

文章编号:1001-5078(2007)12-1287-03

太赫兹波在金属镀层空芯圆波导中的传输特性

陆东梅¹,姚建铨^{1,2},郑义¹,耿优福²,李忠洋¹,王鹏²

(1. 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室,河南 郑州 450052;2. 天津大学精仪学院激光与光电子研究所,天津 300072)

摘要:文章理论分析了太赫兹波在金属镀层空芯圆波导中的传输特性。比较了在内直径为2mm的空芯圆波导中分别镀金、铅、镍不同金属时不同入射频率的太赫兹波的理论衰减常数,计算了镀不同金属而入射波长一定的情况下波导中主模即最低模 TE_{11} 模的衰减常数随波导内直径的变化情况。进一步研究表明 Au, Ag, Cu 均可作为空芯圆波导中优良的金属镀层以用于太赫兹波的低损耗传输。

关键词:太赫兹波;金属镀层空芯圆波导;传输特性;衰减常数

中图分类号:TN814+.5

文献标识码:A

Transmission Characteristics of Hollow Metallic Film-coated Circular Waveguide for THz Radiation

LU Dong-mei¹, YAO Jian-quan^{1,2}, ZHENG Yi¹, GENG You-fu², LI Zhong-yang¹, WANG Peng²

(1. Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric Information Technology, Zhengzhou 450052, China;

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

Abstract: The transmission characteristics of hollow metallic film-coated circular waveguide for THz radiation have been theoretically analyzed. We compared the theoretical attenuation coefficients of THz radiations with different incident frequencies in hollow circular waveguides with a bore diameter of 2mm with different metallic coating films of Au, Pb and Ni, and, for a given incident frequency, calculated the relationships between attenuation coefficients of the dominant mode TE_{11} and the bore diameters of hollow waveguides with different metallic coating films. Further investigations indicated that Au, Ag and Cu can all be used as excellent metallic coating films in hollow circular waveguides for the transmission of THz radiations with low attenuation coefficients.

Key words: THz radiation; hollow metallic film-coated circular waveguide; transmission characteristics; attenuation coefficient

1 引言

太赫兹(THz)频段是指频率从(0.1~10)THz,介于毫米波与红外光之间的电磁辐射区域。由于太赫兹波在电磁波谱中所处的特殊位置,它有很多优越的特性和非常重要的学术、应用价值,因此引起了世界各国的极大关注^[1-2]。

目前国际上对太赫兹波的研究主要集中在太赫兹辐射源、探测、成像、传输等几个方面。在传输方面,由于在自由空间中传输时损耗太大,太赫兹波只能在一定的波导系统中才能进行远距离传输^[3]。国际上已对多种不同的太赫兹传输系统,如太赫兹金属波导、光子晶体波导、光子晶体光纤、聚合物波导、塑料带状波导和蓝宝石光纤等进行了研究报道^[4]。本文详细研究了太赫兹波在不同金属镀层

空芯圆波导中的传输特性,并深入分析了孔径大小对衰减常数的影响。

2 计算与分析

在均匀金属波导中,存在无穷多个正态模式,每个模式有它的临界频率(或称截止频率)。临界频率低于工作频率的模式是导波模,而高于工作频率的是截止模或渐消模。在某一工作频率,任何一个金属波导中存在有限个导波模和无穷多个截止模^[5]。在金属圆波导的所有波型中, TE_{11} 波的截止

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助课题(No. 60671036)。

作者简介:陆东梅(1975-),女,硕士研究生,主要从事 THz 波传输方面的研究工作。E-mail: ludongmei2005@163.com

收稿日期:2007-06-19; **修订日期:**2007-08-02

波长是最长的,因而是圆波导中的最低模即主模。圆波导中另一个重要的模式是 TE_{01} 模,这种波在波导壁上只有环形电流^[6],从而导致其衰减远小于其他模式,且衰减随频率的升高而减小。但由于它不是最低模式,且很难耦合进波导中,故不适用于传输。圆波导中最低的圆周对称模式是 TM_{01} 模,由于它也不是最低模,因此也不适用于传输,它们的场结构如图1所示。

