

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311413

金刚石氮空位色心自旋传感技术*

秦岳, 王志斌, 郭浩, 唐军, 刘俊
(中北大学仪器与电子学院 太原 030051)

摘要: 金刚石氮空位 (NV) 色心具有优异的室温量子特性、长相干时间、兼容微纳加工等优势, 成为芯片化高精度传感器技术领域发展的新方向。基于金刚石 NV 色心量子效应的磁、电、温、角速度等多种物理量传感灵敏度已逐渐突破现有传感测量技术极限, 在航空航天、深空探测、生命科学等学科领域应用越来越深入。本综述主要介绍金刚石 NV 色心量子传感机理、不同物理量传感器研究进展及未来发展趋势。

关键词: NV 色心; 量子传感; 磁强计; 温度计; 电场计; 陀螺仪

中图分类号: TH73 O482.54 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Sensing technology of nitrogen vacancy color center of diamond

Qin Yue, Wang Zhibin, Guo Hao, Tang Jun, Liu Jun

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

Abstract: Diamond nitrogen vacancy (NV) color center has the advantages of excellent quantum properties at room temperature, long decoherence time, compatibility with micro and nano processing, etc. Thus, it becomes a new development direction in the field of high-precision on-chip sensor technology. The sensitivity of magnetic, electric, temperature, angular velocity, and other physical quantities based on the quantum effect of diamond NV color center has gradually broken through the limits of existing sensing and measurement technology. It has been increasingly applied in aerospace, deep space exploration, life science, and other disciplines. This review mainly introduces the mechanism of diamond NV color center quantum sensing, the research progress, and future development trends of sensors with different physical quantities.

Keywords: NV color center; quantum sensing; magnetometer; thermometer; electric field meter; gyroscope

0 引言

量子传感技术因其超高的传感精度成为国内外研究的热点。金刚石中的氮空位 (nitrogen-vacancy, NV) 缺陷作为一种固态量子功能结构, 在室温下具有较长的自旋相干时间、全光初始化和读出、纳米级尺寸、固定的晶体轴、兼容微纳加工工艺等优异特性, 已被广泛的应用于开发各种传感技术, 如磁强计^[1-4]、温度计^[5-7]、电场计^[8-10]、陀螺仪^[11]等等。在地球物理、航空航天、深海极地、生物医药、生命科学等领域具有广泛的应用前景。

本文就金刚石 NV 色心自旋传感机理、基于金刚石

NV 色心所开发的各类型传感器件的原理、关键技术、发展现状及集成化工程应用发展趋势展开论述。

1 金刚石 NV 色心自旋传感机理

金刚石 NV 色心是由金刚石晶格中 1 个氮原子取代了 1 个碳原子, 并与邻近碳空位所构成的晶格缺陷结构。NV 色心沿着“氮原子-空位”的连接方向具有 C_{3v} 对称性 (NV 色心轴向), 通常, NV 色心以 NV^- (带负电) 和 NV^0 (电中性) 两种形式存在, 其中 NV^- 的电子自旋态易于极化与调控。本文主要讨论以 NV^- 形式存在的 NV 色心。

如图1所示,金刚石 NV 色心的能级结构是一种三能级体系,由基态、激发态和亚稳态组成。基态和激发态都具有自旋三重态($m_s = -1, 0, +1$ 态)。处于激发态的所有自旋子能级($m_s = 0, \pm 1$)都通过光子发射表现出自发衰减。基态三重态的哈密顿量(H)可以写为零场分裂项、斯塔克效应项和塞曼分裂项之和^[12],即:

$$H = (D + d_{\parallel} E_z) \cdot S_z^2 - d_{\perp} E_x (S_x^2 - S_y^2) + d_{\perp} E_y (S_x S_y + S_y S_x) + g_e \mu_B \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \quad (1)$$

式中: D 为零场劈裂,在室温下为 2.87 GHz; S 为电子自旋算子; $d_{\parallel}$ 和 $d_{\perp}$ 分别为轴向和非轴向的电偶极矩; $d_{\parallel} E_z$ 、 $d_{\perp} E_x$ 和 $d_{\perp} E_y$ 表征了 NV 色心与电场、应力场的耦合; g_e 为朗德因子; μ_B 为 Bohr 磁子; $\mathbf{B}$ 为施加的磁感应强度; z 轴为 NV 轴向, S_x 、 S_y 和 S_z 分别为 $\mathbf{S}$ 在 x 、 y 和 z 轴的分量。

NV 色心中自旋电子的能级可通过微波调控,当微波能量与自旋能级间能量差相等时,低态能级自旋电子吸收微波能量发生共振跃迁,各能级的电子布居数发生改变。当外界物理量与自旋电子耦合时,会引起自旋电子跃迁,改变电子布居数,可通过荧光强度读取各能级电子布居数实现对物理量传感测量。目前自旋信息探测方法主要有光探测磁共振(optically detected magnetic resonance, ODMR)^[2,5,13-14]、Ramsey 序列^[5,9,15-16]、Spin Echo^[5,10,17]序列等方法,主要通过荧光强度读取自旋电子布居数,获得自旋能级位置、电子跃迁行为或自旋电子状态,最终利用哈密顿方程(式(1))定量传感解算各物理量信息。此外,由于哈密顿量同时对磁场、电场、温度和应力等多种物理量敏感,为了实现更精确的测量,需要在测量特定物理量时消除其他敏感物理量的影响。

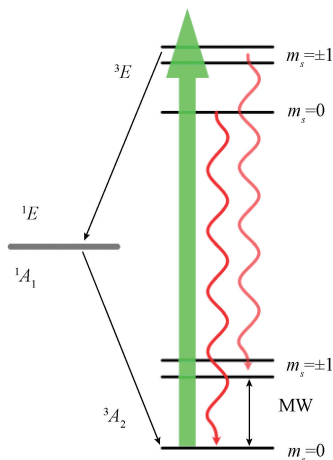


图1 NV 中心电子自旋的能级图

Fig. 1 Energy level diagram of the spin of the NV center

1.1 零场分裂效应传感机理

金刚石 NV 色心的基态能级在零外场作用时,0 态和 ± 1 态之间产生能级劈裂被称为零场劈裂。零场劈

裂与环境温度相关,室温下零场劈裂 $D = 2.87$ GHz。哈密顿方程(式(1))中的 $D \cdot S_z^2$ 为零场分裂项^[18]。在不同的温度区间内,有不同线型的曲线来描述零场劈裂的位移(ΔD)与温度(T)之间的关系。当 $T \leq 300$ K 时,5 阶多项式具有较好的拟合效果;在室温范围内(280 K $\leq T \leq 330$ K),二者之间近似呈线性关系;当 300 K $\leq T \leq 700$ K 时,二者之间的关系通常利用 3 阶多项式来描述。在上述 3 个温度区间内, ΔD 与 T 之间的关系可以统一使用修改后的 Varshni 经验公式描述。具体表达式如下:

$$D(T) = D_0 - \frac{AT^4}{(T+B)^2} \quad (2)$$

利用 D 与温度的关系,通过测量零场分裂值,可以实现基于 NV 自旋态的温度测量^[19]。

综上所述,零场分裂效应是基于金刚石 NV 色心周围核自旋的物理效应,可以用来测量温度。随着金刚石 NV 色心的研究不断深入,其在传感器领域的应用前景也变得越来越大。由于 $m_s = -1$ 和 $m_s = +1$ 在磁场、电场的下能级分裂的大小相同,符号相反。通过 ODMR 中的共振峰的零场分裂测量温度时,通常同时测量 $m_s = -1$ 、 $+1$ 的能级位置的平均值作为零场分裂值,以此来消除磁场和电场对温度测量的影响。

1.2 塞曼分裂效应传感机理

塞曼分裂效应是指外部磁场导致的 NV 色心能级分裂和移动。由于 NV 色心本身存在的磁矩,外磁场的作用引起了附加的能量,造成了能级的分裂,分裂数值与磁场强度成正比。

哈密顿方程(式(1))中的第 4 项为塞曼分裂项。当 NV^- 在零磁环境中, NV 色心基态能级 $m_s = -1$ 和 $m_s = +1$ 为简并态, NV^- 与微波共振频率 $\nu_0 = 2.87$ GHz。当外界磁场不为 0 时,投影在 NV 轴上的磁场会通过塞曼分裂效应使三重态退简并,进而使微波共振频率发生分裂^[18]。分裂后的共振频率为 $\nu_0 \pm \gamma_e B_{NV}$, 其中 $\gamma_e = 2.8$ MHz/Gs 为 NV 色心的旋磁比, B_{NV} 为磁场在其中一个 NV 轴上的投影值^[8]。由此可得, $m_s = -1$ 和 $m_s = +1$ 态之间的频率间隔与磁场强度成正比,通过该频率间隔即可定量计算投影在 NV 轴上的磁场强度,实现对磁场信息的传感^[20]。通过 ODMR 测量磁场时,为了屏蔽温度的影响,通常通过计算 $m_s = +1$ (或 $m_s = -1$) 与零场分裂之间的能级差值来测量磁场。此外,由于电场和应变造成的能级分裂(斯塔克效应)远小于磁场造成的能级分裂(塞曼效应),在测量磁场时,无需屏蔽电场和应变。

1.3 斯塔克效应传感机理

斯塔克效应是指外部电场导致的能级移动和分裂。由于 NV 色心存在轴向与非轴向的电偶极矩,外电场的作用引起了附加的能量,造成了能级的分裂,分裂数值与电场强度成正比。

