

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.04.009

基于金刚石NV色心集成振动检测模块的设计

陈骊颖^{1,2}, 黄堃^{1*}, 王琪¹, 闫仕农²

(1 中北大学动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;

2 中北大学半导体和物理学院, 山西 太原 030051)

摘要: 原子对磁场的高敏感特性使得金刚石氮空位 (NV) 色心在量子传感领域的使用越来越广泛。为研究金刚石在振动测磁方面的优越性, 使用集成振动模块把传统的共聚焦系统集成在PCB板上以测试振动结果。以圆柱形永磁体作为振动测磁的质量块, 由于外界振动的影响使永磁体与金刚石NV色心的距离产生变化, 因此金刚石NV色心上的磁场强度也会产生变化。对振动效应的检测通过金刚石NV色心上光探测磁共振 (ODMR) 荧光信号的分析来获得。集成振动实验在距离永磁体15 mm范围内对振动效应进行验证, 测试得到基于金刚石氮空位色心振动传感的位移噪声灵敏度为11 nm/Hz^{1/2}。

关键词: 量子光学; 振动检测; 光学检测磁共振; 磁感应

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)04-00500-10

Design of an integrated vibration detection module based on diamond NV color centers

CHEN Liying^{1,2}, HUANG Kun^{1*}, WANG Qi¹, YAN Shinong²

(1 State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2 School of Semiconductors and Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The highly precise sensitivity of atoms to magnetic fields has led to the increasing application of diamond nitrogen vacancy (NV) color centers in the field of quantum sensing. To investigate the superiority of diamond in vibration magnetometry, an integrated vibration module is used to integrate a conventional confocal system on a PCB board for vibration testing. A cylindrical permanent magnet is used as the mass block for vibration magnetometry. Due to the influence of external vibrations, the distance between the permanent magnet and the diamond NV color center will change, so the magnetic field intensity on the diamond NV color center will also change. The detection of the vibration effect is obtained by analyzing the light-detected magnetic resonance (ODMR) fluorescence signal of diamond NV color core. Integrated vibration experiments are performed to validate the vibration effect at a

基金项目: 山西高校创新项目 (2019L0518)

作者简介: 陈骊颖 (1997 -), 女, 湖南株洲人, 研究生, 主要从事量子缺陷的振动检测方面的研究。E-mail: 2675202114@qq.com

导师简介: 闫仕农 (1963 -), 山西太原人, 博士, 副教授, 主要从事纳米材料的光学性能及应用光学方面的研究。E-mail: yanshinong@nuc.edu.cn

收稿日期: 2022-10-09; 修改日期: 2022-11-07

通信作者: E-mail: 1548186950@qq.com

distance of 15 mm from the permanent magnet, and the sensitivity of the displacement noise based on the vibration sensing of diamond nitrogen vacancy color core is tested to be $11 \text{ nm}/\text{Hz}^{1/2}$.

Key words: quantum optics; vibration detection; optical detection magnetic resonance; magnetic induction

0 引言

近年来, 基于量子技术的传感^[1]和计量学^[2]在学术界引起广泛关注。其中一种基于金刚石中负电荷的氮空位 (NV) 色心的前瞻性量子传感方法代表了从基础研究向商业产品开发的转变, 这些色心具有广泛的动态范围、较高的空间分辨率和在室温下的高磁灵敏度。此外, 该技术还可用于测量温度^[3]、电场^[4]、磁场^[5]和压力^[6]等。

