

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.01.009

用于金刚石 NV 色心量子磁强计的 集成化光电系统研究

戴雨霖¹, 徐南阳^{2,3}, 田宇³

(1. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601; 2. 浙江大学 光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027; 3. 之江实验室 量子传感中心, 浙江 杭州 311000)

摘要:基于金刚石的磁测量系统因其稳定性、矢量性和常温光学读出等性质,具有广泛的应用前景,而激光器和光电探测器是金刚石电子自旋量子态操控和读出的关键器件,其性能直接决定磁强计的灵敏度。文章设计了一套为金刚石氮空位(nitrogen-vacancy, NV)色心磁强计定制的集成光电系统,包含超小型激光控制和光电探测模块。激光控制模块基于 TPS54200 芯片实现,输出光强可达 700 mW;光电探测模块采用 S13955-01 光电二极管与 AD8065 运算放大器实现;两模块实物性能与商用器件相近,但结构更简单,体积和功耗显著降低。基于该集成系统,最终研制的小型化金刚石 NV 色心量子磁强计实现了 nT/Hz^{1/2}量级的灵敏度,大幅超越此前 μ T/Hz^{1/2}量级的工作成果,有望应用于航空磁探等领域。

关键词:金刚石;氮空位(NV)色心;磁强计;集成光电系统;激光控制;光电探测

中图分类号:TN29 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)01-0062-06

Research on integrated optoelectronic system for diamond NV center quantum magnetometers

DAI Yulin¹, XU Nanyang^{2,3}, TIAN Yu³

(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Research Center for Quantum Sensing, Zhejiang Lab, Hangzhou 311000, China)

Abstract: The magnetic measurement system based on diamond, due to its stability, vector nature, and room-temperature optical readout properties, has broad prospects for applications. Among them, lasers and photodetectors are essential devices for the manipulation and readout of diamond electronic spin quantum states, and their performance determines the sensitivity of the magnetometer. This paper introduces an integrated optoelectronic system customized for diamond nitrogen-vacancy(NV) center magnetometers. The system includes ultra-compact laser control and photodetection modules. The laser control module is based on the TPS54200 chip, achieving an output power of up to 700 mW, while the photodetection module uses S13955-01 photodiode and AD8065 amplifier. Both modules have performance similar to commercial devices but with simplified structures, smaller volumes, and reduced power consumption. Using this system, the final miniaturized diamond NV center quantum magnetometer achieved nT/Hz^{1/2}-level sensitivity, significantly surpassing previous μ T/Hz^{1/2}-level performance. It holds promise for applications in areas such as airborne magnetic exploration.

Key words: diamond; nitrogen-vacancy(NV) center; magnetometer; integrated optoelectronic system; laser control; photodetection

收稿日期:2024-03-13;修回日期:2024-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(92265114;92265204)

作者简介:戴雨霖(1992—),女,浙江宁波人,合肥工业大学硕士生;

徐南阳(1983—),男,安徽合肥人,博士,浙江大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail:nyxu_physics@zju.edu.cn.

0 引 言

金刚石中的氮空位 (nitrogen-vacancy, NV) 色心是一种晶格点缺陷,由一个替代氮原子与相邻的碳空位组成,如图 1a 所示。NV 色心的自旋能级对沿着 NV 对称轴方向的磁场非常敏感,可通过光探测磁共振 (optical detection magnetic resonance, ODMR) 技术来测量外部磁矢量场,如图 1b 所示。大量 NV 色心组成 NV 系综可以获得更高的探测灵敏度。NV 色心电子自旋的基态为三重态,包含 $|m_s=0\rangle$ 和 $|m_s=\pm 1\rangle$ 态,零场劈裂值 $D\approx 2.87$ GHz,在外部磁场作用下,自旋态 $|m_s=\pm 1\rangle$ 态劈裂为 $|+1\rangle$ 态和 $|-1\rangle$ 态。当受到 532 nm 的绿激光激发时, NV 色心的电子自旋最初从基态 3A_2 跃迁到激发态 3E ,其中大多数自旋自发回到基态,并辐射出 637~800 nm 波长的红色荧光,少量 $|+1\rangle$ 态和 $|-1\rangle$ 态的自旋通过无辐射跃迁,经过亚稳态单重态 1A_1 和 1E 返回到 $|0\rangle$ 态。这导致 2 个结果:① $|0\rangle$ 态的光致发光比 $|\pm 1\rangle$ 态的更亮;② 经过在大量跃迁周期后,自旋分布极化为 $|0\rangle$ 态。当施加的微波 (MW) 频率接近 $|0\rangle$ 态和 $|\pm 1\rangle$ 态的跃迁频率 ν_{\pm} 时荧光较弱,反之较强,通过扫描微波频率可以测得 ν_{\pm} ,并通过下式计算磁场投影到 NV 轴的分量:

$$\nu_{\pm} = D \pm \gamma_e B_z \quad (1)$$

其中, γ_e 为旋磁比^[1], $\gamma_e \approx 28.04$ GHz。

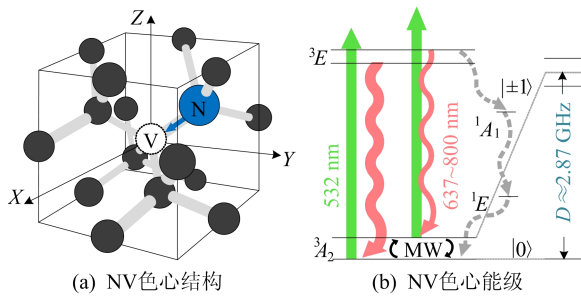


图 1 金刚石磁 NV 色心量子磁测量原理图

传统的商用磁强计如磁通门和原子磁强计等有一定的局限性,磁通门可以测量矢量但是有很严重的温漂和电压漂移,原子磁强计则只能测量总场。金刚石 NV 色心磁强计因具有常温矢量测量、高灵敏度、无温漂等优点,是未来磁强计发展的一个重要方向。国内外小型化金刚石磁强计的研究^[2-15]可根据功能完整性分为便携式探头和完全集成设备。截至目前,大多数工作都集中在基于光纤的探头上^[2-9],通过在光纤末端附着一颗金

刚石,获得 $310 \text{ pT/Hz}^{1/2} \sim 180 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ 的灵敏度,尺寸从光纤的尺度到数厘米不等,非常适用于高空间分辨率的医学成像。部分工作使用纳米等离子结构实现了芯片级的集成^[10-13],但仍需使用外部激光器。这些芯片只有 $0.04 \sim 1.50 \text{ mm}^2$ 大小,灵敏度为 $245 \text{ nT/Hz}^{1/2} \sim 32.1 \text{ } \mu\text{T/Hz}^{1/2}$ 。另外,有些整机集成的设备灵敏度在 $\mu\text{T/Hz}^{1/2}$ 量级^[14-15]。

一个金刚石磁强计包含激光器、光电探测器、其他光学元件、微波系统、采集和控制系统以及电源,其中激光器和光电探测器对于实现 ODMR 至关重要,直接影响磁强计的灵敏度。目前有很多电路能够实现激光控制^[16-22]和光电探测^[23-28]的功能。激光控制包括连续和脉冲 2 种模式:脉冲激光的脉冲宽度在数百皮秒至几纳秒之间^[16-18],足够应用于 NV 系综的脉冲法 ODMR,但是电路比较复杂;而连续激光控制^[19-22]电路简单,稳定性好,更便于集成。光电探测模块包含光电二极管和前置放大器,若需要很高的放大倍数,则要额外加主放大器。由于毫米尺寸的 NV 系综荧光强度为 μW 级,只需前置放大器即可满足需求,一般使用集成运算放大器构成前置放大器^[23-25],集成运算放大器具有很好的带宽和较低的输入噪声,且设计简单;也可以采用分立器件^[26-27]或者设计芯片^[28],通过减少晶体管等有源器件的数量,获得更低的噪声。

本文为金刚石磁强计定制了超小型激光控制和光电探测模块。超小型激光器的整体尺寸为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$,最大输出光功率可达 700 mW,可在 450 mW 的输出光功率下长时间工作且无需风扇散热,总功耗为 2.8 W。光电探测器结构简单,功耗仅为 0.05 W,可以采用 2 个独立的探测模块分别检测激光和荧光,通过软件平衡探测方式有效减少激光功率引起的噪声,从而提高磁强计灵敏度。实验结果证明,两自制器件的性能与商用器件相近。本文将此光电系统应用于小型化金刚石 NV 色心量子磁强计,最终实现 $\text{nT/Hz}^{1/2}$ 量级的灵敏度,较之前 $\mu\text{T/Hz}^{1/2}$ 量级的工作有显著提升,使之有望应用于航空磁探等领域。

