

文章编号: 0253-2239(2003)07-0870-4

基于内反射效应的可变光学衰减器*

刘志强 曹庄琪 沈启舜

(上海交通大学物理系导波光子实验室, 上海 200240)

摘要: 提出一种基于内反射原理的可变光学衰减器, 这种利用一加长的棱镜和涂于棱镜上下两底面的 SiO₂ 薄膜的简单结构, 使随入射角变化的反射光实现弱偏振相关和大动态范围的衰减。

关键词: 光学元器件; 内反射; 可变光学衰减器; 偏振相关损耗; 溶胶-凝胶法

中图分类号: TH744 文献标识码: A

1 引 言

近年来, 可变光学衰减器由于在密集波分复用 (DWDM) 系统中的应用前景, 已引起广泛的重视。它可用于放大器增益的控制, 以弥补因波长不同而产生的增益不均衡; 也可用来直接控制半导体激光器的驱动电流, 以便防止因电流的变化而引起的波长漂移^[1]; 可变光学衰减器也被广泛地用于使用激光器的其他工业、军事和航天航空部门^[2]。

按照不同的工作原理, 可变光学衰减器可分为光纤位移型、微光机电型、液晶型和热光、电光效应型等。利用内反射原理可实现角度和折射率的测

量^[3,4], 但到目前为止, 尚未有利用内反射原理制备可变光学衰减器的报道。

本文提出了一种棱镜-薄膜结构的可变光学衰减器。根据内反射原理, 这种结构可实现低插入损耗、高动态范围和弱偏振相关的光强衰减。

2 工作原理

首先, 考察激光光束入射于图 1 所示简单棱镜, 在棱镜底面引起的内反射现象。在这种情况下, 棱镜底面的光强反射率由菲涅耳公式来描述

$$R = |r_{02}|^2 = \begin{cases} \left| \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_2 \cos \theta_2}{n_0 \cos \theta_0 + n_2 \cos \theta_2} \right|^2, & \text{TE 入射} \\ \left| \frac{n_2 \cos \theta_0 - n_0 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_2} \right|^2, & \text{TM 入射} \end{cases} \quad (1)$$

其中 r_{02} 为棱镜空气界面的振幅反射率, θ_0 和 θ_2 分别为棱镜空气界面的入射角和折射角。设入射光波长为 $\lambda = 832 \text{ nm}$, ZF7 棱镜的折射率 $n_0 = 1.75$, 空气折射率为 $n_2 = 1.0$ 。这种情形下, 光束在棱镜底面的全反射临界角 $\theta_c = \arcsin(n_2/n_0) = 34.85^\circ$ 。将(1)式的反射率折算成衰减量, $A = 10\lg R$, 得到的理论衰减曲线如图 1 所示。偏振相关损耗 $L_{\text{PD}} = 10\lg(R_{\text{max}}/R_{\text{min}})$ 。因为任一线偏振光都可以分解成电矢量振动方向垂直于入射面 (TE) 与电矢量振动方向平行于入射面 (TM) 两个方向的分量, 其反射

率总是介于 TM 偏振光入射时的光强反射率 R_{TM} 和 TE 偏振光入射时的光强反射率 R_{TE} 之间。所以, 这里的偏振相关损耗对应于 TE 衰减量与 TM 衰减量之差的绝对值, 即

$$L_{\text{PD}} = |10\lg(R_{\text{TM}}/R_{\text{TE}})| = |A_{\text{TM}} - A_{\text{TE}}|.$$

由图 1 可知, 简单棱镜引起的衰减具有极强的偏振相关性, 偏振相关损耗极大。而且, 其 TE 偏振入射时的动态衰减范围太小。例如, 在棱镜底面内反射入射角达到 30° 时, TM 入射光的衰减量达到 38 dB 以上, 而此时 TE 入射光的衰减量只有 6 dB 左右。

为了增大动态衰减范围并降低偏振相关性以制备偏振无关的实用化可变光衰减器, 考虑在棱镜底面制备一层介质薄膜, 如图 2 所示。此时, 根据菲涅耳公式, 有

* 上海市科学技术委员会资助项目 (012262021)