磁场由 NV 色心的电子自旋观察到的塞曼效应感知, 其自旋状态可以通过光学启动、微波控制和具有较长相干时间的光学读出, 其中许多相互依赖的因素会限制 NV 集成潜在的传感器性能, 导致难以优化其性能。由于金刚石具有高折射率, 需要开发有效的解决方案以提取 NV 色心发射的荧光。而灵敏度则取决于金刚石材料的质量^[7], 如限制自旋相干特性的应变以及材料参数 (包括 NV 浓度^[8]、NV 取向^[9]、NV 电荷状态^[10]、同位素组成^[11]、顺磁性杂质的浓度^[12])。对于 NV 自旋的光学初始化, 必须为高灵敏度的 NV 系综磁强计^[13]设置激发光的光功率、波长、偏振性和均匀性。除了提供足够强和均匀的微波场外, 还需要进一步提供均匀的偏移磁场。最近在 NV 金刚石磁强计方面取得的成果包括: 检测交流磁场^[14], 灵敏度为 $0.9 \text{ pTHz}^{-1/2}$; 记录神经元动作电位^[15], 灵敏度为 $15 \text{ pTHz}^{-1/2}$; 在低频范围内灵敏度为 $0.9 \text{ pTHz}^{-1/2}$ 。NV 色心磁力计具有高灵敏度和广泛的动态范围。然而, 以上结果大多是通过在实验室中大型装置获得的, 而基于 NV 的磁强计的便捷应用需要将传感器组件集成到小型便携式设备上。

机械振动^[16]在遥感卫星、结构健康监测和其他使用原子力显微镜 (AFM) 的技术中发挥着重要作用, 可以通过检测和测量振动信号来确定其属性^[17]。例如, 可以用金刚石 NV 色心作为扫描探针来进行对 NV 的高精度磁性测量实验。本文介绍了各种类型的振动传感器, 包括压电式传感器^[18]、压阻式传感器^[19]和电容式传感器^[20]。这些传感器各有不足之处, 例如压电式微加速度计器件使用的压电材料价格较昂贵且线性度不够好; 压阻式微加速度计灵敏度较低, 不利于测量微小的加速度变化, 并且蠕变和迟滞效应比较明显; 电容式微加速度计易受寄生电磁和电容干扰的影响。

本文研发了一种基于金刚石 NV 色心的集成振动测磁模块。此振动传感器利用 PCB 板对 NV 色心进行光学初始化和部署, 由靠近金刚石的筋膜枪建立的位移检测方案来实现。此集成振动测磁模块包括偏移磁场、振动源、滤波器和 PD 等必要的组件, 装置的灵敏度约为 $11 \text{ nm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

1 工作原理和工作方法

1.1 电子自旋共振原理

金刚石晶格中一个碳原子被氮原子取代, 同时相邻位置又缺少一个碳原子, 从而产生了一个空位, 即 NV 色心, 如图 1 (a) 所示。至今, 已经在 NV 色心中发现两种不同形式的缺陷, 即中性态 NV_0 和负电荷态 NV^- 。光探测磁共振 (ODMR) 信号可以测量 NV^- 自旋的能级跃迁, 而不能测量 NV_0 , 因此下文提到的 NV 色心均指 NV^- 。

常温下, 金刚石NV色心的基态可以看成是 3A_2 的自旋三重态, 分别对应 $m_s = 0, +1, -1$ 态, 如图1(b)所示。在未成对的两个电子的磁偶极子相互作用下, $m_s = \pm 1$ 和 $m_s = 0$ 之间存在零场分裂常数 $D \approx 2.87$ GHz的零场劈裂, 其中 $m_s = \pm 1$ 态在无外界磁场影响情况下被称为简并态, 简并态在光探测磁共振光谱中仅有一个共振谷出现。在受到外界环境磁场影响下, $m_s = -1$ 和 $m_s = +1$ 之间会发生退简并, 会导致光探测磁共振光谱中出现两个共振谷。当外界施加的磁场方向与金刚石NV色心轴线方向一致时会产生共振频率 ω , 可表示为

