

半导体科学与技术丛书

半导体中的自旋物理学

〔美〕 M.I.迪阿科诺夫 主编

姬 扬 译



科学出版社

www.sciencep.com

半导体科学与技术丛书

半导体中的自旋物理学

〔美〕M. I. 迪阿科诺夫 主编

姬 扬 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2010-2339 号

内 容 简 介

本书介绍了半导体自旋物理学当前研究全貌, 共 13 章, 每章都是由从事该方向研究多年、长期处于研究前沿的专家撰写。

在概述了半导体物理学和自旋物理学的基本知识之后, 本书重点介绍了当前研究的热点和重要成果, 在实验技术和实验测量方面的描述更为详尽。

本书可供对半导体自旋物理学感兴趣的研究生和初次涉足这一领域的研究人员使用, 对该领域的一线研究人员也极具参考价值。

Translation from the English language edition:

Handbook of the Solar-Terrestrial Environment by Yohsuke Kamide and Abraham C. L. Chian

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

Springer-Verlag London is part of Springer Science+Business Media, LLC

All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

半导体中的自旋物理学/(美) 迪阿科诺夫 (Dyakonov, M. I.) 主编;
姬扬译. —北京: 科学出版社, 2010

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-028286-6

I. 半… II. ①迪… ②姬… III. 自旋-半导体物理学 IV. O47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 133522 号

责任编辑: 王飞龙 张 静 唐保军/责任校对: 张 琪

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 王 浩

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>

北京佳信达版艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 7 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2010 年 7 月第一次印刷 印张: 26

印数: 1—2 500 字数: 496 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《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
郑有烱

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

中文版前言

我很高兴地了解到, 姬扬博士将该书翻译为中文.
全世界物理学家都了解中国科学研究的迅猛发展, 特别是固体中的自旋物理学.

我衷心地希望, 中国的学生和研究人员会认为这是一本既有趣又有用的书.

It was a great pleasure for me to know that this book will appear in Chinese, thanks to the translation done by Dr. Yang Ji.

The spectacular development in China of science in general, and spin physics in solids in particular, is well known to physicists around the globe.

I sincerely hope that Chinese students and researchers will find the book interesting and useful.

Michel Dyakonov

Montpellier, France Michel Dyakonov

Montpellier, France

前 言

本书旨在对半导体中与自旋相关的物理现象进行一个并不完全的概述, 重点在于近期的研究工作. 它可以被视为 *Optical Orientation* 一书的更新版, 后者关注的都是体材料半导体中的自旋物理学.

一方面, 在过去的 24 年中, 我们见证了令人激动的二维半导体物理学中非同寻常的进展以及相应的革命性的应用; 另一方面, 在过去的大约 15 年中, 人们对自旋现象, 特别是低维半导体结构中自旋现象的兴趣又强烈地复苏了. 在 20 世纪 70 年代和 80 年代, 全世界在此领域中的研究人员从来没有超过 20 人, 然而, 2008 年已经达到了几百人, 已经发表了几千篇论文. 这种爆炸式的发展在很大程度上是被某种希望所刺激起来的, 即半导体中的电子或原子核的自旋可能有助于实现用量子计算来进行大数分解的梦想, 从而最终发展出一种基于自旋的电子学, 即“自旋电子学”. 究竟是否能够实现这种愿望, 仍然有待于观察. 然而, 无论如何, 这些想法已经产生了许多非常有趣而又激动人心的研究工作, 这本身就是一件好事情.

半导体中的自旋物理学是一个丰富多彩而又激动人心的研究领域, 有着许多引人入胜的光学效应和输运效应. 我们相信, 本书概述了其中非常具有代表性的一部分内容. 我们已经尽力使本书对研究生和刚刚涉足这一领域的研究人员有所帮助.

Montpellier, Michel Dyakonov

2008 年 5 月

目 录

中文版前言

前言

第 1 章 半导体和自旋物理的基础知识	1
1.1 历史背景	1
1.2 自旋相互作用	2
1.2.1 泡利原理	2
1.2.2 交换相互作用	2
1.2.3 自旋-轨道相互作用	2
1.2.4 与原子核自旋的超精细相互作用	3
1.2.5 磁相互作用	4
1.3 半导体物理学基础	4
1.3.1 晶体中的电子能谱	4
1.3.2 电子和空穴的有效质量	4
1.3.3 有效质量近似	5
1.3.4 杂质的作用	5
1.3.5 激子	6
1.3.6 价带的结构, 轻空穴和重空穴	7
1.3.7 GaAs 的能带结构	9
1.3.8 光生载流子以及荧光	9
1.3.9 光学跃迁中的角动量守恒	11
1.3.10 低维半导体结构	11
1.4 半导体中的自旋物理学: 概览	13
1.4.1 光学自旋取向与探测	13
1.4.2 自旋弛豫	14
1.4.3 Hanle 效应	18
1.4.4 自旋流和电流的相互转化	19
1.4.5 电子与原子核系统之间的相互作用	20
1.5 本书内容概览	21
参考文献	23

