

文章编号: 0253-2239(2007)03-0536-4

与人射线偏振光振动方向无关的低偏振度消偏器*

刘继红 方强 阴亚芳 梁猛 陆蓉

(西安邮电学院电子与信息工程系, 西安 710061)

摘要: 消偏器是光纤传感器、光放大器等偏振敏感性光学系统中的关键器件,用于减小输入光的偏振度(DOP)。设计了一种与人射线偏振光振动方向无关的低偏振度消偏器,该器件中利用人为的偏振相关延迟代替了保偏光纤的双折射,并在偏振相关型消偏器前增加了一个 1/4 波片,从而对任意方向振动的线偏振光具有相同的消偏能力,结构紧凑。对消偏性能随波片阶数、入射光中心波长和振动方向的变化作了数值计算。实验中采用半峰全宽为 0.13 nm 的光源,入射线偏振光在任意方向振动时,输出光偏振度小于 2.6%,消偏器的插入损耗为 0.6 dB,损耗起伏小于 0.11 dB。实验和数值计算结果表明,该消偏器具有低偏振度、低插入损耗和适合于宽光谱应用的优点。

关键词: 光学器件; 消偏器; 虚拟双折射; 线偏振光; 1/4 波片

中图分类号: O436.3; TN929.11 文献标识码: A

Low-DOP Depolarizer for Linearly Polarized Light Independent of Direction of Vibration

Liu Jihong Fang Qiang Yin Yafang Liang Meng Lu Rong

(Department of Electronic and Information Engineering, Xian Institute of Posts and Telecommunications, Xian 710061)

Abstract: Depolarizer is a key device in polarization sensitive optical systems, by which a completely or partially polarized light is converted into unpolarized one. An artificial polarization-dependent delay is employed substitute for polarization maintaining fiber, a compact depolarizer for linearly polarized light with any direction of vibration is proposed. Before being depolarized, the incident linearly polarized light is converted into an elliptical polarized light by a quarter-wave plate and is divided into two orthogonal polarized parts always with equal intensity, so that the depolarizer is independent of the optical field direction of incident light. The depolarization performance evolution with the order of quarter-wave plate, center wavelength and optical field direction of incident light is calculated. Low DOP (2.6%), low insertion loss (0.6 dB) and small insertion loss fluctuation (0.11 dB) are obtained for a linearly polarized light with 0.13 nm spectral width. Theoretical analyses and experimental results show that proposed depolarizer has low DOP, low insertion loss and small insertion loss fluctuation, and can be operated in a wide spectral band.

Key words: optical devices; depolarizer; virtual birefringence; linearly polarized light; quarter-wave plate

1 引言

在许多激光测量和光纤传感应用中,消除系统的偏振相关性是提高性能的一项关键技术^[1,2],在光放大器中也存在增益与抽运光偏振态相关的现象^[3,4],消偏器正是为解决这些问题而设计的。目前研究较多的是无源消偏器,基本原理是通过消除输入光正交偏振分量之间的相关性,从而降低输出光的偏振度^[5~7]。最典型的无源消偏器是基于保偏

光纤(PMF)的立奥(Lyot)型消偏器,它由两根长度比为1:2、快(慢)轴成45°夹角的保偏光纤连接构成。对于一定谱宽的光源,当保偏光纤足够长时,输出光由两个强度相同、相关系数为零的正交偏振分量构成,从而达到消偏的目的。这种消偏器与输入光偏振态(SOP)无关,但由于保偏光纤双折射率小,对于谱宽较窄的光源,需要很长的保偏光纤。由于激光器输出的光束具有良好的线偏振特性,在许多应用中输入

* “十五”科技攻关项目(2002BA106B07)资助课题。

作者简介: 刘继红(1977—),男,讲师,主要从事光无源器件和光通信网络的研究。E-mail: ong1705@xiyou.edu.cn

收稿日期: 2006-01-10; 收到修改稿日期: 2006-06-15

消偏器的光也是线偏振光,如果入射光偏振方向和保偏光纤快(慢)轴成 45° 角,使用一段保偏光纤即可达到消偏的目的,但环境条件变化会引起入射光偏振方向变化,造成这种结构的消偏器性能不稳定^[8]。

