

自旋电子学研究进展*

詹文山[†]

(中国科学院物理研究所 磁学国家重点实验室 北京 100080)

摘要 自旋电子学是最近几年在凝聚态物理中发展起来的新学科分支,它研究在固体中自旋自由度的有效控制和操纵,在金属和半导体中自旋极化、自旋动力学、自旋极化的输运和自旋电子检测.由于它在信息存储方面的重大应用前景,受到学术界和工业界的高度重视.文章扼要地介绍了自旋电子学发展的历程和发展中的最重要的发现.最近几年,最奇特的发现和最重要的应用莫过于巨磁电阻,薄膜领域纳米技术的迅速发展使巨磁电阻的应用变成可能.作为磁记录头它已使硬盘的记录密度提高到 $170\text{Gbit}/\text{in}^2$. 动态随机存储器 MRAM 的研究已实现 16Mbit 的存储密度.

关键词 自旋电子学,巨磁电阻,磁隧道结,自旋阀

Recent progress in spintronics

ZHAN Wen -Shan[†]

(State Key Laboratory for Magnetism, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100080, China)

Abstract Spintronics is a new branch of condensed matter physics devoted to studies on the manipulation of the spin degree of freedom in solids. It involves spin polarization, spin dynamics, spin transport, and the detection of spin polarized electrons in metals and semiconductors. Spintronics has attracted great attention from scientists and manufacturers because of its potential application in information storage. A brief review of the development of spintronics and its most important discoveries will be given. The most exciting event in recent years may be the discovery of the giant magnetoresistance effect in metallic multilayer films and the successful application of this effect to information storage. Based on this effect, the magnetic recording density has been increased to $170\text{Gbit}/\text{in}^2$. A magnetoresistive random access memory of 16Mbit storage density has also been developed. These results clearly demonstrate the importance of spintronics for information technology.

Keywords Spintronics, giant magnetoresistance, magnetic tunnel junctions, spin valve

1 自旋电子学研究的历史回顾

电子具有电荷和自旋两种属性是人所共知的.电子在电场中运动由于带有电荷而形成电流.导体在磁场中做切割磁力线的运动时,导体中产生电流.反过来,在磁场中的通电导体将产生垂直磁场的运动.从而发明电动机和发电机,成就了一个世纪的文明.在半导体中由于导带中的电子和价带中失去电子形成空穴的输运特性,构成 PN 结,1947 年发明半

导体晶体管,开创半导体电子学,打开了当代通信和数据处理技术发展的大门,奠定了现代信息社会的基础.所有这些都是基于电子具有电荷的属性.电子在完整晶体的周期性势场中运动是不受阻碍的,因而称为透明的.但是由热引起晶格振动或晶体中的各种缺陷,对电子散射而形成了阻碍.电子不受到散射的平均路程称为平均自由程.在低温下,金属的电

* 国家重点基础研究发展计划(批准号 2001CB610600),国家自然科学基金(批准号 59731010)资助项目
2006-04-04 收到初稿 2006-06-02 修回

[†] Email: wszhan@aphy.iphy.ac.cn

子平均自由程约为 10nm. 在原子结构中, 我们已经熟知电子的自旋特性, 在一个能级轨道上只能有自旋向上和自旋向下的两个电子占据. 电子在固体材料中运动能否有自旋极化的电子电流? 怎样产生自旋极化的电流? 自旋极化电子在运动中能保持多长的路程? 怎样检测自旋极化电流? 早在 1971 年, Tedrow 等^[1]利用超导(Al)/绝缘层(Al_2O_3)/铁磁金属(Ni)的隧道结, 测出穿越绝缘体的电流是自旋极化电子流, 而自旋极化电子流是通过铁磁金属产生的. 人们可以利用该实验测量各种铁磁材料产生自旋极化电流的能力, 用自旋极化度 P 来表征. 自旋极化度 P 定义为

$$P = \frac{N_{\uparrow}(E_F) - N_{\downarrow}(E_F)}{N_{\uparrow}(E_F) + N_{\downarrow}(E_F)} (\%),$$

式中 $N_{\uparrow}(E_F)$ 和 $N_{\downarrow}(E_F)$ 分别表示在费米面附近自旋向上和自旋向下的电子数. 1973 年, Tedrow^[2]用隧道谱法测量了 Fe, Co, Ni 和 Gd 的自旋极化率. 1999 年, Jagadeesh 等^[3]分析多家实验结果, 给出较为合理精确的实验测定结果: Fe 44%, Co 45%, Ni 33%, FeNi 48%, FeCo 51%. 对于半金属材料(如 CrO_2), 由于在费米面处自旋向下能带是空的, $P = 100\%$. 下一个问题是, 电流通过多厚的铁磁层才能达到最大的自旋极化度? 1983 年, Meservey^[4]发现 Fe 薄膜在 1nm 厚度时自旋极化逐渐达到饱和. 2003 年, Zhu 等^[5]对 CoFe 薄膜测量, 发现它在 2.3nm 厚度时达到饱和.