第 2 章 量子阱中自由载流子的自旋动力学	26
2.1 导论	26
2.2 自旋动力学的光学测量	26
2.3 自由电子的自旋弛豫机制	28
2.4 体材料半导体中的自旋弛豫	31
2.5 [001] 取向量子阱中的电子自旋弛豫	33
2.5.1 对称的 [001] 取向的量子阱	33
2.5.2 [001] 取向量子阱中的结构反演不对称性	36
2.5.3 量子阱中的自然界面不对称性	38
2.5.4 二维电子气中的振荡自旋动力学	40
2.6 体材料和量子阱中自由空穴的自旋动力学	42
2.7 量子阱中自旋动力学的设计和控制	44
2.8 结论	46
参考文献	47
第 3 章 半导体量子阱中的激子自旋动力学	51
3.1 二维激子的精细结构	51
3.1.1 短程电子-空穴交换相互作用	52
3.1.2 电子-空穴的长程交换相互作用	53
3.2 量子阱中激子自旋的光学取向	53
3.3 量子阱中的激子自旋动力学	55
3.3.1 量子阱中的激子形成	56
3.3.2 激子中空穴的自旋弛豫	57
3.3.3 激子中电子的自旋弛豫	59
3.3.4 激子自旋弛豫机制	61
3.4 量子阱中的激子交换能和 g 因子	67
3.4.1 用连续光磁荧光谱来测量激子的交换能和 g 因子	67
3.4.2 激子的自旋拍	70
3.5 II 类量子阱中的激子自旋动力学	74
3.6 高密度激子系统自旋动力学	75
参考文献	79
第 4 章 半导体量子点中的激子自旋动力学	83
4.1 导论	83
4.2 量子点中的电子-空穴复合体	84
4.2.1 对单粒子图像的库仑修正	84

4.2.2 中性激子的精细结构	85
4.3 无外加磁场时中性量子点中的激子自旋动力学	86
4.3.1 共振激发下的激子自旋动力学	87
4.3.2 激子自旋的量子拍: 各向异性的交换相互作用的影响	88
4.4 有外磁场时中性量子点中的激子自旋动力学	89
4.4.1 单量子点光谱中塞曼效应与各向异性相互作用导致的劈裂之间的竞争	89
4.4.2 外磁场下激子自旋的量子拍	91
4.5 荷电激子复合体: 无磁场时的激子自旋动力学	92
4.5.1 荷电激子的形成: 掺杂结构和电荷可调结构	93
4.5.2 X^+ 和 X^- 激子的精细结构和偏振	93
4.5.3 带负电的激子复合体 X^{n-} 的自旋动力学	95
4.5.4 束缚电子的自旋记忆	96
4.6 带电荷的激子复合体: 外磁场中的自旋动力学	97
4.6.1 纵向磁场中带正电激子的电子自旋极化	97
4.6.2 垂直磁场中带正电的激子的电子自旋相干性	99
4.7 结论	100
参考文献	100
第 5 章 时间自旋分辨动力学和自旋噪声谱	106
5.1 导论	106
5.2 时间分辨和偏振分辨的光致荧光谱	107
5.2.1 实验技术	107
5.2.2 实验例证 I: (110) 量子阱中的自旋弛豫	109
5.2.3 实验例证 II: 半导体中耦合的电子和空穴自旋的相干动力学	111
5.2.4 光致荧光和自旋 - 光电器件	112
5.3 时间分辨法拉第/克尔旋转	113
5.3.1 实验装置	114
5.3.2 实验例证: 自旋放大	116
5.4 自旋噪声谱	117
5.5 n-GaAs 中的自旋噪声测量	119
5.6 结论	120
参考文献	121
第 6 章 载流子的相干自旋动力学	123
6.1 导论	123
6.1.1 自旋相干性和自旋退相位时间	123
6.1.2 用光学方法产生自旋相干的载流子	124

