

基于液态金属的柔性频率可重构 CPW 天线设计

郑鹏帅¹, 陈 婧², 姚 佩¹, 崔建利¹, 张斌珍¹, 段俊萍¹, 王万军¹

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西太原 030051; 2. 中国航天科工集团第二研究院 706 所, 北京 100854)

摘 要: 针对固态金属天线在受力弯曲后易产生裂纹导致功能失效的问题, 本文提出一种频率可重构的柔性液态金属共面波导馈电天线. 该天线由四个不同半径的开口谐振环 (Split-Ring Resonators, SRR) 构成, 利用紫外光刻技术 (ultraviolet lithography) 制备天线的 SU-8 负模结构, 其次浇注聚二甲基硅氧烷进行倒模并键合, 最后将液态金属合金注入至微流沟道, 完成天线的制作. 通过机械施压方式改变不同谐振环间的通断状态, 可在 1GHz ~ 6GHz 范围内实现频率可重构, 满足 WLAN、WiMAX 和部分 C 波段的通信要求. 弹性体和液态金属的特性使天线具有更好的灵活性和耐久度, 可应用于集成电子设备的弯曲表面.

关键词: 柔性液态金属天线; 共面波导; 开口谐振环; 紫外光刻技术; 聚二甲基硅氧烷; 频率可重构; WLAN/WiMAX; 弯曲表面

中图分类号: TN826

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)09-2276-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.033

Design of Flexible Frequency Reconfigurable CPW Antenna Based on Liquid Metal

ZHENG Peng-shuai¹, CHEN Jing², YAO Pei¹, CUI Jian-li¹,
ZHANG Bin-zhen¹, DUAN Jun-ping¹, WANG Wan-jun¹

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement
(North University of China), Taiyuan, Shanxi 030051, China;

2. No. 706 Institute, the Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: When subjected to flexing, conventional metallic structures can crease, fatigue, and eventually fail mechanically with a catastrophic loss of conductivity and functionality. A flexible frequency reconfigurable coplanar waveguide-fed (CPW) antenna consisting of four split-ring resonators (SRRs) with different radii is presented to solve the problem. The SU-8 negative mold structure is fabricated with microfluidic channel by ultraviolet lithography (UV lithography), and then the PDMS (PolyDiMethylSiloxane) is used to cast for the SU-8 microfluidic to obtain a PDMS positive mold structure. Finally, the liquid metal alloy was injected into the microfluidic channels of PDMS. Changing the pass state of the SRRs by mechanical pressure, the antenna can be reconstructed at multiple frequencies within the range of 1GHz ~ 6GHz. The proposed antenna can meet the communication requirement of WLAN, Wi-MAX and C-band. The combined properties of the fluid and the elastomeric substrate result in a flexible and durable antenna that is well suited for simple means of integrating electronic devices on curved surfaces, such as wearable devices and artificial skins.

Key words: flexible liquid metal antenna; coplanar waveguide (CPW); split-ring resonators (SRR); ultraviolet lithography; polydimethylsiloxane (PDMS); frequency reconfigurable; WLAN/WiMAX; curved surfaces

1 引言

近年来,无线通信技术得到迅猛发展,各领域对其要求与日俱增.为了在满足信息系统多功能、大容量等要求的同时,也降低综合信息系统的制作成本、减小信息系统体积,各种收发天线被大量的安装在系统内部,这就使得

同一平台上搭载的信息子系统数量增加.而天线数目的增多,势必会造成信息系统内部的复杂和严重的电磁耦合干扰,从而影响系统的整体性能^[1].正是在这种情况下,提出了“可重构天线”的概念^[2],并且在天线领域受到的关注与重视越来越多.目前所提出的可重构天线,基本上都是通过 MEMS 开关或 PIN 二极管控制天线的辐射结

构来实现工作频率的改变^[3,4].但是固态金属天线在受力弯曲时其结构会起皱,甚至破裂,导致天线功能失效,使其无法应用于设备弯曲表面.