$$\omega = D \pm g\mu_B B, \quad (1)$$

式中: 朗德因子 $g = 2$, 玻尔磁子 $\mu_B = 1.4 \times 10^{-4}$ MHz/T, B 为磁感应强度。

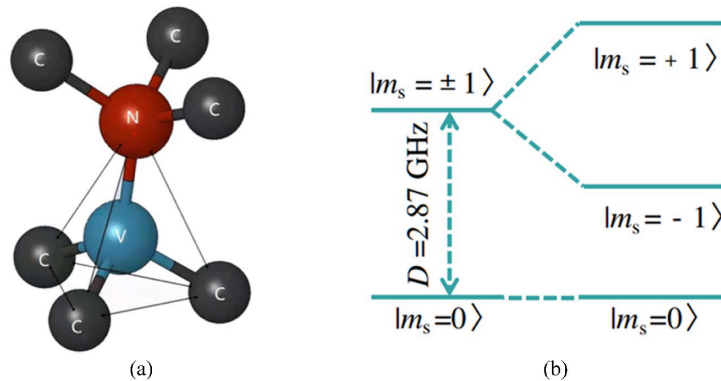


图1 (a) NV色心结构; (b) NV色心的能级结构和跃迁机制

Fig. 1 (a) NV core structure; (b) Energy level structure and transition mechanism of NV core

1.2 振动检测原理

振动检测利用了金刚石NV色心的电子自旋对磁场的高灵敏度特性。NV色心的磁灵敏度会影响金刚石能量水平, 从而导致NV色心的变化, ODMR光谱也会发生变化, 如图2所示, ODMR光谱直接反映了荧光强度的周期性变化。之后, ODMR信号可用于检测共振峰的移动, 通过ODMR信号计算筋膜枪频率和振幅, 并进行振动检测。振动检测装置包括一个集成磁强计电路模块、一个磁铁和一个筋膜枪。筋膜枪与磁铁相连, 当筋膜枪振动时磁铁和金刚石之间的位移被调制, 并由振动传递的动态磁信号调制荧光强度。

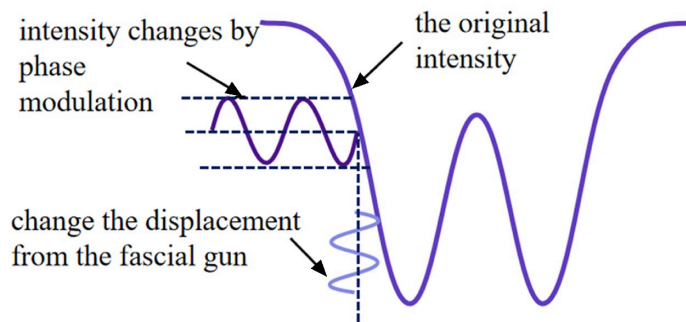


图2 相位调制技术引起的荧光强度变化

Fig. 2 Fluorescence intensity change induced by the phase-modulation technique

2 设计和实验装置

2.1 永磁体的设计与分析

亥姆霍兹线圈、永磁体等常规磁体结构周围磁场成梯度场分布。以圆柱形永磁体下表面圆心为原点建

立坐标系, 如图 3 所示, 此圆柱形永磁体的材料为 N35 烧结钕铁硼, 沿轴线方向均匀磁化, 测量得到永磁体直径 $r = 20 \times 10^{-3} \text{ m}$, 高度 $h = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$, 磁化强度 $M = 0.1229 \text{ T}$ 。由于对称性, 在圆柱中心轴线 (z 轴) 上的点只受到 z 轴方向磁场强度分量的作用, 其他方向相互抵消。 z 轴上任意一点 P 的磁场强度 H 可以由 z 轴方向的磁场强度分量 H_z 表示为

$$H_z = \frac{M}{4\pi} \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{r[r - \rho \cos(\varphi - \varphi_0)]}{[\rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos(\varphi - \varphi_0) + (z - z_0)^2]^{3/2}} d\varphi_0 dz_0, \quad (2)$$

