贡献, 而且证实了巨磁电阻效应和层间耦合在室温条件下是人工可调控的. 1991 年 Dieny 等将反铁磁薄膜改进为具有 GMR 的三明治结构, 发展了结构简单、低场灵敏度高的自旋阀结构, 使 GMR 器件化, 引起传感器和磁盘读头头的巨大革新. GMR 的发展诱发了具有更高磁电阻的隧道结的突破性的研究与开发. 继 FM/Al₂O₃/FM 之后, 在单晶 MgO 势垒磁性隧道结理论和实验研究中发现了更高室温隧穿磁电阻, 这是近些年自旋电子学及磁电阻材料研究中的又一重要突破. 目前, 在单晶 MgO 单势垒和双势垒磁性隧道结中观测到的室温隧穿磁电阻比值已经分别超过 600% 和 1000%, 远高于已有的金属性三明治结构自旋阀的磁电阻比值. 这些工作成为当前自旋电子学产业化的主流. 与此同时, 50 年代已发现的钙钛矿型锰氧化物重新获得重视. 在低温强磁场作用下, 观察到的超大的磁电阻被称为庞磁电阻 (colossal magneto resistance, CMR). 例如, 在 30K, 50kOe 的磁场作用下 Nd_{0.65}Ca_{0.35}MnO₃ 的 MR 值高达 10⁶%. 在自旋电子学的发展中, 出现的另一个历史性突破是自旋动量矩或力矩的转移 (spin transfer torque, STT), 从而可用电流直接引起纳米磁体的磁化状态的变化, 它是巨磁电阻的逆效应. 1996 年首先出现了理论预言, 并很快地得到了实验证实. 自从古代发现磁铁矿以来, 实践和理论均认为, 只有磁场才能使磁矩改变方向, 使铁磁体改变其磁化. 电流能直接引起磁化, 而不通过磁场, 无疑是几千年来物理上的一个历史性的突破. 另外, 在微电子学中有一个长期的技术困难, 即磁场的植入, 产生磁场的器件难以微型化. 因此, 电流直接引起磁化提出了解决这一难题的崭新途径, 是技术上的历史性突破. 除电流诱导磁矩转动和反转外, 电流诱导磁矩进动和自旋波的激发, 电流诱导畴壁位移, 基于 STT 效应的纳米微波振荡器和整流器的研发, 基于电流诱导畴壁位移的新型逻辑元件和高密度存储器等, 新的研究与开发不断涌现, 自旋电子学在全面形成和发展. 还值得注意的是, 100 多年来强磁体的磁化理论已经相当系统而完备, 但都基于磁场诱导磁化, 现在正被 STT 效应, 即电流直接诱导磁化的理论和实验补充和更新. 此外, 磁性半导体、铁磁/半导体间的自旋极化电流的注入、自旋极化率达到 100% 的半金属材料等方面的研究均有许多令人瞩目的进展.

2007 年诺贝尔物理学奖授予了 Fert 与 Grünberg. 瑞典科学院在获奖的材料中指出, 他们二人的这项发现所导致的技术可以视为前景广阔的纳米技术领域中最先实现的各种应用的一种. 这种物理现象的应用, 使读取硬盘数据的技术发生了革命性的改变, 它还对各式各样的磁性传感器以及新一代的电子产品的开发起了重要的作用. 巨磁电阻效应的故事是一个很好的例子, 它展示了一个令人完全预料不到的科学发现是如何带来全新技术和商业产品的.

自旋电子学也受到国内学术界的重视, 在过去 20 年, 国内发表的 GMR 相关的

SCI 论文约 300 篇, 赖武彦、梅良模、戴道生等研究了 Fe/Mo、Fe/Ag、NiFe/Mo、Fe/Pd、CoNb/Pd 等多层膜体系中的 GMR、层间交换耦合和非铁磁层中的自旋极化效应. 翟宏如等利用核磁共振在 GMR 体系的 Fe/Cu 多层膜中, 首次证实 Cu 层的传导电子处于自旋极化状态, 并观测到其实空间内的振荡分布状态. 在理论方向, 蒲富恪、李伯臧对 GMR 理论的电子平均自由程进行了修正, 并提出了简化的量子力学理论来描述 GMR 效应. 邢定钰等对 GMR 的准经典理论进行了修正. 国内 TMR 效应的研究始于 2000 年左右, 发表 SCI 论文 200 篇以上. 中国科学院物理研究所磁学实验室 M02 组在国内率先开始这项研究, 利用磁控溅射技术实现了室温下 80% 磁电阻的优异成果; 还提出了一种新的观测自旋相干长度的方法; 并基于第一性原理研究了国内外的一个热点 —— 单晶双势垒隧道结 Fe(001)/MgO/Fe/MgO/Fe 中的量子阱以及量子阱共振隧道效应, 这有助于研发基于隧道结的自旋晶体管. 都有为等在 $Zn_{0.41}Fe_{0.29}O_4-(\alpha-Fe_2O_3)$ 复相多晶铁氧体发现的 TMR 效应, 室温下可达 159%, 4.2K 温度下可达 1280%, 且在相当宽温区内磁电阻几乎不随温度变化. 李正中等的研究深入地分析了隧道结中自旋相干散射问题, 该结果可有效地推广到双势垒隧道结体系中, 并可为实验提供有力的理论支持.

