

激光与光电子学进展

毫赫兹频段低噪声半导体泵浦驱动源设计与测试表征

高子超¹, 李番¹, 李健博¹, 王嘉伟¹, 马正磊¹, 李响¹, 尚鑫¹, 田龙^{1,3*}, 尹王保^{2,3**}, 王雅君^{1,3}, 郑耀辉^{1,3***}¹山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;²山西大学激光光谱研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;³山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 针对空间引力波探测中抑制毫赫兹频段激光强度噪声的需求, 基于低噪声芯片, 结合高稳定性电压基准源, 设计相关外围电路, 进行星载激光放大器中半导体激光泵浦驱动源的整体设计与研发, 从时域及频域两方面对泵浦驱动源的工作性能进行评估。实验结果表明: 自研泵浦驱动源输出电流 3.5 A 时, 在 4 h 内的电流时域抖动 $\leq 180 \mu\text{A}$; 在频域方面, 通过取样电阻将电流信号转化为电压信号, 得到电压噪声谱密度低于 $1 \times 10^{-4} \text{ V/Hz}^{1/2}$ @ 0.1 mHz 和 $1 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$ @ 1 mHz。所研发的泵浦源输出激光强度噪声在毫赫兹频段的相对电压噪声谱密度小于 $1 \times 10^{-3} \text{ Hz}^{-1/2}$ @ (0.1 mHz ~ 1 Hz), 为空间引力波探测中激光强度噪声抑制等方面提供关键器件及实验基础。

关键词 半导体泵浦驱动源; 毫赫兹频段噪声评估; 激光噪声抑制; 光电反馈控制

中图分类号 TN245

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232756

Design and Characterization of Low-Noise Semiconductor Pump Driver in the mHz Frequency Band

Gao Zichao¹, Li Fan¹, Li Jianbo¹, Wang Jiawei¹, Ma Zhenglei¹, Li Xiang¹, Shang Xin¹, Tian Long^{1,3*}, Yin Wangbao^{2,3**}, Wang Yajun^{1,3}, Zheng Yaohui^{1,3***}¹State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;²State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;³Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China

Abstract In response to the demand for suppressing laser intensity noise in the millihertz frequency band in space gravitational wave detection, based on a low-noise chip and combined with a high stability voltage reference source, this paper designs relevant peripheral circuits to carry out the overall design and development of a semiconductor laser pump driver in a spaceborne laser amplifier. The performance of the pump driver is evaluated from both the time and frequency domains. Experimental results show that when the self-developed pump driver outputs 3.5 A, the current time-domain jitter is $\leq 180 \mu\text{A}$ within 4 h. In the frequency domain, by converting the current signal into a voltage signal through a sampling resistor, the voltage noise spectral density is less than $1 \times 10^{-4} \text{ V/Hz}^{1/2}$ at 0.1 mHz and $1 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$ at 1 mHz. The developed pump driver outputs laser intensity noise with a relative voltage noise spectral density below $1 \times 10^{-3} \text{ Hz}^{-1/2}$ at (0.1 mHz ~ 1 Hz) in the frequency range of space gravitational wave detection. This study provides key components and experimental basis for laser intensity noise suppression in space gravitational wave detection.

Key words laser diode driver; millihertz frequency band noise evaluation; laser noise suppression; optoelectronic feedback control

收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-01-25; 录用日期: 2024-02-05; 网络首发日期: 2024-03-13

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC2200402)、国家自然科学基金(62027821, 62225504, U22A6003, 62035015, 12274275, 62375162, 12304399, 12174234)、山西省重点研发计划(202102150101003)、山西省基础研究计划(202303021212003, 202303021224006)、山西省三晋学者特聘教授项目

通信作者: *tianlong@sxu.edu.cn; **ywb65@sxu.edu.cn; ***yhzheng@sxu.edu.cn

1 引言

在爱因斯坦的广义相对论中,引力被认为是时空弯曲的一种效应^[1],这种弯曲是质量的存在而导致的,直接探测引力波信号可以探索无法直接探测的、更大时空尺度的天文事件,因此引力波探测对推动多信使天文学等学科的发展以及深入理解宇宙起源和演化具有重要的科学意义^[2]。

目前空间引力波探测的频段在 0.1 mHz~1 Hz 范围^[3-4],其探测频率相对于地基引力波探测计划更低,能够实现超大质量黑洞合并、超紧凑双星等波源的探测^[5-7]。由于空间引力波探测装置的灵敏度直接受到激光光源噪声的影响,需要对激光光源进行稳频^[8-9]以及抑制激光强度噪声等。在噪声传递分析方面,2005 年德国马克斯-普朗克研究所在光纤激光放大器中调制了半导体泵浦激光管的驱动电流,进而测量了从半导体泵浦源输出功率到激光放大器输出功率变化的传递函数^[10]。传递函数表示在较低频段内(小于 100 Hz)时,泵浦源噪声在光纤激光放大器的激光输出噪声传递中

表现为低通滤波的形状,即空间引力波探测频段泵浦源的噪声大部分可传递到光纤激光放大器激光输出噪声中;同时测量了从激光放大器种子源相对激光功率变化到放大器相对输出功率变化的传递函数,传递函数表现为高通滤波的形状,即在空间引力波探测频段种子源激光器的噪声在传递到放大器的输出噪声中被抑制,而在较高频段(大于 100 Hz)被保留。综上,激光器输出的噪声在低频段的主要来源是泵浦源的噪声^[11],所以在搭建面向空间引力波探测的低噪声激光系统时,抑制半导体泵浦源的强度噪声是非常有必要的^[12-14]。在搭建低噪声的泵浦源时,泵浦驱动源作为核心器件,其稳定的执行电流也为光电反馈提供了重要保障。

目前国外半导体激光器驱动器产品的性能指标如表 1 所示。国外厂商主要有 Wavelength 公司、Thorlabs 公司等,这两家公司的产品主要是连续电流驱动源,其中,Thorlabs 公司驱动器的产品有 ITC4000 和 LDC 等驱动器系列,Wavelength 公司低电流半导体激光驱动产品主要是 LDTC LAB 系列。

表 1 国外半导体激光驱动器产品性能

Table 1 Performance of foreign semiconductor laser driver products

Model/manufacturer	Measurement frequency band /Hz	Noise without ripple / μA	Short term stability (4 h) / μA	Long term stability (24 h) / μA
LDC240C/Thorlabs	10–10 ⁷	<50	–	200
ITC4005/Thorlabs	10–10 ⁷	<250	–	300
LDC-3736/Wavelength	1–2.50×10 ⁵	<16	100	200
LDX-3232/Wavelength	1–2.50×10 ⁵	<40	80	160

