

文章编号 1004-924X(2017)03-0689-08

纸基 RFID 标签天线喷射打印化学反应沉积成形

肖 渊*, 刘金玲, 吴 姍, 申 松, 张津瑞
(西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:针对目前射频识别(RFID)标签天线制备成本高、工艺复杂等问题,提出微滴按需喷射 3D 打印与化学沉积技术相结合制备半波偶极子天线的方法。利用构建的气动式双喷头微滴喷射系统,采用试验研究的方法,对系统按需喷射条件下产生硝酸银与抗坏血酸微滴的一致性以及基板运行速度对成线均匀性的影响进行研究,并对成形导线的电阻率进行测试;在此基础上设计、仿真和制备了半波偶极子天线,对其性能参数进行了测试。结果表明:系统产生的微滴均匀性较好;基板速度小于或等于 0.5 mm/s 时,硝酸银成线边缘光滑度较好;成形导线的电导率为 $1.57 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$;打印成形的半波偶极子天线谐振频率、谐振点回波损耗 S_{11} 参数等与仿真结果具有较好的一致性。为 RFID 标签天线提供了一种低成本制备方法。

关键词:微滴喷射;化学沉积;电阻率;RFID 标签天线

中图分类号:TH16;TN820 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0689

Fabrication of paper-based RFID tag antennas using jet printing and chemical deposition

XIAO Yuan*, LIU Jin-ling, WU Shan, SHEN Song, ZHANG Jin-rui

(College of Mechanical & Electrical Engineering,
Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

* Corresponding author, E-mail: xiaoyuanjidian@xpu.edu.cn

Abstract: Considering the problems of RFID (Radio Frequency Identification) tag antennas, including high manufacturing cost and complicated process, a method for fabrication of half wave dipole antennas combining 3D micro-droplet jet printing with chemical reaction deposition was put forward. Method: a constructed double nozzle pneumatic micro-droplet ejection device was used to carry out an experimental research on micro-droplet consistency of silver nitrate and ascorbic acid produced under the required ejection conditions the impacts of substrate speed on the line forming uniformity, and conducted a test in resistivity of the formed conductor; based on this, a half wave dipole antenna was designed, simulated and fabricated, and a test was conducted in its performance parameters. The results show that micro-droplet produced by the system is in good uniformity; when substrate speed is less than or equal to 0.5 mm/s, the line forming margin of silver nitrate is relatively smooth, and conductivity of the formed conductor is $1.57 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$; parameters of the printed half wave dipole antenna, such as the resonant frequency, resonance point return loss (S_{11}) etc, are in good

收稿日期:2016-10-19;修订日期:2016-11-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51475350);西安工程大学研究生创新基金资助项目(No. CX201610)

consistency with the simulation results. Hence, the test provides a low-cost method for fabrication of RFID tag antennas.

Key words: micro-droplet ejection; chemical deposition; resistivity; RFID tag antennas

1 引言

随着无线射频识别 (Radio Frequency Identification, RFID) 通信技术的迅速发展, RFID 标签天线作为 RFID 系统中信息交互的重要桥梁, 越来越受到人们的广泛关注^[1]。目前常见的 RFID 标签天线制造方法有蚀刻法、绕线法及印刷法等^[2]。其中, 蚀刻法存在工艺复杂、成本高和污染环境等缺点; 绕线法存在生产效率低、成本大、厚度高、不耐弯折等问题。印刷法主要包括丝网印刷、凹版印刷及喷墨印刷等^[3-4]。其中丝网印刷所使用材料黏度高, 致使制备的墨层厚度大; 凹版印刷过程需施加较大压力, 造成天线发生扭曲变形而影响天线的性能^[5]。喷墨印刷是将墨汁从喷孔中射出, 按照预设图形沉积于载体上, 以形成所需要的图形, 具有非接触、工艺简单、成线精度高、喷射材料黏度低等优点^[6], 是一种较为理想的标签制备方法。Alford Chauraya 等使用喷墨打印机分别在聚酰亚胺薄膜、涤纶/棉织物、PU 涂覆的可伸缩织物等基质上打印柔性偶极子天线^[7], 实现了可穿戴天线的喷墨打印; Rushi Vyas 等利用 Dimatix DMP-2800 打印机在纸质基质上制备了偶极子天线及相关电路, 首次利用该技术制备出完整的传感无线平台^[8]。大连理工大学利用 Dimatix DMP-2831 打印机制备了可与 SL3ICS1202 芯片阻抗匹配的标签天线^[9], 但该技术喷射材料为纳米银墨水, 存在制备工艺复杂、成本较高等问题^[10], 且后续需要烧结处理, 较高的烧结温度会影响基底材料的性能。

