

激光与光电子学进展

半导体激光器亚微安级低噪驱动电路设计与稳定性分析

何东强^{1,2}, 胡芳仁^{1*}, 尤敦喜², 钱勇², 周军^{1,2}¹南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210046;²南京先进激光技术研究院先进全固态激光技术研发中心, 江苏 南京 210046

摘要 为满足精密测量等领域对半导体激光器的波长稳定性、相位噪声等指标的严苛要求,提出基于系统传递函数理论推导论证与仿真验证相结合的分析方法,并由此设计改进了一款半导体激光器的高稳低噪恒定电流驱动电路。绘制了电流驱动电路的交流小信号模型和交流通路,对电路参数和系统稳定性的关系进行了理论分析,并引入噪声抑制网络对电路进行改进,通过 Tina-TI 仿真验证了改善后的驱动电路在 2 MHz 带宽内的噪声抑制能力和稳定性。实验结果表明,恒流驱动电路在 3 kHz~2 MHz 宽带内交流噪声有效值为 224 nA,连续驱动电流 2.5 h 稳定度优于 1.904×10^{-6} ,1 h 光功率积分时间 1 s 时的稳定度为 1.177×10^{-5} 。仿真与实验基本相符,驱动电路具有较高的稳定性和噪声抑制能力,同时,该分析方法对半导体激光器的超低噪声的驱动电路设计和优化具有普遍的理论指导意义。

关键词 光学设计与制造; 半导体激光器; 理论分析; 仿真验证; 超低电流噪声; 高稳定性

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220701

Design and Stability Analysis of Sub-Microampere Low-Noise Drive Circuit for Semiconductor Lasers

He Dongqiang^{1,2}, Hu Fangren^{1*}, You Dunxi², Qian Yong², Zhou Jun^{1,2}¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, Jiangsu, China;²Advanced All Solid State Laser Technology R&D Center, Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing 210046, Jiangsu, China

Abstract To satisfy the strict requirements of semiconductor lasers in terms of wavelength stability, phase noise, and other indicators in precision measurements and similar applications, an analysis method based on the combination of system transfer function theory derivation analysis and simulation verification is proposed. We designed a semiconductor laser diode drive circuit with a smaller wavelength drift and ultra-low noise. For an alternating current small-signal model and alternating current path, we theoretically analyzed the correlation between the circuit parameters and system stability. The circuit design was optimized by introducing a noise-suppression network. Using Tina-TI simulations, the drive circuit loop noise is effectively suppressed, and the system stability improves to a bandwidth below 2 MHz. Experimental results reveal that the effective value of alternating current noise is approximately 224 nA and 1.9×10^{-6} for the direct current ripple between 3 kHz and 2 MHz in 2.5 h. When the 1 h optical power integration time is 1 s, the stability is 1.177×10^{-5} . These results verify the theoretical model and simulation analysis. Notably, this approach provides a universal guideline for analyzing and designing ultra-low noise current drivers for semiconductor laser diodes.

Key words optical design and fabrication; semiconductor laser; theoretical analysis; simulation verification; ultra-low current noise; high stability

1 引言

目前,半导体激光器在军事、光纤传感、痕量气体

分析、单频光纤激光等领域已经获得广泛的应用,但同时也对驱动电路提出更高的要求^[1-3]。半导体激光器的输出波长和功率主要由激光二极管的 PN 结注入电

收稿日期: 2022-02-01; 修回日期: 2022-02-21; 录用日期: 2022-03-03; 网络首发日期: 2022-03-14

通信作者: *hufu@njupt.edu.cn

流和结温度决定,注入电流变化会影响增益介质中载流子浓度和禁带宽度,从而导致激光输出功率和中心频率的变化^[4]。例如砷化镓铝(GaAlAs)半导体激光器,驱动电流对激光频率的影响约为 3 MHz/ μA ,由外部光栅选模后影响可以降到 0.3 MHz/ μA 左右。所以,对于具有外部光栅的外腔激光器线宽要达到 100 KHz,交流噪声有效值应该小于 300 nA^[5]。因此,高质量的激光器需要设计低噪声、高稳定性驱动电路^[6]。同时对驱动电路噪声抑制与稳定性分析进行研究十分重要^[7]。

本文在典型压控恒流源驱动电路基础上,设计了一种连续、稳定且可靠的低噪声适用于蝶形封装类型半导体激光器的驱动电路。并将电路传递函数理论推导与 Tina-TI 仿真相结合对电路的噪声频率响应、电路稳定性等进行交流小信号分析。从理论分析、软件仿真和实验验证 3 个方面给出了激光器驱动电路的优化方法及依据。该方法对半导体激光器的低噪声驱动电路设计和优化具有普遍的理论指导意义。

