



项目批准号	90303012
申请代码	A040202
归口管理部门	
收件日期	

# 国家自然科学基金 资助项目结题报告

资助类别: 重大研究计划

亚类说明: 面上项目

附注说明: 理论物理学及其交叉科学若干前沿问题

项目名称: 自旋电子学的自旋去相干及自旋输运理论研究

负责人: 吴明卫 电话: 0551-3603524

电子邮件: mwwu@ustc.edu.cn

依托单位: 中国科学技术大学

联系人: 赵乌兰 电话: 0551-3601957

资助金额: 25(万元) 累计拨款: 25.0000(万元)

执行年限: 2004.01-2006.12

填表日期: 2007年1月16日

国家自然科学基金委员会制(2004年11月)



## 项目摘要

中文摘要(500字以内):

围绕着自旋电子学中自旋的进动、弛豫、去相位以及自旋输运这些重要问题,从多体、单体以及介观物理三个层面展开系统的研究,取得了一系列有特色的创新性成果。文章被他人多次引用。有些理论预言已被其后的实验验证。

关键词(不超过5个,用分号分开):自旋电子学;自旋输运;自旋去相位;自旋调控

Abstract(limited to 500 words):

Wu performed a systematic investigation on spin precession, spin relaxation and dephasing, and spin transport from many-body, single-particle and mesoscopic approaches. We have obtained many novel and important results. Our results are frequently cited by other groups. Some of our theoretical predictions have been realized experimentally.

Keywords(limited to 5 keywords,seperated by):Spintronics; Spin Transport; Spin Dephasing; Spin Manipulation



## 报告正文

围绕着自旋电子学中自旋的进动、弛豫、去相位以及自旋输运这些重要问题，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。三年来，共完成 SCI 论文 21 篇，其中 Phys. Rev. B 12 篇；Appl. Phys. Lett. 4 篇；J. Appl. Phys. 3 篇，Phys. Lett. A 及 Chin. Phys. Lett. 各 1 篇。这些论文被他人引用（包括在 arxiv 上被引）99 次，最高单篇他引 24 次。分别被邀请在 2004 年美国的 IEEE 会议、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。今年年底又收到邀请，在 2007 年哥伦比亚举办的 LDS-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。

下面，我们从多体、单体及介观三个方面报告我们的研究成果。

### 一、多体方面：

#### 1 自旋迟豫与自旋去相位

1. 在我们以前工作的基础上，我们成功地将热电子效应引入了自旋电子学，这在自旋电子学领域中尚属首次。众所周知，半导体热电子效应是由于小样品两端小的电位差可以对应于一个极大的电场，从而导致的远离平衡的效应。以往在电的输运中已有广泛研究，所用的方法无外乎 Monte Carlo 方法及平衡方程方法。在引入自旋轨道耦合后，上面两种方法都无法真正地描述在强场下的自旋的动力学。而在我们的理论框架中，这一效应可以得到很好的描述[1]，从而给出了很多预言。特别值得指出的是：我们在 2003 年最早提出，又在[1]中进一步讨论的自旋寿命随极化急剧增加这一远离平衡的预言，今年底已被德国 Resensburg 大学的实验组证实[D. Stich, J. Zhou, T. Korn, D. Schuh, W. Wegscheider, M. W. Wu, and C. Schüller, cond-mat/0612477]。进一步地，我们引入了多带的自旋动力学，在近、远离平衡下第一次明确了为什么有时自旋去相位时间会随温度上升，而有时却下降[2]。

[1] M. Q. Weng, M. W. Wu, and L. Jiang, "Hot-electron effect in spin dephasing in n-type GaAs quantum wells", Phys. Rev. B **69**, 245320 (2004).

[2] M. Q. Weng and M. W. Wu, "Multi-subband effect in spin dephasing in semiconductor quantum wells", Phys. Rev. B **70**, 195318 (2004).

