

自旋电子学研究

钟红梅*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘 要 本文对自旋电子学的起源、作为自旋源的稀磁半导体的制备和自旋电子学的应用及发展前景进行了综述。详细介绍了稀磁半导体的制备及自旋电子学在器件上的应用。

关键词 自旋 电子 稀磁半导体 应用

电子的奇异量子特性之一就是所谓的“自旋”，它与磁性有密切的关系。到目前为止，信息处理技术一直依赖于纯粹以电荷为基础的器件，包括现在已经成了老古董的真空管以及最新型的百万晶体管及微芯片等。这类传统电子器件利用电荷的运动来工作，但每个电子所具有的自旋却不起什么作用^[1]。

然而对于信息的存储来说，磁性(因而电子自旋)却始终扮演着非常重要的角色。例如，即使是最早一代的计算机硬盘驱动器也利用了磁阻效应，即磁场引起的电阻变化来读出存储在磁畴中的数据。自旋电子器件技术在信息存储行业初露锋芒就大获成功并不令人惊奇。现在的大多数笔记本电脑都配置了大容量的硬盘驱动器，其每平方毫米硬盘面积上存储的数据之多达到了前所未有的水平。这些器件利用了一种名为巨磁阻(GMR)的自旋电子效应来读出密度如此之高的数据。巨磁阻效应也被认为是人们研究自旋电子学的最初动机。其另一个可能具有巨大商业价值的应用就是在今后几年内将投放市场的一种新型的计算机存储器(MRAM)。MRAM即使在断电时也能保持状态，因而它存储的数据不会丢失^[2]，但它的开关速度和重写能力可与传统的随机存储器相媲美。因此，各国科研机构 and 各大公司都投入了巨大财力和人力从事此领域的研究。我国的中科院、南京大

学和中国科技大学等有关研究机构对此也给予了一定的重视，但目前只集中在凝聚态物理方面，更大的突破则需要半导体行业的积极加入。

自旋电子学(Spintronics)^[4,5]这一新的学科分支使人们有可能利用电子自旋这一特性来操纵电子的许多光电行为，从物理根源上与目前电子电荷特性操纵电子的光电特性形成互补。由于自旋特征量的易保持性，人们可以期望利用电子自旋特征来优化当前的许多光电子与微电子器件。稀磁半导体一个独特而重要的特点是磁极子的局域磁矩和电子(空穴)的自旋相互作用^[5]，所以稀磁半导体被看作是一种很有前途的自旋源。所以在自旋电子学的研究中对稀磁半导体研究是必不可少的。

1 稀磁半导体简介

1.1 稀磁半导体定义

稀磁半导体材料(DMS)也称半磁半导体，是指由磁性过渡族金属原子或稀土金属离子部分替代非磁阳离子之后所形成的一类半导体材料。无磁场无磁性，有磁场有磁性，如图1所示。

1989年^[6]，人们在非平衡生长条件下，利用低温分子束外延(LT-MBE)的方法制备出了基于III-V族化合物InAs的DMS、(In,Mn)As。后来基于III-V族化合物DMS的研究也主要局

* 2002级博士研究生

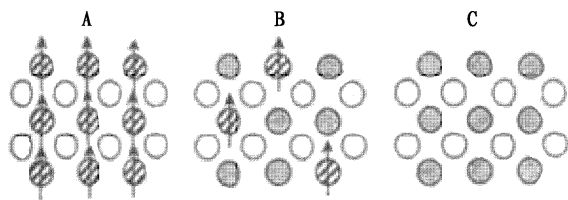


图 1 从磁性角度看, 半导体可划分为: (a) 含有磁元素阵列的磁性半导体; (b) 稀磁半导体 (非磁半导体和磁元素间的合金); (c) 传统的不包含磁离子的半导体

限于 (In,Mn)As。直到 1996 年, 一种新型基于 III-V 族化合物 GaAs 的 DMS, $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ (Mn 组分 x 在 0.005 ~ 0.08 范围), 通过 LT-MBE 的方法制备成功。(Ga,Mn)As 的出现开创了磁性半导体领域的新时代。

