

文章编号 1004-924X(2016)01-0073-10

射频识别标签天线的按需微喷射制备

杨利军, 李 茜, 朱晓阳, 朱 丽*, 陆宝春, 章维一
(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 基于数字化微喷射技术搭建了射频识别(RFID)标签天线的按需微喷射制备系统。首先,将纳米银导电墨水按需微喷射到镀有疏水化薄膜的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)基底表面形成天线图形;然后在恒温干燥箱内烧结,形成RFID标签天线。实验研究了微喷射系统参量对液滴产生的影响以及制备参数对纳米银导线成线的影响,制得了最小线宽为100 μm 、厚度为2.8 μm 、电阻率为5.2 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 且阻值具有较好线性度的导线。设计、仿真和制备了弯折偶极子天线,并对其性能参数进行了测试,结果显示其天线谐振频率、带宽和谐振点 S_{11} 参数等与仿真结果具有较好的一致性。实验结果表明,按需微喷射导电银墨水制备RFID标签天线的方法具有系统结构简单、成本较低、液滴微喷射精确、便于制备任意天线图形等特点;制备的弯折偶极子天线尺寸可控、导电性高、阻值均一性好,并具有较好的天线性能。

关键词: 射频识别标签天线;按需微喷射系统;纳米银导电墨水;疏水化薄膜;弯折偶极子天线

中图分类号: TP273; TN820 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162401.0073

Fabrication of RFID tag antennas based on drop-on-demand technology

YANG Li-jun, LI Xi, ZHU Xiao-yang, ZHU Li*, LU Bao-chun, ZHANG Wei-yi

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: nlgzl@163.com

Abstract: A system for the fabrication of RFID(Radio Frequency Identification) tag antenna was setup based on a digital drop-on-demand technology. Firstly, the conductive ink was jetted on the polyethylene terephthalate (PET) substrate with a hydrophobic thin film to form the designed antenna pattern. Then the conductive pattern was sintered to form the RFID tag antenna in an oven. The influences of the system parameters on the generation of droplets and the fabrication parameters on the formation of the conductive line were researched. The conductive line with a width of 100 μm , a thickness of 2.8 μm and the resistivity of 5.2 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ was obtained, and its resistance was almost proportional to the length. Furthermore, a folded dipole antenna was designed, simulated and fabricated, and the performance of the antenna was measured. The results show that the resonant frequency, bandwidth and the S_{11} parameters of the antenna fabricated are in agreement with the simulation results. The experimental results indicate that the fabrication of the RFID tag antenna

收稿日期:2015-08-13;修订日期:2015-09-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175268);江苏省三维打印装备与制造重点实验室开放基金资助项目(No. BM2013006);江苏省博士后科研资助计划资助项目(No. 14020068)

based on the drop-on-demand technology has advantages in simple system construction, low cost, accurate droplet ejection and a flexible antenna pattern. Moreover, the folded dipole antenna is characterized by size controllability, high conductivity, good resistance uniformity and good antenna performance.

Key words: Radio Frequency Identification(RFID) tag antenna; drop-on-demand system; nano-silver conductive ink; hydrophobic thin film; folded dipole antenna

1 引言

射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)是一种利用无线电波进行通信的非接触自动识别技术,信息技术的飞速发展使 RFID 在生产管理、医疗卫生、交通管理及物流供应链等领域得到了广泛应用^[1-2]。RFID 标签天线是按照射频识别所要求的功能而设计的电子线路,其性能对 RFID 系统的性能有着重要影响。目前,RFID 标签天线的制备方法主要有蚀刻法、电镀法及导电油墨印刷法^[3-4]等。其中,蚀刻法存在成本高、生产流程复杂、生产过程慢、精度较低及环境污染等问题;电镀法的小量生产成本昂贵,但大批量生产所需的设备投资又较高。导电油墨印刷法按照印制设备原理可分为丝网印制^[5]、凹版印制^[6]、柔性版印制^[7]和喷墨印制^[8-9]。其中,丝网印刷工艺精度可达 10 μm ,具有较高的天线制备精度。但采用的油墨一般为高黏度油墨,墨层厚度较大,不适用于超高频、微波段墨层较薄的天线印制。凹版印制工艺可以获得较好的图形分辨率,印制油墨的层厚适中,但印制过程中印制压力大,可能使天线发生扭曲变形而影响天线的性能。柔性版印制基底材料适用广泛,但印制过程中的印制压力会使印版变形,造成制备的天线边缘均一性差,降低天线成品率。

喷墨印制法是一种非接触式的数字化无版印制工艺,其制备过程中喷嘴与基底不接触,避免了微喷嘴的损坏和导电油墨被污染,对基底表面不产生压力,提高了制备稳定性和精度;可以使用较低黏度的墨水;无需制版,简化了印制过程;对天线图形可以在线修改,提高了天线制备的灵活性。Li Yang 等人使用喷墨打印机在纸基底上进行了超高频 RFID 天线的印制,RFID 天线性能检测结果与仿真结果具有很好的一致性^[8],但存在着打印机设备构造复杂、价格昂贵,以及相纸基底耐温

较低,只能在 150 $^{\circ}\text{C}$ 以下进行烧结等问题。Mark L. Allen 等人采用喷墨印制的方法以商用纳米银墨水进行高频和超高频天线 RFID 天线的印制,获得品质因子为 9.4 的 RFID 天线,其最大读写距离为 3 m^[9],但存在打印机喷头难以拆卸、清洗与维修等问题。

