基于裂纹模板法的双层金属网格 透明导电薄膜制备及性能^{*}

廖敦微¹) 周建华¹) 郑月军²)†

(邵阳学院信息科学与工程学院,邵阳 422000)
(国防科技大学电子科学学院,长沙 410073)
(2024 年 9 月 16 日收到; 2024 年 11 月 25 日收到修改稿)

在裂纹模板法制备单层金属网格透明导电薄膜的基础上,为提升其电磁屏蔽性能,制备了双层金属网格透明导电薄膜.通过旋涂法和提拉法工艺分别得到双层裂纹模板后,进而制备相应的双层金属网格透明导电 薄膜.首先对同样条件下采用旋涂法制备的单层和双层金属网格透明导电薄膜样品进行性能测试和对比,可 知双层结构相对于单层的透光率下降了10.9%,在Ku波段(12—18 GHz)测试的电磁屏蔽效能提升了30 dB. 另外,对提拉法制备的双层金属网格样品也进行了测试,与同样条件制备的单层金属网格样品相比,双层结 构在损失 8.38%的透光率前提下,在Ku波段的电磁屏蔽效能提升了20 dB.测试结果表明,制备的双层金属 网格透明导电薄膜在牺牲一定透光性能前提下可明显提升电磁屏蔽性能.通过对基于裂纹模板法的双层金 属网格透明导电薄膜的制备和性能研究,可以充分利用裂纹模板法工艺的低成本优势制备高电磁屏蔽性能 的双层金属网格透明导电薄膜.

关键词:裂纹模板法,双层金属网格透明导电薄膜,高电磁屏蔽性能,磁控溅射

PACS: 42.25.Bs, 42.68.Ay, 42.70.-a, 78.67.-n **CSTR**: 32037.14.aps.74.20241305 **DOI:** 10.7498/aps.74.20241305

CSTR: 32037.14.aps.74.2024130

1 引 言

在金属网格透明导电薄膜 (metal mesh transparent conductive film, MMTCF) 领域,鉴于单 层 MMTCF^[1-4] 电磁屏蔽性能不太理想的现状,有 研究人员提出采用双层 MMTCF^[5,6] 用以提升其电 磁屏蔽性能.国外很早就对双层金属网格的相关性 能进行了描述^[7],近年来国内部分学者将双层结构 应用于电磁屏蔽性能的提升研究^[6,8].目前,对于双 层 MMTCF 电磁屏蔽性能提升研究主要集中于采 用光刻法等传统制备工艺的周期规则型 MMTCF^[6,9], 并采用部分理论分析和仿真计算对其电磁屏蔽性 能提升进行了相关研究^[10-13]. 另外,除了制备规则 型双层 MMTCF^[6,9],出于提升成像质量性能的考 虑, Jiang 等^[14] 提出双层随机网格结构透明导电薄 膜,取得了良好的光学和电磁屏蔽性能. 但是,这 些有关双层 MMTCF 的研究都是基于光刻法等传 统工艺制备,制备成本高且工艺复杂,而基于裂纹 模板法制备双层结构 MMTCF 用于电磁屏蔽性能 提升鲜见研究.

作为一种不同于传统光刻工艺制备 MMTCF 的方法,裂纹模板法由于其裂纹原料来源广泛、工 艺简单和制备成本低廉等优点,因此一经出现就获 得大量科研人员的关注^[15-18].但是,现有基于裂纹 模板法制备 MMTCF 的研究主要集中在单层网格

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 61901493) 和湖南省自然科学基金 (批准号: 2022JJ50239) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhengyuejun18@nudt.edu.cn

^{© 2025} 中国物理学会 Chinese Physical Society

结构的诸如有关裂纹原料、裂纹形成方式以及裂纹 胶厚度等因素对裂纹模板形成的影响^[19-22],以研 制性能优良的 MMTCF.由于基于裂纹模板法制 备的 MMTCF 一般为单层结构^[23-25],与传统光刻 工艺制备的单层金属网格结构性能类似,因此在电 磁屏蔽性能方面也不理想.然而,作为一种低成本 的金属网栅制备工艺,基于裂纹模板法制备双层 MMTCF 鲜有文献提到.因此,为了提升电磁屏蔽 性能,有必要对基于裂纹模板法的双层 MMTCF 的制备进行研究.