1986 年, Grunberg 等人^[6]发现, 在 Fe/Cr/Fe 三明治结构中, 适当的“Cr”层厚度, 可使两铁层之间形成反铁磁耦合. 1988 年, Baibich^[7]发现铁铬多层膜中, 当铬的厚度使铁层之间形成反平行耦合时, 没有外加磁场的电阻比外加磁场使多层膜饱和时大得多, 称为巨磁电阻(GMR)效应. 1990 年, Parkin 等^[8]用磁控溅射制备了一系列多层膜, 系统地研究了它们交换耦合振荡效应和巨磁电阻效应. 1990 年, Shinjo^[9]用两种不同矫顽力的铁磁层构成自旋阀. 1991 年, Dieny^[10]用反铁磁层钉扎铁磁层构成自旋阀. 自旋阀结构为 GMR 效应提供实际应用的可能, 例如硬磁盘的读出头和磁传感器. 自旋阀的结构给我们提供测量自旋扩散长度的方法. 1993 年, Bruce 等^[11]测量了 Fe, Co 和 FeNi 合金的自旋扩散长度. 在室温下: Co [5.5nm(↑), 0.6nm(↓)]; Fe [1.5nm(↑), 2.1nm(↓)]; FeNi [4.6nm(↑), 0.6nm(↓)], 对于非磁性金属 Au, Ag, Cu, Al 自旋扩散长度在 1—10 μm (括号中的箭头表示自旋向上或向下).

1975 年, Julliere 等^[12]发现用铁磁金属替代超导金属, 构成铁磁(Fe)/绝缘层(Ge)/铁磁(Fe)的磁隧道结(MTJ), 在低温 4.2K 时, 磁隧道电阻为 14%. 但可惜是在低温下实现的. 1995 年, Miyazaki 等^[13]发现 Fe/ Al_2O_3 /Fe 隧道结在室温下隧道磁电阻 TMR 高达 18%, 引起人们极大的兴趣. 由此可见, 自旋电流的注入、输运、操纵和检测都是在纳米尺度下进行的, 成为纳米科技的重要内容, 并成为新的研究领域. 早期(大约在 1995 年)^[14]称该研究领域为磁电子学(Magneto-electronics), 它主要包括巨磁电阻效应和磁隧道效应. 1996 年, Ohno 等^[15]在 GaAs 半导体中掺杂了 3.5% 的 Mn, 得到稀磁半导体, 居里温度超过 60K. Awschalom 等^[16]证明, 在 n 型 GaAs 中, 能够传输自旋信息和操纵自旋. 人们很自然想到能否实现自旋半导体器件. 1996 年, 日本最先实施“自旋可控的半导体纳米结构”的研究计划. 紧跟着美国、欧洲等都开始实施类似的研究计划. 2000 年 6 月, 在德国召开了自旋电子学讨论会(Symposium on Spin-electronics), 2001 年 8 月, 在比利时召开了自旋电子学讨论会(英文名称用 Spintronics in Belgium). 此时, 人们就发现用磁电子学定义狭隘了, 而采用了更广泛的名词: Spin-electronics 或 Spintronics (1999 年 Awschalom 等的文章中已出现“Spintronics”一词). 在我国称为自旋电子学, 它包括磁电子学和半导体自旋电子学.

《世界 2006 年鉴》期刊在“科学”栏目中的《自旋医生》一文中有一段评述: 如果磁电阻随机存储器(MRAM)实现了人们对它的期望, 它将最终横扫所有其他类型的存储芯片, 甚至会 and 硬盘展开激烈的竞争. 但是自旋电子器件的支持者希望 MRAM 只是一个开始. 他们想用自旋电子器件替代更多电荷电子器件. 2000 年, Black 等^[17]提出用一个比较简单的线路把 GMR 或 TMR 器件连结起来, 构成可编程程序的逻辑操作. 2003 年, Ney 等^[18]对单一磁电阻元件的结构做新的构思, 实现单一器件具有可编程程序的逻辑元件, 也就是说, 通过软件可以使一个磁性逻辑元件从“与”门变成“与非”门; 或“门变成“或非”门, 以及把“与”门变成“或”门. 我国《科学》刊物在 2005 年第 10 期发表的《硬件变色》一文中, 通俗介绍了利用 GMR 和 TMR 制作磁逻辑门, 以及用磁逻辑门阵列构成的磁处理器, 而且每个逻辑门都可以通过软件单独配制, 形成可随时变化像变色龙般的磁处理器. 最近国际上又开展了利用 GMR, TMR 和半导体的组合构建自旋晶体管的研究工作.

自旋电子学的发展历程可归纳为三步:巨磁电阻→隧道磁电阻→半导体自旋电子. 本文将扼要介绍这三种现象的物理概念、应用前景及最新进展.

