

# 中国科学院“百人计划”入选者 终期考核评估表

单 位 中国科学技术大学

姓 名 吴明卫

从事专业 凝聚态物理

入选年度 2000 年

是否获得院资助

入选者现任职务 教授，博士生导师

到岗工作时间 2002 年 1 月

年在岗工作时间 11 个月

中国科学院人事教育局制

## 说 明

- 一、请入选者实事求是地填写表中内容。
- 二、封面中的“入选时间”、“到岗工作时间”、“年在岗工作时间”必须填写，否则视材料无效。所在单位需在封皮“单位”处加盖单位公章。
- 三、入选者还需附入选者与招聘单位签定的工作任务书，中期检查有关材料，获奖证明等相关材料。

## 研究工作进展总体情况

(包括已完成科学目标、成果在该领域所处地位、发表论文论著、获奖和经费情况、实验室环境、人才队伍建设)

三年来，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，我们从多体、单体以及介观物理三个层面展开研究，并取得了一定的成果，完成了“百人计划”工作任务书中预定的工作任务和目标。尤其在多体方面，我们做了一系列有特色的创新性工作。此外，我们也在量子纠缠，电子-空穴液滴的动力学以及 TMR 方面也开展了一点工作。

### 主要研究成果:

**建立了一套  $n$  型半导体中自旋进动及去相位的多体动力学理论，提出了一种新的自旋去相位机制:**

以前所有的自旋动力学理论全是建立在几十年前的单电子图象上的，因而无法解释一些实验结果（如自旋去相位（dephasing）时间随温度增加等）。我们最早给出了建立在多体基础上的自旋动力学理论。这一理论可以完整地描述电子及其自旋被飞秒激光激发后随时间的演化的全过程以及电子-电子、电-声子、电子-杂质相互作用引起的电子自旋相干性、电子光学相干性的去相位和能量的弛豫。在这一新的理论基础之上，我们还提出了一个新的自旋去相位机制，即由自旋守恒散射导致的自旋去相位（而以前的自旋去相位机制，需要有自旋翻转（spin flip）或有效自旋翻转散射），这是以前单电子理论完全无法给出的；此外，根据这一机制，我们最早指出了电子-电子相互作用可以导致自旋的去相位，而以前所有文献中都指出，电子-电子相互作用对自旋地去相位是没有贡献的。目前，国际上认为电子-电子相互作用对自旋去相位有贡献的除了我们以外，尚有俄罗斯的 Ivchenko 研究组。但是，后者只研究了电子-电子的两体相互作用，因而只在低温下（ $<100\text{K}$ ）有贡献，而我们的理论却包括了多体相互作用：我们发现在高温下电子-电子散射也有很大的贡献。此外，在我们的多体理论中，电子的分布函数及自旋的关联函数都是自洽求解得到的。因此，不仅包括了由于 Dresselhaus 及 Rashba 自旋轨道耦合对动量的依赖导致的自旋进动的非均匀（Inhomogeneous broadening）导致的自旋去相位，而且还包含了由于散射对非均匀扩展的反作用，这在其他理论中都没能讨论。

我们的研究表明，这一长久以来被忽略的自旋去相位机制在  $n$  型半导体的自旋去相位中起了决定性的作用。我们发现在现在广泛关心的  $n$  型半导体的自旋去相位是完全由多体机制导致的，而不是像以前认为的完全由单体效应决定。我们基于多体理论得到的自旋去相位时间与温度关系、杂质浓度关系，与现在单体理论得到的结果完全相反，但是同实验结果很好地符合。

在这一理论框架下，我们研究了不同的  $n$  型半导体量子阱、量子线以及体材料中的自旋动力学，解释了很多实验并提出了大量的预言。

### 远离平衡态的自旋动力学理论:

由于我们成功地解决了电子-电子库仑散射计算量极大、难以处理的瓶颈问题,在我们的多体理论基础之上,我们可以突破目前国际上通用理论只能处理单体问题及近平衡问题(小自旋极化)的局限,研究自旋在远离平衡条件下的多体动力学。这里我们说的远离平衡指的是大的自旋极化以及在强电场下的问题。

