

# 一种具有偏振保持能力的光纤耦合声光器件

陈华志, 刘 伟, 吴中超, 吴 畏

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

**摘 要:**该文报道了一种具有偏振保持能力的光纤耦合声光器件,对声光介质及保偏光纤的偏振特性进行了分析,并对器件设计思路及性能参数进行了介绍。样品器件采用  $\text{TeO}_2$  作为声光介质;PM980 光纤作为耦合光纤;在工作波长 1 053 nm、频率 100 MHz 下获得插入损耗为 2.4 dB、通断消光比为 50 dB、偏振消光比为 22.24 dB。

**关键词:**光纤耦合声光器件;偏振保持;声光介质;插入损耗;偏振消光比

**中图分类号:**TN384

**文献标识码:**A

## A Fiber Coupled Acousto-optic Device with Polarization Maintaining Ability

CHEN Huazhi, LIU Wei, WU Zhongchao, WU Wei

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** This paper reported a fiber coupled acousto-optic device with polarization maintaining ability. The polarization characteristics of acousto-optic medium and polarization maintaining fiber were analyzed, and the design and performance parameters of the device were also introduced. The experimental device using  $\text{TeO}_2$  as acousto-optic medium, PM980 fiber as coupling fiber. A result of insert loss 2.4 dB, extinction ratio 50 dB and polarization extinction ratio 22.24 dB has been obtained at 1 053 nm operating wavelength and 100 MHz operating frequency.

**Key words:** fiber coupled acousto-optic device; polarization maintain; acousto-optic medium; insert loss; polarization extinction ratio

### 0 引言

光纤耦合声光器件(光纤声光器件)是 20 世纪末发展起来的新型光电子器件,这类器件在自由空间光声光器件的基础上,采用光导纤维进行光路耦合,在光纤系统中可改变光的传播特性。光纤声光器件是一种直列式器件。与自由空间光声光器件相比,其采用全固化光路,在接入光纤系统后不需进行光路调节,具有使用方便,易于集成,可靠性高等特点。经过多年的发展,光纤声光器件已开发出光纤声光调制器、移频器及 Q 开关等不同类型的功能器件,被广泛应用于光信号处理、光纤传感、光纤激光器等领域<sup>[1]</sup>。

目前光纤声光器件主要采用非偏振保持光纤进行光路耦合,器件本身不具备偏振保持能力。随着光偏振技术在激光雷达及水听传感等系统中的应用,需要一种能用于保偏光纤系统的光纤声光器件。本文介绍了一种具有偏振保持能力的光纤声光器件(保偏光纤声光器件)设计思路,并开发出实用器件,

在相干探测系统及光纤传感、光信号处理等领域具有广阔的应用前景。

### 1 工作原理

保偏光纤声光器件由输入、输出光纤和自由空间光声光器件构成,内部结构包括安装有压电换能器的声光介质、匹配电路板和光纤耦合系统,如图 1 所示。驱动信号经匹配电路加载于压电换能器上,换能器通过反压电效应激发超声波传入声光介质,引起声光介质折射率周期性变化,形成折射率光栅。输入光纤导入的激光经折射率光栅后发生布喇格衍射,一级衍射光由输出光纤导出。器件输入、输出光纤均采用保偏光纤。

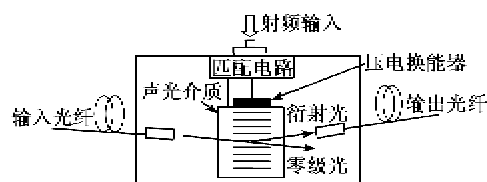


图 1 光纤声光器件原理

收稿日期:2014-08-27

作者简介:陈华志(1984-),男,重庆人,工程师,硕士,主要从事声光技术的研究。

## 2 声光介质及保偏光纤偏振特性

### 2.1 声光介质的偏振特性

常用的声光介质的材料有熔石英、重火石玻璃、 $\text{TeO}_2$  晶体、 $\text{PbMoO}_3$  (PM) 晶体、 $\text{LiNbO}_3$  (LN) 晶体等,其中  $\text{TeO}_2$ 、PM 晶体由于具有高的声光优值,能在较小尺寸及较低驱动功率下获得高的衍射效率,适合制作光纤声光器件。 $\text{TeO}_2$ 、PM 同属四方晶系的单轴晶体,为各向异性材料,用于保偏光纤声光器件中的切向及对应声光特性参数如表 1 所示。

表 1  $\text{TeO}_2$ 、PM 的切向和对应特性参数

材料名称	通声方向	声速/(m/s)	声光优值 $M_2$ /( $10^{-15} \text{ ms}^2/\text{kg}$ )	
$\text{TeO}_2$	[001]	4 203 (纵波)	34.5	$o$ 光
			25.6	$e$ 光
PM	[001]	3 632 (纵波)	36.1	$o$ 光
			36.3	$e$ 光