本文提出了一种对输入线偏振光振动方向无关的紧凑型无源消偏器。首先,用人造的偏振相关延迟代替保偏光纤的双折射,即一束光由偏振分束器(PBD)分成两个沿空间不同光学介质或路径传播的正交偏振分量,这样,在两分量之间形成一定长度光程差所需的空间距离可远小于保偏光纤的长度;其次,在入射光束进入消偏器之前先通过一个 $1/4$ 波片(QWP),线偏振光被转换成椭圆偏振光,由于 $1/4$ 波片和偏振分束器二者光轴的夹角是 45° ,从而由偏振分束器分开的两束正交偏振光强度相等,与入射线偏振光振动方向无关。实验结果表明,对于任意方向振动的线偏振光,消偏器输出光的偏振度及其起伏都很小。

2 消偏器结构设计

图 1 是设计的消偏器结构示意图。偏振分束器 1 和偏振分束器 2 的光轴在 xoz 面内, $1/4$ 波片的光轴与 x 轴的夹角是 45° 。线偏振光准直后首先通过 $1/4$ 波片,变成一长或短轴在 $1/4$ 波片光轴方向的椭圆偏振光,然后被偏振分束器 1 分成强度相等的两个正交偏振分量,经不同光路传播,最后由偏振分束器 2 合为一束光进入输出准直器,两个光路之间的时间延迟差应大于光源的相干时间。只要由偏振分束器 2 合成时两正交偏振分量强度相同,且不相干,即可达到消偏的目的^[7]。延时支路上的介质可以采用折射率较大的光学材料,如 YVO_4 晶体等。

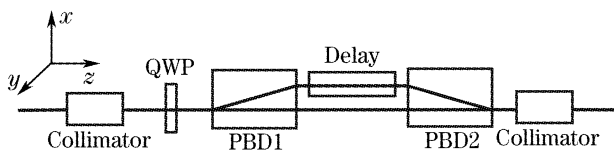


图 1 消偏器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of depolarizer. QWP: quarter-wave plate, PBD: polarization beam displacer

3 $1/4$ 波片对消偏性能的影响

$1/4$ 波片在我们设计的消偏器中具有重要作用,保证任意方向振动的线偏振光通过 $1/4$ 波片后由偏振分束器 1 分开的两个正交偏振分量强度相等。设入射到 $1/4$ 波片的光束中波长为 λ 的光场对

应的琼斯矢量为 $[E_x^{\text{in}}, E_y^{\text{in}}]^T$, 光强度是 I_{in} , 从 $1/4$ 波片出射光的琼斯矢量为 $[E_x^{\text{out}}, E_y^{\text{out}}]^T$, 偏振分束器 1 分开的两光场振幅分别是 E_o 和 E_e , 则有

$$\begin{bmatrix} E_x^{\text{out}} \\ E_y^{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\Delta\phi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^{\text{in}} \\ E_y^{\text{in}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 α 是 $1/4$ 波片光轴和 x 轴的夹角, $\Delta\phi = 2\pi\Delta nL/\lambda$, Δn 是 $1/4$ 波片材料的双折射率差, L 是 $1/4$ 波片的厚度。把 $\alpha = 45^\circ$, $\Delta\phi = k\pi/2$ ($k = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$) 代入(1)式,可得

$$\begin{bmatrix} E_x^{\text{out}} \\ E_y^{\text{out}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (E_x^{\text{in}} + E_y^{\text{in}}) \pm j(E_x^{\text{in}} - E_y^{\text{in}}) \\ (E_x^{\text{in}} + E_y^{\text{in}}) \mp j(E_x^{\text{in}} - E_y^{\text{in}}) \end{bmatrix}.$$

