

磁性石榴石单晶 Bi-YIG 的布里渊散射

刘玉龙 张鹏翔 莫育俊 屠安

(中国科学院物理研究所)

1986 年 6 月 12 日收到

提 要

本文报道用激光布里渊散射法测量 $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x = 0, 0.14, 0.36, 0.54$) 室温下的布里渊散射, 观察到了热激发磁振子散射, 依据磁振子的频率-磁场关系, 导出了材料的磁性参数, 并发现了 Bi 代入时引起的自旋波劲度系数的增大现象.

一、引 言

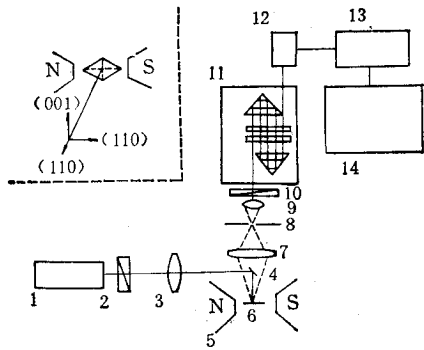
布里渊散射技术被广泛用来研究凝聚态物质中几个波数以下的低能量元激发. 布里渊散射不仅发生于声子, 在磁系统中也可发生于自旋波(磁振子). 对于透明晶体, 这门技术已发展得相当完善. 但大多数铁磁和亚铁磁材料在可见光范围都是不透明的. 参与散射的有效体积受到很大限制, 使磁振子的散射研究遇到很大困难. 特别是磁振子能量很低, 在背向散射配置中要求把极弱的散射信号从很强的表面激光漫散射中分析出来, 要求仪器具有很高的对比度和分辨能力. 由于近年来法布里-珀罗干涉仪的发展^[1], 使得在可见光区对热激发磁振子的布里渊散射研究成为可能^[2,3].

抗磁性 Bi^{3+} 离子部分地替代 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) 中的 Y^{3+} 离子, 形成分子式为 $\{\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\}[\text{Fe}_2](\text{Fe}_3)\text{O}_{12}$ 的石榴石单晶(简称 Bi-YIG 单晶). 它具有许多独特的磁性和磁光特性^[7]. 无论在机制研究和应用方面, 都引起了很大重视. 尤其是 Bi 代入后磁光旋转增强的机制, 还没有一致的见解. 关于 Bi 替代的 YIG 材料的磁振子散射研究, 尚未见报道. 我们测量了 $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x = 0, 0.14, 0.36, 0.54$) 的室温布里渊散射, 观察到热激发磁振子散射, 计算了相关的磁性参数, 并对 Bi 代入 YIG 后, 引起自旋波劲度系数及散射强度增强的机制进行了讨论.

二、样品的制备和实验方法

Bi-YIG 单晶是用助溶剂法生长的^[4]. 自然晶面中有呈菱形的. 经 X 射线衍射测定, 这种菱形表面是(110)面, 长轴是 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向, 短轴是 $\langle 001 \rangle$ 方向. 培养出的晶体自然表面多是光亮的, 可直接用于光散射实验. 为消除表面可能的油污, 所用晶体表面均用 Syton 抛光^[5].

布里渊散射的测量装置见文献[6]. 使用氩离子激光器的 4880 Å 和 5145 Å 线激发. 采用背向散射测量安排. 图 1 给出了背向散射实验配置. 散射光经收集透镜聚焦后再经过针孔、检偏器进入五通法布里-珀罗干涉仪. 仪器对比度大于 10^8 , 锐度为 57.



1 为激光器； 2 为起偏器； 3 为聚焦透镜；
4 为反射镜； 5 为磁铁； 6 为样品； 7 为
收集透镜； 8 为针孔； 9 为平行光透镜； 10
为检偏器； 11 为五通法布里-珀罗干涉仪；
12 为光电倍增管； 13 为放大器； 14 为扫描
稳定系统

图 1 布里渊散射实验配置

入射光的偏振方向同磁场垂直，平行于晶面的 $\langle 001 \rangle$ 方向。在磁振子光散射实验中，使用的激光功率要适当，要考虑样品热导，光吸收大小，以免过渡加热样品。在我们的实验过程中，照在样品上的激光功率约为 30 mW。

三、结果与讨论

1. Bi-YIG 单晶中体模磁振子散射峰

图 2 给出了典型的 Bi-YIG 单晶散射谱。我们认证，它是体模声学磁振子 (BM)，它不同于声学声子，也不同于表面模磁振子。亚铁磁材料中体磁振子的频率由以下色散公式来决定^[8]：

$$\omega_m^2 = \gamma^2 (H_{\text{eff}} + Dk_m^2)(H_{\text{eff}} + Dk_m^2 + 4\pi M_s), \quad (1)$$