2 巨磁电阻(GMR)

GMR 现象的发现首先应归功于 Grunberg 等人在 1986 年的发现:在“Fe/Cr/Fe”三明治结构中,Fe 层之间可以通过 Cr 层进行交换作用,当 Cr 层在合适的厚度(如 9Å)时,两铁层之间存在反铁磁耦合. 如图 1 所示,当 Cr 层厚度使铁磁层间为反铁磁耦合时,多层膜磁化强度饱和所需要的饱和磁场大,铁磁耦合时需要的饱和磁场小,呈现出随 Cr 层厚度变化铁层之间呈铁磁和反铁磁耦合的振荡现象.

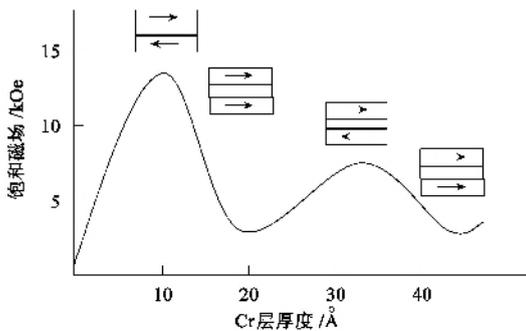


图 1 非磁性 Cr 层厚度变化引起铁磁层之间铁磁和反铁磁耦合交替变化

1991 年, Unguris 等^[19]做了一个很漂亮的实验,在三明治结构中,把非磁性金属层做成楔形,然后观察磁畴,可以明显看到黑白相间的磁畴,黑和白分别表示两个区域中磁化强度方向相反,意味着与底层磁化强度分别成铁磁和反铁磁耦合(图 2).

第二个贡献应归功于 Baibich 等人在 1988 年的发现:在 Fe/Cr/Fe 三明治结构的多层膜中,当 Cr 层为 9Å 时,铁层之间呈反铁磁耦合,在 4.2K 温度下 20kOe 的外磁场可以使相邻铁层之间由反铁磁耦合变成铁磁耦合,此时平行于电流方向的膜面的电阻率下降至不加外磁场时的一半,即 $MR\% = [R(0) - R(H)] / R(H) \times 100\%$,用磁化强度平行的电阻 R_p 和反平行电阻 R_{AP} 表示为 $MR\% = (R_{AP} - R_p) / R_p = 100\%$. 多层膜 MR 值随 $(Fe/Cr)_n$ 周期 n 的增加而增大,随 Cr 厚度变化呈振荡变化. 从 1988 年开始,国际上掀起对多层膜巨磁电阻现象的研究热潮,例如选择了各种铁磁层、非磁性层材料的组合对多层膜巨磁电阻和磁化强度反转磁场的影响,磁

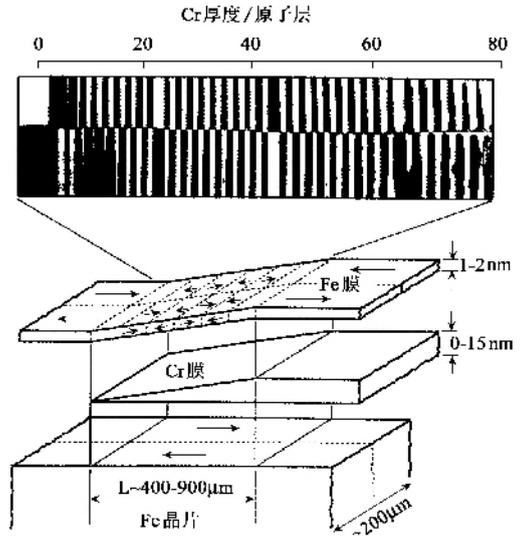


图 2 层间耦合的磁畴观察结果

场灵敏度[$MR\% / Oe$],以及巨磁电阻的物理起源等. 1991 年, Parkin 等^[20]用磁控溅射制备多层膜,并得到磁电阻随非铁磁层厚度变化的振荡效应,得到 (Co/Cu) 多层膜在室温下 MR 值达到 65%,而 (CoFe/Cu) 多层膜的 MR 值更优于 (Co/Cu) 多层膜. 如何使巨磁电阻效应获得应用是人们最关心的问题. 1990 年, Shinjo 用两种不同矫顽力铁磁层构成三明治结构的自旋阀. 1991 年, Dieny 用反铁磁层钉扎下面一层铁磁层,上面一层铁磁层为自由层,构成具有反铁磁层的自旋阀,如图 4 所示. FeMn, IrMn, NiMn, PtMn 等分别为反铁磁层所选材料,从此,材料的反铁磁性研究开始从学术研究范畴进入到技术应用研究范畴. 自旋阀的产生为巨磁电阻的应用打开方便之门. 1994 年, IBM 公司宣布利用 GMR 自旋阀研制成硬磁盘读出磁头的原型,将磁盘系统的记录密度提高 17 倍,达到 $10Gbit/in^2$,超越现有光盘的记录密度,是计算机电子工业的重大突破. 基于 GMR 自旋阀结构做成的磁传感器比常规的磁传感器输出信号大、信噪比大、体积小、灵敏度高、可靠性高、耐恶劣环境能力强,因此在测速、位移、旋转编码器和电流传感器等方面得到广泛应用. 但是三明治自旋阀的 MR 值比较低(不超过 10%). 为了提高自旋阀的 MR 值,1991 年, Pratt^[21]和 Gijs 提出利用电流垂直多层膜面的方式(CPP)可比电流平行膜面方式(CIP)的 MR 值大 4 倍(图 3). Egelhoff 等^[22]在 1999 年用氧化镍加在自旋阀两铁磁层外,形成镜面散射可提高自旋阀的 GMR. Kouli 等和 Huai 等^[23]于 2001 年提出,在两个铁磁层外面插入纳米氧化层可把自

