

基于 NV 色心的晶体管放大器近场分布成像

姜海峰¹, 陈国彬^{1,2}, 郭志刚¹, 和文豪¹, 顾邦兴¹, 王昊¹, 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: 微波毫米波芯片非破坏高分辨率近场分布成像对高频射频芯片的功能和失效分析至关重要. 本实验基于金刚石 NV (Nitrogen-Vacancy) 色心这一独特的量子体系, 选取直径约为 $14\mu\text{m}$ 的金刚石样品, 将其粘附于 $20\mu\text{m}$ 直径的光纤锥形尖端, 制备成高分辨、非破坏、微型化的探针, 通过分析 NV 色心在微波场变化中的基态自旋演化规律, 采用全光学的方法, 一次性成像, 获得芯片表面整体场分布. 本文给出了氮化镓高电子迁移率晶体管的近场分布成像图, 拟合出光学探测磁共振 (Optically Detected Magnetic Resonance, ODMR) 谱图以及 Rabi 谱图, 并对成像结果进行了分析. 这一系统具有高效、高分辨、高灵敏度、对近场干扰小等优势, 有望为高集成度微波电路故障诊断、天线辐射剖面、微波集成电路电磁兼容测试等应用提供一种全新的方案.

关键词: 金刚石 NV 色心; 光学探测磁共振; 微波场成像; 高分辨率

中图分类号: TN61 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2020)08-1631-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.08.023

Near Field Distribution Imaging of Transistor Amplifier Based on NV Color Center

JIANG Hai-feng¹, CHEN Guo-bin^{1,2}, GUO Zhi-gang¹, HE Wen-hao¹,
GU Bang-xing¹, WANG Hao¹, DU Guan-xiang¹

(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: The nondestructive and high-resolution near-field distribution imaging of microwave and millimeter wave chips is very important for the function and failure analysis of RF chips. This experiment is based on the unique quantum system of diamond NV (nitrogen-vacancy) color center. A diamond sample with a diameter of about $14\mu\text{m}$ is selected and adhered to the tapered tip of a $20\mu\text{m}$ fiber. A high-resolution, non-destructive and miniaturized probe is prepared by analyzing the ground state spin evolution law of NV color center in the change of microwave field, and the all optical method is used. The whole field distribution on the chip surface is obtained by imaging. In this paper, the near-field distribution image of GaN high electron mobility transistor is given. The ODMR spectrum and Rabi spectrum are fitted, and the imaging results are analyzed. This system has the advantages of high efficiency, high resolution, high sensitivity and low near-field interference. It is expected to provide a new scheme for the application of high integration microwave circuit fault diagnosis, antenna radiation profile, microwave integrated circuit electromagnetic compatibility test, etc.

Key words: nitrogen vacancy (NV) center in diamond; optical detection magnetic resonance; microwave field imaging; high resolution

1 引言

随着无线通信技术的飞速发展,微波功率器件的性能要求越来越高.无论是通信基站还是移动终端设备,放大器增益提高尤为重要.微波功率器件的近场分

布情况探测对于其设计与检测有着重要意义,虽然大部分 EDA 软件可以提供从器件到 IC 电路的各级仿真,但目前还缺乏直接测试微波功率器件^[1]内部电磁兼容^[2]和信号完整性的方法.传统微波近场探头的最小尺寸只能达到 $100\mu\text{m}$,这对于纳米级芯片的电磁兼容

收稿日期:2019-12-02;修回日期:2020-02-27;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)

测试与诊断是远远不够的. 为了应对这些问题, 基于金刚石氮空位 (NV) 色心的磁测量技术成了近年来量子磁场探测和成像的研究热点. 一方面, NV 色心作为一个独特的量子系统^[3], 其固态单自旋时间在室温下可达毫秒量级, 可用光学共聚焦系统进行初始化和读出. 将 NV 色心磁测量技术和扫描成像技术结合起来, 能够实现高灵敏度和高分辨率的磁成像.

另一方面, 金刚石中的单个氮-空位缺陷电子自旋作为一种量子传感器可以反映出芯片表面的磁场强弱, 分辨率可达纳米级^[4], 具有灵敏度高、原子级别尺寸、荧光稳定、对近场干扰小等优点. 因此, 金刚石 NV 色心十分合适制备成探头进行微波场测量, 以满足微波功率器件和天线等设备测试时在高灵敏度、高分辨率以及非破坏性等方面的要求.

