

太赫兹波在有限电导率金属空芯波导中的传输特性*

张玉萍^{1)†} 张会云¹⁾ 耿优福²⁾ 谭晓玲²⁾ 姚建铨²⁾

1) 山东科技大学理学院, 青岛 266510

2) 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

(2009 年 1 月 6 日收到, 2009 年 2 月 2 日收到修改稿)

研究了太赫兹波在具有有限电导率的金属镀层空芯波导中的传输特性. 从其传输的特性方程出发, 利用 Newton-Raphson 迭代方法数值模拟了传输损耗和相位常数随太赫兹波频率、波导内径以及波导中金属镀层的电导率的变化关系. 结果表明, 采用大芯径波导和高电导率的金属镀层能有效降低太赫兹波的传输损耗.

关键词: 太赫兹波, 空芯波导, 特征方程

PACC: 4281, 9530J

1. 引 言

目前太赫兹(THz)波以其在探测、成像、传输、频谱等方面的广泛应用而受到人们越来越多的关注^[1-4]. 然而, 由于 THz 波在自由空间中的传输损耗很大, 以波导为基础的 THz 器件就成了 THz 传输的重要基础, 也是 THz 波能否广泛应用的关键. 由于近年越来越多的科学家投入到该领域的研究中, 因而出现了诸如 THz 金属波导^[5,6]、光子晶体波导^[7,8]、光子晶体光纤^[9,10]和聚合物波导^[11]等不同类型的 THz 波导器件, 它们不但在传输性能方面愈显其优越性, 而且体积越来越小, 更便于制作成集成器件.

金属平板和金属丝可以有效传输 THz 波, 金属镀层的 THz 波导也具有很多的优点, 如柔韧性好、损耗低、可以实现米级传输距离等, 这是其他类型的波导目前还无法实现的, 从而展示了它很好的应用前景. 金属镀层空芯 THz 波导的结构如图 1 所示, 外波导层采用具有光滑表面的石英材料或柔韧性好的聚碳酸酯材料, 金属层采用 Au, Ag, Cu 等, 这三种金属在 THz 波段具有很好的反射, 在波长 512.02 μm 时, 测量的反射率分别为 0.997, 0.996 和 0.994. 金属银薄膜的制作可以采用传统的镀银技术.

1999 年 McGowan 等^[12,13]成功地将 THz 波耦合进直径为 240 μm , 长为 24 mm 的不锈钢金属波导管

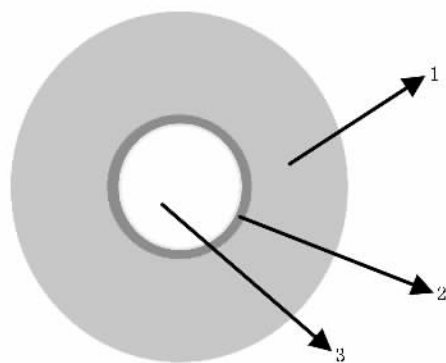


图 1 金属镀层空芯 THz 波导结构图. 区域 1 为外波导层, 区域 2 为金属层(采用 Au, Ag 或 Cu 等), 区域 3 为空芯

中, 实现了范围在 0.8—3.5 THz, 总能量吸收系数低于 0.7 的 THz 传播. 2004 年, Harrington 等^[14]报道的空芯中镀铜的聚碳酸酯波导, 在波长为 1.89 THz 时直波导情况下, 实现最佳损耗 4 dB/m. 2007 年, Ito 等^[15]报道了空芯镀银的 THz 波导, 纤芯为 1 mm, 金属层为 100—120 nm, 光纤长为 60 cm, 在波长 190—250 μm 的范围内获得了 7—8 dB/m 的损耗.

在空芯金属波导中, 金属层对电磁波具有绝缘效应, 入射到金属上的电磁波随着透入金属中距离的增大, 电磁波的振幅按指数很快衰减, 产生趋肤效应, 以致电磁波只能透入金属中很小的一段深度, 这段深度就是趋肤深度 δ , 即电磁波的振幅衰减到表面处振幅 $1/e$ 的传播距离. 若认为金属材料是理想

* 国家自然科学基金(批准号: 60671036)资助的课题.

† E-mail: zhangyuping1976@yahoo.com.cn

导电的,截面为圆形的波导管,内部充满空气,则其只支持 TE 和 TM 模式.然而在实际的过程中金属壁材料均具有一定的电导率,不再认为金属材料理想导电,其导波模就要发生变化,因此本文着重分析 THz 兹波在具有一定电导率的金属波导中的传输及其截止特性.

