

激光与光电子学进展

基于金刚石氮-空位色心的光纤量子传感

刘勇, 林豪彬, 张少春, 董杨, 陈向东, 孙方稳*

中国科学技术大学中国科学院量子信息重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 金刚石中的氮-空位(NV)色心在室温下具有稳定的荧光发射,超长的电子自旋相干时间以及许多优良的光学性质,可以对电磁场,温度进行高灵敏度表征。光纤传感技术近几年来发展迅速,在电力、化工、交通、医疗、环保及军事等领域得到广泛应用。光纤体系由于其集成度、实用性高以及操作便捷性,且具有优良的传输光能力,损耗较低,可与NV色心结合,形成一种高集成化、高灵敏度的便捷性传感系统,未来将会作为传感器件投入到许多领域的应用中,例如对生物细胞、材料温度、磁场等物理量的高灵敏度测量。本综述主要介绍NV色心体系的光纤量子传感技术的工作原理、实现方式以及在相关领域的应用。

关键词 氮-空位色心; 光纤; 量子传感

中图分类号 O431.2 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP230704

Optical Fiber Quantum Sensing Based on Diamond Nitrogen-Vacancy Center

Liu Yong, Lin Haobin, Zhang Shaochun, Dong Yang, Chen Xiangdong, Sun Fangwen*

CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, Anhui, China

Abstract Nitrogen-vacancy (NV) color center has stable fluorescence emission at room temperature, ultra-long electron spin coherence time, and excellent optical properties. In the field of quantum sensing, it has excellent performance in electromagnetic field and temperature sensing with high sensitivity. Optical fiber sensing technology has been developed rapidly in recent years with wide applications. Optical fiber system can be combined with NV color center because of its integration, high practicability, and easy operation, showing excellent optical transmission capacity and low loss. This optical fiber-based quantum sensor system can be applied to biological, material temperature, magnetic field, and other physical measurements. This review mainly introduces the working principle, methods, and applications of fiber quantum sensing technology based on NV color center system.

Key words nitrogen-vacancy; optical fiber; quantum sensing

1 引言

量子信息技术近些年来成为了研究热点之一,其中包括量子计算、量子通信、量子传感三大领域。量子传感利用量子态演化与测量去实现对物理量的高灵敏度检测,是量子信息技术中一项重要的研究方向。目前研究广泛的量子传感器有原子蒸气(Atomic vapors)^[1-2]、超导量子干涉仪(SQUID)^[3]、离子阱(Trapped ions)^[4]以及以金刚石氮-空位(NV)色心^[5]为代表的固态自旋等,并且各类传感器的所测物理量以

及磁场探测灵敏度指标如表1所示。在这些传感器中,原子蒸气需在高温条件下实现对微弱磁场的高灵敏度探测,而SQUID需在低温条件下以极高灵敏度探测微弱的磁场,但高温以及低温实验带来了许多挑战如大型设备的高成本以及运行的难度等。在此情况下NV色心作为室温下固态自旋的代表性体系备受青睐^[6]。NV色心在室温下具有很多独特的性质,如优越的光学性质、超长的电子自旋相干时间、良好的可拓展性、成熟的微波操作技术以及简易的光学读出手段。近年来,NV色心已经成为室温固态量子传感中最有

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-03-23; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(62225506)

通信作者: *fwsun@ustc.edu.cn

潜力的研究方向之一^[7-10]。基于激光和微波实现的 NV 色心电子自旋量子态操控和探测,可以实现对磁场^[11]、温度^[12]、电场^[13]、应力^[14]等物理量的精密测量。依据传感单元的尺寸和传感方式,基于金刚石 NV 色心的传感系统可以分为共聚焦光路^[15]、宽场成像^[16]、光纤体系^[17-33]等。共聚焦传感体系的优点是具有高空间分辨率,但是其系统不稳定、荧光收集效率受物镜数值孔径限制、集成化较难;宽场成像的优点是视场大、分辨率高,但是系统捕捉的背景荧光影响对比度和分辨率,也不易集成;光纤传感系统较前两者牺牲了空间分辨率,但是提升了测量灵敏度、稳定性以及集成度。经过多年的发展,这些系统已经发展得较为成熟,并成功地应用在微纳尺寸传感、磁成像、空间弱磁探测的领域。

然而,无论是科研还是工业领域,传感器都会朝着

高灵敏度和高集成度的方向发展。在这个趋势下,基于 NV 色心光纤传感体系的优势脱颖而出,目前在很多科学领域取得丰富的研究成果。在生物医学领域,可以通过光纤量子探针辨别磁性物质^[34],可以对细胞的温度进行测量^[35-36],也可以检测生物医药领域的磁性纳米颗粒的浓度^[37];在材料科学领域,可作为磁强计或是磁场梯度计实现磁场的测量^[38-40],同时也可以测量芯片表面温度分布^[41],还可以利用该体系进行电路诊断^[42],以及磁性材料的无损检测^[43-44]等。随着相关技术的不断提高,光纤体系结合量子传感技术在灵敏度等方面的优势进一步突出,已经逐步发展出光纤量子传感的新领域,将来会在科学研究、工业测量、生物医疗等方面发挥重要的研究和应用价值。本文主要介绍的是基于 NV 色心的光纤量子传感多物理量测量的原理及其应用。

表 1 各类量子传感器性能对比

Table 1 Performance comparison of various quantum sensors

Types of sensors	Measured quantity	Magnetic fieldsensitivity	Reference
Atomic vapors	Magnetic field, rotation, time	0.16 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[2]
SQUID	Magnetic field	0.2 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[3]
Trapped ions	Magnetic field, time, rotation, electric field	4.6 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[4]
NV center	Magnetic field, electric field, temperature, pressure	0.2 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[5]

2 NV 色心系统简介基本原理

2.1 NV 色心结构与能级

金刚石中的单个氮-空位色心是由一个氮原子与其附近的一个空位形成的点缺陷,如图 1(a)所示。这种缺陷存在 C_{3v} 对称性^[45],对称轴的方向也称为 NV 色心的轴向。NV 色心通常有两种电荷态 NV^- 和 NV^0 ,由于操控 NV^- 的方法很多,而 NV^0 操控的能力很弱,故对 NV^- 的研究占大多数,下文若无特别强调,NV 色心均为 NV^- 。如图 1(b)所示,NV 色心的能级的基态 3A_2 以及激发态 3E 都为自旋三重态,亚稳态 1A_1 和 1E 是自旋单态。基态由于零场劈裂形成 $m_s = \pm 1$ 与 $m_s = 0$ 能级,且零场劈裂值 $D = 2.87 \text{ GHz}$ 。图 1(b)中

的 637 nm 称为零声子线,它表示 NV 色心电子直接从激发态回到基态发射的光子波长。对于基态中位于 $m_s = 0$ 能级的电子,它被激光激发至激发态的能级后会直接回到基态中的 $m_s = 0$,而对于基态的能级 $m_s = \pm 1$ 上的电子,它被激光激发至激发态的 $m_s = \pm 1$ 能级后,会有一定的概率跃迁至亚稳态的 1A_1 ,此过程不会辐射出光子,然后很快衰减至 1E 能级,并最终衰减至基态中的 $m_s = 0$ 能级上,期间会发射出光子。以上为不同基态能级的 NV 色心经过 532 nm 激发后发射光子的过程,并且也可以看出,不管 NV 色心的初始状态是位于哪个能级上,最终都会经过 532 nm 激光的激发初始化到基态中的 $m_s = 0$ 能级上,这个操作叫作自旋极化。另一方面,当电子自旋的初态位于 $m_s = \pm 1$

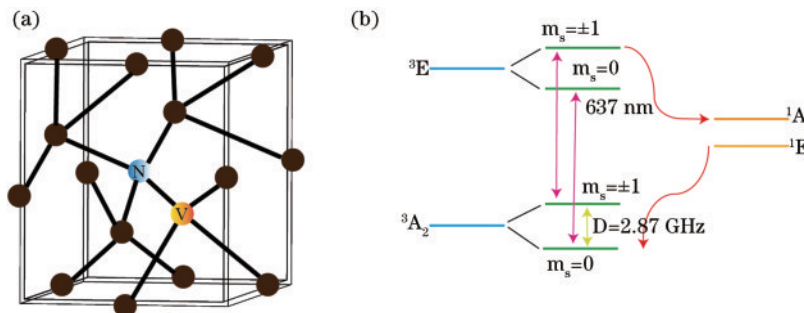


图 1 NV 色心的结构。(a) NV 色心的结构图,其中黑色球表示碳原子;(b) NV 色心能级结构图

Fig. 1 Structure of NV color center. (a) Structure diagram of NV color center, black circle represents the carbon atom; (b) energy level diagram of NV color center

