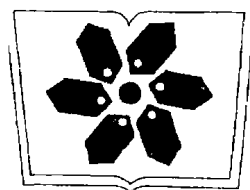


半导体科学与技术丛书

# 半导体自旋电子学

夏建白 葛惟昆 常凯 著

 科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)



中国科学院科学出版基金资助出版

半导体科学与技术丛书

# 半导体自旋电子学

夏建白 葛惟昆 常凯 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍了半导体自旋电子学的一些基本概念和国际国内的研究成果,其中包括:半导体中磁离子的性质、稀磁半导体中巨 Zeeman 分裂、铁磁半导体的居里温度、自旋极化电子的注入、自旋弛豫、Rashba 效应和 Dresselhaus 效应、半导体电子自旋的光学响应、自旋极化电子和磁畴的输运、量子点和量子线中电子的自旋性质等.特别是介绍了最近国际上最新研究成果——自旋相干电子的操控,包括:自旋相干电子的空间运动、自旋霍尔效应、自旋流的产生、自旋动力学等.

本书可供大学物理系高年级本科生、研究生和从事半导体自旋电子学研究的科研工作者使用.

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体自旋电子学/夏建白,葛惟昆,常凯著. —北京:科学出版社,2008  
(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-022117-9

I. 半… II. ①夏… ②葛… ③常… III. 半导体-自旋-电子学 IV. O472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 074522 号

责任编辑:张 静 刘凤娟/责任校对:赵燕珍

责任印制:赵德静/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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 10 月第一次印刷 印张: 23 3/4

印数: 1—2500 字数: 447 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

## 《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问：王守武 汤定元 王守觉

顾 问：(按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础  
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植  
郑有焯

主 编：夏建白

副 主 编：陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委：(按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林  
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深  
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标  
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光  
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣  
张国义 赵元富 祝宁华

## 《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

# 《半导体科学与技术丛书》已出版书目

(按出版时间排序)

- |                       |         |                 |
|-----------------------|---------|-----------------|
| 1. 窄禁带半导体物理学          | 褚君浩     | 2005年4月         |
| 2. 微系统封装技术概论          | 金玉丰 等   | 2006年3月         |
| 3. 半导体异质结物理 (第二版)     | 虞丽生     | 2006年5月         |
| 4. 高速 CMOS 数据转换器      | 杨银堂 等   | 2006年9月         |
| 5. 光电子器件微波封装和测试       | 祝宁华     | 2007年7月         |
| 6. 半导体的检测与分析 (第二版)    | 许振嘉     | 2007年8月         |
| 7. 半导体科学与技术           | 何杰, 夏建白 | 2007年9月         |
| 8. 微纳米 MOS 器件可靠性与失效机理 | 郝跃, 刘红侠 | 2008年4月         |
| 9. 半导体自旋电子学           | 夏建白 等   | <b>2008年10月</b> |

# 目 录

<b>第 0 章 绪论</b> .....	1
0.1 自旋电子学的起源 —— 巨磁阻效应器件 .....	1
0.2 自旋电子学应用的新材料 .....	2
0.3 自旋电子注入和自旋输运 .....	3
0.3.1 欧姆注入 .....	4
0.3.2 隧道注入 .....	4
0.3.3 弹道电子注入 .....	4
0.3.4 利用稀磁半导体在磁场下的巨 Zeeman 分裂效应 .....	4
0.3.5 利用铁磁半导体作为自旋校准器 .....	4
0.3.6 光学方法产生自旋极化电子 .....	5
0.4 半导体和纳米结构中自旋相干的光学调控 .....	5
0.4.1 自旋寿命的延长 .....	5
0.4.2 自旋通过异质界面的相干输运 .....	7
0.4.3 自旋相干态的空间分辨 .....	7
0.5 自旋电子器件 .....	8
0.5.1 自旋发光二极管 .....	8
0.5.2 铁磁场效应晶体管 .....	8
0.5.3 铁磁半导体隧道结 .....	8
参考文献 .....	9
<b>第 1 章 半导体中稀磁离子的性质</b> .....	10
1.1 磁离子电子的组态 .....	10
1.2 自由磁离子的基态在晶格场中的分裂 .....	12
1.3 晶格场理论 .....	13
1.4 多电子态波函数 .....	16
1.5 等价算符方法 .....	18
1.6 半导体中的磁离子能级 .....	19
1.7 半导体磁离子性质的实验研究 .....	25
参考文献 .....	29
<b>第 2 章 稀磁半导体的性质</b> .....	30
2.1 磁场下半导体的有效质量理论 .....	31
2.2 宽禁带稀磁半导体 .....	32