1 集成光电系统的原理及设计

集成化光电系统的设计应秉持在保证功能的基础上体积尽量小、噪声和功耗尽量低的原则,本节将分别对激光控制模块、光电探测模块和总体电路 3 个部分进行讨论。

1.1 激光控制模块

激光器的主要参数包括中心频率、输出光强、和光强半角,根据金刚石 NV 能带 $E_g = 2.33 \text{ eV}$ 可计算出光子吸收的上限截止波长 $\lambda_g = 532 \text{ nm}$ 。由于金刚石 NV 系综对激光频率要求不高,合适的激光中心频率可选范围为 $515 \sim 532 \text{ nm}$ 。理论上激光强度越高,测量灵敏度就越高,但是激光器产生的功率波动、热量和功耗会大大增加,这就需要采用更精确的驱动电路和更庞大的冷却系统,例如水冷或半导体制冷片,而这并不适用于集成化系统,因此本文将激光的输出光强设定在合适的 450 mW ,该光强下足以激发 NV 系综,同时激光器可以不使用风扇,仅依靠金属外壳散热即可,并能长时间稳定工作。此外,激光器的光强半角越小越接近于平行光,最好小于 1° 。计算可得上限截止波长 λ_g 为:

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} \approx 532 \text{ nm} \quad (2)$$

综上,本文选用 NICHIA NUGM04 激光头,该激光头的中心频率 λ_0 为 525 nm ,输出光强阈值约 350 mW ,最高 1.35 W ,水平和垂直光强半角分别位于 $0.2^\circ \sim 0.6^\circ$ 和 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 之间,根据下式可以计算出 $T = 300 \text{ K}$ 常温时激光器输出的光谱线宽 $\Delta\lambda$ 为:

$$\Delta\lambda = \lambda_0^2 \frac{3kT}{hc} \approx 17.22 \text{ nm} \quad (3)$$

该激光器输出的光谱线宽比商用激光器 1 nm 的线宽要大得多,这是由于商用激光器通常使用激光线滤光片将输出频率进行筛选,导致能量的浪费,因此在本文集成化系统中仍使用激光器的原始输出光。

激光控制电路的原理是通过向晶体管的基极输入控制电压,使集电极至发射极产生一个大电流以驱动激光头发光,并利用电感与电容构成的回路进行滤波。本文使用 LED 驱动芯片 TI TPS54200,该芯片内置一个晶体管,最大输出电流为 1.5 A ,足够驱动 NUGM04 激光头,电流波动小于 2% ,且带有脉宽调制(pulse width modulation, PWM)调光和过载自动关断功能。

1.2 光电探测模块

光电探测可以通过平衡探测的方法,即使用 2 个探测器分别采集信号和噪声光源,以有效减少激光噪声的影响。平衡探测包括硬件平衡探测和软件平衡探测,其中硬件平衡探测已被证实可以将磁场灵敏度提高 10 倍以上,但是会增加电路

的复杂度。本文在实验中尝试使用软件平衡探测。软件平衡探测由 2 个互阻放大器组成,其中一个采集荧光信号,另一个采集绿光信号,2 路信号通过双通道模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)转换为数字信号 A 和 B,然后分别被放大不同的倍率并相减,以获得最小的均方根误差。

首先,硅光电二极管(photodiode, PD) PD_1 收集红光, PD_2 收集绿光,分别将光信号转换成电流信号,其阴极连接到放大器 ADI AD8065 的反相输入端,阳极接地,电路的负反馈回路将光电流放大并转换成电压输出。电压对电流放大系数的计算方法为:

