

TDLAS气体激光遥测高灵敏光电探测电路设计

裴梓伊 胡朋兵 潘孙强 戚海洋 刘素梅 刘东

Design of a highly sensitive photoelectric detection circuit for TDLAS gas laser telemetry

PEI Zi-yi, HU Peng-bing, PAN Sun-qiang, QI Hai-yang, LIU Su-mei, LIU Dong

引用本文:

裴梓伊, 胡朋兵, 潘孙强, 戚海洋, 刘素梅, 刘东. TDLAS气体激光遥测高灵敏光电探测电路设计[J]. *中国光学*, 2024, 17(1): 198–208. doi: 10.37188/CO.2023–0107

PEI Zi-yi, HU Peng-bing, PAN Sun-qiang, QI Hai-yang, LIU Su-mei, LIU Dong. Design of a highly sensitive photoelectric detection circuit for TDLAS gas laser telemetry[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 198-208. doi: 10.37188/CO.2023-0107

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0107>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光电探测的多光谱测温装置

Multi-spectral temperature measuring system based on photoelectric detection

中国光学 (中英文). 2019, 12(2): 289 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0289>

多元热流体激光检测及杂光抑制光路

Optical path of laser detection and stray light suppression for multiple thermal fluids

中国光学 (中英文). 2019, 12(2): 310 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0310>

高灵敏度空间点目标探测系统设计

Design of highly sensitive space point target detection system

中国光学 (中英文). 2018, 11(1): 115 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0115>

用于太阳光谱仪的光电探测系统线性度测试装置

Linearity testing device for the photoelectric detecting system of solar spectrometers

中国光学 (中英文). 2019, 12(2): 294 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0294>

基于Se和有机的无机钙钛矿异质结的宽光谱光电探测器制备及其光电特性研究

Fabrication and photoelectric properties of organic-inorganic broad-spectrum photodetectors based on Se microwire/perovskite heterojunction

中国光学 (中英文). 2019, 12(5): 1057 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1057>

TDLAS直接吸收法测量CO₂的基线选择方法

Selection of baseline method in TDLAS direct absorption CO₂ measurement

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 455 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0455>

文章编号 2097-1842(2024)01-0198-11

TDLAS 气体激光遥测高灵敏光电探测电路设计

裴梓伊^{1,2}, 胡朋兵^{2,3}, 潘孙强^{2,3}, 戚海洋^{2,3}, 刘素梅^{2,3}, 刘东^{1*}

(1. 浙江大学光电科学与工程学院 极端光学技术与仪器全国重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310018;

3. 浙江省能源与环境保护计量检测重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对气体激光遥测光信号微弱、环境因素干扰强等特点,结合波长调制技术,设计和研究了用于 TDLAS 激光遥测的高灵敏度光电探测电路(Highly Sensitive Photoelectric Detection Circuit, HSPDC)。基于波长调制技术,确定了 TDLAS 信号噪声抑制方法;采用光电二极管理想模型,分析了光电探测电路的线性响应特性并确定了光电二极管的关键参数;基于级联放大原理设计、仿真并对 HSPDC 进行测试。结果表明:所设计 HSPDC 的光功率检测下限为 0.11 nW,信号衰减仅为 0.79 dB($f=10$ kHz),截止频率较现有 10^8 V/A 跨阻放大电路高一个数量级,可用于高速调制微弱光信号的探测。搭建了气体激光遥测系统,当调制频率为 3 kHz 时,激光遥测系统获得了良好的检测性能,检测灵敏度达到 88.66 mV/ppm,检测限优于 0.565 ppm,线性拟合度 R^2 为 0.9996。研究表明,研制的 HSPDC 光电探测电路具有响应速度快、检测灵敏度高等优点,可集成化,能满足气体激光遥测应用需求。

关键词:光电探测;跨阻放大;TDLAS;开放光路;激光遥测

中图分类号:O433.1; O433.4 文献标志码: A doi:10.37188/CO.2023-0107

Design of a highly sensitive photoelectric detection circuit for TDLAS gas laser telemetry

PEI Zi-yi^{1,2}, HU Peng-bing^{2,3}, PAN Sun-qiang^{2,3}, QI Hai-yang^{2,3}, LIU Su-mei^{2,3}, LIU Dong^{1*}

(1. State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation, College of Optical Science

and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China;

3. Key Laboratory of Energy and Environmental Protection Measurement of

Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

* Corresponding author, E-mail: liudongopt@zju.edu.cn

Abstract: Aiming at the characteristics of weak gas laser telemetry optical signals and strong interference from environmental factors, a Highly Sensitive Photoelectric Detection Circuit (HSPDC) for TDLAS laser tele-

收稿日期:2023-06-25; 修订日期:2023-07-20

基金项目:2022 年度“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(No. 2022C03065, No. 2022C03162, No. 2022C03084); 浙江省市场监督管理局雏鹰计划 培育项目(No. CY2023001); 浙江省市场监督管理局科研计划项目(No. QN2023419) Supported by the “Pioneer” and “Leading Goose” R&D Program of Zhejiang (No. 2022C03065, No. 2022C03162, No. 2022C03084); Science and Technology Plan Program, Eagle Plan Training Program of Marketing Surveillance & Administration Bureau of Zhejiang Province (No. QN2023419, No. CY2023001)

metry based on wavelength modulation technology has been designed and investigated. In addition, a noise suppression method for TDLAS signals based on wavelength modulation technology was determined. The photodiode ideal model is utilized to analyze the linear response characteristics of the photodetector circuit and determine the essential photodiode parameters. Based on the cascade amplification principle, the HSP-DC is designed, simulated, and tested, achieving a lower limit of optical power detection of 0.11 nW, a signal attenuation of 0.79 dB ($f=10$ kHz). The cutoff frequency is one order of magnitude higher than the existing 10^8 V/A cross-impedance amplification circuit. Therefore, the HSPDC is applicable for high-speed modulation of weak optical signals. The laser telemetry system exhibits excellent detection performance at a modulation frequency of 3 kHz, with a detection sensitivity of 88.66 mV/ppm, a detection limit of less than 0.565 ppm, and a linear fit R^2 of 0.9996. The study demonstrates that the HSPDC photoelectric detection circuit has the advantages of fast response, high detection sensitivity and accuracy. Thus, it can be integrated to meet the needs of gas laser telemetry applications.