在大自旋极化下,我们发现了一系列意想不到的现象,并且找到了导致这些现象的物理机制;此外,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。以往在电的运输中已有广泛研究,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,并给出了很多预言。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。

### 近远离平衡下的多体自旋输运理论:

我们成功地将上述自旋动力学理论推广到含空间自由度的自旋扩散及输运体系,并建立了一套多体输运方程。在我们工作前的自旋扩散/输运理论,全是建立在只含有自旋电荷密度的单电子漂移-扩散(drift-diffusion)方程的框架下。我们指出虽然单电子漂移-扩散方程可以成功地揭示很多电荷的输运性质,但是却无法完全描述自旋的扩散,而需要把自旋的关联也引入进来。此外,在基于漂移-扩散方程的输运理论中,扩散系数、迁移率、自旋去相位机制之一或者全部是作为系数人为加入的,且无法处理远离平衡的体系及处理多体效应。在我们的理论中,上述量完全是通过自洽地求解包含所有散射的自旋动力学方程并联合泊松方程得到的,并且可以讨论多体效应及远离平衡的问题。在我们多体理论的基础之上,我们还提出了在自旋扩散过程中的一个新的自旋去相位机制:即由于不同动量的电子的自旋随着空间梯度扩散时的进动不同(另一种非均匀扩展)导致的自旋去相干。

我们利用该理论,做了一系列工作,仔细地讨论了在平衡及远离平衡的各种单体及多体的自旋输运特性,得到并预言了大量有趣的结果。特别是,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(cond-mat/0311223),并与2004年底被Los Alamos的S.A. Crooker及D.L. Smith实验所证实(cond-mat/0411461)[注: Pershin的文章中引用了我们的结果,但是Crooker及Smith的文章中没有引用我们的工作]。

### 单体的自旋电子学工作:

自旋电子学的可能应用中,包含了用于量子计算的量子位,这就需要对单电子的自旋弛豫有透彻的了解。独立于多体的自旋电子学研究,我们引入了对于单

个自旋的研究。对于电子在量子点中的自旋迟豫，尽管这一方面已有很多工作发表，但都是用微扰论的方法，用最低几个不含自旋轨道耦合的能级波函数作为基底来计算自旋弛豫时间。我们研究发现，虽然在低温时，用较少的几个能级作为基，就可以收敛加入自旋-轨道耦合后的量子点的最终能级，但是，当计算自旋弛豫时，却需要用大量的能级作为基。这是由于自旋-轨道耦合很强的结果。计算表明，严格对角化方法得到的自旋寿命，比用文献中用的微扰论方法得到的自旋寿命大 5 个量级。此外，我们还指出了文献中广泛用地微扰方法中的错误。这些看起来似乎是不大可能的结果，最近被 Ohio 大学的 C.F. Destefani, 及 S.E. Ulloa 所重复(cond-mat/0412520)。根据这些发现，我们仔细计算了在各种条件下的自旋寿命。同时我们也研究了在量子点中的轻重空穴的自旋在各种条件下的寿命，得到了很多和电子型量子点定性上完全相反的结果。我们是最早研究空穴型量子点自旋性质的小组之一：在我们之前，只有一个工作，用微扰论方法研究了空穴型量子点的自旋寿命，并且得到的结果在定量既定性上都是错误的。我们的工作于 05 年 1 月发表后，即被 D. Loss 研究组引用 (D.V. Bulaev 及 D. Loss, cond-mat/0503181)。

我们还研究了 THz 场对有 Rashba 自旋轨道耦合的二维电子气的作用，指出非对角关联的重要性，并最早给出了在 THz 场下有 Rashba 自旋轨道耦合的电子的严格波函数。根据该波函数，我们指出了在垂直 THz 场方向，会诱导出一个 THz 磁矩。

