

发展固态量子信息与计算的实验研究*

陈东敏[†] 赵宏武 梁学锦 刘宝利 潘新宇 王如泉

(中国科学院物理研究所 固态量子信息与计算实验室 北京 100190)

摘要 量子计算与量子信息是 21 世纪基础和应用科学研究的一大挑战. 要实现实用意义上的量子信息和量子计算, 必须解决量子比特系统的可拓展性问题. 基于现代半导体技术的固态量子系统, 其应用和最终产业化的可行性较高. 然而, 固态量子体系受周边环境的影响比较严重, 控制其退相干, 维持其量子状态的难度更高. 实验固态量子计算的研究是个新的领域, 尚无实用的技术和方法. 文章介绍了中国科学院物理研究所固态量子信息和计算实验室近几年来新开辟的自旋、冷原子、量子点(包括原子空位)、功能氧化物和关联体系等固态量子信息的新载体和同量子计算与量子信息相关的科学与技术难题的实验研究.

关键词 量子比特, 量子信息, 量子计算, 自旋电子, 信息存储, 纳米器件

Experimental research program in solid state quantum information processing

CHEN Dong-Min[†] ZHAO Hong-Wu LIANG Xue-Jin LIU Bao-Li
PAN Xin-Yu WANG Ru-Quan

(*Solid State Quantum Information and Computation, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract Quantum information processing and quantum computation pose grand challenges for basic and applied science in this century. Creating scalable quantum systems is essential for the realization of practical quantum computing. Solid state quantum systems that can be produced with micro/nano fabrication technologies should offer better scalability. Strong coupling of the solid state system to the environment, however, makes decoherence of an otherwise pure quantum state a much more serious problem to be overcome. This is a new field that is open for conceptual breakthroughs and technology innovation. This article is a brief account of the recent developments using spin, cold atoms, quantum dots, and other functional materials as new quantum information carriers for quantum manipulation experiments in the Solid State Quantum Information Processing Laboratory in the Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences.

Keywords quantum qubit, quantum computation, spintronics, memory materials, nano devices

量子计算与量子信息是当代迅速发展的前沿科学领域, 是本世纪基础和应用科学的一大挑战, 将在未来信息技术领域有着广阔的前景. 要实现实用意义上的量子信息和量子计算, 必须解决量子比特系统的可拓展性问题. 人们普遍认为, 固态量子系统是解决这一问题较为有效的途径, 特别是基于现代半导体技术的固态量子系统, 其应用和最终产业化的可行性更高. 然而, 固态量子体系受周边环境的影响比较严重, 控制其退相干, 维持其量子状态遇到了更大的挑战. 近几年来, 国际上量子信息领域

的主要进展是在原子(离子)和分子体系, 固态量子计算的研究虽有进展, 但尚无重大突破. 实验固态量子计算的研究是个新的领域, 尚无实用的技术和方法. 中国科学院物理研究所和北京国家凝聚态物理实验室, 于 2004 年 5 月成立了固态量子信息和计算实验室, 开辟了量子计算与量子信息科学领域中

* 国家自然科学基金(批准号 90406017, 10427402)资助项目
2008-05-19 收到

[†] 通讯联系人. Email: xlmchen@aphy.iphy.ac.cn

一些关键性的科学与技术难题的研究方向. 固态量子信息的新载体有自旋、冷原子、量子点(包括原子空位)、功能氧化物和关联体系等. 下面是本实验室近几年来发展的几个研究方向的简介.

1 基于冷原子量子比特链的可扩展的量子计算

以激光冷却、俘获原子为代表的冷原子技术近 20 年来发展迅速. 现代微加工技术可以将实验器件集成在微型芯片——原子芯片^[1]上, 为冷原子实验提供了更好的实验环境, 也使得其微型化和集成化成为可能. 平面基底上的微结构, 包括导线、电极、永磁体、光学腔等器件, 提供了比宏观实验更极端的电磁场条件, 更有利于实现对冷原子的俘获、约束和操作. 同时微型和集成化的系统又大大提高了相关技术的应用前景. 原子芯片的应用前景包括物质波干涉仪、微型原子钟、量子信息处理和低维量子气体研究等. 但是这些应用通常要求很长的量子相干时间, 还要求对少数甚至单个原子的特定量子态进行高效操作. 所以, 在原子芯片的设计、加工和运用中, 都充满了机遇和挑战.

以原子的冷却和俘获为例, 在原子芯片中, 导线和基底的紧密接触和基底良好的导热性质, 大大提高了导线的散热性能和载流密度, 电流密度已经提高到 10^7 A/cm^2 , 远远大于普通线圈的载流能力^[2,3], 微型化的线路使得磁阱能够提供更强的束缚势场. 同时在微导线之间, 有限电压差也可以产生巨大的静电场, 交变电流附近会产生强辐射场. 这极大地方便了对于原子自由度的操作.

