

0.56 GeV C⁶⁺ 离子在 YIG 上的辐照效应

夏元复 熊宏齐

(南京大学物理系 南京 210008)

侯明东

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 用穆斯堡尔谱学、正电子湮没技术和高分辨电子显微镜等方法研究了高能碳离子在石榴石铁氧体材料上的辐照效应。辐照效应引起材料微结构变化源于缺陷和缺陷团,导致缺陷周围磁结构变化,内场趋向各向同性,辐照并且使得晶胞参数变大;引起材料磁性能变化源于由于 O²⁻ 空位形成而使超交换场降低,从而减小超精细场。

关键词 辐照效应, 重离子物理。

1 引言

高能重离子辐照会显著改变石榴石铁氧体 Y₃Fe₅O₁₂ 的性质,而 YIG 是重要的微波铁氧体材料,并且在磁泡技术和磁光技术领域中也有重要应用。因此,在中高能重离子轰击的研究中,YIG 一直是感兴趣的体系^[1~3]。从事这一领域研究的主要是法国 GANIL 国家实验室,可提供用于轰击的束流从 100 MeV/u 的碳离子、27 MeV/u 的氦离子乃至 10 MeV/u 的铀离子。德国的 UNILAC 早自 1981 年就开始该领域的许多开拓性的工作。1991 年,我们利用我国 HIRFL 重离子加速器所提供的 50 MeV/u 的 C⁶⁺ 离子轰击掺 Ca、V、Sn 的 YIG 材料 Y_{1.6}Ca_{1.4}V_{0.45}Sn_{0.45}Fe_{4.05}O₁₂,并对其引起的辐照效应进行了研究。这一能区尚未经研究,我们期望得到新的信息。

上述 C⁶⁺ 离子在材料中的穿透深度约为 2.14 mm,因此可以观察到辐照的体相损伤。电子阻止本领 $[-dE/dX]_e$ 和核阻止本领 $[dE/dX]_n$ 的比值高达 1.5×10^4 ,从而能量损失机理可以认为基本上来自电子能损。前人工作^[4]表明辐照将严重影响磁性离子间的超交换作用。本工作又进一步用穆斯堡尔谱学表征了这些缺陷的特征。

2 实验

样品制备按 Y₂O₃、CaO、V₂O₅、SnO₂ 及

Fe₂O₃ 配方混合均匀后,在炉中 1190℃ 温度下空气中煅烧 4.5 h,降至室温,经粉碎、研磨和压片后再在 1356℃ 氧气中煅烧 7 h,制成圆形样品,直径 15.2 mm,实测密度 4.75 g/cm³,室温下比饱和磁化强度 19.12 emu/g,对应饱和磁化强度 0.114 T。

为了检验样品质量,先进行 X 射线衍射测定,实验中用 Cu 的 K α 射线,证明样品为单相,属立方晶系,晶胞参数 12.468 Å。

样品在 HIRFL 重离子加速器上用 47 MeV/u 的 C⁶⁺ 离子束辐射。辐照时样品温度保持在 30 K 以下,以避免热效应。样品上的注量用 $1.4 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 及 $3.5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 两种。

穆斯堡尔测量在室温下进行,用等加速穆斯堡尔谱仪和 25 mCi 的 ⁵⁷Co/Pd 源。以最小二乘法拟合谱线,同质异能移植均相对于 α -Fe。

用高分辨电子显微镜观察辐照损伤的结构特征;用正电子湮没寿命测定,证实空位及空位团的存在,实验用 ²²Na 源,并用 ⁶⁰Co 测定仪器的分辨函数。

3 结果和讨论

Y_{1.5}Ca_{1.4}V_{0.45}Sn_{0.45}Fe_{4.05}O₁₂ 属立方晶系,具有体心立方结构,每个晶胞含有 8 个分子。每个晶胞含有 16 个八面体位置(a 位),24 个四面体位置(d 位)和 24 个十二面体位置(c 位)。当 Ca²⁺、V⁵⁺ 和 Sn⁴⁺ 引入 YIG 后,Ca²⁺ 离子

