

文章编号: 2095-4980(2021)05-0901-05

基于金刚石的光纤近场探头和芯片表征

顾邦兴¹, 陈国彬^{1,2}, 王昊¹, 郭志刚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 南京 223865)

摘要: 随着单片微波集成电路(MMIC)集成度和复杂度的提高, 芯片功能模块之间的距离越来越小, 特征线宽越来越窄, 对于分析芯片内部的信号路径和信号的完整性, 能够提供芯片表面高分辨微波场成像显得尤为重要。为了解决准确检测芯片内部结构完整无损的问题, 这项工作采用了一种基于光纤的近场扫描探头的方法, 其中包含氮空位(NV)色心的金刚石颗粒固定在光纤的尖端, 通过搭建光路并接收金刚石 NV 色心的荧光信号, 从而推理出被测芯片的磁场强度。该实验选取一个微波低噪声放大器芯片内部的区域进行扫描成像, 得到了较好的成像结果, 并准确分析出芯片的信号线走势。这些结果为高度集成芯片和滤波器等集成器件的功能和失效分析提供了变革性的方法。

关键词: 单片微波集成电路; 微波场; 金刚石探头; 氮空位色心

中图分类号: TN958

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019519

A fiber based diamond near-field probe and characterization of a chip

GU Bangxing¹, CHEN Guobin^{1,2}, WANG Hao¹, GUO Zhigang¹, DU Guanxiang^{*1}

(1.School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China; 2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Suqian University, Nanjing Jiangsu 223865, China)

Abstract: As the integration and complexity of Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC) increase, the distance among the chip functional modules is getting closer and closer, and the characteristic line width is getting narrower and narrower. For analyzing the signal path and signal integrity inside the chip, it is particularly important to provide high-resolution microwave field imaging of the chip surface. In order to solve the problem of accurately detecting the integrity of the internal structure of the chip, this work uses a fiber based near-field scanning probe method, in which the diamond particle containing the nitrogen vacancy(NV) center is fixed at the tip of the fiber by building the optical path and receiving the fluorescence signal of the diamond NV center, so as to infer the magnetic field strength of the chip under test. In this experiment, an area inside a microwave low-noise amplifier chip is selected for scanning imaging, good imaging results are obtained, and the signal line trend of the chip is accurately analyzed. These results provide a transformative method for the function and failure analysis of integrated devices such as highly integrated chips and filters. It has achieved good test results in application fields such as chip electromagnetic compatibility, integrated antenna near-field characterization and digital circuit signal integrity analysis.

Keywords: Monolithic Microwave Integrated Circuit; microwave field; diamond probe; Nitrogen Vacancy center

单片微波集成电路因具有电路损耗小、噪声低、功率大、频带宽、抗电磁辐射能力强等一系列优点^[1], 而广泛应用于无线通信、军用雷达和全球定位系统等领域, 因此对单片微波集成电路的内部结构进行有效且可靠的测试显得十分重要。一些传统有效的芯片测试方法分为物理和化学方法两类, 物理方法主要采用镭射开盖的方法,

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-03-24

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(NY214136); 江苏省自然科学基金项目(SBK2020041231); 宿迁市产业发展引导资金项目(K201912)

*通信作者: 杜关祥 email:duguanxiang@njupt.edu.cn

烧去芯片的金属外壳,化学方法主要使用发烟硝酸,由于它与金属外壳的反应速率快,而与铜线的反应速率极慢,故采用它腐蚀芯片表面的金属,由此可见,这些方法都会对芯片表面产生一定的破坏,并且操作难度大,精确度不够高。相比之下,非侵入式测试方法即用探头接触芯片表面,可以在不破坏芯片表面的条件下,高效地探测出芯片内部结构的情况。随着芯片设计复杂度与集成度的提高,这就要求测试所需的探头必须足够灵敏,以提供高分辨力的成像来分析芯片内部的信号路径和信号完整性。由于金刚石氮空位色心体积小,能够提供亚微米级的分辨力,并且它属于非金属,对微波场的干扰较小^[2-3],因此采用微米级金刚石氮空位色心作为探头非常合适。实验通过搭建光路,测出锁相接收到的荧光信号大小来表征出芯片的磁场分布情况^[4],有望为芯片失效分析、天线近场成像和数字电路信号检测提供良好的解决方案。