2.2.1	宽禁带半导体的磁能级	32
2.2.2	稀磁半导体的磁相互作用	38
2.2.3	纤锌矿结构的稀磁半导体	42
2.2.4	实验观测	44
2.3	窄禁带稀磁半导体	50
2.3.1	窄禁带半导体的磁能级	50
2.3.2	$\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 的磁光谱	53
2.4	稀磁半导体微结构	56
2.4.1	稀磁半导体超晶格, 磁场垂直于界面	56
2.4.2	稀磁半导体超晶格, 磁场平行于界面	60
2.4.3	稀磁半导体量子点	65
2.4.4	磁极化子效应	69
2.4.5	稀磁半导体量子线	72
2.5	稀磁半导体的输运性质	76
2.6	$\text{Fe}^{2+}$ 离子的稀磁半导体, van Vleck 磁性	79
2.7	巨 Faraday 和 Kerr 旋转	80
2.7.1	磁性半导体的磁光性质	81
2.7.2	磁性半导体中的时间分辨 Faraday 和 Kerr 旋转	84
2.8	光致磁化	87
	参考文献	89
<b>第 3 章</b>	<b>铁磁半导体</b>	<b>92</b>
3.1	铁磁半导体 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$	92
3.2	其他铁磁半导体	98
3.3	费米能级工程	104
3.4	团簇对铁磁性的影响	108
3.5	铁磁半导体量子点	110
3.6	铁磁半导体的平均场理论	114
3.6.1	铁磁性的微观理论	114
3.6.2	稀磁半导体中的磁相互作用	117
3.6.3	铁磁半导体量子线, 量子板	123
3.6.4	铁磁半导体量子点	128
3.6.5	铁磁半导体能带结构的第一性原理计算	130
	参考文献	135
<b>第 4 章</b>	<b>自旋极化电子的注入</b>	<b>137</b>
4.1	半导体中电子自旋的寿命和漂移	137
4.2	半导体自旋晶体管	144



4.3	Rashba 效应	148
4.3.1	Rashba 效应的产生根源	148
4.3.2	Rashba 系数的实验测量	151
4.3.3	Rashba 系数的理论计算	155
4.4	自旋极化电子流的产生和输运	159
4.4.1	自旋电子通过半导体异质界面的相干输运	159
4.4.2	自旋极化电子的注入 (实验)	163
4.4.3	自旋极化电子的注入 (理论)	169
4.5	磁性半导体隧穿结	177
4.5.1	GaAs/GaMnAs 异质结基本性质	177
4.5.2	铁磁/非磁/铁磁三层结构性质	178
4.5.3	铁磁金属和半导体接触	180
	参考文献	185
<b>第 5 章</b>	<b>自旋弛豫</b>	<b>188</b>
5.1	自旋弛豫时间 $T_1$ 和 $T_2$	188
5.2	自旋弛豫的主要机制	191
5.2.1	EY 机制	191
5.2.2	DP 机制	194
5.2.3	DP 机制, 在单轴形变晶体中的自旋弛豫	197
5.2.4	BAP 机制	198
5.2.5	EY, DP 和 BAP 机制的比较	199
5.3	III-V 族化合物中自旋弛豫的实验和理论研究	200
5.3.1	光学取向方法	200
5.3.2	InSb 中的自旋弛豫 (EY 机制)	203
5.3.3	GaAs 中的自旋弛豫 (DP 机制)	203
5.3.4	GaAs 中的自旋弛豫 (BAP 机制)	206
5.3.5	自旋弛豫率与受主浓度的关系	207
5.4	量子阱中的自旋弛豫	208
	参考文献	214
<b>第 6 章</b>	<b>Rashba 效应与 Dresselhaus 效应</b>	<b>216</b>
6.1	反演非对称半导体体系中自旋-轨道相互作用导致的自旋分裂 —— Rashba 效应和 Dresselhaus 效应	216
6.1.1	有效质量近似	216
6.1.2	Dresselhaus 效应概述	223
6.1.3	相对论量子力学推导	225
6.2	Rashba 系统中的自旋-轨道耦合哈密顿	232