ω_m 是磁振子频率， γ 是旋转化， H_{eff} 是包括外加磁场、各向异性场和退磁场在内的有效场， D 是自旋波劲度系数， k_m 是磁振子波矢， $4\pi M_s$ 是材料的饱和磁化强度。实验上有三个判据证明所测到的散射峰为体磁振子。首先 BM 峰位置与所加磁场大小明显有关；其次 BM 峰的偏振方向和入射光偏振相差 90° ；第三，BM 峰的散射强度随磁振子频率的升高而降低。^[9]

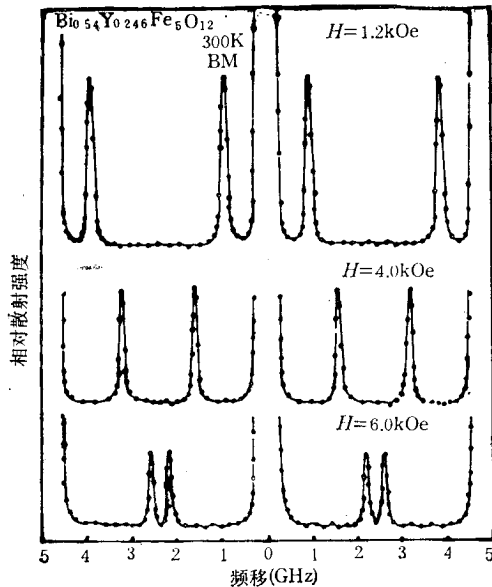


图 2 体磁振子布里渊散射谱

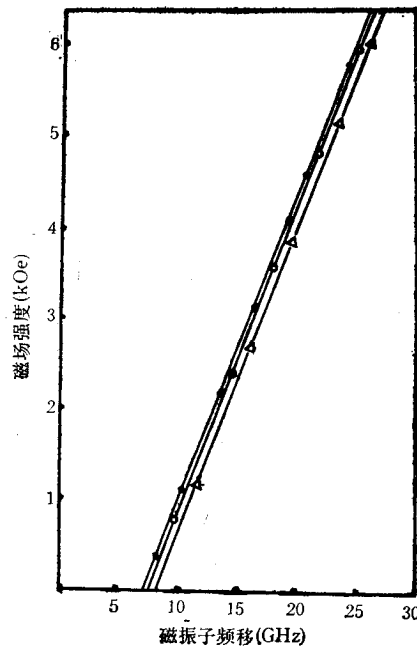


图 3 $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 中磁振子频率与磁场关系
 Δ — $x = 0.5$ ； \circ — $x = 0.36$ ； \bullet — $x = 0.14$

图 3 是由(1)式计算出的 Bi-YIG 单晶的磁振子频率 ω_m 与外加磁场的关系曲线及实验结果的比较,符合之好是显而易见的. 这种符合为光散射法测量磁性材料的基本参数提供了可靠的基础. 据(1)式求出的磁参数列入表 1. 在背反射情况下, (1)式中只有 Dk_m^2 项与磁振子波矢 $k_m = \frac{4\pi n}{\lambda}$ 有关. 因此,若用两个激光波长 λ 的散射数据,可以更准确地确定自旋波劲度系数.

2. 自旋波劲度系数

按照上述方法得到的自旋波劲度系数也列入表 1. 由表 1 可以看出,自旋波劲度系数随 Bi 含量增加而增加,这意味着 $Fe^{3+}-O-Fe^{3+}$ 超交换作用随 Bi 含量而增强. 这一结果和由于 Bi 的代入,Bi-YIG 单晶的居里点比 YIG 更高是一致的.^[10]Bi 是非磁性离子,由

表 1 用光散射测定的 Bi-YIG 单晶的磁性参数

磁性参数 样品	g		D(10 ⁻⁹ Oe·cm ²)		4πM _s (G)	
	测量值	文献值 ^[2]	测量值	文献值 ^[2]	测量值	文献值 ^[2]
Y ₃ Fe ₅ O ₁₂	2.00	2.00	5.4	5.4	1754	1750
Bi _{0.14} Y _{2.86} Fe ₅ O ₁₂	2.01		5.9		1763	
Bi _{0.36} Y _{2.64} Fe ₅ O ₁₂	2.01		6.2		1772	
Bi _{0.54} Y _{2.46} Fe ₅ O ₁₂	2.01		6.7		1783	

它引起 $Fe^{3+}-O-Fe^{3+}$ 交换积分增加的机制一直是人们探讨的问题. Geller 根据 X 射线衍射结果,倾向这样一种看法. Bi 的代入使四面体的 Fe-O 键缩短,从而导致交换作用的增强. Mössbauer 效应测定表明^[11]: Bi-YIG 样品四面体晶场增加,被认为是四面体的缩小所致. 我们的结果直接证明: Bi 加入使自旋波劲度系数增大了.

