

纳米科学与技术



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

自旋电子学导论

下卷

韩秀峰 等 编著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

内容简介

纳米科学与技术

自旋电子学导论

下卷

韩秀峰等 编著

科学出版社

北京

TN01
134
V2

内 容 简 介

本书由工作在自旋电子学研究领域里的国内外 50 余位学者撰写而成。全书分两卷、共 28 章，各章均由该领域富有研究经验的知名专家负责，较全面地介绍和论述了目前自旋电子学研究领域中的各个重要研究方向及其进展，并重点关注自旋电子学的关键材料探索、物理效应研究及其原理型器件的设计开发和实际应用。

本书适合物理(特别是自旋电子学)及相关领域的大学本科高年级学生、研究生、教师、工程师和科研工作者等参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

自旋电子学导论·下卷/韩秀峰等编著. —北京: 科学出版社, 2014. 8
(纳米科学与技术/白春礼主编)
ISBN 978-7-03-041825-8

I. 自… II. 韩… III. 自旋-电子学-研究 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 206442 号

丛书策划: 杨 震/责任编辑: 顾英利 卜 新/责任校对: 彭 涛 钟 洋
责任印制: 肖 兴/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

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 8 月第一次印刷 印张: 35 3/4 插页: 6

字数: 840 000

定价: 160.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《纳米科学与技术》丛书编委会

顾 问 韩启德 师昌绪 严东生 张存浩

主 编 白春礼

常务副主编 侯建国

副主编 朱道本 解思深 范守善 林 鹏

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈小明 封松林 傅小锋 顾 宁 汲培文 李述汤

李亚栋 梁 伟 梁文平 刘 明 卢秉恒 强伯勤

任咏华 万立骏 王 琛 王中林 薛其坤 薛增泉

姚建年 张先恩 张幼怡 赵宇亮 郑厚植 郑兰荪

周兆英 朱 星

《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中，及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著，一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段，是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和运用，离不开知识的传播：我们从事科学研究，得到了“数据”（论文），这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析，使之形成体系并付诸实践，才变成“知识”。信息和知识如果不能交流，就没有用处，所以需要“传播”（出版），这样才能被更多的人“应用”，被更有效地应用，被更准确地应用，知识才能产生更大的社会效益，国家才能在越来越高的水平上发展。所以，数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展，这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中，知识的传播，无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪，我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面，已经大大地落后于科技发达国家，其中的原因有许多，我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同：中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识，将其变成具有系统性的知识结构。所以，很多学科领域的第一本原创性“教科书”，大都来自欧美国家。当然，真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力，更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一，其对经济和社会发展所产生的潜在影响，已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）会刊在 2006 年 12 月评论：“现在的发达国家如果不发展纳米科技，今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此，世界各国，尤其是科技强国，都将发展纳米科技作为国家战略。

兴起于 20 世纪后期的纳米科技，给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前，各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国，纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此，国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》，力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性，全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标，将涵盖纳米科学技术的所有领域，全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识；并长期组织专家撰写、编辑

出版下去,为我国纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,从而为提高全民科学素养作出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!

白尚礼

中国科学院院长

国家纳米科技指导协调委员会首席科学家

2011年3月于北京

现代磁学的黄金时期

三十年前的 1984 年，当我还是霍普金斯大学一个年轻教授的时候，一位著名的物理大师 X 教授(这里隐去他的姓名)来到霍普金斯大学讲学。其间我们偶遇，X 教授问我：“你现在在哪个领域里做研究？”我答道：“磁学。”他说：“磁学已经死了！”他又问：“你还做什么其他研究？”我答道：“超导。”他惊叫道：“超导也死了！”不言而喻，当时那种惊人而令人沮丧的场景至今还记忆犹新。然而，出乎所有人的预料，很快在 1986 年发现了高温铜氧化物超导体，1988 年发现了巨磁电阻(GMR)效应。这两大事件显著改变了凝聚态物理的进程及其技术景观，并分别于 1987 年和 2007 年获得了诺贝尔物理学奖。事实证明 X 教授是大错特错了，而我们在过去的 25 年时间里已经进入了现代磁学的黄金时期。