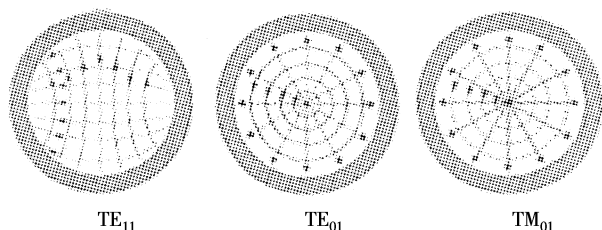


图1 金属圆波导中低阶模 TE 模和 TM 模的场结构分布示意图

太赫兹波在金属中的趋肤深度约为 50 ~ 70 nm,而所采用金属镀层的厚度约为 0.5 ~ 0.7 μm 。研究表明当金属镀层的厚度大于太赫兹波的趋肤深度时,内镀金属层的塑料或玻璃空芯波导与金属空芯波导传输机理相同^[7]。因此,本文理论分析及计算均基于金属空芯波导理论,采用结构如图2(a)所示。

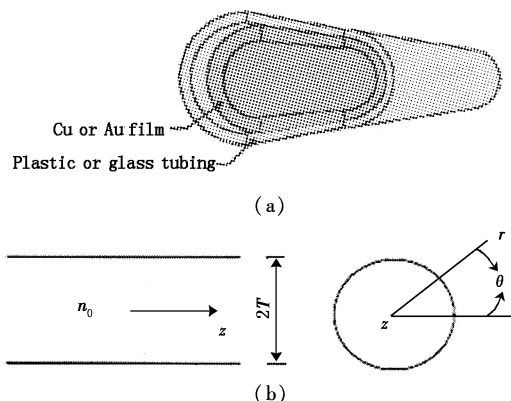


图2 金属镀膜空芯圆波导结构示意图

设圆波导的内半径为 T (如图2(b)),当半径 $r \leq T$ 时折射率为 n_0 (≈ 1),当 $r = T$ (金属与空气的界面上)时定义归一化表面阻抗及导纳分别为 Z_{TE} 和 Y_{TM} ,则金属与空气界面的边界条件为^[8-9]:

$$\left. \frac{E_\theta}{H_z} \right|_{r=T} = \frac{\omega \mu_0}{n_0 k_0} z_{TE}, \left. \frac{H_\theta}{E_z} \right|_{r=T} = -\frac{n_0 k_0}{\omega \mu_0} y_{TM} \quad (1)$$

其中, k_0, μ_0 分别为真空波矢及真空磁导率。

金属的折射率为 $n_{\text{met}} = n - jk$ ^[10-11],则金属的归一化表面阻抗及导纳分别为^[9]:

$$z_{TE} = [(n - jk)^2 - 1]^{-\frac{1}{2}} \approx (n - jk)^{-1} \quad (2)$$

$$y_{TM} = (n - jk)^2 z_{TE} \approx n - jk \quad (3)$$

式中, n, k 均远大于1。

对于普通金属波导,在远红外和 THz 区域有

$$|z_{TE}| \ll z_0 \text{ 和 } |y_{TM}| \gg y_0, \text{ 其中 } z_0 = y_0 = \frac{n_0 k_0 T}{u},$$

$n_0 k_0 T \gg 1$, z_0 和 y_0 分别为空气的归一化表面阻抗和导纳,则金属圆波导中各种模式的衰减常数可表示为:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{u^2}{(n_0 k_0)^2 T^3} \cdot \frac{n}{n^2 + k^2} & TE_{0q} \text{ 模} \\ \frac{1}{T} \cdot \frac{n}{n^2 + k^2} & TM_{pq} \text{ 模} \\ \frac{u'^4}{u'^2 - p^2} \cdot \frac{n}{n^2 + k^2} \left(\frac{1}{n_0^2 k_0^2 \cdot T^3} + \frac{p^2}{u'^4 \cdot T} \right) & TE_{pq} \text{ 模} \end{cases} \quad (4)$$

