

磁场诱导的 TmFeO_3 单晶自旋重取向*王宁¹⁾ 黄峰^{1)†} 陈盈^{4)‡} 朱国锋¹⁾ 苏浩斌¹⁾ 郭翠霞¹⁾ 王向峰^{1)2)3)††}

1) (福州大学机械工程及自动化学院, 福建省太赫兹功能器件与智能传感重点实验室, 福州 350108)

2) (CAD/CAM 福建省高校工程研究中心 (莆田学院), 莆田 351100)

3) (智能配电网装备福建省高校工程研究中心, 福州 350108)

4) (福州大学物理与信息工程学院, 福州 350108)

(2023 年 8 月 14 日收到; 2023 年 9 月 8 日收到修改稿)

TmFeO_3 具有磁光效应、多铁性和自旋重取向等丰富的物理特性, 在凝聚态物理和材料物理领域具有重要的研究价值. 本文利用时域太赫兹低温磁光谱, 研究 TmFeO_3 单晶在 1.6 K 温度下自旋共振频率随外加磁场的变化规律, 并表征其内部复杂的相互作用. 结果表明, 随磁场增加 TmFeO_3 单晶的准铁磁共振向高频移动, 而准反铁磁共振在临界磁场 (2.2—3.6 T) 转变为准铁磁共振, 通过磁结构分析和理论拟合, 证实单晶磁矩发生了磁场诱导的自旋重取向. 本研究有助于深入理解稀土正铁氧体在外磁场、温度场综合作用下, 内部磁结构的调控机制, 开发相关的自旋电子学器件.

关键词: 太赫兹, 稀土正铁氧体, 铁磁共振, 自旋重取向**PACS:** 78.47.J-, 76.30.Kg, 75.30.Kz, 76.50.+g**DOI:** 10.7498/aps.73.20231322

1 引言

稀土正铁氧体 (RFeO_3 , R 表示稀土元素) 具有磁光效应、多铁性、超快自旋开关效应等独特的物理性质^[1-3], 因而引起了广泛关注. RFeO_3 具有畸变的钙钛矿结构, 空间群为 $D_{2h}^{16}-Pbnm$, 包含 R^{3+} 和 Fe^{3+} 两套磁性离子亚晶格^[4-6]. RFeO_3 中 Fe^{3+} 自旋以反铁磁构型排列, 但由于反对称交换相互作用, 自旋方向不是完全共线, 而是相互轻微倾斜^[7,8], 产生微弱的宏观磁化, 因而也被称为倾角反铁磁体. 自旋重取向是 RFeO_3 体系中最重要的一种物理性

质, 即 RFeO_3 中 Fe^{3+} 的自旋排列方式由一种构型转变为另一种构型^[9]. 自旋的状态可以作为自旋电子学器件中信息的载体, 对自旋的控制可以作为读写信息的手段. 同时, 探究自旋的控制方法也能够更加深入地理解磁性材料内部相互作用的物理机制. 研究表明通过外加磁场^[10-14]、温度场^[15-19] 或元素掺杂 (化学压力)^[6,20-22] 可以诱导这种相变过程.

太赫兹时域光谱近年来广泛应用于自旋电子学^[23]、载流子动力学^[24]、磁化动力学^[25,26] 等超快物理过程的研究. Song 等^[10] 探究了 83—95 K 温度下磁场对 TmFeO_3 单晶中自旋开关的影响, 结果表明, 这种自旋开关很容易受到极低的外部磁场的影

* 国家自然科学基金 (批准号: 62105068)、福建省自然科学基金 (批准号: 2023J05096, 2023J01055)、福建省太赫兹功能器件与智能传感重点实验室 (福州大学) 开放基金 (批准号: FPKLTFDIS202304)、CAD/CAM 福建省高校工程研究中心开放基金 (批准号: K202203)、智能配电网装备福建省高校工程研究中心开放基金 (批准号: KFRC202203)、福建省教育厅中青年教师教育科研项目 (批准号: JAT220032) 和福州大学科研启动项目 (批准号: XRC-22073) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: huangf@fzu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: chenying26@fzu.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: xfwang@fzu.edu.cn

