

THz 波在金属镀层空芯波导中传输的理论和实验研究*

谭晓玲^{1)3)†} 耿优福²⁾³⁾ 周骏¹⁾ 姚建铨³⁾

1)(宁波大学理学院物理系, 宁波 315211)

2)(深圳大学物理科学与技术学院, 深圳市传感器技术重点实验室, 深圳 518060)

3)(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, 天津 300072)

(2010年6月28日收到; 2010年7月13日收到修改稿)

本文基于微扰法求得不同金属镀层空心圆波导中各模式的损耗系数, 对金属镀层空芯波导中 THz 波传输损耗随金属材料、波导结构等参数的变化关系进行了数值模拟. 根据数值分析结果, 优化设计并控制了内径为 1.1 mm 的镀银空芯波导, 实验测得当 THz 波的频率为 2.5 THz 时, 传输损耗为 8.6 dB/m, 实现了 THz 波短距离的有效传输.

关键词: 太赫兹波, 金属空芯波导, 传输损耗

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.70.km

1. 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波的频率范围是 0.3—10 THz, 这个频段的电磁辐射具有独特的性质, 在医学成像与疾病诊断、安全检查与无损探伤、环境检测、通信等领域有着广阔的应用前景. 在相继出现了 THz 发射器、探测器及一些应用 THz 系统之后, THz 波的有效传输在 THz 系统集成方面显得越来越重要.

THz 波的传输主要是受材料吸收和色散的影响, 由于缺少低损耗、低色散传输 THz 波的波导材料, 现有的 THz 波系统都是基于 THz 波在自由空间传输和处理, 增加了 THz 波设备的成本和操作难度, 限制了应用技术的发展. 因此如何有效地减小传输过程中的衰减, 并保持波形不发生形变是目前面临的主要问题. 目前报道的用于 THz 波传输的波导可分为金属线波导^[1, 2]、平板波导^[3]、光子晶体光纤波导^[4]、空芯波导^[5-9]以及实芯电介质与聚合物光纤^[10, 11]等几大类. 金属镀层的空芯 THz 波导具有损耗低、柔韧性好和安全性高等优点, 可以用于长

距离、低损耗的 THz 波传输, 引起了越来越多的关注. 1999 年, McGowan 等人^[5, 6]将 THz 波耦合进直径为 240 μm 不锈钢金属管空芯波导中, 实现了范围在 0.8—3.5 THz、总能量吸收系数低于 0.7 cm^{-1} 的 THz 传输, 但是传输的损耗还是较大并且波导的长度也仅为 24 cm; 2004 年, Harrington 等人^[7]首次报道了空芯中镀铜的聚碳酸酯塑料空芯波导, 在波长为 1.89 THz 时, 实现最佳损耗 4 dB/m, 所用的空芯波导芯径为 3 mm, 长为 129.7 cm, 实现了米级的有效传输. 2007 年, Ito 等人^[8]报道了镀银的玻璃空芯 THz 波导, 纤芯为 1 mm, 长为 60 cm, 在波长 190—250 μm 的范围内获得了 7—8 dB/m 的损耗; 目前国内已报道 THz 波在电薄膜^[12]、光子晶体^[13]以及金属粒子中^[14]的传输特性, 但这三种介质不适合用于 THz 系统集成.

本文选用金属镀层空芯波导来传输 THz 波, 空芯波导具有结构简单、无端口损耗等优点, 在传输时能有效将光束束缚在波导内, 具有很好的安全性. 在波导管内镀金属膜, 可以有效克服波导管内壁的粗糙和不均匀, 大大降低传输损耗. 本文首先对金属镀层空芯 THz 光波导的理论进行了研究, 分析了

* 国家自然科学基金 (批准号: 60977048), 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (批准号: 2007CB310403) 和宁波市自然科学基金 (批准号: 2008A610001) 资助的课题.

† E-mail: xiaoling_tan@yahoo.com.cn

THz 波模式损耗随波导直径、金属材料的变化情况. 根据理论结果, 设计并拉制了镀银 THz 空芯波导, 进行了 THz 波传输损耗测量.

2. 金属镀层空芯波导的理论

金属镀层空芯波导的横截面如图 1 所示. 外包层由石英或塑料构成, 内金属镀层可以是银 (Ag)、铜 (Cu) 和金 (Au) 等, 其中波导的内直径为 d , 金属膜厚度为 d_{me} . 在金属层的厚度大于 THz 波的穿透深度时, 就可以看成是空芯金属波导.

