

一种高品质中空金属光波导*

周建英 吕刚宁 李振先 黄旭光

(中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室, 广州 510275)

李荣基

(香港中文大学物理系)

摘 要 讨论了高品质中空金属光波导的工作原理及其制作工艺, 制备了以金和银作为波导材料的中空波导管, 并对空芯以及充入不同透明液体的液芯波导的透光特性进行了测试。结果表明: 与中空介质波导相比, 中空金属波导具有光传输损耗低、透过率对波导弯曲与失调不甚敏感等优点; 而液芯金属波导的透光效率与透明材料的折射系数无关。文中描述了在特定波段内“中空光纤”的原理, 并报道了 He-Ne 和 CO₂ 激光在中空金壁波导传输的实验结果。分析结果表明高品质中空金属波导具有重要应用价值

关键词 中空金属光波导, 红外激光导波。

常规中空波导一般采用玻璃或石英介质作为波导材料, 其导波特性和决定了这类波导装置的光透过率较低, 光传输损耗对波导的弯曲、失调均十分敏感, 故其用途远不及光纤。但光纤在光能传输的功率与传输波长等方面受到较大限制, 因而研究特殊波段的高功率激光在中空金属波导中的传输效应, 在激光器件及激光应用等方面具有重要价值。本文对高品质的中空金属光波导的原理、制作工艺、测试及其应用进行了研究, 并讨论了“中空光纤”的工作原理及其应用。

如果忽略入射光在自由空间中的传播模式向波导混杂模 EH_{lm} 耦合转换的损耗, 只考虑波导损耗, 则光束通过波导的表示式为^[1]

$$P_s = P_i \exp(-\alpha_{lm}L) \quad (1)$$

式中 P_s 为光在波导出射端的功率, P_i 为在入射处的功率。 L 为波导长度。 α_{lm} 为波导模 EH_{lm} 的损耗系数, 其表达式为^[2]

$$\alpha_{lm} = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{lm}}{\pi} \right)^2 \frac{\lambda^2}{a^3} \text{Re}(v) \quad (2)$$

式中 λ 为波长, a 为波导半径, U_{lm} 为贝塞尔方程 $J_{l-1}(U_{lm}) = 0$ 的解。对于 EH_{lm} 模, $v = (\epsilon + 1)(\epsilon - 1)^{-1/2}/2$, 且 $\epsilon = (n - ik)^2$ 为波导材料的复折射系数。

考虑一个内径为 0.1 mm, 长度为 1 m 的中空波导, 分别代入二氧化硅、金和银材料的

* 本项目由国家高技术“863”新材料青年基金项目资助。

收稿日期: 1995年5月1日

折射率系数和消光系数^[3]，可求出介质与金属波导的透过率。不计波导的耦合损耗，对 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 的光波，透过率的理论值为：玻璃介质波导为 0.250，银壁金属波导为 0.966，金壁金属波导为 0.918。由此可见，中空金属波导在透光性能方面大大优于中空介质波导。中空波导的这一特点在物理描述方面不难理解：如图 1 所示，光在中空波导中的传播是利用其在波导内壁的多次反射的原理，金属波导表面的反射率明显高于一般玻璃表面的反射率，因而金属波导的传播损耗相对较小。

利用金属波导传播光波的设想由来已久，但至今仍未见有高品质的中空金属波导的报道^[4]。尽管在中红外至远红外波段，可以利用某些金属材料(如铝)的晶格振动吸收带导致的折射率 $n_1 < 1$ 的效应，使波导由一种光高反状态进入一种光全反状态(即空芯光纤结构)，但现有波导制作工艺中采用的较原始的制作方法使实验与理论结果存在有较大差异^[5]。

本工作在分析、比较现有中空波导制作工艺的基础上，结合本文的实验研究，选取了一种由芯径制作，蒸镀、电镀和腐蚀等工艺制作中空金属波导的方案。根据这种方案，作者制作出了内径为 0.5 mm，长度 25 cm，且波导材料为金或银的高品质中空波导，通过使用一种特殊连接工艺，波导长度可达 50 cm 或更长。采用本工艺技术上可制备出内径最小为 0.2~0.3 mm 的金属波导，对于内径大于 1 mm 的中空金属波导，原则上无新的技术障碍。

实验利用 He-Ne 激光作为光源测试了金属波导的透光性。激光由一个 $f = 20 \text{ cm}$ 的透镜聚于金属波导内。由金或银的反射曲线可求出^[6]，对于波长为 632.8 nm 的光辐射，金的反射率低于银。所测试的波导为刚制备出的金、银波导，长度均为 25 cm，内径为 0.6 mm。测试结果表明：光在金波导中的透过率为 95%，而在银波导中的透过率则高于 95%。但银波导的化学性质远不及金波导稳定。将波导暴露于大气中数天后的测量结果表明：银波导透过率由 $>95\%$ 降至 85%，而金波导透过率则保持不变。因而在实际应用时对银波导需采用“封闭型”方式，或在波导内充入不起化学反应的惰性气体。

实验中用光学多道分析器(OMA)对波导的传输模式进行了测量，并与中空介质波导的传播模式进行了比较。当波导在一种良好的调节状态时，以波导的入射模式作为参考，金属波导的输出横模模式为多阶模的混合，然而，当波导失调或波导弯曲时，对于介质波导，不仅输出模式变差，且光透过率也急剧下降，而对于金属波导，波导弯曲或波导失调相对于入射光 $< 5 \text{ mrad}$ 时，光透过率没有明显变化 ($< 2\%$)，这表明中空金属波导可以容许一定程度的弯曲。金属波导的这一特性，大大地扩展了波导作为光的能量载体的用途。

