

基于金刚石 NV 色心的微波近场矢量测量技术 *

王昊¹, 顾邦兴¹, 陈国彬^{1,2}, 杜关祥¹

(1.南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2.宿迁学院 机电工程学院, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 为了满足微波器件进行高分辨率、非破坏性微波矢量近场测量的需求, 提出了一种基于金刚石氮空位(NV)色心的全光学微波近场矢量测量技术。该技术利用 NV 色心对其轴向的圆形极化电磁场的敏感特性, 将粘有金刚石 NV 色心的锥形光纤探头作为传感器, 在外部静磁场环境中测量得到具有 8 个峰的光探测磁共振(ODMR)谱, 并在每个ODMR 谱峰所对应的微波频率下测量微波器件表面不同 NV 轴方向的电磁场分量分布, 从而得到微波近场矢量测量结果。最后, 利用 3 μm 金刚石颗粒对谐振频率 2.87 GHz 的微带天线进行近场矢量成像, 实验结果证明了该方法的有效性, 可广泛用于芯片电磁兼容测试、集成微波芯片失效分析、数字电路信号完整性分析等。

关键词: NV 色心; 微波磁场; 矢量测量; 天线表征; 全光学; 非破坏性

中图分类号: TN407

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200480

中文引用格式: 王昊, 顾邦兴, 陈国彬, 等. 基于金刚石 NV 色心的微波近场矢量测量技术[J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 5-8, 13.

英文引用格式: Wang Hao, Gu Bangxing, Chen Guobin, et al. Microwave near field vector measurement method based on nitrogen-vacancy center ensembles in diamond[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(12): 5-8, 13.

Microwave near field vector measurement method based on nitrogen-vacancy center ensembles in diamond

Wang Hao¹, Gu Bangxing¹, Chen Guobin^{1,2}, Du Guanxiang¹

(1. School of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Post and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Suqian College, Suqian 223800, China)

Abstract: In order to meet the needs of microwave devices for high-resolution, non-destructive microwave vector near-field measurement, an all-optical microwave near-field vector measurement technique based on diamond nitrogen-vacancy(NV) centers is proposed. Using the sensitivity of NV centers to the circularly polarized electromagnetic field, the tapered optical fiber probe with diamond NV center is used as the sensor to measure the optical detection magnetic resonance (ODMR) spectrum with 8 peaks in the external static magnetic field environment, and the distribution of electromagnetic field components in different NV directions on the surface of microwave device is measured under the corresponding microwave frequency of each ODMR spectrum peak. The results of microwave near-field vector measurement are obtained. Finally, 3 μm diamond particles are used for near-field vector imaging of microstrip antenna with resonance frequency of 2.87 GHz. The experimental results show the effectiveness of the method, which can be widely used in chip electromagnetic compatibility (EMC) test, integrated microwave chip failure analysis, digital circuit signal integrity analysis, etc.

Key words: nitrogen-vacancy center; microwave field; vector field measurement; antenna characterization; all-optical; non-destructive

0 引言

近年来, 随着军用航空航天、5G 技术、卫星通信、医学检测、汽车电子等应用领域的蓬勃发展, 微波毫米波技术因其频谱宽、可靠性高、方向性好、波长短等优点受到人们的青睐, 微波毫米波器件的产生也推动了半导体市场快速增长。现如今, 芯片等高集成度电路的工作频

率越来越高, 最小线宽不断缩小, 制造工艺、加工精度也不断地提升, 整个系统逐渐小型化、微型化。芯片测试作为芯片设计生产过程的最后一个环节, 为保证芯片的功能正常性与性能指标的准确性, 起着非常重要的作用, 但是芯片测试与失效分析技术发展的速度远赶不上芯片设计与制造工艺发展的速度。传统的芯片微波近场测

* 基金项目: 江苏省特聘教授项目(RK002STP15001); 南京邮电大学校长特聘教授项目(XK0020914136); 宿迁市产业发展引导资金项目(K201912); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)(SBK2020041231)

量一般利用金属开放式波导,由于金属探头会对待测微波磁场产生干扰,且探头本身尺寸相较于芯片的微米级布线来说较大,难以进入器件内部,故无法满足高分辨率、非破坏性的矢量微波近场测试要求,因此开发一种全新的芯片表面微波磁场矢量测量技术至关重要。