Key words: photoelectric detection; transimpedance amplification; TDLAS; open light path; laser telemetry

1 引 言

近年来,环境保护受到人们越来越多的关注,痕量/微量气体检测^[1]、颗粒物检测^[2]、尘埃气溶胶检测^[3]、海洋水质检测^[4]乃至气溶胶-水云特性检测^[5-6]等相关领域均迎来了蓬勃的发展。目前,痕量气体检测主要包括光学检测和电化学片上检测技术^[7-9]。其中,光学检测技术近年来发展迅速^[10],推动了相关研究领域的发展^[11-14]。可调谐半导体激光吸收光谱技术 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) 作为激光遥测技术之一,凭借其高灵敏度、强抗噪能力和快速响应等特性被广泛应用于同位素测量、气体泄漏检测、痕量大气污染物检测等研究^[15]。常见的应用 TDLAS 技术进行气体检测的方式分为原位检测和遥测两种。原位检测即在气体漏点处进行检测,具有稳定性强,灵敏度高等优势。2020 年,钟笠等人^[16]采用 TDLAS 装置在气池中测量了丙烯气体浓度,测量误差最大为 19.17 ppm; 2021 年,张伟健等人^[17]基于纳米金涂覆微纳光纤倏逝场实现了氨气检测,长期监测时相对误差为 5.38%。这些 TDLAS 检测均属于原位检测,适用于工厂等场所气体浓度的长期监测。遥测,即在开放光路下远距离实现气体浓度检测,检测量通常为气体柱浓度。2015 年,姚路等人^[18]基于 TDLAS 技术通过离轴抛物面反射镜实现了吸收光程为 700 m 的痕量 CO 气体浓度测量; 2021 年,

Xin F 等人^[19]采用 TDLAS 直接吸收技术,通过 7 块 64 mm 直径的后向散射装置测量了 20 m 和 110 m 垂直高度 CO₂ 气体柱浓度。这些 TDLAS 检测均属于气体遥测,具有检测范围大,系统集成度高,操作简洁等优势。然而,现有的 TDLAS 气体遥测系统通常需要目标反射物配合,且容易受环境光电信号的干扰,稳定性及灵敏度较差。因此,为获得大检测范围和较高的灵敏度及稳定性,本文对 TDLAS 技术中的核心部件——光电探测电路进行了研究,用以提升 TDLAS 气体激光遥测系统的灵敏度和信噪比。

目前应用于 TDLAS 气体激光遥测领域的光电探测器主要有光电倍增管 (Photomultiplier Tube, PMT)、雪崩光电二极管 (Avalanche Photon Diode, APD) 以及 PIN 光电二极管。其中, PMT 主要应用于紫外及可见光波段,感光灵敏度高^[20],但气体吸收光谱通常在近、中红外波段,因此 PMT 在气体激光遥测领域中几乎没有应用。APD 虽然有在红外光波段检测微弱光信号的能力,但 APD 仅能实现兆级跨阻增益,无法满足气体激光遥测信号百兆级增益的要求^[21]。PIN 光电二极管种类繁多,波长覆盖范围宽、易于集成,但其感光灵敏值仅在 1 A/W 左右,无法直接用于气体激光遥测信号测量。因此,需要配合相应的跨阻放大器 (Transimpedance Amplifier, TIA) 检测微弱的后向散射信号。

目前, TIA 商用产品较多,但普遍存在增益不足、响应速度慢、体积偏大和价格昂贵等问题。

例如: 索雷博光电公司提供的跨阻放大器的增益达到 10^8 V/A, 但其截止频率仅为 1 kHz, 当截止频率增加至 100 kHz 时, 增益迅速衰减为 10^4 V/A; 爱特蒙特公司生产的高增益跨阻放大器在低噪声模式下, 增益可达到 10^8 V/A, 然而截止频率同样仅有 1.2 kHz, 且成本较高; 而国内同类产品增益通常为 100 V/A, 远低于国外产品。

本文依据线性响应原理选型 PIN 光电二极管, 通过级联放大电路设计实现了高灵敏度、高增益、高截止频率的光电探测电路。其检测下限为 0.11 nW, 衰减仅为 0.79 dB ($f=10$ kHz)。实验结果显示: 调制频率为 3 kHz 时, 激光遥测系统获得了良好的检测性能, 检测灵敏度达到 88.66 mV/ppm; 检测限优于 0.565 ppm; 线性拟合度 R^2 为 0.9996。研究表明, 设计的光电探测电路突破了 TDLAS 气体激光遥测关键核心技术, 推进了激光遥测技术的健康发展, 在气体激光遥测领域具有重要意义。

2 设计理论

2.1 TDLAS 波长调制技术及噪声分析

用于气体激光遥测的 TDLAS 技术主要有直接吸收光谱技术和波长调制光谱技术^[22-23]。其中, 直接吸收光谱技术是通过半导体激光器的电流进行低频调制, 使激光波长扫描覆盖气体的完整吸收峰, 再通过计算光强曲线在频域上的积分, 反演得到气体浓度的方法。波长调制光谱技术在低频扫描信号的基础上叠加高频调制信号, 使光信号频率高于低频噪声, 再通过滤波去除噪声信号, 提升信噪比, 因此, 波长调制技术的检测系统性能通常优于直接吸收光谱技术^[24]。

根据 Beer-Lambert 定律, 激光经过气体后探测电路得到的激光光强可表示为:

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[S(\nu)CL] \quad (1)$$

其中: ν 为激光空间频率; $S(\nu)$ 为分子吸收光谱; C 为气体浓度; L 为吸收光程。激光经过波长调制后, 波长随时间变化, 即

$$I[\nu(t)] = I_0[\nu(t)] \exp[S[\nu(t)]CL] \quad (2)$$

$$S[\nu(t)] = S[\nu_c + a \cos(2\pi ft)] \quad (3)$$

对于理想半导体激光器, 其光强不随空间频率的变化而变化。对于气体激光遥测领域, 有以下关系: $S[\nu(t)]CL \ll 1$, 因此,

$$I[\nu(t)] = I_0\{1 - S[\nu(t)]CL\} \quad (4)$$

令 $\theta = 2\pi ft$, 对透射光强 $I[\nu(t)]$ 做傅立叶级数展开

$$I(\nu_c, \theta) = I_0 \sum_{n=0}^{\infty} H_n(\nu_c) \cos(n\theta) \quad (5)$$

$$H_n(\nu_c) = \frac{2CL}{\pi} \int_0^{\pi} S(\nu) \cos(n\theta) d\theta \quad (6)$$

其中: $H_n(\nu_c)$ 为各次谐波分量, 可通过锁相放大器提取。对 $S(\nu)$ 做泰勒展开可得

$$S(\nu) = \sum_0^{\infty} \frac{1}{n!} S^{(n)}(\nu_c) (\nu - \nu_c)^n \quad (7)$$

将公式 (7) 代入公式 (6) 可得

$$H_n(\nu_c) = \frac{CL}{2^{n-1}n!} a^n S^{(n)}(\nu_c) \quad (8)$$

常温常压下, 分子碰撞展宽远大于多普勒展宽, 分子吸收光谱为

$$S(\nu) = \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + \alpha} \quad (9)$$