2 硬件电路系统设计与稳定性分析

2.1 恒流驱动电路设计

在典型压控恒流源驱动电路基础上设计的恒流驱动电路如图 1 所示。该电路主要采用单位增益稳定、低宽带噪声放大器 ADA4896-2ACPZR7 芯片作为恒流驱动电路反馈控制的核心;选取精度为 0.1%、低温度系数为 $25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 的电阻作为采样电阻 R_{th} ,将驱动电路实际电流转换为电压信号;使用仪表放大器将 R_{th} 两端电压反馈到放大器 U1 的反相端。当在 U1 的同相端输入工作电流的设定值为 $V_{I,set}$ 时,U1 根据电流设定值与实际值的差值控制金属-氧化物半导体场效应晶体(MOS)管 Q1 型号为 DMN6066SSS 的门极电压 V_g 、调节 MOS 管导通电流,实现稳定的恒

流输出^[8-10]。

负反馈系统的闭环增益的一般表达式为

$$A_{cl} = \frac{A_{ol}}{1 + A_{ol}F}, \quad (1)$$

式中: A_{cl} 为闭环增益; A_{ol} 为开环增益; F 为反馈系数; $A_{ol}F$ 为环路增益。在运放负反馈电路中, $A_{ol}F$ 增益幅度曲线在运放的低频主极点 f_{PL} 后以 -20 dB/dec 线性衰减。此后,每经过一个 $1/F$ 零点,便增加 -20 dB/dec 的下降速度,有利于环路对电路中高频噪声的衰减。但相移曲线在 f_{PL} 处有 -45° 的相移,在 $10f_{PL}$ 处相移达到最大 -90° ;如果 $A_{ol}F$ 存在两个或两个以上极点,那么在第二个极点处相移可能会达到 -135° ,最大相为 -180° 。在波特图中,就是 $|A_{ol}F|=1$ 时相位滞后达到 180° ,此时电路自激振荡、不稳定。因此, $A_{ol}F$ 存在双极点或者更多极点的负反馈控制系统可能存在不稳定的问题。

2.2 恒流驱动电路小信号模型稳定性分析

采用 Tina-TI 获取元器件的 Tina SPICE 对驱动电路进行仿真,着重分析运放与 MOS 管小信号模型下对电路稳定性的影响,暂时将仪表放大器理想化处理。仿真图如图 2 所示,为了通过仿真得到正确的开环曲线,电路必须要对直流建立反馈,同时对交流是开路的。因此采用电容电感仿真环路增益法^[11-12],选取足够大的电感 L_1 与电容 C_1 。 L_1 为直流信号提供合适的直流偏置且对交流为断路, C_1 为交流信号提供了合适的交流通路且对直流为断路。

根据运放 U1 的数据手册,其中 C_a 、 R_a 构成低频主极点 f_{PL} 为 4 Hz,高频主极点 f_{PH} 为 330 MHz 左右,开环输出电阻 R_o 为 75Ω ,以此为 U1 的建模依据进行建模。图 2 中, C_{gs} 、 C_{gd} 、 C_{ds} 以及 R_{ds} 分别为 MOS 管 Q1 的栅源极间电容、栅漏极间电容、漏源极间电容以及漏源极导通电阻。跨导 g_m 为 1 s,其中根据厂家手册值可知 $C_{gd} = 80 \text{ pF}$ 、 $C_{ds} = 20 \text{ pF}$ 以及 $R_{ds} = 0.3 \Omega$ 低频时阻抗较大支路可视作断路对电路影响可忽略,产生的高频零极点可不考虑。而 $C_{gs} = 475 \text{ pF}$ 和 MOS 管栅极限流电阻 R_1 ,产生的中低频零极点会对电路的稳定性产生一定的影响。

根据推导分析得出驱动电路系统的开环增益公式为

$$A_{ol} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1 + SC_{gs}R_1}{[1 + SC_{gs}(R_1 + R_o)] * (1 + SC_aR_a)} \quad (2)$$

运放开环增益低频主极点为

$$f_{PL} = \frac{1}{2\pi C_a R_a} \quad (3)$$

同时开环输出电阻 R_o 、门极限流电阻 R_1 和 MOS 门极电容 C_{gs} 在开环增益曲线 A_{ol} 上产生一对零极点分别为 f_{z1} 、 f_{p1} 如下所示:

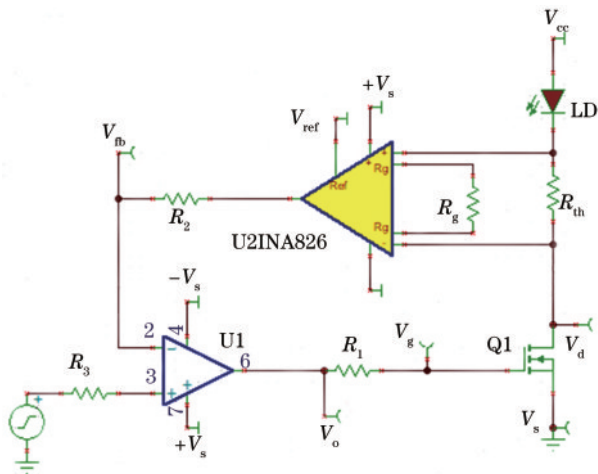


图 1 恒流驱动电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of constant current drive circuit