目前,国内外采用喷墨印制法制备标签天线的打印装置主要是商用喷墨打印机,按照液滴发生原理可分为压电式喷墨打印机和热气泡式喷墨打印机。微流体脉冲-驱动控制技术(也称数字化微喷射技术)作为一种无内嵌微可动件、控制方法简单,对流体性质无影响的微流体驱动方法,以脉冲流动为微流动基本形态,以脉冲惯性力为主动动力,适用于各种液体和粉体,液体喷射量的分辨率可达飞升级^[10-11]。近年来,南京理工大学微系统研究室对数字化微喷射技术在粉体输送、印制电子、微光学器件、微流控芯片等领域展开了一系列研究^[12-14]。

本文基于数字化微喷射技术搭建了 RFID 标签天线的按需微喷射制备系统,在微流体脉冲惯性力的驱动下,纳米银导电墨水从玻璃微喷嘴中按需微喷射到镀有疏水化薄膜的 PET 基底表面,形成具有一定形状的天线图形,经恒温干燥箱烧结成型后,制得了 RFID 标签天线。天线尺寸可控、导电性高、阻值均一性好,并具有较好的天线性能。

2 材料和方法

2.1 实验材料

实验材料包括纳米银导电墨水 JET-600C,其银含量为 15%,黏度值为 12 cps,表面张力系数为 24 mN/m(昆山海斯电子有限公司);无水乙醇(上海凌峰化学试剂有限公司);全氟烷基丙烯酸酯乳液(国药集团化学试剂有限公司);硼硅酸盐玻璃毛细管(1.0 mm \times 0.6 mm \times 100 mm)(北京正天易科贸有限公司)。

2.2 实验系统

图 1 所示为 RFID 标签天线的按需微喷射制备系统,系统由控制电路、功率放大器、压电致动器、X-Y-Z 工作台及其控制器和数码显微镜等构成。其中,压电致动器为德国 PI 公司生产的 P-844.10 型压电陶瓷。通过调节制备系统的驱动波形^[15]、驱动电压幅值(U)和驱动频率(f)等控制参数,使微喷嘴内的导电墨水在压电致动器作用下,以液滴的形式按需微喷射到 PET 基底表面。通过设置天线图形、改变压电驱动-控制系统的控制参数和步进电机的运动参数,可以实现液滴的按需微喷射并在 PET 基底上制得设计的天线图形。

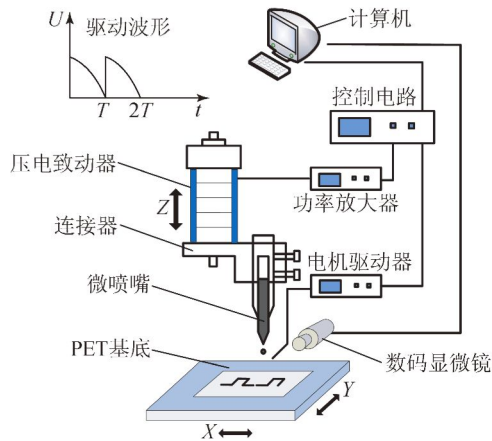


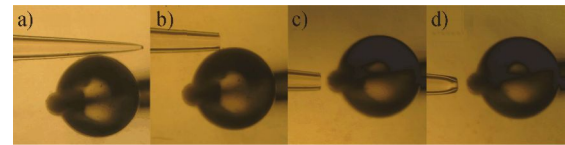
图 1 RFID 标签天线制备系统图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment system for fabrication of RFID tag antennas

玻璃微喷嘴是数字化微喷射技术制备标签天线系统的核心器件,玻璃微喷嘴是将硼硅酸盐玻璃毛细管先经过拉针仪拉制,再由锻针仪截断并锻制至所需的出口内径制得。玻璃微喷嘴为内构双锥型,微喷嘴的锻制过程如图 2(a)所示。首先,将玻璃毛细管置于玻璃微球上端,然后通过调节锻针仪的电压改变加热微球的温度,待玻璃毛细管受热一定时间后,突然断电,玻璃毛细管在特定的位置断开。接着,将截断开的玻璃微喷嘴置于玻璃微球前端,最后,调节电压值加热玻璃微球,使毛细管截断处收缩至特定的尺寸,从而获得实验所需要的玻璃微喷嘴。

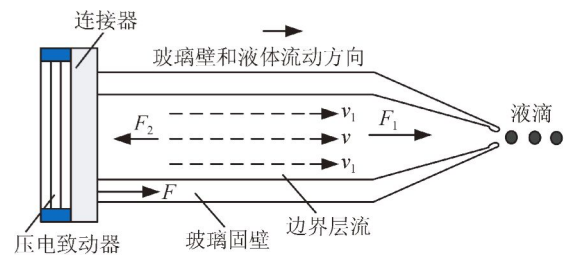
图 2(b)所示为微喷嘴内液滴发生原理图,当施加一定的电压脉冲时,与玻璃微喷嘴固壁相连的压电致动器伸长,对玻璃固壁产生周期性扰动,

从而使得玻璃固壁和液体的边界层流沿玻璃固壁运动。当脉冲信号的电压值迅速下降至零时,压电致动器收缩,使得喷嘴内的液体获得脉冲惯性力 F_1 。当脉冲惯性力 F_1 超过液体黏性力 F_2 时,液体将沿着 F_1 的方向从微喷嘴中按需喷射出来。



(a)微喷嘴锻制过程图

(a)Forging process diagram of micro-nozzle



(b)微喷嘴内液滴发生原理图

(b)Schematic diagram of generation of liquid droplet

图 2 微喷嘴的锻制过程与液滴发生原理图

Fig. 2 Forging process diagram of micro-nozzle and schematic diagram of generation of liquid droplets