哈密顿方程(式(1))中的 $d_{\parallel} E_z \cdot S_z^2$ 为轴向斯塔克效应项,第2项和第3项为非轴向斯塔克效应项^[12]。无外加电场与应力场时, $E=0$, 当外加电场或应力场时, $E \neq 0$ 。通过标定 NV 色心能级与外部电场之间的定量关系,即可通过测量能级位置来确定外部电场的强度。由于能级对外部电场方向的敏感特性, NV 色心也可以用来测量外部电场的方向^[10,21]。此外,在应力作用下,金刚石晶格内部会产生一个等效电场,该电场通过斯塔克效应改变了 NV 色心的能级结构。因此,对能级与应力之间的关系进行标定,可以通过测量能级来确定压力^[22-23]。

通过斯塔克效应,金刚石 NV 色心在电场和应力传感领域具有很大的应用潜力^[12,24]。可以用于生物医学、环境监测、电子学等领域。因此,金刚石 NV 色心的研究受到了广泛的关注,其进一步的研究和应用前景具有很大的潜力。

由电场造成的能级分裂远小于磁场造成的能级分裂,通常使用连续微波驱动,使 NV 色心中的自旋结构处于特定缀饰态,进而消除磁场对电场测量的影响。

1.4 CPT 效应传感机理

如图2所示,相干布居囚禁(coherent population trapping, CPT)是指,在相干光场的作用下,所有电子布居数都长期处于两个基态的相干叠加态,且不再吸收或发射光子的物理效应。通过 CPT 效应,使 NV 色心中的电子布居数全部处于基态,进而抑制了 NV 色心的光子吸收和发射。当磁场波动时, CPT 被打破, NV 色心重新吸收并发射光子。此时,通过光子计数和磁场之间的相关关系,即可对磁场进行实时传感^[25-26]。

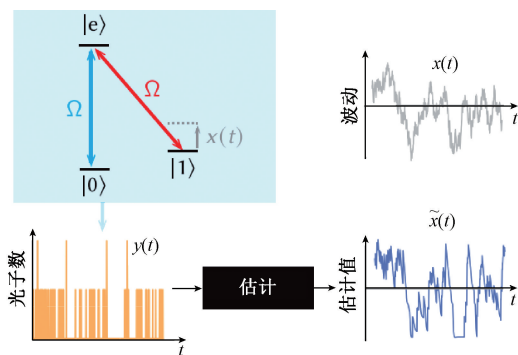


图2 基于 CPT 在 NV 色心波动磁环境中连续实时传感原理图

Fig. 2 Based on the continuous real-time sensing schematic diagram of CPT in the fluctuating magnetic environment of NV color center

2 金刚石 NV 色心自旋传感进展

2.1 磁传感器

磁场传感技术广泛应用于磁异常探潜、地磁导航、生物医疗、地质勘探等诸多领域。基于金刚石 NV 色心的磁场传感技术理论上能够实现阿特斯拉量级的磁测量,成为未来小型化固态原子磁传感技术发展的主要方向之一。目前,原子自旋磁传感主要分为 DC 磁场和 AC 磁场,2008 年加州伯克利分校 Maze 等^[27]提出的 DC 与 AC 磁灵敏度的计算方法如式(3)所示。

$$\eta_{AC} \approx \frac{\pi h}{2g\mu_B C \sqrt{\beta T_2}} \quad (3)$$

$$\eta_{DC} \approx \frac{\pi h}{g\mu_B C \sqrt{\beta T_2^*}} \quad (4)$$

式中: h 为约化普朗克常量, g 为朗德因子, μ_B 为玻尔磁子, C 为 ODMR 对比度。DC 磁测量限制因素 ODMR 谱的线宽 $\Delta\nu$ 主要和非均匀加宽的横向弛豫时间 T_2 有关,当 π 脉冲作用时间 $T_\pi \approx T_2^*$ 时, $\Delta\nu \approx 1/(\pi T_2^*)$ 。AC 磁测量则可以利用 T_1 弛豫法,在 GHz 频段的频率上对信号进行相位检测。 T_2^* 通常也被称作退相干时间。

1) DC 磁测量

基于 NV 的 DC 磁场检测方法主要有光探测磁共振^[2,13-14]、Ramsey 微波脉冲序列^[9,15-16,28]和无微波 GSLAC^[29-30]。如图3(a)所示,ODMR 的探测方式一直是 NV 磁检测的主要方式,广泛应用与磁传感与磁成像中。ODMR 基于三重态的荧光强度差异,通过光探测方式确定 $0, \pm 1$ 态之间的微波共振频率,最终通过微波共振频率解算 DC 磁场。如图3所示,无外加磁场时, $<1|$ 态是简并态,当外加磁场时, $<1|$ 态会解除简并状态并向横向劈裂。不同的强度磁场作用下,荧光强度是微波场频率的函数,可以通过荧光确定共振峰频率和哈密顿方程(式(1))获得不同 NV 轴上的磁场强度,通过计算实现对总磁场 B 的高灵敏传感测量。2017 年,德国古滕堡大学^[31]采用微波调制解调技术的结合对低频噪声进行了有效的抑制,磁探测灵敏度达到了 $28 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2022 年,北京航空航天大学^[32]提出了一种结合锁定检测和脉冲型方案的优点的直流 NV 中心磁力测量方案。灵敏度提高了 4 倍,最小可分辨磁场(minimum resolvable magnetic field, MRMF)提高了 60 倍。该方案实现了 100 pT 的 MRMF 和 $3 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度,对应的体积归一化灵敏度为 $2.5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

同时,由于金刚石 NV 色心特殊的轴对称特性,使其具有单结构三轴矢量传感优势。通过建立笛卡尔坐标系,根据金刚石内角的固定 109.4° 与正交坐标系间的关系,将 4 个轴向的强度分别解算到建立的笛卡尔坐标

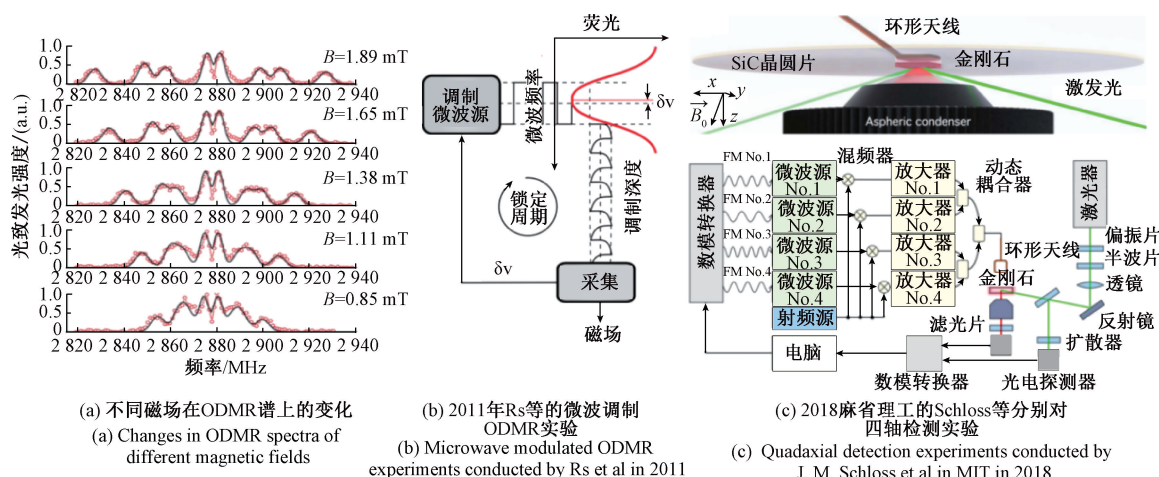


图3 通过 ODMR 谱线对磁场的测量

Fig. 3 Measurement of magnetic field by ODMR spectra

系上,从而实现对三轴矢量信息的传感。在矢量磁场测量方面,三轴矢量磁强计可以通过同时检测 4 个 NV 轴向来实现。结合微波调制与解调方法,该三轴矢量磁强计的工作带宽为 $0 \sim 12.5$ kHz,灵敏度可以达到 $50 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}^{[33]}$ 。在 2020 年 Zheng 等^[34]的实验中磁探测灵敏度可以达到 $300 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2023 年,西安交通大学 Zhao 等^[35]提出了一种便携式、灵活的全光纤 NV 中心矢量磁力计,利用光纤代替传统的空间光学元件,同时有效地利用多模光纤实现微金刚石的激光激发和荧光采集。实现了光纤探针尖端的 μm 尺度,矢量磁场检测灵敏度为 $0.73 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

2) AC 磁测量

AC 磁场的探测主要基于 Spin Echo 序列^[17,36-37]和动力学解耦序列^[38-40]的方式。不同于 Ramsey 序列(如图 4(a)所示),Spin Echo 序列在自由演化的时间 τ 中等间隔地加入了一个 π 脉冲。由于静磁场在 π 脉冲前后造成的相位累积大小相等、符号相反,前后累积的相位相互抵消,因此 Spin Echo 序列对静磁场不敏感。最后,Spin Echo 序列的相位输出仅保留了交流磁场造成的相位累积。动力学解耦序列与 Spin Echo 序列思想类似,通过在自由演化时间中加入多个 π 脉冲,延长 NV 色心与交流磁场作用时间与退相干时间,实现对交流磁场的高灵敏传感。

