

文章编号:1001-9014(2007)02-0085-04

(TbBi)₃Ga_xFe_{5-x}O₁₂薄膜/(TbYbBi)₃Fe₅O₁₂晶体复合结构的生长和在光通信波段的磁光性能

徐志成, 严密, 吴勇军, 黄敏, 张志良
(浙江大学材料系, 浙江 杭州 310027)

摘要:用助熔剂法生长出掺Bi复合稀土铁石榴石晶体((TbYbBi)₃Fe₅O₁₂),用(TbYbBi)₃Fe₅O₁₂替代传统的无磁性Gd₃Ga₅O₁₂晶体作基底液相外延掺Bi稀土铁石榴石薄膜((TbBi)₃Ga_xFe_{5-x}O₁₂)。测量了Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体和Tb_{2.43}Bi_{0.57}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂薄膜/Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体复合结构材料在光通信波段(波长λ=1500~1620nm)处的光透射谱(T)、饱和磁化强度(M_s,0.5×10⁶A/m)、法拉第旋转温度系数(FTC,5×10⁻⁵/K)和法拉第旋转波长系数(FWC,0.05%/nm)。所得结果表明:Tb_{2.43}Bi_{0.57}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂薄膜/Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体复合结构材料的综合性能适用于宽带和温度稳定的光隔离器及其他光通讯器件。

关键词:稀土铁石榴石;薄膜/晶体复合结构;磁光性能;温度系数
中图分类号:TN818;O482;O434 **文献标识码:**A

GROWTH AND MAGNETO-OPTICAL PROPERTIES IN OPTICAL COMMUNICATION BAND FOR (TbBi)₃Ga_xFe_{5-x}O₁₂ FILM/(TbYbBi)₃Fe₅O₁₂ CRYSTAL COMPOSITE STRUCTURE

XU Zhi-Cheng, YAN Mi, WU Yong-Jun, HUANG Min, ZHANG Zhi-Liang
(Department of Materials Science and Engineering, Zhejiang Univ., Hangzhou 310027, China)

Abstract: By using the flux method, the (TbYbBi)₃Fe₅O₁₂ single crystals were grown. By employing the (TbYbBi)₃Fe₅O₁₂ crystal instead of the conventional nonmagnetic Gd₃Ga₅O₁₂ crystal as substrate, the (TbBi)₃Ga_xFe_{5-x}O₁₂ film were cultivated by means of LPE method. The optical transmission spectrum (T), saturation magnetization (M_s, 0.5×10⁶A/m), Faraday rotation temperature coefficient (FTC, 5×10⁻⁵/K) and Faraday rotation wavelength coefficient (FWC, 0.05%/nm) were measured for Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂ crystal and Tb_{2.43}Bi_{0.57}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂ film/Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂ crystal composite structure in the near-infrared region (1500~1620nm). It is shown that Tb_{2.43}Bi_{0.57}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂ film/Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂ crystal composite structure is a suitable material used in optical isolator and other optical communication device.

Key words: rare-earth iron garnet; film/crystal composite structure; magneto-optical properties; temperature coefficient

引言

Bi替代稀土铁石榴石在近红外波段具有良好的磁光效应和很小的光吸收,在光通讯器件中有重要的应用.宽带光纤通信、波分复用等技术的发展对光隔离器提出了更高的应用技术指标,作为光隔离器核心部件的法拉第转子材料,应具有更大的带宽和更稳定的温度特性^[1-3].45°法拉第转子目前国内外都采用含Bi铁石榴石晶体,其中GdBiIG材料得

到普遍应用.在近红外波段,此种晶体的磁光优值($\theta_F/\alpha \approx 100^\circ/\text{dB}$)约比YIG材料的磁光优值大一个数量级.因此,当 $\lambda = 1550\text{nm}$ 时,45°法拉第转子的厚度仅为0.3mm,并且该晶体的饱和磁化强度较低(约几万A/m).但是,它的法拉第旋转角(θ_F)的温度系数(FTC, -0.08deg/K)和波长系数(FWC, 0.14%/nm)较大,从而使45°法拉第旋转器在-30~+80℃温度区域和带宽要求为100nm的工作环境中,对旋转45°角时产生的最大偏差角分别约为

收稿日期:2006-03-22,修回日期:2006-10-23

基金项目:国家自然科学基金(50472061)资助项目

作者简介:徐志成(1946-),男,上海市人,副教授,主要从事磁性材料的研究.