目前原子芯片的研究已经取得了一些开创性的成果, 如实现了铷原子的玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)^[4], 钾原子的费米简并^[5], 准一维铷原子 BEC^[6]和原子芯片表面相互作用等研究^[11]. 最近 J. Schmiedmayer 的小组制作出了具有双层结构的原子芯片, 并以此实现了尺度比大于 1000 的准一维 BEC. 从而推进了多层、复杂原子芯片和相应的原子操作的研究, 这对于实现原子在势阱阵列中的隧穿和相干特性, 以及量子信息操作很有意义.

另外, 基于原子芯片的腔量子电动力学(CQED)实验也在迅速发展. 置于微型 Fabry-Perot 腔中的原子和腔中的光子有非常强的相互作用, 实验上已经实现了光腔中光子和原子的耦合远大于光

子在光腔中的寿命和原子的自发辐射寿命^[7]. 光腔同时可以改变原子自发辐射系数的数值, 影响了原子激发态的寿命. 集成在芯片上的 CQED 可能会成功延长原子能级的寿命和相干时间, 并让其作为量子信息载体——量子比特, 最终通过集成化使实现量子计算成为可能.

物质波干涉仪是另一个原子芯片的重要研究方向^[8]. 通过实现 BEC 或费米简并的原子团的分束和汇聚, 可以实现物质波的干涉, 进而通过干涉图像的变化来实现对转动角速度等多种物理量的精密测量. 原子芯片的强约束作用, 将有助于实现稳定的相干原子波导, 大大提高物质波干涉仪的灵敏度^[9,10].

目前我们实验室正在搭建一个原子芯片的玻色-爱因斯坦凝聚实验. 我们已经成功地自制了用于激光冷却的半导体激光器系统, 稳定地将激光器锁定在铷原子的跃迁频率上. 半导体激光器系统如图 1 所示, 其中主激光器采用了分布反馈二极管激光器, 它具有集成度高、工作稳定、坚固耐用、体积小等优点. 主激光器由饱和吸收光谱稳频的方法锁定在铷原子的跃迁频率上, 并驱动一个注入锁定的从激光器. 从激光器的电流被 6.8G 的微波源调制, 以获得激光冷却所必需的重抽运光. 从激光器的输出由一个 1W 的半导体锥形放大器放大, 输出用于激光冷却. 以上系统都是在购买激光管和放大芯片的基础上自制的, 成本低并且工作稳定可靠.

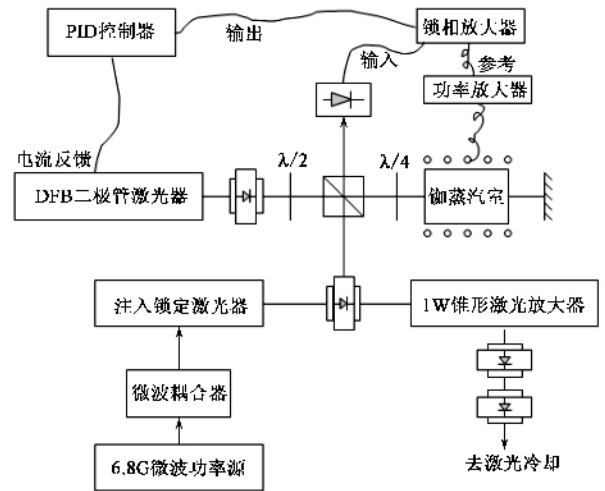


图 1 激光器部分光路原理图

真空系统由一个三级离子泵和一个钛升华泵组成, 极限真空能够达到 10^{-11} Torr, 从而保证原子在磁阱里面的寿命. 用于实现玻色-爱因斯坦凝聚的芯片由 DBC 工艺(陶瓷基片覆铜工艺)制作, DBC 基板是在 1000°C 度左右的高温下把铜片和氧化铝或氮化铝

陶瓷基片直接复合而形成的,具有极佳的导热性和优良的载流能力.在 DBC 基板上再通过刻蚀的方法我们就可以得到原子芯片所需的各种载流导线,并束缚和囚禁原子,通过蒸发制冷实现玻色-爱因斯坦凝聚.下一步的实验将使用硅基片上的微加工工艺,以得到更小的微结构,实现复杂的量子操控.

我们又开发了实验的时序控制系统,利用两块数字和模拟输出卡实现了 16 通道数字、8 通道模拟的实时控制系统,时间精度达到 $1\mu\text{s}$.

下一步,我们将首先实现原子芯片上的玻色-爱因斯坦凝聚,并实现芯片上的准一维量子简并的 Tonks-Girardeau 气体(见图 2),利用其中的每一个原子的内态形成基于单原子的量子比特,并利用微光腔和原子的相互作用来实现对量子比特的操控.由于原子芯片上可以实现大规模集成的微结构,我们期望未来能够实现可扩展的大规模量子计算机.