由于半径较大,占据 c 位; V^{5+} 离子半径小,占据 d 位; 而 Sn^{4+} 离子占据 a 位^[5]. 因此,分子式可写为 $\{Y_{1.5}Ca_{1.4}\} [Fe_{1.5}Sn_{0.5}] (Fe_{2.55}V_{0.45}) O_{12}$. 它的晶胞常数 (12.468 Å) 比 $Y_3Fe_5O_{12}$ 的晶胞常数 12.376 Å 稍大,这主要是由于 Ca^{2+} 、 Sn^{4+} 和 V^{5+} 进入后引起的晶格畸变而引起的. 本实验样品的 X 射线衍射图表明样品为单相. 前人的结果表明低能离子辐照和中子辐照均使 YIG 晶胞常数增加. 我们为此实测 0.56 GeV C^{6+} 离子的辐照对晶胞参数 a 的影响,见图 1. 随着碳离子能损的增加,晶胞参数增加,致使样品密度降低. 从而使得与密度有关的物理量(如饱和磁化强度)的测定中,必须对其加以修正,但这是前人没注意的问题.

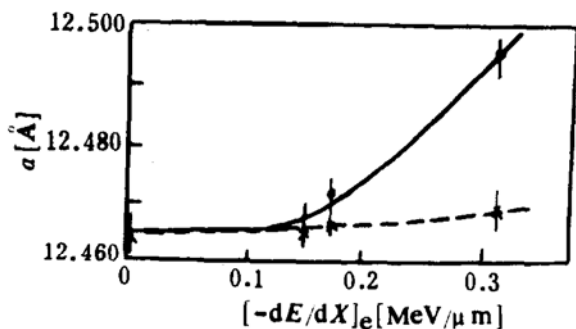


图 1 样品的晶胞参数随碳离子在样品中能量损失的增加而增加 ($O, \phi t = 1.4 \times 10^{15} \text{cm}^2, X, \phi t = 3.5 \times 10^{14} \text{cm}^2$)

穆斯堡尔谱给出铁原子核处磁超精细场的信息,穆斯堡尔参数示于表 1. 在谱线中央部分没有观察到顺磁组份. 由谱线可见,由于 Ca^{2+} 、 Sn^{4+} 和 V^{5+} 的引入使谱线线宽增宽,致使 a 位和 d 位的二套亚谱线不能分开. $\{Y_{1.5}Ca_{1.4}\} [Fe_{1.5}Sn_{0.5}] (Fe_{2.55}V_{0.45}) O_{12}$ 的磁性来源于 a 位和 d 位上的 Fe^{3+} 离子,在这二位置上的 Fe^{3+} 的磁矩分别为 S_a 和 S_d ,它们通过 O^{2-} 的相互作用(称为超交换相互作用)的哈密顿为

$$H = -J \sum S_a \cdot S_d$$

对于铁氧体材料, $J < 0$, S_a 和 S_d 必须反平行以保持体系能量最低. 由于辐照引起氧空位以

及晶胞参数增加, a 位和 d 位 Fe^{3+} 的超交换场变小,从而使铁原子核处有效内磁场减小. 从辐照后样品的电子显微镜照片上可以看到 $[Fe^{3+}]_a - O_2 - [Fe^{3+}]_d$ 链的增加和夹角偏离 180° , 这一结果也导致了饱和磁化强度的减小,如图 2 所示.

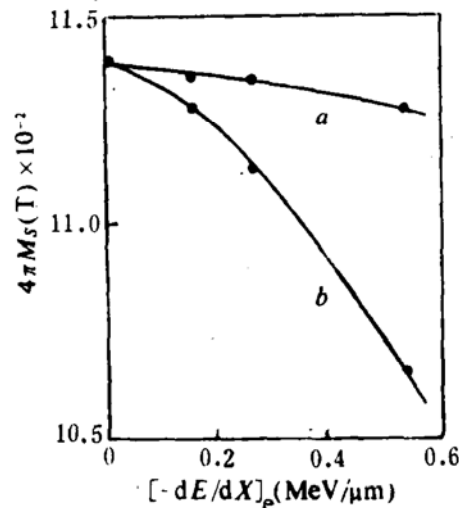


图 2 样品的饱和磁化强度随碳离子在样品中能量损失的增加而减小 ($O, \phi t = 1.4 \times 10^{15} \text{cm}^2, X, \phi t = 3.5 \times 10^{14} \text{cm}^2$). 饱和磁化强度值已作密度修正