Received date: 2006-03-22, revised date: 2006-10-23

4.8°和6.3°,这将使光隔离器的反向隔离度下降至15dB以下而不能正常工作.将两种对FTC和FWC有相反符号的稀土元素复合添加于掺Bi铁石榴石中能得到具有较好FTC和FWC的($Tb_x Yb_y Bi_{3-x-y} Fe_5 O_{12}$)晶体材料^[4,5].

本文用($Tb_x Yb_y Bi_{3-x-y} Fe_5 O_{12}$)磁光晶体替代无磁性的 $Gd_3 Ga_5 O_{12}$ 晶体作基底,液相外延($Tb_2 Bi_{3-2z} Fe_{5-w} Ga_w O_{12}$)磁光薄膜.调节薄膜的补偿温度为工作温度区的中点,利用该膜的法拉第旋转在补偿温度上、下温度区,其旋转方向相反的特点^[6],进一步减小($Tb_x Yb_y Bi_{3-x-y} Fe_5 O_{12}$)晶体的FTC.研究($Tb_2 Bi_{3-2z} Fe_{5-w} Ga_w O_{12}$)薄膜/ $(Tb_x Yb_y Bi_{3-x-y} Fe_5 O_{12})$ 晶体复合结构材料在光通信波段($\lambda = 1500 \sim 1620\text{nm}$)的磁光性能.

1 实验

采用以 $Bi_2 O_3/B_2 O_3$ 为主助熔剂的高温助熔剂法生长 $Tb_x Yb_y Bi_{3-x-y} Fe_5 O_{12}$ 单晶.将高纯度(99.99%)稀土氧化物 $Tb_4 O_7$ 和 $Yb_2 O_3$ 与 $Fe_2 O_3$ 、 $Bi_2 O_3$ 、 $B_2 O_3$ 混合,充分研磨后倒入铂金坩埚,放置在可双向加速旋转单晶炉内.将炉温升至1290°C,保温10h,以0.5~3.0°C/h降温至980°C后自然冷却到室温,用热硝酸分离、清洗.单晶表面完整有光泽,晶体尺寸最大可达到8mm×6mm×5mm. $Tb_x Yb_y Bi_{3-x-y} Fe_5 O_{12}$ 晶体用XRD定向,沿着(111)向切片、细磨、抛光成400μm左右的薄片,在160°C磷酸中腐蚀30s后再用去离子水清洗,干燥后装入支架作基片.将高纯度(99.99%)稀土氧化物 $Tb_4 O_7$ 与 $Fe_2 O_3$ 、 $Bi_2 O_3$ 、 $Ga_2 O_3$ 、 PbO 、 $B_2 O_3$ 混合、充分研磨后倒入铂金坩埚,加热至约1100°C保温8h,以3.0°C/h降温至850°C.把支架放入铂金坩埚内低于高温融化物的液面约10mm,保持30min后提起,并加以快速旋转抛弃基片上的残留助熔剂.