式中: (ρ, φ, z) 为任意一点 P 的柱坐标, z_0 为圆柱厚度, φ_0 为圆柱侧表面上从 z 轴正方向来看自 x 轴逆时针旋转到指定位置的角度。

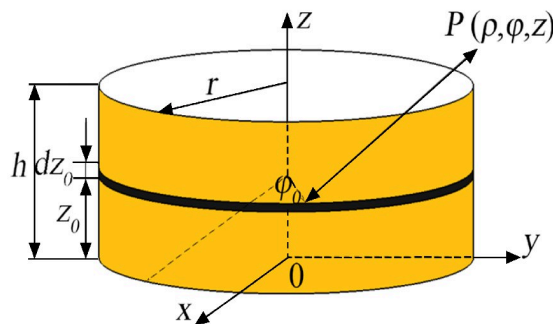


图 3 永磁体示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the permanent magnet

实验中, 利用 Matlab 软件对 (2) 式进行仿真分析, 结果如图 4 所示。由于是均匀磁化, $B = H/\mu_0$, 其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 为真空磁导率。

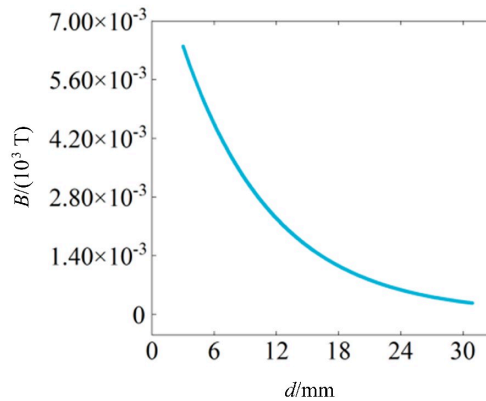


图 4 z 轴上的磁场强度仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of the magnetic field strength along z -axis

由图 4 可知, 在距离永磁体轴线方向 15 mm 内存在显著的磁场强度线性区域, 在进行振动测试前用高斯计对永磁体磁场进行测试, 从而获得较大的磁场强度梯度。测试中, 通过位移调节台将高斯计探头沿永磁体轴线移动, 记录所在位置 d 与高斯计所测试的磁场强度 B , 测试结果如图 5 所示。

线性拟合分析表明, 沿永磁体轴线方向 4~12 mm 范围内的磁场强度梯度为 $dB/dz = -15.74 \times 10^{-4} \text{ T/mm}$, 线性相关系数为 0.99。因此可以将此范围内的磁场强度视为线性变化, 沿轴线上某一位置 z 与磁场强度 B

的关系拟合直线方程为

$$B = -15.73924z + 77.8394. \quad (3)$$

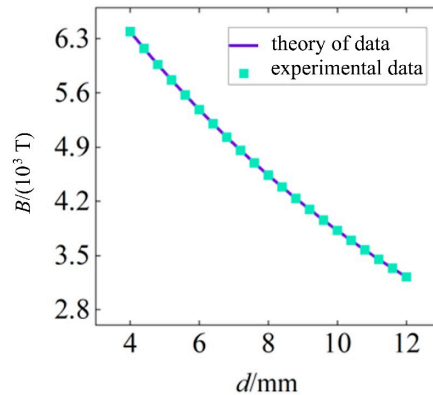


图5 沿z轴的实测磁场强度变化

Fig. 5 Measured magnetic field intensity changes along z-axis

2.2 实验装置

本研究利用PCB电路板来集成组件,如图6所示。组件包括金刚石层、微波天线层、滤光片、信号放大器 and 光电二极管。实验中的NV样品是从元素6公司购买的取向为[001]的单晶金刚石,其发射波长为637~800 nm的荧光,经过滤片滤除荧光中的残余激光后,最后由光电探测器检测荧光强度信号,最终发送到计算机上。微波是由微波源(型号Ceyear, 1465)产生,其作用是区分共振频率($m_s = \pm 1$),并通过微波天线传输至金刚石。

