

# 基于金刚石 NV 色心的带状线芯片微波场成像

郭志刚<sup>1</sup>, 陈国彬<sup>1,2</sup>, 顾邦兴<sup>1</sup>, 和文豪<sup>1</sup>, 姜海峰<sup>1</sup>, 王昊<sup>1</sup>, 杜关祥<sup>1</sup>

(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:** 为了满足集成微波器件进行高分辨率微波近场测量的需求, 本论文提出了一种基于金刚石氮空位 (Nitrogen-Vacancy, NV) 色心的微波近场成像技术. 该技术可用于查找芯片等集成微波器件的干扰源和信号串扰. 此微波近场成像方法采用金刚石 NV 色心颗粒作为场传感器, 其中金刚石颗粒固定在锥形光纤的末端. 由于塞曼效应, NV 色心的光探测磁共振 (Optical Detection Magnetic Resonance, ODMR) 谱在外部静磁场环境中会分裂成为 8 个峰, 通过测量共振峰频点的 Rabi 振荡谱, 能够得到 Rabi 频率, 接着通过 2.8 MHz/Gauss 换算得出该处的微波场强度, 最后通过将所测得所有数据点进行二维图像处理即可得到所测芯片和集成微波器件的表面微波场近场图像.

**关键词:** 微波场成像; 金刚石 NV 色心; 芯片; 高分辨率

**中图分类号:** TN61      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2020)11-2258-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.11.023

## Microwave Field Imaging of Stripline Chip Based on Nitrogen-Vacancy Center Ensembles in Diamond

GUO Zhi-gang<sup>1</sup>, CHEN Guo-bin<sup>1,2</sup>, GU Bang-xing<sup>1</sup>, HE Wen-hao<sup>1</sup>,  
JIANG Hai-feng<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, DU Guan-xiang<sup>1</sup>

(1. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China; 2. Electromechanic Engineering College, Suqian College, Suqian, Jiangsu 223800, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of integrated microwave devices for high-resolution microwave near-field measurement, this paper proposes a microwave near-field imaging technology based on the diamond Nitrogen-Vacancy (NV) color center. This technology can be used to find interference sources and signal crosstalk of integrated microwave devices such as chips. This microwave near-field imaging method uses diamond NV color center particles as a field sensor, where the diamond particles are fixed at the end of a tapered fiber. Due to the Zeeman effect, the optical detection magnetic resonance (ODMR) spectrum of the NV color center will split into 8 peaks in the external static magnetic field environment. By measuring the Rabi oscillation spectrum of the resonance peak frequency point, the Rabi frequency can be obtained, and then use 2.8 MHz / Gauss to calculate the microwave field strength. Finally, the near-field image of the surface microwave field of the chip and the integrated microwave device can be obtained by performing two-dimensional image processing on all measured data points.

**Key words:** microwave field imaging; nitrogen-vacancy center ensembles in diamond; chip; high resolution

## 1 引言

集成电路领域过去二十年内发生了显著的变化, 深亚微米技术的进步推动了集成电路复杂性的爆炸性增长, 尺寸越小, 这些器件对制造变化和公差累积越敏感. 单片微波集成电路芯片具有体积小、集成度高和性能好等优点<sup>[1]</sup>, 因此找到合适方法对这些微波器件进行经济、

快速、准确的测试变得愈加重要<sup>[2,3]</sup>. NV 色心是金刚石中由替换碳原子的氮原子 (Nitrogen) 与其相邻空位 (Vacancy) 构成的一种具有荧光特性的缺陷, 能够感知芯片表面的磁场强弱, 能提供高达纳米级的分辨率<sup>[4]</sup>, 具有体积小、退相干时间长等特点. 它具有两个特征明确的充电状态: 中性 (NV<sup>0</sup>) 或带负电 (NV<sup>-</sup>).

NV 色心在正常环境下具有相对较长的自旋寿命, 可

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-02-25; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2017YFB0403602); 江苏省特聘教授项目 (No. RK002STP15001); 南京邮电大学校长特聘教授项目 (No. NY214136); 宿迁市产业发展引导资金项目 (No. K201912); 江苏省自然科学基金 (No. SBK2020041231)