这里，让我从 1986 年开始，大致按照时间先后的顺序提及一些重要的进展：

层间耦合；

纳米多层膜和颗粒膜中的巨磁电阻(GMR)效应；

交换偏置；

电流垂直平面(CPP)的巨磁电阻(GMR)效应；

自旋阀 GMR 传感器；

铁磁性纳米线；

基于 AlO_x 势垒的磁性隧道结(MTJ)；

庞磁电阻(CMR)效应；

用于测量自旋极化率的安德列耶夫(Andreev)反射谱；

自旋转移力矩(STT)效应及其磁翻转和微波振荡；

Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)微磁学模拟；

具有 100% 自旋极化率的半金属，如 CrO_2 ；

磁随机存取存储器(MRAM)；

多铁性材料；

纳米环和纳米环磁性隧道结；

稀磁半导体；

有机自旋电子学；

具有巨大隧穿磁电阻效应的 MgO 势垒磁性隧道结；

自旋霍尔效应(SHE)；

逆自旋霍尔效应(ISHE)；

磁畴壁运动；

纯自旋流现象;
横向自旋阀;
自旋泵浦;
石墨烯自旋电子学;
自旋塞贝克效应;
Rashba 效应;
自旋轨道耦合作用及其磁翻转;
Skyrmion 材料;
电压调控的磁翻转;
拓扑绝缘体; 等等。

每一年几乎都不平凡, 总有一些新鲜有趣的发现引人关注, 并且上述这些专题内容基本上都被涵盖在这部书中。

人们常说微电子学使现代技术得以实现, 但这只说对了一半儿。应该更确切地讲, 微电子学和高密度数据存储(HDDS)是现代技术发展的两个主要驱动力。它们共同使得过去只能由专业研究机构所拥有的房屋尺度大小的计算机, 变成了现在人人可以拥有的笔记本电脑和真正便携式的各种掌上电脑(PDA)。自从 1947 年以来, 每单位集成电路所含晶体管的数量按摩尔定律稳定增长, 如今已超过了 10^{10} /IC。同样引人注目的是, 1955 年磁记录开始应用以来, 高密度数据存储(HDDS)技术的记录密度持续增长至今天, 也远高于摩尔定律的预测、超越了 10^{12} bit/in²。

非常有趣的是, 一些怀疑论者曾在这个发展过程中给出过若干悲观的预言。当巨磁电阻(GMR)效应被发现后, 一些人认为, 由于需要非常大的磁场, GMR 效应无法应用; 但随后自旋阀式 GMR 器件巧妙地避免了这个困境。当采用超导量子干涉仪(SQUID)探测系统第一次观测到具有非常小电阻的电流垂直直立面(CPP)的 GMR 效应后, 一些悲观者又宣称 CPP-GMR 效应永远不会被应用。但今天, 三维尺度均为几十纳米的 CPP-MR 磁读头被广泛地使用在硬盘驱动器(HDD)之中。在 20 世纪 90 年代, 有一个最高磁记录密度不可能超过 40Gb/in² 的著名终极预言。该预言仅盛传了几年之后就被无情地悄然打破。今天, 磁记录密度已经超过上述预言极限值的 30 倍, 并且仍在继续攀升。公正地说, 该预言并没有真正预见到现代磁学中一系列的发现对高密度数据存储(HDDS)的推进所起到的作用; 不过, 主动做出预言与占卜有一点相似, 它们均具有一定的风险。

这本书由自旋电子学领域里的众多前沿专家共同编写, 收录了上述现代磁学黄金时期那些令人兴奋的、方兴未艾的持续研究进展。我个人也熟知这本书里的许多作者, 并且受益于与他们之中几位作者的合作研究。这部书的唯一缺憾是它采用中文撰写, 这会让那些非汉语科学家们无法分享它的丰富内容。