与中空介质波导或光纤相比，金属波导具有下述特点：1) 光透过率较高；2) 波导的应用范围可以从可见至远红外，尤其是金波导，在远红外区(如对 CO_2 激光)比在可见区有更高的反射系数，因而金波导更适用于远红外激光导波；3) 金属波导作为光能载体，可传输高功率激光，不存在光纤传输中芯径的光损伤问题；4) 金属波导可允许一定量的弯曲且对透光性能影响不大。

本工作的研究结果可应用于 CO_2 激光的导波及非线性波导的研究。对于具有液芯光纤结构^[7,8]的介质波导，仅当芯径折射率大于波导折射率时才有导波效应，而金、银波导由于其高

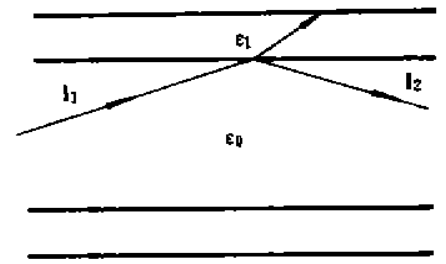


Fig. 1 Principle diagram of light reflection for hollow waveguide. Intrawall reflectance of waveguide $r = I_2/I_1$

反射特性,故不受此限制,亦即金属波导的芯径内可充气体或任意折射率的液体。作者在 $L = 25 \text{ cm}$, $d = 0.6 \text{ mm}$ 的金波导中分别充入 CS_2 、苯、水、重水等液体,测试结果表明:He-Ne 光透过率均为 95%,这表明在任何液体中都可产生光约束效应,从而大大扩展了非线性波导的研究对象。

本工作所采用的金属波导制作工艺与分析,还可用于“中空光纤”的研究,在此类光纤中,由于波导材料在特定波段(例如远红外)具有由于晶格振动而引起的特征吸收峰,有可能使其折射系数小于 1。这种在特定波段具有光纤特性的导波效应有重要的应用价值。在 CO_2 激光输出波长范围内具有小于 1 的折射率材料可以是金属(如铝^[5]),也可以是复合膜料^[9]。本文报道的波导制作工艺,原则上也可制备出这种“中空光纤”的结构波导。

为测试 CO_2 激光在中空金属波导中的传输效应,本文选用了一内径为 0.5 mm,长度为 20 cm 的中空金波导作透光测试实验。实验结果表明,透光率为 35%,而采用铝波导作理论分析,其透过率的理论值为 37%,说明此中空波导具有理论所要求的高品质光学特性。对于长度为 1 m,内径 1.5 mm 的金属波导,理论预测其透过率可高于 90%,如采用中空光纤结构,透过率更可高于 99%,因而高品质中空金属波导具有重要的应用前景。

感谢彭文基博士在使用 OMA 测量波导模式工作方面给予的帮助。并对吴宏雄教授在早期阶段的建议与贡献表示谢意。

参 考 文 献

- [1] J. Y. Zhou, C. H. Fu, Z. G. Lu *et al.*, , Enhanced single transverse mode oscillation with intracavity circular waveguide. *Opt. Comm.*, 1991, 81(6): 385~390
- [2] E. A. J. Marcatili, R. A. Schmeltzer, Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers. *Bell Syst. Tech. J.*, 1964, 43(): 1783~1809
- [3] 王之江主编, 光学技术手册(上册). 北京, 机械工业出版社, 1987, 1: 454
- [4] V. G. Artjuschenko, K. I. Kalaidjian, M. M. Hirakian, Excitation of middle-IR range hollow metallic waveguides. *Int. J. IR & Millimeter Waves*, 1991, 12(10): 1175~1185
- [5] R. M. Jenkins, R. W. J. Devereux, Dispersion phenomena in hollow alumina waveguides. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, QE-21(10): 1722~1727
- [6] W. Zakowica, Low loss metallic waveguide for transmission of optical radiation. *J. Appl. Phys.*, 1984, 55(9): 3421~3428
- [7] J. Y. Zhou, H. Z. Wang, Z. X. Yu, Efficient generation of ultrafast broadband radiation in a submillimeter waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 57(7): 643~644
- [8] J. Y. Zhou, H. Z. Wang, X. G. Huang *et al.*, , Generation of frequency tunable ultrashort optical pulse with liquide-core fibers. *Opt. Lett.*, 1991, 18(23): 1865~1867
- [9] T. Hidaka, K. Kumada, J. Shimada *et al.*, , GeO_2 - ZnO - K_2O glass as the cladding mterial of 940 cm^{-1} CO_2 laser-light transmitting hollow-core waveguide. *J. Appl. Phys.*, 1982, 53(8): 5484~5490

A High Quality Hollow Metallic Optical Waveguide

Zhou Jianying Lu Gangning Li Zhenxian Huang Xuguang

(*State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou 510275*)

Lee Wingkee

(*Department of Physics, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong*)

(Received 1 May 1995)

Abstract Properties of an optical quality circular metallic hollow waveguide are discussed and the technique for fabricating such a waveguide is described. The waveguide with gold or silver as the waveguide cladding material exhibits the characteristics of low propagation loss, transmission insensitive to waveguide bending and misalignment, and capability of transmitting high power light from visible to far infrared. It is demonstrated that transmission of He-Ne laser is independent of the refractive index of the liquid filled into a gold hollow waveguide, and this characteristic greatly extends the nonlinear waveguide applications. The mechanism for a "hollow fiber" in the 10.6 μm spectral region is discussed and results of propagation of CO_2 laser through a gold hollow waveguide are presented.

Key words Hollow metallic optical waveguide, infrared laser waveguiding.