



项目批准号	10574120
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: 面上项目

亚类说明: _____

附注说明: _____

项目名称: 受限空穴型半导体的自旋动力学理论研究

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: 27(万元) 累计拨款: 27.0000 (万元)

执行年限: 2006.01-2008.12

填表日期: 2009年2月1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):

我们对受限空穴型和电子型半导体系统中的自旋动力学进行了系统的研究。围绕其中的自旋弛豫和去相位、自旋输运和自旋调控,我们得到了很多新颖而重要的结论和预言。其中一些已被实验证实。我们的成果被同行广泛的引用。

关键词(不超过5个,用分号分开):自旋动力学;受限半导体系统;自旋弛豫和去相位;自旋输运;自旋调控

Abstract(limited to 500 words):

We have performed a systematic study on spin dynamics in confined semiconductor system for both p-type and n-type materials. Focusing on spin relaxation/dephasing, spin transport, and spin manipulation, we have obtained many novel and important results and predictions. Some of these predictions have been confirmed by experiments. Our results are cited by other groups.

Keywords(limited to 5 keywords,seperated by;):Spin Dynamics; Confined Semiconductor System; Spin Relaxation/Dephasing; Spin Transport; Spin Manipulation



报告正文

我们系统地研究了受限空穴型和电子型半导体系统中的自旋动力学。主要围绕其中的自旋弛豫、自旋去相位和自旋输运，取得了一系列成果，超额完成了研究计划。三年来，共发表SCI论文30篇，在俄罗斯、哥伦比亚、白俄罗斯、美国、印度及巴西召开的国际会议上作邀请报告7次。发表文章分布情况为：Phys. Rev. B 16篇；J. Appl. Phys. 6篇；Physica E 3篇；Phys. Rev. Lett.、Europhys. Lett.、Appl. Phys. Lett.、J. Phys.: Condens. Matter及Phys. Lett. A 各1篇。此外，应 Nanomeeting-2007的邀请，我们撰写了一篇关于我们近几年的研究工作的综述性文章。这些论文被他人引用（包括在arXiv上被引）70次，最高单篇他引11次。其中2007年的一篇文章，在2008年被中国科学信息研究所评为中国百篇最具影响国际学术论文。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个半小时的邀请报告（只有两个邀请报告为1个半小时）。2007年在哥伦比亚举办的LDS-2007、白俄罗斯举办的Nano-2007、美国举办的FOPS-2007、印度举办的SSPS-2007国际会议上作邀请报告。2008年在俄罗斯举办的第16届International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology"和巴西举办的ICSNN-2008会议上作邀请报告。

下面，我们从自旋弛豫和去相位、自旋输运、自旋调控这三个方面报告我们的研究成果。

一. 自旋弛豫和去相位方面

1. 受限空穴系统：

1. 我们用我们建立的动力学自旋Bloch方程方法，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。值得指出的是，该文章中预言的自旋寿命随浓度的依赖关系，已被我们其后的实验证实（见后面1.2.5）。

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

2. 另外，之前的研究都是基于Markov近似的，对于自旋-轨道耦合比较小的系统，这个近似是很好的。而空穴系统中的自旋-轨道耦合极强，导致非均匀扩展极强。因而需要用非Markov的动力学进行研究。我们把运动方程扩展到非Markov的情况，并预言了由非Markov效应导致的自旋的量子拍。目前正推动实验验证。

[2] P. Zhang and M. W. Wu, "Non-Markovian hole spin kinetics in p-type GaAs quantum wells", Phys. Rev. B **76**, 193312 (2007).

3. 我们还研究了在量子线中空穴的自旋弛豫，发现自旋弛豫时间可以通过空穴浓度、温



度、量子线的几何形状等进行有效的调节。这些发现有待实验验证。

[3] C. Lü, U. Zülicke, and M. W. Wu, "*Hole spin relaxation in p-type GaAs quantum wires investigated by numerically solving fully microscopic kinetic spin Bloch equations*", Phys. Rev. B **78**, 165321 (2008).

2. 受限电子系统：多体系统

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 20K 到 300K 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，一旦在实验中做出此峰，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。该预言已被半导体所姬扬研究组的实验初步证实[Ruan, Luo, Ji, Xu, and Umansky, Phys. Rev. B **77**, 193307 (2008)]. 该论文在 2008 年被中国科学信息研究所评为中国百篇最具影响国际学术论文。

[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。

[5] 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).