JH So 等人在 2009 年发现镓铟合金 (Eutectic Gallium-Indium, EGaln) 在室温下呈液态,具备天线所需的电特性,是一种可替代铜的新型天线材料,并制作了一款形状可逆和机械可调的液态天线,辐射效率可达到铜天线的 90%^[5]. Liu 等人表明采用 EGaln 作为材料制成的天线具有铜材质所不具备的特性,如反复弯折不会导致材料“疲劳”,以及在受到外力作用被截断或弯曲时具有自我修复能力等^[6].自此以后,柔性天线如雨后春笋般涌现,如可拉伸不平衡回路天线^[7]、高度可调的锥形螺旋天线^[8]和微流控电小天线^[9]等,基本上都是依据高弹性介质和液态金属的特性来实现可重构的要求.2015 年, M. Wang 等人设计出一种电化学控制毛细管制动的液态金属可重构天线^[10];2016 年, Liu P 等人以双臂阿基米德螺旋天线为原型,提出了一种通过微型风机鼓风改变高度进而重构微波方向性的宽带天线^[11].但是这种外部辅助装置不易在电子设备中安装.故本文提出一种机械施压的频率可重构天线,可以满足 WLAN、WiMAX 和部分 C 波段的通信要求.

2 天线设计

基于液态金属的流动性及自我修复能力,设计并制作一款频率可重构的多频共面波导 (CPW) 馈电天线.天线的辐射单元由四个在微带线两侧相对分裂的同心金属环所组成的圆形谐振环构成,在微带线适当位置通过机械施压,使弹性介质上下接触,截断圆形谐振环间的连接,实现不同谐振环之间的耦合作用,从而实现改变天线频率的目的.撤去外力时,由于介质的高弹性和液态金属的流动性,谐振环之间恢复连接.通过在不同位置施加压力而截断不同谐振环间的连接,可以实现不同频率的改变.使用 HFSS 软件对天线进行设计和仿真,优化天线的辐射结构和物理尺寸,实现良好的阻抗匹配和较低的回波损耗等,达到指标要求.

PDMS 是一种高分子有机硅化合物,在低温下为一种粘稠状液体,加热可使其固化,且具备高弹性的特性,因此本天线采用 PDMS 作为弹性体来包裹液态金属. PDMS 的相对介电常数 $\epsilon_r \approx 2.67$,介电损耗角正切 $\tan\delta = 0.0375$.天线辐射贴片和参考地面的材料使用 EGaln,其在室温下为液态,导电性能优异,电导率高,为 $3.4 \times 10^4 \text{ S/cm}$,且其毒性很低.图 1 为所设计的多频 CPW 天线结构示意图,该天线的介质基板为 PDMS,尺寸为 $28.45 \times 21 \times 1.6 \text{ mm}^3$.共面波导馈电线的宽度 $W_3 = 4 \text{ mm}$,微带线与两侧地面的间距 $W_4 = 0.5 \text{ mm}$;谐振环的半径和开口尺寸依次为 $r_1 \sim r_4, a_1 \sim a_4$;谐振环的宽度

与环间距相等,均为 r .

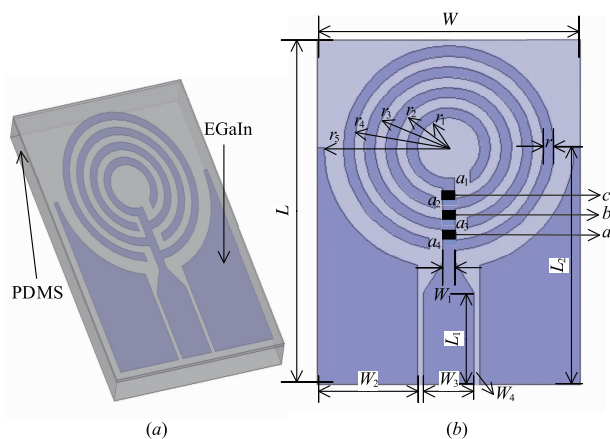


图1 天线的结构示意图

表 1 天线结构中的尺寸参数 (单位:mm)

L	W	L_1	L_2	W_1	W_2	W_3	W_4	r	r_1
28.45	21	7.5	19.5	1	8	4	0.5	0.85	2.5
r_2	r_3	r_4	r_5	a_1	a_2	a_3	a_4		
4.2	5.9	7.6	10	1.2	0.6	1	1.1		