然而随着国外科技封锁加剧,国内激光驱动源产业虽然日臻成熟,但国内外商用产品中均未给出毫赫兹频段的频域噪声谱密度,无法直接满足空间引力波探测中激光噪声抑制需求^[15-16],仍需进行针对性研发及测试。

本文针对空间引力波探测中抑制毫赫兹频段激光强度噪声需求,研发低噪声半导体泵浦源。首先围绕低温漂、极低失调电压的运放芯片 LTC1150 (Linear Technology) 以及金属氧化物半导体(MOS)场效应管 IRLZ44N (Infineon Technologies) 进行外围电路设计,结合自研高稳定性电压基准源控制 MOS 管输出电流,设计缓启动及电流、温度保护电路增加驱动源可靠性;以及采用高精度,低温漂四线取样电阻结合比例-积分-微分(PID)电路构成恒流反馈结构实现电流的稳定输出;进一步对取样电阻进行精密控温以及优化供电机制提高鲁棒性。最终,自研的泵浦驱动源在电流 3.5 A 时可输出激光功率 2 W,此时电流在 4 h 内的时域抖动峰峰值小于 180 μA ;通过取样电阻将电流噪声转化为电压信号,电压噪声谱密度为 1×10^{-4} V/Hz^{1/2}@0.1 mHz、 1×10^{-5} V/Hz^{1/2}@1 mHz 以及 1×10^{-6} V/Hz^{1/2}@0.1 Hz。所研发泵浦源输出激光的相对

强度噪声小于 1×10^{-3} Hz^{-1/2}@(0.1 mHz~1 Hz),相关研究为空间引力波探测中激光强度噪声抑制等方面提供关键器件及实验基础。

2 低噪声泵浦驱动源的设计

2.1 低噪声泵浦驱动源的设计原理

低噪声泵浦驱动源的整体设计原理框架如图 1 所示,由高稳定性电压基准源产生一个电压输出,经过比例放大和 MOS 管输出稳定电流,最终半导体激光管(LD)输出激光。为提高稳定度,从运算放大器输出的电压通过取样电阻采样放大后与基准电压比较,通过 PID 电路,输出电压维持在设定值上不变,也就保证了泵浦驱动源(LD driver)的稳定电流输出。低噪声驱动源是实现高性能激光的关键器件^[17-19],通过对驱动电路针对性的改进和优化,可以有效保证泵浦源的低噪声输出。在空间引力波探测频段,激光放大器的噪声主要来源于泵浦源激光噪声,并受到环境温度漂移和微小振动的影响^[20-21],其中温度漂移是影响激光放大器和泵浦源长时间稳定性的主要因素之一。

星载激光功率放大器的输出功率须达到 2 W 以上,若以光-光转化效率为 50% 计算,那么半导体激光

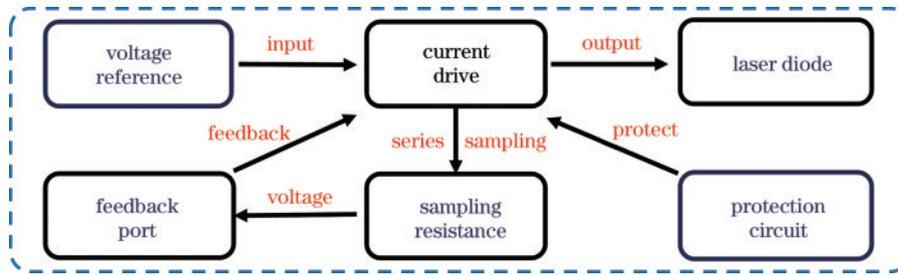


图 1 低噪声泵浦驱动源整体设计架构图

Fig. 1 Overall design principle of low-noise laser diode driver

泵浦源需要 4 W 以上的输出功率,此时的泵浦驱动电流约 7 A。大电流输出对 LD 的温控精度要求更加严格,采用双 LD 级联泵浦激光放大器可以降低对输出电流的要求,此时泵浦驱动源输出电流 ≥ 3.5 A。另外,控制泵浦驱动电路的功耗可以减少泵浦源长时间运行的热积累,提高工作稳定性,为此电路设计采取以下主要措施:1)恒流电路使用 MOS 管,而非双极性晶体管(BJT)。因为 BJT 管属于电流控制元件,通过控制 BJT 管基极端电流来改变输出电流,整体电路中通过电流过大会增加电路功耗。而 MOS 管属于电压控制元件,通过控制栅极与源极间电压(V_{gs})来控制其输出电流,可以有效降低驱动电路中的电流从而减小电路功耗。2)使用低温漂、低失调电压的运放芯片 LTC1150。LTC1150 芯片具有 $0.5 \mu\text{V}$ 的失调电压、 $0.01 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 的温漂系数、 $1.8 \mu\text{V}_{p-p}$ ($0.1\sim 10$ Hz) 的输入噪声电压,仅需使用 0.8 mA 供电电流。3)使用低阻值、低温漂的取样电阻。选择了四线采样电阻 PBV-R047-F1-0.5,四线采样电阻相比二线采样电阻采样得到的电压值精确度更高,回路反馈效果更优。4)对取样电阻进行精密温控处理。取样电阻的电压反馈值是驱动源恒流输出的关键,但是取样电阻的阻值具有较强的温度相关性,严重影响驱动源的长期稳定性;未温控的取样电阻值会随着环境温度的变化而发生漂移,驱动源的反馈电路无法完全抑制其由温度引起的慢漂,这是搭建适用于低噪声空间引力波探测的泵浦驱动源需要克服的关键困难。5)控制芯片单独供电。使用低功率低噪声电源单独为芯片供电,屏蔽供电电源大电流输出对芯片失调电压和工作状态的影响。LTC1150、PM2903 (Texas Instruments) 等芯片的工作电流小,分离式供电的方法可以减少电路的功耗,同时也可以隔离驱动电源对反馈信号的干扰。通过以上措施,可以有效降低电路功耗。保证驱动源的低噪声输出的关键器件还包括了供电电源和高稳定性的电压基准源。泵浦源的电流噪声水平与其供电电源和电压基准源的噪声水平有着非常大的关系,如果供电电源的噪声水平比较差,供电电压波动会影响 MOS 管的电压控制信号,进而影响泵浦驱动源的输出电流稳定,所以选用一个在空间引力波探测频段内低噪声的供电电源是非常必要的。同理,基准电压的稳定是保证高

