

低损耗太赫兹镀膜金属波导研究

何雅兰, 何金龙, 刘平安

(中国计量学院 机电学院 太赫兹技术与应用研究所, 浙江 杭州 310000)

摘要: 在研究太赫兹波在镀膜二维平板金属波导传输时, 损耗减小的机制和条件, 发现只有 TM 模式在大间隙的金属镀膜波导传播时, 其损耗小于不镀膜的金属波导。利用射线光学方法分析波导尺寸、膜厚度以及膜折射率等参数对 TM 模式损耗的影响, 获得其损耗最低的优化结构参数。用转移矩阵理论对镀介质膜前后平板金属波导的损耗进行理论计算和分析, 当介质为聚乙烯且厚度为 0.06 mm 时, 波导的损耗最小。所获结论对于太赫兹波导器件及太赫兹波低损耗波导研制具有较大的意义。

关键词: 金属波导; 太赫兹波; 介质膜; 损耗

中图分类号: TN814⁺.5 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)06-1533-04

Investigation on low-loss metallic terahertz waveguide with coating

He Yalan, He Jinglong, Liu Ping'an

(Centre for THz Research, Institute of Electrical and Mechanical, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Studied on the transmission of terahertz wave in the metallic parallel plate waveguide coated by film, and finally found that transmission losses was less in the TM mode when the gap of plates was more wider. Analyzed the size of waveguide, the thickness and refractive index of film by the ray-optics method, and have got the optimal structural parameters with the lowest loss. Calculated and analyzed the loss of waveguide which had caoting or not by the transfer matrix. When polyethylene is 0.06 mm, the loss of waveguide was more lower. It's a great significance for the development of terahertz device and waveguide.

Key words: metallic waveguide; terahertz; dielectric film; loss

收稿日期: 2012-10-08; 修订日期: 2012-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(61001064); 浙江省自然科学基金(Y1091001)

作者简介: 何雅兰(1987-), 女, 硕士生, 主要从事太赫兹波导方面的研究。Email: zhangcong_zone@163.com

导师简介: 何金龙(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事太赫兹波技术方面的研究。Email: jlhe@cjlu.edu.cn

0 引言

太赫兹(0.1~10 THz)波在环境检测、物体成像、通信、医疗诊断等领域具有广阔的应用前景。但是,目前太赫兹波领域仍缺乏低损耗、制备成本较低的波导,这也是限制太赫兹波进一步推广应用的制约因素之一。近年来,大量的太赫兹波导结构被报道,如金属线波导^[1]、亚波长介质波导^[2]、空心介质管波导^[3-5]、双金属线波导^[6]、光子晶体光纤^[7]以及镀膜金属波导^[8-9]等。但普通金属线及双金属线波导损耗依旧较大,而亚波长及空心介质管波导吸收损耗虽然较小,但由于其模式约束较弱,波导弯曲时模式的弯曲损耗很大;而光子晶体结构复杂制备相对比较困难。Bradley Bowden 等人,提出通过空芯金属波导内壁镀聚苯乙烯膜减小太赫兹波传输损耗方法,在较大尺寸的金属管圆波导中镀较薄厚度的薄膜能有效降低波导损耗。文中主要通过理论分析在二维平板金属导内表面加介质膜后太赫兹波不同模式传输损耗的变化,分析介质膜影响波导吸收损耗机理,分析及计算低损耗太赫兹镀膜金属平板波导的优化参数。

1 覆盖介质层金属界面的反射率

当平面太赫兹波入射到覆盖厚度为 d_2 、折射率为 n_2 的介质层的金属界面时,其反射系数为:

$$r = \frac{r_{12} + r_{23}e^{2i\alpha}}{1 + r_{12}r_{23}e^{2i\alpha}} \quad (1)$$

式中: r_{12} 、 r_{23} 分别为空气-介质界面、介质-铜界面的反射系数; $\alpha = 2\pi n_2 d_2 \cos\theta_2 / \lambda$, λ 为波长; θ_2 表示太赫兹波在空气-介质界面的折射角。由于金属铜和聚乙烯在太赫兹波段具有较小的吸收系数,文中主要研究镀聚乙烯膜的铜反射界面及由其构成的波导。在 1 THz 附近聚乙烯的折射率为 $1.369 + 0.0015i$, 铜的介电常数为 $-1.5 \times 10^5 i + 1 \times 10^6$ ^[10]。图 1 为太赫兹波分别入射到铜反射面以及镀 0.03 mm 和 0.05 mm 厚度聚乙烯膜的铜反射面的反射率曲线。由图 1 可知,金属反射面对 TE 波的吸收损耗随着入射角度的增大而减小,而镀膜反射面的反射率总是小于不镀膜的情形,且进一步计算表明在膜层较小时(即不满足薄膜前后表面反射干涉相长),损耗随着膜的厚度增加

