

Zixuan Diansixue Jichu

自旋电子学基础

米文博 王晓姹 编

013046851

TN01
120

自旋电子学基础

米文博 王晓姹 编



 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS



北航

C1652582

TN01/120

178870810

内 容 提 要

本书将自旋电子学的基础内容分为八章,分别为引言、磁电阻效应、电子自旋注入、半金属材料、稀磁半导体、自旋矩、有机自旋电子学、自旋电子学器件原理简介。本书对各个章节的相关基础知识进行了详细介绍,并给出典型的例子,同时对相关的学科前沿进展进行了概述,有利于学生了解自旋电子学的基础知识和学科发展。

本书是面向物理学、材料学、电子科学与技术、微纳加工和光学等专业高年级本科生和研究生的专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

自旋电子学基础/米文博,王晓姘编. —天津:天津大学出版社,2013.4

ISBN 978-7-5618-4659-9

I. ①自… II. ①米…②王… III. ①磁电效应—电子学—研究 IV. ①TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第088312号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647
网 址 publish.tju.edu.cn
印 刷 河北省昌黎县思锐印刷有限责任公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm×260mm
印 张 17.5
字 数 437千
版 次 2013年5月第1版
印 次 2013年5月第1次
定 价 48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

自旋电子学是关于利用电子自旋自由度进行信息处理和存储的学科,为涉及凝聚态物理学、材料科学、微电子学和微纳加工等多学科的新兴交叉学科。巨磁电阻效应的发现,迄今约有 25 年的历史。2007 年,巨磁电阻效应发现者获得了诺贝尔物理学奖。自旋电子学所涉及的学科和技术领域非常广,自旋电子学器件因体积小、速度快、能耗小等优点,具有广泛的应用前景。

本书是面向物理学、材料学、电子科学与技术、微纳加工和光学等专业高年级本科生和研究生的专业教材,是在天津大学教改项目支持下教学经验的总结。根据国内外的相关文献资料,本书对当前自旋电子学的研究热点领域进行了简单的概述。

本书从磁电阻效应、电子自旋注入、半金属材料、稀磁半导体、自旋矩、有机自旋电子学、自旋电子学器件原理等七个方面进行了介绍,包括了相关的理论和实验结果,使读者能够对自旋电子学有初步的了解,为将来的工作和学习打下坚实的基础。同时,本书注重学以致用,从自旋电子学原理、材料和器件方面进行了系统的介绍,为本领域的研究者和学习者在工作和学习的过程中提供了参考和依据。

本书共分为八章,第 1、3、5、6 章由天津理工大学电子信息工程学院王晓姹编写,第 2、4、7、8 章由天津大学理学院米文博编写,米文博负责统稿。

在编者的学术成长过程中得到了天津大学理学院白海力教授、姜恩永教授、李志青教授、吴萍教授的鼓励和教诲,在此表示衷心的感谢。

由于编者的学术水平有限,不足之处欢迎读者批评指正,以便再版时加以提高改善。

编者
2012 年 11 月 28 日

目 录

第1章 引言	1
1.1 电子的发现和发​​展简况	1
1.1.1 电子的发现和发​​展	1
1.1.2 电子学器件的发​​展	2
1.2 电子的自旋属性	4
1.3 自旋电子学的发展概况	6
第2章 磁电阻效应	8
2.1 磁电阻效应的发​​展过程	8
2.2 各向异性磁电阻	9
2.2.1 各向异性磁电阻概述	9
2.2.2 各向异性磁电阻理论	14
2.2.3 各向异性磁电阻实验研究	21
2.3 巨磁电阻效应	23
2.3.1 多层膜结构	24
2.3.2 自旋阀结构	27
2.3.3 磁性金属和非磁性金属颗粒膜结构	30
2.4 隧道型磁电阻效应	32
2.4.1 磁性隧道结	32
2.4.2 铁磁性金属-绝缘体颗粒膜	35
2.4.3 多晶磁性材料中的隧道型磁电阻效应	39
2.4.4 隧道型磁电阻的相关理论	41
2.5 庞磁电阻效应	51
2.5.1 钙钛矿锰基氧化物的庞磁电阻效应	51
2.5.2 钙钛矿锰基氧化物中的相互作用	55
2.5.3 钙钛矿锰基氧化物中的低场磁电阻效应	58
2.5.4 钙钛矿锰基氧化物中的电荷有序现象	60
2.5.5 钙钛矿锰基氧化物中的相分离现象	64
2.5.6 钙钛矿锰基氧化物中的磁熵变现象	65
2.6 几种其他磁电阻效应	67
2.6.1 弹道磁电阻效应	67
2.6.2 磁性金属-碳基材料中的磁电阻效应	68
2.6.3 磁性金属-氧化物宽带半导体复合薄膜中的磁电阻效应	70
2.6.4 非磁性半导体中的磁电阻效应	70
2.6.5 石墨烯中的磁电阻效应	71

