

· 成果简介 ·

超大各向异性磁电阻效应的研究进展

李润伟

(中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

[关键词] 钙钛矿型锰氧化物, 金属-绝缘体转变, 各向异性磁电阻效应

由于电荷、自旋、轨道、晶格之间的耦合作用, 强关联体系呈现了许多有趣的物理特性^[1]。在掺杂的钙钛矿型锰氧化物 $\text{Ln}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ 中 (Ln 和 A 分别为稀土和碱土离子), 通过掺杂、应力、外场等可以引起电荷、自旋、轨道、晶格之间耦合的微妙变化, 从而引起显著的物理性质的改变。中国科学院宁波材料技术与工程研究所李润伟研究组在 $\text{La}_{0.69}\text{Ca}_{0.31}\text{MnO}_3$ 单晶样品中在金属-绝缘体转变温区观察到了异常大的各向异性磁电阻效应 (Anisotropic Magnetoresistance—AMR)。该成果已经在《美国科学院院刊》(PNAS, 2009, 106: 142 224)^[1] 上发表。

1857年, W. Thomson 发现材料的电阻率随着外磁场方向的改变而变化, 该现象被称为 AMR 效应。AMR 效应广泛存在于各类铁磁性材料当中, 并已经被广泛应用到读出磁头以及磁性传感器上。与巨磁电阻 (GMR)、隧道磁电阻 (TMR)、庞磁电阻 (CMR) 效应相比, 传统铁磁性材料中的 AMR 效应数值通常较小。比如, 坡莫合金是已经被广泛应用的 AMR 材料, 但在室温下其 AMR 数值只有 1%—2%。由于基于传统铁磁性材料的 AMR 器件灵敏度相对较低, 近年正逐步被 GMR 和 TMR 器件所取代。我们的研究表明, 在钙钛矿型锰氧化物单晶中, 即便弱的晶体各向异性便可以诱发出超大的 AMR 效应, 其数值甚至可以高于 GMR 和 TMR, 而且该异常 AMR 效应与温度和磁场具有非单调的变化关系。

$\text{La}_{0.69}\text{Ca}_{0.31}\text{MnO}_3$ 单晶为正交结构。如图 1A—B 所示, 样品的金属-绝缘体转变温度 T_{MI} 为 220 K, 与铁磁-顺磁转变温度 (居里温度) 基本一致。图 1C 展示了不同温度下约化电阻随着磁场方向的变化关系。在 220 K 附近, 电阻率 $\rho(T)$ 随外加磁场方向改变而表现出震荡行为, 当磁场与 c 轴平行时电阻最大, 当磁场

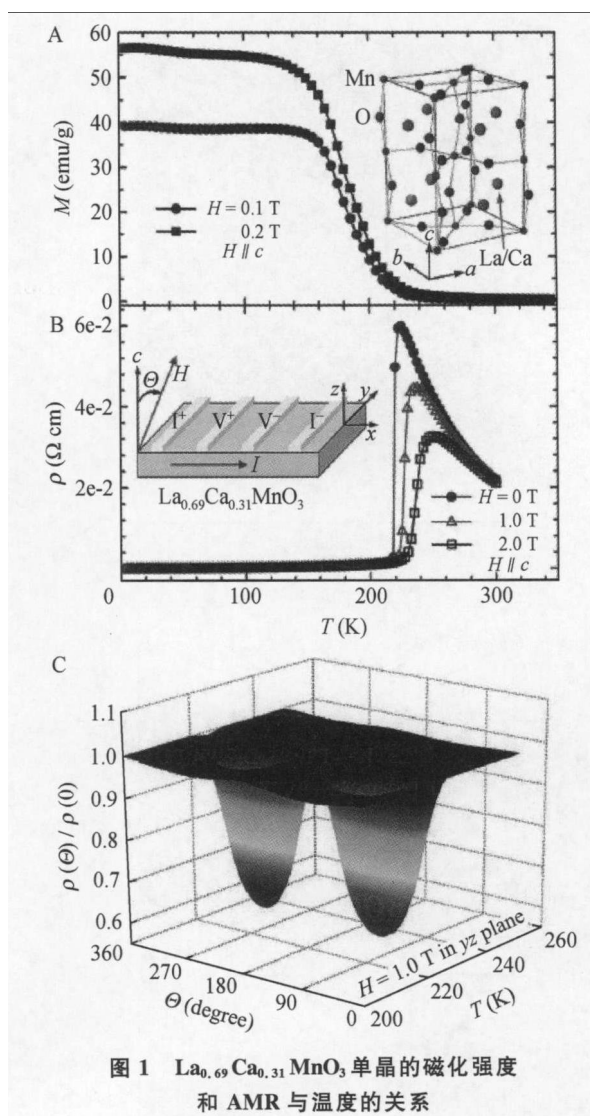


图1 $\text{La}_{0.69}\text{Ca}_{0.31}\text{MnO}_3$ 单晶的磁化强度和 AMR 与温度的关系

与 c 轴垂直时电阻最小, 即展示了明显的 AMR 效应。

在大多数传统的铁磁性材料中, AMR 数值随着温度的升高而单调下降, 随着磁场的增加而增加, 并在高场下趋于饱和。但钙钛矿锰氧化物中的 AMR 与温度、磁场都具有非线性关系。图 2 展示了