的时候,电子回到基态会经过亚稳态,导致整个自发辐射的时间变长,相较于自旋态 $m_s = 0$ 会直接回到基态的过程,单位时间内发射的光子数目减少,因此可以看出 NV 色心的荧光强度依赖于电子自旋状态,故可以通过发射的荧光强度判断电子自旋状态,以上特点也奠定了 NV 色心电子自旋操控的基础。

2.2 NV 色心电子基态能级的自旋哈密顿量

由量子力学的理论可知,金刚石中 NV 色心的自旋系统可以简化为电子自旋本身与外界环境之间的相互作用^[46]。数学上可以用哈密顿量 H 描述为

$$H = DS_z^2 + E(S_x^2 - S_y^2) + \gamma_e \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} + \sum A_i \cdot I_i, \quad (1)$$

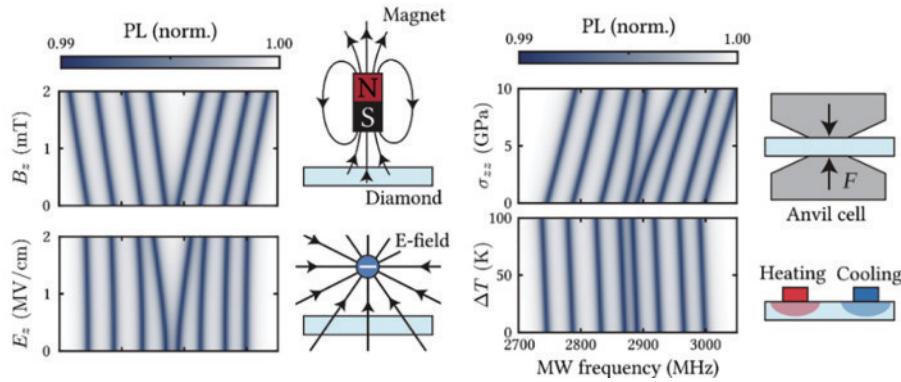


图 2 利用 ODMR 对不同物理量进行测量^[47]

Fig. 2 Different physical quantity measurements with ODMR^[47]

目前主要是针对磁场与温度的测量,在不考虑应力以及核自旋的影响下,测量磁场原理如下:由式(1)可知,当只对 NV 色心施加直流磁场时,系统的哈密顿量可以表示为

$$H = D(T)S_z^2 + \gamma_e \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}. \quad (2)$$

通常使用连续 ODMR 方法^[48-51]:NV 色心在连续光的激发下,电子自旋会有一些的概率初始化到基态中的 $m_s = 0$,在连续施加的微波场的作用下,当微波频率与基态能级的共振频率一致的时候,系统处在 $m_s = 0$ 与 $m_s = \pm 1$ 的叠加状态,这时 NV 色心发射的荧光会减弱,因此 ODMR 谱线会出现一个低谷,通过对微波进行扫频,就可以得到 NV 色心基态电子的共振频率

$$\nu_{\pm} = D(T) \pm \gamma_e B_{NV}. \quad (3)$$

通过该共振频率就可以计算出磁场大小 $B_{NV} = \frac{\nu_+ - \nu_-}{2\gamma_e}$ 。

测量温度原理如下:根据式(1), $D(T)$ 值的变化同样影响着系统的哈密顿量。利用 NV 色心体系测量温度主要是观察 D 值的移动,测量 D 值最简单的方法是采用 ODMR 技术^[52],可以施加平行于 NV 轴向的偏置磁场,探测出 $m_s = 0$ 到 $m_s = \pm 1$ 的跃迁频率 ν_{\pm} ,然后利用 $D(T) = \frac{\nu_- + \nu_+}{2}$ 求出零场劈裂。基于金刚石的高德拜温度模型,中国科学技术大学孙方稳小组得

出了一个经验公式^[53]用于描述 NV 色心 D 值与零声子线随温度变化的关系,

$$D(T) = D(0) - \frac{AT^4}{(T+B)^2}, \quad (4)$$

式中: $D(0)$ 、 A 和 B 均为拟合参数。 $D(T)$ 和 $D(0)$ 根据描述的物理量(零场劈裂或零声子线)做了相应变化:在低温下,温度按四次方变化;在高温条件下,温度呈二次方变化;室温范围内, $D(T)$ 值与温度的关系近似呈线性 $dD(T)/dT = 74.2 \text{ kHz/K}$ ^[54]。

3 基于 NV 色心的光纤量子传感体系及原理

3.1 光纤传感体系及原理

光纤传感器是将被测对象的状态通过在光纤中转化为光信号输出的传感器,由于其成本低、质量轻、耐腐蚀耐高温、抗电磁干扰能力强,并且可以在极端恶劣的条件下进行温度、磁场、应力、电场、气体、折射率等物理量的测量,故其在工业、生物等领域已被广泛应用。传统的光纤传感器主要原理有法拉第电磁感应、光弹效应、磁致伸缩效应、布里渊和拉曼散射以及双折射效应等。根据不同的传感位置,可以将光纤传感器大致分为两种体系:反射式和透射式。反射式光纤体系一般是将传感材料放置于光纤末端,而透射式体系

的传感区一般位于光纤之中,甚至光纤本身就是传感器,实际应用中会根据具体的传感应用场景选择合适的体系以及结构。最常见的光纤主要分为两类:单模光纤(SMF)与多模光纤(MMF)。它们的结构都是由两部分组成:纤芯与包层。在制备的过程中,一般使得纤芯比包层折射率稍高,从而在光纤中传输光时能发生全反射并向前传播,全反射其中有小部分光从纤芯透过到包层,并沿着包层界面流过波长量级的距离,也被称为倏逝波,倏逝波深度 d_p 是一个倏逝波光纤传感的重要参数,如图 3^[55]所示, d_p ^[56]表达式为

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{medium}}^2}} \quad (5)$$

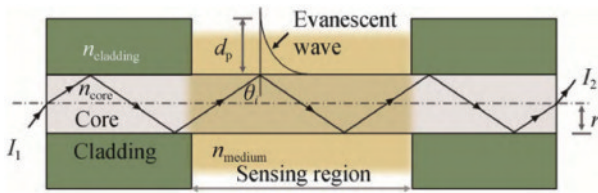


图 3 倏逝波传感原理图^[55]

Fig. 3 Schematic diagram of evanescent wave sensing^[55]

基于光纤倏逝波传感器具有高灵敏度、响应速度快、易与其他传感技术结合等特点,并且可以优化传感区域结构类型使得灵敏度得到进一步提高,如改变光纤的结构,采用光纤锥、裸光纤、U形、D形等,或添加

微结构,如光子晶体光纤。目前,光纤传感与微纳技术、材料技术、生物技术相结合,应用于很多交叉领域。在量子传感领域,科研工作者针对更高效率与稳定性荧光收集的需求,提出了将光纤与 NV 色心体系相结合的近场收集系统,从而建立高灵敏度、高集成化的量子传感体系。

3.2 基于 NV 色心的反射式与透射式光纤量子传感

将光纤体系与 NV 色心结合在一起时,最简单的方法是在光纤的末端放上金刚石样品,如图 4(a)^[57]所示。通过同一根光纤传输激发光并且完成荧光的收集。2014 年 Fedotov 等^[57]使用直径大约 250 μm 的块状金刚石, NV 色心浓度为 10^{14}cm^{-3} , 贴附在多模光纤顶部,在外加磁场的作用下,通过该结构实现金刚石 NV 色心的激发以及荧光的收集,并且在外加微波传输线与磁场对 NV 色心电子自旋进行操控、极化以及读取。2022 年 Ishikawa 等^[58]采用一种多模光纤内窥镜结构,与光纤中的纳米金刚石颗粒耦合后,通过测量温度变化后的荧光光谱,证明了零声子线峰值波长的温度依赖性,并对光谱系统中的波长以及灵敏度进行标定。另外 2022 年中国科学技术大学孙方稳小组利用金刚石与多模光纤耦合^[41],通过在金刚石的外表面镀上银反射膜从而提高荧光效率以及激发效率,此外,通过优化脉冲 ODMR 测量序列,得到了 100 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的磁场灵敏度以及 4.1 kHz 的带宽,如图 4(b)^[41]所示。