第3章 电子自旋注入	75
3.1 电子自旋极化简介	75
3.2 电子自旋注入的相关理论	76
3.2.1 F/N 结	76
3.2.2 F/N/F 结	80
3.2.3 空间电荷区域的自旋注入	81
3.3 电子自旋注入的实验现象	82
3.3.1 Johnson-Silsbee 自旋注入	82
3.3.2 自旋注入金属	84
3.3.3 自旋注入半导体	85
3.3.4 金属铁磁体 - 半导体异质结	87
3.4 自旋弛豫	88
3.4.1 自旋弛豫简介	88
3.4.2 自旋弛豫机制	91
3.4.3 金属中的自旋弛豫	102
3.4.4 半导体中的自旋弛豫	104
3.5 自旋极化输运	111
3.5.1 F/I/S 隧穿	111
3.5.2 F/I/F 隧穿	113
3.5.3 Andreev 反射	115
3.5.4 自旋极化飘移和扩散	117
第4章 半金属材料	121
4.1 半金属铁磁体简介	121
4.2 Heusler 合金和闪锌矿结构化合物	122
4.2.1 Heusler- $C1_b$ 合金	123
4.2.2 闪锌矿结构半金属	130
4.2.3 Heusler- $I2_1$ 合金	131
4.3 少数自旋带隙的强磁性半金属	133
4.3.1 二氧化铬(CrO_2)	133
4.3.2 CMR 材料	136
4.4 多数自旋带隙的弱磁性半金属	137
4.4.1 双钙钛矿结构	137
4.4.2 四氧化三铁(Fe_3O_4)	138
4.5 多数自旋带隙的强磁性半金属	147
4.6 硫化物	147
4.6.1 硫铁矿	148
4.6.2 尖晶石	148
4.7 其他半金属材料	148
4.7.1 钆的氧化物	148

4.7.2	有机物半金属	149
4.7.3	Fe_4N	149
4.7.4	石墨烯	154
第5章 稀磁半导体		160
5.1	稀磁半导体材料简介	160
5.2	II-VI族稀磁半导体材料	162
5.2.1	II-VI族稀磁半导体材料简介	162
5.2.2	II-VI族稀磁半导体材料的晶体结构	163
5.2.3	II-VI族稀磁半导体材料的电特性	166
5.2.4	II-VI族稀磁半导体材料的磁性质	170
5.3	III-V族稀磁半导体材料	177
5.3.1	III-V族稀磁半导体材料简介	177
5.3.2	III-V族稀磁半导体的输运特性	179
5.3.3	III-V族稀磁半导体的光学性质	187
5.4	氧化物宽带稀磁半导体材料	193
5.4.1	氧化物宽带稀磁半导体材料简介	193
5.4.2	ZnO基宽带稀磁半导体($\text{Zn}_{1-x}\text{M}_x\text{O}$ ($\text{M} = \text{Co}, \text{Mn}, \text{V}, \text{Fe}\cdots$))	194
5.4.3	TiO_2 基宽带稀磁半导体	198
5.4.4	其他基体宽带稀磁半导体	202
第6章 自旋矩		207
6.1	自旋矩简介	207
6.2	铁磁性基础	210
6.2.1	铁磁性的产生	210
6.2.2	铁磁材料模型	210
6.2.3	微磁学	211
6.2.4	磁畴	212
6.2.5	没有自旋矩时的磁动力学	213
6.3	自旋流、自旋矩和磁动力学	214
6.3.1	自旋流密度的定义	214
6.3.2	1号玩具模型	215
6.3.3	2号玩具模型	216
6.3.4	自旋矩以及朗道-利弗席兹-吉尔伯特方程	218
6.3.5	求磁化强度运动方程更严格的方法	219
6.4	多层膜和隧道结	221
6.4.1	器件构型	221
6.4.2	计算自旋矩的方法	222
6.4.3	自旋矩驱动的磁性动力学	223
6.4.4	磁动力的测量	227
6.4.5	非零温度效应	227

6.4.6	关于自旋矩适量的垂直分量	228
6.4.7	理论与实验的比较	230
6.5	纳米线中的畴壁	231
第7章	有机自旋电子学	234
7.1	有机自旋电子学简介	234
7.2	有机物中的自旋弛豫	234
7.3	有机物中自旋弛豫时间和长度的测量	236
7.3.1	自旋阀	236
7.3.2	μ 子自旋转动(μ SR)	239
7.4	有机物中的自旋注入和传输	240
7.4.1	自旋阀	240
7.4.2	Meservey-Tedrow 自旋极化隧穿	246
7.4.3	双光子发射谱	247
7.5	有机物磁性半导体	248
7.6	有机半导体中的磁电阻现象	250
7.6.1	不同的电极材料	250
7.6.2	不同的有机层厚度	251
7.6.3	温度依赖关系	251
7.7	展望	252
7.7.1	非易失性记忆和磁场探测器	252
7.7.2	自旋基经典和量子计算	252
7.7.3	自旋基有机发光二极管	252
第8章	自旋电子学器件原理简介	256
8.1	自旋电子学器件简介	256
8.2	自旋过滤	259
8.3	自旋二极管	260
8.4	自旋晶体管	262
8.4.1	自旋场效应晶体管	263
8.4.2	磁双极晶体管	264
8.4.3	热电子自旋晶体管	265
8.5	半导体纳米结构中的自旋量子比特	267

第 1 章 引 言

1.1 电子的发现和发 展简况

1.1.1 电子的发现和发 展

电子是一种基本粒子,其直径为质子的 $1/1\ 000$,质量为质子的 $1/1\ 836$ 。电子围绕原子核做高速运动,能量高的电子离原子核较远。电子通常排列在各个轨道上。当原子互相结合成为分子时,在最外层的电子便会由一个原子转移至另一个原子或成为彼此共享的电子。