微滴喷射自由成形技术是在喷墨打印技术基础上发展起来的新技术^[11-13], 具有微滴尺寸可控、喷射材料范围广^[14]、非接触、成本低、无污染和效率高等优点, 是一种极具发展潜力的材料成形方法。南京理工大学采用该技术制备了 RFID 标签天线, 其性能与仿真结果具有较好的一致性^[5], 但其所用喷射材料为纳米银墨水, 成本较高。因此寻求一种 RFID 标签天线的低成本制造方法成为研究的热点。

本文提出微滴按需喷射 3D 打印与化学沉积技术相结合的射频标签天线制备方法。利用搭建的气动式双喷头微滴喷射系统, 在气压的驱动下, 分别控制双喷头按需产生硝酸银与抗坏血酸微滴, 精确沉积在纸质基板的预设位置, 在室温条件下经氧化还原反应得到微细银颗粒, 实现 RFID 天线的喷射打印反应成形。为 RFID 天线的低成本制备提供了一种新途径。

2 系统和方法

2.1 实验系统

气动式双喷头微滴喷射系统如图 1 所示^[15], 主要由微滴产生模块、喷射控制模块、图形采集模块、运动控制模块、STM32 微控制系统模块等组成。其中, 微滴产生系统主要由带有微喷嘴的腔体、气路三通、电磁阀、球阀等组成, 用来产生均匀的微滴, 其中喷嘴和腔体为整体结构, 采用硼硅酸盐玻璃管制成一端封闭的尖嘴状、经打磨和抛光制成不同尺寸的喷嘴; 图像采集系统由 CCD 相机、LED 光源等组成, 实现微滴产生动态过程的图像采集; 运动控制系统由卓立汉光 MC600 系列移动平台、运动控制器等组成, 实现沉积平台按指定轨迹运动。STM32 微控制系统实现液滴的喷射、运动平台移动、图像采集等过程的协调控制。

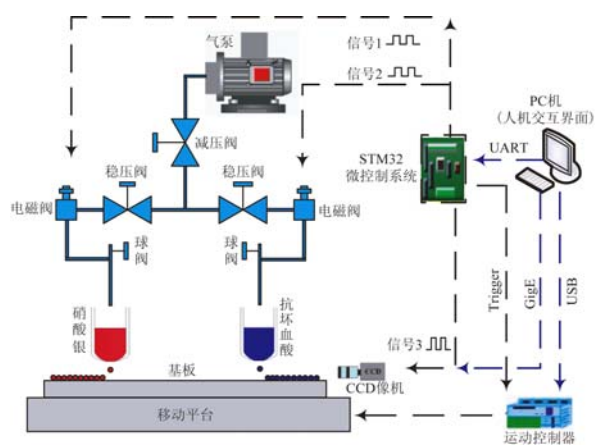
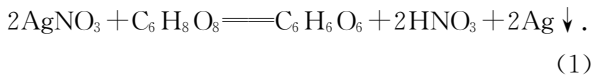


图 1 气动式双喷头微滴喷射系统

Fig. 1 Double nozzle pneumatic micro-droplet ejection system

2.2 实验原理

实验选用喷射材料硝酸银和抗坏血酸均为分析纯,基板为铜版纸,厚度为 $260\ \mu\text{m}$ 。沉积过程中首先依据天线频率计算出偶极子天线的具体尺寸,依照设计天线尺寸和形状编写移动平台的运动程序。在此基础上,通过微滴按需喷射与基板的协调控制,将硝酸银和抗坏血酸溶液精确沉积在预定的位置,在室温下还原出银颗粒,从而实现偶极子天线的直接打印成形。其反应化学方程式为:



3 微滴喷射沉积实验研究

天线喷射打印沉积成形过程中,实现微滴在基板上沉积的一致性和成形导线的均匀性是天线沉积制备的前提和基础,对微滴在基板上沉积的一致性及基板运动速度对成线均匀性的影响进行研究。