响. 因此, 通过调节外部磁场的大小, 可以控制自旋开关的触发温度. Grishunin 等^[27]利用太赫兹光谱在 TmFeO_3 中观察到光子-磁振子的耦合, 并分析了不同样品厚度与拍频信号的依赖关系, 研究表明 RFeO_3 中存在磁振子-极化子的传播效应. Guo 等^[11]研究了 150 K 温度下 3 种切向的 TmFeO_3 样品中, q-FM 和 q-AFM 两种共振模式随外加磁场的依赖关系. 而在低温下, 稀土元素 Tm^{3+} 自旋磁矩变得有序, 内部相互作用变得更加复杂, 将产生新颖的物理现象. 特别是低温下磁矩对于外界的磁场将变得敏感, Johnson 等^[28]发现在非相变温度区间内, 较高温度下 (273 K), 诱发 ErFeO_3 单晶自旋重取向需要 10 T 以上的外加临界磁场, 而在 140 K 时, 临界磁场的大小降为 6.3 T. 同样他在与 TmFeO_3 , ErFeO_3 同为稀土正铁氧体的 HoFeO_3 , DyFeO_3 上也发现了类似的现象. 因而研究 TmFeO_3 单晶在极低温下的行为, 对于探究 RFeO_3 体系中复杂的相互作用以及开发较低磁场控制的稀土正铁氧体自旋电子学器件具有重要意义.

本文利用时域太赫兹低温磁光谱系统, 研究了低温下 TmFeO_3 单晶中准铁磁 (quasi-ferromagnetic mode, q-FM) 和准反铁磁 (quasi-antiferromagnetic mode, q-AFM) (以下简称双模) 共振频率随外加磁场增加的频移和模式转换现象. 通过控制不同实验构型下双模的选择性激发, 分析 TmFeO_3 单晶中的自旋磁矩变化, 发现了磁场诱导的 TmFeO_3 自旋重取向现象, 并对其内部复杂的相互作用参数进行表征.

2 实验方法

实验样品是通过光学浮区法生长的 TmFeO_3 单晶, 样品表面经过抛光处理, 厚度为 0.775 mm. 样品经过 X 射线定向仪分析确认为 (001) 取向, 即 *c*-cut. 实验装置为自主搭建的太赫兹低温磁光谱系统, 该系统的磁场变化范围为 0—7 T; 温度变化范围为 1.6—300 K; 光谱探测范围为 0.2—2 THz^[29]. 系统光源为美国 Coherent 公司的 Astrella 一体化钛蓝宝石飞秒激光放大器 (中心波长为 800 nm, 激光重复频率为 1 kHz, 脉宽为 35 fs, 脉冲峰值功率为 5 mJ). 一对 ZnTe 非线性晶体分别通过光整流效应和光电采样技术用于产生和探测太赫兹信号, 其厚度均为 1 mm. 系统的可变温度和磁场由英国 Oxford 公司的超导磁体 (Oxford Instruments, SpectromagPT) 控制. 为了减小空气中水汽对探测光的吸收进而影响实验结果, 整个系统处于密闭空间内, 并持续向空间内部充入干燥氮气.

3 结果与讨论

TmFeO_3 单晶具有畸变的钙钛矿结构, 晶体结构示意图如图 1(a) 所示. 温度能够诱导 TmFeO_3 自旋磁矩发生自旋重取向. 无外磁场时, 温度高于 93 K 而低于 Néel 温度 ($T_N = 650$ K) 时, TmFeO_3 晶体为 Γ_4 相, 磁矩 \mathbf{M} 沿晶体 *c* 轴方向; 温度低于 85 K 时, 晶体转变为 Γ_2 相, 此时磁矩 \mathbf{M} 沿晶体 *a* 轴方向, 自旋磁矩构型示意图见图 1(c). 在 93—85 K 之间, 晶体处于 Γ_{24} 相, 此时磁矩 \mathbf{M} 处于 *ac* 平面内, 与 *a* 轴和 *c* 轴产生夹角^[4,30].

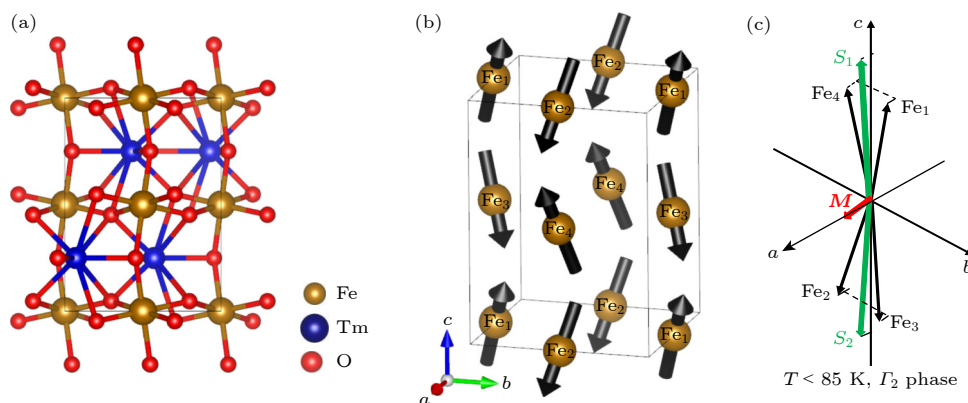


图 1 TmFeO_3 晶体结构及倾角反铁磁自旋构型示意图 (a) 晶体结构示意图; (b) 反铁磁亚晶格 Fe_{1-4} 自旋方向示意图; (c) $T < 85$ K, Γ_2 相的自旋磁矩构型示意图, S_1 和 S_2 表示两对合成的 Fe^{3+} 亚晶格自旋