6.1.3 实验技术	125
6.2 量子阱中的自旋相干性	127
6.2.1 电子自旋相干性	128
6.2.2 空穴自旋相干性	138
6.3 带有单个电荷的量子点中的自旋相干性	140
6.3.1 用法拉第旋转来探测激子和电子的自旋拍频	140
6.3.2 电子自旋相干性的产生	143
6.3.3 量子点系综中自旋相干性的模式锁定	146
6.3.4 原子核诱导的自旋相干性的频率汇集	155
6.4 结论	160
参考文献	160
第 7 章 硅中受限电子的自旋性质	164
7.1 导论	164
7.2 硅量子阱中的自旋轨道效应	166
7.3 Si/SiGe 量子阱中导带电子的自旋弛豫	170
7.3.1 导带电子的自旋弛豫机制	170
7.3.2 Si/SiGe 中二维电子气的线宽和纵向弛豫时间	171
7.3.3 退相位和纵向自旋弛豫	175
7.3.4 与实验的比较	177
7.4 电流诱导的自旋-轨道场	178
7.5 交流电流引起的电子自旋共振	180
7.5.1 电偶极矩的自旋激发和磁偶极矩的自旋激发	180
7.5.2 二维 Si/SiGe 结构中的电子自旋共振信号的强度 —— 实验结果	181
7.5.3 电子自旋共振的电流诱导激发和探测的模型	182
7.5.4 功率吸收和线型	183
7.6 平面束缚下的自旋弛豫	184
7.6.1 浅施主杂质	185
7.6.2 从二维电子气到量子点	186
7.6.3 硅量子点中的自旋弛豫和退相位	187
7.7 结论	188
参考文献	189
第 8 章 自旋霍尔效应	193
8.1 背景: 分子气体中的磁输运	193
8.2 唯象理论: 具有反演对称性的情形	194
8.2.1 基本知识	194
8.2.2 自旋流和电流的耦合	195
8.2.3 唯象方程	195

8.2.4	自旋-电荷耦合的物理结果	196
8.2.5	相关的问题	199
8.2.6	自旋-轨道相互作用的二阶项的电效应	200
8.3	唯象理论: 不具有反演对称性的情形	202
8.4	微观机制	203
8.4.1	电子散射的自旋非对称性	204
8.4.2	侧跳机制	206
8.4.3	本征机制	210
8.5	实验	213
8.5.1	自旋霍尔效应的首次观测	214
8.5.2	二维空穴的自旋霍尔效应	214
8.5.3	二维电子的自旋霍尔效应	215
8.5.4	金属中逆自旋霍尔效应的观测	215
8.5.5	半导体中的室温自旋霍尔效应	217
8.6	结论	217
附录	推广的运动方程	217
	参考文献	219
第 9 章	自旋光电流效应	222
9.1	导论: 唯象描述	222
9.1.1	圆偏振光电流效应	222
9.1.2	自旋-电流效应和逆自旋-电流效应	223
9.1.3	纯粹的自旋光电流	223
9.1.4	磁致光电流效应	224
9.2	圆偏振光电流效应	224
9.2.1	历史背景	224
9.2.2	基本实验	224
9.2.3	子带间跃迁的微观模型	226
9.2.4	与 k 线性项的关系	226
9.2.5	子带间跃迁导致的圆偏振光电流效应	227
9.2.6	带间光学跃迁	229
9.2.7	对自旋敏感的漂白	230
9.3	自旋-电流效应	232
9.3.1	微观机制	233
9.3.2	Hanle 效应引起的自旋光电流	235
9.3.3	零磁场下的自旋-电流效应	236

9.3.4 Rashba/Dresselhaus 自旋劈裂比值的确定	237
9.4 逆自旋-电流效应	238
9.4.1 通过自旋翻转引起的电流诱导极化	239
9.4.2 进动的机制	240
9.4.3 电流诱导的自旋法拉第旋转	241
9.4.4 电流诱导的荧光偏振	242
9.5 纯自旋流	243
9.5.1 线偏振光注入的纯自旋流	243
9.5.2 依赖于自旋的散射导致的纯自旋流	246
9.6 总结	248
参考文献	248
第 10 章 自旋注入	253
10.1 导论	253
10.2 自旋注入和自旋堆积的理论模型	255
10.2.1 启发性的介绍	255
10.2.2 微观输运模型	258
10.2.3 自旋输运的热动力学理论	259
10.2.4 Hanle 效应	264
10.3 金属中的自旋注入实验	264
10.4 半导体中的自旋注入	267
10.4.1 光学实验	268
10.4.2 输运实验	271
10.5 相关主题	275
参考文献	276
第 11 章 动态原子核极化与原子核场	279
11.1 半导体的电子-原子核自旋系统: 有效场和自旋进动频率的特 征值	280
11.1.1 自旋能级的塞曼劈裂	280
11.1.2 四极矩相互作用	280
11.1.3 超精细相互作用	281
11.1.4 原子核偶极-偶极相互作用	282
11.2 原子核引起的电子自旋弛豫: 从短关联时间到长关联时间	283
11.3 原子核自旋的动态极化	285
11.3.1 电子自旋在 Overhauser 场中的劈裂	286