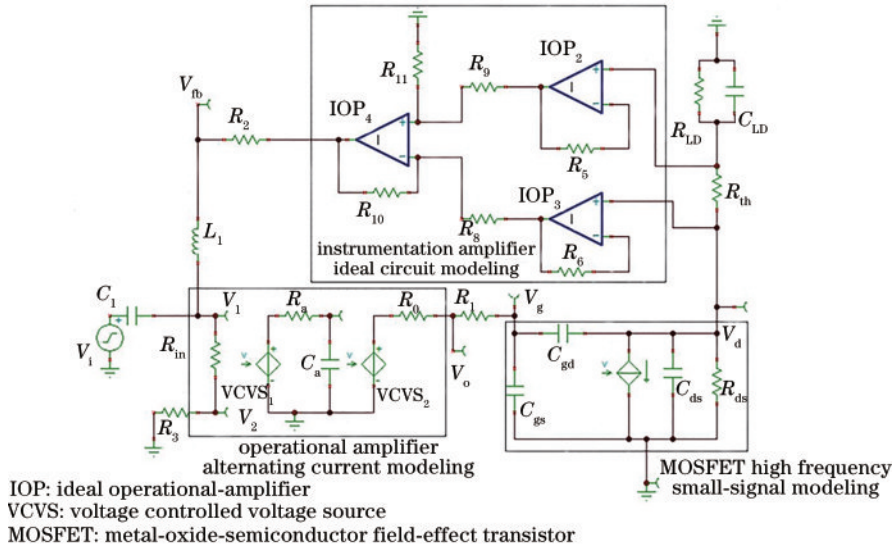


图 2 驱动电路小信号模型
 Fig. 2 Small signal model of drive circuit

$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi C_{gs} R_1}, f_{p1} = \frac{1}{2\pi C_{gs} (R_1 + R_0)}, \quad (4)$$

由式(4)分析可知 f_{z1} 、 f_{p1} 的频差与 R_1 成反比,对于开环增益曲线,这一对零极点的频差越小系统越稳定,但是整个系统的带宽将会减低。据此本文 R_1 选取 330Ω ,估算出此时 $4.4R_0 = R_1$ 则 $1.227f_{p1} = f_{z1}$,此时这一对零极点距离很近,即极点 f_{p1} 产生的幅频与相频特性作用将会快速被零点 f_{z1} “抵消”,对 $A_{ol}F$ 影响较小。而根据推导分析得出驱动电路系统的反馈环路公式为

$$\frac{1}{F} = \frac{V_o}{V_{fb}} = \frac{1 + SC_{gs}R_1}{g_m R_{th}}, \quad (5)$$

MOS管的输入电容 C_{gs} 与电阻 R_1 在 $1/F$ 上产生了一个零点(即反馈环路的极点):

$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi C_{gs} R_1}, \quad (6)$$

根据前面分析可知 R_1 与 C_{gs} 会在 A_{ol} 与 $1/F$ 分别产生一个相同的零点 f_{z1} ,对于闭环增益 $A_{ol}F$ 曲线,这个零点 f_{z1} 将相互抵消,只存在两个极点。此时根据上述传递函数可以推导出系统反馈环路的闭环增益 $A_{ol}F$ 如下式所示,并绘制对应的波特图。

$$A_{ol}F = \frac{g_m R_{th}}{[1 + SC_{gs}(R_1 + R_0)] * (1 + SC_a R_a)}, \quad (7)$$

由式(7)可以得出存在两个极点:

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi C_{gs} (R_1 + R_0)}, f_{pL} = \frac{1}{2\pi C_a R_a}. \quad (8)$$

根据闭环增益 $A_{ol}F$ 传递函数分析可知:调节 R_1 大小将改变 f_{p1} 的位置,增大 R_1 可以提高低频段环路的噪声抑制能力,但是同时会减低环路带宽响应且 f_c 会靠近低频,影响环路低频时的稳定性。且由图3中