3. 散射强度问题

我们在实验中发现, Bi-YIG 单晶的磁振子的散射强度随样品中 Bi 含量的增加而逐渐增强. 在 YIG 中,磁振子的散射强度强烈地依赖于激光波长. Wetling 等人发现^[2],尽管在 4880 Å YIG 样品具有更强的吸收,因此参加散射的有效体积更小.然而,4880 Å 的散射强度却比 6328 Å 大三个数量级. 他们将通常的声子喇曼散射张量推广到磁系统,考虑了磁光耦合中的平方项和耗散项的作用. 所得理论结果较好地解释了他们的结果,即在可见光的高频端,耗散项在磁光效应中占了支配地位,尽管有大的吸收,散射体积变小,散射强度却反而增强.

Bi-YIG 单晶有类似的结果,但 5145 Å 的散射谱却比 4880 Å 的散射强度高. Wittekoek 等人^[12]给出了 $x = 0.26$ 和 $x = 0.16$ 的 Bi-YIG 单晶磁光测试数据:

$$x = 0.26 \begin{cases} 5145 \text{ \AA} & \phi F = -3.5^\circ/\mu\text{m}, \alpha = 9.8 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}; \\ 4880 \text{ \AA} & \phi F = -3.1^\circ/\mu\text{m}, \alpha = 21 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}. \end{cases}$$

$$x = 0.16 \begin{cases} 5145 \text{ \AA} & \phi F = -1.8^\circ/\mu\text{m}, \alpha = 8.3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}; \\ 4880 \text{ \AA} & \phi F = -2.0^\circ/\mu\text{m}, \alpha = 16 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}. \end{cases}$$

从对磁光耦合最有影响的这两项看, Bi 的代入似乎不足以造成 4880 Å 和 5145 Å 散射强度对 YIG 的反转. 是其它两项的影响更强或还有其它原因, 尚需更多的实验验证.

四、结 论

1. 测量了 Bi-YIG 单晶的布里渊谱, 得到了体磁振子的磁场、频率关系, 并与理论预言进行了比较, 求得了材料的磁性参数.

2. 实验还揭示出 Bi-YIG 单晶中自旋波的劲度系数随 Bi 含量的增加而增大的事实. 从而确认, 非磁性离子 Bi^{3+} 的确对交换作用有重要影响.

3. Bi-YIG 单晶是磁光耦合较强的材料, Bi 的加入使光散射强度明显增加, 但因为实验较为复杂, 还需要进一步的工作以便说明原因.

贾惟义同志多次参加本工作的讨论, 并提出宝贵意见, 在此深表感谢.

参 考 文 献

- [1] J. R. Sandercock, *Phys. Rev. Lett.*, **28**(1972), 237.
- [2] W. Wettling *et al.*, *J. Phys. c*, **8**(1975), 211.
- [3] P. H. Chang *et al.*, *Solid State Commun.*, **27**(1978), 617.
- [4] 徐孝贞、贾惟义、刘朝信, *物理学报*, **29**(1980), 1558.
- [5] 张鹏翔、刘玉龙、王焕元、庞玉璋, *物理学报*, **31**(1982), 865.
- [6] 张鹏翔、刘玉龙、王焕元、董长江, *声学学报*, **7**(1982), 51.
- [7] G. B. Scott *et al.*, *IEEE Trans. on Mag.*, **Mag-12**(1976), 296.
- [8] H. Suhl, *J. Phys. Chem. Solid*, **1**(1957), 209.
- [9] J. R. Sandercock, *AIP Conference Proc.*, No. 18(1973).
- [10] S. Geller *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **3**(1963), 21.
- [11] 凌启芬、徐孝贞、刘朝信, *物理学报*, **31**(1982), 1680.
- [12] S. Wittcheok *et al.*, *MMM Conference*, (1973), 1418.

BRILLOUIN SCATTERING FROM BISMUTH SUBSTITUTED IRON GARNETS

LIU YU-LONG ZHANG PENG-XIANG MO YU-JUN TU AN

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Brillouin scattering spectra of bismuth substituted iron garnets $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ ($x=0, 0.14, 0.36, 0.54$) were measured. The thermally excited bulk magnons were observed. Some magnetic parameters of these samples were determined according to the dispersion relation of the bulk magnons. We found that there is a dependance of the spin wave stiffness constant on bismuth contents, the higher the bismuth contents, the smaller the spin wave stiffness constant.