

# 掺 Bi 钇铁石榴石薄膜光波导的 线性双折射及消除方法

张 颖 欧阳嘉 何华辉

(华中理工大学固体电子学系, 武汉 430074)

**摘 要** 分析了光的线性双折射对磁光波导 TE-TM 模式转换、法拉第旋转、波导光隔离器隔离比及插入损耗的影响。研究了掺 Bi 钇铁石榴石薄膜光波导中的形状线性双折射、应力感生线性双折射及生长感生线性双折射的来源、特性和消除方法。

**关键词** Bi: YIG 薄膜, 磁光波导, 光隔离器, 线性双折射。

## 1 引 言

光纤通信系统中最基本的非互易器件是光隔离器, 它能阻止光路中的反射光干扰光源, 从而保证了光源的稳定性。磁光薄膜波导光隔离器由于具有外加磁场小、成本低、体积小、易于集成等优点, 得到了较大的发展<sup>[1]</sup>。掺 Bi 钇铁石榴石薄膜在近红外波段具有较小的光吸收和较大的法拉第旋转, 多用于制作磁光波导, 在光隔离器中用作 45°法拉第旋转器。磁光波导中, 法拉第旋转是通过 TE 模和 TM 模耦合实现的。法拉第效应导致的耦合可用耦合常数  $K(K \approx \theta_F)$  来表示,  $\theta_F$  是波导材料的比法拉第旋转角。TE 模和 TM 模的传播常数之差  $\Delta\beta = \beta_{TE} - \beta_{TM}$  对模式耦合有很大的影响, 它干扰法拉第旋转, 产生的椭圆偏振光, 不能被偏振器有效地阻止, 降低了器件的隔离比<sup>[2]</sup>。严格的 45°法拉第旋转光隔离器要求  $\Delta\beta = 0$ , 实际应用要求  $\Delta\beta \leq 5^\circ/\text{cm}$ 。

外延掺 Bi 钇铁石榴石薄膜光波导的  $\Delta\beta$  有三个来源: 形状线性双折射  $\Delta N$ 、应力感生线性双折射  $\Delta n^s$  及生长感生线性双折射  $\Delta n^g$ 。  $\Delta\beta = k_0(\Delta N + \Delta n^s + \Delta n^g)$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  为真空中光的波数。本文分析了这三种线性双折射, 并提出了减小线性双折射的方法。

## 2 线性双折射对法拉第旋转的影响

线偏振光通过光波导的前端面耦合进去, 在波导内发生 TE-TM 模式转换, 从波导后端面耦合出来。根据耦合模理论<sup>[3]</sup>, 可得方程:

$$A_{TE}(L) = aA_{TE}(0) + bA_{TM}(0) \quad (1)$$

$$A_{TM}(L) = -bA_{TE}(0) + a^*A_{TM}(0) \quad (2)$$

其中  $A_{TE}(0)$  和  $A_{TM}(0)$  分别是 TE 模和 TM 模在波导前端面的振幅,  $A_{TE}(L)$  和  $A_{TM}(L)$  分别是 TE 模和 TM 模在波导后端面的振幅,  $L$  为波导的长度。  $a = \cos(kL) + i(\Delta\beta/2k) \sin(kL)$ ,  $b = (K/k) \sin(kL)$ ,  $k^2 = K^2 + (\Delta\beta/2)^2$ ,  $a^*$  为  $a$  的共轭复数, 一般  $A_{TE}(0)$  和  $A_{TM}(0)$  是实数,  $A_{TE}(L)$  和  $A_{TM}(L)$  是复数。