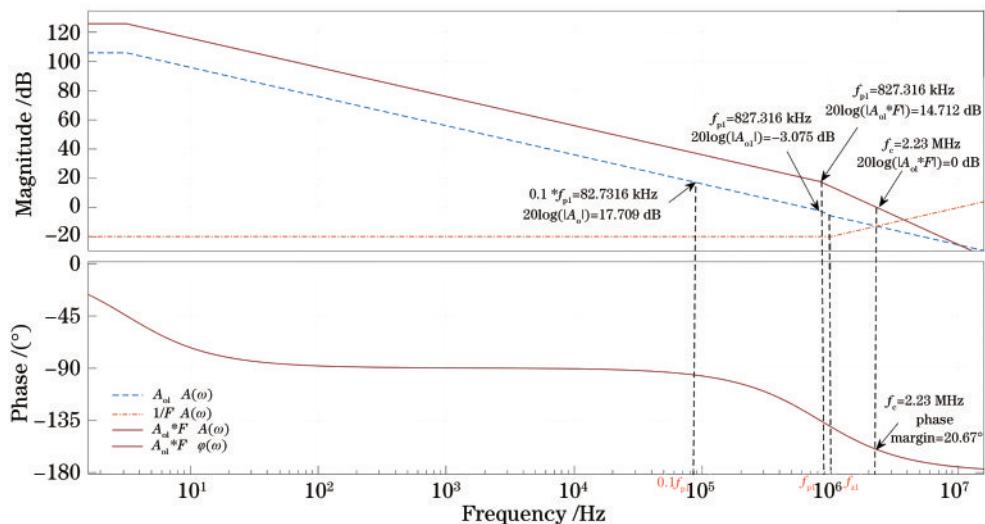


图 3 未加入噪声抑制网络的环路稳定性波特图
 Fig. 3 Bode plot of no noise suppression network loop stability

可以看出, $20\lg(|A_{ol}F|)_{f_{p1}} = 14.712 \text{ dB}$, 此时 $A_{ol}F$ 的相移已经达到 135° , 最终当 A_{ol} 与 $1/F$ 曲线相交时 $f_c = 2.23 \text{ MHz}$, $A_{ol}F$ 曲线的相位裕量为 20.67° , 远小于工程经验相位裕量大于 45° 的要求, 此时整个系统处于不稳定状态, 会有明显的过冲和震荡。

2.3 恒流驱动电路稳定性改进与分析验证

增加环路稳定性的方法有很多种: 第一种是开环增益负载曲线的第二极点的位置后面 10 倍频以内(靠近第二极点位置)产生一个零点, 抵消第二极点使净相移为 0° , 使单位增益相位裕量到稳定范围; 第二种是在

反馈环路上产生一个低频零点, 抬高 $1/F$, 然后远离低频零点(10 倍频以外)再产生一个极点, 使之与 A_{ol} 在 $-20 \text{ dB}/10\text{dec}$ 的斜率处相交。

根据前文分析可知, R_1 的增加并不会有效改善电路的稳定性, 因此选取第二种方法。固定 f_{p1} 位置不变, 在反馈环路上增加噪声抑制网络以产生一对零极点抬高 $1/F$, 同时抑制运放输出端印制电路板(PCB)的寄生电容或其他器件的噪声对 V_o 的影响, 使系统的相位裕量处于稳定范围, 从而提高了整个环路的噪声抑制能力。

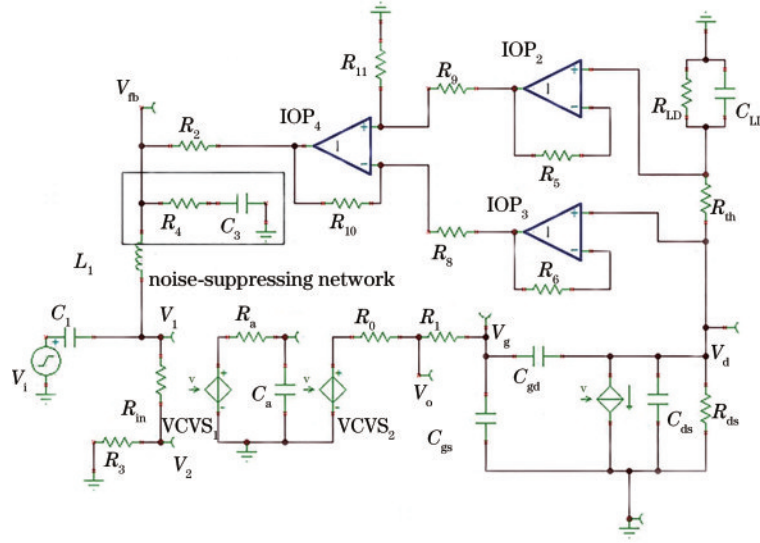


图 4 改进的低噪驱动电路加入噪声抑制网络

Fig. 4 Improved low-noise drive circuit adding to noise suppression network

在反馈环路中引入噪声抑制网络如图 4 所示, 根据推导得出加入噪声抑制网络后的反馈环路传递函数为如下所示, 并得出噪声抑制网络中的 R_4 与 C_3 在反馈环路上新产生的一对零极点 f_{p2} 和 f_{z2} 。

$$\frac{1}{F} = \frac{V_o}{V_{fb}} = \frac{1 + SC_{gs}R_1}{g_m R_{th}} * \frac{1 + SC_3(R_2 + R_4)}{1 + SC_3R_4}, \quad (9)$$

$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi C_{gs}R_1}, f_{p2} = \frac{1}{2\pi C_3R_4}, f_{z2} = \frac{1}{2\pi C_3(R_2 + R_4)}. \quad (10)$$