本文于 2009 年 11 月 15 日收到。

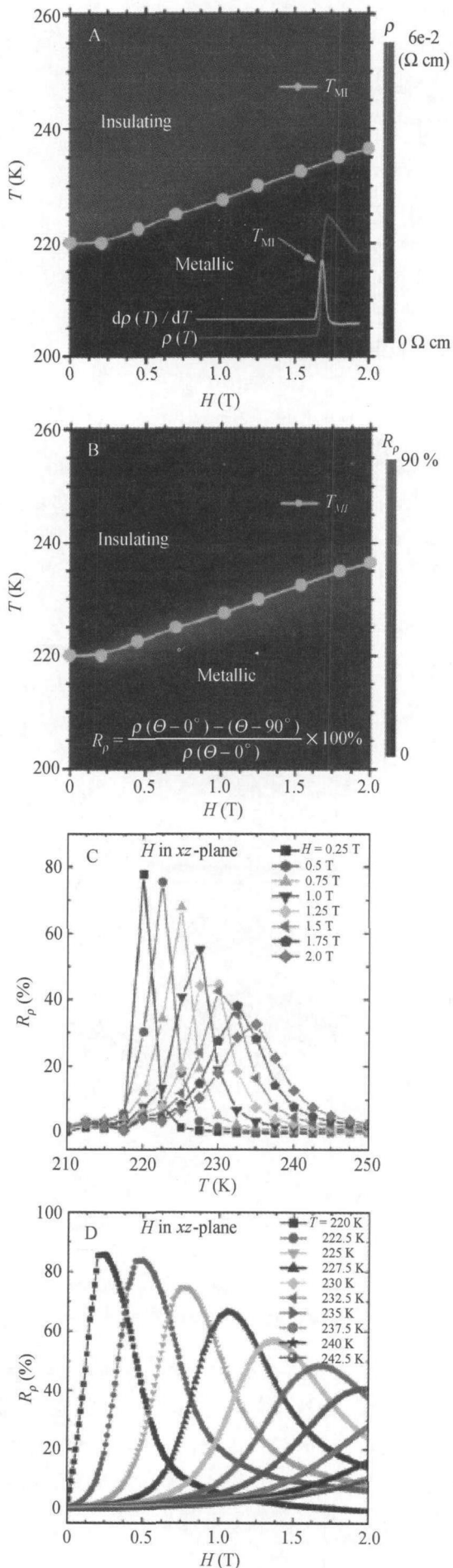


图2 AMR与温度(T)和磁场(H)之间的关系

AMR与温度、磁场及金属-绝缘体转变温度(T_{MI})之间的关系。从图2A—B可见, T_{MI} 随磁场的增加而线性的增加,AMR峰值出现在 T_{MI} 处。当温度远低于 T_{MI} (铁磁金属态)或者远高于 T_{MI} (顺磁绝缘态),AMR效应都不明显。如图2C—D所示,AMR随温度、磁场的变化关系类似,都呈现了非单调的变化关系。我们可以定义AMR数值(R_p)为 $R_p = \frac{R_{0^\circ} - R_{90^\circ}}{R_{0^\circ}}$ 或 $R_p = \frac{R_{0^\circ} - R_{90^\circ}}{R_{90^\circ}}$ 其中 R_{0° 和 R_{90° 分别为磁场方向与 c 轴夹角为 0° 和 90° 时的电阻值。在温度为220 K,磁场为0.2 T的条件下,采用前一种定义,AMR数值为90%,采用后一种定义AMR数值可达600%以上。可见,钙钛矿型锰氧化物AMR数值甚至可以与GMR和TMR相比,打破了“AMR小于GMR和TMR”的传统印象。

为了探明异常AMR效应的物理机制,我们在 T_{MI} 附近重点研究了磁场对电阻率和 T_{MI} 的影响。如图3所示,当磁场在 ab 面内,磁场方向平行与 a 轴或 b 轴对于 $\rho(H)$ 的数值影响很小,其差别主要来自于洛伦兹力的作用。而当磁场平行于 c 轴时,与磁场平行于 ab 面相比, $\rho(H)$ 出现了非常明显的变化。换句话说,在金属-绝缘体转变温区,电阻在 ab 面和 c 轴方向具有很强的各向异性。从图3B可以看出,金属-绝缘体转变温度 T_{MI} 也存在着磁场各向异性,当磁场方向从平行于 ab 面转向平行于 c 轴时, T_{MI} 明显的向高温移动。磁场作用下 T_{MI} 的各向异性为解释异常大的AMR效应提供了基础,也正是 T_{MI} 随磁场方向变化($H//c$ 轴和 $H \perp c$ 轴)导致了异常大的AMR效应。比如,在 T_{MI} 附近,对于给定的磁场强度,当 $H//c$ 轴时,样品是金属态,而当 $H \perp c$ 轴时,样品是绝缘态(图3B),因此,AMR的峰值出现在了 T_{MI} 的附近。同样,对于给定的温度,AMR的峰值随磁场的变化也会出现峰值。当温度远离 T_{MI} 时,AMR的数值迅速减小,只有传统的AMR效应起作用。