2014 年, Wolf 等^[41]基于 NV 演示了一个亚皮特斯拉的磁力计,在 20 kHz 磁场下 AC 灵敏度达到了 $0.9 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2022 年,美国伯克利分校, Sahin 等^[3]利用 ^{13}C 超极化核自旋的方法,演示了 7 kHz 的检测带宽,光谱分辨率小于 100 mHz, AC 灵敏度达到了 $410 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

目前 DC 磁探测方法包括 ODMR、Ramsey 序列和无微波 GSLAC, AC 磁探测方法包括 Spin Echo 和动力学解耦。NV 作为量子磁探测器,在室温下具有超高的磁探测分辨率。在未来的磁探测领域中,是极具应用前景的方法之一。

2.2 温度传感器

温度反映了物体内部能量和热量的大小,是描述物体热力学状态的重要参数,自然界中的一切过程都与温度密切相关,能为科学研究提供重要信息。

金刚石 NV 色心可作为具有优异性能的温度传感器,如图 5 所示,其温度测量主要基于 3 种原理:测量零场劈裂值、测量零声子线和测量磁场间接测量温度,3 种方法有各自的应用场景和优势。此外,得益于微纳米金刚石中 NV 色心的稳定性, NV 色心可应用于具有微纳米级空间分辨率的测温应用。

1) 利用零场劈裂值测温

正如 2.1 节中所分析,零场劈裂的变化主要与温度有关,所以可以通过测量零场劈裂值的变化来测量温度。零场劈裂值可以通过 ODMR 谱线来测量,其与温度的关系在不同温度范围内有不同的拟合关系, $T \leq 700$ K 时, D 与 T 之间的关系可以使用修改后的 Varshni 经验公式描述,如式(5)、(6)所描述^[7]。

ODMR 方法的温度灵敏度计算公式如下:

$$\eta_T = \frac{\Delta\omega}{C\sqrt{R} |dD/dT|} \quad (5)$$

$$\eta_T = \frac{\Delta\omega}{C\sqrt{R} |dD/dT| \sqrt{Rt_{coh}}} \quad (6)$$

式(5)和(6)分别描述了连续 ODMR 和脉冲 ODMR 的温度探测灵敏度。其中 C 和 $\Delta\omega$ 分别是 ODMR 谱线的

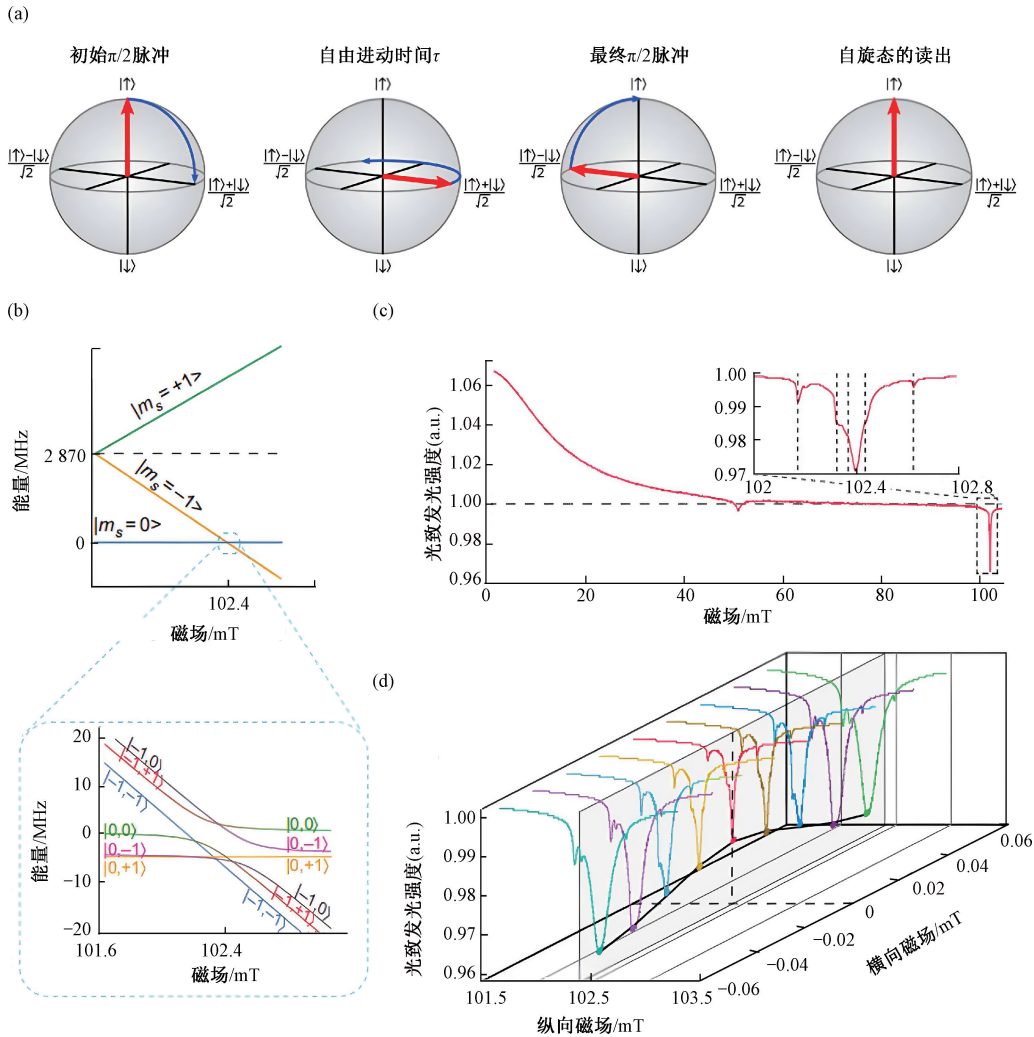


图 4 拉姆齐序列及横向磁场的测量

Fig. 4 Romsey sequence and measurement process of transverse magnetic field

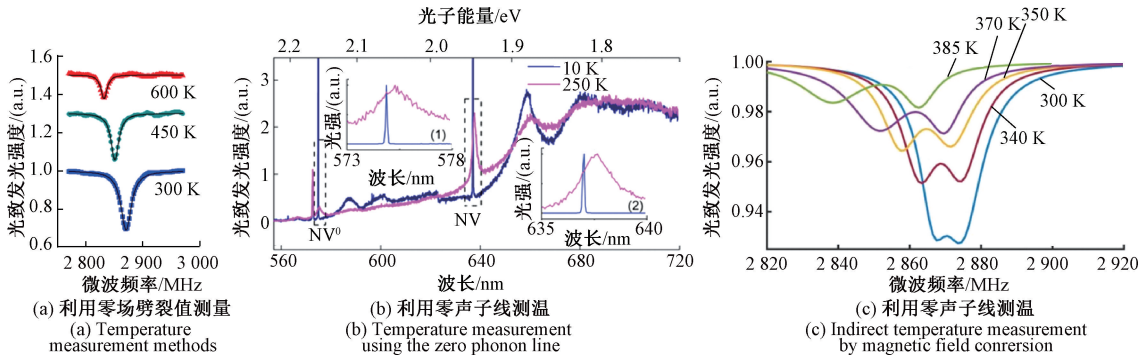


图 5 3 种测温方法示意图

Fig. 5 Diagram of three temperature measurement methods

对比度和线宽, R 是检测效率, dD/dT 是零场劈裂值和温度之间的拟合关系值, t_{coh} 是自旋耦合(相干)时间。

在横向磁场下使用射频(radio frequency, RF)场压制

的 NV 电子自旋体的 CW-ODMR 技术来提高温度感应的灵敏度。该方法有效地抵抗了磁场或温度波动, 温度传感灵敏度达到 $50.4 \pm 3.5 \text{ mK/Hz}^{1/2}$ 的^[5]。

2) 利用零声子线测温

利用零声子线的测温方法也被称为全光测温法,其原理是用 532 nm 激光激发 NV 色心使其产生荧光,然后利用光谱仪等设备检测荧光激发光谱中零声子线的变化情况来测量温度。Chen 等^[42]测量了高纯度金刚石样品中 NV 色中心集合温度在 5.6 K~295 K 之间的磁共振和荧光光谱,零声子线与温度的非线性关系来传感测量温度。该方法无需微波参与,避免了额外的热噪声来源。实验中只需要使用激光,简化了实验设置。