6.3	Rashba 效应与能带色散	234
6.4	Rashba 参数 $\alpha$	235
6.4.1	$\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 公式	236
6.4.2	用 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 方法处理自旋-轨道相互作用	237
6.4.3	八带模型	238
6.4.4	五能级模型 (以 GaAs 为例)	240
6.5	从 Shubnikov-de Haas 振荡获取 Rashba 参数 $\alpha$	243
	参考文献	246
<b>第 7 章</b>	<b>半导体中电子自旋的光学响应</b>	<b>248</b>
7.1	光子的自旋	248
7.2	半导体中光学跃迁的自旋守恒	250
7.2.1	光跃迁选择定则	250
7.2.2	分裂能带下的光激发	251
7.3	自旋分裂系统中光注入电子自旋引发的自旋光电流	254
7.3.1	圆偏光电流效应 (CPGE)	255
7.3.2	自旋光电流效应 (SGE)	259
7.4	自旋分裂系统中电场导致电子自旋极化	260
7.5	Rashba 效应与 Dresselhaus 效应的实验区分及应用	262
7.6	旋光电子器件	265
7.6.1	Rashba 和 Dresselhaus 综合效应自旋场效应晶体管	266
7.6.2	自旋光源 —— 发光二极管和激光器	268
7.6.3	以传导电流探测自旋流	277
	参考文献	280
<b>第 8 章</b>	<b>自旋相干电子的操控</b>	<b>282</b>
8.1	实验技术	282
8.2	半导体体材料中的电子自旋相干	285
8.3	半导体量子点的电子自旋相干	287
8.4	半导体中自旋相干电子的空间运动	292
8.4.1	半导体中没有外磁场的相干自旋操控	292
8.4.2	电流感应的自旋极化	294
8.5	自旋霍尔效应	297
8.5.1	自旋霍尔效应的光学观测	298
8.5.2	二维电子气的自旋霍尔效应	303
8.6	自旋流的产生	306
8.6.1	由自旋霍尔效应产生自旋流	306
8.6.2	双色光场产生自旋流	307

---

8.7 半导体中的自旋动力学 .....	313
8.7.1 几种自旋流的迁移率和扩散系数 .....	314
8.7.2 电场对自旋极化电流的效应 .....	317
参考文献 .....	319
<b>第 9 章 自旋极化电子和磁畴的输运 .....</b>	<b>321</b>
9.1 磁性半导体二维电子气中的自旋输运 .....	321
9.2 量子点的自旋输运 .....	328
9.2.1 铁磁性 Co 引线构成的双垒磁隧穿结的自旋输运 .....	328
9.2.2 与铁磁性电极耦合的半导体量子点中的近藤效应 .....	332
9.2.3 磁性半导体量子点的自旋输运理论 .....	335
9.3 磁性半导体中的磁畴输运 .....	338
参考文献 .....	342
<b>第 10 章 未来的量子点、量子线自旋电子学 .....</b>	<b>344</b>
10.1 量子点的电子 $g$ 因子 .....	345
10.2 量子线的 $g$ 因子 .....	354
10.3 电场可调的 $g$ 因子 .....	359
10.4 N 掺杂对电子的 Rashba 系数和 $g$ 因子的效应 .....	362
参考文献 .....	365