精度恒流反馈的基础,使用自研高精度程控电压基准源^[22]是稳定输出的保证。

2.2 恒流工作电路

泵浦驱动源的恒流工作原理如图 2 所示。高稳定电压基准源的电压信号经过 RC 滤波后输入到运算放大器 U_1 的同相输入端,运算放大器 U_1 输出端接场效应管。要得到恒定的输出电流,实际上只需稳定采样电阻 R_s 两端电压 U_s 即可。根据运算放大器的特点:同相和反相输入端电压相等,即电压 U_s 由输入到同相端的控制信号电压决定,得到取样电阻 R_s 两端的电压值,经过运算放大器 U_2 放大输出后通过反馈端口接至运算放大器 U_1 的反相输入端,构成负反馈回路,使得运算放大器 U_2 的输出到 MOS 管电压稳定,进而保证了稳定的恒流输出。

2.3 保护电路

2.3.1 缓启动电路

如果通电时电流从零瞬间上升到较大值,会对 LD 造成一定的损伤,减少 LD 的使用寿命;关断时从较高的电流瞬间降为 0 同样会对 LD 造成一定的伤害。所以,电路通过将 MOS 管与 C_3 和 R_6 串联,利用电容的充放电原理,达到控制电流缓慢上升下降的目的。这样除了可以限制通过 MOS 管的电流,还可以达到缓启动的目的。

2.3.2 过温保护电路

面向空间引力波探测要求,激光放大器的出光功率须达到 2 W 以上,双 LD 泵浦输出功率至少要达到 4 W。本文采用双 LD 串联的方式,驱动电流需达到 3.5 A,若 MOS 管等大功率器件的散热没有满足要求,则其工作温度会快速上升,导致芯片的损坏,所以过温过流保护是必不可少的一环。过温保护驱动电路如图 2 所示, $R_7=R_8=10$ k Ω , $R_9=4$ k Ω ,自研泵浦驱动源使用 10 k Ω 热敏电阻,当温度处于正常工作温度时,比较器 U_3 同相端电压低于反相端电压, U_3 输出负电压,红灯暗,则三极管 BC546 (ONSEMI) 不工作,继电器处于常闭。当温度过高(高于 50°C)时,热敏电阻阻值下降到 4 k Ω 以下,小于 R_9 ,比较器 U_3 同相端电压高于反相端电压, U_3 输出正电压,红灯亮,三极管工作,继电器处于常开,MOS 管的供电断开,驱动源停止工作。

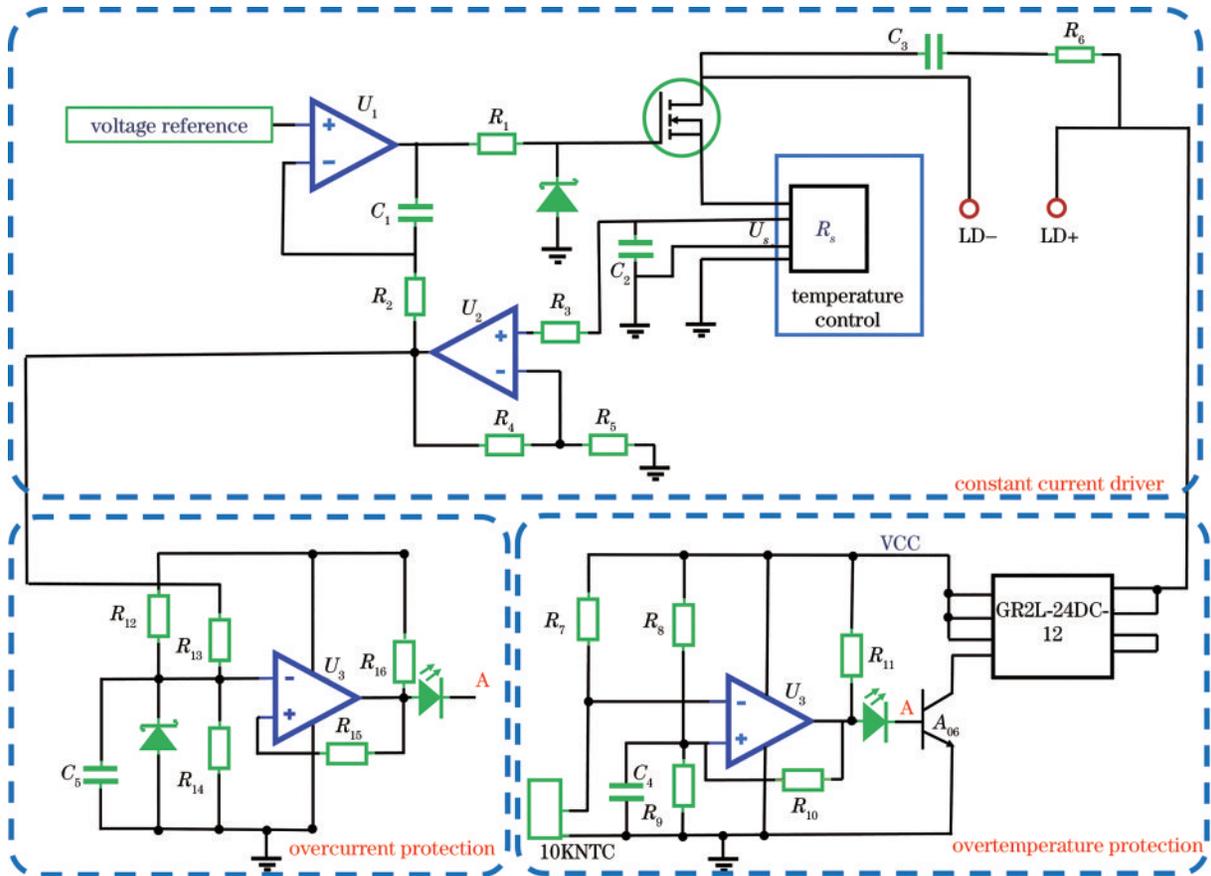


图 2 泵浦驱动电路图

Fig. 2 Pump drive circuit diagram

2.3.3 过流保护电路

过流保护电路的 A 端同样与三极管 BC546 相连, $R_{13}=6\text{ k}\Omega$, $R_{14}=3\text{ k}\Omega$, ZB(BZX84-A3V0.215, Nexperia, 美国)是一个 3 V 的稳压管, 当 R_{13} 正相端电压小于 3.5 V, 即 LD 驱动电流小于 10 A 时, 运放同相输出电压小于反相端电压比较器 U_4 不工作, 当 R_{13} 正相端输出 3.5 V, 即电路输出超过 10 A 时, 比较器 U_4 输出正电压, 红灯亮, 继电器常开, 断开 MOS 的供电, 达到保护的目。

