

与偏振无关光隔离器的插入损耗和隔离度的理论分析与实验研究

向 清 黄德修

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘 要 在理论上用琼斯矩阵法得到了与偏振无关的 Walk-off 型光隔离器的插入损耗及反向隔离度的表达式, 讨论了偏振分束器、法拉第旋转器、 $\lambda/2$ 波片的参数对其性能的影响。作者设计制作的光隔离器光纤到光纤的插入损耗为 1.46 dB, 隔离度为 34.2 dB, 外型尺寸为 $13 \times 10 \times 46 \text{ mm}^3$ 。

关键词 光隔离器, 插入损耗, 隔离度。

光隔离器是光单向传输的一种非互易器件。在用激光二极管作光源的光学系统如高速光纤通信、相干光通信、公用天线电视、精密光学测量等系统中, 光隔离器是消除激光器反射噪声的非常有效的器件, 受到国内外的广泛重视, 而且随着光纤通信技术的不断发展, 显得越来越重要。

1 与偏振无关光隔离器的原理和结构

已报道过几种与偏振无关的光隔离器结构^[1~3], 本文研制的与偏振无关的光隔离器如图 1 所示, (a) 为正向传输光路示意图, (b) 为反向传输光路示意图。光正向传输时, 从自聚焦透镜出射的准平行光经分束镜 1 分成 o 光和 e 光, 这两束光在通过法拉第旋转器 (FR) 和半波片时, 法拉第旋转器的旋转角与半波片的旋转角相等 (均为 45°), 但方向相反而相消, 在通过分束镜 2 后又会会聚为一点, 并由自聚焦透镜 2 耦合进输出光纤。当光反向传输时, 由自聚焦透镜 2 经分束镜 2 分光后的 o 光和 e 光, 在经法拉第旋转器和半波片时旋转角相等 (均为 45°)

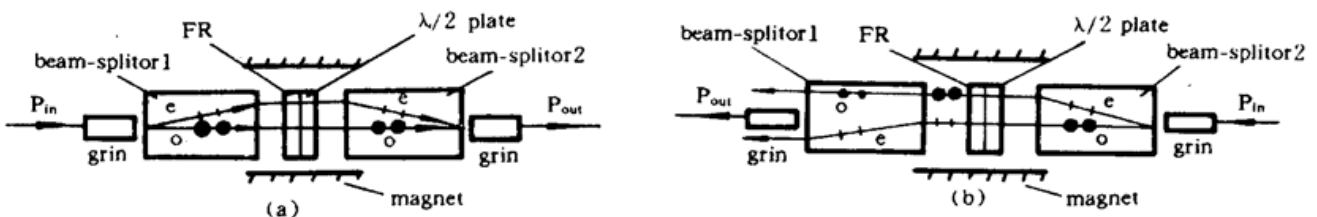


Fig. 1 Schematic arrangement of the polarization-independent optical isolator

且方向相同而相加, 所以, 原来的 o 光变成了 e 光, 原来的 e 光变成了 o 光, 在分束镜 1 中不能会聚, 不能进入输入光纤^[4], 从而达到反向隔离的目的。

2 插入损耗和隔离度的表达式

设偏振分束镜(合束镜)和法拉第旋转器的插入损耗分别为 $L_p(\text{dB})$ 和 $L_F(\text{dB})$, 分束镜的消光比为 E_p , 法拉第旋转器的椭圆度为 E_F , 则分束镜 1 和 2 的琼斯矩阵为:

$$P_1 = P_2 = \alpha_p \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_p & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

式中 $\alpha_p = 10^{-L_p/20}$, $e_p = (E_p)^{1/2}$ 。

旋转角为 θ 的法拉第旋转器的琼斯矩阵为:

$$F = \alpha_F \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -ie_F \\ ie_F & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

同样 $\alpha_F = 10^{-L_F/20}$, $e_F = (E_F)^{1/2}$ 。由于法拉第旋转器的非互易特性, 光正向通过时的 $F_{\text{正}}$ 与反向通过时的 $F_{\text{反}}$ 相等, 即 $F_{\text{正}} = F_{\text{反}} = F$ 。

对于 1/2 波片, 由于其很薄, 损耗可以忽略, 另外, 它是互易的, 所以, 光正向传输和反向传输时的琼斯矩阵不等, 分别为:

$$T_{\text{正}} = \begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix}, \quad T_{\text{反}} = \begin{bmatrix} \cos \theta' & -\sin \theta' \\ \sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix}, \quad (3)$$