该书系由南京大学翟宏如教授负责编撰, 得到国内物理学界在自旋电子学前沿工作的著名科学家参与撰写和大力支持. 历经数年, 现将出版, 成为国内这一重要科技领域的一部高水平的专著.

冯 端

2011 年 12 月 30 日

目 录

序

第 1 章 自旋电子学的形成与发展	翟宏如 (1)
1.1 两个历史性突破	(1)
1.2 各种磁电阻和巨大磁电阻	(2)
1.2.1 各向异性磁电阻	(2)
1.2.2 正常磁电阻	(3)
1.2.3 巨磁电阻	(3)
1.2.4 隧道结磁电阻	(5)
1.2.5 庞磁电阻	(5)
1.3 巨磁电阻的基本原理和发现的背景	(5)
1.3.1 铁磁金属的导电和自旋相关导电的基本原理	(5)
1.3.2 多层膜中的层间反铁磁交换耦合与巨磁电阻的发现	(10)
1.3.3 发现巨磁电阻的物质基础是纳米技术的发展	(11)
1.4 20 多年来自旋电子学的发展及成就	(11)
1.4.1 振荡型的层间交换耦合	(11)
1.4.2 巨磁电阻走向应用的关键, 溅射工艺的采用和自旋阀	(14)
1.4.3 半金属引人关注	(16)
1.4.4 磁性隧道结不断取得惊人的进展	(17)
1.4.5 CMR 材料形成一大类新材料和物理的研究领域	(19)
1.4.6 半导体自旋电子学的发展	(20)
1.4.7 探索中的自旋逻辑元件和自旋计算	(21)
1.5 自旋动量矩转移 —— 一个新的历史性突破	(22)
1.6 自旋电子学的应用与开发	(24)
1.7 结束语	(25)
参考文献	(26)
第 2 章 颗粒体系中的磁电阻效应	都有为 (34)
2.1 颗粒体系中的静磁特性	(34)
2.1.1 单畴临界尺寸	(34)
2.1.2 超顺磁性	(36)
2.2 颗粒体系中的输运特性	(39)

2.3 金属/金属型颗粒膜的巨磁电阻效应·····(43)

2.4 间断膜的巨磁电阻效应·····(52)

2.5 金属/绝缘体型颗粒膜的磁电阻效应·····(55)

2.6 纳米颗粒固体的磁电阻效应·····(62)

 2.6.1 熔淬薄带的磁电阻效应·····(63)

 2.6.2 机械合金化制备的纳米固体的磁电阻效应·····(68)

 2.6.3 纳米微晶材料的磁电阻效应·····(69)

2.7 有机介质中颗粒体系的磁输运·····(72)

2.8 结束语·····(74)

参考文献·····(75)

第 3 章 磁性隧道结及其隧穿磁电阻效应和器件的应用····· 韩秀峰 (82)

3.1 磁性隧道结的结构原理和发展简介·····(82)

3.2 微米和纳米尺度磁性隧道结的微制备和加工·····(86)

 3.2.1 磁性隧道结多层膜的沉积和生长·····(87)

 3.2.2 掩膜法制备磁性隧道结·····(89)

 3.2.3 深紫外曝光法制备磁性隧道结·····(90)

 3.2.4 电子束曝光制备纳米磁性隧道结·····(92)

 3.2.5 聚焦离子束刻蚀法制备纳米磁性隧道结·····(94)

 3.2.6 磁性隧道结势垒层的氧化和热处理工艺·····(95)

3.3 磁性隧道结的电极和势垒等常用材料·····(98)

 3.3.1 具有高自旋极化率的铁磁单质金属及其合金材料·····(98)

