

安徽省自然科学基金项目

结 题 报 告

项 目 编 号 050460203

项 目 名 称 半导体自旋电子学中铁磁与半导
体界面及自旋注入的理论研究

承 担 单 位 中国科学技术大学物理系

项 目 主 持 人 吴明卫

安徽省自然科学基金委员会办公室

二〇〇七年制

一、结题项目简表

项目编号	050460203			项目主持人	吴明卫		
项目名称	半导体自旋电子学中铁磁与半导体界面及自旋注入的理论研究						
实际参加 人数(职称分 布)	高级	中级	初级	研究生		其它	
	1			5			
研究期限	计划完成年月			2006年12月			
	实际完成年月			2006年12月			
发表论文(篇)	16	其中:SCI收录(篇)		16	EI收录(篇)		ISTP收录(篇)
出版专著(万字)		参加学术会议(人次)			8	其中:国际会议	8(7个为邀请报告)
研究成果	科技成果(项)		申请发明专利(项)	其它专利(项)	已推广应用成果(项)		
学术奖励(项)	国家级	省部级	其它	人才培养(名)	博士后	博士	硕士
					2	5	
争取国家课题(项)		1	其中:国家自然科学基金(项)		1	经费(万元)	27
			其中:973计划(项)			经费(万元)	
			其中:国家攻关计划(项)			经费(万元)	
资助经费(万元)	5		现帐户余额(万元)		0		

二、项目完成情况

围绕着自旋电子学中自旋注入、自旋输运及自旋的进动、弛豫、去相位这些重要问题,从多体、单体以及介观物理三个层面展开研究,超额完成了研究计划,取得了一系列有特色的创新性成果。二年来,共完成SCI论文**16**篇,其中Phys. Rev. B **9**篇; Appl. Phys. Lett. **1**篇; J. Appl. Phys. **4**篇, Phys. Lett. A及Chin. Phys. Lett. 各**1**篇。这些论文被他人引用(包括在arxiv上被他引)**42**次,最高单篇他引**12**次。分别被邀请在2005年美国的ACS会议、日本的IEEE-Nano2005及巴西的拉美表面科学会议上作邀请报告。2006年被邀请在俄罗斯Ioffe研究所举办的半导体冬季学校上作1个半小时的(只有两个邀请报告为1个半小时)自旋电子学讲座。今年又被邀请,在2007年哥伦比亚举办的LDSD-2007、白俄罗斯举办的Nano-2007及美国举办的FOPS-2007国际会议上作邀请报告。此外,分别用中英文完成

了两篇总结文章，分别以一个章节发表在新加坡World Scientific和中国科学出版社的两本书中。

下面，我们分几个方面报告我们的研究成果。

由系综 Monte Carlo 研究自旋输运及注入

我们用系综 Monte Carlo 方法研究了自旋的注入：指出了自旋电注入极为困难的缘由。并且指出了文献中被用到的该方法在研究自旋输运中存在的问题。

[1] Y. Y. Wang and M. W. Wu, "*Schottky-barrier induced spin relaxation in spin injection*", Phys. Rev. B **72**, 153301 (2005).

自旋扩散及自旋输运

1. 我们在我们以前工作的基础上，更进一步，将电子-电子相互作用首次引入输运方程，进而研究了库仑拽引的效应。并提出了一系列新的现象。

[2] L. Jiang, M. Q. Weng, M. W. Wu, and J. L. Cheng, "*Diffusion and transport of spin pulses in an n-type semiconductor quantum well*", J. Appl. Phys. **98**, 113702 (2005).

2. 更进一步，我们发展了一套新的求解自旋输运方程的模式，可以用较小的 CPU 时间得到高精度的自旋输运解，并进而给出了决定自旋输运的非均匀扩展的表达式。

[3] J. L. Cheng and M. W. Wu, "*Spin diffusion/transport in n-type semiconductor quantum wells*", J. Appl. Phys. **101**, 073702 (2007).