3. 我们和德国 Regensburg 大学的 Schüller 教授实验组合作，**成功地在实验上验证了我们在 2003 年 [Weng and Wu, Phys. Rev. B **68**, 075312 (2003)] 提出的在大自旋极化下自旋的动力学行为的一系列理论预言**。实验结果和我们的理论预言高度一致。论文发表后，即获 11+4 次他引。

[6] D. Stich, J. Zhou, T. Korn, R. Schulz, D. Schuh, W. Wegscheider, M. W. Wu, and C. Schüller, "*Effect of initial spin polarization on spin dephasing and electron g factor in a high-mobility two-dimensional electron system*", Phys. Rev. Lett. **98**, 176401 (2007).

[7] D. Stich, J. Zhou, T. Korn, R. Schulz, D. Schuh, W. Wegscheider, M. W. Wu, and C. Schüller, "*Dependence of spin dephasing on initial spin polarization in a high-mobility two-dimensional electron system*", Phys. Rev. B **76**, 205301 (2007).



4. 我们和德国Regensburg大学的Schüller教授实验组合作, 运用我们的自旋动力学理论, 在几乎没有拟合参量的情况下, 成功地解释了在同时有 Dresselhaus和Rashba项的GaAs量子阱系统中, 自旋寿命随磁场的高度各向异性的实验结果, 理论计算结果和实验高度一致。

[8] D. Stich, J. H. Jiang, T. Korn, R. Schulz, D. Schuh, W. Wegscheider, M. W. Wu, and C. Schüller, "*Detection of large magneto-anisotropy of electron spin dephasing in a high-mobility two-dimensional electron system in a [001] GaAs/AlGaAs quantum well*", Phys. Rev. B **76**, 073309 (2007).

5. 我们和中山大学赖天树实验组合作, 证实了我们2006年文章[Lü, Cheng, Wu, Phys. Rev. B **73**, 125314 (2006)]中的一个理论预言: 在二维电子气中, 当线性Dresselhaus项为主时, 自旋寿命随载流子浓度上升而上升; 而当三次方项为主时, 则随载流子浓度上升而下降。实验结果和我们的预言完全一致。

[9] L. H. Teng, P. Zhang, T. S. Lai, and M. W. Wu, "*Density dependence of spin relaxation in GaAs quantum well at room temperature*", Europhys. Lett. **84**, 27006 (2008).

6. 我们将我们以前强场下的动力学自旋Bloch理论[Weng and Wu, PRB **69**, 245320 (2004); PRB **70**, 195318 (2004)], 推广到包含多能谷下的自旋动力学方程, 并系统研究了在强场下的自旋动力学[7]。特别是, 我们发现虽然不同能谷的自旋-轨道耦合[8]及g因子[9]相差极大, 但是由于强的谷间声子散射, 不同谷的自旋寿命及在磁场下得自旋进动频率是完全相同的。这一结论和我们2004年在量子阱不同子带的自旋寿命的预言相一致 [Weng and Wu, PRB **70**, 195318 (2004)], 而该预言已在今年被郑厚植院士的实验所证实[Zhang, Zheng, Ji, Liu, Li, Europhys. Lett. **83**, 47007 (2008)]。所不同的是, 在量子阱中子带间的散射是库仑散射, 而在不同能谷间的散射是电-声散射。目前我们正在推动这一预言的实验证实。此外, 我们结果还表明, 用平行电场即可有效调控自旋寿命。

[10] P. Zhang, J. Zhou, and M. W. Wu, "*Multivalley spin relaxation in the presence of high in-plane electric fields in n-type GaAs quantum wells*", Phys. Rev. B **77**, 235323 (2008).

[11] J. Y. Fu, M. Q. Weng, and M. W. Wu, "*Spin orbit coupling in bulk GaAs*", Physica E **40**, 2890 (2008).

[12] K. Shen, M. Q. Weng, and M. W. Wu, "*L-valley electron g-factor in bulk GaAs and AlAs*", J. Appl. Phys. **104**, 063719 (2008).

7. 我们将动力学自旋Bloch方程理论推广到在强THz场驱动下、包含所有散射(包括电子-电子库仑散射)的情况下, 并全面系统地研究了自旋的动力学行为, 给出了大量的预言(该文有16页)。目前英国 University of Surrey的B. N. Murdin教授正和我们合作, 从实验上证实我们的预言。

[13] J. H. Jiang, M. W. Wu, and Y. Zhou, "*Kinetics of spin coherence of electrons in n-type InAs*"



quantum wells under intense terahertz laser fields", Phys. Rev. B **78**, 125309 (2008).