本文分别基于旋涂法和提拉法工艺制备了双 层裂纹模板后,进而制备得到相应的双层 MMTCF 样品.首先,通过旋涂工艺制备双层裂纹模板,再 通过金属溅射和去胶得到相应的双层金属网栅样 品,与相同旋涂工艺制备得到的单层金属网栅样品 性能进行比较,双层结构金属网格样品的电磁屏蔽 性能明显优于单层结构.进一步研究了提拉法工艺 制备双层裂纹模板及相应的双层金属网格样品,并 与同样工艺得到的单层网格样品性能对比后可知, 双层结构的电磁屏蔽性能明显增强.通过对制备的 两种双层和对应单层结构 MMTCF 样品的测试结 果进行对比,均验证了基于裂纹模板制备的金属双 层网格样品能明显增加电磁屏蔽性能.

2 双层 MMTCF 样品制备

2022年,我们已对单层 MMTCF 的制备工艺 过程给出了详细叙述^[22].在单层 MMTCF 制备工 艺的基础上,本文以直径 60 mm,厚度为 2 mm 的 SiO₂ 玻璃作为基底,在制备得到双层裂纹模板 后,采用磁控溅射工艺在裂纹模板两侧分别依次溅 射 50 nm 厚度铬和 500 nm 厚度铜,溅射功率控制 在 140 W.最后得到镀制均匀的金属薄膜样品后, 将样品浸没于盛有丙二醇丁醚有机溶剂的超声清 洗机中,功率大小设置为 60 W,超声 20 min 后去 除大部分的裂纹胶.再将样品放入丙酮溶剂中浸 泡 1 h 以去除剩余未脱落的裂纹胶和表面杂质.最 后,采用去离子水清洗辅以氮气枪吹干,得到双层 MMTCF 样品.

本文分别基于旋涂法和提拉法工艺得到双层 裂纹模板后,制备得到两种双层 MMTCF 样品,下 面分别对这两种双层 MMTCF 制备展开研究.

2.1 旋涂法工艺制备双层 MMTCF

在旋涂法工艺制备单层 MMTCF 的基础上, 基于同样的工艺制备双层 MMTCF 样品. 与单层 金属网栅的裂纹模板制备过程类似, 旋涂法制备双 层裂纹模板以 SiO2 玻璃为基底和水性丙烯酸树脂 (dolphin-1062 T) 作为裂纹原料,设置一级旋转参 数 (500 r/min, 15 s), 二级旋转参数 (1000 r/min, 15 s), 然后在玻璃基底表面中央滴入少许水性丙 烯酸树脂溶液.开启旋涂机器后,得到旋涂均匀的 裂纹胶薄膜样品. 在得到一面 (定义为正面) 裂纹 模板后,通过同样的旋涂工艺在玻璃基底另一面 (定义为背面)也制备相应的裂纹模板. 将样品于阴 凉处静置干燥 12 h,薄膜进行充分自裂解形成具 有随机网络图案的双层裂纹模板.采用金相显微镜 分别在 10×与 20×镜头下进行显微图案观测, 如 图 1 所示, 制备得到的双层裂纹模板正面与背面的 裂纹显微图案结构分布规律基本一致,裂纹形态清 晰可见,裂纹网络之间的线条贯通良好,双层裂纹 模板的双面都形成了均匀分布的随机裂纹图案.



图 1 双层裂纹模板的金相显微镜观测结果图 (a) 10× 镜头下的正面裂纹图案; (b) 20×镜头下的正面裂纹图案; (c) 10×镜头下的背面裂纹图案; (d) 20×镜头下的背面裂 纹图案

Fig. 1. Metallographic microscope observation pattern of the double-layer crack template: (a) Top crack pattern under $10 \times \text{lens}$; (b) top crack pattern under $20 \times \text{lens}$; (c) bottom crack pattern under $10 \times \text{lens}$; (d) bottom crack pattern under $20 \times \text{lens}$.

在制备得到双层裂纹模板样品后,分别采用磁 控溅射镀膜工艺依次对裂纹模板的正面和背面沉 积 50 nm 厚度的金属铬和 500 nm 厚度的铜,制备 得到的双层金属沉积薄膜样品如图 2 所示.该样品 有一圈窄带深色条纹区域,这与基底本身未清洗干 净或者有缺陷以及溅射前该区域未完全干燥等原 因都有关.

采用金相显微镜对如图 2 所示的双层溅射金 属沉积样品的微观形态进行了观测,如图 3 所示. 可以看到,沉积金属层分布明显,整体上呈现与裂 纹图案类似的随机网络分布特性.同时注意到,金 属沉积网络图案有部分离散区域金属线呈黑色分 布,这是由于观测过程中,部分区域反射光强进入 显微镜较弱,导致光线较暗.



