

半金属磁体*

孙 华 睢 胜 李振亚

(苏州大学物理系 苏州 215006)

摘 要 半金属磁体是近些年来日益受到关注的一种新材料,也是物质具有的一种新形态.在半金属磁体的能带结构中,两个自旋子能带分别具有金属性与绝缘性,从而产生自旋完全极化的传导电子.这一特性使它有可能在新一代微电子设备中发挥重要作用,并为极化输运理论及自旋电子学的研究开辟崭新的领域.文章主要介绍了半金属磁体的命名、特征和几种典型的材料,回顾了寻找半金属磁体过程中的理论计算和实验研究的发展历程,并对已在半金属磁体材料中发现的一些具有应用价值的磁输运现象作了阐述.

关键词 半金属磁体,自旋极化,磁输运

HALF-METALLIC MAGNETS

SUN Hua JU Sheng LI Zhen-Ya

(Department of Physics, Suzhou University, Suzhou 215006, China)

Abstract Half-metallic magnetic materials are a new state of matter which is attracting more and more attention in recent years. With a special band structure in which only one of the two spin directions is metallic, the conducting electrons are completely spin polarized in these materials. This property makes it possible for them to play a key role in future electronic devices and to offer an interesting field for the study of spin-polarized transport theory and spin electronics. We review the history and properties of half-metallic magnets, as well as ongoing theoretical and experimental studies to find more evidence and examples of these materials. In addition, the magnetoresistance in half-metallic magnets is described in detail since this property has great importance in applications.

Key words half-metallic magnets, spin polarization, magnetotransportation

1 特征

1983年,de Groot等人在对半霍伊斯勒(semi-Heusler)合金NiMnSb和PtMnSb作能带计算时,得到了一种特殊的能带结构^[1].这些磁性金属间化合物与一切普通的铁磁体一样,具有两个不同的自旋子能带.但有趣的是,其中一个自旋子能带(一般称为自旋向上或多数自旋子能带)在费米面上有传导电子,而对于另一个子能带(称为自旋向下或少数自旋子能带),费米能级恰好落在价带与导带的能隙中.换言之,两种自旋子能带分别具有金属性和绝缘性.因此,de Groot把具有这种能带结构的物质称为“半金属”磁体(half-metallic magnets).

需要指出的是,这里所说的“半金属”(half metal)并非传统意义上的半金属,传统的半金属是一种由于导带与价带有少量交叠(负带隙宽度)或导带底与价带顶具有相同能量(零带隙宽度),而使其宏观

输运性质介于典型的金属与半导体之间的半金属(semi metal).与此相反,de Groot命名的这种半金属在宏观上通常表现为具有金属性的磁性化合物,但是在晶体结构、键的性质以及较大的交换劈裂等因素的共同影响下,其能隙恰好只在一个自旋方向的子能带(通常为自旋向下子能带)中打开,从而实现了金属性与绝缘性在微观尺度下的共存.为了区分这两个不同的概念,我们在本文中把这种新的半金属称为“半金属磁体”.

这样一种特殊的能带结构自然会带来一系列特殊的性质,其中最显著的表现是传导电子的完全自旋极化.如前所述,半金属磁体只有一个自旋子能带,在费米面上有传导电子分布,因而所有的传导电子都具有相同的自旋方向.根据自旋极化率 P 的一般定义,

* 国家自然科学基金(批准号:19774042,10174049)资助项目
2001-11-05收到初稿 2002-01-22修回

$$P = \frac{N_{\uparrow}(E) - N_{\downarrow}(E)}{N_{\uparrow}(E) + N_{\downarrow}(E)} \quad (1)$$

其中 $N_{\alpha}(E)$ 是能级 E 上自旋为 α 的电子态密度 ($\alpha = \uparrow, \downarrow$)。半金属磁体在费米能级上的电子自旋极化率为百分之百 ($P = 100\%$)，远远超过了一般铁磁金属及其合金的极化率范围 ($P = 10\% - 40\%$)。正是这种极限下的完全极化输运性质使半金属磁体正在成为近年来不断发展的磁输运理论的重要研究对象，并有望在自旋电子学中占据重要地位，为新一代电子器件提供有价值的材料。

