

等离子体处理制备柔性低损耗 ABS/Ag 太赫兹空芯波导及其传输可靠性研究

刘 晟, 沈圆杰, 侯广宁, 查志鹏, 朱怡臻, 余烁颖, 张擎天, 赵 强, 刘少华,
敬承斌*, 褚君浩

(华东师范大学 物理与电子科学学院 纳光电集成与先进装备教育部工程研究中心, 上海 200241)

摘要: 等离子体处理 ABS 管提升了 ABS/Ag 镀层太赫兹空芯波导的性能。胶带法测试结果表明, 等离子体处理后, 银镀层的附着力由 5 级提升至 2 级。等离子体处理后的 ABS 管内表面银层的均匀性和致密度更高, 高质量的银层有利于降低波导的损耗。未经等离子体处理的 4.2 mm 内径的 ABS/Ag 镀层空芯波导在 0.3 THz 和 0.1 THz 时的直线损耗分别为 0.72 dB/m 和 1.47 dB/m, 等离子体处理后其损耗分别降至 0.70 dB/m 和 1.44 dB/m, 且波导能够在冷热环境中稳定传输太赫兹波。等离子体处理后的样品在超过 200 小时的湿热老化和 16 次的高低温循环老化试验后直线损耗升高小于 0.1 dB/m, 而未经等离子体处理的样品的损耗升高大于 1 dB/m。研究表明, 等离子体处理后的 ABS/Ag 镀层太赫兹空芯波导损耗更低、传输可靠性更高、耐老化性更好, 可用于构建下一代通信、传感及太赫兹成像系统等。

关键词: 太赫兹传输; 太赫兹波导; 空芯波导; 等离子体处理

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Preparation of flexible low-loss ABS/Ag-coated terahertz hollow waveguide by plasma treatment and study on its transmission reliability

LIU Sheng, SHEN Yuan-Jie, HOU Guang-Ning, ZHA Zhi-Peng, ZHU Yi-Zhen, YU Shuo-Ying,
ZHANG Qing-Tian, ZHAO Qiang, LIU Shao-Hua, JING Cheng-Bin*, CHU Jun-Hao

(Engineering Research Center for Nanophotonics and Advanced Instrument of Ministry of Education, School of
Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The performance of ABS/Ag-coated terahertz hollow waveguide (HWG) was improved through plasma treatment of the ABS structural tube. The adhesion of the silver (Ag) film to the ABS tube was enhanced from level 5 to level 2 after plasma treatment. The 4.2 mm bore waveguide sample treated with plasma has a more uniform and denser silver film than the untreated sample, which contributes to the reduction of transmission losses from 0.72 dB/m to 0.70 dB/m at 0.3 THz and 1.47 dB/m to 1.44 dB/m at 0.1 THz, respectively. After 200 hours of hydrothermal aging and 16 cycles of high and low temperature cycling testing, the straight loss of the HWG sample treated with plasma increased by less than 0.1 dB/m, while the untreated sample underwent an increase of more than 1.0 dB/m. The results indicate that the ABS/Ag-coated HWG fabricated by plasma treatment has lower loss, higher reliability and better anti-aging performance compared with the untreated sample. It can be potentially used for establishment of next-generation communication, sensing, and THz imaging systems.

Key words: terahertz transmission, terahertz waveguide, hollow waveguide, plasma treatment

收稿日期: 2023-09-26, 修回日期: 2023-12-07

Received date: 2023-09-26, Revised date: 2023-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(61775060)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61775060)

作者简介 (Biography): 刘晟 (1997-), 男, 四川资阳人, 博士研究生, 主要研究领域为太赫兹空芯波导. E-mail: 365817861@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: chjing@ee.ecnu.edu.cn

引言

太赫兹波的传输是太赫兹科学与技术领域的重要研究方向之一。相比于无线传输,借助波导结构能够实现太赫兹波的低损耗、稳定及定向传输^[1-2]。在众多的太赫兹波导结构中^[3-8],金属镀层太赫兹空芯波导具有结构简单、无端面反射、传输损耗低及阈值高等优点^[9-10]。金属镀层空芯波导结构主要包括内金属镀层和外部结构管。玻璃管因其与金属良好的结合性能而被用作空芯波导的结构管^[11],但玻璃管的柔韧性差,限制了波导的应用。塑料管具有良好的柔韧性和光滑的内表面,其被广泛用作空芯波导的结构管^[12-13]。基于塑料管的金属镀层太赫兹空芯波导具有结构简单、弯曲性能好和传输损耗低等优点,被认为是极具应用前景的太赫兹波导。