2. 特征方程

在图 1 中区域 3 中的介电常数为

$$\epsilon_1 = \epsilon_{r1} \epsilon_0 + \frac{\sigma_1}{j\omega} = \epsilon_0 \left(\epsilon_{r1} + \frac{\sigma_1}{j\omega \epsilon_0} \right). \quad (1)$$

由于区域 3 内无论是真空、空气、液体介质、固体介质(如聚四氟乙烯),传导电流(即漏点电流)差不多都可以忽略,所以可取 $\sigma_1 \cong 0$, 则有 $\epsilon_1 \cong \epsilon_{r1} \epsilon_0$. 类似方法,在区域 2 中,

$$\epsilon_2 = \epsilon_{r2} \epsilon_0 + \frac{\sigma_2}{j\omega} = \epsilon_0 \left(\epsilon_{r2} + \frac{\sigma_2}{j\omega \epsilon_0} \right). \quad (2)$$

可以取 $\epsilon_2 = \epsilon_0$, $\sigma_2 = \sigma$ (为金属膜层的参数),于是有

$$\epsilon_3 = \epsilon_0 = \epsilon_0 \left(\epsilon_{r2} + \frac{\sigma}{j\omega \epsilon_0} \right). \quad (3)$$

对于磁导率,波导内区域取

$$u_1 = u_0, \quad (4)$$

导体区域则取

$$u_2 = u_0 = u_{00} u_0. \quad (5)$$

故波数的表达式为

$$k_1^2 = \omega^2 \epsilon_1 u_1. \quad (6)$$

再利用(1)和(4)式有

$$k_1^2 \cong \epsilon_{r1} k_0^2. \quad (7)$$

对区域 2 波数的表达式为

$$k_2^2 = \omega^2 \epsilon_2 u_2, \quad (8)$$

利用(3)和(5)式则有

$$k_2^2 = \omega^2 \epsilon_0 u_0 = k_0^2 u_0 \left(\epsilon_{r2} + \frac{\sigma}{j\omega \epsilon_0} \right). \quad (9)$$

在此基础上,圆柱波的普遍化特征方程由这种符号体系下的

$$\begin{aligned} & - \left[\frac{1}{u} \frac{J'_m(u)}{J_m(u)} - \frac{u_{00}}{v} \frac{H'_m(v)}{H_m(v)} \right] \\ & \times \left[\frac{k_1^2}{u} \frac{J'_m(u)}{J_m(u)} - \frac{k_2^2}{u_{00} v} \frac{H'_m(v)}{H_m(v)} \right] \\ & = m^2 \gamma^2 \left(\frac{1}{v^2} - \frac{1}{u^2} \right)^2, \end{aligned} \quad (10)$$

化为

$$\begin{aligned} & - k_0^2 \left[\frac{1}{u} \frac{J'_m(u)}{J_m(u)} - \frac{u_{00}}{v} \frac{H'_m(v)}{H_m(v)} \right] \\ & \times \left[\frac{\epsilon_{r1}}{u} \frac{J'_m(u)}{J_m(u)} - \left(\epsilon_{r2} + \frac{\sigma}{j\omega \epsilon_0} \right) \frac{1}{v} \frac{H'_m(v)}{H_m(v)} \right] \\ & = m^2 \gamma^2 \left(\frac{1}{v^2} - \frac{1}{u^2} \right)^2, \end{aligned} \quad (11)$$

式中 u 是反映区域 1 情况的参数,有

$$u = a \sqrt{k_1^2 + \gamma^2}. \quad (12)$$

将(6)式代入(12)式有

$$u \cong a \sqrt{\epsilon_{r1} k_0^2 + \gamma^2}. \quad (13)$$

(11)式中的 v 是反映区域 2 情况的参数,

$$v = a \sqrt{k_2^2 + \gamma^2}. \quad (14)$$

由于有

$$\gamma^2 = \frac{u^2}{a^2} - k_1^2, \quad (15)$$

所以(14)式可写为

$$\begin{aligned} v^2 & = a^2 k_2^2 + a^2 \left(\frac{u^2}{a^2} - k_1^2 \right) = a^2 k_2^2 + u^2 - a^2 k_1^2 \\ & = a^2 (k_2^2 - k_1^2) + u^2. \end{aligned} \quad (16)$$