2.3 实验过程

RFID 标签天线的制备过程主要为 PET 基底的印前处理、RFID 标签天线的喷射成型和 RFID 标签天线的烧结成型。

首先将 PET 薄膜放入装有无水乙醇的超声波清洗机中清洗 10 min,然后用去离子水冲洗后放入恒温干燥箱内以 50 °C 低温烘干。对 PET 薄膜表面进行疏水化处理,采用提拉法制备疏水化薄膜,将全氟烷基丙烯酸酯乳液与去离子水以一定的比例混合,搅拌,静置,即可制得一定浓度的疏水剂。将干燥处理后的 PET 薄膜浸入疏水剂中,随后取出放入恒温干燥箱以 60 °C 预热 5 min 后,再以 120 °C 烘干 20 min,即可制得具有疏水化涂层的 PET 薄膜^[16]。其后,将镀有疏水化薄膜的 PET 基底平放在系统工作台上,通过调节制备系统的控制参数和设置工作台的运动参数,使纳米银导电墨水按需喷射于基底表面,并形成相应的天线图形。天线图形经烧结成型后即可制得所需的 RFID 标签天线。

为了得到多尺度、高导电性能的 RFID 标签天线,提高天线线宽可控性和导电性能,实验研究了制备参数对天线线宽和导电性能的影响。制备参数是指疏水剂浓度 c 、液滴直径 D 、重叠率 k 、烧结温度 T 和烧结时间 t 。为了获得稳定的微喷射,避免卫星液滴及散喷等现象,驱动频率设置为 2 Hz,驱动波形选择利于液体微喷射的缓升陡降波形^[17]。为了获得不同的液滴直径,研究了系统参量对液滴直径 D 的影响,系统参量主要包括驱动电压幅值 U 和微喷嘴内径 d 。

在 RFID 标签天线的数字化微喷射制备实验中,重叠率是液滴连接成线的重要参数。如图 3 所示,重叠率 k 为相邻两个液滴间重叠部分的宽度 l 和液滴直径 D 的比值:

$$k = \frac{l}{D} = \left[1 - \frac{p}{D} \right] 100\%, \quad (1)$$

其中: D 为液滴的直径, l 为重叠区域的宽度, p 为相邻液滴的间距。

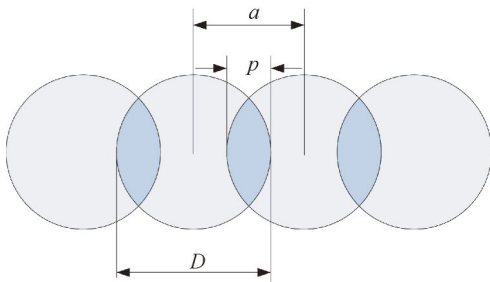


图 3 相邻液滴重叠度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of overlapped neighboring droplets

3 结果与讨论

3.1 系统参量对液滴产生的影响

研究了系统参量对导电墨水液滴产生的影响,主要包括系统喷射的稳定性分析和系统参量对液滴直径的影响。

3.1.1 系统喷射稳定性分析

实验条件:疏水剂浓度 $c=0.05\%$,驱动电压 $U=50$ V,微喷嘴内径 $d=100$ μm 。

首先在镀有疏水化薄膜的 PET 基板上喷射制备 6×6 的导电墨水液滴阵列,然后放入干燥箱中以 170 $^{\circ}\text{C}$ 烧结 25 min,形成纳米银斑点阵列,取出后对阵列的直径进行测量。图 4 所示为 PET 基底表面制备的导电墨水液滴阵列烧结后的斑点显微照片。对图中 36 个斑点的直径进行

测量,结果显示斑点的平均直径为 201.4 μm ,标准差为 5.2 μm ,采用变异系数来表征斑点直径的一致性,计算公式为:

$$C \cdot V = (S/\bar{x}) 100\%, \quad (2)$$

其中: S 为斑点直径的标准差, \bar{x} 为斑点直径的平均值。计算得到 $C \cdot V$ 为 2.6% 。可见,数字化微喷射系统喷出的液滴经烧结后具有较好的一致性,表明系统具有较好的喷射稳定性。

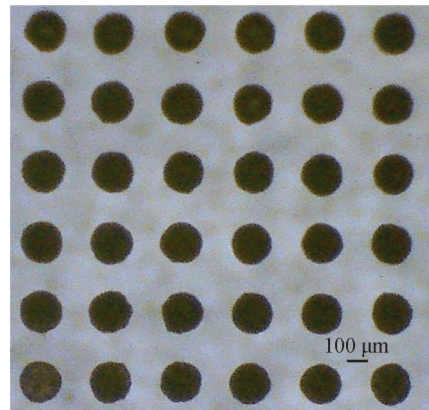


图 4 纳米银斑点阵列的显微照片

Fig. 4 Micrograph of conductive ink droplets

3.1.2 系统参量对液滴直径的影响

实验条件为疏水剂浓度 $c=0.05\%$,驱动电压 U 为 $20 \sim 80$ V,微喷嘴出口内径 d 为 $60 \sim 120$ μm 。

图 5 所示为液滴直径与微喷嘴内径和驱动电压的关系图,从图中可以看出,液滴的直径可由玻璃微喷嘴的出口内径和系统的驱动电压控制,当系统的驱动电压和微喷嘴的出口内径增大时,液滴的直径也增大。实验中,PET 基底上的液滴直径为 $80 \sim 360$ μm 。

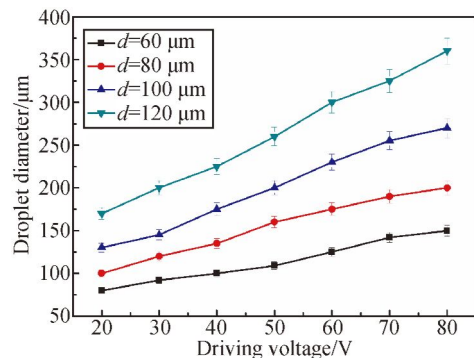


图 5 液滴直径与微喷嘴内径和驱动电压的关系

Fig. 5 Relation between droplet diameter and driving voltage for micro-nozzles with different inner diameters