以使用绿色激光将其偏振以及进行光学读取,并且可以通过由脉冲控制的微波场对自旋子能级进行操纵. NV 色心的结构具有  $C_{3v}$  对称性,其两个不成对电子态在基态 ( $^3A_2$ ) 和激发态 ( $^3E$ ) 是自旋三重态 ( $S=1$ ),其自旋能级有  $m_s=0, \pm 1$ . 在自旋守恒的激光激励下,激发态  $m_s=0$  自发地回到基态  $m_s=0$ ,然而  $m_s=\pm 1$  的状态有两条可能的衰变路径,其中一条是通过辐射跃迁到  $m_s=\pm 1$  状态,或非辐射的通过系统间交叉效应到  $m_s=0$  状态. 在后一种情况下有 30% 的概率,  $m_s=\pm 1$  的激发态首先衰减为亚稳态的单重态,然后衰减为基态  $m_s=0$ <sup>[5]</sup>. 由于自旋相互作用,在室温下 NV 色心的基态在  $m_s=0$  和  $m_s=\pm 1$  态之间具有 2.87GHz 的零场分裂<sup>[6]</sup>. 当施加外部磁场时,通过塞曼效应提升  $m_s=\pm 1$  自旋态的简并性,表现在 ODMR 谱上为共振峰值距离被拉大<sup>[7]</sup>. 通过调整外部磁场和四个晶体 NV 轴的相对取向,可以通过光学检测磁共振 (ODMR) 技术观察到基态中的总共八个微波偶极跃迁.  $m_s=0$  态和  $m_s=+1$  态或  $m_s=-1$  态之间的跃迁是磁偶极子跃迁,构成了一个量子二能级体系,共振微波磁场在布洛赫球面上驱动闭环 Rabi 循环<sup>[8]</sup>.

传统的微波近场测量使用是金属开放式波导,其无法满足高分辨率的微波近场的测量需求,因此基于金刚石 NV 色心的微波近场测量在微波器件性能表征方面起着重要的作用. 如图 1 是本论文中所用的含金刚石 NV 色心晶体的光纤探头,该光纤纤芯直径经过 5mm 的距离从 200 $\mu\text{m}$  被拉到 70 $\mu\text{m}$  左右,顶端是直径约为 10 $\mu\text{m}$  的金刚石 NV 色心晶体,其中探头达到的空间分辨率大小即金刚石 NV 色心晶体的尺寸大小 10 $\mu\text{m}$ ,若利用更小体积的金刚石 NV 色心晶体测量微波场则可提高其空间分辨率.

本文基于金刚石 NV 色心的光学性质,利用末端粘有金刚石 NV 色心的锥形光纤探头作为传感器,对 LANGER 公司的带状线芯片进行了微波场成像<sup>[9]</sup>.

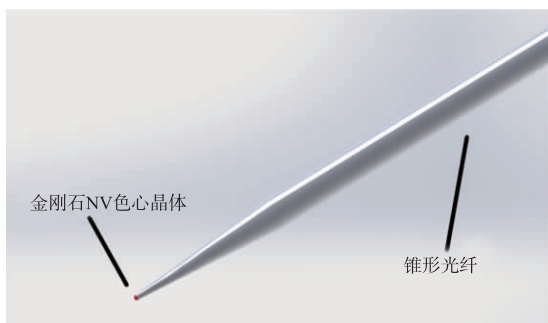


图1 含NV色心的锥形光纤探头

## 2 实验系统

微波近场扫描系统<sup>[10,11]</sup>结构如图 2 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.

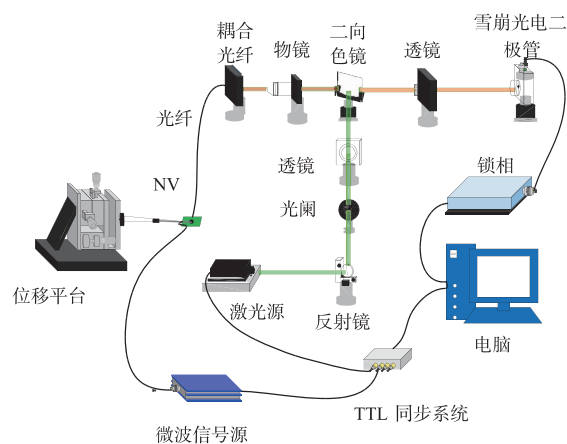


图2 微波近场测量系统

在光学共聚焦部分中,激光光源提供 532nm 的激光,该激光器由 TTL 同步系统提供如下图 3 中所示的 Laser 脉冲控制,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接于光纤末端的金刚石颗粒,从而激发出红色荧光. 其中上面所说光纤位于芯片的正上方,芯片末端连接着微波源,微波源由 TTL 同步系统产生的如图 3 中 MW 脉冲控制. 值得注意的是,一个周期内共有  $N$  个 Laser 脉冲和  $M$  个 MW 脉冲序列,其中前  $M$  个 Laser 脉冲关闭时 MW 脉冲开启, Laser 脉冲开启时 MW 脉冲关闭,后  $(N-M)$  个 Laser 脉冲无论开关期间内, MW 脉冲全都处于常关状态. 随后金刚石 NV 色心激发产生的红色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 (APD) 测量其荧光强度. 最后,利用锁相进行该信号的频谱分析.

