

1.3 μm 光学环行器正向损耗及反向隔离比的理论及实验研究

周 宓 黄德修 刘德明 柳清菊
(华中理工大学光学系, 武汉 430074)

提 要

在理论及实验上分析了影响光环行器插入损耗及反向隔离比的因素, 讨论了环行器中起、检偏镜参数对其性能的影响. 结果表明, 起、检偏镜的各组参数存在最佳选择, 以保证环行器具有低插损、高隔离比及与偏振无关的特性. 作者研制的环行器正向损耗小于 1 dB, 反向隔离比在 25.5 dB 与 28 dB 之间.
关键词 光学环行器, 正向损耗.

光学环行器是一种多端口输入输出的非互易无源器件^[1,2], 它具有正向顺序导通而反向传输阻塞的特点, 在光纤通讯, 光纤传感和非线性光学等领域具有广泛的用途^[3].

1 光学环行器结构

图 1 为作者研制的光学环行器的结构图, 利用磁光效应, 当正向入射的平行光从 1 端口

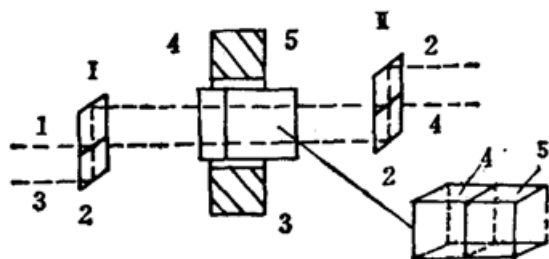


Fig. 1 Basic configuration of the optical circulator
1, 2—polarizing-splitting prism, 3—magnetic ring,
4—YIG crystal, 5—quartz compensating plate

输入环行器后, 经过起偏分光棱镜 I (它由镀多层膜 F 的棱镜组成), 将光分解成两束偏振面相互垂直而传输方向彼此平行的线偏振光, 这两束线偏振光正向通过由 YIG 晶体、 45° 石英旋光片及 Sm-Go 磁环组成的旋光系统后, 由于旋光系统中 YIG 晶体的磁致旋光角与 z 轴石英旋光片的旋光角二者的旋光方向在正向时相反相消而反向时相同相加, 因而其出射光的

偏振面将保持不变, 并经过偏振分光棱镜 II (也由镀多层膜 F 的棱镜组成) 合光后, 只能从 2 端口输出而不能从 4 端口输出; 同样的道理, 由 2 端口输入的平行光只能从 3 端口输出, 这样, 就形成了环行器只能沿 1→2, 2→3, 3→4, 4→1 的正向环行传输, 而其余端口相互间反向阻塞的特点.

光学环行器的性能指标主要是正向损耗和反向隔离化. 下面将对此做些理论分析和实验研究.

2 正向损耗及反向隔离比的表达式

根据定义, 环行器的正向损耗及反向隔离比分别为
正向损耗

$$FL(i \rightarrow j) = -10 \log(j \text{ 端口输出光}/i \text{ 端口输入光}), \quad (1)$$

反向隔离比

$$BL(j \rightarrow i) = -10 \log(j \text{ 端口输出光}/i \text{ 端口输入光}) + FL(i \rightarrow j), \quad (2)$$

如图 2 所示, 在我们设计的器件中, 设 P_0 为输入光环行器 1 端口的平行光功率, 且其偏振方向平行于纸面的 P 光分量为 P_{0p} , 偏振方向垂直于纸面的 S 光分量为 P_{0s} . 当 P_0 通过偏振分光棱镜 I 时, 由于多层介质偏振分光膜 F 对 P 光分量具有很高的透过率(T_p)和低的反射率(R_p), 而对 S 光分量具有很高的反射率(R_s)和低的透过率(T_s), 因而分解后的 P_{11} 光及 P_{12} 光实际上为两束准偏光, 这两束准偏光在不同位置处分别