旋阀的 MR 值提高到 10%—20% (图 4)。基本原理是纳米氧化层形成镜面,反射自旋电子而不改变自旋电子的极化方向,从而增加在三明治结构中电子自旋扩散长度,增加自旋阀的电导率。

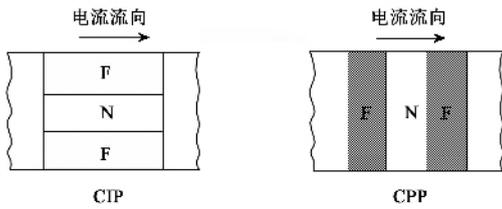


图 3 电流平行膜面(CIP)和垂直膜面(CPP)的GMR效应(F为铁磁金属,N为非磁金属)

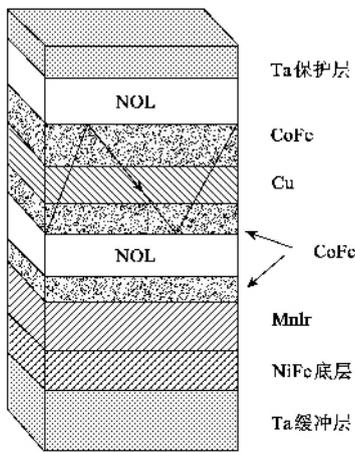


图 4 纳米氧化层(NOL)的自旋阀

GMR 效应最重要的应用是做硬磁盘的读出磁头,图 5 表示硬磁盘磁头的发展趋势。从 1994 年 IBM 公司做出 GMR 原型磁头到 2004 年十年间,已发展到 170Gbit/in² 的记录密度。磁头读出缝隙已达到 50nm。现在全世界硬磁盘高密度磁头市场几乎全部是 GMR 磁头。用 MTJ 做硬盘读出磁头,预计不久记录密度可达到 1000Gbit/in²,最终可能达到 50Tbit/in²。

早先人们利用 GMR 效应研制磁动态随机存储器(MRAM)在 0.9cm² 面积上实现 16Megabyte 高性能的 MRAM。后来由于用隧道磁电阻效应 TMR 做 MRAM 比用 GMR 效应有更大的优势,近来这方面的研究就很少了。图 6 表示目前能做出直径为 60nm、高为 130nm 的 GMR 纳米柱器件,显然 GMR 效应在纳米传感器方面有很大的发展前景,尤其在 MEMS 和机器人研究领域中的应用。Katine 等^[24]采用电流驱动 Co/Cu/Co 纳米柱的磁矩反转,并提出自旋转矩(spin-transfer torque)的新概念,引起学者们的广泛兴趣,同时有可能促成新

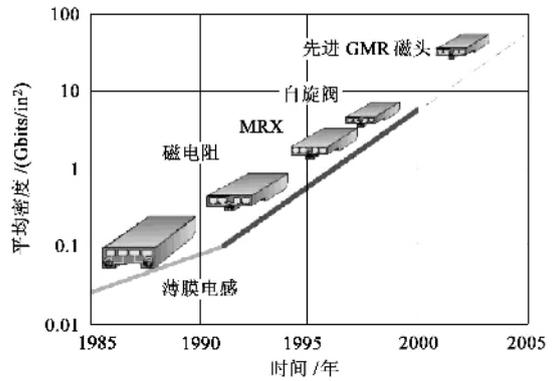


图 5 硬磁盘记录密度的发展

的信息存储技术的出现。

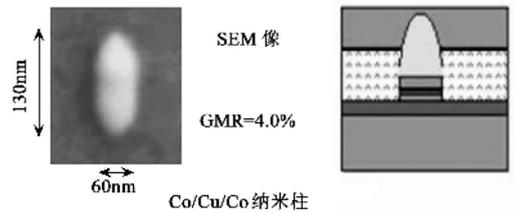


图 6 Co/Cu/Co 磁纳米柱的 GMR 效应

3 隧道磁电阻(TMR)

