

“十三五” 国家重点出版物出版规划项目

21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书

微纳磁电子学

夏建白 文宏玉 编著



科学出版社



国家自然科学基金
理论物理专款资助

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书

微纳磁电子学

夏建白 文宏玉 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

磁学是一门古老的学科,已有几百年的发展历史。过去磁学主要研究块体的顺磁体和铁磁体,铁磁体也就是永磁体是发电机的关键部件,而顺磁体(软磁材料)是变压器的关键部件。电气化对一个国家的经济有重大意义,因此提高和改进块磁体的性能永远是磁学研究者的责任。另外,近年发展起来的微纳磁体与微电子技术:磁存储器和传感器技术密切相关。磁随机存储器(MRAM)有可能代替半导体存储器,成为新一代的非易失性的存储器。从基础研究的角度看,做 MRAM 的磁性材料虽然还是通常所说的铁磁体,但体积要小多了,是微米甚至纳米尺度。它们和块体材料不同,其中没有磁畴,能够做成单晶。“磁畴”的存在给材料的理论研究带来了困难,所以以往的磁体理论只能是定性的。而微纳磁体是单晶,就可以用一个统一的物理量 M 描述其中的磁化,并且 M 的运动可以用一个宏观方程——LLG 方程描述,使得我们可以像处理半导体中电子态那样,精确地处理微纳磁体中 M 的运动规律。本书研究微磁体中的电子学,利用 LLG 方程研究微纳磁体中 M 运动规律的理论和方法,为研制 MRAM 及其他磁电子器件提供理论基础。

本书适合半导体物理、凝聚态物理以及广大基础物理领域的研究生、科研工作者学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

微纳磁电子学/夏建白,文宏玉编著. —北京:科学出版社,2020.3

(21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-064345-2

I. ①微… II. ①夏… ②文… III. ①纳米材料-应用-磁电效应-电子学-研究 IV. ①TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 021566 号

责任编辑:钱俊 崔慧娴/责任校对:彭珍珍

责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2020年3月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:192 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》编委会
(第二届)

主 编: 孙昌璞

执行主编: 常 凯

编 委: (按姓氏拼音排序)

蔡荣根	段文晖	方 忠	冯世平
李 定	李树深	梁作堂	刘玉鑫
卢建新	罗民兴	马余刚	任中洲
王 炜	王建国	王玉鹏	向 涛
谢心澄	邢志忠	许甫荣	尤 力
张伟平	郑 杭	朱少平	朱世琳
庄鹏飞	邹冰松		

《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》

出版前言

物理学是研究物质及其运动规律的基础科学。其研究内容可以概括为两个方面：第一，在更高的能量标度和更小的时空尺度上，探索物质世界的深层次结构及其相互作用规律；第二，面对由大量个体组元构成的复杂体系，探索超越个体特性“演生”出来的有序和合作现象。这两个方面代表了两种基本的科学观——还原论 (reductionism) 和演生论 (emergence)。前者把物质性质归结为其微观组元间的相互作用，旨在建立从微观出发的终极统一理论，是一代又一代物理学家的科学梦想；后者强调多体系统的整体有序和合作效应，把不同层次“演生”出来的规律当成自然界的基本规律加以探索。它涉及从固体系统到生命软凝聚态等各种多体系统，直接联系关乎日常生活的实际应用。

现代物理学通常从理论和实验两个角度探索以上的重大科学问题。利用科学实验方法，通过对自然界的主动观测，辅以理论模型或哲学上思考，先提出初步的科学理论假设，然后借助进一步的实验对此进行判定性检验。最后，据此用严格的数学语言精确、定量表达一般的科学规律，并由此预言更多新的、可以被实验再检验的物理效应。当现有的理论无法解释一批新的实验发现时，物理学就要面临前所未有的挑战，有可能产生重大突破，诞生新理论。新的理论在解释已有实验结果的同时，还将给出更一般的理论预言，引发新的实验研究。物理学研究这些内禀特征，决定了理论物理学作为一门独立学科存在的必要性以及在当代自然科学中的核心地位。