2. 我们提出了用应力极大地提高自旋寿命的方案[3]。

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

3. 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是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).

5. 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).

6. 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).

7. 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] 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).

## 2 自旋扩散及自旋输运



1. 我们在我们 2003 年工作的基础上，对于自旋波包的输运进行了深入讨论。我们在 2003 年 1 月发表的文章中最早预言的在没有磁场时，自旋波包在扩散过程中可以发生自旋极化翻转及震荡（这正是由于在自旋输运方程中包含了自旋关联的结果），随后被 Clarkson 大学的 Y. V. Pershin 用包含了自旋关联的 Monte Carlo 模拟所重复[PRB **71**, 155317 (2005)]，并与 2004 年底被 Los Alamos 的 S.A. Crooker 及 D.L. Smith 实验所证实[PRL **94**, 236601 (2005)]。

[8] M. Q. Weng, M. W. Wu, and Q. W. Shi, "*Spin oscillations in transient diffusion of a spin pulse in n-type semiconductor quantum wells*", Phys. Rev. B **69**, 125310 (2004).

2. 我们更进一步，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[9]。

[9] 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).

## 二、单体方面：

### 1 量子点

1. 独立于多体的自旋电子学研究，我们新引入了对于单个自旋的研究，这对于量子位的实现具有理论上的指导作用。我们研究了电子型[10]及空穴型[11]量子点中的自旋迟豫，纠正了当前文献中普遍存在的问题。其中电子型量子点的文章[10]，已被 Ohio 大学 Destefani 和 Ulloa 的验证 [PRB **72**, 115326 (2005)]，并被引用了 23 次。

[10] J. L. Cheng, M. W. Wu, and C. Lü, "*Spin relaxation in semiconductor quantum dots*", Phys. Rev. B **69**, 115318 (2004).

[11] 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。

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

3. 我们在我们以前工作 [Cheng and Wu, APL **86**, 032107 (2005)] 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。

[13] 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).

### 2 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。

[14] 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).

该效应在量子点的实现发表在[13]。

### 3 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[15]。

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

## 三、介观方面

1. 我们在介观层面上研究了自旋的输运:提出了三种全新的电子型自旋筛设计[16-18],及一种空穴型自旋筛的设计[19]

[16] J. Zhou, Q. W. Shi, and M. W. Wu, "Spin-dependent transport in lateral periodic magnetic modulations: a scheme for spin filters", *Appl. Phys. Lett.* **84**, 365 (2004).

[17] M. W. Wu, J. Zhou, and Q. W. Shi, "Spin-dependent quantum transport in periodic magnetic modulations: Aharonov-Bohm ring structure as a spin filter", *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1012 (2004).

[18] Q. W. Shi, J. Zhou, and M. W. Wu, "Spin filtering through a double-bend structure", *Appl. Phys. Lett.* **85**, 2547 (2004).

[19] 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,这和国际上前一阵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。

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

## 四、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。

[21] J. H. Jiang, M. W. Wu, M. Nagai, and M. Kuwata-Gonokami, "Formation and decay of



## 国际会议邀请报告

1. 吴明卫, "*Spin Kinetics far away from Equilibrium in Semiconductors*" at 2004 IEEE NTC Quantum Device Technology Workshop, May 17-21, Potsdam, New York, **U.S.A.**, 2004.
2. 吴明卫, "*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.
3. 吴明卫, "*Mesoscopic and Microscopic Spin Injection, Spin Precession, Spin Diffusion and Spin Transport in Semiconductor Nanostructures*", at IEEE-NANO2005, Nagoya, **JAPAN**, July 12-15, 2005.
4. 吴明卫, "*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.
5. 吴明卫, "*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。