3.2 制备参数对纳米银导线成线的影响

纳米银导线的制备是 RFID 标签天线的关键步骤,实验研究了制备参数对纳米银导线成线的影响,主要包括制备参数对导线成线形貌、导线成线宽度和导线成线导电性的影响。首先在镀有不同疏水程度薄膜的 PET 基板上以不同的重叠率按需喷射制备纳米银导线,然后放入干燥箱中烧结固化,取出后对导线的形貌、线宽、阻值进行测量分析。

3.2.1 制备参数对导线成线形貌的影响

疏水剂浓度 c 为 0.005%~50%,重叠率 k 为 10%~90%,液滴直径 $D=200\ \mu\text{m}$,烧结温度 $T=170\ \text{C}$,烧结时间 $t=25\ \text{min}$ 。

由于不同浓度疏水剂处理的 PET 基底具有不同的表面能,导电墨水液滴沉积于基底表面后形成的接触角不同。液滴接触角的大小和重叠率是影响液滴成线的重要因素。液滴接触角与基板的疏水化程度有关。实验中,通过改变疏水剂的浓度和液滴的重叠率,对导线成线形貌进行了研究,如表 1 所示。从结果可以看出,当疏水剂浓度 c 为 0.05%,液滴重叠率 k 为 30%~70%时,可以形成较好的导线。

表 1 疏水剂浓度 c 与重叠率 k 对导线成线的影响

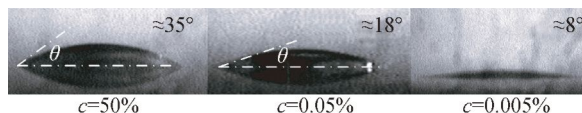
Tab.1 Influence of concentration of hydrophobic agent and overlap with formation of conductive line

疏水剂浓度 c	重叠率 k				
	10%	30%	50%	70%	90%
50%	S	S	S	S	S
5%	S	S	S	S	S
0.5%	S	S	W	B	B
0.05%	S	W	W	W	B
0.005%	R	R	R	R	R

注:“S”表示导线间断或斑点间隔;“B”表示导线凸起;“W”表示导线成线良好;“R”表示导线边缘粗糙。

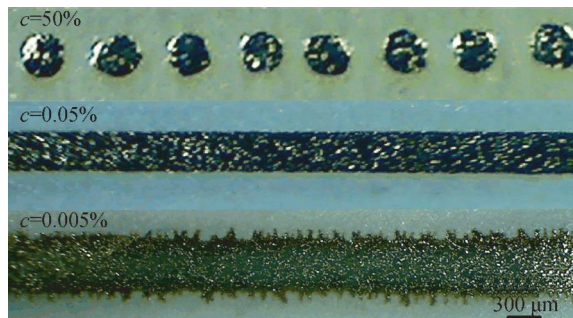
图 6(a) 和 6(b) 所示为液滴重叠率为 60% 时,疏水剂浓度对液滴接触角和导线成线形貌的影响。当浓度为 50% 时,基底表面疏水化程度较高,基板上的液滴接触角相对较大,约为 35°,液

滴烧结而成的斑点互相间隔,无法形成导线;当浓度为 0.05% 时,液滴接触角约为 18°,导线成线良好;当浓度为 0.005% 时,由于基底疏水度低,液滴接触角较小,约为 8°,导线可以形成,但扩散现象明显,烧结后的导线边缘较粗糙。图 6(c) 为疏水剂浓度 0.05% 时,不同重叠率对导线成线的影响。当重叠率为 25% 时,液滴间距较大,烧结后无法形成较连续的导线;当重叠率为 60% 时,可以形成形貌较好的导线;当重叠率为 80% 时,单位距离内的液滴数较多,烧结后导线边缘凸起现象较明显。



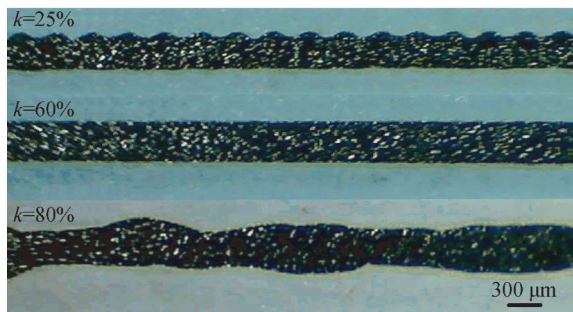
(a) 疏水剂浓度对液滴接触角的影响

(a) Influence of concentration of hydrophobic agent with contact angle of liquid



(b) 疏水剂浓度对导线成线的影响

(b) Influence of concentration of hydrophobic agent with formation of conductive line



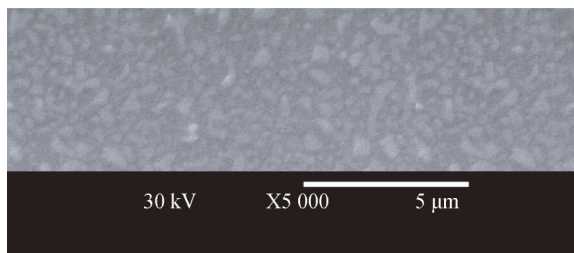
(c) 重叠率对导线成线的影响

(c) Influence of overlap with formation of conductive line

图 6 疏水剂浓度和重叠率对导线成线的影响

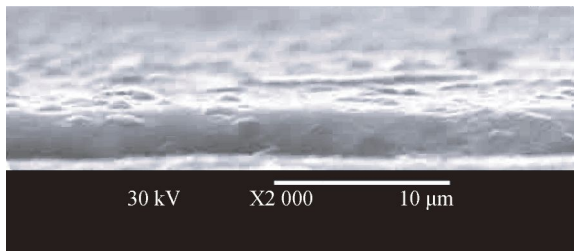
Fig. 6 Influence of concentration of hydrophobic agent and overlap with formation of conductive line