理论物理学立足于科学实验和观察，借助数学工具、逻辑推理和观念思辨，研究物质的时空存在形式及其相互作用规律，从中概括和归纳出具有普遍意义的基本理论。由此不仅可以描述和解释自然界已知的各种物理现象，而且还能够预言此前未知的物理效应。需要指出，理论物理学通过当代数学语言和思想框架，使得物理定律得到更为准确的描述。沿循这个规律，作为理论物理学最基础的部分，20 世纪初诞生的相对论和量子力学今天业已成为当代自然科学的两大支柱，奠定了理论物理学在现代科学中的核心地位。统计物理学基于概率统计和随机性的思想处理多粒子体系的运动，是二者的必要补充。量子规范场论从对称性的角度描述微观粒子的基本相互作用，为自然界四种基本相互作用的统一提供坚实的基础。

关于理论物理的重要作用和学科发展趋势，我们分以下六点简述。

(1) 理论物理研究纵深且广泛, 其理论立足于全部实验的总和之上。由于物质结构是分层次的, 每个层次上都有自己的基本规律, 不同层次上的规律又是互相联系的。物质层次结构及其运动规律的基础性、多样性和复杂性不仅为理论物理学提供了丰富的研究对象, 而且对理论物理学家提出巨大的智力挑战, 激发出人类探索自然的强大动力。因此, 理论物理这种高度概括的综合性研究, 具有显著的多学科交叉与知识原创的特点。在理论物理中, 有的学科 (诸如粒子物理、凝聚态物理等) 与实验研究关系十分密切, 但还有一些更加基础的领域 (如统计物理、引力理论和量子基础理论), 它们一时并不直接涉及实验。虽然物理学本身是一门实验科学, 但物理理论是立足于长时间全部实验总和之上, 而不是只针对个别实验。虽然理论正确与否必须落实到实验检验上, 但在物理学发展过程中, 有的阶段性理论研究和纯理论探索性研究, 开始不必过分强调具体的实验检验。其实, 产生重大科学突破甚至科学革命的广义相对论、规范场论和玻色-爱因斯坦凝聚就是这方面的典型例证, 它们从纯理论出发, 实验验证却等待了几十年, 甚至近百年。近百年前爱因斯坦广义相对论预言了一种以光速传播的时空波动——引力波。直到 2016 年 2 月, 美国科学家才宣布人类首次直接探测到引力波。引力波的预言是理论物理发展的里程碑, 它的观察发现将开创一个崭新的引力波天文学研究领域, 更深刻地揭示宇宙奥秘。

(2) 面对当代实验科学日趋复杂的技术挑战和巨大经费需求, 理论物理对物理学的引领作用必不可少。第二次世界大战后, 基于大型加速器的粒子物理学开创了大科学工程的新时代, 也使得物理学发展面临经费需求的巨大挑战。因此, 伴随着实验和理论对物理学发展发挥的作用有了明显的差异变化, 理论物理高屋建瓴的指导作用日趋重要。在高能物理领域, 轻子和夸克只能有三代是纯理论的结果, 顶夸克和最近在大型强子对撞机 (LHC) 发现的 Higgs 粒子首先来自理论预言。当今高能物理实验基本上都是在理论指导下设计进行的, 没有理论上的动机和指导, 高能物理实验如同大海捞针, 无从下手。可以说, 每一个大型粒子对撞机和其他大型实验装置, 都与一个具体理论密切相关。天体宇宙学的观测更是如此。天文观测只会给出一些初步的宇宙信息, 但其物理解释必依赖于具体的理论模型。宇宙的演化只有一次, 其初态和末态迄今都是未知的。宇宙学的研究不能像通常的物理实验那样, 不可能为获得其演化的信息任意调整其初末态。因此, 仅仅基于观测, 不可能构造完全合理的宇宙模型。要对宇宙的演化有真正的了解, 建立自洽的宇宙学模型和理论, 就必须立足于粒子物理和广义相对论等物理理论。

(3) 理论物理学本质上是一门交叉综合科学。大家知道, 量子力学作为 20 世纪的奠基性科学理论之一, 是人们理解微观世界运动规律的现代物理基础。它的建立, 带来了以激光、半导体和核能为代表的新技术革命, 深刻地影响了人类的物质、精神生活, 已成为社会经济发展的原动力之一。然而, 量子力学基础却存在诸