图 2 双层金属沉积样品示意图 Fig. 2. Schematic of the double-layer metal deposition sample.



图 3 双层金属沉积样品的金相显微镜观测结果图 (a) 10× 镜头下的正面金属沉积图案; (b) 20×镜头下的正面金属沉 积图案; (c) 10×镜头下的背面金属沉积图案; (d) 20×镜头 下的背面金属沉积图案

Fig. 3. Metallographic microscope observation pattern of the double-layer metal deposition: (a) Top metal deposition pattern under $10 \times \text{lens}$; (b) top metal deposition pattern under $20 \times \text{lens}$; (c) bottom metal deposition pattern under $10 \times \text{lens}$; (d) bottom metal deposition pattern under $20 \times \text{lens}$.

为了得到双层 MMTCF 样品,采用超声清洗 与丙二醇丁醚有机溶剂相结合的方式去除裂纹胶 以及覆盖在裂纹胶表面的金属薄膜,最终得到了双 层 MMTCF 样品,如图 4 所示.采用金相显微镜对 得到的双层 MMTCF 样品进行显微图像观测,如图 5 所示.由图 5 可知,正反面的金属网格线条分布图案基本类似,整体上网格图案的金属线条呈现随机结构分布,其线宽在 1.4—2.3 µm 之间,特征周期间距为 24—42 µm,网格线条清晰完整.



图 4 双层 MMTCF 样品示意图 Fig. 4. Diagram of the double-layer MMTCF sample.



图 5 双层金属网格样品的金相显微镜观测结果图 (a) 10× 镜头下的正面金属网格图案; (b) 20×镜头下的正面金属网 格图案; (c) 10×镜头下的背面金属网格图案; (d) 20×镜头 下的背面金属网格图案

Fig. 5. Metallographic microscope observation pattern of the double-layer metal mesh: (a) Top metal mesh pattern under $10 \times \text{lens}$; (b) top metal mesh pattern under $20 \times \text{lens}$; (c) bottom metal mesh pattern under $10 \times \text{lens}$; (d) bottom metal mesh pattern under $20 \times \text{lens}$.

2.2 基于提拉法工艺制备双层 MMTCF

前面采用旋涂法制备双层金属网格样品过程 中,由于需要分别将透明基底的两个面依次旋涂 裂纹胶溶液,然后风干龟裂,形成相应的双层裂 纹模板.而这种双面均需分别旋涂裂纹胶溶液的 方法,在双层裂纹模板的制备过程中比较麻烦.因 此,为了更有效地制备双层裂纹模板,本节采用提 拉法工艺制备双层裂纹模板,进而制备得到双层 MMTCF. 提拉法制备双层裂纹模板是将透明基底浸没 于裂纹胶溶液中,通过提拉设备以一定提拉速率将 基底从裂纹溶液中缓慢提拉上升.在提拉过程中, 裂纹胶黏附在基底两个表面,一次即可制备得到双 层裂纹模板,且形成条件一致性好.提拉法制备双 层裂纹模板的具体制备过程如图 6 所示,通过使用 夹具将透明基底固定后浸没于盛放裂纹胶溶液的 提拉设备溶液池中,然后通过提拉设备以提拉的方 式匀速缓慢地将透明基底移出液面.

在提拉法制备裂纹模板过程中,设置基底浸没 于裂纹溶液中的持续时间为 10 min,提拉速率为 50 μm/s.通过提拉设备,玻璃基底从裂纹胶溶液 中缓慢上升,提拉速率恒定.将得到裂纹胶薄膜放 置于阴凉处干燥 12 h,自裂解形成随机裂纹模板.



图 6 提拉法制备裂纹模板示意图

Fig. 6. Schematic of crack template prepared by pulling method.



图 7 提拉法制备的双层裂纹模板的金相显微镜观测结 果图 (a) 20×镜头下的正面裂纹图案; (b) 50×镜头下的 正面裂纹图案; (c) 20×镜头下的背面裂纹图案; (d) 50×镜 头下的背面裂纹图案

Fig. 7. Metallographic microscope observation pattern of double-layer crack template by pulling method: (a) Top crack pattern under $20 \times \text{lens}$; (b) top crack pattern under $50 \times \text{lens}$; (c) bottom crack pattern under $20 \times \text{lens}$; (d) bottom crack pattern under $50 \times \text{lens}$; (d) bottom crack pattern under $50 \times \text{lens}$.