晶体与薄膜的组份由扫描电子能谱分析仪(EDS)测得,用振动样品磁强计VSM(TOEI, VSM-P5-15Model)测定复合结构材料的饱和磁化强度.法拉第旋转角(θ_F)随温度(25~95°C)和波长(1500~1620nm)变化的测量装置如图1所示.发射光源(ANDO AQ2801-13B)的输出由光纤传导后会聚,经由方解石构成的柯兰—汤姆逊棱镜偏振化后沿垂直于试样表面方向上入射,用磁场强度大于 $1.0 \times 10^6 \text{A/m}$ 的钕铁硼永磁体,使试样饱和磁化,从试样透过的光由另一方解石构成的棱镜检偏振后,透

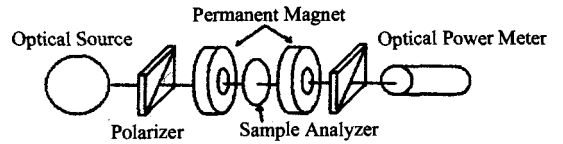


图1 法拉第旋转角 θ_F 测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a magneto-optical apparatus for θ_F measurement

过的光功率,由光功率计(ANDO AQ8201-21)读出.如未加和施加磁场时检测到的功率分别为 I_0 和 I_1 ,利用Malus定律 $I_1 = I_0 \cos^2 \theta_F$ 得出样品法拉第旋转角 θ_F .

2 结果与讨论

2.1 薄膜与晶体的生长

液相外延($Tb_2 Bi_{3-2z} Fe_{5-w} Ga_w O_{12}$)薄膜的组份可由一组Blank克分子比关系式决定:

$$R_1 = Fe_2 O_3 / X_2 O_3,$$

$$R_2 = Fe_2 O_3 / Ga_2 O_3,$$

$$R_3 = PbO / B_2 O_3,$$

$$R_4 = (\sum X_2 O_3 + Fe_2 O_3 + Ga_2 O_3) / (\sum X_2 O_3 + Fe_2 O_3 + Ga_2 O_3 + PbO + B_2 O_3),$$

式中X为稀土位离子^[7].为使薄膜的晶相是石榴石相, R_1 的值必须控制在一个合适的范围,如对YIG, R_1 的值约为14. R_2 的值决定了Ga离子替代Fe离子的浓度,比例 R_3 、 R_4 与熔体的饱和温度和石榴石相在熔体的浓度有关. ($Tb_2 Bi_{3-2z} Fe_{5-w} Ga_w O_{12}$)薄膜的补偿温度要高达45°C左右,因此薄膜组份中重稀土离子Tb含量必须很高.为了减少由薄膜与基底($Tb_x Yb_y Bi_{3-x-y} Fe_5 O_{12}$)晶体的光折射率不同而引起的光反射损耗, ($Tb_2 Bi_{3-2z} Fe_{5-w} Ga_w O_{12}$)薄膜组份中Bi离子的含量应与基底($Tb_x Yb_y Bi_{3-x-y} Fe_5 O_{12}$)晶体的Bi的含量接近,因为铁石榴石材料的光折射率受Bi离子的含量增加其值增加很快^[8].Bi离子的掺入增加薄膜的法拉第旋转但是减低了薄膜的补偿温度,必须掺入Ga离子来减少四面体晶位的铁离子磁距从而提高薄膜的补偿温度.综合以上考虑及我们以往薄膜生长的经验,取 $R_1 > 20$ 、 $R_2 = 6.66$ 、 $R_3 = 15.6$ 、 $R_4 < 0.2$.我们获得的薄膜厚度为2.5μm左右,成功的晶体、薄膜生长的配方和生长后的组份见表1所列.

2.2 薄膜/晶体复合结构在近红外波段的磁光性能
作为光隔离器核心部件的45°法拉第转子材

表1 晶体生长的配方和生长后的组份

Table 1 Composition of solution and growth results of crystal

Fe ₂ O ₃ (g)	Bi ₂ O ₃ (g)	Tb ₄ O ₇ (g)	Yb ₂ O ₃ (g)	B ₂ O ₃ (g)	Ga ₂ O ₃ (g)	PbO (g)	Crystal
41	51	0.8	4.4	5	0	0	Tb _{0.87} Yb _{1.62} Bi _{0.51} Fe ₅ O ₁₂
>7.0	0.42	0.579	0	2.7	1.755	134.55	Tb _{2.43} Bi _{0.57} Ga _{0.12} Fe _{4.88} O ₁₂

