

Research Progress of RIG Magneto-Optical Crystals

Dongxu Wang Subinuer·Maimaiti Yujie Li Haipeng Liu*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang, 830054, China

Abstract

In recent years, the rapid development of optical communication technology has highlighted the increasingly important role of magneto-optic materials in multiple key fields such as information transmission, optical isolation, and signal modulation. Consequently, higher requirements have been put forward for the performance of magneto-optic devices. Therefore, exploring new high-performance magneto-optic materials has become an urgent task. Among them, rare earth iron garnet (RIG) magneto-optic crystals are considered ideal candidate materials for high-performance magneto-optic devices due to their excellent optical uniformity, low absorption loss, and high laser damage threshold. Research shows that the magneto-optic performance of crystals can be effectively improved by doping ions. This paper first outlines the basic principles of the Faraday effect, and then introduces the main crystal growth techniques, including the widely used methods such as the flux method and the liquid-phase epitaxy method, which are crucial for obtaining high-quality crystals. Secondly, it reviews the research results of ion doping in rare earth iron garnet crystals. Finally, the paper prospects the future development of magneto-optic crystals.

Keywords

Faraday effect; Rare earth iron garnet; Magneto-optical crystal; Growth method

RIG 型磁光晶体研究进展

王东旭 苏比努尔·买买提 李煜杰 刘海鹏*

新疆师范大学化学化工学院, 中国·新疆 乌鲁木齐 830054

摘要

近年来, 光通信技术的迅猛发展, 助力磁光材料在信息传输、光学隔离、信号调制等多个关键领域的作用日益凸显, 进而对磁光器件的性能提出了更高要求, 因此探索高性能新型磁光材料成为当务之急。其中稀土铁石榴石 (RIG) 磁光晶体因其优异的光学均匀性、低吸收损耗和高激光损伤阈值, 被认为是实现高性能磁光器件的理想候选材料。研究表明, 通过掺杂离子可有效提升晶体的磁光性能。本文首先概述了法拉第效应的基本原理, 随后介绍了晶体生长的主要技术, 包括助溶剂法、液相外延法等当前应用较为广泛的方法, 这些技术对于获得高质量晶体至关重要。其次, 回顾稀土铁石榴石晶体离子掺杂的研究成果。最后, 文章对磁光晶体的未来发展进行了展望。

关键词

法拉第效应; 磁光晶体; 稀土铁石榴石; 生长方法

1 引言

磁光非互易器件是现代光通信、高功率激光系统等领域不可或缺的核心元件, 其性能极限最终取决于磁光材料本身。磁光材料的物理基础可追溯至 1845 年 Michael Faraday 的发现: 线偏振光在通过具有固有磁矩的介质时, 其偏振面会发生旋转, 该现象被命名为法拉第效应 (原理示意图如图

1 所示)^[1]。随后克尔效应 (Kerr effect)^[2]、塞曼效应 (Zeeman effect)^[3]、科顿-莫顿效应 (Cotton-Mouton effect) 等相继被揭示^[4], 经典磁光理论体系逐步完善。随着激光技术与光通信系统的迅速发展, 基于磁光效应的功能器件如磁光隔离器、光环行器等应运而生, 并逐步成为保障激光系统稳定运行的核心元件^[5-7]。

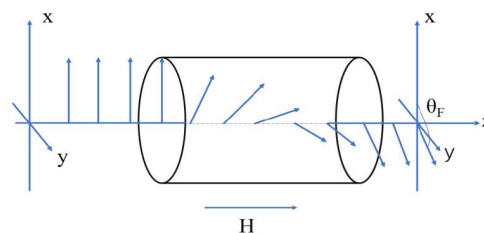


图 1 法拉第效应原理示意图

【项目资助】天池英才 - 青年博士引进计划项目; 新疆师范大学博士 (后) 科研启动基金项目资助 (项目编号: XJNUZBS2548); 大学生创新创业训练计划项目 (项目编号: X202510762030)。