近年来,聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)^[14]、聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, PTFE)^[15]及聚丙烯(Polypropylene, PP)^[16]等塑料管已被广泛用作空芯波导的结构管。然而,这些塑料管和金属层之间的结合性能不佳,老化后金属膜容易脱落影响波导的性能。因此,选择合适的材料作为结构管制备高性能可弯曲的太赫兹波导仍面临着挑战。之前的工作中,选择了价廉物美的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS)通用工程塑料来制备 ABS/Ag 镀层太赫兹空芯波导^[17]。目前,柔性金属镀层太赫兹空芯波导的损耗在总体上已经降低到相对低的水平,但波导的传输稳定性和可靠性仍是其实用化进程中的一个挑战。此外,制作成本也是金属镀层太赫兹空芯波导商业化需求的基本要求。为了进一步满足商业化应用需求、提升波导的应用价值,迫切需要探索新的制备策略,实现对波导结构管表面改性,调控金属镀层质量和改善波导的界面结合状态,进而提高 ABS/Ag 镀层太赫兹空芯波导的传输可靠性。已有研究表明,等离子体处理可以高效地对聚合物表面进行改性,提高聚合物表面极性基团的数量、增强聚合物表面能、改善聚合物表面亲水性,从而提高聚合物管与金属镀层间的界面结合强度^[18-20]。同时,等离子体处理可以去除 ABS 管表面的污染物,深度清洁表面,提升金属镀层的均匀性和致密性^[21]。

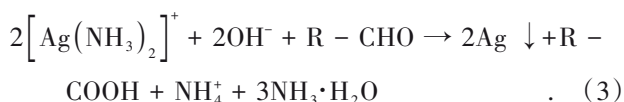
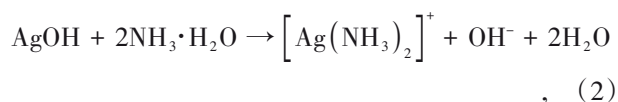
本研究采用等离子体对 ABS 管表面进行处理以改善 ABS 与银层间的界面结合状态。分别使用经过和未经过等离子体处理的 ABS 管作为结构管

制备了不同内径的 ABS/Ag 镀层太赫兹空芯波导,并对其界面结合性能、金属层微观形貌及波导的传输性能进行了探究。胶带法测试结果表明,等离子体处理使得 ABS 与银层间的界面结合强度由 5 级提升至 2 级。光学及电子显微镜分析表明,等离子体处理使镀制的银反射层更加致密且均匀性更高,使波导具有较低的传输损耗。经过等离子体处理的 ABS/Ag 镀层太赫兹空芯波导在热环境(65 °C)和低温环境(-78.5 °C)中能稳定地传输太赫兹波(输出功率波动小于 1%)。此外,使用恒温恒湿试验箱对波导样品进行湿热老化(85 °C, 85 RH%)处理,未经过等离子体处理的样品在 180 小时的加速老化处理后传输性能明显下降,而经过等离子体处理的样品在经历 200 小时的加速老化后传输性能基本不变。实验结果证明,等离子体处理提高了波导的传输可靠性和耐老化性能。

1 样品制备与测试

1.1 样品制备

实验中使用两种不同规格市售的 ABS 塑料管作为结构管制备波导样品,其内径分别为 3.2 mm 和 4.2 mm。波导的制备过程包括对结构管的预处理和动态液相沉积工艺制备 Ag 镀层两个步骤。对结构管的预处理包括表面清洗及等离子体处理等流程:表面清洗是利用去离子水、乙醇等冲洗结构管表面以去除杂质及油污;等离子体处理是使用等离子体处理机(VP-R, 广州善准仪器有限公司)对结构管表面进行处理,所使用的射频频率为 13.56 MHz,输出功率为 100 W,处理时间 5~10 min。结构管完成预处理后采用动态液相沉积工艺制备 Ag 镀层,其反应原理为^[15]:



实验中借助蠕动泵向结构管内泵入反应溶液,葡萄糖溶液和银氨溶液均匀混合后在结构管内发生银镜反应生成 Ag 的单质颗粒,流经结构管时在其内壁上附着生长,最终形成 Ag 镀层。蠕动泵的流速控制在 150 mL/min,镀银时间为 15 min 以保证所制备 Ag 镀层的厚度超过所需的趋肤深度。镀银结束

后,继续向结构管内泵入去离子水洗涤,再吹入洁净空气干燥 3 h,即得到 ABS/Ag 镀层太赫兹空芯波导样品。为了探究等离子体处理对波导性能的影响,实验中制备了两种不同类型的波导样品,其区别在于一批样品在预处理过程中使用了等离子体处理 ABS 结构管,另一批样品的 ABS 结构管则未经等离子体处理,除此之外的制备工艺均相同。最终得到了 3.2 mm 和 4.2 mm 两种内径的 ABS/Ag 镀层太赫兹空芯波导样品,长度均为 50 cm。