# 第0章 绪 论

自旋电子学研究如何利用器件中电子的自旋自由度. 它起始于 1988 年 Fert 和 Gruenberg 分别独立发现的巨磁阻效应 (GMR). 这个发现产生高灵敏度的磁传感器, 被用到硬盘中的读出头上. 就在 GMR 发现的 9 年以后, 1987 年 11 月 IBM 公司就宣布制成了商业用的硬盘读出头. 这一成果成就了一项几十亿美元的事业. 目前正在研究的自旋电子学器件有: 磁随机存储器 (magnetic random access memory, MRAM)、自旋场效应晶体管、自旋控制的激光器等. 这些器件依赖于在固体中控制自旋的能力, 目的在于减小功率消耗, 克服与电荷电子相联系的速度限制, 以及将来用作量子信息处理和量子计算.

自旋电子学研究的内容包括: 自旋极化电子的产生、输运、隧穿, 以及与之联系的光学现象、寿命、退相干机制等. 半导体是研究自旋电子学的最好的材料, 因为: ① 半导体中载流子数目比较少, 可以研究单电子行为, 而先排除多体效应. ② 半导体单晶, 或者异质结、量子阱、超晶格、量子点等可以做得质量非常好, 使得晶格缺陷、杂质等降到最低限度, 减小对电子自旋的弛豫. ③ 半导体对大部分光都是“透明”的, 因此可以用圆偏振光来注入或者检测自旋电子. ④ 半导体器件工艺成熟, 容易制成器件、集成或者与其他器件集成. 但是半导体有一个缺点, 就是它是非磁的. 它的磁化需要从外界掺入磁性离子, 而一般磁性离子在半导体中的溶解度是比较小的, 磁性离子在半导体中的掺杂浓度一般只有百分之几. 因此半导体中产生自旋极化的电子是一个难题.

## 0.1 自旋电子学的起源 —— 巨磁阻效应器件

1988 年在一个三层的薄膜结构中发现了巨磁阻效应, 如图 0.1(a) 所示. 上下两层是铁磁材料 (如 Fe, Co, Ni 的合金), 中间一层是非磁材料 (如 Cu). 当上下两铁磁层的磁矩是平行时, 材料的电阻最小; 而当磁矩是反平行时, 电阻最大. 电流可以是垂直于界面 (CPP), 也可以是平行于界面 (CIP). 这种效应可以发生在室温, 当在一个相当小的磁场 ( $\sim 100\text{Oe}^*$ ) 下改变其中一个铁磁层的磁矩取向时, 就能观察到电阻率明显的变化 ( $\sim 10\%$ ).

在 GMR 效应的基础上, 提出了自旋阀, 如图 0.1(a) 所示. 在上铁磁层的上面加一个反铁磁层, 两者紧密接触. 反铁磁层使得上面铁磁层的磁矩在外界磁场下不

\*  $1\text{Oe} = 79.5775 \text{ A/m}$ .

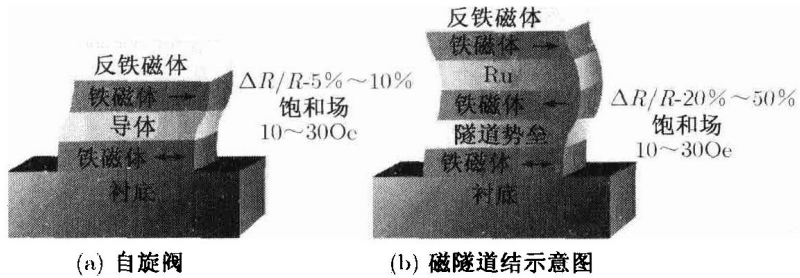


图 0.1<sup>[1]</sup>

能轻易改变方向, 起到一个磁矩的“钉扎”作用. 下面的铁磁层是自由层, 它的磁矩在外界小磁场下能改变方向. 当上下两层的磁矩方向在  $10 \sim 30 \text{ Oe}$  的外磁场下由平行变为反平行时, 自旋阀的电阻一般增加  $5\% \sim 10\%$ .