采用金相显微镜分别在 20×和 50×镜头下对制备 的双层裂纹模板进行观测, 如图 7 所示, 裂纹模板 的裂纹网络随机分布且尺寸分布趋势基本一致.

在制备得到双层裂纹模板样品后,分别采用磁 控溅射镀膜工艺对裂纹模板的正反面溅射沉积 50 nm 厚度的金属铬与 500 nm 厚度的铜.制备得 到双面金属沉积的金属薄膜样品如图 8 所示,金 属沉积表面均匀且光洁.采用金相显微镜对得到的 金属沉积样品的微观形态进行了观测,如图 9 所 示,整体金属线分布明显,呈现与裂纹图案类似的 随机网络分布特性.同时,金属沉积网络图案有部 分离散区域的金属线呈黑色分布,这是由于观测过 程中部分区域反射光强进入显微镜较弱,导致光线 变暗.



图 8 提拉法制备的双层金属沉积样品示意图

Fig. 8. Diagram of the double-layer metal deposition by pulling method.



图 9 提拉法制备双层金属沉积样品的金相显微镜观测 结果图 (a) 20×镜头下的正面金属沉积图案; (b) 50×镜 头下的正面金属沉积图案; (c) 20×镜头下的背面金属沉积 图案; (d) 50×镜头下的背面金属沉积图案

Fig. 9. Metallographic microscope observation pattern of the double-layer metal deposition by pulling method: (a) Top metal deposition pattern under $20 \times$ lens; (b) top metal deposition pattern under $50 \times$ lens; (c) bottom metal deposition pattern under $20 \times$ lens; (d) bottom metal deposition pattern under $50 \times$ lens. 为得到基于提拉法制备的双层 MMTCF 样品, 采用超声清洗与丙二醇丁醚有机溶剂相结合的方 式去除裂纹胶以及覆盖在裂纹胶表面的金属薄膜, 这样得到双层 MMTCF 样品如图 10 所示.得到双 层网格样品后,使用金相显微镜对样品的显微结构 进行观测,得到相应的金相显微图案如图 11 所示. 可以看出,该样品双面的金属网格线条分布基本类 似,整体上金属线条呈现随机分布,其线宽在 0.72— 1.4 µm 之间,周期间距为 15.91—30.23 µm,金属 网格线条清晰完整.



图 10 提拉法制备的双层 MMTCF 样品示意图 Fig. 10. Diagram of the double-layer MMTCF sample by pulling method.



图 11 提拉法制备的双层金属网格样品的金相显微镜观测结果图 (a) 20×镜头下的正面金属网格图案; (b) 50×镜头下的正面金属网格图案; (c) 20×镜头下的背面金属网格图案; (d) 50×镜头下的背面金属网格图案

Fig. 11. Metallographic microscope observation pattern of the double-layer metal mesh by pulling method: (a) Top metal mesh pattern under $20 \times \text{lens}$; (b) top metal mesh pattern under $50 \times \text{lens}$; (c) bottom metal mesh pattern under $20 \times \text{lens}$; (d) bottom metal mesh pattern under $50 \times \text{lens}$.

3 MMTCF 样品的光/电性能测试

基于上述制备得到双层 MMTCF 样品,进一步分别测试其方阻、电磁屏蔽性能和透光率(光/ 电性能).

3.1 旋涂法工艺制备双层 MMTCF 样品 的光/电性能测试

首先采用四探针仪测试了双层金属网格样品 正面与背面的方阻值,分别在样品表面区域选取 10个均匀离散点位置测试方阻值来表征其导电性 能,如图 12 所示.可以看到,测得样品正面与背面 的方阻值均为 (3.5±0.4) Ω·□⁻¹,展现了良好的导 电性能.



图 12 双层 MMTCF 样品的方阻测试结果 Fig. 12. Square resistance measurement results of the double-layer metal mesh sample.

测试得到双层 MMTCF 样品的方阻值后,为 了说明双层 MMTCF 样品的性能提升情况, 在同 样条件下制备了相应的单层 MMTCF 样品进行性 能对比. 采用波导法在 Ku 波段 (12-18 GHz) 对 制备得到的单层与双层金属网栅透明导电薄膜样 品的电磁屏蔽效能进行了测试,如图 13 所示.可 知在测试的 Ku 波段范围内, 双层金属网格样品 的电磁屏蔽效能为 60 dB 左右, 而单层金属网格 样品的屏蔽效能约为 30 dB. 双层实测电磁屏蔽 效能结果大于单层金属网格样品 30 dB, 相对于单 层结构,制备的双层金属网格电磁屏蔽效能增强 明显. 基于双层金属网格增强电磁屏蔽的机理分 析^[13], 双层结构的层间距与电磁屏蔽性能密切相 关, 双层结构能明显提升金属网格的电磁屏蔽性 能,上述测试结果验证了双层结构性能提升分析的 有效性.