1.2 样品测试

1.2.1 银层的形貌及其与结构管间界面结合力测试

银层的均匀性和粗糙度是影响波导性能的重要因素,研究中使用光学显微镜(ST-2000L, Siontae)和扫描电子显微镜(S-4800, Hitachi)对样品的表面形貌进行了表征。本研究中,等离子体处理的主要目的在于提高银层与 ABS 管之间的界面结合强度。为了探究等离子体处理对结构管与金属层之间结合强度的影响,本研究参照 ASTM D3359-09《胶带法测试涂层附着力的标准试验方法》对所制备银镀层的附着力进行测试。由于圆波导样品尺寸较小且其剖面为弧形,难以在其表面划格并使用胶带法进行测试,因此通过在 ABS 平板表面镀银并对比探究等离子体处理对银镀层附着力的影响。实验中所使用的 ABS 平板材质与波导结构管材质相同,等离子体处理和镀银工艺与制备波导样品一致。参照 ASTM D3359-09 标准中的试验方法,使用百格刮刀(QFH-A, 艾锐普)在银镀层表面进行十字划格,划格后在银镀层表面贴上半透明压敏胶带(Scotch 600, 3M),贴上胶带后拿住胶带悬空的一

端,尽可能平稳快速地撕离胶带,最终通过计算银镀层剥落的面积对银镀层的附着力进行分级。

1.2.2 波导的传输性能测试

实验中使用发散角较小的太赫兹激光器测量了波导的传输损耗,测试系统如图 1 所示。所使用的太赫兹激光器的频率分别为 0.1 THz 和 0.3 THz (IMPATT-100 和 IMPATT-300, Terasence)。在测量过程中,太赫兹源所产生的太赫兹波直接进入耦合波导,通过耦合波导后进入待测波导样品。使用太赫兹功率计(THz-9B-BL, Gentec.)在耦合波导末端及待测波导样品末端测量其输出功率分别记为 P_{in} 和 P_{out} ,对于长度为 L 的待测波导样品,其传输损耗可以由公式(4)计算得到:

$$\alpha = 10 \cdot \log(P_{in}/P_{out})/L \quad (4)$$

测量过程中,耦合波导直接从所制备的波导样品上截取得到,其长度为 15 cm,波导内径及镀层膜厚等参数与待测波导样品完全一致,测试过程中尽可能使波导对齐以降低耦合损耗。在测量波导的弯曲传输损耗时,波导样品两端各 10 cm 长度部分保持直线状态,其余部分则以弯曲半径 10 cm 进行任意角度弯曲。

1.2.3 波导的传输稳定性即耐老化性能测试

波导的传输稳定性及其耐老化性能是波导实际应用的重要参数。实验时将样品分别置于硅胶加热带及干冰槽营造的冷热环境中以探究波导在不同温度时的传输稳定性,如图 1 中插图所示。同时为进一步研究波导的耐老化性能,使用恒温恒湿试验箱(LK-80G, Kingjo)对样品进行湿热老化及高低温循环老化测试。湿热老化测试时,恒温恒湿试

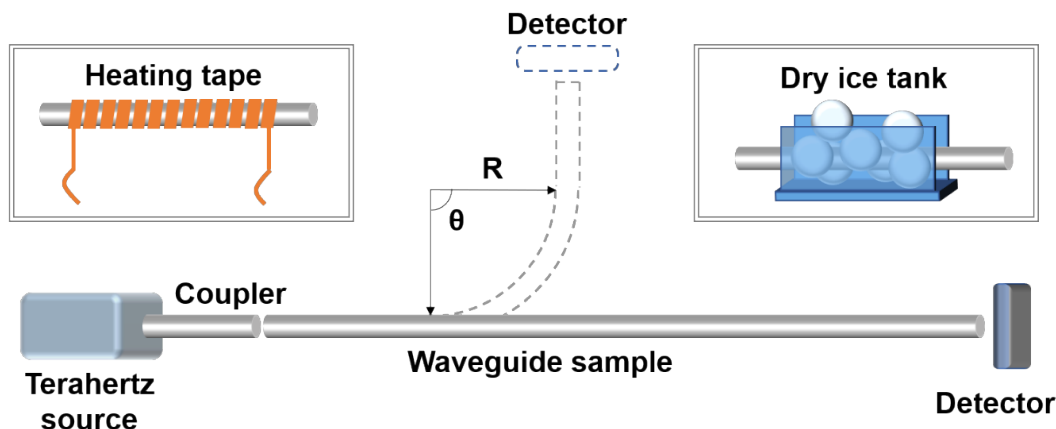


图1 波导样品的传输损耗测试示意图(插图分别展示了营造高、低温环境的方法)

Fig. 1 Schematic diagram of transmission loss test of waveguide samples (the insert figures show the methods for creating high and low temperature environments respectively)

试验箱内的温度设置为 85 °C,湿度设置为 85 RH%,将波导样品置于试验箱中每 10 小时取出测试其传输损耗。高低温循环老化测试的最低温度设置为 -40 °C,最高温度设置为 80 °C,升温 and 降温速率大于 1 °C/min,在每次高低温循环完成后测试波导的传输损耗。