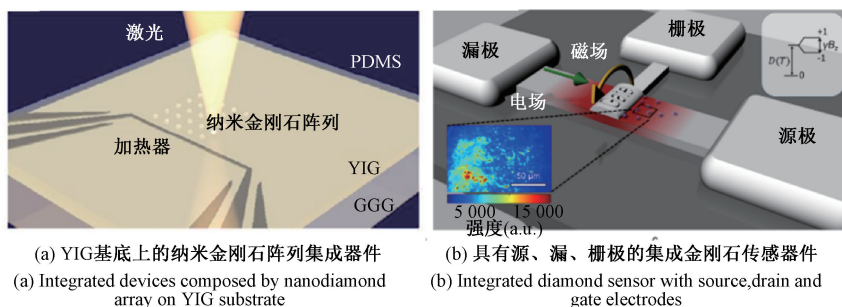


图6 材料科学领域应用

Fig. 6 Application in material science field

2.3 电场传感器

金刚石 NV 色心电场测量利用了其自旋性质,通过精确调整磁场,将电感应转换与磁波动解耦,提供了一种传感器从“磁性”模式切换到“电性”模式的方法,通过探索塞曼位移、局部应变效应和基态自旋流形的斯塔克位移之间的相互作用,并利用对这种相互作用的更好理解来感知电场。根据式(1),考虑到固定的磁场和应变场,由电场引起的 $m_s = 0$ 和 $m_s = \pm 1$ 自旋子能级之间的磁跃迁频率 $\Delta\omega_{\pm}$ 为:

$$h\Delta\omega_{\pm} = d_{gs}^{\parallel} E_z \pm [F(B, E, \sigma) - F(B, 0, \sigma)] \quad (7)$$

$$F(B, E, \sigma) = \left[\mu_B^2 g_e^2 B_z^2 - d_{gs}^{\perp 2} \Pi_{\perp}^2 - \frac{\mu_B^2 g_e^2 B_z^2}{D_{gs}} d_{gs}^{\perp} \Pi_{\perp} \times \cos(2\phi_B + \phi_{\Pi}) + \frac{\mu_B^4 g_e^4}{4D_{gs}^2} B_{\perp}^4 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$\Pi_{\perp}^2 = \Pi_x^2 + \Pi_y^2$, $B_{\perp}^2 = B_x^2 + B_y^2$, $\tan\Phi_{\Pi} = \Pi_y/\Pi_x$, $\tan\Phi_B = B_y/B_x$ 考虑到在基态中塞曼效应比斯塔克效应强得多, $\mu_B^2 g_e^2 B_z^2$ 在 F 中的一阶出现表明,对于预期的情况, $d_{gs}^{\perp} \Pi/\mu_B g_e B_z$ 。因此,需要在非轴向平面中仔细对准磁场来消除磁场的影响来精确测量电场。图 7 所示为不同电压下的 ODMR 谱线,清楚地显示了斯塔克偏移的影响^[44]。

2011 年,斯图加特大学物理研究所和研究中心的 Dolde 等^[45]利用金刚石中单个氮-空位缺陷中心自旋进

3) 磁场转化间接测温

通过磁性材料在居里温度附近的磁性变化,可以通过测量磁场来间接测量温度。由于 NV 色心具有极高的磁场传感灵敏度,可通过测量磁场变化转化为对温度的传感测量,2023 年, Liu 等^[43]通过采用纳米金刚石和磁性纳米粒子的混合结构进行转导和放大,从而使温度灵敏度达到创纪录的 $76 \mu\text{K}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

由于金刚石 NV 色心温度传感的高灵敏、高空间分辨、非侵入性等优异特性,使其在生命科学领域、材料科学和电子学领域得到广泛应用(如图 6 所示)。

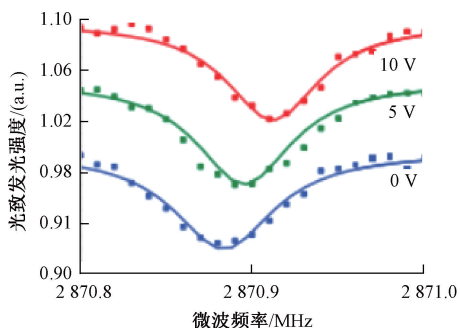


图7 电压对 ODMR 谐振线的影响

Fig. 7 Effect of voltage on ODMR spectra

行精密的三维电场测量,交流电场灵敏度达到了 $202 \pm 6 \text{ V cm}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 。2022 年,哈佛大学的 Qiu 等^[46]利用位于钻石纳米柱顶端的浅层 NV 来成像自然条件下外部的交流(alternating current, AC)和直流(direct current, DC)电场,AC 电场传感灵敏度为 $26 \text{ mV}\mu\text{m}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$, DC 电场灵敏度为 $2 \text{ V}\mu\text{m}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 。

与其他精密电荷测量技术(如 SET、SCM、EFM 和 Kelvin 探针显微镜)比, NV 测量灵敏度比最灵敏的电场检测技术(即在 100 nm 的距离处的 SET)低大约两个数量级。然而,原子级尺寸作为 NV 的关键优势,使 NV 可以在环境条件下以几纳米的距离对目标进行精确的

电场传感。因此,NV 在空间分辨率和操作条件方面优于上述技术,并为环境条件下的纳米级单电荷成像开辟了道路。

2.4 力传感器

近年来,基于 NV 的力传感系统快速发展,并成为了精确测量微小力和压力的重要分支,这归因于其独特的量子特性和光学易读出性质。基于 NV 色心的力传感器在微米甚至纳米尺度下都具有高灵敏度、高分辨率和高抗压性,可以被用于进行非破坏性的力学特性研究,实现对微观力学过程的监测。

利用 NV 色心检测力的主要方法是 ODMR 和红宝石光谱方法^[47-48]。其中,通过 ODMR 计算横向零场劈裂(D)的偏移已成为力学测量的主流方法。但由于温度波动也会导致 D 发生偏移,因此在测力实验中,需要消除温度对 D 的影响。横向零场劈裂参数 D 和纵向零场劈裂参数 E 的理论计算方法如下^[19]:

$$D = \frac{P_R + P_L}{2} \quad (9)$$

$$E = \frac{P_R - P_L}{2} \quad (10)$$

式中: P_R 和 P_L 分别为 ODMR 光谱的右峰和左峰频率。研究显示当作用在金刚石上的压力 P 小于百 GPa 时, D 与 P 呈线性关系^[22,49-51],该线性关系可以被用作压力测量。红宝石光谱法则是基于 NV 的荧光波长 λ 与 P 之间的线性关系,通过测量 λ 来确定 P 的大小。

在压力测量方面。2014 年,Cai 等^[52]教授提出了一种由 NV 色心和压电元件组成的混合器件,用于检测外部应力或信号引起的应力磁响应,该器件的压力测量灵敏度为 $0.35 \text{ kPa/Hz}^{1/2}$,而应力灵敏度为 $\eta F \sim 75 \text{ fN/Hz}^{1/2}$ (如图 8 所示)。2020 年,香港中文大学 Ho 等^[51]利用 NV 色心 Ruby 光谱通过 R1 峰的波长来测量确定压力,在 60 GPa 的压力下,零场劈裂 D 的梯度变化率为 $dD/dP = 14.58 \pm 0.06 \text{ MHz/GPa}$ (图 9),测试得到压力灵敏度的约为 $0.6 \text{ GPa/Hz}^{1/2}$ 。2023 年,日本科学技术振兴机构 Ryota Kitagawa 教授利用金刚石的磁致伸缩(magnetic stnction, MS)层和 N-V 中心的混合结构对外部压力的磁响应进行成像,其最高压力系数为 8.2 kHz kPa^{-1} ^[23]。

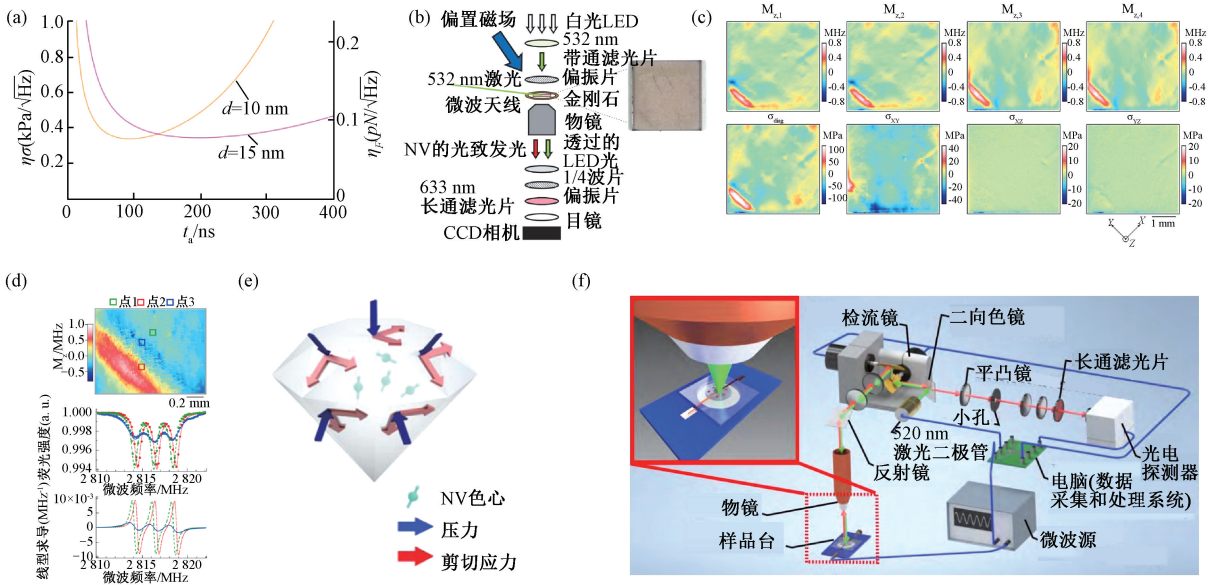


图 8 通过 NV 色心测量应力

Fig. 8 NV color center measurement of stress

在应变测量方面。2019 年,北京理工大学 Xu 等^[53]通过 NV 色心光学跃迁频率偏移来传感测量应变,在应变为 10^{-5} 的情况下, $[\bar{1}, \bar{1}, \bar{1}]$ 方向的光学转换频率失调量为 24 GHz ^[53]。2022 年,马里兰大学 Marshall 等^[54]利用金刚石进行量子干涉应变测量,这种量子干涉测量技术对来自电子和核自旋浴的磁场不均匀性不敏感,从而实现了长 NV 系综电子自旋减相时间和增强的应变灵敏