磁隧道结 (magnetic tunnel junction, MTJ) 如图 0.1(b) 所示. 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), 下面自由铁磁层, 以及中间一薄绝缘层 (一般  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 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  $20\% \sim 50\%$ , 类似于自旋阀, 但电阻调制幅度大. 因为隧穿电流密度通常是小的, 所以 MTJ 器件有高的电阻.

自旋阀和 MTJ 器件的应用是很广的, 例如: 磁场传感器、硬盘的读头、电隔离器 (galvanic isolator) 和 MRAM 等. GMR 自旋阀读头是硬盘驱动器中的主要部件, 几乎所有商业 GMR 头都是最初 IBM 提出的自旋阀形式. 经过改进以后, 如利用反铁磁耦合层作为钉扎层 [如图 1(b)], 自旋阀的磁阻从原来的增加  $5\%$ , 提高到今天的  $20\%$ . 目前硬盘的存储密度已接近每平方英寸  $100 \text{ Gbits}$ , 传感器的条宽接近  $0.1 \mu\text{m}$ , 电流密度变得非常大, 对自旋阀的灵敏度要求也越来越高.

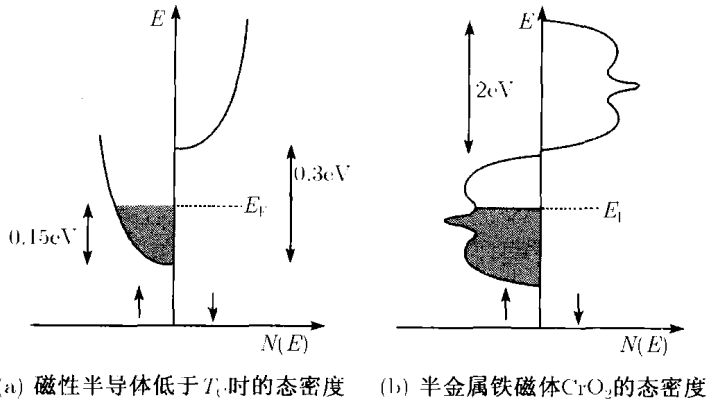
MRAM 利用磁滞回线的性质去储存资料, 以及用磁阻去读出数据. 将 GMR 基的 MTJ 或者自旋阀的存储单元集成在一个集成电路芯片上, 它的功能就像一个普通的半导体随机存储器 (RAM). 但是它有一个优点, 在电源切断时, 数据仍可保留. 与硅的电可擦可程序化的只读存储器 (electrically erasable programmable read-only memory, EEPROM) 和闪存相比, MRAM 的写入时间快  $1000$  倍, 在写的过程中没有磨损 (EEPROM 和闪存在一百万次写的循环后磨损) 和低的功耗. MRAM 的数据存取时间大约是硬盘的万分之一. MRAM 目前还没有商品<sup>[1]</sup>.

## 0.2 自旋电子学应用的新材料

寻找一种材料, 既具有半导体性质, 又具有铁磁性质是一项长期而艰巨的任务,

由于这两种材料的晶格结构和化学键性质有很大的差别. 铁磁半导体 (ferromagnetic semiconductor) 是一种理想的材料, 它既是半导体, 又有较高的居里温度.  $\text{EuS}$  是最早研究的铁磁半导体, 其中铁磁离子  $\text{Eu}^{2+}$  占据了每一个晶格位置, 但是它的居里温度非常低, 没有使用价值. 最近在  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  半导体中发现居里温度  $T_C$  高达  $110\text{K}$ <sup>[2]</sup>, 是向提高居里温度努力的一个重大突破. 它的态密度如图 0.2(a) 所示. 用平均场近似, 假定了磁相互作用通过半导体中的自由空穴, 理论预言了许多半导体的居里温度能高于室温<sup>[3]</sup>. 实验上寻找具有高居里温度的铁磁半导体已经取得了一些进展, 但结果并不是太肯定.