半金属磁体的另一特征是整数磁矩，即所谓的“磁矩量子化”现象^[2]。在一般的铁磁元素金属中，单原子平均磁矩多半不是玻尔磁矩的整数倍，如 Fe 的单原子平均磁矩为 $2.2\mu_B$ 。这种分数磁矩的现象通常可用斯通纳模型的简单图像来解释。因为这些普通磁性金属的自旋向上、向下两个子能带都只被部分占据，平均每个原胞可容纳的电子数 n^+ 、 n^- 及其差值都不是整数。但在半金属磁体中，自旋向下的子能带被占满，平均每个原胞容纳的自旋向下的电子数密度 n^- 必为整数值，于是在另一个子能带中容纳的自旋向上的电子数密度 $n^+ = n - n^-$ (n 为原胞中的价电子总数) 也是一个整数，最终导致平均磁矩 $m = (n^+ - n^-)\mu_B$ 为整数值 (μ_B 为玻尔磁矩)。事实上，早在 50 年代初期，L. Castelliz 就测量了 NiMnSb 的磁矩并发现它接近玻尔磁矩的 4 倍^[2]。

由于半金属磁体中费米面上自旋向下的电子态密度为零，传导电子要改变自旋方向跳到另一个子能带中 (Stoner 激发)，必须克服从费米面到自旋向下子能带导带底的能隙。若没有足够的能量，这样的自旋翻转就不会发生。这种在低温或低场下对 Stoner 激发的禁止也是半金属磁体的特征，它会对磁化强度、电阻等物理量随外界条件的变化关系产生影响。以 NiMnSb 为例，在低温时，它的磁化强度 M 与温度 T 的关系满足

$$M(T) = M(0) \{1 - BT^{3/2}\}, \quad (2)$$

与传统的海森伯磁体一致，只有当温度大于 80K 时，其磁化强度才会表现出一般的巡游铁磁体具有的温度效应^[3,4]。所有这些半金属磁体的特征一方面为理论研究提供了有趣的课题，另一方面使人们有可能从实验上找到关于半金属磁体的应用依据，为这个领域中的进一步开拓奠定基础。

2 材料与测量

自半金属磁体提出以来的近二十年里，人们在

不断地寻找各种可能的半金属磁体。目前被认为属于半金属磁体的材料主要可分为两大类：一类是以霍伊斯勒合金或半霍伊斯勒合金为代表的三元金属化合物；另一类是在费米能级上 d 电子占主要地位的磁性金属氧化物。

最早发现的半金属磁体为 NiMnSb。NiMnSb 是具有半金属性的半霍伊斯勒合金的典型代表，其晶体结构可描述为三个相互贯穿的 fcc 格子，对应的原子与空间位置分别是：Ni(1/4, 1/4, 1/4)，Mn(0, 0, 0)，Sb(1/2, 1/2, 1/2)^[1]。我们一开始就提到，半金属磁体的命名最早是来源于对 NiMnSb 的能带计算。与磁性氧化物相比，霍伊斯勒合金中影响其能带分裂效果的晶场作用、原子耦合以及各种磁相互作用等因素更为复杂，以致于人们除了通过直接的能带计算，很难预测出哪一种霍伊斯勒合金具有半金属性。

最简单的半金属磁体为 CrO₂。这种金红石结构 (图 1) 的金属性铁磁氧化物被广泛地用作磁记录材料。早在六七十年代，人们就对 CrO₂ 的磁性质与光学性质做了十分详细的研究，但直到 1986 年，才由 Schwarz 给出了 CrO₂ 的能带结构，并指出它也是一种半金属磁体^[5]。此后，其他的一些能带计算工作也得到了同样的结论^[6,7]。图 2 是 Lewis 计算得到的 CrO₂ 态密度^[6]，从中可以清楚地看到两个分别具有金属性与绝缘性的自旋子能带。虽然 CrO₂ 的晶体结构简单，但大于子能带宽度的交换劈裂已足以使它形成半金属性。

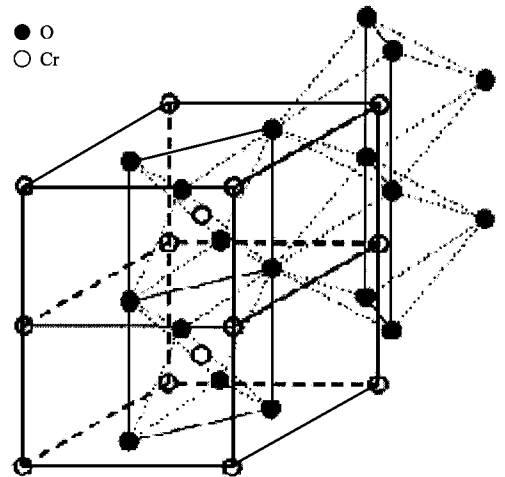


图 1 半金属磁体 CrO₂ 的金红石结构^[6]

[其中 Cr 原子构成体心四角格子 ($c/a = 0.65958$)，每个 Cr 原子外包围着氧八面体(细虚线)]