式中, u 为零阶贝塞尔函数的导数的第 q 个根; u' 为 p 阶贝塞尔函数的导数的第 q 个根。对于 TE_{01} 模 $u = 3.832$,而对于 TE_{11} 模 $u' = 1.841$ 。

基于以上分析,我们对不同金属镀层空芯圆波导中 THz 波传输的理论衰减常数随波长的变化情况以及一定波长的入射波在不同金属镀层空芯圆波导中的衰减常数随波导内直径的变化状况进行了相应计算^[10-11]。

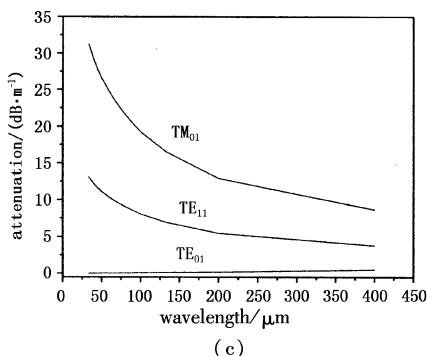
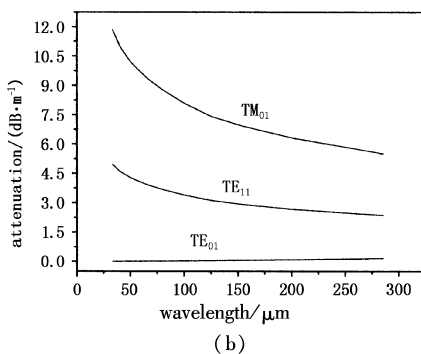
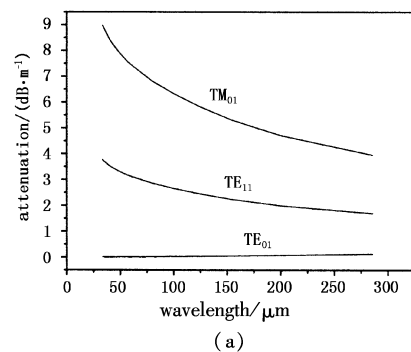


图3 内直径为2mm,镀(a)金、(b)镍、(c)铅空芯圆波导中低阶模 TE 模和 TM 模在不同入射波长时的理论衰减常数

图3是镀层金属分别为Au, Ni, Pb, 内直径为2mm的波导管中 TM_{01} , TE_{11} 及 TE_{01} 模的理论衰减常数随波长的变化情况。由图可以发现 TE_{01} 模的损耗比其他两种模式小得多, 且其衰减常数随频率的升高而减小, 而 TM_{01} 和 TE_{11} 模的损耗均随频率的升高而增加。

图4是镀层金属分别为Au, Ni, Pb, 入射波长为200 μm 时, 金属波导的主模即 TE_{11} 模的理论衰减常数随波导内直径的变化情况, 可以看出在相同条件下, 镀层金属为Au时, 其主模 TE_{11} 模衰减常数最小。

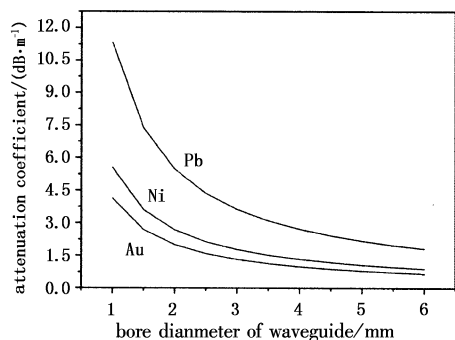


图4 内层分别镀金、镍、铅, 入射波长为200 μm 时, 金属波导的主模 TE_{11} 模在不同内直径波导中的理论衰减常数

除以上几种金属外, 据报道Ag, Cu也可作为理想的金属镀层^[7,12]。Takahiro Ito曾对镀Ag空芯圆波导的太赫兹传输特性进行过专门研究, 结果表明在入射波长为190~250 μm 、波导内直径为1mm时损耗系数约为7.5~8dB/m。与Au、Ag相比, Cu的价格低廉, 且其在THz频段的反射率甚至比Au和Ag都略大些, 比如入射波长为513.02 μm 时, Cu、Ag和Au的反射率分别为0.997, 0.996和0.994^[12]。为此, 我们专门考察了镀层金属为Cu, 入射波波长为300 μm 时波导管内主模即 TE_{11} 模的理论衰减常数随波导内直径的变化情况(如图5), 在此波段Cu的折射率为 $n_{\text{met}} = 438 - j494$ ^[13]。结果表明当波导内直径不小于2mm时, 其理论衰减常数 $\alpha < 2\text{dB/m}$, 这样, 通过选取恰当的波导内径, 镀Cu空芯圆波导可望用于THz波较长距离(大于2m)的传输。

