

钒酸钇晶体楔型光隔离器

向 清 黄德修

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要 介绍了用钒酸钇晶体的与偏振无关的 Wedge 型光隔离器的基本原理, 用琼斯矢量法得到了插入损耗和隔离度的数学表达式, 并介绍了隔离器的结构设计。制作的隔离器光纤到光纤的插入损耗为 1.04 dB, 隔离度为 42 dB, 回程损耗为 44.3 dB, 偏振灵敏度 ≤ 0.2 dB, 带宽大于 40 nm, 体积为 $10 \times 10 \times 40$ mm³。

关键词 钒酸钇晶体, 光隔离器

1 引 言

随着光纤技术的发展, 光隔离器在光通信、精密光学测量系统中的重要性越来越明显, 对高性能的光隔离器的研究受到国内外的广泛重视。对与偏振无关的单模光纤输入输出的光隔离器的研究, 目前国内大都采用方解石作偏振分束(合束)器, 也有少部分用金红石。方解石的特点是加工工艺成熟, 成本相对较低, 但在 1.55 μm 波段, 双折射特性较差 ($n_o - n_e = 0.156$)^[1], 低温特性也差。金红石的双折射特性很好 ($n_e - n_o = 0.249$), 但加工难度大, 价格昂贵。我们研制的楔型光隔离器采用了钒酸钇 (YVO_4) 晶体, 弥补了前两种晶体的不足, 它具有双折射特性好 ($n_e - n_o = 0.204$), 加工方便, 成本低等优点, 而且热膨胀系数及热光学系数低。

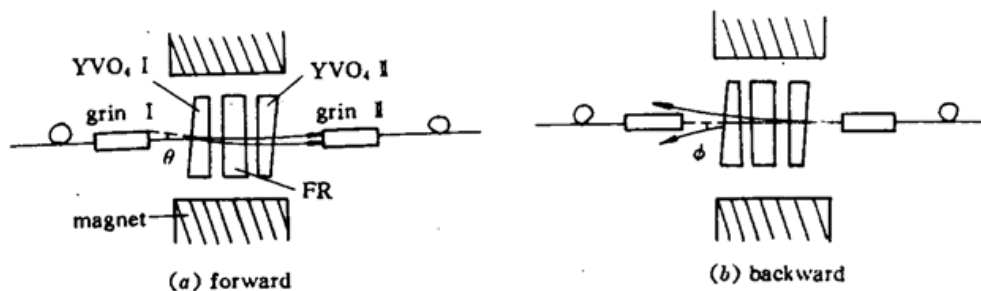


Fig. 1 Structure and principle of the optical isolator

2 隔离器的基本原理

我们研制的与偏振无关光隔离器的结构如图 1 所示, YVO_4 晶体是楔角为 θ 的楔形, 两晶体光轴之间的夹角为 45° , 光正向传输时, 自聚焦透镜输出的平行光经第一块 YVO_4 晶体分成 o 光和 e 光, 两束光的夹角稍有不同, 经 FR 旋转 45° 后, 在第二块 YVO_4 的出射端得到中心稍稍

分开的两束平行光,并由 GRIN I 耦合进输出光纤。反向传输时,由于 FR 的非互易性,由 GRIN I 来的平行光经 YVO₄ I 后的 *o* 光、*e* 光再经 FR 后,对 YVO₄ I 来说,原来的 *o* 光变成了 *e* 光,原来的 *e* 光变成了 *o* 光。所以,在 YVO₄ I 中继续分开,适当选择 YVO₄ 的楔角 θ 和 GRIN 的参数,使反向传输的光不能进入输入光纤而达到反向隔离的目的。

3 插入损耗和隔离度的表达式

设 YVO₄ 和 FR 的插入损耗分别为 L_p (dB) 和 L_f (dB),YVO₄ 的消光比为 E_p ,FR 的椭圆度为 E_f ,以 YVO₄ I 得到的 *o* 光方向为横轴,*e* 光方向为纵轴建立直角坐标,则得 YVO₄ I 的传输矩阵为^[2]

$$Y_1 = a_p \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_p & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

这里 $a_p = 10^{-L_p/20}$, $e_p = (E_p)^{1/2}$ 。

YVO₄ I 中的 *o* 光的传输矩阵为^[3]

$$Y_{21} = \frac{a_p}{2} \begin{bmatrix} 1 + e_p & 1 - e_p \\ 1 - e_p & 1 + e_p \end{bmatrix} \quad (2a)$$

YVO₄ I 中的 *e* 光的传输矩阵为

$$Y_{22} = \frac{a_p}{2} \begin{bmatrix} e_p + 1 & e_p - 1 \\ e_p - 1 & e_p + 1 \end{bmatrix} \quad (2b)$$

旋转角为 45° 的法拉弟旋转器的传输矩阵为

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} a_f \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -ie_f \\ ie_f & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