Fig. 1. Schematic diagrams of TmFeO_3 crystal's structure and canted-antiferromagnet spin configuration: (a) Crystal's structure diagram; (b) spin directions for the Fe_{1-4} sites in the antiferromagnetic sublattice; (c) spin magnetic moment configuration schematic of Γ_2 phase at $T < 85$ K, S_1 and S_2 stand for two pairs of spins for synthesized Fe^{3+} sublattices.

线偏振的 THz 波能够选择性地激发 TmFeO_3 单晶中自旋磁矩的两种共振模式, 当 THz 波的磁场分量 H_{THz} 垂直于宏观磁化矢量 \mathbf{M} 时, 激发 q-FM 共振模式, \mathbf{M} 将绕着有效场做弛豫进动; 当 H_{THz} 平行于 \mathbf{M} 时, 激发 q-AFM 共振模式, \mathbf{M} 将沿着有效场方向做切向进动^[31], THz 波的选择性激发及两种共振模式示意图如图 2(a) 所示. 利用线偏振 THz 波对两种共振模式的激发生理原理, 能够有效地通过 THz 时域光谱探究晶体内部磁结构在外磁场、温度场、元素掺杂作用下的变化.

实验上, 入射太赫兹波垂直入射到样品上, 其磁场分量 H_{THz} 垂直于太赫兹电场所在平面, 且平行于样品表面. 通过旋转样品可以改变宏观磁矩 \mathbf{M} 和 H_{THz} 的夹角, 实现两种模式的选择性激发, 如图 2(b) 所示.

图 3 为 $T = 1.6$ K, 沿晶体 c 轴方向施加 0—7 T 外加磁场, 太赫兹波的磁场分量 H_{THz} 分别平

行于 b 轴和 a 轴时样品的 THz 吸收光谱. 如图 3(a) 所示, 在无外加磁场 ($H = 0$) 且 H_{THz} 平行于晶体 b 轴时, H_{THz} 垂直于磁矩 \mathbf{M} , THz 波选择性激发了 q-FM 模式, 其频率约为 0.6 THz. 在低磁场时, q-FM 共振频率随磁场变化比较小. 外磁场增大至 2.2 T 后, 随着外磁场的增大, 共振频率快速向高频移动. 如图 3(b) 所示, 在无外界磁场 ($H = 0$) 且 H_{THz} 平行于晶体 a 轴, H_{THz} 平行于磁矩 \mathbf{M} , THz 波选择性激发了 q-AFM 模式, 其频率约为 0.9 THz. 随着外加磁场的增大, q-AFM 共振频率逐渐向高频移动. 外磁场增大至 2.2 T 时, 在 0.65 THz 处出现 q-FM 吸收峰, 随着外磁场的增大, 其频率也往高频移动. 在 2.2—3.6 T 磁场范围内, 同时存在两种共振模式, 表明外加磁场诱导 TmFeO_3 磁结构发生变化. 当外磁场大于 3.6 T 时, q-AFM 吸收峰消失, 后出现的 q-FM 吸收峰与图 3(a) 中 q-FM 吸收峰的共振频率基本一致.

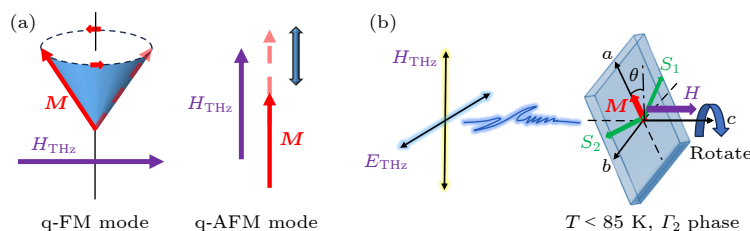


图 2 TmFeO_3 共振模式激发规律及实验构型 (a) THz 波选择性激发 q-FM 和 q-AFM 两种共振模式; (b) 实验构型图, 通过旋转样品改变宏观磁化矢量 \mathbf{M} 和 THz 磁场分量的角度

Fig. 2. Excitation rule of TmFeO_3 resonance modes and experimental geometry: (a) THz wave selectively excites the two resonance modes of q-FM and q-AFM; (b) experimental geometry, the angle between the macroscopic magnetization vector \mathbf{M} and the THz magnetic field component is changed by rotating the sample.

