



国家“十五”重点图书
国家科学技术学术著作出版基金资助项目

磁电子学

MAGNETOELECTRONICS

焦正宽 曹光旱 编著



浙江大学出版社

国家“十五”重点图书
国家科学技术学术著作出版基金资助项目

磁电子学

焦正宽 曹光早 编著

浙江大学出版社

内容简介

磁电子学是基于电子传导和磁性间的关联效应,通过磁场实现对输运特性调制的新兴学科。它涉及自旋极化、自旋相关散射和隧穿、自旋积累及弛豫、电荷—自旋—轨道—晶格间相互作用等强关联和量子干涉效应,是当今凝聚态物理的重大课题。作为纳米电子学的重要组成,在磁记录、磁头读出、非易失信息随机存储、自旋晶体管及量子计算机等领域将获得广泛应用,成为未来信息科学技术的主导技术。

全书共分 10 章,全面系统地讨论了各种材料体系的磁电阻(GMR,CMR,TMR)效应及其机理、磁性—半导体一体化、强关联电子学以及磁电子学的应用等。

本书适于作为信息科学、凝聚态物理(磁学、半导体、高温超导等)、材料科学和纳米科技的科研人员及大专院校的高年级学生和研究生教材或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

磁电子学 / 焦正宽, 曹光早编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2005. 10
ISBN 7-308-04468-8

I. 磁... II. ①焦... ②曹... III. 磁电效应—电子学 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 110309 号

出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310028)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

策 划 陈晓嘉
责任编辑 樊晓燕
版式设计 孙海荣
封面设计 杭州氧化光阴多媒体设计有限公司
排 版 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷 杭州富春印务有限公司
经 销 浙江省新华书店
开 本 889mm×1194mm 1/16
印 张 34
字 数 960 千
版 次 2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-308-04468-8/TN·077
定 价 68.00 元

前言

近几年,以磁电子学或自旋电子学作为关键词的综述性文章频频出现于科技刊物中。基于凝聚态物理、电子学、光学、材料科学和纳米科技间的密切交叉,一门全新的学科——磁电子学已经诞生,并因在磁电阻传感器、磁头读出及信息存储等领域显示出广阔的应用前景而备受关注。

以电场操纵电子的一个属性——电荷(即多数载流子和少数载流子)来调制其导电行为的半导体电子学,在上世纪得到了飞跃的发展,将人类带入高度文明的信息时代。

电子器件的小型化、电路芯片的大容量或存储信息的高密度化一直是推动电子技术更新换代或信息革命的原动力。时至今日,微电子学要求在微米或亚微米尺度上对元器件实施加工和性能控制。但是,半导体电子器件能否无限地被小型化?答案是否定的!集成电路的发展历程表明,芯片容量每3年增加4倍(Moore第一定律)。小型化、大容量的发展趋势将受到两方面的制约:经济上,按照 Moore 第二定律,集成电路的加工费用将以每3年增加两倍的速率增大,直至大到人们无法承受的程度;物理上,随着器件尺寸的不断缩小,将步入所谓受介观体系物理支配的领域,呈现一系列量子干涉效应,从而导致某些经典物理定律的失效,迫切要求另辟蹊径。

与传统的半导体电子学不同,磁电子学是建立在自旋极化和自旋相关的电子输运过程的基础上,即通过磁场等操纵电子的另一个属性——自旋的相对取向,基于电子输运特性与磁序间的关联效应,调制其传导行为,并制作成具有相应传感、读写和存储功能器件的一门新兴的科学技术。

磁电阻(MR)效应是一个早被人们所熟知的现象。铁磁性金属的磁电阻效应长期以来就被用于磁传感器。

巨磁电阻(GMR)效应的发现,推动了磁电子学的诞生。1988年,法国 A. Fert 教

授领导的研究小组在研究 Fe/Cr 超晶格的物性时意外发现,在外磁场作用下,其电阻发生了巨大变化。相继地,在掺杂锰氧化物中观察到更加显著的庞磁阻(CMR)效应和自旋相关的隧道磁电阻(TMR)效应等,以及以自旋阀为代表的非耦合型磁电阻效应的相继发现,特别是磁性半导体或半金属材料的高速发展,导致继高温超导电性研究热潮后成为凝聚态物理研究的又一热点课题。