3 低噪声泵浦驱动源的实验结果和分析

3.1 恒流驱动源影响因素

3.1.1 温度对恒流驱动源的影响

系统稳定性是空间引力波探测的必要保障。在这个过程中温度稳定是核心要求。本文通过多点测温、监视采样, 探究温度如何影响驱动源的低频性能。通过采集取样电阻 R_s 电压值和驱动 LD 输出后探测器探测得到的电压信号以及环境温度和取样电阻温度, 其关系如图 3 所示。

由图 3(a)可知, 取样电阻在未温控的条件下, 其温度和环境温度变化趋势一致。图 3(b)表明随着温度的变化, 取样电阻两端的电压和温度呈反相关。取

样电阻温度漂移为 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$, 取样电阻电压 $V_{p-p} \approx 30\text{ }\mu\text{V}$ 。取样电阻的温度系数小于 -30×10^{-6} , 芯片输出失调电压的温度系数为 $0.05\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 那么芯片输出失调电压的影响约为 $0.1\text{ }\mu\text{V}$, 而由取样电阻本身温漂引起的电压变化为 $30\sim 50\text{ }\mu\text{V}$, 所以取样电阻的电压变化主要是由取样电阻的温度变化引起的。图 3(c)表明取样电阻值的变化引起了泵浦源输出电流的变化, 进而导致泵浦源输出功率的抖动, 经过光电转换, 体现在探测器输出电压值的波动上, 故取样电阻电压值与探测器的电压值变化趋势相同。综上, 取样电阻阻值随温度的变化是影响泵浦源的功率抖动的主要因素之一。

由此对驱动源的取样电阻进行控温后, 搭建半导体激光泵浦源及其驱动源的性能测试平台如图 4 所示。驱动源由高精度基准源提供基准电压, 输出稳定电流后接 LD 输出泵浦激光。系统采用对取样电阻电压和楔形镜分光后经探测器 (PD) 采集电压进行功率谱密度分析, 分别通过时域和频域的数据分析泵浦源及其驱动源在空间引力波探测频段工作的性能。主功率输出可为后续的泵浦激光降噪使用。

在未控温的环境中, 环境温度变化是导致取样电阻温度变化的主要因素, 即在泵浦驱动源的长时间工作中, 保证取样电阻的温度稳定是驱动源稳定工作的重要前提。通过四线采样电阻将驱动电流监视信号转

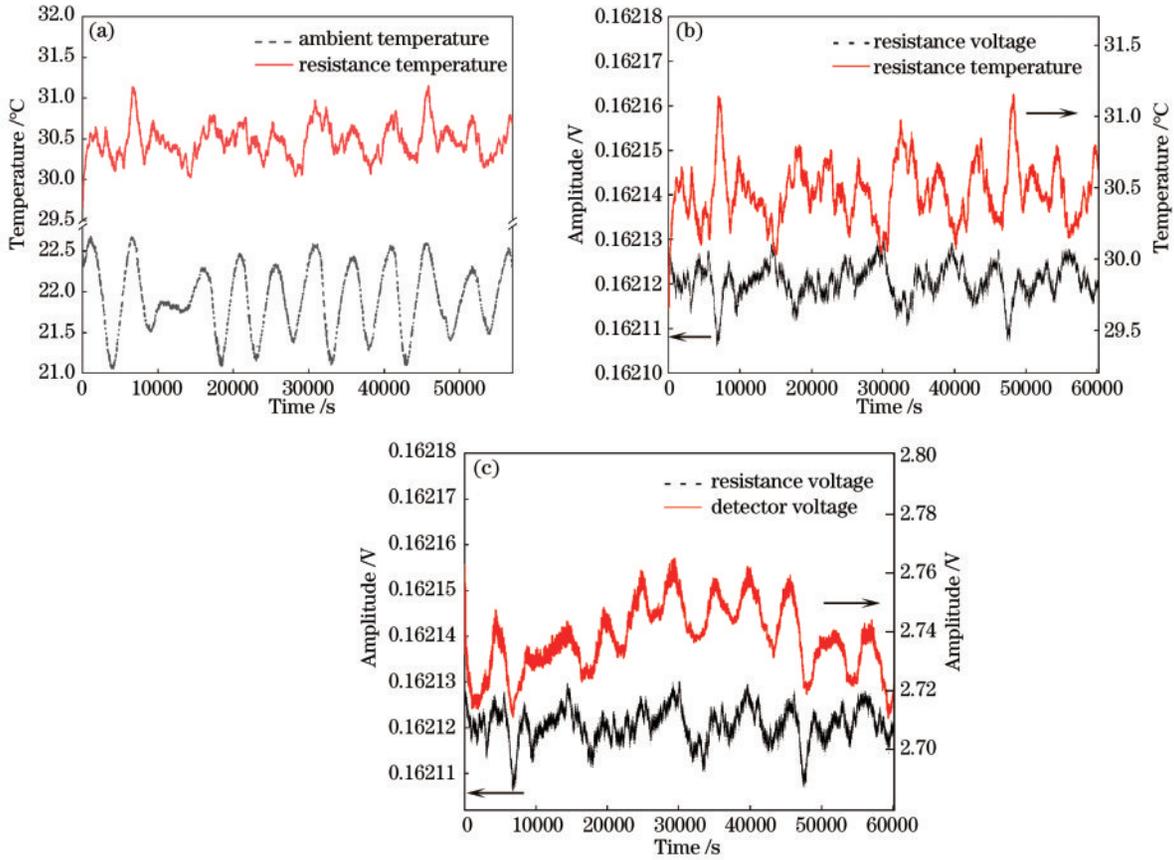


图 3 泵浦源输出激光功率、泵浦驱动源取样电阻温度及其输出电压与温度的关系。(a)取样电阻温度与环境温度；(b) 取样电阻电压与其温度；(c) 取样电阻电压与激光功率