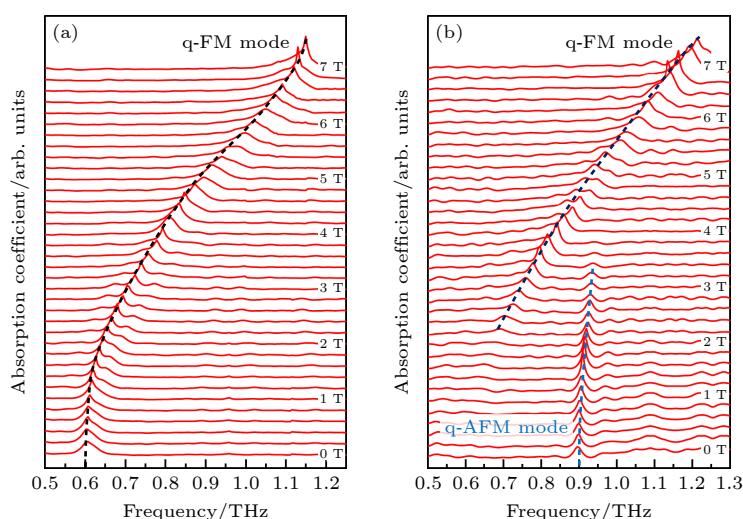


图 3 $T = 1.6$ K 时, 沿晶体 c 轴施加 0—7 T 外磁场, TmFeO_3 在不同磁场下的 THz 吸收光谱 (a) $H_{\text{THz}} // b$ 轴; (b) $H_{\text{THz}} // a$ 轴

Fig. 3. THz absorption spectra of TmFeO_3 at $T = 1.6$ K under different magnetic fields applied along crystal's c -axis from 0—7 T: (a) $H_{\text{THz}} // b$ -axis; (b) $H_{\text{THz}} // a$ -axis.

图 4 为外磁场诱导的磁结构相变的示意图. 这里, φ 为矢量 \mathbf{M} 和 a 轴之间的夹角, 它随着沿 c 轴施加磁场的增大而增大. $\theta_{1,2}$ 表示两个自旋亚晶格 S_1 和 S_2 与 \mathbf{M} 之间的夹角. 随着沿 c 轴外加磁场的增大, Γ_2 相样品磁矩 \mathbf{M} 由 a 轴逐渐向 c 轴方向翻转, 经过 Γ_{24} 相, 最后完全转向磁场方向, 变为 Γ_4 相, 完成自旋重取向.

根据 Balbashov 等 [32] 的工作, 如图 3(b) 所示, q-AFM 模的频率与外加磁场的关系可以表示为

$$\frac{2\omega_{\text{AFM}}^2}{\gamma^2} = P + Q + R + [(P - Q + R)^2 + 4QR]^{1/2}, \quad (1)$$

其中,

$$P = H_E H_{xy} + H_D^2 - \eta H^2, \quad (2)$$

$$Q = H_E (H_{xz} + 3H_{A2} \sin^2 \varphi) \cos^2 \varphi + H^2 (\sin^2 \varphi - \eta), \quad (3)$$

$$R = H^2 (1 + \eta)^2 \cos^2 \varphi. \quad (4)$$

倾斜的角度 φ 满足 [33]:

$$H_E H_{A2} 2 \sin^3 \varphi + (H_E H_{xz} - \eta H^2) \sin \varphi - H H_D = 0, \quad (5)$$

其中, ω_{AFM} 为 q-AFM 模式在外界磁场影响下的共振频率. H 为沿 c 轴施加的外界磁场大小, 旋磁比 $\gamma = 1.86 \times 10^7 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Oe}^{-1}$ [34]. 通过拟合, 获得 TmFeO_3 内部复杂的相互作用参数. H_E 和 H_D 分别为交换场系数和反对称交换场系数, 均与温度相关, 当温度不变时, 将它们视为常数, 大小分别为 6900 kOe 和 2.3 kOe; η 为外界磁场对样品有效场系数, 大小为 0.72. H_{A2} 是 ac 平面上的有效双二次各向异性场, 大小为 0.2 kOe. H_{xy} 为 ab 面各向异性场, 大小分别为 0.33 kOe; H_{xz} 为 ac 面各向异性场, 在这里 $H_E H_{xz} = 12000 \text{ kOe}^2$.

根据 Herrmann 等 [35] 的工作, 图 3(b) 中 q-FM 模的频率与外加磁场 H 的关系可以表示为

$$\frac{2\omega_{\text{FM}}^2}{\gamma^2} = \frac{2\omega_{\text{FM}}^2(0)}{\gamma^2} + (5H_{xz} + H_D)(\eta H) + (\eta H)^2. \quad (6)$$

其中, ω_{FM} 为 q-FM 模式的共振频率. 经拟合, $\eta = 0.72$, $H_D = 2.3 \text{ kOe}$, $H_{xz} = 0.12 \text{ kOe}$. 经过 Γ_2 到 Γ_4 相的自旋重取向, 描述晶体内部结构的各向异性场系数发生改变, 表征晶体内部结构发生一定程度变化.