根据第 2 节消偏器结构中坐标的定义,有

$$[E_o \ E_e]^T = [E_x^{\text{out}} \exp(-j\tau) \ E_y^{\text{out}}]^T,$$

其中 τ 是偏振分束器 1 中两正交偏振分量之间传播的时延差,所以

$$I_o = 0.5 |E_o|^2 = 0.5 I_{\text{in}},$$

$$I_e = 0.5 |E_e|^2 = 0.5 I_{\text{in}},$$

可见,偏振分束器 1 分开的两正交分量光强度相等,与入射线偏振光的振动方向(即 $E_x^{\text{in}}/E_y^{\text{in}}$ 的大小)无关。对于非单色光,当波长 λ 的 $1/4$ 波片用于其它波长时, $\Delta\phi$ 不再严格的等于 $k\pi/2$, I_o 、 I_e 的大小与波长相关。因此,需要对不同谱宽和波长的光经过 $1/4$ 波片、偏振分束器 1 后 I_o/I_e 的变化进行分析,同时考虑 α 偏离 45° 的影响。设光源中心波长 $\lambda_c = 1550$ nm, 半峰全宽 $\Delta\lambda = 0.1$ nm, 光强分布符合高斯分布,使用 1550 nm 波长的 $1/4$ 波片。

当入射线偏振光振动方向和 $1/4$ 波片光轴的夹角 β 变化 2π 时, I_o/I_e 的变化如图 2 所示(采用零阶 $1/4$ 波片)。对于 $\lambda_c = 1550$ nm 的光源,当 $\alpha = 45^\circ$ 时, $I_o/I_e = 1$, 与入射线偏振光振动方向无关,当 $\alpha =$

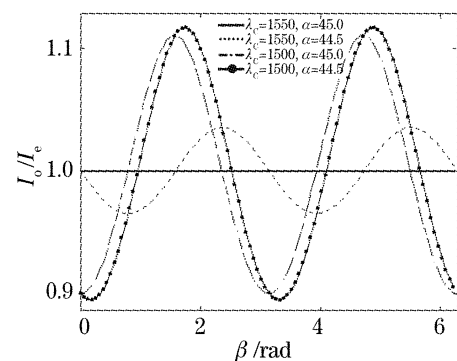


图 2 不同 α 、 λ_c 条件下 I_o/I_e 与 β 的关系

Fig. 2 Relationship between I_o/I_e and β with different α and λ_c

44.5°时, I_o/I_e 与入射光振动方向相关, 但偏离 1 较小。而当 $\lambda_c = 1500 \text{ nm}$ 时, 无论 α 是否有偏差, I_o/I_e 与入射光振动方向都相关, 随 α 的不同取值, 在约 0.89~1.12 的范围内变化。

由偏振度的定义^[9]

$$n_{\text{DOP}} = \sqrt{1 - \frac{4|\mathbf{J}|}{(J_{xx} + J_{yy})^2}},$$

(其中 \mathbf{J} 是输出光的相干矩阵, $J_{m,n} = \langle E_m E_n^* \rangle$, $m, n \in \{x, y\}$) 和所设计消偏器的工作原理可得, 当 $I_o/I_e = 1.12$ (或 0.89) 时, 最大 $n_{\text{DOP}} \approx 5.4\%$ 。

图 3 是 $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$ (从图 2 可知, $\beta = 0^\circ$ 时 I_o/I_e 对 λ_c 变化敏感) 时, I_o/I_e 随 λ_c 变化的情况。使用零阶 1/4 波片时, I_o/I_e 随 λ_c 的变化比较缓慢, 100 nm 范围内都在 0.9~1.11 之间。当 1/4 波片阶数为 1 时, I_o/I_e 对 λ_c 的变化比较敏感, 相应的, 偏振度低的波长范围减小。由于光谱的对称性, 当光源半峰全宽变化时, 图 2 和图 3 中所有曲线变化都很小, 可以忽略。