Fig. 3 Output laser power of the pump source, the sampling resistance temperature of the pump driver, and the relationship between the output voltage and temperature. (a) Sampling resistance temperature and ambient temperature; (b) sampling resistance voltage and its temperature; (c) sampling resistance voltage and laser power

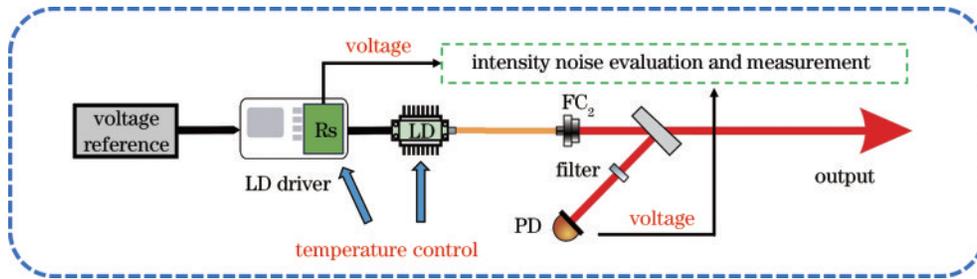


图 4 半导体激光泵浦源和及其驱动源的性能测试装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of performance test device for semiconductor laser pump source and its driver source

化为电压信号进行时域及频域分析,实验结果如图 5 所示。图 5(a)和图 5(c)展示了自研泵浦源 16 h 取样电阻温度控温前后对比结果图:未温控前取样电阻温度的温度抖动 $\Delta T=1.5\text{ }^\circ\text{C}$,取样电阻电压信号抖动峰峰值为 $30\text{ }\mu\text{V}$;温控后取样电阻温度抖动 $\Delta T=0.1\text{ }^\circ\text{C}$,取样电阻电压信号抖动峰峰值为 $11\text{ }\mu\text{V}$ 。温控前后取样电阻电压功率谱密度对比如图 5(b)所示,在毫赫兹频段,温控后的取样电阻比未控温取样电阻噪声谱密度明显降低。图 5(d)是泵浦源温控前后取样电阻电压信号值的艾伦方差计算图,可以明显地得到,温控后的取样电阻在长时间稳定性上有明显的优势。综上,

对取样电阻采用温控措施对提高泵浦源长期稳定性有明显作用,是进一步实现驱动恒流输出的重要保障,也是在星载激光放大器中必须考虑的问题。

3.1.2 驱动源供电电源对驱动源的影响。

在毫赫兹频段,当温度稳定后,泵浦驱动源输出的长时间稳定性与其供电机制有着极大的关系。本文利用不同电源给 MOS 管及控制芯片供电,研究了毫赫兹频段驱动源供电电源对驱动源工作性能的影响。首先利用两种不同电源(商用睿登 6006P 和自研的线性电源)给驱动源整体供电,并通过测试取样电阻电压信号来间接评估泵浦驱动源输出电流的性能,测试结果

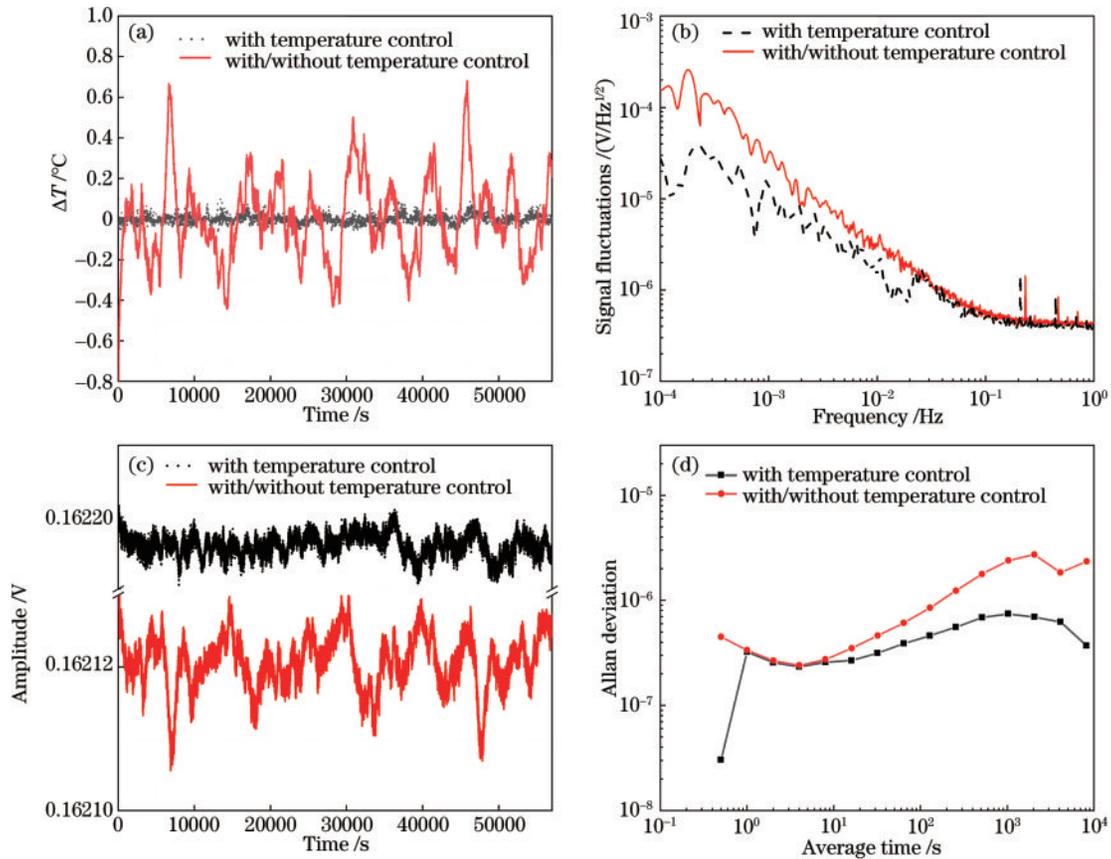


图5 温控前后取样电阻性能对比图。(a)温度变化；(b)取样电压信号功率谱密度；(c)取样电压信号；(d)取样电压信号的艾伦方差

Fig. 5 Performance comparison of temperature-controlled sample resistors. (a) Temperature variation; (b) power spectral density of the sample voltage signal; (c) sample voltage signal; (d) Allan deviation of the sample voltage signal