共振频率随磁场变化的理论拟合曲线如图 5 所示. 在低磁场时, 样品此时处于 Γ_2 相, H_{THz} 平行 \mathbf{M} , 激发 q-AFM 模式. q-AFM 共振模式随外加磁场变化能够用 (1) 式很好地拟合. 在高磁场时, 在样品处于 Γ_4 相, 由于外加磁场诱导自旋磁矩 \mathbf{M} 由 a 轴转向 c 轴, 此时外加磁场和太赫兹磁分量垂直, 激发 q-FM 共振模式, 其随外加磁场变化情况能够用 (6) 式很好地拟合.

对比 Guo 等 [11] 在高温下 (150 K) 对 TmFeO_3 的相关测量及拟合数据, 参数 H_E , H_{xy} , $H_E H_{xz}$ 等相近, 而表征晶体内部的反对称交换相互作用的反对称交换场系数 H_D 则受到温度影响较大, 150 K 温度下大小为 185 kOe, 文中 1.6 K 温度下大小为 2.3 kOe. 倾角反铁磁体中磁矩 \mathbf{M} 的产生主要由于反对称交换相互作用. 低温使得磁矩 \mathbf{M} 减弱, 晶体的各向异性场变小, 从而使得 TmFeO_3 单晶对外部磁场的扰动更加敏感, 在较低磁场作用下完成磁矩 \mathbf{M} 由 a 轴向 c 轴的转变, 即晶体发生 Γ_2 到 Γ_4 相的自旋重取向. 此外, 根据 Johnson 等 [28] 研究表明低温在一定程度上通过影响稀土正铁氧体中稀土离子, 从而间接改变晶体内部 Fe^{3+} - Fe^{3+} 相互作用或直接影响 R^{3+} - Fe^{3+} 的相互作用, 在一定程度上促进了极低温下较低磁场诱导自旋重取向现象的发生.

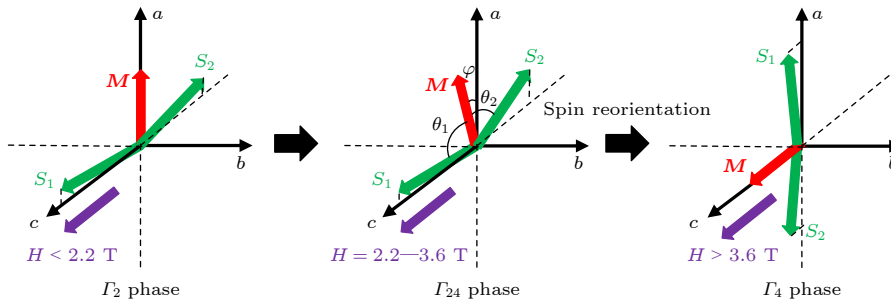


图 4 1.6 K 温度下 TmFeO_3 在沿 c 轴外加磁场影响下磁结构变化示意图

Fig. 4. Schematic diagram of magnetic structure change of TmFeO_3 under magnetic field applied along the crystal's c -axis.