8. 我们用我们的动力学自旋Bloch方程理论，重新研究了BAP机制对本征及空穴型量子阱电子自旋迟豫的贡献，发现以往文献中普遍认为的BAP机制在低温下是决定自旋迟豫的机制是错误的。并指出了以往单体理论错误的原因。该发现，已被香港大学崔晓东实验组所证实（他们的文章正在PRB送审，文章见arXiv:0902.0484）。

[14] J. Zhou and M. W. Wu, "*Spin relaxation due to the Bir-Aronov-Pikus mechanism in intrinsic and p-type GaAs quantum wells from a fully microscopic approach*", Phys. Rev. B **77**, 075318 (2008).

9. 我们还讨论了GaAs量子阱二维电子气的Local Field Correlation对自旋弛豫的影响。

[15] J. Zhou, "*Effect of Singwi-Tosi-Land-Sjölander local field correction on spin relaxation in n-type GaAs quantum wells at low temperature*", Physica E **41**, 50 (2008). [此文为本人指导的研究生的工作，由于该文对本人来说物理不够新颖，因而本人没做共同作者，仅在感谢中注明本人贡献]

2. 受限电子系统：量子点系统

1. 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个量级的调节的设计。

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

2. 我们在量子点的自旋动力学方面，进行了系统的研究：在一篇长达19页的文章中，我们发展了一套运动方程的方法，并用该方法对量子点的自旋迟豫时间及自旋退相干时间进行了全面系统的研究[17]。我们的研究发现以往文献中广泛采用的费米黄金规则在强自旋轨道耦合及高温时，是不适用于自旋寿命的计算。此外，我们发现以往所有理论全都忽略了自旋-轨道耦合对能谱的修正，从而使得各种自旋迟豫及退相干机制的相对重要性发生错误。我们通过重新计算各种机制的贡献，重新认识了GaAs量子点的自旋迟豫及退相干随各种条件的变化。进而我们用该方法，研究了双量子点中自旋迟豫及退相干的调控[18]。

[17] J. H. Jiang, Y. Y. Wang, and M. W. Wu, "*Reexamination of spin decoherence in semiconductor quantum dots from equation-of-motion approach*", Phys. Rev. B **77**, 035323 (2008).

[18] Y. Y. Wang and M. W. Wu, "*Control of spin coherence in semiconductor double quantum dots*", Phys. Rev. B **77**, 125323 (2008).

3. 我们将耗散引入到强THz场驱动量子点系统中，研究了THz场对自旋弛豫的调控。据我们所知，这是在含时自旋系统中最早引入耗散的工作。

[19] 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).

4. 此外我们研究了量子点中两个电子组成的单三态之间的弛豫，我们发现文献中对单三态之间的弛豫所采用的选择定则是不对的。我们给出了正确的理论，并推广到双量子点系统。

[20] K. Shen and M. W. Wu, "*Triplet-singlet relaxation in semiconductor single and double quantum dots*", Phys. Rev. B **76**, 235313 (2007).

二. 自旋输运方面

1. 我们发展了一套新的计算自旋输运的数值计算格式，可以高精度及快速地求解自旋动力学Bloch方程。我们预言了在自旋输运中存在的不可逆自旋注入长度与系综自旋注入长度相等 [21]。同样，在空间均匀系统中存在不可逆自旋去相干时间与系综自旋去相干时间相同 [22]。这些预言都有待实验验证。

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

[22] C. Lü, J. L. Cheng, M. W. Wu, and I. C. da Cunha Lima, "*Spin relaxation time, spin dephasing time and ensemble spin dephasing time in n-type GaAs quantum wells*", Phys. Lett. A **365**, 501 (2007).

2. 我们指出了以往文献中被广泛忽略的自旋注入方向对自旋注入各向异性的重要影响。并预言了在有相同Dresselhaus和Rashba强度时，当自旋注入方向沿着[-110]方向时，无论自旋极化沿着什么方向，自旋注入长度会无穷大。这对自旋电子学实验有着非常重要的意义，这是由于实验中产生的自旋极化都是沿着在z方向，而以往产生大自旋注入长度的理论预言都要求自旋极化沿着垂直于z轴的量子阱平面。

[23] J. L. Cheng, M. W. Wu, and I. C. da Cunha Lima, "*Anisotropic spin transport in GaAs quantum wells in the presence of competing Dresselhaus and Rashba spin-orbit coupling*", Phys. Rev. B **75**, 205328 (2007).

