

文章编号: 1003-501X(2003)01-0046-04

一种新型偏振分光棱镜的设计和应用

张 晟¹, 黄德修¹, 殷东亮¹, 陈斯杰²

(1. 华中科技大学光电子系, 湖北 武汉 430074;
2. 福州康顺光通讯有限公司, 福建 福州 350014)

摘要: 一种新型的偏振分光棱镜结构, 实现了将偏振态相互垂直的光以不同的角度输入后合为一束的功能, 尤其能与双光纤准直器配合使用。通过计算说明二者角度可相互匹配, 并分析了在准直器的角度加工出现小的偏差时, 通过微量调节输入光束的方向能予以补偿。实验将该棱镜用于偏振光合束器和光学环行器等无源器件中取得了良好效果。

关键词: 偏振棱镜; 分光棱镜; 光纤准直器; 偏振光合束器

中图分类号: TN942.2 **文献标识码:** A

Design of a Novel Polarization Beam Splitting Prism and Its Applications

ZHANG Sheng¹, HUANG De-xiu¹, YIN Dong-liang¹, CHEN Si-jie²

(1. Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University
of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Fuzhou Koncent Communication Inc. Fuzhou 350014, China)

Abstract: The function that combining two mutually vertical polarization state beams with different incident angles into one is carried out by a novel polarization beam splitting prism. The structure can be used through matching dual optic fiber collimator. The calculation shows that the two angles can be matched each other. If any small deviation appears in collimator angle processing, it can be compensated through some small amount adjustment for the direction of the input beam. The prism is applied to the optical passive devices such as polarization beam combiner and optical circulator in experiments, and good effect has been achieved.

Key word: Polarization prism ; Beam splitting prism; Optic fiber collimator; Polarization beam combiner

引 言

光学无源器件正朝着高性能和结构紧凑的方向发展, 由一个双光纤头配合一个自聚焦透镜构成的双光纤准直器用来替代两个单光纤准直器, 大大缩小了器件的尺寸。它在解波分复用器中已经得到比较成熟的应用, 目前它正越来越多地应用于其它三端口或三端口以上的光无源器件。但是由于共用一个自聚焦透镜, 通过双光纤准直器出射的两条光束并不平行, 往往需要用棱镜或棱镜组来与其特定的耦合角度实现匹配, 常用的棱镜组有屋脊棱镜和渥拉斯顿棱镜。另外在许多偏振无关的光无源器件中, 常常需要将输入的光束中正交的偏振态分开作旋光处理后再合光, 因此一个偏振光合束器的结构在其中起着重要的作用。本文提出一种新颖的偏振分光棱镜组, 实现了与双光纤准直器的角度匹配的同时, 将合光的功

能与之集为一体。其结构简单，加工方便，实验已将这种结构应用于光学环行器和偏振光合束器，取得了良好的效果。

1 原理设计

这种棱镜的结构如图 1，它与渥拉斯顿棱镜相似，由两块楔形单轴双折射晶体粘结而成，其中晶块 I 的光轴与入射面平行且与水平方向成 θ 角（如图）；晶块 II 光轴与两晶体的粘结面平行。由于两晶体的光轴相互垂直，则从左端入射的一束普通光线，经过晶体 I 分为两束偏振态相互垂直的线偏光，然后由于它们各自的偏振态在两块晶体中的折射率不同，发生如图 1 所示的折射现象，使最终出射光线夹角正好与所用双光纤准直器匹配，能同时完好地耦合进入两条光纤中。原理设计首先须对所用的双光纤准直器进行精确地计算。

1.1 关于双光纤准直器的计算

图 2 为双光纤准直器的结构，为减小回波损耗，常将自聚焦透镜与光纤头的对接面磨一小的楔角 α 。本文所用的双光纤准直器两光纤的排列方向沿楔角方向。设光纤头至自聚焦的端面的距离为 d_0 ，自聚焦透镜的聚焦常数为 A ，轴线折射率为 n_0 ，长度为 L 。