受到极大关注的半金属磁体是掺杂的钙钛矿锰

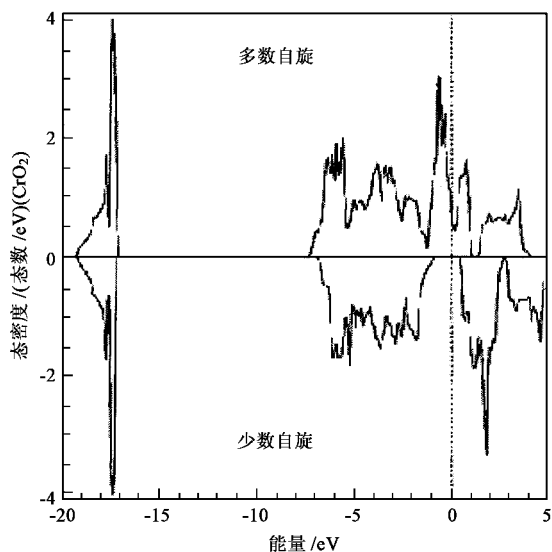


图2 能带计算得到的半金属磁体 CrO_2 的态密度^[6]

[虚线表示费米能级,同时落在多子能带(即自旋向上能带)的态密度极小值处和少子能带(即自旋向下能带)的能隙中]

氧化物 $\text{Ln}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ (Ln 为三价稀土族元素, A 为 Ca , Sr). 这种氧化物的磁性基于双交换作用,使电子的输运性质与系统的磁结构密切相关^[8,9]. 只有当 Mn 离子上的局域磁矩平行排列时,扩展态电子才能在不同离子间巡游,而巡游电子的自旋在强烈的洪德(Hund)作用下与局域磁矩方向一致,从而导致传导电子的完全极化.除了半金属性外,这些锰氧化物还具有一系列丰富的物理现象和与高温超导体类似的结构,因而成为近几年来人们研究的一个热点.

事实上,已发现的半金属磁体还远远不止上面介绍的这三种典型的化合物,如亚铁磁性的 Fe_3O_4 , 其费米能级上的能隙只在自旋向下的子能带中打开,从而具有 -100% 的自旋极化率;具有双钙钛矿结构的 $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$, 在它的每个原胞中,磁矩反平行的 Fe^{3+} 和 Mo^{5+} 共贡献出 $4\mu_B$ 的净磁矩,而且和 Fe_3O_4 一样,传导电子的自旋方向一致向下^[2]. 稀磁半导体如 $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$ 和 $(\text{Hg}, \text{Mn})\text{Se}$ 是另一类特殊的半金属材料.在这些铁磁性的半导体中,两个自旋的子能带具有不同的能隙.当载流子被注入其中时,仅当它们的自旋完全极化时才能形成电流^[2]. 由此可见,半金属磁体是一类范畴极广的材料,它们可以具有不同的结构、不同的磁性、不同的输运性质,能产生完全自旋极化的传导电子是它们的共同特征,这也是此类材料具有重大价值的原因.

由于半金属磁体最早是从能带结构上加以定义,能带计算始终是判断一种材料是否具有半金属

性的重要依据.但是能带计算本身的复杂性,再加上半金属磁体多为强关联作用电子体系,使得这方面的工作常常产生很大的误差,甚至得到自相矛盾的结果.因此,人们需要更多的实验证据来作为判断半金属性的有力佐证.

测量磁矩是从实验上寻找半金属性的各种途径中最简单而又十分有效的一种方法.如前所述,半金属磁体的平均磁矩应当具有整数值,即为玻尔磁矩的整数倍.很多可能的半金属磁体都已被测量过磁矩,从实验上观测到的结果与理论的估计基本一致,如:半霍伊斯勒合金 NiMnSb 的平均磁矩为 $4\mu_B$,金红石结构的 CrO_2 为 $2\mu_B$,双钙钛矿结构的 $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ 为 $4\mu_B$ ^[2].

其他一些半金属磁体所特有的现象也可被用来作为判断半金属性的依据.最近, Zhao 等人在测量掺杂的锰氧化物的电阻随温度变化的曲线时,发现材料的低温电阻中缺少由于单自旋波量子散射而引起的 T^2 项^[10],取代它的是对应着双自旋波量子散射的 $T^{4.5}$ 项^[11],且从实验曲线得到的 $T^{4.5}$ 项前的系数与双自旋波量子散射的量子理论预言的数值能很好地吻合^[12].这是由于半金属磁体中费米能级上没有自旋向下的电子,从而可能导致会引起传导电子自旋翻转的单自旋波量子散射被禁止.由于这种实验方法对样品表面的性质较不敏感,因而它为这种锰氧化物的半金属性提供了有力的实验证据.