【作者简介】王东旭 (1999-), 男, 中国黑龙江哈尔滨人, 硕士, 从事磁光晶体材料的设计、制备与应用研究。

近年来, 随着光子集成技术的兴起, 磁光器件正朝着

小型化、片上集成化方向加速演进。在此背景下，磁光材料体系不断拓展，目前已涵盖磁光晶体、磁光陶瓷、磁光玻璃和磁光薄膜等多种形态。其中，磁光晶体与磁光陶瓷因兼具良好的磁光性能与工程实用性，成为当前研究的重点方向^[8]。磁光陶瓷凭借制备工艺成熟、易于实现大尺寸成型及成本低廉等优势，在高功率激光系统中展现出良好应用前景^[9, 10]。然而，其固有的光学散射与透过率受限等问题，制约了其在高端光学系统中的进一步推广。相比之下，磁光晶体因其优异的光学均匀性、低吸收损耗和高激光损伤阈值，被认为是实现高性能磁光器件的理想候选材料。特别是稀土离子掺杂的 YIG 体系，即 RIG 型晶体因其在通信波段表现出巨法拉第效应，近年来备受关注，已成为新型磁光材料研发的热点。

2 法拉第效应

法拉第效应是磁光领域最核心的物理效应之一，该效应的本质是磁场作用下介质的介电张量发生各向异性变化，使入射的线偏振光分解为左旋和右旋圆偏振光，二者在介质中因折射率差异 ($n_+ \neq n_-$) 产生相位差，出射后重新合成线偏振光时，偏振面相对入射方向发生偏转，偏转角度(法拉第旋角 θ_F) 满足关系式

$$\theta_F = VHL \quad (1)$$

其中 V 为 Verdet 常数; H 为外加磁场强度; L 为光在介质中的传播距离。法拉第效应最显著的特征是非互易性 - 偏振面的旋转方向仅由外加磁场方向决定，与光的传播方向无关，这一特性使其区别于自然旋光效应，也是磁光隔离器、环行器等非互易磁光器件实现单向传输功能的核心物理基础。

3 生长方法

稀土石榴石化合物属于立方晶系，体心立方结构，空间群为 O_h^{10} (Iad)，化学通式为 $R_3[c]Fe_2[a]Fe_3[d]O_{12}$ ，其中 a、c、d 分别表示八面体、十二面体与四面体。RIG 晶体结构如图 2(a) 所示。图 2(b) 是 Fe_2O_3 - Y_2O_3 的赝二元相图，从中可知 YIG 是非一致熔融物，通常需要使用助溶剂来辅助实现晶体的生长。常用的晶体生长方法有助溶剂法 (Flux Method)、液相外延法 (Liquid Phase Epitaxy, LPE)、浮区法 (Floating Zone method, FZ)、导模提拉法 (Edge-Defined Film-Fed Growth, EFG) 等^[10]。

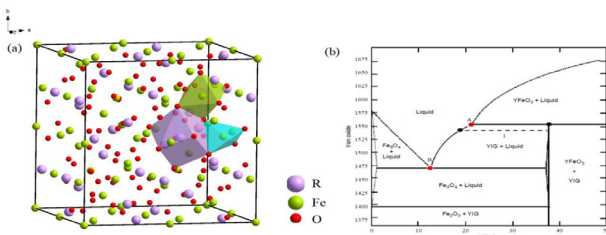


图 2 (a)RIG 晶体结构示意图; (b) Fe_2O_3 - Y_2O_3 的赝二元相图^[11]

3.1 助溶剂法

助溶剂法是一种在高温条件下将待生长晶体的材料溶解于低熔点的助溶剂中，从而形成一个均匀的饱和溶液，随后通过逐步降低温度或其他技术手段诱导晶体从溶液中沉淀并生长^[12]。常用的助溶剂包括两大类：一类是以 PbO 体系为主的含铅助溶；另一大类是以 Bi_2O_3 、 BaO 、钼酸盐体系为主的无铅助溶剂^[13]。1958 年，贝尔实验室的 Dillon 首次使用助溶剂法合成了 YIG，其在红外及近红外波段拥有良好的透过性和优秀的磁光效应^[14]。1981 年 B.Antonini 等探索通过助溶剂蒸发的方法在恒定温度下生长 YIG 晶体^[15]。相较于助溶剂缓慢冷却技术，恒温技术解决了晶体成分不均匀的问题。2021 年，Jiang 等使用 PbO - B_2O_3 助溶剂生长直径达 20 mm 的一系列的高质量 YIG 和 Bi:TIG^[16]。所得的 YIG 晶体在 1300-2500 nm 范围内的平均透过率超过 75%；Bi:TIG 晶体的比法拉第旋角在 1550 nm 处达到 -1250 deg/cm。