本文基于金刚石 NV 色心的全光量子光学探测磁共振原理, 制备出一种亚微米级的微波近场探头, 设计了非破坏、高灵敏度、高分辨率的微波磁场成像系统. 全文主要内容包括: 全光学微波成像系统及原理, 氮化镓晶体管放大器近场磁测量结果和分析以及总结和展望.

2 实验系统及原理介绍

2.1 实验系统

全光学微波成像系统如图 1 所示, 由光学子系统与微波子系统组成. 光学子系统中, 532nm 绿色激光从激光器发出, 依次通过反射镜、半波片、偏振分光棱镜, 经过透镜聚焦到声光调制器. 由于布拉格衍射效应^[5], 调节声光调制器, 通过光栅滤除其余衍射光, 筛选出一级衍射激光, 再次经过透镜、反射镜到达二向色镜. 二向色镜可以反射绿光, 透射荧光. 此时激光被分为两路, 一路打在锥形光纤尖端的金刚石 NV 色心上, 一路则是金刚石 NV 色心发出的荧光经过物镜, 透射过二向色镜, 聚焦在雪崩光电二极管的晶体上. 在微波子系统中, 微波源工作在软件触发模式下, 输出功率设置为 12dBm. 通过 labview 虚拟仪器平台来控制微波源的输出频率及其调制参数. 微波开关用于调制连续微波并输出脉冲微波.

本系统通过 TTL 板卡产生三路脉冲信号, 其中两路脉冲信号用来控制激光、微波同步, 并对微波信号进行调制, 另外一路脉冲作为参考信号输入致锁相放大器解调.

2.2 实验步骤及原理

将提前准备好的金刚石颗粒均匀撒在载玻片上, 由于拉锥处理后的光纤尖端内径大约为 $20\mu\text{m}$, 为了保证耦合效率同时获得较高的分辨率, 通过光学相机选取了一颗直径为 $14\mu\text{m}$ 的金刚石样品. 用准备好的光纤锥形尖端沾一些紫外胶将选好的金刚石样品沾上, 紫

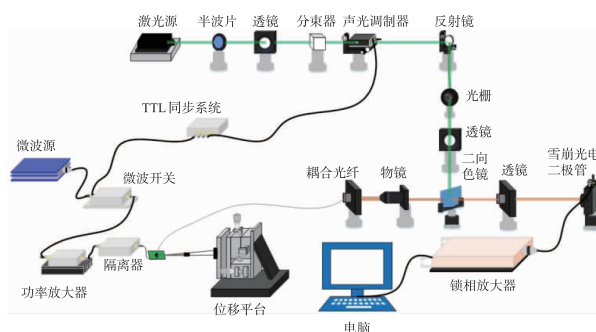


图1 全光学微波成像系统

外线灯照射后固化. 制备完成的样品(图 2)通过激光与光纤耦合的方式接入光路, 用光纤支架将其固定在光学平台上. 待测芯片固定于电动位移平台, 置于金刚石样品下方. 调节电动位移平台, 同时在显微镜中观察探头与芯片表面的相对位置, 使金刚石样品十分贴近待测芯片表面.

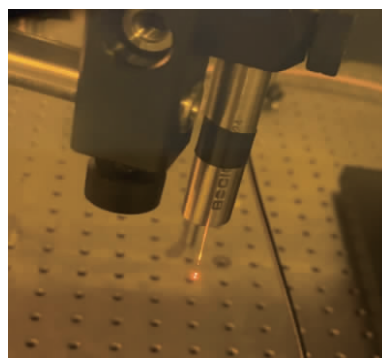


图2 固定在支架上的金刚石探针

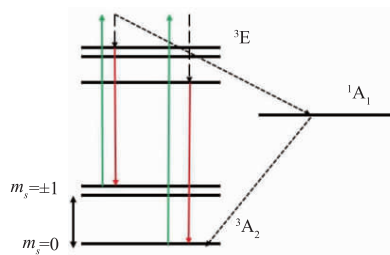


图3 能级结构

氮-空位色心, 即 NV 色心, 是由于金刚石晶格中一个碳原子被氮原子取代, 且其相邻的一个碳原子缺失, 形成光致发光点缺陷. 带负电荷的 NV 色心称为 NV^- , 在室温条件下单自旋相干时间可达毫秒量级, 故可用光学共聚焦系统进行初始化和读出. 能级结构如图 3 所示, 三重态的激发态和基态分别是 ${}^3\text{E}$ 和 ${}^3\text{A}_2$, ${}^1\text{A}_1$ 则是单态基态^[6]. 在自旋与自旋之间的相互作用下, 室温下 NV 色心的基态在磁量子数 $m_s = 0$ 与 $m_s = \pm 1$ 之间有 2.87 GHz 的零场分裂. 当外部磁场作用于 NV 色心时, 由于塞曼效应^[7], $m_s = |\pm 1\rangle$ 能级进一步分裂成 $m_s = 1$

