

# 偏振无关光隔离器的偏振相关损耗分析\*

虞国华<sup>1</sup> 方罗珍<sup>2</sup> 刘水华<sup>2</sup> 姚建<sup>2</sup> 江山<sup>2</sup> 黄德修<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>华中理工大学光电子工程系 武汉 430074 <sup>2</sup>武汉邮电科学研究院固体器件研究所 武汉 430074)

**提要** 在波动光学理论上,建立了求解光隔离器偏振相关损耗的理论模型,分析了影响光隔离器偏振相关损耗的因素,实际测量结果与理论分析相吻合。

**关键词** 光隔离器,偏振相关损耗,光纤通信

## 1 引言

随着光纤技术的高速发展,光隔离器在高速光纤通信、相干光通信、精密光学测量系统中的重要性越来越明显。特别是它在掺铒光纤放大器组件中的应用,可以有效地抑制掺铒光纤放大器的自激振荡。衡量与偏振无关光隔离器的一些重要参数为:插入损耗、回波损耗、反向隔离度、偏振相关损耗和偏振模色散。偏振无关的光隔离器有许多种类型,其中楔型双折射光隔离器<sup>[1]</sup>,由于其体积小、结构简单、插入损耗小而广泛被人们利用。

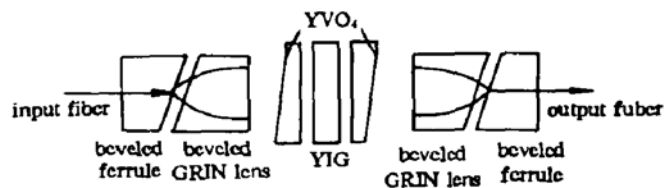


图1 带有斜面自聚焦透镜的楔型偏振无关光隔离器示意图

Fig. 1 A wedge-type polarization independent optical isolator with beveled GRIN lenses

为了增加光隔离器的回波损耗,滤除光隔离器本身回返光纤系统的影响,采用斜面耦合自聚焦透镜是一种行之有效的方法,如图1所示。同时为了得到小体积和高的反向隔离度,需要有高折射率双折射晶体。以上两种因素都将导致光学隔离器的偏振相关损耗(PDL)增加。

本文在波动光学理论和高斯光束传输理论上,提出了计算带有斜面自聚焦(GRIN)透镜的楔型光隔离器PDL的数学模型,并利用此模型分析了光隔离器的PDL。

## 2 理论模型的建立

如图2所示,一束光从折射率为 $n_1$ 的介质中斜入射到折射率为 $n_2$ 的介质中,假定 $s$ 表示振动方向平行于入射面的光分量, $p$ 表示振动方向垂直于入射面的光分量,由波动光学的理论可

\* 邮电部重点资助项目。

收稿日期: 1996-05-13; 收到修改稿日期: 1996-11-21

知,此时  $s$  方向的光能量透过率  $T_s$  与  $p$  方向的光能量透过率  $T_p$ , 不相等,这就产生了偏振相关损耗,而且有<sup>[2]</sup>

$$T_s = \left( \frac{2\sin\theta_i \cos\theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t)\cos(\theta_i - \theta_t)} \right)^2 \quad (1.a)$$

$$T_p = \left( \frac{2\sin\theta_i \cos\theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \right)^2 \quad (1.b)$$

因此,由界面产生的偏振相关损耗值 PDL 可表示为

$$PDL = 10\log \frac{T_s}{T_p} = -10\log[\cos^2(\theta_i - \theta_t)] \quad (2)$$

其中,  $\theta_i$  为入射角,  $\theta_t$  为入射光的折射角,它们满足折射定律,即

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t \quad (3)$$

从公式(2),(3)可以看出,入射角  $\theta_i$  越大,  $\theta_i$  与  $\theta_t$  间的差值越大,由此产生的 PDL 也越大。当  $\theta_i = 0$ , 即入射光垂直入射时,  $\theta_i = \theta_t = 0$ , 则  $PDL = 0$ 。

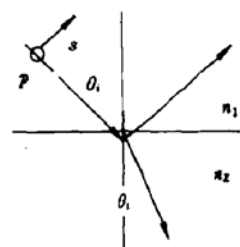


图 2 界面光反射和折射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reflection and refraction in the interface

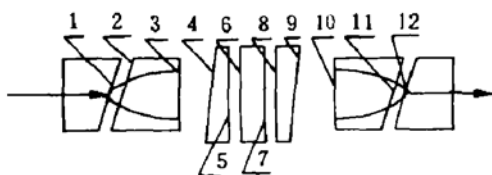


图 3 楔型光隔离器界面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the interface in the wedge-type optical isolator

有了以上理论基础,我们就可以进行计算带有斜面 GRIN 透镜楔型光隔离器的偏振相关损耗。由前面的分析可以知道,器件的偏振相关损耗主要产生在折射率发生突变的界面上。从图 1 可看到,一个光隔离器有 12 个界面:界面 1,12 为光纤与胶的界面,界面 2,11 为 GRIN 透镜与胶的界面,界面 3,10 为 GRIN 透镜与空气的界面,界面 4,5,8,9 分别为双折射晶体与空气的界面。界面 6,7 为旋光晶体与空气的界面,如图 3 所示。为了方便描述,用  $PDL_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 12$ ) 代表第  $n$  个界面的偏振相关损耗值,  $\theta_i^n, \theta_t^n$  分别代表第  $n$  个界面入射光的入射角和折射角。