本文介绍了 5 μm 金刚石探头的制作流程和光学系统的搭建,详细阐述了测得芯片表面成像的原理和过程,并对 GaAs MMIC 低噪声放大器芯片 656 μm \times 938 μm 大小的区域进行成像,验证该实验方法的理论和可操作性。

1 实验材料、系统与方法

1.1 探头的制备

实验所需探头的制备要在光纤末端烧去涂覆层,拉成锥形,并在锥形尖端处涂上一层紫外胶,在高倍显微镜下,找到载玻片上一个 5 μm 的金刚石,用三维平台移动光纤尖端去靠近金刚石,将其粘到光纤尖端后^[5],需要放到紫外灯下照射 30 min 固化紫外胶,最后使用激光耦合光纤的方法观察是否发出荧光来检查金刚石是否粘在光纤尖端处。

1.2 芯片及其外围电路的设计

本次实验选取在芯谷微电子公司购买的一个低噪声放大器芯片,频率范围覆盖 2.7~3.5 GHz。先根据芯片内部的封装设计芯片外围电路板,接着用导电银胶将芯片水平粘在电路板上,然后用键合机进行引线,再焊好电容和 SMA 接头,便于接线进行测试。

1.3 光学系统的搭建

该实验搭建光路进行成像,光学系统见图 1,该系统由两条光路组成,其中一条光路是采用 532 nm 绿光激光源先经 2 个反射镜调整激光入射角度平行地射入透镜汇聚光线,后经偏振分光棱镜变成线偏振光,通过激光振幅稳定器进行降噪,稳定线偏振光,再经声光调制器发生布拉格衍射,用光阑选择一级衍射光斑,然后经透镜、反射镜到二向色镜反射绿光,透射红光,绿光通过物镜聚焦耦合到光纤上,带有金刚石的光纤尖端固定在三维平台上方方便调整位置,另一边由微波源产生微波脉冲信号经微波开关进行调控接到来待测芯片上,金刚石探头距芯片的高度一般在 1 mm 以内,并放入亥姆霍兹线圈的中心处。另一条光路则是由金刚石氮空位(NV)色心激发的荧光,经光纤、物镜到二向色镜上透射出红光,接着聚焦到硅雪崩光电探测器上,通过锁相放大器接收荧光信号。

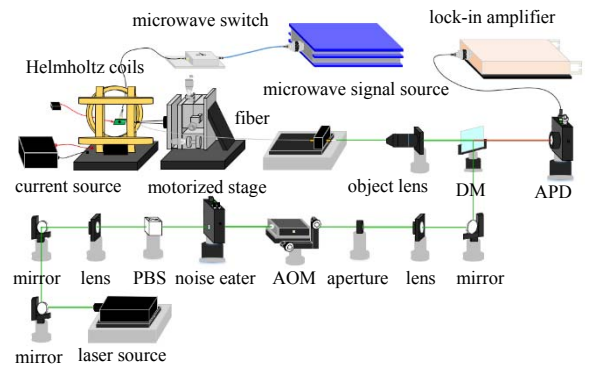


Fig.1 Diagram of optical system
图 1 光学系统图

1.4 芯片成像的原理和方法

NV 色心是金刚石中的一种发光点缺陷,它由一个替代碳原子的氮原子和临近位的空穴组成^[6-8]。在室温下金刚石 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^[9-11],在外加均匀偏置静态磁场的作用下,金刚石 NV 色心会发生塞曼效应^[12-13],即在光学检测磁共振(Optically Detected Magnetic Resonance, ODMR)光谱上呈现出以 2.87 GHz 为中心频率劈裂出 8 个共振峰的现象,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^[14-15]。实验中以亥姆霍兹线圈加电流的方式外加垂直磁场^[16],并通过分析磁场对 8 个共振峰的影响来求解线性方程,可以快速测量金刚石 NV 轴的方向^[17],将 NV 色心的 4 个 NV 轴中的一个轴转向与磁场方向一致,此时与磁场方向一致的轴对应的 ODMR 峰值强度达到最高,并向左右两侧劈开,其他 3 个 NV 轴上的峰重合在一起,测得的 ODMR 见图 2,并通过 MATLAB 拟合函数将离散的数据点连接成曲线。