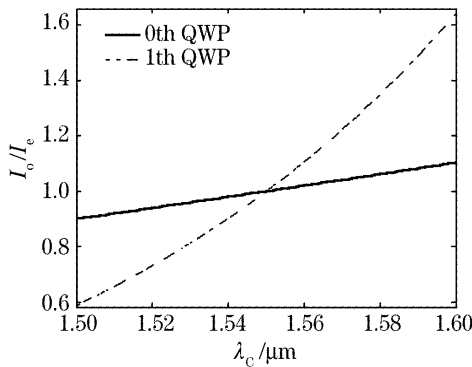


图 3 1/4 波片阶数不同时 I_o/I_e 随 λ_c 的变化情况
Fig. 3 I_o/I_e as a function of λ_c using 0th and 1th quarter-wave plate

综合以上分析, 有如下结论: 若使用零阶、 $\lambda_{\text{QWP}} = 1550 \text{ nm}$ 的 1/4 波片, (1) 消偏器用于 $\lambda_{\text{QWP}} \pm 50 \text{ nm}$ 的光谱范围时, 可使 $n_{\text{DOP}} \leq 5.4\%$, 对入射线偏振光振动方向无关。(2) 当 1/4 波片和偏振分束器 1 光轴之间夹角 α 的误差增大到 0.5° 时, 对消偏性能影响不大, 可见允许较大的装配误差。

4 实验结果

实验中, 1/4 波片采用 $\lambda_{\text{QWP}} = 1550 \text{ nm}$ 的零阶石英波片, 延时支路上使用 YVO_4 晶体, 偏振光束分量以“o”光 ($n_o = 1.9447$) 通过延时晶体, 实验所用光源的光谱如图 4 所示。图 5 是 $\beta = 45^\circ$ 时, 消偏器输出光偏振度随两个正交偏振分量之间光程差增加的变化趋势, 偏振度随光程差增大而减小, 实验结果

与数值计算曲线基本一致, 当光程差大于 2 cm 时, 实验测得的偏振度 $n_{\text{DOP}} < 5\%$ 。实验光源的相干长度 $\lambda_c^2/\Delta\lambda \approx 1.8 \text{ cm}$, 可见, 当光程差略大于光源相干长度时即可获得良好的消偏效果。

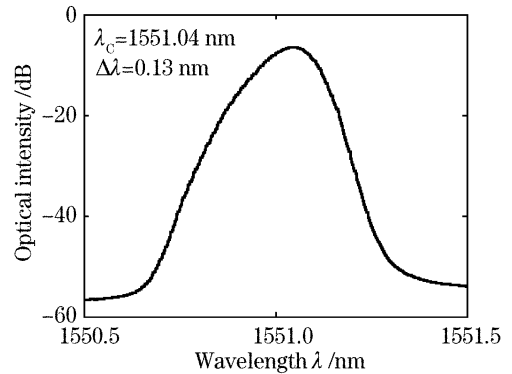


图 4 实验用光源的光谱

Fig. 4 Optical spectrum of laser diode used in experiment

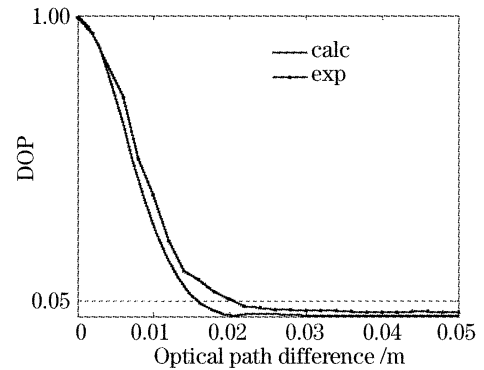


图 5 消偏光偏振度随光程差的变化趋势

Fig. 5 Relationship between degree of polarization of depolarized light and optical path difference

考虑到前文分析的误差因素, 为获得小的偏振度, 以下实验中光程差取 3 cm。当入射线偏振光的偏振方向改变 2π 时, 消偏器输出光的偏振度均小于 2.6% (图 6), 同时消偏器的插入损耗约 0.6 dB, 损耗起伏小于 0.11 dB (图 7)。可见, 对于任意方向振动的线偏振光, 该消偏器都能保持优良的消偏性能。