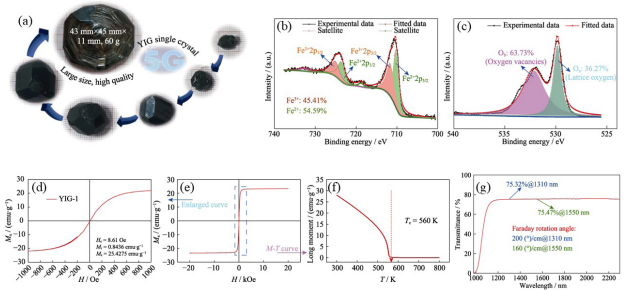


图 3 (a) 晶体生长过程; 晶体粉末的 XPS(b)Fe2p; (c)O1s; (d) 在 -1000-1000Oe 的磁场中放大的 M-H 曲线; (e) 室温下的 M-H 曲线; (f) 外加磁场下磁化强度随温度的变化; (g)1310 nm 和 1550 nm 处的透过率和法拉第旋角^[17]

如今 Bi_2O_3 、 BaO 等无铅助溶剂因其低熔化温度、低蒸气压等优点被广泛使用。2023 年，Yang 等使用顶部籽晶法生长出了最大尺寸可达 $43 \times 46 \times 11 \text{ mm}^3$ 、重量达 60 g 的 YIG 晶体^[17]。晶体展现出优异的性能，包括窄的铁磁共振线宽 (0.679 Oe)、高透明度 (75%) 以及在 1310 nm 和 1550 nm 波长处的法拉第旋角分别为 200、160 deg/cm。2024 年，Yang 等使用 Bi_2O_3 作为助溶剂、采用顶部籽晶法生长一系列浓度不同 Ni^{2+} 掺杂浓度的高质量 Ni,Bi:(HoEu)IG 单晶^[18]。 Ni^{2+} 离子的掺杂有助于提高 Bi:(HoEu)IG 晶体在近红外区的光学透过率。 $(Bi_{0.37}Ho_{1.18}Eu_{0.83}Gd_{0.62})(Fe_{4.20}Ni_{0.25}Ga_{0.55})O_{12}$ 晶体的光学透过率在 1550 nm 处接近最大理论值 72.6%， θ_F 为 -451 deg/cm。此外，晶体的法拉第旋转温度 (FTC)和波长系数 (FWC)低至 $-6.3 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 和 $8.0 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$ 。

3.2 液相外延法

液相外延技术 (LPE) 最初由 Nielsen 于 1963 年提出，核心原理是利用低熔点金属作为溶剂，并将待生长的晶体材料作为溶质加入其中。在溶质达到饱和或过饱和状态后，通过逐步降低温度促使溶质从溶液中沉积出来，并在单晶衬底上进行有序的晶体生长^[19]。

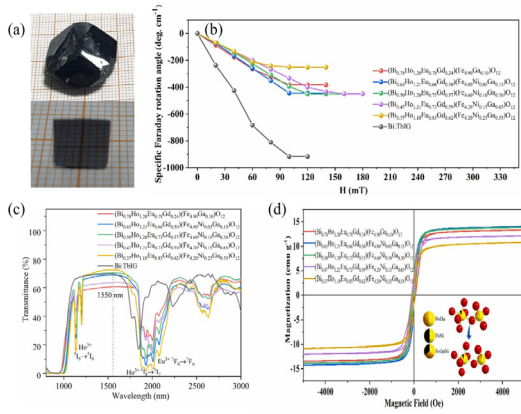


图 4 (a) 晶体和抛光晶片 (b) 1550 nm 处的 θ_F 与室温下的磁场强度关系。(c) 透过光谱 (d) 磁滞回线 [18]