3.1 点阵沉积实验研究

获得均匀的液滴是沉积制备高性能天线的前提。利用开发的双喷头微滴喷射系统,使用孔径分别为 $120\ \mu\text{m}$ 和 $165\ \mu\text{m}$ 的喷嘴,对浓度为 $1.96\ \text{mol/L}$ 的硝酸银和 $1.31\ \text{mol/L}$ 抗坏血酸溶液沉积微滴的均匀性进行研究。通过调节喷射装置的控制参数,使喷射系统在一次控制信号作用下对应的产生单颗微滴,稳定喷射的控制参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 硝酸银稳定喷射控制参数表

Tab. 1 Silver nitrate deposition experiment parameter list

参数	供气压力 p/MPa	脉冲宽度 b/ms	喷射频率 f/Hz	球阀开口 $\theta/(\circ)$
数值	0.02	1.953	1	45

表 2 抗坏血酸稳定喷射控制参数表

Tab. 2 Ascorbic acid deposition experiment parameter list

参数	供气压力 p/MPa	脉冲宽度 b/ms	喷射频率 f/Hz	球阀开口 $\theta/(\circ)$
数值	0.02	1.953	1	20

在稳定喷射条件下,在铜板纸上分别进行的硝酸银和抗坏血酸液滴阵列沉积,在室温下固化,24 h 后的硝酸银和抗坏血酸阵列照片如图 2 和图 3 所示。

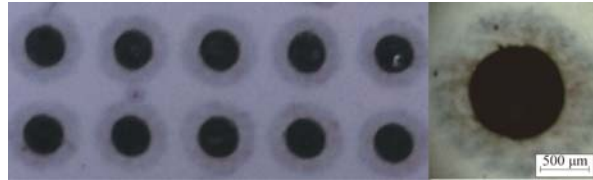


图 2 硝酸银阵列

Fig. 2 Silver nitrate array



图 3 抗坏血酸阵列

Fig. 3 Ascorbic acid array

由图 2、图 3 可看出,沉积在铜版纸上的硝酸银和抗坏血酸斑点形状较为规整,为了进一步分析沉积在基板上的微滴均匀性,采用图像分析软件分别对沉积的 64 个硝酸银斑点和抗坏血酸斑点的直径进行测量,利用平均值函数:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i, \quad (2)$$

式中: D_i 为测量硝酸银斑点直径, $n=1\sim 64$ 。

求得沉积在铜版纸的硝酸银和抗坏血酸斑点平均直径分别为 $883.4\ \mu\text{m}$ 和 $1\ 150.6\ \mu\text{m}$ 。

利用标准偏差函数:

$$D_{\text{STDEV}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \left[n \sum_{i=1}^n D_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n D_i \right)^2 \right]}. \quad (3)$$

计算得到硝酸银和抗坏血酸直径的标准偏差分别为 $12.6\ \mu\text{m}$ 和 $21.05\ \mu\text{m}$ 。采用变异系数来表征液滴直径的一致性:

$$C \cdot V = (D_{\text{STDEV}} / \bar{D}) 100\%. \quad (4)$$

得到变异系数分别为 1.4% 和 1.8% ,表明沉积的微滴具有较好的一致性。

3.2 导线沉积实验研究

微滴喷射成线是由一系列圆形微滴沉积连接而成,沉积过程中会产生边缘波浪状起伏,如图 4 所示^[16]。

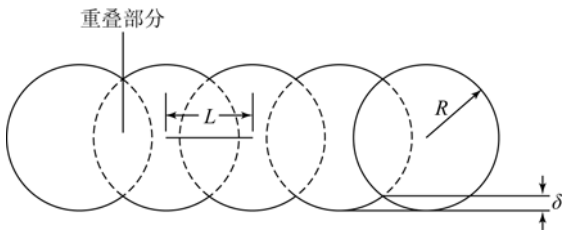


图 4 点成线原理图

Fig. 4 Principle diagram of point into a line

图 4 中 δ 为波峰到波谷的差值, L 为两硝酸银液滴圆心间的距离, R 为硝酸银液滴的半径。相邻液滴圆心的距离 L 由微滴喷射的频率与基板移动速度决定。设定喷射频率为 f , 基板的移动速度为 v , 则相邻液滴圆心的距离为:

$$L = v/f. \quad (5)$$

采用边缘光滑度 S 来评价导线边缘的齐整程度:

$$S = \delta/L, \quad (6)$$

$$\delta = R - \sqrt{R^2 - (L/2)^2}. \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得:

$$S = R/L - \sqrt{(R/L)^2 - 1/4}. \quad (8)$$

由式(8)可知, 沉积导线的边缘光滑度仅与 R/L 比值有关, R/L 越大, S 越小, 导线边缘越光滑。

经前期实验观察, 当按预先设计的轨迹进行喷射时, 后喷射的溶液会沿已成形的轨迹进行铺展, 保证第一层微滴的成线均匀性直接影响最终导线的成线质量。

由式(5)和式(8)可知, 在微滴尺寸、喷射频率及基板材料等参数一定的情况下, 其成线形貌主要与基板运动速度有关, 在稳定喷射条件下, 设定基板速度为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 和 0.8 mm/s, 得到不同的速度下沉积的硝酸银直线照片如图 5 所示。



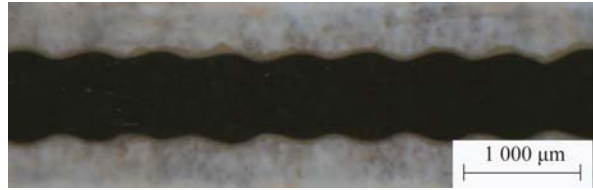
(a) 0.3 mm/s



(b) 0.4 mm/s



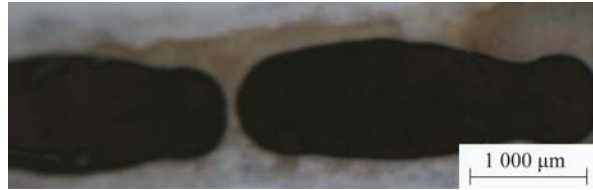
(c) 0.5 mm/s



(d) 0.6 mm/s



(e) 0.7 mm/s



(f) 0.8 mm/s

图 5 基板不同速度下所打印的硝酸银成线图

Fig. 5 Silver nitrate into line diagram under different substrate speed

由图 5 可以看出, 当速度小于 0.5 mm/s 时, 成形边缘具有较好的光滑度。当速度大于 0.5 mm/s 时, 直线波浪型增加明显。并且当速度为 0.8 mm/s 时出现断点, 无法连续成线。当边缘光滑度较好时, 选择较大的速度可以提高效率, 因此, 喷射硝酸银时基板速度选择 0.5 mm/s, 该速度下硝酸银成形的线宽为 765 μm 。

3.3 银导线电阻率的测试

银导线的电阻率是天线的性能仿真中需明确的重要参数:

$$\rho = \frac{R\omega t}{l}, \quad (9)$$

式中: R 为导线的阻值, ω 为导线横截面的线宽,

t 为横截面的厚度, l 为导线的长度。

为了获得式(9)的相关参数,在所述稳定喷射条件下,设定硝酸银和抗坏血酸喷射时,基板的运动速度分别为 0.5 mm/s 和 0.6 mm/s。通过 STM32 微控制系统分别发出信号给 2 个电磁阀和运动控制器,控制 2 个喷嘴先后喷射微滴与基板的协调动作,使得 2 个喷嘴在相同的轨迹上先后喷射两种溶液,两者通过氧化还原反应沉积,室温固化 24 h 后的导线如图 6 所示。



图 6 制备的银导线
Fig. 6 Fabricated silver wire

对图 6 中沉积的银导线进行测量,得到其平均宽度 w 为 900 μm 、长度 l 为 3 cm、厚度 t 约为 11 μm 、阻值为 47.6 Ω 。最终得到银导线电阻率为 $1.57 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ 。

4 天线的设计与制备

4.1 平面偶极子天线的设计与仿真

目前常见的平面天线有短偶极子天线、偶极子天线、半波偶极子天线、小环天线、微带天线和倒 F 天线等。选择应用范围广,频率为 2.4 GHz 的半波偶极子天线进行沉积成形,其波长为:

$$\lambda = c / f, \quad (10)$$

式中: c 为光速,单位为 m/s, f 为天线的工作频率,单位为 Hz。

将 2.4 GHz 代入式(10)得到半波偶极子天线的波长为 125 mm,确定出偶极子天线的臂长为 31.25 mm,其结构尺寸如图 7 所示。

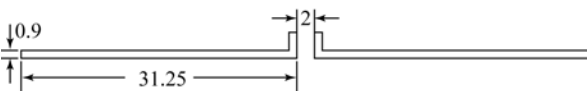
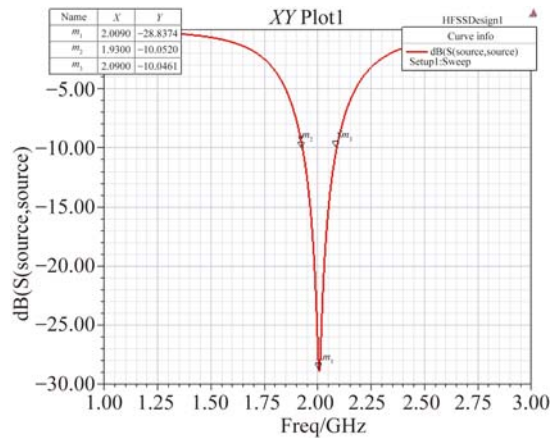


图 7 半波偶极子天线原型结构尺寸示意图

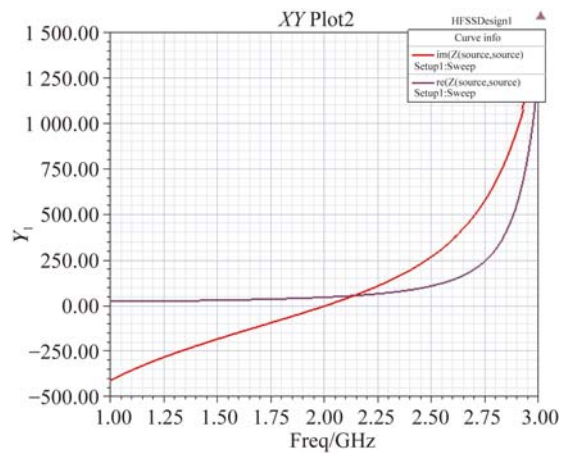
Fig. 7 Schematic diagram of half wave dipole antennas structure and size

采用 Ansoft HFSS 软件平台对设计的半波偶极子天线的谐振频率、谐振点阻抗及谐振点回波损耗(S_{11})进行仿真研究,设定天线的介电材料为铜版纸,其相对介电常数为 2.5,厚度为 260 μm 。天线的电阻率为 $1.57 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$,得到的天线性能参数如图 8 所示。



(a) HFSS 仿真 S_{11} 参数

(a) S_{11} parameters of HFSS simulation



(b) HFSS 仿真天线阻抗值

(b) Antenna impedance of HFSS simulation

图 8 HFSS 仿真天线参数

Fig. 8 Antenna parameters of HFSS simulation

由图 8 可以看出,天线的谐振频率为 2.01 GHz,谐振点回波损耗 S_{11} 参数为 -28.84 dB,带宽为 1.93~2.09 GHz,谐振点阻抗为 50 Ω ,与实验所用同轴电缆特性阻抗一致,满足阻抗匹配要求。

4.2 RFID 天线的喷射打印成形

依据微滴喷射技术与化学沉积原理以及所设计的天线的尺寸,利用所搭建的双喷头微滴喷射

系统,控制微滴喷射系统在铜版纸基板预定轨迹上先后喷射硝酸银和抗坏血酸,获得两者反应沉积室温固化 24 h 后的天线如图 9 所示。



图 9 沉积成形的半波偶极子天线

Fig. 9 Half wave dipole antenna prepared

由图 9 可以看出,反应沉积成形天线的宽度均匀,经测量其线宽为 $900\ \mu\text{m}$,长度为 $31.3\ \text{mm}$,基本符合设计尺寸要求。对沉积的天线进行 SEM 电子显微镜观察,得到其微观照片如图 10 所示。

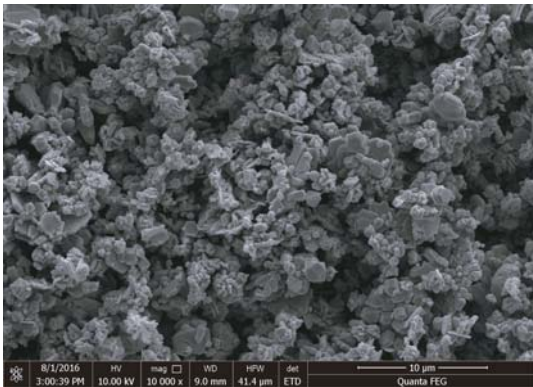


图 10 沉积成形偶极子天线的 SEM 图

Fig. 10 SEM image of fabricated dipole antenna

由图 10 可以看出,反应后的银颗粒为类球状或者片状多面体,微粒最小粒径达到纳米级。银颗粒间存在空隙,后续研究可通过多层打印及后处理方式改善。

采用矢量网络分析仪 Agilent E5071B 对制备的半波偶极子天线进行监测,以 $50\ \Omega$ 的同轴线进行信号传输,网络分析仪在 $1\sim 3\ \text{GHz}$ 内进行扫频检测,检测出的天线谐振频率、谐振点 S_{11} 参数,天线阻抗值如图 11,图 12 所示。