尽管在实验上可以从各个角度去间接地证明半金属磁体的实际存在,但最直接、最有力的证据还是对样品的自旋极化率进行的测量.人们运用各种实验技术与方法来探测被认为可能是半金属磁体的材料所具有的自旋极化率,如正电子湮灭、自旋分辨光电发射谱、自旋极化隧穿、点接触 Andreev 反射等.所积累的大量实验事实与数据证明,传导电子的完全自旋极化并非只是理论计算的理想结果,而是一系列实际材料所具有的真实性质.

最早得到接近百分之百的极化率的实验可能是 Jae-Hoon Park 及其合作者用自旋分辨光电发射谱对掺杂的钙钛矿锰氧化物 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 所做的自旋极化率测量^[13].图3是他们的样品在 40K 的温度下得到的光电谱.其中自旋向上的电子在费米能级 E_F 处有较大的态密度,具有金属性,而自旋向下电子的态密度在 E_F 下 0.4eV 处消失,这也是自旋向下电子的价带顶到费米能级的能隙.由此得到的费米能级上电子的自旋极化率为 $100\% \pm 5\%$,与理论的预言

能很好地吻合。

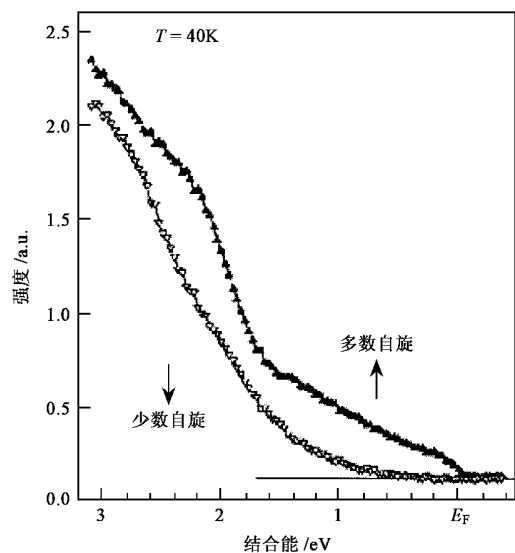


图3 掺杂的钙钛矿锰氧化物 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 在 $T = 40\text{K}$ 时的自旋分辨光电发射谱^[13]

最近, Dedkov 等人测量了 $\text{Fe}_3\text{O}_4(111)$ 薄膜在室温(300K)下的自旋分辨光电发射谱, 发现费米能级上电子的自旋极化率达到 $-(80 \pm 5)\%$ ^[14]。但是, 由于光电发射谱实验对样品的表面性质十分敏感, 在它测量自旋极化率时, 常常会得到与理论值偏差较大的结果, 如一些关于 NiMnSb 的较早实验, 所得到的极化率只有 50% 左右。更令人难以接受的结果出现在对 CrO_2 所做的实验中: 百分之百的自旋极化率出现在费米能级下 2eV 处, 而费米能级上甚至连自旋向上电子的态密度也为零, 这与该材料所具有的金属性完全不符。直到 1998 年, Soulen 等人采用点接触 Andreev 反射来研究半金属性, 即利用超导体/金属界面上正常电流与超导电流间的转化来探测费米面上的自旋态密度^[15]。如图 4 所示, 在低电压下, 正常金属中的单个传导电子要穿越超导体/金属界面, 必须与金属中另一自旋方向的传导电子配对, 形成超导体中的载流子——库珀对。换言之, 每入射一个电子, 就在界面上反射回一个另一自旋子能带中的空穴, 这就是著名的 Andreev 反射。正常金属若具有铁磁性, 不同自旋传导电子的数目不同, 并决定着 Andreev 反射效应的强弱, 因而可利用这一效应来探测金属中费米能级上的自旋极化率。Soulen 及其合作者测得的二氧化铬中传导电子的自旋极化率为 $(90 \pm 3.6)\%$, 大大高于光电发射谱的结果。用这种方法得到的 NiMnSb , $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{MnO}_3$ 的极化率也在 60%—90% 的范围内。最近, 美国霍布金斯大学、

布朗大学和 IBM 公司联合研究组用化学蒸发沉积法 (CVD) 制备出 CrO_2 单晶膜, 用点接触 Andreev 反射法测得该样品的自旋极化率高达 0.96 ± 0.01 ^[16] 和 0.984 ^[17], 又一次证实了理论的预言。

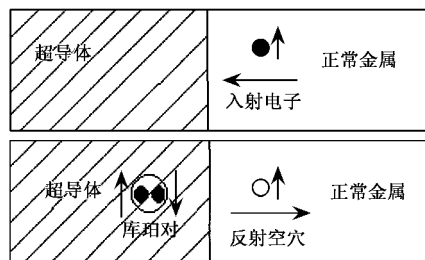


图4 超导体/正常金属结中的 Andreev 反射效应 (正常金属中的单个入射电子必须与另一个自旋相反的电子配对才能穿越界面, 即反射回一个相应的空穴)