多的争议,哥本哈根学派对量子力学的“标准”诠释遭遇诸多挑战。不过这些学术争论不仅促进了量子理论自身发展,而且促使量子力学走向交叉科学领域,使得量子物理从观测解释阶段进入自主调控的新时代,从此量子世界从自在之物变成为我之物。近二十年来,理论物理学在综合交叉方面的重要进展是量子物理与信息计算科学的交叉,由此形成了以量子计算、量子通信和量子精密测量为主体的量子信息科学。它充分利用量子力学基本原理,基于独特的量子相干进行计算、编码、信息传输和精密测量,探索突破芯片极限、保证信息安全的新概念和新思路。统计物理学为理论物理研究开拓了跨度更大的交叉综合领域,如生物物理和软凝聚态物理。统计物理的思想和方法不断地被应用到各种新的领域,对其基本理论和自身发展提出了更高的要求。由于软物质是在自然界中存在的最广泛的复杂凝聚态物质,它处于固体和理想流体之间,与人们的日常生活及工业技术密切相关。例如,水是一种软凝聚态物质,其研究涉及的基础科学问题关乎人类社会今天面对的水资源危机。

(4) 理论物理学在具体系统应用中实现创新发展,并在基本层次上回馈自身。从量子力学和统计物理对固体系统的具体应用开始,近半个世纪以来凝聚态物理学已发展成当代物理学最大的一个分支。它不仅是材料、信息和能源科学的基础,也与化学和生物等学科交叉与融合,而其中发现的新现象、新效应,都有可能引导凝聚态物理一个新的学科方向或领域的诞生,为理论物理研究展现了更加广阔的前景。一方面,凝聚态物理自身理论发展异常迅猛和广泛,描述半导体和金属的能带论和费米液体理论为电子学、计算机和信息等学科的发展奠定了理论基础;另一方面,从凝聚态理论研究提炼出来的普适的概念和方法,对包括高能物理在内的其他物理学科的发展也起到了重要的推动作用。BCS 超导理论中的自发对称破缺概念,被应用到描述电弱相互作用统一的 Yang-Mills 规范场论,导致了中间玻色子质量演生的 Higgs 机制,这是理论物理学发展的又一个重要里程碑。近二十年来,在凝聚态物理领域,有大量新型低维材料的合成和发现,有特殊功能的量子器件的设计和实现,有高温超导和拓扑绝缘体等大量新奇量子现象的展示。这些现象不能在以单体近似为前提的费米液体理论框架下得到解释,新的理论框架建立已迫在眉睫,如果成功将使凝聚态物理的基础及应用研究跨上一个新的历史台阶,也将理论物理的引领作用发挥到极致。

(5) 理论物理的一个重要发展趋势是理论模型与强大的现代计算手段相结合。面对纷繁复杂的物质世界(如强关联物质和复杂系统),简单可解析求解的理论物理模型不足以涵盖复杂物质结构的全部特征,如非微扰和高度非线性。现代计算机的发明和快速发展提供了解决这些复杂问题的强大工具。辅以面向对象的科学计算方法(如第一原理计算、蒙特卡罗方法和精确对角化技术),复杂理论模型的近似求解将达到极高的精度,可以逐渐逼近真实的物质运动规律。因此,在解析手段无

法胜任解决复杂问题任务时,理论物理必须通过数值分析和模拟的办法,使得理论预言进一步定量化和精密化。这方面的研究导致了计算物理这一重要学科分支的形成,成为连接物理实验和理论模型必不可少的纽带。

(6) 理论物理学将在国防安全等国家重大需求上发挥更多作用。大家知道,无论决胜第二次世界大战、冷战时代的战略平衡,还是中国国家战略地位提升,理论物理学在满足国家重大战略需求方面发挥了不可替代的作用。爱因斯坦、奥本海默、费米、彭桓武、于敏、周光召等理论物理学家也因此彪炳史册。与战略武器发展息息相关,第二次世界大战后开启了物理学大科学工程的新时代,基于大型加速器的重大科学发现反过来为理论物理学提供广阔的用武之地,如标准模型的建立。国防安全方面等国家重大需求往往会提出自由探索不易提出的基础科学问题,在对理论物理提出新挑战的同时,也为理论物理研究提供了源头创新的平台。因此,理论物理也要针对国民经济发展和国防安全方面等国家重大需求,凝练和发掘自己能够发挥关键作用的科学问题,在实践应用和理论原始创新方面取得重大突破。