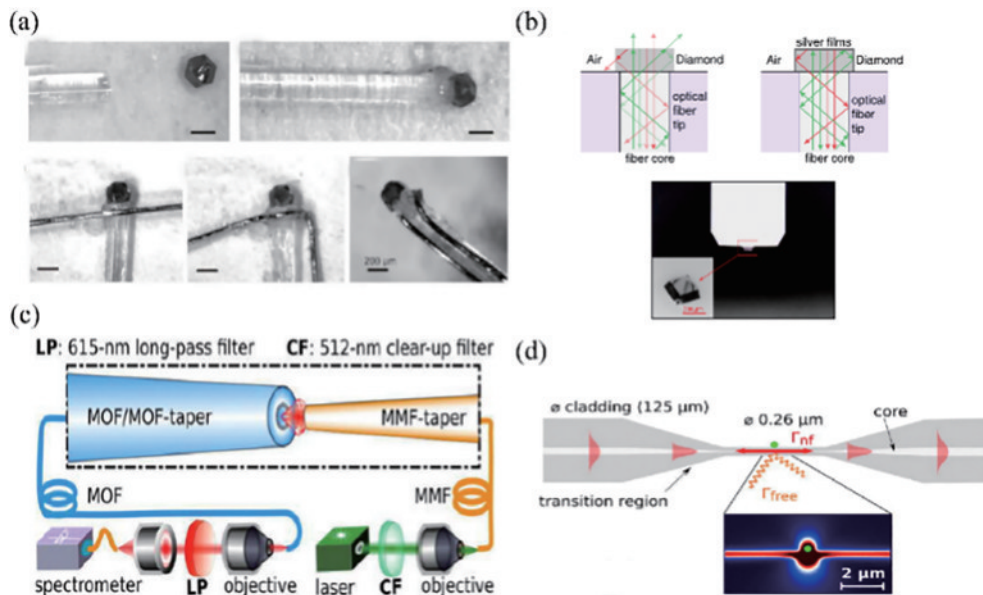


图 4 反射式与透射式的实验装置图。(a)制作光纤探头的步骤示意图^[57]; (b)金刚石表面镀银反射膜示意图以及未镀银膜时显微镜下观察的图像^[41]; (c)通过两个光纤锥完成对激发光的传输以及荧光的收集^[59]; (d)锥形光纤的结构图^[60]

Fig. 4 Experimental equipment diagram of reflection type and transmission type. (a) Schematic diagram of the steps for making the fiber probe^[57]; (b) schematic diagram of silver-coated reflection film on diamond surface and microscope image without silver-coated film^[41]; (c) transmission of excitation light and collection of fluorescence are completed through two optical fiber cones^[59]; (d) structure diagram of tapered optical fiber^[60]

另一种方法就是将金刚石置于光纤传输的中间段,使得传输与收集单向进行,如图 4(c)^[59]所示。通

过将金刚石样品置于两根光纤锥中间的结构,以及对金刚石的单向激发与收集能有效地提高荧光的收集效

率,该结果与裸多模光纤相比,收集效率提升了 3.35 倍,与单根光纤锥相比,收集效率提升了 2.75 倍^[59]。另外,2013 年德国实验室通过锥形光纤结构实现了单个纳米金刚石晶体的按需定位以及其与纳米光纤模式的高效耦合^[60],耦合效率大约为 10%。如图 4(d)^[60]所示。

3.3 基于 NV 色心的倏逝波光纤量子传感

灵敏度是传感领域一个重要的衡量传感器性能指标参数,为了极大提高 NV 色心体系测量的灵敏度,结合光纤倏逝波传感技术,目前已取得了许多成果^[61-63]。如 3.1 节所说,倏逝波深度与灵敏度息息相关,可通过改进传感体系的结构来达到目的。如图 5(a)^[64]所示,光纤锥结构的制备方法有熔融拉锥法、化学刻蚀法,锥形结构可以增加光纤内部全内反射次数使得光纤表面倏逝波强度增强,因此金刚石样品与倏逝波接触范围更大,从而增加 NV 色心的激发效率,最终提高传感灵敏度,锥形光纤的倏逝波深度可用式(5)表示。早在 2013 年,孙万稳小组通过将纳米金刚石沉积在锥形光纤尖端成功耦合,实现对光纤输出

端的检测^[38]。利用该方案探测到了单个 NV 色心的电子自旋共振谱,证明该结构可作为磁力计。2022 年暨南大学团队^[34]采用锥形光纤探针,即将金刚石颗粒粘在锥形光纤上,结合聚磁结构以及微波天线实现了对磁场的高灵敏度测量,如图 5(b)^[34]所示。除了锥形结构外,目前 U 形结构也有所突破,如图 5(c)^[65]所示。2021 年西北大学团队^[65]制备该光纤反射镜探头,通过该结构实现了对温度变化的高灵敏度测量,并且为实现全光学测温提供一种手段。另外,光子晶体光纤(PCF)也可与金刚石进行耦合实现高灵敏度探测,PCF 的工作原理是内部全反射形成波导,相比于传统的折射率传导,光子晶体包层的有限折射率允许纤芯有更高的折射率,可以增大光纤的数值孔径(NA)。如图 5(d)^[66]所示。早在 2011 年 Fedotov 等^[67]就将 PCF 与 NV 色心结合,提高了在 NV 色心零声子线光致发光效应中的对比度,也为以后光纤与 NV 色心体系的结合提供了一个平台。2016 年该研究小组^[66]优化该传感器的结构实现了 30 μm 以下的空间分辨率,以及高灵敏度的磁场测量。

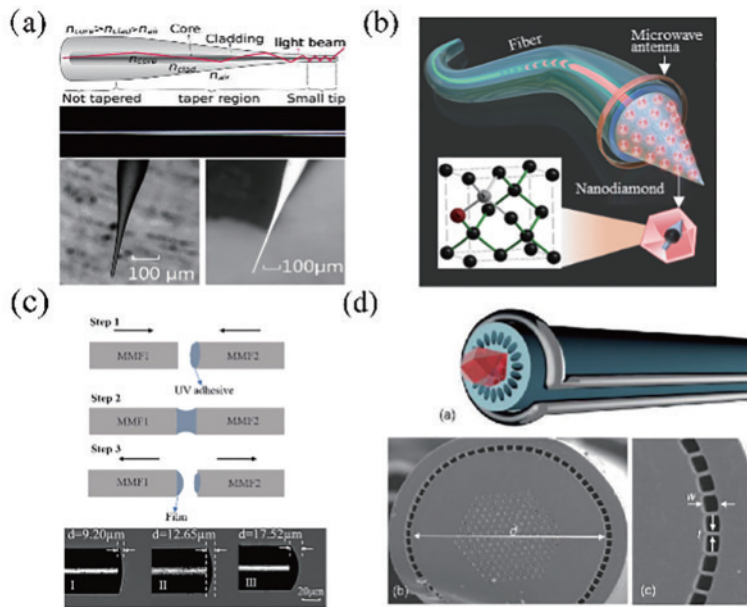


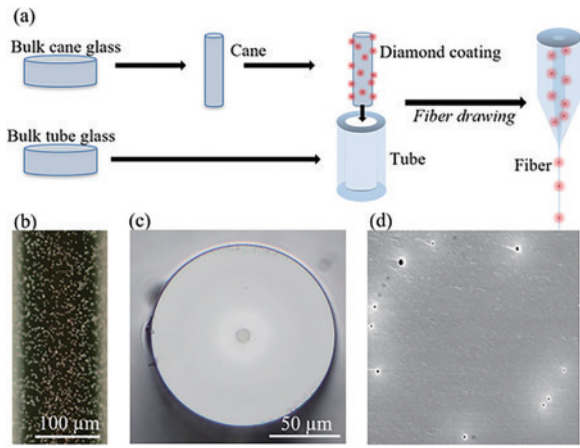
图 5 倏逝波光纤传感结构图。(a)锥形光纤尖端^[64]; (b)锥形光纤探针(红色晶体为金刚石颗粒^[34]); (c) U形光纤结构^[65]; (d) NV-光子晶体传感器^[66]

Fig. 5 Evanescent wave optical fiber sensing structure. (a) Tapered fiber tip^[64]; (b) tapered fiber probe (red crystal is diamond particle^[34]); (c) U-shaped fiber structure^[65]; (d) NV-photon crystal fiber sensor^[66]

