

基于泵浦调制的高功率光纤激光器过冲抑制

高俊峰, 闫明鉴, 梁慧生, 詹涌, 韩志刚, 朱日宏, 刘明
(南京理工大学电子信息与光电技术学院, 江苏南京 210094)

摘要:分析了高功率光纤激光器过冲效应的产生机理,提出一种基于泵浦调制的过冲效应抑制方法,在线性恒流闭环负反馈技术的基础上实现泵浦调制,遏止光纤激光振荡器中“反转粒子”过量积累,最终抑制高功率光纤激光器的过冲效应,搭建了750 W的光纤激光器系统,经泵浦调制后,1450 W的激光过冲衰减了-2.86 dB,达到额定功率缓升时间小于1 ms,有效地抑制了激光过冲效应。

关键词:光纤激光器;高功率;过冲效应;泵浦调制

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.08.007

Overshoot suppression of high power fiber laser based on pump modulation

GAO Jun-feng, YAN Ming-jian, LIANG Hui-sheng, ZHAN Yong, HAN Zhi-gang, ZHU Ri-hong, LIU Ming
(School of Electronic Information and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In this paper, the mechanism of overshoot effect in high power fiber laser is analyzed, and a suppression method of overshoot effect based on pump modulation is proposed. Based on the linear constant current closed-loop negative feedback technology, the pump modulation is realized to prevent the excessive accumulation of inversion particles in the fiber laser oscillator, and finally the overshoot effect of high-power fiber laser is suppressed. A 750 W fiber laser system is built, after the pump modulation, the overshoot of 1450 W laser is attenuated by -2.86 dB, and the slow rise time of the rated power is less than 1 ms.

Keywords: fiber laser; high power; overshoot effect; pump modulation

1 引言

高功率光纤激光器在工业、国防和医学等领域有重要应用^[1],随着激光功率的增加,过冲效应的影响不容忽视。过冲效应呈现为一个峰值功率远高于稳态功率的毫秒量级的激光脉冲,过冲峰的频率在几十到几百赫,经过衰减振荡后趋于稳定。过冲效应造成光纤中产生超高的激光功率密度和大量沉

积的热负荷^[2],引起光纤激光器的非线性效应阈值降低、光束质量恶化、模式不稳定以及热损伤等现象,使激光器输出呈现复杂的动态行为,甚至导致激光器永久性损伤^[3]。

人们对光纤激光器的瞬态响应特性、自脉冲现象、强度噪声抑制等方面进行了大量的理论与实验研究, Sanchez 等人^[4]从激光光子和反转粒子的交互

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2017YFF0107103);国家自然科学基金项目(No. 61875087)资助。

作者简介:高俊峰(1996-),男,硕士研究生,主要从事高功率激光器方向的研究。E-mail:346290380@qq.com

通讯作者:刘明(1969-),男,博士,讲师,主要从事高功率光纤激光器电源及控制方向的研究。E-mail:liumwh@163.com

收稿日期:2020-11-11;**修订日期:**2020-12-23

作用对激光过冲效应进行理论解释;方妍等人^[5]对激光过冲效应从部分未抽运或弱抽运的光纤对信号光的可饱和吸收作用进行解释;孟现柱等人^[6]获得掺杂三能级光纤激光器速率方程组的解析解;Ammar Hideur 等人^[7-8]对于侧向抽运高功率掺镱双包层光纤激光器的动态行为和自脉冲激发的布里渊散射和拉曼散射能够产生不规则的脉冲进行了研究;梁旭等人^[9]通过光电反馈法设计相位超前和低噪声宽带增益放大的噪声抑制电路,将强度噪声抑制在 39 dB 以下;Kim Dohyun 等人^[10]通过组合腔内外光学元件法,将锁模光纤激光器的相对强度噪声抑制在 -140 dB/Hz 以下;Amili Abdelkrim 等人^[11]在激光腔内插入可饱和吸收体作为缓冲池,利用光子吸收进行噪声抑制。