自旋迟豫与自旋去相位

1. 我们发展了在自旋动力学框架下处理声学声子的方法，把我们的自旋动力学理论扩展到了低温区域。我们的理论结果可以从 20 K 到 300 K 和实验完全符合，并且无拟合参量。更为重要的是：我们预言了一个在自旋寿命-温度曲线中完全由库仑散射导致的峰。这一预言有着非常重要的意义：由于本人在 2000 年最早指出库仑散射对自旋去相位有着极为重要的意义。而在国际上普遍认为库仑散射不对自旋去相干有任何作用的。2002 年英国的 Harley 实验组间接证明库仑散射对自旋寿命有作用，但是国际上目前对这一观点并无统一认识。而我们提出的峰，是完全由库仑散射导致的，相当于库仑散射在自旋寿命-温度曲线中的指印，一旦在实验中作出此峰，就可给出库仑散射在自旋去相位中的直接证据，因而极为重要。Referee 专门指出：“The prediction of the peak in the spin relaxation time (SRT) at low temperatures as a footprint of Coulomb scattering effects in the quantum well electron spin dynamics is important enough to merit publication in the Physical Review B, and I hope it will attract the experimentalists' interest. Thus I strongly recommend acceptance of this manuscript.”目前，德国 Regensburg 大学的 Christian Schueller 教授已着手这一方面的实验验证。

[4] J. Zhou, J. L. Cheng, and M. W. Wu, "*Spin relaxation in n-type GaAs quantum wells from a fully microscopic approach*", Phys. Rev. B **75**, 045305 (2007).

2. 我们用我们建立的多体动力学的方法，系统研究了空穴型量子阱中轻、重空穴的自旋动力学。我

们指出了由于空穴型半导体中自旋-轨道耦合极强，导致非均匀扩展极强。因而空穴自旋的很多特性与电子极为不同。更为重要的是：我们发现库仑散射在有大的非均匀扩展时，会导致自旋寿命减短。这和电子情况不同。在我们以前的理论中发现：在电子情况中，加入库仑散射会导致自旋寿命变长，这一结果和以往熟知的光学领域中光学去相干的结果正好相反。通过本研究，我们指出了在强散射区，由于散射对非均匀扩展的反作用更为显著，因而加入空穴后自旋寿命变长；而在弱散射区，散射的反作用可忽略，加入库仑散射只增加一个去相干通道，因而自旋寿命变短。而在光学中，系统处于弱散射区。这就将自旋系统中的自旋去相位与光学系统中的光学去相位中库仑散射的作用等价了起来。

[5] C. Lü, J. L. Cheng, and M. W. Wu, "Hole spin dephasing in p-type semiconductor quantum wells", *Phys. Rev. B* **73**, 125314 (2006).

3. 我们给出了在Helix态下的自旋动力学方程，并证明了对于n型半导体，虽然Helix态是严格的本征态，但是用Collinear态是很好的近似。这对我们的理论体系极为重要。这是因为：用Helix态很难精确处理我们的动力学方程，但是用Collinear态可以得到高度精确的解，而我们以前所有的工作全在Collinear态下做的。这一工作从理论上证明了我们以前工作的可靠性。

[6] J. L. Cheng and M. W. Wu, "Spin relaxation under identical Dresselhaus and Rashba coupling strengths in GaAs quantum wells", *J. Appl. Phys.* **99**, 083704 (2006).

4. 我们将由我们多体理论及以前单体理论得到的自旋寿命与实验相比较，指出我们多体理论的结果，在定性及定量上，才与实验相符合[7]。另外，我们提出了用应力极大地提高自旋寿命的方案[8]。

[7] M. Q. Weng and M. W. Wu, "Many-body effect in spin dephasing in n-type GaAs quantum wells", *Chin. Phys. Lett.* **22**, 671 (2005).

[8] L. Jiang and M. W. Wu, "Control of spin coherence in n-type GaAs quantum wells using strain", *Phys. Rev. B* **72**, 033311 (2005).

THz 场作用下的自旋调控

我们研究了将 THz 电场平行地加入有 Rashba 自旋-轨道耦合的二维电子气，利用 Floquet 方法，得到了含时 Schrödinger 方程的严格解。更进一步，他们指出了在研究自旋问题时，自旋关联是不可忽略的。当自旋关联被忽略时，一些错误的理论会得出加入含时电场会导致自旋的劈裂，进而设计出自旋阀。而实际上，加入含时电场由于对称性的保证，是不会导致实验室系下自旋的分裂。此外，他们提出了在 x 方向加入一个 THz 电场，会在 y 方向诱发一个 THz 磁矩，这在磁性半导体中磁共振实验有极大的意义。

[9] J. L. Cheng and M. W. Wu, "Intense terahertz laser fields on a two-dimensional electron gas with Rashba spin-orbit coupling", *Appl. Phys. Lett.* **86**, 032107 (2005).

