

文章编号: 1001-3806(2014)03-0289-04

一种激光刻蚀制作圆柱形介质天线的方法

周 洋, 王德苗*, 金 浩, 郑小婵
(浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 圆柱形介质加载四臂螺旋天线因宽波束、圆极化、体积小等优点被认为是微小卫星天线的理想方案。为了解决介质加载四臂螺旋天线制作的难点, 提出了一种全新的磁控溅射金属化加激光刻蚀的新工艺, 采用计算机数控结合激光刻蚀的柔性加工技术, 制作出 3 维立体的四臂螺旋结构, 制备了应用于微小卫星系统的介质加载四臂螺旋天线, 相对于传统工艺, 大大提高了加工精度, 并缩短了加工周期。结果表明, 天线的电气性能达到了设计要求, 且具有良好的机械性能。该研究为以后此类曲面共形天线的制作提供了参考。

关键词: 激光技术; 介质天线; 柔性加工; 四臂螺旋; 磁控溅射

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.03.001

Fabrication method of cylindrical dielectric-loaded antenna by means of laser etching

ZHOU Yang, WANG Demiao, JIN Hao, ZHENG Xiaochan

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Cylindrical dielectric-loaded quadrifilar helix antenna is an ideal choice for small satellite antenna owing to its advantages of wide beam, circular polarization and small volume. In order to solve the difficulty of the manufacture of dielectric-loaded quadrifilar helix antenna, a novel manufacture method combing magnetron sputtering metallization and laser etching was introduced. Computer control system with laser etching technology was used to produce three-dimensional quadrifilar helix structure, which is suitable for small satellite systems. The novel process can greatly improve the machining accuracy and shorten the processing cycle compared with traditional process. The results show that the manufactured antenna has good electrical performance, which meets the design requirements of a small satellite system, as well as good mechanical properties. It offers a method of manufacture of the cylindrical conformal antenna.

Key words: laser technique; dielectric-load antenna; flexible manufacture; quadrifilar helix; magnetron sputtering

引 言

四臂螺旋天线最早由 KILGUS 在 1968 年提出^[1], 后因其宽波束、圆极化的特性被广泛应用于空间通讯中^[2]。2001 年, LEISTEN 提出了介质加载四臂螺旋天线^[3], 实现了四臂螺旋天线的小型化, 也为后面应用于微小卫星打下了基础。相对于传统的平面天线, 介质加载的四臂螺旋天线因其 3 维曲面结构在制作上存在诸多难点。目前, 对于此类曲面共形天线的加工主要利用掩膜的方法。LEISTEN

采用在介质表面电镀铜, 然后涂覆光刻胶, 再借助立体掩膜套并紫外曝光的方法制备介质加载四臂螺旋天线^[4], 但是这种工艺存在诸多的不足: 首先, 电镀的铜膜与介质基底的结合力较差, 在长期使用尤其是高温环境下铜膜极易脱落, 不适应微小卫星恶劣的空间环境; 其次, 立体掩膜套加工不易, 尺寸误差较大, 导致天线圆柱体表面加工成型的 4 条螺旋臂精度不高, 从而使实际性能与设计指标偏差较大, 往往需要后期校调; 再次, 电镀工艺对环境污染较大, 也不是一个理想的金属化(介质表面形成金属膜)方法。此外, WU 等人提出了一种柔性微带法^[5], 通过光刻在柔性基底上腐蚀出天线的图案, 再将图案卷绕在介质上形成四臂螺旋天线, 这种方法成本相对于掩膜法较低, 工序也相对减少。但是同样, 这种工艺也存在工序复杂, 加工精度难以掌握, 且不适于

基金项目: 浙江省教育厅科研资助项目(Y200805433)