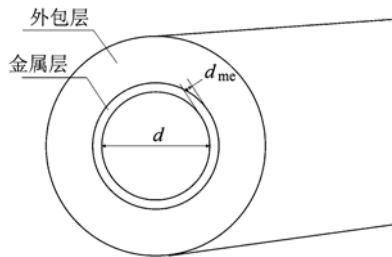


图 1 金属镀层空芯波导结构示意图

金属的折射率为可表示为 $\nu = n - i\kappa$, 并且 $n, \kappa \gg 1$. 利用微扰法求解金属圆波导的本征方程, 可得金属圆波导中各模式的振幅衰减系数为

$$\alpha = \begin{cases} \frac{u^2}{(n_0 k_0)^2 d^3} \cdot \frac{n}{n^2 + \kappa^2}, & \text{TE}_{0q}, \\ \frac{1}{d} \cdot \frac{n}{n^2 + \kappa^2}, & \text{TM}_{pq}, \\ \frac{u'^4}{u'^2 - p^2} \cdot \frac{n}{n^2 + \kappa^2} \left(\frac{1}{n_0^2 k_0^2 \cdot d^3} + \frac{p^2}{u'^4 \cdot d} \right), & \text{TE}_{pq}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 n_0 为空气折射率, k_0 为真空波矢, d 为波导的内直径, u 为一阶贝塞尔函数 $J_1(u_q) = 0$ 的第 q 个根, u' 为 p 阶贝塞尔函数导数 $J'_p(u_q) = 0$ 的第 q 个根.

从上式可以看出, 各模式的损耗与 $n/(n^2 + \kappa^2)$ 成正比, $n/(n^2 + \kappa^2)$ 值越小, THz 传输损耗就越低. 图 2 为各种不同金属的 $n/(n^2 + \kappa^2)$ 值随波长的变化情况. 可以看出相比之下, 镀膜材料 Ag 具有最低的传输损耗, Al 次之. 目前相比其他金属镀膜工艺, 镀 Ag 的工艺技术比较成熟, 因此 THz 金属镀层空芯波导应该采用镀 Ag 实现传输损耗最低.

根据 Drude 模型, 我们可得到 Ag 材料在 THz 波波段的复折射率, 并利用 (1) 式可以得到几个低

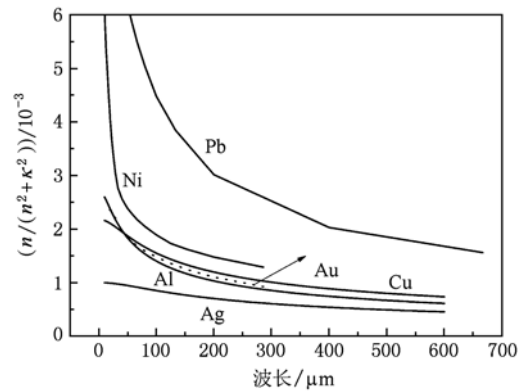


图 2 不同金属的 $n/(n^2 + \kappa^2)$ 值随 THz 波长的变化曲线

阶模的传输损耗, 如图 3 所示. 当空芯直径为 1 mm 时, 波导中可以同时支持几个低阶模. 从图 3 中可以看出, TE_{01} 模具有最低的传输损耗, TE_{11} 模次之. 但当传输的 THz 波为线偏振光时, 需要特殊的耦合系统才能激发出圆偏振的 TE_{01} 模, 并且当波导形状不规则或者有弯曲的情况发生时, TE_{01} 模也容易耦合到 TE_{11} 模式. 因此, 当使用线偏振的 THz 源时, 最合适的传输模式为 TE_{11} 模, 并且随着 THz 波的波长增大, 该模式的传输损耗是逐渐减小的.

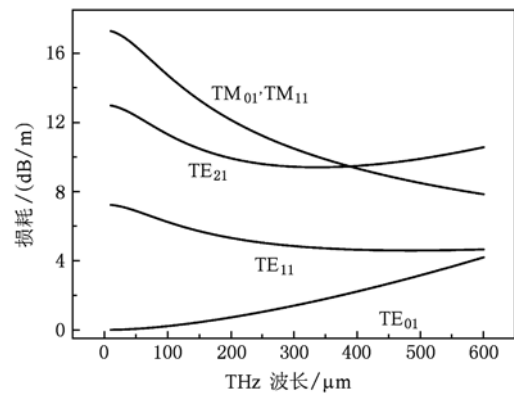


图 3 镀 Ag 空芯波导中各传输模式的损耗随波长的变化

金属镀层空芯波导的内直径为另一重要设计参量, 因此我们对传输损耗随内直径的变化进行了理论计算, 结果如图 4 所示. 计算中设定 THz 波的波长为 $118 \mu\text{m}$ ($\sim 2.5 \text{ THz}$). 从图中可以看出, 当波导的内径增大时, 各低阶模式的损耗是减小的, 因此, 采用大芯径的波导有利用减小传输损耗.