英国人汤姆逊在 1897 年发现并证实了电子的客观存在^[1]。他是在勒纳等人研究阴极射线的基础上得到该结果的。他通过改进实验装置,用磁铁使阴极射线偏转进入金属筒,证明阴极射线是带负电的。他还让阴极射线只受电场作用,通过测定阴极射线撞击玻璃管壁产生的荧光斑点位移,计算出荷质比,而且用不同方法得到相同结果。他还测得阴极射线粒子质量约为氢原子质量的 $1/1\ 700$,说明了自然界中有比原子更小的粒子。汤姆逊还证实了从不同金属发射出来的阴极射线的粒子是相同的,说明了粒子是组成一切物质的基本单元。通过一系列的实验,汤姆逊获得了电子的特征信息。他的发现证实了电子的存在,彻底打破了原子不可分的观点,也为人们打开了一个崭新的世界。人们在对电的本质、电磁现象、物质结构等新的认识基础上,对电子的性质、运动规律、电子和其他物质的相互作用、电磁场等进行了深入研究,取得了许多成果,有力地推动了科技的发展。

1909 年,美国人密立根设计了“油滴实验”。他通过实验发现了油滴带电荷量恒为基本电荷量 e 的整数倍。也就是说,电荷只能以 e 的大小为基本单位,这就是电子的电荷量,进而证实了电荷的分立性。现在测得的精确值 $e = 1.602\ 189\ 2 \times 10^{-19}\ \text{C}$,通常可取作 $e = 1.60 \times 10^{-19}\ \text{C}$,1 C 的电量相当于 6.25×10^{18} 个电子或质子所带的电量。电子的电荷量和电子的质量之比,叫做电子的荷质比。它也是一个常用的物理量。电子的质量 $m_e = 0.91 \times 10^{-30}\ \text{kg}$ 。

法国人德布罗意以“电子的波动性”的研究获得 1929 年诺贝尔物理学奖。他是在没有得到任何实验结果和理论依据的情况下,仅通过类比(对称性)就预言实物和光一样,不仅具有粒子性,而且具有波动性。1924 年,他建立了波和粒子间的对应关系,即德布罗意关系式,并且提出用电子作为实物粒子来验证他的推断。1925 年,美国人戴维逊在电子通过镍的实验中发现了衍射现象,装置图如图 1-1 所示;1927 年,英国人汤姆逊通过高能电子束对金箔的干涉实验证实了电子具有波动性,证实了德布罗意预言的正确性。波粒二象性也成为电子和其他粒子的一个主要性质。

1925 年,荷兰人乌伦贝克和古德斯密特为解释碱金属光谱的双重谱线,提出过两个假设:一是电子具有自旋,其行为好像一个绕自身对称轴旋转的带电小球,并且具有量子化的自旋角动量;二是电子具有磁偶极矩,即玻尔磁子。1928 年,英国人狄拉克从量子力学最普遍的条件出发,根据相对论建立了一个描述单个电子运动的相对论性量子力学方程——狄拉克方程。这个方程不仅对氢原子能级精细结构和高速运动电子的性质作出了与实验相符

的解释,而且得到了电子自旋和磁矩。斯特恩-盖拉赫实验不但直接显示了原子具有磁矩的性质,而且为原子角动量空间取向量子化和电子自旋提供了直接实验根据。1947年,美籍华裔科学家库什通过实验发现,电子的磁偶极矩并不严格等于一个玻尔磁子,而是 $(1.001\ 19 \pm 0.000\ 05)$ 个玻尔磁子。人们称为“电子的反常磁矩”,这为以后的量子电动力学提供了精确的实验验证。

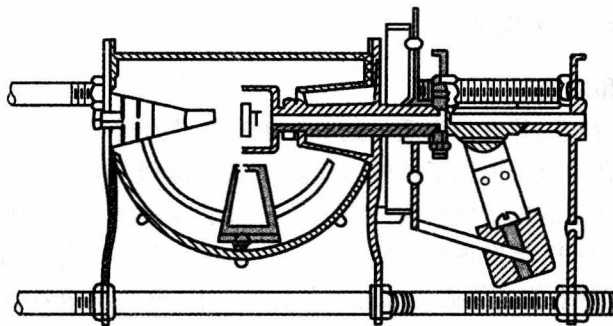


图 1-1 戴维逊的电子衍射实验装置结构图

1930年,狄拉克又从该方程中大胆地预言有质量和电荷量都与电子相同的正电子存在,并且提出了正负电子的湮灭过程。1932年,美国人安德森从宇宙射线中发现正电子。赵忠尧在1930年,英国人布拉凯特在1933年先后发现正负电子对的产生和湮灭过程。

1998年10月13日,瑞典皇家科学院宣布将1998年诺贝尔物理学奖授予美国斯坦福大学劳克林教授、哥伦比亚大学霍斯特·施特默教授及普林斯顿大学美籍华裔科学家崔琦教授,以表彰他们发现并解释了电子在强磁场中相互作用而形成一种新粒子,称为准粒子。这种粒子的电荷是电子电荷的分数值。这种分数电荷的激发形成一种新的量子流^[2]。新的量子流体霍尔效应在实验和理论上的发现,证明过去人们一向认为不可分的、基本的电子电荷其实是可分的,可分裂成带分数电荷的准粒子,这在人类认识物质的组成和电的基本单位上产生重大突破。

