



## 基于磁集聚效应的系综NV色心磁检测增强

李中豪 王天宇 郭琦 郭浩 温焕飞 唐军 刘俊

## Enhancement of magnetic detection by ensemble NV color center based on magnetic flux concentration effect

Li Zhong-Hao Wang Tian-Yu Guo Qi Guo Hao Wen Huan-Fei Tang Jun Liu Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 147601 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210129

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210129>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于金刚石色心自旋磁共振效应的微位移测量方法

A method of measuring micro-displacement based on spin magnetic resonance effect of diamond color center

物理学报. 2018, 67(4): 047601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171914>

#### 利用金刚石氮-空位色心精确测量弱磁场的探索

Measurement of weak static magnetic field with nitrogen-vacancy color center

物理学报. 2017, 66(23): 230601 <https://doi.org/10.7498/aps.66.230601>

#### 固态金刚石氮空位色心光学调控优化

Optimization of optical control of nitrogen vacancy centers in solid diamond

物理学报. 2020, 69(14): 147601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200072>

#### 基于金刚石氮-空位色心自旋系综与超导量子电路混合系统的量子节点纠缠

Entanglement of quantum node based on hybrid system of diamond nitrogen-vacancy center spin ensembles and superconducting quantum circuits

物理学报. 2018, 67(7): 070302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172634>

#### 基于金刚石氮-空位色心的精密磁测量

High-resolution magnetometry based on nitrogen-vacancy centers in diamond

物理学报. 2018, 67(16): 167601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181084>

#### 基于金刚石NV色心的纳米尺度磁场测量和成像技术

Nanoscale magnetic field sensing and imaging based on nitrogen-vacancy center in diamond

物理学报. 2018, 67(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180243>

## 基于磁集聚效应的系综 NV 色心磁检测增强\*

李中豪 王天宇 郭琦 郭浩 温焕飞 唐军† 刘俊‡

(中北大学仪器与电子学院, 太原 030051)

(中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

(中北大学, 量子传感与精密测量山西省重点实验室, 太原 030051)

(2021 年 1 月 20 日收到; 2021 年 3 月 8 日收到修改稿)

高灵敏色心量子自旋磁检测是弱磁、极弱磁检测及成像应用的关键. 本文通过搭建结合磁力线集聚结构 (MFC) 的系综金刚石氮空位 (NV) 色心的宽视场磁分布成像系统, 对系综金刚石 NV 色心磁检测增强进行了系统研究. 首先基于磁力线集聚效应仿真设计并制造了成对的 T 型薄片状 MFC 结构, 利用连续波光探测磁共振 (ODMR) 宽视场磁成像技术对 MFC 的磁增强效果进行验证. 实验测试的 MFC 间距的最小值为 1.0 mm, 此时磁增强倍数约为 10.35, 通过进一步对比不同磁场强度以及不同间距条件下的 MFC 磁增强效果, 验证了 MFC 磁增强效果的有效性, 系统磁检测灵敏度由  $1.10 \text{ nT/Hz}^{1/2}$  提升至  $0.30 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ . 通过进一步对比仿真与测量获得的磁增强倍数与间隙宽度的关系, 可对实验系统的磁增强及灵敏度进行有效估计. 在 MFC 间距为 0.5 mm 时, 对应的磁增强倍数可提升至约 18.21, 磁灵敏度则可达  $0.25 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ . 以上结果表明基于磁集聚效应可以实现系综金刚石氮空位色心磁检测灵敏度的有效提升, 为精密量子测量技术在弱磁、极弱磁检测应用方面提供了参考.

**关键词:** 磁力线集聚结构, 系综金刚石氮空位色心, 连续波光探测磁共振, 磁灵敏度

**PACS:** 76.70.Hb, 85.75.Ss, 42.30.-d, 07.55.Ge

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210129

## 1 引言

弱磁、极弱磁检测成像技术是微纳米材料学、物理学和生命科学等领域应用的基础<sup>[1]</sup>, 是地磁检测<sup>[2]</sup>、脑磁检测<sup>[3]</sup>等实现的关键. 现有的弱磁检测成像技术主要包括超导量子干涉仪 (superconducting quantum interference device, SQUID)、巨磁阻 (giant magnetoresistance, GMR) 传感器等, 其中 SQUID 和 GMR 的高精度检测需要超低温条件<sup>[4]</sup>或加热与磁屏蔽要求<sup>[5]</sup>, 而用于室温检测的巨

磁阻抗<sup>[6]</sup>(giant magneto-impedance, GMI)、磁电<sup>[7]</sup>(magnetoelectric, ME) 传感等能提供的灵敏度较低. 因此需要发展一种能在室温条件下提供高灵敏度测量的磁传感器件.

氮空位 (nitrogen-vacancy, NV) 色心是金刚石中较为常见的一种自旋结构, 由一个氮原子 (N) 和空位 (V) 取代碳 (C) 原子, 根据其荧光电荷态分为  $\text{NV}^0$  和  $\text{NV}^-$ , 本文围绕系综 NV 色心研究展开, 为了表述方便, 本文后续均由 NV 指代  $\text{NV}^-$ . 由于 NV 色心电子自旋对磁场的敏感性, 目前 NV 色心主要用于纳米级的磁场检测<sup>[8,9]</sup>, 较大体积的

\* 国家重大科研仪器设备研制专项 (批准号: 51727808, 61727804)、国家自然科学基金 (批准号: 51635011, 51922009)、山西省应用基础研究计划 (批准号: 201901D111011 (ZD), 201901D211254, 201801D221202, 201801D221213)、山西省重点研发项目 (批准号: 201803D121067)、山西省高等学校科技创新项目 (批准号: 2019L0558)、山西省重点实验室 (批准号: 201905D121001) 和山西省“1331 工程”重点学科计划经费资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tangjun@nuc.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: liuj@nuc.edu.cn

系综金刚石 NV 色心具有较高的色心浓度, 可以实现高灵敏度磁传感检测<sup>[10]</sup>, 目前系综金刚石 NV 色心已经实现微米量级<sup>[11,12]</sup> 磁场成像的技术研究, 但是在实际应用过程中, 系综 NV 色心磁检测磁灵敏度受微波功率和激光功率等多种因素限制<sup>[13]</sup>, 现有研究条件下继续增大微波功率和激光功率已经受到诸多因素的限制. 如何引入新机制进一步提升系综 NV 色心传感器检测灵敏度且不引入额外噪声, 这是目前亟需解决的关键问题.