3 仿真结果分析

图 2 给出了在天线的物理结构和尺寸相同的条件下,EGaln 和铜分别作为天线材料时,在 PDMS 和 FR4 两种介质基板下天线的回波损耗 S_{11} 曲线与其辐射效率图.从图 2(a)与(b)中可以看出,当天线材料一样时,使用 PDMS 作介质基板与 FR4 作介质基板相比,天线的谐振点向高频偏移,天线频段变宽、 S_{11} 值降低,天线的性能提升较大.这是由于相对介电常数会影响天线的带宽,介电常数越低,对场的束缚就会越弱,带宽相应的会变宽.与 FR4 介质基板相比,PDMS 的相对介电常数相对较低 (PDMS 的 $\epsilon_r \approx 2.67$,FR4 的 $\epsilon_r \approx 4.4$).因此在相同尺寸下,以 EGaln 作为天线材料,PDMS 作为介质基板,天线的性能有所提高,而且还会具备高弹性的特性.图 2(c)中显示使用 EGaln 时,天线的辐射效率整体与铜相比较低,最大差值为 17.5%,但由于天线材料自身特性及其天线物理结构等原因,使得天线在 3GHz 左右时辐射效率比铜略高.

在确定介质基板后,然后研究以何种方式来实现 CPW 天线的频率可重构.笔者提出两种方法进行试验:一是改变谐振环的开口尺寸;二是改变谐振环之间的通断状态,即改变微带线与谐振环的连接数量.

图 3 为通过改变谐振环开口尺寸来实现 CPW 天线的频率可重构的回波损耗图.从图中可以看出,当改变某一谐振环的开口尺寸而其他结构不变时,天线的频段和谐振点几乎不变,只有 S_{11} 值发生了明显的变化.这

是因为在不改变谐振环数量而仅改变其开口尺寸的情况下,谐振环间的电磁耦合对于天线的的影响很小.在不考虑电磁耦合作用的前提下,改变谐振环开口尺寸,影响了SRR的等效电容与等效电阻,开口尺寸的变大导致其等效电容相对变大,SRR在该频点处产生了更为

稳定、有效的电磁谐振.同时,谐振环开口尺寸的变化也影响着整个天线的分布电容与分布电阻,进而影响天线与馈线间的匹配.当 $a_1 = 1.2\text{mm}$, $a_2 = 0.6\text{mm}$, $a_3 = 1\text{mm}$, $a_4 = 1.1\text{mm}$ 时,天线与微带馈线实现最优阻抗匹配,损耗大幅度降低.