### 介观的自旋电子学工作：

我们从介观的层面，利用 Landauer-Buttiker 公式，并借助格林函数方法，研究了自旋注入及自旋 Hall 效应。我们提出了三种全新的自旋筛设计；对于空穴型半导体的自旋 Hall 效应，我们从介观的角度进行了研究，发现一些有意思的结果（比如：空穴型半导体的自旋 Hall 效应并不依赖于  $\Gamma$  点的简并；即使自旋朝上几朝下的重空穴之间没有任何关联，重空穴仍然有自旋 Hall 效应等）。

### 其他工作：

在“百人”工作期间，作为对即将进入我们研究组攻读博士学位的本科生的筛选和训练，除了上面提到的从介观角度提出的三种自旋筛，我们还同物理所的韩秀峰研究员合作，提出了一个新的磁振子激发，成功地解释了他的 TMR 实验；同东京大学五神真教授合作，给出了在 CuCl 及金刚石中的电子-空穴液滴形成的动力学，成功地解释了东大的实验。这些结果分别发表在三篇 APL 及在 CPL, PLA, 和 PRB 上各一篇。

### 总结：

“百人”工作期间，共完成 SCI 论文 22 篇，其中 Appl. Phys. Lett. 四篇； Phys. Rev. B 八篇； J. Appl. Phys. ; J. Phys.:Cond. Matt.; Phys. Stat. Sol. B (为封面文章)； J. Phys. Soc. Jpn.; Phys. Lett. A 各一篇； Solid Stat. Commun.三篇， Chin. Phys. Lett. 两篇。此外，还有三篇论文正在送审。这两年自旋电子学论文被他人引用（包括在 arxiv 上被引）62 次。所有论文被引 280 余次。分别于 2004 年及 2005

年被邀请在美国 IEEE 及 ACS 会议上作邀请报告。成功申请到国家自然科学基金中“理论物理重大研究计划”一项；教育部博士点基金及安徽省自然科学基金各一项；参加国家自然科学基金主任基金一项（负责人：杨振宁）。并受到结构开放实验室创新基金资助。

我们搭建了两套 PC Cluster，每套 2 4 个节点。实验室目前有固定人员两人（本人及石勤伟讲师），流动人员七人（全为硕一博连读研究生，其中程晋罗在第二年已获得院长奖学金），建设了一支充满活力、结构合理的研究队伍。已培养博士生一人，指导博士后一人（已出站）。除此之外还积极参加和组织其它学术活动，作为学术组织者之一，成功组织了 2004 年 CCAST 的自旋电子学 workshop。

1.发表论文（篇）、论著（部或章节）、申请专利（项）							
国内刊物	2	国际刊物	20	SCI	22	EI	
国际会议	5			出版专著			
受理的发明专利数							
受资助期间发表的有代表性的论文、论著细目							
作者排序	年份	题目	期刊或国际会议名称	卷期	页		
通信作者	2002	<i>Longitudinal spin decoherence in spin diffusion in semiconductors</i>	Phys. Rev. B	66	235109		
通信作者	2003	<i>Spin dephasing in n-type GaAs quantum wells</i>	Phys. Rev. B	68	075312		
通信作者	2004	<i>Spin oscillations in transient diffusion of a spin pulse in n-type semiconductor quantum wells</i>	Phys. Rev. B	69	125310		
通信作者	2004	<i>Hot-electron effect in spin dephasing in n-type GaAs quantum wells</i>	Phys. Rev. B	69	245320		
通信作者	2004	<i>Spin relaxation in semiconductor quantum dots</i>	Phys. Rev. B	69	115318		
第一及通信作者	2004	<i>Spin-dependent quantum transport in periodic magnetic modulations: Aharonov-Bohm ring structure as a spin filter</i>	Appl. Phys. Lett.	85	1012		
通信作者	2005	<i>Intense terahertz laser fields on a two-dimensional electron gas with Rashba spin-orbit coupling</i>	Appl. Phys. Lett.	86	032107		
2.人才培养及团队建设							
固定人员		2	流动人员			8	
培养博士生		1	培养硕士生				

