

文章编号 : 0258-7025(2001)01-0033-03

一种可用于 XeCl 准分子激光传输的新型 金属光波导的研究*

雷 博 楼祺洪 董景星 魏运荣 黄 峰 李铁军 章 琳

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

摘要 研究了一种由表面镀铝的磷青铜作为反射面的矩形型波导传输紫外光束的性能。实验结果表明,这种波导能够有效地传输 308 nm 紫外光束,传输率可达 72%/m。充入氦气能有效地提高紫外光束的传输率。并对于不同弯曲程度对波导损耗的影响以及如何提高波导传输率,降低弯曲损耗进行了分析。

关键词 光波导, XeCl 准分子激光, 弯曲, 传输率

中图分类号: TN 248.2+2; TN 252 文献标识码: A

Study of the Alumium Hollow Light Guide for XeCl Excimer Laser Transmission

LEI Bo LOU Qi-hong DONG Jing-xing WEI Yun-rong

HUANG Feng LI Tie-jun ZHANG Ling

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A hollow light guide using the aluminum-phosphor bronze reflector to transmit UV laser beams has been studied. The delivery characteristics of the hollow light guide with different bending angle have been studied using XeCl excimer laser. The transmission of straight light guide was 72%/m and the transmission of bending wave guide of different radius of curvature have also been measured. The measurement showed that the transmission was proportional inversely to the bending radius R . Some methods to improve the transmission have been proposed. The experiment showed that helium gas displayed the weakest absorption and can improve the transmittance of hollow light guide. When the light beams with very small divergence propagate as whispering gallery modes, which propagate through the guide by successive reflections from the outer wall only, the transmission is independent of the curvature R .

Key words hollow light guide, XeCl excimer laser, bend, transmission

准分子激光是紫外波段最有效的相干光源之一,广泛地应用于许多领域,而这些应用又都要求对准分子激光器输出的紫外光实现有效地传输。目前紫外激光光束的传输是利用一系列紫外透镜和反射镜阵列以及利用空间滤波器的像传递技术来实现的^[1,2],但传输效率较低且易受环境限制。利用光纤实现光束传输具有高效率、可弯曲传输等优点,已得到广泛应用。但是以石英玻璃为材料的光纤对于传输低于 350 nm 的紫外光,传输效率不能令人满意,尤其在光纤弯曲传输时,对紫外光的损耗很大^[3,4],因此,需要一种能够高效传输紫外光束的新型波导来改变这一现状。

1 光波导的结构

图 1 为这种光波导的结构,它由两个平行的金属反射层、塑料间隔层以及包裹在最外层的聚乙烯套层构成。这种中空波导与介质波导相比,波导边界以外没有电磁场存在,能量的纵向受导借助于横向边界的反射且具有镜面特性,由于金属边界侧向封闭,也不可能产生能量的横向泄漏或辐射。

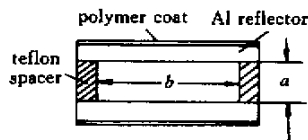


图 1 光波导的结构

Fig.1 Structure of the hollow light guide

$a = 0.5 \text{ mm}, b = 8 \text{ mm}$

* 863-416 资助项目。

因为中空型金属波导的传输损耗与金属材料性质有关,电导率越大,损耗越小,磁导率越大,损耗越大,因此为了有效地提高光波导的传输效率,需要一种对紫外光具有高反射率的非磁性良导体,同时为了使波导能用于光线的弯曲传输,又要求金属反射层的材料具有良好的韧性。而工业纯铝不仅对红外波段及可见光都具有很高的反射率,而且对紫外波段的光也有很高的反射率^[5],因此选取铝作为波导内层的反射材料。在实际运用中,以磷青铜表面镀铝膜代替纯铝,因为它的表面光洁度要高于工业纯铝,对紫外光的反射率也比纯铝的反射率高,而且磷青铜的耐腐蚀性和柔韧性又可以提高波导的物理性质。由于矩形金属光波导的传输损耗也包括非导体的间隔层表面的损耗,因此选取对紫外光辐射具有高反射性的聚四氟乙烯作为间隔层,保证了光波导的高传输率。采用高聚合体材料作为间隔层和最外面的包裹层既能起到支持和保护芯层的作用,同时又保证波导的韧性,使其可作大角度的弯曲。

2 光波导传输性能的研究

首先对直波导传输紫外光束的传输率进行了测量。实验采用的激光光源是 psx-100 型准分子激光器,重复率 30 Hz,输出波长 308 nm,由于工作在稳腔,其光束的发散角为 15 mrad。经过多次测量表明,这种矩形金属波导传输 308 nm 紫外光的传输率可达 72%/m。