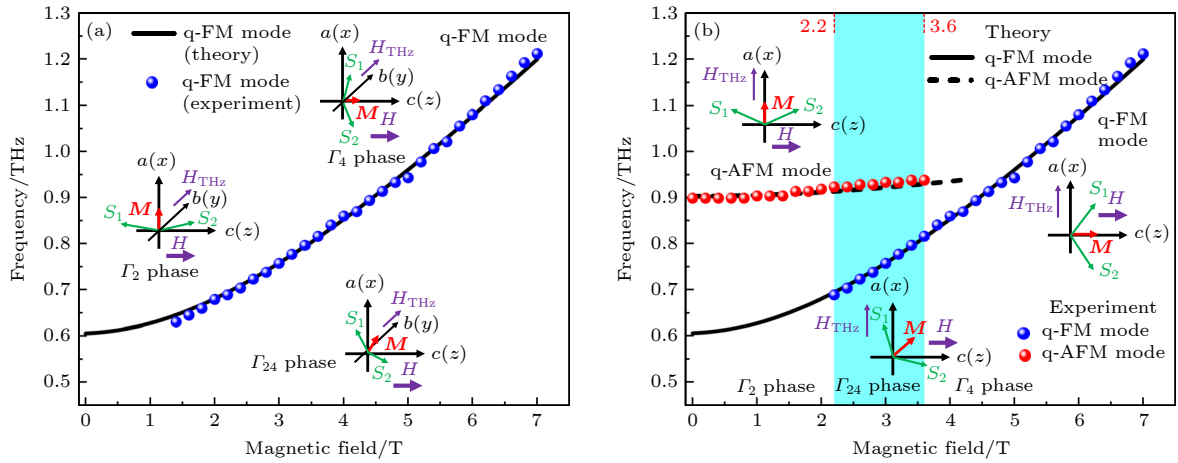


图 5 TmFeO₃ 在 1.6 K 共振频率随磁场变化的理论拟合 (a) 图 3(a) 中 q-FM 共振频率及其理论拟合曲线; (b) 图 3(b) 中 q-AFM 和 q-FM 共振频率及其理论拟合曲线. 图中的插图显示了太赫兹磁分量 H_{THz} 方向, 外磁场 H 方向, 及 Γ_2 相 TmFeO₃ 在不同磁场下的简化磁结构变化示意图. 黑色虚线是根据 (1) 式对 q-AFM 共振频率的拟合; 黑色实线是根据 (6) 式对 q-FM 共振频率的拟合

Fig. 5. Theoretical fittings of TmFeO₃ resonance frequency varying with magnetic field at 1.6 K: (a) The q-FM resonance frequencies in Fig. 3(a) and its theoretical fitting curve; (b) the q-AFM and q-FM resonance frequencies in Fig. 3(b) and their theoretical fitting curves. The illustrations in the figure show the terahertz magnetic component H_{THz} , the external magnetic field H , and simplified magnetic structure changes of Γ_2 -phase TmFeO₃ under different magnetic fields. The black dashed line is the fitting of q-AFM resonance frequency according to Eq. (1); black solid line is the fitting of q-FM resonance frequency according to Eq. (6).

4 结 论

本文利用线偏振 THz 波选择性激发 TmFeO₃ 晶体中两种自旋共振模式, 分析磁场 0—7 T 内两种磁共振模式的共振频率及对应的磁结构变化, 发现了在低温下磁场诱导的 $\Gamma_2 \rightarrow \Gamma_4$ 自旋重取向现象. 通过理论拟合, 获得 TmFeO₃ 单晶内部复杂的相互作用参数. 在 RFeO₃ 体系中由于交换场、各向异性场、晶体场等综合作用, 通常需要施加较高磁场才能诱导磁结构的相变. 而在低温时, 可以通过较低的磁场诱导 TmFeO₃ 由 $\Gamma_2 \rightarrow \Gamma_4$ 的完全相变过程. 这项研究为通过磁场操控 TmFeO₃ 内部自旋磁矩提供了理论依据, 并有望开发相应的高速磁存储等自旋电子学器件.

参考文献

- [1] Kimel A V, Ivanov B A, Pisarev R V, Usachev P A, Kirilyuk A, Rasing Th 2009 *Nat. Phys.* **5** 727
- [2] Afanasiev D, Ivanov B A, Kirilyuk A, Rasing Th, Pisarev R V, Kimel A V 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 658270
- [3] Nova T F, Cartella A, Cantaluppi A, Först M, Bossini D, Mikhaylovskiy R V, Kimel A V, Merlin R, Cavalleri A 2017 *Nat. Phys.* **13** 132
- [4] White R L 1969 *J. Appl. Phys.* **40** 1061
- [5] Yamaguchi T 1974 *J. Phys. Chem. Solids.* **35** 479
- [6] Ma X X, Yuan N, Yang W T, Zhu S, Shi C F, Song H, Sun Z Q, Kang B J, Ren W, Cao S X 2022 *Inorg. Chem.* **61** 14815