E-mail: zqliu2002@hotmail.com

收稿日期: 2002-06-07; 收到修改稿日期: 2002-07-15

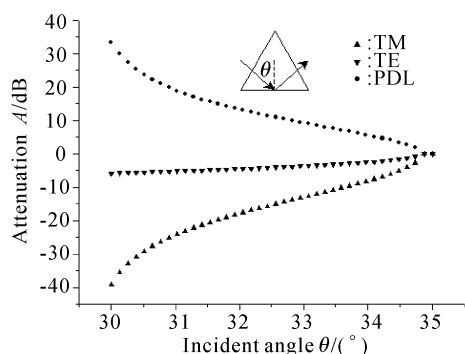


Fig. 1 Theoretical attenuation curve of simple prism based on internal reflection

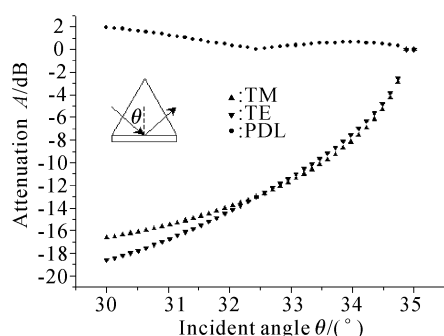


Fig. 2 Theoretical attenuation curve of prism-film configuration (reflecting once)

$$R = |r|^2 = \frac{r_{01}^2 + r_{12}^2 + 2r_{01}r_{12}\cos(2\kappa_1 h)}{1 + r_{01}^2 r_{12}^2 + 2r_{01}r_{12}\cos(2\kappa_1 h)}, \quad (2)$$

这里 r 为棱镜底面上的振幅反射率, 定义为

$$r = \frac{r_{01} + r_{12}\exp(2i\kappa_1 h)}{1 + r_{01}r_{12}\exp(2i\kappa_1 h)}, \quad (3)$$

r_{01} 、 r_{02} 分别为棱镜-薄膜界面和薄膜-空气界面的振幅反射率,

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{\epsilon_j \kappa_i - \epsilon_i \kappa_j}{\epsilon_j \kappa_i + \epsilon_i \kappa_j}, & \text{TM 入射} \\ \frac{\kappa_i - \kappa_j}{\kappa_i + \kappa_j}, & \text{TE 入射} \end{cases} \quad (4)$$

h 为薄膜层厚度, 其他参量定义分别为 $\kappa_0 = k_0 n_0 \cos \theta$, $\beta = k_0 n_0 \sin \theta$, $\kappa_1 = (k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}$ 和 $\kappa_2 = (k_0 n_2 - \beta^2)^{1/2}$, k_0 为真空中的波数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 。仍旧设入射光波长为 $\lambda = 832 \text{ nm}$, 棱镜的折射率 $n_0 = 1.75$, 空气折射率为 $n_2 = 1.0$, 当制备得到的 SiO_2 薄膜的折射率为 $n_1 = 1.18$, 薄膜厚度为 $h = 235 \text{ nm}$ 时, 根据 (2) 式的反射率折算成衰减量得到图 2 所示的理论衰减曲线。与图 1 相比, 薄膜的引进确实改善了简单棱镜引起的衰减的偏振相关性, 提高了动态衰减范围。采用这种棱镜-薄膜结构, 理论上当衰减达到 15 dB 时, 偏振相关损耗可小于 1 dB。实际上, 这种参量仍不能达到实用化的要求, 为此设计了图 3 所

示的结构。这是一个加长的等腰棱镜, 并在棱镜的上下底面制备相同的薄膜。棱镜的长度允许入射光在棱镜下底面反射两次, 而在棱镜上底面反射一次。这样的三次反射的反射率可用 (2) 式中反射率的三次方 (R^3) 描述。这种设计不仅大大地增加了衰减的动态范围, 而且, 进一步减弱了系统的偏振相关性。当 $h = 243 \text{ nm}$, 其他参量如上所述, 由图 3 显示的这种新设计的结构的理论衰减曲线可知, 该系统的动态衰减范围达到 30 dB 时, 其偏振相关损耗不到 0.5 dB。在不改变系统基本结构和参量的情况下, 通过采用更多次数的反射, 还可以得到更大范围的衰减并进一步降低偏振相关性。

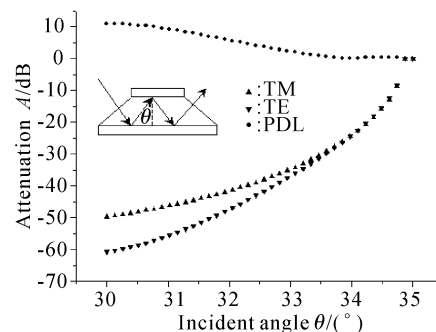


Fig. 3 Theoretical attenuation curve of prism-film configuration (reflecting three times)