什么是隧道效应?量子力学的隧道效应就是指粒子穿过势垒并出现在经典力学禁阻的区域的过程。现在考虑一个电子通过由金属层/绝缘层/金属层构成的三明治薄膜的情况,绝缘层形成一个势垒很高的势阱。按经典力学概念,电子是不可能通过绝缘层。我们知道电子具有“波”“粒”两重性,电子的运动可以用波函数表征。量子力学对这种情况分析表明,电子能以一定的几率通过隧道效应而穿过势垒,逃出势阱。穿过势垒的几率是由波函数在势阱的两壁上必需连续这个条件决定的。当电子通过第一个金属/绝缘体的界面时,在绝缘体内波函数较快地衰减,如果绝缘层足够薄,也就是势垒薄,电子通过绝缘层到达第二个绝缘体/金属界面时,波函数没有衰减到零,那么在第二个金属薄膜中,发现电子的几率不是零,也就是说,电子穿越了势垒(图 7(a))。通俗比喻,当把电子看成是一个粒子球,它不可能通过墙壁,要想通过就得把墙壁打个洞。如果把电子看成是电子波,它就能像声音(声波)一样穿过墙壁,在墙壁后面听到声音。如果墙壁太厚,声音(声波)

也穿不过去. 1970年, Meservey 和 Tedrow^[25] 测量超导 $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ag}$ 在磁场下的隧道谱, 得到磁矩贡献的能级劈裂为 $2\mu\text{H}$. 1973年^[26] 他们进一步研究了“超导体/非磁绝缘层/铁磁金属”隧道结, 并测量了 Fe , Co , Ni 的自旋极化率, 该方法成为测量铁磁金属自旋极化率的经典方法.

1975年, Slonczewski 提出将隧道结中的超导体用另一铁磁层取代的设想, 认为隧道电导必然与两铁磁电极的磁化方向相关, 并把此现象命名为磁隧道结效应(图7(b)). 同年, Julliere 等确实发现 $\text{Fe}/\text{Ge}/\text{Co}$ 隧道结的隧道电导与两铁磁层磁化矢量的相对方向有关, 变化的大小 $\Delta G/G_A$ 在 4.2K 时约为 14%, ΔG 为相应两铁磁层磁化矢量平行和反平行时电导之差, G_A 为反平行时的电导. 1982年, Maekawa 等^[27] 研究了一系列以 NiO 为绝缘层的 $\text{FM}/\text{I}/\text{FM}$ 的隧道结, 发现在低温下有隧道效应, 但磁电阻值都很小, 最大只有 2.4%. 1987年, Suezawa 等^[28] 用 Al_2O_3 做绝缘层, 可喜的是在室温下获得磁隧道电阻, 但也很小. 1991年, Miyazaki 等^[29] 在 300K 获得最大磁电阻仅为 2.6%. 1995年, Miyazaki 等获得突破性进展, 在 $\text{Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ 隧道结中, 室温下获得磁电阻 $\text{MR} = 18\%$, 磁场灵敏度 $8\%/Oe$, 从此揭开了隧道磁电阻新的激动人心的一页, 人们开始集中研究用 Al_2O_3 做绝缘层的隧道结. 2000年, Han 等^[30] 在室温下获得磁电阻达 50%. 为了能够操纵极化的自旋电子, 同样地用反铁磁薄膜钉扎底层铁磁薄膜的磁化方向, 构成磁隧道结的自旋阀结构, 利用这样的结构就可以研制动态随机存储器, 称为磁动态随机存储器 MRAM(图7(c)).

基于 MTJ 构建的磁动态随机存储器 MRAM 具有非常优异的特性: 非易失性、高的集成度、高速读写能力、重复可读写次数近乎无穷大、低功耗和抗辐照能力. 它既可以做计算机的内存储器, 也可以做外存储器. 作为内存储器, 它与市场上通用的 DRAM 相比的优点是非易失性、抗辐照和存取速度快. 作为外存储器, 它比 Flash 存取速度快 1000 倍、功耗小和寿命长. 与硬盘竞争优势在于它无运动部件, 与 Flash 存储器使用一样方便. 由于 MRAM 的实现将极大促进计算机的发展, 国际上各大计算机公司都投入巨资研制 MRAM. 图 8(a) 给出各大公司的研究进展. IBM 公司目前做得最好, 达到 16Mbit. 美国和日本的公司都瞄准 256Mbit 的目标.