如果令

$$B^2 = a^2 (k_2^2 - k_1^2), \quad (17)$$

则有

$$v^2 = B^2 + u^2. \quad (18)$$

这表明 v 是 u 的函数,因而待解特征方程写作只包含变量 u 的方程

$$F(u) = 0,$$

即

$$\begin{aligned} F(u) & = - k_0^2 \left[\frac{1}{u} \frac{J'_m(u)}{J_m(u)} - \frac{u_{00}}{v} \frac{H'_m(v)}{H_m(v)} \right] \\ & \times \left[\frac{\epsilon_{r1}}{u} \frac{J'_m(u)}{J_m(u)} - \left(\epsilon_{r2} + \frac{\sigma}{j\omega \epsilon_0} \right) \frac{1}{v} \frac{H'_m(v)}{H_m(v)} \right] \\ & - m^2 \gamma^2 \left(\frac{1}{v^2} - \frac{1}{u^2} \right)^2 = 0. \end{aligned}$$

这样,我们得到了考虑金属壁存在有限电导率时的待求特征方程.这个方程是严格的,它的应用条件为:圆波导横向为标准圆形,纵向无弯曲,内表面光滑.

3. 数值求解与结果分析

考虑金属壁存在有限电导率时的特征方程是一个圆柱函数的复变函数微分方程,虽然得不出它的解析解,但可以用数值方法精确求解,如利用

Newton-Raphson 迭代方法. 在所选频率范围内取一些分立的频率值计算其 u 值, 再由 u 值计算出 γ , 对 γ 分别取其实部 α 和虚部 β , 即为损耗系数和相位常数. 结果得到三种模式的衰减常数与材料损耗因数的关系曲线. 在镀银空芯波导中, 波导芯中为真空 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m}$, $\epsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$, 波导壁为镀银金属, $\sigma = 6.1 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, $\epsilon_{r0} = 1$, $\mu_{r0} = 1$, 纤芯直径 $a = 1 \text{ mm}$, THz 波的频率为 $f = 1\text{--}10 \text{ THz}$.

由于介质频率不在我们的所选波段, 所以可以预测 α, β 的两条线在 1—10 THz 频率段是没有交点的. 这里为了更形象地表示出两条曲线的变化特性, 在程序中计算时, 将频率段扩展到 0.01—10 THz, 将截止点包含其中.

同样, 对横纵坐标取对数, 得出 α, β 的变化曲线如图 2 所示, 从图 2 中可以看出传输模式的截止频率大约在 0.09 THz, 当频率小于此截止频率时其传输损耗迅速增大.

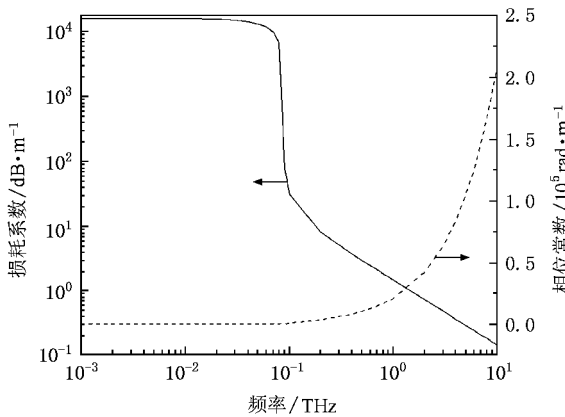


图 2 镀银空芯波导损耗系数和相位常数随频率的变化关系

当空腔内径变化, 将频率固定为 2 THz, 采用镀银空芯波导, 其他结构参数都与前面相同. 在对空腔半径取一系列值之后, 得出了其对损耗系数和相位常数的影响, 如图 3 所示.

可以看出, 当空腔内径超过 $10^{-16/5} \text{ m}$ 后, 相位常数就逐渐趋于恒定. 但损耗系数则随着光纤芯径的增大而减小, 因此为了获得小的传输损耗要尽量采用芯径大的金属镀层空芯光纤.