$$A_{V-I} = R_F = \frac{U_{OUT}}{IS_\lambda} = 200 \Omega \quad (4)$$

其中: $U_{OUT} = 540 \text{ mV}$, 为输出电压; $I = 540 \text{ mW}$, 为输入光强; $S_\lambda = 0.5 \text{ A/W}$, 为波长 $\lambda = 700 \text{ nm}$ 处的光电二极管的光敏度; R_F 为反馈电阻。电路选用 HAMAMATSU s13955-01 硅光电二极管,该 PD 的感光面积较大 ($7.4 \text{ mm} \times 7.4 \text{ mm}$),且暗电流较小(反向电压 10 mV 时,暗电流为 1 nA)、光敏度高(在 $670, 525 \text{ nm}$ 处的灵敏度分别为 $0.5, 0.4 \text{ A/W}$)。当激光强度为 450 mW ,反馈电阻设为 $R_{F1} = 200 \Omega, R_{F2} = 2.2 \text{ k}\Omega$ 时,收集到的荧光和散射绿光的输出电压为 $540, 190 \text{ mV}$,因此根据式(3)可以推测收集到的荧光强度约为 5.4 mW ,散射绿光强度为 $216 \mu\text{W}$ 。由于 R_F 和 C_{IN} 在放大器的环路传递函数中产生一个极点,为了消除这种不稳定,可以使用补偿电容 C_F 创建一个零点,即 45° 相位裕补偿,首先需要计算反馈网络虚拟电容 C_c ,计算方法为:

$$C_c = \frac{1}{2\pi R_{F1} f_c} \approx 12.2 \text{ pF} \quad (5)$$

其中: $R_F = 200 \Omega$, 为反馈电阻; $f_c = 65 \text{ MHz}$, 为放大器的带宽。补偿电容 C_{F1} 为:

$$C_{F1} = \frac{C_c}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4C_i}{C_c}} \right) \approx 37 \text{ pF} \quad (6)$$

其中, $C_i = 66.6 \text{ pF}$, 为 PD 的输入电容。可以取一个大于 C_{F1} 计算值的常见电容值,同理可以计算 C_{F2} 。

1.3 总体电路

激光控制和光电探测电路原理图如图 2 所示,左边部分为激光控制模块,右边部分为光电探测模块,电路参数见表 1 所列,具体计算过程已在 1.1 节和 1.2 节中给出。由于本文使用平衡探测

的方法,需要制作 2 个电路相同的光电探测器,仅参数不同,因此图 2 中只画出 1 个,并用不同标号表示。

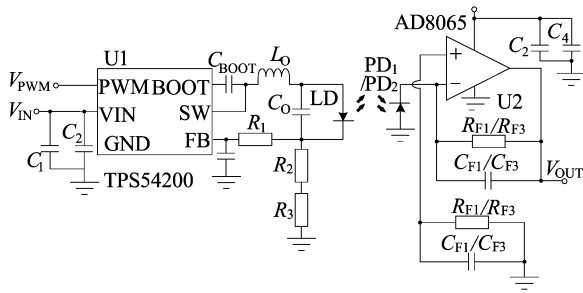


图 2 激光控制和光电探测电路原理图

表 1 电路参数

参数	数值	参数	数值
V_{IN}/V	8	$C_1/\mu F$	10
V_{PWM}/V	3.3	$C_2/\mu F$	10
V_{CC}/V	5	$C_0/\mu F$	10
R_1/Ω	910	C_3/nF	100
R_2/Ω	0.1	C_4/nF	100
R_3/Ω	0.033	C_{BOOT}/nF	100
R_{F1}/Ω	200	C_F/nF	82
R_{F2}/Ω	200	C_{F1}/pF	37
R_{F3}/Ω	2 200	C_{F2}/pF	37
R_{F4}/Ω	2 200	C_{F3}/pF	13
$L_0/\mu H$	10	C_{F4}/pF	13

2 测试结果

本文所设计的电路制作成实物后大小均为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$, 探头实物如图 3a 所示, 电路和布线图如图 3b 所示; 该电路实物被安装在小型化金刚石 NV 色心量子磁强计的探头上, 具体位置如图 3c 所示; 探头内部结构如图 3d 所示。由激光器产生的绿色激光通过非球面聚焦透镜 (AFL, IBTEK AC4301-A) 聚焦到金刚石上, 金刚石 (Element Six) 贴近微带天线, 微带天线辐射微波进行自旋态操控; 之后荧光由一个抛物面聚光器 (CPC, Edmund #17-709) 收集, 通过长通滤波器 (LPF, Edmund Stock #15-448) 照射到其中一个光电探测器上; 激光散射的绿光通过带通滤光片 (BPF, Edmund SCHOTT VG20) 照射到另一个光电探测器上; 最后, 采集光电探测器输出的电压信号, 经过处理后得到磁场信息。

