

文章编号:1001-9014(2005)03-0189-04

自旋电子学、自旋电子器件及 GaAs 中电子自旋弛豫研究

赖天树, 刘鲁宁, 寿倩, 雷亮, 文锦辉, 林位株
(中山大学物理系光电材料与技术国家重点实验室, 广东广州 510275)

摘要:评述了自旋电子学及自旋电子器件的发展, 自旋电子器件的应用, 半导体自旋电子学的研究内容及目前的研究现状. 给出了我们的有关 GaAs 中电子自旋偏振与相干弛豫的研究结果.

关键词:自旋电子学; 自旋电子器件; 自旋弛豫; GaAs

中图分类号: O472⁺.3, O433.5⁺4. **文献标识码:** A

SPINTRONICS, SPINTRONIC DEVICES AND ELECTRON-SPIN RELAXATION IN GaAs

LAI Tian-Shu, LIU Lu-Ning, SHOU Qian, LEI Liang, WEN Jin-Hui, LIN Wei-Zhu
(Department of Physics, State-Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies
Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The development of spintronics and spintronic devices, the applications of spintronic devices as well as the research subjects and current status on semiconductor spintronics are reviewed. Our research results on the relaxation of polarization and coherence of electron spin are given for GaAs.

Key words: spintronics; spintronic devices; spin relaxation; GaAs

引言

尽管人们在 20 世纪 20 年代就发现了电子的自旋特性, 但一直未能发现电子自旋的应用价值. 现代电子器件只应用了电子的电荷特性, 而忽略了电子的自旋特征. 直到 1988 年, Baibich 等人人在 (Fe/Cr)_n 多周期薄膜组成的超晶格结构中观察到了巨磁阻效应, 并解释为 Cr 原子对 Fe 层膜中导电电子的散射强度的电子自旋取向依赖效应^[1], 才使人们认识到了电子自旋的应用价值. 之后, 对电子自旋的研究成了国际上一个新的研究热点, 美国、德国和法国等发达国家投入了大量的人力、物力开展电子自旋特征、电子自旋的控制、输运等研究和基于电子自旋效应的电子器件的开发, 以致于形成了一个新的学科—自旋电子学 (Spintronics)^[2]. 自旋电子学之所以引起人们极大的兴趣, 是因为自旋电子器件比传统的电子器件具有诸多优点, 如体积小、速度快、功耗小和信息不丢失等^[2]. 此外, 自旋电子器件还是目前

的微电子器件进入纳米尺度, 即量子器件的重要方案之一. 因为随着光刻技术的进步, 目前的微电子器件的基本单元尺度将会趋近纳米. 然而, 进入纳米尺度后, 电子的波动性质突显出来, 使得基于电子的粒子性设计的传统微电子器件在纳米尺度不能再有效工作, 而电子的自旋正是一个量子特征, 所以, 自旋电子器件正是目前的传统微电子器件向纳米量子器件过渡的重要方案之一. 目前已报道了一些基于电子或原子核的自旋态作为量子位的量子计算和信息处理方案^[3~6], 未来的量子计算机发展, 其重要的方案之一也是基于自旋电子器件^[7].

1 自旋电子器件的发展和应用

由于自旋电子器件比传统电子器件具有诸多优点, 所以, 自 Baibich 等人报道巨磁阻效应后, 国际上就开始了自旋电子器件的研制. 目前研制的自旋电子器件主要是基于铁磁金属, 已研制成功的自旋电子器件包括巨磁电阻 (GMR)^[8,9]、自旋阀 (SV)^[10]

收稿日期: 2004-10-21, 修回日期: 2005-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60378006) 国家重大项目课题 (60490295)、广东省自然科学基金项目 (04009736) 和广东科技计划项目 (2004B10101006)

Received date: 2004-10-21, revised date: 2005-02-24

作者简介: 赖天树 (1963-), 男, 四川大竹县人, 中山大学物理系教授, 博士, 主要从事飞秒激光技术与凝聚态物质中超快动力学研究.