其中 α 为洛伦兹线型 (碰撞展宽) 谱线半宽度。根据式 (8)、式 (9) 可得出透射光强的一到六次谐波信号图, 如图 1 (彩图见期刊电子版) 所示。显然, 奇次谐波在谱线中心的相对强度为零, 偶次谐波在谱线中心的相对强度为极值, 且谐波次数越高, 相对强度越小, 因此选用二次谐波进行气体吸收浓度反演。

波长调制技术中, 调制信号频率通常为 1~20 kHz, 此时, 信号噪声主要为光电探测器和半导体激光器的 $1/f$ 噪声^[25]。半导体元件 $1/f$ 噪声功率谱密度可表示为

$$S_v(f) = \frac{AI^\beta}{f^\gamma} \quad (10)$$

其中: I 为半导体元件中的电流; f 代表噪声频率; A 和 β 均为与器件结构相关的常数; γ 为频率指数。显然, 调制信号频率越高, $1/f$ 噪声越小, 而现有 TIA 商用产品增益在 10^8 V/A 量级时, 截止频率为 1 kHz 左右, 仅满足波长调制技术的频率下

限, 不利于抑制 $1/f$ 噪声, 提升信噪比。因此, 设计具有高截止频率的高灵敏度光电探测电路, 对于提升 TDLAS 气体激光遥测系统灵敏度和信噪比具有重要意义。

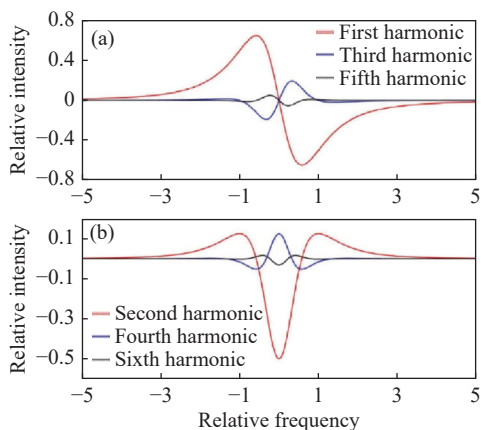


图 1 各次谐波信号。(a) 奇次谐波信号; (b) 偶次谐波信号
Fig. 1 Each harmonic signal. (a) Odd harmonic signal; (b) even harmonic signals

2.2 线性响应分析

在光电检测领域, 要获得较好的检测效果, 需要光电转换器件具有良好的线性输出响应。理论上, PIN 光电二极管可等效为恒流源和等效电容电阻的串并联形式。图 2 为 PIN 光电二极管的等效模型。图中, I 为理想恒流源, D 为理想二极管, R_d 和 C_d 分别为光电二极管的分流电阻和结电容, R_s 为等效串联电阻, R_L 和 C_L 分别为等效负载的电阻和电容。其中, R_s 、 R_d 和 C_d 与光电二极管自身结构和材料有关, 通常 R_s 取值在几欧到几

百欧之间, R_d 则在千欧到兆欧量级。

对光电二极管而言, 输出电流通常在纳安和微安量级, 因此 C_d 和 C_L 对电流的分流可以忽略不计。 I_d , I_{rd} , I_L 分别为结电流、分流电阻电流和负载电流, 分别表示为^[26]

$$I_d = I_0 [e^{qU_d/AkT} - 1] \quad (11)$$

$$I_{rd} = U_d/I_d = I_L(R_s + R_L)/R_d \quad (12)$$

$$I_L = \frac{I - I_0 [e^{qU_d(R_s + R_L)/AkT} - 1]}{1 + (R_s + R_L)/R_d} \quad (13)$$

其中, U_d 为二极管两端电压; I_0 为光电二极管的暗电流; 光电二极管 PN 结越小, I_0 越小, A 为一常数, 取值取决于制成光电二极管的材料, 取值通常在 1~10 之间, q 为电子电荷量 ($q=1.6 \times 10^{-19}$ C), T 为温度, k 为玻尔兹曼常数 ($k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K)。

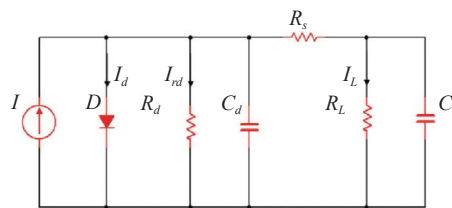


图 2 PIN 光电二极管等效模型
Fig. 2 Equivalent model of PIN photodiode

取铟镓砷光电二极管典型值, 即 $R_s=50 \Omega$ 、 $A=2$ 、 $T=298.15$ K、 $I_0=1$ nA。研究发现 R_L 在 $100 \Omega \sim 1$ M Ω 范围内、 R_d 取值在 10 k $\Omega \sim 1$ M Ω 内时 $I-I_L$ 响应曲线如图 3(彩图见期刊电子版) 所示。

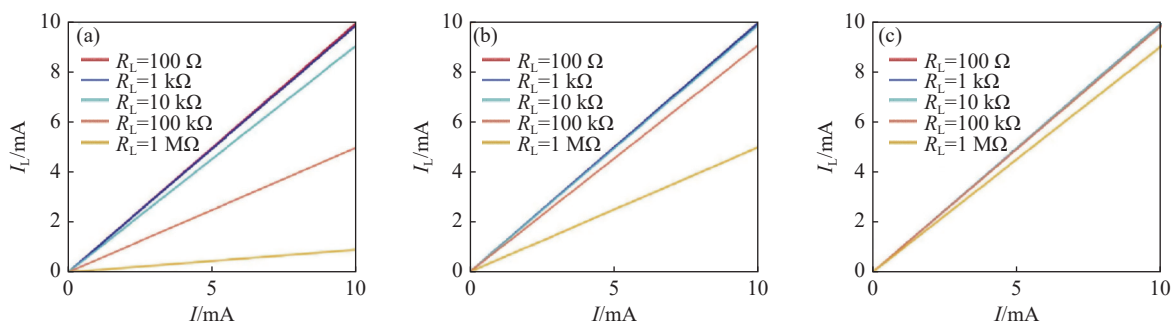


图 3 不同 R_d 时 $I-I_L$ 响应关系。(a) $R_d=10$ k Ω ; (b) $R_d=100$ k Ω ; (c) $R_d=1$ M Ω

Fig. 3 $I-I_L$ response relationship with different R_d values. (a) $R_d=10$ k Ω ; (b) $R_d=100$ k Ω ; (c) $R_d=1$ M Ω