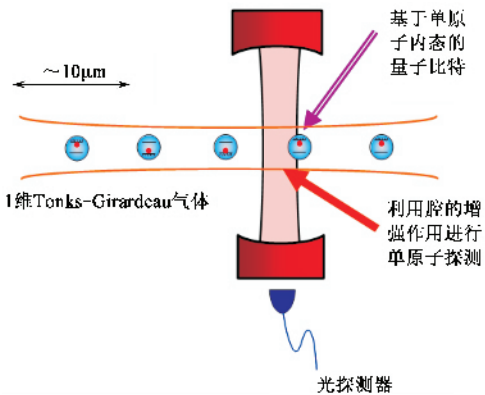


图 2 基于冷原子量子比特链的可扩展的量子计算

2 基于金刚石晶体的量子计算和信息处理

近年来,量子计算和信息处理逐渐成为物理学的前沿和热点方向,量子计算机和传统的计算机不同,它是用量子比特(qubit)来替代传统计算机中的 0 和 1,量子比特可以处于 0 和 1 的叠加态上,借助各种量子计算的算法及量子比特的特征,人们可以极大地提高例如搜索数据库或者大整数的因子分解等计算任务的速度.但是到目前为止,科学家还没有找到真正意义上的能实现量子计算的物理体系,究其原因是在微观上对量子态进行操纵具有极大的难度,已经提出的方案例如原子和光腔相互作用、冷阱束缚离子、电子或核自旋共振、量子点操纵、超导量子干涉等.要实现真正意义上的量子信息处理和量子计算,首先必须解决量子比特系统的可拓展性问

题,固态量子系统是解决这一问题的最佳途径,特别是基于现代半导体技术及微加工技术的固态量子系统,其应用和最终产业化的可行性更高.近年来,作为量子计算和信息处理的核心课题,研究人员一直在寻找能实现量子计算的物理体系和器件,金刚石是有希望实现固态量子计算的材料之一.

金刚石是一种碳的同素异形体,氮是金刚石内最常见的杂质,一个取代了碳原子的氮原子和一个与它相邻的空位组成金刚石中的氮-空位中心,室温下金刚石晶体中氮-空位中心的能级谱带中零声子线(zero phonon line, ZPL)波长为 637nm ,同时它具有一个有很宽的 650nm 到 800nm 的声子边带(phonon sideband).其电子基态自然劈裂成自旋为 0 和 1 的两个子能级,自旋为 0 的能级和自旋为 1 的能级之间的能量差为 2.87GHz ,正好处于微波的频段,所以我们可以很容易地使用外加的微波辐射场来调控位于自旋为 0 和自旋为 1 的电子的布居数,进而实现对电子的自旋量子态的调控,而这个自旋为 0 和 1 的二能级系统可以为制备量子比特提供条件^[12].

金刚石晶体中的碳原子基本上都是碳 12,其原子核的自旋为零,对氮-空位中心的自旋没有任何影响.氮-空位中心的电子自旋可以看成是处在一个几乎不受周边环境的影响,这些因素使得它们在量子信息处理中具有广阔的应用前景^[13,14],但是常温下电子自旋态的寿命在微秒量级,延长量子信息的存储时间是一个非常重要的问题,哈佛大学 Mikhail Lukin 小组分别在 2006 年和 2007 年^[15,16],利用氮-空位中心一个电子自旋和周边一个碳原子核自旋的超精细相互作用,成功地把核自旋的量子态映照到电子自旋的态上,同样可以实现反方向的态映照操作,这样就组成了一个高保真度的双量子比特的寄存器,实现了量子态的寿命可以延长到秒的量级.研究人员在氮-空位中心和周边碳、氮自旋等杂质的相互作用中,找到了可以实现量子逻辑操作的途径,从而形成一个完备的量子信息存储、操作和计算的体系.

2007 年至今,我们实验室已经搭建完成亚微米量级的激光扫描共聚焦荧光显微系统,这个系统是进行金刚石晶体内部氮-空位中心量子计算和信息处理的核心装置,它可以探测单个光子的荧光,对样品的二维扫描精度达亚微米量级,结合自主研制的微波天线,能够在目前国际上处于前沿位置的金刚石氮-空位中心的量子调控的方向进行了深入全面的

研究. 图 3 为激光扫描共聚焦荧光显微系统图, 532 nm 波长的激光通过高倍显微物镜聚焦到金刚石样品表面下, 激发出的荧光通过同样的物镜收集后, 经过长波可以通过的滤光片, 用单光子计数器收集. 样品表面的微波天线发射微波对氮 - 空位中心的自旋量子态进行调控.

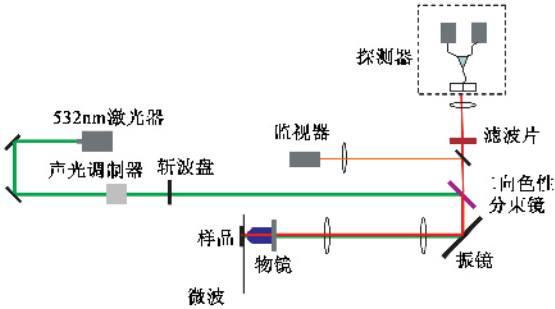


图 3 激光扫描共聚焦荧光显微系统图

图 4 是光学方法探测到的电子自旋共振(ESR)谱, 氮 - 空位中心的集群(ensemble)荧光强度和作用的微波频率有关, 在 2.87 GHz 时出现很强的共振峰, 这个频率是氮 - 空位中心在零外场下的自旋能级分裂值.