根据 A_{ol} 和 $1/F$ 传递函数关系式得到反馈环路的闭环增益传递函数为

$$A_{ol}F = \frac{g_m R_{th}}{[1 + SC_{gs}(R_1 + R_0)] * (1 + SC_a R_a)} * \frac{1 + SC_3(R_2 + R_4)}{1 + SC_3R_4}. \quad (11)$$

为了提高系统的稳定性需要调节 R_4 与 R_2 比例大小以确定 f_{p2} 与 f_{z2} 的频差, 以抬高 $1/F$ 高度, 使其满足: $20\lg(|A_{ol}F|)_{0.1f_{p1}} \leq 20\lg(|1/F|)_{f_c} \leq 20\lg(|A_{ol}F|)_{f_{p1}}$, 同时选择合适 C_3 使 $10f_{p2} \leq f_{p1}$ 确保 A_{ol} 与 $1/F$ 相交频率 f_c 位于 $10f_{p2}$ 与 f_{p1} 之间, 此时系统的相位裕量达到稳定

要求。

由图 3 可知 $20\lg(|A_{ol}|)_{f_{p1}} = -3.075 \text{ dB}$, $20\lg(|A_{ol}|)_{0.1f_{p1}} = 17.709 \text{ dB}$, 在 $0 \sim f_{z2}$ 时 $20\lg(|1/F|) = -20 \text{ dB}$ 。根据前文分析估算 R_4 取值范围为 $18 \sim 42 \Omega$, 此时抬高 $1/F$ 高度满足 $-3.075 \text{ dB} \leq 20\lg(|1/F|)_{f_c} \leq 17.709 \text{ dB}$, 然后选取合适的 C_3 以满足 $10f_{p2} \leq f_{p1}$, 最终系统稳定时的相位裕量满足稳定时的要求。使用 Matlab 绘制不同 R_4 和 C_2 大小下传递函数的波特图如图 5 所示。为方便观察零极点的位置与影响, 增益曲线采用渐近线绘制, 而相位采用曲线形式。

根据波特图 5 由噪声抑制网络曲线 2、3 对比和曲线 1、4 对比, 发现当 R_4 小于 18Ω 时, 或者当 C_3 小于 45 nF 时, 系统的相位裕量均不满足系统稳定性的相位裕量要求。而噪声抑制网络曲线 1、2 的 f_{c1} 与 f_{c2} 位于 f_{p1} 与 $0.1f_{p1}$ 之间, 且满足 $10f_{p2} \leq f_{p1}$, 此时系统环路的相位裕量由原来的 20.1° 提升到最大为 55.01° , 大幅提高了整个系统的稳定性, 并提高了对噪声的衰减能力。同时过高抬高 $1/F$ 会提高环路的稳定性和噪声抑制能

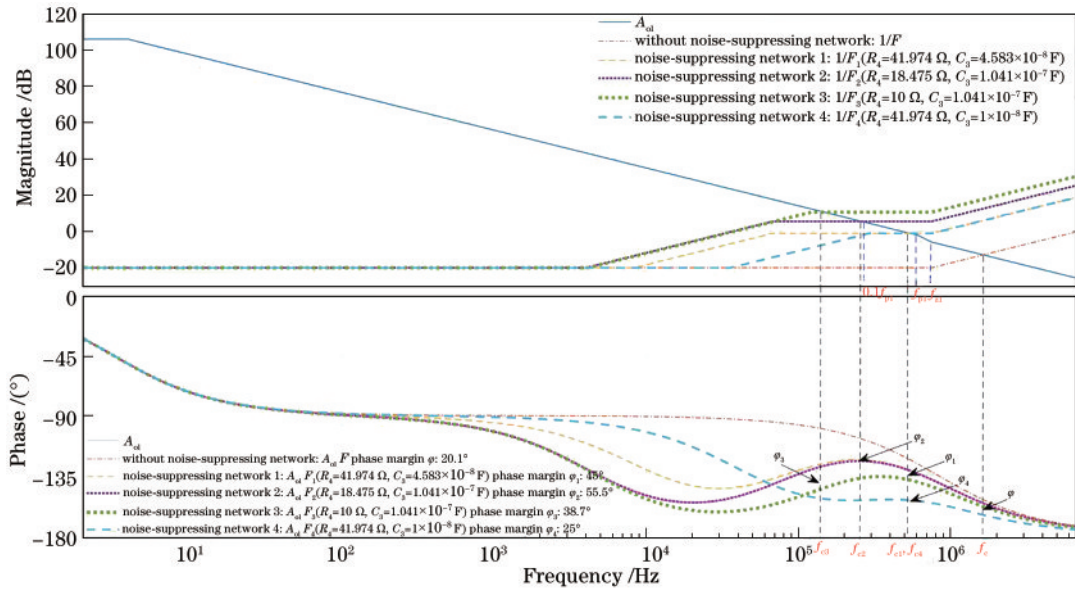


图 5 引入噪声抑制网络电路稳定性前后波特图

Fig. 5 Bode plots before and after introduction of noise suppression network circuit stability