实验选取 ODMR 在 2 929 MHz 这个共振峰通过锁相放大器读取芯片表面磁场最强处的拉比(Rabi)振荡, 并采用式(1)进行拟合, 测量和拟合结果见图 3。

$$V = V_0 - V_1 \sin(2\pi\gamma B_{MW}t) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

式中: V 为载波频率处的荧光强度; V_0 为边带频率处的荧光强度; V_1 为调制频率处的荧光强度; γ 为旋磁比; B_{MW} 为微波磁场; t 为微波脉冲时间; τ 为退相位时间^[18-19]。

当式(1)满足 $t \rightarrow 0^+$ 的条件时, 可近似为:

$$V = V_0 - V_1 2\pi\gamma B_{MW}t \quad (2)$$

此时, 荧光强度与微波磁场成线性关系, 又根据式(3)可以推断出 Rabi 频率与微波磁场成线性关系^[20]。

$$\hbar\Omega_R = 2\pi\gamma B_{MW} \quad (3)$$

式中: \hbar 为普朗克常量; Ω_R 为 Rabi 频率。

综合式(2)和式(3), 在微波脉冲时间极短的条件下, 可以得出荧光强度 V 与微波磁场 B_{MW} 成线性关系的结论。虽然通过扫描芯片每一个位置的 Rabi 可以得到对应的微波磁场, 但这样做太耗时, 因此在实验过程中, 可以将微波脉冲时间设为 20 ns, 就能快速得到芯片表面的近场分布。

2 结果与分析

实验选取图 4 中一个 GaAs MMIC 低噪声放大器芯片进行成像分析, 它的左侧是输入端, 右侧是输出端, 上方是电源。对芯片 $656 \mu\text{m} \times 938 \mu\text{m}$ 大小的矩形区域进行成像, 扫描步长为 $7.8125 \mu\text{m}$, 金刚石探头距芯片的高度为 $30 \mu\text{m}$, 扫描结果如图 5 所示。

为方便进行成像分析, 将所有电感进行编号。从成像结果中可以清晰地看出, 所有电感上均有信号分布, 其中临近输出端的电感 2 上分布的磁场强度最高, 说明该电感上的信号很强, 而低噪声放大器的功能就是确保将接收的微波信号能够在接收端的最后一级被正确恢复, 并且在放大信号的同时产生尽可能低的噪声和失真。由于电感 2 上的磁场强度太高, 以至于从成像上不能明显地看出其他电感上的磁场分布情况, 因此实验选取电感线圈中心到半径的一段距离进行定量对比分析, 见图 6, 所有电感上的磁场强度在这段距离上都呈下降趋势。

由于这块芯片需要 +5 V 电源进行供电, 所以实验还需对图 4 中位置 6 处的晶体管进行成像分析, 结果见图 7, 成像结果显示, 在晶体管上的磁场强度比较弱, 但在晶体管周围三路信号线上有较强的磁场分布, 因此可以判断出在经过晶体管后有信号出来, 则说明这个晶体管是在正常工作的。

此外, 对于这样的芯片测试结果, 还有不足之处需要加以改进, 比如, 在图 4 中位置 7 处的阻抗调节分支上未能测出明显的磁场强度, 主要原因是其上没有电流通过, 但仍有电荷分布, 因此可以在后续的实验尝试测出其表面的电场强度来进行分析。