钱嘉陵

约翰·霍普金斯大学物理与天文学系

Golden Era of Modern Magnetism

Thirty years ago in 1984 when I was a young professor at The Johns Hopkins University, a prominent physicist, Professor X (who shall remain nameless) came to Hopkins to give a colloquium. During a brief encounter, Professor X asked me, "What area of research do you do?" I answered, "Magnetism." He said, "Magnetism is *dead!* What else do you do?" I answered, "Superconductivity." He exclaimed, "Superconductivity is also *dead!*" That poignant, not to mention discouraging, exchange was certainly memorable. However, unbeknownst to anyone then, prominent or otherwise, high T_C cuprate superconductors would soon be discovered in 1986, and giant magnetoresistance (GMR) in 1988. Both events, garnered the Nobel Prize in Physics in 1987 and 2007 respectively, have altered the course of condensed matter physics and indeed the technological landscape. Notwithstanding the fact that Professor X was *dead* wrong, we have been in the midst of the Golden Era of Modern Magnetism for the last 25 years.

Let me mention just some of the advances since 1986, roughly in chronological order:

- interlayer coupling,
- GMR in multilayers and granular solids,
- exchange bias,
- current perpendicular to plane (CPP)-GMR,
- spin-valve GMR sensors,
- ferromagnetic nanowires,
- AlO_x -based magnetic tunnel junction (MTJ),
- colossal magnetoresistance (CMR) materials,
- Andreev reflection spectroscopy for measuring spin polarization (P),
- spin-transfer torque (STT) switching and microwave oscillation,
- Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) micromagnetic simulation,
- half-metals with 100% spin polarization, such as CrO_2 ,
- magnetic random access memories (MRAM),
- multiferroic materials,

nanorings and nanoring MTJs,
dilute magnetic semiconductors,
organic spintronics,
MgO-MTJs with huge tunnel magnetoresistance (TMR),
spin Hall effect (SHE),
inverse spin Hall effect (ISHE),
domain wall motion,
pure spin current phenomena,
lateral spin valves,
spin pumping,
graphene spintronics,
spin Seebeck effect,
Rashba effect,
spin-orbit switching,
Skyrmion materials,
voltage-controlled switching,
topological insulators.

There has hardly been a dull year. There is always something new and interesting to learn. Not coincidentally, many of these subjects are covered in this book.

It has often been said that microelectronics has enabled modern technology. This is only partly correct. More accurately, the two main drivers for modern technology are microelectronics and high-density data storage (HDDS). Together, they transformed room-sized main computers, which only major institutions could possess, to lab-top computers, which everyone owns, and personal digital assistant (PDA) devices, which one literally carries. Since 1947, the number of transistors per integrated circuit (IC) has been steadily increasing following closely the Moore's law to over 10^{10} /IC today. Equally impressive, since the launch of magnetic recording in 1955, the HDDS recording density has been increasing more than that of the Moore's law to over 10^{12} bit/in² today.

It is rather amusing that some skeptics have expressed pessimistic predictions along the way. When GMR was discovered, some opined that GMR would not be useful because of the very large magnetic field required. The spin-valve GMR devices nicely circumvented that predicament. When the CPP-GMR effect was first observed using a SQUID-based detection system due to the mi-

nuscle electrical resistance, some skeptics proclaimed that CPP-GMR would never be useful. Today, CPP-MR heads with all three dimensions of only a few tens of nm are in most hard drives. During the 1990's, there was a famous doomsday prediction of the ultimate magnetic recording density limit of 40 Gbits/in² that could never be surpassed. That prediction enjoyed a few years of fame until it was broken unceremoniously and without fanfare. Today, the recording density is more than 30 times that predicted limit and still climbing. To be fair, that prediction did not foresee the discoveries in modern magnetism that has been instrumental in advancing HDDS. On the other hand, unsolicited predictions and fortune telling are risky businesses.

