第 19 卷　第 8 期
1999 年 8 月

光　学　学　报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 19, No. 8
August, 1999

采用新型棱镜的光学隔离器

柳清菊　林理忠
(云南大学物理系, 昆明 650091)

摘　要　在理论上分析并用实验研究了采用新型光学棱镜作起偏器、检偏器后与偏振无关的光学隔离器性能的变化。结果表明, 隔离器的反向隔离比在原来的基础上提高了将近一倍, 而正向插入损耗增加得很少。研制的光学隔离器光纤-光纤的正向损耗与反向隔离比分别为 - 0.82 dB 及 - 48.1 dB。

关键词　光学隔离器,　偏振分光棱镜,　反向隔离比。

1　引　　言

光学隔离器在光纤通信、光纤传感和非线性光学等领域有广泛用途[1, 2], 其中的块状型与偏振无关的光学隔离器由法拉第旋光器、起偏器、检偏器构成。起偏器、检偏器有晶体型[3]和棱镜型[4]两种基本类型。前者是采用优质双折射晶体, 选择合适的晶轴取向, 经精密加工而成。由于晶体的起偏度高, 由此制作的光学隔离器性能优良, 反向隔离比可达 - 50~60 dB, 目前已获得广泛应用; 后者是在两块光学玻璃棱镜的分光面上镀制多层介质偏振分光膜并胶合在一起来达到起偏、检偏的目的, 其特点是材料价格低廉, 加工容易, 可大批量生产。但由于偏振分光膜在实际镀制过程中的限制因素, 导致其消光比较低, 使得由此制作的光学隔离器的反向隔离比难以提高, 一般只能达到 - 25 dB 左右, 从而严重地限制了棱镜型光学隔离器的发展。为了解决这一问题, 作者在原有起-检偏棱镜的基础上, 设计并研制了一种新型几何结构的偏振分光棱镜[5], 其消光比得到了成倍的提高, 将其作为隔离器的起偏器、检偏器, 可使隔离器光纤-光纤的反向隔离比达到 - 50 dB 以上, 其它性能指标也基本接近晶体型光学隔离器的水平。

2　器件结构与主要性能

采用常规偏振分光棱镜作分光、合光元件的与偏振无关的块状型光学隔离器结构原理如图 1 所示, 其反向隔离比 L 的理论计算公式为

$$L = 10 \log (2R_S T_S) \tag{1}$$

式中 R_S、T_S 分别为 S 光在偏振分光面上的反射率与透射率[6]。

下面对采用新型棱镜的隔离器的反向隔离比进行分析。

收稿日期: 1998-03-23; 收到修改稿日期: 1998-06-08

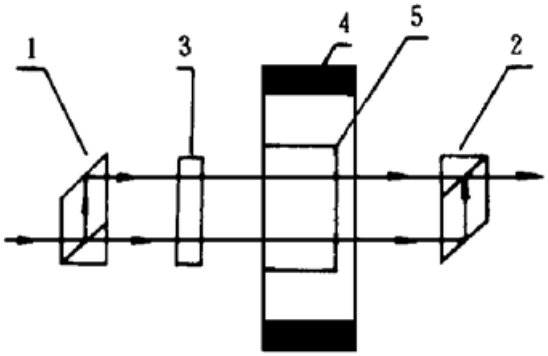

Fig. 1 Basic configuration of the optical isolator using conventional polarizing-splitting prism. 1, 2: conventional polarizing-splitting prism; 3: quartz compensating plate; 4: magnetic ring; 5: YIG crystal

2.1　反向隔离比

所设计的新型偏振分光棱镜的结构如图 2 所示[5]。将该棱镜用作光隔离器的起、检偏器，则隔离器的结构如图 3 所示。这种棱镜具有三个偏振分光面 F_1、F_2、F_2'，从反向入射的 I_{in} 光

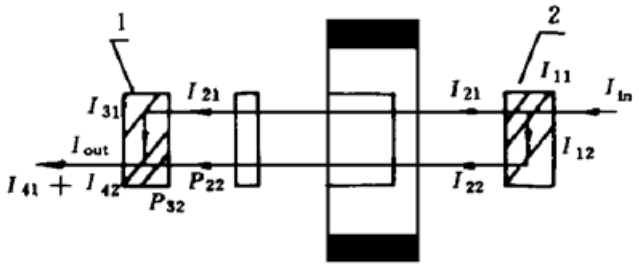

Fig. 2 The new prism configuration. F_1、F_2、F_2': polarizing-splitting face

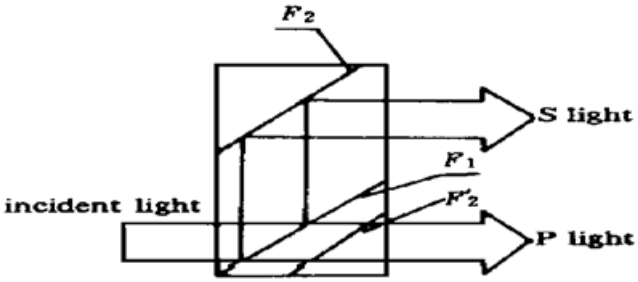

Fig. 3 The optical isolator using the new polarizing-splitting prism. 1, 2: new polarizing-splitting prism