用氧化镁做绝缘层开辟了研究 MTJ 的新方向. Yuasa 等^[31] 在 2000 年研究单晶氧化镁基片上生长

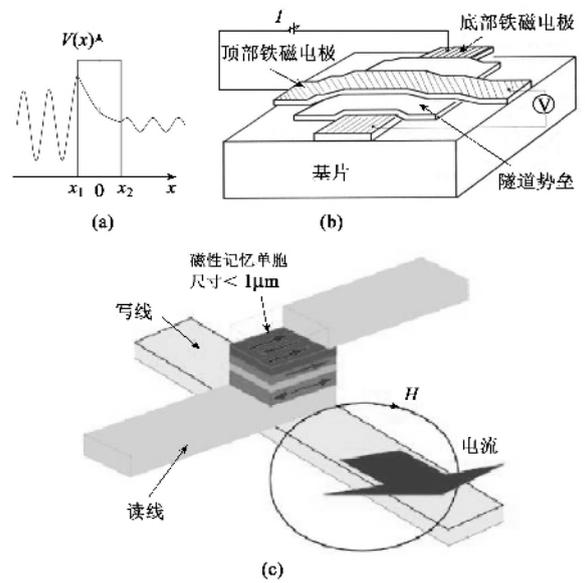


图7 隧道效应与 MRAM 原理图 (a) 电子穿越了势垒 (b) 磁隧道效应 (c) 磁动态随机存储器

$\text{Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiFe}$ 磁隧道结, 发现铁电极也是单晶膜, 而磁电阻具有各向异性特征, 不同晶体方向的磁电阻值不一样. 2001年, Wulfskel 等^[32] 用 MBE 制备了以氧化镁为基片的 $\text{Fe}(001)/\text{MgO}(001)/\text{Fe}$ 磁隧道结, 用 STM 测量隧道效应. 同时 Butler 等^[33] 用第一性原理计算了隧道电导和磁隧道电导, 理论上预言 TMR 值可达到 1000%. 2004年, Yuasa 等^[34] 制备的 $\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Fe}$ 磁隧道结的 MR 在室温下达到 88%, 最大输出电压为 380mV, 超高氧化铝为绝缘层的磁隧道结. 2004年 10 月, 他们又把 MR 值提高到 180%^[35]. 同月 Parkin 等^[36] 报道了在 $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{CoFe}$ 磁隧道结中获得 MR 为 220%、温度稳定性超过 400°C 的实验结果. 2005年 2 月, Diayaprawira 等^[37] 发表了他们的最新结果: 在 $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$ 磁隧道结中, MR 值为 230%, 结面电阻 R_A 为 $420\Omega\mu\text{m}^2$. 我们可以看到其进展不是以年计, 而是以月计. Coey^[38] 于 2005 年综合国际上研究结果, 给出氧化铝和氧化镁作为绝缘层磁隧道结的进展, 如图 8(b) 所示. 氧化镁磁隧道结的优点是: 高自旋极化率, MR 值在室温下达到 230%; 结电阻较小, R_A 接近 $300\Omega\mu\text{m}^2$; 热稳定性高, 可超过 400°C . 氧化镁磁隧道结的出现将大大加快 MRAM 的研究进度和进入市场的时间. 继续寻找新的绝缘层材料, 研究电流驱动自由铁磁层磁矩的反转和研究磁性处理器是今后磁隧道效应研究的重要方向.

表 1 各种稀磁半导体的性能

材料	掺杂元素	磁矩/(μ_B)	居里温度/(K)	参考文献
GaN	Mn 9%	0.9	940	Sonoda 等(2002)
TiO ₂	Co 7%	1.4	650-700	Shinde 等(2003)
	Fe 2%	2.4	>300	Wang 等(2003)
SnO ₂	Fe 5%	1.8	610	Coey 等(2004)
	Co 5%	7.5	650	Ogale 等(2003)
ZnO	Fe 5% Cu1%	0.75	550	Han 等(2002)
	Co 10%	2	280-300	Ueda 等(2001)

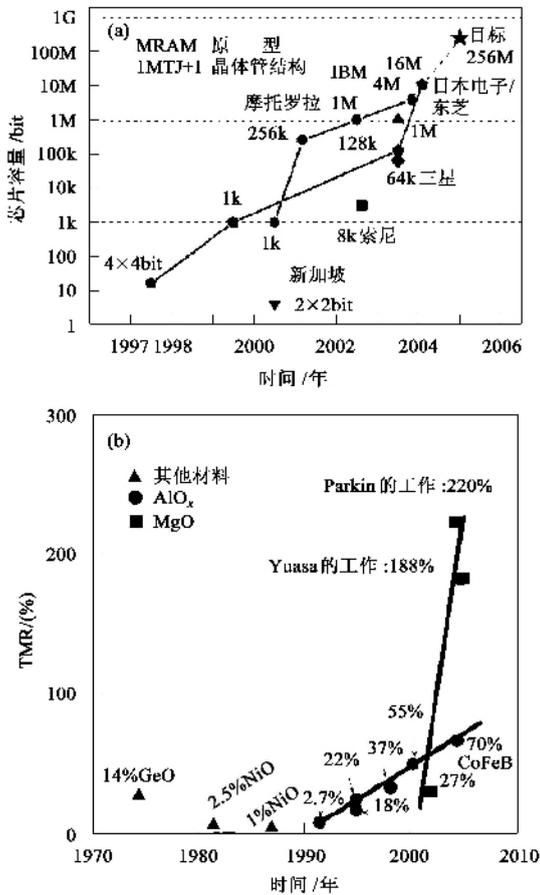


图 8 (a)MRAM 的进展 (b)磁隧道结 MTJ 的进展

4 半导体自旋电子学

电子同时具有电荷和自旋两种属性,电子的电荷属性在半导体材料中获得极大的应用,推动了电子技术、计算机技术和信息技术的发展.能否使电子的自旋特性在半导体中获得应用?能否在半导体器件中实现自旋极化、注入、传送、操作和检测?成为人们最关注的问题.最初人们企图用铁磁金属与半

导体材料直接欧姆接触,把极化自旋流注入到半导体材料中去,但是由于肖特基势垒太高,注入效率极低.为了克服肖特基势垒,只有两个办法:寻找磁性半导体材料或利用隧道效应.