首先进行光电探测模块的线性度单独测试; 然后将该模块安装于小型化金刚石 NV 色心量子磁强计上, 比较自制光电探测器与商用产品的噪声性能; 接着进行光驱动电路的稳定性测试, 分别

测量采用自制和商用激光器时磁强计的磁场灵敏度; 最后测试平衡探测下磁强计的磁场灵敏度。

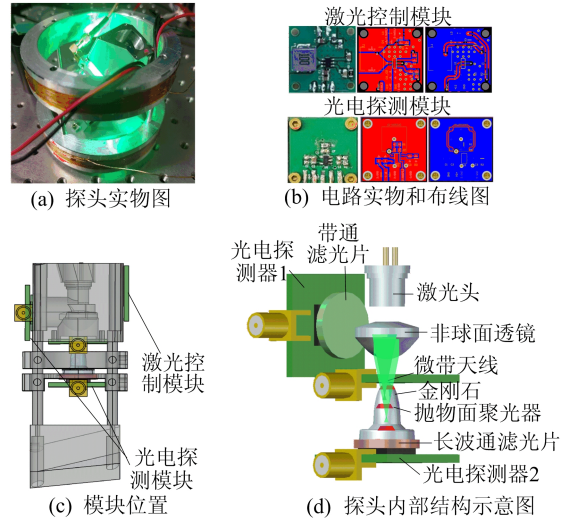


图 3 探头实物及测试系统图

在光电探测模块还未焊接光电二极管时, 首先使用商用波源提供 10 kHz 、中心值 400 mV 的信号, 接入到放大器的输入端, 调整输入信号的幅度, 并用示波器查看输出电压的幅度, 绘制放大器的响应曲线, 如图 4a 所示。

从图 4a 可以看出, 直线拟合得到的增益为 196.4 V/A , 线性度为 0.0053% , 可见放大电路的响应良好。然后, 分别使用自制光电探测器和商用光电探测器 (Thorlabs DET) 测量金刚石发出的荧光, 关闭微波, 并通过调整放大倍数使输出电压相等, 测得自制和商用的光电探测器输出磁场噪声分别为 16.5 、 $11.0\text{ nT/Hz}^{1/2}$, 前者比后者差 50% 。

将激光头涂上导热硅脂后安装在铝合金外壳中, 并将输出光强设定为 450 mW , 稳定工作 4 h 后测得其外壳温度为 38.9° 、功耗为 2.8 W 。分别使用相同的光电探测器探测自制激光器和商用激光器的输出, 并保证光电探测器的增益与输出电压相同, 使用示波器观察发现, 自制激光器的峰-峰值噪声是商用激光器的 4 倍。本文进一步利用金刚石磁强计测量使用商用激光器 (CNI MLL-FN-532 nm-300 mW) 和使用自制激光器时的磁场灵敏度, 保证激发的荧光强度一致, 结果如图 4b 所示。从图 4b 可以看出, 使用自制激光器时磁场灵敏度为 $18.5\text{ nT/Hz}^{1/2}$, 使用商用激光器时为 $15.0\text{ nT/Hz}^{1/2}$, 减去 $2.1\text{ nT/Hz}^{1/2}$ 的电子学底噪, 前者比后者仅差了 1.27 倍, 为同一量级。

进行磁强计整机的灵敏度测试, 在 10 Hz 的

等效噪声带宽下得到了 $3 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ 的磁场灵敏度。最后,本文对磁强计在不同等效噪声带宽下进行灵敏度测试,结果如图 3c 所示,在 $1.3 \sim 625.0 \text{ Hz}$ 的等效噪声带宽范围内,灵敏度均在 $\text{nT/Hz}^{1/2}$ 量级。