除了方阻值与电磁屏蔽效能,还测试了样品的 透光性能,测试结果如图 14 所示.由图 14 可知, 单层样品在可见光 400—700 nm 波长范围内的平 均透光率为 83.75%,双层样品的透光率为 72.85%, 双层金属网格样品的透光率比单层样品下降了 10.9%. 这由于双层金属网格的金属线条遮挡区域 相对于单层有所增加, 因此导致其透光率有一定程 度的下降. 此外, 通过对单/双层 MMTCF 样品的 电磁屏蔽效能和透光性能的测试结果进行对比可 知, 相同条件下制备的双层金属网格样品在损失 10.9% 的透光性能情况下, 其电磁屏蔽效能大于单 层金属网格样品 30 dB. 这说明基于裂纹模板法制 备的双层金属网格样品, 可在牺牲一定透光率前提 下有效地增强 MMTCF 的电磁屏蔽性能.



图 13 双层 MMTCF 样品屏蔽效能测试结果对比

Fig. 13. Comparison of electromagnetic shielding effectiveness results for the double-layer metal mesh sample.



图 14 双层 MMTCF 样品透光率测试结果对比

Fig. 14. Comparison of optical transmittance results for the double-layer metal mesh sample.

3.2 提拉法工艺制备双层 MMTCF 样品 的光/电性能测试

本节对提拉法制备的双层金属网格样品方阻、 电磁屏蔽性能及透光率进行了测试.采用四探针仪 分别测试了双层金属网格样品正面与背面的方阻 值,在样品表面整个区域选取 10 个均匀离散点位 置测试方阻值来表征其导电性能,如图 15 所示, 测得正面与背面的方阻值均为 (3.7±0.7) Ω·□⁻¹, 展现了良好的导电性能.



图 15 提拉法制备的双层金属网格样品方阻测试结果 Fig. 15. Square resistance measurement results of the double-layer metal mesh sample by pulling method.

与前面旋涂法制备双层金属网格样品的测试 过程类似, 在测试了双层 MMTCF 样品的方阻值 后, 为对比制备的双层 MMTCF 样品的性能提升, 与同样提拉工艺制备的单层 MMTCF 样品进行性 能比较. 采用波导法在 Ku 波段对单层与双层 MMTCF 样品的电磁屏蔽效能进行了测试, 如图 16 所示. 单层金属网格的电磁屏蔽效能约为 30 dB, 同时双层金属网格的电磁屏蔽效能在 50 dB 左右. 对于同样条件下制备的单层金属网格样品, 双层金 属网格样品的电磁屏蔽效能的实测结果约提高了 20 dB. 以上结果同样验证了相对于单层结构金属 网格样品, 提拉法制备的双层金属网格电磁屏蔽效 能明显增强.



图 16 提拉法制备的双层 MMTCF 样品的电磁屏蔽效能 测试结果对比

Fig. 16. Comparison of electromagnetic shielding effectiveness results for the double-layer metal mesh sample by pulling method. 另外, 在测试得到方阻值与电磁屏蔽效能结果 后, 还测试了样品的透光率, 测试结果如图 17 所 示. 同样条件下制备的单层样品在可见光 400— 700 nm 波长范围内的平均透光率 83.34%, 双层样 品的透光率为 74.96%, 制备的双层金属网格样品 的透光率比单层样品下降了 8.38%.



图 17 提拉法制备的双层 MMTCF 样品透光率测试结果 对比

Fig. 17. Comparison of optical transmittance results for the double-layer metal mesh sample by pulling method.

通过以上对提拉法制备的单/双层 MMTCF 样品的电磁屏蔽效能和透光性能的测试结果进行 对比,类似前面旋涂法制备的双层金属网栅样品的 测试结果,双层金属网格样品在损失一定的透光性 能情况下,其电磁屏蔽效能明显高于单层金属网格 样品.这也进一步验证了基于裂纹模板法制备的双 层金属网格样品可以有效地增强 MMTCF 的电磁 屏蔽效能.