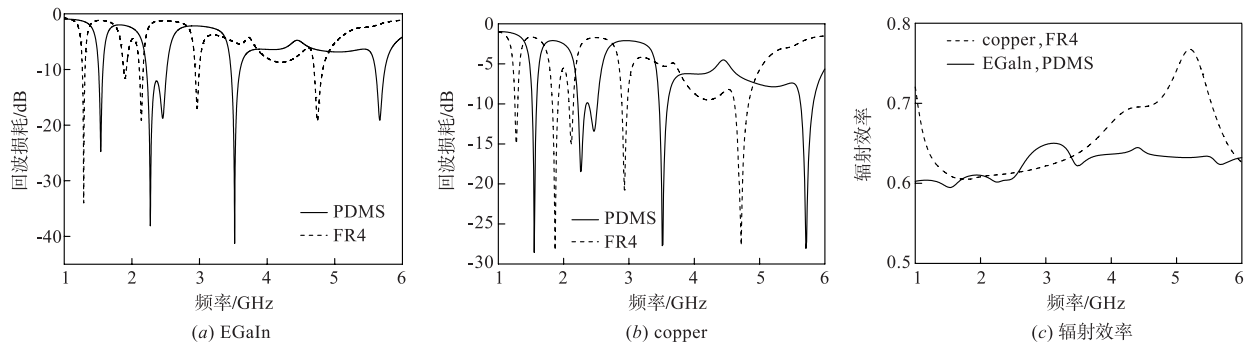


图2 不同介质基板和天线材料对 S_{11} 的影响及其辐射效率

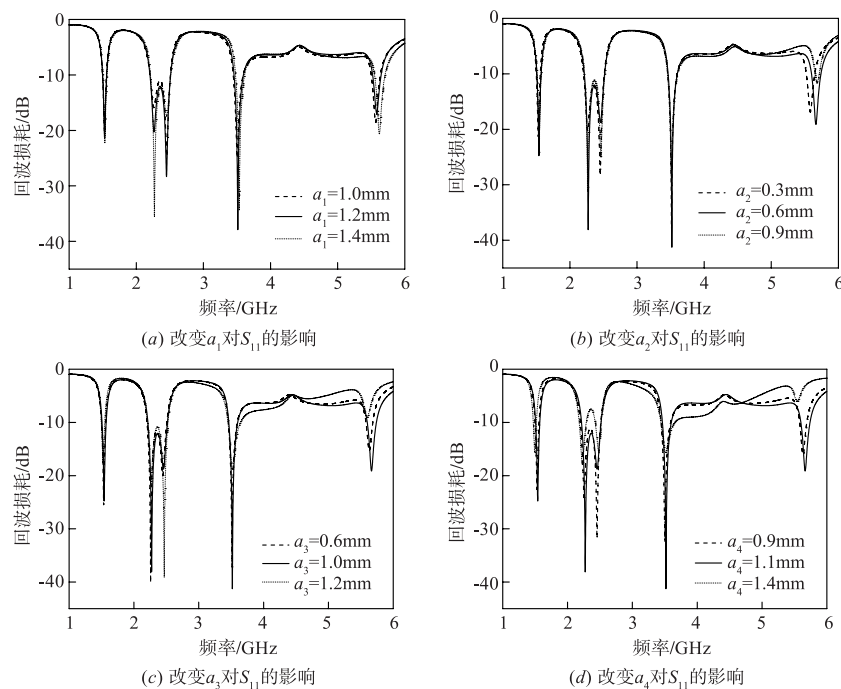


图3 谐振环开口尺寸对天线的的影响

其次,研究谐振环之间通断路对于天线频率和回波损耗的影响.通过在微带线上施压来控制谐振环间的通断路,以改变天线辐射贴片表面的电流分布,进而使天线的频率可重构.谐振环间微带线的施压位置从下到上依次定义为 a 、 b 、 c ,施压面积为 $1 \times 0.85\text{mm}^2$,其中 1mm 为微带线在此处的宽度, 0.85mm 为环之间的距离,如图1(b)所示.图4给出了截断不同谐振环间连接的回波损耗曲线图.在数值仿真时,天线的的所有参数均保持不变,只研究在微带线不同位置施加压力的情况下,回波损耗和谐振点的的变化趋势.由图2(a)可知,

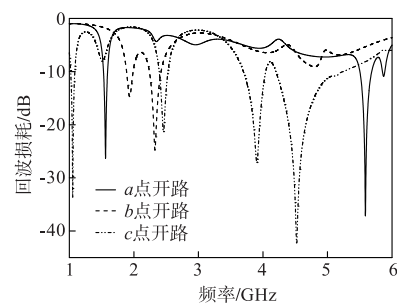


图4 施压后天线的回波损耗图

未施压时,天线覆盖了 WLAN 和 WiMAX 频段. 观察图 4 可知,当在 a 处施压后,产生了工作于 WLAN 的频点,即 5.63GHz;在 b 处施压后没有产生有用的频点;在 c 处施压后,其在 2.45GHz 处的 S_{11} 值降低,并出现了用

于通信卫星下行传输信号的 C 波段频段. 图 5 为天线在不同频点处 E 面和 H 面的方向图,天线在 E 面为双向辐射,在 H 面为全向辐射.