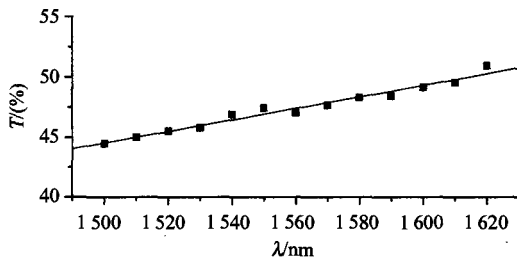
表2 几种铁石榴石晶体和薄膜/晶体复合结构在λ=1550nm处的磁光性质

Table 2 Magneto-optic characteristics of several iron garnets and film/crystal composite structure (λ=1550nm)

Crystal	YIG Crystal	Gd _{2.3} Bi _{0.7} Fe ₅ O ₁₂ Crystal	Tb _{0.87} Yb _{1.62} Bi _{0.51} Fe ₅ O ₁₂ Crystal	Bi _{0.57} Tb _{2.43} Ga _{0.12} Fe _{4.88} O ₁₂ Film/ Tb _{0.87} Yb _{1.62} Bi _{0.51} Fe ₅ O ₁₂ Crystal Composite Structure
Specific Faraday Rotation (deg/cm)	216.0	-1306.2	-1052.1	-1107.2
Saturation magnetization Ms(A/m)	1.8 × 10 ⁶	1.2 × 10 ⁶	0.48 × 10 ⁶	0.48 × 10 ⁶
FWC (%/nm) (Band width)	0.067 (20nm)	0.124 (20nm)	0.048 (120nm)	0.049 (120nm)
FTC (K ⁻¹)	6.60 × 10 ⁻⁴	2.43 × 10 ⁻³	1.17 × 10 ⁻³	5.00 × 10 ⁻⁵

料,首先要求在使用的波段有较高的光透射率.测得的 Tb_{2.43}Bi_{0.57}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂薄膜/Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体复合结构 45°转子材料在近红外波段的透射谱如图 2 所示,可见光损耗小、并且无吸收带.这表明 Tb_{2.43}Bi_{0.57}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂薄膜的光折射率与 Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体的光折射率相近,二者组份是合适的.

利用磁光 Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体替代无磁性的 Gd₃Ga₅O₁₂晶体作基底,液相外延 Tb_{2.43}Bi_{0.57}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂薄膜,有如下优点:(1)可以通过用二种具有相反 FWC、FTC 符号的稀土离子 Tb 和 Yb 复合掺入,生成的 Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体具有很小的 FWC、FTC.(2)Gd₃Ga₅O₁₂晶体对法拉第旋转毫无贡献而且价格昂贵,而 Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体不仅可以作为液相外延薄膜的基底而且又是极好的磁光材料. Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体和 Tb_{2.43}Bi_{0.57}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂薄膜/Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体复合结构的法拉第旋转随波长的变化如图 3 所示,二者的 FTC 在带宽为 120nm 时都较好.法拉第

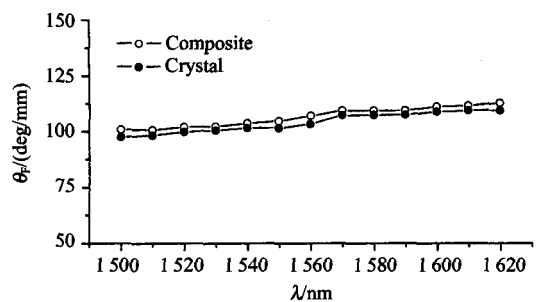
图2 Bi_{0.57}Tb_{2.43}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂薄膜/Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体复合结构的近红外透射谱Fig. 2 Near-IR transmission spectrum of Bi_{0.57}Tb_{2.43}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂ film/Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂ crystal composite structure

旋转波长系数(FWC)定义为

$$FWC = (\theta_{f,1500} - \theta_{f,1620})/\theta_{f,1500}/120 \times 100, \quad (1)$$

这里 $\theta_{f,1500}$ 和 $\theta_{f,1620}$ 分别是在波长 1500nm 和 1620nm 处法拉第旋转角(波长变化为 120nm).