除了双层金属网格能明显提高电磁屏蔽性能, 金属网格的密度与电磁屏蔽性能也密切相关.金属 网格密度越大,电磁屏蔽性能越好,但与此同时其 透光率越低^[13].而金属网格的理论分析表明,由于 金属网格的电磁屏蔽效能随着频率的增加而降低, 对于双层样品,在其厚度不变的情况下,频率越高, 说明双层的相对厚度越大,所对应的电磁屏蔽性能 越差^[13].

4 基于裂纹模板法的双层 MMTCF 制备研究讨论

第3节中基于裂纹模板法的双层 MMTCF 制备和性能研究中通过样品实测已验证,基于裂纹 模板法制备的双层 MMTCF 在相对于单层网格损 失一定透光率性能的前提下可明显提升其电磁屏 蔽效能.其中,采用旋涂工艺制备双层 MMTCF 的 制备过程和单层 MMTCF 类似,而其中有关裂纹 胶溶液的旋涂性能、金属溅射沉积和裂纹胶去除的 讨论已在文献 [22] 中详细讨论,因此未再赘述.本 节中有关双层 MMTCF 制备研究讨论,主要集中 在采用提拉法制备双层 MMTCF.

本节在对采用提拉法工艺制备双层裂纹模板 的过程中,在裂纹胶种类与浓度不变的情况下,将 透明基底浸没于裂纹胶溶液后,设置不同的提拉速 度,可得到不同厚度的裂纹胶薄膜.裂纹胶薄膜的 厚度变化又对应了不同的随机裂纹图案的孔径周 期与裂缝宽度.因此,研究了裂纹模板在不同提拉 速度下对应的裂纹图案尺寸分布规律.

实验中,采用与旋涂法同样的 dolphin-1062T 型水性丙烯酸树脂作为裂纹材料以制备裂纹模板. 首先,将透明基底浸没于裂纹胶溶 10 min,以保证 样品与裂纹胶溶液的充分接触与浸润.然后,在提拉 设备控制端,分别设置不同提拉速度参数 10, 20, 30, 40, 50, 60 及 70 μm/s,最后得到相应的裂纹模板 样品.在提拉过程中,确保提拉环境处于常温状态 并保持良好通风即可.通过设置不同的提拉速度, 可获取提拉速度与裂纹网络尺寸分布之间的关系.

为研究不同提拉速度下对应裂纹尺寸的变化 趋势,通过金相显微镜对多点区域均匀测量采样的 方法分别得到多个 (≥ 10) 测量数据然后取平均, 得到对应裂纹周期与宽度尺寸数据. 另外, 裂纹深 度数据采用台阶仪同样均匀随机选取多个 (≥ 10) 测量区域进行数据测量,然后对采集的测量结果取 平均,得到裂纹深度数据.通过金相显微镜图案观 测与台阶仪裂纹深度测量后,可获得裂纹周期、宽 度及深度数据. 图 18 绘制了提拉速度与裂纹尺寸 关系的分布曲线.可以看到,随着提拉速度的增加, 裂纹模板的裂纹周期、深度及宽度的尺寸分布总体 变化趋于减小,但不呈线性规律分布.在10 μm/s 开始的低提拉速度下,裂纹网络的周期、深度与宽 度尺寸都较大. 随着提拉速度增加, 裂纹周期初始 下降速度快,随着速度的继续增加,裂纹尺寸变化 速度趋缓, 而裂纹宽度与深度尺寸一开始就呈现平 缓变化. 当提拉速度达到 50 µm/s 之后, 裂纹周 期、宽度与深度都达到相对稳定的水平,尺寸也变 化平缓.因此,后续实验亦采用在该提拉速度下制 备双层金属网格样品.





Fig. 18. Relationship curve between the pulling speed and the crack size distribution.

5 结 论

本文针对基于裂纹模板法制备单层网格透明 导电薄膜的电磁屏蔽性能不够理想的情况,制备了 两种双层 MMTCF, 以提升电磁屏蔽性能. 首先通 过传统的旋涂法工艺制备了双层裂纹模板后,进一 步经过金属沉积和去胶后得到双层 MMTCF 样品. 与同样条件下制备的单层金属网格样品进行实测 结果对比后,可知制备的双层金属网格样品相对于 单层金属网格样品在损失 10.9% 的透光性能情况 下在 Ku 波段的电磁屏蔽效能提升了 30 dB. 另外, 进一步提出了提拉法工艺制备双层裂纹模板并经 过金属沉积和去胶后得到双层 MMTCF 样品. 测 试结果表明,与同样条件下制备的单层金属网格样 品相比,双层金属网格样品的透光率比单层样品下 降了 8.38% 的同时在 Ku 波段的电磁屏蔽效能提 升了 20 dB. 通过对基于裂纹模板法的两种双层 MMTCF 的制备研究和测试,验证了双层结构可 以在损失一定透光率的前提下大幅提升电磁屏蔽 性能,这为后续高电磁屏蔽性能的双层 MMTCF 的制备研究提供了参考.