11.3.2	电子-原子核自旋系统在法拉第构型中的稳态	288
11.3.3	局域电子导致的动力学极化	288
11.3.4	原子核自旋系统的冷却	290
11.3.5	中性量子点中由激子引起的原子核极化	291
11.3.6	在隧穿耦合的量子点中由电流诱导的动态极化	292
11.3.7	原子核自旋的自极化	293
11.4	倾斜磁场中的原子核动态极化	294
11.4.1	电子自旋拉莫尔进动	295
11.4.2	倾斜磁场中电子-原子核自旋系统的极化	296
11.4.3	具有各向异性的 g 因子和自旋弛豫时间的结构中的电子-原子核自旋系统的双稳态	298
11.5	原子核磁共振的光学检测和光学诱导	299
11.5.1	光学检测原子核磁共振	299
11.5.2	多自旋和多量子态的核磁共振 NMR	300
11.5.3	光学诱导核磁共振 NMR	301
11.6	量子点的电子-原子核自旋系统中的自旋守恒	303
11.6.1	自旋方向保持不变的时间尺度和自旋温度	303
11.6.2	“自旋记忆”实验的解释	304
11.7	结论	308
	参考文献	308
第 12 章	量子霍尔效应区内的原子核自旋与电子自旋的相互作用	314
12.1	导论	314
12.1.1	量子霍尔效应简介	314
12.1.2	量子霍尔效应中的电子自旋现象	319
12.1.3	GaAs 基二维电子系统中的原子核自旋	322
12.2	实验技术	325
12.3	量子霍尔区的原子核自旋现象	326
12.3.1	无序的影响	327
12.3.2	边缘沟道的散射	328
12.3.3	斯格米子	331
12.3.4	$\nu = 2/3$ 处的原子核-电子自旋相互作用	333
12.3.5	在 $\nu = 2/3$ 处基于电阻测量的核磁共振	335
12.3.6	$\nu \sim 1/2$ 处的组合费米子的费米海	342
12.3.7	其他情形	345

12.4 总结和展望	346
参考文献	347
第 13 章 稀磁性半导体的基本物理学和光学性质	352
13.1 导论	352
13.2 II-VI 族和 III-V 族稀磁性半导体的能带结构	352
13.3 稀磁性半导体中的交换相互作用	354
13.3.1 s, p-d 交换相互作用	354
13.3.2 d-d 交换相互作用	356
13.4 磁性质	358
13.4.1 非掺杂的稀磁性半导体	358
13.4.2 载流子诱导的铁磁性	361
13.5 基本光学性质	364
13.5.1 巨塞曼效应	364
13.5.2 用光学方法检测 II-VI 族稀磁性半导体中的铁磁性	369
13.5.3 量子点	371
13.5.4 自旋光发射二极管	372
13.5.5 III-V 族稀磁性半导体	373
13.6 自旋动力学	375
13.6.1 s-d 交换相互作用引起的电子自旋弛豫	375
13.6.2 Mn 的自旋弛豫	376
13.6.3 CdMnTe 量子阱中的集体自旋激发	379
13.7 先进的时间分辨光学实验	382
13.7.1 载流子自旋动力学	382
13.7.2 磁化动力学	383
参考文献	387
译后记	393
《半导体科学与技术丛书》已出版书目	395

第1章 半导体和自旋物理的基础知识

M. I. Dyakonov

本章内容主要是面向初次涉足本领域的读者. 1.1 节简要回顾当前研究的历史根源; 1.2 节描述各种自旋相互作用; 1.3 节为初学者概要地介绍半导体物理学; 1.4 节简要地综述半导体中的自旋现象; 最后, 1.5 节介绍以后各章讨论的主题.

1.1 历史背景

在 1923~1924 年, Wood 迈出了通往当前研究工作的第一步, 那时候连自旋的概念都还没有. Wood 和 Ellett 在一篇引人入胜的文章中^[1] 曾描述到, 起初, 他们观测到 (被偏振光共振激发的) 水银蒸气的荧光具有很高的偏振度, 但是, 在后来的实验中, 偏振度显著地变小了. “我们注意到实验装置的方向与前期工作时有所不同, 将桌子连同其上的所有东西都转过 90° 之后, 也就是将观测方向置为东西方向, 我们立刻得到了大得多的偏振度.” 这样, Wood 和 Ellett 就发现了 Hanle 效应, 也就是说, 横向磁场 (在他们的实验中就是地磁场) 降低了荧光的偏振度. Hanle 对此效应进行了仔细的研究, 并作出了物理解释^[2].

