

巡游铁磁体 SrRuO_3 磁性的 Preisach 描述*

侯登录^{1,2} 姜恩永¹ R.M.Roshko³ 杨连祥² 唐贵德² 聂向富²

(1. 天津大学 2. 河北师范大学 3. The University of Manitoba, Canada)

摘 要 测量了巡游铁磁体 SrRuO_3 的零场冷却 (ZFC) 和加场冷却 (FC) 的磁化强度随温度的变化关系, 以及不同温度下的磁滞回线. 考虑了热涨落和自由能垒随温度的变化, 改进了 Preisach 模型并对测量数据进行了拟合. 数值模拟再现了测量结果的变化规律, 包括在不同温度下的磁滞回线和在不同外磁场下的 ZFC 和 FC 磁化强度曲线等. 对拟合出的巴克豪森跳跃谱进行了讨论.

关键词 Preisach 模型 铁磁性材料 不可逆过程 磁滞回线 磁化强度

分类号 O482

文章编号 1005-3093(2002)06-0575-05

A PREISACH APPROACH TO THE MAGNETIC PROPERTIES OF ITINERANT FERROMAGNET SrRuO_3

HOU Denglu^{1,2**} JIANG Enyong¹ ROSHKO R M³ YANG Lianxiang²
TANG Guide² NIE Xiangfu²

(1. Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. College of Physics, Hebei Normal University

3. Department of Physics, The University of Manitoba, Winnipeg R3T 2N2, Canada)

* Supported by National Natural Science Foundation of China No. 50072015, 10074013 and China Scholarship Council No.99813057. Manuscript received Nov 30, 2001; in revised form Jul 29, 2002.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(022)27406991,
E-mail:houdenglu@eyou.com

ABSTRACT Zero field cooled (ZFC) and field cooled (FC) magnetization as a function of temperature of itinerant ferromagnet SrRuO_3 has been measured experimentally, in a sequence of applied fields up to the coercive field, and also the major hysteresis loop at a sequence of temperatures which span the ordered phase. The data have been analysed within the framework of a generalized version of the Preisach model of hysteresis, which combines thermal fluctuations with the change of the free energy barriers below T_c . The numerical simulations replicate all of the principal structural systematics of the data, and yield details of the spectrum of Barhausen instabilities in this material.

KEY WORDS preisach model, ferromagnet, irreversibility, hysteresis loop, magnetization

SrRuO_3 显示出非常有趣的物理性质因此倍受关注^[1~6]. 该材料具有金属导电性, 常称为“坏金属” (bad metal). 实验表明, SrRuO_3 化合物可以沉积在各种基底上, 且具有高的热稳

* 国家自然科学基金 50072015, 10074013 和国家留学基金 99813057 资助项目.

2001 年 11 月 30 日收到初稿; 2002 年 7 月 29 日收到修改稿.

本文联系人: 侯登录, 天津市 300072, 天津大学理学院应用物理系

定性、化学稳定性和非常光的表面。它具有与高温超导体以及铁电化合物相同的结构和相近的晶格常数，可用于各种用途的导电过渡层。

描述磁化过程的 Preisach 模型的特点是物理上具有广泛的普适性以及数学方法的简明性^[7]。能量壁垒的分布是决定巴克豪森 (Barkhausen) 跳跃的关键因素，外场或热涨落导致的每一次跳跃都可以通过 Preisach 模型很好的记录下来。由于磁有序温度 T_c 的影响，能量壁垒随温度而变化。将此能量壁垒的变化以及热涨落引入 Preisach 模型中，就可以拟合出材料的大部分磁性规律，如磁滞回线、ZFC 磁化强度曲线和 FC 磁化强度曲线等。因此，在同一理论框架下，可以对各种磁有序材料进行拟合，包括铁磁性材料以及超顺磁材料等^[7,8]。本文研究 SrRuO_3 的磁学性质，如零场冷却 (ZFC) 和加场冷却 (FC) 磁化强度随温度的变化规律，不同温度下的磁滞回线等，并利用改进的 Preisach 模型对此实验结果进行拟合。