经过棱镜 2 的 F_1 面后分成 I_{11} 光和 I_{12} 光，且

$$I_{11} = T_S I_{inS} + T_P I_{inP} \tag{2}$$

$$I_{12} = R_S I_{inS} + R_P I_{inP} \tag{3}$$

这里 R_S、T_S 的定义和(1) 式中参数的定义是一致的，R_P、T_P 分别为 P 光在偏振分光面上的反射率和透射率。

I_{11} 和 I_{12} 两束光又分别经过 F_2'、F_2 面被再次分光，有

$$I_{11} \rightarrow I_{21}: \qquad I_{21} = T_S^2 I_{inS} + T_P^2 I_{inP} \tag{4}$$

$$I_{12} \rightarrow I_{22}: \qquad I_{22} = R_S^2 I_{inS} + R_P^2 I_{inP} \tag{5}$$

从棱镜 2 出射的两束偏振光 I_{21}、I_{22} 的偏振方向经过 45°磁光晶体及半波片的反向相消的旋光作用后，偏振方向保持不变，当这两束光分别经过棱镜 1 的偏振分光面 F_2、F_2' 后，有

$$I_{21} \rightarrow I_{31}: \qquad I_{31} = R_S T_S^2 I_{inS} + R_P T_P^2 I_{inP} \tag{6}$$

$$I_{22} \rightarrow I_{32}: \qquad I_{32} = T_S R_S^2 I_{inS} + T_P R_P^2 I_{inP} \tag{7}$$

I_{31}、I_{32} 光经过棱镜 1 的 F_1 面后，有

$$I_{31} \rightarrow I_{41}: \qquad I_{41} = R_S^2 T_S^2 I_{inS} + R_P^2 T_P^2 I_{inP} \tag{8}$$

$$I_{32} \rightarrow I_{42}: \qquad I_{42} = R_S^2 T_S^2 I_{inS} + R_P^2 T_P^2 I_{inP} \tag{9}$$

I_{41}、I_{42} 两束光在 F_1 面上合为一束光 I_{out} 从棱镜 1 输出

$$I_{out} = I_{41} + I_{42} = 2(R_S^2 T_S^2 I_{inS} + R_P^2 T_P^2 I_{inP})$$

因为 $R_S \approx T_P$，$T_S \approx R_P$[6]，故

$$I_{out} \approx 2R_S^2 T_S^2 (I_{inS} + I_{inP}) \tag{10}$$

按反向隔离比的通常定义，该隔离器的反向隔离比 L' 为

$$L' = -10\lg(2R_s^2T_s^2) \tag{11}$$

和(1)式比较可以看出：在旋光系统、棱镜偏振分光膜的镀制完全相同的情况下，采用两种结构不同的偏振分光棱镜，二者之间隔离器的反向隔离比有如下关系

$$L' = 2L - 10\lg 2 \tag{12}$$

可见，采用新型结构的偏振分光棱镜将使隔离器的反向隔离比在采用常规偏振分光棱镜的基础上提高近一倍。

2.2 正向插入损耗

引起光学隔离器正向插入损耗的主要因素如下：

1) 半波片与 45° YIG 晶体的失调角 $\Delta\theta$ 引起的损耗 α_1：

$$\alpha_1 = -10\lg[\cos^2(\Delta\theta)] \quad (\mathrm{dB}) \tag{13}$$

2) 棱镜、半波片、YIG 晶体各通光面的剩余反射率及各元件对光的吸收与散射造成的损耗 α_2；

3) 棱镜中偏振分光膜的吸收损耗 α_3；

4) 自聚焦棒之间的耦合损耗 α_4。

对棱镜的偏振分光膜进行合理的膜系设计、膜料选择并采用精确的镀制工艺后，与 α_1、α_2、α_4 相比，α_3 一般比较小，不是隔离器损耗的主要原因。

光学隔离器在旋光系统、各元件镀制的增透膜及棱镜偏振分光膜的镀制工艺均相同的情况下，其偏振元件采用常规棱镜时的正向插入损耗为

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 \tag{14}$$

而采用新型棱镜时为

$$\alpha' = \alpha_1 + \alpha_2 + 2\alpha_3 + \alpha_4 \tag{15}$$

因此，采用新型棱镜时，除膜层本身的吸收损耗增加外，其余损耗均不变。在实际制作过程中，损耗的主要来源是 α_1、α_2，二者之和常达 0.6 dB 左右，而膜层吸收损耗 α_3 通常仅为 10^{-2} dB。故在总的损耗中由于偏振分光面的增加而引起的吸收损耗的增加是很少的，和隔离器所获得的高隔离比相比，这点牺牲是值得的。