作者简介: 周 洋(1986-), 男, 硕士研究生, 现主要从事微小卫星天线的研究。

* 通讯联系人。E-mail: iseedm@zju.edu.cn

收稿日期: 2013-07-10; 收到修改稿日期: 2013-08-30

微小卫星恶劣的空间环境等缺点。

近几年,随着激光器质量的提高,以及微机数控的完善,激光刻蚀技术越来越广泛应用于各种天线加工^[6]。因此,针对微小卫星应用,作者提出了一种全新的磁控溅射金属化加激光刻蚀的新工艺,该工艺采用绿色环保且成膜质量高的磁控溅射技术对介质表面进行金属化,再利用计算机数控结合激光刻蚀的柔性加工技术,实现3维立体四臂螺旋结构的制作,解决了印刷四臂螺旋天线加工难的问题。

1 实验原理和设备

激光刻蚀主要是通过短脉冲、高功率的激光束作用于材料表面,使得材料在吸收了激光能量后温度升高,发生熔化乃至汽化,达到材料的精确去除。激光是以非机械式的“刀具”进行加工,对材料不产生机械挤压或机械应力,而且由于脉冲时间短,热作用只限于激光光斑区域^[7],对材料附近不产生热变形等影响,无“刀具”磨损、无毒、无环境污染,选择合适的激光源和激光功率大小可以对绝大多数的金属或非金属材料进行加工^[8]。

介质基体上高质量的金属薄膜对天线的电气性能有着重大影响,薄膜的均匀度和厚度都会对后面的激光刻蚀造成影响,因此作者采用工艺环保、成膜质量高、且膜厚精确可控的磁控溅射技术对陶瓷基体进行镀铜。磁控溅射主要是利用真空中高能粒子在电场作用下轰击靶材表面,使靶材粒子发生溅射,从而使溅射粒子沉积在工件上。磁控溅射可通过不同靶材来沉积不同材料,所得的膜层细腻、均匀、结合力好^[9]。

介质加载四臂螺旋天线的结构如图1所示,它的主体为一个圆柱形基体,布上4条螺旋金属线作为辐射体^[10],利用同轴线通过圆柱体轴心在顶部馈电,底部为一个巴伦。考虑到圆柱体侧面是一个曲面,如果通过单一控制激光束来刻蚀形成螺旋图形

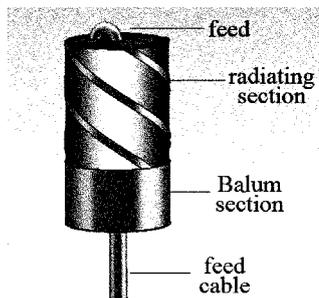


Fig. 1 Dielectric-loaded quadrifilar helix antenna

有一定的难度,所以采用计算机数控系统,将圆柱体基体置于旋转台上,通过软件系统控制旋转台转动配合激光束沿圆柱体轴向线性扫描,利用两者的合运动形成螺旋线图案。其加工示意图如图2所示。

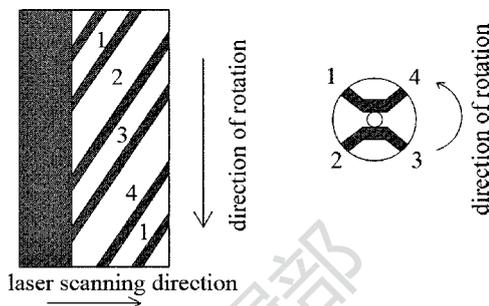


Fig. 2 Laser etching process

实验中用的激光器为深圳大族激光生产的 EP-12A 半导体抽运激光器,激光波长为 1064nm,激光模式为 TEM₀₀ 模,激光脉宽为纳秒级。它可以通过计算机软件对控制器发出指令驱动 x 轴、y 轴振镜来控制激光束的扫描方向,同时利用旋转工作台旋转工件,两者配合就能将平面图形刻蚀在圆柱体上。其整体示意图如图3所示,只需在计算机 CAD 控制界面上绘制出圆柱曲面的平面展开图,系统就能按照所绘的图形在圆柱体上进行刻蚀。激光扫描速率最高可达 7000mm/s,最小扫描线宽为 0.01mm,通过计算机对矢量图形提取扫描路径,可以制作出精细的图案,利用这种动态旋转的扫描方式,可使图形在圆弧面上线条顺滑、无断点、无拼接,所得图形精度可达 0.01mm,达到常规工艺所不能达到的效果。