由图 11, 12 可以得到天线的谐振频率为 $2.07\ \text{GHz}$,天线参数 S_{11} 为 $-26.91\ \text{dB}$,谐振点阻抗值为 $51.4\ \Omega$,天线的带宽为 $1.63\sim 2.60\ \text{GHz}$ 。与仿真参数相比,制备的天线谐振频率比仿真值大 $0.06\ \text{GHz}$;参数 S_{11} 比仿真值小 $1.93\ \text{dB}$;谐振

点阻抗比仿真值大;天线带宽比仿真值宽。由天线的性能检测和仿真结果对比可知,制备的平面偶极子天线的谐振频率、谐振点回波损耗等性能参数与仿真结果较为一致。

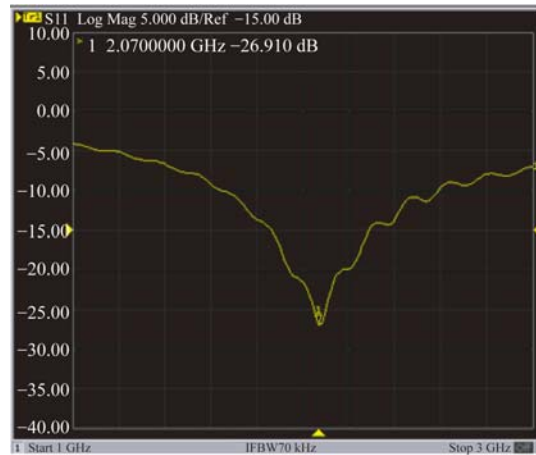


图 11 半波偶极子天线的 S_{11} 性能参数

Fig. 11 S_{11} parametera of half wave dipole antenna

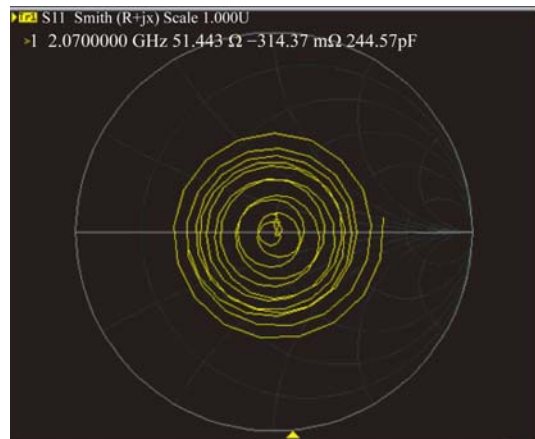


图 12 半波偶极子天线的阻抗值

Fig. 12 Half wave dipole antenna impedance

5 结 论

本文对系统喷射硝酸银和抗坏血酸液滴的一致性研究表明,液滴直径的变异系数分别为 1.4% 和 1.8% ,具有良好的均匀性。对不同基板速度下硝酸银微滴成线试验研究,得到速度为 $0.5\ \text{mm/s}$ 时,成线边缘光滑度较好,银导线的电阻率为 $1.57\times 10^{-5}\ \Omega\cdot\text{m}$ 。对制备的半波偶极子天线性能检测与仿真结果分析,表明其谐振频率、谐振点 S_{11} 参数等一致性较好。

参考文献:

- [1] 董健,余夏苹,任华斌,等.一种 UHF 频段弯折偶极子 RFID 天线的设计[J]. 电子元件与材料,2016,35(2):47-51.
DONG J, YU X P, REN H B, *et al.*. Design of a bending dipole RFID antenna at UHF band [J]. *Electronic Components and Materials*, 2016, 35(2): 47-51. (in Chinese)
- [2] 苏忠根.射频识别天线蚀刻技术工艺流程及其精益化管理研究[J]. 科技管理研究,2014(1):218-223.
SU ZH G. Study of the RFID antennas etching process and quality control management [J]. *Science and Technology Management Research*, 2014(1):218-223. (in Chinese)
- [3] YANG L, RIDA A, VYAS R, *et al.*. RFID tag and RF structure on a paper substrate using inkjet printing technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, 55(12): 2894-2901.
- [4] MARK L A, JAAKKOLA K, NUMMILA K, *et al.*. Applicability of metallic nanoparticle inks in RFID applications [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2009, 32(2): 325-332.
- [5] 杨利军,李茜,朱晓阳,等.射频识别标签天线的按需微喷射制备[J]. 光学精密工程,2016,24(1):73-82.
YANG L J, LI X, ZHU X Y, *et al.*. Fabrication of RFID tag antennas based on drop-on-demand technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1):73-82. (in Chinese)
- [6] 黄琦金,沈文锋,宋伟杰.反应喷墨打印技术及其在功能材料领域的研究进展[J]. 化学进展,2015,34(5):1332-1339.
HUANG Q J, SHEN W F, SONG W J. Development of reactive inkjet printing and its application in functional materials [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(5):1332-1339. (in Chinese)
- [7] CHAURAYA A, WHITTOW W G, VARDAXO-GLOU J C, *et al.*. Inkjet printed dipole antennas on textiles for wearable communications [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2013, 7(9):1-22.
- [8] RUSHI V, VASILEIOS LAKAFOSIS A R, *et al.*. Paper-based RFID-enabled wireless platforms for sensing applications [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(5): 1370-1382.
- [9] 黄志爱.基于喷墨打印工艺的 RFID 标签天线设计研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
HUANG ZH A. *RFID Antenna Design and Research Based on Inkjet Printing Technology* [D]. Dalian: Da Lian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] 周广洲,蔡亚果,张哲娟,等.无颗粒型银导电墨水的制备及其性能研究[J]. 材料导报,2016,30(6):50-54.
ZHOU G ZH, CAI Y G, ZHANG ZH J, *et al.*. Preparation of Non-particles Conductive Silver Ink and electrical property [J]. *Materials Review*, 2016, 30(6):50-54. (in Chinese)
- [11] DONG H M. *Drop-on-demand inkjet drop formation and deposition* [D]. Georgia Institute of Technology, 2006.
- [12] 王运赣,张祥林.微滴喷射自由成形[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2009:8-91.
WANG Y G, ZHANG X L. *Freeform Fabrication with Micro-droplet Jetting* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2009:8-91. (in Chinese)
- [13] 薛光怀,贺永,傅建中,等.压电式喷头的微滴喷射行为及其影响因素[J]. 光学精密工程,2014,22(8):2166-2172.
XUE G H, HE Y, FU J ZH, *et al.*. Droplet jetting of piezoelectric printhead and corresponding effect factors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2166-2172. (in Chinese)
- [14] 杨利军,陆宝春,朱晓阳,等.数字化微喷射技术制备聚合物薄膜电阻[J]. 光学精密工程,2015,23(6):1598-1604.
YANG L J, LU B CH, ZH X Y, *et al.*. Fabrication of polymer thin film resistors by a drop-on-demand technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1598-1604. (in Chinese)
- [15] 肖渊,黄亚超.气动式微滴喷射过程仿真与尺寸均匀性试验研究[J]. 中国机械工程,2014,25(21):2936-2941.
XIAO Y, HUANG Y CH. Simulation of pneumatic driven microdroplet jetting process and experimental study of microdroplet's uniformity [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(21): 2936-2941. (in Chinese)

- [16] 王春晖. 基于微流体数字化喷射技术的直写导线技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
WANG CH H. *The Research of Direct Write*

Technology Based on Micro-fluids Digital Jet [D]. Nanjing: Nan Jing University of Science & Technology, 2006. (in Chinese)

作者简介:



肖 渊(1975—),男,陕西咸阳人,博士,副教授,硕士生导师,1999年于中原工学院获得学士学位,2004年于西安工程大学获得硕士学位,2012年于西北工业大学获得博士学位,主要从事微滴喷射成形技术、机电控制技术等方面的研究。E-mail: xiaoyuanjidian@xpu.edu.cn



刘金玲(1989—),女,山西临汾人,硕士研究生,2014年于西安工程大学获得学士学位,主要从事喷射打印可穿戴天线的基础研究。E-mail: aiai0606liujinling@163.com