This book, authored by many leading experts in the field, captures the exciting developments of the Golden Era of Modern Magnetism, which continues undiminished and unabated. I personally know many of the authors, and I have benefited from the collaborations with a few of them. The only drawback of this book is that it is written in Chinese. All non-Chinese scientists would be deprived of its rich content.

C. L. Chien

Department of Physics and Astronomy
The Johns Hopkins University

目 录

《纳米科学与技术》丛书序

现代磁学的黄金时期

Golden Era of Modern Magnetism

上 卷

第 1 章 磁性纳米多层膜巨磁电阻效应及其器件	1
1.1 背景简介	1
1.2 巨磁电阻效应的发现、理论及其应用	3
1.2.1 巨磁电阻效应的发现和典型实验结果	3
1.2.2 巨磁电阻效应的理论模型	10
1.2.3 巨磁电阻效应的应用	12
1.3 巨磁电阻的影响	13
1.3.1 隧穿磁电阻	14
1.3.2 庞磁电阻	15
1.3.3 铁磁半导体中的磁电阻	15
1.3.4 纳米线以及有机体系中的磁电阻	18
1.3.5 非磁体系中的磁电阻效应	19
1.4 结论与展望	20
参考文献	21
第 2 章 磁性颗粒膜中的巨磁电阻效应	29
2.1 磁性颗粒膜中的超顺磁性	29
2.1.1 铁磁性颗粒的磁性	29
2.1.2 铁磁性颗粒集合体的超顺磁性	33
2.2 金属/金属型磁性颗粒膜的巨磁电阻效应	35
2.2.1 理论解释	36
2.2.2 金属/金属型颗粒膜 GMR 效应的影响因素	40
2.3 金属/绝缘体型磁性颗粒膜的巨磁电阻效应	44
2.4 磁性纳米粒子组装颗粒膜的巨磁电阻效应	50
2.5 结束语	59
参考文献	60

第3章 磁性隧道结及隧穿磁电阻相关效应	65
3.1 引言:磁性隧道结及其发展历程	65
3.2 基于不同势垒材料的单势垒磁性隧道结	69
3.2.1 基于非晶 Al-O 势垒的磁性隧道结	69
3.2.2 基于单晶 γ -Al ₂ O ₃ 势垒的磁性隧道结	75
3.2.3 基于非晶 Ti-O 势垒的磁性隧道结	76
3.2.4 基于单晶 MgO(001) 势垒的磁性隧道结	77
3.2.5 基于尖晶石 MgAl ₂ O ₄ (001) 等新型势垒的磁性隧道结	82
3.2.6 基于有机材料势垒的磁性隧道结	85
3.2.7 基于半导体材料势垒的磁性隧道结	90
3.2.8 基于其他势垒的磁性隧道结	92
3.3 磁性隧道结中常用电极材料	92
3.3.1 基于单质铁磁金属材料的磁性隧道结	93
3.3.2 基于高自旋极化率铁磁金属合金材料的磁性隧道结	93
3.3.3 具有高自旋极化率的半金属电极材料	94
3.3.4 基于垂直磁各向异性磁电极材料的磁性隧道结	97
3.3.5 基于稀磁半导体电极材料的磁性隧道结	99
3.3.6 基于插层和复合电极材料的磁性隧道结	104
3.4 双势垒磁性隧道结	109
3.4.1 基于非晶 Al-O 双势垒的磁性隧道结	110
3.4.2 基于单晶 MgO(001) 双势垒的磁性隧道结	111
3.5 磁性隧道结中的物理效应	115
3.5.1 自旋转移力矩效应	115
3.5.2 库仑阻塞磁电阻效应	118
3.5.3 磁电阻振荡效应	121
3.5.4 双势垒磁性隧道结中的量子阱共振隧穿效应	122
3.5.5 磁性隧道结中的电场效应	124
3.5.6 磁性隧道结中的热自旋效应	124
3.6 磁性隧道结在器件中的应用	127
3.6.1 硬盘驱动器磁读头	128
3.6.2 磁性传感器	128
3.6.3 磁性随机存取存储器	129
3.6.4 自旋纳米振荡器	129
3.6.5 自旋逻辑器件	130
3.6.6 自旋晶体管、自旋场效应晶体管	130