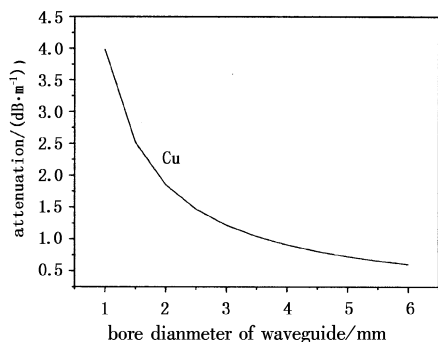


图5 内层镀铜, 入射波长为300 μm 时, 金属波导的主模 TE_{11} 模在不同内直径波导中的理论衰减常数

3 结论

本文对太赫兹波在金属镀层空芯圆波导中的传输状况进行了详细的理论分析与计算, 研究了太赫兹波在内直径为2mm的不同金属镀层空芯圆波导中传输时的衰减常数随波长的变化情况, 以及一定波长的入射波在不同金属镀层空芯圆波导中的衰减常数随波导内直径的变化状况。通过对比研究, 我们发现Au, Ag, Cu均可作为空芯圆波导中优良的金属镀层。而其中Cu以其低廉的价格及在合适波导内径下的较小的损耗系数可望用于THz波的较长距离传输。

参考文献:

- [1] 韩元, 周燕, 阿布来提, 等. 太赫兹技术在安全领域中的应用[J]. 现代科学仪器, 2006, 2: 45-47.
- [2] 姚建铨, 路洋, 张百钢, 等. THz辐射的研究和应用新进展[J]. 光电子·激光, 2005, 16(4): 503-510.
- [3] 刘頔威, 祝大军, 刘盛纲. 介质镀膜空芯光纤在THz频段的传输特性[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(4): 542-544.
- [4] 黄婉文, 李宝军. 太赫兹波器件研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 7: 11-17.
- [5] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 第2版. 北京: 电子工业出版社, 2001: 236-271.
- [6] 依久莫娃 T И, 斯维里多夫 B T. 空心波导与带状波导[M]. 谢怀彦译. 北京: 人民邮电出版社, 1963: 6-19.
- [7] Ito Takahiro, Matsuura Yuji, Miyagi Mitsunobu, et al. Flexible terahertz fiber optics with low bend-induced losses[J]. Opt. Soc. Am., 2007, 24(5): 1230-1235.
- [8] Mitsunobu Miyagi. Waveguide-loss evaluation in circular hollow waveguides and its ray-optical treatment[J]. Journal of Lightwave Technology, 1985, LT-3(2): 303-307.
- [9] Mitsunobu Miyagi, Shojitro Kawakami, Member. Design theory of dielectric-coated circular metallic waveguides for infrared transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, LT-2(2): 116-126.
- [10] Ordal M A, Long L L, Bell R J, et al. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared[J]. Optical Society of America Applied Optics, 1983, 22(7): 1099-1120.
- [11] Mark A Ordal, Robert J Bell, Ralph W, et al. Optical properties of Au, Ni, and Pb at submillimeter wavelengths[J]. Applied Optics, 1987, 26(4): 744-752.
- [12] James A H, Pedersena P, Bowdena B, et al. Hollow Cu-coated plastic waveguides for the delivery of THz radiation[J]. Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics IV, Proc. of SPIE, 2005, 5727: 143-150.
- [13] Themistos Christos, Azizur Rahman B M, et al. Finite element solutions of surface-plasmon modes in metal-clad dielectric waveguides at THz frequency[C]//Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 5111-5118.