$+1 >$ 态和 $m_s = |-1 >$ 态,可以观察到 ODMR 谱上共振峰值之间的距离增大.通过调整外部磁场与四个晶体 NV 轴的相对方向,根据光学探测磁共振 (ODMR) 技术可以观察到基态中全部的八个微波偶极跃迁.通过软件设计 TTL 外部脉冲控制微波频率变化,以 2870MHz 作为中心频率.同样方法设计了另外两路 TTL 脉冲,一路用于调制激光信号,一路作为参考信号,图 4 为三路脉冲信号示意图.

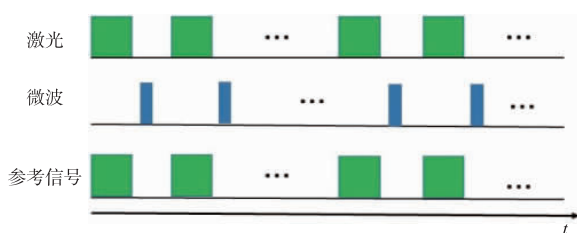


图4 脉冲控制序列

脉冲 ODMR 序列由激光脉冲和微波脉冲交替形成.激光脉冲将 NV 色心的量子态初始化为 $m_s = 0$.紧接着,微波脉冲将 NV 色心的量子态操纵至 $m_s = -1$ 或 $m_s = +1$;下一个激光脉冲通过分析荧光信号读出 NV 色心的量子态,并且将量子态重新初始化为 $m_s = 0$.可以通过调整微波脉冲宽来优化 NV 色心的效率,这就是使用脉冲泵浦的原因.激光与微波交替开的时间分别设置为几百和几十纳秒,对微波源进行幅度调制,调制频率相较于激光脉冲频率比较低,一般设置为 1kHz.在微波作用的情况下,NV 色心 $m_s = |0 >$ 态不能够跃迁到 $m_s = |\pm 1 >$ 态,这时候,会产生最强的荧光.在有微波作用的情况下,连续变化的微波信号作用于金刚石 NV 色心,在共振频率点的荧光信号变弱.这实际上是对最大的荧光强度进行了调幅调制,载波的幅度就是最大的荧光强度,频率就是激光脉冲频率,因此系统的信噪比得到了改善.图 5 为实验所得的 ODMR 谱.

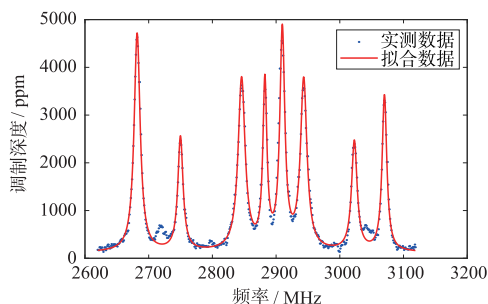


图5 光探测磁共振谱信号

可以通过芯片上每个位置的 Rabi 频谱^[8]测出芯片上每个位置的微波场强.但这种做法需要很长的时间,效率不高.根据 ODMR 谱图中各个峰值频率点之间的劈裂程度,选取 ODMR 谱图中 2859MHz 的频率点,进行

Rabi 序列的扫描.Rabi 频率与微波磁场存在着线性比例关系,可以根据表达式 $\omega_R = \frac{\gamma}{\hbar} BR$ 推导出微波场强,其中 γ 是旋磁比, \hbar 是约化普朗克常数,Rabi 频谱图如图 6 所示.

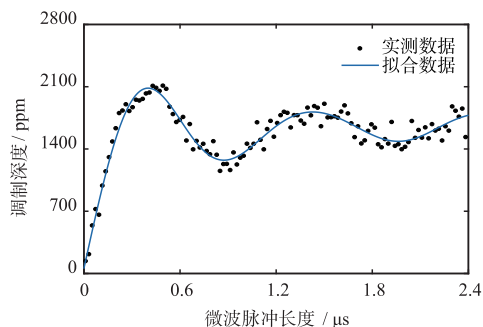


图6 2859MHz频率下的Rabi谱

根据 Rabi 振荡谱图,设置微波作用时间为 20ns,通过软件设置好位移平台,确定描区域,就可以在短时间内获得芯片近场分布图.