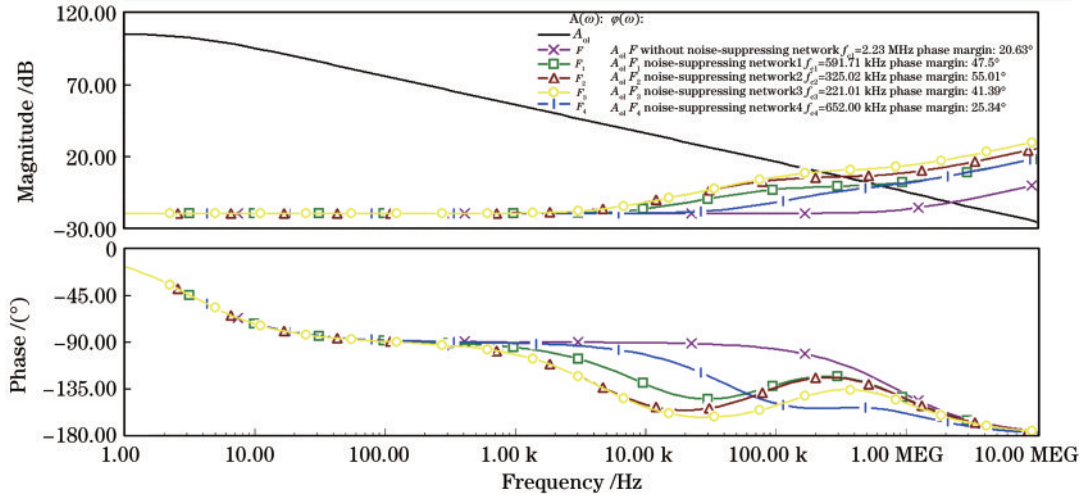


图 6 引入噪声抑制网络电路稳定性前后 Tina-TI 仿真波特图

Fig. 6 Tina-TI simulation Bode plots before and after introduction of noise suppression network circuit stability

力,但是驱动环路的带宽将会有所下降。因此,电路的稳定性和带宽指标需要设计人员根据实际需求做出最好的权衡。根据 Tina-TI 仿真波特图(图 6)可以看出曲线相一致符合理论的分析结果。

3 实验测试

采用 QD_LASER 半导体激光器进行驱动电流与输出光功率的稳定性测试,实验装置实物图如图 7 所示,电流设定为 100 mA,用 KEYSIGHT-34465A 型号的 6 位半数字万用表测量采样电阻两端的电压波动,测试驱动电路的长时间电流稳定性。将采样时间间隔为 1 s,连续测量 2.5 h,两端电流稳定性结果如图 8 所示,根据测试结果可看出,在 2.5 h 连续测量内,电流波动小于 1.4 μ A,稳定度为 0.0001904%,可以满足驱动电路对电流稳定性和控制精度的要求。

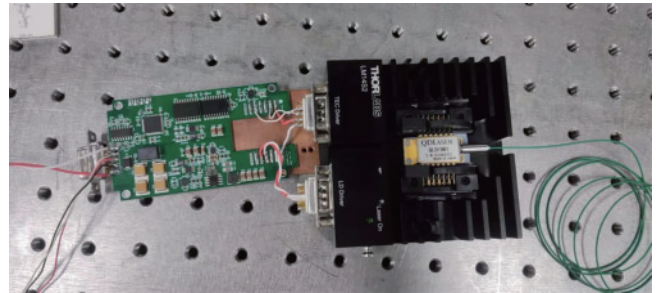


图 7 实验装置实物图

Fig. 7 Physical diagram of experimental device

选用索雷博 THORLABS LDC202C 驱动模块与恒流驱动电路,对比测试同一支 QD_LASER 半导体激光器的输出光功率稳定性。THORLABS LDC202C 驱动模块具有较好的电流稳定性,24 h 电流

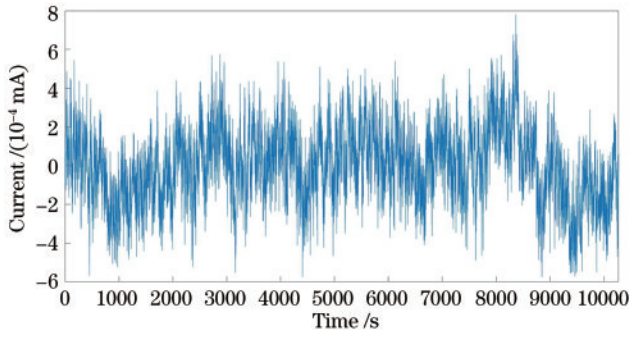


图 8 2.5 h 驱动电流稳定性
Fig. 8 2.5 h drive current stability

漂移小于 $3 \mu\text{A}$, 噪声纹波小于 $1.5 \mu\text{A}$ 。同时选用 THORLABS TED200C 温控模块提供 QD_LASER