2 实验结果与讨论

2.1 等离子体处理对银层形貌的影响

波导样品表面银层的形貌分析结果如图 2 所示。图 2(a)和(c)为经过等离子体处理后的 ABS 管表面沉积的银层形貌,图 2(b)和(d)所示样品的 ABS 管在沉积银层之前未经过等离子体处理。光学显微镜可以观察较大范围银层的形貌特征,如图 2(a)所示,样品表面银层分布均匀且粗糙度较低,而图 2(b)中的样品表面银层的均匀性相对较低且粗糙度较高。图 2(c)和(d)对比发现,未经过等离子体处理的波导样品表面银层存在微小的孔洞,而经过等离子体处理后银层表面的孔洞基本消失,其致密度更高。波导样品的表面形貌表征结果证明,等离子体处理能够有效地清洁 ABS 管表面,有利于银层的沉积,所制备的银层更加均匀、光滑和致密,有利于降低波导的传输损耗。

2.2 等离子体处理对银层形貌的影响

胶带法测试 ABS 与金属层之间结合强度的实验结果如图 3 所示。图 3(a)和(b)分别是经过等离

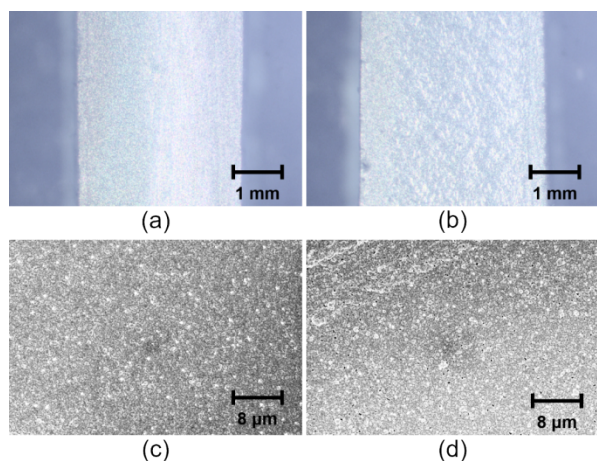


图 2 银反射层的微观形貌图:(a)、(c)ABS 结构管在沉积银层前经过等离子体处理;(b)、(d)ABS 结构管在沉积银层前未经过等离子体处理

Fig. 2 Microscopic morphology of the silver reflective layer: (a), (c) ABS structural tubes have been plasma treated before depositing the silver layer; (b), (d) ABS structural tubes have not been plasma treated before depositing the silver layer

子体处理后的 ABS 平板表面镀银样品和未经过等离子体处理的 ABS 平板表面镀银样品。在制备完成的 ABS 平板表面镀银样品上参照 ASTM D3359-09 标准划格后使用胶带法对银镀层的附着力进行测试,测试结果分别如图 3(c)和(d)所示。未经过等离子体处理的 ABS 平板样品表面银层几乎完全脱落,对应划格试验结果分级中的 5 级;而经过等离子体处理的 ABS 平板样品表面银层脱落面积小于 15%,对应划格试验结果分级中的 2 级。胶带法实验结果证明,等离子体处理 ABS 表面使银镀层的附着力由 5 级提升至 2 级,等离子体处理极大地提升了 ABS 与银层之间的界面结合强度,有望使波导具有更好的传输稳定性及可靠性。

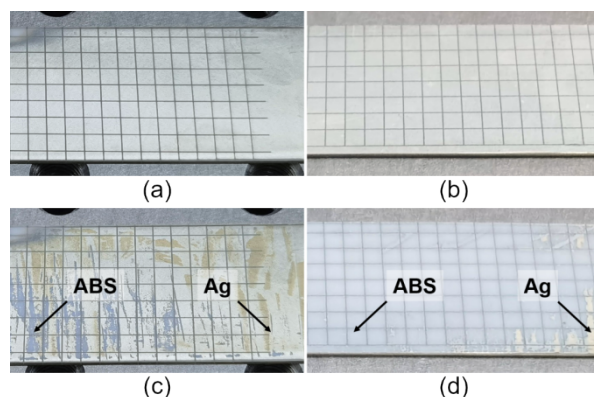


图 3 胶带法测试银镀层结合强度的实验图:(a)、(c)ABS 平板在沉积银层之前经过等离子体处理;(b)、(d)ABS 平板在沉积银层之前未经过等离子体处理

Fig. 3 Experimental diagram for testing the bonding strength of silver coating by tape test: (a), (c) ABS panels have been plasma treated before depositing the silver layer; (b), (d) ABS panels have not been plasma treated before depositing the silver layer