为了全方位支持我国理论物理事业长足发展,1993 年国家自然科学基金委员会设立“理论物理专款”,并成立学术领导小组(首届组长是我国著名理论物理学家彭桓武先生)。多年来,这个学术领导小组凝聚了我国理论物理学家集体智慧,不断探索符合理论物理特点和发展规律的资助模式,培养理论物理优秀创新人才做出杰出的研究成果,对国民经济和科技战略决策提供指导和咨询。为了更全面地支持我国的理论物理事业,“理论物理专款”持续资助我们编辑出版这套《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》,目的是要系统全面介绍现代理论物理及其交叉领域的基本内容及其学科前沿发展,以及中国理论物理学家科学贡献和所取得的主要进展。希望这套丛书能帮助大学生、研究生、博士后、青年教师和研究人员全面了解理论物理学研究进展,培养对物理学研究的兴趣,迅速进入理论物理前沿研究领域,同时吸引更多的年轻人献身理论物理学事业,为我国的科学研究在国际上占有一席之地作出自己的贡献。

孙昌璞

中国科学院院士,发展中国家科学院院士

国家自然科学基金委员会“理论物理专款”学术领导小组组长

前 言

基于自旋转移力矩效应的 STT-MRAM 自旋芯片具有数据非易失性、寿命长、低功耗、抗辐射等诸多优点，并具有逻辑运算的功能，能够用来制造非易失性存储器/触发器芯片 (non-volatile latch/flip-flop)、非易失性加法器芯片 (non-volatile adder)、非易失性查找表 (non-volatile look-up table, LUT) 和自旋逻辑芯片 (spin-logic)，带来未来芯片技术的革命，并在工业自动化、嵌入式计算、网络和数据存储、卫星航天等重要的民生和国防领域具有巨大和潜在的应用价值。

2014 年由美国半导体研究合作协会 (Semiconductor Research Corporation) 和美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 共同投资近 3000 万美元成立了一个由明尼苏达大学牵头的有十几所大学和公司参加的国家自旋芯片研究中心 (the Center for Spintronic Materials, Interfaces, and Novel Architectures, C-SPIN)，专注于开发下一代微电子自旋芯片，其中大学的合作伙伴包括明尼苏达双城大学、卡耐基·梅隆大学、康奈尔大学、麻省理工学院、约翰·霍普金斯大学和美国加利福尼亚大学河滨分校。行业合作伙伴包括 IBM、应用材料、英特尔、德州仪器和美光科技。

2002~2010 年 MagIC 公司持续投资超过 5 亿美元，建立了 8in MRAM 生产线，进行了 64M STT-MRAM 芯片的产品开发。2009 年 11 月韩国政府资助三星和现代公司 4000 万美元用于联合研发 STT-MRAM，该项目持续至 2014 年，目的是到 2015 年控制约 45% 的存储芯片市场。2012 年 11 月 Ever Spin 公司开始推出 64 Mbit STT-MRAM 的试用芯片。2013 年 Crocus 和 Rusnano 科技公司宣布共同投资 3 亿美元在莫斯科建设基于 90nm 工艺 TAS-MRAM 的生产线；预计 2014 年 MRAM 的晶圆产量可达到 2000 片/月。2013 年美国的美光科技和日本的东电电子等 20 多家日美半导体相关企业宣称将共同开发第二代 STT-MRAM 存储器的量产技术。相比目前的存储器，第二代存储器的存储容量将提高至 10 倍，而电子设备的耗电量将减少至约 2/3，力争 2016 年度确立技术，美光科技将于 2018 年启动量产。据赵建华研究员最近在美国参加有关国际会议时得到消息：MRAM 即将量产。

中国科学院物理研究所、中国科学院半导体研究所、南京大学、北京大学、清华大学、北京科技大学、成都电子科技大学，山东大学等较早地开展了自旋电子学的基础和应用基础研究。

中国科学院物理研究所：MRAM 器件设计研发方面获中国发明专利 12 项，美国专利 3 项和日本专利 1 项。2006 年传统型 16bit×16bit MRAM 演示器件通过

鉴定,在国际上首次设计和制备出采用外直径为 100nm 环状磁性隧道结为存储单元,并采用自旋极化电流直接驱动的新型 4bit×4bit nano-ring MRAM 原理型演示器件。其纳米环磁随机存储器等多种设计具有自主知识产权。