1972 年 S.L.Blank 和 J.W.Nielsen 探索利用 LPE 技术生长石榴石单晶薄膜，讨论了影响薄膜质量的因素包括相关系、生长温度等以及如何调控参数来优化薄膜质量 [20]。2004 年，Huang 等在 GGG 衬底上生长一层 YIG 种子层，然后在种子层上外延了 BiYbIG 薄膜 [21]。测得 1550 nm 波段法拉第旋转角 θ_F 和光吸收系数分别为 -558 deg/cm 和 4.26 cm^{-1} 。2023 年，Jiang 等使用 LPE 法在 (111) 取向的 $(\text{GdCa})_3(\text{GaMgZr})_5\text{O}_{12}$ 衬底获得 Bi、Mn 共掺杂的 YIG 薄膜 [22]。薄膜在 1064 nm 处的比法拉第旋转角和 Verdrt 常数分别为 -574.75 deg/cm 和 $-3858.18 \text{ rad}/(\text{T} \times \text{m})$ 。2024 年 Yu 等使用 $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 作为助溶剂，选择钙镁锆掺杂钷石榴石作为衬底材料，使用 LPE 法生长出数百微米的 $(\text{TbBiCa})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜，并且尝试在 H_2 气氛下不同温度下退火，退火后的薄膜在 1064 nm 处的透过率为 51.2%，在 1310 nm 处的透过率为 71.6%， $(\text{TbBiCa})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜具有高 θ_F 和低驱动磁场，其比法拉第旋转角在 1310 nm 处为 1413 deg/cm ，在 1064 nm 处为 2647 deg/cm [23]。

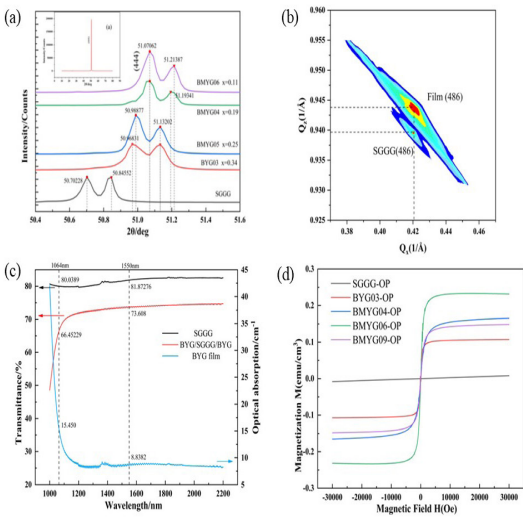


图 5 (a) 外延膜 XRD 图谱；(b) 倒易空间映射；(c) 1000–2200 nm 波段的透射谱和吸收光谱；(d) 外延膜的磁滞回线 [23]

3.3 浮区法

浮区法是一种用于生长高质量单晶材料的技术，它通过使用光源聚焦在多晶料棒和籽晶上，使材料熔化形成熔区，然后通过控制熔区的移动来实现晶体的生长。这种方法的特点是在生长过程中晶体与任何容器或坩埚之间没有物理接触，最大限度的避免了杂质的引入和晶体污染。

1977 年，日本研究人员 I.Shindo 和 S.Kimura 首次采用浮区法生长出直径 5 mm YIG 单晶棒 [24]。1999 年，Sadao Higuchi 等采用流动溶剂浮区法生长出 $\text{Y}_{3-x}\text{Ce}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [25]。晶体在 1550 nm 波长下， $\text{Y}_{2.82}\text{Ce}_{0.18}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 的法拉第旋转为 -740 deg/cm ，光吸收系数为 0.12 cm^{-1} 。且在 1550nm 波长下的光吸收损耗为 0.03dB，灵敏度为 0.1 %/Oe。2020 年，Jin 等使用光学浮区法生长了 $\text{Ce}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x=0.05, 0.10, 0.15$) 单晶 [26]，所得晶体具有纯石榴石晶体结构，晶体的磁饱和和强度随 Ce^{3+} 离子浓度的增加而降低；此外，晶体在 1310 nm 波长处的 Verdet 常数表现出随着 Ce^{3+} 含量增加而递增的规律， $\text{Ce}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x=0.05, 0.10, 0.15$) 晶体在 1310 nm 处的 Verdet 常数分别为 $-486.011 \text{ rad}/\text{T} \cdot \text{m}$ 、 $-827.428 \text{ rad}/\text{T} \cdot \text{m}$ 、 $-1223.191 \text{ rad}/\text{T} \cdot \text{m}$ 。2025 年 Cho 等开发了一种创新的两步浮区法 [27]，此方法成功应用于 YIG 及 $\text{Er}^{3+}:\text{YIG}$ 单晶的生长。 Er^{3+} 的引入显著调制了材料的低温磁性能，出现了明显的抗磁耦合和自旋重取向现象。该方法规避了传统方法对助溶剂的依赖，并有效抑制了气泡生成，实现了快速、稳定的晶体生长。