如图6所示。

其中,图6(a)两种电源直接输出电压信号测试结果:在4h内自研线性电源输出为8.5V,驱动源输出电流3.5A,取样电阻的电压信号平均值为0.154mV,自研线性电源的电压输出抖动为1.5mV;睿登6006P电源输出9V,取样电阻的电压信号平均值为0.162mV,电源电压输出抖动为0.4mV。可以看出,自研线性电源受温度影响较为明显,有一个周期性的漂移,此影响无法通过后续的电路处理来解决。其电压噪声谱密度如图6(b)所示,线性电源比开关电源电压噪声谱密度在 10^{-4} Hz处高一个数量级。由于睿登电源输出有短周期的振荡,其电压噪声谱密度在 10^{-2} 处有一明显尖峰,此尖峰可以通过泵浦驱动源的滤波电路消除影响。图6(c)是不同电源供电下驱动源取样电阻电压时域图,代表了此刻驱动源的电流输出性能。可以发现:当使用自研线性电源供电时,驱动源的输出随供电电源电压输出漂移有着同频的漂移,取样电阻电压抖动为 $50\mu\text{V}$;当使用睿登6006P供电时,取样电阻电压抖动为 $9\mu\text{V}$ 。绝对电压谱密度对比如图6(d)所示:当使用线性电源供电时,其取样电阻电压噪声谱密度相比睿登电源供电在 $10^{-4}\sim 1$ Hz范围内高一个数量级。上述实验结果证明,供电电源的性能会影响泵浦驱动源的

输出性能,如若电源存在长时间的漂移,就会导致驱动源输出发生相应的漂移。

由上文可知,当供电电源输出电压波动时,会导致芯片工作状态发生变化,进而导致泵浦源输出发生抖动。本文采用对控制电路芯片及MOS管独立供电来解决上述问题。使用自研低噪声小功率电源供电,因为自研的小功率低噪声电源有着更低的电压输出噪声,可以保证芯片的稳定输入,避免驱动源受到供电电源输出不稳定或电路布板问题导致芯片的供电地线串扰等情况影响,进而导致泵浦驱动源输出波动。图7是更改驱动电路的供电方式后的电源对比图。

由图7(a)可知,在对取样电阻进行控温,并对控制电路芯片及MOS管独立供电后,取样电阻的取样电压抖动 $\leq 8\mu\text{V}$,达到了对供电电源性能的“屏蔽”效果,降低了由于电源在大负载长时间输出不稳定导致驱动电路控制芯片等输出变化的影响。相比单纯的温控措施,引入了自研的12V低噪声线性小功率电源单独为芯片和MOS管供电后,驱动源取样电阻的取样电压抖动更小,也表示泵浦输出电流更加稳定。图7(b)表明泵浦驱动源在1mHz处电压噪声谱密度已经低于 $1 \times 10^{-5} \text{ Hz}^{-1/2}$,进一步提升了泵浦驱动源的性能,提高了泵浦驱动源工作的长期稳定性,而仪器的

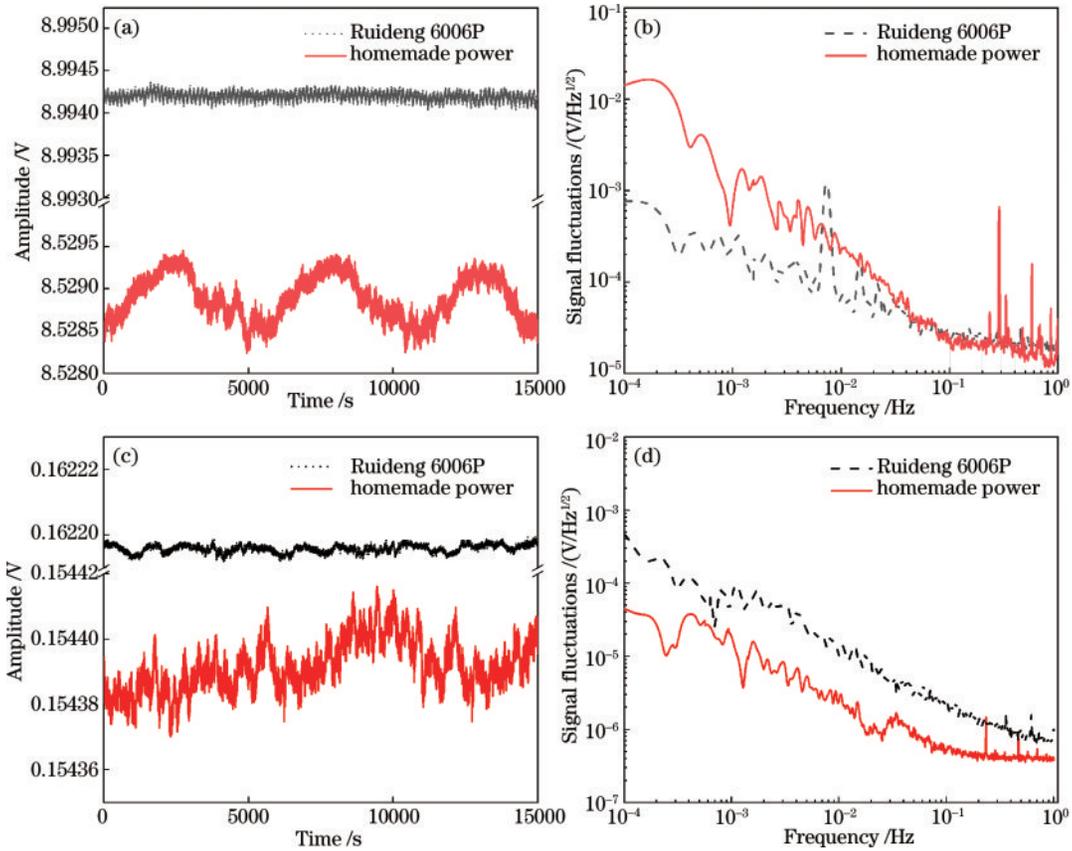


图 6 不同电源输出性能及其供电后泵浦驱动源输出性能对比。(a)电源输出电压;(b)电源电压功率谱密度;(c)取样电阻电压信号;(d)取样电阻电压功率谱密度
Fig. 6 Comparison of output performance of different power supplies and output performance of pump driver under the power supply. (a) Power voltage; (b) power supply voltage spectral density; (c) sampling resistance voltage signal; (d) sampling resistance voltage power spectral density