1.2 稀磁半导体的制备

1.2.1 分子束外延 (MBE) 法

半导体材料之所以应用广泛, 在于可以通过掺入很少量的 n 型或 p 型杂质就能改变其特性, 因此人们想到了通过掺入磁性离子来改变其磁性的方法。但是存在 n 型和 p 型掺杂的困难, 限制了其器件的应用。

同现代半导体工艺相容的方法是引入高浓度的磁离子使非磁性的 III-V 族化合物半导体带磁性。但 III-V 族半导体磁性化的主要障碍是磁离子在其中的固溶度太低。由于磁效应大致正比磁离子的浓度, 低于 10^{18}cm^{-3} 固溶度的磁离子不起作用, 因此稀磁半导体的制备研究一直裹足不前。自 1989 年 Munekata 等人采用 MBE 方法成功生长出 (In,Mn)As 之后, (Ga,Mn)As 和其它一些 III-V 族磁半导体也相继得到制备。MBE 的优点在于可以精确控制计量比同时引入高浓度的磁离子。其缺点是该方法生长温度低, 不能使用高熔点的源; 只限于研究使用, 生产规模受限。

1.2.2 离子注入技术

离子注入技术具有良好的选注入能力, 更具有实用价值; 但是由于注入能量较高, 会造成晶格损伤, 内外表面难于均匀。

扩展更多的掺杂磁元素或生长更多种类材料来提高磁半导体材料的居里温度是当务之急。Dietl 等人^[7]采用 Zener 模型对闪锌矿结构磁半导体的计算表明 GaMnN 和 ZnMnO 具有高达室温的居里温度 (如图 2)。该计算结果对实验研究提供了很好的理论依据, 这两类磁半导体的实验研究已经起步。Zajc 等人^[8]利用氨热解法生长了微晶 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{N}$ 样品并研究了其磁学和光学特性。Fukumura 等人^[9]则在蓝宝石衬底上利用脉冲激光淀积技术成功制备了 ZnMnO。我们相信这些不懈的努力必然会推动自旋电子学的进一步发展。

1.2.3 表征技术

(1) X 射线衍射、断面扫描显微镜 (STM) 和拉曼散射技术可用来研究磁半导体薄膜的晶体质量、晶格常数及界面处点缺陷和掺杂原子的分布等。图 2 给出了 (In,Mn)As 的晶格常数随 Mn 离子浓度的变化。

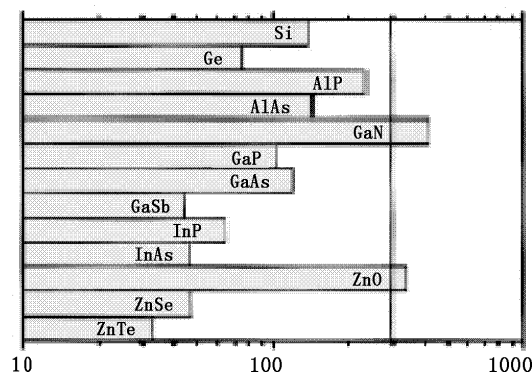


图 2 利用 Zener 模型计算的各种 p 型半导体的居里温度 (Mn 组分为 5%, 空穴浓度为 $3.5 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$)