3.6.7 自旋发光二极管	130
3.7 研究展望	136
参考文献	138
附录 磁性隧道结的发展历史及其有代表性的优化结构	152
第4章 铁磁体/反铁磁体多层结构中交换偏置的最新进展	161
4.1 引言	161
4.2 反铁磁层对磁交换偏置效应的影响	163
4.3 铁磁体/非磁体/反铁磁体三层膜体系中的层间交换偏置耦合	165
4.4 铁磁体/反铁磁体/铁磁体三层膜体系中的层间交换偏置耦合	167
4.5 通过磁-电效应实现交换偏置的电场控制	168
4.6 结语	169
参考文献	170
第5章 磁性超薄膜中厚度诱导的自旋重取向相变	177
5.1 唯象性描述	178
5.1.1 零磁场下的自旋重取向相变	178
5.1.2 外加磁场下的自旋重取向相变	180
5.2 利用磁化曲线研究自旋重取向相变	182
5.3 利用微观成像技术研究自旋重取向相变	186
5.4 利用磁化率研究自旋重取向相变	190
5.4.1 厚度诱导自旋重取向相变中磁化率的理论模型	191
5.4.2 自旋重取向相变的磁化率实验研究及与理论比较	193
5.5 总结	196
参考文献	198
第6章 钙钛矿结构锰氧化物中的庞磁电阻效应及其应用	203
6.1 钙钛矿结构锰氧化物的 CMR 效应	203
6.2 CMR 锰氧化物的制备	205
6.2.1 多晶陶瓷	205
6.2.2 单晶	206
6.2.3 薄膜	207
6.2.4 纳米颗粒、线	208
6.3 CMR 锰氧化物的物理性质	210
6.3.1 晶体结构	210
6.3.2 电子结构	213
6.3.3 磁结构	217
6.3.4 CMR 锰氧化物的磁输运行行为	219

6.3.5	各种掺杂效应和相图	222
6.3.6	电荷有序和轨道有序	231
6.3.7	相分离	236
6.3.8	CMR 效应的理论研究	242
6.4	CMR 锰氧化物薄膜器件和应用	246
6.4.1	锰基异质结及其应用	247
6.4.2	CMR 锰氧化物隧道结及其应用	252
6.4.3	CMR 锰氧化物铁电场效应晶体管及其应用	254
6.5	小结	256
	参考文献	257
第 7 章	自旋转移力矩效应	271
7.1	引言	271
7.2	自旋转移力矩的基本原理	273
7.2.1	自旋电流、自旋力矩以及它们之间的联系	273
7.2.2	自由电子在非磁性金属和铁磁金属界面处的散射	274
7.2.3	自旋转移力矩在磁异质结中的特性	277
7.3	自旋转移力矩驱动的多层膜磁化动力学	284
7.3.1	LLG 方程与自旋转移力矩	284
7.3.2	磁化动力学: 宏观磁矩模型	286
7.3.3	磁化动力学: 微磁学模型简介	289
7.4	磁性单层膜和双层膜结构中的自旋转移	291
7.4.1	不均匀铁磁金属单层膜中的自旋转移	291
7.4.2	顺磁金属/铁磁金属双层膜中的自旋转移	296
7.5	对自旋转移力矩的其他研究方向的展望	299
7.5.1	基于铁磁绝缘体的自旋转移	299
7.5.2	热驱动自旋转移力矩	300
7.5.3	自旋转移力矩的逆效应	300
7.5.4	其他磁性材料中的自旋转移效应	301
	参考文献	303
第 8 章	自旋转移力矩效应和微磁学模拟技术	313
8.1	微磁学基础理论	313
8.1.1	布朗(Brown)稳态方程	313
8.1.2	磁动力学方程	315
8.1.3	数值模拟方法	318
8.1.4	微磁学计算中的单位约化	323