关于半金属磁体的实验研究所面临的最大困难是半金属性的不稳定性。晶体结构的缺陷(尤其在表面和界面上)以及温度升高带来的热扰动会迅速地使材料的能带结构丧失其半金属性的特征。前者使光电发射谱这类对表面极其敏感的实验很难得到精确的数据, 后者则要求实验必须在低温下进行, 增加了实验的难度。这些不利因素可能会给实验结果带来极大的误差, 并造成不同的实验方法得到的结果大相径庭。但是, 随着实验数据的不断积累, 各种实验方法的逐步完善, 越来越多有利于半金属性的证据被发现。在 de Groot 为半金属性命名了近二十年后的今天, 半金属磁体这一具有特殊性质的材料的存在已被广泛接受, 并越来越引起人们的关注与兴趣。

3 应用

磁电阻 (MR) 是指在磁场作用下材料的电阻的相对改变, 其传统定义为

$$\text{MR} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)}, \quad (3)$$

其中 $R(H)$ 为外场 H 下材料的电阻。一般的金属都具有磁电阻, 原因是电子在洛伦兹力作用下受到的散射增强, 从而引起电阻增加, 但这种电阻变化的幅度通常极小, 甚至连 1% 都不到。

1988 年, Baibich 等人发表了第一篇关于巨磁电阻 (GMR) 的报告^[18], 从实验上观察到了在铁磁-非铁磁金属交替排列的多层膜结构中的这种量子效应。在无外场时, 铁磁层的磁矩在反铁磁耦合作用下

反向平行排列,使电子受到的自旋相关散射达到最大值.随着外场的逐步增大,各铁磁层的磁矩趋向平行排列,自旋相关散射迅速下降直至饱和.很快,类似的现象在磁性金属-非磁性金属的颗粒复合体系中也被发现.这种电阻在外加磁场下减小的相对值可达 50%,从而为实际的商业应用提供了可能.1994 年,第一种利用 GMR 效应制作的磁场传感器面世.1997 年 9 月,IBM 公司推出了用于硬盘驱动器的读磁头,大幅度提高了硬盘的容量;巨磁电阻效应还被应用于计算机中的固定存储器,1997 年 1 月, Honeywell 公司演示了第一台 GMR 随机读写存储器 (RAM).这些产品已经显示出广阔的市场前景^[19].

除了由自旋相关散射导致的 GMR 外,另一种在自旋相关隧穿的输运机制下产生的磁电阻-隧穿磁电阻 (TMR) 也是一种同时具有理论价值与商业价值的物理现象.早在 70 年代, Julliere 提出了著名的 Julliere 模型来解释存在于铁磁金属/绝缘层/铁磁金属 (FM/I/FM) 隧道结中的隧穿磁电阻现象^[20].根据隧穿理论,隧道结中的隧穿电导与左右两侧金属电极中电子在费米面上的态密度的乘积成正比

$$G \propto N_L(E_F)N_R(E_F). \quad (4)$$

Julliere 将此关系运用到 FM/I/FM 隧道结中,得到了铁磁层磁矩在平行排列 (P) 与反平行排列 (AP) 时电导的相对变化:

$$\frac{G_P - G_{AP}}{G_P} = \frac{2P_L P_R}{1 + P_L P_R}, \quad (5)$$

式中 P_L, P_R 分别是左右两侧铁磁金属的自旋极化率.1995 年, Moodera 等人在他们制备的 $\text{CoFe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ 隧道结中发现了在室温下仍能达到 11.8% 的隧穿磁电阻^[21],从而掀起了对铁磁隧道结的研究热潮.目前,已经有人在试图利用铁磁隧道结的 TMR 效应来制备随机读写存储器^[19].与完全由金属材料制成的 GMR 器件相比,隧道结的磁电阻也达到了实际应用的要求,而其中通过的电流要小得多,尤其适合于小功率的便携式产品.因而,虽然对 TMR 效应的具体机制尚待进一步深入理解,要把它推广至应用阶段还面临着一系列技术上的问题,但它和 GMR 效应一样,是自旋电子学研究的重要方面,并为电子器件的未来发展指明了方向.

无论是 GMR 效应还是 TMR 效应,其最本质的来源都是自旋极化输运.人们自然而然地希望能尽量提高载流子的自旋极化率,以获得尽可能大的磁电阻效应.传导电子自旋完全极化的半金属磁体无疑是最佳的候选者.因此,研究半金属磁体中的磁电

阻现象已成为这种材料的应用研究中的主要课题.