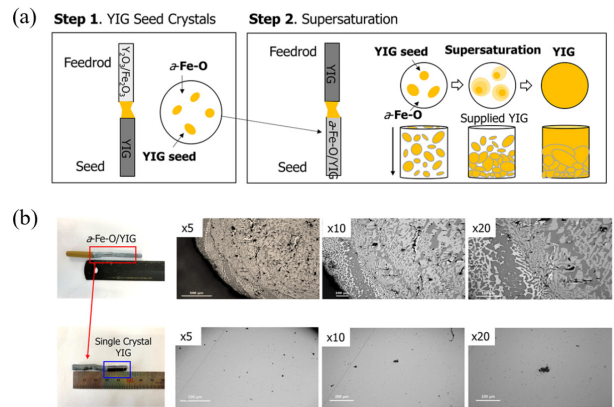


图 6 (a) 生长方法示意图；(b) $\alpha\text{-Fe-O}/\text{YIG}$ 结晶固体和 YIG 单晶的光学显微镜图像 [27]

3.4 导模提拉法

导模提拉法即边缘薄膜限定供料提拉生长技术，这种方法的核心在于通过控制晶体生长过程中的温度梯度和提拉速率，来获得具有特定晶体方向和质量的单晶材料 [28, 29]。

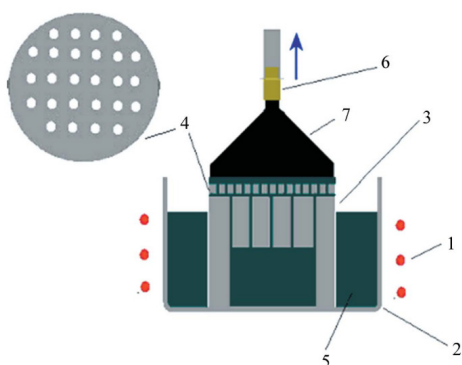


图 7 EFG 生长装置示意图 (1- 感应线圈, 2- 坩埚, 3、4- 铌模具, 5- 熔体, 6- 籽晶棒, 7- 生长晶体) [30]

2012 年, Zhuang 等通过 EFG 法生长出不同浓度 Ga^{3+} 掺杂的 Ga:YIG (生长装置如图 7 所示)。晶体质量良好, 尺寸为 $15 \times 15 \times 18 \text{ mm}^3$, Ga^{3+} 的掺杂增加了其在近红外波段的透过率, 但是随着 Ga^{3+} 的增加晶体的居里温度呈现出线性下降 [30]。2014 年 Zhuang 研究团队继续探索 EFG 法生长大尺寸 Ga:GIG 单晶 [31]。由于晶体在惰性气氛中生长, 生长后的晶体的光学透过率较低, 但可以通过在 800°C 的 O_2 气氛中退火晶体来提高光学透过率。晶体的饱和磁化强度随着 Ga^{3+} 掺杂浓度的增加而减小。与 Ga:YIG 晶体相比, Ga:GIG 晶体具有更佳的磁光性能。2021 年, Liu 等通过改进的 EFG 方法生在氮气气氛生长出一系列不同浓度 Ce^{3+} 掺杂的 Ce,Ga:GIG 和 Ce,Ca,Ga:GIG 晶体 [32], 生长出的晶体均达到了厘米级别且质量完好。随着 Ce^{3+} 浓度的增加, 晶体的比法拉第转角、饱和磁化强度和居里温度显著增强, 其中 $(Ce_{0.35}Gd_{2.65})(Ga_{1.04}Fe_{3.95}V_{0.01})O_{12}$ 的法拉第旋转角达到 896 deg./cm 满足了商业应用的要求。