8.2	微磁学新进展	324
8.2.1	自旋转移力矩效应	324
8.2.2	Rashba 效应	329
8.2.3	Landau-Lifshitz-Bloch 方程	330
8.2.4	自洽 Bloch 方程	332
8.2.5	原子尺度的微磁学模型	333
8.3	STT 驱动的磁化翻转及微磁学模拟	334
8.3.1	STT 效应的研究进展	334
8.3.2	STT 驱动的磁化翻转微磁学模拟	335
8.4	STT 驱动的磁涡旋极性翻转	338
8.5	STT 驱动自旋波激发	342
8.5.1	STT 驱动的磁振荡	342
8.5.2	面内-垂直双自旋极化结构	343
8.6	原子尺度的微磁学模拟	345
8.6.1	稀土-过渡金属合金材料	345
8.6.2	三温度模型	346
8.6.3	稀土-过渡金属薄膜材料的微磁学模型及激光退磁过程	347
8.7	结束语	348
	参考文献	349
第 9 章 铁磁共振和自旋波的电检测技术及其在自旋电子学方面的新应用		
	359
9.1	电检测铁磁共振技术的物理原理	362
9.2	电检测铁磁共振信号的定量分析方法	364
9.2.1	磁化强度的进动	364
9.2.2	广义欧姆定律	366
9.2.3	自旋整流效应的定量分析和角对称性	368
9.3	铁磁共振和自旋波电检测技术的应用	371
9.3.1	GaMnAs 薄膜中的自旋激发	371
9.3.2	相分辨铁磁共振谱	372
9.3.3	自旋波共振的电检测	374
9.3.4	非线性铁磁共振和自旋波	375
9.3.5	异质结自旋器件中自旋泵浦效应和自旋整流效应的区分	378
9.3.6	微波磁场矢量探测器	380
9.3.7	微波相位成像	381
9.4	结语	383

参考文献	385
第 10 章 磁性纳米异质受限结构中的自旋和热电输运量子理论	389
10.1 引言	389
10.2 单磁性隧道结中自旋相关输运定态理论	390
10.2.1 无自旋的转移哈密顿量	391
10.2.2 单隧道结系统的哈密顿量	392
10.2.3 利用非平衡格林函数计算电流和电导	394
10.2.4 电导和隧穿磁电阻效应	395
10.2.5 单磁性隧道结中的自旋转移力矩	398
10.2.6 电子-电子相互作用对电导的影响	399
10.3 双磁性隧道结中自旋相关输运定态理论	399
10.3.1 中心区为铁磁膜	399
10.3.2 中心区为超导体	402
10.3.3 中心区为量子点	405
10.3.4 中心区为一臂镶嵌了量子点的 Aharonov-Bohm 环	408
10.3.5 自旋过滤: 铁磁体-量子点-半导体双隧道结系统	409
10.4 自旋相关的含时输运理论	412
10.4.1 多铁磁端口器件: 中心区存在随时间变化的栅电压	412
10.4.2 单磁性隧道结中含时外场对电流和自旋转移力矩的影响	418
10.5 具有自旋轨道耦合的量子环和自旋场效应管中激光激发的自旋动力学	420
10.5.1 量子环	420
10.5.2 光控自旋场效应管	421
10.6 自旋热电输运理论	422
10.6.1 热功率、Peltier 系数和热导率	423
10.6.2 Wiedemann-Franz 定律	425
10.7 总结	425
参考文献	427
第 11 章 各种霍尔效应及其输运性质和应用	433
11.1 霍尔效应的研究简史	433
11.2 霍尔效应分类介绍	434
11.2.1 正常霍尔效应	434
11.2.2 反常霍尔效应	440
11.2.3 平面霍尔效应	446
11.2.4 自旋霍尔效应	449