磁力线集聚结构 (magnetic flux concentrator, MFC) 是一种利用具有磁力线汇聚作用的高磁导率软磁材料制备的对称结构<sup>[14]</sup>. 该结构中央间隙部分可以实现待测磁力线的汇聚, 产生局部磁场增强, 进而将微弱待测磁场转变成较强的汇聚磁场进行检测, 最终实现传感器检测灵敏度的有效提升. 同时, 利用磁通集聚结构增大磁力计灵敏度的方式不会将更多的测量噪声引入到传感器系统中<sup>[15]</sup>. 目前 MFC 已经被用于霍尔传感器<sup>[16]</sup>、磁通门感器<sup>[17]</sup> 和磁隧道结传感器<sup>[18,19]</sup> 等多种传统磁传感检测技术中. 但是, MFC 对于 NV 色心磁检测的灵敏度提升的有效性及其系统研究目前报道相对较少, 同时, 结合室温弱磁、极弱磁检测发展需求, 有必要对 MFC 系统对系综 NV 色心磁检测增强的有效性展开系统研究.

基于以上研究背景, 本文通过搭建结合 MFC 系统的系综金刚石 NV 色心宽场磁检测成像系统, 利用连续波光探测磁共振 (continuous wave optical detection magnetic resonance, CW-ODMR) 宽场成像技术, 验证 MFC 对磁场增强效应的有效性. 通过对比有无 MFC 条件下的 ODMR 曲线变化, 确定 MFC 对待测磁场的磁增强效果, 进一步通过测量不同间距下 MFC 磁增强倍数首先获得实验条件下的最优磁灵敏度, 最后通过对比实验测试和仿真结果, 预计现有 MFC 对实验系统的最优的磁增强效果和可实现的最优磁灵敏度.

## 2 实验原理及装置

### 2.1 实验原理

如图 1(a) 的能级图所示, 金刚石 NV 色心在受到 532 nm 绿色激光照射时, 其能级由基态  $^3A_2$  激发到第一激发态  $^3E$ , 同时也在发生退激发回到基态, 退激发时有两种途径, 其中无辐射的系

统间交叉 (inter-system crossing, ISC) 过程经过中间态  $^1A_1$  和  $^1E$  的过程占比与微波频率有关, 在电子自旋与微波频率共振时荧光强度最弱; 在外磁场条件为零时, ODMR 曲线仅在微波共振频率  $\nu_0 = 2.87$  GHz 附近呈现一个分裂的谐振峰. 以 NV 晶轴为坐标系的  $z$  方向, 并适当地选取  $x$  和  $y$  方向, 则 N-V 色心基态电子自旋的哈密顿量可以表示为<sup>[20]</sup>

$$H = h [DS_z^2 + E(S_x^2 - S_y^2) + g\mu_B \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}], \quad (1)$$

其中  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  J·s 为普朗克常量; 第一项是电子自旋在 N-V 轴方向 ( $z$  方向) 上的零场劈裂,  $D = 2.87$  GHz 为零场分裂常量; 第二项是横向的零场劈裂,  $E$  为离轴零场分裂常量, 在没有外电场和横向应力的情况下  $E = 0$ ,  $S_x$ ,  $S_y$  和  $S_z$  表示 NV 电子的自旋角动量算符, 自旋数为 1; 第三项为静磁场的塞曼项, 可以用来进行外部磁场探测,  $\mathbf{S}$  代表以  $S_x$ ,  $S_y$  和  $S_z$  为分量的矢量,  $g$  是朗德因子,  $\mu_B$  是玻尔磁子. 基于第三项, 可以推出 ODMR 在 N-V 轴方向上的共振频率为

$$\nu_{\pm} = \nu_0 \pm g\mu_B B/h, \quad (2)$$

其中  $\nu_0 = D$  为零磁共振条件下对应的微波频率. 将色心处的磁场调节到与四个轴的最小夹角相同, 即垂直于 (100) 金刚石的立方体晶胞的一个晶面时, NV 色心能级由于塞曼分裂在不同方向 NV 轴上分裂的谐振峰退简并为一对峰. 在外部施加磁场增大强度后每个方向上的谐振峰的分裂也同步增大, ODMR 曲线共振峰的峰值点差值也会增大, 简并后峰值点的频率与磁场方向和 N-V 轴的夹角有关. 此外, 以立方体晶胞的一个顶点为原点, 与之相连的三个边长为  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  轴建立空间坐标系, 施加外磁场  $B_n$  方向沿  $Y$  轴方向时, 如图 1(b) 所示, 在所有 NV 轴的轴向上磁场强度  $\mathbf{B} = B_n \cos\alpha$ , 在产生磁场变化  $\delta B_n$  时, ODMR 曲线在峰值点处的共振频率变化  $\delta\nu$  为

$$\delta\nu = \gamma_e \delta B_n \cos\alpha, \quad (3)$$

$\gamma_e = g\mu_B/h = 2.8$  MHz/Gs ( $1\text{Gs} = 10^{-4}$  T) 是色心的旋磁比,  $\alpha$  为磁场方向与 NV 轴的夹角<sup>[21]</sup>, 这个夹角可求得为  $\tan\alpha = \sqrt{2}$ . (3) 式表明, NV 色心处的共振微波频率变化  $\delta\nu$  与磁场强度变化  $\delta B$  呈正相关关系.