(2) X 射线吸收精细结构测量技术 (XAFS) 和内核光发射谱能确定 Mn 原子的局域结构即其周围的情况包括原子间距、原子种类和最近邻原子数等。

(3) 带宽度的测量用红外吸收实验实现。

(4) 载流子的类型、浓度、迁移率和磁阻的测量由 Hall 方法得到。

(5) 磁性质包括易磁轴 (磁的各向异性)、磁滞回线和磁畴等基本特性的研究需利用含超导

量子干涉器件 (SQUID) 的磁量仪、磁力显微镜 (MFM) 和扫描 Hall 探针显微镜 (SHPM) 等。

2 电子自旋的应用

(1) 1990 年, 普渡大学的 Datta 和 A.Das 提出了自旋极化场效应晶体管 (自旋 FET) 的一种设计方案 (见图 3)。

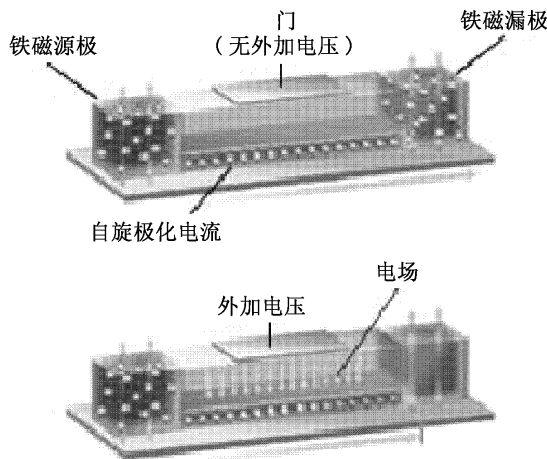


图 3 自旋晶体管的一种构想

与传统的 FET 一样, 该自旋 FET 有一个源极和一个漏极, 其间隔着一条狭窄的半导体通道。但自旋 FET 的源极和漏极均具有磁性。源极发出的自旋极化电子进入半导体通道。如果这一自旋电流原封不动地到达漏极的话, 那么它的流动便畅通无阻 (上图)。向门电极加一个电压, 就在半导体通道内产生出一个电场, 该电场使高速运动的电子的自旋发生进动或转动 (下图)。此时漏极开始对自旋电流产生阻碍作用, 而阻碍作用的强弱取决于自旋转动的程度。与传统的 FET 相比, 自旋 FET 有很多优点: 能使电子自旋翻转, 而不是把电子从半导体通道中驱赶出去, 这样它所需要的能量就小得多, 而且自旋翻转的过程也比驱赶电子的过程快得多。但是至今为止还无人打造出这样的自旋 FET。

(2) 光电自旋设施^[10]。

(3) 自旋存储器、自旋量子计算机^[11-13]等。

图 3 给出了自旋在自旋量子计算机中的应用。在传统计算机中, 每一位数据都有一个确定的值——不是 0 就是 1。8 个二进制位可以

表示从 0 到 255 的任何数字, 但一次只能表示一个数。电子自旋只能取“自旋向上”或“自旋向下”两种状态中的一种, 因此可用来表示数据位。量子位也可以是 0 与 1 的迭加, 实际上就是说量子位可以同时既为 0 又为 1。这样, 8 个量子位可以同时表示从 0 到 255 的每一个数, 因此它理所当然具有极高的并行性, 这样量子算法就可以同时运算许多不同的数字。电子自旋就是天生的量子位, 因为一个倾斜的电子就是一个自旋向上与自旋向下两种状态的相干迭加, 而且它比其他的量子电子态要更加稳定。但是量子位是极为脆弱的, 只要它与周围环境有丝毫的意外互相作用, 它的迭加态就会在转瞬间土崩瓦解, 通常使它转变为随机的一般数据即 0 或 1。这一过程称为退相干 (decoherence)。

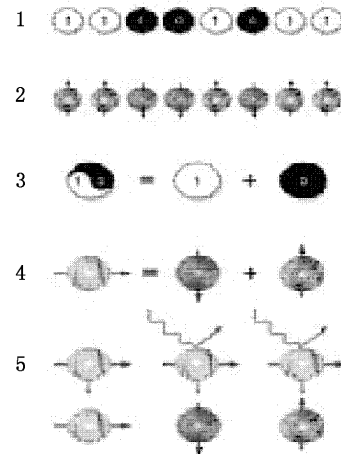


图 4 量子计算机中的自旋电子量子位

以半导体中电子的电荷为基础的量子位充其量也只能把相干性维持几皮秒, 而且还必须是在极低的温度下, 因此没什么使用意义。退相干之所以如此之快, 其原因在于电荷之间的电作用力相当强, 而且是长程力。在传统的半导体器件中, 这种强相互作用是有利的, 因为它使我们能够用较弱的电场实现对电流的精确控制。然而, 对于量子相干器件来说这种强相互作用是一个祸害。实验通过观察自旋的进动来测定退相干速率, 图 5 是半导体中的自旋拖动, 处于自旋极化状态的一团团电子被电场拖曳着移动了 100 μm 以上的距离, 比基于电荷的