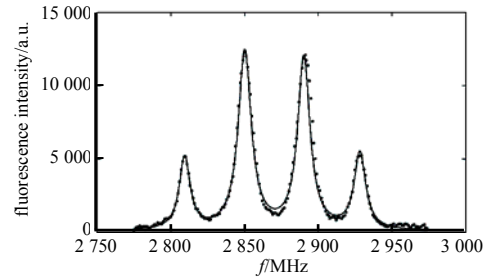


Fig.2 ODMR measurement and fitting curve
图 2 ODMR 测量和拟合曲线

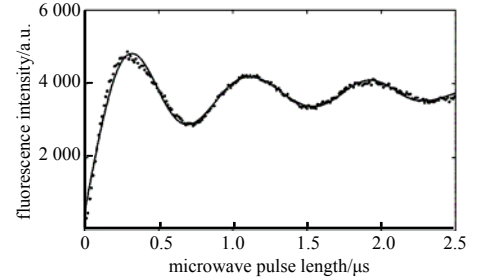


Fig.3 Rabi measurement and fitting curve
图 3 Rabi 测量和拟合曲线

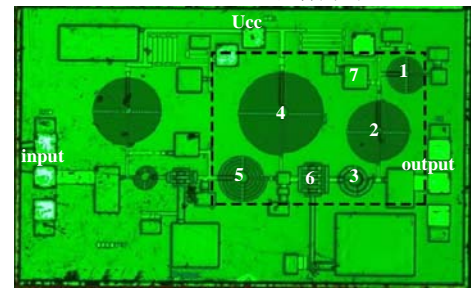


Fig.4 Imaging area of chip
图 4 芯片成像区域

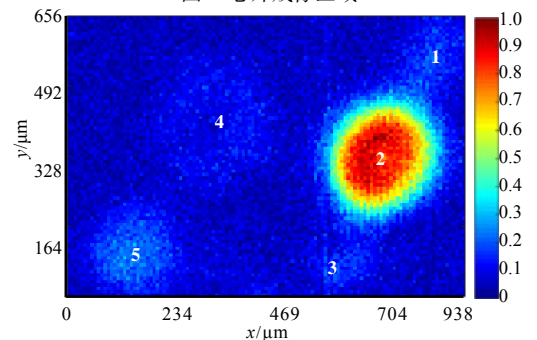


Fig.5 Imaging result of chip
图 5 芯片成像结果

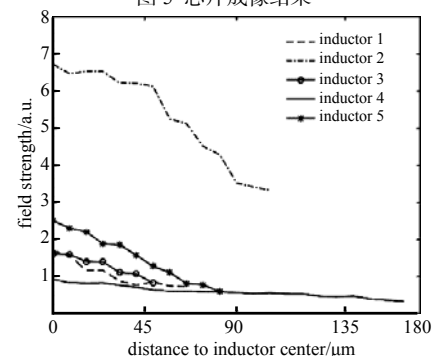


Fig.6 Quantitative comparison of the magnetic field strength of inductors
图 6 电感磁场强度的定量对比

3 结论

采用 $5\ \mu\text{m}$ 金刚石的光纤近场探头对微波低噪放芯片进行成像分析。由于金刚石 NV 色心体积小的优势,得到了高分辨的成像结果,并验证了该方法的理论基础和可行性。从实验中发现,虽然在电感、信号线以及晶体管上能够呈现出比较好的成像结果,并能够准确地判断其功能是否失效,但对于阻抗调节分支则不能通过该方法进行成像分析。为了完善芯片测试的结果,下一步的工作目标是寻找一种具有电场检测能力的金刚石 NV 色心探头,通过探测出其表面的电场强度进行分析,从而有效提高整个成像分析的可靠性与稳定性。

参考文献:

- [1] 孙昕,陈莹,李斌. 26~40 GHz 单片微波集成低噪声放大器研究[J]. 电子技术与软件工程, 2017(9):110-112. (SUN Xin, CHEN Ying, LI Bin. Research on 26-40 GHz Monolithic Microwave Integrated Low Noise Amplifier[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2017(9):110-112.)
- [2] 王成杰,石发展,王鹏飞,等. 基于金刚石 NV 色心的纳米尺度磁场测量和成像技术[J]. 物理学报, 2018,67(13):43-51. (WANG Chengjie, SHI Fazhan, WANG Pengfei, et al. Nano-scale magnetic field measurement and imaging technology based on diamond NV center[J]. Acta Physica Sinica, 2018,67(13):43-51.)
- [3] 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):217-228. (PENG Shijie, LIU Ying, MA Wenchao, et al. Precision magnetic measurement based on diamond nitrogen-vacancy center[J]. Acta Physica Sinica, 2018,67(16):217-228.)
- [4] YANG Bo, DONG Yue, HU Zhenzhong, 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.
- [5] DUAN Dewen, DU Guanxiang, KAVATAMANE Vinaya Kumar, et al. Efficient nitrogen-vacancy centers' fluorescence excitation and collection from micrometer-sized diamond by a tapered optical fiber[J]. Applied Physics Letters, 2019, 113(4):41107-1-41107-5.
- [6] 周飞飞,邢腾腾,陈冰,等. 用于金刚石 NV 色心实验的辐射结构的设计与实现[J]. 量子光学学报, 2019,25(2):197-204. (ZHOU Feifei, XING Tengting, CHEN Bing, et al. Design and implementation of radiation structure for diamond NV center test[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2019,25(2):197-204.)
- [7] 王宇. 金刚石中高浓度 NV 色心的制备和光谱表征[D]. 上海:华东师范大学, 2018. (WANG Yu. Preparation and spectral characterization of high-concentration NV center in diamond[D]. Shanghai, China: East China Normal University, 2018.)
- [8] 王生毅. 金刚石 NV 色心系综制备与表征技术研究[D]. 太原:中北大学, 2018. (WANG Shengyi. Study on preparation and characterization of diamond NV center ensemble[D]. Taiyuan, China: North University of China, 2018.)
- [9] 袁振亨. 基于金刚石氮-空位色心的微波磁矢量场成像[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2016. (YUAN Zhenheng. Microwave magnetic vector field imaging based on diamond Nitrogen-Vacancy center[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2018.)
- [10] BOSS J M, CUJIA K S, ZOPES J, et al. Quantum sensing with arbitrary frequency resolution[J]. Science, 2017,356(6340): 837-840.
- [11] ZHENG Huijie, SUN Zhiyin, CHATZIDROSOS Georgios, et al. Microwave-free vector magnetometry with nitrogen-vacancy centers along a single axis in diamond[J]. Physical Review Applied, 2020,13(4)44023-1-44023-9.
- [12] 李路思,李红蕙,周黎黎,等. 利用金刚石氮-空位色心精确测量弱磁场的探索[J]. 物理学报, 2017,66(23):90-96. (LI Lusi, LI Honghui, ZHOU Lili, et al. Exploration of accurate measurement of weak magnetic field by diamond nitrogen-vacancy center[J]. Acta Physica Sinica, 2017,66(23):90-96.)
- [13] 董杨,杜博,张少春,等. 基于金刚石体系中氮-空位色心的固态量子传感[J]. 物理学报, 2018,67(16):8-26. (DONG Yang, DU Bo, ZHANG Shaochun, et al. Solid-state quantum sensing based on nitrogen-vacancy color centers in diamond systems[J]. Acta Physica Sinica, 2018,67(16):8-26.)
- [14] SHAO Linbo, LIU Ruishan, ZHANG Mian, et al. Wide-field optical microscopy of microwave fields using Nitrogen-Vacancy centers in diamonds[J]. Advanced Optical Materials, 2016,4(7):1075-1080.

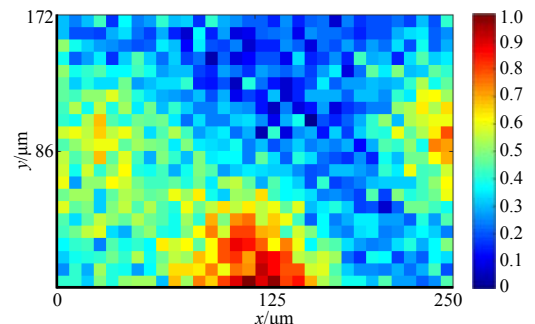


Fig.7 Imaging result of transistor
图 7 晶体管成像结果