MFC 由高磁导率软磁材料制成, 可用于磁场

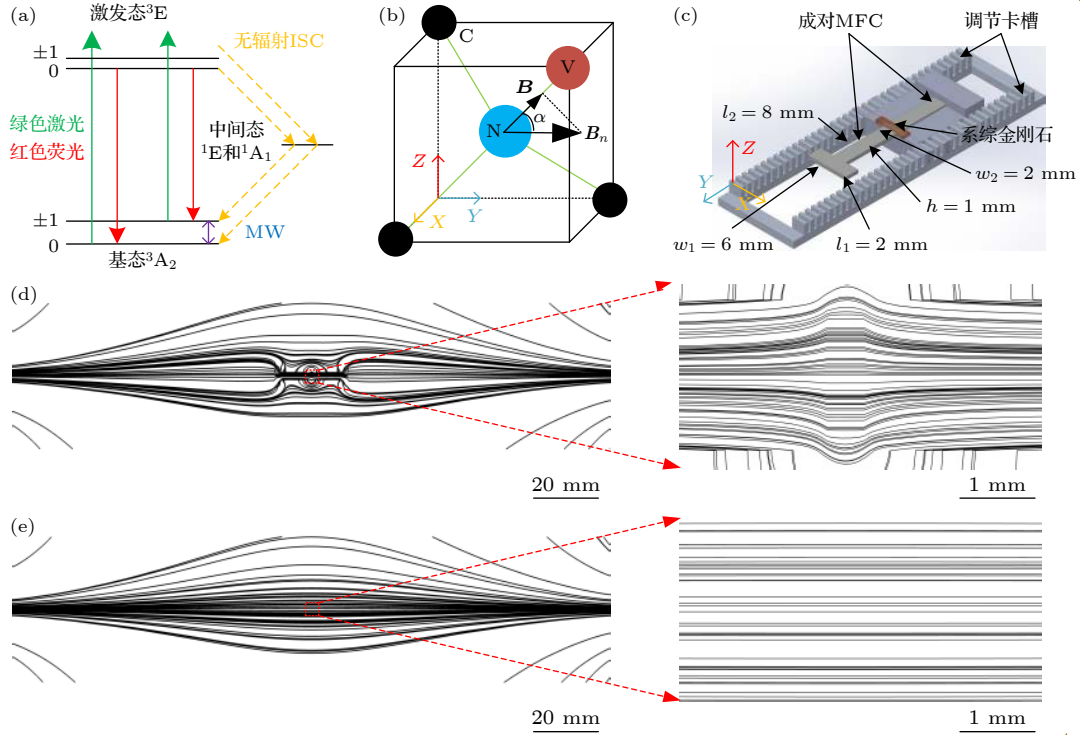


图 1 (a) 金刚石 NV 色心能级跃迁示意图; (b) 沿 (100) 面生长的金刚石晶胞中一种 NV 轴朝向与磁场方向夹角示意图; (c) T 型薄片状 MFC 及调节装置示意图; (d) MFC 间距为 0.5 mm 的两永磁体间磁场仿真流线图; (e) 无 MFC 的两永磁体间磁场仿真流线图  
 Fig. 1. (a) Related energy levels of NV color center in diamond; (b) schematic diagram of the angle between the direction of the magnetic field and the direction of the NV axis in the diamond cell grown along the (100) plane; (c) schematic diagram of the T-shaped flake MFC and adjusting system; (d) simulation of magnetic field streamline diagram with MFC gap width of 0.5 mm between two permanent magnets; (e) simulation of magnetic field streamline diagram without MFC between two permanent magnets.

的增强. 空气中的磁力线在进入 MFC 较大的一端后在其内部顺着 MFC 的形状在较小的一端产生汇聚, 形成磁力线的集聚 [22], 有无 MFC 时永磁体产生磁力线的仿真流线对比如图 1(d) 和图 1(e) 所示. MFC 通常做成小端相对对称结构, 在有外界磁场时其中心处的空气间隙会产生比无 MFC 状态增大的磁场 [23]. 根据已有研究结果可知, T 型 MFC 的磁集聚增强效果最明显 [23,24], 因而选择成对 T 型薄片状 MFC 进行研究. 本文所采用的 T 型 MFC, 其制作材料为 1j79 坡莫合金, 结合使用的实验装置, 实验中所采用的 T 型薄片状 MFC 具体形状尺寸如图 1(c) 所示.

## 2.2 实验装置与仿真建模

图 2(a) 所示为实验装置系统, 由光路系统、宽场显微镜系统、微波系统、磁场系统、同步控制系统和数据处理系统组成. 高浓度的 NV 色心系综样品为 1.0 mm × 4.0 mm × 0.5 mm 的长条形金刚石 (色心浓度约 3 ppm, Element six, (100) 为金刚石生长晶面), 而根据晶胞建立的坐标系由于沿

着金刚石生长面与切削面, 因而在宏观上表现为图 1(c) 所示的以金刚石中心点为原点, Y 轴方向为施加待测磁场与 MFC 的方向.

光路系统将激光器 (MGL-III-532-100 mW, 长春新产业光电技术) 产生的 532 nm 绿色激光经过准直与扩大后射入宽场显微镜系统; 宽场显微镜系统将通过扩束透镜扩大后的激光通过二向色镜经由 20 ×/0.4 的物镜汇聚到金刚石下表面 NV 色心富集层上. 相机成像区域为该样品中心位置处约 0.48 mm × 0.27 mm 区域, 通过调节金刚石位置可将视场边界较宽的一侧与坐标轴 Y 轴方向平行, 较窄一侧与 X 轴平行. 金刚石上方物镜将 532 nm 激光作用于 NV 色心表面, 其有效光斑直径为 0.6 mm, 可完全覆盖成像区域. NV 色心发出的红色荧光由物镜收集后经分束镜, 一束进入到相机 (CS2100M-USB, Thorlabs) 进行成像, 另一束收集至光电探测器上用于相关参数对比较正.