和高温超导铜氧化物一样,磁电子材料,如 CMR 锰氧化物也是典型的强关联电子体系,在电荷—自旋—轨道—晶格之间存在着能量大小相当的各种相互作用,从而诱发绝缘体—金属(I-M)相变、有序化和相分离等一系列奇异效应。对此所作的深入研究导致凝聚态物理新概念的急剧增加,并向其他学科移植和渗透。继自旋电子学之后,科学家又提出了所谓轨道电子学甚至强关联电子学的全新概念。十余年来发表了数以千计的学术论文。我国已将巨磁电阻效应作为强关联多电子系物理问题列为重点研究课题,并已取得不少重要结果。本书的作者深感有必要在总结国内外学者研究成果的基础上,编写这样一本书,以促进这一新学科的发展。

和任何新学科的发展规律一样,磁电子学的发展动力主要源于技术应用的需求。磁电子器件由于与传统半导体电子器件相比具有一系列独特的优越性,使其有可能在未来的信息工业和商品市场中占据巨大的份额,显示诱人的应用前景。磁电阻传感器具有灵敏度高、功耗低、小型化、大容量、廉价、稳定可靠以及对温度变化和粒子辐照等恶劣环境具有较大的承受力,而成为传感器更新换代的最佳候选产品。在磁头读出和信息存储领域,由于磁电子元器件可以实现亚纳(10^{-10})秒的开关,特别由于磁滞效应是铁磁材料的内禀属性,使得磁电子存储器件即使在断电情况下也不会造成信息挥发(丢失)的灾难性事故。这对某些特殊应用领域(如军事)具有不可替代的优越性。同时,某些磁电子器件可沿用已在上世纪得到高度发展的微电子学集成电路制作工艺,无须建立新的生产线,从而具有重大的经济效益。作为具有更大发展潜力的自旋晶体管,是一种低阻抗器件,以非平衡磁化强度(δM)为内在驱动力;探测电极的开路电压(V_s)正比于 δM ,而后者又与其基极的体积成反比。所以,器件的小型化与性能的改善相得益彰。全金属化的自旋晶体管与半导体晶体管相比,耗能下降一个量级,载流子密度增加 4 个量级,存储密度提高两个量级。人们可以设想,全金属计算机和量子计算机的相继问世,将使未来的信息技术发生何等巨大的变化!

磁电子学建立在磁性体内多种交换作用的基础之上,这些相互作用的特征长度小至金属费米波长和原子间距(nm)尺度。所以,将铁磁材料作为器件应用时,要求对材料进行纳米尺度的加工和调制。因此,磁电子学是纳米电子学的重要组成部分。纳米电子学和纳米生物学的发展水平是纳米科技走向成熟的重要标志,我们应给予足够的重视。正如 1986 年诺贝尔物理奖获得者 H. Rohrer 所说:“20 世纪 70 年代重视微电子技术的国家,如今都先后成为发达国家。现在重视纳米技术的国家,很可能成为 21 世纪的先进国家。”

但是应当指出,由于磁电子学的发展还处于初创阶段,加之有的成果已成为商业秘密,所以,本书尽管以一章的篇幅涉及应用问题,但更多的笔墨是用于讨论各种磁电阻效应及其机理、电荷—自旋—轨道—晶格间的相互作用以及由此导致的多种有序化、相变和不稳定性等重大凝聚态物理问题。贯穿本书的核心概念是电子强关联和自旋相关散射问题。因此,本书还不是传统意义上的电子学。不过,正如美国《商业周刊》所指出的:谁能抢先占领磁电子技术的巨大诱人的商品市场,最关键的还是看谁能在基础研究处于领先地位。

本书的内容安排如下:

在第1章的磁电子学导论中,解释了磁电子学的基本概念、内涵和外延,讨论了磁电子学的几个核心问题,如自旋极化、传导电子的自旋相关散射、层间交换耦合、磁量子阱及巨磁电阻效应、自旋相关的隧穿过程、自旋积累及其弛豫效应、自旋阀等,并指出庞磁电阻效应的机理,涉及钙钛矿锰氧化物中自旋—电荷—轨道—晶格各自由度间的复杂的相互作用以及由此派生的多种有序化、相变和相分离等前沿理论课题,还讨论了高温超导性与庞磁电阻的相互关联与渗透,半导体磁电子学、轨道电子学以及强关联电子学和莫尔定律等,相信读者在仔细阅读导论之后,对全书会有一整体的概念。