Jahn-Teller效应和双交换作用对于钙钛矿型锰氧化物的磁性和输运性质起着至关重要的作用。通常Jahn-Teller效应有利于绝缘性,而双交换作用有利于铁磁金属性。双交换的作用的强弱也与Jahn-Teller畸变程度密切相关。Jahn-Teller效应通常使得Mn-O-Mn键发生弯曲从而减弱双交换作用。而Jahn-Teller效应和双交换作用的竞争造成了金属-绝缘体转变。当施加外磁场时,外磁场有利于铁磁金属态的出现,在金属-绝缘体转变温度附近

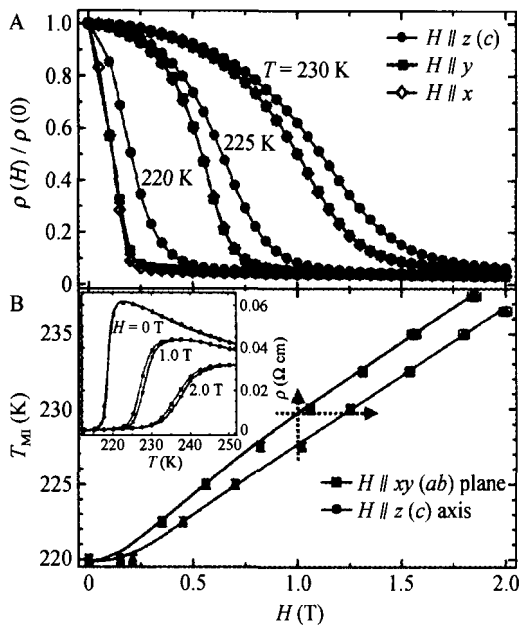


图 3 电阻率和 T_{M_t} 与磁场方向的关系

诱导出庞磁电阻效应。不仅如此,由于磁弹性作用,金属-绝缘体转变温度附近的晶格结构也会受到外加磁场的影响,例如,磁场可以压制 Jahn-Teller 效应。异常大的 AMR 效应正是来源于晶格畸变对不同方向磁场的响应不同所引起的。在高对称性的立方结构中,晶格对不同方向的磁场的响应是基本相同的,不能产生异常的 AMR 效应。在正交结构中,磁场垂直于 c 轴时晶格常数对磁场的响应要大于磁

场平行于 c 轴的情况,这就导致了磁输运性质的各向异性,即异常的各向异性磁电阻效应。基于以上的物理图象,钙钛矿锰氧化物中异常的 AMR 效应可以被很好地解释。由于异常 AMR 效应来源于 Jahn-Teller 效应对于不同方向磁场的不同响应,因此,具有大的 Jahn-Teller 效应的系统应该具有大的 AMR 效应。而事实也是如此, $La_x Sr_{1-x} MnO_3$ 由于具有较小的 Jahn-Teller 效应,其 AMR 的数值要小于 $La_x Ca_{1-x} MnO_3$ 体系。当然,在实际的锰氧化物晶体中,孪晶的影响是不能忽略的。

钙钛矿型锰氧化物中超大各向异性磁电阻效应的发现将会使人们重新认识各向异性磁电阻效应的物理起源,为探索新型各向异性磁电阻材料提供了新的思路。从应用的角度,超大各向异性磁电阻效应有望在读出磁头、方向/角度传感器、定位系统等方面得以应用。

该项工作获得了国家自然科学基金项目的资助。

参 考 文 献

- [1] Li R W, Wang H B, Wang X et al. The Proceeding of the National Academic Sciences (PNAS) USA, 2009, 106: 142 224.

RESEARCH PROGRESS ON COLOSSAL ANISOTROPIC MAGNETORESISTIVE EFFECT

Li Runwei

(Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201)

Key words perovskite manganite, metal-insulator transition, AMR

(上接 16 页)

RECENT PROGRESS ON MANAGEMENT EXTENSION ENGINEERING

Yang Chunyan

(Research Institute of Extension Engineering of Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090)

Abstract Management extension engineering (MEE) is a branch of extension engineering. It combines Extenics with management science. In this article, the significance of MEE is discussed, its research contents and methods are introduced, and its research progress is summarized. In a word, MEE will have the widest development foreground.

Key words management extension engineering (MEE), extenics, contradiction problem, extension method