直到 1949 年, 在 Brossel 和 Kastler^[3] 开始深入研究原子的光学泵浦之前, 这件事都没有得到多少关注; 在 20 世纪五六十年代, 巴黎的 Kastler 学派对此问题进行了深入的研究 (参见 Kastler 的诺贝尔奖获奖演说^[4]). 今天的“自旋电子学”研究的基本物理概念和实验技术都来自于这些经典文章. 用光学激发产生原子角动量的非平衡分布, 通过直流场或交流场来操纵这一分布, 并通过研究荧光的偏振度来探测结果. 原子角动量衰减的弛豫时间可以非常长; 在涉及原子核自旋导致的超精细分裂时, 更是如此.

这些研究已经派生出很多重要的应用, 比如说旋磁计和超灵敏的磁强计, 而从这些研究上获得的知识更为珍贵. 对于未来的发展 (比如说激光物理学) 来说, 深刻认识各种原子过程以及光与物质的相互作用是非常重要的.

在 1968 年, Lampel^[5] 第一个完成了半导体中电子的光学自旋取向实验, 这是原子物理学中的光学泵浦概念的直接应用. 最大的不同在于, 此时被自旋极化的是导带中的自由电子 (或空穴), 而非束缚在原子中的电子, 这一差异有着非常重要的结果. 在这一开创性的工作之后, 圣彼得堡 (列宁格勒) 的约飞研究所 (Ioffe Institute in

St. Petersburg (Leningrad)) 和巴黎的高等技术学院 (Ecole Polytechnique in Paris) 的几个研究小组, 在 20 世纪 70 年代和 80 年代初期, 开展了广泛的实验和理论研究工作. 当时, 物理学界的其他人对此研究几乎漠不关心.

1.2 自旋相互作用

本节列举了半导体材料中可能遇到的几种自旋相互作用.

电子具有自旋 $s = 1/2$ 和磁矩 $\mu = e\hbar/2mc$, 这导致了许多后果, 其中一些非常重要, 它们决定了世界的结构, 而另一些则比较微妙, 但也更加有趣. 下面按照重要性递减的次序列出这些结果.

1.2.1 泡利原理

因为电子是费米子, 自旋 $s = 1/2$, 所以在每个量子态上最多只能有一个电子. 这一原理, 和库仑定律以及薛定谔方程共同决定了原子的结构以及凝聚态物质的化学性质和物理性质 (包括生物学). 想象一下, 如果泡利原理不存在的话, 世界将会怎样? 那个世界将不会存在任何生命! 也许只有完全电离的高温等离子体的性质才不会有什么变化. 注意, 泡利不相容原理与任何相互作用都没有关系: 如果我们能够消除电子间的库仑斥力 (但保持原子核对它们的吸引力不变的话), 原子物理学将不会有什么重大的变化, 只需要对元素周期表进行一些修改就可以了.

电子自旋的其他表现来源于电的 (库仑定律) 或磁的 (与电子磁矩 μ_B 有关) 相互作用.

1.2.2 交换相互作用

交换相互作用实际上是电子间库仑静电相互作用的结果, 它依赖于自旋的原因在于, 一对电子在交换坐标和自旋之后, 它们的波函数必须是反对称的. 如果电子自旋是平行的, 那么波函数的坐标部分就必须是反对称的, $\psi_{\uparrow\uparrow}(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1) = -\psi_{\uparrow\uparrow}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$, 也就意味着两个电子彼此靠近的概率小; 如果电子自旋是反平行的, 那么波函数的坐标部分就是对称的, 两个电子彼此靠近的概率就大一些. 因此, 自旋相互平行的电子在空间上就离得远一些, 它们的排斥也就小一些, 从而静电相互作用能也要小一些.

在半导体中, 交换相互作用导致了铁磁性. 除了在铁磁半导体中 (如 CdMnTe) 和半导体-铁磁体界面上, 这通常并不重要.

1.2.3 自旋-轨道相互作用

如果观测者以速度 $\mathbf{v}$ 在外电场 $\mathbf{E}$ 中运动, 他将看到一个磁场 $\mathbf{B} = (1/c) \mathbf{E} \times \mathbf{v}$, 其中 c 为光速. 这个磁场作用到电子磁矩上, 这就是自旋-轨道相互作用的物理原