在实际应用中,由于光波导中的光束传播方向的改变和光束传播轴的移位需要,光波导的弯曲是必要的,由于光波导的弯曲,引起波导材料在传输方向上的光学特性的改变,因此引入了传输的额外损耗即弯曲损耗。为了能使光线有必要的弯曲,同时又尽可能减少传输时的损耗,有必要对波导弯曲时的传输特性进行研究(图2)。

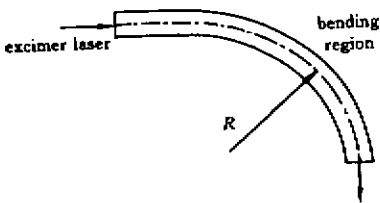


图2 具有金属反射层和非导体间隔层的中空型波导的弯曲

Fig.2 Hollow curved waveguide confined by metallic plates and dielectric spacer

对于光场在矩形波导中的传输行为,基本方法是通过麦克斯韦方程并利用完善的金属边界条件求解。与介质波导相比,矩形金属波导只应用于传输一个或少数几个 TE 或 TM 模,而在 $b > a$ 时, TE_{10} 模是传输的主模^[5]。场的结构简单、损耗小而且截止频率与窄边 a 无关,故可选适当的窄边来抑制高次模。因此也以 TE_{10} 模为例分析波导的传输特性。

以金属反射层与非导体的间隔层构成的矩形波导的传输损耗包括两部分:金属反射层的损耗以及非金属间隔层的损耗。对于两间隔为 a 的金属平板波导,其对 TE_{10} 模的传输损耗可表示为^[6]

$$\alpha_{10}^{TE} = \frac{\lambda^2}{8a^3} \left(\frac{R_s}{Z_0} \right) \quad (1)$$

式中 $R_s = \sqrt{\pi f \mu / \sigma}$ 代表波壁的表面电阻,取决于导体的材料,实验采用的铝电导率 σ 为 3.8×10^9 s/m。 Z_0 为平板之间的填充气体的阻抗。 λ 为传输的波长, a 为金属板的间隔距离。

此时金属平板传输的低损耗 TE_{10} 模的极化方向对于非金属间隔层来说是 TM_{10} 模,根据 Marcatili 的非导体平板波导对 TM_{10} 的传输损耗结论可得

$$\alpha_{10}^{TE} = \frac{\lambda^2}{b^3} \operatorname{Re} \frac{\nu^2}{(\nu^2 - 1)^{3/2}} \quad (2)$$

式中 ν 为非导体材料的复折射率,对于本实验的非导体材料 $\nu = 1.4 + (0.1)i$, b 为平板的间隔距离。

当光波导发生弯曲时,由于弯曲只发生在金属反射层,因此非金属的间隔层不影响弯曲损耗,间隔为 a 的金属波导的弯曲损耗表示为^[7]

$$\alpha_{10}^{TE}(R) = \frac{\lambda^2}{8a^3} \left(\frac{R_s}{Z_0} \right) \left(1 + 21 \frac{a^6}{\lambda^4 R^2} \right) \quad (3)$$

其中 R 为波导弯曲的曲率半径。

最后可得到由金属平板与非导体的间隔层构成的矩形波导的总传输损耗为

$$\alpha_{10}^{\text{total}}(R) = \frac{\lambda^2}{8a^3} \left(\frac{R_s}{Z_0} \right) + \frac{\lambda^2}{b^3} \operatorname{Re} \frac{\nu^2}{(\nu^2 - 1)^{3/2}} + \frac{\lambda^2}{8a^3} \left(\frac{R_s}{Z_0} \right) \left(21 \frac{a^6}{\lambda^4 R^2} \right) \quad (4)$$

由上式可以看出,由于弯曲波导引入的损耗与曲率半径的平方成反比,当曲率半径增大时弯曲产生的损耗降低。特别是,由于紫外光的波长很短,比可见光与红外光的弯曲损耗更大,因此为了使波导能有效地进行紫外光的低损耗弯曲传输,在保证直波导有足够高的传输率的前提下,需要将波导的窄边即金属平板的间距尽可能地缩短。

对这种以镀铝的磷青铜作为金属反射面,聚四

氟乙烷作为间隔层的矩形波导弯曲传输损耗进行了实验,图3为光波导的传输率随曲率半径变化的曲线,其中传输率已经以直波导为标准作了归一化。

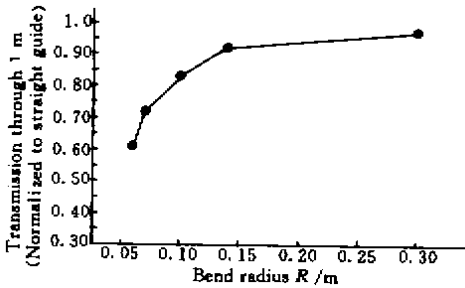


图3 中空型波导对 XeCl 准分子激光的传输率随曲率半径的变化

Fig.3 Transmission of a hollow light guide vs bending radius, normalized to straight guide transmission using XeCl laser