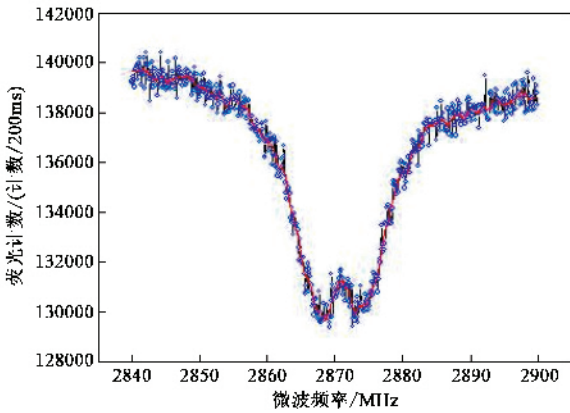


图 4 光学方法探测到的电子自旋共振(ESR)谱

结合我们实验小组在这个领域已经建立的系统和研究积累, 我们选取金刚石晶体作为量子比特制备及调控的主攻方向, 拟开展系统、深入的理论和实验研究工作, 进行室温下金刚石晶体中氮 - 空位中心的单电子自旋调控的研究, 目标是实现高保真度的量子比特的制备, 达到可以初始化、调控和读出单电子自旋的量子态, 为可拓展的量子比特系统提供实验上的依据, 同时发展与完善相关理论, 并为相关材料、技术的开发提供科学支撑. 金刚石材料的化学稳定性好, 拥有超高的硬度, 热导率也是所有固体材料中最优良的, 对紫外线也高度透明. 随着高纯度单晶金刚石制

备技术和掺杂技术的发展, 金刚石在固态电子器件上的应用前景广阔, 以金刚石氮 - 空位中心的固态量子比特的制备为基础, 进一步实现量子逻辑操作、量子信息存储等研究, 是我们未来的计划.

3 半导体材料体系电子自旋的调控和动力学研究

利用固态量子系统的自旋自由度, 有望发展新一代以自旋为信息载体的低功耗、高速度、高集成密度的量子器件^[17-19]. 在固态量子系统中制备自旋量子态, 实现自旋信息的有效传递(自旋量子态保持长的退相干时间和输运长度), 并且通过电、磁、光等手段来测量与控制自旋量子态, 是最终实现基于自旋量子器件的核心物理问题. 我们将通过研究固态量子系统中的尺寸、维度、晶体取向以及结构效应等对自旋量子态基本物理特性(自旋动力学、自旋输运长度等)的影响, 完善、发展测量(单)自旋态及其特征参数(自旋退相干时间、自旋输运长度、自旋扩散系数等等)的新方法, 最终实现(单)自旋量子态的制备、测量与控制, 探索基于自旋的量子器件.

在半导体二维异质结构中, 自旋 - 轨道耦合(spin-orbit coupling, SOC)在基于自旋的量子器件实现方面起关键作用. Datta 和 Das 在 1990 年提出的自旋晶体管(spin - FET)的概念^[20], 正是利用了二维电子气中自旋 - 轨道耦合特性, 在实现自旋有效输运的同时, 通过外加电场来控制自旋态的进动, 来实现器件的功能. 为了实现自旋操纵和自旋的有效输运, 必需要求在组分半导体器件中, 自旋在有足够长的弛豫时间和高的自旋(电子)迁移率. 通过近 30 多年自旋特性的理论和实验研究, 基本上确定出各种半导体材料、二维量子阱和零维量子点中主要的自旋弛豫机制. 通常情况下, 在 III - V 和 II - VI 半导体材料中, 室温下电子自旋“记忆”(spin memory)的损失起源于自旋 - 轨道耦合, 即 D'yakonov - Perel (DP)自旋弛豫机制^[21]. SOC 将引起自旋分裂. 这种自旋分裂 $\Omega(k)$ 可以看成是一个有效的内建磁场, 大小和方向与电子的波矢有关. 当自旋在移动过程中, 自旋趋向于围绕着这个有效磁场作 Larmor 进动. 这种自旋的再取向过程导致自旋“记忆”的损失, 使得室温下自旋寿命为几十到几百个皮秒(ps). 从理论上讲, 由于短的自旋弛豫时间的限制, spin-FET 这种概念性器件只能在弹道(ballistic)

输运区域实现. 这需要我们寻找新的解决方案, 限制甚至是去除这种自旋弛豫机制.