2.3 等离子体处理对波导传输损耗的影响

在太赫兹波低频段(0.1 THz 和 0.3 THz)测试了不同内径的 ABS/Ag 镀层空芯波导的传输损耗,探究了等离子体处理 ABS 管对波导传输损耗的影响。对于空芯波导,其传输总损耗 α_{tot} 可由公式(5)表示^[22-23]:

$$\alpha_{tot} = \alpha_{pq}L + (C \cdot r^3/R)(R\theta) \quad (5)$$

式中, α_{pq} 是波导的直线传输损耗, L 和 r 分别代表波导的长度和内半径, R 和 θ 分别是测试过程中的弯曲半径和弯曲角度。如图 4 所示为 ABS/Ag 镀层空芯波导在固定弯曲半径($r=10$ cm)时传输损耗随弯曲角度的变化曲线。

0.3 THz 时, 未经过等离子体处理的 3.2 mm 和 4.2 mm 内径波导的直线损耗分别为 1.02 dB/m 和 0.72 dB/m, 经过等离子体处理后两种波导的直线损耗分别降低至 1.01 dB/m 和 0.70 dB/m。波导的弯曲损耗随着弯曲角度的增加而线性增加, 当弯曲角度为 90° 时, 3.2 mm 和 4.2 mm 内径波导的损耗分别上升至 1.41 dB/m 和 0.97 dB/m。在 0.1 THz 时, 未经等离子体处理的 3.2 mm 和 4.2 mm 内径波导的损耗在 0° 到 90° 弯曲时分别为 1.91~4.23 dB/m 和 1.47~3.13 dB/m, 经等离子体处理后的 3.2 mm 和 4.2 mm 内径波导的损耗在 0° 到 90° 弯曲时分别为 1.81~4.21 dB/m 和 1.44~3.00 dB/m。

将本研究中所制备的 ABS/Ag 镀层空芯波导与其他太赫兹空芯波导相比较, 如表 1 所示。可以看出, 在太赫兹空芯波导研究领域近年来取得了积极的进展, 尤其是在传输降低损耗方面。相对而言, 对波导传输可靠性方面的研究还少有涉及。本研究工作中的 ABS/Ag 镀层空芯波导具有较低的传输损耗, 同时等离子体处理有效地增强了波导的传输可靠性和耐老化性能, 使得本研究所制备的波导具有较为广阔的应用前景。

根据公式(5)可得, 波导的附加弯曲损耗主要取决于波导的内径、弯曲半径和弯曲角度, 当波导的内径和弯曲半径不变时, 波导的损耗随弯曲角度线性变化, 与测试结果相符。对比经过和未经过等离子体处理的两种波导样品的损耗测量结果, 经等离子体处理的 ABS/Ag 镀层空芯波导的损耗降低。

这主要得益于 ABS 表面分子链在等离子体作用下发生弛豫, 在一定程度上消除表面缺陷, 同时等离子体处理可以深度清洁 ABS 管表面, 这些都有利于银在 ABS 结构管上成核和生长, 使生长的银镀层更加均匀和致密。

表 1 本研究与之前报道的太赫兹空芯波导的传输性能比较

Table 1 Comparison of transmission performance between this study and previously reported THz hollow waveguides

类型	损耗 (dB/m)	内直径 (mm)	参考文献
COC 管波导	10(1.1 THz)	2.8	[6]
Ag/COP	2.1(0.16 THz)	2.6	[7]
PC/Ag	0.80(0.1 THz)	3/5	[9]
ABS/Cu	0.85(0.98 THz)	5.0	[13]
ABS/Ag	0.70(0.3 THz)	4.2	本工作

2.4 等离子体处理对波导传输稳定性的影响

图 5 展示了经过和未经过等离子体处理的两种波导样品在不同温度环境下的传输稳定性。将硅橡胶加热带环绕在波导样品外壁按照设定温度对样品进行加热, 实验结果显示, 两种 ABS/Ag 镀层空芯波导在热环境中 (65°C) 均具有较好的传输稳定性, 其输出功率波动不超过 1%。将波导样品置于干冰槽中以模拟低温环境, 当温度为 -78.5°C 时, 两种波导样品的输出功率基本保持不变。