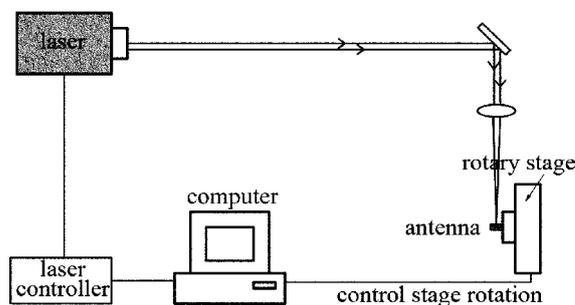


Fig. 3 Experiment system for making antenna

用于陶瓷基体金属化的磁控溅射系统为实验室自制的多靶磁控溅射仪。天线 S 参数的测量采用 Agilent 5071C 矢量网络分析仪,方向图的测量在浙江大学应用电磁波实验室的微波暗室中进行,仿真设计采用 CST Microwave STUDIO 软件,天线金属化铜膜与陶瓷基体的结合力强度采用福州艾普仪器有限公司生产的 K-50H 型拉力计测得。

2 实验步骤

2.1 介质金属化

为保证磁控溅射镀膜的质量,先对陶瓷基体进行超声清洗,确保所镀的铜膜具有良好的结合力。

本实验中的主要条件为本底气压 5×10^{-3} Pa, 溅射气压 5×10^{-1} Pa, 溅射电流 1A, 溅射时间 2h, 靶材为工业纯铜。同时为保证圆柱基体上铜膜均匀沉积,在溅射过程中利用电机驱动基体匀速转动。

2.2 激光刻蚀

对于完成镀铜的陶瓷基体,必须去除多余的铜层,形成四臂螺旋的结构,这里主要有两种方式。

第1种方法利用激光器按上述方法直接对铜层进行刻蚀^[11],因为铜的融限比较低,因此激光束对铜膜能直接消除,这种方法的优点是工序简单,一次加工就能成形,缺点是需要准确控制激光的功率,功率过小,铜膜就会残留,功率过大,激光就会损伤陶瓷基体,无论何种结果都会对天线性能造成一定影响,因此实施的时候需要多次试验来确定合适的激光功率。

第2种方法对第1种方法进行了改进,先对镀铜基体进行表面喷漆处理,利用油漆覆盖铜膜,然后用激光器根据设定的图形对油漆进行刻蚀,将最后要去除的铜膜暴露出来,接着通过湿法腐蚀将暴露出来的铜膜腐蚀掉,而天线图形部分的铜膜由于受到油漆的保护得到保留,最后用丙酮去除油漆,完成天线主体的制作。由于油漆的融限更低,因此激光器对其刻蚀更容易,而且因为底下存在一层铜膜,所以不会因激光功率过大而损伤陶瓷,最后的湿法腐蚀也保证了铜膜能去除地更干净。因激光刻蚀的精度远高于传统掩膜套的机械加工精度,因此本方法获得的天线的螺旋臂具有良好的线条精度。

完整的工艺流程如图4所示。



Fig. 4 Bare ceramic substrate, copper coating, paint coating, laser etching, chemical etching, antenna product (from left to right)

3 实验结果和讨论

通过磁控溅射镀膜加激光刻蚀得到的天线如图5所示。本天线圆柱体高度 17.8mm, 直径为 10mm, 金属螺旋线宽仅为 1.5mm, 天线图形边缘整齐、尺



Fig. 5 Finished antenna

寸精确,对于这种微小尺寸的介质天线而言,传统的掩膜法无法制作精度很高的立体掩膜来符合设计要求,同时,本工艺对于天线图形一次成型,与柔性微带法相比,不存在拼接错位和螺旋线定位不精确的不足,也省去了后期卷绕,粘接成形等一系列步骤。针对电镀天线存在金属层易脱落的现象,采用点焊的方式并用拉力计对天线金属层与陶瓷基体的结合力进行测试,其结合力达到了 $31.4\text{N}/\text{mm}^2$, 表现出良好的机械特性,满足天线在恶劣环境下工作的条件。最后,采用矢量网络分析仪与微波暗室对天线的电气性能进行了测试,结果如图6所示,天线谐振在 2.03GHz, 且具有较宽的波束,考虑到加工和测试过程中的误差,与仿真结果基本相符,微小卫星天线要求工作频率在 2GHz, 波束宽度大于 120° , 根据实测结果显示,本天线在误差范围内符合设计要求。