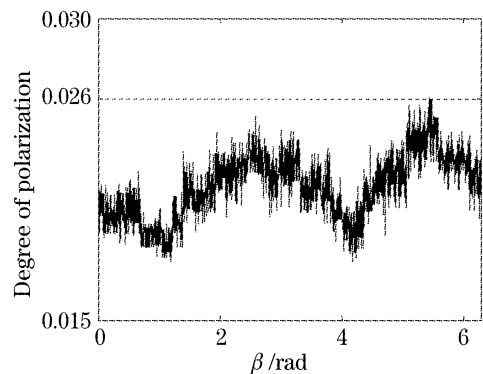


图 6 偏振度随入射光振动方向变化的情况

Fig. 6 Degree of polarization fluctuation with direction of electric field scrambled

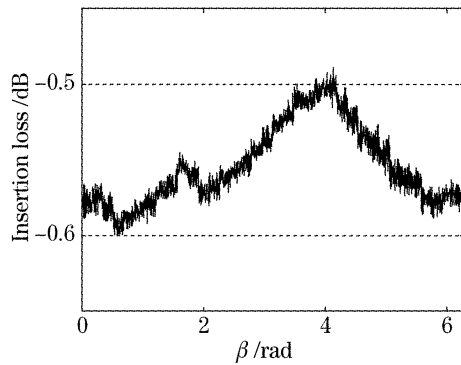


图 7 插入损耗随入射光振动方向变化的情况
Fig. 7 Insertion loss fluctuation with direction of electric field scrambled

5 结 论

我们提出了一种能对任意方向振动的线偏振光消偏的激光消偏器, 结构紧凑。对于中心波长 $\lambda_c = 1551.04$ nm、半峰全宽 $\Delta\lambda = 0.13$ nm 的光源, 以任意振动方向进入消偏器, 出射光的偏振度小于 2.6%, 插入损耗 0.6 dB, 损耗起伏小于 0.11 dB。实验和仿真分析结果表明, 该消偏器具有低偏振度、低插入损耗和适合于宽光谱应用的优点。

参 考 文 献

- 1 Kazumasa Takada, Akira Himeno, Kuniharu Kato *et al.*. Development of fiber-optic depolarizer and its application to measurement systems for polarization-insensitive operation of silica-waveguide matrix switches[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(9): 1640~1647
- 2 P. B. Ruffin, Janet Baeder, C. C. Sung. Study of ultraminiature sensing coils and the performance of a depolarized interferometric fiber optic gyroscope[J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(4): 605~611
- 3 J. S. Wang, J. R. Costelloe, R. H. Stolen. Reduction of the degree of polarization of a laser diode with a fiber Lyot depolarizer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(11): 1449~1451
- 4 Toshiyuki Tokura, Taichi Kogure, Takashi Dugihara *et al.*. Pump light depolarization method for low PDG Raman amplification[C]. *OFC' 2002*, **ThGG24**: 645~646
- 5 Benson, Paisheng Shen, Chinlon Lin. Passive fiber depolariser based on incoherent cascaded fibre-rings [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(18): 1777~1778
- 6 Chi Hao, Gao Jun, Xu Senlu. A novel practical quasi-monochromatic depolarizer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8): 1097~1102 (in Chinese)
- 池 灏, 高 军, 徐森禄. 一种实用的准单色光退偏器的研究[J]. *光学学报*, 1997, **17**(8): 1097~1102
- 7 N. Azami, E. Villeneuve, A. Villeneuve *et al.*. All-SOP all-fiber depolarizer linear design[C]. *OFC' 2003*, **Tuk5**: 230~231
- 8 H. Kazami, S. Matsushita, Y. Emori *et al.*. Development of a crystal-type depolarizer[J]. *Furukawa Review*, 2003, **23**: 44~47
- 9 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. Beijing: World Publishing Co. Ltd., 2001. 619~629