早在 1989 年,Ohno 等^[39]就开始研究了稀磁半导体.他们在 InAs 中掺杂少量的 Mn,获得能隙变窄的 n 型稀磁半导体.1992 年,他们又获得 p 型(In, Mn)As 稀磁半导体^[40].1996 年^[41],他们首先在 GaAs 半导体中掺杂了 3.5% 的 Mn,获得居里温度为 60K 的稀磁半导体.1998 年,Matsukura 等^[42]通过实验得到了 5% Mn 的(Ga, Mn)As 半导体,居里温度超过 100K.2000 年,Chiba 等^[43]利用 Mn 5.5% 的 GaAs 稀磁半导体和 (Al, Ga)As 作绝缘层的三明治结构的隧道结,获得磁电阻 TMR 在 20K 温度下为 5.5%,居里温度为 110K.2001 年,Tanaka 等^[44]在 (GaMn)As/AlAs/(GaMn)As 隧道结中获得 TMR 值为 70%,超过了氧化铝为绝缘层的 FM/I/FM 的 TMR 值,引起人们极大兴趣.2004 年,Yamanouchi 等^[45]用 (Ga, Mn)As/(In, Ga)As/GaAs 做成特殊设计的结构,用自旋极化电流驱动磁畴壁,控制磁化强度反转,构成磁信息存储器件.遗憾的是 (Ga, Mn)As 的居里温度为 110K,能使用温度太低,室温下不能用,因此人们开始努力寻找室温下的稀磁半导体.人们尝试了在各种氧化物半导体中掺杂磁性元素,例如在 ZnO, TiO, SnO 和 GaN 中掺杂磁性元素,获得一些居里温度超过室温的稀磁半导体.表 1 中给出一些研究结果.遗憾的是至今还没有找到适合在室温下能做磁隧道结 MTJ 的稀磁半导体,而且同样的材料各人做出来的结果都不一样,机理也没有完全弄清楚.

为了克服肖特基势垒人们又考虑采用隧道效应.2001 年,Zhu 等^[46]通过 Fe 膜与 GaAs 膜之间的隧道效应,把自旋电子注入到半导体中,通过电子发光的反转,获得室温下自旋有效注入为 2%,如图 9

(a)所示,其中EL为电子发光 Dijken 等^[47]在 GaAs 半导体上制备了 CoFe/Al₂O₃/CoFe 磁隧道结,见图 9(b),得到集电极磁电阻变化的百分数 $MC\% = [(I_{c,p} - I_{c,ap})/I_{c,ap}]\% = 120\%$ 其中 $I_{c,p}$ 和 $I_{c,ap}$ 分别为两个铁磁层磁化强度平行和反平行时的集电极电流。

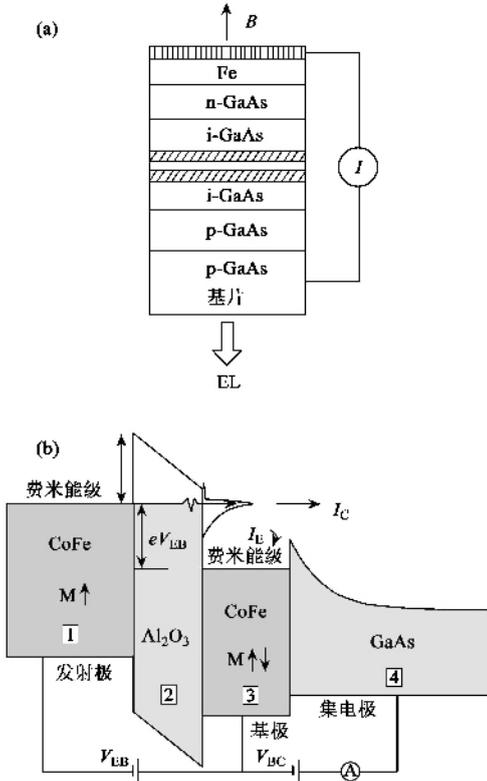


图9 (a)用发光检测自旋注入半导体 (b)以 GaAs 为基础的磁隧道三极管

有关自旋电子学方面的综述文章请参阅蔡建旺等^[48]1997年发表的《磁电子学中的若干问题》一文和 Zutic 等^[49]2004年发表的《自旋电子学的基础和应用》一文。类钙钛矿型的 LaCaMnO 化合物具有庞磁电阻,称为 CMR。该类材料中的自旋行为很复杂,吸引了大批的学者,发现了许多有趣的物理现象,有兴趣读者可阅 Salamon 等^[50]的综述文章。