- [7] Dzyaloshinsky I 1958 *J. Phys. Chem. Solids.* **4** 241
- [8] Moriya T 1960 *Phys. Rev.* **120** 91
- [9] Jin Z M, Ruan S Y, Li J G, Lin X, Ren W, Cao S X, Ma G H, Yao J Q 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 167501 (in Chinese) [金钻明, 阮舜逸, 李炬康, 林贤, 任伟, 曹世勋, 马国宏, 姚建铨 2019 *物理学报* **68** 167501]
- [10] Song H, Fan W C, Jia R R, Sun Z Q, Ma X X, Yang W T, Zhu S, Kang B J, Feng Z J, Cao S X 2023 *Ceram. Int.* **49** 22038
- [11] Guo J J, Cheng L, Ren Z, Zhang W J, Lin X, Jin Z M, Cao S X, Sheng Z G, Ma G H 2020 *J. Phys. Condens. Matter* **32** 185401
- [12] Jiang J J, Song G B, Wang D Y, Jin Z M, Tian Z, Lin X, Han J G, Ma G H, Cao S X, Cheng Z X 2016 *J. Phys. Condens. Matter* **28** 116002
- [13] Shen H, Cheng Z X, Hong F, Xu J Y, Yuan S J, Cao S X, Wang X L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 192404
- [14] Nikitin S E, Wu L S, Sefat A S, Shaykhutdinov K A, Lu Z, Meng S, Pomjakushina E V, Conder K, Ehlers G, Lumsden M D, Kolesnikov A I, Barilo S, Guretskii S A, Inosov D S, Podlesnyak A 2018 *Phys. Rev. B* **98** 064424
- [15] Slawinski W, Przenioslo R, Sosnowska I, Suard E 2005 *J. Phys. Condens. Matter* **17** 4605
- [16] Kimel A V, Kirilyuk A, Usachev P A, Pisarev R V, Balbashov A M, Rasing Th 2005 *Nature* **435** 655
- [17] Chen L, Li T W, Cao S X, Yuan S J, Hong F, Zhang J C 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 103905
- [18] Ramu N, Muralidharan R, Meera K, Jeong Y H 2016 *RSC Adv.* **6** 72295
- [19] Zhao W Y, Cao S X, Huang R X, Cao Y M, Xu K, Kang B J, Zhang J C, Ren W 2015 *Phys. Rev. B* **91** 104425
- [20] Long H, Cao S X, Liu M, Kang Y M, Zhang B J, Jin C 2014 *Phys. Rev. B* **90** 144415
- [21] Ren Z, Cheng L, Sergey G, Nadezhda L, Li J T, Shang J M, Sergey B, Wu A H, Aleksandra K, Ma Z W, Zhou C, Sheng Z G 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 207802 (in Chinese) [任壮, 成龙,

- 谢尔盖·固瑞特斯基, 那泽亚·柳博奇科, 李江涛, 尚加敏, 谢尔盖·巴里洛, 武安华, 亚历山大·卡拉什尼科娃, 马宗伟, 周春, 盛志高 2020 *物理学报* **69** 207802]
- [22] Amelin K, Nagel U, Fishman R S, Yoshida Y, Sim H, Park K, Park J G, Rõõm T 2018 *Phys. Rev. B* **98** 174417
- [23] Nagel U, Fishman Randy S, Katuwal T, Engelkamp H, Talbayev D, Yi H T, Cheong S W, Rõõm T 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 257201
- [24] Beard M C, Turner G M, Schmuttenmaer C A 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 5915
- [25] Kim T H, Kang C, Kee C S, Lee J H, Cho B K, Gruenberg P, Tokunaga Y, Tokura Y, Lee J S 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 233101
- [26] Reid A H M, Rasing Th, Pisarev R V, Duerr H A, Hoffmann M C 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 082403
- [27] Grishunin K, Huisman T, Li G Q, Mishina E, Rasing T, Kimel A V, Zhang K L, Jin Z M, Cao S X, Ma G H, Mikhaylovskiy R V 2018 *ACS Photonics* **5** 1375
- [28] Johnson C E, Prelorendjo L A, Thomas M F 1980 *J. Magn. Magn. Mater.* **15** 557
- [29] Ju X W, Hu Z Q, Huang F, Wu H B, Wang X F 2021 *Opt. Express* **29** 9261
- [30] Tsuyoshi Y, Kunirō T 1973 *Phys. Rev. B* **8** 5187
- [31] Li X W, Bamba M, Yuan N, Zhang Q, Zhao Y, Xiang M L, Xu K, Jin Z M, Ren W, Ma G H, Cao S X, Turchinovich D, Kono J 2018 *Science* **361** 794
- [32] Balbashov A M, Berezin A G, Gufan Y M, Kolyadko G S, Marchukov P Y, Rudashevskii E G 1987 *J. Exp. Theor. Phys.* **66** 174
- [33] Lin X, Jiang J J, Jin Z M, Wang D Y, Tian Z, Han J G, Cheng Z X, Ma G H 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 092403
- [34] Gorodetsky G, Shaft S, Remeika J P 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 7353
- [35] Herrmann G F 1963 *J. Phys. Chem. Solids* **24** 597

Magnetic-field-induced spin reorientation in TmFeO₃ single crystals*

Wang Ning¹⁾ Huang Feng^{1)†} Chen Ying^{4)‡} Zhu Guo-Feng¹⁾ Su Hao-Bin¹⁾

Guo Cui-Xia¹⁾ Wang Xiang-Feng^{1)2)3)††}

1) (Fujian Provincial Key Laboratory of Terahertz Functional Devices and Intelligent Sensing, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

2) (The Engineering Research Center for CAD/CAM of Fujian Universities, Putian University, Putian 351100, China)

3) (Engineering Research Center of Smart Distribution Grid Equipment, Fujian Province University, Fuzhou 350108, China)

4) (College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

(Received 14 August 2023; revised manuscript received 8 September 2023)