其中, 图 3(a)~图 3(c) 分别为 $R_d=10$ k Ω , $R_d=100$ k Ω 和 $R_d=1$ M Ω 时的 $I-I_L$ 响应关系曲线。由图 3 可知, 当 R_L 为 100Ω 时, $I-I_L$ 的比例系数为 0.99, 当 R_L 增加到 1 M Ω 时, 比例系数降低为

0.09, 比例系数随 R_L 的增大而减小。此时电路对外接负载要求严苛。当 R_d 增大至 100 k Ω 时, R_L 由 100Ω 变化至 1 M Ω 的过程中对比例系数的影响从 0.99 降低到 0.55 左右, 负载对比例系数的影

响仍不可忽略。当 R_d 为 $1\text{ M}\Omega$ 时, R_L 由 $100\ \Omega$ 变化至 $100\ \text{k}\Omega$, 比例系数均被限定在 0.99 以上, I 与 I_L 展现出良好线性响应关系, 有利于电路光电信号的线性输出。综上所述, 要保证 I_L 与 I 满足 $1:1$ 线性相关, 设计光电探测电路时需满足以下两个条件:

(1) R_s 、 R_L 均不大于 $1\ \text{k}\Omega$, 使 $q/AkT \gg I_L(R_s + R_L)$;

(2) $R_d \geq 100\ \text{k}\Omega$, 使 $R_s + R_L \ll R_d$ 。

本文依据氨气及干扰气体的吸收曲线, 选用 $1512\ \text{nm}$ 作为检测波长, 选择 R_s 和 R_d 分别为几十欧和兆欧量级的铟镓砷光电二极管作为光电探测器, 光谱范围约为 $900 \sim 1700\ \text{nm}$, 峰值响应波长为 $1550\ \text{nm}$, 暗电流小于 $1.1\ \text{nA}$, 以满足线性响应条件和低噪声要求。

3 电路设计及仿真

3.1 光电探测电路设计

根据上一节对 $1/f$ 噪声特性的分析, 运放芯片应有足够高的增益带宽积 (Gain-Bandwidth Product, GBP), 以抑制噪声并提高增益, 因此选择 OPA656 和 LM324 运放芯片。OPA656 具有 $230\ \text{MHz}$ 的 GBP, $2\ \text{pA}$ 的输入偏置电流, 开环增

益典型值为 $65\ \text{dB}$, 可得到该芯片等效输入阻抗为 $56.2\ \Omega$ ^[26], 用于信号放大。四通道放大器 LM324 具有单位增益内部频率补偿功能, 输入电流偏置仅为 $45\ \text{nA}$, 双通道供电时, 供电电压范围为 $\pm 1.5\ \text{V}$ 到 $\pm 15\ \text{V}$, 用于信号反相和构建三阶巴特沃兹 (ButterWorth, BW) 滤波器。基于级联放大原理设计光电探测电路, 第一级为跨阻放大电路, 将光电流转换为电压信号, 增益为 $-10^5\ \text{V/A}$; 第二、三级为负反馈放大电路, 增益分别为 -10 和 $-100\ \text{V/V}$ 。光电信号经过级联放大后由 LM324 运放芯片反相并滤波输出, 总增益为 $+10^8\ \text{V/A}$, 响应带宽约为 $10\ \text{kHz}$ 。

光电探测电路原理示意图如图 4 所示。其中, 图 4 (a) 为跨阻放大电路, 图 4 (b) 为负反馈放大电路, 图 4 (c) 为 BW 滤波电路。图 4 (a)、图 4 (b) 的增益分别如式 (14)~式 (15) 所示。

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{R_F}{1} \quad (14)$$

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{R_F}{R_B} \quad (15)$$

采用一级跨阻放大电路、两级负反馈放大电路和一级反相电路 (增益 -1) 级联, 构成光电探测电路信号放大部分, 再串联 BW 滤波电路形成光电探测电路。

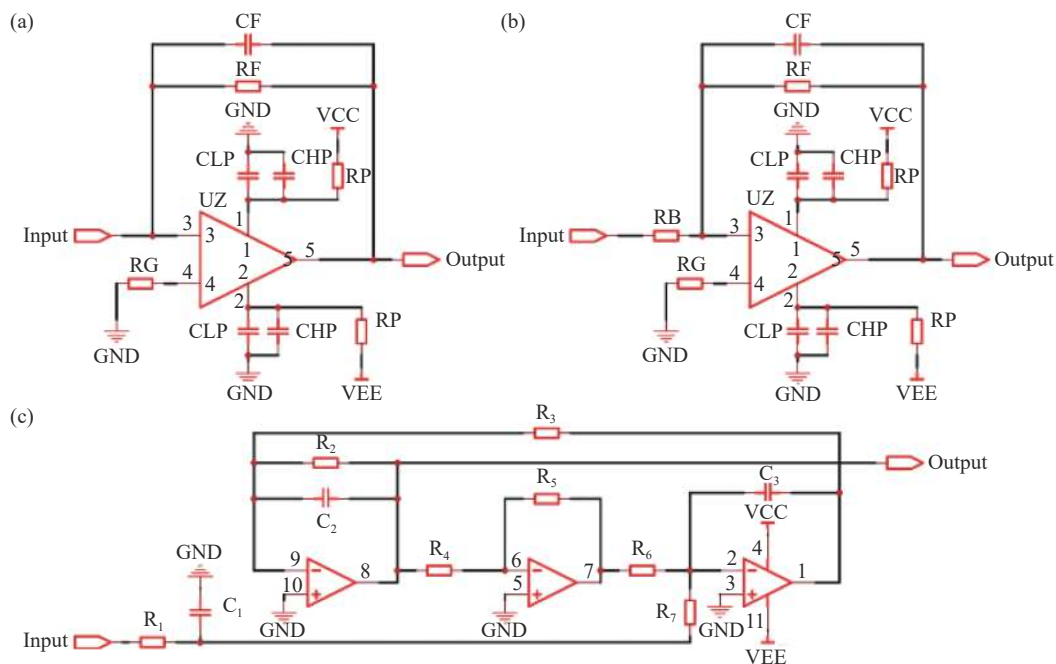


图 4 光电探测电路原理示意图。(a) 跨阻放大电路; (b) 负反馈放大电路; (c) BW 滤波电路

Fig. 4 Schematic diagram of photoelectric detection circuit. (a) Cross resistance amplification circuit; (b) negative feedback amplification circuit; (c) BW filtering circuit

3.2 电路仿真

使用电路仿真软件 Multisim 对图 4 设计的电路进行仿真。根据光功率检测结果, 遥测距离为 0 ~ 100 m 时, 气体激光遥测装置接收到的漫反射物体散射光功率约为 1 ~ 20 nW, 即 PIN 管输入电流范围约为 1.05 ~ 21 nA。因此, 设置输入电流峰值为 10 nA, 偏移量为 10 nA, 交流频率为 5 kHz, 热噪声源温度为 27 °C, 噪声频率为 10 MHz, 电阻为 1 kΩ。