1 实验方法

采用传统的固相反应法制备多晶 SrRuO_3 材料。将 SrCO_3 和 RuO_2 按比例混合并研磨均匀，然后在空气气氛下在 1123 K 预烧结 24 h，随后重新研磨，空气气氛下在 1473 K 烧结 24 h，该过程重复若干次，以保证样品的均匀性。利用 X 射线衍射确定样品的相结构。在扫描电子显微镜 (SEM) 下观察晶粒的形貌。利用 Quantum Design 物理性质测量系统 (PPMS) 测量样品在不同直流偏磁场下的 ZFC 和 FC 磁化强度随温度的变化，并测量样品在不同温度下的磁滞回线。在加磁场下使样品由居里温度以上的顺磁相冷却到低温的铁磁相 (FC)，保持磁场不变，升温测量磁化强度。在零磁场下使样品由高温冷却到低温 (ZFC)，然后加磁场升温测量磁化强度。

2 结果与讨论

多晶 SrRuO_3 的相结构为正交畸变钙钛矿结构，未见其它杂相 (图 1)。利用最小二乘法拟合实验数据得到材料的晶格常数分别为 $a=0.5548$ nm, $b=0.5551$ nm, $c=0.7830$ nm。多晶 SrRuO_3 晶粒的形貌一般为粒状颗粒，尺寸约为 $1.5 \mu\text{m}$ 。

由图 2 可见，FC 磁化强度随温度单调减小；ZFC 磁化强度都出现一个峰；ZFC 峰的位置随外场的增加而向低温方向移动。利用改进的 Preisach 模型对图 3 中的实验数据进行数值模拟，结果示于图 4, 5 和 6，包括各温度下的磁滞回线，各磁场下的 ZFC/FC 磁化强度随温度的变化曲线。可以看出，实验结果和数值计算相互符合得很好 (表 1)。

在零温度下平均各向异性势垒为 $\bar{W}_a(0) = \mu_0 \bar{h}_{c0} = 1.0 \times 10^{-18}$ J，而在临界温度下热涨落能为 $W_c^* = k_B T_c \ln(t_{\text{exp}}/\tau_0) = 5.5 \times 10^{-20}$ J。显然，零温各向异性势垒远远大于临界温度下的热涨落能， $\bar{W}_a(0) \gg W_c^*$ 。因此，可将该材料

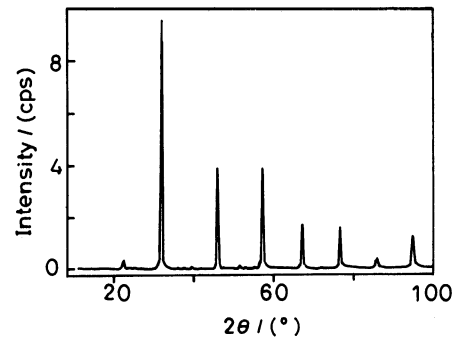


图 1 SrRuO_3 的室温 X 射线 ($\text{CuK}\alpha$) 衍射图
Fig.1 XRD pattern ($\text{CuK}\alpha$) of SrRuO_3 at room temperature

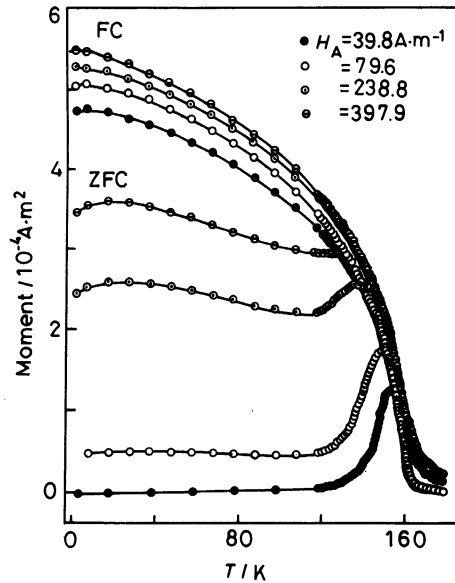


图 2 SrRuO₃ 在不同外场下的零场冷却 (ZFC) 和加场冷却 (FC) 磁化强度随温度的变化

Fig.2 Measurements of the temperature dependence of the field cooled (FC) and zero field cooled (ZFC) moment of SrRuO₃ in various applied fields h_a (1 emu = 10^{-3}Am^{-2})