 3.3.2 具有高自旋极化率的半金属电极材料·····(99)

 3.3.3 具有垂直各向异性的金属磁电极材料·····(100)

 3.3.4 稀磁半导体电极材料·····(100)

 3.3.5 磁隧道结的势垒材料·····(103)

 3.3.6 磁性隧道结中的几种有代表性的反铁磁钉扎材料·····(109)

3.4 磁性隧道结的种类·····(109)

 3.4.1 三明治结构磁性隧道结·····(109)

 3.4.2 自旋阀式钉扎型磁性隧道结·····(110)

 3.4.3 双势垒磁性隧道结·····(111)

 3.4.4 半金属磁性隧道结·····(112)

 3.4.5 垂直各向异性磁性隧道结·····(115)

 3.4.6 稀磁半导体复合型磁性隧道结·····(117)

 3.4.7 超导复合型磁性隧道结·····(123)

 3.4.8 颗粒膜复合型磁性隧道结·····(124)

3.4.9	有机复合型磁性隧道结	(130)
3.4.10	多铁性复合磁性隧道结	(137)
3.4.11	平面型自旋阀结构	(140)
3.5	磁性隧道结中的量子效应及其磁电性质	(142)
3.5.1	磁性隧道结的磁电阻对温度和偏压依赖关系	(142)
3.5.2	磁性隧道结中的非弹性隧道谱	(147)
3.5.3	自旋极化电子的磁激子、声子及杂质辅助隧穿	(152)
3.5.4	磁性隧道结 $\text{Co}(001)/\text{Cu}(001)/\text{Al-O}/\text{NiFe}$ 中的量子阱效应	(161)
3.5.5	磁性隧道结的反常霍尔效应	(163)
3.5.6	双势垒磁性隧道结中的磁电阻振荡效应	(165)
3.5.7	双势垒磁性隧道结中的顺序隧穿模型	(172)
3.5.8	双势垒磁性隧道结中的自旋散射效应和自旋翻转长度	(174)
3.5.9	双势垒磁性隧道结中的自旋相关库仑阻塞磁电阻效应	(180)
3.5.10	非磁性电极隧道结中的自旋相关库仑阻塞磁电阻效应	(185)
3.6	单晶磁性隧道结的第一性原理计算和研究方法	(191)
3.6.1	Layer Korringa-Kohn-Rostoker 第一性原理计算方法	(192)
3.6.2	单晶磁性隧道结 $\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Fe}$ 的隧穿磁电阻效应	(195)
3.6.3	单晶磁性隧道结 $\text{Fe}/\text{FeO}/\text{MgO}/\text{Fe}$ 的隧穿磁电阻效应	(198)
3.6.4	单晶磁性隧道结 $\text{Fe}/\text{Mg}/\text{MgO}/\text{Fe}$ 和 $\text{Fe}/\text{Mg}/\text{MgO}/\text{Mg}/\text{Fe}$ 的隧穿磁电阻效应	(198)
3.6.5	单晶磁性隧道结 $\text{Fe}/\text{MgO}/(\text{Au}, \text{Ag})/\text{Fe}$ 中的量子阱效应	(202)
3.6.6	单晶双势垒磁性隧道结 $\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Fe}$ 的量子阱效应	(204)
3.6.7	单晶磁性隧道结 $\text{Co}/\text{MgO}/\text{Co}$ 的隧穿磁电阻效应	(207)
3.6.8	单晶磁性隧道结 $\text{Fe}/\text{Co}/\text{MgO}/\text{Co}/\text{Fe}$ 的高隧穿磁电阻效应	(208)
3.6.9	单晶磁性隧道结 $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{CoFe}$ 的能带结构及磁电阻特性	(209)
3.6.10	单晶磁性隧道结 $\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Cr}/\text{Fe}$ 的振荡隧穿磁电阻效应	(210)
3.6.11	磁性隧道结 $\text{CoFeB}/\text{MgO}(001)/\text{CoFeB}$ 的晶体结构和磁电阻效应	(215)
3.6.12	磁性隧道结新势垒 MgAl_2O_4 、 ZnAl_2O_4 、 SiMg_2O_4 、 SiZn_2O_4 等材料的探索	(217)
3.7	有机复合磁性隧道结的第一性原理计算方法简介	(220)
3.7.1	有机复合磁性隧道结实验及理论背景	(220)
3.7.2	第一性原理与非平衡格林函数	(225)
3.7.3	纳米分子器件的自旋相关输运问题	(231)
3.7.4	铁磁/有机 LB 膜势垒/铁磁-复合型磁性隧道结的计算研究	(233)
3.7.5	NaCl 单晶势垒磁性隧道结的自旋相关输运问题	(236)