θ' 为 1/2 波片的旋转角。

上述结构的隔离器其正、反向传输时的矩阵为:

$$P_{\text{正}} = P_2 T_{\text{正}} F P_1, \quad (4a)$$

$$P_{\text{反}} = P_1 F T_{\text{反}} P_2. \quad (4b)$$

由(4a)式得 o 光的传输矩阵为:

$$P_{\text{正o}} = \alpha_p^2 \alpha_F \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta') - ie_F \sin(\theta - \theta') & -ie_F e_p \cos(\theta - \theta') - e_p \sin(\theta - \theta') \\ ie_F e_p \cos(\theta - \theta') + e_p \sin(\theta - \theta') & e_p^2 \cos(\theta - \theta') - ie_F e_p^2 \sin(\theta - \theta') \end{bmatrix} \quad (5)$$

光的传输矩阵为:

$$P_{\text{正e}} = \alpha_p^2 \alpha_F \begin{bmatrix} e_p^2 \cos(\theta - \theta') - ie_F e_p^2 \sin(\theta - \theta') & -ie_F e_p \cos(\theta - \theta') - e_p \sin(\theta - \theta') \\ ie_F e_p \cos(\theta - \theta') + e_p \sin(\theta - \theta') & \cos(\theta - \theta') - ie_F \sin(\theta - \theta') \end{bmatrix} \quad (6)$$

设入射光为 $\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$, 则正向传输时输出光的矩阵为

$$P_{\text{正out}} = [P_{\text{正o}} + P_{\text{正e}}] \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$$

根据插入损耗的定义得到插入损耗 L 为:

$$\begin{aligned} L &= 2L_p + L_F - 10 \log \{ [(1 + e_p^2)^2 + 4e_p^2 e_F^2] \cos^2(\theta - \theta') \\ &\quad + [(1 + e_p^2)^2 e_F^2 + 4e_p^2] \sin^2(\theta - \theta') \} \\ &\approx 2L_p + L_F - 10 \log [(1 + 2E_p) \cos^2(\theta - \theta') + (4E_p + E_F) \sin^2(\theta - \theta')] \end{aligned} \quad (7)$$

由(4b)式得反向传输时 o 光、e 光的传输矩阵分别为:

$$P_{\text{反o}} = \alpha_p^2 \alpha_F \begin{bmatrix} \cos(\theta + \theta') - ie_F \sin(\theta + \theta') & -ie_F e_p \cos(\theta + \theta') - e_p \sin(\theta + \theta') \\ ie_F e_p \cos(\theta + \theta') + e_p \sin(\theta + \theta') & e_p^2 \cos(\theta + \theta') - ie_F e_p^2 \sin(\theta + \theta') \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P_{\text{反}e} = \alpha_p^2 \alpha_F \begin{bmatrix} e_p^2 \cos(\theta + \theta') - ie_F e_p^2 \sin(\theta + \theta') & -ie_F e_p \cos(\theta + \theta') - e_p \sin(\theta + \theta') \\ ie_F e_p \cos(\theta + \theta') + e_p \sin(\theta + \theta') & \cos(\theta + \theta') - ie_F \sin(\theta + \theta') \end{bmatrix} \quad (9)$$

仍设入射光为 $\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$, 则反向传输时输出光的矩阵为:

$$P_{\text{反out}} = [R_{\text{反}o} + P_{\text{反}e}] \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$$

根据隔离度的定义得到隔离度 I 为:

$$\begin{aligned} I &= 2L_p + L_F - 10 \log \{ [(1 + e_p^2)^2 + 4e_p^2 e_F^2] \cos^2(\theta + \theta') \\ &\quad + [(1 + e_p^2)^2 e_F^2 + 4e_p^2] \sin^2(\theta + \theta') \} \\ &\approx 2L_p + L_F - 10 \log [(1 + 2E_p) \cos^2(\theta + \theta') + (4E_p + E_F) \sin^2(\theta + \theta')] \quad (10) \end{aligned}$$

由(7)式和(10)式可知, 影响隔离器插入损耗和隔离度的因素来自三个方面:

1) 分束(合束)镜与法拉第旋转器的吸收和端面反射损耗 $2L_p + L_F$ 。端面反射可通过减反射膜来减小, 而吸收损耗只能通过选择高等级的材料来减少。

2) 法拉第旋转器和半波片旋转角度误差。在理论上 $\theta = \theta' = 45^\circ$, 如果实际的旋转角偏离 45° , 分别为 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\theta'$ 。为定量地分析 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\theta'$ 对 L 和 I 的限制, 设此时 $E_p = E_F = 0$, 则(7)式和(10)式分别为:

$$L = 2L_p + L_F - 10 \log \cos^2(\Delta\theta - \Delta\theta') \quad (11)$$

$$I = 2L_p + L_F - 10 \log \sin^2(\Delta\theta + \Delta\theta') \quad (12)$$

由此可见, 角度偏差对 I 产生的影响比对 L 产生的影响大得多。 $\Delta\theta$ 是法拉第旋转器加工时的厚度误差引起的, $\Delta\theta'$ 由半波片的主轴与分束镜的主轴之间的夹角(理想情况下为 22.5° ^[5]) 误差决定的, 当 $\Delta\theta$ 在法拉第旋转器加工时确定后, 在调整半波片与分束镜之间的相对位置时应使 $\Delta\theta'$ 与 $\Delta\theta$ 符号相反, 数值上尽量相等。