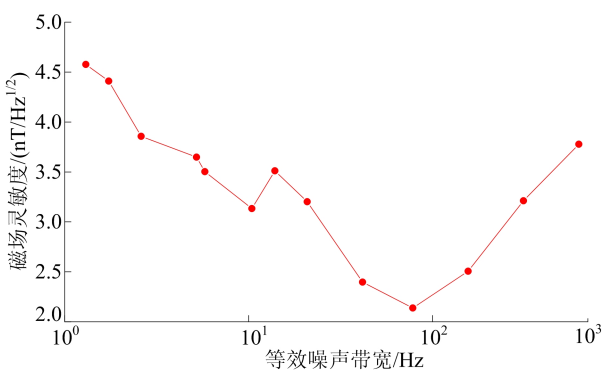
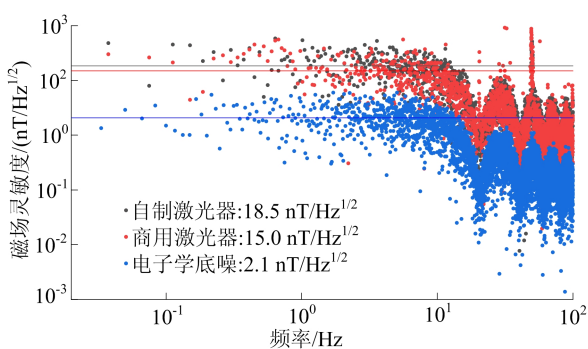
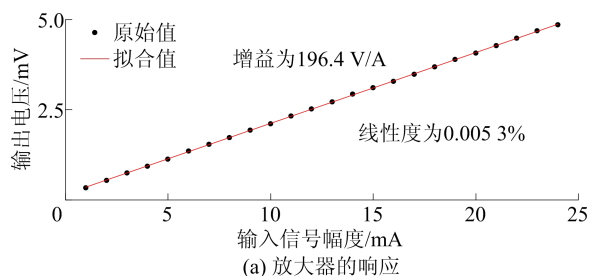


图 4 电路性能测试结果

3 结 论

本文为金刚石磁强计研制了一套集成光电系统,包含超小型激光控制和光电探测模块,所设计的模块实物性能出色,与商用器件相当,但结构更简单,体积、重量和功耗显著降低。将该光电系统应用于小型化金刚石 NV 色心量子磁强计,实现了 $\text{nT/Hz}^{1/2}$ 量级的灵敏度,远超之前 $\mu\text{T/Hz}^{1/2}$ 量级的工作成果,证明了该小型化磁强计有望应用在航空磁探等领域。由于使用商用芯片设计电路,不可避免地比使用分立器件设计的电路噪声

大,这将是未来首要改进的方向。

[参 考 文 献]

- [1] BARRY J F, SCHLOSS J M, BAUCH E, et al. Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry[J]. Rev Mod Phys, 2020, 92(1): 015004.
- [2] MAAYANI S, FOY C, ENGLUND D, et al. Distributed quantum fiber magnetometry[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13: 1900075.
- [3] DUAN D, DU G, 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: 6734.
- [4] 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: 2483.
- [5] WEBB J L, CLEMENT J D, TROISE L, et al. Nanoscale sensitivity magnetic field sensing using a compact diamond nitrogen-vacancy magnetometer[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114: 231103.
- [6] ZHENG D, MA Z, GUO W, 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: 155004.
- [7] PATEL R, ZHOU L, FRANGESKOU A, et al. Subnanoscale magnetometry with a fiber-coupled diamond sensor[J]. Phys Rev Appl, 2020, 14: 044058.
- [8] STURNER 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: 2000111.
- [9] 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: 191104.
- [10] STURNER 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.
- [11] KIM D, IBRAHIM I, FOY C, et al. A CMOS-integrated quantum sensor based on nitrogen-vacancy centres[J]. Nature Electronics, 2019, 2: 284-289.
- [12] IBRAHIM M I, FOY C, ENGLUND D R, et al. High scalability CMOS quantum magnetometer with spin-state excitation and detection of diamond color centers[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2021, 56(3): 1001-1014.
- [13] HONG L, LI H, YANG H, et al. Fully integrated fluorescence biosensors on-chip employing multi-functional nanoplasmonic optical structures in CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(9): 2388-2406.