在疏水剂浓度 $c=0.05\%$ ，液滴重叠率 $k=60\%$ 的实验条件下进行了纳米银导线的制备，并对导线的表面形貌和层厚进行了分析。图 7(a) 所示为纳米银导电墨水微打印的导线表面 SEM 局部图，其中，纳米银颗粒因烧结而互相连接，并长成为较大的纳米银颗粒，因而具有较好的导电性。图 7(b) 所示为导线横截面的 SEM 局部图，其中，导线的层厚约为 $2.8\ \mu\text{m}$ ，且分布较均匀。



(a) 导线表面的 SEM 图

(a) SEM image of surface of conductive line



(b) 导线层厚的 SEM 图

(b) SEM image of thickness of conductive line

图 7 纳米银导线的表面形貌与层厚图

Fig. 7 SEM image of surface and thickness of conductive line

3.2.2 制备参数对导线成线宽度的影响

实验条件为疏水剂浓度 $c=0.05\%$ ，重叠率 $k=30\%\sim 70\%$ ，液滴直径 D 为 $80\sim 250\ \mu\text{m}$ ，烧结温度 $T=170\ ^\circ\text{C}$ ，烧结时间 $t=25\ \text{min}$ 。

由前面的研究可知，当疏水剂浓度为 0.05% 时，选择合适的重叠率可以制备出形貌较好的纳米银导线。导线的线宽是 RFID 标签天线制备的重要参数，制备出宽度大小可以控制的导线，有利于促进天线的小型化水平，并提高天线制备的灵活性。图 8 所示为具有不同线宽的导线显微照片，从图中可以看出导线的边缘质量较好，线性度较高，线宽的变化为 $100\sim 230\ \mu\text{m}$ 。

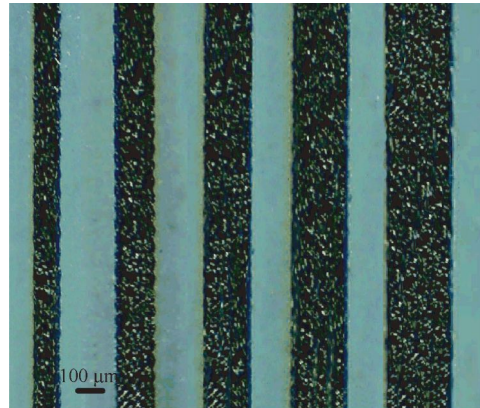


图 8 不同线宽的导线显微照片

Fig. 8 Micrograph of conductive line with different width

图 9 所示为导线的线宽与液滴直径和重叠率的关系图，从图中可以看出，导线的线宽可由液滴直径和重叠率控制，液滴的直径和重叠率增大时，导线的线宽也增大。实验中，PET 基底上的导线宽度的变化为 $120\sim 415\ \mu\text{m}$ 。

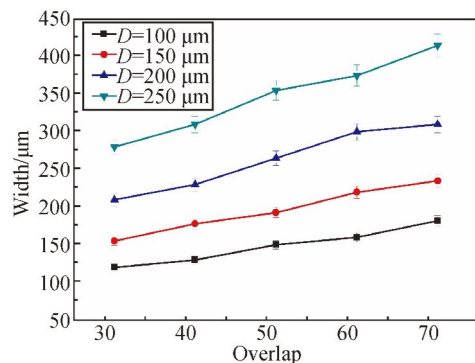


图 9 导线线宽与液滴直径和重叠率的关系

Fig. 9 Relation between width of conductive line and liquid diameter with overlaps

3.2.3 制备参数对导线成线导电性能的影响

纳米银导线的电阻率和阻值的线性度对 RFID 标签天线性能的一致性和稳定性有着重要影响。实验研究了制备参数对纳米银导线导电性能的影响，主要包括烧结时间和烧结温度对导线电阻率的影响，并对导线阻值的线性程度进行了分析。

实验条件为疏水剂浓度 c 为 0.05% ，液滴重叠率 $k=60\%$ ，液滴直径 $D=200\ \mu\text{m}$ ，烧结温度 T 为 $80\sim 200\ ^\circ\text{C}$ 。烧结时间 t 为 $5\sim 30\ \text{min}$ ，制备长度 $l=3\ \text{cm}$ 。

图 10 所示为导线的阻值与导线长度和烧结温度 T 的关系图,由图中可以看出,导线的阻值和烧结温度及烧结时间有关。当烧结温度一定时,导线的阻值随着烧结时间的增加而减小并趋于稳定;当烧结时间一定时,导线的阻值也随着烧结温度的提高而减小并趋于稳定。这是因为随着温度和烧结时间的增加,导线内的纳米银颗粒互相连接,逐渐长大为更大的导电微粒,最后趋于一个相对饱和的尺寸,此时,再提高退火温度或者延长退火时间,对导线阻值的影响不大。当烧结温度为 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、烧结时间为 25 min 时,制得了具有如下参数的导线:阻值为 $1.8\text{ }\Omega$,宽度为 $308\text{ }\mu\text{m}$,厚度为 $2.8\text{ }\mu\text{m}$,长度为 3 cm ,天线的电阻率为:

$$\rho = \frac{R \times m \times n}{l}, \quad (3)$$

其中: R 为导线的阻值, m 为导线横截面的线宽, n 为横截面的厚度, l 为导线的长度。计算得 $\rho = 5.2\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$,约为块状金属银的 3.1 倍,和钨的电阻率较为接近。