3.8	磁性隧道结中的自旋转移力矩效应及其应用	(239)
3.8.1	磁性隧道结中的自旋转移力矩效应	(239)
3.8.2	纳米环状磁性隧道结中的自旋转移力矩效应	(245)
3.8.3	纳米椭圆环状磁性隧道结中的自旋转移力矩效应	(257)
3.8.4	纳米环状磁性隧道结在纳米振荡器中的应用	(259)
3.8.5	纳米柱状磁性隧道结在纳米振荡器中的应用	(260)
3.9	磁性隧道结在原理型和实际器件应用上的典型范例	(262)
3.9.1	磁性隧道结在计算机磁读头方面的应用	(263)
3.9.2	磁性隧道结在磁敏传感器方面的应用	(265)
3.9.3	磁性隧道结在磁随机存储器方面的应用	(270)
3.9.4	磁性隧道结在自旋晶体管 and 场效应晶体管方面的应用	(277)
3.9.5	磁性隧道结在磁逻辑器件方面的应用	(281)
3.9.6	磁性隧道结在忆阻器方面的应用	(284)
3.10	磁性隧道结的研究展望	(286)
第 3 章附录 磁性隧道结的发展历史及其有代表性的优化结构		(292)
参考文献		(299)
第 4 章	庞磁电阻材料	刘俊明 王克锋 (327)
4.1	锰氧化物的结构及其庞磁电阻效应	(328)
4.1.1	锰氧化物的晶格和电子结构	(328)
4.1.2	庞磁电阻效应和组分调节	(334)
4.1.3	层状钙钛矿结构锰氧化物的性质及其磁电阻效应	(341)
4.1.4	其他庞磁电阻材料	(345)
4.2	钙钛矿锰氧化物的电荷/轨道有序相	(345)
4.2.1	锰氧化物的电荷和轨道有序态	(346)
4.2.2	锰氧化物的电荷和轨道有序态的融化	(350)
4.3	钙钛矿锰氧化物的输运性质	(351)
4.3.1	高温输运性质 —— 极化子输运	(352)
4.3.2	低温输运性质 —— 本征输运	(354)
4.4	庞磁电阻效应的机制 —— 相分离图像	(355)
4.4.1	早期的理论模型	(355)
4.4.2	锰氧化物的理论模型 —— 模型和参数	(356)
4.4.3	锰氧化物的理论模型 —— 单轨道模型、双轨道模型和相分离	(357)
4.4.4	锰氧化物不均匀性的试验证据 —— 理论同试验的比较	(360)
4.4.5	相分离图像下输运性质和庞磁电阻效应	(362)
4.5	锰氧化物的低场磁电阻效应	(367)

4.5.1	锰氧化物的低场磁电阻效应及其理论模型	(367)
4.5.2	低场磁电阻效应的增强	(369)
4.6	锰氧化物在自旋电子学中的应用	(373)
4.6.1	基于锰氧化物的磁隧道结	(373)
4.6.2	基于锰氧化物的电场效应器件	(377)
4.6.3	高温超导铜氧化物/锰氧化物夹心结构和自旋极化载流子注入	(383)
4.7	庞磁电阻材料目前存在的问题和展望	(387)
	参考文献	(389)
第 5 章	稀磁半导体的研究进展	赵建华 邓加军 郑厚植 (394)
5.1	引言	(394)
5.2	(Ga,Mn)As 薄膜制备及其结构特征	(397)
5.3	(Ga,Mn)As 磁性质	(401)
5.4	(Ga,Mn)As 磁输运性质	(405)
5.5	(Ga,Mn)As 磁光性质	(410)
5.5.1	磁圆偏振光二色性谱 (MCD 谱)	(411)
5.5.2	法拉第旋转	(413)
5.5.3	拉曼散射谱	(414)
5.5.4	铁磁共振谱	(416)
5.6	提高 (Ga,Mn)As 居里温度的方法	(417)
5.6.1	生长后低温退火热处理	(418)
5.6.2	共掺杂	(421)
5.7	空穴载流子导致铁磁性	(424)
5.8	(Ga,Mn)As 的异质结构	(429)
5.8.1	(Ga,Mn)As 和 GaAs 的带阶	(429)
5.8.2	(Ga,Mn)As/GaAs 多层膜结构	(430)
5.8.3	(Ga,Mn)As 基三层膜结构的自旋相关散射、层间耦合和隧穿磁阻	(431)
5.8.4	(Ga,Mn)As 自旋共振隧穿二极管	(433)
5.9	(Ga,Mn)As 铁磁性的电场控制	(433)
5.10	半导体异质结构中的自旋注入	(438)
5.10.1	(Ga,Mn)As 等稀磁半导体向半导体的自旋注入	(438)
5.10.2	铁磁金属向半导体中的自旋注入	(441)
5.11	其他稀磁半导体的研究进展	(442)
5.11.1	GaN 基稀磁半导体	(442)
5.11.2	IV 族稀磁半导体	(443)
5.11.3	III - VI 族稀磁半导体	(445)