附表1、基金项目研究成果目录（栏目不够可自行增加）

序号	成果类型	成果或论文名称	主要完成者	成果说明	标注状况
1	专著				
1	期刊论文	"Hot-electron effect in spin dephasing in n-type GaAs quantum wells"	M. Q. Weng, M. W. Wu, and L. Jiang	Phys. Rev. B <b>69</b> , 245320 (2004). 被他引 <b>11</b> 次	标注资助 SCI收录
2	期刊论文	"Multi-subband effect in spin dephasing in semiconductor quantum wells"	M. Q. Weng and M. W. Wu	Phys. Rev. B <b>70</b> , 195318 (2004). 被他引 <b>3</b> 次	标注资助 SCI收录
3	期刊论文	"Control of spin coherence in n-type GaAs quantum wells using strain"	L. Jiang and M. W. Wu	Phys. Rev. B <b>72</b> , 033311 (2005). 被他引 <b>4</b> 次	标注资助 SCI收录
4	期刊论文	"Spin relaxation in n-type GaAs quantum wells from a fully microscopic approach"	J. Zhou, J. L. Cheng and M. W. Wu	Phys. Rev. B <b>75</b> , 045305 (2007)	标注资助 SCI收录
5	期刊论文	"Hole spin dephasing in p-type semiconductor quantum wells"	C. Lü, J. L. Cheng, and M. W. Wu	Phys. Rev. B <b>73</b> , 125314 (2006). 被他引 <b>1</b> 次	标注资助 SCI收录
6	期刊论文	"Spin relaxation under identical Dresselhaus and Rashba coupling strengths in GaAs quantum wells"	J. L. Cheng and M. W. Wu	J. Appl. Phys. <b>99</b> , 083704 (2006).	标注资助 SCI收录
7	期刊论文	"Many-body effect in spin dephasing in n-type GaAs quantum wells"	M. Q. Weng and M. W. Wu	Chin. Phys. Lett. <b>22</b> , 671 (2005). 被他引 <b>1</b> 次	标注资助 SCI收录
8	期刊论文	"Spin oscillations in transient diffusion of a spin pulse in n-type semiconductor quantum wells"	M. Q. Weng, M. W. Wu, and Q. W. Shi	Phys. Rev. B <b>69</b> , 125310 (2004). 被他引 <b>8</b> 次	标注资助 SCI收录
9	期刊论文	"Diffusion and transport of spin pulses in an n-type semiconductor quantum well"	L. Jiang, M. Q. Weng, M. W. Wu, and J. L. Cheng	J. Appl. Phys. <b>98</b> , 113702 (2005). 被他引 <b>1</b> 次	标注资助 SCI收录
10	期刊论文	"Spin relaxation in semiconductor quantum dots"	J. L. Cheng, M. W. Wu, and C. Lü	Phys. Rev. B <b>69</b> , 115318 (2004). 被他引 <b>24</b> 次	标注资助 SCI收录
11	期刊论文	"Hole spin relaxation in"	C. Lü, J. L. Cheng, and M.	Phys. Rev. B <b>71</b> , 075308 (2005)	标注资助