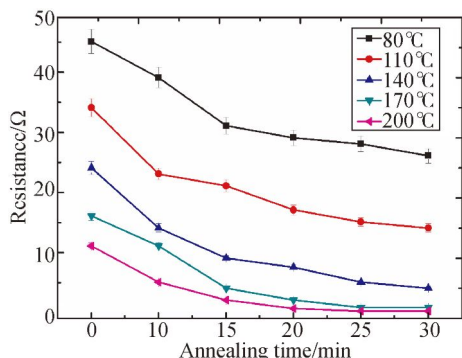


图 10 导线的阻值与烧结时间和烧结温度的关系
Fig. 10 Relation between the resistance of conductive line and length with layer number

使用相同的制备参数进行了 5 次导线的制备。疏水剂浓度 $c = 0.05\%$,液滴重叠率 $k = 60\%$,液滴直径 $D = 200\text{ }\mu\text{m}$,烧结温度 $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。烧结时间 $t = 25\text{ min}$,制备长度 $l = 10\text{ cm}$ 。分别对 5 个制备好的导线,每隔 1 cm 进行阻值的测量,除以测量的长度,共得到 50 组数据。数据显示,单位长度的阻值平均值为 $0.6\text{ }\Omega/\text{cm}$,标准差为 $0.02\text{ }\Omega/\text{cm}$,采用变异系数 $C \cdot V$ 来计算单位长度的电阻的一致性,得到算得阻值的变异系数为 3.3% ,表明制备好导线的阻值与其长度具有较好的线性相关性。

3.3 天线的设计和制备

3.3.1 RFID 标签天线的设计与仿真

以三维电磁仿真软件 Ansoft HFSS 进行了实验用天线的仿真设计,设计了弯折偶极子天线,通过改变弯折偶极子天线的臂长和弯折次数可以改变天线的谐振点阻抗,从而满足天线的阻抗匹配要求。其中,天线的介电材料设置为 PET,天线的材料选择电阻率最为接近的钨,天线结构如图 11 所示,尺寸参数如表 2 所示。

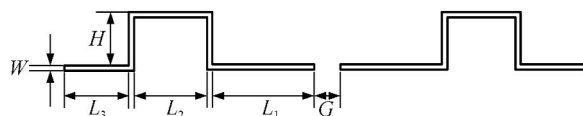


图 11 RFID 天线结构图

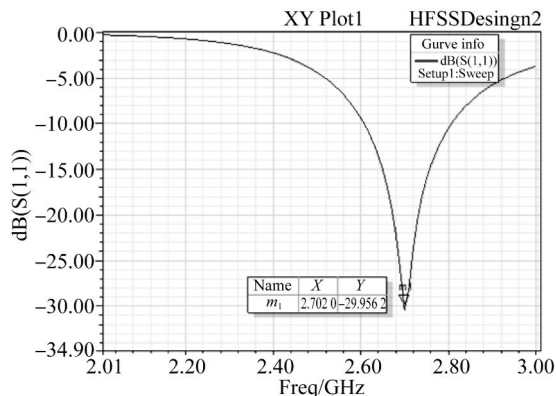
Fig. 11 Photo of RFID tag antenna structure

表 2 天线的尺寸参数

Tab. 2 Size parameters of RFID tag antenna (mm)

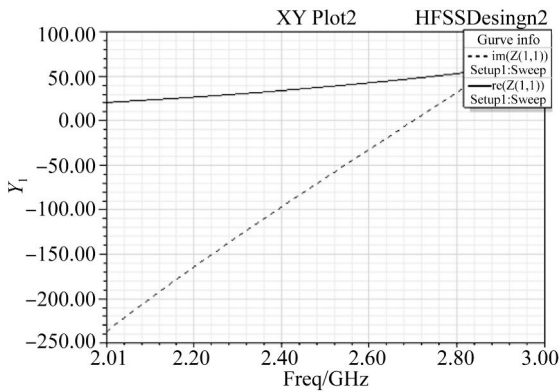
H	L_1	L_2	L_3	W	G
4	8	6	5	0.3	2

使用 HFSS 软件对设计好的弯折偶极子天线的天线谐振频率、谐振点阻抗及谐振点回波损耗 (S_{11}) 进行仿真,得到的天线性能参数如图 12 所示。其中,天线的谐振频率为 2.70 GHz , S_{11} 参数为 -29.96 dB ,带宽为 $2.61\sim 2.81\text{ GHz}$;谐振点阻抗为 $50\text{ }\Omega$,与实验所用的同轴电缆特性阻抗一致,满足阻抗匹配要求。



(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 12 HFSS 仿真天线参数

Fig. 12 Antenna parameters of HFSS simulation

3.3.2 天线的制备与性能检测

实验条件为疏水剂浓度 $c=0.05\%$, 重叠率 $k=60\%$, 液滴直径 $D=200\ \mu\text{m}$, 烧结温度 $T=170\ ^\circ\text{C}$, 烧结时间 $t=25\ \text{min}$ 。

首先将设计好的天线图形导入控制计算机, 然后对天线进行按需微喷射制备, 制备完成后将天线图形放入恒温干燥箱内烧结固化, 制得弯折偶极子天线。制备出来的天线如图 13 所示, 天线的线宽为 $300\ \mu\text{m}$ 。