和磁隧道结 (MTJ)^[11],正在研制、近期将具有商品化产品的自旋电子器件有磁随机访问存储器 (MRAM)^[12].更重要的自旋电子器件是自旋晶体管,只有研制成功自旋晶体管,才能实现自旋电流的放大.目前还处于探索阶段,已有一些方案提出^[13,14].GMR 器件的结构与 Baibich 等人报道的结构相同,利用相邻铁磁金属薄膜层间的自旋反向平行耦合,实现高阻态,而在适当强度外磁场作用下,所有铁磁金属薄膜层中电子自旋取向平行,实现低阻态.目前 GMR 器件的电阻变化率通常为 20%.SV 器件是对 GMR 器件的结构改进.将 GMR 器件中的铁磁金属薄膜层顺序编号,所有奇数号码为第一组,而所有偶数号码为第二组.结构的改进是在第一组铁磁金属薄膜层旁插入反铁磁金属薄膜层.由于铁磁和反铁磁层间的自旋耦合,使第一组铁磁金属薄膜层的自旋取向对外磁场不敏感,称为钉扎 (pinned) 层,而第二组称为自由层.通过外磁场方向控制自由层的电子自旋取向与钉扎层相同,实现低阻态,反之,使自由层电子自旋取向与钉扎层反向平行,实现高阻态.SV 结构比 GMR 结构略复杂,但 SV 中的金属薄膜夹层的厚度选择更灵活,而 GMR 中此金属薄膜层的厚度必须薄到几十埃,使得相邻的铁磁金属层间,在没有外磁场时能产生自旋反向耦合.MTJ 结构是对 SV 结构的进一步改进.将 SV 结构中的金属薄膜夹层替换为绝缘介质薄膜层,如氧化铝.MTJ 的控制原理与 SV 相同,差别仅在于 MTJ 结构中电子传导利用了绝缘介质的隧道贯穿效应,而 SV 结构中利用金属电子传导.MTJ 能够获得近 50% 的电阻变化率,所以比 SV 更灵敏.MRAM 是一种功能类似于目前计算机中的 EEPROM 的存储器,但它的速度是目前 RAM 的 1000 倍^[2],并且,功耗低,它将替代计算机中目前使用的 RAM.由于 MRAM 的信息不丢失性,所以,装有 MRAM 的计算机断电后再加电时,计算机能够继续先前的状态运行.MRAM 存储器目前已报道 64KB 的实验产品^[12].

目前得到成功应用的自旋电子器件主要有 GMR、SV. GMR 和 SV 型磁感应器用作计算机硬盘中的磁读头,取得了巨大的成功,使硬盘的存储密度在过去近 10 年中提高了近千倍.目前的计算机硬盘存储密度已接近 100GB/in²,这种巨大进步完全得益于 GMR 和 SV 磁读头的高灵敏度.目前正在研制灵敏度更高的 MTJ 磁读头,用于存储密度超 100GB/in² 的新一代硬盘.GMR 的另一个成功应用

是电噪声隔离器,它比传统的光电隔离器速度快至少 10 倍,并且容易与电路集成制造,所以已在现代集成电路设计中得到广泛应用.

2 半导体自旋电子学研究进展

GMR、SV、MTJ 和 MRAM 器件均是基于铁磁金属发展的自旋电子器件.然而,基于铁磁金属难于发展具有放大功能的自旋晶体管^[5],也难于实现自旋器件的集成制造和与传统微电子器件的一体化集成制造.所以,目前国际上自旋电子学的研究重点集中在半导体自旋电子学,希望利用半导体中电子和空穴的自旋自由度实现自旋电子器件与传统电子器件的集成制造.然而,由于半导体中的电子和空穴的自旋取向是各向同性的,因而,首先要解决的基本问题是如何实现半导体中电子自旋的极化或注入.其次,要解决如何使电子自旋极化(偏振)能够保持足够长的时间,以满足基于电子自旋极化的信息存储和算数、逻辑处理要求.目前发展的自旋极化方法主要有圆偏振光激发^[15]、电注入法^[16].前者主要应用在自旋特性的实验研究中,而后者主要在未来的半导体自旋电子器件开发中具有应用价值.此外,目前还在从材料方面努力,使半导体中导带电子的自旋分裂,如目前正在探索的稀磁半导体材料^[17].要实现半导体自旋电子器件制造,除了解决上述电子自旋极化或注入的基本问题外,还需要解决电子自旋的存储、运输、控制和检测等问题.这些问题正是目前半导体自旋电子学的研究热点.美国加州大学圣巴巴拉分校的 D. D. Awschalom 教授的研究小组在上述问题研究中作出了许多开创性的研究工作.他们首先研究了 GaAs 中电子自旋相干的运输,发现 GaAs 中电子自旋在 16V/cm 的电场中能够运输 100 μm ^[18],这样的运输尺度已基本能满足器件制造需要.在 II-VI 半导体量子阱中,他们发现电子的自旋即使在室温下也能够保存几个 ns^[19].自旋相干的控制方面,他们提出了超快光^[20]、电^[21]控制方法,而瑞典的 Acremann 等人报道了超快磁场产生^[22],有望用于自旋的磁控制.对电子自旋的检测, Ganichev 等人提出了将自旋转换为电流的检测方法^[23].上述所有问题的初步研究,为原理性的半导体自旋电子器件设计提供了重要参考和指导,但距实际的半导体自旋电子器件研制还有相当遥远的距离,还有许多理论、技术问题有待研究、解决.国内在半导体及其量子结构自旋电子学研究方面虽然起步稍晚,但目前基本上紧跟国际先进水平.中科院物理