而增加。因此,介质膜不能降低 TE 波的吸收损耗,由此可知,在二维金属波导中,镀膜对改善 TE 模式损耗的作用不大。而对于 TM 波则情况完全不同,由于存在布儒斯特角,纯金属反射面在布儒斯特角附近时对电磁波有大的吸收损耗。镀介质层后,在布儒斯特角附近其反射率变大,损耗减小,而当电磁波以偏离布儒斯特角较远的角度(即入射角较小时),其损耗反而是增加的。由此可知,在二维波导中镀介质膜,主要对改善具有较大 β 值的 TM 模式有效。因此,在文中只分析 TM 波的情形。

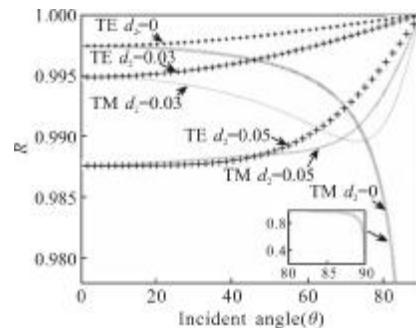


图 1 太赫兹入射角和反射率关系曲线图

Fig.1 Relationship curve of terahertz wave incident angle and reflectivity

介质层厚度会影响反射界面的反射率特性,且它们之间关系复杂。如图 2 所示,金属铜表面镀不同厚度的聚乙烯膜对太赫兹的吸收损耗不同,多个介质层厚度的反射面中,0.06 mm 在较大入射角入射时(入射角度大于 73.54°),其反射率最大。

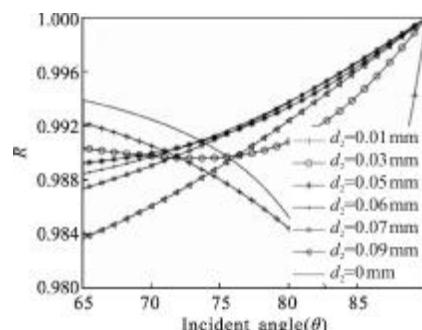


图 2 铜表面镀不同厚度聚乙烯膜时 TM 波入射角和反射率的关系曲线图

Fig.2 Relationship curve of terahertz wave incident angle and reflectivity in TM mode when copper co-ated polyethylene films of different thickness

反射损耗同样受介质层材料的影响，分析了镀聚酰亚胺薄膜(折射率为 $1.8+0.04i$ @ 1 THz)^[11]、硅(折射率为 $3.44+0.00064i$)以及石英(折射率为 $1.945+0.0052i$)层的铜反射面的损耗特性。另外的计算表明，在聚酰亚胺薄膜为 0.03 mm 时，而硅薄膜在其厚度为 0.02 mm 时，其反射面的反射率较大，镀石英层的界面则薄膜约为 0.03 mm 时，其反射率较大。它们的反射率如图 3 所示。对比可知，镀聚乙烯膜的铜反射面对太赫兹波的吸收损耗小于镀其他介质膜反射面的吸收损耗。

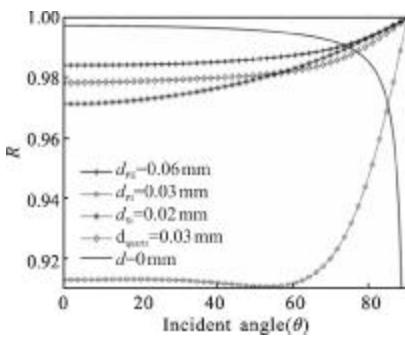


图 3 镀不同介质薄膜铜反射面的时入射角和反射率关系曲线

Fig.3 Relationship curve of terahertz wave incident angle and reflectivity in TM mode when copper coated dielectric films of different material

2 镀介质膜金属波导 TM 模式传输损耗

用射线光学方法分析传播模式，如图 4 所示。把镀膜金属界面等效为反射界面为介质层表面的单一

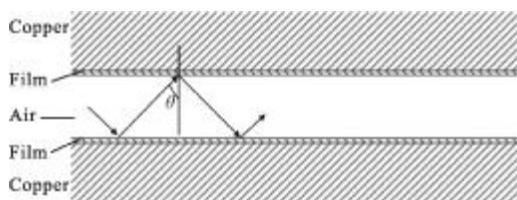


图 4 金属波导的侧视图

Fig.4 Lateral view of metal waveguide

反射面，则光线经上下反射面反射一次后，其与原来光线满足相干加强条件，由此可得色散方程为：

$$\kappa d_1 = m\pi + 2\phi \quad (2)$$

式中： $\kappa = k_0 n_1 \cos \theta$, $k_0 = 2\pi/\lambda$; n_1 表示空气的折射率； d_1 表示波导中间空气层的厚度，表示镀膜反射界面上的反射相移。根据色散方程，TM₁ 模式时，波导导波