第2章和第3章分别讨论了巨磁电阻(GMR)效应的发现、主要实验事实及其机理。

第4章涉及自旋阀和隧道磁电阻(TMR)效应。

第5章着重讨论了作为当今磁电子学的最现实途径和主流方向的半导体磁电子学的某些基本问题,如磁性体—半导体的一体化、稀磁半导体、磁性半导体和半金属等多种新型半导体磁电子学材料的研制,自旋的注入、检测和调制等关键技术问题。

第6章对庞磁电阻(CMR)效应的发现及其发展作扼要介绍,以便对CMR锰氧化物的背景知识有一基本了解。

第7章讨论钙钛矿锰氧化物体系的晶体结构、磁结构及电子结构,着重阐述其自旋—电荷—轨道有序现象。

第8章介绍钙钛矿锰氧化物的物理性质和电子相图。

第9章涉及钙钛矿锰氧化物的电输运性质和相分离。在此基础上,介绍CMR效应的理论解释。

第10章简要介绍低场磁电阻效应以及其他新型CMR材料的研究进展。

第11章介绍有关强关联电子学的基本概念,指出从自旋电子学向轨道电子学的外延以及在磁、光、电、压力、晶格畸变和辐射等外界条件诱导下,材料的输运特性可能发生的巨大变化,将构成强关联电子学的一大家族。

第12章全面介绍了XMR效应(GMR,CMR,TMR,BMR,GMI和AMR等)在传感器、磁头、磁记录、磁存储等领域的应用实例,以及未来在自旋晶体管、量子计算等

领域的应用前景。

本书的前言、第1~5章、11~12章由焦正宽执笔;第6~10章由曹光旱执笔。

广义地讲,磁光效应、磁致伸缩效应甚至高温超导电性都是磁电子学或强关联电子学的重要方面,但由于篇幅所限,以及已有多种专著涉及这些问题,故本书不再专门讨论。考虑到专业读者的习惯,在磁学量纲上并用国际和高斯单位制。

本书编写时在取材上是以介绍原创性工作为主,并兼顾代表发展方向的最新成果。应当着重指出,磁电子学是一门刚刚兴起的新学科,新的物理概念不断被引入,新的应用领域不断被开拓,目前尚没有可以借鉴的全面论述磁电子学各个方面的专著问世,已有文献又散布于浩瀚的书刊海洋之中,编写此书的困难是显而易见的,特别是受编者学术水平的限制,书中取材可能挂一漏万,并难免有不少错误和不妥之处。我们真诚地希望读者给予批评指正,以便将来有机会再版时加以修订。

张泽渤教授、应俊先生和焦剑博士参与了本书部分章节的编写。曹义刚博士和浙江大学出版社副社长陈晓嘉编审参与了前期工作,为本书的出版作出了重要贡献。

在申请国家科学技术学术著作出版基金资助过程中,得到了唐孝威、贺贤土、杨国禔三位院士的鼎力推荐;德国 Jülich 研究中心 P. Grünberg 和 G. Eilenberger 教授提供了宝贵资料。现在美国访问的陈晓嘉先生和任宇航博士以及中国计量学院的崔玉建教授等为本书收集了颇有参考价值的资料。罗孟波副教授,陈江星、傅敏毅、汪友梅、冯丽欣和许晓峰等研究生为本书出版做了大量的具体工作。