辐照还引起材料内磁场方向的显著变化,这种情形在前人用高能 Xe 离子辐照时也曾观察到^[1,2,4]. 定义方向因子 F_0 为

$$F_0 = \frac{4/3A - 2B}{A + B + C}$$

衡量内磁场方向平行于入射方向的百分比,式中 A、B 和 C 分别是最外、中间和最内亚谱线的强度. 图 3 给出 F_0 随 $(-dE/dX)_e$ 的变化,它反映了内磁场方向的变化,也就是磁矩方向的变化. 由于重离子辐照,材料中产生空位-间隙原子,或是空位-间隙原子团,这类缺陷类似于位移钉扎,它们的存在在局部范围内破坏了点阵的周期性,从而导致缺陷周围内磁场方向的改变,使内磁场方向趋于各向同性分布.

关于辐照造成的空位-间隙原子对和空位-间隙原子团的存在,我们在正电子湮没寿命测量实验中得到证实. 对未辐照样,正电子

表 1 经辐照和未经辐照的样品的穆斯堡尔参数

Fluence ϕt (ions/cm ²)	$(-dE/dX)_e$ MeV/ μ m	Octahedral (a) sites		Tetrahedral (d) sites	
		I. S. Q. S. H _{hf} mm/s mm/s kOe	A : B : C*	I. S. Q. S. H _{hf} mm/s mm/s kOe	A : B : C*
0	0	0.31 0.10 381	3 : 3.20 : 1.31	0.03 -0.05 332	3 : 3.30 : 1.27
1.4×10^{15}	0.15	0.30 0.11 379	3 : 3.29 : 1.29	0.04 -0.07 335	3 : 3.19 : 1.32
	0.31	0.29 0.05 378	3 : 3.16 : 1.28	0.04 -0.05 325	3 : 3.09 : 1.33
	0.83	0.31 0.14 376	3 : 2.88 : 1.33	0.05 -0.12 324	3 : 2.86 : 1.27
3.5×10^{14}	0.15	0.27 0.09 381	3 : 3.25 : 1.30	0.01 -0.02 333	3 : 3.21 : 1.27
	0.31	0.25 0.08 380	3 : 3.20 : 1.30	0.05 -0.05 332	3 : 3.17 : 1.26
	0.83	0.27 0.07 377	3 : 3.12 : 1.30	0.03 -0.07 328	3 : 3.15 : 1.28

* A : B : C, the absorption ratio of intensities of outer, middle and inner peaks

在其中的自由寿命 $\tau_1 = 170\text{ps}$, 在缺陷态寿命 $\tau_2 = 413\text{ps}$, 可见 $\tau_2 = 2.4\tau_1$, 即大于正电子在双空位中的寿命. 由图 4 可见, 经辐照后缺陷浓度越来越大, 以致缺陷态的平均寿命下降.

畸变减弱了超交换作用, 从而减小了磁超精细场. 由于磁结构的存在, 辐照导致磁超精细场趋向较各向同性.

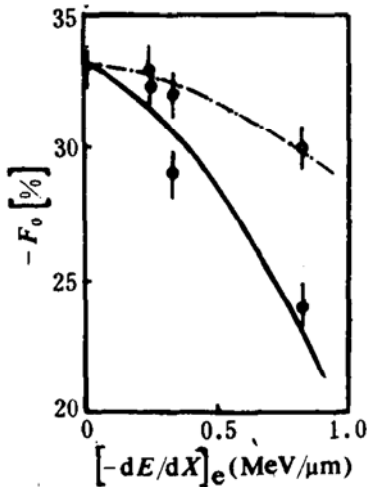


图 3 方向因子 F_0 随 $(-dE/dX)_e$ 的变化 ($\circ: \phi t = 1.4 \times 10^{15} / \text{cm}^2, \bullet: \phi t = 3.5 \times 10^{14} / \text{cm}^2$)