随着电子的发现和人们对电子的认识,基于操控电荷的电子学器件逐渐出现。随着科学技术的发展,电子学器件也发生了翻天覆地的变化,并成为人们生活中必不可少的内容。

1.1.2 电子学器件的发展

1905年,真空电子管的发明标志着人类社会进入电子化时代,电子技术实现第一次重大技术突破^[3]。这是控制电子在真空中的运动规律和特性而产生的重要技术成果。从此,产生了无线电通信、雷达、导航、广播、电视和各种电子仪器及系统。后来,人们发现真空电子管还存在许多问题,如仪器设备的体积大、重量大、功耗大、可靠性和寿命受限制等。因此,研究新型电子管的迫切需求被提出。

1947年,美国贝尔实验室两位科学家 Bardeen 和 Brattain 在 Ge 表面的实验中,发明了世界上第一个点接触 Ge 晶体管。1949年,Shockley 发表了晶体管的理论基础——p-n 结理论。此后,结型晶体管研制成功,使晶体管进入实用阶段。晶体管的实质是控制电子在固体中的运动规律以及特性。晶体管的发明是电子技术的第二次重大技术突破,为微电子技术揭开了序幕。1956年,以上三位科学家共同获得诺贝尔物理学奖。晶体管发展初期是利用

Ge 单晶研制的。然而,在实验过程中,发现 Ge 晶体管的漏电流大、工作电压低、表面性能不稳定、温度特性差、可靠性和寿命不佳。实验发现 Si 比 Ge 有更多的优点,特别是 Si 的表面可以形成稳定性较好、结构致密、电学性能好的 SiO_2 钝化层。这不仅使 Si 晶体管比 Ge 晶体管更稳定,性能更好,而且在技术上有重要突破,发明了晶体管平面工艺。这些成果为 20 世纪 50 年代末集成电路的出现提供了可靠的基础。这是微电子技术中的一次技术突破,也是电子技术的第三次重大技术突破。集成电路从小规模向大规模发展过程中,最令人惊奇的是从 1958 年到 1978 年集成度从 10 个元件发展到 10 万个元件,20 年整整提高近 10 000 倍。这是电子技术的第四次重大技术突破。

20 世纪末,集成度已进一步提高到 1 000 万个元件。IBM 公司已研制成功 64 Mbit 的芯片。微电子技术面临挑战,纳米电子技术应运而生,贝尔实验室研制成功隧道三极管,利用量子隧道效应,器件的尺寸缩小为原器件尺寸的 1/100,而运算速度可以提高 1 000 倍,功耗却只有传统晶体管的 1/1 000。这种量子器件对超越集成电路的物理极限具有重大意义。这一成果被认为是电子技术的第五次重大技术突破。随着研究工作的深入发展,出现单电子晶体管,只要控制一个电子就可以完成特定功能。从控制成群电子的传统晶体管发展到控制单个电子的量子器件,使器件的响应速度提高 1 000 ~ 10 000 倍,而功耗降低到 1/1 000 甚至 1/10 000,其优越性显而易见。

迄今为止,硅材料功率器件已发展得相当成熟。为了进一步实现人们对理想功率器件特性的追求,越来越多的功率器件研究工作转向了对用新型半导体材料制作新型半导体功率器件的探求。研究表明,砷化镓场效应晶体管和肖特基整流器可以获得十分优越的技术性能。

随着变换器开关频率的提高,对快恢复二极管的要求也越来越高。众所周知,砷化镓二极管具有比硅二极管优越的高频开关特性,但是由于工艺技术等方面的原因,砷化镓二极管的耐压比较低,实际应用受到局限。为适应高压、高速、高效率等应用需要,高压砷化镓高频整流二极管已在摩托罗拉公司研制成功。与硅快恢复二极管相比,这种新型二极管的显著特点是反向漏电流随温度变化小、开关损耗低、反向恢复特性好。

在用新型半导体材料制成的功率器件中,最有希望的是碳化硅(SiC)功率器件,它的性能指标比砷化镓器件还要高一个数量级。碳化硅与其他半导体相比,具有优异的物理特性:高禁带宽度、高饱和电子漂移速度、高击穿强度、低介电常数和高热导率。上述这些优异的物理特性,决定了碳化硅在高温、高频率、高功率等方面具有潜在应用价值。在同样的耐压和电流条件下,SiC 器件的漂移区电阻是 Si 器件的 1/200,即使高耐压的 SiC 场效应管的导通压降,也比单极型、双极型 Si 器件的低得多。而且,SiC 器件的开关时间可降至 10 ns 量级。SiC 器件可以用来制造射频和微波功率器件。SiC 高频功率器件已在摩托罗拉公司研发成功,并应用于微波和射频装置。GE 公司正在开发 SiC 功率器件和高温器件。西屋公司已经制造出了在 26 GHz 频率下工作的甚高频场效应管。ABB 公司正在研制高功率、高电压的 SiC 整流器和其他 SiC 低频功率器件,用于工业和电力系统。理论分析表明,SiC 功率器件非常接近于理想的功率器件。可以预见,各种 SiC 器件的研究与开发,必将成为功率器件研究领域热点之一。但是,SiC 材料和功率器件的机理、理论、制造工艺尚有大量问题需要解决。

日本名古屋大学的 Ohno 教授、芬兰阿尔托大学的 Karppinen 教授及其研究团队,已经

成功制造了世界上第一个由碳纳米管产生的逻辑电路。他们认为,如果能顺利实现这种碳纳米管柔性塑料基底制造技术(图 1-2),半导体企业就能以更低的成本生产出电子纸等柔性电子产品,从而开创廉价电子产品新时代。