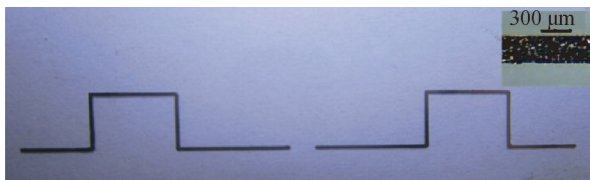
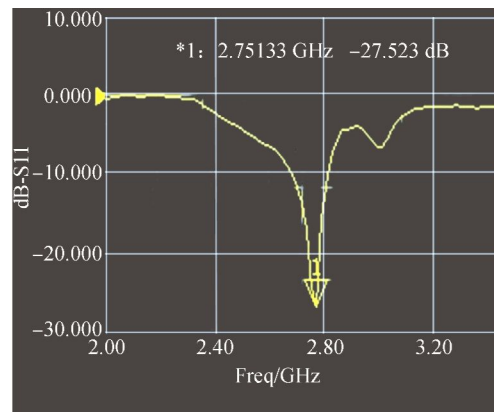


图 13 弯折偶极子天线实物图

Fig. 13 Photo of RFID tag antenna structure

采用矢量网络分析仪 AV3629A 对制备的弯折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 $2\sim 3\ \text{GHz}$ 内进行扫频检测, 检测出的天线谐振频率、带宽、谐振点 S_{11} 参数

如图 14 所示。与仿真参数相比, 制备的天线 S_{11} 参数为 $-27.52\ \text{dB}$, 比仿真值大 $2.44\ \text{dB}$; 谐振频率为 $2.75\ \text{GHz}$, 比仿真值大 $0.05\ \text{GHz}$, 天线带宽为 $2.65\sim 2.82\ \text{GHz}$ 。由弯折偶极子天线的性能检测图和仿真结果对比可知, 实验制备的弯折偶极子天线的性能与仿真结果具有较好的一致性。

图 14 弯折偶极子天线的 S_{11} 性能参数Fig. 14 S_{11} parameters of folded dipole antenna

将制备好的弯折偶极子天线置于实验环境中, 每隔一段时间对其天线的性能进行测试, 得到天线性能参数与使用时间之间的关系, 如表 3 所示。实验结果表明, 当使用时间在 18 个月以内时, 天线的性能参数几乎不发生变化, 这表明基于该方法所制备的弯折偶极子天线具有较长的使用寿命, 其天线的性能在使用过程中具有较高的稳定性。当使用时间超过 18 个月时, 天线的性能参数均有所减弱, 特别是 S_{11} 参数增大, 频率带宽减小。这可能是由于天线表面的纳米银图形薄膜在使用过程中与空气长直接接触, 发生了缓慢氧化反应, 从而降低了天线材料的导电性能, 并使得天线的导电性能因局部氧化而出现不均匀不一致的现象, 从而削弱了天线的电性能。

表 3 天线的性能参数与使用时间的关系

Tab. 3 Relation between the performance parameters of antennas and the usage time

使用时间/月	3	6	9	12	15	18	21
S_{11} 参数/dB	-27.50	-27.47	-27.42	-27.36	-27.20	-27.01	-25.12
谐振频率/GHz	2.75	2.75	2.76	2.76	2.78	2.78	2.82
天线带宽/GHz	2.65~2.81	2.65~2.80	2.67~2.82	2.67~2.81	2.69~2.84	2.69~2.83	2.77~2.86

3.3.3 天线性能的一致性分析

使用相同的制备参数在PET薄膜基底表面分别进行20次弯折偶极子天线的制备,制备参数为疏水剂浓度 $c=0.05\%$,重叠率 $k=60\%$,液滴直径 $D=200\ \mu\text{m}$,烧结温度 $T=170\ ^\circ\text{C}$,烧结时间 $t=25\ \text{min}$ 。弯折偶极子天线制备完成后,分别对天线的宽度、厚度、 S_{11} 参数、谐振频率和天线带宽等性能参数进行测试。结果显示,弯折偶极子天线的平均宽度为 $302\ \mu\text{m}$,标准差为 $11\ \mu\text{m}$,平均厚度为 $2.9\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.1\ \mu\text{m}$,天线的平均 S_{11} 参数为 $-27.56\ \text{GHz}$,标准差为 $-0.8\ \text{GHz}$,平均谐振频率为 $2.76\ \text{GHz}$,标准差为 $0.07\ \text{GHz}$,天线带宽的分布大致处于 $2.64\sim 2.84\ \text{GHz}$,分布范围较为集中。采用式(2)计算得天线的宽度变异系数为 3.6% ,厚度变异系数为 3.4% , S_{11} 参数变异系数为 2.9% ,谐振频率变异系数为 2.5% 。变异系数表明,制备得到的RFID标签天线的几何形状与天线电性能具有较好的一致性。

4 结 论

基于数字化微喷射技术搭建了RFID标签天

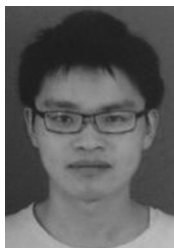
线的按需微喷射制备系统,可以稳定地将纳米银导电墨水喷射到镀有疏水化薄膜的PET基底表面上形成设计好的天线图形,然后在恒温干燥箱内以 $170\ ^\circ\text{C}$ 烧结 $25\ \text{min}$,形成RFID标签天线。研究了制备参数对纳米银导线成线的影响:当疏水剂浓度为 0.05% 、重叠率为 $30\%\sim 70\%$ 时,导电墨水可以较好地连接成线;在疏水剂浓度为 0.05% 的基底上,改变液滴直径和液滴重叠率,制备了线宽为 $100\sim 415\ \mu\text{m}$ 、单层层厚为 $2.8\ \mu\text{m}$ 的导线;在 $170\ ^\circ\text{C}$ 的温度下烧结 $25\ \text{min}$,制得了电阻率为 $\rho=5.2\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 的导线,导线的阻值具有较好的线性度。进行了弯折偶极子天线的设计、仿真和制备,并对其天线性能参数进行了测试。结果表明,基于数字化微喷射技术的导电银墨水按需喷射制备RFID标签天线的方法具有系统结构简单、成本较低、液滴微喷射精确、便于制备任意天线图形等特点。制备的弯折偶极子天线导电性高、尺寸与阻值的均一性好,表面形貌均匀;与仿真结果比较,其天线谐振频率、带宽和谐振点 S_{11} 参数等天线性能参数具有较好的一致性。