90 年代早期,一些具有半金属性的掺杂钙钛矿锰氧化物被发现能产生接近 100% 的磁电阻^[22-23].除了在幅值上大大超过以往发现的任何磁电阻效应外,它还具有两个十分明显的特征.首先,这一新的磁电阻现象并不像 GMR 或 TMR 那样只能在不均匀的复合体系中找到,而是发生在锰氧化物的单晶材料中,因而被认为是该材料的内禀性质.其次,这种材料在发生铁磁-顺磁相变的同时还伴随着金属-绝缘体的相变,而电阻在磁场下的巨大变化恰恰也只在居里温度附近发生.一旦温度偏离了居里点,无论是高温还是低温,磁电阻现象都会迅速地消失.这种与 GMR 或 TMR 完全不同的磁电阻效应被命名为“庞磁电阻 (CMR)”,并很快引起了人们的广泛关注.

关于 CMR 的理论解释最早是建立在双交换作用机制和极化子效应的基础上^[24].最近,在实验观察的基础上,又有人提出可把 CMR 效应归因于锰氧化物中的相分离现象^[25],即在低温下,金属性的铁磁相与绝缘性的反铁磁相共存,且其比例随温度的变化而改变.在居里点附近,铁磁相达到渗流阈值,此时系统对外界条件的变化十分敏感,较小的外磁场就足以引起激烈的电阻变化,从而引起巨大的磁电阻.然而锰氧化物具有的复杂结构为有关 CMR 的理论研究带来了很大难度,这方面的工作至今尚未完善.但考虑到 CMR 只发生在居里点附近,而能带结构的半金属性及相应的完全自旋极化在这个温度下早已丧失,一般人们都认为 CMR 并不是为大多数半金属磁体所具有的性质,或者说 CMR 与百分之百的自旋极化率之间没有直接的因果关系.

1996 年, Hwang 及其合作者在锰氧化物的多晶材料中观察到了另一类磁电阻^[26].他们发现,与单晶材料相比,多晶样品一方面在电阻上提高了几个数量级,另一方面,可在低温下得到接近 30% 的磁电阻.与 CMR 效应只局限在居里温度附近的狭小范围内不同,该磁电阻随温度的上升迅速单调下降,在室温下几乎完全消失(图 5).在与单晶样品的性质作了各方面的比较之后, Hwang 指出,这种磁电阻来源于颗粒间的自旋极化隧穿过程,多晶材料中高度无序的颗粒边界起到了绝缘层的作用,而载流子的高度自旋极化使这一磁电阻可具有较大的数值.随着温度的升高,自旋极化率下降,磁电阻也随之减小,当达到已接近材料居里点的室温时,半金属性已不存在,自旋极化率趋于零,于是磁电阻现象消失.

很快,在其他半金属材料的其他颗粒体系中也

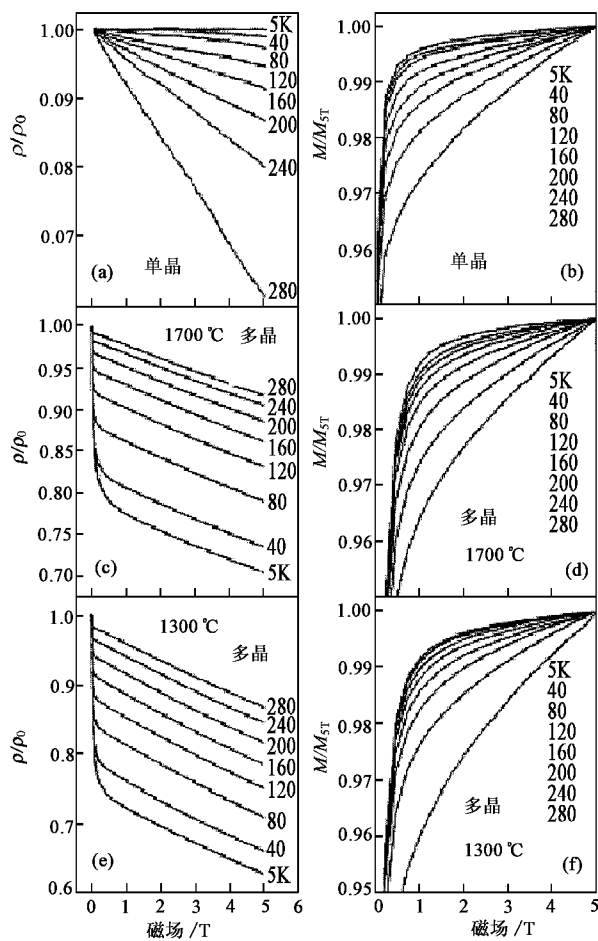


图5 Hwang 及其合作者制备的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 单晶样品和多晶样品(烧结温度分别为 1300°C 、 1700°C)中电阻(左栏)和磁化强度(右栏)随外场和温度的变化^[26]

