

用于集成NV磁强计的高稳定和高灵敏度微波天线

付江豪^{1,2,3}, 任轩辉^{1,2,3}, 杨应杰^{1,2,4}, 侯琛瑜^{1,2,4}, 张庆礼^{1,2,4}, 马宗敏^{1,2,3*}

(1. 中北大学 宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 量子传感与精密测量山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 中北大学 半导体与物理学院, 山西 太原 030051; 4. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

摘要: 设计了一种由氮化铝(AIN)基板制成的环形天线板, 通过沉金技术在其表面沉积了一层金, 旨在将微波磁场有效辐射到金刚石上。AIN天线的谐振频率约为2.87 GHz, 适用于便携式集成氮空位(NV)磁力计。实验结果表明, 与传统的环氧(FR4)天线板相比, 在没有外加磁场的情况下进行光学检测磁共振(ODMR)测量时, 荧光强度增加了2倍, 归一化ODMR信号的带宽减少了33%。稳定性测试进一步表明, AIN天线的稳定性是FR4天线的4倍。此外, 在外加偏置磁场下, AIN天线的灵敏度为 $2.9 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 而FR4天线的灵敏度为 $8.7 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 灵敏度提高了3倍。将AIN天线用于NV集成磁强计中, 大幅缩小磁强计本身体积, 并提高集成传感器系统的性能指标, 从而促进集成的发展。

关键词: 微波天线; 氮化铝基板; FR4天线; 氮空位磁强计

中图分类号: O431.2

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025062

引用格式: 付江豪, 任轩辉, 杨应杰, 等. 用于集成NV磁强计的高稳定和高灵敏度微波天线[J]. 测试技术学报, 2025, 39(5): 592-598.

FU Jianghao, REN Xuanhui, YANG Yingjie, et al. Highly stable and sensitive microwave antenna used for integrated NV magnetometer[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(5): 592-598.

Highly Stable and Sensitive Microwave Antenna Used for Integrated NV Magnetometer

FU Jianghao^{1,2,3}, REN Xuanhui^{1,2,3}, YANG Yingjie^{1,2,4}, HOU Chenyu^{1,2,4},
ZHANG Qingli^{1,2,4}, MA Zongmin^{1,2,3*}

(1. State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies,
North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Lab of Quantum Sensing and Precision Measurement of Shanxi Province, Taiyuan 030051, China;

3. School of Semiconductors and Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: We have designed a circular antenna plate constructed from an aluminum nitride (AIN) substrate, with a layer of gold deposited on its surface by an immersion technique, designed to efficiently radiate microwave magnetic fields onto a diamond. The AIN antenna exhibits a resonant frequency of approxi-

收稿日期: 2024-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3211202); 国家自然科学基金国际合作与交流资助项目(62220106012); 山西省杰出青年基金资助项目(202103021221007); 山西省量子传感与精密测量重点实验室资助项目(201905D121001)

作者简介: 付江豪(2000—), 男, 硕士生, 主要从事量子传感与精密测量研究。E-mail: 2992907893@qq.com.

* **通信作者:** 马宗敏(1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事量子传感与精密测量研究。E-mail: mzmncit@163.com.

mately 2.87 GHz, making it suitable for portable, integrated nitrogen-vacancy (NV) magnetometers. Experimental results demonstrate a two-times increase in fluorescence intensity and a 33 % reduction in the bandwidth of the normalized optically detected magnetic resonance (ODMR) signal, as compared to the conventional epoxy (FR4) antenna plate, when ODMR measurements are conducted in the absence of an applied magnetic field. Stability tests further reveal that the AlN antenna provides four times greater stability than the FR4 antenna. In addition, under an applied bias magnetic field, the sensitivity of the AlN antenna is $2.9 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$, while the sensitivity of the FR4 antenna is $8.7 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$, a three-fold improvement in sensitivity. The use of AlN antennas in NV integrated magnetometers facilitates integration by significantly reducing the size of the magnetometer itself and improving the performance metrics of the integrated sensor system.