在进行计算时  $PDL_3$  与  $PDL_{10}$  可忽略。这主要因为两个 GRIN 透镜的长度均为四分之一节距,入射到界面 3 和 10 上的高斯光是垂直入射的,即  $\theta_i^3 = \theta_i^{10} = \theta_t^3 = \theta_t^{10} = 0$ , 则  $PDL_3 = PDL_{10} = 0$ 。

首先考虑  $PDL_1, PDL_2, PDL_{11}, PDL_{12}$  的计算模型。从图 3 可知,入射光纤的端面是倾斜的,但是由于倾斜较小(一般为  $8^\circ$ ),所以可以近似认为从光纤端面输出的高斯光束仍是平面波圆高斯光束,即界面 1 上的所有入射光线的入射角  $\theta_i^1$  相等,且均等于光纤端面的倾斜角,利用公式(3)可求得  $\theta_t^1 = \arcsin\left(\frac{N_{\text{fiber}} \sin\theta_i^1}{N_{\text{glue}}}\right)$ , 式中  $N_{\text{fiber}}$  为光纤轴心折射率,  $N_{\text{glue}}$  为光纤与 GRIN 透镜间的胶的折射率。将  $\theta_i^1$  与  $\theta_t^1$  代入(2)式,就可求出  $PDL_1$ 。

从界面 1 透过的高斯光束的腰斑半径  $w_0$  约为  $4.5 \mu\text{m}$ , 当工作波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  时,该高斯光束的焦距  $f = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = 41.1 \mu\text{m}$ 。在实际制作的光隔离器中,界面 1 与 2 间胶的厚度  $< 20 \mu\text{m}$ , 因此,在计算  $PDL_2$  时,仍可认为界面 2 上的所有入射角均相等,且  $\theta_i^2 = \theta_i^1$ , 同样利用式(3)得到  $\theta_t^2$ 。同样将  $\theta_i^2, \theta_t^2$  代入(2)式可求出  $PDL_2$ 。

$PDL_{11}, PDL_{12}$  的求取类似于  $PDL_1, PDL_2$  的求法,此时  $\theta_i^{12} = \theta_i^1$ , 再利用折射定律依次求出  $\theta_t^{12}, \theta_i^{11}, \theta_t^{11}$ , 然后求出  $PDL_{11}, PDL_{12}$ 。

在提出  $PDL_n$  ( $n = 4, 5, \dots, 9$ ) 的计算模型时,先要讨论 GRIN 透镜对高斯光束的传输特性。

假定入射高斯光束的腰斑半径为  $w_{in}$ , 经四分之一节距长的 GRIN 透镜转换后, 其腰斑半径  $w_{out}$  为如下的数学表达式<sup>[3]</sup>

$$w_{out} = \frac{\lambda}{N_{GRIN} \sqrt{A} \pi w_{in}} \quad (4)$$

式中的  $N_{GRIN}$  为 GRIN 透镜的轴心折射率,  $\sqrt{A}$  为 GRIN 的聚焦常数,  $\lambda$  为工作波长。将实际用到的一种 GRIN 透镜参数:  $N_{GRIN} = 1.5901$ ,  $\sqrt{A} = 0.326 \text{ mm}^{-1}$  及  $\lambda = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $w_{in} = 4.5 \text{ }\mu\text{m}$  代入(4)式, 可得  $w_{out} = 210.8 \text{ }\mu\text{m}$ , 则经 GRIN 透镜变换后的高斯光束的焦距为  $90.1 \text{ mm}$ 。变换后高斯光束的焦距远远大于变换前的焦距, 这也是 GRIN 透镜能提高光纤与光纤间间距耦合效率的原因所在。我们知道楔型偏振无关光隔离器的特点之一是其外形尺寸较小, 界面 3 与界面 10 间的距离仅为  $3 \text{ mm}$  左右, 因此如图 3 所示, 两 GRIN 透镜间的间距远小于所传输高斯光束的焦距。这样, 在简化数学模型时, 完全可以近似认为在两 GRIN 透镜间所传输的高斯光束的波形是平面波。即针对两 GRIN 透镜间的任何一界面来说, 入射光有相同的入射角。

下面分析界面 4, 5, 8 及 9 的偏振相关损耗。若双折射晶体为 YVO<sub>4</sub> 晶体, 则晶体相对  $e$  光的折射率  $n_e = 2.2$ , 相对  $o$  光的折射率  $n_o = 2.0$ 。当界面上镀有  $o$  光和  $e$  光有相同透过率的增透膜时, 可取双折射晶体的折射率  $N$  为  $n_o$  与  $n_e$  的中间值, 这样就简化了求取因角度引起的偏振相关损耗的计算模型。当双折射晶体的楔形角为  $7^\circ$  时, 即  $\theta_1^i = 7^\circ$ , 并假定  $o$  光平行于入射面,  $e$  光垂直于入射面。则利用公式(2), (3) 得  $\theta_1^t = \arcsin\left(\frac{\sin\theta_1^i}{N}\right)$ ;  $\text{PDL}_1 = -10 \log \cos^2(\theta_1^t - \theta_1^i)$ 。类似可求得  $\text{PDL}_5, \text{PDL}_8, \text{PDL}_9$ 。