本书在编写过程中参考了多篇高水平的综述文章以及大量学术论文,使作者受益匪浅。

本书的责任编辑是浙江大学出版社樊晓燕博士,她的辛勤和卓有成效的工作为本书的出版作出了重要贡献。

作者对所有使本书得以顺利出版并作出贡献的友人以及引文的原作者表示衷心的感谢。

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 磁电子学的基本概念	1
1.2 磁电子学的几个核心物理问题	2
1.2.1 自旋极化和自旋相关散射	2
1.2.2 巨磁电阻效应和双电流模型	3
1.2.3 层间交换耦合的振荡效应和磁量子阱态	4
1.2.4 自旋阀	5
1.2.5 庞磁电阻效应及其机理	5
1.2.6 自旋积累和弛豫效应	7
1.2.7 自旋相关的隧道效应和隧道磁电阻	8
1.3 巨磁电阻效应与高温超导电性间的关联与渗透	8
1.4 半导体磁电子学	8
1.5 从自旋电子学到轨道电子学以及强关联电子学的基本概念	9
1.6 关于莫尔定律的讨论	10
参考文献	11
第 2 章 巨磁电阻(GMR)效应	14
2.1 引 言	14
2.2 磁电阻和电子输运与磁性的关联效应	14
2.2.1 磁电阻效应	14
2.2.2 电子输运与磁性的关联效应	17
2.3 巨磁电阻的发现及其主要实验现象	26
2.3.1 GMR 的发现	26
2.3.2 巨磁电阻效应的主要实验现象	28
2.4 多层膜巨磁电阻效应材料的发展	30
2.5 层间交换耦合的两类不同振荡周期	32

2.6	CPP 模式下的巨磁电阻效应	34
2.7	微加工 Fe/Cr 多层膜的 CPP-MR	36
2.8	多层磁性纳米线的巨磁电阻	37
2.9	沉积在具有微结构衬底上的多层膜 GMR	39
2.10	磁场诱导的巨亚铁磁态多层膜的 GMR 效应	41
2.11	颗粒体系的巨磁电阻	43
2.11.1	颗粒膜的巨磁电阻	43
2.11.2	失稳分解合金的 GMR	47
2.12	弹道磁电阻效应	48
	参考文献	52
第 3 章	巨磁电阻效应的机理及影响因素	57
3.1	引言	57
3.2	层间耦合效应的唯象描述和耦合类型及强度的确定	58
3.3	自发磁化的能带模型与自旋相关散射	62
3.3.1	自发磁化的能带模型	62
3.3.2	自旋相关散射	63
3.4	多层膜 GMR 的唯象理论——双电流模型	64
3.5	AF 耦合的多层膜 GMR 效应的理论分析	66
3.6	自旋相关散射的界面无规交换势微观理论	69
3.6.1	铁磁金属合金的交换势和虚束缚态	69
3.6.2	金属多层膜 GMR 的界面无规交换势理论	70
3.7	层间交换耦合理论	76
3.7.1	引言	76
3.7.2	类 RKKY 理论	77
3.7.3	自由电子模型的基本概念	79
3.7.4	空穴束缚模型	81
3.7.5	层间交换耦合的 Anderson(s-d 混合)模型	82
3.7.6	总能量计算法	83
3.7.7	层间交换耦合的量子干涉模型及磁量子阱态	83
3.8	从头计算模型	93
3.9	GMR 计算的介观理论模型	94
3.10	自旋相关散射的计算	95
3.11	巨磁电阻效应的量子理论	95
3.12	多层膜 GMR 的电阻网络理论	98
3.13	CPP-GMR 的理论模型	100
3.14	GMR 数据的定量分析	103
3.15	GMR 的温度依赖关系	108
3.16	GMR 与相邻磁层磁化相对取向的关系	110
3.17	GMR 的影响因素理论分析	112
3.17.1	引言	112
3.17.2	自旋相关散射的非对称性及材料欠完美性的影响	112