扫频微波由微波源 (SMA 100A, ROHDE & SCHWARZ, 输出功率为 30 dBm) 通过微波天线向成像测量区域提供, 频率范围为 2.7—3.0 GHz,

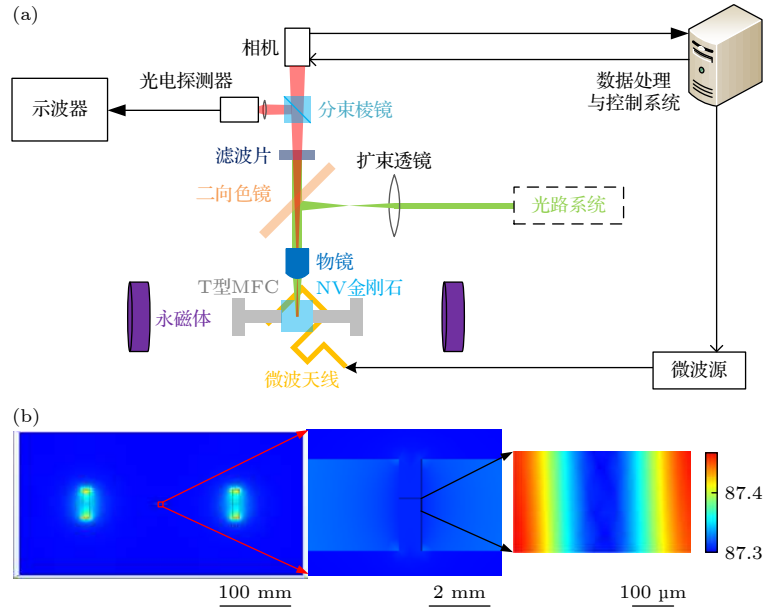


图 2 (a) 实验装置示意图; (b) 用于仿真的几何结构俯视图, 红框为 MFC 间距 0.5 mm 时间隙部分放大示意图, 黑框为视场内的仿真磁场分布图

Fig. 2. (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) top view of the geometric structure used in simulation, the red frame is the enlarged schematic diagram of the gap part when the MFC gap width is 0.5 mm, and the black frame is the simulated magnetic field distribution in the field of view.

步进为 0.15 MHz.

待测磁场由成对圆柱状 ( $\Phi 40 \times 10$  mm) 永磁体结合精密调节架提供, 构成类亥姆霍兹的磁调节系统, 两永磁体轴线正中心为测量位置, 磁体间距约为 200 mm 时, 利用高斯计测量中心位置处的磁场强度约为 5 Gs, 此外还可通过加减永磁铁或改变磁铁间距改变中心位置处磁场强度.

同步控制系统通过控制板卡 (PulseBlasterE-SR-PRO, SpinCore) 将微波扫频步进与相机曝光和图像储存时间根据序列进行循环同步, 相机曝光时间设置为 5 ms, 在图像储存开始的同时, 对微波源提供一个同步的步进触发信号, 单次循环储存时间为 35 ms, 相机每秒采集帧数为 25 FPS, 单次 2000 个循环的完整 ODMR 成像数据采集时间为 80 s. 为了提升测量数据的准确性, 单组数据进行 5 次测量平均.

数据处理系统将相机保存的图片数据根据采集时间逐张提取并保存为一个  $1920 \times 1080 \times 2000$  的三维矩阵, 然后这个三维矩阵经过  $4 \times 4$  个像素点平均为一个像素点后将每个图像像素点处的数值随时间变化的曲线单独保存, 对应的系统分辨率约为  $1 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , 获得的曲线为对应像素位置成像需要的 ODMR 曲线, 如图 3(c) 中的蓝色实线所

示, 通过 MATLAB 算法, 利用双峰 Lorentz 公式进行最小二乘法拟合:

$$f = y_0 + \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^2 \left[ \frac{A\omega}{4(x - x_c)^2 + \omega^2} \right], \quad (4)$$

其中  $y_0$  是 ODMR 曲线中非共振位置处光强度,  $\omega$  是 ODMR 曲线中共振峰的半高全宽,  $x_c$  是曲线上共振峰处对应的峰值点的共振频率, 峰值处对应的荧光强度为  $y_c = y_0 + 2A/(\omega\pi)$ , 根据 ODMR 曲线可确定其两个共振峰的共振频率位置, 然后利用共振频率的差值获得对应磁场强度为

$$B_n = \frac{\Delta F}{2n\gamma_e \cos \alpha} (\Delta x - \Delta x_0), \quad (5)$$

其中,  $\Delta x$  为成像图片中 ODMR 的两个共振频率差值,  $\Delta x_0 \approx 20$  为无待测磁场时的背景频率差值, 如图 3(c) 中的黑线所示, 其对应微波频率约为 3 MHz, 这个零场劈裂由两部分构成<sup>[25]</sup>, 其中一部分由金刚石中未消除的应力产生, 另一部分为小于 2 MHz 的地磁导致;  $\Delta F = 300$  MHz 为输入扫频范围,  $n = 2000$  为一个扫频范围内采集的图片数.