参 考 文 献

[1] Tedrow P M , Meservey R . Phys. Rev. Lett. ,1971 26 192
 [2] Tedrow P M *et al.* . Phys. Rev. B ,1973 7 318
 [3] Jagadeesh S *et al.* . J. Magn. Magn. Mater. ,1999 200 248
 [4] Meservey R *et al.* . J. Magn. Magn. Mater. ,1983 35 1
 [5] Zhu T *et al.* . Phys. Rev. B 2002 66 094423
 [6] Grunberg P. Phys. Rev. Lett. ,1986 57 2442
 [7] Baibich M N . Phys. Rev. Lett. ,1988 61 2472

[8] Parkin S S P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1990 64 2304
 [9] Shinjo T , Yamamoto H. J. Phys. Soc. Jpn. ,1990 ,59 : 3061 Yamamoto H *et al.* . J. Magn. Magn. Mater. ,1991 99 243
 [10] Dieni J. Appl. Phys. ,1991 69 4774
 [11] Bruce A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1993 71 4023
 [12] Julliere M. Phys. Lett. A ,1975 54 225
 [13] Miyazaki T *et al.* . J. Magn. Magn. Mater. ,1995 ,139 :L231 ; 1995 ,151 403
 [14] Simmonds J L. Phys. Today ,1995 (4) 24
 [15] Ohno H *et al.* . Appl. Phys. Lett. ,1996 69 363
 [16] Awschalom D *et al.* . Phys. Today ,1999 (6) 33
 [17] Black W C *et al.* . J. Appl. Phys. 2000 87 6674
 [18] Ney A *et al.* . Nature ,2003 425 485
 [19] Unguris J *et al.* . Phys. Rev. Lett. ,19912 67 140
 [20] Parkin S S P *et al.* . Appl. Phys. Lett. ,1991 58 2710
 [21] Pratt W P *et al.* . Phys. Rev. Lett. ,1991 66 3060 Gijss M A M *et al.* . Phys. Rev. Lett. ,1993 70 3343
 [22] Egelhoff W F *et al.* . J. Vac. Sci. Technol. B ,1999 ,17 :1702
 [23] Kouki K *et al.* . 8th. Joint MMM-intermag Conference , 2001 ; Huai Y *et al.* . 8th. Joint MMM-intermag Conference ,2001
 [24] Katine J K *et al.* . Phys. Rev Lett. 2000 84 3149 jzyilmaz B *et al.* . Phys. Rev. Lett. 2003 91 067203
 [25] Meservey R , Tedrow P M. Phys. Rev. Lett. ,1970 25 1270
 [26] Tedrow P M *et al.* . Phys. Rev. B ,1973 7 318
 [27] Maekawa S *et al.* . IEEE Trans. Magn. ,1982 ,18 707
 [28] Suezawa Y *et al.* . Proc. Int. Symp. Magn. Mater. 1987 ,18 303
 [29] Miyazaki T *et al.* . J. Magn. Magn. Mater. ,1991 98 17
 [30] Han X F *et al.* . Jpn. J. Appl. Phys. 2000 39 1441
 [31] Yuasa S *et al.* . Europhys Lett. 2000 52(3) 344
 [32] Wulfhekel W. Appl. Phys. Lett. ,2001 78 509
 [33] Butler W H. Phys. Rev. B ,2001 ,63 054416
 [34] Yuasa S . Jpn. J. Appl. Phys. 2004 43 1588
 [35] Yuasa S *et al.* . Nature. Mater. 2004 3 868
 [36] Parkin S S P *et al.* . Nature. Mater. 2004 3 862
 [37] Djayapawira D D *et al.* . Appl. Phys. Lett. 2005 86 092502
 [38] Coey M. Nature. Mater. 2005 4 9
 [39] Ohno H *et al.* . Phys. Rev. Lett. ,1992 63 1849
 [40] Ohno H *et al.* . Phys. Rev. Lett. ,1992 68 2664
 [41] Ohno H *et al.* . Appl. Phys. Lett. ,1996 69 363
 [42] Chiba D S *et al.* . Appl. Phys. Lett. ,2000 77 1873
 [43] Matsukura F *et al.* . Phys. Rev. B ,1998 57 R2037
 [44] Tanakaq M *et al.* . Phys. Rev. Lett. 2001 87 026602
 [45] Yamanouchi M *et al.* . Nature. 2004 428 539
 [46] Zhu H J *et al.* . Phys. Rev. Lett. ,2001 87 016601
 [47] Dijken S *et al.* . Phys. Rev. Lett. ,2003 90 197203
 [48] 蔡建旺等. 物理学进展 ,1997 ,17 :119 [Cai J W *et al.* . Progress in Phys. 1997 ,17 :119(in Chinese)]
 [49] Zutic L *et al.* . Rev. Mod. Phys. ,2004 76 323
 [50] Salamon M B *et al.* . Rev. Mod. Phys. 2001 73 583