3.17.3 逆巨磁电阻效应	115
3.17.4 CIP 模式下的 MR 厚度依赖关系与标度长度	119
3.17.5 CPP 模式下的 MR 厚度依赖关系与标度长度	120
参考文献	121
第 4 章 自旋阀和隧道巨磁电阻效应	128
4.1 引 言	128
4.2 自旋阀效应的发现及其工作原理	129
4.2.1 自旋阀的结构和工作原理	129
4.2.2 非磁层厚度对自旋阀磁电阻的影响	131
4.2.3 反铁磁层材料的选择及影响	132
4.3 交换各向异性的机理	134
4.3.1 交换各向异性的理想模型	134
4.3.2 界面效应与长程交换作用	136
4.3.3 非补偿自旋、界面粗糙度和磁畴	137
4.3.4 窘组与自旋转向耦合	137
4.3.5 反铁磁层的磁各向异性及其对磁交换各向异性的影响	138
4.4 隧道巨磁电阻效应	142
4.4.1 FM/I/FM 系隧道型巨磁电阻效应	142
4.4.2 纳米颗粒膜的隧道型巨磁电阻效应	150
4.4.3 TMR 的量子振荡效应	157
参考文献	159
第 5 章 半导体磁电子学	163
5.1 引 言	163
5.2 铁磁一半导体的一体化	165
5.2.1 外延膜的制备	165
5.2.2 在静磁场下的行为	166
5.2.3 与辐射场的耦合效应	168
5.2.4 自旋注入器件	170
5.3 磁性半导体	171
5.3.1 铁磁 III-V 族半导体	172
5.3.2 磁性和磁输运性质	173
5.3.3 自旋相关的共振隧道效应	176
5.3.4 层间磁相互作用	177
5.4 新型铁磁半导体	177
5.4.1 引 言	177
5.4.2 铁磁霍伊斯勒合金	178
5.4.3 铁磁半金属氧化物	179
5.4.4 CrO ₂ 型半金属磁性材料	180
5.4.5 具有室温铁磁性的过渡金属掺杂的 TiO ₂	181
5.4.6 MnSb 颗粒膜的室温巨正磁电阻效应	181

5.4.7	CrSb 的室温铁磁性	183
5.4.8	稀磁半导体基体内铁磁 Mn-Ge 纳米团簇的磁电阻效应	184
5.5	电子自旋的注入、检测和输运	186
5.5.1	自旋的欧姆注入	187
5.5.2	光发射二极管内自旋极化电流的注入与检测	191
5.5.3	GaAs/ZnSe 异质结结构的偏压自旋注入	193
5.5.4	自旋的热电子注入	195
5.5.5	自旋的隧道注入	196
5.5.6	弹道电子注入	197
5.5.7	自旋检测	197
5.5.8	自旋的输运和转移	197
5.6	电场对半导体磁性的调制	198
5.6.1	电场辅助的磁化反向	198
5.6.2	极化自旋流驱动下纳米磁体的微波振荡	201
5.7	在半导体和纳米结构内的自旋相干光调制	204
5.7.1	通过半导体和界面的相干自旋输运	205
5.7.2	半导体异质结构的磁性掺杂	205
5.7.3	核自旋的调制和量子计算	206
5.8	半导体电子—核自旋相互作用的门控	207
5.8.1	电子—核自旋相互作用门压控制原理	207
5.8.2	伊辛铁磁态	209
5.8.3	核自旋反转和复位程序	210
5.9	核自旋的光控	211
	参考文献	217

第 6 章 锰氧化物庞磁电阻效应概述

6.1	引言	222
6.2	CMR 效应的发现及其影响	223
6.2.1	亚锰酸盐磁电阻效应的发现	223
6.2.2	亚锰酸盐 CMR 现象的发现	224
6.2.3	CMR 效应的分类和特点	225
6.2.4	CMR 锰氧化物的研究趋势	227
6.3	锰氧化物的早期研究	229
6.3.1	早期实验结果	230
6.3.2	晶场效应与 Jahn-Teller 畸变	233
6.3.3	双交换理论	235
6.3.4	de Gennes 的倾斜自旋态	236
6.3.5	Goodenough 的共价键理论	237
6.3.6	铁磁性金属的导电模型	240
6.4	锰氧化物系统的相互作用与理论模型	241
6.4.1	锰氧化物系统的相互作用	241
6.4.2	锰氧化物系统的理论模型	243