设光从光纤头出射的为高斯光束，束腰处在出射面，束腰半径为 ω_0 ，经自聚焦透镜准直输出的传输

矩阵为

$$\begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{AL}) & \frac{\sin(\sqrt{AL})}{n_0} \\ -n_0\sqrt{A}\sin(\sqrt{AL}) & \cos(\sqrt{AL}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 L 为光束进入自聚焦透镜的入射点至自聚焦透镜输出端面的轴向距离。计算得到最终出射光束的模场半径 ω_1 和波振面半径 R_1 ，以此确定所用自聚焦透镜的工作距离 $2Z$ ，其中 Z 为

$$Z = R_1 / [1 + (1/R_1 / \partial w_1^2)^2] \quad (2)$$

对于所需的特定工作距离，通过改变 d_0 值获得。对于双光纤准直器，两根光纤并排位于自聚焦透镜的轴线两侧， r_0 为光纤直径，所以有 $r_{11}=r_0$ ， $r_{21}=-r_0$

由于 α 角的存在，从光纤出射的中心光线的方向角 j_{11}, j_{21} 均为 $\arcsin(n_f \sin(\alpha))$ ，其中 n_f 为光纤芯层折射率。由此可以得到两光束经过光纤头和自聚焦透镜中间间隙后到达自聚焦透镜端面的参数 r_{12}, r_{22} 和 j_{12}, j_{22} 以及入射点到轴线端点的水平位移 x_1 和 x_2 (见图 2)，那么

可将有楔角的自聚焦透镜等效为两个长度分别为 $(L-x_1)$ 和 $(L-x_2)$ 的垂直圆柱体，由于自聚焦透镜的折射率相对离轴位移成二次分布

$$n(r) = n_0(1 - Ar^2/2) \quad (3)$$

由两入射点的位置分别求出两光束的等效入射角度 j'_{12}, j'_{22}

$$j'_{12} = \arcsin\{n(r_{12})\sin[\arcsin(\sin j_{12}/n(r_{12})) - \alpha]\} \quad (4)$$

$$j'_{22} = \arcsin\{n(r_{22})\sin[\arcsin(\sin j_{22}/n(r_{22})) - \alpha]\} \quad (5)$$

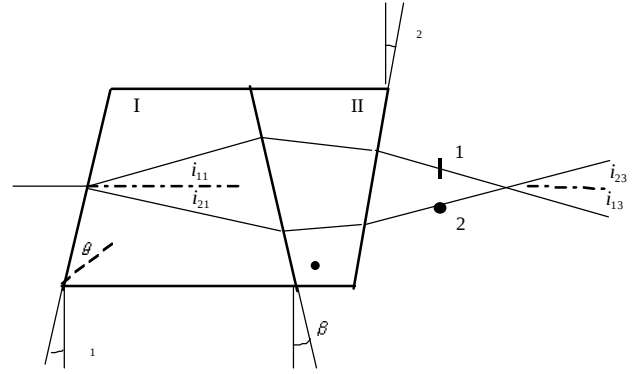


图 1 棱镜结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of the prism structure

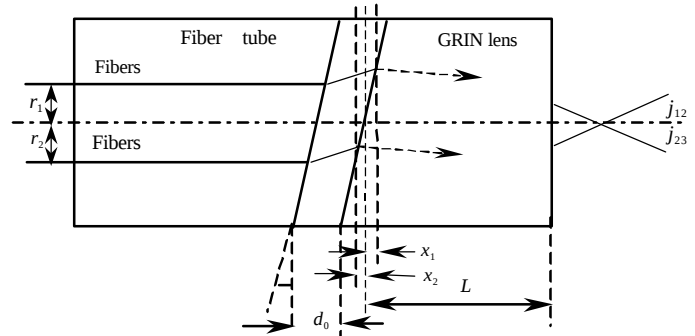


图 2 双光纤准直器光路图

Fig.2 Light path of dual optic fiber collimator

j_{12}' 和 j_{22}' 分别两圆柱形自聚焦透镜的假想入射角, 再由圆柱形自聚焦透镜的传输矩阵计算出最终出射光线的方向^[1]

$$\begin{pmatrix} r_{13} \\ j_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos[\sqrt{A}(L-x_1)] & \sin[\sqrt{A}(L-x_1)]/n_0\sqrt{A} \\ n_0\sqrt{A}\sin[\sqrt{A}(L-x_1)] & \cos[\sqrt{A}(L-x_1)] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{12} \\ j_{12}' \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} r_{23} \\ j_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos[\sqrt{A}(L-x_2)] & \sin[\sqrt{A}(L-x_2)]/n_0\sqrt{A} \\ n_0\sqrt{A}\sin[\sqrt{A}(L-x_2)] & \cos[\sqrt{A}(L-x_2)] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{22} \\ j_{22}' \end{pmatrix} \quad (7)$$