同样 $a_f = 10^{-L_f/20}$, $e_f = (E_f)^{1/2}$ 。

正向传输时的传输矩阵为

$$P_{\text{正}} = Y_2 F Y_1 \quad (4)$$

由(4)式得出射端 *o* 光,*e* 光的传输矩阵分别为

$$P_{\text{正}o} = \frac{\sqrt{2}}{2} a_p^2 a_f \begin{bmatrix} 1 - ie_f e_p & -ie_f e_p - e_p^2 \\ 1 + ie_f e_p & -ie_f e_p + e_p^2 \end{bmatrix} \quad (5a)$$

$$P_{\text{正}e} = \frac{\sqrt{2}}{2} a_p^2 a_f \begin{bmatrix} e_p^2 - ie_f e_p & -ie_f e_p - 1 \\ e_p^2 + ie_f e_p & -ie_f e_p + 1 \end{bmatrix} \quad (5b)$$

根据插入损耗的定义得插入损耗 L 为

$$\begin{aligned} L &= 2L_p + L_f - 10 \log \left[(e_p^2 + 1)^2 + 4e_p^2 e_f^2 \right] \\ &\approx 2L_p + L_f - 10 \log(1 + 2E_p) \end{aligned} \quad (6)$$

反向传输时的传输矩阵为

$$P_{\text{反}} = Y_1 F Y_2 \quad (7)$$

由(7)式得到 *o* 光,*e* 光的传输矩阵分别为

$$P_{\text{反}o} = \frac{\sqrt{2}}{2} a_p^2 a_f \begin{bmatrix} e_p - ie_f & -e_p - ie_f \\ e_p + ie_f e_p^2 & e_p - ie_f e_p^2 \end{bmatrix} \quad (8a)$$

$$P_{\text{反}e} = \frac{\sqrt{2}}{2} a_p^2 a_r \begin{bmatrix} -ie_p^2 e_r + e_p & -ie_r e_p^2 - e_p \\ e_p + ie_p & e_p - ie_p \end{bmatrix} \quad (8b)$$

根据隔离度 I 的定义得 I 为

$$\begin{aligned} I &= 2L_p + L_r - 10\log[4e_p^2 + e_r^2(1 + e_p^2)^2] \\ &\approx 2L_p + L_r - 10\log(4E_p + E_r) \end{aligned} \quad (9)$$

由于 E_r 非常小,由(6)式知,光隔离器的插入损耗 L 主要由 YVO_4 和 FR 的插入损耗 ($2L_p + L_r$) 决定,它由材料的吸收和端面反射引起。可通过选择等级高的材料和端面增透来减少。由(9)式可知,虽然 L_p 和 L_r 对隔离度 I 有贡献,但 I 的大小主要由 YVO_4 的消光比 E_p 和 FR 的椭圆度 E_r 决定。

4 结构设计

上述隔离器的非互易部分通过自聚焦透镜与单模光纤耦合后,光纤到光纤的插入损耗 L' 和隔离度 I' 除与 YVO_4 、FR 的损耗、 YVO_4 的消光比、FR 的椭圆度有关外,还与 YVO_4 的楔角 θ , YVO_4 I、II 之间的距离 d 以及角自聚焦透镜的参数有关,因为 d 、 θ 直接影响正、反向的耦合效率。

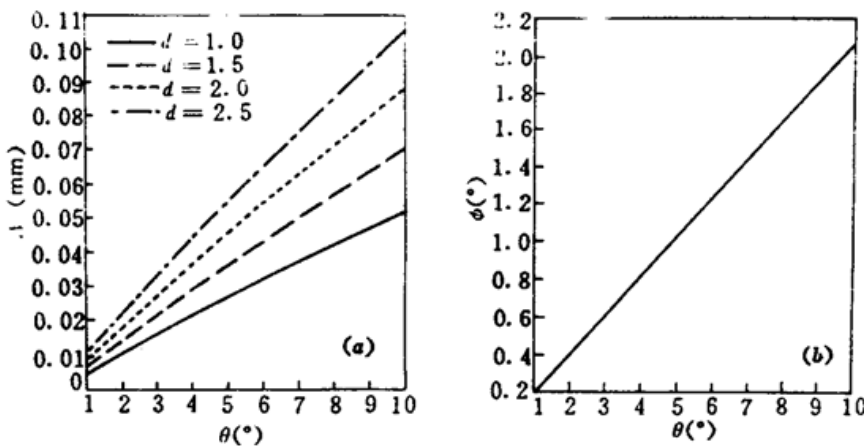


Fig. 2 Influence of Wedge angle on forward and backward output height rays

(a) increase of Δh as a function of θ° ; (b) increase of φ as a function of θ°

设 YVO_4 的通光面为 $2 \times 2 \text{ mm}^2$, 最大厚度为 1 mm , 入射光位于其中间位置。图 2(a) 表明了在不同 d 值情况下, YVO_4 的楔角 θ 与正向输出的两平行光束中心间距 Δh 的关系曲线, 图 2(b) 是 θ 与反向输出光与水平轴夹角 φ 的关系曲线。由该图可知, 正向传输时, d 一定, θ 越大时, Δh 越大, 反之亦然。反向传输时, φ 与 θ 的关系为