Key words: microwave antenna; AlN antenna; FR4 antenna; nitrogen-vacancy magnetometer

0 引言

金刚石量子传感器在导航^[1-2]、电磁^[3-4]和生物^[5-6]等领域的高精度测量中大有可为,因为其具有在室温环境中高精度和高稳定性的优点。微波天线作为氮空位(Nitrogen Vacancy, NV)色心量子传感器中的关键部分,在测量过程中对连续波光学检测磁共振(Continuous Wave-Optically Detected Magnetic Resonance, CW-ODMR)测量、灵敏度等参数有较大影响。如果微波天线设计不合理,会影响NV磁传感器的性能。因此,优化微波天线是提高传感器性能的一项重要工作。

许多研究学者已经为提高系统指标开发了许多微波传输结构。Bayat等^[3]利用双环结构可产生稳定磁场的优势,设计了双环形微波天线结构;Zhang等^[7]为克服天线在测量过程中信噪比低的缺陷,利用电子束蒸发技术设计出一款耦合带状波导天线,使天线激发效率得到了大幅提升;Jia等^[8]利用共面波导技术制作了一款超宽带微波天线,频带带宽可达6~10 GHz;Ma等^[9]设计了一种对共面波导天线的验证测试实验,该天线可以起到将微波磁场和金刚石中的NV色心耦合作用。这些天线板在提高磁场均匀度、微波激发效率等方面起到了一定的积极作用,但上述设计的天线板均采用覆铜板或以环氧(FR4)为材质的印刷电路板,在对金刚石散热以及稳定性方面仍有不足,存在散热性能差、系统灵敏度低、微波传输损耗低、稳定性差的问题,无法满足精密测量需求。

本文设计了一种以氮化铝(AlN)为衬底的环形天线板,采用镀膜的方法在其表面镀一层金,用于将微波磁场有效地辐射到金刚石,并将其应

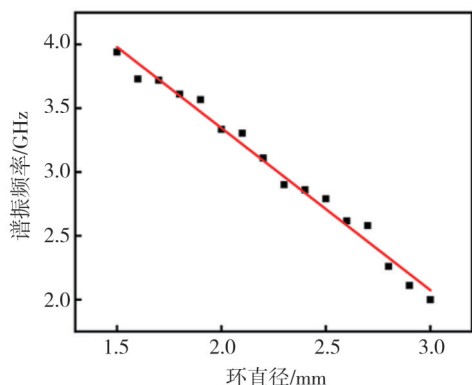
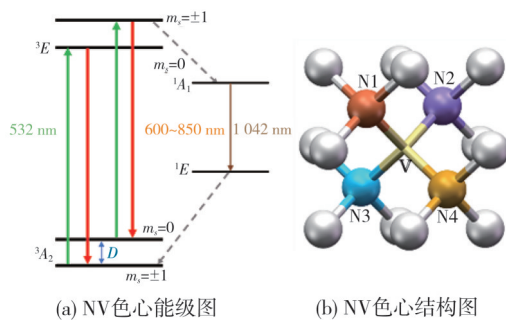
用于便携式集成NV磁强计。实验结果表明,与以往的FR4天线板相比,不仅系统稳定性提高了4倍,而且改善了ODMR信号,系统灵敏度提高了3倍,达到 $2.9 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

1 原理

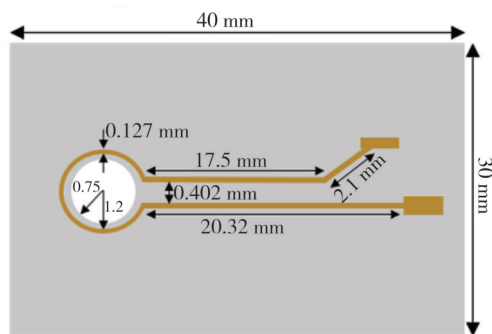
NV色心是金刚石中由N原子取代C原子后与附近的空穴组成的缺陷^[10],NV具有 C_{3v} 对称性^[11],每个金刚石中的NV色心在晶格中都具有4种可能的取向^[4],如图1(b)所示。在金刚石NV色心中,负电荷态在热力学上被认为是最稳定的,因此,主要关注负电荷态的NV中心,因为它具有独特的活性^[12]。