法拉第转子材料的 FTC 是光隔离器工作时温度稳定性的主要因素.为进一步改善 Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体在工作时的 FTC,我们以该 Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体作基底,液相外延 Tb_{2.43}Bi_{0.57}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂薄膜,调节薄膜的补偿温度为工作温度区的中点(约 45°C),利用该膜的法拉第旋转在补偿温度上、下温度区,其旋转方向相反的特点,使该膜对 Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体的法拉第旋转角在低于补偿温度的工作温度区有减少的作用、在高于补偿温度的工作温度区有增加的作用,这样就可以改善 Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体当工作温度逐渐增加时,其法拉第旋转角线性减小(温度稳定性差)的

图3 Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体和 Bi_{0.57}Tb_{2.43}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂薄膜/Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂晶体复合结构的 θ_F 随 λ 变化曲线(25°C)Fig. 3 λ dependence of θ_F for Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂ crystal and Bi_{0.57}Tb_{2.43}Ga_{0.12}Fe_{4.88}O₁₂ film / Tb_{0.87}Yb_{1.62}Bi_{0.51}Fe₅O₁₂ crystal composite structure at 25°C

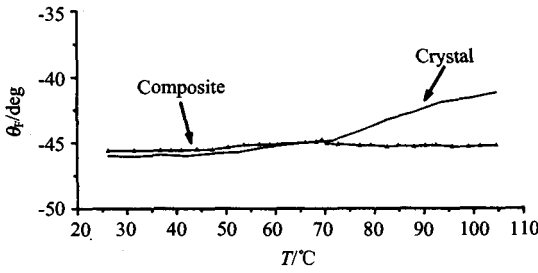


图4 $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 晶体和 $\text{Bi}_{0.57}\text{Tb}_{2.43}\text{Ga}_{0.12}\text{Fe}_{4.88}\text{O}_{12}$ 薄膜/ $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 晶体复合结构的 θ_F 随温度变化曲线 ($\lambda = 1550\text{nm}$)

Fig. 4 Temperature dependence of θ_F for $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ crystal (solid) and the $\text{Bi}_{0.57}\text{Tb}_{2.43}\text{Ga}_{0.12}\text{Fe}_{4.88}\text{O}_{12}$ film/ $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ crystal composite structure (dashed) ($\lambda = 1550\text{nm}$)

缺点. 图4为测得的 $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 晶体和 $\text{Tb}_{2.43}\text{Bi}_{0.57}\text{Ga}_{0.12}\text{Fe}_{4.88}\text{O}_{12}$ 薄膜/ $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 晶体复合结构在 $\lambda = 1550\text{nm}$ 时, θ_F 与温度的关系.

法拉第旋转温度系数 (FTC) 定义为

$$\text{FTC} = (\theta_{f,25^\circ\text{C}} - \theta_{f,105^\circ\text{C}}) / \theta_{f,25^\circ\text{C}} / 90, \quad (2)$$

这里 $\theta_{f,25^\circ\text{C}}$ 和 $\theta_{f,105^\circ\text{C}}$ 分别是 25°C 和 105°C 的 θ_F . 可以看出在 $25 \sim 105^\circ\text{C}$ 范围内, $\text{Tb}_{2.43}\text{Bi}_{0.57}\text{Ga}_{0.12}\text{Fe}_{4.88}\text{O}_{12}$ 薄膜极大地改善了 $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 晶体的 FTC. 表2列出了几种铁石榴晶体和薄膜/晶体复合结构的磁光性能.