参考文献

- Qiu L, Li L, Pan Z, Sun X, Yan W 2018 MATEC Web of Conferences 189 1003
- [2] Wang W, Bai B, Zhou Q, Ni K, Lin H 2018 Opt. Mater.

Express 8 3485

- [3] Kai C, Wang K, Liu C 2019 10th EAI International Conference, WiSATS 2019, Part II Harbin, China, January 12–13, 2019 pp656–660
- [4] Shi K, Su J, Hu K, Liang H 2020 J. Mater. Sci. Mater. Electron. 31 11646
- [5] Corredores Y, Besnier P, Castel X, Sol J, Dupeyrat C, Foutrel P 2017 IEEE Trans. Electromagn. Comput. 59 1070
- [6] Zhang Y, Dong H, Li Q, Mou N, Chen L, Zhang L 2019 RSC Adv. 9 22282
- [7] Smith H A, Rebbert M, Sternberg O 2003 Appl. Phys. Lett. 82 3605
- [8] Wang H, Lu Z, Liu Y, Tan J, Ma L, Lin S 2017 Opt. Lett. 42 1620
- [9] Gu J, Hu S, Ji H, Feng H, Zhao W, Wei J, Li M 2020 Nanotechnology 31 185303
- [10] Kaipa C S, Yakovlev A B, Medina F, Mesa F, Butler C A, Hibbins A P 2010 Opt. Express 18 13309
- [11] Lu Z, Wang H, Tan J, Lin S 2014 Appl. Phys. Lett. 105 241904
- [12] Lu Z, Liu Y, Wang H, Tan J 2016 Appl. Opt. 55 5372
- [13] Liao D W, Zheng Y J, Cui H, Cun T, Fu Y Q 2022 Opt. Precis. Eng. 30 1310 (in Chinese) [廖敦微, 郑月军, 崔浩, 寸 铁, 付云起 2022 光学精密工程 30 1310]
- [14] Jiang Z, Zhao S, Huang W, Chen L, Liu Y H 2020 Opt. Express 28 26531
- [15] Rao K D M, Hunger C, Gupta R, Kulkarni G U, Thelakkat M 2014 Phys. Chem. Chem. Phys. 16 15107
- [16] Han B, Pei K, Huang Y, Zhang X, Rong Q, Lin Q, Guo Y, Sun T, Guo C, Carnahan D, Giersig M, Wang Y, Gao J, Ren Z, Kempa K 2014 Adv. Mater. 26 873
- [17] Kiruthika S, Gupta R, Rao K D M, Chakraborty S, Padmavathy N, Kulkarni G U 2014 J. Mater. Chem. C 2 2089
- [18] Xiao Z H, Wang X L, Han C, Zhang S Q, Fu S, Yu Y L 2018 *J. Xinyu Univ.* 23 1 (in Chinese) [肖宗湖, 王新莲, 韩春, 张帅 旗, 付爽, 余玉玲 2018 新余学院学报 23 1]
- [19] Han Y, Lin J, Liu Y, Fu H, Ma Y, Jin P, Tan J 2016 Sci. Rep. 6 25601
- [20] Kim Y, Tak Y, Park S, Kim H 2017 Nanomaterials 7 214
- [21] Muzzillo C P, Reese M O, Mansfield L M 2020 Langmuir 36 4630
- [22] Liao D W, Zheng Y J, Chen Q, Ding L, Gao M, Fu Y Q 2022 Acta Phy. Sin. 71 154201 (in Chinese) [廖敦微, 郑月军, 陈强, 丁亮, 高冕, 付云起 2022 物理学报 71 154201]
- [23] Yang C, Merlo J M, Kong J, Xian Z, Han B, Zhou G, Gao J, Burns M J, Kempa K, Naughton M J 2018 *Phys. Status Solidi A* 215 1700504
- [24] Voronin A S, Fadeev Y V, Govorun I V, Simunin M, Tambasov I A, Karpova D V, Smolyarova T E, Lukyanenko A V, Karacharov A, Nemtsev I V, Khartov S V 2021 J. Mater. Sci. 56 14741
- [25] Voronin A S, Fadeev Y V, Makeev M O, Mikhalev P A, Osipkov A S, Provatorov A S, Ryzhenko D S, Yurkov G Y, Simunin Ml M, Karpova D V, Lukyanenko A V, Kokh D, Bainov D, Tambasov I A, Nedelin S V, Zolotovsky N A, Khartov S V 2022 Materials 15 1449