系综 NV 色心磁灵敏度表示为  $\eta \equiv \delta B \sqrt{T}$ <sup>[26]</sup>, 其中  $\delta B$  是最小可检测场强度变化, 在没有经过 MFC 放大时最小可检测场强度由共振频率偏移变化  $\delta\nu$  确定, 对应的磁灵敏度  $\eta$  表示为<sup>[27]</sup>

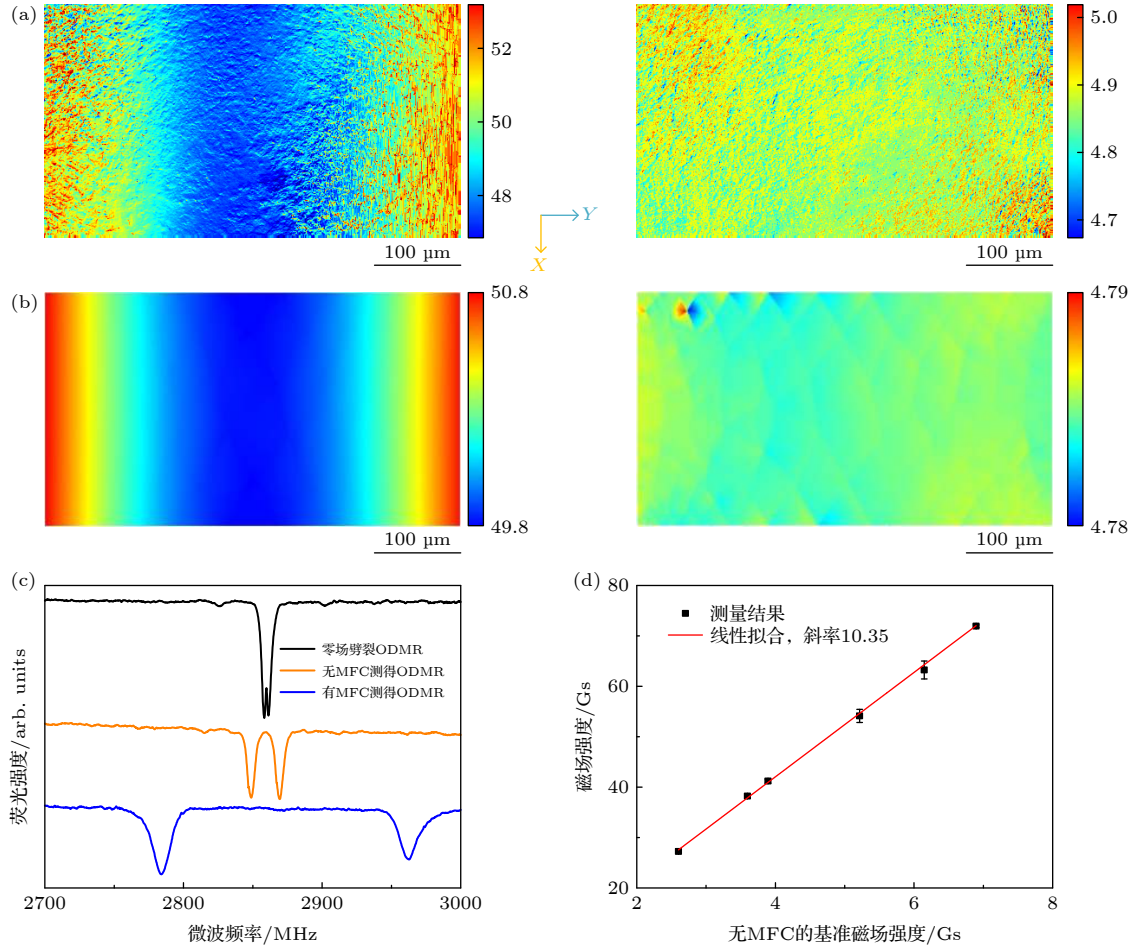


图3 (a) 测量得到的 1.0 mm 间距 MFC 的测量位置磁场分布图(左)与同样位置处无 MFC 磁场分布图(右), 单位 Gs; (b) 仿真得到的图(a)的两个对应图; (c) 三种状态的 ODMR 曲线, 只有背景磁场(黑线)、有待测磁场无 MFC(橙线)、有间距 1.0 mm 的 MFC(蓝线); (d) MFC 间距 1.0 mm 时改变待测磁场强度得到的增强磁场与基准磁场关系

Fig. 3. (a) Simulated magnetic field distribution diagram of the MFCs with a 1.0 mm gap (left) and without MFCs at the same position (right); (b) corresponding photos of panel (a) obtained by measurement; (c) ODMR curves under three conditions: only background magnetic field (black line), magnetic field without MFC (orange line), magnetic field with MFC of 1.0 mm gap (blue line); (d) relationship between the enhanced magnetic field and the reference magnetic field obtained by changing the intensity of the magnetic field to be measured when the MFCs gap is 1.0 mm.

$$\eta = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{\omega}{\gamma_e C \sqrt{R}}, \quad (6)$$

其中  $C$  为 ODMR 共振峰处荧光对比度;  $R$  为实验系统光子速率, 可表示为<sup>[28]</sup>

$$R = \frac{P_{\text{fl}}}{hc/\lambda}, \quad (7)$$

其中  $P_{\text{fl}} \approx 7 \mu\text{W}$  为通过光电探测器标定的红色荧光的功率,  $c \approx 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$  为真空中光速,  $\lambda \approx 670 \text{ nm}$  近似为红色荧光的波长.

加入 MFC 后, 结合 (3) 式, 对应的共振频率偏移  $\delta\nu_{\text{MFC}}$  则改变为

$$\delta\nu_{\text{MFC}} = \delta\nu N = N \times \gamma_e \delta B_n \cos\alpha, \quad (8)$$

其中  $N$  为 MFC 的放大倍数. 则根据 (6) 式可知,

经 MFC 增强后的系统磁灵敏度  $\eta_{\text{MFC}}$  为

$$\eta_{\text{MFC}} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{1}{N \cos\alpha} \frac{\omega}{\gamma_e C \sqrt{R}}. \quad (9)$$

针对在被测磁场被放大的同时, 背景磁场也会被聚磁薄片放大的问题, 可以根据 (5) 式利用该系统分为两种不同情况进行测量, 即只有背景磁场、以及待测磁场加背景磁场, 通过对比测量, 即可获得消除背景作用的待测磁场分布, 进而计算对应的磁检测灵敏度, 消除背景磁场对测量灵敏度的干扰.