5.11.4	IV - VI族稀磁半导体	(445)
5.11.5	氧化物稀磁半导体	(446)
5.11.6	稀磁半导体量子点	(446)
5.12	展望	(448)
	参考文献	(449)
第 6 章	磁电阻理论	邢定钰 夏 钊 (456)
6.1	引言	(456)
6.2	铁磁金属电子结构	(459)
6.3	杂质散射	(463)
6.4	单界面	(466)
6.4.1	弹道方式	(466)
6.4.2	考虑能带效应下的界面电导	(468)
6.4.3	自旋积累效应	(471)
6.4.4	铁磁体/超导体界面的 Andreev 反射效应	(473)
6.5	磁电电路理论	(474)
6.6	铁磁隧道结的隧穿磁电阻效应	(478)
6.6.1	非相干的电子隧穿	(478)
6.6.2	电子的相干隧穿	(481)
6.7	钙钛矿结构的锰氧化物的庞磁电阻效应	(484)
6.7.1	未掺杂 LaMnO_3 的电子自旋、电荷和轨道	(485)
6.7.2	掺杂 LaMnO_3 的双交换机理	(487)
6.7.3	锰氧化物中的量子相变	(489)
	参考文献	(492)
第 7 章	交换偏置	周仕明 (498)
7.1	引言	(498)
7.2	交换偏置的基本特征	(499)
7.3	基本测量方法	(514)
7.4	理论模型	(519)
	参考文献	(527)
第 8 章	自旋角动量转移效应	苏 刚 (534)
8.1	引言	(534)
8.2	自旋转移效应的提出	(537)
8.3	几类磁性多层纳米结构中的自旋转移效应	(542)
8.3.1	磁性隧道结中的自旋转移效应	(542)
8.3.2	铁磁体-Marginal 费米液体-铁磁体双隧道结中的自旋转移效应	(546)

8.3.3 铁磁体-量子点-铁磁体耦合系统中的自旋转移效应	(548)
8.4 自旋转移效应对畴壁动力学的影响	(552)
8.5 自旋转移效应的实验进展	(556)
8.6 结束语	(559)
参考文献	(561)
第 9 章 自旋动量矩转移矩对传统技术磁化的发展	翟宏如 (564)
9.1 自旋动量矩转移, 物理和技术上的历史性突破	(564)
9.2 传统铁磁学中的磁场诱导磁化	(566)
9.2.1 磁化的可逆转动和不可逆转动 (Stoner-Wohlfarth 模型)	(567)
9.2.2 可逆和不可逆畴壁位移	(568)
9.2.3 磁畴转动与反磁化的动力过程	(569)
9.2.4 畴壁位移的动态过程	(571)
9.2.5 用交变磁场研究磁矩进动、铁磁共振	(573)
9.2.6 磁矩进动的时间域测量	(577)
9.2.7 磁场诱导磁化过程小结	(578)
9.3 电流的自旋转移力矩 (STT) 诱导磁化的主要进展和特点	(578)
9.3.1 磁场诱导与电流诱导磁化机理的相同之处与特征	(578)
9.3.2 STT 导致的磁化转动和磁化反转	(579)
9.3.3 STT 导致的磁矩持续进动及自旋波的激发	(581)
9.3.4 STT 诱导的畴壁位移	(585)
9.3.5 自旋泵浦、自旋流和非局域自旋进动阻尼	(587)
9.4 结束语	(589)
参考文献	(590)
第 10 章 磁电子学器件应用原理	蔡建旺 (596)
10.1 巨磁电阻、隧穿磁电阻传感器	(596)
10.1.1 巨磁电阻传感器设计两要素	(597)
10.1.2 多层膜巨磁电阻传感器	(599)
10.1.3 自旋阀方向传感器	(601)
10.1.4 线性化自旋阀传感器	(603)
10.1.5 自旋阀线性位移传感器	(606)
10.1.6 磁隧道结隧穿磁电阻传感器	(608)
10.2 巨磁电阻隔离器	(609)
10.3 巨磁电阻、隧穿磁电阻硬盘读出磁头	(612)
10.3.1 巨磁电阻磁头的自旋阀单元工作的要点	(615)
10.3.2 高密度巨磁电阻读头发展对自旋阀材料的新要求	(618)