中国科学院半导体研究所:在探索与主流半导体兼容的高品质垂直磁化薄膜材料方面取得了突破性进展,在半导体 GaAs 衬底上成功外延生长出垂直磁各向异性 L_{10} -MnGa 和 L_{10} -MnAl 单晶薄膜,这类不含贵金属和稀土的薄膜在室温环境中具有超大垂直磁各向异性、超低磁阻尼因子、高居里温度、高磁能积、可调饱和磁矩和高自旋极化度等一系列优异特性,在超高密度和磁化翻转临界电流密度 MRAM 器件方面具有重要的应用前景。

宜昌东方微磁科技有限公司及杭州电子科技大学:拥有一项美国发明专利授权的磁电子传感器芯片核心技术,并申请了两项相关的中国发明专利,2009 年推出单极 GMR 集成传感器产品。2010 年 7 月将推出 SS 系列双极 GMR 集成传感器产品。计划推出光电耦合器件兼容的 GMR/MTJ(磁隧道结)磁电隔离耦合器件。

成都电子科技大学:研发了磁旋转编码器、位移传感器、角度传感器,实现了 MRAM 原型器件的设计和研制。

最近,北京航空航天大学成立自旋电子交叉学科研究中心,重点研发 MRAM 器件,上海磁宇信息科技有限公司、中电海康集团有限公司相继投入力量进行 MRAM 产业化研发。江苏多维科技有限公司和宁波深圳等地的公司也开始生产低端 TMR 传感器器件。相对国外,我国基础研究还有一定的基础与成果,但产业化基础十分薄弱,与国外差距甚大,起步迟,投入少,急需国家大力支持。因此本书的第一个目的就是为中国 MRAM 的研究和发展提供一些理论基础。

磁学是一门古老的学科,已有几百年的发展历史。过去磁学主要研究块体的顺磁体和铁磁体,铁磁体也就是永磁体,是发电机的关键部件,而顺磁体(软磁材料)是变压器的关键部件。电气化对一个国家的经济有重大意义,因此提高和改进块磁体的性能永远是磁学研究者的责任。另一方面微小磁体与磁存储器和存储器技术密切相关。1949 年哈佛大学王安发明了基于微小的铁氧体环的器件——“磁芯”,制造了非易失性的磁芯存储器,在 20 世纪 60 年代成为最重要的计算机存储器,后来被半导体存储器代替。今天 MRAM 有可能再次代替半导体存储器,成为新一代的非易失性的存储器。

从基础研究的角度看,做 MRAM 的磁性材料虽然还是通常所说的铁磁体,但体积要小多了,是微米甚至纳米尺度。它们和块体材料不同,其中没有磁畴,能够做成单晶。“磁畴”的存在给材料的理论研究带来了困难,磁畴边界总在动,各个磁畴中的磁化方向不一致,无法用统一的物理量描述,所以以往的磁体理论只能是定性的。而微纳磁体是单晶,就可以用一个统一的物理量 M 描述其中的磁化,并且 M 的运动可以用一个宏观方程——LLG 方程描述,使得我们可以像处理半导体中

电子态那样，精确地处理微纳磁体中 M 的运动规律。本书的第二个目的就是发展一套用 LLG 方程研究微纳磁体中 M 运动规律的理论和方法，所以定名为“微纳磁电子学”。

本书内容包括九章。第 1 章介绍了微纳磁电子学的研究目的以及磁随机存储器；第 2~4 章主要是从原子的量子学角度介绍顺磁性、铁磁性和自旋扭力的物理原理；第 5 章介绍纳米磁体中如何用自旋极化电流控制自旋；第 6 章主要介绍电场驱动的磁化开关和动力学；第 7 章介绍铁磁共振的条件下磁矩的翻转情况；第 8 章介绍自旋泵和纯自旋流的概念；第 9 章介绍有限温度的福克尔-普朗克方程，将反演时间和热涨落引入自旋扭转中分析自旋进程。