合适的工作温度。光纤输出端采用 PDA10CF-EC 分别测量二者光功率的变化并将光功率转化为电信号。用 KEYSIGHT 34465A 型号的 6 位半数字万用表分别测量 3 组 1 h 的光功率稳定性, 并对测试结果用阿伦方差进行光功率稳定性计算, 结果如图 9 所示。恒流驱动电路在积分时间 1 s 时稳定度为 1.298×10^{-5} , 积分时间 10 s 时稳定度约为 5.266×10^{-5} , 且 1 h 内光功率稳定性要优于索雷博驱动模块。

用频谱分析仪测试采样电阻 R_{th} 两端的交流电压噪声功率谱密度, 测试结果如图 10 所示。在 3 KHz~2 MHz 带宽内交流噪声功率谱密度在 10^{-9} 量级, 估算得到交流电压噪声有效值为 $11.1786 \mu\text{V}$, 交流电流噪声有效值小于 224 nA , 由此导致的激光输出线宽展宽在 105 Hz 量级。

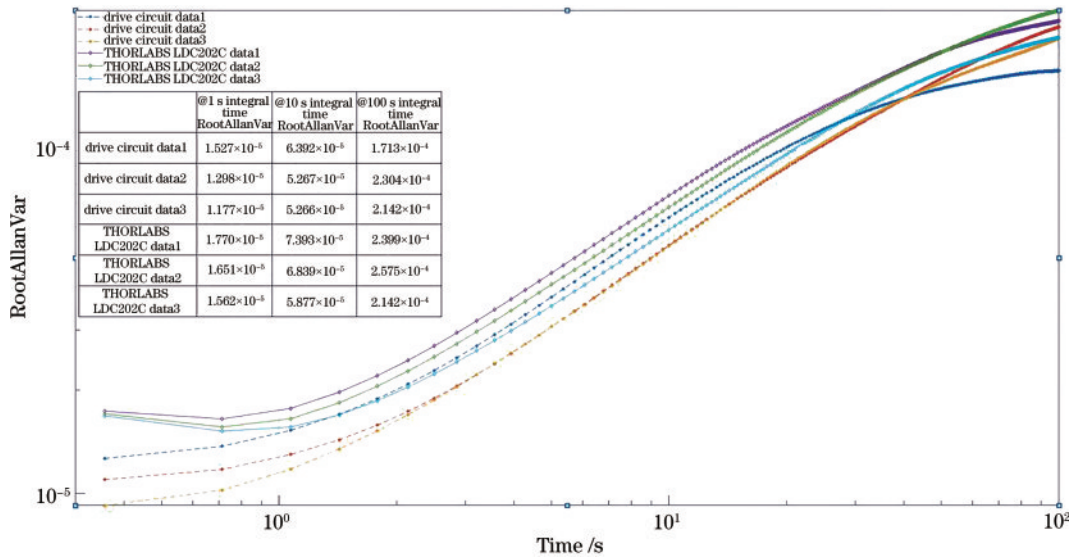


图 9 1 h 光功率稳定性阿伦方差对比图
Fig. 9 1 h optical power stability Allan variance comparison chart

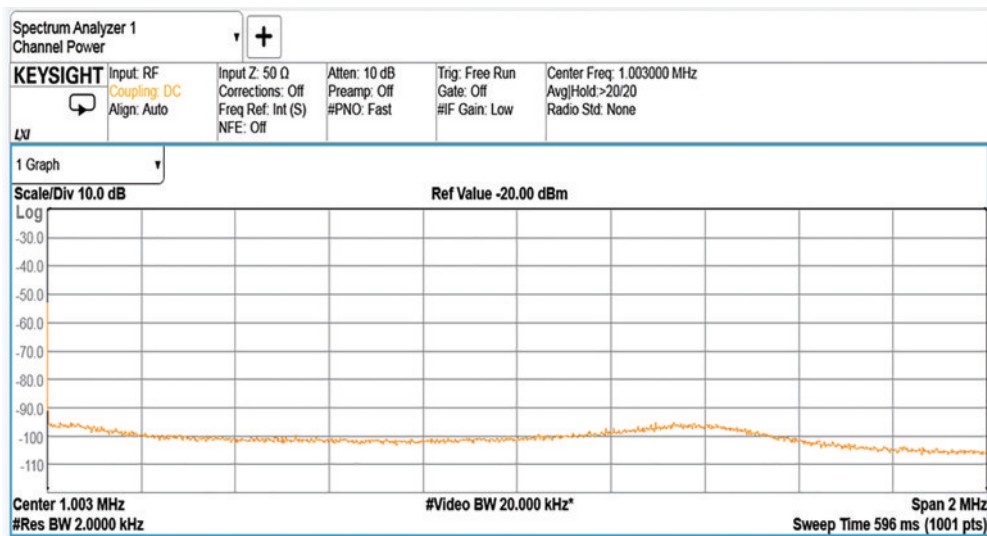


图 10 驱动电路交流噪声有效值测量
Fig. 10 Effective value measurement of alternating current noise in drive circuit