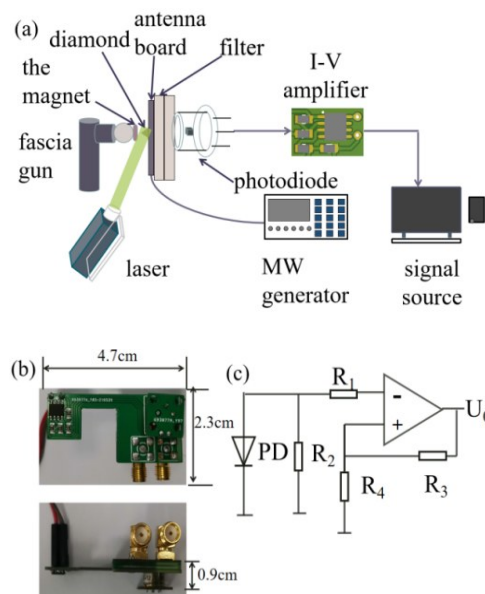


图6 (a) 振动检测系统示意图; (b) 器件实物图; (c) IV放大器示意图

Fig. 6 (a) Schematic diagram of the vibration detection system; (b) Photo of the device;

(c) Schematic diagram of the IV amplifier

在器件测试过程中,微波对放大电路存在干扰,把从天线环到运算放大器的距离定义为干扰距离。辐射功率为64 mW的微波发生器和放大电路的距离在一定范围内会存在微波辐射。因此微波辐射对电信号的

干扰难以避免。为了解决微波对放大电路造成的干扰, 本研究在设计电路板时放置接地铜环, 以减少微波辐射的范围。

3 测试和分析

3.1 静态 ODMR 曲线实验分析

在开始阶段, 将微波频率设置为扫描模式 (从 2.7 GHz 到 3.1 GHz), 微波输出的恒定功率为 18 dBm。在实验过程中, 磁铁与金刚石样品之间的距离 d 以 2 mm 的间隔递增, 由最初的 4 mm 依次增加到 12 mm, 包含在磁铁的线性范围内。相应的 ODMR 测量结果如图 7 所示, 随着磁场强度的增加, 谱线从位置 a 到位置 e , 磁场强度的连续增加导致塞曼分裂频率增加。

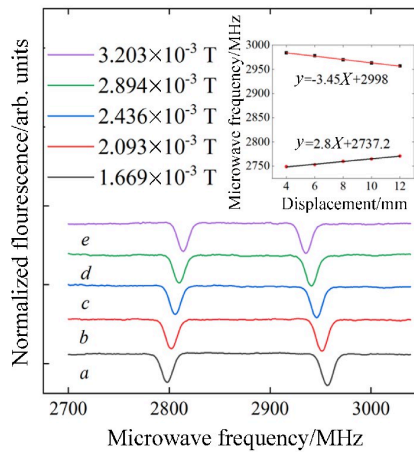


图 7 不同磁场强度下的 ESR 荧光光谱

Fig. 7 ESR fluorescence spectra at different magnetic field intensity

图 7 所示的 ODMR 信号有两个明显的共振峰, 位于 NV 色心的能级分裂状态下, NV 系综的最大自旋极化 ($m_s = \pm 1$) 会影响 ODMR 信号的最小值, 随后记录每条曲线的共振频率及其对应位置。随着磁铁的运动, $|+1\rangle$ 亚级共振频率单调减小, $|-1\rangle$ 亚级共振频率单调增大, 存在两个自旋极化亚级。线性拟合的斜率表示共振峰值跃迁 ($\delta f / \delta z$) 的响应, $\delta f / \delta z$ 的 $|+1\rangle$ 子级的响应为 3.45 MHz/mm, $\delta f / \delta z$ 的 $|-1\rangle$ 子级的响应为 2.8 MHz/mm。

3.2 振动检测与分析

实验使用筋膜枪作为振动信号源, 永磁体固定在筋膜枪按摩头上, 筋膜枪振动源的质量增加造成振动信号源的频率略低。

采集卡的采样率设定为 10^8 Hz, 采样点数也设置为 10^8 。振动波形如图 8 (a)~(c) 所示, 每次在连续得到 3500、2900、2200 个数后取平均值, 即可得到三条曲线, 它们既表示不同的标准偏差也表示系统对位移的分辨率, 可以通过曲线的宽度表示不同的标准偏差。