为简单起见, 在波导前端面输入 TE 偏振波, 即  $A_{TM}(0) = 0$ , 偏振方向平行于波导平面, 由方程(1)、(2)得:

$$A_{TE}(L) = aA_{TE}(0) \quad (3)$$

$$A_{TM}(L) = -bA_{TE}(0) \quad (4)$$

$$\text{则} \quad -A_{TM}(L)/A_{TE}(L) = K \operatorname{tg}(kL) \exp(-i\delta) / (k \sqrt{1 + [\Delta\beta \operatorname{tg}(kL)/(2k)]^2}) \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \Delta\beta \operatorname{tg}(kL) / (2k) \quad (6)$$

$$\text{因此,} \quad \operatorname{tg} \varphi = K \operatorname{tg}(kL) / (k \sqrt{1 + [\Delta\beta \operatorname{tg}(kL)/(2k)]^2}) \quad (7)$$

$\varphi$  为偏振面旋转角。若  $\Delta\beta = 0$  (TE 模和 TM 模相位匹配), 则  $\varphi = KL$ ,  $\delta = 0$ , 与块状材料的法拉第旋转一样。若  $\Delta\beta \neq 0$  (TE 模和 TM 模相位失配), 则  $\varphi$  与波导长度  $L$  的关系成振荡形式。利用(7)式, 假定  $K = 150^\circ/\text{cm}$ , 可得不同  $\Delta\beta$  下  $\varphi$  与  $L$  的关系(见图 1)。可见, 当  $\Delta\beta$  较大时,  $\varphi$  甚至不能达到  $45^\circ$ , 就不能成为  $45^\circ$  法拉第旋转器。

即使  $\Delta\beta$  较小, 能够实现  $45^\circ$  旋转, 但是产生的椭圆偏振光也会影响波导隔离器的性能。正向传输时, 光被检偏器阻止的分量为  $\Delta\beta^2/(8K^2 + \Delta\beta^2)$ , 这就增加了插入损耗。反向传输时, 光被起偏器阻止的份量为  $8K^2/(\Delta\beta^2 + 8K^2)$ , 传过的分量为  $\Delta\beta^2/(8K^2 + \Delta\beta^2)$ , 降低了隔离比。

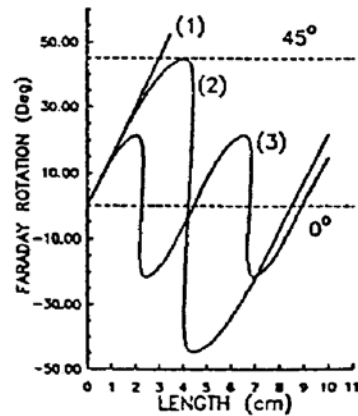


Fig. 1  $\varphi$  vs  $L$  at different  $\Delta\beta$  (1):  $\Delta\beta = 0$ ; (2):  $\Delta\beta = 2K$ ; (3):  $\Delta\beta = 5K$

### 3 形状线性双折射

(BiAl)YIG 薄膜是通过等温液相外延法(LPE)在钆镓石榴石(GGG)基片[111]方向上生长的,  $\text{Al}^{3+}$  离子的掺入是为了晶格匹配。由于双层单模波导两层的折射率要求相差在  $1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$  之间, 必须采用连续液相外延方法。即保持溶料配比不变、生长温度不变, 通过改变基片旋转速率, 不中断生长过程生长双层膜。高的基片旋转速率增大了生长速率, 从而提高 Bi 的掺入量, 导致高的折射率<sup>[5]</sup>。本文制备的 Bi:YIG 薄膜, 在基片转速为 30 r/min 和 210 r/min 下  $1.3 \mu\text{m}$  波长的折射率分别为 2.220 和 2.224(见表 1)。薄膜厚度随生长时间和基片转速的增加而增大。

由于波导中 TE 模和 TM 模的边界条件明显不同, 薄膜结构本身会产生形状线性双折射。其大小为 TE 模和 TM 模的折射率之差, 即  $\Delta N = N_{TE} - N_{TM}$ 。

本文制备的双层薄膜波导, 相当于四层平板波导(见图 2)。缓冲层厚度  $d_2 = 3 \mu\text{m}$ , 光波长  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  时,  $n_4 = 1$ ,  $n_3 = 1.945$ ,  $n_2 = 2.22$ ,  $n_1 = n_2 + \Delta n$ 。四层平板波导对应于波导层