$\text{PDL}_6, \text{PDL}_7$  的求取类似于  $\text{PDL}_1, \text{PDL}_3$  的求取, 这里就不再赘述。

### 3 结果与分析

若取光纤轴心折射率为 1.45; 光纤与 GRIN 透镜间胶的折射率为 1.52; GRIN 透镜轴心折射率为 1.59; 双折射晶体  $o$  光折射率为 2.0;  $e$  光折射率为 2.2; 旋光晶体(YIG)折射率为 2.17; 及光纤端面与 GRIN 透镜斜面的倾斜角为  $7^\circ$ , 双折射晶体的楔角为  $7^\circ$ , 则光隔离器各个面的入射角、折射角与偏振相关损耗如表 1 所示, 表中  $n$  表示第  $n$  个面,  $\text{PDL}_n$  表示第  $n$  个面的偏振相关损耗值。从表 1 可以看出, 光隔离器的偏振相关损耗主要来自于界面 4, 5, 6, 7, 8, 9 的偏振相关损耗, 而这主要是因为这些界面两边高折射率差所导致的。

表 1 光隔离器及其各个界面的最大偏振相关损耗

Table 1 The biggest PDL of each interface in the isolator and of the isolator

$n$	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_t(^{\circ})$	$\text{PDL}_n \text{ (dB)}$	$n$	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_t(^{\circ})$	$\text{PDL}_n \text{ (dB)}$
1	8.00	7.63	0.00018	7	3.55	7.73	0.0231
2	7.63	7.29	0.00015	8	7.73	3.67	0.0218
3	0	0	0	9	3.33	7.00	0.0178
4	7.00	3.33	0.0178	10	0	0	0
5	3.67	7.73	0.0218	11	7.29	7.63	0.00015
6	7.73	3.55	0.0231	12	7.63	8.00	0.00018
total							0.12626

图 4 给出了由计算所得光隔离器的偏振相关损耗与双折射晶体倾角的关系曲线。从图中

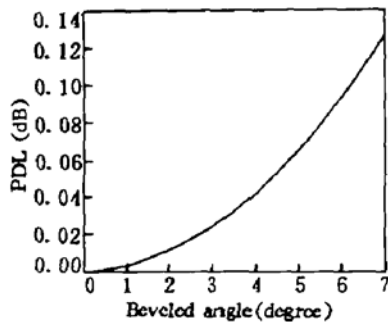


图 4 光隔离器的偏振相关损耗与双折射晶体倾角的关系曲线

Fig. 4 The relative curve between PDL of the optical isolator and beveled angle of the birefringent crystal

可以看出,随着双折射晶体的倾角的增加,偏振相关损耗也随之增加,而且增加的幅度也比较大。因此,要获得低偏振相关损耗的偏振无关光隔离器,就应该使双折射晶体的楔角做得越小越好。然而,为了同时得到高隔离度的光隔离器,选择双折射晶体的楔角为  $7^\circ$  较为合适。

实验测试中,采用了 HP-8509B 型光波偏振分析仪,其 PDL 的测量精度为 0.01 dB;光源采用 HP-8668A 型可调谐激光器,该激光器出射的波长在 3 dB 处的带宽为 0.01 nm。实际被测的偏振无关光隔离器的各元器件的折射率和斜面参数与理论计算值一致。通过测试我们实际制作的偏振无关光隔离器的 PDL,得到的测试结果范围为 0.07~0.15 dB。

从实验结果和理论计算结果可以看到:理论计算值在实验测量范围之内。实验结果与理论计算相吻合。

### 参 考 文 献

- 1 Masataka Shirasaki, Kunihiro Asama. Compact optical isolator for fiber using birefringent wedges. *Appl. Opt.*, 1982, 23(23): 4296~4299
- 2 董守荣. 波动光学. 武汉:华中理工大学出版社,1988年版,34~43
- 3 Toyokazu Sakamoto. Coupling characteristic analysis of single-mode and multimode optical-fiber connectors using gradient-index-rod lenses. *Appl. Opt.*, 1992, 31(25): 5184~5190

## Analysis on Polarization-dependent Loss of a Polarization-independent Optics Isolator

Yu Guohua Fang Luozhen\* Liu Shuihua\* Yao Jian\*  
Jiang Shan\* Huang Dexiu

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

\* Solid State Devices, Wuhan Research Institute of Post & Telecommunications, Wuhan 430074)

**Abstract** On the basis of the theory of wave-optics, a theoretical model used to compute the polarization-dependent loss of a polarization-independent isolator is established. Some factors which influence the polarization-dependent loss of the isolator are discussed. Experimental results agree with the theoretical analysis.

**Key words** optical isolator, polarization-dependent loss, optical fiber communication