6.5 金属—绝缘体转变	245
6.5.1 强关联电子系统中的金属—绝缘体转变	245
6.5.2 Mott-Hubbard 绝缘体与电荷转移绝缘体	246
6.5.3 锰氧化物母体相——掺杂引起的 IM 转变	247
6.5.4 锰氧化物铁磁金属相——温度引起的 MI 转变	248
6.5.5 锰氧化物电荷/轨道/自旋有序相——磁场引起的 IM 转变	249
6.6 CMR 锰氧化物的研究进展概述	250
6.6.1 自旋—电荷—轨道有序	250
6.6.2 电子相图的特征	252
6.6.3 电子相分离	255
6.6.4 CMR 机理的主要图像	258
参考文献	260
第 7 章 钙钛矿锰氧化物的基态性质	264
7.1 引 言	264
7.2 CMR 锰氧化物的晶体结构	265
7.2.1 理想钙钛矿	265
7.2.2 畸变钙钛矿	266
7.2.3 钙钛矿锰氧化物	267
7.2.4 晶体结构对电子结构的影响	272
7.3 锰氧化物的电荷—自旋—轨道有序	274
7.3.1 引 言	274
7.3.2 自旋—轨道有序—— LaMnO_3	275
7.3.3 半金属铁磁体	276
7.3.4 自旋—轨道—电荷有序——半掺杂情形	279
7.3.5 条纹型电荷有序的反铁磁体	281
7.3.6 C 型反铁磁体	282
7.3.7 G 型反铁磁体	283
7.3.8 A 位离子的影响	283
7.4 电荷—自旋—轨道有序的理论解释	284
7.4.1 $x=0$ 的情形	285
7.4.2 $x \neq 0$ 的情形	287
7.5 锰氧化物的电子结构	290
7.5.1 Goodenough 的离子模型	290
7.5.2 能带计算	292
7.5.3 电子结构的实验观察	298
参考文献	302
第 8 章 钙钛矿锰氧化物的物理性质与电子相图	307
8.1 引 言	307
8.2 低温铁磁态的性质	308
8.2.1 电输运性质	308

8.2.2	磁性质	315
8.2.3	低温比热	318
8.3	高温顺磁态性质	321
8.3.1	磁性质	321
8.3.2	电输运性质	321
8.4	铁磁—顺磁相变	327
8.4.1	相变的临界行为	327
8.4.2	物理性质变化	328
8.4.3	结构畸变与电子性质	334
8.4.4	同位素效应	338
8.5	电荷有序相的熔化	339
8.5.1	$x=1/8$ 相	339
8.5.2	$x\approx 1/2$ 相	340
8.5.3	电子掺杂区的电荷有序相	345
8.5.4	磁场诱发电荷有序的熔化	346
8.5.5	其他因素导致电荷有序的熔化	347
8.6	锰氧化物的电子相图	352
8.6.1	宽带系	352
8.6.2	中等带宽系	355
8.6.3	窄带系	357
8.6.4	带宽调节系	357
	参考文献	359

第9章 钙钛矿型锰氧化物的庞磁电阻效应及其机理 366

9.1	引言	366
9.2	锰氧化物 CMR 效应及其影响因素	366
9.2.1	锰氧化物 CMR 效应的回顾	366
9.2.2	B 位掺杂与 CMR 效应	367
9.2.3	CMR 效应的其他影响因素	370
9.3	相分离的实验证据	375
9.3.1	中等带宽系	375
9.3.2	宽带系	380
9.3.3	窄带系	381
9.3.4	电子掺杂的锰氧化物	384
9.3.5	小结	385
9.4	锰氧化物 CMR 效应的理论解释	387
9.4.1	引言	387
9.4.2	极化子理论	388
9.4.3	无序效应	393
9.4.4	基于相分离的 CMR 理论	395
	参考文献	399