在微波近场扫描成像部分中,被测芯片固定于二维电动位移台表面,金刚石颗粒固定于芯片表面. 二维电动位移台由电脑控制进行逐点的位置扫描.

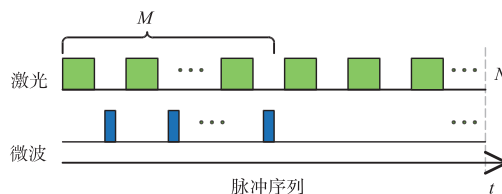


图3 系统脉冲序列

## 3 微波场成像

### 3.1 光探测磁共振 (ODMR) 谱

在测量过程中,本文主要采用一种脉冲调制技术,设置激光脉冲开关的长度各为 500ns,然后由此激光脉冲激发 NV 色心产生荧光,设置微波脉冲长度为 50ns,然后由此脉冲信号调制微波,特别的其中每  $M$  个微波脉冲周期的时间总和与后面处于微波常关状态的周期

时间相加为 1ms,即相当于微波在源处有一频率为 1kHz 的幅度调制.因此,在频域中,脉冲荧光具有 1MHz 的频率分量 ( $V_c$ ),除此之外还有调制生成的荧光载波信号的边带信号 ( $V_s$ ).在线性状态:  $\gamma B_{mw} t \ll 1$  ( $\gamma$  是旋磁比,  $t$  是微波脉冲持续时间,  $B_{mw}$  是微波场强度)中,边带信号与载波信号成线性比例,本文将它们的比率  $V_s/V_c$  定义为调制深度.

据已有实验结果显示,受整个系统本底噪声限制最小可分辨调制深度约为 20 ppm,此时分辨率 (RBW) 带宽为 3Hz.减小 RBW 可以进一步改善最小可检测微波场强度,但需要更长的测量时间.在弱磁场极限下,具有典型的 Rabi Pi 脉冲长度为  $4\mu\text{s}$  ( $B_{mw}$  约为  $0.0446\text{G}$ ),调制深度最大约为 1%,最小可分辨场强度约为  $0.89 \times 10^{-4}\text{G}$ .若考虑到 RBW,灵敏度则为  $0.5 \times 10^{-4}\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$  或  $5\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[8]</sup>.在测得零场 ODMR 后,调整外部固定磁场矢量的强度及方向即可测量得到如图 4 所示具有 8 个谱峰的光探测磁共振谱 (ODMR) 信号,此图很好的验证了引言部分 NV 色心的自旋理论.

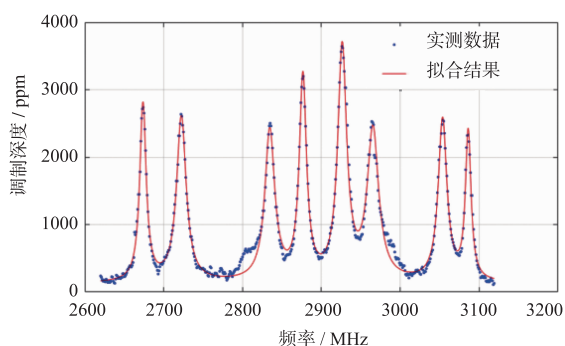


图4 光探测磁共振谱信号

### 3.2 Rabi 振荡谱

本文在 8 个谱峰中取从左往右数第二个峰所处的微波源的频率 2724MHz,将其代入 labview 程序中,因为此峰与周边两个峰的距离均在 50MHz 往上,用此峰进行微波场表征时噪声较小,得到的效果会比较好.之后我们不再更改微波源频率与激光频率设置,仅仅通过设置 MW 脉冲开启时间的长度,逐渐的增大微波作用的时间(这期间控制 Laser 与 MW 的 TTL 脉冲序列还是如上图 3 所示,变化的只是每一次 MW 脉冲持续的时间),从而得到如图 5 所示此微波频率处的 Rabi 振荡谱.然后根据式子  $\omega_R = (\gamma/\hbar)B_{mw}$  即可推导出微波场强,其中其中  $\gamma$  是旋磁比,  $\hbar$  是约化普朗克常数.