量子点

1. 独立于多体的自旋电子学研究，我们对于单个自旋的进行研究，这对于量子位的实现具有理论上的指导作用。我们在我们前面对电子型量子点中的自旋迟豫研究基础上 [J. L. Cheng, M. W. Wu, and C. Lü, "Spin relaxation in semiconductor quantum dots", *Phys. Rev. B* **69**, 115318 (2004).], 该文纠正了当前

文献中普遍存在的问题, 并被Ohio大学Destefani和Ulloa的验证 [PRB 72, 115326 (2005)], 已被他引了26次], 研究了空穴型量子点的自旋迟豫。

[10] C. Lü, J. L. Cheng, and M. W. Wu, "Hole spin relaxation in semiconductor quantum dots", Phys. Rev. B **71**, 075308 (2005).

2. 我们巧妙地利用门电压, 提出了在双量子点中实现自旋寿命高达七次方调控的设计。

[11] Y. Y. Wang and M. W. Wu, "Control of spin relaxation in double quantum dots", Phys. Rev. B **74**, 165312 (2006).

3. 我们在我们上面提到的工作 [9] 的基础上, 将 THz 激光引入含自旋轨道耦合的量子点系统中, 指出可以利用 THz 电场实现 THz 磁信号[12]。更进一步我们将耗散引入到 THz 含时系统, 指出了可以用强的 THz 场来调制自旋寿命[13]。

[12] J. H. Jiang, M. Q. Weng, and M. W. Wu, "Intense terahertz laser fields on a quantum dot with Rashba spin-orbit coupling", J. Appl. Phys. **100**, 063709 (2006).

[13] J. H. Jiang and M. W. Wu, "Spin relaxation in an InAs quantum dot in the presence of terahertz driving fields", Phys. Rev. B **75**, 035307 (2007).

介观方面

1. 我们在介观层面上研究了自旋的输运: 提出了一种空穴型自旋筛的设计[13]

[14] J. Zhou, M. Q. Weng, and M. W. Wu, "Spin-dependent hole quantum transport in Aharonov-Bohm ring structure: possible schemes for spin filter", Phys. Lett. A **349**, 393 (2006).

2. 在空穴型半导体中, 我们指出了磁单极对纯自旋流的产生及保持是毫无关系的, 这和国际上前一陣广为流传的观点是完全不同的; 此外, 我们指出对空穴型半导体, 即使自旋上下空穴间没有任何直接或间接关联, 也可以产生纯的自旋流。

[15] M. W. Wu and J. Zhou, "Spin-Hall effect in two-dimensional mesoscopic hole systems", Phys. Rev. B **72**, 115333 (2005).

其他

此外, 我们也研究了金刚石中的电子-空穴液滴的动力学, 成功地解释了东京大学的实验。

[16] J. H. Jiang, M. W. Wu, M. Nagai, and M. Kuwata-Gonokami, "Formation and decay of electron-hole droplets in diamond", Phys. Rev. B **71**, 035215 (2005).

国际会议邀请报告

1. M. W. Wu, "*Mesoscopic and Microscopic Spin Injection, Spin Precession, Spin Diffusion and Spin Transport in Semiconductor Nanostructures*", at Technical Session on Nanostructures for Quantum Device Technology at the 79th ACS Colloid and Surface Science Symposium, June 12-15, Potsdam, New York, **U.S.A.**, 2005.
2. M. W. Wu, "*Mesoscopic and Microscopic Spin Injection, Spin Precession, Spin Diffusion and Spin Transport in Semiconductor Nanostructures*", at IEEE-NANO2005, Nagoya, **JAPAN**, July 12-15, 2005.
3. M. W. Wu, "*Spin Injection, Spin Precession, Spin Diffusion and Spin Transport in Semiconductor Nanostructures*", at The Latin-American Conference on the Sciences of Surfaces and their Applications (CLACS-12), Angra dos Reis, State of Rio de Janeiro, **BRAZIL**, Dec. 5-9, 2005.
4. M. W. Wu, "*Spin dynamics in semiconductor nanostructures*", Lecture at Ioffe Physico-Technical Institute International Winter School 2006, St. Petersburg, **RUSSIA**, February 24-27, 2006. 这是会议中两个 1 个半小时报告之一。
5. M. W. Wu, "Spin dynamics in semiconductor nanostructures", at the sixth International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (LSDS 2007), The Archipelago of San Andres, **COLOMBIA**, April 15-20, 2007.
6. M. W. Wu, "Spin dynamics in semiconductor nanostructures", at Nanomeeting-2007, Minsk, **BELARUS**, May 22-25, 2007.
7. M. W. Wu, "Spin dynamics in semiconductor nanostructures", at conference on "Fundamental Optical Processes in Semiconductors" (FOPS 2007), Big Sky, Montana, **U.S.A.**, July 23-27, 2007.