第 10 章 低场磁电阻效应和其他新型 CMR 材料	404
10.1 引 言	404
10.2 低场磁电阻效应	405
10.2.1 LFMR 的基本物理图像	405
10.2.2 晶界磁电阻效应	406
10.2.3 隧道结磁电阻效应	413
10.2.4 其他 LFMR 材料简介	413
10.3 层状钙钛矿锰氧化物	420
10.3.1 锰氧化物系统的维度效应	420
10.3.2 $\text{La}_{2-2x}\text{Sr}_{1+2x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ 的磁电阻效应及其电子相图	422
10.4 其他 CMR 材料简介	427
10.4.1 磁性半导体	427
10.4.2 $\text{Tl}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$ 系	430
10.4.3 CMR 材料的普适关系和共同特征	432
参考文献	433
第 11 章 强关联电子学	437
11.1 总 论	437
11.1.1 引 言	437
11.1.2 自旋—电荷—轨道耦合与丰富多彩的电子相	438
11.1.3 强关联电子的临界相控制	441
11.1.4 从自旋电子学到轨道电子学	444
11.1.5 强关联电子学的关键课题	447
11.2 电子关联和铁磁材料设计的理论基础	448
11.2.1 引 言	448
11.2.2 奇异态密度和磁性	449
11.3 磁性氧化物人工晶格的自旋调制	454
11.3.1 引 言	454
11.3.2 3D 自旋取向调制的人工晶格及铁磁性(F)、反铁磁性(AF)	456
11.3.3 自旋窘组的人工晶格	457
11.3.4 多功能综合调制的人工晶格	460
11.4 介观体系的关联电子	462
11.4.1 引 言	462
11.4.2 人工原子的自旋效应	462
11.4.3 量子点超晶格	466
参考文献	467
第 12 章 磁电子学的应用	471
12.1 引 言	471
12.2 巨磁感应效应及其应用	473
12.3 巨磁电阻传感器	475

12.3.1	磁传感器市场分析·····	475
12.3.2	磁传感器·····	476
12.3.3	GMR 传感器 ·····	476
12.4	磁记录读出磁头·····	489
12.4.1	引 言·····	489
12.4.2	市场拉动·····	490
12.4.3	技术推动·····	490
12.4.4	磁盘技术·····	491
12.4.5	磁 带·····	492
12.4.6	磁记录和读出磁头·····	493
12.5	磁电阻随机存取存储器·····	500
12.5.1	引 言·····	500
12.5.2	半导体存储器·····	501
12.5.3	磁存储器·····	502
12.5.4	磁电阻随机存取存储器(MRAM) ·····	502
12.5.5	自旋阀型随机存储单元·····	508
12.5.6	TMR 型 MRAM ·····	509
12.6	自旋晶体管·····	511
12.7	量子计算机·····	517
	参考文献·····	522
	本书所涉及的部分名词术语中英文对照表·····	525

第 1 章

导 论

1.1 磁电子学的基本概念

历史一再证明,材料科学的发展水平是人类文明进步程度的重要标志。具有特殊性能的新型材料的问世,常导致科学技术的重大突破,甚至引发一场技术革命。最能说明这一点的是半导体锗(Ge)晶体管的发现(1947年12月,美国贝尔实验室),以及五年之后,第一个商用晶体管的诞生,最终导致微电子学(microelectronics)的蓬勃发展和当今信息时代的到来。可以毫不夸大地说,我们人类今天所能享受的高度物质文明,大多是和物理学,特别是凝聚态物理学,以及与此密切相关的材料科学的发展分不开的。

从科学发现到向商品应用快速转换的最新的实例是巨磁电阻(giant magnetoresistance, GMR)效应在传感器、磁头和存取存储等领域的开拓性应用,以及其在自旋晶体管、全金属计算机和量子计算机等领域展现的诱人的应用前景。^[1,2]

正如大家所熟知的,被束缚于固体中的原子上的电子同时负载电荷和自旋并伴随有轨道自由度。所以,固体的电子输运和磁性是密切相关的^[3]。作为20世纪物理学最伟大的创造之一的固体电子学是以通过电场来调制半导体中数目不等的电子和空穴亦即多数载流子(majority)和少数载流子(minority)的输运过程为基础的,并未计及电子的自旋状态。那么我们能否操纵电子的另一个属性——自旋,制成新型的磁电子器件呢?答案是肯定的!以各向异性磁电阻(anisotropic magnetoresistance, AMR)、巨磁电阻、庞磁电阻(colossal magnetoresistance, CMR)和隧道磁电阻(tunneling magnetoresistance, TMR)等磁性相关输运效应的相继发现为契机,随着高灵敏度传感器、磁电子器件开发研究的深入,在微电子技术中得到高度发展的超晶格(superlattice)制备和微加工技术以及由于在过去十余年高温超导电性研究过程中,在对钙钛矿氧化物高质量单晶和薄膜制备工艺的改进与对强关联电子系理解的不断深入的基础上,一门崭新的科学技术——磁电子学(magnetoelectronics)或自旋电子学(spin-electronics 或 spintronics)已初见端倪。