3. 此外我们研究了自旋光栅下自旋扩散。指出在有自旋-轨道耦合时，以往文献用基于无自旋进动的漂移-扩散方程得到的自旋扩散长度公式是不正确的，并给出了正确的公式 [24]。我们也用动力学自旋Bloch方程理论研究了自旋-Hall效应 [25]。

[24] M. Q. Weng, M. W. Wu, and H. L. Cui, "*Spin relaxation in n-type GaAs quantum wells with transient spin grating*", J. Appl. Phys. **103**, 063714 (2008).

[25] J. L. Cheng and M. W. Wu, "*Kinetic investigation on extrinsic spin Hall effect induced by skew scattering*", J. Phys.: Condens. Matter **20**, 085209 (2008).



三. 自旋调控

1. 我们在以前工作[Cheng and Wu, Appl. Phys. Lett. **86**, 032107 (2005)]的基础上, 将强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。

[26] 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. 另外, 我们也研究了强THz激光对含自旋轨道耦合的空穴系统的影响。

[27] Y. Zhou, "*Intense terahertz laser fields on a two-dimensional hole gas with Rashba spin-orbit coupling*", Physica E **40**, 2847 (2008). [此文为本人指导的本科论文, 由于该文对本人来说物理不够新颖, 因而本人没做共同作者, 仅在感谢中注明本人贡献]

四. 其他

1. 基于K·P方法对自旋轨道耦合和 g 因子的研究

1. 我们研究了GaAs整个布里渊区内导带的自旋轨道耦合, 不仅包括 Γ 谷, 还包括L谷和X谷[11]。另外还研究了GaAs和AlAs中L谷的 g 因子[12]。这些信息对于研究GaAs

2. 为了和法国Xavier Marie教授的实验相呼应, 我们研究了ZnO及GaN的自旋-轨道耦合。

[28] J. Y. Fu and M. W. Wu, "*Spin-orbit coupling in bulk ZnO and GaN*", J. Appl. Phys. **104**, 093712(2008).

2. 介观体系中的自旋量子输运

1. 我们设计了一个基于T形结构的远端控制的自旋过滤器, 并表明该器件的Robustness很好。

[29] X. Y. Feng, J. H. Jiang, and M. Q. Weng, "*Remote-control spin filtering through a T-type structure*", Appl. Phys. Lett. **90**, 142503 (2007). [此文为本人指导的本科论文, 由于该文对本人来说物理不够新颖, 因而本人没做共同作者, 仅在感谢中注明本人贡献]

2. 在此基础上利用Fano-Rashba效应提供的反共振, 我们发现当结构反共振和Fano反共振重合时, 可以打开一个能隙, 从而可以显著的提高器件的On-Off电流比和Robustness.

[30] K. Shen and M. W. Wu, "*Robust strongly-modulated transmission of a T-shaped structure with local Rashba interaction*", Phys. Rev. B **77**, 193305 (2008).



五. 综述

应Nanomeeting-2007的邀请，我们撰写了一篇关于我们近几年研究工作的综述文章：

[1] M. W. Wu, M. Q. Weng, and J. L. Cheng, "*Spin dynamics in semiconductor nanostructures*", in "*Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting 2007*", eds. V. E. Borisenko, V. S. Gurin, and S. V. Gaponenko (World Scientific, Singapore, 2007), p. 14.

国际会议邀请报告

1. 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。
2. 吴明卫, "*Spin dynamics in semiconductor nanostructures*" (**Invited**), at the sixth International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (LDS 2007), The Archipelago of San Andres, **COLOMBIA**, April 15-20, 2007.
3. 吴明卫, "*Spin dynamics in semiconductor nanostructures*", (**Invited**), at Nanomeeting-2007, Minsk, **BELARUS**, May 22-25, 2007.
4. 吴明卫, "Spin dynamics in semiconductor nanostructures from a fully microscopic approach", (**Invited**), at conference on "Fundamental Optical Processes in Semiconductors" (FOPS 2007), Big Sky, Montana, **USA**, July 23-27, 2007.
5. 吴明卫, "Spin dynamics in semiconductor nanostructures from a fully microscopic approach", (**Invited**), at the 52nd DAE Solid State Physics Symposium (SSPS-2007), Mysore, **INDIA**, December 27-31, 2007.
6. 吴明卫, "Spin dynamics in semiconductor quantum wells and quantum dots" (**Invited**), at the 16th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", Vladivostok, **RUSSIA**, July 14-19, 2008.
7. 吴明卫, "Spin dynamics in semiconductor nanostructures from a fully microscopic approach" (**Invited**), at The 15th International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN 2008), Natal, **BRAZIL**, August 3-8, 2008.