晶体材料的光学性质可通过折射率椭球进行描述<sup>[2]</sup>,即

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (1)$$

式中  $n_i$  ( $i=1,2,3$ ) 为晶体主轴折射率。对单轴晶体材料有  $n_1=n_2=n_o$ ,  $n_3=n_e$  ( $n_e$  为  $e$  光折射率;  $n_o$  为  $o$  光折射率)。单轴晶体在任意光波矢方向上存在 2 个偏振方向相互垂直的本征模式,即  $e$  光和  $o$  光。 $o$  光为正常光,  $n_o$  与光波矢方向无关;  $e$  光为反常光, 折射率  $n_e$  为光波矢方向与光轴夹角  $\theta$  的函数  $n_e(\theta)$  (对  $\text{TeO}_2$ 、PM 晶体光轴方向为 [001] 方向) 为

$$n_e(\theta) = \left[ \frac{\sin^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_e^2} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

考虑线偏光沿晶体 [100] 方向传播,此方向对应的 2 个本征模式偏振方向分别为  $e$  光 [001] 方向和  $o$  光 [010] 方向,此时  $\theta=90^\circ$ 。当入射光偏振方向与本征模式偏振方向不同时,将被分解到 2 个本征模式上同向传播。由于  $n_e \neq n_o$ ,两束光分量具有不同的传播速度,形成相位差,在晶体出射面得到的将是与光程有关的椭圆偏振光,如图 2 所示。只有当入射光偏振方向与 2 个本征模式偏振方向中任意一个相同时,在晶体出射面才能得到与入射光偏振状态一致的线偏振光。

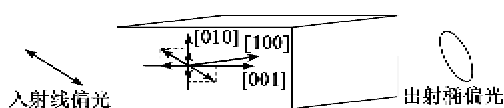


图 2  $\text{TeO}_2$ 、PM 晶体中光传输的偏振特性

以  $\text{TeO}_2$ 、PM 材料制作的光纤声光器件主要采

用正常布喇格衍射模式,声场模式为纵波,方向为 [001]。在加载声场后,晶体材料折射率椭球<sup>[3]</sup>变为

$$\begin{cases} \frac{x^2}{(n_1 + \Delta n_1)^2} + \frac{y^2}{(n_2 + \Delta n_2)^2} + \frac{z^2}{(n_3 + \Delta n_3)^2} = 1 \\ n_1 = n_2 = n_o \\ n_3 = n_e \\ \Delta n_1 = \Delta n_2 = -\frac{1}{2} n_o^3 p_{13} S_3 \\ \Delta n_3 = -\frac{1}{2} n_e^3 p_{33} S_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $S_3$  为声纵波沿 [001] 方向传播产生的应变向量元素;  $p_{13}$ 、 $p_{33}$  为晶体材料的有效声光系数。式 (3) 说明在此声场模式下晶体材料的折射率椭球大小在主轴方向上被压缩,而其主轴方向未发生旋转。因此当入射线偏光与晶体本征模式偏振一致时,正常布喇格衍射模式不会改变光场的线偏振特性。

### 2.2 保偏光纤中的偏振特性

保偏光纤是一种特殊的单模光纤,在制作过程中通过人为引入应力形成双折射,以消除外界因素对光纤传输特性的影响。保偏光纤在传光方向存在 2 个相互正交的主轴。2 个主轴方向具有不同折射率。折射率较大的主轴方向称为慢轴;折射率较小的主轴方向称为快轴,如图 3 所示。

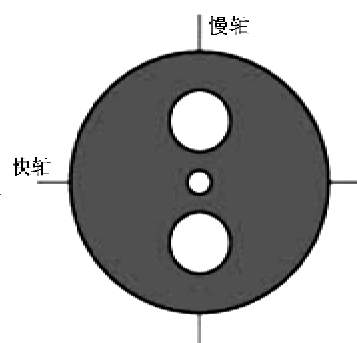


图 3 熊猫眼型保偏光纤端面结构与主轴方向

在保偏光纤中,当入射线偏振光的偏振方向与光纤主轴方向不一致时,光的偏振状态将随光纤长度的增加而呈周期性变化。一个周期长度称为光纤的一个拍长,一般高双折射光纤拍长为  $1 \sim 10 \text{ mm}$ <sup>[4]</sup>,此时保偏光纤失去偏振保持能力。只有当入射光偏振方向沿光纤主轴方向时,线偏振光才能保持偏振状态不变的向前传播。