NV色心的负电荷态是自旋缺陷,具有自旋三重态基态和激发态^[13],如图1(a)所示。自旋状态可以被极化并通过ODMR读出。用532 nm激光可以将NV色心极化到 3A_2 基态的 $m_s=0$ 子能级。在 $m_s=\pm 1$ 次能级中,通过系统间交叉非辐射弛豫过程,可能会发生自旋态之间的转变。然后,可以从荧光强度的变化读出NV色心的自旋状态^[14]。利用微波可以将自旋态从 $m_s=0$ 驱动到 $m_s=\pm 1$ 次能级。在室温下基态的零场分裂约为2.87 GHz,但在外加磁场后, $m_s=\pm 1$ 子能级发生塞曼分裂,并在两个不同的频率上形成两个跃迁。分裂能级差与磁场呈线性关系,即 $\Delta f=2\gamma_e B$,其中 Δf 为 $m_s=+1$ 态与 $m_s=-1$ 态之间的能级差, γ_e 为NV色心电子旋磁比,为2.8 MHz/G。从NV色心的能级跃迁过程可知,NV色心自旋极化到基态 $m_s=0$ 通过长时间激光照射便可以实现,且NV色心的自旋态可通过600~850 nm波长的荧光强弱来判断,这是进行磁

场测量与量子调控的重要依据。



(c) 环直径对模拟谐振频率的影响



(d) AlN天线设计参数

图1 NV色心原理图及AlN天线板设计图

Fig. 1 NV centers energy level diagram and AlN antenna board design drawing

2 仿真与分析

在本文研究中,选择使用AlN取代以往FR4材质,主要是因为AlN具有优异的导热性能,热导率为 $321 \text{ W/mk}^{[15]}$,而FR4材料的热导率仅为 0.25 W/mk ,有助于抑制金刚石由于温度波动产生噪声^[16]。与传统的FR4材料相比,AlN在高激光功率下不仅具有更好的热稳定性,还具备与碳化硅(SiC)相当的介电性质^[15],能够有效地传导微波信号。因此,基于传统的FR4天线板,采用3D高频仿真软件(Ansys)对AlN天线板进行了优化

设计。

为了将该天线板更好地与集成磁强计配合,将天线板的基底尺寸固定为 $3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$,同时保证激光穿过天线板的中心孔来激发NV色心产生荧光信号。实验所使用的金刚石大小为 $3.33 \text{ mm} \times 3.26 \text{ mm} \times 1.15 \text{ mm}$,在保证激光穿过中心孔和微波信号充分激发金刚石的基础上,将中心孔的大小设为 1.5 mm ,环形天线的直径大于 1.5 mm 且小于 3 mm 。根据金刚石中NV色心自旋的要求,将天线板的谐振频率设置为 2.87 GHz 。通过将环形天线的直径从 1.5 mm 改变到 3 mm ,谐振频率在 2.02 GHz 和 3.94 GHz 之间变化,如图1(c)所示,发现环形直径为 2.4 mm 时,谐振频率最接近 2.87 GHz 。此外,谐振频率还取决于其他参数,如线宽,线之间间隙的大小。优化后的AlN天线板参数如图1(d)所示。金刚石被精确放置在中心直径为 1.5 mm 的环形天线孔内,微波信号通过传输线传输至金刚石。传输线最初由铜(Cu)材料构成,随后在其表面覆上一层金(Au)接触层,以确保与AlN衬底的良好电气连接。

图2(a)显示了在微波输入功率 1 W 时,中心区域 1.5 mm 孔周围的磁场强度均匀。由于金刚石在天然状态下的零场劈裂 $D \approx 2.87 \text{ GHz}$,通过不断地优化参数,AlN天线板的反射系数(S_{11})参数仿真结果如图2(b)所示,在 2.87 GHz 的谐振峰值处强度为 -28.8 dB 。

图2(c)展示了AlN天线板的实物图片,AlN天线板的尺寸为 $3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$,有4个直径为 3 mm 的圆孔,方便固定在便携式NV集成上。此外,天线板中间有一个直径为 1.5 mm 的孔,使激光通过透镜到达金刚石。特别是天线采用AlN为衬底,在材料硬度、微波传输、热导率、介电常数等方面都有良好的性能。