波导样品在冷热环境中的传输稳定性测试表

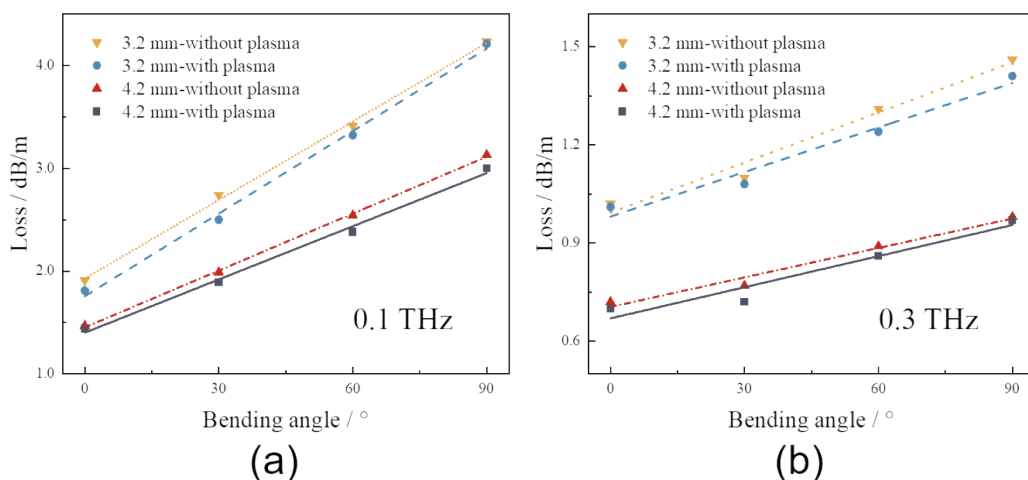


图 4 (a) 3.2 mm 和 4.2 mm 内径的波导在 0.1 THz 时的传输损耗随弯曲角度的变化曲线; (b) 3.2 mm 和 4.2 mm 内径的波导在 0.3 THz 时的传输损耗随弯曲角度的变化曲线

Fig. 4 (a) The bending transmission losses of the 3.2 mm and 4.2 mm- waveguides at 0.1 THz; (b) the bending transmission losses of the 3.2 mm and 4.2 mm- waveguides at 0.3 THz

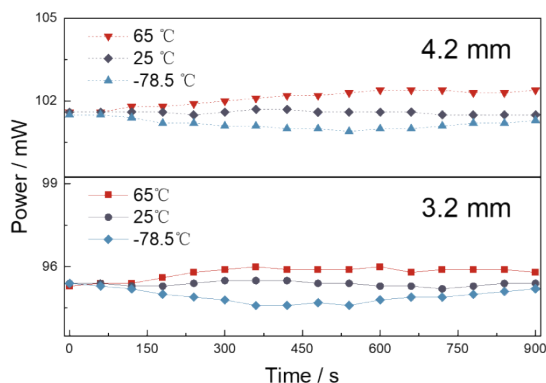


图5 经过和未经过等离子体处理的两种波导样品在冷热环境中的传输稳定性

Fig. 5 Transmission stability of the two waveguide samples with and without plasma treatment in hot and cold environments

明,经过和未经过等离子体处理的ABS/Ag镀层空芯波导均能在冷热环境中稳定地传输太赫兹波,较宽的温度传输范围拓展了波导的应用场景。值得注意的是,样品处于热环境时波导样品的输出功率略有上升,这可能是由于加热时波导样品内部的水蒸气减少使得太赫兹波的损耗降低。样品处于干冰槽中时波导样品的输出功率略有下降,这可能是由于低温环境时水蒸气凝结在波导的内壁,增大对太赫兹波的吸收使得波导样品的输出功率下降。

2.5 等离子体处理对波导耐老化性能的影响

结构管与银反射层之间的结合性能是影响金属镀层空芯波导耐老化性能的重要因素。在湿热

及高低温变化等环境中,金属层与结构管之间的结合不佳将导致金属层损坏或脱落,影响波导传输的可靠性、降低波导使用的寿命。等离子体处理能够有效地提升ABS管与银反射层之间的结合性能,本文使用恒温恒湿试验箱对波导的耐老化性能进行了探究,实验结果如图6所示。

如图6(a)是波导样品的输出功率随湿热老化(85 °C, 85 RH%)时间的变化曲线,未经等离子体处理的3.2 mm和4.2 mm内径的波导样品其传输损耗分别在190小时和180小时后开始升高,而经过等离子体处理后的两种规格波导样品的损耗在200小时的湿热老化后依然保持不变。图6(b)展示了波导样品的损耗随高低温循环老化试验次数的变化曲线,未经等离子体处理的3.2 mm和4.2 mm内径波导样品的损耗分别在经过14次和13次的高低温循环老化试验后开始上升,而经过等离子体处理后的两种规格的波导样品在经历16次的高低温循环老化试验后传输损耗依旧基本不变。在湿热老化测试中,温度和湿度分别为85 °C和85 RH%,高温高湿环境中使得波导的老化速度远大于其在大气环境中的老化速度^[24],波导样品在经过200小时以上的湿热老化后依然能保持良好的传输性能。此外,温度循环老化试验进一步验证了金属层与结构管之间具有良好的结合性能。波导样品能够承受较长时间的加速老化试验,在正常大气环境中ABS/Ag镀层空芯波导将具有足够长的使用寿命。