3.4 基于 NV 色心的玻璃光纤量子传感

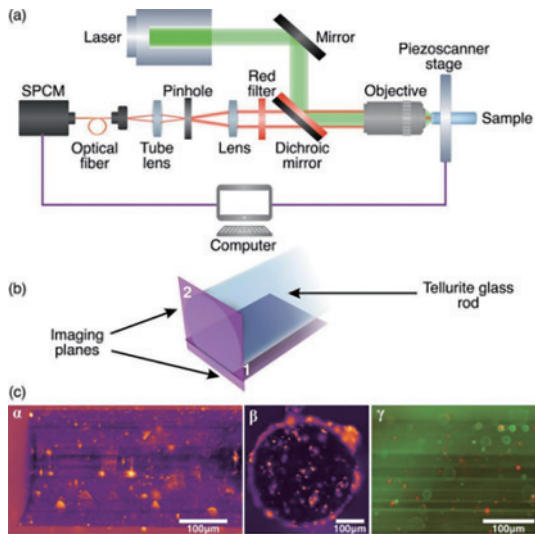
除了研究光纤结构以外,光纤材料也是研究的一大热点,常见光纤纤芯为石英玻璃(主要材料为二氧化硅,折射率为 1.5 左右),而金刚石折射率为 2.41,接触时产生的散射光使得损耗较大。目前正在寻找更加适合金刚石 NV 色心体系的光纤材料,比如掺铅硅酸盐玻璃(F2)光纤^[68-71]、碲酸盐玻璃光纤^[72-78]等材料。如图 6^[68]所示,2020 年 Bai 等^[68]基于该 F2/F2 掺杂光纤与纳米金刚石颗粒耦合,实现了 4.0 dB/m 的低损耗下测

量直流磁场的灵敏度可达 $350 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。另外,2022 年波兰华沙大学 Filipkowski 等^[71]利用 F2 光纤纤芯微结构与纳米金刚石颗粒的耦合,在微波场下得到了 7% 的对比度,并通过对光纤导出模式的读取,得出了该光纤探头的磁场灵敏度为 $0.5 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。同时,该组还利用 790 根 F2 芯胚,通过纤维拉丝堆叠成纤芯,从而制成阶跃折射率纤维,纳米金刚石颗粒掺杂其中,通过验证荧光强度的磁依赖性,得出该光纤探头具有 0~

图 6 F2 掺杂金刚石颗粒制备光纤的过程^[68]Fig. 6 Fabrication of optical fibers by F2 doped diamond particles^[68]

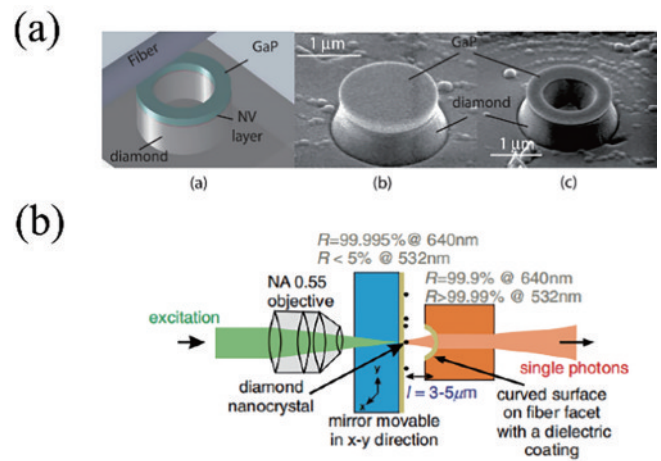
35 mT 的磁强测量范围^[70]。

另外基于碲酸盐玻璃光纤也有着系列的研究：2011 年澳大利亚团队证实了在碲酸盐玻璃光纤中的纳米金刚石可作为良好的单光子源^[72-73]，在 2014 年该组又对该体系下的光纤损耗、纳米金刚石在其光纤内的活性以及最佳的掺杂浓度做了研究^[74-75]，然后在 2018 年基于该体系实现了磁场测量^[77]，得到了灵敏度为 $11 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在 2021 年，来自波兰的团队也在该体系下，通过掺杂更大体积的金刚石纳米颗粒，荧光光谱检测到了 NV 色心的共振峰，该掺杂光纤实现了对温度和磁场的同时测量^[78]，如图 7^[78]所示。

图 7 掺杂金刚石的碲酸盐玻璃光纤。(a) 实验装置；(b) 碲酸盐光纤示意图；(c) 扫描显微镜下该光纤侧面(α)、端面(β)图像，以及不同滤光片下激发光与荧光图(γ)^[78]Fig. 7 Diamond-doped tellurite glass fiber. (a) Experimental device; (b) tellurite fiber schematic diagram; (c) image of side (α) and end (β) of the fiber under scanning microscope, and excitation light and fluorescence images under different filters (γ)^[78]

3.5 基于 NV 色心的光纤谐振腔量子传感

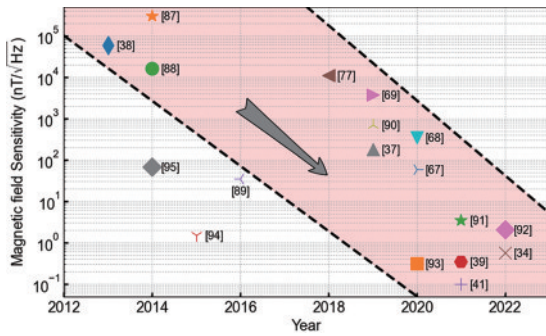
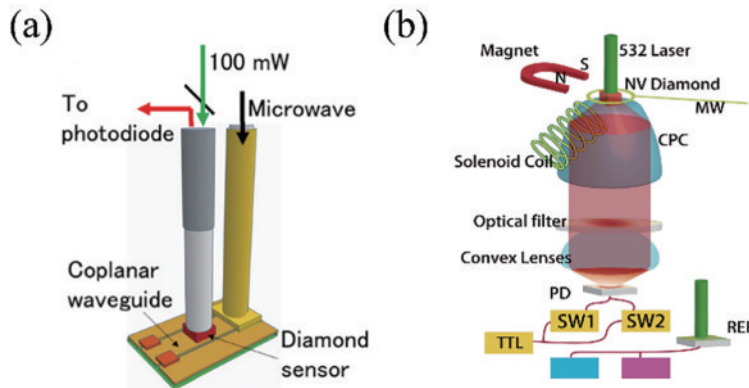
以上所述皆是光纤与 NV 体系的直接接触或耦合。还有一种间接耦合的方式，即可以通过光学谐振腔。光学谐振腔一般由两个以及两个以上光学反射镜面组成，置于工作物质的两端，谐振腔的主要作用是提供光学反馈使光束不断增强以及限制光束的方向与频率，使输出光束具有良好的方向性与单色性，也可以增加荧光的收集效率，利用光纤与谐振腔、谐振腔与 NV 色心耦合从而间接达到耦合^[17,79-86]。如图 8(a)^[82]所示，利用锥形光纤传输激发光，并收集 NV 色心与 GaP 腔的光耦合发出的荧光^[82]，提供了一种集成单光子发射器的应用。如图 8(b)^[17]所示，2013 年 Albrecht 等^[17]利用纤维微腔与金刚石颗粒耦合，通过物镜激发和光纤收集光子，提高了光子的收集效率，最终提供了一种窄带宽的单光子源方案。

图 8 光纤腔与 NV 色心耦合装置。(a) 锥形光纤与 GaP-NV 色心腔^[82]；(b) 纤维微腔与金刚石颗粒耦合系统^[17]Fig. 8 Fiber cavity and NV color center coupling device. (a) Tapered fiber with GaP-NV color center cavity^[82]; (b) coupling system of fiber microcavity and diamond particle^[17]

3.6 基于 NV 色心的光纤体系的多物理量测量

基于光纤手段的 NV 色心体系近些年来研究较多，主要应用于磁场、温度等物理量的测量，本文 2.1 节介绍了测量磁场、温度的原理。其中对磁场的测量研究居多，如何提高探测磁场的灵敏度是应用研究重点。图 9^[34,37-39,41,67-69,77,87-95]对近十年的研究进行了总结，从图中可以看出，灵敏度一直在不断地提升，从 $\mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ 提高至 $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，未来的发展趋势将通过降低各类噪声、提高荧光收集效率、优化测量序列等方法实现更高的探测灵敏度。

近年来也有一些研究是基于光纤手段的 NV 色心体系对温度进行测量。2014 年 Fedotov 等^[96]利用金刚石的 NV 色心与微波传输线结合的光纤探头，采用差分锁相技术实现了精度为 0.02 K 的温度测量。2021 年