如图2(d)所示,对AlN天线板进行 S_{11} 测量,其中,红线表示AlN天线板的测量 S_{11} 结果,黑线表示模拟仿真的 S_{11} 结果。结果显示AlN天线实测有两个共振点 2.19 GHz 和 2.93 GHz , S_{11} 分别为 -4.6 dB 和 -25.2 dB 。黑线为AlN仿真的共振峰值为 2.87 GHz , S_{11} 为 -28.8 dB 。所以,AlN天线板的谐振峰值和 S_{11} 的仿真与实验结果之间的差异为 0.06 GHz 和 3.6 dB 。其中实验结果与模拟之间的误差是被允许。

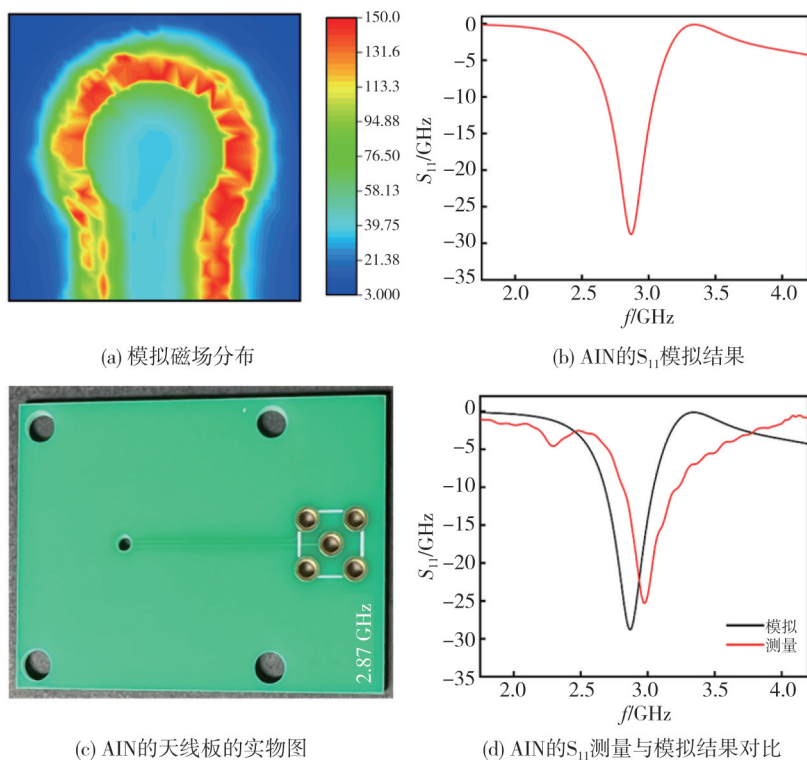


图 2 AlN 天线板的仿真以及 S₁₁ 测试结果图

Fig. 2 Simulation of AlN antenna board and S₁₁ test result chart

3 实验与结果

NV 磁传感器探头结构如图 3 中红色虚线部分所示, 将金刚石、AlN 天线板、滤波片(MEFH10-600LP)、光电探测器(Photodetector PD, 型号: PDB-C609)以及跨组放大电路(Transimpedance Amplifier, TIA)集成在一起。使用最大功率为 100 mW 的激光器(CrystaLaser 532 nm)来激发 NV 色心, 钻石荧光被聚焦到 PD 上。金刚石放置在 AlN 天线板上, 使用 N-BK7 非球面透镜准直激光, 其中荧光波导激发收集结构(Fluorescence Waveguide Excitation Collection, FWEC)^[17] 放置在金刚石之前, 使荧光信号最大可能聚焦到 PD 上。通过 TIA 将电流转换为电压信号传输到锁相放大器(Lock-in Amplifier, LIA)。