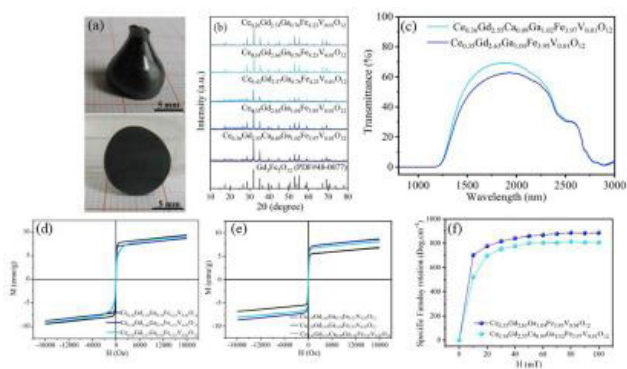


图 8 (a) Ce,Ga:GIG 晶体与抛光后晶片; (b) 晶体的 XRD; (c) 晶体透过率 (d) 晶体磁滞回线。 (d) 未退火晶体磁滞回线; (e) 退火后晶体磁滞回线; (f) 晶体比法拉第旋转角与磁场强度关系曲线 [32]。

4. 总结与展望

近年来, RIG 型磁光晶体在光通信、高功率激光系统及集成光子学等领域展现出广阔应用前景, 已成为高性能磁

光器件的核心材料候选。通过助溶剂法、液相外延法、浮区法和导模提拉法等多种生长技术的持续优化, 大尺寸、高质量 RIG 单晶与薄膜的制备取得显著进展。与此同时, 离子掺杂策略被广泛应用于调控材料的法拉第效应、磁光优值及温度 / 波长稳定性。未来, RIG 型磁光晶体的研究将朝着高 Verdet 常数、低光学损耗、宽温宽谱稳定性和硅基集成兼容性等方向深入发展, 结合组分设计、缺陷工程与异质结构构筑, 有望实现材料性能的进一步突破, 为下一代小型化、片上集成化的磁光隔离器、调制器等非互易器件提供关键材料支撑, 推动光电子技术向高效、智能和规模化方向迈进。

参考文献

- [1] Michael F On the magnetic affection of light, and on the distinction between the ferromagnetic and diamagnetic conditions of matter[J]. Philosophical Magazine, 1846, 29(194): 249-258.
- [2] Ho P. P., Alfano R. R. Optical Kerr effect in liquids[J]. Physical Review A, 1979, 20(5): 2170-2187.
- [3] Zeeman P. The Effect of Magnetisation on the Nature of Light Emitted by a Substance[J]. Nature, 1896, 55(1424): 347.
- [4] Didosyan Y S, Hauser H, Reider G A. Magneto-optic switch based on domain wall motion in orthoferrites[J]. IEEE transactions on magnetics, 2002, 38(5): 3243-3245.
- [5] 刘公强. 磁光学[M]. 2001.
- [6] Qi H B, Ni Y B, Yu X Z, et al. Study of the Solid Solubility Limit and Growth of $Cd_{1-x}MnxTe$ Multicomponent Single Crystals for Miniaturized Magneto-Optical Isolators[J]. Inorganic Chemistry, 2025, 64(36): 18499-18508.
- [7] Duan L M, Yang D L, Wang Z J, et al. Effect of Gadolinium Addition on Magnetic and Magneto-Optical Properties of Yttrium Iron Garnet Crystal[J]. Crystal Growth & Design, 2024, 24(11): 4437-4442.
- [8] 张昊天, 窦仁勤, 张庆礼, et al. 磁光晶体的研究进展及应用[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(2): 346-352,357.
- [9] Ikesue A., Aung Y. L., Wang J. Progress of magneto-optical ceramics[J]. Progress in Quantum Electronics, 2022, 86: 100416.
- [10] Zhelezov D, Starobor A, Palashov O, et al. High-power Faraday isolators based on TAG ceramics[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2578-2583.
- [11] Mao T C, Chen J C, Hu C C. Characterization of the growth mechanism of YIG crystal fibers using the laser heated pedestal growth method[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 282(1): 143-151.
- [12] Leycuras C., Gall H. Le, Desvignes J., et al. Magnetic and magneto-optical properties of a cerium YIG single crystal[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1985, 21(5): 1660-1662.
- [13] Tamanoi K., Ariizumi M., Shinagawa K., et al. Faraday Effects of Cerium-Substituted YIG LPE Films[J]. Journal of the Magnetics