本研究中,银镀层的附着力提升使得所制备的

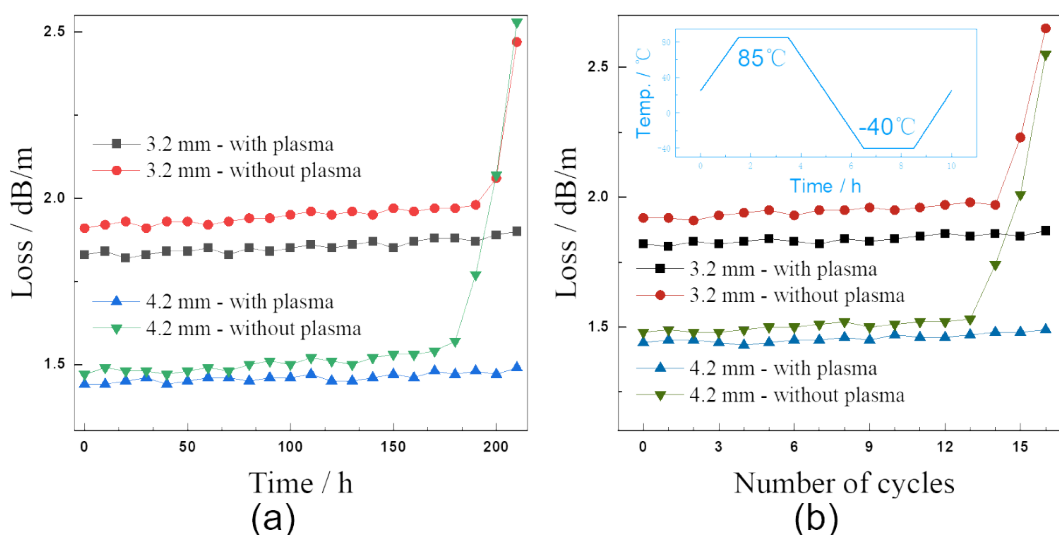


图6 (a)波导样品的传输损耗随湿热老化时间的变化曲线;(b)波导样品的传输损耗随高低温循环老化试验次数的变化曲线
Fig. 6 (a) The variation curve of the transmission loss of the waveguide sample with the hydrothermal aging time; (b) the variation curve of the transmission loss of the waveguide sample with the number of high and low temperature cycle aging tests

波导在湿热或高低温循环老化实验中金属层更不容易脱落或破裂,从而延长波导的使用寿命、提升其可靠性。本研究的实验结果表明,等离子体处理 ABS 管的确能够增强波导的耐湿热老化和高低温循环老化的能力,同时基于等离子体处理改性 ABS 材料表面改善了银镀层的均匀性和致密性,使得损耗没有降低反而略有提升,符合商业化应用对波导的传输稳定性和可靠性所提出的需求。

3 结论

本文研究了等离子体处理对 ABS/Ag 镀层太赫兹空芯波导性能的影响。等离子体处理有效地提升了银层与 ABS 管之间的结合性能,增强了波导的传输可靠性和耐久性。ABS 管表面银层的形貌分析结果表明,经过等离子体处理后的银层均匀性更高、粗糙度更小。更好的银层质量使 3.2 mm 和 4.2 mm 内径的 ABS/Ag 镀层空芯波导在 0.1 THz 时的直线传输损耗分别降低了 0.1 dB/m 和 0.03 dB/m,且样品在冷热环境中传输太赫兹波的稳定性高,输出功率波动小于 1%。等离子体处理还极大地提高了波导的耐久性,未使用等离子体处理的 4.2 mm 内径的样品在 180 小时的湿热老化和 13 次的高低温循环老化试验后传输损耗明显上升,而经过等离子体处理的波导样品在超 200 小时的湿热老化和 16 次的高低温循环老化试验后传输性能基本保持不变。本研究中采用等离子体处理 ABS 结构管的方法有效地增强了波导的传输可靠性和耐老化性能,所制备的 ABS/Ag 镀层空芯波导具有柔性好、损耗低、传输可靠性及耐老化性能优异等特性,在太赫兹成像、传感和下一代通信等系统中具有较大的商业化应用前景。