Preparation and performance of double-layer metal mesh transparent conductive films based on crack template method^{*}

LIAO Dunwei¹⁾ ZHOU Jianhua¹⁾ ZHENG Yuejun^{2)†}

1) (School of Information Science and Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China)

2) (College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 16 September 2024; revised manuscript received 25 November 2024)

Abstract

In order to improve the electromagnetic shielding performance of the single-layer metal mesh transparent conductive films (SMMTCFs) based on the crack template method, the preparation of double-layer metal mesh transparent conductive films (DMMTCFs) by using the crack template method is studied. The double-layer cracked templates are prepared by spin-coating crack glue on both sides of the transparent substrate and by pulling the transparent substrate from the cracked adhesive solution with a certain rate to obtain the corresponding double-layer cracked templates, respectively. After obtaining the double-layer crack templates by the spin-coating method and the pulling method, respectively, the corresponding DMMTCF samples are obtained by metal deposition and degumming process. First, the performances of single-layer and double-layer metal mesh samples prepared by the spin-coating method under the same conditions are measured and compared with each other, and the optical transmittance of the double-layer structure decreases by nearly 10.9% compared with that of the single-layer structure, while the electromagnetic shielding effectiveness in the



^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61901493) and the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant No. 2022JJ50239).

 $[\]dagger$ Corresponding author. E-mail: <code>zhengyuejun18@nudt.edu.cn</code>

Ku band (12–18 GHz) increases by 30 dB. In addition, the double-layer metal mesh sample prepared by the pulling method is also tested. Compared with the single-layer metal mesh sample prepared under the same conditions, the double-layer structure can improve electromagnetic shielding effectiveness in the Ku band by 20 dB under the premise of losing 8.38% optical transmittance. The measurement results show that the electromagnetic shielding performance of the double-layer metal mesh transparent conductive films can be significantly improved at the expense of some optical transmittance performances. Through the preparation and performance study of DMMTCFs based on the cracked template method, the low-cost advantage of the cracked template method can be fully utilized to prepare DMMTCFs with high electromagnetic shielding performance.

Keywords: crack template method, dual-layer metal mesh transparent conductive films, high electromagnetic shielding performance, magnetron sputtering

PACS: 42.25.Bs, 42.68.Ay, 42.70.-a, 78.67.-n

DOI: 10.7498/aps.74.20241305

CSTR: 32037.14.aps.74.20241305





Institute of Physics, CAS

基于裂纹模板法的双层金属网格透明导电薄膜制备及性能

廖敦微 周建华 郑月军

Preparation and performance of double-layer metal mesh transparent conductive films based on crack template method

LIAO Dunwei ZHOU Jianhua ZHENG Yuejun

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 74, 014201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241305 在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.74.20241305 当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于裂纹模板法的金属网格透明导电薄膜制备及性能改进

Preparation and performance improvement of metal grid transparent conductive film based on crack template method 物理学报. 2022, 71(15): 154201 https://doi.org/10.7498/aps.71.20220101

F, Al共掺杂ZnO透明导电薄膜的制备及掺杂机理研究 Insight of the doping mechanism of F and Al co-doped ZnO transparent conductive films

物理学报. 2020, 69(19): 197801 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200580

金属网格-透明导电氧化物复合型透明电极的瑞利分析和仿真

Rayleigh analysis and numerical simulations of metal-mesh/ transparent conducting oxide composite transparent electrode 物理学报. 2024, 73(14): 146801 https://doi.org/10.7498/aps.73.20240230

透明导电ZnO:Al/Cu网格复合膜及其电加热性能

Transparent conductive ZnO:Al/Cu mesh composite film and its electric heating performance 物理学报. 2022, 71(18): 187304 https://doi.org/10.7498/aps.71.20220529

引入籽晶层的物理溅射生长Ga2O3外延薄膜特性研究

Characteristics of Ga₂O₃ epitaxial films on seed layer grown by magnetron sputtering

物理学报. 2020, 69(22): 228103 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200810

TiO薄膜的制备及电输运性质

Preparation and electrical transport properties of TiO thin films 物理学报. 2023, 72(22): 227302 https://doi.org/10.7498/aps.72.20231083