2003 年, D. Loss 等人^[22]提出了在非弹道(non-ballistic)输运区域实现这种器件的理论预言. 通常情况下, 在 GaAs(001)衬底生长的二维电子气中, 自旋 - 轨道耦合引起的与 k 的线形项有关的哈密顿量可以写为

$$H_{so} = \alpha(k_y\sigma_x - k_x\sigma_y) + \beta(k_x\sigma_x - k_y\sigma_y), \quad (1)$$

其中 $k_{x,y}$ 为电子波矢, α 和 β 分别为 Rashba 和 Dresselhaus 自旋 - 轨道耦合强度. 这两项的干涉将产生自旋分裂(spin splitting) (内建磁场) 的各向异性. 在样品生长过程中, 通过调整结构参数, 可以使 $\alpha = \beta$ 或者 $\alpha = -\beta$, 使得自旋分裂产生大的各向异性(giant anisotropy of spin splitting), 这时有有效磁场方向将沿着特殊的晶向 [$\bar{1}10$] 或者 [110] 方向. 在这种情况下, 当自旋分量 S_x 沿着 [$\bar{1}10$] 或者 [110] 时, DP 自旋弛豫机制将不再有效(S_x 平行于有效磁场方向, 自旋不会围绕磁场方向作 Larmor 进动, 因此也不会产生自旋弛豫). 如果注入的自旋取向沿着 [$\bar{1}10$] 或者 [110], 自旋会输运长的距离而不丢失自旋的信息, 从而有可能实现这种概念性原形器件.

另外, 在自旋量子器件中, 自旋极化的载流子必须能够在从器件的一端传输到另一端的同时, 保持自旋态的相干性. 两个重要的物理量决定了自旋的输运特性: 自旋迁移率(spin mobility) μ_s 和自旋扩散常数(spin diffusion coefficient) D_s . 自旋迁移率决定了自旋波包(spin package)在电场驱动下的漂移速度(drift velocity), 自旋扩散常数决定了自旋波包的扩展(spread out)速率. 这些基本参数对于自旋在固态自旋量子器件和量子信息处理中的应用非常重要. 在通常情况下, 假定自旋的输运特性和电荷的输运特性是一样. 但是, 最近的实验结果证实, 由于电子 - 电子之间的库仑相互作用, 自旋的扩散常数 D_s 要小于电子的扩散常数^[23, 24], 并且改变了迁移率和扩散常数之间的爱因斯坦关系. 在非简并能带结构的样品中, 这种关系表示为 $eD = \mu kT$. 在最近的实验中发现, D_s 的实验值要比用爱因斯坦关系计算出来的值大一个数量级^[25]; 另外, 晶体取向也对自旋输运过程有很大的影响. 因此, 自旋输运一直是非常活跃的研究领域, 还有很多未知的因素影响自旋的输运过程.

过去几年里, 我们成功地建立了先进的自旋探测和物性表征系统: 可时间 - 空间分辨的超快磁光

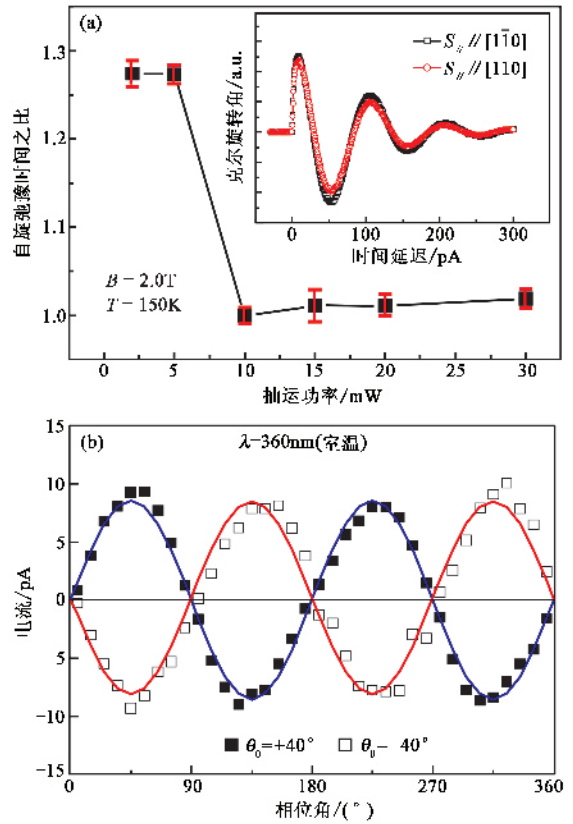


图5 自旋调控机理的实验研究 (a)在半导体二维电子气中, 电子密度的变化会直接影响自旋 - 轨道耦合的相对强度 (b)自旋 - 轨道耦合引起的自旋分裂, 其对称性依赖于晶体结构

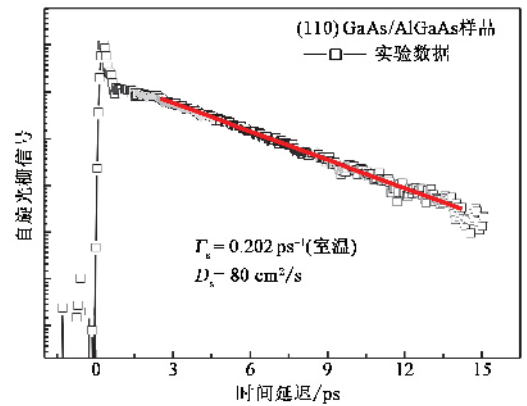


图6 自旋扩散常数的测定

激光光谱测量系统. 它包括时间分辨克尔/法拉第旋转系统和瞬态自旋光栅系统, 可用于自旋动力学和自旋输运过程的实验研究. 利用这套系统, 我们还开展了二维电子气中自旋 - 轨道耦合对自旋量子态的影响以及产生的相关量子现象的实验研究. 实验发现在半导体二维电子气中, 电子密度的变化会直接影响自旋 - 轨道耦合的相对强度(图5(a))^[26]; 自旋 - 轨道耦合引起的自旋分裂, 其对称性依赖于晶