(下转第 101 页)

- [8] CHANG X M, LIU D J, GAO F, et al. A study on lateral transient vibration of large diameter piles considering pile-soil interaction[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 90(11): 211-220.
- [9] WU J T, NAGGAR M H, WANG K H, et al. Lateral vibration characteristics of an extended pile shaft under low-strain integrity test[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 126: 105812.
- [10] WU J T, NAGGAR M H, WANG K H, et al. Analytical study of employing low-strain lateral pile integrity test on a defective extended pile shaft[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146(9): 4020103.
- [11] ZHANG J Y, CHEN L Z, JIN Y. Theoretical basis and numerical simulation of parallel seismic test for existing piles using flexural wave[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 84(5): 13-21.
- [12] VIVEK S, MURTHY G. Nondestructive method for length estimation of pile foundations through effective dispersion analysis of reflections[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, 38(2): 1-11.
- [13] VIVEK S, MURTHY G. Nondestructive length estimation of an embedded pile through combined analysis of transverse and longitudinal waves[J]. *NDT & E International*, 2020, 110: 102203.
- [14] YU C P. Evaluation of pile lengths using impact-induced flexural vibrations—a frequency domain approach[J]. *NDT & E International*, 2019, 108: 102174.
- [15] LU Z T, WANG Z L, LIU D J, et al. Propagation characteristics of flexural wave and the reflection from vertical cracks during pipe-pile integrity testing[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2022, 46(9): 1660-1684.
- [16] 卢志堂, 王志亮, 柯宅邦, 等. 偏心瞬态激振下基桩横向和竖向振动分析[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(9): 1751-1759.
- [17] 龙丽丽, 刘东甲, 卢志堂, 等. 基于 Timoshenko 梁模型的完整桩瞬态横向振动模拟计算[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2011, 34(3): 403-407.
- [18] CHAI H, PHOON K, ZHANG D. Effects of the source on wave propagation in pile integrity testing[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(9): 1200-1208.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 66 页)

- [14] DEGUCHI H, HAYASHI T, SAITO H, et al. Compact and portable quantum sensor module using diamond NV centers[J]. *Applied Physics Express*, 2023, 16: 062004.
- [15] MARIAMI G, UMEMOTO A, NOMURA S. A homemade portable device based on Arduino Uno for pulsed magnetic resonance of NV centers in diamond[J]. *AIP Advances*, 2022, 12: 065321.
- [16] BLASCO G, DÜRICH D, REH H, et al. A sub-ns integrated CMOS laser driver with configurable laser pulses for time-of-flight applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(16): 6547-6556.
- [17] CHEN Z, YAN Y, SHU J, et al. Modulated high power and narrow pulse width laser drive circuit for lidar system [J]. *Electronics*, 2021(7): 10070823.
- [18] MIAO W, HUANG J, CHEN H, et al. Simulation and analysis of pulse driving circuit for semiconductor laser [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 632(4): 042076.
- [19] HUANG H, NI J, WANG H, et al. A novel power stability drive system of semiconductor laser diode for high-precision measurement [J]. *Measurement and Control*, 2019, 52(5/6): 46272.
- [20] ZHAO Y, TIAN Z, FENG X, et al. High-precision semiconductor laser current drive and temperature control system design[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): s22249989.
- [21] 李金一, 王华睿. 多工作模式下的非温控式半导体激光驱动器设计[J]. *应用激光*, 2023, 43(8): 159-169.
- [22] 王彪, 程林祥, 薛金波, 等. 复合式 VCSEL 型 CO 和 CH₄ 激光气体检测系统设计 [J]. *激光杂志*, 2023, 44(7): 27-31.
- [23] ZHANG S, ZHANG C, PAN X, et al. High-performance fully differential photodiode amplifier for miniature fiber-optic gyroscopes[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2125.
- [24] 秦正波, 任羊弟, 王辉. 微弱信号检测的超低噪音宽带放大器设计[J]. *现代经济信息*, 2017(5): 339-340.
- [25] 陈晓娟, 樊欣欣, 吴洁. 低频低噪声测量放大器的设计[J]. *现代电子技术*, 2016, 39(10): 116-119.
- [26] 刘宝衡, 付天晖, 侯文达. 一种低频低噪声前置放大器的设计[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(12): 1-5.
- [27] 王秀华. 前置低噪声放大器的研究与设计[J]. *电子测量技术*, 2013, 36(6): 35-37.
- [28] MOHAN S S, HERSHENSON M M, BOYD S P, et al. Bandwidth extension in CMOS with optimized on-chip inductors[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2000, 35(3): 34655.

(责任编辑 胡亚敏)