中传播的 TE 模和 TM 模的模式本征方程为<sup>[6]</sup>:

$$k_1 d_1 = m\pi + \arctg(x_{14} p_4 / k_1) + \arctg\{x_{12} p_2 \text{th}[\arctg(x_{23} p_3 / p_2) + p_2 d_2] / k_1\} \quad (8)$$

其中,  $m = 0, 1, 2, \dots$  为模式数,  $k_1^2 = k_0^2(n_1^2 - N^2)$ ,  $p_2^2 = k_0^2(N^2 - n_2^2)$ ,  $p_3^2 = k_0^2(N^2 - n_3^2)$ ,  $p_4^2 = k_0^2(N^2 - n_4^2)$ ;  $x_{ij} = 1$ (TE 模),  $x_{ij} = n_i^2/n_j^2$ (TM 模);  $N$  为 TE 模或 TM 模的折射率。

利用方程(8), 可计算出在不同的波导层厚度  $d_1$  下基模 TE<sub>0</sub> 和 TM<sub>0</sub> 的折射率之差  $\Delta N$  与双层膜两层间折射率之差  $\Delta n$  的关系(见图 3)。可见, 形状线性双折射为正, 且随波导层厚度的减小而增大, 随双层层间折射率差的减小而减小。因此, 为减小形状线性双折射, 在保证波导层单模传输的情况下, 尽可能减小层间折射率差, 增大波导层厚度。这可以通过调节基片转速和生长时间, 控制双层薄膜波导的折射率和厚度来实现。

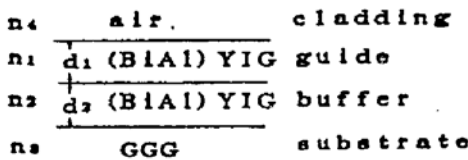


Fig. 2 Four-layer waveguide structure

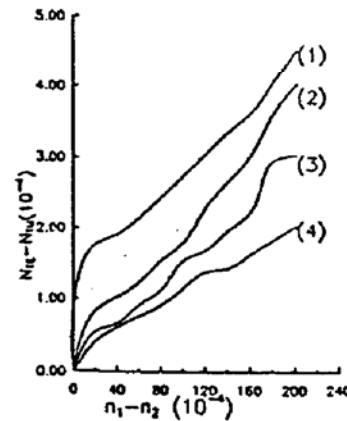


Fig. 3  $\Delta N$  vs refractive index difference  $\Delta n$

(1):  $d_1 = 2 \mu\text{m}$ ; (2):  $d_1 = 3 \mu\text{m}$ ; (3):  $d_1 = 4 \mu\text{m}$ ;  
(4)  $d_1 = 5 \mu\text{m}$

### 4 应力感生线性双折射

应力感生线性双折射 ( $\Delta n^s$ ) 来源于膜与基片的晶格失配, 其大小可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\Delta n^s = B\langle 111 \rangle \sigma, \quad \sigma = 2C_{44} \Delta a^\perp / a_s \quad (9)$$

式中  $B\langle 111 \rangle$  是  $[111]$  方向的应力光学常数,  $\sigma$  是晶格失配  $\Delta a^\perp$  产生的应力, 晶格失配  $\Delta a^\perp = a_s - a_f$ ,  $a_s$  和  $a_f$  分别为基片和膜垂直于表面的晶格常数。对 Bi: YIG,  $B\langle 111 \rangle C_{44} = 0.23$ 。当薄膜波导受压应力时 ( $\Delta a^\perp < 0$ ), 应力感生线性双折射为负, 可用来抵消正的形状线性双折射。

Table 1 Double-layered (BiAl)YIG thin film and corresponding single-layered film

sample No	growth temperature T(°C)	rotation rate $\omega$ r/min	growth time t (min)	composition (a. t. %)				lattice mismatch $\Delta a^\perp / a_s$	refractive index ( $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ )
				Y	Bi	Fe	Al		
G-7	750	30	8	28.99	1.39	66.29	3.34	$2.1 \times 10^{-3}$	2.220
G-9	750	210	4	27.29	2.02	68.87	1.32	$-1.3 \times 10^{-3}$	2.224
G-12	750	30/210	3/5						