3 实验和结果

实验上使用的是截面为等腰梯形的 ZF7 棱镜, 其底角为 45° , 上底长度为 2 cm, 下底长度为 4 cm, 高为 1 cm, 其折射率 $n_0 = 1.75$ 。采用溶胶-凝胶法来制备光学薄膜是最近的一个研究热点。用乙醇稀释的正硅酸乙脂 (TEOS) 在碱 (NH_3) 或酸 (HCl) 的催化作用下, 发生水解反应, 生成 SiO_2 溶胶。溶胶成膜时, 利用旋涂法和提拉法都可以得到透光性较好的薄膜。相比之下, 提拉法所成薄膜厚度比较均匀, 故使用较多。对于溶胶-凝胶法和提拉法制备的 SiO_2 薄膜, 根据经验, 当摩尔比 $x(\text{TEOS}) : x(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) : x(\text{NH}_3) : x(\text{H}_2\text{O}) = 1 : 37 : 0.66 : 2.5$ 时, 薄膜折射率将在 1.18 左右。对于这样的溶胶, 当提拉速率为 20 cm/min 时, 得到的薄膜厚度约为 245 nm。

实验中采用的光源是 LaserMax 公司生产的半导体激光器, 其波长为 832 nm, 发散角 0.5 mrad, 光束腰斑大小为 1.5 mm。光的接收采用硅探测器 (日本滨松 S2387-1010R)。图 4 是测试装置图, 不同偏振入射时得到的反射率曲线和衰减曲线分别如

图 5 和图 6 所示。由图 6 可知,所得样品衰减器在衰减达到 20 dB 时,其偏振相关损耗小于 0.5 dB。

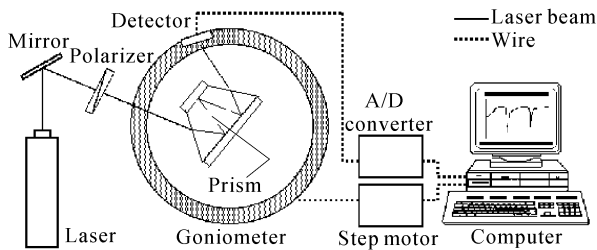


Fig. 4 Equipment of experimental measurement

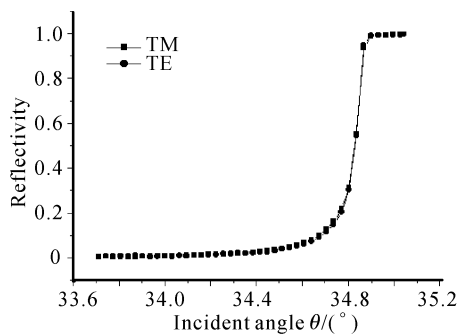


Fig. 5 Experimental reflectivity curve

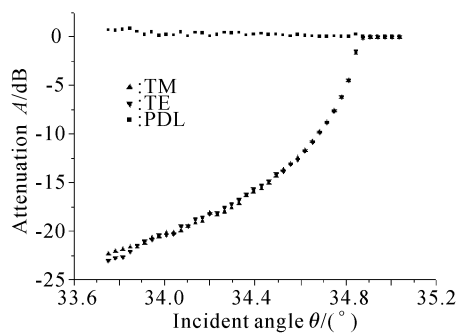


Fig. 6 Experimental attenuation curve

4 讨 论

在本文的实验条件下,误差主要来源于探测电路噪声、外界杂散光及激光光束发散角。当角度位于全反射角附近时,因为探测到的光强较强,实验误差主要由激光光束发散角引起;但是,在角度比较小时,电路噪声和杂散光的影响相对就比较大。在入射角为 34.9° 时,原则上角度已经大于全反射角,应该没有衰减。这时,实验上约 0.05 dB 的衰减完全是由误差引起的;在入射角为 34.2° 时,理论计算的衰减结果达到了 20 dB,但实验测得的衰减只有 19 dB 左右。因为这时的光强比较小,实验误差的干扰作用达到了 1 dB。

实验中主要研究了三次反射情况。对于更多次

反射情形,原则上,反射次数增多,可以进一步提高动态衰减范围并降低偏振相关损耗。但是,反射次数越多,临界角位置附近的实验结果受光束平行度影响越大。所以,对于一般的应用情况而言,三次反射是个比较好的选择。