## 3 器件设计

### 3.1 声光晶体设计

我们选择正常布喇格衍射模式,声光介质采用

TeO<sub>2</sub> 材料,压电换能器采用 36°Y-切 LN 晶片。在 TeO<sub>2</sub>(001)晶面制作通声面,用于安装压电换能器,(100)晶面作为通光面。为减小声场反射,我们在声光介质背面加装了吸声体,如图 4 所示。

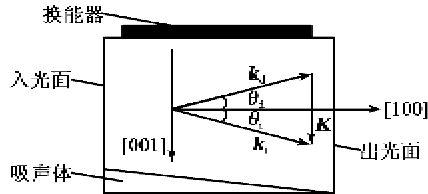


图 4 声光晶体结构与矢量布局

由正常布喇格衍射动量匹配条件,入射光波矢  $k_i$ 、衍射光波矢  $k_d$  与声波矢  $K$  间构成封闭等腰矢量三角形,有  $\theta_i = \theta_d = \theta_B$ 。 $\theta_i$ 、 $\theta_d$  分别为声光介质内部的入射角和衍射角,  $\theta_B$  为正常声光相互作用的布喇格角,且

$$\theta_B = \arcsin\left(\frac{\lambda f}{2nv}\right) \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为介质内的光波长;  $n$  为介质折射率;  $f$  为器件中心频率;  $v$  为介质中的声速。

由折射定律可得,介质外部入射光和衍射光与 [100] 方向夹角分别为

$$\theta_{\text{入射}} = \theta_{\text{衍射}} = \arcsin\left(\frac{\lambda f}{2v}\right) \quad (5)$$

压电换能器通过金属膜层键合到声光介质通声面,金属膜层设计为声学增透膜,在换能器背面制作表电极图形,换能器结构如图 5 所示。换能器工作在厚度驱动模式,换能器厚度设计为

$$l = \bar{v}/(2f_0) \quad (6)$$

式中:  $\bar{v}$  为 LN 晶片中压电增透声速;  $f_0$  为晶片半波长频率。

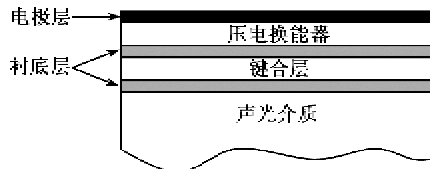


图 5 声光晶体换能器结构

TeO<sub>2</sub> 光学透明窗口为 0.35~5.00 μm,材料自身光学透过率约为 70%,为提高声光晶体的光利用率,通过在通光面上制作光学增透膜,其在特定波长的光学透过率可达 99%。

### 3.2 性能参数

保偏光纤声光器件的重要指标包括插入损耗、通断消光比、偏振消光比。

#### 3.2.1 插入损耗

器件的插入损耗是器件工作时输入、输出光强之比,即

$$\delta_{\text{Loss}} = -10\lg(P_{\text{out}}/P_{\text{in}}) \quad (7)$$

保偏光纤声光器件插入损耗来自光纤的耦合损耗、声光介质光学透过率及器件衍射效率 3 方面。其中衍射效率对插入损耗的影响最大。声光布喇格衍射效率为

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 LP}{2H}}\right) \quad (8)$$

式中:  $M_2$  为声光优值;  $L$  为换能器电极长度;  $H$  为换能器电极宽度;  $P$  为声场功率。

式(8)说明在设计保偏光纤声光器件时,在声功率一定的情况下为获得尽量高的衍射效率,应选择  $M_2$  高的本征模式作为偏振光在晶体中的传输模式,同时器件的表电极形状应该制作为窄而长的形状,以实现更低的器件插入损耗。

#### 3.2.2 通断消光比

通断消光比是指器件工作和关闭状态下输出的光强之比,即

$$\sigma_{\text{ER}} = -10\lg(P_{\text{off}}/P_{\text{on}}) \quad (9)$$

通断消光比主要用于描述器件光路输出的信噪比。输出光的基底噪声主要来自器件光路耦合时零级光对输出光的影响,以及驱动电源的开关比。要获得高的通断消光比,需要器件零级光与衍射光间夹角满足严格分离条件,同时驱动电源具有大的开关比。光纤声光器件入射光为高斯光束,器件严格分离条件为:零级光与衍射光方向夹角大于光束发散角的 2 倍,即

$$\beta = \frac{\lambda}{v} f \geq 2\Delta\varphi = \frac{8\lambda}{\pi d} \quad (10)$$

式中:  $\beta$  为零级光与衍射光方向夹角;  $\Delta\varphi$  为高斯光束的光发散角;  $d$  为高斯光束束腰。

#### 3.2.3 偏振消光比

偏振消光比是指器件输出端光纤慢轴方向光强与快轴方向光强之比,即

$$\sigma_{\text{PER}} = -10\lg(P_{\text{fast-axis}}/P_{\text{slow-axis}}) \quad (11)$$