- Society of Japan, 1989, 13(1): 44-45.
- [14] Dillon J. F., Nielsen J. W. Ferrimagnetic Resonance in Impurity Doped Yttrium Iron Garnet (YIG)[J]. *Journal of Applied Physics*, 1960, 31(5): S43-S45.
- [15] B. Antonini, Paoletti A., Paroli P. Isothermal Growth Of Bulk YIG Crystals By $\text{PbF}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ Flux Evaporation[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1981, 54: 586-587.
- [16] Jiang Y S, Shen H, Xu J Y, et al. Large size rare earth iron garnet single crystals grown by the flux-Bridgman method[J]. *Journal of Rare Earths*, 2021, 39(12): 1547-1553.
- [17] Yang X M, Lan J H, Wei Z T, et al. High Quality and Large Size Yttrium Iron Garnet Crystal Grown by Top Seeded Solution Growth Technique[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, 38(3): 322-328.
- [18] Yang Yanduan, Fan Xiaoyu, Liu Haipeng, et al. A new Ni/Bi Co-doping rare earth iron garnet crystal with high transmittance, low temperature and wavelength coefficients[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 978: 173396.
- [19] Nielsen J. W., Dearborn E. F. The growth of single crystals of magnetic garnets[J]. *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 1958, 5(3): 202-207.
- [20] Blank S L, Nielsen J W. The growth of magnetic garnets by liquid phase epitaxy[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1972, 17: 302-311.
- [21] Huang M, Xu Z C. Liquid phase epitaxy growth of bismuth-substituted yttrium iron garnet thin films for magneto-optical applications[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 450(2): 324-328.
- [22] Jiang J W, Dai Y, Shang J M, et al. Perpendicular magnetic anisotropy and magneto-optical properties of Bi, Mn: YIG epitaxial films[J]. *CrystEngComm*, 2024, 26(1): 32-39.
- [23] Yu J Y, Yang Q H, Zhang D, et al. The performance of $(\text{TbBiCa})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ magneto-optical films at 1064 nm after hydrogen atmosphere annealing and ion beam polishing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 180: 111528.
- [24] Kimura S., Shindo I. Single crystal growth of YIG by the floating zone method[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1977, 41(2): 192-198.
- [25] Higuchi S, Takekawa Y F, Kitamura O K. Magneto-Optical Properties of Cerium-Substituted Yttrium Iron Garnet Single Crystals Grown by Traveling Solvent Floating Zone Method[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, 38(7R): 4122.
- [26] Jin W Z, Gai L Y, Li C, et al. Crystal growth and characterization of $\text{Ce}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ single crystal by optical floating zone method[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2020, 588: 412168.
- [27] Cho Y J, Nahm Y W, Decorse C, et al. Two-Step Floating Zone Method for Single-Crystal Growth of Er-Doped $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [J]. *ACS Omega*, 2025, 10(27): 29421-29427.
- [28] Zhang L, Pan M Y, Tian R F, et al. Rapid Growth of a Yb:YAG Slab Crystal with Superior Laser Properties by the Edge-Defined Film-Fed Growth Method[J]. *Crystal Growth & Design*, 2024, 24(5): 1959-1968.
- [29] 杨文娟, 卜予哲, 赛青林, et al. 导模法生长氧化镱晶体中的位错缺陷及其分布特点[J]. *人工晶体学报*, 2025, 54(03): 414-419.
- [30] Zhuang N F, Chen W B, Shi L J, et al. A new technique to grow incongruent melting Ga: YIG crystals: the edge-defined film-fed growth method[J]. *Applied Crystallography*, 2013, 46(3): 746-751.
- [31] Zhuang N F, Wang C N, Wei Q K, et al. EFG growth and optical properties of incongruent-melting Ga^{3+} : GIG single crystal[J]. *Optical Materials*, 2014, 36(7): 1160-1164.
- [32] Liu H P, Shen J R, Liu X F, et al. Edge-defined film-fed growth of incongruent-melting Ce,Ga:GIG crystal with high magneto-optical performance[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 888: 161456.