所、半导体所和中国科技大学均有研究小组正在从事半导体及其量子结构中电子自旋偏振、相干的弛豫和输运方面的理论研究,并取得重要研究成果,在国际著名学术刊物 Phys. Rev. Lett. 和 Phys. Rev. B 等上报道. 中山大学在半导体及量子阱中电子自旋偏振与相干弛豫动力学实验研究及新的实验探测方法及其理论方面开展了研究工作,并取得了初步重要研究成果,在国内外重要学术刊物 Appl. Phys. Lett. 和物理学报等上报道.

3 GaAs 中电子自旋偏振与相干弛豫的实验研究

我们使用飞秒时间分辨圆偏振光泵浦—探测饱和吸收光谱技术首次实验研究了室温下非掺杂 GaAs 中电子自旋偏振与相干弛豫. 飞秒激光由自锁模钛宝石激光器产生,中心波长 850nm,脉冲宽度约 80fs,脉冲重复率 82MHz. 实验装置和探测方法与通常的时间分辨线偏振光泵浦—探测实验装置相同,只是在泵浦和探测光束中插入了 1/4 波片,产生左或右旋圆偏振泵浦和探测光. GaAs 中电子自旋偏振弛豫实验结果如图 1 中点线所示. 图中 (σ^+, σ^+) 标注曲线为右旋圆偏振光激发、右旋圆偏振光探测的实验结果,显示右旋圆偏振光激发的初始自旋向上电子布居的衰减弛豫. (σ^+, σ^-) 标注曲线表示右旋圆偏振光激发,左旋圆偏振光探测的实验结果,显示由于初始自旋向上偏振电子的退偏振引起自旋向下偏振电子布居的增长. $(-, -)$ 标注的中间曲线为平行线偏振光激发、探测的实验结果,它对自旋偏振弛豫不灵敏,反映载流子布居密度的衰减. 根据二能级体系速率方程和小信号近似,可以导出圆偏振光泵浦—探测信号的理论公式为:

$$\Delta I(t) = C(1 \pm Pe^{-2t/T_2})e^{-t/T_1}, \quad (1)$$

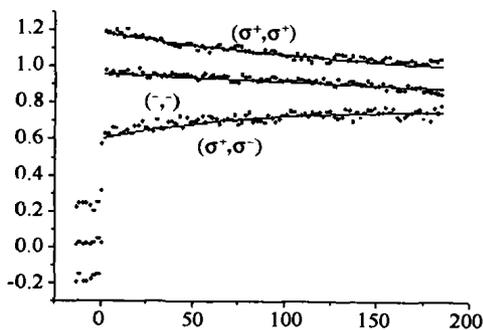


图 1 GaAs 中电子自旋偏振弛豫
Fig. 1 The relaxation of electron-spin polarization in GaAs

式中 T_2 和 T_1 分别为电子的自旋偏振弛豫和复合弛豫时间常数. P 为与 GaAs 的轻、重空穴带的吸收强度有关的待定常数. 当在导带底附近激发和探测时,理论上 P 的最大值为 0.25. “+”和“-”符号分别对应泵浦和探测圆偏振光具有相同和相反的旋向. C 为归一化常数.