氮空位(Nitrogen-Vacancy, NV)色心是金刚石中由替换碳原子的氮原子与其相邻空位构成的一种具有荧光特性的缺陷。NV色心在空间中具有矢量敏感特性,沿着NV轴方向的静磁场与垂直于NV轴平面的极化电磁场都会影响NV色心的荧光特性。根据金刚石的正四面体原子结构可知,具有多个NV色心的金刚石颗粒中共有4种不同固定方向的NV色心,因此可以进行静磁场以及微波场的矢量测量^[1]。

基于金刚石NV色心的光学性质和矢量敏感特性^[2],利用末端粘有金刚石NV色心的锥形光纤探头作为传感器,研究了一种微波器件表面的微波近场矢量测量技术。该技术采用全光学的方法,不会对待测器件表面的电磁场产生干扰,属于非破坏性测量,且金刚石颗粒尺寸可以达到亚微米甚至纳米级别,能够无障碍进入器件内部,物理接近待测近场,空间分辨率得到显著提高。除此之外,由于使用量子标定的手段,理论上可以做到完全的磁场或者电场敏感,工作频率在DC-100 GHz之间,可用于微带天线、微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)芯片等微波器件的表征以及失效分析工作。

本文介绍了3 μm金刚石探头的制作流程和光学系统的搭建,详细阐述了器件表面微波磁场矢量测量的原理和过程,并在不同的微波频率作用下,分别对谐振频率为2.87 GHz的微带天线进行近场矢量成像,验证了该技术的有效性与可操作性。

1 探头的制备与系统的搭建

1.1 金刚石探头的制备

微波磁场的测量分辨率与所用金刚石颗粒尺寸有关,理论上体积越小的样品其分辨率越高,本次实验所使用的金刚石样品直径大约为3 μm。

本文独创了一种含有金刚石NV色心的锥形光纤探头制备方法。首先将载有金刚石颗粒的载玻片水平固定在三维位移平台上,同时把锥形光纤探头竖直固定在载玻片的正上方,使得锥形光纤探头的端面正对着金刚石颗粒,并在光纤探头端面涂抹少量紫外胶。然后将显微镜固定在金刚石与锥形光纤探头端面的侧面,并通过调节三维位移平台对金刚石颗粒和锥形光纤探头进行精准对位。接着将532 nm激光由锥形光纤探头的另一端面耦合入光纤,不断调节三维位移平台,使涂有紫外胶的端面不断接近载玻片而不接触,载玻片上的金刚石颗粒被激光激发后产生荧光,红色荧光反射回锥形光纤探头,并由荧光探测装置确定荧光信号的强度,当荧光信

号的强度最大时,使涂有紫外胶的端面接触载玻片,再离开载玻片,直到确定金刚石颗粒沾上。最后将粘有金刚石颗粒的锥形光纤探头悬空于紫外灯上方,等待30 min左右,紫外胶完全固化,金刚石颗粒将稳固在锥形光纤探头的端面上。

1.2 实验系统的搭建

微波近场矢量测量系统如图1所示。其主要包括光学共聚焦部分与微波近场扫描成像部分。

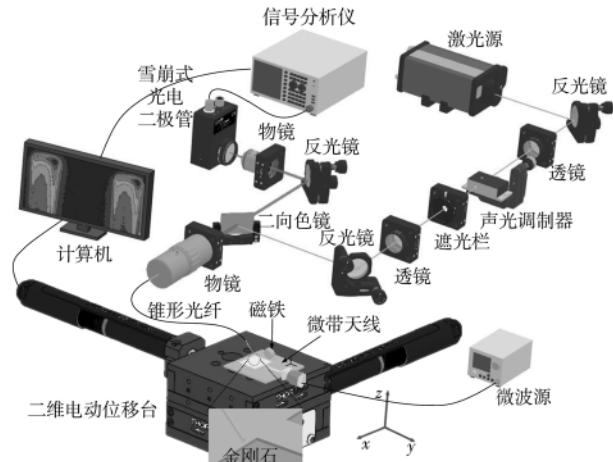


图1 微波近场矢量测量系统

在光学共聚焦部分中,激光光源提供532 nm的激光,该激光首先经过透镜聚焦进入声光调制器中进行开关控制,其出射光中的1级衍射光通过遮光栏,经过透镜,并由二向色镜反射进入长工作距离物镜进行聚焦,然后通过锥形光纤照射至粘于光纤末端的金刚石颗粒,从而激发出红色荧光。随后,该荧光由锥形光纤导入至物镜并穿过二向色镜由另一物镜聚焦,并由雪崩光电二极管测量其荧光强度。最后,利用信号分析仪进行该信号的频谱分析。