实验上发现另一种具有大的载流子自旋极化的材料——铁磁氧化物和有关的化合物, 如  $\text{CrO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{La}_{0.7}\text{Si}_{0.3}\text{MnO}_3$  等, 它们的导带态密度对自旋向上电子和自旋向下电子几乎是完全分开, 在能量上不重叠, 如图 0.2(b) 所示. 因此它们是半金属的, 费米能级位于一个带中. 用 Andreev 反射谱研究了这些氧化物<sup>[4]</sup>, 发现它们在低温下有高的自旋极化率 (高于 70%). 在液 He 温度下,  $\text{CrO}_2$  的自旋极化率高达 96%. 但是在室温下自旋极化率很快趋于零.

图 0.2<sup>[1]</sup>

其他材料, 如用激光溅射方法制得了掺 6%~8% Co 的  $\text{TiO}_2$ , 居里温度达到室温<sup>[5]</sup>. 它对可见光是透明的, 因此在光电子应用中特别重要. 闪锌矿结构的  $\text{CrSb}/\text{GaAs}/\text{CrSb}$  外延层也发现具有铁磁性<sup>[6]</sup>.

### 0.3 自旋电子注入和自旋输运

制造与自旋有关的电子器件 (自旋电子器件), 最关键的问题是在不需要强磁场和室温条件下自旋极化电子的注入、产生自旋电流以及它的电检测. 以下是几种可能的自旋电流产生办法.

### 0.3.1 欧姆注入

通过铁磁金属 (ferromagnetic metal, FM) 作电极引入极化电子. 如果在铁磁金属与半导体之间形成欧姆接触, 则期望能将铁磁金属中的自旋极化电流引入到半导体中. 但是由重掺杂形成的欧姆接触产生了自旋反转的散射, 使得自旋极化损失. 在  $T < 10\text{K}$ , 由 FM-InAs 欧姆接触得到了 4.5% 的自旋极化电子注入<sup>[7]</sup>. 在室温下, 由 Fe-GaAs 接触得到了 2% 的自旋电子注入<sup>[8]</sup>.

### 0.3.2 隧道注入

用一个铁磁针尖做的扫描隧道显微镜 (STM) 已经证明一个真空隧道过程能够有效地将自旋极化电子注入到半导体中<sup>[9]</sup>. 具有高磁阻的 FM-绝缘体-FM 隧道结 (图 1(b)) 也已确定, 隧穿势垒能够保持隧穿过程中的自旋极化, 因而证明, 隧穿是比扩散输运更有效的自旋注入的方法.

以上两种方法都依赖于在半导体上外延生长铁磁薄膜, 要求形成尖锐的界面和高质量的 Schottky 势垒.

### 0.3.3 弹道电子注入

除了扩散输运以外, 还可以利用弹道输运. 由铁磁材料中两个自旋导带和半导体导带的能量差, 可以确定与自旋有关的界面弹道电子穿透率和反射律. 在铁磁和非铁磁金属之间形成一个点接触, 实验证明用弹道注入在非铁磁金属中得到了高达 40% 的自旋极化电流<sup>[10]</sup>.