Abstract

TmFeO₃ exhibits rich physical properties such as magneto-optical effect, multiferroicity, and spin reorientation, making it possess significant research value in condensed matter physics and materials science. In this study, we utilize a time-domain terahertz magneto-optical spectroscopy system to investigate the changes in spin resonance frequency of TmFeO₃ single crystal at $T = 1.6$ K under external magnetic fields in a range of 0–7 T. The TmFeO₃ sample is grown in an optical floating zone furnace and its crystallographic orientation is determined by using back-reflection Laue X-ray photography with a tungsten target. The measurement setup is a self-built time-domain terahertz magneto-optical spectroscopy system, with magnetic fields in a range of 0–7 T, temperatures in a range of 1.6–300 K, and a spectral range of 0.2–2.0 THz. A pair of 1 mm-thick ZnTe nonlinear crystals is used to generate and detect terahertz signals through optical rectification and electro-optic sampling technique. The system variable temperature and magnetic field are controlled by a superconducting magnet. In experiments, a linearly polarized terahertz wave is vertically incident on the sample surface, and its magnetic component H_{THz} is parallel to the sample surface. By rotating the sample, the angle (θ) between macroscopic magnetic moment \mathbf{M} and H_{THz} can be tuned, achieving selective excitations of the two modes, that is, $\theta = 0$ for q-AFM mode and 90° for q-FM mode. Terahertz absorption spectrum results indicate that as the magnetic field increases, the quasi-ferromagnetic resonance (q-FM) of TmFeO₃ single crystal shifts towards high frequencies, and quasi-antiferromagnetic resonance (q-AFM) transits to q-FM under low critical magnetic fields (2.2–3.6 T). Through magnetic structure analysis and theoretical fitting, it is confirmed that the magnetic moment of the single crystal undergoes magnetic field induced spin reorientation. This study is helpful in better understanding of the regulation mechanism of the internal magnetic structure of rare earth ferrite under the combined action of external magnetic field and temperature field, and also in developing related spin electronic devices.

Keywords: terahertz, rare earth orthoferrite, ferromagnetic resonance, spin reorientation

PACS: 78.47.J–, 76.30.Kg, 75.30.Kz, 76.50.+g

DOI: 10.7498/aps.73.20231322

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62105068), the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant Nos. 2023J05096, 2023J01055), the Key Laboratory of Terahertz Functional Devices and Intelligent Sensing of Fujian Province, China (Grant No. FPKLTDFDIS202304), the Engineering Research Center for CAD/CAM of Fujian Universities (Grant No. K202203), the Engineering Research Center of Smart Distribution Grid Equipment, China (Grant No. KFRC202203), the Education and Scientific Research Foundation for Young Teachers in Fujian Province, China (Grant No. JAT220032), and the Scientific Research Start-up Project of Fuzhou University, China (Grant No. XRC-22073).

† Corresponding author. E-mail: huangf@fzu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: chenying26@fzu.edu.cn

†† Corresponding author. E-mail: xfwang@fzu.edu.cn

磁场诱导的 TmFeO_3 单晶自旋重取向

王宁 黄峰 陈盈 朱国锋 苏浩斌 郭翠霞 王向峰

Magnetic-field-induced spin reorientation in TmFeO_3 single crystals

Wang Ning Huang Feng Chen Ying Zhu Guo-Feng Su Hao-Bin Guo Cui-Xia Wang Xiang-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 017801 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231322

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231322>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

$\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$ 单晶自旋重取向的掺杂效应与磁控效应的太赫兹光谱

Terahertz spectroscopy study of doping and magnetic field induced effects on spin reorientation in $\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$ single crystals

物理学报. 2020, 69(20): 207802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201518>

稀土正铁氧体中THz自旋波的相干调控与强耦合研究进展

Research progress of coherent control of terahertz spin waves and strong coupling in rare-earth orthoferrites

物理学报. 2019, 68(16): 167501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190706>

强磁场在 ZnCr_2Se_4 中诱导的各向异性太赫兹共振吸收

Anisotropic resonance absorptions induced by high magnetic field in ZnCr_2Se_4

物理学报. 2020, 69(20): 207501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201507>

非对称条形纳磁体的铁磁共振频率和自旋波模式

Ferromagnetic resonance frequency and spin wave mode of asymmetric strip nanomagnet

物理学报. 2020, 69(5): 057501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191622>

基于超快自旋-电荷转换的太赫兹辐射源

Terahertz emitters based on ultrafast spin-to-charge conversion

物理学报. 2020, 69(20): 204202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200715>

基于IrMn/Fe/Pt交换偏置结构的无场自旋太赫兹源

Field-free spintronic terahertz emitters based on IrMn/Fe/Pt exchange bias heterostructures

物理学报. 2022, 71(4): 048703 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211831>