应用方程(1)最小二乘拟合图 1 中的实验数据;拟合结果如图 1 中实线所示,获得待定参数值为 $T_2 = 230\text{ps}$, $T_1 = 1.5\text{ns}$ 和 $P = 0.245$.

电子自旋相干弛豫时间常数也是一个非常重要的参数. 目前国际上主要采用时间分辨法拉第光谱实验测量^[24]. 我们发展了一种新的实验方法—时间分辨圆偏振光泵浦—探测光谱技术. 当外加磁场与泵浦、探测光平面垂直 (Voigt 结构) 时,圆偏振泵浦光激发的电子自旋偏振会产生进动,绕磁场旋转. 这种自旋偏振进动会引起自旋向上和向下态的布居密度发生周期性变化,而一个右旋或左旋圆偏振光分别只对自旋向上或向下电子布居密度灵敏,所以,自旋态电子布居密度的周期变化会调制圆偏振探测光的透射强度,产生周期振荡. 我们用这种方法初步研究了 GaAs 中电子自旋相干弛豫过程. 所使用的飞秒激光和实验条件与上面的自旋偏振弛豫实验相同. 沿样品表面的平行磁场由 NdFeB 永磁体柱产生. GaAs 薄膜样品位于永磁体柱的 4mm 气隙中的柱轴线上,气隙中轴线上磁感应强度 $B = 1.43\text{T}$,方向沿轴线,并设置泵浦—探测光平面与 B 垂直. 实验结果如图 2 中点线所示. 图中 (σ^+, σ^+) 标注曲线为右旋圆偏振光激发、右旋圆偏振光探测的实验结果,显示右旋圆偏振光激发的初始自旋相干弛豫与自旋进动. (σ^+, σ^-) 标注曲线表示右旋圆偏振光激发,左旋圆偏振光探测的实验结果,同样显示初始自旋相干弛豫与自旋进动,但由于初始自旋态的初始位相相对于左旋圆偏振光为 180 度,所以,信号反相,由弱变强. $(-, -)$ 标注的中间曲线为平行线偏振光激发、探测的实验结果,它对自旋偏振与相干弛豫不灵敏,反映载流子布居密度的衰减. 根据二能级体系速率方程和小信号近似,可以导出自旋相干弛豫与自旋进动调制引起的圆偏振探测光强度变化的理论公式为:

$$\Delta I(t) = C[1 \pm Pe^{-2t/T_2^*} \cos(g\mu_B Bt/\hbar)]e^{-t/T_1}, \quad (2)$$

应用方程(2)最小二乘拟合图 2 中的实验数据;拟合结果如图 2 中实线所示,获得待定参数值为 $T_2^* = 82\text{ps}$, $T_1 = 1.1\text{ns}$, $P = 0.24$ 和 $\omega = g\mu_B B/\hbar =$

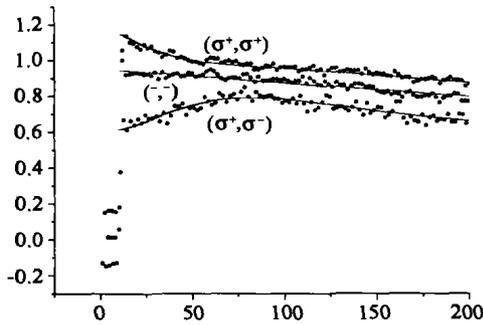


图2 GaAs 中电子自旋的相干弛豫。B = 1.43T

Fig.2 The relaxation of electron-spin coherence in GaAs

0.04rad/s = 2.3°/s。由于 B 较小, 自旋进动角速度小, 仅 2.3°/s, 在 82 ps 的自旋相干时间内, 自旋进动还不能完成一周, 所以, 图 2 中信号没能观察到周期振荡。

4 展望

自旋电子学是一个年轻的新学科, 具有许多新问题有待研究、解决。基于铁磁金属的 GMR、SV 和 MTJ 自旋电子器件的研制成功和应用, 显示出了自旋电子器件的巨大应用潜力, 促使人们研制半导体自旋电子器件, 特别是自旋晶体管。自旋晶体管的研制成功, 将促进量子计算机和量子信息处理的发展。然而, 由于半导体中电子自旋的非耦合性, 并不象铁磁金属中那样自旋耦合取向。所以, 实现半导体自旋电子器件还有许多基本问题有待研究、解决。