图 7 超高真空低温强磁场双探针 STM 和 MBE 联合系统(图中 LEED 为低能电子衍射 ,AES 为俄歇谱仪 ,RHEED 为反射式高能电子衍射仪 ,MBE 为分子束外延 ,STM 为扫描隧道显微镜)

体结构(图 5(b))^[27]。我们进一步发展了瞬态自旋光栅技术,进行了半导体二维结构中自旋扩散常数的测定(图 6),室温下自旋的扩散常数大约为 $80\text{cm}^2/\text{s}$ 。

自旋信息的有效传递是基于自旋量子器件的物理实现的核心问题之一,未来几年我们将在进一步研究自旋扩散常数,电子-电子之间的库仑相互作用对自旋-轨道耦合的影响,晶体取向、载流子浓度以及温度等对自旋输运过程的影响,轨道耦合引起的内建磁场与自旋弛豫的关系等基础问题的同时,探索如何利用外加电场控制半导体二维体系中自旋-轨道耦合,进而控制自旋弛豫和自旋输运。

4 基于二维体系中自旋轨道耦合效应的新型量子器件物理

自 1996 年 LaShell S 等基于自旋-轨道耦合(SOC)效应成功地解释了在非磁性材料 sp 型表面态带中存在的劈裂现象^[28],引起了人们对薄膜或表面体系由于维度的减少可以导致可观磁效应现象的广泛关注,特别是最近在室温下,在 SOC 效应较强的金膜中发现了“巨”自旋霍尔效应(SHE)^[29],更激发了人们对实现基于二维体系 SOC 效应的实际 SHE 器件的向往。但真正实现这类新型量子器件还存在一些基本的物理问题有待解决,例如,如何将

SOC 效应导致的能带劈裂效应体现在电输运的测试中,或者找到一种二维系统,其费米面附近的态密度有相当大的贡献来自于自旋劈裂的能带,还有,产生“巨”SHE 的具体物理机制何在,它既可能产生于样品中固有的 SOC 效应^[30],也可能产生于样品中的缺陷导致的自旋相关的散射作用等^[31]。开展对绝缘衬底上制备的具有较强 SOC 效应的单晶(半)金属薄膜中电荷与自旋的输运研究,是解决这些基本问题的较好途径。单晶 Bi 膜存在着很强的 SOC 效应,费米面附近具有丰富的自旋劈裂的态密度^[32],同时具有奇数对的 Kramer 边缘态和“更适合”产生 SHE 的几何结构,具有较高的迁移率、低的有效质量和较长的平均自由程等^[33],从理论上讲,单晶 Bi 膜在室温下具有较强的 SHE 以及自旋相关的输运现象^[34],因此它很可能适于开发基于 SOC 效应的自旋电子学和量子计算的室温器件。

由于制备技术和测试技术的限制,目前单晶 Bi 膜中电荷与自旋的输运研究基本未得到开展,这为我们提供了机会。我们利用自己研发的超高真空低温强磁场双探针 STM 与 MBE 联合系统(图 7)已成功地在硅衬底上制备出单晶 Bi 膜(图 8),证实所制备的单晶 Bi 膜的确具有良好的金属性。目前正在进行原位输运测试,研究单晶 Bi 膜中的(逆)SHE 和自旋相关的输运,并构筑室温下基于铋和金膜的自旋器件。

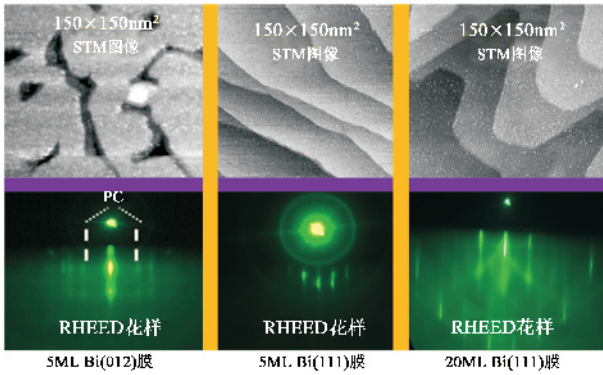


图8 在 $Si(111)-7 \times 7$ 衬底上制备的单晶 $Bi(111)$ 膜

5 低维量子结构的尺寸效应及纳米器件的研究

下一代信息存储技术要求信息单元有超高的记录密度、更快的响应速度、极低的功耗和非易失性，这就要求从多种角度了解信息载体——纳米量子结构中的量子尺寸效应，以及电子（自旋）输运行为的新奇现象与基本物理规律，例如，信息单元尺度降低到纳米尺度时其物理性质与块体有多少区别，电子局限在这样的量子系统中有什么新奇物性，电子在小系统结构中的输运过程和动力学行为是怎样的，如何实现信息的长久保存（非易失性），如何提高量子系统的测量精度，等等。从基础物理和功能材料的角度开展下一代固态信息研究，并阐明这些物理问题，将会从根本上推动量子信息技术和材料的发展，并提供新的固态量子信息的载体。