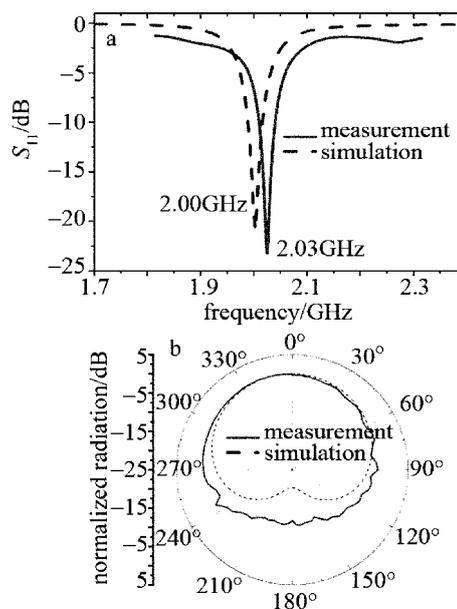


Fig. 6 a— S_{11} curve of the antenna b—normalized radiation pattern

4 结论

通过磁控溅射加激光刻蚀的方法制作了介质加载四臂螺旋天线,相比传统的方法,大大简化了工艺,提高了加工精度,为大规模生产提供了可能,所

制作的天线符合微小卫星系统的电气性能要求,且具有良好的机械特性。同时,这种计算机数控与激光刻蚀相结合的系统也可以推广到制作其它圆柱体曲面共形天线的应用中。

参 考 文 献

- [1] KILGUS C. Multielement, fractional turn helices[J]. *Antennas and Propagation*,1968,16(4):499-500.
- [2] KILGUS C. Spacecraft and ground station applications of the resonant quadrifilar helix[C]//*Antennas and Propagation Society International Symposium*. Atlanta, USA; IEEE,1974:75-77.
- [3] LEISTEN O, VARDAXOGLU J C, McEVOY P, *et al.* Miniaturised dielectrically-loaded quadrifilar antenna for global positioning system (GPS) [J]. *Electronics Letters*, 2001, 37 (22): 1321-1322.
- [4] LEISTEN O. Laser-assisted manufacture for performance-optimized dielectrically loaded GPS antennas for mobile telephones [J]. *Proceedings of SPIE*,2003,4637:397-403.
- [5] WU B G. Manufacture technology of an omnidirectional antenna [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2003, 19 (5): 34-36 (in Chinese).
- [6] YANG J P, CHEN X K, WU G, *et al.* Laser ablation and its application in fabrication of spacecraft antennas[J]. *Aerospace Manufacture Technology*, 2011(3): 51-54 (in Chinese).
- [7] PEI X, WU J H. Numerical simulation of transient temperature field on metal material induced by pulse laser irradiation[J]. *Laser Technology*, 2012,36(6):828-831 (in Chinese).
- [8] WANG H J, GUO W G, DONG Z H, *et al.* Application of laser etching technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2004,33(5): 469-472 (in Chinese).
- [9] YANG W M, LIU Y W, XU L X, *et al.* Review of film growth by sputtering technology[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*,2005,25(3):204-210 (in Chinese).
- [10] DU X Y, DONG Sh R, WANG D M. Design of dielectrically-loaded printed quadrifilar helical antenna for GPS applications [C]//*Conference Digest of the 2006 Joint 31st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics*. New York, USA: IEEE,2006:47.
- [11] LIU Y X. The basis study on the pulsed laser ablating metals [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007: 24-36 (in Chinese).