微波振动范围可表示为

$$A = \frac{D\Delta PL_2}{\Delta PL_1}, \tag{4}$$

式中: A 为振动范围, D 为静态试验位移范围, ΔPL_1 为静态荧光范围, ΔPL_2 为动态荧光范围。结果表明, 系统的振动范围为 7.10 mm, 振幅为 6.10 mm, 振动频率为 7.06 Hz。

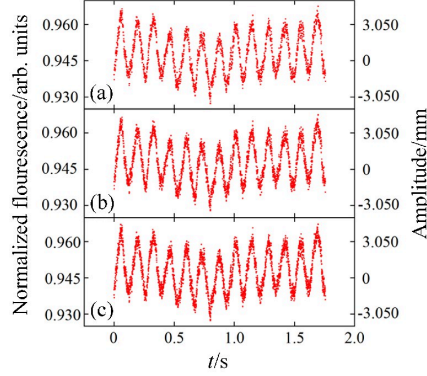


图8 振动波形

Fig. 8 Vibration waveform

3.3 灵敏度计算与分析

当微波频率与金刚石 NV 色心的共振频率接近时, 非极化电子会出现共振吸收现象, 导致荧光强度的相对变化可用于检测位移信号。在曲线共振谷的斜率处

$$\frac{\delta PL}{\delta f} = \frac{\alpha}{\nu}, \quad (5)$$

式中: $\alpha = 8.62\%$ 为共振对比度, $\nu = 14 \text{ MHz}$ 为 ODMR 信号的半峰全宽 (FWHM)。根据 (5) 式, α/ν 的计算结果为 $0.616\%/ \text{MHz}$ 。

然后, 通过移动磁铁记录出一个频率的 ODMR 信号的荧光强度, 可以获得 PL 位移响应为 $0.796\%/ \text{mm}$ ($|+1\rangle$) 或 $0.867\%/ \text{mm}$ ($|-1\rangle$) 的检测系统, 测量范围可近似表示为 α 除以 PL 位移响应。如图 9 所示, 在 2920 MHz 的微波频率下, 荧光强度随着永磁体的离开而呈现单调增加的趋势, 最后趋于平滑。因此, 当 $|+1\rangle$ 子级共振时的测量范围为 $4 \sim 12 \text{ mm}$, 理论磁灵敏度极限值可表示为

$$S = \frac{1}{g\mu_B} \frac{\nu}{\alpha \sqrt{R}}, \quad (6)$$

式中: $R = P_{f1}/(hc\lambda)$ 为检测到的荧光光子数, $P_{f1} \approx 887.32 \mu\text{W}$ 为通过测试获得的荧光功率, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ 为普朗克常数, $c \approx 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为光速, $\lambda = 670 \text{ nm}$ 为荧光波长。最后计算得出最小磁灵敏度极限为 $0.169 \text{ nT}/ \text{Hz}^{1/2}$ 。

图 10 为测量的位移噪声频谱结果。

最小灵敏度计算过程如下:

$$\eta_B = \delta PL / \frac{\delta PL}{\delta f_{\text{MW}}} / \frac{\delta f_{\text{MW}}}{\delta B} / \frac{\partial B}{\partial d}, \quad (7)$$

$$\delta B = \delta PL / \frac{\delta PL}{\delta f_{\text{MW}}} / \frac{\delta f_{\text{MW}}}{\delta B}, \quad (8)$$

$$\frac{\delta PL}{\delta f_{\text{MW}}} = \alpha / \Delta \nu, \quad (9)$$

$$\frac{\delta f_{\text{MW}}}{\delta B} = \frac{g\mu_B}{\sqrt{3}}, \tag{10}$$

式中: δPL 表示光致发光强度的噪声, f_{MW} 表示微波频率, $\delta PL/\delta f_{\text{MW}}$ 表示 ODMR 信号的半共振斜率, $\partial B/\partial d$ 表示磁线圈随位移的高斯斜率, δB 为一定采样率下的位移分辨率, η_B 为一定采样率下的位移分辨率。位移灵敏度 η 可表示为