如果采用不同的金属镀层, 即不同的金属镀层意味着不同的金属电导率, 在这里我们仍然取频率为 2 THz, 空芯波导除金属电导率以外的其他结构参

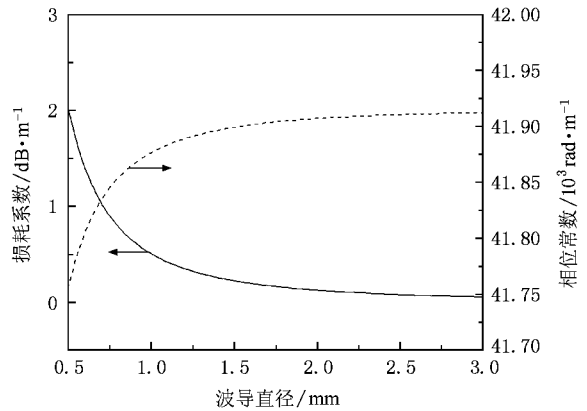


图 3 空芯金属波导的损耗系数和相位常数随纤芯直径的变化关系

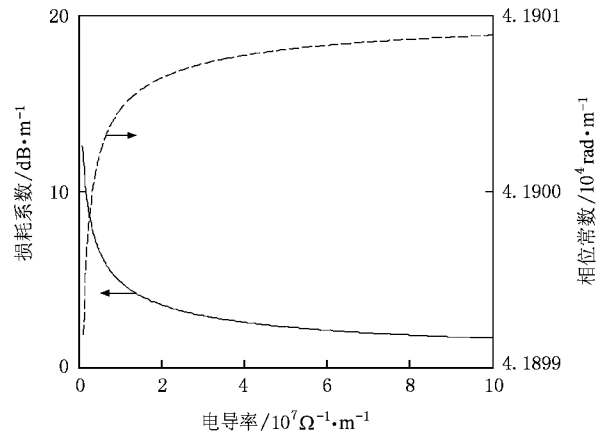


图 4 波导传输损耗与相位常数随电导率的变化情况

数都同之前一样, 这样通过程序计算后我们得到图 4. 但需要注意, 这里我们取金属的电导率变化为连续值, 使得曲线变化平滑, 实际金属的电导率则是确定的分立值.

可以看出, 随着金属电导率的增加, 相位常数呈递增趋势, 但其增长速度却逐渐减小, 同时, 损耗系数则是随电导率的增长持续减小.

4. 结 论

本文采用数值方法对具有有限电导率的金属镀层空芯光纤的传输特性进行了数值模拟, 得到了金属镀层的空芯波导在 THz 波段的损耗系数和相位常数的变化规律, 以及它们与波导的结构系数 (如空腔半径、金属电导率等) 的关系, 这对于设计出具有低损耗传输的光纤具有一定的指导意义.

- [1] Ma M R , Chen Y L , Wang L M , Wang C 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1854
- [2] Zhang X B , Shi W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4984 (in Chinese)
[张显斌、施 卫 2008 物理学报 **57** 4984]
- [3] Wang W N , Li Y B , Yue W W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 781 (in Chinese)
[王卫宁、李元波、岳伟伟 2007 物理学报 **56** 781]
- [4] He Z H , Yao J Q , Shi H F , Huang X , Luo X Z , Jiang S J , Wang P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5802 (in Chinese)
[何志红、姚建铨、时华锋、黄 晓、罗锡璋、江绍基、王 鹏 2007 物理学报 **56** 5802]
- [5] Mendis R , Grischkowsky D 2001 *Opt. Lett.* **26** 846
- [6] Mendis R , Grischkowsky D 2001 *IEEE Microwave & Wireless Comp. Lett.* **11** 444
- [7] Nemeč H , Duvillaret L , Garet F 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 4072
- [8] Takagi K , Seno K , Kawasaki A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3681
- [9] Goto M , Quema A , Takahashi H , Ono S , Sarukura N 2004 *Lasers and Electro-Optics (CLEO)* **1** 3
- [10] Han H , Park H , Cho M , Kim J 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2634
- [11] Hidaka T , Minamide H , Ito H , Maeta S 2003 *Proc. SPIE* **5135** 70
- [12] McGowan R W , Gallot G , Grischkowsky D 1999 *Opt. Lett.* **24** 1431
- [13] Gallot G , Jamison S P , McGowan R W , Grischkowsky D 2000 *Opt. Soc. America* **17** 851
- [14] Harrington J A , George R , Pedersen P 2004 *Opt. Express* **12** 5263
- [15] Ito T , Matsuura Y , Miyagi M , Minamide H , Ito H 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1230

Transmission properties of terahertz wave in finite conductance metal-coated hollow waveguide *

Zhang Yu-Ping^{1)†} Zhang Hui-Yun¹⁾ Geng You-Fu²⁾ Tan Xiao-Ling²⁾ Yao Jian-Quan²⁾

¹⁾ College of Science , Shandong University of Science and Technology , Qingdao 266510 , China)

²⁾ Institute of Laser and Optoelectronics , College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

(Received 6 January 2009 ; revised manuscript received 2 February 2009)

Abstract

The transmission properties of terahertz (THz) wave in metal-coated hollow waveguide are studied. Based on the characteristic equation of THz electromagnetic wave in metallic hollow waveguide , the dependence of the transformation attenuation and phase constant on the frequency of THz wave , inner radius of the waveguide and conductance of the metal material is simulated by using the Newton-Raphson iterative method. The results show that , the transformation attenuation can be decreased effectively by using large radius waveguide and high conductance coating metal.

Keywords : terahertz wave , hollow waveguide , characteristic equation

PACC : 4281 , 9530J

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60671036).

† E-mail : zhangyuping1976@yahoo.com.cn