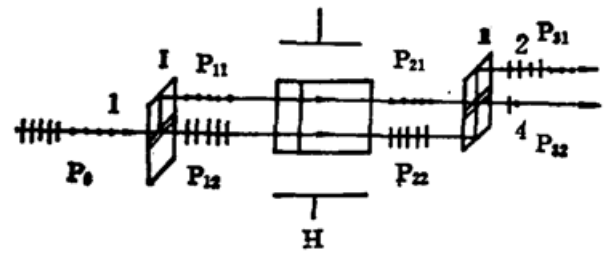


Fig. 2 Diagram of optical paths of the circulator

通过转光系统时, 由于转光系统对 P_{11} 光及 P_{12} 光的磁致转角受到外加磁场空间分布非均匀性以及石英晶体补偿片固有加工误差的影响, 二者的实际转角存在一定的偏差, 同时由于 YIG 晶体材料存在的结构缺陷, 也将使 P_{11} 光及 P_{12} 光的偏振度下降, 而通过转光系统的 P_{12} 光及 P_{22} 光在通过偏振分光棱镜 II 合光输出 P_{31} 光时, 由于膜层 F 对 P 光的剩余反射及对 S 光的剩余透射, 又将再次产生部分泄漏, 这些因素的迭加将形成泄漏光 P_{32} .

作为一种近似考虑, 如果忽略棱镜材料对光的吸收作用以及棱镜几何误差对分光光束平行性及合光光束重合性的影响, 并考虑对于多层介质膜 F , 在一定的波长范围内^[3], R_s 、 T_p 的量级约为 1, 而 R_p 、 T_s 的量级约为 10^{-2} , 容易推得由 2 端口及 4 端口输出的 P_{31} 光及 P_{32} 光可近似表示为

$$P_{31} \doteq \delta T_R^4 (\delta_1^2 P_{0s} + \delta_2^2 P_{0p}), \quad (3)$$

$$P_{32} \doteq \delta \delta_1 \delta_2 T_R^4 (2T_s P_{0s} + 2R_p P_{0p} + \theta_1^2 P_{0s} + \theta_2^2 P_{0p}), \quad (4)$$

式中, δ_1 及 δ_2 分别为膜层 F 对反射光及透射光的吸收系数, T_R 为偏振分光棱镜通光表面的透过率, 而等效旋光偏差角 θ_1 及 θ_2 则分别对应 P_{11} 光及 P_{12} 光通过转光系统后的实际旋光转角与理论值的差值. δ 为转光系统总的反射及吸收损耗系数.

(3) 式代表了光环行器 1 端口至 2 端口之间的正向损耗, (4) 式代表了 1 端口至 4 端口之间的反向隔离比. 采用同样的方法, 可导出光从 2、3、4 端口入射时的出射情况, 将其代入 (1) 式及 (2) 式中, 即可得到本文设计的光环行器各端口间的正向损耗及反向隔离比的表达式:

正向损耗

$$\left. \begin{aligned} FL(1 \rightarrow 2) &= FL(3 \rightarrow 4) = -10 \log [\delta T_R^4 (\delta_1^2 P_{0s} + \delta_2^2 P_{0p}) / P_0], \\ FL(2 \rightarrow 3) &= FL(4 \rightarrow 1) = -10 \log \delta \delta_1 \delta_2 T_R^4, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

反向隔离比

$$\left. \begin{aligned} BL(1 \rightarrow 4) = BL(3 \rightarrow 2) &= -10 \log [(2T_s P_{0s} + 2R_p P_{0p} + \theta_1^2 P_{0s} + \theta_2^2 P_{0p}) / P_0], \\ BL(4 \rightarrow 3) = BL(2 \rightarrow 1) &= -10 \log [\delta_1 \delta_2 (2T_s P_{0s} + 2R_p P_{0p} + \theta_1^2 P_{0s} + \theta_2^2 P_{0p})] \\ &+ 10 \log (\theta_1^2 P_{0s} + \delta_2^2 P_{0p}), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由(5)式环行器的正向损耗主要是由各项吸收及反射损耗决定的,因此在环行器各个通光面镀制高质量的减反膜将降低通光截面的反射损耗,使环行器的正向损耗大为降低.对已镀制高减反膜的玻璃棱镜而言,损耗主要是镀膜材料的吸收产生的,参考图3,为了保证膜层具有较高的起偏特性及较宽的反射带宽,膜层数一般在27层左右,这时偏振分光膜的反射吸收系数 δ_1 和透射吸收系数 δ_2 一般在0.9~0.95量级,另外,如果 $\delta_1 \neq \delta_2$,则环行器各端口的正向损耗和入射光的偏振有关,并取决于偏振分光膜的设计及实际镀制过程.从理论上说,应设计使 δ_1 及 δ_2 尽量接近的偏振分光膜,以保证环行器的正向损耗和入射光的偏振态无关.