光电探测电路仿真结果如图 5(彩图见期刊电子版)所示, 其中, 图 5 (a) 为各级放大电路输出信号, 图 5 (b) 为频率及相位响应。图 5 (a) 中 4 条曲线分别为第一级、第二级、第三级放大信号和最终输出信号, 对应纵坐标刻度为 1 mV/Div, 10 mV/Div, 1 V/Div 和 1 V/Div。

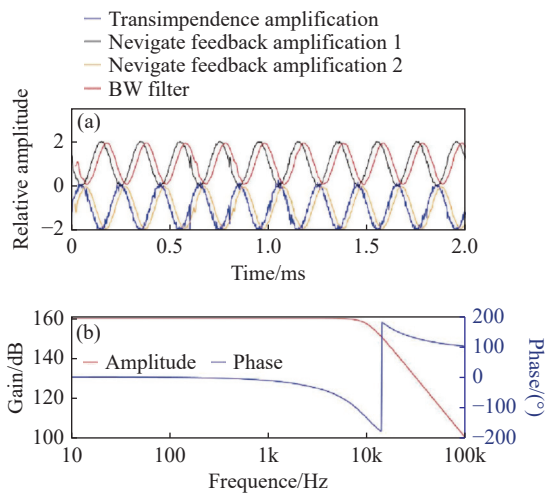


图 5 光电探测电路仿真结果。(a) 各级放大电路输出信号; (b) 增益及相位频率响应特性

Fig. 5 Photoelectric detection circuit simulation results. (a) Output signals of each stage of amplification circuit; (b) frequency response characteristic of gain and phase

仿真结果表明, 经放大滤波后的正弦波信号

与初始电流源信号符号一致, 放大了 10^8 V/A 且携带的高频噪声被抑制, 电路截止频率约为 10 kHz。输出信号虽然存在一定相移, 但信号波形没有发生畸变, 不影响信号的有效性和准确性。

4 实验装置与结果分析

4.1 实验装置

为验证 HSPDC 的检测性能, 分别基于 HSPDC 和商用跨阻放大器 (Thorlabs Photoelectric Detection Circuit, TLB PDC) 构建了 TDLAS 气体激光遥测系统(图 6), 并进行对比实验。

该系统由光学和电学两部分组成, 光学部分主要包括非球面透镜、分布式反馈半导体激光器 (Distributed Feedback -Laser Diode, DFB-LD)、准直器和光电二极管等。非球面透镜的响应波长范围为 350 ~ 2200 nm, 可将距离为 100 m、直径为 80 mm 的光斑聚焦成直径为 0.05 mm 的光斑, 焦距约为 110 mm, 有利于系统集成化。DFB-LD 中心波长为 1512 nm, 输出光功率约为 20 mW, 激光线宽约为 3 MHz。激光经过准直镜准直射出, 被物体 (墙面、管道等) 散射后部分散射光原路返回由非球面透镜接收, 会聚到光电二极管上实现光电信号转换。电学部分主要由激光控制器、光电探测电路、锁相放大器、信号发生器和示波器组成。其中: 激光控制器控制 DFB-LD 激光器激光输出, 控制温度和电流分别为 25 °C 和 60 mA; 信号发生器输出低频锯齿波扫描信号, 叠加锁相放大器内置高频正弦调制信号, 共同调制激光输出, 实现对气体吸收谱线的扫描; 光电探测电路接收气体遥测光信号并转换为电压信号, 由锁相放大器接收处理并输出二次谐波信号, 用于气体浓度反演。示波器同步接收显示光电探测电路输出信号和锁相放大器输出二次谐波信号。

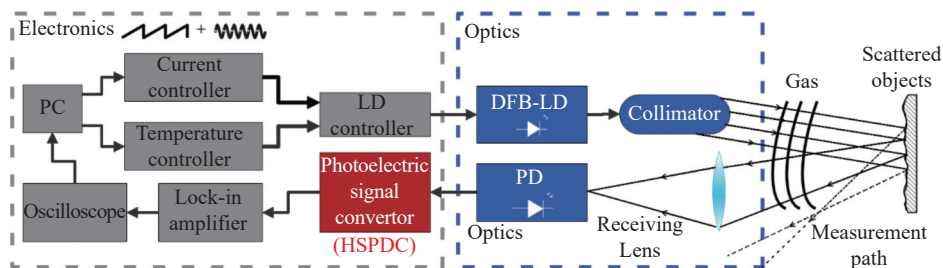


图 6 氨气激光遥测系统结构示意图

Fig. 6 Structural diagram of ammonia laser telemetry system

4.2 距离影响对比实验

激光控制器控制电流为 60 mA, TEC 控制温度为 25 °C, 调制方式为外部电压调制; 信号发生器产生频率为 100 Hz、对称度为 90% 且峰峰值为 500 mV 的锯齿波扫描电压信号, 作为激光控制器的外部调制输入, 并同步输出 TTL 信号触发示波器采集。

在无激光输出时, 对两套激光遥测系统的输出信号进行连续测量。通过计算输出信号的实验标准偏差来评价系统底噪, 如图 7 (彩图见期刊电子版) 所示。由图 7 可知, 基于 TLB PDC 遥测系统的暗电流噪声标准偏差为 32.9 mV, 系统底噪为 32.9 mV(1 倍标准偏差); 而基于 HSPDC 遥测系统的暗电流噪声标准偏差为 3.85 mV, 系统底噪为 3.85 mV(1 倍标准偏差), 优于 TLB PDC 系统底噪一个数量级, 性能得到了巨大改善, 光散射信号探测能力更强。

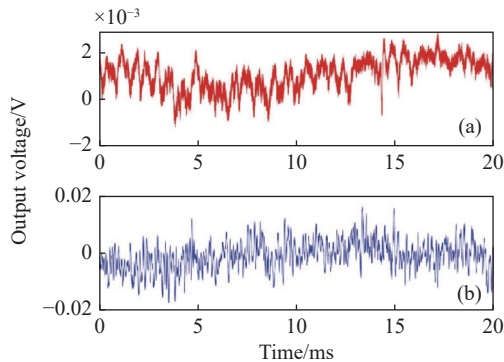


图 7 暗电流噪声信号。(a) HSPDC 噪声; (b) TLB PDC 噪声

Fig. 7 Dark current noise signal. (a) HSPDC noise; (b) TLB PDC noise

在激光开启的情况下, 在遥测距离分别为 10 m、20 m 时、30 m 和 60 m 时, 依次测量和记录激光遥测系统的光电探测信号, 如图 8 (彩图见期刊电子版) 所示。