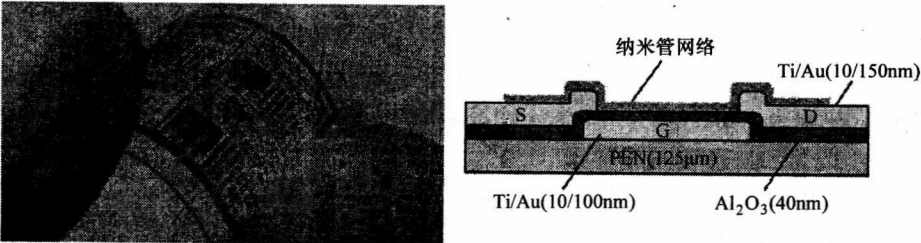


图 1-2 柔性衬底上生长的碳纳米管晶体管^[4]

随着科学技术的飞速发展,英国曼彻斯特大学与德国马克普朗克研究所的研究人员一起开发出采用一种新型材料制造的只有一个原子厚、不到 50 个原子宽的晶体管。这种被称为石墨烯的物质是二维材料,具有极高的晶体和电子特性,在凝聚态物理学和电子学中具有非常多的潜在应用。石墨烯薄膜可能最终替代硅,因为石墨烯晶体管更有效、更快,而耗能更低。石墨烯晶体管非常小,开关电压非常低,因而非常敏感,被视为目前的芯片晶体管的快速低功耗替代品。图 1-3 所示为石墨烯场效应管的结构和发展过程。

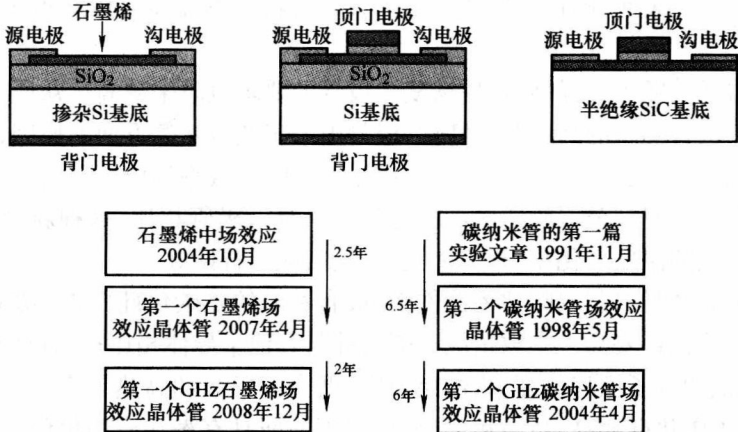


图 1-3 石墨烯场效应管的结构和发展过程^[5]

上面这些电子学器件是通过控制电荷来实现功能的。随着人们对电子的进一步认识,发现电子自旋这个属性可以被控制,从而可以实现各种功能,制成自旋电子学器件。自旋电子学器件具有小型化、耗能低等优点,是电子学领域近年来的研究热点。

1.2 电子的自旋属性^[6]

运动和自旋是电子的固有属性。1897 年 12 月,普雷斯顿的报告中提到了光谱线的分裂可以不是三个,间隔也不尽相同。此后的 30 年时间内,许多人尝试作过很多理论解释,但一直未能成功,从而称这种现象为反常塞曼效应。索莫非把反常塞曼效应列为“原子物理

学中悬而未决的问题”。1925年,在乌伦贝克与古德斯密特根据一系列实验事实大胆地提出电子有自旋属性后才得到解释。反常塞曼效应是发现电子自旋的实验之一,也是作为验证电子自旋正确性的实验之一。

乌伦贝克与古德斯密特假设:电子不是点电荷,它除了轨道角动量外,还有固定的自旋角动量(S),其值

$$|S| = \sqrt{s(s+1)} \cdot h, s = \frac{1}{2} \quad (1-1)$$

它的方向分量只有两个:

$$S_z = \pm \frac{1}{2}h \quad (1-2)$$

这里以单价原子为例,其光谱产生于价电子的能级跃迁。没有加磁场前,价电子的能量算符可以写成

$$H_0 = \frac{p^2}{2m_e} + V(r) + \xi(r)S \cdot L \quad (1-3)$$

最后一项是自旋轨道耦合能;加磁场后,价电子又获得一项磁作用势,以磁场方向为 z 轴,磁作用势

$$H' = -\mathbf{B} \cdot (\boldsymbol{\mu}_l + \boldsymbol{\mu}_e) = \frac{eB}{2m_e c} (L_z + 2S_z) \quad (1-4)$$

价电子的总能量算符变成

$$H = H_0 + H' \quad (1-5)$$

在弱磁场中,磁作用势小于自旋轨道耦合能,应将式(1-5)中 H' 作为微扰。取(H_0 , L^2 , J^2 , J_z)共同本征函数作为零级近似波函数,记为

$$\Psi_{nljm_j}^{(0)} = R_{nl}(r)\psi_{ljm_j}(\theta, \varphi, S_z) \quad (1-6)$$

其中 Ψ_{nljm_j} 表示(L^2 , J^2 , J_z)共同本征函数。

H_0 由式(1-3)表示,其中包含了自旋轨道耦合能。 H_0 的本征值即未加磁场时的价电子能级,和量子数 n, l, j 有关,但和 m_j 无关,可以记为 $E_{nlj}^{(0)}$,能级简并度 $(2j+1)$ 。 n, l 给定后, $j = l \pm \frac{1}{2}$ 对应于两个能级,就是能级的精细结构。