3.主持或承担重大项目情况					
名称			职位		
自然科学基金“理论物理重大研究计划”：自旋电子学的自旋退相位及自旋输运理论研究（25万）			项目负责人		
4.获其他经费资助情况					
经费来源			经费额度		
中科院创新课题			10万		
教育部博士点基金			5万		
安徽省自然科学基金			5万		
自然科学基金委国际会议基金			1万		
经费合计			46万		
5.获表彰奖励情况					
6.执行期间在岗工作时间情况					
年度	本所岗位工作时间	出国访问时间	国内访问时间	其他	合计（月数）
2002	12				12



2 0 0 3	1 0	2			1 2
2 0 0 4	1 2				1 2
合计 (月数)	34	2			-

注：1. “作者排序” 栏按 “第一作者”、“通信作者”、“非第一作者” 顺序填写。

2. “人才培养及团队建设”：固定人员指研究所在编人员；流动人员指客座、高级访问学者、博士后、博士生、硕士生。

3. “主持或承担重大项目情况”：主要是指 863、973、攀登、国家攻关、基金重大、基金重点及院创新重大项目中的职位及作用等。

4. “获其他经费资助情况”：不包含“百人计划”资助经费。

5. “获表彰奖励情况”：指获得国家级、部委级科技奖励及其它荣誉奖。

## 初 评 估 专 家 考 核 意 见

2005年4月10日中国科学技术大学举行了吴明卫教授的“百人计划”项目终期评估专家评审，专家组听取了吴明卫教授的报告，审阅了终期评估材料，形成评审意见如下：

吴明卫教授从2002年1月起执行中国科学院“百人计划”，在自旋电子学领域做出了系统的富有开拓性的研究成果。(1) 建立了一套n型半导体中自旋进动及去相位的多体动力学理论，提出了一种新的自旋去相位机制；基于多体理论的自旋去相位时间及与温度和杂质浓度关系，与实验结果符合很好；(2) 突破目前国际上通用理论只能处理单体问题及近平衡问题（小自旋极化）的局限，研究了大的自旋极化以及在强电场下的自旋在远离平衡条件下的多体动力学问题，发现了一系列新奇现象，并且找到了导致这些现象的物理机制；(3) 成功地将上述自旋动力学理论推广到含空间自由度的自旋扩散及输运体系，并建立了一套多体输运方程，并且指出了自旋输运中的新的自旋去相位机制；(4) 在单体自旋电子学工作中，研究了电子在量子点中的自旋弛豫，指出了文献中广泛采用的微扰方法中的不足；研究了在量子点中的轻重空穴的自旋在各种条件下的寿命，得到了和电子型量子点在定性上完全相反的结果；研究了THz 场对有Rashba 自旋轨道耦合的二维电子气的作用，指出非对角关联的重要性，并最早给出了在THz 场下有Rashba 自旋轨道耦合的电子的严格波函数。(5) 利用Landauer-Buttiker公式，并借助格林函数方法，研究了介观系统中自旋注入及自旋Hall效应。此外，他们提出了三种全新的自旋阀设计，还同其他实验小组合作，提出了一个新的磁振子激发，解释了TMR实验结果；给出了在CuCl及金刚石中的电子-空穴液滴形成的动力学，解释了实验结果。

吴明卫教授在“百人计划”资助期间建立了一个基于多体理论的关于自旋电子弛豫的系统理论，研究扎实，具有独创性，取得突出成果。在SCI期刊上发表论文22篇，获得广泛引用，并且在国内该领域赢得了声誉，他们的工作也为国际同行广泛关注，在国际大会上多次作邀请报告。与国际上有关研究团队建立了有效的合作关系，同时成功建立了一个活跃在自旋电子学领域的研究组。