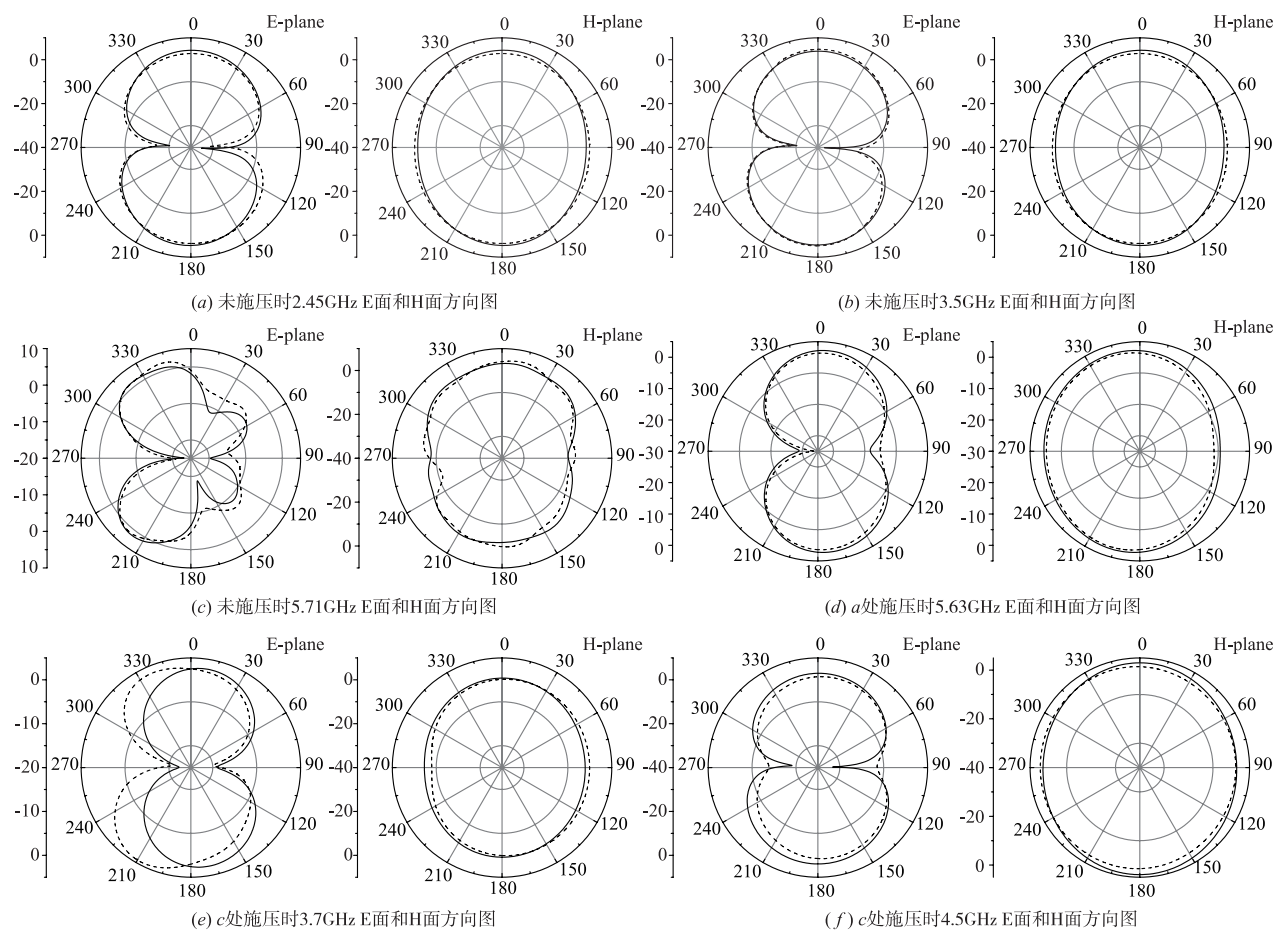


图5 不同频点处的辐射方向图 (实线为仿真曲线, 虚线为测试曲线)

4 天线制作与测试

经 HFSS 仿真及以上分析,确定了天线的尺寸,然后利用 MEMS 工艺制作,工艺流程如图 6(a) 所示. 首先利用紫外光刻技术将设计在掩膜版上的天线图案复制到已旋涂在硅片上的 SU-8 胶上,制作出该天线的负模;其次把 PDMS 浇注在 SU-8 负模上进行倒模,得到其正模结构;最后对 PDMS 结构作改性处理,封装其结构和盖片,再注射液态金属,制得所需天线.