3 实验结果与分析

依据上述理论分析，采用相同的材料和制作工艺分别制作了常规和新型结构的棱镜。在作者研制的偏振分光棱镜中，采用折射率为 1.68 的 Lak5 玻璃，偏振分光膜料选用折射率为 1.39 的 SiO_2 和折射率为 2.30 的 TiO_2，膜层数为 20。常规和新型结构棱镜的偏振分光膜的镀制同时完成，经胶合切割后，将它们分别作为隔离器的偏振分光元件，对其进行了对比测试，初步实验结果如下：

1) 当中心波长为 1.3 μm 的光垂直于棱镜 1 的通光面入射，从棱镜 2 出射时，在图 1 和图 3 两种情况下，测得光学隔离器光纤–光纤的正向插入损耗分别为 −0.73 dB、−0.82 dB，相差 0.09 dB，与理论分析基本相符。该损耗可以通过选择更为精细的制作工艺和优质的材料(YIG 晶体、光学玻璃、半波片、膜料)等方法进一步降低。

2) 当入射光 $\lambda_m = 1.3$ μm 时，图 1 和图 3 两种情况实验测得隔离器光纤–光纤的反向隔

离比分别为- 26.4 dB、- 48.1 dB, 后者比前者高出 21.7 dB, 反向隔离比得到了大幅度的提高, 与理论分析吻合。

在更精确的膜系设计与镀制工艺下, 采用常规偏振棱镜的隔离器其反向隔离比最高可达到- 30 dB 以上[6], 根据理论分析, 这种新型结构的偏振棱镜可望使隔离器光纤-光纤的反向隔离比提高到- 60 dB 以上。

3) 由于偏振分光膜实测的最佳起偏角为 42°, 因此在实际制作的器件中, 棱镜及 YIG 晶体的放置形式略有倾斜, 并选择对 P 光和 S 光起偏度基本相等的最佳角度, 从而有效地降低了回程损耗及偏振灵敏度。实测回程损耗为- 44.2 dB, 偏振灵敏度为±2.8 dB。

参 考 文 献

[1] Huang D X, Liu D, Yu S *et al.*. Packaged double-pass travelling-wave semiconductor laser amplifier. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(7): 571~ 572

[2] Yamashita S, Okoshi T. Performance improvement and optimization of fiber amplifier with a midway isolator. *IEE. Photo. Tech. Lett.*, 1992, **4**(11): 1276~ 1280

[3] 虞国华, 刘水华, 方罗珍等. 偏振无关的楔形光隔离器插入损耗与反向隔离比分析. 光学学报, 1997, **17**(8): 1108~ 1112

[4] Yohji Fujii. High-isolation polarization-independent optical circulator coupled with single-mode fibers. *J. Lightwave Tech.*, 1991, **9**(4): 456~ 460

[5] 柳清菊, 林理忠, 普小云等. 一种新型高偏振度的偏振分光棱镜. 激光杂志, 1997, **18**(6): 25~ 28

[6] 刘德明, 黄菊仙, 周　密等. 用于光纤隔离器/环行器的宽带偏振分光棱镜. 第五届全国光纤通信学术会议论文集, 天津, 1991, **5**: 279~ 282

[7] 柳清菊, 林理忠. 提高光学隔离器/环行器反向隔离比的方法. 激光杂志, 1997, **18**(3): 27~ 29

An Optical Isolator Using a New Type Prism

Liu Qingju　　Lin Lizhong

(*Department of Physics, Yunnan University, Kunming* 650091)

(Received 23 March 1998; revised 8 June 1998)

Abstract The performance of a polarization-independent isolator using a new type polarizing splitting prism are analysed in theory and studied by experiment. Theoretical and experimental results indicate that the isolation is nearly two times greater than before, and the insertion loss just increases a little. Experiment shows that the insertion loss and the isolation from fiber to fiber of the isolator are - 0.82 dB and - 48.1 dB, respectively.

Key words optical isolator, polarizing splitting prism, isolation.