夏建白 文宏玉
中国科学院半导体研究所
2019 年 5 月

目 录

《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》出版前言

前言

引言 微纳磁电子学	1
0.1 电磁学的发展历史	1
0.2 20 世纪磁学的发展	2
0.3 一门新的交叉学科——微纳磁电子学	4
参考文献	5
第 1 章 微纳磁电子学与磁随机存储器的关系	6
1.1 磁电子学发展到微纳磁电子学	6
1.2 MRAM 的定义	7
1.3 各种存储器的比较	9
1.4 MRAM 的发展历史	12
1.5 MRAM 的基本原理	13
1.6 微纳磁电子学的研究目的	18
参考文献	19
第 2 章 磁学的一般概念: 顺磁性	20
2.1 原子的量子力学	20
2.2 顺磁性的量子理论	21
2.3 磁化	22
2.4 晶格场效应	25
2.5 时间反演对称性和自旋	26
2.6 轨道角动量被自旋-轨道耦合的部分恢复	28
参考文献	33
第 3 章 铁磁性	34
3.1 铁磁性的外斯模型	34
3.2 铁磁体的基态	36
3.3 自旋波激发	37
3.4 铁磁性的能带理论	40
3.5 铁磁体内的有效内部场	44
3.6 铁磁体中的铁磁共振	46

3.7 影响铁磁共振频率的各种因素	48
参考文献	53
第 4 章 自旋扭力的物理原理	54
4.1 微纳铁磁体的一些基本物理	54
4.2 自旋输运的二流体模型	59
4.3 自旋流通过铁磁/非磁界面的输运	61
4.4 磁多层中电流驱动的激发	64
4.5 自旋扭力的物理原理	69
4.6 自旋扭力的理论	72
4.7 具有自旋扭力项的修正 LLG 方程	77
4.8 自旋扭力引起的磁动力学	78
参考文献	81
第 5 章 微纳磁体中用自旋极化电流控制自旋	82
5.1 具有自旋扭力项的 LLG 方程	83
5.2 LLG 方程的数值计算	84
5.3 计算结果	85
5.3.1 自旋扭力效应	85
5.3.2 电流的效应	86
5.3.3 局域各向异性场的效应	88
5.3.4 阻尼因子 α 的效应	89
5.3.5 固定层中磁化方向 n_s 的效应	90
5.4 小结	91
参考文献	91
第 6 章 电场驱动的磁化开关和动力学	92
6.1 电压控制的开关效应	97
6.2 初始磁化的效应	99
6.3 外加磁场的效应	100
6.4 外磁场倾斜角的效应	102
6.5 电场引起的铁磁共振	104
6.6 小结	108
参考文献	108
第 7 章 铁磁共振的动力学	109
7.1 LLG 方程	110
7.2 铁磁共振的性质	111
7.2.1 在不同交变场频率下磁矩的变化	111

7.2.2	磁矩振荡的频谱	113
7.2.3	铁磁共振谱	114
7.2.4	阻尼因子的效应	115
7.2.5	内部各向异性场 h_1 和 h_2 的效应	115
7.2.6	磁场倾斜的效应	117
7.2.7	由自旋电流引起的自旋转移扭力 (SST) 的效应	118
7.3	小结	119
	参考文献	119
第 8 章	自旋泵和纯自旋流	120
8.1	自旋泵	121
8.1.1	基本方程	122
8.1.2	LLG 方程和布洛赫方程	123
8.1.3	铁磁单层/非铁磁体模型	124
8.1.4	自旋流	126
8.2	自旋流的检测	129
8.3	自旋流注入半导体	131
8.4	自旋流的应用——磁化开关	132
	参考文献	134
第 9 章	有限温度的福克尔-普朗克方程处理	135
9.1	简化的福克尔-普朗克方程	135
9.2	计算结果	142
9.2.1	本征值方程的收敛性	142
9.2.2	电流 $(I/I_c - 1)$ 的效应	143
9.2.3	内部场 H_k 的效应	144
9.3	有限温度的宏观自旋动力学	145
9.4	开关速度和宏观自旋在自旋扭力下的动力学的简单模型	147
9.5	自旋扭力放大的热激发	149
9.6	应用	150
	参考文献	152
	《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》已出版书目	153

引言 微纳磁电子学

0.1 电磁学的发展历史^[1]

磁学的发展具有悠久的历史，古希腊哲学家泰勒斯 (Thales, 公元前 624—前 546) 首先研究了电和磁的现象。泰勒斯发现当摩擦一小块琥珀后，琥珀就能吸起轻的物体，因此摩擦的作用就是产生静电荷。名词 “electron” 和 “electricity” 来自于这个发现，elektron 是希腊词琥珀。泰勒斯还研究了天然磁石彼此间吸引的类似现象，这种天然磁石来自于 Magnesia 地区，它成为以后磁学名词的来源。从此人们认识到电性和磁性的研究是联系在一起的，它们的结合成为物理学的最重要的发现之一。