(从中可看出,虽然三种样品的磁化曲线没有很大的区别,但单晶样品和多晶样品的磁电阻现象完全不同.前者随着温度下降而迅速减小,后者则在低温下磁电阻达到最大,且在低场时有一个明显的电阻下降过程)

发现了类似的现象,如 CrO_2 多晶^[27-28]、 CrO_2 压缩粉末^[29,30]等,进一步证明了自旋极化率和颗粒边界对这种颗粒间磁电阻(IMR)的关键作用.尤其是 Coey 等人^[29]将二氧化铬紧压缩粉末用绝缘的三氧化二铬稀释后,在 5K 的温度下得到了 56% 的磁电阻,其结果十分令人鼓舞.近来有关 $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ 纳米粉末的实验发现在低温下磁电阻可以达到 100%,然而在 100K 以后磁电阻就迅速下降,并在室温(300K)时趋于零^[31].我们应用无规网络模型,考虑了直接隧穿、高阶隧穿、跳跃(电导)及超顺磁性对磁运输的不同贡献,有效地解释了半金属颗粒体系的磁运输现象^[32-34].除了颗粒体系外,人们还在试图制备基于半金属磁体的隧道结^[2].从 Julliere 模型可知,当

隧道结中两侧电极在费米面都具有完全的自旋极化时,就有可能得到百分之百的隧穿磁电阻,即当两侧铁磁磁化平行时,电流可通过,而当磁化反平行时,电流完全不能通过.但要真正实现这些基于半金属磁体中自旋极化输运过程的磁电阻现象,并将其应用到实际器件上,就必须解决两方面的主要问题.一方面是所有有关半金属性的实验都会面临如下困难,即半金属性的不稳定性.温度升高带来的热扰动和表面、杂质带来的结构缺陷都会破坏半金属性,导致自旋极化率及相应的磁电阻的下降.另一方面,自旋极化输运过程本身同样会受到干扰.热扰动和磁性杂质等因素导致载流子在输运过程中发生自旋翻转,这两种自旋通道的不对称性降低,从而在宏观上表现为磁电阻的减小.事实上,在目前的实验中,这类存在于半金属磁体体系中的磁电阻在室温下一般不会超过 1%,远远达不到应用的要求.但即使是普通的铁磁金属隧道结,从发现磁电阻到制备出具有较大的室温磁电阻的样品也经历了数十年的研究.因此,我们有理由相信,随着人们对新的更适于磁电阻器件的半金属磁体的不断寻找,对样品制备方法和技术的不断完善,对半金属磁体中自旋输运过程的理论和实验研究的进一步深入,这类材料将能被应用到实际生产中,为自旋电子学带来新的突破.

4 展望

回顾 20 年来半金属磁体研究工作的发展,我们可以看到,从最初单纯的能带计算到实验证据的大量涌现,从只为锰氧化物所具有的 CMR 效应到在多种结构、多种材料中的自旋极化输运,半金属磁体不仅被人们所重视,而且正在成为凝聚态物理和材料科学研究中的一个新热点.除了具有极大的应用价值外,半金属性作为物质的一种新形态,还可能带来一系列更基础的问题.对于半金属反铁磁体(HMAF)的研究就是其中的一个例子.目前实验上发现的半金属磁体大多具有铁磁性,极少数为亚铁磁体(如 Fe_3O_4).但 Hendrikus van Leuken 和 de Groot 从理论上构造了 HMAF^[35],它不具有宏观的磁化强度,载流子却是完全极化的.有人指出,这种反铁磁的半金属性是一种新的超导态,其配对的电子具有相同的自旋,因而可能带来许多新的性质,为自旋电子学开辟出一个全新的领域^[36,37].当然,关于半金属磁体的研究刚起步不久,许多问题都有待解决,但我们可以大胆地预测,在不远的将来,无论是在理论研究还是在应

用开发中,半金属磁体及其相关性质的研究都将占据十分重要的一席之地.