图 9 近十年磁场测量的灵敏度指标^[34,37-39,41,67-69,77,87-95]Fig. 9 Sensitivity index of magnetic field measurement in recent ten years^[34,37-39,41,67-69,77,87-95]图 10 多物理量测量装置图。(a)传感器探头结构^[91];(b)时分多路复用传感器配置^[97]Fig. 10 Diagram of multi-physical quantity measuring device. (a) Structure of sensor probe^[91]; (b) configuration of time division multiplexing sensor^[97]

4 光纤量子传感体系的应用

在现在的传感研究中,对微纳尺度的物理场的精密测量越来越重要。金刚石内的 NV 色心体系结合光纤体系的高集成度、简便性、实用性等优点,已在量子传感领域取得了极大的突破与进展,并在一些领域展开了应用,本节主要介绍基于 NV 色心的光纤量子传感在生命科学、材料科学等领域的应用。

4.1 生命科学领域

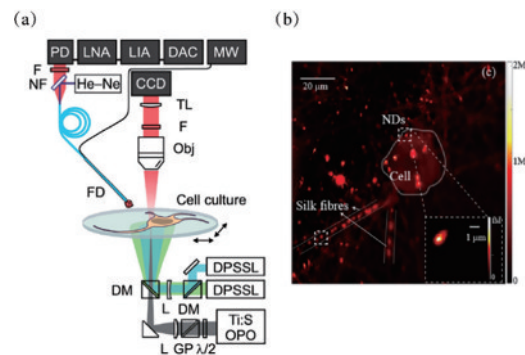
随着生命科学的发展,对细胞尺度的测量成了一项重要的研究,NV 色心是一种发射荧光材料,基于该体系的光纤传感可以通过荧光的光子数对细胞的温度^[31,93]、细胞内的磁性纳米颗粒^[34,37]等进行测量。如图 11(a)^[36]所示,2016 年 Lanin 等^[36]通过光纤探头从热激励的神经元细胞读出的其细胞温度变化与 Ca^{2+} 传感器的荧光密切相关。另外,可通过丝纤维-NV 色心体系进行测温,并实现了 25~50 °C 的温度测量,并且在该研究中还发现,丝纤维结构可以形成用于生物生长的 NV-纤维膜,可促进细胞的愈合,给未来的医疗治疗伤口带来一种新的方案,如图 11(b)^[98]所示。

4.2 材料科学领域

在材料领域中,器件附近的温度或者磁场对于器件的性能影响很大,因此,需要对其附近的物理量进行

检测,而基于 NV 色心的光纤传感体系就能实现高精度以及高灵敏度的测量。如图 12(a)^[41]所示。2020 年孙

东京工业大学^[91]利用一块金刚石附着在多模光纤完成光激发以及荧光的收集,而另一块金刚石附着在共面微波波导上,用于自旋基态混合,使用双微波时域复用技术,将两个微波频率锁定在两个共振点,通过两个锁定频率的差值以及均值可以同时分别获得磁场与温度,如图 10(a)^[91]所示。另外,2022 年中国科学技术大学孙方稳小组提出双微波时分多路复用协议^[97],该协议采用双频驱动以及调频技术并利用锁相放大技术,对温度和磁场解耦实现了对温度和磁场的实时同步测量,且该系统的灵敏度分别达到了 $3.4 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $1.3 \text{ mK}/\sqrt{\text{Hz}}$,如图 10(b)^[97]所示。

图 11 NV 色心在细胞测温的应用。(a)对热激发神经元细胞测温结构示意图^[36];(b) NV-丝纤维在细胞中的荧光光谱图,其中中央圆是细胞,实线是丝纤维,虚线框指出两个具有代表的 NV 色心,色度条代表荧光强度^[98]Fig. 11 Application of NV color center in cell temperature measurement. (a) Schematic diagram of thermal excitation neuronal cell temperature measurement structure^[36]; (b) fluorescence spectrum of NV-silk fiber in cells, the central circle is the cell, the solid line is silk fiber, the dotted line box indicates two NV centers with representative fluorescence intensity^[98]

检测,而基于 NV 色心的光纤传感体系就能实现高精度以及高灵敏度的测量。如图 12(a)^[41]所示。2020 年孙

方稳小组利用基于 NV 色心的光纤体系,通过观察 ODMR 谱线的变化可以得出温度的变化并应用于测量芯片表面的温度分布,且该系统的灵敏度为 $18 \text{ mK}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[99-100]。2023 年该组利用光学探测磁共振以及拉比测量协议、温度和磁场反映了电路内部的绝缘体-金属跃迁(IMT)信息,利用微波可以确定电隔离区域的 IMT 信息^[101]。另外,南京邮电大学杜关祥小组对光纤体系也有着许多研究:2020 年该组提出了一种通过锥形光纤量子探针去表征微波矢量近场的方法,有望应用于纳米空间分辨率的毫米波成像领域^[102],如图 12(b)^[102]所示;2021 年该组通过将金刚石颗粒固定在

光纤尖端,对金刚石发出的荧光信号进行分析,从而推理出被测芯片的磁场强度^[103];2022 年该组结合光纤体系,通过优化微波传感的测量参数并引入微分算法减小系统的 $1/f$ 噪声^[104]。另外,该体系还可以通过测量电路中的磁场,对电路进行诊断与监测^[42]。在无损伤检测领域也有应用,2020 年英国课题组^[43]使用光纤耦合金刚石传感器,在没有磁屏蔽的条件下,用磁铁施加不均匀磁场,磁性物质的结构损伤使得不均匀磁场扭曲,通过检测这种扭曲,对物质的损伤结构进行重建。实现了对磁性物质的无损检测,如图 12(c)^[43]所示。

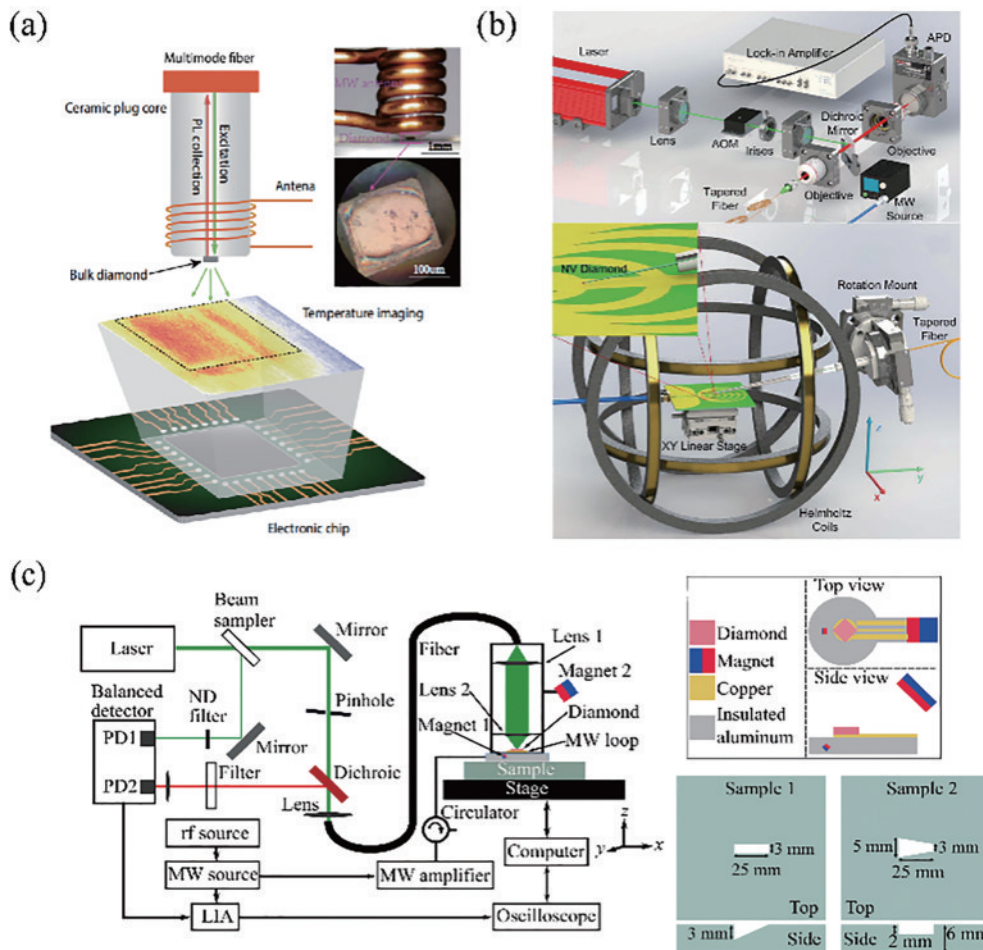


图 12 材料科学领域的应用。(a) 光纤传感测量芯片表面温度^[41]; (b) 锥形光纤探针去表征微波矢量近场^[102]; (c) NV 色心传感装置用于无损检测^[43]