REFERENCES

- [1] Baibich M N, Broto J M, Fert A, *et al.* Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61** (21): 2472—2475.
- [2] Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A, *et al.* Spintronics: A spin-based electronics vision for the future[J]. *Science*, 2001, **294**: 1488—1495.
- [3] DiVincenzo D P. Quantum computation[J]. *Science*, 1995, **270**: 255—261.
- [4] Bennett C H, DiVincenzo D P. Quantum information and computation[J]. *Nature*, 2000, **404**: 247—255.
- [5] Sarma S Das, Fabian Jaroslav, Hu Xuedong, *et al.* Spin electronics and spin computation[J]. *Solid State communications*, 2001, **119**: 207—215.
- [6] BI Si-Wen. Tangle state of quantum remote sensing [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (毕思文, 量子遥感信息的纠缠态, 红外与毫米波学报), 2003, **22** (1): 53—60.
- [7] Kane B E. A silicon-based nuclear spin quantum computer [J]. *Nature*, 1998, **393**: 133—137.
- [8] Barnas J, Fuss A, Camley R E, *et al.* Novel magnetoresistance effect in layered magnetic structures: Theory and experiment[J]. *Phys. Rev. B*, 1990, **42**: 8110.
- [9] Prinz G A. Magnetoelectronics [J]. *Science*, 1998, **282**: 1660—1663.
- [10] Parkin S S P, Mauri D. Spin engineering: Direct determination of the Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida far-field range function in ruthenium [J]. *Phys. Rev. B*, 1991, **44**: 7131—7134.
- [11] Moodera J S, Kinder Lisa R, Wong Terrilyn M, *et al.* Large Magnetoresistance at room temperature in thin film tunnel junctions[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **74**: 3273—3276.
- [12] Koh G H, Kim H J, Jeong W C, *et al.* Fabrication of high performance 64 kb MRAM[J]. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, **272—76**: 1941—1942.
- [13] Sugahara S, Tanaka M. A spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistor using half-metallic-ferromagnet contacts for the source and drain [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84** (13): 2307—2309.
- [14] Hall K C, Lau W H, Gundogdu K, *et al.* Nonmagnetic semiconductor spin transistor[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2003, **83** (14): 2937—2939.
- [15] Lampel Georges. Nuclear dynamic polarization by optical electronic saturation and optical pumping in semiconductors [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1968, **20**: 491—493.
- [16] Ohno Y, Young D K, Beschoton B, *et al.* Electrical spin injection in a ferromagnetic semiconductor heterostructure [J]. *Nature*, 1999, **402**: 790—792.
- [17] Fleurov V, Kikoin K, Ivanov V A, *et al.* Mechanisms of double magnetic exchange in dilute magnetic semiconductors[J]. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, **272—76**: 1967—1968.
- [18] Kikkawa J M, Awschalom D D. Lateral drag of spin coherence in gallium arsenide [J]. *Nature*, 1999, **397**: 139—141.
- [19] Kikkawa J M, Smorchkova I P, Samarth N, *et al.* Room-temperature spin memory in two-dimensional electron gases [J]. *Science*, 1997, **277**: 1284—1287.
- [20] Gupta J A, Knobel R, Samarth N, *et al.* Ultrafast manipulation of electron spin coherence[J]. *Science*, 2001, **292**: 2458—2460.
- [21] Salis G, Kato Y, Ensslin K, *et al.* Electrical control of spin coherence in semiconductor nanostructures [J]. *Nature*, 2001, **414**: 619—622.
- [22] Acremann Y, Buess M, Back C H, *et al.* Ultrafast generation of magnetic fields in a Schottky diode [J]. *Nature*, 2001, **414**: 51—54.
- [23] Ganichev S D, Ivchenko E L, Danilov S N, *et al.* Conversion of spin into directed electric current in quantum wells [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**: 4358—4361.
- [24] Kikkawa J M, Awschalom D D. Resonant spin amplification in n-type GaAs [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**: 4313—4316.