近期，我们对一些低维量子结构系统的尺寸效应展开研究，发现了一些新奇的量子现象。

5.1 量子尺寸效应诱导的共振与散射电子态的振荡效应^[34]

利用低温扫描隧道谱（STS）手段，研究了外延生长的 $Pb/Si(111)7 \times 7$ 系统的镜像态，在费米能级以上5—10V范围内，发现电子镜像态的结合能随Pb膜的厚度振荡，周期为2个原子层。进一步的分析表明，这种在高于真空能级处发生的电子态振荡效应源于Pb中量子尺寸效应诱导的电子态共振与散射行为。

5.2 $Cu(111)$ 表面态驻波的量子化与尺寸效应的关系^[35]

电子被局限在纳米结构中时，会表现出量子化

效应。利用 $Cu(111)$ 表面产生的六角型空洞结构，我们应用低温STM技术研究了电子在这种量子结构中产生的表面态驻波的量子化现象。通过对不同偏压下局域态密度（LDOS）的傅里叶分析，发现了不连续的色散关系，进一步的理论分析表明，这种不连续色散关系中的每一个“台阶”，都对应着一个LDOS的一个极值，整个色散关系构成了电子在受限体系中由于量子化表现出的本征态。

5.3 Se纳米管的光电导研究^[36]

纳米管的光电导是一种新奇的量子现象。我们利用STM技术并采用“suspended”两端测量方法，进行了Se纳米管的光电导研究。实验发现Se纳米管中巨大的光电导现象，而且Se和Au、W两种金属接触产生的肖特基势垒高度随着光照强度的增加会持续下降，直至消失。

5.4 主动减噪式低噪音扫描隧道波谱^[37]

为了进一步提高纳米量子结构的测量信噪比，我们发明了世界上第一套主动减噪低温（5K）超高真空STM，在常规环境下可获得较高的稳定性和分辨率。

最近，科学家在一些纳米氧化物薄膜中发现了巨电致电阻效应（colossal electric-resistance, CER）^[38]，即在纳秒宽度的外加电压脉冲作用下，纳米氧化物结构的电阻在低阻态（“0”）和高阻态（“1”）之间可逆转变，变化率可达1000倍以上，并且所得到的电阻在去掉外电场后可以保持下来。这些发现引起了国际科技界的极大兴趣，原因是利用这一效应可能发展一种全新的信息存取技术：电阻型随机存取器（resistive RAM, RRAM），并在性能（包括高读写速度、低功耗、高集成度、多值化等）、成本、制造和应用方面表现出其他不挥发存储器所不具备的巨大优势。作为一种全新的物理现象，巨电致电阻效应所涉及的物理机制和材料结构都与以往的其他存储效应完全不同（1）CER效应的物理机制目前尚不清楚，有关电致电阻效应的物理机制，目前有多种设想，但目前尚未有一个令人满意的实验结果和统一模型（2）研发材料体系多种多样，表现出电致电阻效应的氧化物材料包括一些复杂氧化物（如 $PrCaMnO_x$ 等钙钛矿锰氧化物）和许多简单二元氧化物（如 Cu_xO 、 HfO_x 等）。

我们对纳米氧化物 $PrCaMnO_x$ 薄膜的CER效应研究结果表明，这种量子结构在50ns的脉冲激励下

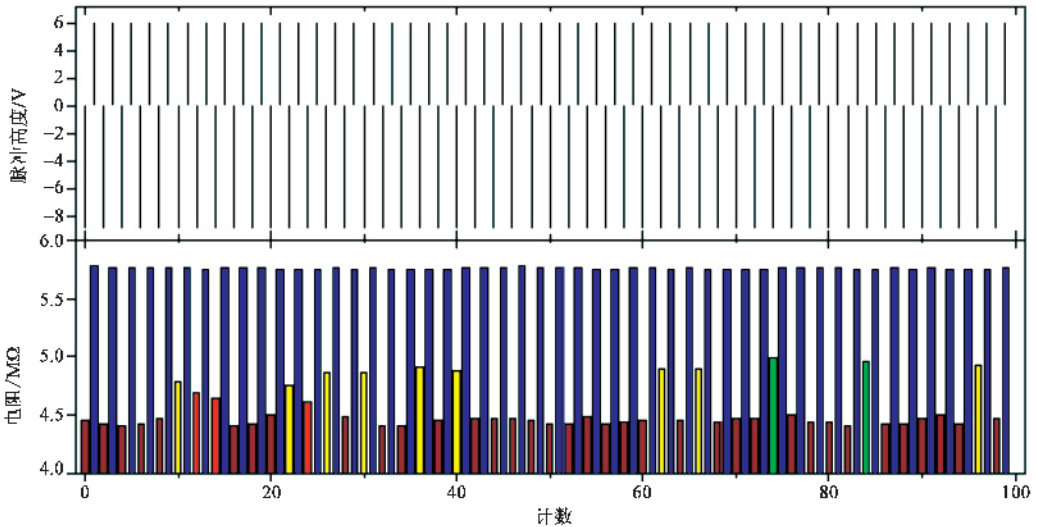


图9 PrCaMnO₃ 中 50ns 的电脉冲激励翻转结果

表现出稳定的双稳态(图9),信息的写入、擦除可以重复上千次.同时,利用先进的透射电镜下原位 SPM 探针技术,我们发现当材料结构面积小到 100nm 时仍然具有存储效应(图10).