为有效减少噪声带来的影响, 采用了调制解调技术, 搭建了如图 3 所示的 CW-ODMR 磁检测装置, 在该装置中, 选用微波源(Keysight N5181B)来生成微波信号, 微波源具备较宽的最大输出频率范围, 其频率跨度为 9 kHz~6 GHz, 而且频率分辨率精度颇高, 可精确到 0.001 Hz。同时, 该微波源还拥有调频(FM)以及调幅(AM)这两项功能, 能够产生微波调制信号, 以此来激发

金刚石。信号的采集与解调工作则是借助 LIA 来完成的, 这里使用 LIA(苏黎世仪器 HF2LI)作为信号采集处理的工具。该锁相放大器的采样率可达 210 Msa/s, 其频率测量范围覆盖了从直流(DC)到 5 MHz 这一区间, 并且集了解调器、频谱分析以及示波器等多样化的功能, 最终可通过上位机将测量信号进行显示。

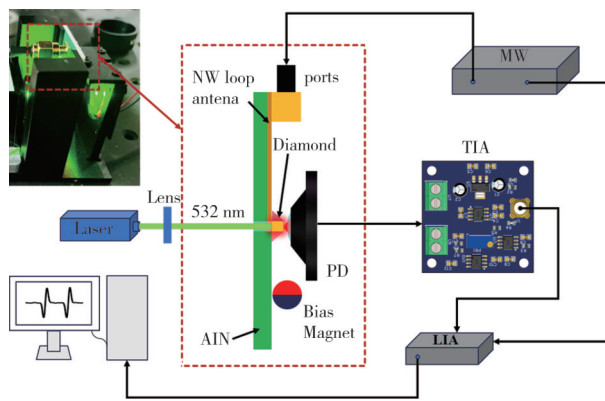


图 3 使用 AlN 天线板的 ODMR 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ODMR experimental setup using AlN antenna plate

采用 CW-ODMR 方法进行磁场测量, 该方法非常适合低频磁场检测, 并且易于使用。采用微波扫描法进行磁场检测, 微波源在 2.8~3 GHz 范围内扫描, 步进设置为 500 kHz/s, 功率设置为

20 dBm。由LIA连续采集TIA输出电压信号,并将ODMR信号显示在上位机界面。在不施加外部磁场的情况下,分别使用AIN线板和FR4天线板测量ODMR光谱,结果如图4(a)所示。对于FR4天线板,归一化的ODMR的平均荧光强度与带宽分别为0.07和15 MHz,相比之下,使用AIN

天线板,归一化的ODMR信号的平均荧光强度与带宽分别为0.14和10 MHz。这比先前的FR4天线板的归一化的ODMR平均荧光强度高2倍,并且带宽低33%。带宽取决于外部磁场的均匀性。在相同的实验条件下,结果表明采用AIN天线板的NV中心激发效率高于采用FR4天线板。