度,并扩大了该技术在同位素富集或高纯度钻石以外的潜在应用,其应变灵敏度可达 $5 \times 10^{-8} / \sqrt{\text{Hz} \mu\text{m}^{-3}}$ 。

由于 NV 色心力学传感器具有优异的量子特性,且在微纳米尺度具有高灵敏度和高抗压性,可以非破坏性地研究力学特性,实现对微观尺度下的力学过程的测量。因此,NV 色心在微观尺度下的力学传感方面具有广阔的应用前景。

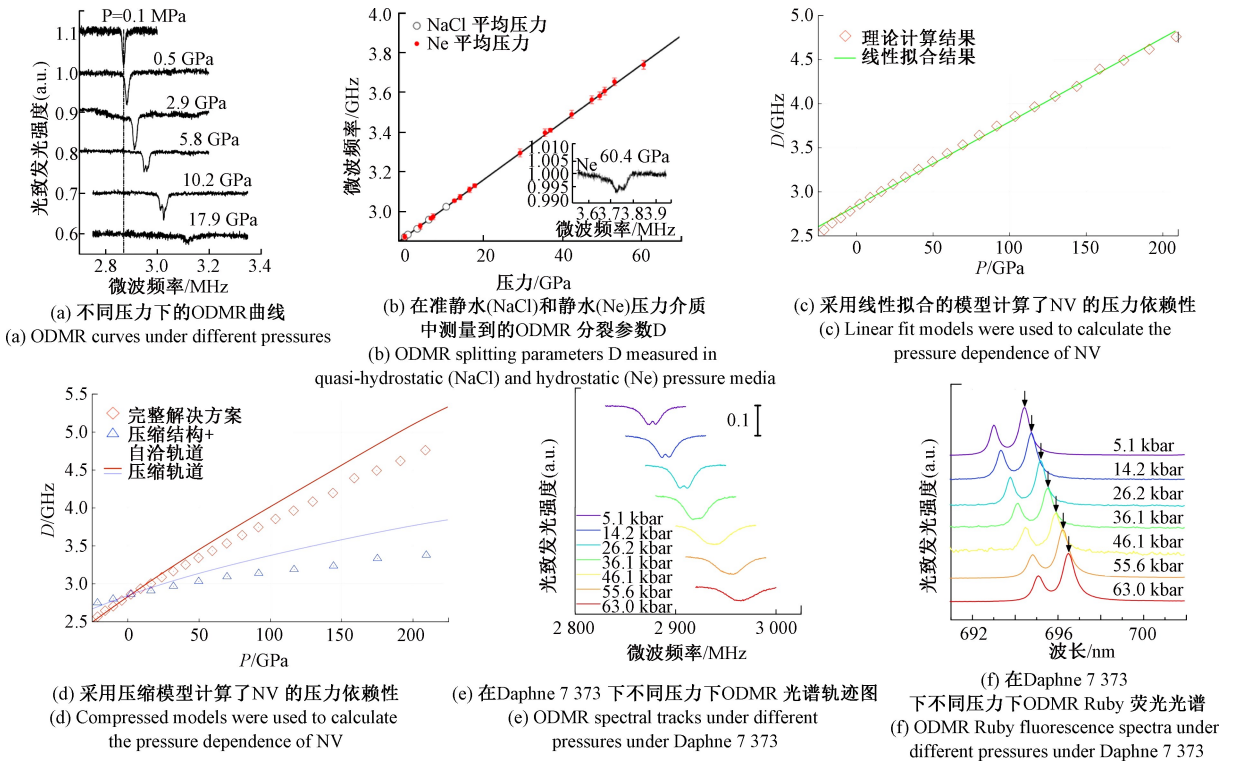


图9 通过 NV 色心测量压力

Fig. 9 Measurement of pressure through NV color center

2.5 陀螺

陀螺仪是用于测量物体相对于惯性空间的角度运动的惯性测量设备,自其问世以来,在导航与制导领域得到了广泛应用。随着科学理论发展与制造技术的不断提升,基于不同原理的各类型陀螺仪应运而生,其中,随着现代量子技术的发展,基于金刚石氮空位色心的量子陀

螺仪也随之诞生。

金刚石 NV 色心的角速度测量传感机理如图 10 所示。其可测量的进动频率 ω_0 随角速度的变化而变化,它完全由非旋转框架内的外场决定。角速度信息可以通过采集信号与可观测外部信息计算获得:

$$\omega_0 = \omega_L \pm \Omega \quad (11)$$

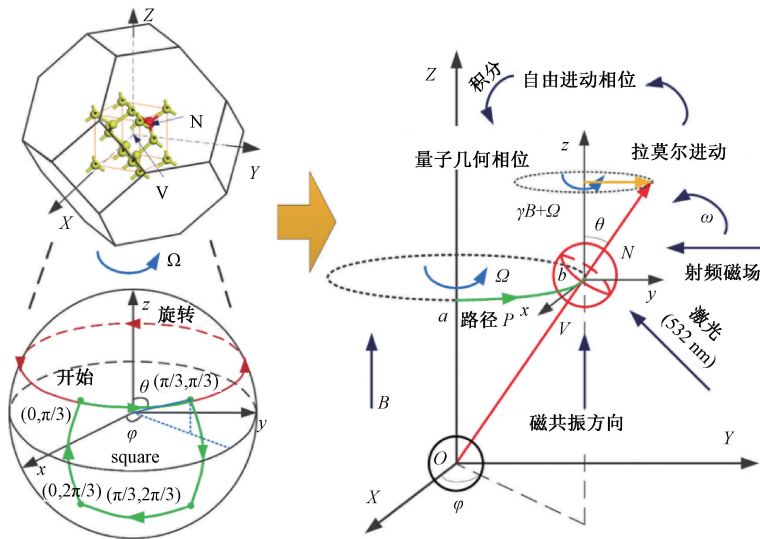


图10 自旋测量原理图

Fig. 10 Schematic diagram of spin measurement

式中: ω_0 即为测量频率, $\omega_L = \gamma B$ 为拉莫尔进动频率, Ω 为旋转角速度。同时, 其在自旋态上累积的量子相位表示为:

$$\phi = \Omega t \quad (12)$$

其中, t 为旋转时间, Ω 为载体的均匀角速度。通过测量自旋态即可获得载体角速度。同时又可基于独立测量外部参数(如磁场)的影响, 实现对量子相位积累的测量, 解算载体角速度信息。

根据上述传感机理, 众多研究人员开展了基于 NV 色心的陀螺仪研究工作。从 2012 年开始, 国外开始提出金刚石 NV 色心陀螺传感模型, 加州伯克利大学提出基于 NV 色心系综的固态陀螺仪方案, 通过将 NV 电子基态相干中引起的 Berry 相移表征 NV 对称轴旋转^[55], 结合动态解耦与抑制偶极弛豫方法, 计算得到传感灵敏度为 $10^{-5} \text{ rad s}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 。麻省理工学院提出基于 NV 色心集成三轴陀螺仪^[56], 利用 NV 色心的 4 个离域轴, 通过将其共振微波脉冲将核自旋顺序映射到对应电子自旋轴向, 实现对旋转速率与方向的同步测量, 计算得到传感灵敏度为 $0.5 (\text{medg s}^{-1}) / \sqrt{\text{Hz} \cdot \text{mm}^3}$ 。墨尔本大学提出利用单个 NV 色心的非阿贝尔相位实验, 应用于单个路径的旋转晶体 NV 色心系综中以实现角速度测量^[57], 理论灵敏度为 $5.4 \times 10^{-3} \text{ rad s}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 。中科院空间技术研究院提出了基于单个 ^{13}C 核自旋与相邻 NV 色心耦合以检测旋转系统 Berry 相位的陀螺仪^[58], 利用 NV 色心电子自旋实现高速率操纵 ^{13}C 核自旋, 理论计算其灵敏度为 $3 \times 10^{-3} \text{ rad s}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 。

直到 2021 年, 国内外陆续研制了金刚石 NV 色心原理样机, 斯图加特大学提出了基于 NV 色心系综的 ^{14}N 核自旋陀螺仪, 使用固态超极化 ^{14}N 核自旋系综的双量子

Ramsey 光谱对亚 Hz 级旋转直接测量, 利用采集动态相位等效旋转引起的伪磁场, 验证了 NV 色心系综核自旋陀螺的可能性^[59]。加州伯克利大学基于 ^{14}N 核自旋的角速度传感器, 其利用光学偏振和原子核读数检测 ^{14}N 核自旋进动的射频量子脉冲以实现核双量子 Ramsey 测量^[60], 其实现角速度测量灵敏度达到 $4.7^\circ/\sqrt{\text{s}} (13 \text{ mHz}/\sqrt{\text{Hz}})$, 其零偏稳定性达到 $0.4^\circ/\text{s} (1.1 \text{ mHz})$, 推动了金刚石 NV 色心陀螺技术迈向高精度、器件化方向发展。

3 自旋传感器件集成进展

小型化、集成化是固态原子自旋传感技术从实验室走向工程化应用的必经之路。目前, 国内外学者在金刚石 NV 色心传感器集成化、小型化制造方面开展了大量工作, 主要的集成方式有两种组装式集成和芯片级一体化集成。