References

- [1] Shaghik Atakaramians, Shahraam Afshar V., Tanya M. Monro, *et al.* Terahertz dielectric waveguides[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, **5**(2): 169–215.
- [2] Muhammad Talal Ali Khan, Haisu Li, Nathan Nam Minh Duong, *et al.* Terahertz Waveguide: 3D-Printed Terahertz Topological Waveguides[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, **6**(7): 2170040.
- [3] WANG Chang, ZHENG Yonghui, TAN Zhiyong, *et al.* Recent advances in terahertz waveguide[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*. (王长, 郑永辉, 谭智勇, 等. 太赫兹波导发展现状与展望[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*), 2022, **20**(3): 241–260.
- [4] Alessio Stefani, Jonathan Henry Skelton, Alessandro Tuniz. Bend losses in flexible polyurethane antiresonant terahertz waveguides [J]. *Optics Express*, 2021, **29** (18): 28692–28703.
- [5] R. Wallis, R. Degl Innocenti, D. S. Jessop, *et al.* Investigation of hollow cylindrical metal terahertz waveguides suitable for cryogenic environments[J]. *Optics Express*, 2017, **24**(26): 30002–30014.
- [6] Yi Zhong, Guoxing Xie, Feng Mao, *et al.* Thin-wall cyclic olefin copolymer tube waveguide for broadband terahertz transmission[J]. *Optical Materials*, 2019, **98**: 109490.
- [7] ZHANG Xue-Wen, TAN Zhi-Yong, CHEN Ke-Wang, *et al.* Transmission characteristics of dielectric-coated metallic waveguides in G band and 4.3 THz[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. (张学文, 谭智勇, 陈可旺, 等. 介质金属膜波导在 G 波段和 4.3 THz 的传输特性[J]. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(2): 215–222.
- [8] Shuai Li, Zijie Dai, Zhiguo Wang, *et al.* 0.1 THz low-loss 3D printed hollow waveguide [J]. *Optik*, 2019, **176**: 611–616.
- [9] Menghui He, Zhangxiong Chen, Jiafu Zeng, *et al.* Design, fabrication, and characterization of a single-polarization single-mode flexible hollow waveguide for low loss millimeter wave propagation [J]. *Optics Express*, 2022, **30** (6): 10178–10186.
- [10] C. M. Bledt, J. E. Melzer, J. A. Harrington. Fabrication and characterization of improved Ag/PS hollow-glass waveguides for THz transmission [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(27): 6703–6709.
- [11] Bradley Bowden, James A. Harrington, Oleg Mitrofanov. Silver/polystyrene-coated hollow glass waveguides for the transmission of terahertz radiation [J]. *Optics Letter*, 2007, **32**(20): 2945–2947.
- [12] Menghui He, Jiafu Zeng, Xian Zhang, *et al.* Transmission and imaging characteristics of flexible gradually tapered waveguide at 0.3 THz[J]. *Optics Express*, 2021, **29** (6): 8430–8440.
- [13] Xuehui Lu, Chengbin Jing, Junhao Chu, *et al.* Flexible ABS hollow waveguides with an inner copper coating for terahertz transmission [J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, **148**: 107700.
- [14] James A. Harrington, Roshan George, Pal Pedersen, *et al.* Hollow polycarbonate waveguides with inner Cu coatings for delivery of terahertz radiation[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(21): 5263–5268.
- [15] Miguel Navarro-Cía, Jeffrey E. Melzer, James A. Harrington, *et al.* Silver-coated Teflon tubes for waveguiding at 1–2 THz[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, **36**: 542–555.
- [16] Guoxing Xie, Yi Zhong, Guishun Li, *et al.* 300 GHz bending transmission of silver/polypropylene hollow terahertz waveguide [J]. *Results in Physics*, 2020, **19**: 103534.
- [17] Sheng Liu, Guoxing Xie, Guishun Li, *et al.* Transmission and Confocal Imaging Characteristics of Bendable ABS/Ag-Coated Hollow Waveguide at Low THz Band[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2023, **13**(3): 193–199.
- [18] David Gravis, Grégoire Rigolé, Mayssa Yengui, *et al.* Enhancement of metal adhesion, owing to the plasma texturing of PEEK [J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2021,

- 18**(6): 2100009.
- [19] Juana Abenojar, Rafael Torregrosa-Coque, Miguel Angel Mantinez, *et al.* Surface modifications of polycarbonate (PC) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) copolymer by treatment with atmospheric plasma[J]. *Surface and Coating Technology*, 2009, **203**(16), 2173–2180.
- [20] Róbert Boros, Ageyeva Tatyana, Ádám Golcs, *et al.* Plasma treatment to improve the adhesion between ABS and PA6 in hybrid structures produced by injection overmolding[J]. *Polymer Testing*, 2022, **106**: 107446.
- [21] Greg D. Learn, Emerson J. Lai, Horst A. von Recum. Nonthermal Plasma Treatment Improves Uniformity and Adherence of Cyclodextrin-Based Coatings on Hydrophobic Polymer Substrates [J]. *Coatings*, 2020, **10** (11) : 1056.
- [22] Mitsunobu Miyagi, Shojiro Kawakami. Losses and phase constant changes caused by bends in the general class of hollow waveguides for the infrared [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(24): 4221–4226.
- [23] Pallavi Doradla, Cecil S. Joseph, Jayant Kumar, *et al.* Characterization of bending loss in hollow flexible terahertz waveguides [J]. *Optics Express*, 2012, **20** (17) : 19176–19184.
- [24] Shashikant G. Hegde, Suresh K. Sitaraman. Thermal Aging Reliability of Package-Level Polymer Optical Waveguides [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2008, **31**(2): 410–416.