综上所述，专家组认为，吴明卫教授思想活跃、学风严谨，出色完成了“百人计划”项目，经无记名投票，一致同意评为优秀，建议给予后续支持。

专家评审组组长：

2005年4月10日

--	--	--	--

**专 家 小 组 成 员**

姓名	单位	职务或职称	签名
朱邦芬	清华大学	院士	
邢定钰	南京大学	教授	
熊诗杰	南京大学	教授	
崔 平	中国科学院宁波材料与 工程研究所	研究员	
侯建国	中国科学技术大学	院士	
周先意	中国科学技术大学	教授	

负责人：	单位（盖章）：
	年 月 日

## 综合评估意见

(包括入选者研究方向与内容在该研究领域的地位与意义, 所取得的科学成果、发表论著的水平, 人才队伍建设、经费、实验室情况, 以及入选者的科学品德等)

综合评估小组负责人:

年 月 日

院 终 审 意 见

领导小组组长：

年 月 日

## 附件：获资助以来发表及已投稿论文目录

1. M.W. Wu, "*Spin dephasing induced by inhomogeneous broadening in D'yakonov-Perel' effect*", J. Phys. Soc. Jpn. **70**, 2195 (2001).
2. M.W. Wu and M. Kuwata-Gonokami, "*Can't D'yakonov-Perel' effect cause spin dephasing in GaAs(110) quantum wells?*", Solid State Commun. **121**, 509 (2002).
3. J.L. Cheng and M.W. Wu, "*Excimers and their entanglement in double quantum dots*", Solid State Commun. **124**, 203 (2002).
4. M.Q. Weng and M.W. Wu, "*Longitudinal spin decoherence in spin diffusion in semiconductors*", Phys. Rev. B **66**, 235109 (2002).
5. M.Q. Weng and M.W. Wu, "*Kinetic theory of spin transport in n-type semiconductor quantum wells*", J. Appl. Phys. **93**, 410 (2003).
6. M.Q. Weng and M.W. Wu, "*Spin dephasing in n-type GaAs quantum wells in the presence of high magnetic fields in Voigt configuration*", Phys. Stat. Sol. (b) **239**, 121 (2003) (published as Editor's Choice).
7. C. Lü, M.W. Wu, and X.F. Han, "*Magnon and phonon assisted tunneling in a high-magnetoresistance tunnel junction using  $Co_{75}Fe_{25}$  ferromagnetic electrode*", Phys. Lett. A **319**, 205 (2003).
8. M.Q. Weng and M.W. Wu, "*Rashba-effect-induced spin dephasing in n-type InAs quantum wells*", J. Phys.:Condens. Matter **15**, 5563 (2003).
9. M.Q. Weng and M.W. Wu, "*Spin dephasing in n-type GaAs quantum wells*", Phys. Rev. B **68**, 075312 (2003).
10. L. Jiang, M.W. Wu, M. Nagai, and M. Kuwata-Gonokami, "*Formation and decay of electron-Hole plasma clusters in a direct-gap semiconductor CuCl*", Chin. Phys. Lett. **20**, 1833 (2003).
11. J.L. Cheng, M.Q. Weng, and M.W. Wu, "*Manipulation of spin dephasing in InAs quantum wires*", Solid State Commun. **128**, 365 (2003).
12. 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).
13. 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).
14. J.L. Cheng, M.W. Wu, and C. Lü, "*Spin relaxation in semiconductor quantum dots*", Phys. Rev. B **69**, 115318 (2004).
15. 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).
16. 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).
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. M.Q. Weng and M.W. Wu, "*Multi-subband effect in spin dephasing in semiconductor quantum wells*", Phys. Rev. B **70**, 195318 (2004).
  20. 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).
  21. C. Lü, J. L. Cheng, and M. W. Wu, "*Hole spin relaxation in semiconductor quantum dots*", Phys. Rev. B **71**, 075308 (2005).
  22. 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).
  23. L. Jiang and M. W. Wu, "*Control of spin coherence in n-type GaAs quantum wells using strain*", Submitted, 2005.
  24. 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*", Submitted, 2005.
  25. M. W. Wu and J. Zhou, "*Spin-Hall effect in two-dimensional mesoscopic hole systems*", Submitted, 2005.