液态天线 PDMS 正模的具体制作过程:将预聚物和固化剂按质量 10:1 的比例配制,在烧杯中充分搅拌 5min,放进真空室进行真空脱泡 2h,目的是彻底去除其中的空气泡;把制作好的 PDMS 浇注在 SU-8 模具上进行倒模,在真空箱中静置 12h,目的是进行脱泡并把 PDMS 均匀水平摊开;把模型复制到 PDMS 上后,在烘台上由室温缓升加热,并在 75℃ 加热 4h 使其完全

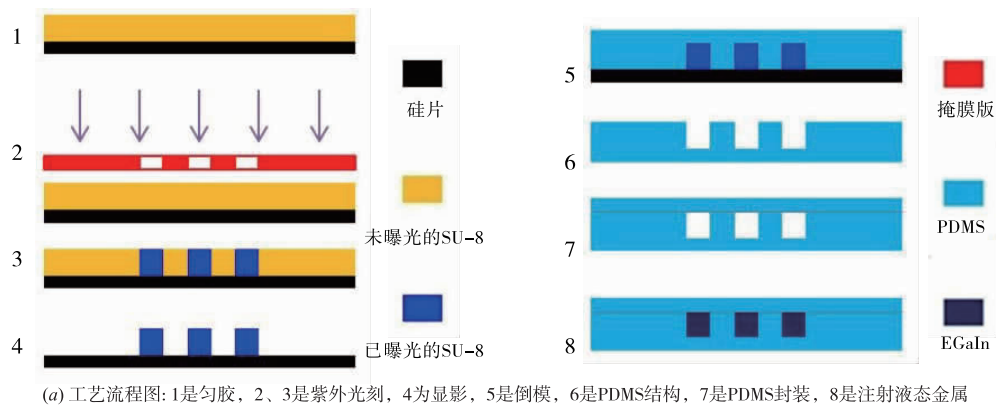
固化.

PDMS 盖片的具体制作过程:将预聚物和固化剂按质量 15:1 的比例配制,搅匀,脱泡;其次把 PDMS 旋涂在硅片上,在 70℃ 加热 20 分钟,使其部分固化.

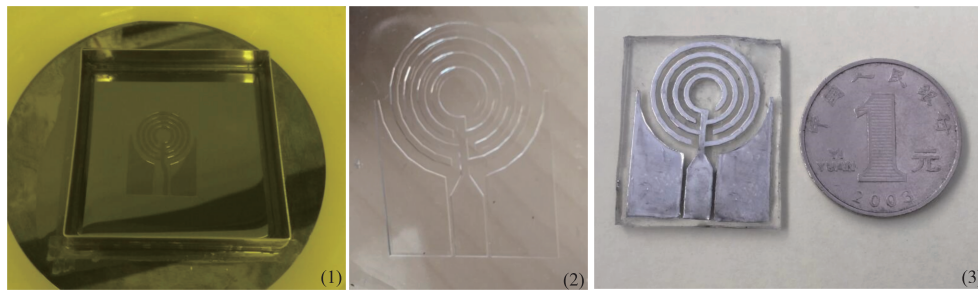
PDMS 模具的封装:将 PDMS 模具进行 Plasma 等离子处理,改变其表面特性,然后与 PDMS 盖片迅速贴合,放入 0.1MPa 的真空干燥箱以 65℃ 键合 24h,使其永久粘合. 表 2 给出了在对 PDMS 作改性处理时,改性时间、射频功率和氧气流量等参数对薄膜的影响^[12-14].

表 2 不同改性参数对 PDMS 薄膜的影响

样品编号	1	2	3	4
改性时间/s	40	80	40	40
射频功率/W	120	120	160	120
氧气流量/SCCM	150	150	150	180
PDMS 表面状态	完好	破裂	破裂	破裂



(a) 工艺流程图: 1是匀胶, 2、3是紫外光刻, 4为显影, 5是倒模, 6是PDMS结构, 7是PDMS封装, 8是注射液态金属



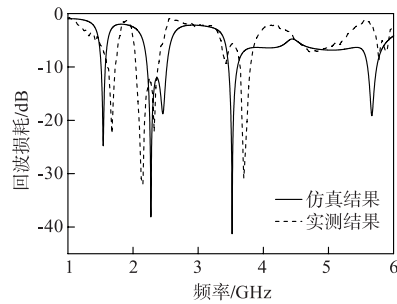
(b) 天线实物制作过程: (1) SU-8负模结构; (2) PDMS结构; (3) 天线实物

图6 天线制作总过程

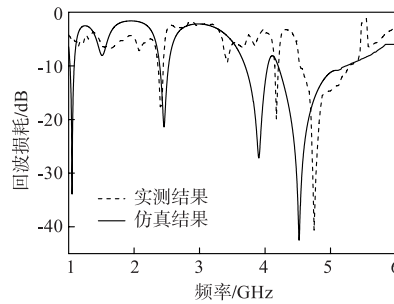
经上述工艺制作好包裹液态金属的弹性体, 使用 1ml 的注射器手动注入 EGaln, 使其充满整个 PDMS 通道, 用被乙醇溶液浸湿的棉花球拭净入口和出口处的残留液, 然后在烘台上以 75℃ 加热 1h, 以彻底密封出入口.