另外一个影响传输损耗的参量为金属镀层的厚度 d_{me} , 若镀层的厚度小于金属的趋肤深度时, THz 波会穿透波导管而造成损耗增大, 金属的趋肤深度为振幅衰减到原振幅的 $1/e$ 时相应的电磁波传

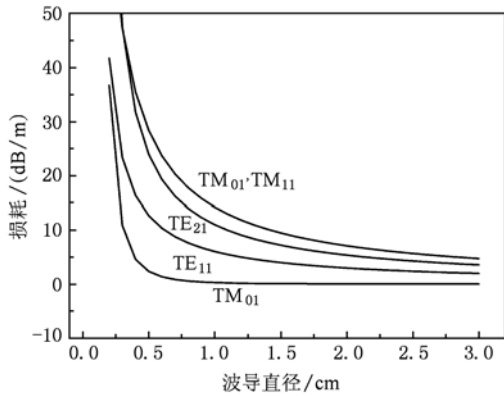


图4 镀 Ag 空芯波导中各低阶模损耗随波导内直径的变化关系

播距离,表达式为

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}}, \quad (2)$$

可以看出,趋肤深度随频率的增大而减小.图5是几种常见金属在不同入射光频率下的趋肤深度,由图可看出 Ag 的趋肤深度最小.

在实际应用中,由于波导空芯中水蒸汽对 THz 具有较强的吸收,THz 波在镀金属层的空芯圆波导中的传输损耗要大于理论计算值,另外,镀层表面的粗糙程度和镀层的均匀性对 THz 传输损耗也有较大的影响,这都金属层的制作有较严格的要求.

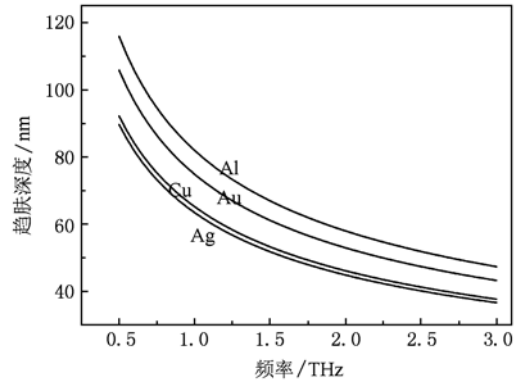


图5 不同金属中的趋肤深度

3. THz 波在金属镀层空芯波导中损耗的测量

金属层的镀制加工我们采用了化学沉积法,外波导层采用圆形玻璃管,内金属层为 Ag. 镀膜溶液为一定浓度的硝酸银溶液,还原剂为氨水等,经过长时间的流动后,银就会逐渐的沉积在玻璃管的表面.为了增加光纤的柔韧性,同时又要考虑到光纤的传输损耗随着内径的变化情况,因此我们选用了内径为 1.1 mm 的石英波导为金属镀层波导的衬垫,最小的弯曲半径可以达到 20 cm.图6为镀 Ag 波导的实物照片.



图6 镀银空芯光纤的实物图

实验中我们采用 CO₂ 光泵远红外 THz 源注入到金属波导中来测量波导的传输损耗.该 THz 源为连续运转,在波长为 118 μm 时最大输出功率为 150 mW,光斑大小约为 0.8 cm,模式为 TEM₀₁ 模.因为要测量的镀银空芯波导的内径仅为 1.1 mm,因此将 THz 波有效的耦合进波导中难度比较大.在实验中,我们采用了一个金属抛物面镜和一个聚乙烯透镜进行有效的耦合,对 THz 功率的测量我们采用远红外功率计.抛物面镜的焦距为 100 mm,聚乙烯透镜

的焦距为 60 mm.由于实验中所使用的 THz 光源的光斑比较大,经过抛物面镜和聚乙烯透镜聚焦后的光斑大小约为 1.5 mm,实验中测得的耦合效率为 41%.

我们采用了切断法来测量镀银空芯波导的传输损耗,入射的 THz 波长为 118 μm,入射功率为 102 mW 时,在光纤 17 cm 处测得的功率为 33.6 mW,在 55.5 cm 处测得功率为 15.7 mW.对不同长度的波导进行测量,得到的传输损耗如图 7 所示.

经过线性拟合得出,当 THz 波的频率为 ~ 2.5 THz 时,传输的损耗为 8.6 dB/m,损耗比较低. 由于我们所使用的 THz 源在其他波段的输出功率较小,利用远红外功率计测得的误差比较大,因此,我们暂时未对其他波段的损耗进行测量.