利用本文提出的棱镜-薄膜衰减结构,采用三次反射,在精确控制薄膜参量的情况下,其性能可以得到进一步的提高。理论计算表明,当 $\lambda = 832 \text{ nm}$, $n_0 = 1.75$, 精确控制薄膜折射率 $n_1 = 1.32$, 薄膜厚度 $h = 217 \text{ nm}$, 可使得衰减达到 45 dB 时,偏振相关损耗小于 0.5 dB。不过,折射率 $n_1 = 1.32$ 且成膜性能较好的涂膜材料比较难于获得。根据文献[5]的结果,采用碱酸两步溶胶-凝胶法,可以控制薄膜折射率在 1.18 到 1.41 之间连续变化。但是,如何精确地控制薄膜参量(厚度、折射率)仍旧是一个需解决的课题。

对于入射波长为 1300 nm 的激光,当 $n_0 = 1.75$, $n_1 = 1.32$, $n_2 = 1.0$ 时,如果能通过精确控制薄膜厚度使 $h = 340 \text{ nm}$, 那么,如图 7 所示,在衰减达到 50 dB 时,偏振相关损耗小于 0.5 dB。这显示了这种衰减器在通讯中的潜在应用价值。

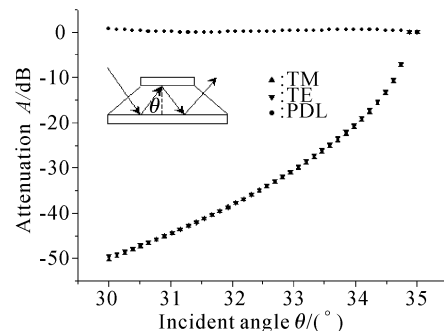


Fig. 7 Theoretical attenuation curve of the proposed device in NIR region

因为我们提出的衰减器基于简单的反射型棱镜薄膜结构,其结构非常简单。这种装置的插入损耗主要由棱镜两臂上光线入射和出射时的反射引起,所以,其插入损耗是非常低的。在本文的实验中,实验得到 TE 和 TM 入射的插入损耗都仅为 0.6 dB 左右。如果进一步优化棱镜几何参量,例如棱镜底角设定在全反射临界角处,使器件工作时光线尽量以比较小的角度入射,那么,插入损耗可以得到进一步的降低。以溶胶-凝胶法和提拉法制得的薄膜作为工作物质,薄膜的制备过程简单,成本也比较低廉。实验结果显示,这种反射型可变光强衰减器具有广阔的市场应用前景。

作者感谢同济大学物理系沈军教授、付甜同学，华东理工大学李旭华同学在溶胶-凝胶法制备 SiO₂ 光学薄膜方面所提供的建议和帮助。

参 考 文 献

- 1 Riza N A, Sumriddetchkajorn S. Fault-tolerant variable fiber-optic attenuator using three-dimensional beam spoiling. *Opt. Commun.*, 2000, **185**(1~3):103~108
- 2 Asselin D, Galarneau P, Lacroix J M *et al.*. Holographic variable attenuator for high power Nd:YAG lasers. *Opt. and Quant. Electron.*, 1994, **27**(12):1427~1432
- 3 Huang P S, Ni J. Angle measurement based on the internal-reflection effect using elongated critical-angle prisms. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(13):2239~2241
- 4 Kasunic K J. Comparison of Kretschmann-Raether angular regimes for measuring changes in bulk refractive index. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(1):61~64
- 5 WuGuangming, Wang Jue, Shen Jun *et al.*. Effect of experimental conditions on the structure and properties of nano-porous silica films. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **50**(1):175~181 (in Chinese)

A Variable Optical Attenuator Based on Internal Reflection

Liu Zhiqiang Cao Zhuangqi Shen Qishun

(Guided Wave Optoelectronics Laboratory, Department of Physics,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

(Received 7 June 2002; revised 15 July 2002)

Abstract: A variable optical attenuator (VOA) based on the internal reflection effect is proposed. This simple configuration makes use of an elongated prism with SiO₂ thin film on both underside of it to realize polarization insensitivity and large range of dynamic attenuation. As a result, a sample VOA was obtained with an attenuation range above 20 dB and polarization dependent loss below 0.5 dB experimentally.

Key words: optical device; internal reflection effect; variable optical attenuator; polarization dependent loss; sol-gel technique