最终两光线的夹角为 $|j_{23}-j_{13}|$ 。

1.2 光束环路部件的设计

如图 1 所示, 任意偏振态的一束光从左至右入射该棱镜, 在晶体 I 中发生双折射, 寻常光 (O 光) 和非寻常光 (e 光) 间产生一个离散角而被分离。由于晶体 I 和晶体 II 的光轴相互垂直, 则在晶体 I 中的 O 光和 e 光分为晶体 II 中的 e 光和 O 光。设晶体 I 左端面、两晶体的粘结面和晶体 II 右端面与竖直方向的夹角分别为 g_1 , β 和 g_2 。则由折射定律可以计算出两光束经过两次折射后的出射角。

如图所示, 光束 1 在晶体 I 中为 e 光, 其能量传播方向为 i_{11} 。设其波矢量方向有与光轴的夹角为 q_{11} , 由如下的方程组可解得 q_{11}

$$n(q_{11})\sin(q_{11}+g_1)=\sin(g_1) \quad (8)$$

$$n(q_{11})=n_0n_e/\sqrt{n_0^2\sin^2(q+q_{11})+n_e^2\cos^2(q+q_{11})} \quad (9)$$

其中 n_0, n_e 分别为所用双折射晶体的折射率值。从而可由下式计算得到 i_{11} :

$$n_e^2\tan(i_{11}+q)=n_0^2\tan(q_{11}+q) \quad (10)$$

再通过晶体 II 的折射, 由下式可得其最终的出射角 i_{13} 。

$$n_e\sin(b+q_{11})=n_0\sin(b+i_{12}) \quad (11)$$

$$n_0\sin(g_2-i_{12})=\sin(i_{13}) \quad (12)$$

对于光束 2, 它在晶体 I 中为 O 光, 在晶体 II 中为 e 光, 通过折射定律可以方便地计算得到出射角 i_{23} , 见式 (13)~(15)

$$n_0\sin(i_{21}+g_1)=\sin(g_1) \quad (13)$$

$$n_e\sin(b+i_{21})=n_e\sin(b+i_{22}) \quad (14)$$

$$n_e\sin(g_2-i_{22})=\sin(i_{23}) \quad (15)$$

通过设计图 1 棱镜的各参数, 可以使 i_{13} 和 i_{23} 分别等于上述双光纤准直器的输出夹角 j_{13}, j_{23} , 实现很好的耦合。

但在实际制作中, 双光纤准直器的光纤头常常不能严格紧密排列且正好位于自聚焦透镜的对称轴上, 这样导致由双光纤准直器出射的两光束夹角与理论计算有一定的偏差, 使得实际的 $|j_{23}-j_{13}| \neq |i_{23}-i_{13}|$, 由于角度失配, 双光纤准直器与棱镜光路不能很好地耦合。

我们通过微量改变入射至棱镜对的光束入射角, 可以微量地调节其输出两偏振光束的夹角 $|i_{23}-i_{13}|$, 以满足与 $|j_{23}-j_{13}|$ 相等而保持匹配。在实际中用双折射晶体设计了一对棱镜与一理论计算夹角为 3.70° 的 SLW 双光纤准直器的匹配, 设棱镜对的入射角为 q_{in} 出射角为 q_{out} , 则 q_{in} 在 $-1.5^\circ \sim 1.5^\circ$ 的变化范围内, q_{out} 也随之有微量的变化 (见图 3)。这样即使加工的双光纤准直器的输出角度有微量的误差, 通过微调 q_{in} 仍可以使双光纤准直器与棱镜光路最终匹配良好。