$$\begin{aligned} \varphi &= \sin^{-1} \left[\frac{\sin \theta}{1.9447} (\sqrt{1.9447^2 - \sin^2 \theta} - \cos^2 \theta) \right] \\ &\quad - \sin^{-1} \left[\frac{\sin \theta}{2.1486} (\sqrt{2.1486^2 - \sin^2 \theta} - \cos^2 \theta) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

θ 越大, φ 就越大, 且 φ 与 d 无关。由此可见, θ 增加, 会使 L' 增加, I' 也提高, 但 d 增加只会使 L' 增加, 不能提高 I' , 所以, 在结构设计中应兼顾 L' 和 I' 来确定 θ 的值, 同时, 应使 d 越小越好 (d 的最小值是 FR 的厚度)。对于通用的自聚焦透镜 ($NA = 0.37$, $\phi = 2 \text{ mm}$), θ 在 $6 \sim 8^\circ$ 为宜。

5 实验结果

根据以上分析,作者设计并制作了应用于 1550 nm 波段的光隔离器,器件采用 YVO_4 晶体楔角 $\theta = 8^\circ$,通光面为 $2 \times 2 \text{ mm}^2$,最大厚度为 1 mm,晶轴在通光面内,与一侧面的夹角为 22.5° ,经增透后的一对 YVO_4 晶体的插入损耗 $\leq 0.2 \text{ dB}$,消光比小于 10^{-5} ,FR 是铋钙钒 BiCaInVIG 晶体 $(\text{Bi}_{3-2x}\text{Ca}_{2x}\text{Fe}_{5-x}\text{In}_x\text{V}_2\text{O}_{12})^{[4]}$,透过率为 98%,旋转角为 $45^\circ \pm 0.5^\circ$,椭圆度为 6310(38 dB),磁环中心磁场大于 0.12 T,调试用光源为中心波长在 1538.8 nm 的静态单纵模 LD,测量用光功率计为 Model 33XLC 型,灵敏度为 $10^{-4} \mu\text{W}$,响应度 $0.69 \mu\text{A}/\mu\text{W}$,响应波长为 $1.1 \sim 1.7 \mu\text{m}$,得到的光隔离器其非互易部分的插入损耗 $L \leq 0.3 \text{ dB}$,峰值隔离度 $I \geq 40 \text{ dB}$ 。经自聚焦透镜与单模光纤耦合后,光纤到光纤的插入损耗 L' 为 1.04 dB,峰值隔离度为 42 dB,回程损耗为 44.3 dB,带宽大于 40 nm,偏振灵敏度 $\leq 0.2 \text{ dB}$,隔离器外型尺寸为 $10 \times 10 \times 40 \text{ mm}^3$ 。

6 结束语

上述光隔离器具有结构简单、体积小、隔离度高、偏振不灵敏等优点,同时带宽也覆盖了掺铒光纤放大器的整个带宽范围,具有非常明显的优越性。由实验结果可知,与单模光纤耦合后的插入损耗比非互易部分的插入损耗要大得多,这主要是由于所用的与单模光纤耦合的自聚焦透镜的损耗较大(0.6~0.8 dB),所以,进一步降低此种光隔离器的光纤到光纤的插入损耗是很有潜力的。

参 考 文 献

- 1 李景镇. 光学手册. 第一版. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986. 501
- 2 Haruo Ishikawa, Kazuhiro Nakajima, Katsumi Machida *et al.*. Optical isolators using Bi-substituted rare-earth iron garnet films. *Opt. and Quant. Electr.*, 1990, 22(6): 517~528
- 3 董守荣. 波动光学. 第一版. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988. 258~261
- 4 Miaoming Ma, Shangping Tao. High-isolation optical isolator using a BiCaInVIG single crystal. *Appl. Opt.*, 1992, 31(21): 4122~4124

A Wedge Type Optical Isolator Using a YVO_4 Crystal

Xiang Qing Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The radical principle of a polarization-independent optical isolator using YVO_4 wedge is presented in this paper. The formula of the insertion loss and isolation are obtained by Jones Matrix and the configuration of the isolator is given. The authors have manufactured this kind of isolator and the experiment showed that a fiber to fiber insertion loss was 1.04 dB, the isolation was 42 dB, the return loss was 44.3 dB, the polarization sensitivity was less than 0.2 dB, and the bandwidth was more than 40 nm. The dimension of the isolator is $10 \times 10 \times 40 \text{ mm}^3$.

Key words YVO_4 crystal, isolator