3.1 组装集成

基于金刚石 NV 色心的传感器组装集成方面, 主要包含光学系统、微波系统和信息解算系统的集成化 3 方面问题。

对于光学系统的小型化问题, 集成系统中的光激发和光收集问题可以通过金刚石敏感单元与发光二极管、光电二极管的集成来解决^[11,14], 最小探头体积可达 2.9 cm^3 , 如图 11(a) 所示。在系统稳定性方面, 激光光源与 NV 色心光路集成系统的小型化发展, 使集成系统避免了较低的光束浦效率、温度波动和光强波动导致的灵敏度降低等问题^[61], 如图 11(b)、(c) 所示。

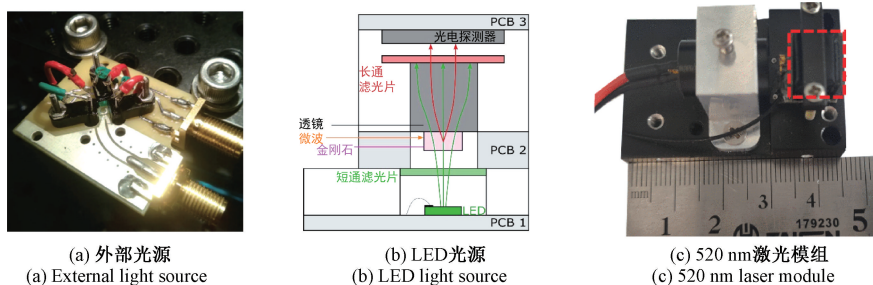


图 11 集成 NV 磁强计中的不同光源

Fig. 11 Different light sources in integrated NV magnetometer

如图 12(a) 所示, 在信息读取与解算系统集成方面, NV 色心自旋信息解算装置通过 NV 色心、8 个独立的锁定模块、一个 4 通道 PID 控制模块和 1 个矢量场等模块集成, 结合现场可编程阵列 (field programmable gate array, FPGA) 芯片对所有数据处理, 实现信息解算系统集成^[62]。

如图 12(b) 所示, 在微波系统和信息解算系统集成方面, 包含有信号产生、微波频率控制、数据处理和读出等基本组件集成, 该集成系统的灵敏度可达 4.2 nT/

$\text{Hz}^{1/2}$ ^[63]。如图 12(c) 所示, 通过采用 Arduino Uno 板, 研究人员在 PCB 上引入自动稳压微控制器和一些附加模块来实现脉冲磁共振测量, 实现了便携化的集成系统, 其体积为 $20 \times 40 \times 10 \text{ cm}^3$ ^[64]。

目前, 金刚石 NV 色心传感器件集成还处于各分立系统的组装集成, 器件集成后导致灵敏度、稳定性等性能指标下降, 未来还需进一步提高集成技术的精度、可控性、互连性等性能, 保障器件集成的灵敏度、稳定性等性能。

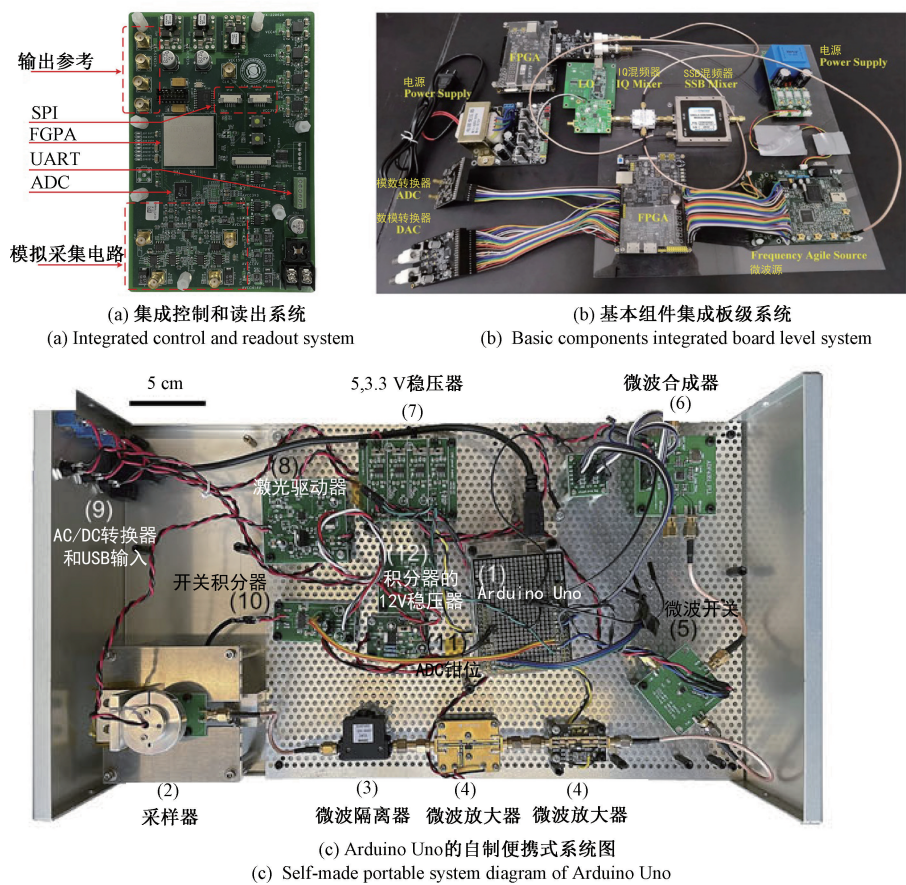


图 12 系统集成磁强计

Fig. 12 System integrated magnetometer

3.2 微纳一体集成

基于金刚石 NV 色心的传感器微纳一体集成是实现固态原子自旋传感器芯片化制造的主要技术途径。目前微纳集成主要技术途径包括:MEMS 微纳加工、3D 打印、CMOS 集成、片上一体集成等技术。中国科学院大学利用标准 MEMS 工艺,采用纳米金刚石与锥形光纤的集成使得 NV 色心与光纤之间的激发荧光有效地耦合,将金刚石与光纤、光电探测器进行集成,实现自旋传感系统小

型化集成,体积为 $1\times1\times0.1\text{ cm}^3$,灵敏度为 $334\text{ pT/Hz}^{1/2}$,如图 13 所示^[65]。3D 打印^[66]、互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor,CMOS) 工艺^[67]和热压键合等组合技术可以将金刚石、微波源、滤波片、光电探测器和 PCB 板等微纳模块集成,实现固态原子自旋传感器件微纳集成。麻省理工学院采用 CMOS 工艺可以将 NV 与微波发生器、光学滤波器和光电探测器进行集成在在 $200\text{ }\mu\text{m}\times200\text{ }\mu\text{m}$ 的空间内,实现具有磁、温同

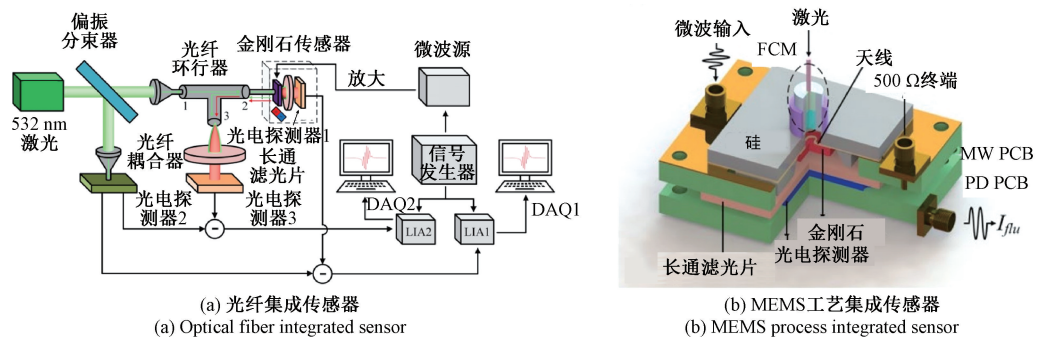


图 13 微纳集成图

Fig. 13 Diagram of micro-nano integration

步测试功能的平台,其磁传感灵敏度为 $2.1\ \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$ [67],如图 14 所示。中北大学提出金刚石 NV 色心嵌入纳米线环激光泵浦及谐振腔增强结构与微波天线

等多功能结构片上集成方案,自旋传感核心功能结构尺寸为 $8\ \mu\text{m}\times 8\ \mu\text{m}$,自旋特征信号增强约 50 倍,磁场传感灵敏度 $83\ \text{nT}/\text{Hz}^{1/2}$ [15],如图 15 所示。