在微波近场扫描成像部分中,被测微波器件(微带天线)固定于二维电动位移台表面并连接至微波源,锥形光纤粘有金刚石颗粒的一端极其贴近微带天线表面,二者之间的高度约为0.2 mm。二维电动位移台由电脑控制进行位置扫描。

2 矢量测量原理与方法

在室温下NV色心的基态是自旋三重态,其磁量子数分别是 $m_s=0$ 、 $m_s=+1$ 和 $m_s=-1$,其中 $m_s=0$ 与 $m_s=\pm 1$ 之间有2.87 GHz的能量间隔,在外加均匀偏置静磁场的作用下,金刚石NV色心会发生塞曼效应,即在光探测磁共振(Optical Detection Magnetic Resonance, ODMR)谱上呈现出以2.87 GHz为中心频率劈裂出8个共振峰的现象^[3]。本次实验使用高速可编程式脉冲发生器提供两路同步脉冲周期序列,一路脉冲序列加载在声光调制器的驱动器上,将连续激光转变为调制后的脉冲激光,用于激发金刚石NV色心辐射红色荧光,同时通过共聚焦技术收

集产生的脉冲荧光信号,其中脉冲开关比为500 ns:500 ns;另一路脉冲信号提供给射频微波开关,在激光脉冲低电平窗口,设置微波脉冲宽度为300 ns,周期与激光脉冲相同,设置微波源为内部调制模式,调制频率为1 kHz,占空比为50%。在激光脉冲与微波脉冲双泵浦的过程中,施加外部静态磁场,通过调节静态磁场的强度与方向,可以准确地分辨出NV色心4个轴向法平面上的投影。设置合理的采样点数,以微波扫描频率为横坐标,收集的荧光信号为纵坐标,能够得到典型的包含8个共振峰的ODMR曲线,每一个共振峰轮廓近似为洛伦兹曲线模型,故使用洛伦兹函数对8个峰进行曲线拟合。典型的洛伦兹函数形式为:

$$S(A, w, f_0) = \frac{A w^2}{(f-f_0)^2 + w^2} \quad (1)$$

式中,A为每个共振峰的最大荧光强度,2w为半高宽,f₀为中心频率,S为荧光信号强度,f为微波频率。

拟合结果如图2所示,其中,中心频率左侧的共振峰对应于m_s=0和m_s=-1之间的自旋跃迁,中心频率右侧的共振峰对应于m_s=0和m_s=+1之间的自旋跃迁。

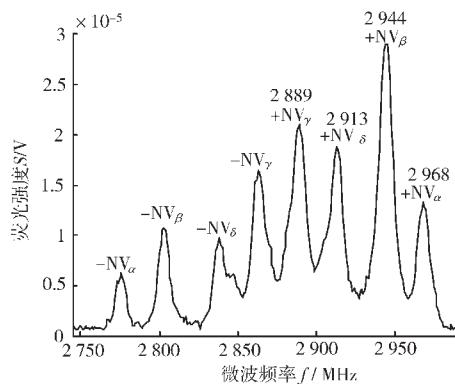


图2 剪裂为8个峰的ODMR谱

在外加磁场的作用下,可以通过对金刚石NV色心施加微波场来操控m_s=0态向m_s=±1态跃迁,分别组成两个量子二能级体系。不断地施加微波脉冲,会导致量子二能级系统的能级间的光子分布数呈现振荡,即为拉比振荡(Rabi振荡)^[4]。选取ODMR谱中任意一个处于待测器件通带内的共振频率,即选择NV色心的某一个二能级体系,以选择共振频率为2 889 MHz的共振峰为例,在一个激光脉冲周期内,设置合理的微波脉冲扫描长度和步进时长,以微波脉冲时间为横坐标,荧光信号为纵坐标,得到典型的拉比振荡曲线如图3所示,所用的曲线拟合函数为:

$$S(B_{mw}, \tau) = I_0 - i_0 \sin(2\pi\gamma B_{mw} \cdot t) \cdot e^{-t/\tau} \quad (2)$$

式中,I₀为基态m_s=0态的荧光强度,i₀为拉比振荡的荧光幅值,B_{mw}为左旋圆极化微波场强度,τ为拉比振荡的衰减时间,γ为NV色心的电子旋磁比,S为荧光信号强度,t为微波脉冲时间。