### 0.3.4 利用稀磁半导体在磁场下的巨 Zeeman 分裂效应

将稀磁半导体  $\text{Be}_{0.07}\text{Mn}_{0.03}\text{Zn}_{0.9}\text{Se}$  作为自旋校准器 (aligner), 在低温 ( $\sim 10\text{K}$ ) 和外磁场 ( $> 1\text{T}$ ) 下, 电子通过 300nm 厚的 BeMnZnSe 层时就能得到自旋极化注入效率 90% 的自旋极化电子<sup>[11]</sup>. 原因就是在磁场下, 低浓度的 Mn 离子通过 sp-d 交换相互作用使半导体中的导带和价带产生了巨 Zeeman 分裂, 电子的有效 Landè  $g$  因子可达到 100. 在低温下, 电子只占据了最低的  $S = -1/2$  能带, 产生了自旋极化电子. 自旋极化率是通过测量电子在一个 GaAs 发光二极管发出光的圆偏振度得到的. 通过这个实验也证明了自旋退相干时间足够长, 使得它在  $100\mu\text{m}$  的扩散长度上还继续保持, 并且长于它与空穴的复合时间. 类似地在稀磁半导体  $\text{Zn}_{0.94}\text{Mn}_{0.06}\text{Se}$  与半导体 GaAs 非完全晶格匹配的条件下, 也观察到有效的自旋极化电子的注入<sup>[12]</sup>, 自旋极化注入效率达 50%.

### 0.3.5 利用铁磁半导体作为自旋校准器

当 p 型铁磁半导体  $\text{Ga}_{0.955}\text{Mn}_{0.045}\text{As}$  低于居里温度 ( $T_C \approx 105\text{K}$ ) 时, 半导体中产生自发磁矩. 在前向偏置电压下自旋极化的空穴从 p 型的 GaMnAs 区以及没有

极化的电子从 n 型 GaAs 区同时注入一个 InGaAs 量子阱, 在其中复合发出圆偏振光. 在  $T=6\text{K}$  下, 空穴的自旋偏振度达到 10%, 证明了铁磁半导体能产生自旋极化空穴, 穿过界面, 保持极化的扩散距离大于 200nm. 并且自旋方向可以通过加一个小磁场 ( $\sim 40\text{Oe}$ ) 加以调控<sup>[13]</sup>.

### 0.3.6 光学方法产生自旋极化电子

样品是一个 GaAs 量子阱, 设生长方向为  $z$  方向. 在一个 GaAs 量子阱中, 重空穴和轻空穴的能量是分开的, 重空穴态是基态, 轻空穴态是激发态. 用一束能量为轻空穴激子的圆偏振光 ( $\sigma^+$ ) 沿样品生长方向照射到量子阱样品上. 由于重、轻空穴与电子之间跃迁选择定则, 这束光只能将  $L_z = -1/2$  的轻空穴态上的电子激发到  $S_z=1/2$  的电子态上 ( $\Delta L_z=+1$ ), 因此在导带中  $S_z=1/2$  的电子远多于  $S_z = -1/2$  的电子. 在脉冲激光结束后, 这部分电子将与重空穴态复合产生  $\sigma^+$  和  $\sigma^-$  偏振的荧光, 分别对应于电子-重空穴跃迁 ( $S_z = -1/2 \rightarrow L_z = -3/2$ ) 和 ( $S_z = +1/2 \rightarrow L_z=3/2$ ). 因此  $\sigma^-$  偏振光强度  $I_-$ , 远大于  $\sigma^+$  偏振光的强度  $I_+$ ,  $I_-/I_+$  等于  $S_z=1/2$  和  $S_z = -1/2$  电子数之比. 由时间分辨光谱测得  $I_-$  和  $I_+$  随时间衰减, 得到自旋弛豫时间约为几百 ps. 在  $x$  方向加一外磁场, 则还观察到由电子绕磁场方向的进动引起的  $I_-$  和  $I_+$  衰减曲线的振荡.  $I_-$  和  $I_+$  随时间互相变换, 其振荡周期为电子的 Larmor(拉莫尔)角频率 ( $g_e\mu_B B/\hbar$ ),  $g_e$  是电子的 Landè 因子<sup>[14]</sup>.