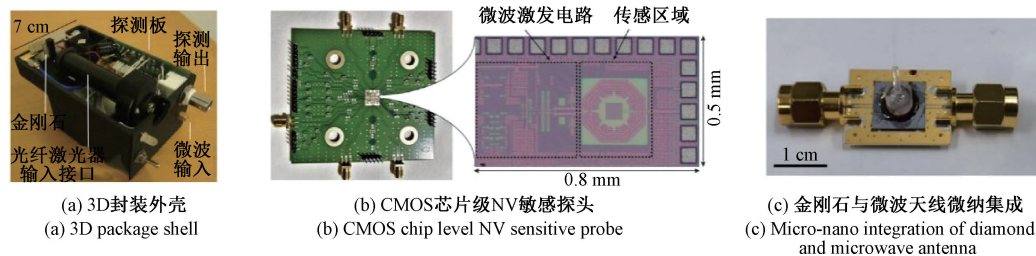


图 14 金刚石 NV 色心系统微纳集成

Fig. 14 Micro-nano integration of diamond NV color center system

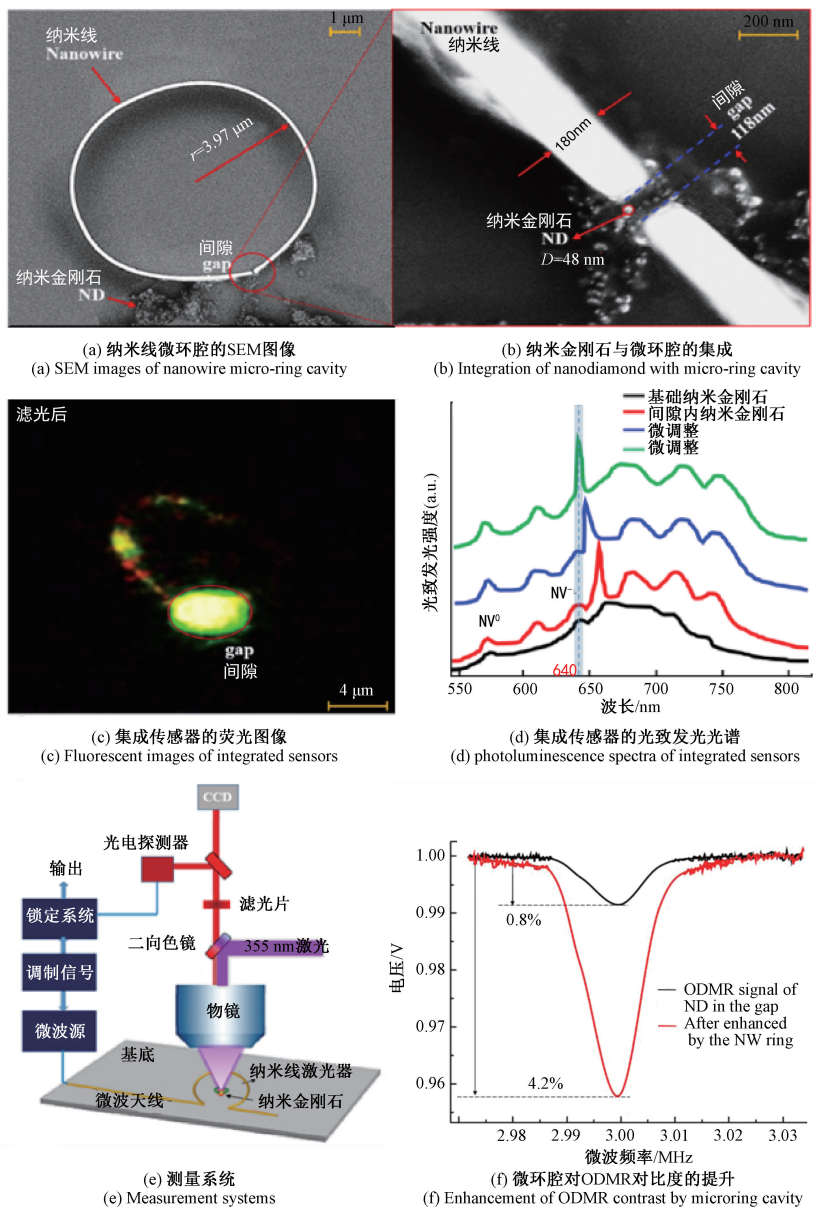


图 15 金刚石 NV 色心系统微纳集成

Fig. 15 Micro-nano integration of the diamond NV color center system

综上所述,基于金刚石 NV 色心的微纳一体化集成方案已取得一定进展,但仍存在技术瓶颈和挑战。受限于目前金刚石 NV 色心加工工艺的限制,NV 色心空间制造和浓度的精确制造、激光/微波激发收集等结构制造及一体集成等工艺技术仍处于起步阶段,还需进一步提升。另外,在实际工程应用中,NV 色心自旋传感器与微电子电路、光学器件和微流体控制芯片等其他领域器件和芯片的兼容制造技术少有报道,也将成为 NV 色心传感器工程应用制造面临的技术难题。

4 结 论

经过多年的发展,具有高极化率、长退相干时间和高保真度的金刚石 NV 色心已被广泛应用于传感磁场、电场、温度和应力等物理量。随着对其传感机理和检测方法的深入研究,NV 色心传感器的性能指标不断提升。此外,NV 色心还可实现裂纹等物理结构检测^[68]。同时,随着金刚石加工工艺技术的逐级成熟,NV 色心传感器正向着集成化和小型化方向发展,微小型、高精度、低成本的金金刚石固态原子自旋传感将会在不久的未来大批量生产,在国防军事、航空航天、生物医学等领域将得到广泛应用^[69-70]。

参考文献

- [1] BALASUBRAMANIAN P, OSTERKAMP C, CHEN Y, et al. Dc Magnetometry with engineered nitrogen-vacancy spin ensembles in diamond [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(9): 6681-6686.
- [2] MA Z, ZHANG S, FU Y, et al. Magnetometry for precision measurement using frequency-modulation microwave combined efficient photon-collection technique on an ensemble of nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Opt Express*, 2018, 26(1): 382-390.
- [3] SAHIN O, DE LEON SANCHEZ E, CONTI S, et al. High field magnetometry with hyperpolarized nuclear spins [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5486.
- [4] MAAYANI S, FOY C, ENGLUND D, et al. Distributed quantum fiber magnetometry [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(7): 1900075.
- [5] TABUCHI H, MATSUZAKI Y, FURUYA N, et al. Temperature sensing with RF-dressed states of nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(2): 024401.
- [6] BURACHENKO A G, RIPPENKO V S, LIPATOV E I, et al. Cathodoluminescence of nitrogen-containing diamond samples at temperatures of 80 ~ 800 K [J]. *Russian Physics Journal*, 2023, 65(11): 1812-1818.
- [7] LI C C, GONG M, CHEN X D, et al. Temperature dependent energy gap shifts of single color center in diamond based on modified Varshni equation [J]. *Diamond and Related Materials*, 2017, 74: 119-124.
- [8] BIAN K, ZHENG W, ZENG X, et al. Nanoscale electric-field imaging based on a quantum sensor and its charge-state control under ambient condition [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2457.
- [9] KOBAYASHI S, MATSUZAKI Y, MORISHITA H, et al. Electrical control for extending the ramsey spin coherence time of ion-implanted nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(4): 044033.
- [10] VAN OORT E, GLASBEEK M. Electric-field-induced modulation of spin echoes of N-V centers in diamond [J]. *Chemical Physics Letters*, 1990, 168(6): 529-532.
- [11] CAPPELLARO P. Quantum spin gyroscope [R]. *Massachusetts Inst of Tech Cambridge*, 2015.
- [12] LI R, KONG F, ZHAO P, et al. Nanoscale electrometry based on a magnetic-field-resistant spin sensor [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(24): 247701.
- [13] SASAKI K, MONNAI Y, SAIJO S, et al. Broadband, large-area microwave antenna for optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(5): 053904.
- [14] STÜRNER F M, BRENNEIS A, KASSEL J, et al. Compact integrated magnetometer based on nitrogen-vacancy centres in diamond [J]. *Diamond and Related Materials*, 2019, 93: 59-65.
- [15] GUO H, GAO Y, QIN Y, et al. NV center pumped and enhanced by nanowire ring resonator laser to integrate a 10 μm -scale spin-based sensor structure [J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(5): 055502.
- [16] OON J T, TANG J, HART C A, et al. Ramsey envelope modulation in NV diamond magnetometry [J]. *Physical Review B*, 2022, 106(5): 054110.
- [17] PHAM L M, LE SAGE D, STANWIX P L, et al. Magnetic field imaging with nitrogen-vacancy ensembles [J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(4): 045021.