3) 偏振分束镜的消光比 E_p 和法拉第旋转器的椭圆度 E_F 。为分析方便起见, 此时设 $\theta = \theta' = 45^\circ$, $\Delta\theta = \Delta\theta' = 0$, 则:

$$L = 2L_p + L_F - 10 \log (1 + 2E_p) \quad (13)$$

$$I = 2L_p + L_F - 10 \log (4E_p + E_F) \quad (14)$$

由(13)式知消光比对 L 的影响可以忽略不计(各种偏振器的消光比都优于 10^{-4} ^[6]), 但由(14)式, 要得到高的隔离度, E_F 是至关重要的。设 E_p 为 10^{-5} 量级, 则 E_F 为 10^{-4} , I 可达 38 dB 左右, 若 $E_F = 10^{-3}$, 则 I 只能达 30 dB 左右。

3 实验研究

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 $3 \times 3 \times 8$ 的方解石作偏振分束(合束)镜, 经增透后的一对方解石插入损耗为 0.4 dB, 消光比为 1.27×10^{-5} 。用 BCVIP 晶体制成法拉第旋转器, 透过率大于 97%, 旋转角为 $45^\circ \pm 0.5^\circ$, 椭圆度 $E_F = 1585$ (32 dB), 将它嵌进中心磁场大于 0.10 T 的 Sm-Co 磁环中, 半波片采用石英晶体零级半波片。隔离器用与单模光纤耦合的自聚焦透镜进行准直和聚焦。实验时发现方解石的定向和配对给调试过程和调试结果带来较大影响, 如果在插入法拉第旋转器和半波片前用一种简单的方法配对, 则给整个调试带来极大的方便并适合于小批量生产。本文是通过监视隔离度来确定半波片与方解石之间的相对位置的。制作的隔离器其非互易部分(自聚焦透镜耦合前)

的插入损耗小于 0.6 dB, 隔离度 33.1 dB。自聚焦透镜耦合后光纤到光纤的插入损耗 1.46 dB, 隔离度 34 dB, 而一对与光纤耦合的自聚焦透镜损耗在 0.8 dB 左右。由此可见, 就插入损耗而言, 上述结构的光隔离器只能通过降低单对与光纤耦合的自聚焦透镜的损耗来减小, 隔离器的非互易部分的损耗已降低到接近其极限。另外, 在实验中发现, BCVIG 晶体的均匀性给调整带来较大影响, 因为它不均匀, 调整时要在插入损耗和隔离度之间寻找最佳配合。

参 考 文 献

- [1] T. Matsumoto, Yokosuka, Optical nonreciprocal device. *U. S. Patent*, 4239329, Dec. 16, 1980, 1001(3) : 1010~1011
- [2] K. Nakajima, Y. Numajiri, Y. Nomi, New design of polarization-independent optical isolator with high performance. *IEEE Trans. Magnetics*, 1991, 27(6) : 5399~5401
- [3] Kok Wai Chang, Wayne V. Sorin, High-performance single-mode fiber polarization-independent isolators. *Opt. Lett.*, 1990, 15(8) : 449~451
- [4] 刘德明, 向清, 黄德修, 光纤光学, 第 1 版, 北京, 国防工业出版社, 1994 : 162~163
- [5] 董守荣, 波动光学, 第 1 版, 武汉, 华中理工大学出版社, 1988 : 256~258
- [6] 方罗珍, 许远忠, 刘永华, 适于 DFB-LD 光源耦合的微型化光隔离器. *光通信研究*, 1994, (1/2) : 138~141

Study of Isolation and Insertion Loss of Polarization-Independent Optical Isolator

Xiang Qing Huang Dexiu

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

(Received 16 January 1995; revised 10 April 1995)

Abstract The formula of insertion loss and isolation of polarization-independent walk-off optical isolator are presented theoretically by Jones Matrix in this paper. The influences of polarization beam-splitter, Faraday rotator and half-wave plate on insertion loss and isolation are discussed. The experiments of the optical isolator developed by the authors show that the fiber to fiber insertion loss was 1.46 dB and isolation was 34 dB and with size of $13 \times 10 \times 46 \text{ mm}^3$.

Key words optical isolator, insertion loss, isolation.