按照简并态微扰论计算磁作用势 H' 造成能级变化(一级修正)。由于 H' 与 J_z 对易,因此 H' 的非对易矩阵元全部为零,能级的一级修正等于 H' 对式(1-6)的平均值,即

$$E_{nljm_j}^{(1)} = \int (\Psi_{nljm_j}^{(0)*} \hat{H}' \Psi_{nljm_j}^{(0)}) d\tau = \frac{eB}{2m_e c} (J_z + S_z) = \frac{eB}{2m_e c} \left(m_j h + \frac{h}{2} \boldsymbol{\sigma}_z \right) \quad (1-7)$$

其中 $\boldsymbol{\sigma}_z$ 求解如下,因为

$$\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{L}) + (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{L})\boldsymbol{\sigma} = 2\mathbf{L} \quad (1-8)$$

在 Ψ_{nljm_j} 态下求式(1-8)平均值,其中 $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{L}$ 变成本征值,因此得到

$$\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{L} \text{本征值}) = \langle \mathbf{L} \rangle \quad (1-9)$$

由于 $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \frac{h}{2}\boldsymbol{\sigma}$,式(1-9)亦即

$$\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle \left[\frac{h}{2} + (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{L} \text{本征值}) \right] = \langle \mathbf{J} \rangle \quad (1-10)$$

在 J_z 的本征态下, $\langle J_x \rangle = \langle J_y \rangle = 0$, 所以 $\langle \sigma_x \rangle = \langle \sigma_y \rangle = 0$ 。而

$$\frac{h}{2} + (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{L}) = \begin{cases} \left(l + \frac{1}{2}\right) \cdot h & j = l + 1/2 \\ -\left(l + \frac{1}{2}\right) \cdot h & j = l - 1/2 \end{cases} = \begin{cases} jh, & j = l + 1/2 \\ -(j+1)h, & j = l - 1/2 \end{cases} \quad (1-11)$$

代入式(1-10), 即得

$$\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle = \begin{cases} \frac{m_j}{j}, & j = l + \frac{1}{2} \\ -\frac{m_j}{j+1}, & j = l - \frac{1}{2} \end{cases} \quad (1-12)$$

代入式(1-7), 即得

$$E_{nljm_j}^{(1)} = B\mu_B m_j g \quad (1-13)$$

其中 g 为朗德因子, 即

$$g = 1 + \frac{\langle \sigma_z \rangle}{2m_j} = 1 + \frac{\langle S_z \rangle}{\langle J_z \rangle} = \begin{cases} 1 + \frac{1}{2j}, & j = l + \frac{1}{2} \\ 1 - \frac{1}{2j+2}, & j = l - \frac{1}{2} \end{cases} \quad (1-14)$$

这样, 由式(1-13)和式(1-14)可知, 能级 $E_{nlj}^{(0)}$ 在弱磁场中分裂成 $(2j+1)$ 个等距离能级, 相应于 m_j 的 $(2j+1)$ 种取值

$$m_j = j, j-1, \dots, (-j) \quad (1-15)$$

能级间距为 $B\mu_B g$ 。在简单塞曼效应中, 能级分裂间距为 $B\mu_B$ 。能级跃迁选择定则是

$$\Delta l = \pm 1; \Delta j = 0, \pm 1; \Delta m_j = 0, \pm 1 \quad (1-16)$$

可从上面的解释中看出, 电子自旋被结合到量子理论当中才可较为完整地解释反常塞曼效应。当然在严谨的物理理论中只依据解释某一个事实现象就确定假设的正确性是不足考验的。但在更多的实验解释中都不可避免地考虑到粒子的自旋, 才把它作为基本的理论确定了下来。

1.3 自旋电子学的发展概况^[7]

电子具有电荷和自旋自由度, 传统的微电子学器件功能设计主要是基于电荷, 忽略了自旋自由度。实际上, 随着研究的深入, 人们发现低维纳米体系中自旋自由度在很多方面优于电荷, 例如退相干时间长、能耗低等。充分利用电子的自旋属性, 有可能获得功能更强大、操控更方便、处理速度更快的新一代微电子器件。以此为契机, 作为凝聚态物理的一个新的分支——自旋电子学出现了。

自从 1988 年在磁性多层膜中发现了巨磁电阻效应(GMR), 1993 年在钙钛矿锰基氧化物(RMnO_3 , R 为稀土元素, 一般为二价碱土金属)中发现了庞磁电阻效应(CMR), 特别是 1995 年在铁磁性隧道结材料中发现了室温高隧穿磁电阻效应(TMR)以及后来的稀磁半导体等研究热点, 这些具有里程碑意义的人工合成磁性材料的成功制备和深入研究, 不仅迅速推动了 20 多年中凝聚态物理新兴学科——自旋电子学的形成与快速发展, 也极大地促进了与自旋极化电子输运相关的磁电阻材料和新型自旋电子学器件的研制和应用。例如巨磁电阻(GMR)是自旋电子学成功应用的范例之一, 它从物理发现到材料制备, 直至最后器件大