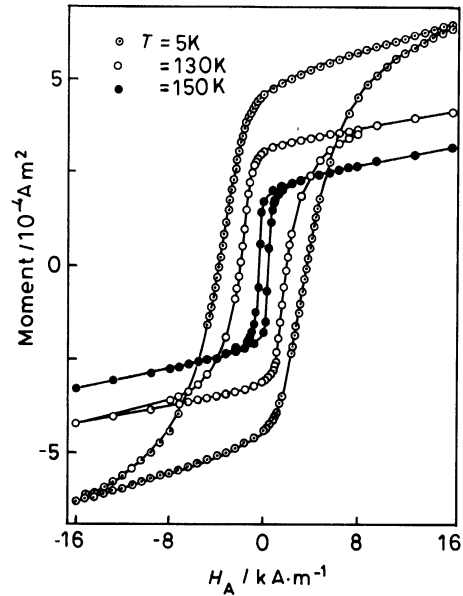


图 3 SrRuO₃ 在不同温度下的磁滞回线

Fig.3 Measurements of the major hysteresis loop of SrRuO₃ at several representative temperatures (1 Oe = $1000/4\pi$ A/m, 1 emu = 10^{-3}Am^2)

归结为各向异性控制的磁性体系, 在确定磁化强度随温度变化时可以忽略热涨落的作用. 在图 6(a) 中, 平均能量壁垒和热涨落能随温度变化的曲线的交点是超顺磁性的阻截温度 T_B . 高于此温度为超顺磁性区, 低于此温度则为铁磁性的不可逆过程. 当样品的温度逐渐升高时, 矫顽力逐渐减小. 这是内禀性质引起, 主要由指数 Γ_c 来确定. 该指数决定平均矫顽力 $\bar{h}_c(T)$ 的温度依赖性. 由图 6(b) 可见, 矫顽力的测量值与模型平均矫顽力相差甚微, 表明热涨落的贡献可以忽略不计. ZFC 曲线的变化趋势基本上来源于矫顽力作用. ZFC 的峰是矫顽力随温度的升高而降低的程度与出现超顺磁性之间竞争的结果. 在低温一侧峰的形状由指数 Γ_c, Γ'_c 确定, 而峰的位置则由指数 Γ_c, Γ'_c 和零温自发磁矩 μ_0 共同决定. 实际上, 利用热粘滞随温度的变化确定巴克豪森磁矩是实验上最直接的测定方法. FC 曲线对矫顽力的分布不十分敏感, 它主要受到相互作用的影响, 即决定于 σ_{i0}, Γ_i 和 Γ . 在零温度下 FC 磁矩的大小主要由比值 h_a/σ_{i0} 决定. 当外场大于 39.79 kA/m 时, FC 磁化强度基本不随外磁场而变化的原因是外场远大于相互作用场 (8.28 kA/m), 从而使 FC 磁矩几乎达到饱和. 在低场下 FC 和 ZFC 磁矩相差很大是不等式 $\sigma_{i0} \ll h_a \ll h_{c0}$ 决定的. $\sigma_{i0} \ll h_a$ 决定 FC 磁矩几乎饱和 (数值大), $h_a \ll h_{c0}$ 决定 ZFC 磁矩非常小. 但是文献 [9] 认为, SrRuO₃ 在低磁场下 ZFC 磁化强度的尖锐峰以及 FC 与 ZFC 之间很大的差别是自旋玻璃行为.