参考文献:

- [1] RIDA A, VYAS R, BASAT S, *et al.*. Paper-based ultra-low-cost integrated RFID tags for sensing and tracking applications [C]. *Electronic Components and Technology Conference, IEEE*, 2007: 1977-1980.
- [2] VIRTANEN J, UKKONEN L, BJORNINEN T, *et al.*. Inkjet-printed humidity sensor for passive UHF RFID systems [J]. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 2011, 60(8): 2768-2777.
- [3] 林其水. RFID标签天线的三种制作方法[J]. *印制电路信息*, 2010(3): 30-35.
LIN Q SH. Three kinds of methods creating RFID label antenna [J]. *Printed Electronics*, 2010(3): 30-35. (in Chinese)
- [4] BJORNINEN T, MERILAMPI S, UKKONEN L, *et al.*. The effect of fabrication method on passive UHF RFID tag performance [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2009.
- [5] SHIN D Y, LEE Y, KIM C H. Performance characterization of screen printed radio frequency identification antennas with silvernanopaste [J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(21): 6112-6118.
- [6] LILJA K E, BÄCKLUND T G, LUPO D, *et al.*. Gravure printed organic rectifying diodes operating at high frequencies [J]. *Organic Electronics*, 2009, 10(5): 1011-1014.
- [7] 安君,唐正宁,车永华. 柔性版印刷网点扩大问题的分析[J]. *包装工程*, 2006, 27(4): 146-148.
AN J, TANG ZH N, CHE Y H. Analysis of dot gain problem in flexography printing [J]. *Packing engineering*, 2006, 27(4): 146-148. (in Chinese)
- [8] YANG L, RIDA A, VYAS R, *et al.*. RFID tag and RF structures on a paper substrate using inkjet-printing technology [J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 2007, 55(12): 2894-2901.
- [9] ALLEN M L, JAAKKOLA K, NUMMILA K, *et al.*. Applicability of metallic nanoparticle inks in RFID applications [J]. *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, 2009, 32(2): 325-332.

- [10] 章维一, 侯丽雅. 微流体数字化的科学与技术问题 (I): 概念、方法和效果 [J]. 科技导报, 2005, 23(8): 4-9.
ZHANG W Y, HOU L Y. Scientific and technological problems of digitalization of microfluids (Part I): concepts, methods and results [J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(8): 4-9. (in Chinese)
- [11] 章维一, 侯丽雅. 微流体数字化的科学与技术问题 (II): 物质数字化及物质能量信息统一数字化概念研究 [J]. 科技导报, 2006, 24(3): 41-47.
ZHANG W Y, HOU L Y. Scientific and technological problems of digitalization of microfluids (Part II): Conceptual study of digitalization of matter-energy-information [J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(3): 41-47. (in Chinese)
- [12] 侯丽雅, 王振琪, 章维一, 等. 金属微粉体脉冲输送的微特性实验 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1030-1038.
HOU L Y, WANG ZH Q, ZHANG W Y, *et al.*. Experiments of micro characteristics of pulse-transfer for micro metallic powders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1030-1038. (in Chinese)
- [13] ZHU X Y, ZHU L, CHEN H J, *et al.*. Fabrication of high numerical aperture micro-lens array based on drop-on-demand generating of water-based molds [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 68: 23-27.
- [14] LI Z A, HOU L Y, ZHANG W Y, *et al.*. Preparation of paper micro-fluidic devices used in bio-assay based on drop-on-demand wax droplet generation [J]. *Analytical Methods*, 2014, 6: 878-885.
- [15] 王洪成, 侯丽雅, 章维一, 等. 驱动电压波形修圆对微流体脉冲惯性力和驱动效果的影响 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2251-2259.
WANG H CH, HOU L Y, ZHANG W Y, *et al.*. Influence of rounded driving voltage waves on micro-fluidic pulse inertial force and driving effects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2251-2259. (in Chinese)
- [16] 刘朝杨, 程璇. 透明超疏水疏油图层的制备及性能 [J]. 功能材料, 2013, 44(6): 870-873.
LIU CH Y, CHENG X. Synthesis and properties of transparent superhydrophobic and oleophobic coatings [J]. *Opt. Journal of functional materials*, 2013, 44(6): 870-873. (in Chinese)
- [17] 朱晓阳, 侯丽雅, 郑悦, 等. 微流体数字化技术制备聚合物微透镜阵列 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 360-368.
ZHU X Y, HOU L Y, ZHENG Y, *et al.*. Fabrication of polymer micro-lens array by micro-fluid digitalization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 360-368. (in Chinese)

作者简介:



杨利军(1989—), 男, 江苏金坛人, 博士研究生, 2012 年于南京理工大学获得学士学位, 主要从事微流体-驱动控制技术及其应用、微电子、微流控芯片等方面的研究。E-mail: fulisayang@163.com

导师简介:



陆宝春(1965—), 男, 江苏南通人, 博士, 教授, 博士生导师, 2002 年于南京理工大学获得博士学位, 主要从事制造装备自动化与智能化、制造系统的集成控制与智能控制、光机电一体化等方面的研究。