虽然中国古代已经用磁石作为指南针，但泰勒斯以后的 2000 年磁学几乎没有发展。公元十三世纪佩雷格伦纳斯 (Petrus Peragrinus) 发现了磁体上有北极和南极，它们之间吸引或排斥。吉尔伯特 (William Gilbert, 公元 1540—1603) 首先解释了地球的磁性，还研究了电性，发现除了琥珀，其他物体在摩擦以后也能吸引物体。

杜费 (Charles Francois Du Fay, 1698—1739) 发现一个物体摩擦以后，既能排斥，同样也能以类似的方式吸引磁极。富兰克林 (Benjamin Franklin, 1706—1790) 提出电性多余或者不足将产生正或负的电荷。库仑 (Charles-Augustinde Coulomb, 1736—1806) 测量了磁极之间产生的力和电荷之间产生的力，发现它们都服从相同的距离平方反比定律。

当伏打 (Alessandro Volta, 1745—1827) 在 1800 年发明了电池以后，把电磁学向前推进了一大步。以后就有了一个电流源。奥斯特 (Hans Christian Oersted, 1777—1851) 在 1820 年发现了电流能产生磁场。这个电磁学的发现立即导致了法拉第 (Michel Faraday, 1791—1867) 发现磁力线必须绕着一个电流。这个概念使得他在 1821 年发现了电机原理，在 1831 年发现了电磁感应，一个变化的磁场能产生电流。这个现象同时也被亨利 (Joseph Henry, 1797—1878) 发现。

同时电学研究有重要的理论发展。安培 (André-Marie Ampère, 1775—1836) 在 1827 年发现了将磁力与电流联系起来的定律，并且区分了电流和电动势 (EMF)。同年，欧姆 (Georg Simon Ohm, 1787—1854) 发表了将电流、电动势和电阻相联系的定律 (欧姆定律)。基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff, 1824—1887) 后来将欧姆定律推广到网络，还统一了静电学和电流电学，证明了静电势就是电动势。

在 19 世纪 30 年代, 高斯 (Carl Fridrich Gauss, 1777—1855) 和韦伯 (Wilhelm Eduard Weber, 1804—1891) 定义了磁学的单位系统, 以后他们又定义了电学的单位系统。在 1845 年法拉第发现材料是顺磁的或逆磁的。开尔文 (Lord Kelvin, 1824—1907) 将法拉第的工作发展成一个完全的磁性理论, 最后由郎之万 (Paul Langevin, 1872—1946) 从电子运动的角度解释了磁性的起源。

将电学和磁学结合在一个漂亮的理论体系是由麦克斯韦 (James Clark Maxwell, 1831—1879) 完成的。他证明了电场和磁场是以波动方式传播的, 光由这种电磁辐射组成。他还预言了其他类似的电磁辐射肯定存在。结果赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894) 在 1888 年证实了无线电波的存在, 随后不久, X 射线和伽马波也被发现了。

0.2 20 世纪磁学的发展^[2]

磁学的发展离不开原子物理和量子力学的发展。第一个对磁学发展有贡献的是电子自旋的发现。1925 年泡利 (Wolfgang Pauli, 1900—1958) 发表了著名的泡利不相容原理。为了解释反常塞曼效应, 需要的量子数不止 n 、 l 、 m_l 这 3 个, 他引入了电子的“二值性”这个量子性质。1921 年斯特恩和盖拉赫发现电子自旋, 1925 年 10 月乌伦贝克和高德斯密特实验上证实了电子自旋, 解释了二值性, 为物质磁性打下了物理基础。

1928 年狄拉克 (Paul Adrien Maurice Dirac, 1902—1984) 建立了相对论电动力学, 从基本原理自然得出电子自旋。同年海森伯 (Werner karl Heisenberg, 1901—1976) 建立了依赖于自旋的交换相互作用模型。这种强烈的短程交换相互作用标志着现代磁学理论的诞生, 解释了铁磁性的起源。

从此以后磁学的研究就建立在量子力学的基础上。1932 年奈尔 (Louis Eugene Felix Néel, 1904—2000) 建立了反铁磁性的概念。沙尔 (Clifford Glenwood Shull, 1915—2001) 的中子衍射实验证实了奈尔关于反铁磁性和亚铁磁性自旋磁化的想法。莫特 (Neville Franois Mott, 1905—1996) 等将能带理论应用于磁性材料。