		<i>semiconductor quantum dots</i> "	W. Wu	被他引7次	SCI收录
12	期刊论文	"Control of spin relaxation in double quantum dots"	Y. Y. Wang and M. W. Wu	Phys. Rev. B <b>74</b> , 165312 (2006). 被他引1次	标注资助 SCI收录
13	期刊论文	"Intense terahertz laser fields on a quantum dot with Rashba spin-orbit coupling"	J. H. Jiang, M. Q. Weng, and M. W. Wu	J. Appl. Phys. <b>100</b> , 063709 (2006). 被他引1次	标注资助 SCI收录
14	期刊论文	"Intense terahertz laser fields on a two-dimensional electron gas with Rashba spin-orbit coupling"	J. L. Cheng and M. W. Wu	Appl. Phys. Lett. <b>86</b> , 032107 (2005). 被他引5次	标注资助 SCI收录
15	期刊论文	"Schottky-barrier induced spin relaxation in spin injection"	Y. Y. Wang and M. W. Wu	Phys. Rev. B <b>72</b> , 153301 (2005). 被他引3次	标注资助 SCI收录
16	期刊论文	"Spin-dependent transport in lateral periodic magnetic modulations: a scheme for spin filters"	J. Zhou, Q. W. Shi and M. W. Wu	Appl. Phys. Lett. <b>84</b> , 365 (2004) 被他引9次	标注资助 SCI收录
17	期刊论文	"Spin-dependent quantum transport in periodic magnetic modulations: Aharonov-Bohm ring structure as a spin filter"	M. W. Wu, J. Zhou, and Q. W. Shi	Appl. Phys. Lett. <b>85</b> , 1012 (2004). 被他引4次	标注资助 SCI收录
18	期刊论文	"Spin filtering through a double-bend structure"	Q. W. Shi, J. Zhou, and M. W. Wu	Appl. Phys. Lett. <b>85</b> , 2547 (2004). 被他引5次	标注资助 SCI收录
19	期刊论文	"Spin-dependent hole quantum transport in Aharonov-Bohm ring structure: possible schemes for spin filter"	J. Zhou, M. Q. Weng, and M. W. Wu	Phys. Lett. A <b>349</b> , 393 (2006).	标注资助 SCI收录
20	期刊论文	"Spin-Hall effect in two-dimensional mesoscopic hole systems"	M. W. Wu and J. Zhou	Phys. Rev. B <b>72</b> , 115333 (2005) 被他引11次	标注资助 SCI收录
21	期刊论文	"Formation and decay of electron-hole droplets in diamond"	J. H. Jiang, M. W. Wu, M. Nagai, and M. Kuwata-Gonokami	Phys. Rev. B <b>71</b> , 035215 (2005).	标注资助 SCI收录
1	会议论文	"Spin Kinetics far away from Equilibrium in Semiconductors"	M. W. Wu	2004 IEEE NTC Quantum Device Technology Workshop, May 17-21,	国际会议邀请报告



				Potsdam, New York, <b>U.S.A.</b> , 2004	
2	会议论文	"Mesoscopic and Microscopic Spin Injection, Spin Precession, Spin Diffusion and Spin Transport in Semiconductor Nanostructures"	M. W. Wu	Technical Session on Nanostructures for Quantum Device Technology at the 79th ACS Colloid and Surface Science Symposium, June 12-15, Potsdam, New York, <b>U.S.A.</b> , 2005.	国际会议邀请报告
3	会议论文	"Mesoscopic and Microscopic Spin Injection, Spin Precession, Spin Diffusion and Spin Transport in Semiconductor Nanostructures"	M. W. Wu	IEEE-NANO2005, Nagoya, <b>JAPAN</b> , July 12-15, 2005.	国际会议邀请报告
4	会议论文	"Spin Injection, Spin Precession, Spin Diffusion and Spin Transport in Semiconductor Nanostructures"	M. W. Wu	The Latin-American Conference on the Sciences of Surfaces and their Applications (CLACS-12), Angra dos Reis, State of Rio de Janeiro, <b>BRAZIL</b> , Dec. 5-9, 2005	国际会议邀请报告
5	会议论文	"Spin dynamics in semiconductor nanostructures"	M. W. Wu	Ioffe Physico-Technical Institute International Winter School 2006, St. Petersburg, <b>RUSSIA</b> , February 24-27, 2006. 这是会议中两个 1 个半小时报告之一。	国际会议邀请报告

- 注1、“成果类型”栏，分为“专著 / 期刊论文 / 会议论文 / 专利 / 获奖 / 其他”六类，请归类集中填写并单独编号；
- 注2、“成果说明”栏，用于填写如刊物名、获奖类别、级别等必要的说明和便于其他人查询的信息，具体要求见撰写提纲；
- 注3、“标注状态”栏，用于说明有无标注“自然科学基金资助”及项目批准号等，具体要求见撰写提纲。