10.3.3	基于磁隧道结的新一代读出磁头·····	(620)
10.4	磁电阻随机存储器·····	(622)
10.4.1	各向异性磁电阻随机存储器的历史·····	(624)
10.4.2	巨磁电阻随机存储器的新篇章·····	(627)
10.4.3	隧穿磁电阻随机存储器的新起点·····	(629)
10.4.4	单配晶体管型隧穿磁电阻随机存储器面面观·····	(632)
10.4.5	触发器型隧穿磁电阻随机存储器的新特点·····	(636)
10.5	自旋转移磁化反转与纳米柱微波振荡器·····	(637)
10.6	自旋晶体管——磁电子器件的新理念·····	(640)
10.6.1	全金属双极性自旋晶体管·····	(640)
10.6.2	半导体双极性自旋晶体管·····	(642)
10.6.3	Datta-Das 自旋场效应晶体管·····	(643)
10.6.4	热电子自旋晶体管·····	(644)
10.7	结束语·····	(647)
	参考文献·····	(648)
	彩图·····	(653)

第 1 章 自旋电子学的形成与发展

1.1 两个历史性突破

近 20 年来,在物理和电子学方面出现了两个历史性的突破.第一个是 1988 年巨磁电阻^[1,2]的发现.调控金属磁性纳米多层膜中磁性层中磁矩的相对取向可引起其电阻或电流的巨大变化,这个突破的核心是自旋相关导电.第一次使电子的两个基本秉性——电荷和自旋均成为电子导电可调控的自由度,而传统的电子学和微电子学仅仅利用了电子具有电荷这一特征.1988 年巨磁电阻一经发现,其重要的物理内涵和应用前景立即引起科技界的高度重视,针对它的基础研究和应用开发在各国大量进行:巨磁电阻和自旋相关导电的机理,磁性纳米多层膜中层间交换耦合,比巨磁电阻效应更大的隧道磁电阻 (TMR) 和庞磁电阻 (CMR),铁磁/超导和铁磁/半导体间的自旋电流注入,居里温度达到室温的磁性半导体等新理论、新现象和新材料在几年之内不断涌现.1995~1996 年巨磁电阻传感器和硬盘读出头进入了市场,约 10 年以后隧道磁电阻器件也进入市场,成为基础研究的重大发现迅速转化为重要产品的典范.很快地,一个新兴学科——自旋电子学被人们提出并获得公认^[3,4].在自旋电子学的发展中,出现的第二个历史性突破是自旋动量矩或力矩的转移 (STT) 和电流直接引起纳米磁体的磁化状态变化,它是巨磁电阻的逆效应.1996 年 Slonczewski 和 Berger 首先给出了自旋力矩转移的理论预言^[5,6],并很快地得到了实验证实^[7~9].自从古代发现磁铁矿以来,实践和理论均认为,只有磁场才能使磁矩改变方向,使铁磁体改变其磁化.电流能直接引起磁化,无疑是几千年来物理上的另一个历史性的突破.另外,在微电子学中有一个长期的技术困难,即磁场的植入,产生磁场的器件难以微型化.因此,电流直接引起磁化提出了解决这一难题的崭新的途径,这将是技术上的历史性突破.自旋动量矩转移掀起了自旋电子学新的研究与开发的另一个高潮,物理和应用上的发展层出不穷.电流诱导磁矩转动和反转,电流诱导磁矩进动和自旋波激发^[7~9],电流诱导畴壁位移并在磁性半导体中实现^[10],基于 STT 效应的纳米微波振荡器和整流器^[11,12],基于电流诱导畴壁位移的新型逻辑元件和高密度存储器^[13]等,新的研究与开发不断涌现,自旋电子学在全面形成和发展.还值得注意的是,100 多年来基于磁场诱导磁化的强磁体的磁化理论已经相当系统而完备,现在正被 STT 效应/电流直接诱导磁化的理论和实验补充和更新.