采用连续液相外延法生长的双层(BiAl)YIG 薄膜及其对应的单层膜的生长条件、成分和晶格失配度见表 1。可见, 基片转速影响失配度, 低转速时失配度为正, 高转速时失配度为负。因此, 本文制备的双层(BiAl)YIG 薄膜波导的波导层的失配度为负, 产生的应力感生线

性双折射为负，可用来抵消正的形状线性双折射。

单模磁光波导导层和缓冲层折射率相差很小，产生的形状线性双折射也很小。控制薄膜的成分和生长条件，使应力感生线性双折射与形状线性双折射数量级相同。首先生长较厚的波导层，然后通过离子刻蚀的方法调整波导层的厚度，使形状线性双折射与应力感生线性双折射在要求的波长处数值相等符号相反，从而达到相互抵消的目的(见图 4)。

图 4 表示在 1.32 μm 和 1.51 μm 波长下线性双折射与波导层厚度的关系。形状线性双折射为正，且随厚度的增加而减小。应力和生长感生线性双折射与波导层厚度无关。TOTAL 代表形状和应力感生线性双折射之和，它通过零点。

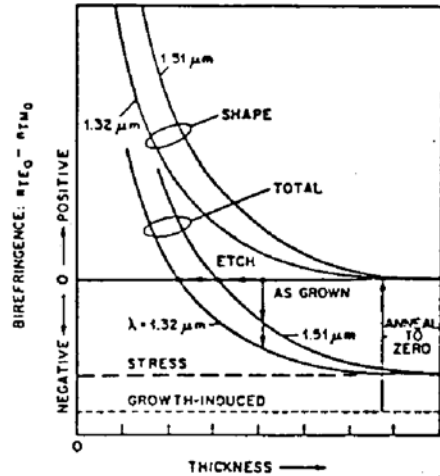


Fig. 4 The shape, stress-induced and growth-induced linear birefringences vs waveguide layer thickness

### 5 生长感生线性双折射

掺 Bi 钇铁石榴石薄膜波导的生长感生线性双折射与 Fe<sup>3+</sup> 离子的电子态有关。在[111]方向生长的钇铁石榴石薄膜中存在着两种不对等的十二面体位(C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 位),Bi<sup>3+</sup> 离子在 C 位的择优分布影响 Fe<sup>3+</sup> 离子的能级结构，从而影响介电常数张量的主对角元。生长感生线性双折射可表示为<sup>[8]</sup>：

$$\Delta n^g = p_{111} \Delta n_{Bi} \tag{11}$$

p<sub>111</sub> 为 Bi<sup>3+</sup> 离子在 C 位的择优分布率，p<sub>111</sub> = n<sub>c1</sub>/n<sub>c2</sub>，n<sub>c1</sub> 和 n<sub>c2</sub> 分别为 Bi<sup>3+</sup> 离子在 C<sub>1</sub> 位和 C<sub>2</sub> 位的离子浓度。Δn<sub>Bi</sub> 表示 Bi<sup>3+</sup> 离子对 Fe<sup>3+</sup> 离子电子态的影响。Δn<sup>g</sup> 随过冷度 ΔT，线性增加就可解释为 Bi<sup>3+</sup> 离子在 C 位的择优分布率 p<sub>111</sub> 随过冷度线性增加。

为达到晶格匹配而掺入的 Al<sup>3+</sup> 导致 Δn<sup>g</sup> 的下降，这是因为 Al<sup>3+</sup> 作为非磁性离子取代四面体位和八面体位的 Fe<sup>3+</sup> 离子，降低了 Fe<sup>3+</sup> 离子的浓度，使 Δn<sup>g</sup> 减小。