4 结 论

设计了高精度、低噪稳定的半导体激光器驱动电路,通过理论分析与 Tina_TI 仿真相结合对驱动电路进行设计分析,引入噪声抑制网络改进电路,并通过实验进行验证。理论、仿真与实验相结合,调节噪声抑制网络的关键参数,使驱动电路在稳定性、噪声抑制能力和带宽等方面得到平衡。

测试结果表明,该激光器电流驱动电路对目标频率 10 倍频程以上的环路噪声的抑制能力高,且电路与光功率稳定性好。驱动电流 2.5 h 电流稳定度优于 0.0001904%,在 3 KHz~2 MHz 带宽内交流噪声功率谱密度在 10^{-9} 量级,计算得到交流噪声有效值小于 224 nA。该研究为高性能半导体激光器电流驱动电路的设计提供了指导。后续将探究 MOS 管寄生电容 C_{gd} 、 C_{ds} 以及 R_{ds} 在高速脉冲窄脉冲驱动时对电路稳定性的影响,从而进一步探究驱动电路在高频段内的响应特性,为设计 LD 高速驱动电路提供参考。

参 考 文 献

- [1] Molina L L, Zutavern F J, Mar A, et al. Sub-nanosecond avalanche transistor drivers for low impedance pulsed power applications[C]//28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference, June 17-22, 2001, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2001: 244.
- [2] 单振国, 干福熹. 当代激光之魅力[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Shan Z G, Gan F X. The charm of contemporary laser [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [3] 张龙, 陈建生, 高静, 等. 大功率半导体激光器驱动电源及温控系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1005003.
Zhang L, Chen J S, Gao J, et al. Design of driving power and temperature control system for high power semiconductor laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1005003.
- [4] 陈霄, 隋青美, 苗飞, 等. 高灵敏度腔增强吸收式乙炔气体检测系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 9-16.
Chen X, Sui Q M, Miao F, et al. High sensitivity acetylene detection system based on cavity enhanced absorption technique[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 9-16.
- [5] 王品一, 万福, 王建新, 等. 注入锁定腔增强拉曼光谱微量气体检测技术[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1917-1924.
Wang P Y, Wan F, Wang J X, et al. Trace gas detection using cavity-enhanced Raman spectroscopy with injection locking[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 1917-1924.
- [6] 朱晓睿, 卢伟业, 饶雨舟, 等. TDLAS 直接吸收法测量 CO₂ 的基线选择方法[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 455-461.
Zhu X R, Lu W Y, Rao Y Z, et al. Selection of baseline method in TDLAS direct absorption CO₂ measurement [J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 455-461.
- [7] Libbrecht K G, Hall J L. A low-noise high-speed diode laser current controller[J]. Review of Scientific Instruments, 1993, 64(8): 2133-2135.
- [8] Zhu X R, Lu W Y, Rao Y Z, et al. Selection of baseline method in TDLAS direct absorption CO₂ measurement [J]. Chinese Journal of Optics, 2017, 10(4): 455-461.
朱晓睿, 卢伟业, 饶雨舟, 等. TDLAS 直接吸收法测量 CO₂ 的基线选择方法[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 455-461.
- [9] 梅剑春, 叶青, 田建国. 多路半导体激光器驱动电路设计[J]. 激光技术, 2018, 42(2): 245-248.
Mei J C, Ye Q, Tian J G. Design of driving circuit of multi-channel semiconductor laser[J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 245-248.
- [10] 马天翔, 田小建. 基于 MOSFET 的半导体激光器驱动电路设计及其改进[J]. 中国激光, 2012, 39(B06): 450-453.
Ma T X, Tian X J. Laser diode driver circuit design and improvement based on the MOSFET[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(B06): 450-453.
- [11] 王东宁, 张琳, 华宝成, 等. 一种空间视觉测量子系统用半导体激光器驱动电路设计[J]. 空间控制技术与应用, 2016, 42(2): 49-52, 62.
Wang D N, Zhang L, Hua B C, et al. Design of laser diode driving circuit used in space vision measurement subsystem[J]. Aerospace Control and Application, 2016, 42(2): 49-52, 62.
- [12] 邢素霞, 王睿, 郭瑞民, 等. 蝶形半导体激光器恒流驱动设计与实现[J]. 激光与红外, 2019, 49(5): 553-558.
Xing S X, Wang R, Guo R M, et al. Design and implementation of constant current drive for butterfly semiconductor lasers[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(5): 553-558.
- [13] Kundert K S. The designer's guide to spice and spectre [M]. New York: Springer, 1995.