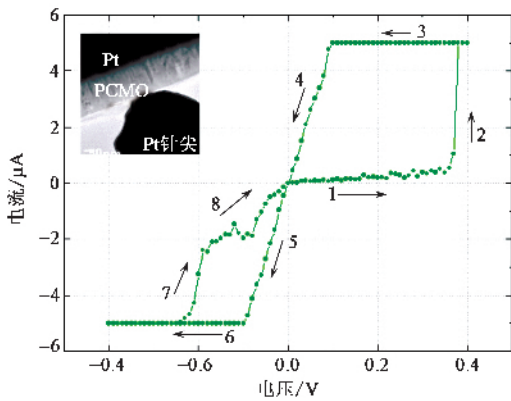


图10 PrCaMnO₃ 在 100nm 尺度的存储效应

总之,纳米结构中的电致电阻效应可能涉及到强关联效应、界面效应、纳米尺度效应等基础研究;纳米尺度 CER 材料和结构的稳定性问题还有待进一步解决,因此,从 CER 效应的物理机制和材料研究,到最终实现全方位的应用,还需要做很多工作.如果在上述两方面获得突破,基于 CER 效应的存储技术将在包括计算机、移动存储等各个领域获得广泛应用,具有巨大的应用价值.

参 考 文 献

[1] József Fortágh , Claus Zimmermann. Rev. Mod. Phys. ,2007 , 79 :235
 [2] Reichel J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 83 3398
 [3] Folman R *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 84 4749
 [4] Hänsel W *et al.* Nature ,2001 ,413 :498
 [5] Aubin S *et al.* Nature Physics. 2006 ,2 :384

[6] Hofferberth S *et al.* Nature ,2007 ,449 :324
 [7] Yves Colombe *et al.* Nature ,2007 ,450 :272
 [8] Kasevich M. Science ,2002 ,298 :5597
 [9] Schummet T *et al.* Nature Physics ,2005 ,1 :57
 [10] Günther A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2007 ,98 :140403
 [11] Aigner S *et al.* Science ,2008 ,319 5867
 [12] Gruber A *et al.* Science ,1997 ,276 2012
 [13] Jelezko F *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2004 ,92 076401
 [14] Jelezko F *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2004 ,93 :130501
 [15] Childress L *et al.* Science ,2006 ,314 281
 [16] Gurudev Dutt M V *et al.* Science ,2007 ,316 :1312
 [17] Awschalom D D ,Loss D ,Samarth N Eds. Semiconductor Spintronics and Quantum Computation. Berlin :Springer ,2002
 [18] Awschalom D D ,Flatte M. Nature Physics ,2007 ,3 :153
 [19] Prinz G A. Science ,1998 ,282 :1660
 [20] Datta S ,Das B. Appl. Phys. Lett. ,1990 ,56 :665
 [21] Yakonov M D ,Perel V I. Sov. Phys. Solid State 1972 ,13 :3023
 [22] Schliemann J ,Egues J C ,Loss D. Phys. Rev. Lett. ,2003 ,90 :146801
 [23] Amico I D ,Vignale G. Europhys. Lett. ,2001 ,55 :566
 [24] Weber C P *et al.* Nature ,2005 ,437 :1330
 [25] Crooker S A *et al.* Science ,2005 309 :2191
 [26] Zhao H M ,Liu B L ,Guo L W *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2007 ,91 :252521
 [27] Liu B L ,Zhao H M ,Wang J *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2007 ,90 :112111
 [28] LaShell S ,McDougall B A ,Jensen E. Phys. Rev. Lett. ,1996 ,77 :3419
 [29] Seki T ,Hasegawa Y ,Mitani S *et al.* Nature ,2008 ,7 :125
 [30] Murakami S ,Nagaosa N ,Zhang S C. Science ,2003 ,301 :1348
 [31] Hirsch J E. Phys. Rev. Lett. ,1999 83 :1834
 [32] Hofmann P. Progress in Surface Science ,2006 ,81 :191
 [33] Murakami S. Phys. Rev. Lett. ,2006 ,97 236805
 [34] Liu H ,Yan J ,Zhao H G *et al.* Phys. Rev. B ,2007 ,76 :113403
 [35] Rodary G ,Sander D ,Liu H *et al.* Phys. Rev. B ,2007 ,75 :233412
 [36] Liu P ,Chen D M *et al.* Nanotechnology ,2007 ,18 205704
 [37] Liu H ,Meng Y ,Zhao H W *et al.* Rev. Sci. Instrum. ,2007 ,78 073705
 [38] Liu Q ,Wu N J ,Ignatiev A. Appl. Phys. Lett. ,2000 ,76 (19) 2749