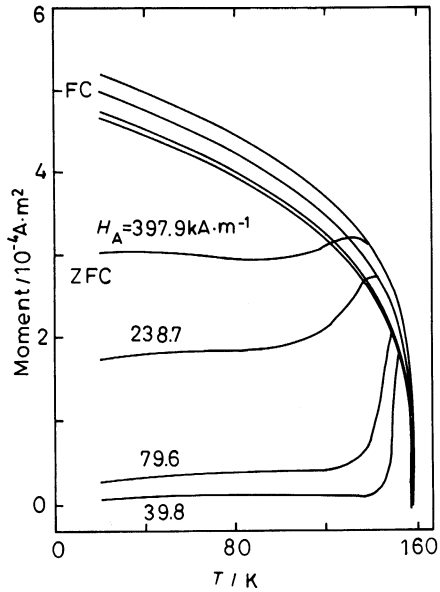


图 4 对图 2 中 FC 和 ZFC 曲线的数值模拟结果

Fig.4 Numerical simulations of the FC and ZFC data in Fig.2

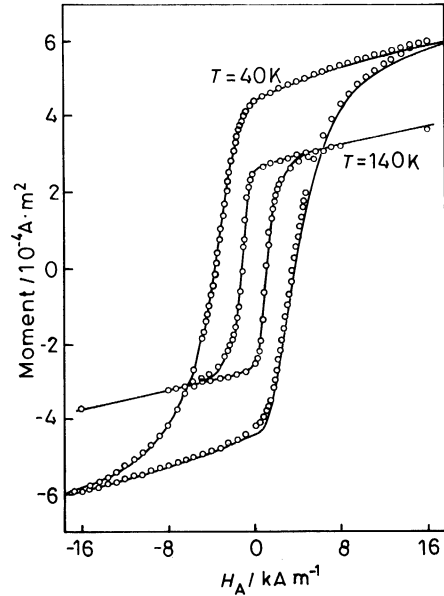


图 5 在两个不同温度下磁滞回线的数值模拟结果, 点为实验数据, 实线为数值模拟结果

Fig.5 Numerical simulations (solid curves) of two representative measured hysteresis loops (discrete points)

表 1 利用 Preisach 模型拟合 ZFC 和 FC 磁化强度以及各温度下的磁滞回线得到的拟合参数

Table 1 Preisach fitting parameters from ZFC/FC magnetization and hysteresis loops

Parameter	FC/ZFC	Loops
μ_0/Am^2	2×10^{-18}	2×10^{-18}
$\bar{h}_{c0}/\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$	413.8	413.8
σ_{c0}	0.8	0.6
$\sigma_{i0}/\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$	8.3	8.3
Γ	0.3	0.28~0.32
Γ_c	5.0	4.0
Γ'_c	20	15~20
Γ_1	0.3	0.3
$\lambda/\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$	0.00261	0.00143~0.00229
F	0.4	0.4
$m_{\text{sat}}/\text{Am}^2$	8×10^{-4}	8×10^{-4}
T_c/K	158	158
$\ln(t_{\text{exp}}/\tau_0)$	25	25