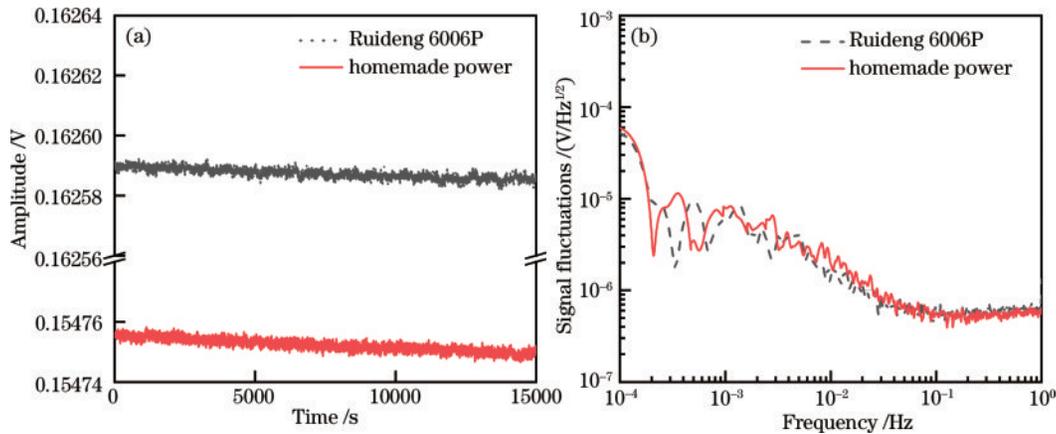


图 7 芯片单独供电后不同电源供电的泵浦驱动源输出性能对比。(a)取样电阻电压信号;(b)取样电阻电压信号功率谱密度
Fig. 7 Comparison of output performance of pump driver powered by different power sources after single chip power supply. (a) Sampling resistance voltage signal; (b) sampling resistance voltage power spectral density signal

长期稳定性才是决定低频噪声的重要因素。

3.2 泵浦输出噪声对比

完成对自研驱动电路的性能测试后,进一步对泵浦驱动源和 LD 输出激光性能进行整体评估,本文采用 7 位半的高精度数字万用表进行数据采集和分析^[23],通过自研的低噪声探测器^[24]对泵浦源输出功率进行探测进而对其低频段噪声进行分析。通过和 Thorlabs 商用

驱动源 LDC240C 进行对比,泵浦源输出激光测试结果如图 7 所示。泵浦源输出电流为 3.5 A,激光输出功率为 2 W,自研的低噪声探测器接收光功率为 6 mW。

图 8(a)是商用的 LDC240C 驱动源和自研驱动源同时驱动同款 LD 时域对比,自研泵浦驱动源泵浦输出探测器测量电压抖动为 0.8 mV,而商用索雷博驱动源泵浦输出探测器测量电压抖动为 3 mV,在长期稳定

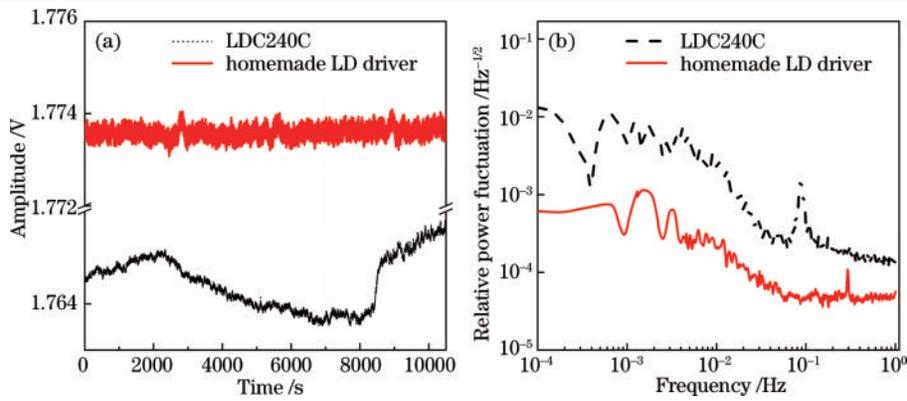


图8 激光泵浦源3.5 A输出探测器激光功率监测信号。(a)探测器电压;(b)探测器相对功率谱密度

Fig. 8 Detection of laser power monitoring signal with 3.5 A output from laser pump source. (a) Detector voltage; (b) relative power spectral density of detector

性方面,自研泵浦驱动源性能要明显优于商用驱动源。图8(b)为两款驱动源输出电流为3.5 A探测器得到泵浦功率电压的相对电压谱密度,自研泵浦驱动源自由运转噪声在 10^{-4} Hz处低于 1×10^{-3} $\text{Hz}^{-1/2}$,比LDC240C低近一个数量级。图中尖峰是由于实验室地线串扰导致的抬高。

在上述研究工作的基础上,得到泵浦驱动源的性能提升的限制因素有以下两个主要方面:1)自研小功率电源的性能。由于泵浦驱动源最终由自研小功率电源为电路芯片供电,所以整体驱动源的噪声性能受自研小功率电源的性能限制;2)取样电阻的温控方式及其温控结构。由于泵浦源电路的设计未考虑取样电阻的温控,故对取样电阻进行主动温控,但对取样电阻的温度调制会导致泵浦驱动源的性能有一定的劣化。将来可以从以下三个方面可对泵浦驱动源的性能进一步提高:1)优化新型的泵浦驱动散热设计,以减小电路的热积累,从而提升泵浦驱动源的性能;2)电路设计中增加对取样电阻的温度补偿电路的设计,减少外置温控的压力,提高泵浦驱动源的鲁棒性;3)将小功率自研电源与泵浦驱动源集成化,减少由于硬连接导致的系统噪声升高。将在后续工作中利用自研驱动源进行星载激光放大器噪声抑制等实验验证,为空间引力波探测中激光强度噪声抑制等方面提供关键器件及实验基础。

4 结 论

本文针对空间引力波探测中抑制毫赫兹频段激光强度噪声的需求,首先围绕低温漂、极低失调电压的运放芯片LTC1150以及金属氧化物半导体型场效应管MOS管进行外围电路设计,设计缓启动及电流、温度保护等电路增加驱动源可靠性;通过实验探究及分析泵浦驱动源在毫赫兹频段的噪声来源,针对取样电阻进行精密控温以及优化供电机制等措施提高驱动源鲁棒性。利用高精度数字万用表进行输出电压的测试与采集,并采用快速傅里叶变换周期图法以及对数轴功