用矢量网络分析仪 Agilent N5224A 对天线的回波

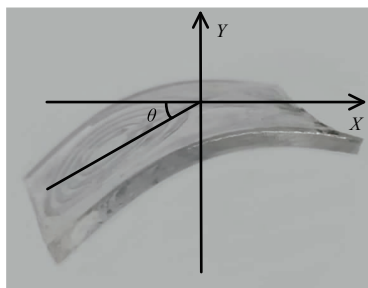
损耗进行测试, 图 7(a)、(b) 为测试结果, 与仿真结果相比存在较小误差. 这是由于利用 MEMS 工艺制作天线的过程中存在一定的精度误差, 以及在测试过程中存在控制误差, 包括介质层的厚度、液态金属的分布和连接 SMA 接头出现的损耗等. c 处开路时的测试结果与仿真结果也有较小误差, 此处产生误差除了上述原



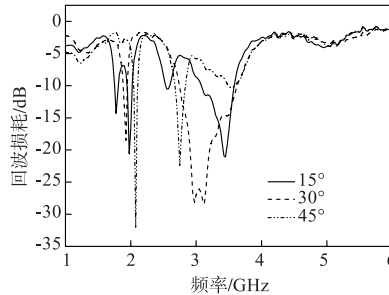
(a) 不改变天线结构时的测试图



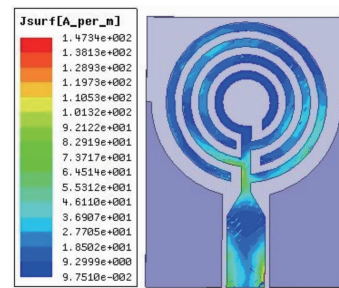
(b) c处施压时的测试图



(c) 天线顶部弯曲示意图



(d) 弯曲角度对天线的影响



(e) 天线表面电流分布

图7 天线回波损耗的测试结果及电流分布图

因外,还包括在微带线上机械压力的不均匀施加与施压面积不精准等。

此外还对天线进行弯曲一定角度来测试天线的性能,结果发现当对左右侧轻微弯曲时,天线的性能大致不变;但是在弯曲天线顶部时,其谐振点、频段及 S_{11} 值都发生较大的变化. 图 7(d) 为对天线顶部分别弯曲 15° 、 30° 和 45° 时的测试图. 从图 7(e) 的表面的电流分布图可知,电流主要分布在微带线表面,故当弯曲顶部时,微带线的物理结构与尺寸发生改变,引起电场与磁场较大的变化,造成天线谐振点的偏移以及 S_{11} 值的改变. 因此在使用过程中应尽量避免天线的微带线部分发生弯曲,以防天线的性能发生过大的改变.

5 结束语

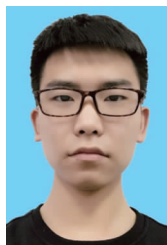
通过仿真和测试可知,本文提出的液态金属天线实现了多频段、体积小、可重构等特点. 天线通过将液态金属 EGaln 包裹在 PDMS 弹性体中形成,可以承受较大的压力,不仅在变形后不会损坏,且会在撤消压力后自动恢复,具有良好的可靠性和自我恢复能力. 另外,由于其柔性特征,还可应用于某些不平整或弯曲的物体表面,并具有良好的契合效果,但若形变过大,则会影响天线的性能. 柔性液态金属天线良好的机械稳定性、灵活性和耐用性等,使其在弯曲面的集成电子设备和柔性电子器件等需共形天线的领域具有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] 王安国,张佳杰,王鹏,等. 可重构天线的研究现状与发展趋势[J]. 电波科学学报,2008,23(5):997-1002.
Wang An-guo, Zhang Jia-jie, Wang Peng, et al. Recent research and developing trends of reconfigurable antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5): 997-1002. (in Chinese)
- [2] Schaubert DH, Farrar FG, Hayes ST, et al. Frequency-agile, Polarization Diverse Microstrip Antennas and Frequency Scanned Arrays[P]. US Patent:4367474 A, 1983.
- [3] Yu Y, Xiong J, Li H, et al. An electrically small frequency reconfigurable antenna with a wide tuning range [J]. IEEE Antenna Wireless Propagation Letters, 2011, 10(1): 103-106.
- [4] 黄帅. 基于双开口谐振环结构的双频方向图可重构天线设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
Huang Shuai. The Design of Dual Band Pattern Reconfigurable Antenna Based on SRRs Structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [5] So JH, Thelen J, Qusba A, et al. Reversibly deformable and mechanically tunable fluidic antennas [J]. Advanced Functional Materials, 2009, 19(22): 3632-3637.