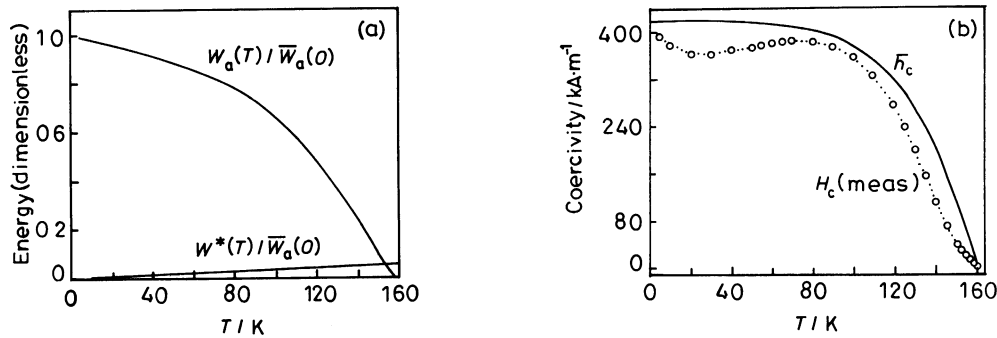


图 6 平均能量壁垒 $\overline{W}_a(T)/\overline{W}_a(0)$ 和热涨落能 $W^*(T)/\overline{W}_a(0)$ (a) 以及矫顽力 $H_c(\text{meas})$ 的测量值和模型平均矫顽力 \overline{h}_c (b) 与温度的关系

Fig.6 Temperature dependence of the mean anisotropy barrier $\overline{W}_a(T)/\overline{W}_a(0)$ in SrRuO₃ obtained from the numerical simulations, and the thermal fluctuation energy $W^*(T)/\overline{W}_a(0)$ (a) and the measured coercive field $H_c(\text{meas})$ and the model coercive field \overline{h}_c from the numerical simulations (b)

3 结 论

利用改进的 Preisach 模型模拟了 SrRuO₃ 在不同外磁场下的 ZFC 和 FC 磁化曲线以及不同温度下的磁滞回线, 得到的相应参数的数值基本相同. SrRuO₃ 的磁行为由各向异性控制, 热涨落在确定磁化强度和矫顽力随温度变化关系时所起的作用可以忽略. ZFC 曲线的变化规律主要起源于矫顽力作用. ZFC 的峰是矫顽力随温度升高而降低的程度与出现超顺磁性之间竞争的结果. FC 曲线主要受到相互作用的影响. 在低场下 FC 和 ZFC 磁矩相差很大是 $\sigma_{i0} \ll h_a \ll h_{c0}$ 决定的.

参 考 文 献

- 1 B.J.Kennedy, B.A.Hunter, High-temperature phase of SrRuO₃, Phys.Rev.B, **58**, 653(1998)
- 2 J.S.Dodge, E.Kulatov, H.Ohta, Y.Uspenskii, S.Haliov, Temperature-dependent local exchange splitting in SrRuO₃, Phys.Rev.B, **75**, R6987(1999)
- 3 L.Klein, J.R.Reiner, T.H.Geballe, M.R.Beasley, A.Kapitulnik, Extraordinary Hall effect in SrRuO₃, Phys.Rev.B, **61**, R7842(2000)
- 4 HOU Deng-Lu, JIANG En-Yong, LI Feng-Wu, BAI Hai-Li, ZHOU Xue-Zhi, Henry KUNKEL, Gwyn WILLIAMS, Critical Behaviour of Sintered SrRuO₃, Chin.Phys.Lett, **19**(5), 733(2002)
- 5 D.L.Hou, E.Y.Jiang, G.D.Tang, Z.Q.Li, S.W.Ren, H.L.Bai, Zero-field-cooled and field-cooled magnetization of itinerant magnetic system Sr_{1-x}CaxRuO₃, Physics Letters, **A298**, 207(2002)
- 6 D.L.Hou, E.Y.Jiang, S.W.Ren, Z.Q.Li, H.L.Bai, Zero-Field-Cooled Magnetization and Coercivity of Itinerant Ferromagnet SrRuO₃, Phys.Stat.Sol. (a) **191**(2), 597(2002)
- 7 T.Song, R.M.Roshko, Preisach model for systems of interacting superparamagnetic particles, IEEE Trans. Magn., **36**, 223(2000)
- 8 T.Song, R.M.Roshko, E.D.Dahlberg, Modelling the irreversible response of magnetically ordered materials: a Preisach-based approach, J. Phys.: Condens. Matter, **13**, 3443(2001)
- 9 S.Reich, Y.Tsabba, G.Cao, J.Magn.Magn.Mat. Spin glass behavior in single crystals and sintered SrRuO₃, **202**, 119(1999)