规模产业化仅用了不到 10 年。计算机硬盘在 GMR 读出头的推动下,磁记录密度已从过去 60 MB/in 发展到目前约 300 GB/in,提高了近 5 000 倍。2002 年,它仅在硬盘驱动器方面创造的收入就突破 400 亿美元。基于非晶 AlO_x 势垒材料的磁性隧道结(MTJ)和隧穿磁电阻效应(TMR)是自旋电子学的另一个成功应用的范例,它从物理发现(1995 年室温隧穿磁电阻效应达到 20%)到材料制备和 2005 年 TMR 磁读出头器件大规模产业化(>270 GB/in)用了不到 10 年。2007 年,美国西部数据公司(WD)采用基于单晶 MgO 势垒的磁性隧道结和 TMR 读出头技术结合垂直磁记录介质,实现了 520 GB/in 硬盘面记录密度。1997 年至今,基于 GMR 和 TMR 效应的磁读出头产品及其硬磁盘已经被广泛地应用到网络服务器和台式计算机、手提电脑、数字照相机以及 MP3、MP4 等音乐播放器中,显著促进了计算机和信息技术的进步,充分体现了基础科学研究对丰富人类文化生活的的作用。1997 年以来,已经有 50 亿个 GMR 磁读出头被生产和投入市场,而且至今仍然被广泛使用;从 2004 年开始,大约每年生产 4 亿个 TMR 磁读出头,并不断地被投入市场,进入最终用户,正在产生巨大的科技和社会经济效益。磁性金属材料的基础物理研究及其器件应用,已经为磁硬盘工业以及信息技术的发展带来了革命性的技术更新。正因为如此,2007 年诺贝尔物理学奖授予了 GMR 的发现者法国的 Fert 和德国的 Grunberg,以表彰他们为当代凝聚态物理和信息科学技术发展所作出的杰出贡献。可以说,分别于 1988 年和 1995 年发现的 GMR 和 TMR 新材料,导致计算机信息存储技术在 21 世纪进入了一个 GMR 和 TMR 时代。高密度和高容量磁随机存储器芯片的实现,以其低功耗、断电下信息不丢失、抗辐射、高速度、高稳定、使用寿命长等优点,将会使计算机科学和信息产业以及人们日常生活中使用的众多电器产品进入一个新的智能化时代。因此,研究和发展自旋电子学材料、物理及自旋相关器件,探索和研究新的人工磁电阻结构和功能材料及其器件应用,不仅是过去 20 年也是当前和今后相当长时期内的国际研究热点和重要领域之一。新型的高性能自旋电子学人工合成材料及其新的物理效应的进一步发现,能给自旋电子学材料及其自旋相关器件的研制,提供新的生长点,注入新的发展动力。目前,人们研究的热点主要包括:磁电阻效应、自旋注入、自旋矩、半金属材料、稀磁半导体材料、自旋过滤和基于自旋效应的各种自旋电子学器件。

参 考 文 献

- [1] 薛凤家. 电子的发现和研究 [J]. 物理与工程, 2003, 13(5): 52 - 59.
- [2] 杨晓段, 陈鸿林. 分数量子霍尔效应与 1998 年诺贝尔物理学奖 [J]. 实验技术与管理, 1999, 16(4): 26 - 31.
- [3] 林鸿溢, 杨仕明, 刘天庆, 等. 从电子的发现到信息技术的发展 [J]. 今日电子, 1997, 12: 77 - 79, 81.
- [4] D. M. SUN, M. Y. TIMMERMANS, Y. TIAN, et al. Flexible high-performance carbon nanotube integrated circuits [J]. Nature Nanotech. , 2011, 6: 156.
- [5] F. SCHWIERZ. Graphene transistors [J]. Nature Nanotech. , 2010, 5: 487.
- [6] 向成, 郭中华. 电子自旋概念及其实验验证 [J]. 工业科技, 2008, 37(2): 37.
- [7] 韩秀峰. 自旋电子学材料、物理和器件设计原理的研究进展 [J]. 物理, 2008, 37(6): 392.

第 2 章 磁电阻效应

2.1 磁电阻效应的发展过程

1857 年,在铁磁性金属中发现各向异性磁电阻效应。20 世纪 80 年代后期,对电子器件小型化、高集成度以及高运算速度的追求,特别是金属-绝缘体颗粒薄膜中巨磁电阻效应的发现,引起了物理学和材料科学工作者对该系统的广泛研究兴趣。1988 年,法国巴黎大学物理系 Fert 教授的科研组首先在 Fe/Cr 多层膜中发现了巨磁电阻效应^[1],即材料的电阻率随磁化状态的变化而呈现显著改变的现象,他们采用分子束外延,在 GaAs(001) 基片上外延生长了(001)Fe/(001)Cr 超晶格,在 4.2 K 温度下,当 Fe、Cr 层的厚度分别为 3 nm 和 0.9 nm 时,外加 2 kOe 的磁场可获得 -50% 磁电阻($\Delta R/R_0 \approx -50\%$),这一数值比 FeNi 合金的各向异性磁电阻约大一个数量级,并且为负值,故称之为巨磁电阻效应(Giant Magnetoresistance, GMR)以示区别。Fe/Cr 多层膜中 GMR 效应的物理机制源于相邻铁磁层间通过非磁性 Cr 层产生的反铁磁性耦合,而外加磁场可改变铁磁层中磁矩的方向,使其趋于外磁场方向取向排列,由于电子在具有不同磁矩取向的磁性层中输运时,所受到的散射几率是不同的,从而导致电阻率随磁化状态的改变而改变。Grunberg 等人^[2]曾在 1986 年采用布里渊散射对 Fe/Cr 多层膜的层间耦合进行了研究,为巨磁电阻效应的发现奠定了物理基础。鉴于巨磁电阻效应在基础研究和实际应用中的重要性,Fert 教授和 Grunberg 教授于 1994 年 8 月在波兰华沙召开的国际磁学会议上获得第二届 IUPAP(International Union of Pure and Applied Physics)磁学大奖和 2007 年诺贝尔物理学奖。IBM 的 Parkin 将巨磁电阻效应应用到磁头中,使得磁记录介质密度大大提高,因此他与 Fert 和 Grunberg 教授同时获得了 1997 年惠普欧洲物理奖、2006 年沃尔夫物理奖、2007 年日本奖。在磁性多层膜的巨磁电阻效应研究的启发与促进下,1992 年 Berkowitz 和 Chien 研究组分别独立地发现在 Co-Cu 和 Co-Ag 颗粒膜中同样存在巨磁电阻效应。1995 年 Miyazaka 等人发现 Fe/Al₂O₃/Fe 隧道结室温下巨磁电阻效应可达 18%。另外,早在 20 世纪 70 年代初期,Gittleman 等人在用溅射法制备的 Ni-Si-O 颗粒膜中观察到了很小的磁电阻效应,并将它归因于自旋相关隧穿效应。二十多年后,Fujimori 和 Mitani 等人首次报道了 Co-Al-O 系统中室温下的巨磁电阻效应,磁电阻值约为 8%。此后不久,Milner 等人在 Ni(Co)-Si-O 系统中也发现了这种巨磁电阻效应。这种电子的输运过程是隧道效应的巨磁电阻称为“隧道型磁电阻(Tunneling Magnetoresistance, TMR)”。理论研究表明 TMR 大小与隧穿电子的自旋极化率成正比。1993 年 Helmolt 等人在 La_{0.67}Ba_{0.33}MnO_x类钙钛矿铁磁薄膜中发现室温磁电阻效应可高达 60%,为这类混合价化合物的本征磁电阻效应的研究揭开了序幕,并把该体系中的磁电阻称为庞磁电阻(CMR)。磁电阻发展简史见表 2-1^[3]。