$$\eta = \eta_B / \sqrt{f}. \tag{11}$$

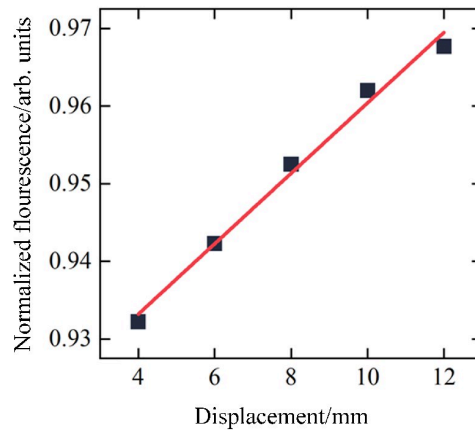


图 9 微波频率在 2920 MHz 的线性范围内, 归一化荧光强度的线性拟合结果

Fig. 9 Linear fitting results of the normalized fluorescence intensity at the microwave frequencies in the linear range of 2920 MHz

采集卡采样率设定为 100000 Hz, 采集卡采集到的荧光强度为 0.1 s。传感器要的是本底噪声, 所以考虑 $1/f$ 噪声的影响, 大约在 1 kHz 时本底噪声会被 $1/f$ 噪声替代。图 10 为经过傅里叶变换计算得出的结果, 系统中噪声的频率分析表明, 在 1 kHz 下位移噪声小于 $11 \text{ nm/Hz}^{1/2}$, 测量灵敏度小于 $0.169 \text{ nT/Hz}^{1/2}$; 随着噪声频率的增加, 噪声限值会从几十 $\text{nm/Hz}^{1/2}$ 降低到 $\text{pm/Hz}^{1/2}$ 。

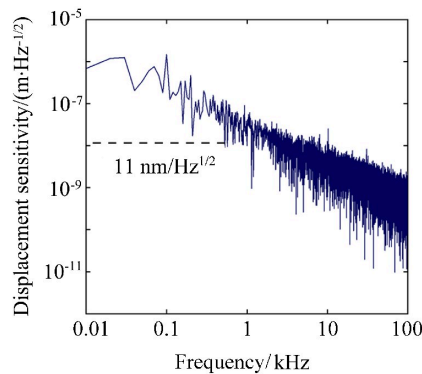


图 10 位移噪声频谱

Fig. 10 The shift noise spectrum

4 结 论

利用电子自旋效应对磁梯度场的高精密敏感特性, 结合了磁梯度场与位移振动之间的关系, 研究了基于金刚石 NV 色心的光探测磁共振、磁敏感机理的集成振动测量方法。实验中首先通过建立电子自旋磁共振与位移振动之间的关系, 设计了一种把共聚焦系统集成在 PCB 电路板的振动方案。相应的位移噪声灵敏度

为 $11 \text{ nm/Hz}^{1/2}$, 振动信号频率为 7.06 Hz , 振幅为 6.10 mm 。此外, 通过优化激光功率的稳定性、光收集效率、NV 色心浓度等实验因素, 可以进一步提高系统的灵敏度。该方法灵敏度高、体积小、结构简易, 为超高灵敏度集成位移振动测量提供了新的研究思路。

参考文献:

- [1] Ariyaratne A, Bluvstein D, Myers B A, *et al.* Nanoscale electrical conductivity imaging using a nitrogen-vacancy center in diamond [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2406.
- [2] Block M, Kobrin B, Jarmola A, *et al.* Optically enhanced electric field sensing using nitrogen-vacancy ensembles [J]. *Physical Review Applied*, 2021, 16 (2): 024024.
- [3] Botsch L, Raatz N, Pezzagna S, *et al.* Vectorial calibration of superconducting magnets with a quantum magnetic sensor [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91 (12) : 125003.
- [4] Bai D, Huynh M H, Simpson D A, *et al.* Fluorescent diamond microparticle doped glass fiber for magnetic field sensing [J]. *APL Materials*, 2020, 8 (8): 081102.
- [5] Barry J F, Schloss J M, Bauch E, *et al.* Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2020, 92: 015004.
- [6] Kempkes M, Zier T, Singer K, *et al.* Ultrafast nonthermal NV center formation in diamond [J]. *Carbon*, 2021, 174: 524-530.
- [7] Li Z H, Wang T Y, Guo Q, *et al.* Enhancement of magnetic detection by ensemble NV color center based on magnetic flux concentration effect [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70 (14): 147601.
- [8] Maayani S, Foy C, Englund D, *et al.* Distributed quantum fiber magnetometry [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13 (7) : 1900075.
- [9] Nizovtsev A P, Pushkarchuk A L, Kilin S Y, *et al.* Hyperfine interactions in the NV- ^{13}C quantum registers in diamond grown from the azaadamantane seed [J]. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 2021, 11 (5): 1303.
- [10] Raman Nair S, Rogers L J, Vidal X, *et al.* Amplification by stimulated emission of nitrogen-vacancy centres in a diamond-loaded fibre cavity [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9 (15): 4505-4518.
- [11] Rubinas O R, Soshenko V V, Bolshedvorskii S V, *et al.* Optimization of the coherence properties of diamond samples with an intermediate concentration of NV centers [J]. *Results in Physics*, 2021, 21: 103845.
- [12] Chen Y L, Li T T, Wang D W, *et al.* A method to improve the stability of NV magnetometer [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2022, 59 (5): 453-457.
陈宇雷, 李铜铜, 王大为, 等. 一种提高NV磁力计稳定性的方法 [J]. 微纳电子技术, 2022, 59 (5): 453-457.
- [13] Chen Y L, Tang J, Guo H, *et al.* Wide-field planar magnetic imaging using spins in diamond [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2019, 18: 1156-1159.
- [14] Eaton S M, Hadden J P, Bharadwaj V, *et al.* Quantum micro-nano devices fabricated in diamond by femtosecond laser and ion irradiation [J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2019, 2 (5/6): 1970033.
- [15] Guo W J, Zheng D D, Wang J Q, *et al.* Sensitivity optimization of quantum-controlled NV color center series synthetic magnetometer [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2020, 57 (1): 54-58, 79.
郭卫军, 郑斗斗, 王军旗, 等. 量子调控型NV色心系综磁强计灵敏度优化 [J]. 微纳电子技术, 2020, 57 (1): 54-58, 79.

- [16] Yuan Q, Gong Z C, Mao T H, *et al.* Experimental investigation of parametric coupling strength control of two vibration modes in a two-mode mechanical system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2021, 38 (4): 454-459.
袁 泉, 龚志成, 毛添华, 等. 两模机械系统中振动模式参量耦合强度调控的实验研究 [J]. 量子电子学报, 2021, 38 (4): 454-459.
- [17] Wang Z H, Zhang W X, Wu Z, *et al.* Research on the forward predictor of minimum mean square error in laser vibrometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49 (5): 54-66.
王之昊, 张文喜, 伍 洲, 等. 激光测振仪中最小均方误差前向预测器的研究 [J]. 光电工程, 2022, 49 (5): 54-66.
- [18] Hoang M L, Pietrosanto A. A new technique on vibration optimization of industrial inclinometer for MEMS accelerometer without sensor fusion [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 20295-20304.
- [19] Huang K, Nie Y L, Liu Y X, *et al.* A proposal for a high-sensitivity optical MEMS accelerometer with a double-mode modulation system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39 (1): 303-309.
- [20] Huang K, Yu M, Cheng L, *et al.* A proposal for an optical MEMS accelerometer with high sensitivity based on wavelength modulation system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37 (21): 5474-5478.