层的厚度和波导的有效折射率的关系如图 5 所示。纯金属波导导波层的厚度 d 为空气层的厚度，内壁镀介质膜的金属波导导波层的厚度 d 为空气膜的厚度加上两倍介质膜的厚度。根据射线光学的分析可知，模式单位长度的传播损耗为：

$$A = \frac{a_r}{d_1 \tan(\theta)} \quad (3)$$

式中： a_r 为太赫兹波在界面反射时的损耗。电磁波在波导传播中的损耗来自于波在界面上反射时的损耗。因而，对于固定宽度的波导，要降低导模的传输损耗存在两种方法：减小 a_r 以及增大 θ (即增大导模传播常数)。从前面计算和分析可知，金属反射面镀介质膜后反射率变大， a_r 减小；从图 5 传播常数和空气膜厚度的关系可看出，空气膜厚度变大，导模传播常数 β 变大。

从图 5 可知，导波层厚度大于 0.8 mm、对应入射角度大于 75.82 时，金属波导内表面镀 0.06 mm 聚乙烯膜后波导的太赫兹波传输损耗减小。

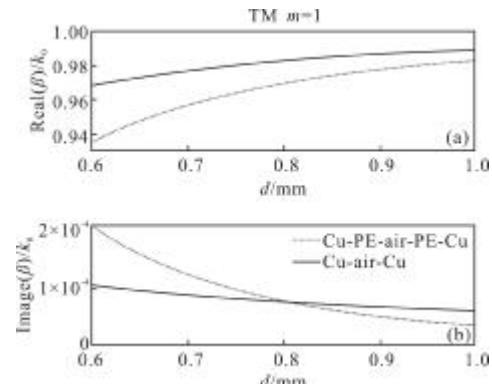


图 5 内壁镀聚乙烯膜前后两种结构波导的色散曲线

Fig.5 Dispersion curves of waveguide coated with polyethylene film and without film

为了得到金属波导内壁镀聚乙烯膜较小损耗时薄膜厚度较优的值，令导波层厚度为 1 mm 不变，聚乙烯的厚度有微小的变化时，计算波导内壁镀膜前后两种结构波导的损耗，可知聚乙烯膜的厚度为 0.07 mm 时，波导的损耗最小。导波层厚度不变时，介质膜厚度变大，相应的空气膜厚度变小，入射角度变大，传播相同距离时损耗减小。

3 结 论

从以上分析和计算可知，通过金属波导内表面

镀介质膜可减小波导的损耗。文中通过给铜金属波导内壁镀聚乙烯膜,减小太赫兹波的传输损耗。在许多应用领域,太赫兹频率段的低损耗金属波导的研究存在着很多的机遇和挑战。相信随着研究的深入和水平的提高,THz技术将会大显身手,给通信、医药等研究领域带来新的发展和突破。

参考文献:

- [1] Jin'e S, Jian R, Wenxin L. Progress of terahertz in communication technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S): 342-347. (in Chinese)
- [2] Yimin L, Jiachun W, Jiaming S, et al. Application of THz technology for detection in soot and wind-blown sand [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 487-490. (in Chinese)
- [3] Yimin L, Jiachun W, Zhidan L. Continuous THz transmission imaging experiment of 337 μm laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 232-235. (in Chinese)
- [4] Bowden B, Harrington J A, Mitrofanov O. Silver/polystyrene-coated hollow glass waveguides for the transmission of terahertz radiation[J]. Opt Lett, 2007, 32(20): 2945-2947.
- [5] Themistos C, Rahman B M A, Grafton K T V, et al. Characterization of silver/polystyrene(PS)-coated hollow glass waveguides at THz frequency [J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(9): 2456-2462.
- [6] Pahlevaninezhad H, Darcie T E, Heshmat B. Two-wire waveguide for terahertz[J]. Opt Exp, 2010, 18(7): 7415-7420.
- [7] Han H, Park H, Cho M, et al. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber [J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(15): 2634-2636.
- [8] Bowden B, Harrington J A, Mitrofanov O. Low-loss modes in hollow metallic terahertz waveguides with dielectric coating[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(181104): 1-3.
- [9] Mitrofanov O, James R, Fernández F A, et al. Reducing transmission losses in hollow THz waveguides [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2001, 1(1): 124-132.
- [10] Ordal M A, Bell R J, Alexander R W, et al. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W [J]. Appl Opt, 1985, 24(24): 4493-4499.
- [11] Tao H, Strikwerda A C, Fan K, et al. Terahertz metamaterials on free-standing highly-flexible polyimide substrates[J]. J Phys D Appl Phys, 2008, 41(232004): 1-4.