Δn<sup>g</sup> 可为正也可为负，且与薄膜厚度无关。欲减小生长感生线性双折射，可采用高温(1100℃~1150℃)退火的方法减小 Bi<sup>3+</sup> 离子在 C 位的择优分布率。通过退火的方法可使生长感生线性双折射减小到零(见图 5)。高温退火并未减少 Bi 含量，因此对法拉第旋转影响不大。

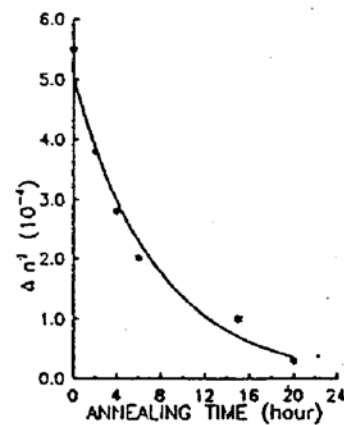


Fig. 5 Δn<sup>g</sup> vs annealing time

**结 论** 磁光薄膜波导中的线性双折射导致的 TE 模、TM 模相位失配，干扰法拉第旋转，降低波导光隔离器的隔离比，增大插入损耗。钇铁石榴石薄膜波导中存在三种线性双折射，形状线性双折射是与波导结构有关的正的线性双折射，应力感生线性双折射与波导层相对于基片的晶格失配有关，生长感生线性双折射来源于生长过

程中离子在 C 位的择优分布对  $\text{Fe}^{3+}$  离子电子态的影响。采用高温退火的方法可使生长感生线性双折射减小到零。控制薄膜成分和生长条件,使形状线性双折射和应力感生线性双折射符号相反,大小相当,再调整波导层的厚度,使它们在要求的波长处大小相等,相互抵消,从而使光波导总的线性双折射为零。

### 参 考 文 献

- [1] R. Wolfe, Thin films for non-reciprocal magneto-optic devices. *Thin Solid Films*, 1992, 218(1): 184~188
- [2] H. Dammann, E. Pross, G. Rabe *et al.*, Phase matching in symmetrical single-mode magneto-optic waveguides by application of stress. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 49(26): 1755~1757
- [3] A. Yariv, Coupled-mode theory for guided-wave optics. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1973, 9(9): 919~933
- [4] H. Dammann, E. Pross, G. Rabe *et al.*, 45° waveguide isolators with phase mismatch. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(14): 1302~1304
- [5] W. Tolksdorf, H. Dammann, E. Pross *et al.*, Growth of yttrium iron garnet multi-layers by liquid phase epitaxy for single mode magneto-optic waveguides. *J. Crystal Growth*, 1987, 83: 15~22
- [6] M. J. Sun, M. W. Muller, Measurements on four-layer isotropic waveguide. *Appl. Opt.*, 1977, 16(4): 814~815
- [7] Koji Ando, Norio Takeda, Naoki Koshizaka *et al.*, Annealing effects on growth-induced optical birefringence in liquid-phase-epitaxial-grown Bi-substituted iron garnet films. *J. Appl. Phys.*, 1985, 57(4): 1277~1280
- [8] H. Lenz, P. Hansen, W. Tolksdorf, Growth-induced magnetic and optical anisotropy in bismuth-substituted iron garnet films. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 54(24): 2484~2486

## The Linear Birefringence in Bi-Substituted Yttrium Iron Garnet Thin Film Optical Waveguide and Its Elimination

Zhang Ying    Ouyang Jia    He Huahui

(Department of Solid State Electronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 18 March 1994; revised 18 April 1994)

**Abstract** The effects of linear optical birefringence in Bi-substituted yttrium iron garnet YIG thin film optical waveguide on TE-TM mode conversion, Faraday rotation, isolation ratio and insertion losses of the waveguide isolator are investigated. Double-layered Bi-substituted YIG films have been grown for single mode magneto-optic waveguides. The characteristics and elimination of shape, stress-induced and growth-induced linear birefringences are analysed.

**Key words** Bi: YIG thin film, magneto-optic waveguide, optical isolator, linear birefringence