### 3.3 带状线芯片微波场图像

本文进行微波场成像的 LANGER 公司的带状线芯片 ( $32.5\text{mm} \times 32.5\text{mm}$ ),主要结构是如图 6 所示的带状线结构.带状线是由两块相距为  $b$  的接地板与中间宽度为  $W$ 、厚度为  $t$  的矩形截面导体带构成<sup>[12]</sup>.带状线具有

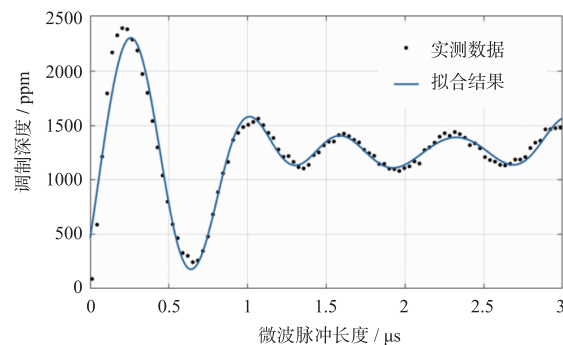


图5 Rabi谱

体积小、重量轻、频带宽、 $Q$  值高、工艺简单、成本低廉等优点,适于制作高性能(宽频带、高  $Q$  值、高隔离度)无源元件.在显微镜下,我们拍照得到了带状线表面的图像,如图 6 所示,红色长方形框即为本文进行扫描的区域 ( $2840\mu\text{m} \times 3780\mu\text{m}$ ).图中黑色长方形突起部分是带状线的  $50\Omega$  匹配电阻.除此之外,本文还测出了沿红色框中橙色线即导线上各处的微波场强度.

做完 Rabi 谱的测量后,我们选取 Rabi 谱第一次振荡上升时间的十分之一即 20ns 作为微波开启的时间,然后继续沿用之前 Rabi 谱测量时的微波频率 2724MHz,将带状线放置到位移平台上之后,设定好需要扫描的区间和步进,在电脑的控制下,进行设定区域微波场成像,如图 7 就是扫描得出的带状线近场微波场成像结果,图中左半部分给出了带状线芯片表面各处微波场强弱,右半部分给出了沿导线的微波场强度.

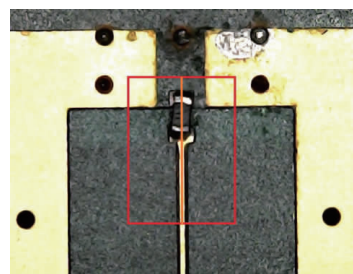


图6 带状线芯片

### 3.4 带状线芯片微波场图像分析

图 7 是扫出的微波场成像结果,从图中我们可以清晰的看出,带状线芯片终端匹配电阻处的微波场强度较其他部分强度较强,这是因为其他地方信号被局限到波导里,而匹配电阻那里是开放结构,所以信号比较强.沿着终端电阻到导线微波场强度逐渐减小,导线上微波场强度显示起来比较低,也有可能是因为,电阻高度比导线高,即扫描时比较靠近光纤传感器,所以得到的强度也会高一点.电阻左侧有部分强度比右侧强,这可能是由于此带状线摆放时没有放到完全水平或者由于焊接时底下的锡分布不均,导致左侧离我们的光纤

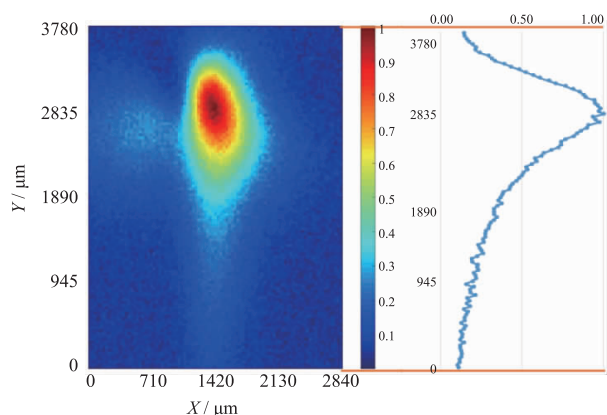


图7 带状线微波场成像

较近,信号较强.另外对于此芯片的测试结果,若想进一步提高它的测试效果,可以在后续的实验中使用体积更小的金刚石 NV 色心晶体,用以提高空间分辨率同时采用三维位移平台,进行三维扫描,从而可以避免芯片表面凹凸不平带来的影响.