Fig. 12 Applications in the field of materials science. (a) Optical fiber sensor measurement chip surface temperature^[41]; (b) tapered fiber probe to characterize microwave vector near field^[102]; (c) NV center sensing device is used for nondestructive testing^[43]

5 基于 NV 色心的光纤传感体系的难点

在近十年针对于基于 NV 色心的光纤传感的研究中,探索出了许多新的研究方向,但与此同时也出现了一些需要克服的挑战。

1) 耦合效率。通过对光纤传感体系灵敏度的优化实验中发现,如何提高光纤与金刚石 NV 色心的耦

合效率成为了灵敏度提升的主要问题。耦合效率主要包含泵浦光的激发效率以及荧光的收集效率,目前大多数实验都是通过提高激光器的功率加强对金刚石的激发,荧光的收集效率的提高方式可以通过镀金属膜^[41,105],增加抛物面透镜^[21,30]、微凹面镜^[106]以及棱镜^[107],优化光纤的结构如光子晶体光纤、光纤锥等来实现。如图 13^[30,106]所示。新的提高方法有待研究。

2) 集成化小型化。目前集成化磁强计是研究热

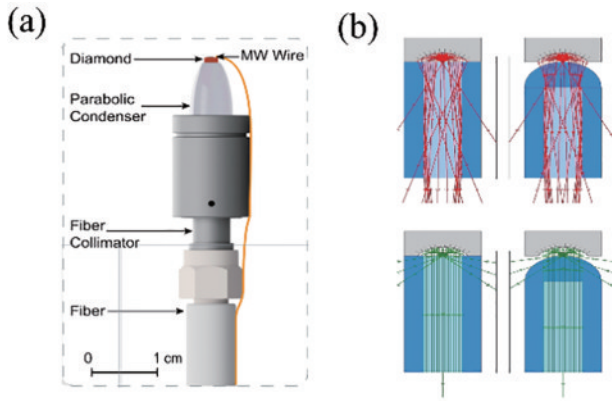


图 13 (a) 抛物面透镜^[30]与(b)微凹镜^[106]分别用于提升荧光收集效率

Fig. 13 (a) Parabolic lens^[30] and (b) micro concave mirror^[106] are respectively used to improve fluorescence collection efficiency

点之一, 2020 年东京工业大学将光纤、微波、样品以及励磁线圈集成在磁强计内部, 可用于检测周围的磁性纳米颗粒, 如图 14(a)^[37]所示。2021 年德国研究者^[34]将具有所有功能组件完全集成, 实现便携式测量, 且测磁灵敏度为 $344 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 可用于脑机接口, 如图 14(b)^[39]所示。2022 年中国科学院上海微系统与信息技术研究所^[93]采用梯度折射率光纤进行激光的激发以及荧光

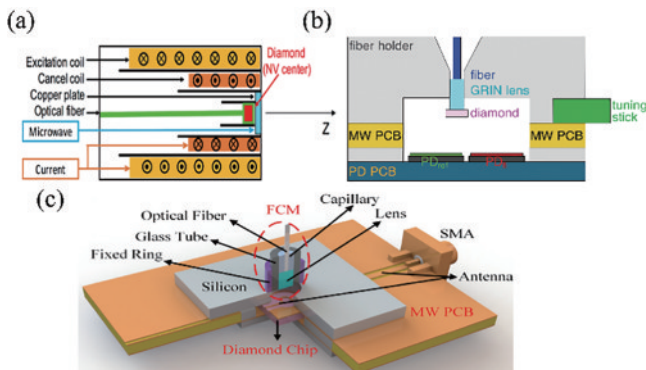


图 14 光纤集成化磁强计。(a) 磁强计内部结构, 包括光纤、微波天线、励磁线圈、金刚石样品^[37]; (b) 集成磁强计内部结构^[39]; (c) 使用阶跃折射率光纤实现金刚石的激发和荧光的收集, 并将微波天线集成在金刚石表面^[93]

Fig. 14 Fiber optic integrated magnetometer. (a) Internal structure of magnetometer, including optical fiber, microwave antenna, excitation coil, and diamond sample^[37]; (b) internal structure of integrated magnetometer^[39]; (c) diamond excitation and fluorescence collection are achieved using step-index fiber, and microwave antennas are integrated on the diamond surface^[93]

的收集, 并将微波天线集成在了金刚石表面, 实现了灵敏度为 $2.03 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的集成化磁强计, 如图 14(c)^[93]所示。综合以上几种集成化磁力计来看, NV 色心传

感器的芯片化还需要考虑以下方面: 将光源、微波源等器件小型化; 微波天线、荧光收集系统集成化; 多种物理场信号如何影响系统噪声水平等。

3) 稳定性。为了提高光纤传感体系的灵敏度, 可以通过改变光纤端面的结构或者将纳米金刚石颗粒熔融进光纤中等手段。2019 年麻省理工学院^[20]采用热拉伸技术, 将几百个光电二极管以及一个包含金刚石流体的光波导熔融进光纤, 并将光纤放在更大的同轴电缆中以便提供所需的微波激励, 102 个测量点分布在长度 90 m 的测量区间内, 每个点的灵敏度为 $(63 \pm 5) \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 实现了一种基于 NV 色心的光纤体系的分布式传感应用, 如图 15^[20]所示。但这些方法可能会使光纤性能发生变化从而影响系统的稳定性, 是一个需要解决的问题。

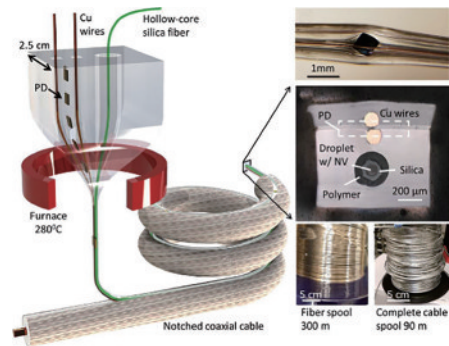


图 15 将光电二极管以及金刚石流体光波导熔融进光纤内^[20]
Fig. 15 Photodiode and diamond fluid optical waveguide are fused into the optical fiber^[20]

6 结束语

本文主要介绍了基于 NV 色心体系下的光纤量子传感技术与应用, 具体分为反射式、透射式、倏逝波、玻璃材料等体系, 主要应用包括作为光纤-金刚石磁力计与温度计用于生命科学领域与材料科学领域。基于光纤的高集成度、实用性以及便捷性, 不仅为现在的 NV 色心应用研究提供了一种方法, 也为以后 NV 色心体系的产业化发展奠定了基础。目前基于 NV 色心的光纤量子传感还处于起步阶段, 依然还有许多基础性技术问题如光纤的数值孔径较小、耦合效率太低没有得到有效解决, 预计未来将会朝着更高集成化的芯片式传感以及实现多物理量同时测量的分布式传感等方向发展, 同时基于光纤-金刚石量子传感的诸多优点, 未来也将会应用于各个领域。

参 考 文 献

- [1] Komonis I K, Kornack T W, Allred J C, et al. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer[J]. Nature, 2003, 422(6932): 596-599.
- [2] Dang H B, Maloof A C, Romalis M V. Ultrahigh sensitivity magnetic field and magnetization measurements