与微电子学不同,磁电子学是通过磁场等在介观尺度上调制自旋状态,借助电子传导与磁性间的关联效应,实现对电子输运特性的调制而开发出各种电子器件的一门新技术。

在基础研究方面,磁电子材料如铁磁金属和合金、磁性半导体或半金属、钙钛矿锰氧化物等,常

常是典型的强关联多电子系。在电子—电子、电子—晶格、电荷—自旋—轨道之间存在着能量相当的相互作用、电子—声子耦合和 Jahn-Teller 效应等关联作用。它们涉及自旋极化、自旋相关散射、自旋相关隧道效应、自旋积累及弛豫、磁量子阱内的干涉效应、电荷—自旋—轨道有序、相分离和条纹相等一系列量子干涉效应,成为凝聚态物理的研究前沿和热点。^[4~6]

在技术应用上,GMR 的第一个商用产品(磁场传感器)诞生在 1994 年^[7]。但真正具有经济效益的应用是 1997 年 IBM 开发的磁驱动磁盘的读出磁头(read heads),这类产品的市场规模在 1998 年已达到大约每年数百万美元的量级。仅仅是在已有的硬盘上装入一片新的 GMR 材料,就能将存储能力从 1 千兆比特增至 20 千兆比特。其具有更大的经济效益的应用是非挥发(信息不易丢失)计算机存储器及自旋晶体管。1997 年 11 月^[8],Holleywell 公司声称 GMR 可用于随机存取存储器(MRAM),这将给 RAM 市场带来巨大冲击,预计这类产品在世界范围的市场份额将高达千亿美元以上^[1]。

作为当今发达国家支柱产业的半导体微电子器件的制造是集薄膜制备和微加工技术之大成。半导体内电子的特征长度为几十纳米量级,半导体微电子器件涉及的是微米技术和电子输运过程,按尺度的观点,其可以被称为微米电子学。随着信息工业的高速发展,信息存储的高密度化和器件的小型化一直是驱动电子学不断向前发展的原动力。然而,芯片容量的提高和尺度的降低并非是有限的^[9]。按照莫尔(Moore)第一定律,芯片容量每 3 年将增加 4 倍。物理上,随着器件的小型化,按照莫尔定律,到 2020 年开关一个三极管将从现在驱动上千个电子减少到不足几个电子。另一方面,当器件尺度小到与退相长度(dephasing length),即载流子经受相邻两次非弹性散射的平均扩散距离可比时,将进入所谓介观物理所涉及的体系,呈现自平均效应的消失、弱局域性、库仑阻塞、AB 效应、磁指纹以及弹道输运和持续电流等一系列量子干涉效应^[10]。因此迫切要求建立新的概念,寻求新的出路^[11]。

20 世纪 80 年代相继发现的高温超导电性、 C_{60} 和巨磁电阻效应,为解决这一难题提供了新的途径。前两项重大科学进展已先后获得诺贝尔奖,巨磁电阻获此项大奖可能也只是时间问题。

巨磁电阻效应是建立在磁性体内多种交换相互作用之上的。这些相互作用发生在原子尺度内,相应的特征长度为金属费米波长和原子间距量级。将这些磁性材料作为器件利用时,要求对纳米尺度实施加工和调制。所以,从这个意义上讲,磁电子学可以看成是纳米电子学的一部分,并且是重要的组成部分。纳米电子学和与其密切相关的纳米生物学的发展水平将作为纳米科技时代的主要标志。

1.2 磁电子学的几个核心物理问题

1.2.1 自旋极化和自旋相关散射

自旋极化(spin polarization)和自旋相关散射(spin-dependent scattering)是本书讨论的各种磁电阻效应的物理基础。

对于普通的非铁磁金属及合金,没有净的自发磁矩,传导电子的散射是自旋简并的 s 电子间的散射。参与输运过程的费米面附近的自旋向上和自旋向下的电子态密度相等($N_{\uparrow} = N_{\downarrow}$),因此输运过程中的电子流是自旋非极化的,传导电子的散射是自旋取向无关的弱散射,室温下,其电子平均自由程约为 10nm 量级。相反,对于铁磁过渡金属,3d 和 4s 电子共存,且 s 带和 d 带是交叠在一起