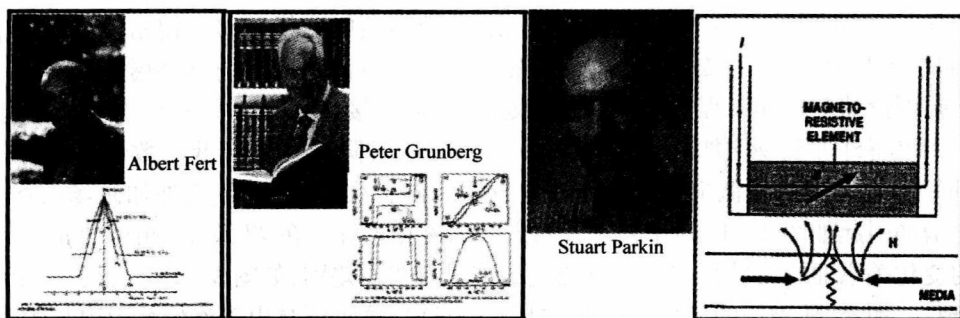


表 2-1 磁电阻发展简史

年份	磁电阻类型	相关材料
1856	AMR	Ni, Fe 等
1936	AMR	坡莫合金 (NiFe 合金)
1955	LMR (CMR)	La-Ca-Mn-O
1975	TMR	Fe/Ge/Co, 14%, 4.2 K
1988	GMR	Fe/Cr 多层膜, 80%, 4.2 K, 20 T
1992	GMR	Co/Cu, Co/Ag 颗粒薄膜
1994	CMR	钙钛矿锰氧化物
1995	TMR	Fe/Al ₂ O ₃ /Fe, 18% RT
1999	TMR	CoFe/Al ₂ O ₃ /Co, 11.8% RT CoFe/Al ₂ O ₃ /CoFe, 42% RT
2003	TMR	Fe/MgO/Fe, 67% RT

通过逐渐将电子的自旋特性引入电输运过程,拓展了传统的电子学研究领域,形成了一门新兴的交叉学科——自旋电子学 (Spintronics)。目前,将自旋与现有的半导体器件成功结合的技术关键在于自旋的注入、传输、控制和检测。因此,寻找并制备在室温乃至更高温度条件下具有较高自旋极化率的材料、研究 TMR 等自旋相关的电输运特性成为自旋电子学的研究关键和热点。目前,美国、欧洲、日本和韩国等世界上主要的半导体厂商已经制造基于 TMR 效应的磁随机存储器件。

2.2 各向异性磁电阻

2.2.1 各向异性磁电阻概述

1975 年,McGuire 和 Potter 对铁磁性 3d 合金的各向异性磁电阻效应的理论和实验研究进行了系统的评述^[4]。本节根据该评述和各向异性磁电阻效应的新研究进展进行介绍。

1857 年,Thomson 在铁磁性金属中发现了各向异性磁电阻效应。在他发现各向异性磁电阻一个世纪后,磁电阻效应才被用做磁记录的探测元件。为了更清晰地定义各向异性磁电阻,图 2-1 给出了相应的图。图 2-1(a) 给出了合金 (Ni_{0.9942}Co_{0.0058}) 从绝对零度到居里温度的自发磁化强度。在室温下,测量圆柱形样品的各向异性磁电阻,圆柱形样品的退磁张量是已知的。图 2-1(b) 给出了相应的测量结果,上面的曲线是在磁化强度平行于电流方向的情况下测量得到的电阻率($\rho_{//}$);下面的曲线是在磁化强度垂直于电流方向时测量得到的电阻率(ρ_{\perp})。从以多畴框架为特征的任意电阻率为起点,50 Oe 的磁场足够使得磁畴