- with an atomic magnetometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(15): 151110.
- [3] Simmonds M, Fertig W, Giffard R. Performance of a resonant input SQUID amplifier system[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1979, 15(1): 478-481.
- [4] Baumgart I, Cai J M, Retzker A, et al. Ultrasensitive magnetometer using a single atom[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(24): 240801.
- [5] Xie Y J, Yu H Y, Zhu Y B, et al. A hybrid magnetometer towards femtoTesla sensitivity under ambient conditions[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(2): 127-132.
- [6] Wrachtrup J, von Borczyskowski C, Bernard J, et al. Optical detection of magnetic resonance in a single molecule[J]. *Nature*, 1993, 363(6426): 244-245.
- [7] Taylor J M, Cappellaro P, Childress L, et al. High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(10): 810-816.
- [8] Jelezko F, Gaebel T, Popa I, et al. Observation of coherent oscillations in a single electron spin[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(7): 076401.
- [9] Gaebel T, Domhan M, Popa I, et al. Room-temperature coherent coupling of single spins in diamond[J]. *Nature Physics*, 2006, 2(6): 408-413.
- [10] 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): 160301. Dong Y, Du B, Zhang S C, et al. Solid quantum sensor based on nitrogen-vacancy center in diamond[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(16): 160301.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Dolde F, Fedder H, Doherty M W, et al. Electric-field sensing using single diamond spins[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(6): 459-463.
- [14] Ovtartchaiyapong P, Lee K W, Myers B A, et al. Dynamic strain-mediated coupling of a single diamond spin to a mechanical resonator[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-6.
- [15] 张少春. 基于金刚石氮-空位色心的光纤量子传感测量方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021. Zhang S C. Research on optical fiber quantum sensing measurement method based on diamond nitrogen-vacancy color center[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [16] Arai K, Belthangady C, Zhang H, et al. Fourier magnetic imaging with nanoscale resolution and compressed sensing speed-up using electronic spins in diamond[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(10): 859-864.
- [17] Albrecht R C, Bommer A, Deutsch C, et al. Coupling of a single nitrogen-vacancy center in diamond to a fiber-based microcavity[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110: 243602.
- [18] Vorobyov V V, Soshenko V V, Bolshedvorskii S V, et al. Coupling of single NV center to the tapered optical fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9920: 992012.
- [19] Zhang N, Guo Q, Ye W, et al. Temperature Fluctuations Compensation with Multi-Frequency Synchronous Manipulation for a NV Magnetometer in Fiber-Optic Scheme[J]. *Sensors*, 22(14), 5218.
- [20] Shai M, Christopher F, Dirk E, et al. Distributed quantum fiber magnetometry[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(7): 1900075.
- [21] Wolf T, Neumann P, Nakamura K, et al. Subpicotesla diamond magnetometry[J]. *Physical Review X*, 2015, 5(4): 041001.
- [22] Dix S, Gutsche J, Waller E, et al. Fiber-tip endoscope for optical and microwave control[J]. *The Review of scientific instruments*, 2022, 93(9).
- [23] Chen G B, Yang H, Sun J C, et al. Rapid measurement and control of nitrogen-vacancy center-axial orientation in diamond particles[J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(11): 49-52.
- [24] Israelsen N M, Kumar S, Tawfiq M, et al. Increasing the photon collection rate from a single NV center with a silver mirror[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(11): 241-254.
- [25] Li S, Bai D B, Capelli M, et al. Preferential coupling of diamond NV centres in step-index fibres[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 14425-14437.
- [26] Fujiwara M, Zhao H Q, Noda T, et al. Ultrathin fiber-taper coupling with nitrogen vacancy centers in nanodiamonds at cryogenic temperatures[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5702-5705.
- [27] Fujiwara M, Neitzke O, Schröder T, et al. Fiber-coupled diamond micro-waveguides toward an efficient quantum interface for spin defect centers[J]. *ACS Omega*, 2017, 2(10): 7194-7202.
- [28] 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.
- [29] Mayer L, Debuisschert T. Direct optical interfacing of CVD diamond for deposited sensing experiments involving nitrogen-vacancy centres[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2016, 213(10): 2608-2613.
- [30] Georgios C, Shaji R J, Zheng H J, et al. Fiberized diamond-based vector magnetometers[J]. *Frontiers in Photonics*, 2021: 4.
- [31] Duan D W, Kavatamane V K, Arumugam S R, et al. Laser-induced heating in a high-density ensemble of nitrogen-vacancy centers in diamond and its effects on quantum sensing[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2851-2854.
- [32] Wunderlich R, Staacke R, Knolle W, et al. Magnetic field and angle-dependent photoluminescence of a fiber-coupled nitrogen vacancy rich diamond[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 130(12): 124901.
- [33] Kubota K, Hatano Y, Kainuma Y, et al. Wide temperature operation of diamond quantum sensor for

- electric vehicle battery monitoring[J]. *Diamond and Related Materials*, 2023, 135: 109853.
- [34] Chen Y F, Lin Q Y, Cheng H D, et al. Nanodiamond-based optical-fiber quantum probe for magnetic field and biological sensing[J]. *ACS Sensors*, 2022, 7(12): 3660-3670.
- [35] Fujiwara M, Sun S, Dohms A, et al. Real-time nanodiamond thermometry probing in vivo thermogenic responses[J]. *Science advances*, 2020, 6(37): eaba9636.
- [36] Lanin A A, Fedotov I V, Ermakova Y G, et al. Fiber-optic electron-spin-resonance thermometry of single laser-activated neurons[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5563-5566.
- [37] Kuwahata A, Kitaizumi T, Saichi K, et al. Magnetometer with nitrogen-vacancy center in a bulk diamond for detecting magnetic nanoparticles in biomedical applications[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-9.
- [38] Liu X D, Cui J M, Sun F W, et al. Fiber-integrated diamond-based magnetometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(14): 143105.
- [39] Stürner F M, Brenneis A, Buck T, et al. Integrated and portable magnetometer based on nitrogen-vacancy ensembles in diamond[J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2021, 4(4): 2000111.
- [40] Masuyama Y, Suzuki K, Hekizono A, et al. Gradiometer using separated diamond quantum magnetometers[J]. *Sensors*, 2021, 21(3): 977.
- [41] Zhang S C, Lin H B, Dong Y, et al. High-sensitivity and wide-bandwidth fiber-coupled diamond magnetometer with surface coating[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(9): 2191-2201.
- [42] 高扬, 徐超群, 黄魁, 等. 基于光纤耦合金刚石 NV 色心系综磁强计的电路诊断方法[J]. *航天器环境工程*, 2022, 39(1): 100-104.
Gao Y, Xu C Q, Huang K, et al. The circuit diagnosis method with diamond NV center ensemble magnetometer based on fiber coupling[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, 39(1): 100-104.
- [43] Zhou L Q, Patel R L, Frangeskou A C, et al. Imaging damage in steel using a diamond magnetometer[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(2): 024015.
- [44] 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 C, et al. Non-destructive detection of cracks based on diamond nitrogen-vacancy color center[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(7): 239-246.
- [45] Doherty M W, Manson N B, Delaney P, et al. The nitrogen-vacancy colour centre in diamond[J]. *Physics Reports*, 2013, 528(1): 1-45.
- [46] 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.
- [47] Scholten S C, Healey A J, Robertson I O, et al. Widefield quantum microscopy with nitrogen-vacancy centers in diamond: strengths, limitations, and prospects[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 130(15): 150902.
- [48] Fuchs G D, Dobrovitski V V, Hanson R, et al. Excited-state spectroscopy using single spin manipulation in diamond[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(11): 117601.
- [49] 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.
- [50] Acosta V M, Bauch E, Ledbetter M P, et al. Diamonds with a high density of nitrogen-vacancy centers for magnetometry applications[J]. *Physical Review B*, 2009, 80(11): 115202.
- [51] Jensen K, Acosta V M, Jarmola A, et al. Light narrowing of magnetic resonances in ensembles of nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. *Physical Review B*, 2013, 87(1): 014115.
- [52] Pezzagna S, Naydenov B, Jelezko F, et al. Creation efficiency of nitrogen-vacancy centres in diamond[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(6): 065017.
- [53] 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.
- [54] 林豪彬, 张少春, 董杨, 等. 基于金刚石氮-空位色心的温度传感[J]. *物理学报*, 2022, 71(6): 060302.
Lin H B, Zhang S C, Dong Y, et al. Temperature sensing with nitrogen vacancy center in diamond[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(6): 060302.
- [55] 王敏, 戴世勋, 张培晴, 等. 基于中红外光纤的倏逝波传感研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(4): 1117-1131.
Wang M, Dai S X, Zhang P Q, et al. Research progress on evanescent wave sensor based on mid-infrared optical fiber[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(4): 1117-1131.
- [56] Raichlin Y, Katzir A. Fiber-optic evanescent wave spectroscopy in the middle infrared[J]. *Applied Spectroscopy*, 2008, 62(2): 55A-72A.
- [57] Fedotov I V, Doronina-Amitonova L V, Voronin A A, et al. Electron spin manipulation and readout through an optical fiber[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 5362.
- [58] Ishikawa L, Shikama T, Kakuno T, et al. All-optical thermometry using a single multimode fiber endoscope and diamond nanoparticles containing nitrogen vacancy centers[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(8): 083705.
- [59] Duan D W, Kavatamane V K, Arumugam S R, et al. Tapered ultra-high numerical aperture optical fiber tip for nitrogen vacancy ensembles based endoscope in a fluidic environment[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(11): 113701.
- [60] Liebermeister L, Petersen F, Münchow A V, et al. Tapered fiber coupling of single photons emitted by a deterministically positioned single nitrogen vacancy center[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(3): 031101.
- [61] Ampem-Lassen E, Simpson D A, Gibson B C, et al.