3 结语

以 $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 晶体作基底, 液相外延 $\text{Tb}_{2.43}\text{Bi}_{0.57}\text{Ga}_{0.12}\text{Fe}_{4.88}\text{O}_{12}$ 薄膜, 得到的 $\text{Tb}_{2.43}\text{Bi}_{0.57}\text{Ga}_{0.12}\text{Fe}_{4.88}\text{O}_{12}$ 薄膜的光折射率与 $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 晶体的光折射率是相近的, 组成的 $\text{Tb}_{2.43}\text{Bi}_{0.57}\text{Ga}_{0.12}\text{Fe}_{4.88}\text{O}_{12}$ 薄膜/ $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 晶体复合结构材料在近红外波段的光透射率很高并无吸收带. Tb、Ga 离子的掺入, 能使 $\text{Tb}_{2.43}\text{Bi}_{0.57}\text{Ga}_{0.12}\text{Fe}_{4.88}\text{O}_{12}$ 薄膜的补偿温度达到室温以上. $\text{Tb}_{2.43}\text{Bi}_{0.57}\text{Ga}_{0.12}\text{Fe}_{4.88}\text{O}_{12}$ 薄膜具有法拉第旋转与温度关系的阶梯函

数, 它极大地提高了 $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 晶体法拉第旋转的温度稳定性. $\text{Tb}_{2.43}\text{Bi}_{0.57}\text{Ga}_{0.12}\text{Fe}_{4.88}\text{O}_{12}$ 薄膜/ $\text{Tb}_{0.87}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.51}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 晶体复合结构材料的综合磁光性能适用于宽带和温度稳定的光隔离器及其他光通讯器件.

REFERENCES

- [1] Zhang G Y, Xu X W, Chong T C. Faraday rotation spectra of Bismuth-substituted rare-earth iron garnet crystals in optical communication band [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95** (10): 5267—5270.
- [2] LI Miao, XU Zhi-Cheng, HUANG Min, *et al.* Study on wideband and temperature properties of TbYbBiIG crystal in 1500-1620 nm band [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李森, 徐志成, 黄敏, 等. TbYbBiIG 晶体在 1500 ~ 1620nm 波段的带宽和温度特性研究. 红外与毫米波学报), 2006, **25** (2): 101—104.
- [3] ZHANG Shou-Ye, ZHANG Zhi-Liang, HUANG Min, *et al.* Magneto-optic properties of bulk crystals in near-infrared wavelength range [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张守业, 张志良, 黄敏, 等. 近红外波段 GdBiIG 单晶的磁光性能. 红外与毫米波学报), 1992, **11** (1): 85—88.
- [4] ZHANG Zhi-Liang, ZHANG Shou-Ye, XU Ming-Xiang. Growth and magneto-optical properties of $(\text{YbTbBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ bulk single crystal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张志良, 张守业, 徐明祥. $(\text{YbTbBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 块状单晶生长及其磁光性能. 红外与毫米波学报), 1996, **15** (6): 469—471.
- [5] Xu Z C, Min Huang, Li miao. A compounded rare-earth iron garnet single crystal exhibiting stable Faraday rotation against wavelength and temperature variation in the 1.55 μm Band [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, **307**: 74—76.
- [6] Fratello V J, Licht S J, Brandle C D. Innovative improvements in Bismuth-doped rare-earth iron garnet Faraday rotator [J]. *IEEE Trans. Magn.*, 1996, **31** (5): 4102—4107.
- [7] Blank S L, Nielsen J W. The growth of magnetic garnets by liquid phase epitaxy [J]. *Journal of crystal growth*, 1972, **17**: 302—311.
- [8] Hansen P, Klages C P, Schuldt J, *et al.* Magnetic and magneto-optical properties of Bismuth-substituted lutetium iron garnet film [J]. *Physical review B*, 1985, **31** (9): 5858—5864.