在空间轴向处金刚石两侧为两个对称放置的 T 型 MFC, 通过图 1(c) 所示的调节卡槽对 MFC 间距进行调节. 由于金刚石尺寸的限制, 初始间距

设置为 1.0 mm, 然后以 0.5 mm 与 1.0 mm 为间距增量逐步测量不同间距中心位置数据. 在不同 MFC 间距下测量得到 ODMR 曲线, 通过其峰值点差值根据 (5) 式计算得到的磁场  $B_n$ , 最后到最大距离后取下 MFC, 测量得如图 3(c) 中橙线对应的无 MFC 磁场  $B_j$ , 得到 MFC 不同间距的磁场增强效果  $N = B_n/B_j$ .

如图 2(b) 所示, 用 Comsol 软件进行建模以上述同样的尺寸参数建立三维几何模型, 外部为材料为空气的长方体, 两永磁体沿测量轴线 Y 轴正向磁化  $1.8 \times 10^5$  A/m, 对应无 MFC 时轴线正中心位置约为 5 Gs. 根据材料性质, 设定 MFC 材料的相对磁导率为 10000, 无 MFC 时则设定为 1, 不同 MFC 间距时轴线中心位置的磁场强度  $B_{mf}$  与无 MFC 时轴线中心磁场强度  $B_{j}$  的比值即为仿真增强效果  $N_f = B_{mf}/B_{j}$ .

### 3 实验结果与分析讨论

#### 3.1 仿真与验证测量

首先使用宽场磁成像系统, 在间距为 1.0 mm 的成对 MFC 之间的轴线中点位置处进行成像, 磁场成像结果如图 3(b) 所示, 通过成像结果可以找到 Y 轴方向上磁场强度最小的位置, 将其调节到视场中间位置, 这个位置处的磁场方向受 MFC 磁场畸变影响而沿着 Y 轴方向, 且在 X 轴方向分量为零. 此处的磁场方向对应金刚石 NV 轴晶胞处于与四个 NV 轴向夹角相同的方向, 将这个位置得到的 ODMR 曲线作为待测量. 仿真得到的有无 MFC 的磁场分布图的总体分布趋势与测量得到的磁分布趋势如图 3(a) 和图 3(b) 所示, 可以看到, 仿真与测试结果几乎一致.

将 MFC 间距固定为 1.0 mm 时, 通过加减磁铁改变测量位置的磁场强度, 得到了如图 3(d) 所示的固定 MFC 间距为 1.0 mm 时测量位置处磁场强度随基准磁场强度的变化关系, 通过线性拟合得到其斜率约为 10.35, 则对应该间距条件下的磁放大倍数为 10.35, 该结果与仿真获得的磁增强倍数 10.67 几乎是一致的.

#### 3.2 不同 MFC 间距的磁增强测试

通过对不同间距条件下 MFC 间隙中心处成

像, 可以获得 MFC 不同间距条件下总体平均 ODMR 曲线, 如图 4(a) 所示. 可以看到, 随着 MFC 间距的增大, ODMR 曲线的两个峰值点间距随之减小, 即随着 MFC 间距的增加, MFC 磁增强效果逐渐减弱. 由于系统使用的系综金刚石 NV 色心样品尺寸的限制, 实验中所测量的 MFC 最小间距为 1.0 mm. 仿真得到的不同间距的磁场增强倍数如图 4(b) 中蓝圈所示, 而黑色方块为测量得到的磁场增强倍数, 可见测量磁场增强倍数与仿真结果匹配得很好. MFC 磁场增强倍数与间距变化的对应关系可表示为<sup>[29]</sup>

$$y = \frac{1}{a + bx}. \quad (10)$$

利用该模型对测量结果进行拟合, 可以得到:

$$N = 0.401 + \frac{2.493}{0.019 + 0.242\text{gap}}. \quad (11)$$

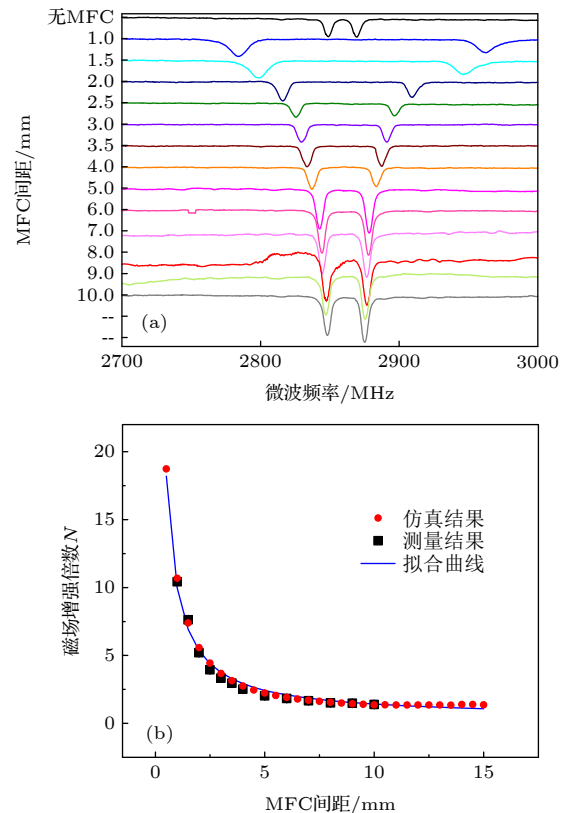


图 4 (a) MFC 不同间距下 ODMR 曲线; (b) 仿真 (红色圆圈) 与测量 (黑色方点) 得到的不同间距 MFC 的磁场增强倍数曲线, 蓝线为拟合曲线.

Fig. 4. (a) ODMR curves of MFC with different gap widths; (b) magnetic field enhancement curve of MFC with different gap widths obtained by simulation (red circles) and measurement (black dots). The blue line is the fitting curve.