为方便比较不同距离信号波形, 通过数据处理去除直流偏置成分, 取一个周期的锯齿波信号用于评价两系统信号的衰减程度和信噪比。由图 8 可知, 随着遥测距离的增加, 两系统探测信号呈现减小趋势, 变化规律一致且探测信号幅值也接近。但是在 10 m 时, TLB PDC 遥测系统光电信号出现饱和状态, 电压信号钳位失真, 而 HSPDC 没有出现信号失真, 表现出更加优异的动态响应特性。

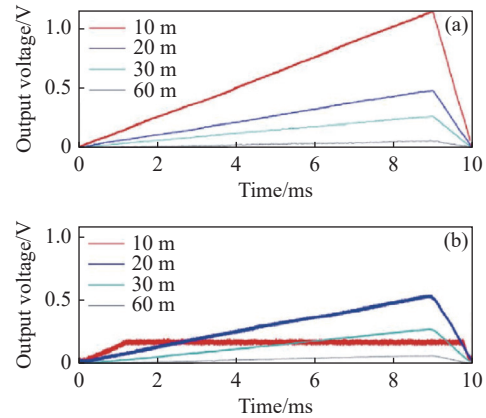


图 8 遥测距离变化时系统输出信号。(a) HSPDC 输出信号; (b) TLB PDC 输出信号

Fig. 8 System output signals when telemetry distance changes. (a) HSPDC output signal; (b) TLB PDC output signal

为准确评估两系统探测信号随距离变化的情况, 绘制了 10 ~ 60 m 探测信号峰峰值和标准偏差随距离变化曲线, 如图 9 (彩图见期刊电子版) 所示。

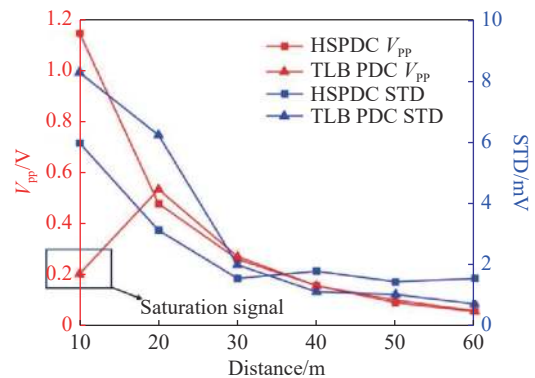


图 9 二次谐波峰峰值及标准偏差随距离变化曲线

Fig. 9 Curves of the second harmonic peak-to-peak value and standard deviation changing with distance

根据双向散射分布函数理论知, 接收透镜接收到的散射光可表示为公式 (16)^[27]:

$$P_r = P_i \cdot \rho_{\text{tot}} (\cos \theta)^{2k_1} \cdot \frac{r^2}{L^2}, \quad (16)$$

其中, P_r 为接收透镜的接收光功率; P_i 为出射光功率; ρ_{tot} 为散射体散射效率; θ 为入射光与散射体的夹角; k_1 为 Minnaert 常数, 取决于散射体材质; r 为透镜半径; L 为透镜距散射体的距离。因此, 两系统距离由近到远变化时, 信号衰减程度变化情况为先快速衰减后逐渐缓和。对于 HSPDC 遥测系统: 当遥测距离分别为 10 m 和 30 m 时, 探

测信号分别约为 1.2 V 和 0.3 V, 信号衰减率达到 45 mV/m; 而遥测距离为 60 m 时, 探测信号下降至 0.1 V, 信号衰减率仅为 6.7 mV/m。可见近遥测距离时, 信号衰减速度快, 随后变化趋势越发缓和。在 10 m 处, TLB PDC 信号出现钳位现象。这是由于增益信号超出运放芯片输出电压最大值, 出现饱和现象导致的, 而 HSPDC 遥测系统在全量程范围内探测信号正常, 响应范围更大。另外, 在遥测距离为 10~20 m 范围内, HSPDC 遥测系统探测信号标准偏差低于 TLB PDC, 标准偏差分别为 5.0~1.5mV 和 8.5~1.7 mV; 而遥测距离超过 30 m 后, 两者趋向一致, 约为 1.0 mV, 两者偏差较小。由此可见, 在近距离测量时, HSPDC 遥测系统信号稳定性优于 TLB PDC 遥测系统, 抗噪声能力更强, 有助于提升气体激光遥测系统的测量精度。

设置遥测距离为 20 m, 激光控制器温度和电流参数设置与距离影响对比实验一致。信号发生器输出高频正弦信号, 幅值为 300 mV, 记录不同频率下的信号峰峰值, 其与调制频率影响关系曲线如图 10 所示。HSPDC 遥测系统的信号峰峰值在 50 Hz~5 kHz 频率范围内未出现衰减, 在 5~10 kHz 范围内衰减 0.79 dB, 由此可知, 频率对信号峰峰值的影响可忽略不计; 而 TLB PDC 遥测系统在调制频率超过 1 kHz 后信号峰峰值迅速衰减至 14.2 dB, 显然无法用于高频率正弦信号调制。结果表明, TLB PDC 遥测系统的截止频率较低, 无法满足调制信号高频特性要求, 不利于远距离激光遥测时降低环境因素干扰^[28]; 而 HSPDC 遥测系统的截止频率大于 10 kHz, 呈现出优异的幅频响应特性, 可用于 TDLAS 气体浓度的高精度测量。

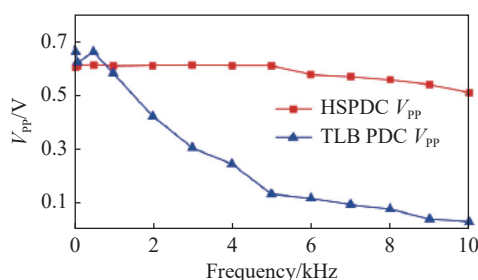


图 10 信号峰峰值随调制频率变化曲线

Fig. 10 Variation in signal peak-to-peak value with frequency

4.3 气体浓度响应对比实验

利用标准气体气袋模拟气体泄漏源, 分别对两系统进行气体浓度响应实验。激光控制器参数设置基本不变, 锁相放大器输出调制信号频率分别为 1 kHz 和 3 kHz, 与信号发生器产生的 10 Hz 扫描信号叠加作为激光控制器的外部信号输入。遥测距离为 20 m, 在散射物前放置浓度为 0.2% 的 10 cm 厚的标准氨气气袋, 调节锁相放大器的时间常数、灵敏度和正弦调制信号相位使二次谐波峰峰值达到最大。