- [18] DOHERTY M W, DOLDE F, FEDDER H, et al. Theory of the ground-state spin of the NV center in diamond[J]. *Physical Review B*, 2012, 85(20): 205203.
- [19] ACOSTA V M, BAUCH E, LEDBETTER M P, et al. Temperature dependence of the nitrogen-vacancy magnetic resonance in diamond [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(7): 070801.
- [20] HUXTER W S, SAROTT M F, TRASSIN M, et al. Imaging ferroelectric domains with a single-spin scanning quantum sensor[J]. *Nature Physics*, 2023; 1-5.
- [21] TAMARAT P, GAEBEL T, RABEAU J R, et al. Stark shift control of single optical centers in diamond [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(8): 083002.
- [22] IVÁDY V, SIMON T, MAZE J R, et al. Pressure and temperature dependence of the zero-field splitting in the ground state of NV centers in diamond: A first-principles study[J]. *Physical Review B*, 2014, 90(23): 235205.
- [23] KITAGAWA R, NAGATA S, ARAI K, et al. Pressure sensor using a hybrid structure of a magnetostrictive layer and nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19(4): 044089.
- [24] BARSON M S J, OBERG L M, MCGUINNESS L P, et al. Nanoscale vector electric field imaging using a single electron spin [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(7): 2962-2967.
- [25] ROGERS L J, JAHNKE K D, METSCH M H, et al. All-Optical initialization, readout, and coherent preparation of single silicon-vacancy spins in diamond [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(26): 263602.
- [26] SANTORI C, TAMARAT P, NEUMANN P, et al. Coherent population trapping of single spins in diamond under optical excitation [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(24): 247401.
- [27] MAZE J R, STANWIX P L, HODGES J S, et al. Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond [J]. *Nature*, 2008, 455 (7213): 644-647.
- [28] DRÉAU A, LESIK M, RONDIN L, et al. 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.
- [29] AKHMEDZHANOV R, GUSHCHIN L, NIZOV N, et al. Microwave-free magnetometry based on cross-relaxation resonances in diamond nitrogen-vacancy centers [J]. *Physical Review A*, 2017, 96(1): 013806.
- [30] WICKENBROCK A, ZHENG H, BOUGAS L, et al. Microwave-free magnetometry with nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(5): 053505.
- [31] CHATZIDROSOS G, WICKENBROCK A, BOUGAS L, et al. Miniature cavity-enhanced diamond magnetometer[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(4): 044019.
- [32] ZHANG J, LIU T, XU L, et al. A pulsed lock-in method for DC ensemble nitrogen-vacancy center magnetometry [J]. *Diamond and Related Materials*, 2022, 125: 109035.
- [33] SCHLOSS J M, BARRY J F, TURNER M J, et al. Simultaneous broadband vector magnetometry using solid-state spins [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(3): 034044.
- [34] ZHENG H, SUN Z, CHATZIDROSOS G, et al. Microwave-Free vector magnetometry with nitrogen-vacancy centers along a single axis in diamond [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(4): 044023.
- [35] ZHAO M, LIN Q, MENG Q, et al. All fiber vector magnetometer based on nitrogen-vacancy center [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(5): 949.
- [36] HANSON R, GYWAT O, AWSCHALOM D D. Room-temperature manipulation and decoherence of a single spin in diamond [J]. *Physical Review B*, 2006, 74(16): 161203.
- [37] LARAoui A, HODGES J S, MERILES C A. Magnetometry of random AC magnetic fields using a single nitrogen-vacancy center [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(14): 143104.
- [38] NAYDENOV B, DOLDE F, HALL L T, et al. Dynamical decoupling of a single-electron spin at room temperature[J]. *Physical Review B*, 2011, 83(8): 081201.
- [39] PHAM L M, BAR-GILL N, BELTHANGADY C, et al. Enhanced solid-state multispin metrology using dynamical decoupling [J]. *Physical Review B*, 2012, 86(4): 045214.
- [40] ZHAO N, HONERT J, SCHMID B, et al. Sensing single

- remote nuclear spins[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(10): 657-662.
- [41] WOLF T, NEUMANN P, NAKAMURA K, et al. Subpicotesla diamond magnetometry [J]. *Physical Review X*, 2015, 5(4): 041001.
- [42] CHEN X D, DONG C H, SUN F W, et al. Temperature dependent energy level shifts of nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(16): 161903.
- [43] LIU G Q, LIU R B, LI Q. Nanothermometry with enhanced sensitivity and enlarged working range using diamond sensors[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2023, 56(2): 95-105.
- [44] DOLDE F, FEDDER H, DOHERTY M W, et al. Electric-field sensing using single diamond spins [J]. *Nature Physics*, 2011, 7(6): 459-463.
- [45] DOLDE F, DOHERTY M W, MICHL J, et al. Nanoscale detection of a single fundamental charge in ambient conditions using the NV⁻ center in diamond[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(9): 097603.
- [46] QIU Z, HAMO A, VOOL U, et al. Nanoscale electric field imaging with an ambient scanning quantum sensor microscope [J]. *NPJ Quantum Information*, 2022, 8(1): 107.
- [47] VAN OORT E, STROOMER P, GLASBEEK M. Low-field optically detected magnetic resonance of a coupled triplet-doublet defect pair in diamond [J]. *Physical Review B*, 1990, 42(13): 8605-8608.
- [48] NEUMANN P, KOLESOV R, JACQUES V, et al. Excited-state spectroscopy of single NV defects in diamond using optically detected magnetic resonance[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(1): 013017.
- [49] DOHERTY M W, STRUZHNIKIN V V, SIMPSON D A, et al. Electronic properties and metrology applications of the diamond NV⁻ center under pressure [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(4): 047601.
- [50] STEELE L G, LAWSON M, ONYSZCZAK M, et al. Optically detected magnetic resonance of nitrogen vacancies in a diamond anvil cell using designer diamond anvils[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(22): 221903.
- [51] HO K O, LEUNG M Y, JIANG Y, et al. Probing local pressure environment in anvil cells with nitrogen-vacancy (N-V⁻) centers in diamond [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(2): 024041.
- [52] CAI J, JELEZKO F, PLENIO M B. Hybrid sensors based on colour centres in diamond and piezoelectric layers[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 4065.
- [53] XU Z, YIN Z Q, HAN Q, et al. Quantum information processing with closely-spaced diamond color centers in strain and magnetic fields [Invited] [J]. *Opt Mater Express*, 2019, 9(12): 4654-4668.
- [54] MARSHALL M C, EBADI R, HART C, et al. High-precision mapping of diamond crystal strain using quantum interferometry [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17(2): 024041.
- [55] LEDBETTER M P, JENSEN K, FISCHER R, et al. Gyroscopes based on nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. *Physical Review A*, 2012, 86(5): 052116.
- [56] AJOY A, CAPPELLARO P. Stable three-axis nuclear-spin gyroscope in diamond [J]. *Physical Review A*, 2012, 86(6): 062104.
- [57] KOWARSKY M A, HOLLENBERG L C L, MARTIN A M. Non-Abelian geometric phase in the diamond nitrogen-vacancy center[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(4): 042116.
- [58] SONG X, WANG L, DIAO W, et al. Quantum gyroscope based on Berry phase of spins in diamond[C]. *Fourth Seminar on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application*, SPIE, 2018, 10697: 1155-1159.
- [59] SOSHENKO V V, BOLSHEDVORSKII S V, RUBINAS O, et al. Nuclear spin gyroscope based on the nitrogen vacancy center in diamond[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(19): 197702.
- [60] JARMOLA A, LOURETTE S, ACOSTA V M, et al. Demonstration of diamond nuclear spin gyroscope [J]. *Science Advances*, 7(43): eabl3840.
- [61] WANG X, ZHENG D, WANG X, et al. Portable diamond NV magnetometer head integrated with 520 nm diode laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(6): 5580-5587.
- [62] TONG Y, ZHANG W, QIN X, et al. A customized control and readout device for vector magnetometers based on nitrogen-vacancy centers [J]. *Review of Scientific*

- Instruments, 2023, 94(1): 014709.
- [63] XIE F, HU Y, LI L, et al. A microfabricated fiber-integrated diamond magnetometer with ensemble nitrogen-vacancy centers [J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(19): 191104.
- [64] MARIANI G, UMEMOTO A, NOMURA S. A home-made portable device based on Arduino Uno for pulsed magnetic resonance of NV centers in diamond [J]. AIP Advances, 2022, 12(6): 065321.
- [65] XIE F, LIU Q, HU Y, et al. A microfabricated diamond quantum magnetometer with picotesla scale sensitivity [C]. 2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, 2023: 157-160.
- [66] WEBB J L, CLEMENT J D, TROISE L, et al. Nanotesla sensitivity magnetic field sensing using a compact diamond nitrogen-vacancy magnetometer [J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(23): 231103.
- [67] KIM D, IBRAHIM M I, FOY C, et al. A CMOS-integrated quantum sensor based on nitrogen-vacancy centres [J]. Nature Electronics, 2019, 2(7): 284-289.
- [68] 赵 龙,王 鑫,罗大程,等. 基于金刚石氮-空位色心的裂纹无损检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 239-246.
- ZHAO L, WANG X, LUO D CH, et al. Von-gestructive testing for weld seam based on nitrogen-vacancy co or center in the diamono [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (7): 239-246.
- [69] 胡 敏,董海峰,江唯鸣,等. 高频调制矢量原子磁力仪综述 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 1-14.
- HU M, DONG H F, JIANG W M, et al. Review of high frequency modulation vector atomic magnetometers [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 (2): 1-14.
- [70] 李博阳,廖柯熹,何国玺,等. 弱磁检测技术研究进展与展望 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 1-14.
- LI B Y, LIAO K X, HE G X, et al. Research progresses and prospects of weak magnetic testing technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 1-14.

作者简介



秦岳, 2021 年于中北大学获得学士学位, 现为中北大学在读博士生, 主要研究方向为量子传感与精密测量。

E-mail: qygyx@163.com

Qin Yue received his B. Sc. degree from North University of China in 2021. He is currently a Ph. D. candidate at North University of China. His main research interests include quantum sensing and precise measurement.



刘俊(通信作者), 1990 年于华北工学院(现中北大学)获得学士学位, 1998 年于北京理工大学获得硕士学位, 2001 年于北京理工大学获得博士学位, 现为中北大学副校长, 主要研究方向为微纳光量子器件与智能测量、仿生传感与惯性导航。

E-mail: liuj@nuc.edu.cn

Liu Jun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from North China Institute of Technology (North University of China) in 1990, received his M. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 1998, and received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2001. He is currently the deputy present of North University of China. His main research interests include micro-nano optical quantum devices and intelligent measurement, bionic sensing and inertial navigation.