由式(2)可以看出,通过精确地测量拉比频率可以直

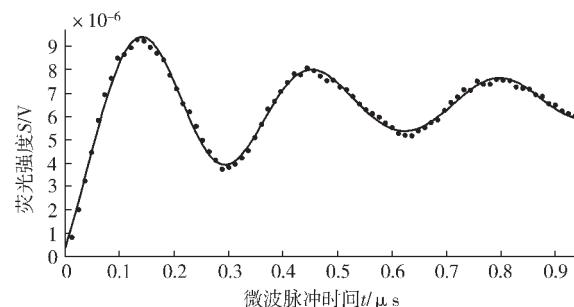


图3 微波频率为2 889 MHz对应的拉比振荡谱

接测量NV色心某一轴向上的左(或右)旋圆极化微波场强度。如果需要得到待测射频器件近场一维或二维区域的微波场强度,通过拉比振荡测量则需要执行一个点一个点的重复实验,从时间成本上考虑这将是不切实际的。因此,在拉比测量技术的基础上,选取极短的微波脉冲作用时间,式(2)中的三角函数项可近似为2πγB_{mw},指教项近似为1,那么微波场强度B_{mw}与探测的荧光信号强度S近似成线性比例关系。综上,扫描待测器件的一维或二维区域时,可以用荧光信号强度来表征射频器件每个位置的微波场强度,再由色阶填充颜色,即可得到射频器件的近场分布成像结果。

根据上述原理,设置微波脉冲时间为10 ns,此时微波场强度与荧光信号强度近似成线性关系,同时利用二维电动位移平台控制谐振频率2.87 GHz的微带天线在金刚石探头下方约0.2 mm处做相对运动,实现对选取的微带天线中微波场较强区域的扫描成像,结果如图4(a)所示。

为了验证该技术的可重复性以及NV色心的电磁场矢量敏感特性,在相同的实验条件下,选取ODMR谱中共振频率2 913 MHz、2 944 MHz对应的共振峰分别进行扫描成像。由于文章篇幅有限,且实验原理相同,故对拉比振荡过程不做复述,只将最终成像结果展示如图4(b)、图4(c)所示。综合对比图4中3种不同共振频率下的成像结果可以看出,该技术具有可重复性,能够有效测量微波器件表面的矢量电磁场分布。至于不同共振频率下所得到的微波场分布的结果略有不同,主要是因为其敏感的微波场矢量的方向分量是沿着各自对应的NV轴向,而所选的3种共振频率对应着3个不同的NV轴向,故成像结果有差异。

3 结论

为了满足微波器件进行高分辨率、非破坏性微波矢量近场测量的需求,本文基于NV色心能够敏感其NV轴向上圆形极化电磁场的特性,提出了一种全新的全光学微波器件表面磁场矢量测量技术。该技术利用具有NV色心的亚微米级金刚石颗粒为敏感单元,通过激光脉冲激发NV色心产生荧光以及脉冲信号调制微波脉冲的方式,测量得到具有8个峰的ODMR谱,从而确定