率谱密度法将采集的数据进行计算处理,得到0.1 mHz~1 Hz频段的电压噪声谱密度。实验结果表明:泵浦驱动源在电流3.5 A、4 h内的时域峰峰值抖动小于 $180 \mu\text{A}$;在频域方面,其取样电阻绝对噪声谱密度低于 1×10^{-4} $\text{V}/\text{Hz}^{1/2}@0.1 \text{ mHz}$ 、 1×10^{-5} $\text{Hz}^{-1/2}@1 \text{ mHz}$ 和 1×10^{-6} $\text{V}/\text{Hz}^{1/2}@0.1 \text{ Hz}$ 。所研发的泵浦源在空间引力波探测频段的相对电流噪声谱密度均小于 1×10^{-3} $\text{Hz}^{-1/2}@0.1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$,为空间引力波探测中激光强度噪声抑制等方面提供关键器件支撑。

参 考 文 献

- [1] Christensen N. *Relativity: the special and the general theory*[J]. *Physics Today*, 2015, 68(11): 51.
- [2] Sathyaprakash B S, Schutz B F. *Physics, astrophysics and cosmology with gravitational waves*[J]. *Living Reviews in Relativity*, 2009, 12(1): 2.
- [3] Sallusti M, Gath P, Weise D, et al. *LISA system design highlights*[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2009, 26(9): 094015.
- [4] Cutler C, Thorne K S. *An overview of gravitational-wave sources*[M]//Bishop N T, Maharaj S D. *General relativity and gravitation*. Singapore: World Scientific, 2002: 72-111.
- [5] Miller M C. *Gravitational radiation from intermediate-mass black holes*[J]. *The Astrophysical Journal*, 2002, 581(1): 438-450.
- [6] Gong X F, Xu S N, Bai S, et al. *A scientific case study of an advanced LISA mission*[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, 28(9): 094012.
- [7] Tröbs M, Weßels P, Fallnich C. *Power- and frequency-noise characteristics of an Yb-doped fiber amplifier and actuators for stabilization*[J]. *Optics Express*, 2005, 13(6): 2224-2235.
- [8] 李明, 黄亚峰, 叶美凤, 等. 面向空间引力波探测的低噪声稳频激光器[J]. *光学学报*, 2023, 43(19): 1914001. Li M, Huang Y F, Ye M F, et al. Low-noise frequency stabilized laser for space-based gravitational wave detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(19): 1914001.
- [9] Wang G F, Li Z, Huang J L, et al. *Analysis and*

- suppression of thermal effect of an ultra-stable laser interferometer for space-based gravitational waves detection[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(1): 011203.
- [10] Hunnekuhl M. Entwicklung weit frequenzabstimmbarer einfrequenter Laserstrahlquellen für Raumfahrtanwen[D]. Diss: Hannover Universität, 2004: 139S.
- [11] Abbott R S, King P J. Diode-pumped Nd: YAG laser intensity noise suppression using a current shunt[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(2): 1346-1349.
- [12] Rollins J, Ottaway D, Zucker M, et al. Solid-state laser intensity stabilization at the 10^{-8} level[J]. Optics Letters, 2004, 29(16): 1876-1878.
- [13] Mio N, Ozeki T, Machida K, et al. Laser intensity stabilization system using laser-diode-pumped Nd: YAG rod-laser amplifier[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(8A): 5338-5341.
- [14] Yu A W, Numata K. Progress of the US laser development for the laser interferometer space antenna (LISA) program[C]//IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 17-22, 2022, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE Press, 2022: 4276-4279.
- [15] Cebeci P, Giesberts M, Baer P, et al. Highly stable fiber amplifier development and environmental component-testing for the space-based gravitational wave detector LISA[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12400: 124001H.
- [16] Foster S B, Tikhomirov A E. Pump-noise contribution to frequency noise and linewidth of distributed-feedback fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(5): 734-741.
- [17] 何东强, 胡芳仁, 尤敦喜, 等. 半导体激光器亚微安级低噪驱动电路设计与稳定性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5): 0522005.
He D Q, Hu F R, You D X, et al. Design and stability analysis of sub-microampere low-noise drive circuit for semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 0522005.
- [18] 杜建艳, 赵毅强, 叶茂, 等. 窄脉宽大电流半导体激光器驱动电路研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 0114008.
- Du J Y, Zhao Y Q, Ye M, et al. Study on driving circuit of narrow pulse width and large current semiconductor laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 0114008.
- [19] 张瑞峰, 崔佳敏. 一种脉宽可调的窄脉冲激光器驱动电路设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2114001.
Zhang R F, Cui J M. Design of a narrow pulse laser drive circuit with adjustable pulse width[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2114001.
- [20] Guiraud G, Traynor N, Santarelli G. High-power and low-intensity noise laser at 1064 nm[J]. Optics Letters, 2016, 41(17): 4040-4043.
- [21] 王在渊, 王浩浩, 李宇航, 等. 面向空间引力波探测的毫赫兹频段低强度噪声单频激光器[J]. 物理学报, 2023, 72(5): 054205.
Wang Z Y, Wang J H, Li Y H, et al. Millihertz band low-intensity-noise single-frequency laser for space gravitational wave detection[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(5): 054205.
- [22] 王嘉伟, 李健博, 李番, 等. 面向空间引力波探测的程控低噪声高精度电压基准源[J]. 物理学报, 2023, 72(4): 049502.
Wang J W, Li J B, Li F, et al. Programmable precision voltage reference source for space-based gravitational wave detection[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(4): 049502.
- [23] 李番, 王嘉伟, 高子超, 等. 面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统[J]. 物理学报, 2022, 71(20): 209501.
Li F, Wang J W, Gao Z C, et al. Laser intensity noise evaluation system for space-based gravitational wave detection[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(20): 209501.
- [24] 郑立昂, 李番, 王嘉伟, 等. 面向毫赫兹频段激光强度噪声抑制的低噪声光电探测技术[J]. 光子学报, 2023, 52(5): 0552220.
Zheng L A, Li F, Wang J W, et al. Low noise photoelectric detection technology for laser intensity noise suppression in mHz band[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5): 0552220.