影响环行器反向隔离比的因素比较复杂,除正向损耗外,偏振分光膜的偏振特性、转光系统的等效旋光偏差角及入射光的偏振态对反向隔离比均有较大影响.下面是二种特殊情况下的反向隔离比计算公式:

1) 入射光为偏振方向平行于s方向的线偏振光, $P_0 = P_{0s}$, $P_{0p} = 0$, 由(6)式

$$\left. \begin{aligned} BL(1 \rightarrow 4) = BL(3 \rightarrow 2) &= -10 \log (2T_s + \theta_1^2), \\ BL(4 \rightarrow 3) = BL(2 \rightarrow 1) &= -10 \log [\delta_2 (2T_s + \theta_1^2) / \delta_1]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

2) 入射光中P分量与S分量相等, $P_{0p} = P_{0s}$, 则有:

$$\left. \begin{aligned} BL(1 \rightarrow 4) = BL(3 \rightarrow 2) &= -10 \log [T_s + R_p + (\theta_1^2 + \theta_2^2) / 2], \\ BL(4 \rightarrow 3) = BL(2 \rightarrow 1) &= -10 \log [\delta_1 \delta_2 (2T_s + 2R_p + \theta_1^2 + \theta_2^2) / (\delta_1^2 + \delta_2^2)]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

因此,如图3所示,偏振分光膜的起偏及分光性能越好, T_s 及 R_p 就越小,对提高反向隔离比就越有利,但是降低 T_s 及 R_p 受到 δ_1, δ_2 的限制.一般而言,对于多层介质偏振分光膜, T_s 越小及反射带宽越宽,则膜层数就越多,因而 δ_1 及 δ_2 将相应减少,从而导致正向损耗增加,所以在 T_s, R_p 及 δ_1, δ_2 之间存在最佳选择,另外也应使 T_s 及 R_p, θ_1 与 θ_2 两组参数尽量接近,以降低入射光偏振态对反向隔离比的影响.如前所述,由于 θ_1 与 θ_2 和YIG晶体的质量有关,因而应尽量选择高质量的晶体材料来制作环行器.另外,在环行器的结构设计

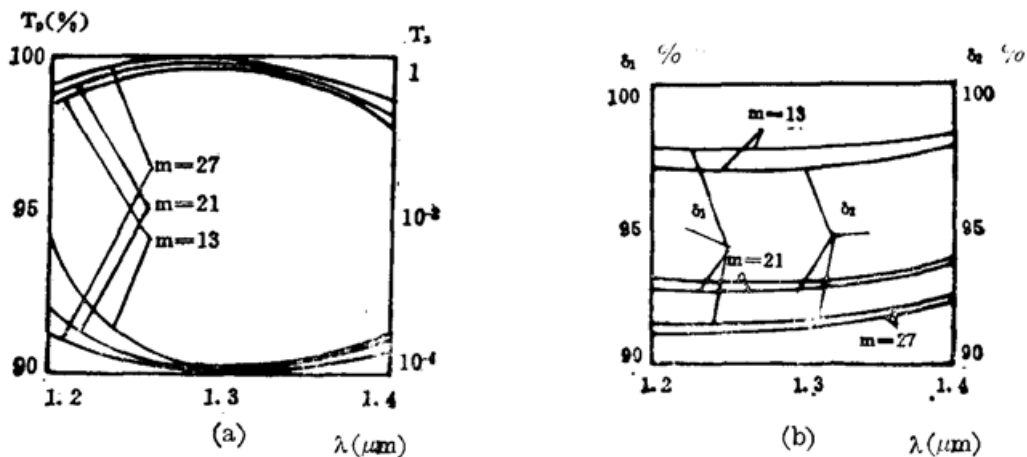


Fig. 3

(a) The variations of T_p, T_s vs the dielectrical multilayers' number m .

(b) The variations δ_1, δ_2 of vs the dielectrical multilayers' number m .

($n_{\text{Prism}} = 1.51, n_{\text{CaF}_2} = 1.25, n_{\text{TiO}_2} = 2.05$)

上,也应保证 YIG 晶体在磁场中的对称分布,避免 P_{11} 光及 P_{12} 光的磁致旋光角之差过大,导致器件的反向隔离比下降.