由图3可看出,弯曲损耗随着曲率半径 R 的增加而减小,当曲率半径增大时传输率逐渐接近直波导的传输率,这与(4)式所得结论是一致的。在曲率半径为 0.3 m 时,传输率相当于直波导传输率的 95% ,而当波导弯曲的曲率半径减小到 0.05 m 时,由于弯曲而引入的损耗影响已相当大,此时的传输率只有直波导的 60% 。因此,为了使波导在弯曲时有效地传输,波导弯曲的曲率半径应大于 0.1 m ,此时的传输率相当于直波导时的 85% 。

如何提高波导对紫外光的传输率是我们所关心的问题,既然中空型金属波导的损耗不仅与反射材料性能有关,而且与波导中的填充气体有关,因此可尝试通过改变波导的工作气体来提高其传输率。实验采用氦气充入波导(约 0.5 MPa)并测量其传输 XeCl 准分子激光的性能,经过与置于空气中的波导对比发现,在同一输入光功率条件下,充入氦气的波导的输出功率要高出 10% 左右。这主要是因为充入氦气能够抑制紫外光传输过程中被空气的吸收,另外由于氦气对紫外光的折射率要高于空气,因此同样入射角的光线进入充入氦气的波导后,由于折射效应,会以较大的反射角在波导中传播,反射次数减小,相应的反射损耗也就减小。

当波导传输的光波波长远小于金属板的间隔尺寸时,即 $ka \gg 1$,通过几何光学方法分析光线在弯曲波导中的传输行为,发现光线的传播会出现如图4的现象,即光线只沿弯曲波导的外反射面传播,这类传播光称之为耳语廊模。如果进入光波导的光线是平行光或是发散角非常小的光束,则大部

分能量的光将按这种方式在弯曲波导中传播。这时由于光线只沿外表面反射,弯曲损耗会降到最低,而且与弯曲波导的曲率半径无关。因此,对于弯曲传输损耗较大的紫外光束,可以通过改善其发散角,使其在弯曲波导中主要以耳语廊模模式传输,以减小弯曲传输损耗。

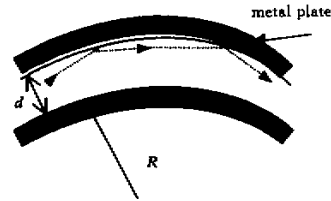


图4 光束沿弯曲波导的外表面连续反射的传播

Fig.4 Light propagates through a bending guide by successive reflections from the outer wall only

3 结 论

实验表明,这种波导可以有效地传输 308 nm 的紫外激光,传输率可达 $72\%/m$ 。当波导弯曲传输时,引入的弯曲损耗将降低波导传输紫外光的效率。在波导的曲率半径大于 0.1 m 时,可以保证有效地弯曲传输,传输率相当于直波导的 85% 。改善反射层材料的性质、提高表面光洁度都能提高传输效率,另外,改变波导的填充气体,利用充入氦气可以有效地降低紫外光的传输损耗。最后,通过理论分析表明,激光发散角很小的光束,可以以耳语廊模模式在弯曲波导中传播,光线只沿弯曲波导的外表面连续反射,此时弯曲损耗只与金属反射层的反射率有关而与波导的弯曲曲率半径无关。

参 考 文 献

- Todd Lizotte, Orest Ohar, Terence O'Keefe *et al.*. Stable beam delivery expands excimer laser use. *Laser Focus World*, 1997, **33**(2):163169
- Lee W. Casperson. How phase plates transform and control laser beams. *Laser Focus World*, 1994, **30**(5):223228
- E. Garmire, T. McMahon, M. Bass. Flexible infrared-transmissive metal waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **29**(4):254256
- Yang Jianyi, Wang Minghua. Optimizie to the structure of the bend light guide. *Photoelectron · Laser* (光电子 · 激光), 1999, **10**(4):305309 (in Chinese)
- J. H. Weaver. CRC Headbook of Chemistry and Physics, 70th Ed CRC Press E, 1990. 389
- Kenneth J. Button. Infrared and Millimeter Waves. Academic Press, Vol.1, 1979
- E. Garmire, T. McMahon, M. Bass. Propagation of infrared light in flexible hollow waveguides. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(1):145150