依次放置浓度为 0.2%、1% 和 2% 标准氨气气袋, 测量并记录 1 kHz 和 3 kHz 调制信号频率下遥测系统的二次谐波波形, 实验结果如图 11(彩图见期刊电子版)所示。显然, 在调制信号频率为 1 kHz 时, HSPDC 和 TLB PDC 系统输出二次谐波峰峰值的变化趋势相差不大。以 1% 标准氨气为例, HSPDC 系统输出谐波噪声大小约为 61.1 mV(1 倍标准偏差), 谐波峰峰值约为 4.33 V, 信噪比为 70.88; 但当调制信号频率为 3 kHz 时, TLB PDC 系统由于响应带宽较低导致输出谐波峰峰值几乎为零, 波长调制技术失效, 而 HSPDC 系统输出噪声降低为 50.1 mV(1 倍标准偏差), 谐波峰峰值为 4.7 V, 信噪比为 93.81, 选择 3 kHz 的正弦调制频率可以实现更高信噪比测量。

图 12(彩图见期刊电子版)为 HSPDC 系统在调制频率分别 1 kHz 和 3 kHz, 气体浓度分别为 0.2%、1% 和 2% 时氨气和二次谐波峰峰值关系曲线。1 kHz 时, HSPDC 系统检测灵敏度为 3.743 V/%, $R^2=0.9990$; 3 kHz 时, HSPDC 系统检测灵敏度为 4.433 V/%, $R^2=0.9996$, 其中 R^2 为线性拟合度。气袋厚度为 10 cm, 探测光程为 20 m, 1% 气体浓度模拟泄漏源可接近等效为 50 ppm, 因此系统检测灵敏度应为 74.86 mV/ppm 和 88.66 mV/ppm。结果显示, 调制信号为 3 kHz 时, HSPDC 系统受外界环境及内部噪声干扰较弱, 谐波信号影响程度小, 系统可获得更高的响应灵敏度和线性拟合度。HSPDC 系统输出噪声为 50.1 mV(1 倍标准偏差), 实际氨气检测限达到 0.565 ppm, 优于其它氨气激光遥测仪产品性能。由此可见, 选择 3 kHz 的正弦信号进行高频调制可获得更高的信噪比、灵敏度和线性度, 系统抗干扰能力更强, 有利于提升气体浓度反演的准确率。

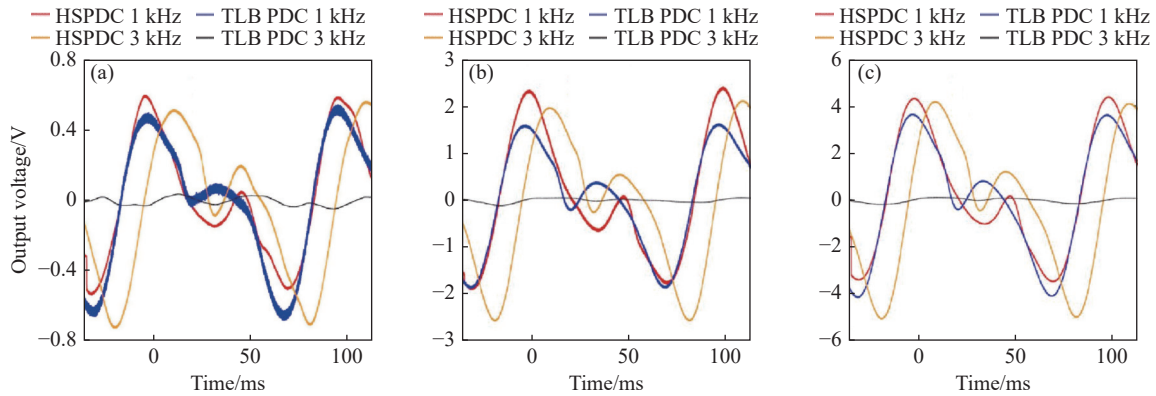


图 11 系统输出二次谐波波形。(a) 气体浓度 0.2%; (b) 气体浓度 1%; (c) 气体浓度 2%

Fig. 11 System output second harmonic waveforms. (a) Gas concentration 0.2%; (b) gas concentration 1%; (c) gas concentration 2%

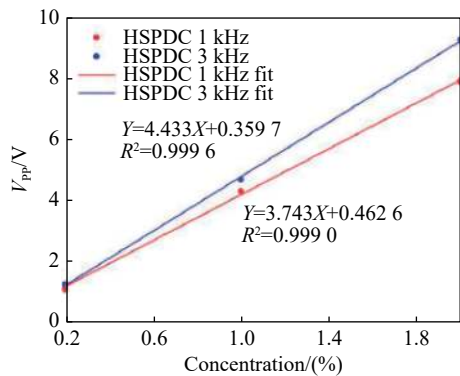


图 12 调制信号为 1 kHz 和 3 kHz 时系统浓度响应特性曲线

Fig. 12 System concentration response characteristic curves when modulation signal is 1 kHz and 3 kHz

5 结 论

本文基于波长调制技术基本原理分析确定了提高 TDLAS 气体激光遥测系统信噪比的方法;

基于光电二极管线性响应特性选型 InGaAs 光电二级管; 基于 OPA656 和 LM324 设计并仿真实现了高速高增益宽带光电探测电路 HSPDC。经测试增益为 10^8 V/A、信号衰减为 0.79 dB ($f=10$ kHz)。其截止频率较现有 10^8 V/A 增益跨阻放大电路高一个数量级, 衰减光功率检测限达到 0.11 nW, 暗电流噪声为 3.85 mV。将 HSPDC 应用于氨气激光遥测系统, 结合波长调制技术, 在 0~60 m 范围内对 10 cm 厚的 0.2%、1% 和 2% 的氨气标准气袋进行了测量。实验结果表明, 该系统在更高的调制频率时获得了更好的检测性能, 检测灵敏度达到 88.66 mV/ppm, 检测限优于 0.565 ppm, 线性拟合度 R^2 为 0.9996, 性能优于其它氨气激光遥测产品, 满足 60 m 甚至更远距离的气体泄漏监测。研制的光电探测电路具有噪声低、增益高、响应带大等优点, 可构建检测灵敏度高、线性度好、测量范围远的激光遥测装置, 满足气体泄漏激光遥测监测等需求。

参考文献:

- [1] YU S F, ZHANG ZH, XIA H Y, *et al.*. Photon-counting distributed free-space spectroscopy[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 212.
- [2] CHEN S J, TONG B W, RUSSELL L M, *et al.*. Lidar-based daytime boundary layer height variation and impact on the regional satellite-based $PM_{2.5}$ estimate[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 291: 113224.
- [3] XIAO D, WANG N CH, CHEN S J, *et al.*. Simultaneous profiling of dust aerosol mass concentration and optical properties with polarized high-spectral-resolution lidar[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 872: 162091.
- [4] ZHANG K, CHEN Y T, ZHAO H K, *et al.*. Comprehensive, continuous, and vertical measurements of seawater constituents with triple-field-of-view high-spectral-resolution lidar[J]. *Research*, 2023, 6: 0201.
- [5] WANG N CH, ZHANG K, SHEN X, *et al.*. Dual-field-of-view high-spectral-resolution lidar: Simultaneous profiling of aerosol and water cloud to study aerosol-cloud interaction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(10): e2110756119.