量子位延长了整整 1000 倍，已经达到实际器件需要。

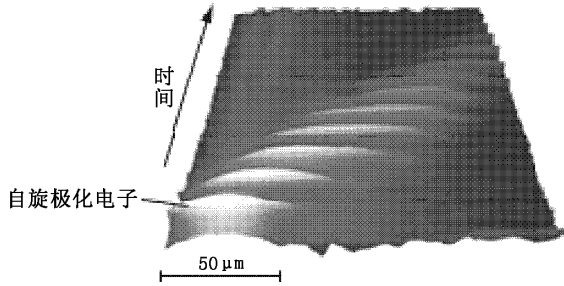


图 5 自旋极化态量子相干性随时间的变化

3 自旋电子学的展望

由于电子自旋极化不易受材料结构不完备的影响，使得自旋电子器件对半导体材料的要求并不像一般电子器件那样苛刻，这可以降低对工艺的要求，而且改变电子自旋比改变电子运动容易得多、快得多，这意味着自旋电子器件功耗比一般电子器件小得多，速度快得多，所以自旋电子器件要比单纯的电子器件更具优势。但是由于对电子自旋知识的缺乏，还有很

多问题有待于解决。现在自旋极化电子的有效注入半导体^[14]是自旋电子学首先需要解决的问题。对于自旋极化率较低的问题，人们需要找寻新磁性材料，它应该具有极大的电子自旋极化度。目前最好的结果是 T<10K 有 4.5% 的极化。所以，新材料和新结构的发展将成为自旋电子学研究和发展计划的主要部分。

参考文献

- [1] David D. Awschalom. Scientific American, 9, 32(2002).
- [2] N. A. Gershenfeld. Science, 275, 350 (1997).
- [3] Michael Oestreich. 402, 735(1995).
- [4] Science, 281, 951(1998).
- [5] Ohno. Phys Rev Lett, 68(17), 2664(1992).
- [6] Munekata H. Phys, Rev Lett, 63, 1849(1989).
- [7] Dietl T. Science, 287, 1019(2000).
- [8] Zajcm. Appl Phys Lett, 78(9), 1276(2001).
- [9] Fukumura T. Appl Phys Lett, 78(7), 958(2001).
- [10] R. Fiederling. Nature, 397(1999).
- [11] Divincenzo. Science, 270, 255(1995).
- [12] N. A. Gershenfeld. Science, 275, 350(1997).
- [13] Loss. Phys. Rev. A, 57, 120(1998).
- [14] Michael Oestreich. Nature, 402, 735(1999).

简 讯

用于人员识别的手指 红外静脉图

日本日立公司中心研究实验室研制出一种可对手指静脉进行近红外成像的人员识别系统。据说这种识别系统比语音检测和脸部识别系统更为精确，而且不会像指纹识别、虹膜扫描和视网膜扫描那样引起传染或者产生令人不舒服的感觉。

手指静脉识别系统让近红外光透过受验者的左手小指，并用 CCD 摄像机对小指进行成像。小指的静脉图像得到增强和互相关处理后，678 名受验对象全都受到准确辨认，误识率为零。

手指静脉识别系统使用的光源是一个近红外发光二极管阵列，发射波长为 810nm，为了增加阵列中发光二极管的数量，阵列中有一块平面塑料透镜。当发光二极管阵列发射的近红外光透过手指的背面时，光的强度受到了人为的调整，并由一台配有中性密度滤光片的 CCD 摄像机成像。为了去除背景强度，摄像机

还使用了一块低通滤光片。识别系统利用相关系数对获得的图像与记录的图像进行比较。根据手指边缘图像，系统计算出手指与水平面的倾角并把它校正成零。整个手指的图像尺寸为 640×480 个像元。在 x 和 y 方向上，这些像元数可减少一半而不会有损于精确的识别结果。大量的曲线拟合结果表明，在图像尺寸小至 32×32 个像元的情况下，近红外手指静脉图的误识率为 0.043%，这样的精度仍等于或优于虹膜和指纹识别方法的精度。

手指静脉图识别方法的最大问题是人的静脉在一生中可能会发生变异。虽然在此试验中的误识率可略而不计，但所选的试验对象基本上都处于 20 岁至 40 岁的年龄段，这一年龄段的人群的遗传变异和年龄变异都比较小。研究人员希望对人数更多、遗传和年龄变异更大的人群作进一步的研究，并希望能长期跟踪儿童的手指静脉图的变化。

目前，日立公司正在寻找把这种技术变成商品的途径，并对这种技术在自动检票机和医院病人鉴别方面的一般应用作一些调查。

□ 顾聚兴