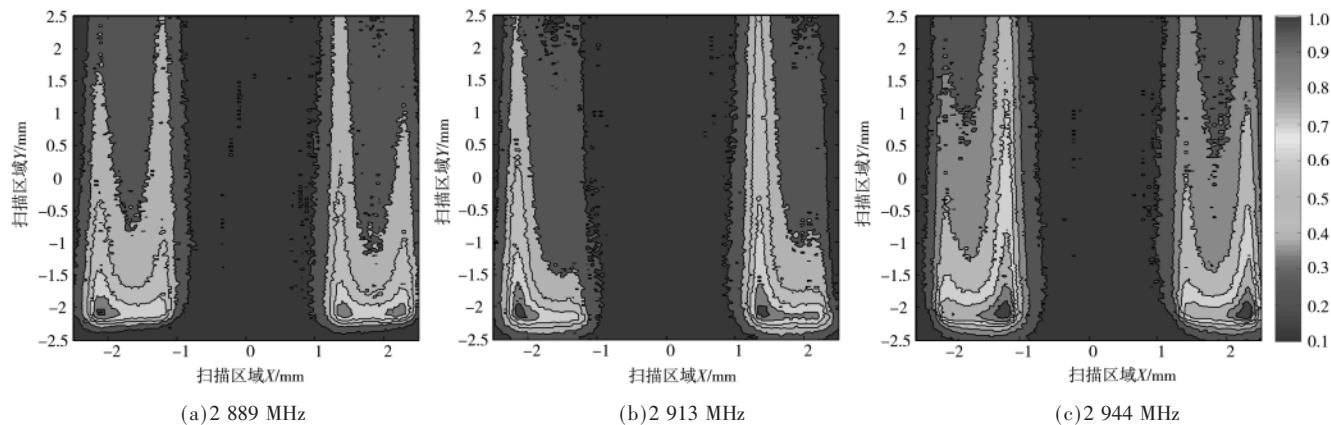


图 4 不同共振频率下微带天线部分近场微波磁场分布结果

金刚石中各 NV 轴向敏感的微波频率。在 ODMR 谱峰所对应的微波频率下进行拉比振荡过程, 以及器件的矢量场扫描成像。文中通过微带天线扫描成像验证了该技术的理论基础和可行性。综上所述, 该方法拥有分辨率高、干扰小、完全的磁场敏感、工作频率宽的优点, 可广泛用于天线的表征、芯片的电磁兼容测试、数字电路信号完整性分析等。

目前为止, 该技术主要用于近场磁场的表征, 对于以电场为主的芯片部位仍无法分析。未来研究工作的主要方向是研制具有近场电场探测能力的金刚石 NV 色心集成探针, 用于充分表征芯片表面的电流和电荷分

布, 了解芯片不同部位的电场耦合情况。与此同时, 结合 FPGA 等技术实现整个测试系统的微型化, 进一步提高该技术的实用性。

参考文献

- [1] APPEL P, GANZHORN M, NEU E, et al. Nanoscale microwave imaging with a single electron spin in diamond[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(11): 112001–112006.
- [2] HORSLEY A, APPEL P, WOLTERS J, et al. Microwave device characterization using a widefield diamond microscope[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(4): 4039–4048.
- [3] 周志鹏. 毫米波有源相控阵天线技术[J]. *微波学报*, 2018, 34(1): 99–102.
- [4] 周志鹏. 毫米波有源相控阵天线技术[J]. *微波学报*, 2018, 34(1): 1–5.
- [5] HA J H, MOON J Y, LEE K W, et al. A Design of X-band tile type active transmit/receive module[J]. *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 2010, 21(12): 1467–1474.
- [6] 何庆强. 低成本有源相控阵天线研究[J]. *微波学报*, 2019, 35(1): 44–48.
- [7] HAUHE M S, WOOLDRIDGE J J. High density packaging of X-band active array modules[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B*, 1997, 20(3): 279–291.
- [8] KIBAROGLU K, SAYGINER M, REBEIZ G M. A low-cost scalable 32-element 28-GHz phased array transceiver for 5G communication links based on a 2×2 beamformer flip-chip unit cell[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, 53(5): 1260–1274.

(收稿日期: 2020-06-12)

作者简介:

刘雪颖(1976-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 卫星通信及相控阵天线阵面集成技术。

(上接第 4 页)

系统品质因数 G/T 由式(3)给出:

$$G/T = 10\log N + G_{\text{ant}} + 10\log \frac{1}{290 \times 10^{\text{NF}/10}} \\ = 21.07 + 4 - 32.6 = -7.55 \text{ dB/K} \quad (3)$$

其中, N 为单元个数, G_{ant} 为单元天线的增益(含芯片输出端到天线输入端的损耗), NF 为单通道噪声系数。

此外波束切换执行时间仅为 150 ns。

5 结论

本文介绍了一种工作在 Ka 频段的低成本瓦片式相控阵天线。该天线实现 128 单元的辐射通道集成, 体积仅为 93 mm×93 mm×52 mm, 重量仅为 0.8 kg。该系统的 ERIP 优于 66 dBm, G/T 优于 -7.55 dB/K, 收发切换时间小于 150 ns。实测结果表明, 该相控阵天线前端系统适用于微波、毫米波频段, 相比传统的相控阵天线, 具有更低的剖面和成本, 具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 彭祥龙. 相控阵天线集成技术[J]. *微波学报*, 2010, 26(1): 725–728.
- [2] 赵怡, 桂进乐, 李骥, 等. 一种瓦片式 T/R 组件的研制[C]. 2019 年全国微波毫米波会议, 2019: 750–752.
- [3] 李吉浩, 李益兵, 陈志新, 等. 毫米波通信 64 单元瓦片相

计算出的一次方程为：

$$f(x) = 1.01869x - 0.13478 \quad (3)$$

由方程(3)可以得出一次项系数为 1.01869, 拟合优度 Adj.R-square 约等于 0.99995, 则表明线性拟合良好, 所以满足识别的准确性要求。