- [6] KE J, SUN Y SH, DONG CH ZH, *et al.*. Development of China's first space-borne aerosol-cloud high-spectral-resolution lidar: retrieval algorithm and airborne demonstration[J]. *Photonix*, 2022, 3: 17.
- [7] WEN L, SUN ZH W, ZHENG Q L *et al.*. On-chip ultrasensitive and rapid hydrogen sensing based on plasmon-induced hot electron-molecule interaction[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 76.
- [8] WU L M, YUAN X X, TANG Y X, *et al.*. MXene sensors based on optical and electrical sensing signals: from biological, chemical, and physical sensing to emerging intelligent and bionic devices[J]. *Photonix*, 2023, 4(1): 15.
- [9] LEE J, YU E S, KIM T, *et al.*. Naked-eye observation of water-forming reaction on palladium etalon: transduction of gas-matter reaction into light-matter interaction[J]. *Photonix*, 2023, 4(1): 20.
- [10] ZHANG CH X, LIU CH, HU Q H, *et al.*. Satellite UV-Vis spectroscopy: implications for air quality trends and their driving forces in China during 2005-2017[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 8: 100.
- [11] VLK M, DATTA A, ALBERTI S, *et al.*. Extraordinary evanescent field confinement waveguide sensor for mid-infrared trace gas spectroscopy[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 26.
- [12] DENG Y, FAN ZH F, ZHAO B B, *et al.*. Mid-infrared hyperchaos of interband cascade lasers[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 11(1): 7.
- [13] MARINOV E, MARTINS R J, YOUSSEF M A B, *et al.*. Overcoming the limitations of 3D sensors with wide field of view metasurface-enhanced scanning lidar[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(4): 046005.
- [14] HUANG ZH T, CHANG C Y, CHEN K P, *et al.*. Tunable lasing direction in one-dimensional suspended high-contrast grating using bound states in the continuum[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(6): 066004.
- [15] 张志荣, 夏滑, 孙鹏帅, 等. 基于高灵敏激光吸收光谱技术的稳定气态同位素测量及其应用 (特邀)[J]. *光子学报*, 2023, 52(3): 0352108.
ZHANG ZH R, XIA H, SUN P SH, *et al.*. Stable gaseous isotope measurement method based on highly sensitive laser absorption spectroscopy and its applications (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(3): 0352108. (in Chinese).
- [16] 钟笠, 宋迪, 焦月, 等. 具有复杂光谱特征的丙烯气体的 TDLAS 检测技术研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 1044-1054.
ZHONG L, SONG D, JIAO Y, *et al.*. TDLAS detection of propylene with complex spectral features[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1044-1054. (in Chinese).
- [17] 张伟建, 曾祥龙, 杨傲, 等. 纳米金涂覆微纳光纤的倏逝场氨气检测研究[J]. *光电工程*, 2021, 48(9): 200451.
ZHANG W J, ZENG X L, YANG A, *et al.*. Research on evanescent field ammonia detection with gold-nanosphere coated microfibers[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(9): 200451. (in Chinese).
- [18] 姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0215003.
YAO L, LIU W Q, LIU J G, *et al.*. Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0215003. (in Chinese).
- [19] XIN F X, LI J, GUO J J, *et al.*. Measurement of atmospheric CO₂ column concentrations based on open-path TDLAS[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1722.
- [20] REN L, WANG X CH, HUANG G R, *et al.*. Contribution of microchannel plate luminescence to the noise of 20-inch photomultiplier tubes[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1022: 165973.
- [21] SUZUKI S, NAMEKATA N, TSUJINO K, *et al.*. Highly enhanced avalanche probability using sinusoidally-gated silicon avalanche photodiode[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(4): 041105.
- [22] 顾宇强, 谭明, 吴渊渊, 等. 具有优化倍增层 InAlAs/InGaAs 雪崩光电二极管[J]. *红外与毫米波学报*, 2021, 40(6): 715-720.
GU Y Q, TAN M, WU Y Y, *et al.*. InAlAs/InGaAs avalanche photodiode with an optimized multiplication layer[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2021, 40(6): 715-720. (in Chinese).
- [23] 杨舒涵, 乔顺达, 林殿阳, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(1): 151-157.
YANG SH H, QIAO SH D, LIN D Y, *et al.*. Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 151-157. (in Chinese).
- [24] 王彪, 鹿洪飞, 李奥奇, 等. 采用 VCSEL 激光光源的 TDLAS 甲烷检测系统的研制[J]. *红外与激光工程*, 2020,

- 49(4): 0405002.
WANG B, LU H F, LI A Q, *et al.*. Research of TDLAS methane detection system using VCSEL laser as the light source[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0405002. (in Chinese).
- [25] CIURA L, KOLEK A, GAWRON W, *et al.*. Measurements of low frequency noise of infrared photo-detectors with transimpedance detection system[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2014, 21(3): 461-472.
- [26] 梁万国, 罗森林, 周思永, 等. 光电探测器的设计[J]. *半导体光电*, 1998, 19(1): 52-56.
LIANG W G, LUO S L, ZHOU S Y, *et al.*. Design of photodetector[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1998, 19(1): 52-56. (in Chinese).
- [27] NICODEMUS F E, RICHMOND J C, HSIA J J, *et al.*. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[EB/OL]. (1977-01-01). <https://www.nist.gov/publications/geometrical-considerations-and-nomenclature-reflectance>.
- [28] 张雷雷, 曹振松, 钟磬, 等. FPGA 主控型数字锁相放大器设计及光谱测量[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(10): 20230023.
ZHANG L L, CAO Z S, ZHONG Q, *et al.*. Digital lock-in amplifier controlled by FPGA for spectral measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(10): 20230023.

作者简介:



裴梓伊(1998—),男,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,2021年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要研究方向为光学检测技术。E-mail: ziyipei@zju.edu.cn



刘东(1982—),男,辽宁大连人,教授,博士,博士生导师,2005年、2010年于浙江大学分别获得学士、博士学位,曾在美国宇航局(NASA)从事博士后研究工作。主要研究方向为光学检测、激光雷达、机器视觉、深度学习。E-mail: liudongopt@zju.edu.cn