理论上线偏振光沿慢轴进入保偏光纤,在传输过程中偏振状态保持不变。但由于光束在光路耦合时发生模式交叉,会有少量光进入光纤快轴。器件的偏振消光比好坏取决于器件的光路耦合质量,要获得高的偏振消光比,需提高器件的光路耦合精度。

#### 4 研制结果

基于以上设计方案,我们研制了一款保偏光纤声光器件样品,如图6所示。

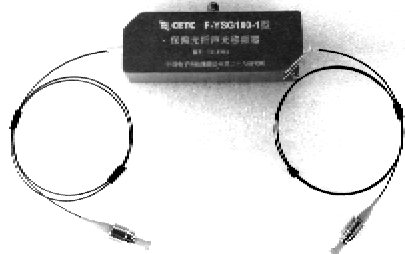


图6 研制样品图片

样品采用 PM980 光纤耦合,慢轴作为传光主轴;采用  $\text{TeO}_2$  作为声光介质, $\sigma$  光模式作为工作模式,器件工作波长 1 053 nm,工作频率 100 MHz。

器件测试仪器包括 1 053 nm 高稳定化光纤光源、光纤在线起偏器、驱动电源、光功率计及偏振分析仪。测试时,利用 1 053 nm 高稳定化光纤光源连接光纤在线起偏器产生线偏振光输入器件,同时利用驱动电源为器件提供频率为 100 MHz,功率为 1.5 W 的驱动射频信号。通过光功率计测得器件插入损耗为 2.4 dB;通断消光比大于 50 dB,通过偏振分析仪测得器件光纤输出端的偏振消光比为 22.24 dB。实测结果与设计值基本一致。器件偏振消光比测试实测结果如图7所示。

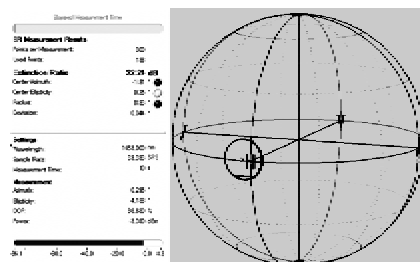


图7 样品偏振消光比实测结果

#### 5 结束语

本文介绍了一种保偏光纤声光器件的理论分析、设计思路,并按此设计思路制作出保偏光纤器件样品,验证了方案的可行性,在包括激光雷达、水听传感阵列在内的相干探测、光纤传感及光信号处理领域具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 吴中超,何晓亮,周建国,等. 光纤声光开关的研究及应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(增1): 124-128.  
WU Zhongchao, HE Xiaoliang, ZHOU Jianguo, et al. Design and application of fiber acousto-optic switch [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(suppl. 1): 124-128.
- [2] 石顺祥,王学恩,刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [3] 俞宽新,丁晓红,庞兆广. 声光原理与声光器件[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [4] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

(上接第227页)

- [5] LI Yushi, ZHOU Jun, ZHONG Ming, et al. Active and passive integration of vibration isolator based on piezoelectric-rubber[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2013, 33(4): 571-577.
- [6] 熊庆辉,张幽彤,刘光聪,等. 高压共轨压电喷油器迟滞控制研究[J]. 压电与声光, 2011, 33(2): 218-221.  
XIONG Qinghui, ZHANG Youtong, LIU Guangcong, et al. Study on the hysteresis control of the high-pressure piezoelectric injector of a common rail system[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2011, 33(2): 218-221.
- [7] WANG Daihua, ZHU Wei, YANG Qun. Linearization of stack piezoelectric ceramic actuator based on Bouc-Wen model[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(5): 401-413.
- [8] 赖志林,刘向东,耿洁,等. 压电陶瓷执行器迟滞的滑模逆补偿控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1281-1290.  
LAI Zhilin, LIU Xiangdong, GENG Jie, et al. Sliding

mode control of hysteresis of piezoceramic actuator based on inverse preisach compensation[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1281-1290.

- [9] 李明明,方勃,黄文虎. 基于压电堆和粘弹性材料的新型整星混合隔振系统[J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 148-152.
- [10] CHOI S B, HONG S R, HAN Y M. Dynamic characteristics of inertial actuator featuring piezoelectric materials; Experimental verification[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(4/5): 1048-1056.
- [11] WANG Daihua, ZHU Wei. A phenomenological model for pre-stressed piezoelectric ceramic stack actuators [J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(3): 1-11.
- [12] KIM S H, CHOI S B, HONG S R, et al. Vibration control of a flexible structure using a hybrid mount[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(1): 143-157.
- [13] IEEE Standard on Piezoelectricity. ANSI/IEEE Std176-1987 [S]. New York: American National Standards Institute, 1987.