4 结 论

0.56GeV 的 C⁶⁺ 离子束轰击掺 Ca、V 和 Sn 的 YIG 石榴石铁氧体, 电子阻止本领为核阻止本领的 1.5×10^4 倍. 此时主要引起点缺陷, 辐照后样品点阵参数增加, 因而饱和磁化强度测量值必须作密度校正, O²⁻ 空位和晶格

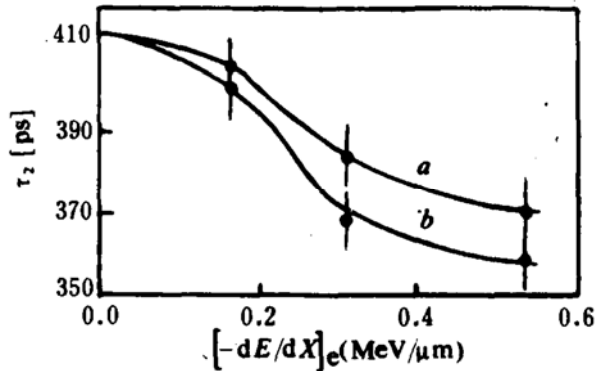


图 4 正电子在样品中缺陷态的平均寿命 τ_2 与 $(-dE/dX)_e$ 的关系. ($a: \phi t = 3.5 \times 10^{14} / \text{cm}^2, b: \phi t = 1.4 \times 10^{15} / \text{cm}^2$)

5 感 谢

在 HIRFL 辐实验时得到中国科学院近代物理研究所的李长林、马峰、金运范、徐荣辉、孙友梅、王志光、权晶民和刘刚同志的帮助, 在样品测量过程中, 得到南京大学物理系的张世远、陆怀先、鹿牧、黄润生、胡征和吴奕初同志, 东南大学物理系翟亚、朱育群同志帮助, 在此表示诚挚感谢.

(下转 60 页)

Highly Charged Ions N^{6+} , O^{5+} , Ne^{4+} Collision with Atom He into Excited States

Pan Guangyan Yang Feng Li Dawan

(*Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

Liu Zhanwen Zhang Wen Xu Qian Liu Huiping Zhao Mengchun

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

Abstract We have investigated the excitation processes in collisions between N^{6+} , O^{5+} , Ne^{4+} and He by using the ECR ionic source and the LHT-30 VUV Monochromator. The emission spectra show that there are three channels of excitation in the $N^{6+} + He$ collision system: (1) Single electron capture into excited states; (2) Double electron capture into excited states; (3) Direct excitation of incident ions.

Key Words highly charged ions, collisions, excited states.

(上接 55 页)

参 考 文 献

- | | |
|---|--|
| <p>1 Toulemonde M, et al. Phys. Rev., (B) 1987, 35: 6560</p> <p>2 Studer F, et al. Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res., (B) 1987, 19~20: 856</p> | <p>3 Fuchs G, et al. Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res., (B) 1985, 12: 471</p> <p>4 Groult D, et al. Defect and diffusion Fourm 1988, 57~58: 391</p> <p>5 张有纲等. 磁性材料, 成都电讯工程学院出版, 1988</p> |
|---|--|

Irradiation Effects of $Y_{1.6}Ca_{1.4}V_{0.45}Sn_{0.5}Fe_{4.05}O_{12}$ Induced by Energetic Carbon Ions Bombardment

Xia Yuanfu Xiong Hongqi

(*Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008*)

Hou Mingdong

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

Abstract The vacancies and vacancy clusters induced by the irradiation lead to the change of the magnetic structure around the defects. The reduction of the hyperfine magnetic field is caused by the lower superexchange field due to the formation of the O^{2-} vacancies. The change of direction of the hyperfine field has been also observed in Mössbauer spectra. On the other hand, the X-ray diffraction showed that the defects give rise to an increase of the lattice constant of the samples.

Key Words irradiation effects, heavy ion physics.