利用 (11) 式获得的磁场增强倍数与间距的关系曲线如图 4(b) 中的蓝线所示. 根据测试结果, 可以预计在 MFC 间距为 0.5 mm (完全满足成像视场范围条件) 时, MFC 的磁增强倍数  $N$  可达 18.21.

### 3.3 磁灵敏度计算及预计

将测量得到的不同间距下的放大倍数  $N$ , ODMR 对比度  $C$  与半波全宽  $\omega$ , 以及通过 (7) 式计算得到的光子速率  $R$  代入 (9) 式, 可以得到不同间距下对应的系统磁灵敏度, 如图 5 所示. 可以看出, 随着 MFC 间距的减小, MFC 对中心位置处磁场强度的放大倍数逐渐增大, 磁灵敏度提高, 系统磁灵敏度可由无 MFC 时的  $1.10 \text{ nT/Hz}^{1/2}$  提升至 MFC 间距为 1.0 mm 时的  $0.30 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ . 将测量结果再根据 (9) 式与 (11) 式进行拟合, 得到蓝色的拟合曲线, 根据曲线可以估计在间距为 0.5 mm 时, 对应磁灵敏度能达约  $0.25 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ , 可实现磁检测灵敏度的有效提升.

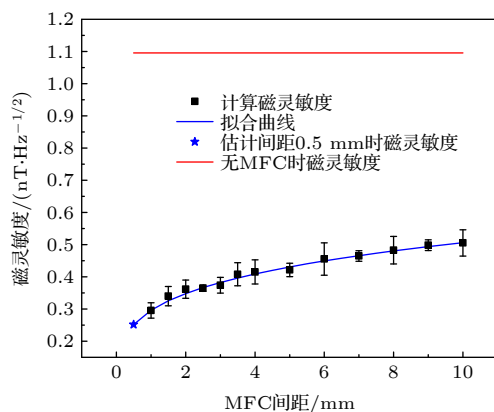


图 5 黑色方点为测量得到的不同间距下的磁灵敏度, 红线为无 MFC 状态下的磁灵敏度, 蓝线为拟合曲线, 蓝色星形为估计得到的间距为 0.5 mm 的磁灵敏度

Fig. 5. The black square points are the measured magnetic sensitivity at different intervals, the red line is the magnetic sensitivity without MFC, the blue line is the fitting curve, and the blue star is the estimated magnetic sensitivity with a pitch of 0.5 mm.

## 4 结论

本文通过搭建结合 MFC 结构的系综金刚石 NV 色心的宽场磁成像系统, 利用连续光探测磁共振的 NV 色心传感技术验证 MFC 磁增强效果. 首先仿真建立随间距变化的 T 型薄片状 MFC 间隙

中心位置磁增强倍数变化模型, 通过磁场成像技术寻找间隙中心位置并利用 ODMR 曲线双峰峰点差值得到在实验条件下的不同间距的磁增强倍数. 最后通过计算和估计得到 MFC 对系综金刚石 NV 色心系统的磁灵敏度放大效果. 实验中 MFC 最小间距为 1.0 mm, 对应的磁增强倍数为 10.35, 磁灵敏度由相对无 MFC 状态的  $1.10 \text{ nT/Hz}^{1/2}$  提升至  $0.30 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ . 根据拟合及模拟曲线计算并预计 MFC 间距为 0.5 mm 时, 磁增强倍数提升到了 18.21, 对应的磁灵敏度较无 MFC 时可进一步提升至  $0.25 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ . 以上结果表明磁集聚效应系综 NV 色心磁检测增强的有效性, 并为非轴向方向磁场的矢量选择性方面的进一步研究奠定了基础, 为弱磁测量的灵敏度的优化提供了一定参考.

## 参考文献

- [1] Shenton M E, Hamoda H M, Schneiderman J S, Bouix S, Pasternak O, Rathil Y, Vu M A, Purohit M P, Helmer K, Koerte I, Lin A P, Westin C F, Kikinis R, Kubicki M, Stern R A, Zafonte R 2012 *Brain Imaging Behav.* **6** 137
- [2] Lenz J, Edelstein A S 2006 *IEEE Sens. J.* **6** 631
- [3] Xia H, Baranga A B A, Hoffman D, Romalis M V 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 211104
- [4] Anahory Y, Reiner J, Embon L, Halbertal D, Yakovenko A, Myasoedov Y, Rappaport M L, Huber M E, Zeldov E 2014 *Nano Lett.* **14** 6481
- [5] Pannetier M, Fermon C, Le Goff G, Simola J, Kerr E 2004 *Science* **304** 1648
- [6] Yabukami S, Kato K, Ohtomo Y, Ozawa T, Arai K I 2009 *J. Magn. Magn. Mater.* **321** 675
- [7] Wang Y, Gao J, Li M, Hasanyan D, Shen Y, Li J, Viehland D, Luo H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 022903
- [8] Wang P F, Chen S Y, Guo M S, Peng S J, Wang M Q, Chen M, Ma W C, Zhang R, Su J H, Rong X, Shi F Z, Xu T, Du J F 2019 *Sci. Adv.* **5** eaan8038 6
- [9] Maze J R, Stanwix P L, Hodges J S, Hong S, Taylor J M, Cappellaro P, Jiang L, Dutt M V G, Togan E, Zibrov A S, Yacoby A, Walsworth R L, Lukin M D 2008 *Nature* **455** 644
- [10] Barry J F, Schloss J M, Bauch E, Turner M J, Hart C A, Pham L M, Walsworth R L 2020 *Rev. Mod. Phys.* **92** 015004
- [11] Davis H C, Ramesh P, Bhatnagar A, Lee-Gosselin A, Barry J F, Glenn D R, Walsworth R L, Shapiro M G 2018 *Nat. Commun.* **9** 1319
- [12] Glenn D R, Fu R R, Kehayias P, Le Sage D, Lima E A, Weiss B P, Walsworth R L 2017 *Geochem. Geophys. Geosyst.* **18** 3254
- [13] Jensen K, Leefer N, Jarmola A, Dumeige Y, Acosta V M, Kehayias P, Patton B, Budker D 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 160802
- [14] Fescenko I, Jarmola A, Savukov I, Kehayias P, Smits J, Damron J, Ristoff N, Mosavian N, Acosta V M 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 023394
- [15] Griffith W C, Jimenez-Martinez R, Shah V, Knappe S, Kitching J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 023502