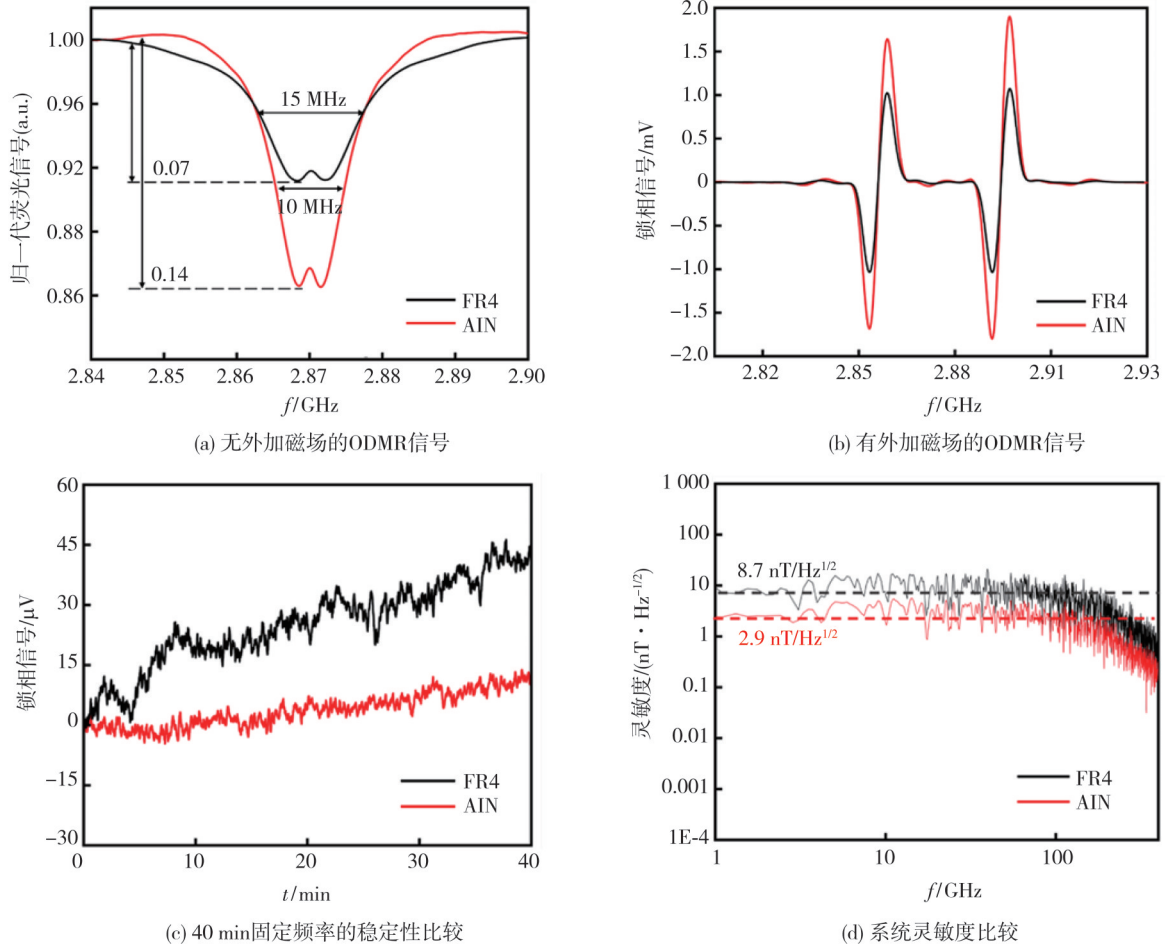


图4 AIN天线板与FR4天线板性能对比

Fig. 4 Comparison of performance of AIN antenna boards and FR4 antenna boards

为减少环境噪声的影响,在CW-ODMR磁检测方法的基础上,采用微波调频技术抑制低频噪声,提高系统的信噪比。微波源配有频率调制功能,可从同一信号通道产生两个相同频率的载波信号。一个信号用于调制微波信号,而另一个信号连接LIA作为解调的参考信号。微波的调制频率可以表示为 $f_{MW} = f_c + f_{dev} \cos 2\pi f_{mod} t$,其中, f_c 为微波中心频率, f_{mod} 为调制频率, f_{dev} 为调制深度。调制后的微波呈现振荡形式,并且当其作用于NV色心时,由NV色心产生的荧光信号也呈现相同的振荡频率。使用LIA对荧光信号进行滤波和解调能够获得ODMR谱线的一阶微分形式。采用小型永久Ne-Fe-B磁体作为偏置场,通过3D打印件

将磁球固定在AIN天线板的侧面。通过对微波信号施加8 MHz的调制频偏,500 Hz的载波信号作用于NV色心,再通过LIA与参考信号进行乘法运算并求得解调分量,得到ODMR信号的解调信号,如图4(b)所示。系统灵敏度可以通过ODMR磁场最大梯度计算^[18]。最大灵敏度可以估计为 $\eta = ASD / \text{Max}(K) * \gamma_e$,其中K为ODMR信号谱的最大梯度,ASD为噪声谱密度。图4(b)中,黑线和红线分别表示AIN天线板和FR4天线板测得ODMR谱。其中,FR4天线板测得ODMR谱幅值为 ± 1 mV,相比之下,使用AIN天线板测得ODMR谱幅值为 ± 1.9 mV,是FR4天线板测得的2倍左右。