参 考 文 献

- [1] de Groot R A ,Mueller F M ,van Engen P G *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1983 50 2024
- [2] Pickett W E ,Moodera J S. Phys. Today ,2001 54(5) 39
- [3] Hordequin C ,Pierre J ,Curat R. J. Magn. Magn. Mater. ,1996 , 162 75
- [4] Hordequin C ,Pierre J ,Curat R. Physica. B ,1997 234—236 605
- [5] Schwarz K. J. Phys. F Met. Phys. ,1986 16 1211
- [6] Lewis S P ,Allen P B ,Sasaki T. Phys. Rev. B ,1997 55 10253
- [7] Korotin M A ,Anisimov V I ,Khomskii D I *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1988 80 4305
- [8] Zener C. Phys. Rev. ,1951 81 440 ;1951 82 403
- [9] Anderson P W. Phys. Rev. ,1955 100 575
- [10] Mannari I. Prog. Theor. Phys. ,1959 22 335
- [11] Kubo K ,Ohata N A. J. Phys. Soc. Jpn. ,1972 33 21
- [12] Zhao Guo-meng ,Keller H ,Prellier W *et al.* Phys. Rev. B ,2001 , 63 172411
- [13] Park J H ,Vescovo E ,Kim H J *et al.* Nature ,1998 392 794
- [14] Dedkov Y S ,Rüdiger U ,Güntherodt G. Phys. Rev. B ,2002 ,65 : 064417
- [15] Soulen R J *et al.* Science ,1998 282 85
- [16] Ji Y ,Strijkers J ,Yang F Y *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2001 86 5585
- [17] Anguelouch A *et al.* Phys. Rev. B 2001 64 180408
- [18] Baibich M N ,Brato J M ,Fert A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1998 61 : 2472
- [19] Prinz G A. Science ,1998 282 1660
- [20] Julliere M. Phys. Lett. ,1975 54A 225
- [21] Moodera J S ,Kinder L R ,Wong T M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1995 , 74 3273
- [22] von Helmolt R ,Wecker J ,Holzapfel B *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1993 71 2331
- [23] Jin ,Tiefel T H ,McCormack M *et al.* Science ,1994 264 413
- [24] Millis A J ,Shraiman B I ,Mueller R. Phys. Rev. Lett. ,1996 77 : 175
- [25] Mayr M ,Moreo A ,Verges J A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 86 : 135
- [26] Hwang H Y ,Cheong S W ,Ong N P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1996 , 77 2041
- [27] Hwang H Y ,Cheong S W. Science ,1997 276 1607
- [28] Manoharan S S ,Elefant D ,Reiss G *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1984 , 72 984
- [29] Coey J M D ,Berkowitz A E ,Balcells L I *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998 80 3815
- [30] Coey J M D. J. Appl. Phys. ,1999 85 5576
- [31] Dai J ,Tang J. Phys. Rev. B 2001 63 054434
- [32] Li R W ,Xiong H ,Sun J R *et al.* J. Phys. C 2001 13 141
- [33] Sun H ,Li Z Y. Phys. Rev. B 2001 64 224413
- [34] Sun H ,Li Z Y. Phys. Lett. , 2001 287 A 283
- [35] Ju S ,Li Z Y. Phys. Lett. , 2002 293 A 199
- [36] van Leuken H ,de Groot R A. Phys. Rev. Lett. ,1995 74 1171
- [37] Pickett W E. Phys. Rev. B 1998 57 10613
- [38] Park M S ,Kwon S K ,Min B I. Phys. Rev. B 2001 64 100403(R)

·物理新闻·

栩栩如生的海洋微生物(A Slice of Microbial Life)

许多生物学家都知道,只有在自然生态的状态下才能最好地了解和研究各种生物对象,但野外的研究工作常常是很艰苦的.而对于海洋科学家来说,问题还不仅仅是艰苦,他们面临的是一种特殊的困难,即现在普遍使用的显微镜都不能有效地捕捉到微米量级微生物的活动图像.当这类微生物以每秒几百微米的速率活动时,甚至在具有高倍放大性能的显微镜下都找不到它们活动的痕迹.

最近美国加州 Scripps 海洋研究所的科学家们认为,要解决上述困难,问题的重点并不是要提高显微镜的放大倍数,而是要解决显微镜聚焦光源的强度.因此以 E. Fuchs, J. S. Jaffe, R. A. Long 和 F. Azam 等教授组成的研究组着重研究如何解决光源问题.与过去将光源照射在大块物质上相比,现在他们让激光照射在一块 23 μm 厚的平板上,也就是让激光光线精确地照射在显微镜聚焦的区域,从而提高了光源的亮度,同时也消除了由其他背景部分所带来的噪声,由于激光的照射严格地限制在所规定的区域,从而使他们获得了大量栩栩如生的海洋微生物活动的图像.他们认为激光薄片照明技术能揭开过去没有研究过的许多海洋微生物的神秘世界,并可进一步对海洋的生态系统作定量的研究.

(云中客摘自 Optics Express 28 January 2002)