- [16] Fan H, Li S, Nabaei V, Feng Q, Heidari H 2020 *IEEE Sens. J.* **20** 9919
- [17] Szweczyk R, Ostaszewska-Lizewska A, Raback P 2020 *Acta Phys. Pol. A* **137** 700
- [18] Hu J F, Ji M H, Qiu W C, Pan L, Li P S, Peng J P, Hu Y G, Liu H Y, Pan M C 2019 *Sensors* **19** 4475
- [19] Feng Y L, Chen J Y, Wu K, Wang J P 2020 *J. Magn. Magn. Mater.* **511** 166728
- [20] Doherty M W, Dolde F, Fedder H, Jelezko F, Wrachtrup J, Manson N B, Hollenberg L C L 2012 *Phys. Rev. B* **85** 205203
- [21] Zhao B B, Guo H, Zhao R, Du F F, Li Z H, Wang L, Wu D J, Chen Y L, Tang J, Liu J 2019 *IEEE Magn. Lett.* **10** S101104
- [22] Marinho Z, Cardoso S, Chaves R, Ferreira R, Melo L V, Freitas P P 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 07e521
- [23] Zhang X M, Bi Y, Chen G B, Liu J, Li J, Feng K Q, Lv C, Wang W J 2018 *AIP Adv.* **8** 125222
- [24] Sun X, Jiang L J, Pong P W T 2013 *Microelectron. Eng.* **111** 77
- [25] Botsch L, Raatz N, Pezzagna S, Staacke R, John R, Abel B, Esquinazi P D, Meijer J, Diziain S 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 125003
- [26] Schloss J M, Barry J F, Turner M J, Walsworth R L 2018 *Phys. Rev. Appl.* **10** 034044
- [27] Barry J F, Turner M J, Schloss J M, Glenn D R, Song Y, Lukin M D, Park H, Walsworth R L 2016 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **113** 14133
- [28] Jensen K, Acosta V M, Jarmola A, Budker D 2013 *Phys. Rev. B* **87** 014115
- [29] Leroy P, Coillot C, Roux A F, Chantaur G M 2006 *IEEE Sens. J.* **6** 707

# Enhancement of magnetic detection by ensemble NV color center based on magnetic flux concentration effect<sup>\*</sup>

Li Zhong-Hao   Wang Tian-Yu   Guo Qi   Guo Hao  
Wen Huan-Fei   Tang Jun<sup>†</sup>   Liu Jun<sup>‡</sup>

(*Institute of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

(*Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education,  
North University of China, Taiyuan 030051, China*)

(*Key Lab of Quantum Sensing and Precision Measurement, Shanxi Province,  
North University of China, Taiyuan 030051, China*)

( Received 20 January 2021; revised manuscript received 8 March 2021 )

## Abstract

The high-sensitivity magnetic sensor is the key to the weak magnetic and extremely weak magnetic detection imaging. In this paper, based on ensemble nitrogen-vacancy (NV) color center in diamond, a wide-field magnetic field distribution imaging system combined with the magnetic flux concentrator (MFC) is built for enhancing the magnetic detection. The paired T-shape chip MFC structures are designed and prepared based on the simulation of magnetic flux concentration effect, and the enhancement of magnetic field of MFC is verified by continuous wave optical detection magnetic resonance (CW-ODMR) imaging technology. When the gap width between the MFCs is 1.0 mm, the magnetic enhancement factor is about 10.35. To verify the effectiveness of the magnetic enhancement effect of the MFC, The magnetic enhancement effects are also measured under different magnetic field strengths and different gap widths. The magnetic sensitivity of the system increases from 1.10 nT/Hz<sup>1/2</sup> to 0.30 nT/Hz<sup>1/2</sup>. By comparing the simulations with the measurements, the relationship between the measured magnetic enhancement multiple and the gap width can be obtained, and the better magnetic enhancement capability and sensitivity of the experimental system are also estimated. When the MFC's gap width is 0.5 mm, the corresponding magnetic enhancement factor is increased to 18.21, and the corresponding magnetic sensitivity is 0.25 nT/Hz<sup>1/2</sup>. These results show that the magnetic detection sensitivity of the ensemble NV in diamond can be effectively improved based on magnetic flux concentration effect, which provides a reference for the applications of precision quantum measurement technology in weak magnetic and extremely weak magnetic detection.

**Keywords:** magnetic flux concentrator, ensemble NV color center in diamond, continuous wave optical detection magnetic resonance, magnetic sensitivity

**PACS:** 76.70.Hb, 85.75.Ss, 42.30.-d, 07.55.Ge

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210129

\* Project supported by the Special Fund for Research on National Major Research Instruments and Facilities of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51727808, 61727804), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51635011, 51922009), the Research Foundation for Basic Research of Shanxi Province, China (Grant Nos. 201901D111011(ZD), 201901D211254, 201801D221202, 201801D221213), the Key Research and Development Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 201803D121067), the Science and Technology Innovation Project of the Higher Education of Shanxi Province, China (Grant No. 2019L0558), the Key Laboratory of Shanxi Province, China (Grant No. 201905D121001), and the Fund for Shanxi "1331 Project" Key Subjects Construction, China.

† Corresponding author. E-mail: [tangjun@nuc.edu.cn](mailto:tangjun@nuc.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [liuj@nuc.edu.cn](mailto:liuj@nuc.edu.cn)