在使用调制解调的方法基础上,采用定频的方法来观测 NV 共振点的变化。需要将微波定频在解调信号的零点,对应 ODMR 共振峰处。当外界环境磁场变化、温度变化、微波信号波动都会引起定频位置荧光强度的变化,进而引起解调信号零点的偏移。将微波源的频率设置为 2.857 GHz,通过解调信号零点的偏移来观察系统的稳定性。图 4(c)中,红线和黑线分别代表使用 AlN 天线板和 FR4 天线板在共振点处调制频率 500 Hz 时,进行的 40 min 定点测试。从图中可以看到,FR4 天线板 40 min 从 0 μV 漂移到了 40 μV 左右。相比之下,AlN 天线板 40 min 从 0 μV 漂移到了 10 μV 左右,稳定性提高了 4 倍左右。

灵敏度作为 NV 磁强计的一个重要指标,影响磁强计灵敏度的两个关键因素是 ODMR 峰的梯度和噪声底电平。通过增加梯度,对于特定的场强度,可以看到电压的较大变化,因此仍然可以确定较弱的磁场。通过降低总噪声基底,从磁场信号中辨别噪声所需的信号强度被降低,并且因此可以检测到较弱的磁场。AlN 天线板与 FR4 相比,磁场梯度扩大了 2 倍。由于 AlN 天线板在材料硬度、散热、稳定性、介电性能都远高于 FR4 天线板,其 ASD 比 FR4 稳定甚至更低。根据拟合得到磁场梯度,通过梯度将电压转换成磁场,再通过 LIA 产生一个频谱密度图,其中区域的平均值(1~100 Hz,仅排除 50 Hz 的主峰值)作为灵敏度。如图 4(d)所示,使用 FR4 天线板时,计算得系统灵敏度为 8.7 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$,使用 AlN 天线板时,计算得系统灵敏度为 2.9 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。相比之下,AlN 天线板使得系统灵敏度提高了 3 倍左右。

4 结 语

本文设计优化了一种以 AlN 为衬底的环形天线板用于便携式集成 NV 磁强计。通过 3D 高频仿真软件(Ansys)对磁测强度、均匀性、 S_{11} 进行了优化。将 AlN 天线板和 FR4 天线板分别应用于集成式 NV 磁强计中,在无外加磁场的情况下进行了 ODMR 测量,实验结果表明,归一化 ODMR 信号的荧光强度和带宽分别比现有 FR4 天线板提高了 2 倍和降低了 33%。此外,通过对金刚石施加小型偏置磁场,ODMR 斜率有明显提升,灵敏度达到了 2.9 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$,相比于 FR4 天线板测得灵敏度 8.7 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$,总体提高了 3 倍左右。基于上述优点,AlN 天线板将成为便携式

集成 NV 磁强计的一大助力。

参考文献:

- [1] LENZ J, EDELSTEIN S. Magnetic sensors and their applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 631-649.
- [2] COCHRANE C J, BLACKSBURG J, ANDERS M A, et al. Vectorized magnetometer for space applications using electrical readout of atomic scale defects in silicon carbide[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 37077.
- [3] BAYAT K, CHOY C J, FARROKH BAROUGHI M. Efficient, uniform, and large area microwave magnetic coupling to NV centers in diamond using double split-ring resonators[J]. Nano Letters, 2014, 14(3): 1208-1213.
- [4] DOHERTY M W, MANSON N B, DELANEY P. The nitrogen-vacancy colour centre in diamond[J]. Physics Reports, 2013, 528(1): 1-45.
- [5] WANG T, ZHOU Y, LEI C. Magnetic impedance biosensor: a review[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 90: 418-435.
- [6] DAVIS H C, RAMESH P, BHATNAGAR A. Mapping the microscale origins of magnetic resonance image contrast with subcellular diamond magnetometry[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 131.
- [7] ZHANG C, YUAN H, ZHANG N. Dependence of high density nitrogen-vacancy center ensemble coherence on electron irradiation doses and annealing time[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(50): 505104.
- [8] JIA W, SHI Z, QIN X. Ultra-broadband coplanar waveguide for optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(6): 064705.
- [9] MA Z, ZHENG D, FU Y. Efficient microwave radiation using broadened-bandwidth coplanar waveguide resonator on assembly of nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(5): 050919.
- [10] LOUBSER J H N, WYK J A V. Electron spin resonance in the study of diamond[J]. Reports on Progress in Physics, 1978, 41(8): 1201-1248.
- [11] FUKUI T, DOI Y, MIYAZAKI T. Perfect selective alignment of nitrogen-vacancy center in diamond[J]. Applied Physics Express, 2014, 10(7): 055201.
- [12] HAUF M V, GROTZ B, NAYDENOV B. Chemical control of the charge state of nitrogen-vacancy cen-