## 0.4 半导体和纳米结构中自旋相干的光学调控

由上一节可看到, 由光学方法 (脉冲激光、时间分辨光谱) 可以在半导体和纳米结构中产生和检测自旋极化电子, 进行量子调控. 最近的实验表明<sup>[15]</sup>, 在半导体掺杂浓度的一个窄范围内, 自旋寿命能够数量级的增加, 超过几个 ns. 在异质结和量子点中, 纳秒的自旋寿命一直保持到室温, 为相干量子自旋电子学的实际应用开阔了道路.

### 0.4.1 自旋寿命的延长

设电子自旋方向沿  $z$  方向, 磁场沿  $y$  方向, 则电子的自旋波函数的分量  $a$  和  $b$  将随时间变化

$$a(t) \sim \cos \omega_L t, \quad b(t) \sim \sin \omega_L t, \quad (0.1)$$

其中  $\omega_L = \mu_B g_e B/\hbar$  为拉莫尔频率. 将  $a$  和  $b$  看作是一个垂直于磁场平面 ( $z-x$  平面) 内的一个矢量, 则它随时间在这平面内转动, 类似于一个陀螺在外场下的拉莫尔进动.



自旋相干态是指所有相同自旋的电子都以同一个频率进动,但是由于自旋间、自旋-杂质、或者自旋-声子间相互作用,系统的总自旋(磁化强度)将随时间而呈指数衰减.

$$M(t) = M(0) \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \cos\left(\frac{\mu_B g_e B t}{\hbar}\right), \quad (0.2)$$

其中  $T_2$  称为退相时间, 又称寿命. 一般的  $T_2$  为几百 ps 量级.

研究自旋退相时间的光学方法主要是 Faraday 旋转和 Kerr 旋转两种方法, 见图 0.3. 其中 (a) 是 Faraday 旋转, (b) 是 Kerr 旋转. 光束垂直于样品, 沿  $z$  方向, 磁场在样品平面内, 沿  $y$  方向. 圆偏振的泵脉冲束垂直照射于半导体样品, 激发出自旋电子相干态, 并作拉莫尔进动. 探束是线偏振的, Faraday 旋转是测透过样品光束的线偏振的转动角, 它正比于电子总自旋在束方向上的投影 [见图 0.3(a)]. Faraday 旋转实验要求去掉不透明的衬底层. 而 Kerr 旋转是测量反射束线偏振的转动角  $\theta_K$ , 见图 0.3(b), 就避免了这种麻烦.

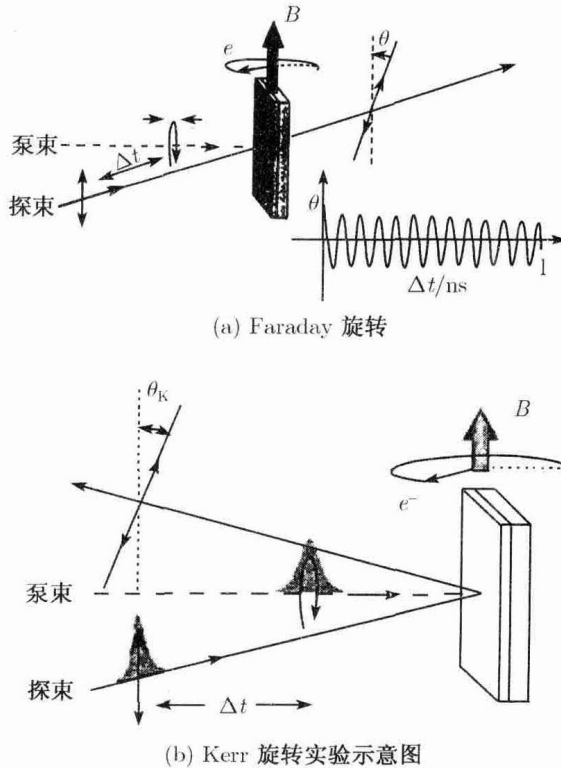


图 0.3

用调制掺杂的  $Zn_{0.8}Cd_{0.2}Se$  量子阱, 产生二维电子气. 实验证明<sup>[15]</sup>, 在一定的