2 应用

该偏振分光结构能很好地与双光纤准直器配合使用在许多光无源器件中。作者已将它应用于光学环形器和偏振光合束器中取得了良好的效果。

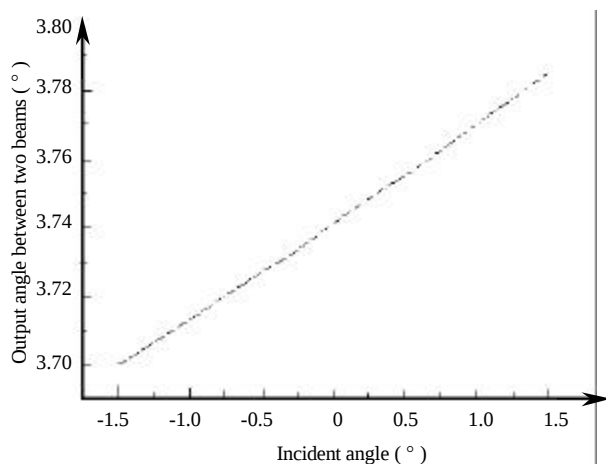


图 3 出射光束夹角与入射光束倾角的关系

Fig.3 Relationship between outgoing light angle and incident light angle

2.1 在偏振光合束器中的应用

偏振光合束器的功能是将两束偏振态相互平行的偏振光和为一束，它在有多个泵浦源的光放大系统中有着极为重要的应用。由图 1 可知只需将一保偏双光纤准直器和一个单光纤准直器置于其左右两端，便可实现此功能。现有用渥拉斯顿棱镜实现的产品面世，由于渥拉斯顿棱镜需要两入射光线的交点位于棱镜分界面处，而双光纤准直器的出射光束交点距离其端面非常近，通常约为 0.25mm。这就需要渥拉斯顿棱镜加工得非常薄，其加工和装配的难度相当大，而用图 1 的结构可以使两光束的交点位于棱镜外不远处，充分保证调节余量，同时棱镜尺寸不受过多约束，给加工和装配带来方便。这种方案制作出来的偏振光合束器插入损耗达到低于 0.2dB 水平，生产效率高。

2.2 在三端口光学环行器中的应用

光学环行器是一种非互易性光无源器件，Takao Matsumoto 和 Yohji Fujii 等人在早期对偏振无关型块状结构的光学环行器作了大量的研究^[2, 3]。他们设计的三端口或多端口环行器，每个输入输出端口都用了一个单独的准直器。而将双光纤准直器用于光学环行器是一种非常经济的选择，因为它相对于两个单光纤准直器的横向尺寸小了很多，可以大大节省双折射晶体和磁光晶体的开销。图 4 是将

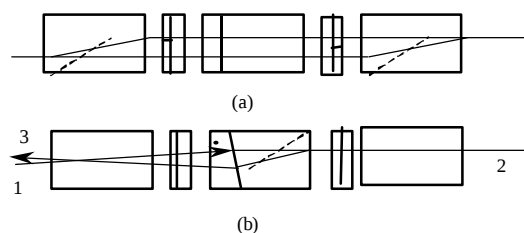


图 4 光学环行器的结构简图

Fig.4 Constitution of optical circulator

M.Koga 所设计的光学环行器^[4]改用一个双光纤准直器和一个单光纤准直器实现，这种方案的光学环行器原理图。其中的光束环路部件（BCC）由这种棱镜结构实现，（a）、（b）分别为俯视图和侧视图，端口 1 和端口 2 的出射光束经过偏振分光和旋光晶体组件（由磁光晶体和天然旋光晶体对组成）后变为两束平行且偏振态相同的偏振光，在侧视图中可以清晰的看到通过设计楔形走离型晶体的长度可以确保从端口 1 出射的光束和入射至端口 3 的光束的交点位于晶体左端晶体外，便于双光纤准直器的调节。整个器件设计得非常紧凑，而且稳定性良好，便于调节。实际由此制作出的光学环行器的插入损耗达到 0.4dB，隔离度达到-55dB 以下，PMD 约为 0.02ps。

3 结 论

本文讨论了一种新颖的偏振分光棱镜结构，它非常适合于与双光纤准直器配合使用，能很好地现角度匹配，而且有效地简化了光学无源器件的结构。实践证明这种设计有结构简单，尺寸小，易加工且稳定性好等优点。

参考文献：

- [1] YUAN S, RIZA N. General formula for coupling-loss characterization of single-mode fiber collimators by use of gradient-index rod lenses[J]. APPLIC OPTICS, 1999, 38(15): 3214-3222.
- [2] MATSUMOTO T. Polarisation-independent optical circulator coupled with multimode fibres[J]. Electron. Lett, 1980, 16(1): 8-9.
- [3] FUJII Y. High-Isolation Polarization-Independent Quasi-Optical Circulator[J]. J.Lightwave Technol, 1992, 10(9): 1226-1229.
- [4] KOGA M, MATSUMOTO T. Polarization-insensitive High-isolation Nonreciprocal Device for Optical Circulator Application[j]. Electron. Lett, 1991, 27(11): 903-904.