- ters in diamond [J]. *Physical Review B*, 2011, 83 (8): 081304.
- [13] MA Y, ROHLFING M, GALI A. Excited states of the negatively charged nitrogen-vacancy color center in diamond [J]. *Physical Review B*, 2010, 81 (4): 041204.
- [14] ACOSTA V M, JARMOLA A, BAUCH E. Optical properties of the nitrogen-vacancy singlet levels in diamond [J]. *Physical Review B*, 2010, 82 (20): 201202.
- [15] WATARI K, ISHIZAKI K, TSUCHIYA F. Phonon scattering and thermal conduction mechanisms of sintered aluminium nitride ceramics [J]. *Journal of Materials Science*, 1993, 28 (14): 3709-3714.
- [16] ACOSTA V M, BAUCH E, LEDBETTER M P. Temperature dependence of the nitrogen-vacancy magnetic resonance in diamond [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104 (7): 070801.
- [17] ZHANG S, MA Z, QIN L. Fluorescence detection using optical waveguide collection device with high efficiency on assembly of nitrogen vacancy centers in diamond [J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11 (1): 013007
- [18] DRÉAU A, LESIK M, RONDIN L. Avoiding power broadening in optically detected magnetic resonance of single NV defects for enhanced dc magnetic field sensitivity [J]. *Physical Review B*, 2011, 84 (19): 195204

(上接第 580 页)

- [26] O'HAGAN A, MURPHY T B, GORMLEY I C, et al. Clustering with the multivariate normal inverse Gaussian distribution [J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2016, 93: 18-30.
- [27] DEMPSTER A P, LAIRD N M, RUBIN D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1977, 39(1): 1-22.
- [28] 荆文君, 张晓琴, 常王华. 一种基于成分数据的修正 EM 算法 [J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34 (5): 485-487.
JING Wenjun, ZHANG Xiaoqin, CHANG Wanghua. A modified EM algorithms based on compositional data [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2013, 34(5):485-487. (in Chinese)
- [29] 孙守思, 邱钧, 桂志国, 等. 重建点模型的 EM 迭代成像 [J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(2): 209-217.
SUN Shousi, QIU Jun, GUI Zhiguo, et al. The EM iterative imaging on the discrete reconstruction points [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2014, 35(2): 209-217. (in Chinese)
- [30] 王志远, 李彩虹, 何安平. 基于 LUT 的 ATPG 算法研究 [J]. *微电子学与计算机*, 2017, 34(4): 44-48.
WANG Zhiyuan, LI Caihong, HE Anping. A study of ATPG based on LUT technology [J]. *Microelectronics & Computer*, 2017, 34(4): 44-48. (in Chinese)

(上接第 591 页)

- [17] HANG W, LI J, LIANG S, et al. FedEEG: Federated EEG decoding via inter-subject structure matching [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE, 2023: 1-5.
- [18] SCHIRRMMEISTER R T, SPRINGENBERG J T, FIEDERER L D J, et al. Deep learning with convolutional neural networks for EEG decoding and visualization [J]. *Human Brain Mapping*, 2017, 38(11): 5391-5420.
- [19] PENG Z, HUANG W, GU S, et al. Conformer: local features coupling global representations for visual recognition [C]//2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2021: 357-366.
- [20] TANGERMANN M, MÜLLER K R, AERTSEN A, et al. Review of the BCI competition IV [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2012, 6: 55.
- [21] BLANKERTZ B, TOMIOKA R, LEMM S, et al. Optimizing spatial filters for robust EEG single-trial analysis [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 25(1): 41-56.