- Nano-manipulation of diamond-based single photon sources[J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 11287-11293.
- [62] Fedotov I V, Safronov N A, Shandarov Y A, et al. Guided-wave-coupled nitrogen vacancies in nanodiamond-doped photonic-crystal fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(3): 031106.
- [63] Schröder T, Schell A W, Kewes G, et al. Fiber-integrated diamond-based single photon source[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(1): 198-202.
- [64] Duan D, Du G X, Kavatamane V K, et al. Efficient nitrogen-vacancy centers' fluorescence excitation and collection from micrometer-sized diamond by a tapered optical fiber in endoscope-type configuration[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6734-6745.
- [65] Bian C, Li M X, Cao W, et al. Robust integration of nitrogen-vacancy centers in nanodiamonds to optical fiber and its application in all-optical thermometry[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(12): 120601.
- [66] Fedotov I V, Blakley S M, Serebryannikov E E, et al. High-resolution magnetic field imaging with a nitrogen-vacancy diamond sensor integrated with a photonic-crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 472-475.
- [67] Fedotov I V, Safronov N A, Shandarov Y A, et al. Photonic-crystal-fiber-coupled photoluminescence interrogation of nitrogen vacancies in diamond nanoparticles[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(2): 151-154.
- [68] 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.
- [69] Mitchell A, Rubinsztein-Dunlop H. AOS Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT) and Australian Conference on Optics, Lasers, and Spectroscopy (ACOLS) 2019[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11200: 1120001.
- [70] Filipkowski A, Mrózek M, Stepniowski G, et al. Volumetric incorporation of NV diamond emitters in nanostructured F2 glass magneto-optical fiber probes[J]. *Carbon*, 2022, 196: 10-19.
- [71] Filipkowski A, Mrózek M, Stepniowski G, et al. Magnetically sensitive fiber probe with nitrogen-vacancy center nanodiamonds integrated in a suspended core[J]. *Optics Express*, 2022, 30(11): 19573-19581.
- [72] Gibson B C, Henderson M R, Ebedorff-Heidepriem H, et al. Single photon emission from nanodiamond in tellurite glass[C]//2011 International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim incorporating the Australasian Conference on Optics, August 28-September 1, 2011, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2011: 721-722.
- [73] Henderson M R, Gibson B C, Ebedorff-Heidepriem H, et al. Diamond in tellurite glass: a new medium for quantum information[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(25): 2806-2810.
- [74] Ebedorff-Heidepriem H, Ruan Y L, Ji H, et al. Nanodiamond in tellurite glass part I: origin of loss in nanodiamond-doped glass[J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(12): 2608-2620.
- [75] Ruan Y L, Ji H, Johnson B C, et al. Nanodiamond in tellurite glass part II: practical nanodiamond-doped fibers[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(1): 73-87.
- [76] Ruan Y L, Gibson B C, Lau D W M, et al. Atom-photon coupling from nitrogen-vacancy centres embedded in tellurite microspheres[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-7.
- [77] Ruan Y L, Simpson D A, Jeske J, et al. Magnetically sensitive nanodiamond-doped tellurite glass fibers[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-6.
- [78] Orzechowska Z, Mrózek M, Filipkowski A, et al. Tellurite glass rods with submicron-size diamonds as photonic magnetic field and temperature sensors[J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2022, 5(3): 2100128.
- [79] Fu K M C, Santori C, Spillane S, et al. Quantum information processing with diamond nitrogen-vacancy centers coupled to microcavities[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6903: 69030M.
- [80] Barclay P E, Santori C, Fu K M, et al. Coherent interference effects in a nano-assembled diamond NV center cavity-QED system[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8081-8097.
- [81] Gregor M, Henze R, Schröder T, et al. On-demand positioning of a preselected quantum emitter on a fiber-coupled toroidal microresonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(15): 153110.
- [82] Fu K M C, Barclay P E, Santori C, et al. Low-temperature tapered-fiber probing of diamond NV ensembles coupled to GaP microcavities[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(5): 055023.
- [83] Tashima T, Takashima H, Takeuchi S. Direct optical excitation of an NV center via a nanofiber Bragg-cavity: a theoretical simulation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 27009-27016.
- [84] Sarath R N, Rogers Lachlan J, Xavier V, et al. Amplification by stimulated emission of nitrogen-vacancy centres in a diamond-loaded fibre cavity[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(15): 4505-4518.
- [85] Ruf M, Weaver M J, van Dam S B, et al. Resonant excitation and Purcell enhancement of coherent nitrogen-vacancy centers coupled to a Fabry-Perot microcavity[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(2): 024049.
- [86] Albrecht R, Bommer A, Pauly C, et al. Narrow-band single photon emission at room temperature based on a single nitrogen-vacancy center coupled to an all-fiber-cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(7): 073113.
- [87] Fedotov I V, Doronina-Amitonova L V, Sidorov-Biryukov D A, et al. Fiber-optic magnetic-field imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(24): 6954-6957.
- [88] Fedotov I V, Doronina-Amitonova L V, Sidorov-Biryukov D A, et al. Fiber-optic magnetometry with randomly oriented spins[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6755-6758.
- [89] Blakley S M, Fedotov I V, Amitonova L V, et al. Fiber-optic vectorial magnetic-field gradiometry by a spatiotemporal differential optical detection of magnetic

- resonance in nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2057-2060.
- [90] Wojciechowski A M, Mrózek P N M, Sycz K, et al. Optical magnetometry based on nanodiamonds with nitrogen-vacancy color centers[J]. *Materials*, 2019, 12(18): 2951.
- [91] Hatano Y, Shin J, Nishitani D, et al. Simultaneous thermometry and magnetometry using a fiber-coupled quantum diamond sensor[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(3): 034001.
- [92] Xie F, Hu Y Q, Li L Y, et al. A microfabricated fiber-integrated diamond magnetometer with ensemble nitrogen-vacancy centers[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(19): 191104.
- [93] Patel R L, Zhou L Q, Frangeskou A C, et al. Sub-nanotesla magnetometry with a fibre-coupled diamond sensor[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(4): 044058.
- [94] Dmitriev A K, Vershovskii A K. Concept of a microscale vector magnetic field sensor based on nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(3): B1-B4.
- [95] Zheng D D, Ma Z M, Guo W J, et al. A hand-held magnetometer based on an ensemble of nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(15): 155004.
- [96] Fedotov I V, Blakley S, Serebryannikov E E, et al. Fiber-based thermometry using optically detected magnetic resonance[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(26): 261109.
- [97] Lin H B, Feng C, Dong Y, et al. Simultaneous temperature and magnetic field measurements using time-division multiplexing[J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(1): 011201.
- [98] Khalid A, Bai D B, Abraham A N, et al. Electrospun nanodiamond-silk fibroin membranes: a multifunctional platform for biosensing and wound-healing applications [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(43): 48408-48419.
- [99] Zhang S C, Li S, Du B, et al. Thermal-demagnetization-enhanced hybrid fiber-based thermometer coupled with nitrogen-vacancy centers[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(12): 4634-4643.
- [100] Zhang S C, Dong Y, Du B, et al. A robust fiber-based quantum thermometer coupled with nitrogen-vacancy centers[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(4): 044904.
- [101] Lin H B, Feng C, Li L, et al. Insulator-metal transition characterized by multifunctional diamond quantum sensor [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(10): 104003.
- [102] Chen G B, Gu B X, He W H, et al. Vectorial near-field characterization of microwave device by using micro diamond based on tapered fiber[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(3): 7500106.
- [103] 顾邦兴, 陈国彬, 王昊, 等. 基于金刚石的光纤近场探头和芯片表征[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2021, 19(5): 901-904, 928.
- Gu B X, Chen G B, Wang H, et al. A fiber based diamond near-field probe and characterization of a chip[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2021, 19(5): 901-904, 928.
- [104] Bai R X, Yang F, Liu P, et al. Optimized microwave sensing in broad frequency range by a fiber diamond probe [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(4): 044003.
- [105] Israelsen N M, Radko I P, Raatz N, et al. Nitrogen-vacancy defect emission spectra in the vicinity of an adjustable silver mirror[J]. *Materials for Quantum Technology*, 2021, 1(1): 015002.
- [106] Duan D W, Kavatamane V K, Arumugam S R, et al. Enhancing fluorescence excitation and collection from the nitrogen-vacancy center in diamond through a micro-concave mirror[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(4): 041107.
- [107] Ma Z M, Zhang S W, Fu Y P, 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]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 382-390.