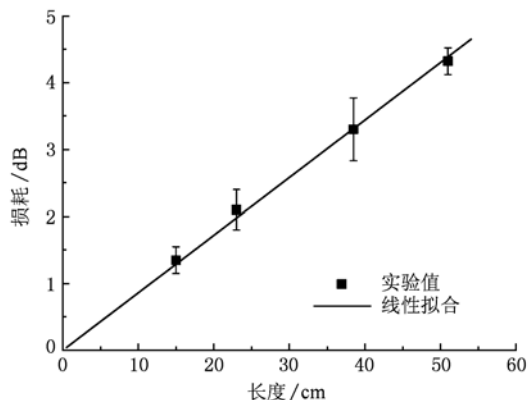


图 7 THz 波功率衰减随光纤长度的变化

4. 结 论

本文对 THz 波在金属镀层空芯波导中传输特性进行了理论和实验研究. 采用微扰法对金属镀层空芯波导模式的振幅衰减系数进行了求解,分析了 THz 波在金属镀层空芯波导中传输时损耗随金属材料、波导结构等参数的变化关系. 数值结果表明,采用镀银、大芯径的波导结构有利用减小 THz 波的传输损耗. 因此基于数值模拟结果,我们设计并拉制了内径为 1.1 mm 的镀银空芯波导,测得当 THz 波的频率为 2.5 THz 时,传输损耗为 8.6 dB/m,与已报道的实验结果相比,我们拉制的金属镀银空芯波导对 THz 波的传输效果较好. 此外,由于金属膜层的粗糙程度及均匀性的影响,实验结果比理论值要稍大,但是通过镀膜工艺技术的改进,THz 波的传输损耗可进一步降低.

- [1] Wang K L, Mittleman D M 2004 *Nature* **432** 376
- [2] Jeon T I, Zhang J Q, Grischkowsky D 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 161904
- [3] Mendis R, Grischkowsky D 2001 *Opt. Lett.* **26** 846
- [4] Geng Y F, Tan X L, Wang P, Yao J Q 2008 *Appl. Phys. B Lasers* **91** 333
- [5] McGowan R W, Gallot G, Grischkowsky D 1999 *Opt. Lett.* **24** 1431
- [6] Gallot G, Jamison S P, McGowan R W, Grischkowsky D 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 851
- [7] Harrington J A, George R, Pedersen P 2004 *Opt. Express* **12** 5263
- [8] Ito T, Matsuura Y J 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1230
- [9] Zhang Y P, Zhang H Y, Geng Y F, Tan X L, Yao J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7030 (in Chinese) [张玉萍、张会云、耿优福、谭晓玲、姚建铨 2009 物理学报 **58** 7030]
- [10] Jamison S P, McGowan R W, Grischkowsky D 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 1987
- [11] Chen L J, Chen H W, Kao T F, Lu J Y, Sun C K 2006 *Opt. Lett.* **31** 308
- [12] Wu C G, S J, L D, M G H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8623 (in Chinese) [吴臣国、沈杰、李栋、马国宏 2009 物理学报 **58** 8623]
- [13] Zhang R, Cao J C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3924 (in Chinese) [张戎、曹俊诚 2010 物理学报 **59** 3924]
- [14] Chen H, Wang L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8271 (in Chinese) [陈华、汪力 2009 物理学报 **58** 8271]

Theoretical and experimental study on transmission properties of THz wave in metal-coated hollow waveguide*

Tan Xiao-Ling^{1)3)†} Geng You-Fu²⁾³⁾ Zhou Jun¹⁾ Yao Jian-Quan³⁾

1) (Department of Physics, Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

2) (College of Physics Science and Technology, Shenzhen Key Laboratory of Sensor Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

3) (Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 28 June 2010; revised manuscript received 13 July 2010)

Abstract

Limited by serious material absorption and dispersion in THz wave band, efficient and long distance delivery of THz signal is one of important problems for constructing a compact THz system. Based on the transmission loss coefficient in metal waveguide obtained by perturbation method, the transmission loss properties of THz wave in metal-coated hollow waveguide varying with different metal materials and waveguide structure parameters are simulated. According to the numerical results, an Ag-coated hollow waveguide with inner diameter of 1.1 mm was designed and fabricated, and the transmission loss of THz wave was 8.6 dB/m at frequency of 2.5 THz as found in experiment, which realizes a short distance transmission with ultralow loss in THz region.

Keywords: terahertz wave, metal hollow waveguide, transmission loss

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.70.km

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60977048), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310403) and the Ningbo Natural Science Foundation (Grant No. 2008A610001).

† E-mail: xiaoling_tan@yahoo.com.cn