3 实验研究

根据以上分析,作者设计并制作了应用于 1.3 μm 波段的光学环行器,器件采用中心磁场大于 0.17 T 的 Sm-Go 磁环, YIG 晶体的厚度为 2.31 mm,石英晶体补偿片采用零级半波片;光环行器测试用光源为中心波长 1.315 μm 的半导体激光器,通过单模光纤输出后,由外径为 $\phi 2$ 的 $P/4$ 自聚焦棒准直,测量用 (photodyne, Model-33XLC) 光功率计,其灵敏度为 $10^{-4} \mu\text{W}$, 响应变为 $0.69 \mu\text{A}/\mu\text{W}$, 波长响应区为 1.1~1.7 μm . 测试结果表明,在 1.3 μm 处,棱镜对 S 光的总损耗(包括通过端面的反射损耗及偏振分光膜的反射、吸收损耗)为 0.32 dB, 偏振度为 25 dB, 对 P 光的总损耗(包括端面反射损耗及膜的透射、吸收损耗)为 0.315 dB, 偏振度为 26.5 dB. 另外,实测转光系统的损耗为 0.31 dB(主要为表面反射损耗),等效旋光偏差角 θ_1 、 $\theta_2 \approx 0.8^\circ$.

在环行器的实际制作过程中发现,外磁场与 YIG 晶体的相对位置对隔离比的影响很大,因此可以通过调节转光系统中 YIG 晶体的通光位置及其与磁环的相对位置,来相对改变转光系统的等效旋光偏差角 θ_1 及 θ_2 的具体数值,补偿偏振分光棱镜对 S 光及 P 光的微小损耗偏差,使环行器的正向损耗与入射光的偏振态无关,但反向隔离比仍与入射光的偏振态有关. 在实验中,也发现很难通过补偿来同时校正正向损耗及反向隔离比与偏振的关系,这主要是由于后者涉及的因素较多(如(6)式所示),限于目前的实验条件,只能在 θ_1 、 θ_2 及 T_s 、 T_p 间取折衷. 表 1 为作者研制的环行器的测试结果,其正向损耗小于 1 dB,反向隔离比在 25.5 dB 与 28 dB 之间.

Table 1 The experimental results of the insertion losses and isolations of the optical circulator ($\lambda=1.315 \mu\text{m}$)

| inlet \ exit | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------|------------|------------|--------------|------------|
| 1 | | 25~29 (dB) | <35 (dB) | 1.15 (dB) |
| 2 | 1.1 (dB) | | 25~26 (dB) | >35 (dB) |
| 3 | >35 (dB) | 1.05 (dB) | | 26~27 (dB) |
| 4 | 25~28 (dB) | >35 (dB) | 1.1~1.2 (dB) | |

该环行器已用于单根光纤耦合的行波半导体激光放大器及光传感领域^[4], 取得了较好的效果.

参 考 文 献

- [1] Hidetoshi Iwamura, Miroshi Iwasaki, Kenichi Kubodra *et al.*, Simple Polarisation-independent Optical Circulator for Optical Transmission System. *Electron. Lett.*, 1979, **15** (25): 830~831
- [2] Takas Matsumoto, Polarisation-independent Optical Circulator Coupled with Multimode Fibers. *Electron. Lett.*, 1980, **16** (1): 8~9
- [3] D xiu Huang, D. Liu, S. Yu *et al.*, Packaged Double-Pass Travelling-wave Semiconductor Laser Amplifiers. *Electron. Lett.*, 1991, **27** (7): 571~572
- [4] Huang D. xiu, Liu Deming, Yu Siyuan *et al.*, Theoretical and experimental investigations on a novel semiconductor laser amplifier with input and output sharing a single fiber. *International Journal of Optoelectronics*, 1992, **7** (1): 91~101

Theoretical and experimental study of isolation and insertion loss of a 1.3 μm optical circulator

ZHOU MI HUANG DEXIU LU DEMING LU QINGJU
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 10 September 1991; revised 6 February 1992)

Abstract

In this paper the factors which influence the isolation and the insertion loss of optical circulator are discussed. Theoretically and experimently ther is an optimum choice between absorption and polarization characteristics of polarizing prism for a polarization-independent optical circulator with low insertion loss and high isolation. Experiment shows that the insertion loss of our circulator was about -1dB and the isolation was between -25.5dB and -28dB .

Key words optical circulator, insertion loss.