#### 4 结语

随着微波集成电路的复杂度和集成度不断提高,特征线宽不断减小,非破坏高分辨微波场近场成像技术对芯片等器件的功能和失效分析至关重要,本文所采用的微波场成像方法能直接、高效的得出带状线芯片表面微波场的分布.此方法同其他测试方法相比,优点如下:

(1) 高分辨率,该系统采用光学成像的方法对金刚石的荧光进行成像,可以达到亚微米的成像分辨率.

(2) 基于脉冲光探测磁共振方法的磁场探测灵敏度可以达到纳特斯拉( $\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ),这大大提高了磁场成像的灵敏度.

(3) 金刚石颗粒本身的化学成分为碳和杂质氮,这两种物质均对电磁场没有扰动,因此这一技术可以做到真正的非破坏电磁场成像,同时具有较小的总体尺寸,将对被测场的侵入性降到最低,在操作上具有鲁棒性.

(4) 该技术主要采用光学探测的方法,利用软件进行数值处理并成像,系统的结构简单.

#### 参考文献

- [1] 徐锐敏,陈志凯,赵伟.微波集成电路的发展趋势[J].微波学报,2013,29(5):55-60.  
XU Ruimin, CHEN Zhikai, ZHAO Wei. 微波集成电路的发展趋势[J]. Journal of Microwaves, 2013, 29(5): 55-60. (in Chinese)

- [2] 吴少芳,孔学东,黄云.微波裸芯片的测试技术[J].电子产品可靠性与环境试验,2008,26(04):58-61.
- [3] Berweger S, Weber J C, John J, et al. Microwave near-field imaging of two-dimensional semiconductors [J]. Nano Lett, 2015, 15(2): 1122-7.
- [4] Maurer P C, Maze J R, Stanwix P L, et al. Far-field optical imaging and manipulation of individual spins with nanoscale resolution [J]. Nature Physics, 2010, 6(11): 912-918.
- [5] Doherty M W, Manson N B, Delaney P, et al. The nitrogen-vacancy colour centre in diamond [J]. Physics Reports, 2013, 528(1): 1-45.
- [6] Acosta V M, Bauch E, Ledbetter M P, et al. Temperature dependence of the nitrogen-vacancy magnetic resonance in diamond [J]. Phys Rev Lett, 2010, 104(7): 070801.
- [7] 宋学瑞. 纳米金刚石中 NV 色心的制备与量子调控研究 [D]. 中国科学技术大学, 2014.
- [8] 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.
- [9] Hu Z, Yang B, Dong M, et al. Optical sensing of broadband rf magnetic field using a micrometer-sized diamond [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(3): 1-4.
- [10] Yang B, Dong M-M, He W-H, et al. Using diamond quantum magnetometer to characterize near-field distribution of patch antenna [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(6): 2451-2460.
- [11] 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 Techniques, 2018, 66(5): 2276-2283.
- [12] 张文喜,郑庆瑜,郑彩平.带状线法测量微波材料的复介电常数[J].中国电子科学研究院学报,2014,9(2):136-139.  
ZHANG Wen-xi, ZHENG Qing-yu, ZHENG Cai-ping. Strip-line test methods for plural permittivity of microwave material [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2014, 9(2): 136-139, 144. (in Chinese)

#### 作者简介



郭志刚 男,1996 年出生,江苏淮安人,2018 年在金陵科技学院获得通信工程学士学位,目前正在南京邮电大学通信与信息工程学院攻读硕士学位,研究方向为量子微波场成像与测量。  
E-mail: 861150340@qq.com



**陈国彬** 男,1987 年出生,内蒙古呼伦贝尔人,2005 年至 2015 年在中国太原中国北方大学获得学士、硕士和博士学位.2015 年进入中国宿迁宿迁学院任教.自 2018 年起,在中国南京邮电大学彼得·格伦伯格研究中心担任博士后研究员.目前的研究兴趣包括从直流到高频的磁场矢量传感和成像.

E-mail:cgb8241016@163.com



**杜关祥(通信作者)** 男,1980 年出生,湖北咸宁人,2003 年获得中国兰州大学学士学位,2008 年获得中国科学院北京物理研究所物理学博士学位.2008 年至 2012 年,任日本仙台东北大学高桥实验室的博士后研究员.是瑞士巴塞尔大学量子原子光学组的成员之一.2014 年至 2016 年,在德国哥廷根马克斯普朗克生物物理化学研究所纳米级自旋成像小组工作.2016 年加入中

国南京邮电大学任教授.目前的研究兴趣包括自旋电子学、磁光光谱仪器、纳米尺度磁学和量子微波场成像.

E-mail:duguanxiang@njupt.edu.cn