3 实验结果

通过扫描成像平台对氮化镓高电子迁移率晶体管放大器表面部分区域进行了成像处理,氮化镓晶体管放大器表面结构图如图 7 所示,红色虚线部分为实际扫描区域,成像结果如图 8 所示.

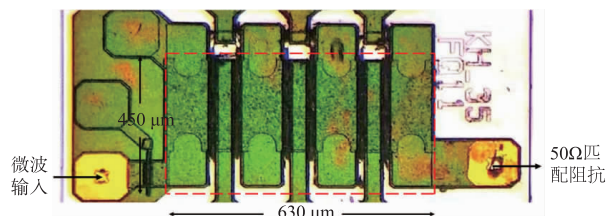


图7 晶体管放大器表面结构

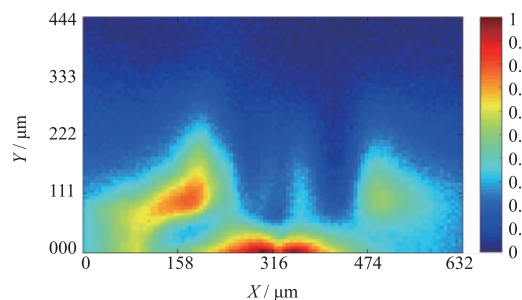


图8 晶体管放大器内部结构成像结果

成像结果图 8 较好地反映出氮化镓晶体管放大器表面微波场强分布,可以看到信号输入一端微波场信号最强,输入端右侧引脚接地,靠近输入端左侧部分微波场信号强于输入端右侧部分微波场信号.放大器输出端我们连接了一个 50Ω 的匹配电阻,靠近输出端的

微波场强比较弱.

4 结论

本次实验利用金刚石氮空位色心作为探头,通过光纤耦合的方式,设计出一种亚微米级探针.成功地搭建出一套非破坏、高灵敏度、高分辨率的微波近场成像系统.对氮化镓高电子迁移率晶体管放大器的主要区域进行了微波成像,验证了本实验系统的可行性.与其他微波功率器件的测试方法相比,本文介绍的实验系统更加直接、高效.本文研究的基于金刚石 NV 色心的全量子光学探测磁共振技术,可以为纳米级芯片提供接近光学衍射极限分辨率的纳米级微波近场成像.这为检测与分析纳米级芯片^[9]的电磁兼容问题提供了一种全新且强有力的工具.

参考文献

- [1] 张金风,郝跃. GaN 高电子迁移率晶体管的研究进展[J]. 电力电子技术,2008,42(12):63-66.
Zhang Jin-feng, Hao Yue. Current research status of gan high electron mobility transistors[J]. Power Electronics, 2008,42(12):63-66. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Karande A D, Heng P W S, Liew C V. In-line quantification of micronized drug and excipients in tablets by near infrared (NIR) spectroscopy: Real time monitoring of tableting process [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2010, 396(1-2):63-74.
- [6] Chen Q, Jiang P, Zhao J. Measurement of total flavone content in snow lotus (*Saussurea involucre*) using near infrared spectroscopy combined with interval PLS and genetic algorithm[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2010, 76(1):50-55.
- [7] 彭世杰,刘颖,马文超,等. 基于金刚石氮-空位色心的精密磁测量[J]. 物理学报, 2018, 67(16):167601-12.
Peng Shijie, Liu Ying, Ma Wenchao, et al. High-resolution magnetometry based on nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(16):167601-12. (in Chinese)
- [8] Acosta V M, Bauch E, Jarmola A, et al. Broadband magnetometry by infrared-absorption detection of nitrogen-vacancy ensembles in diamond [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(17):174104-3.
- [9] 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.

作者简介



姜海峰 男, 1994 年出生, 江苏泰州人, 2017 年在天津职业技术师范大学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, 他目前的研究方向为新一代量子显微成像技术。
E-mail: 1017935063@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, 他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. 他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, 他任日本仙台东北大学高桥实验室的博士后研究员. 他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, 他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. 他目前的研究兴趣包括自旋电子学、磁光谱仪器、纳米尺度磁学和量子微波场成像。
E-mail: duguanxiang@njupt.edu.cn