项目主持人：(签字)

2007 年 5 月 22 日

三、论文论著目录（与本项目密切相关，按发表先后排序）

序	论文（著）名称	刊物名称、卷期（出版单位）	主持人在作者中排序	被收录情况	备注
1	Hole spin relaxation in semiconductor quantum dots	Phys. Rev. B 71 , 075308 (05)	3	SCI	被他引 10 次
2	Intense terahertz laser fields on a two dimensional electron gas with Rashba spin orbit coupling	Appl. Phys. Lett. 86 , 032107 (05)	2	SCI	被他引 5 次
3	Many-body effect in spin dephasing in n-type GaAs quantum wells	Chin. Phys. Lett. 22 , 671 (05)	2	SCI	被他引 1 次
4	Control of spin coherence in n-type GaAs quantum wells using strain	Phys. Rev. B 72 , 033311 (05)	2	SCI	被他引 4 次
5	Spin-Hall effect in two-dimensional mesoscopic hole systems	Phys. Rev. B 72 , 115333 (05)	1	SCI	被他引 12 次
6	Schottky-barrier -induced spin relaxation in spin injection	Phys. Rev. B 72 , 153301 (05)	2	SCI	被他引 3 次
7	Formation and decay of electron-hole droplets in diamond	Phys. Rev. B 71 , 035215 (05)	2	SCI	
8	Diffusion and transport of spin pulses in an n-type semiconductor quantum well	J. Appl. Phys. 98 , 113702 (05)	3	SCI	被他引 1 次

9	Spin-dependent hole quantum transport in Aharonov–Bohm ring structure: possible schemes for spin filter	Phys. Lett. A 349 , 393 (06)	2	SCI	
10	Hole spin dephasing in <i>p</i> -type semiconductor quantum wells	Phys. Rev. B 73 , 125314 (06)	3	SCI	被他引 2 次
11	Spin relaxation under identical Dresselhaus and Rashba coupling strengths in GaAs quantum wells	J. Appl. Phys. 99 , 083704 (06)	2	SCI	
12	Intense terahertz laser fields on a quantum dot with Rashba spin-orbit coupling	J. Appl. Phys. 100 , 063709 (06)	3	SCI	被他引 1 次
13	Control of spin relaxation in semiconductor double quantum dots	Phys. Rev. B 74 , 165312 (06)	2	SCI	被他引 2 次
14	Spin relaxation in <i>n</i> -type GaAs quantum wells from a fully microscopic approach	Phys. Rev. B 75 , 045305 (07)	3	SCI	被他引 1 次
15	Spin relaxation in an InAs quantum dot in the presence of terahertz driving fields	Phys. Rev. B 75 , 035307 (07)	2	SCI	
16	Spin diffusion/transport in <i>n</i> -type semiconductor quantum wells	J. Appl. Phys. 101 , 073702 (07)	2	SCI	
17	Spin dynamics in semiconductor nanostructures	in <i>Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting 2007, Proceedings of the International Conference on Nanomeeting 2007</i> , eds. V. E. Borisenko, V. S. Gurin, and S. V. Gaponenko (World Scientific, Singapore, 2007)	1		总结文章, 为白俄罗斯举办的 Nano-meeting 2007 上的邀请报告
18	半导体纳米结构中的自旋动力学及自旋调控	《量子力学朝花夕拾(II)》(科学出版社)中的一章	1		总结文章, 将出版