- [6] Liu T, Sen P, Kim CJ, et al. Characterization of nontoxic liquid-metal alloy Galinstan for applications in microdevices [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(2): 443-450.
- [7] Cheng S, Rydberg A, Hjort K, et al. Liquid metal stretchable unbalanced loop antenna [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(14): 144103.
- [8] 周芸,房少军,傅世强,等. 一种液态金属锥形螺旋天线的仿真研究[J]. 系统仿真学报,2016,28(2):343-347.
Zhou Yun, Fang Shao-jun, Fu Shi-qiang, et al. Simulation & analysis of liquid metal conical helical antenna [J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 343-347. (in Chinese)
- [9] Jobs M, Hjort K, Rydberg G A, et al. A tunable spherical cap microfluidic electrically small antenna [J]. SMALL, 2013, 9(19): 3230-3234.
- [10] Wang M, Khan MR, Dickey MD, et al. A reconfigurable liquid metal antenna driven by electrochemically controlled capillarity [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(19): 194901.
- [11] Liu P, Yang S, Wang X, et al. Directivity-Reconfigurable wideband two-arm spiral antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 16(99): 66-69.
- [12] Cui J, Duan J, Zhang B, et al. Flexible pressure sensor with a "V-type" array microelectrode on a grating PDMS substrate [J]. Sensor Review, 2016, 36(4): 397-404.
- [13] Cui J, Duan J, Zhang B, et al. Flexible pressure sensor with Ag wrinkled electrodes based on PDMS substrate [J]. Sensors, 2016, 16(12): 12131.
- [14] Zhang B, Cui J, Duan J, et al. A new fabrication method for nano-gratings based on the high flexibility of PDMS [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92(4): 206-210.

作者简介



郑鹏帅 男,1992年6月出生于山西省运城市. 现为中北大学仪器与电子学院硕士研究生. 主要研究方向为液态金属柔性天线的设计与制作和微流控芯片技术.
E-mail: zhengpengshuai0604@163.com



陈婧 女,1987年5月出生于山西省太原市. 现为北京计算机技术及应用研究所设计师. 主要研究方向为嵌入式系统开发.
E-mail: chenjing_032@163.com



姚佩 女,1993年10月出生于湖南省邵阳市. 现为中北大学仪器与电子学院硕士研究生. 主要研究方向为RF器件与系统.
E-mail:1621388471@qq.com



崔建利 女,1992年12月出生于山西省运城市. 现为中北大学仪器与电子学院博士研究生. 主要研究方向为柔性微纳传感器器件技术.
E-mail:18334789099@163.com



张斌珍 男,1974年7月出生于山西省吕梁市. 现为中北大学教授,博士生导师. 主要研究方向为微/纳机电系统(MEMS/NEMS)和恶劣环境下的动态测试技术.
E-mail:zhangbinzhen@nuc.edu.cn



段俊萍 女,1979年3月出生于山西省太原市. 现为中北大学副教授. 主要研究方向为电磁场和微波技术.
E-mail:duanjunping@nuc.edu.cn



王万军 男,1957年10月生于陕西省渭南市. 现为美国路易斯安那州立大学机械工程系终身正教授. 研究方向为微纳机电系统、微制造技术和微传感器技术.
E-mail:wangwanjun@nuc.edu.cn