4 结论

本文采用 1/4 圆环谐振器设计了一种基于频域的无芯片 RFID 标签, 设计了一个 8 位标签, 标签的尺寸 $13.5 \text{ mm} \times 13.5 \text{ mm}$, 工作的频段为 $6 \text{ GHz} \sim 11.5 \text{ GHz}$, 具有 4.39 bits/cm^2 的高编码密度, 验证了其设计的性能。虽然标签的尺寸不是最优的, 但对于设计无芯片 RFID 标签有很好的参考价值, 结合一些小型化技术, 还可以在柔性基板上印刷出尺寸更小、容量更大的标签。

参考文献

- [1] PERRET E. Radio frequency identification and sensors: from RFID to chipless RFID[M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014.
- [2] MULLONI V, DONELLI M. Chipless RFID sensors for the Internet of Things: challenges and opportunities[J]. Sensors, 2020, 20(7): 2135.
- [3] DIVARATHNE C, KARMAKAR N. An advanced tag detection technique for chipless RFID systems[C]. 2015 European Microwave Conference(EuMC), Paris, 2015; 251–254.
- [4] ALIASGARI J, FOROUZANDEH M, KARMAKAR N. Chipless RFID readers for frequency-coded tags: time-domain or frequency-domain[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2020, 4(2): 146–158.
- [5] PPPERL M, PARR A, MANDEL C, et al. Potential and practical limits of time-domain reflectometry chipless RFID[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(9): 2968–2976.
- [6] ALAM J, KHALIEL M, FAWKY A, et al. Frequency-coded chipless RFID tags: notch model, detection, angular orientation, and coverage measurements[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1843.
- [7] SCHÜBLER M, MANDEL C, MAASCH M, et al. Phase modulation scheme for chipless RFID- and wireless sensor tags[C]. Microwave Conference. IEEE, 2010.
- [8] ZOMORRODI M. Image-based chipless RFID system with high content capacity for low cost tagging[C]. IMaRC. IEEE, 2014.
- [9] NGUYEN D H, ZOMORRODI M, KARMAKA N C. Spa-

(上接第 8 页)

- [3] DONG M M, HU Z Z, LIU Y, et al. A fiber based diamond RF B-field sensor and characterization of a small helical antenna[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(13): 131105.1–131105.5.
- [4] YANG B, DONG Y, HU Z Z, et al. Noninvasive imaging method of microwave near field based on solid-state quantum sensing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and

tial-based chipless RFID system[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2019, 3(1): 46–55.

- [10] JIMÉNEZ-SÁEZ A, SCHUBLER M, NICKEL M, et al. Hybrid time-frequency modulation scheme for chipless wireless identification and sensing[C]. 2017 IEEE Sensors, 2017.
- [11] BAUM C E. The singularity expansion method: background and developments[J]. IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, 1986, 28(4): 14–23.
- [12] DRISSI K E K. The matrix pencil method applied to smart monitoring and radar[C]. CMEM 2015, 2015.
- [13] BLISCHAK A T, MANTEGHI M. Embedded singularity chipless RFID tags[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2011, 59(11): 3961–3968.
- [14] TRUDNOWSKI D J, JOHNSON J M, HAUER J F. Making prony analysis more accurate using multiple signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 226–231.
- [15] SUMI M, DINESH R, NIJAS C M, et al. High bit encoding chipless RFID tag using multiple E-shaped microstrip resonators[J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2014, 61: 185–196.
- [16] 马中华, 杨建红. 基于 I 型缝隙谐振器的完全印刷无芯片标签[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 44–49, 57.
- [17] 夏正浩, 邹传云. 多谐振器无芯片 RFID 标签设计[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(7): 87–89.
- [18] JABEEN I, EJAZ A, AKRAM A, et al. Elliptical slot based polarization insensitive compact and flexible chipless RFID tag[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(11): 1–10.

(收稿日期: 2020-08-16)

作者简介:

张强林(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线射频识别技术。

邹传云(1960-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 超宽带技术、无线射频识别技术。

焦良玉(1993-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 无线射频识别技术。

and Techniques, 2018, 28(12): 204–211.

(收稿日期: 2020-06-11)

作者简介:

王昊(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 量子微波场成像。

顾邦兴(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 芯片近场精密测量。

陈国彬(1987-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 自旋电子学、纳米磁学。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所