20 世纪推动磁学发展的一个动力是电动机, 它是工业革命的基础。大功率的电动机要求使用高磁能积的永磁铁。“高磁能积的磁铁”指的是磁滞回线既宽 (最大矫顽场) 又高 (最大磁化的磁体)。这种磁体可以减小器件 (如电动机和扬声器) 的尺寸和重量。磁能积的定义是外磁场和磁感应强度的乘积 $(AB)_{\max}$, 它的发展历史如图 0.1 所示。

由图 0.1 可见, 最强的商品化磁体是 Croat 和 Sagawa 等制备的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (钕铁硼) 永磁体。永磁体是发电机和电动机的关键部件, 它的水平代表了国家工业

化的水平。美国电力销售额每年高达 2500 亿美元，占美国国内 GDP 的 2.5%。

20 世纪下半叶，电子计算机的发展要求有体积小、功耗小、存储量大的存储器。磁学的发展就从大的极端向另一个小的极端方向发展，进入到微米量级。1949 年哈佛大学教授王安发明了基于微小铁氧体环（直径约 200 μm ）的器件——“磁芯”，利用穿过微环的导线中的电流，可以改变磁芯的磁状态。它导致了非易失性磁学存储器的的发展，成为 20 世纪 60 年代计算机的主要存储器。

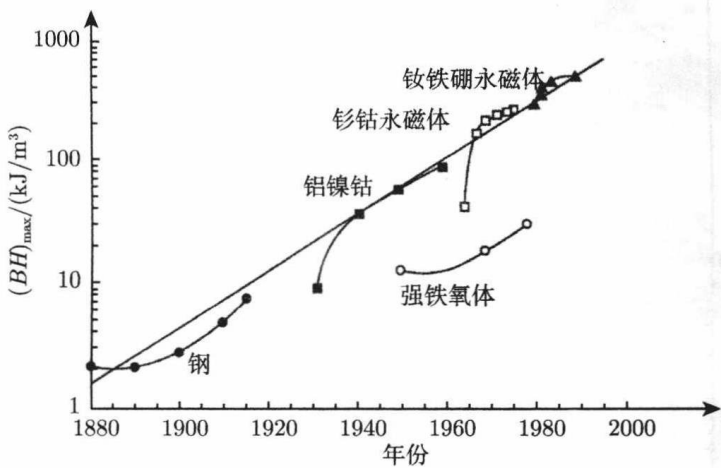


图 0.1 磁能积随年份的变化，表明永磁体性能的历史演化，给出了五种主要的工业用磁铁体系。纵坐标是对数坐标 ([2], p.10)

1957 年第一块硬盘存储驱动器，IBM 的 RAMAC，也就是随机存储器 (random access method of accounting and control) 问世。1988 年在一个铁磁体/非磁体/铁磁体三层膜材料中发现了巨磁阻 (GMR) 效应，当上下两铁磁层的磁矩是平行时，材料的电阻最小；当磁矩是反平行时，电阻最大。在 GMR 效应的基础上，制成了自旋阀。在上铁磁层上面加一个反铁磁层，使得上面铁磁层在外磁场下不改变方向，起一个磁矩的钉扎作用。下面的铁磁层是自由层，在外界小磁场下磁矩能改变方向。当上下两层的磁矩方向在 10~30Oe 的外磁场下由平行变为反平行时，自旋阀的电阻一般增加 5%~10%。同时又发明了磁隧道结 (magnetic tunnel junction, MTJ)。它是由上面的钉扎层（两铁磁层，中间夹一薄层 Ru，构成强反铁磁耦合）、下面的自由铁磁层、中间的一薄绝缘层（一般 Al_2O_3 ）组成。绝缘层作为势垒层，电流垂直于界面方向，形成隧穿电流。当上下铁磁层的磁矩由平行变为反平行时，隧穿电阻改变 20%~50%，类似于自旋阀，但电阻调制幅度大。

IBM 利用自旋阀和磁隧道结制成了磁存储器硬盘，大大提高了效率，目前硬盘的存储密度已接近每平方英寸^①100 Gbit，市场达上千亿美元。未来的磁存储器

① 1 英寸 = 2.54 厘米。