迄今,对高功率光纤激光器过冲效应的行为机制还没有达成共识,对高功率光纤激光器的过冲效应抑制技术研究也比较少见,但研究发现光学器件的机械振动,增益介质的热不稳定性,泵浦光功率扰动,光纤激光振荡器的内损耗起伏等都会引起过冲效应。通过优化温度、增益光纤长度、光纤光栅反射率、光纤掺杂离子浓度、泵浦方式等参数能够抑制光纤激光器的过冲效应^[12],但优化这些参数通常会引起激光输出功率、光束质量或光谱特性发生变化。本文提出一种基于泵浦调制的高功率光纤激光器过冲效应抑制方法,通过泵浦调制电路直接优化泵浦抽运速率,最终抑制高功率光纤激光器的过冲效应,该方法不改变激光的光束质量或光谱特性,但会导致激光输出经过毫秒量级的缓升时间后达到额定功率输出,但这并不会影响连续型高功率光纤激光器的工作和应用。

2 理论研究

高功率光纤激光器的过冲效应是在超过阈值的阶跃泵浦光($P(t) = P_0 \geq P_{th}$)作用下,在上能级粒子经历一定的延迟时间后第一次达到相应的平衡值时,其相应的静态信号光子密度也应达到平衡值,但在实际的瞬态过程中,此时的信号光子密度仍然远小于平衡值。因受激辐射过程很弱且泵浦抽运速率一定,上能级粒子数浓度得以继续增长,但在这个过程中,自发辐射的增强也使受激辐射不断增强,直到信号光子密度第一次达到平衡值时,在信号光子的作用下前期过量积累的“反转粒子”终于达到爆发

点,使其同时发生受激辐射而爆发出一束远超平衡值的激光过冲。降低泵浦抽运速率或增大自发辐射率可以在稳态之前遏止“反转粒子”过量积累,实现对激光过冲效应的抑制,但自发辐射率与温度、光纤掺杂离子浓度、增益光纤长度、光纤光栅反射率等参数有关,改变这些参数通常会引起激光输出功率、光束质量或光谱特性的变化,优化泵浦抽运速率不会引起光束质量或光谱特性变化。

激光过冲过程及其机制可以由速率方程建立其解析理论,根据激光理论,掺镱双包层光纤激光器可视为二能级系统^[13],其速率方程写为关于上能级粒子数密度 $N(t)$ 和光子数密度 $S(t)$ 的微分方程为:

$$\frac{dN(t)}{dt} = W_p \cdot [N_l - N(t)] - N(t)/\tau_p - \sigma v \cdot N(t) \cdot S(t) \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \sigma v \cdot N(t) \cdot S(t) - S(t)/\tau_3 \quad (2)$$

其中, W_p 为泵浦抽运几率; N_l 为粒子总浓度; τ_p 为粒子在上能级平均寿命; τ_3 为信号光子平均寿命; σ 为光纤受激跃迁截面; v 为掺杂光纤中的光速。

采用线性小信号近似分析法对上式求解,可得描述受激光子数密度的微分方程:

$$\frac{d^2 S(t)}{dt^2} + \alpha \cdot \frac{dS(t)}{dt} + \beta \cdot S(t) = 0 \quad (3)$$

其中, $\alpha = (\sigma v N_0)/W_p + 1/\tau_p$; $\beta = (\sigma v N_0)/\tau_3$; N_0 为稳态时上能级粒子浓度。

在泵浦光阶跃输入条件下,对于泵浦功率恒定的光纤激光振荡器,受激辐射光子数密度为:

$$S(t) = A[1 - e^{-\gamma t} \cdot \sin(\omega t + \varphi)] \quad (4)$$

其中, $\gamma = \alpha/2$ 为阻尼振荡系数; $\omega^2 = \beta - \alpha^2/4$ 为振荡频率; A 和 φ 由初值决定;阻尼振荡系数和振荡频率与泵浦抽运速率、光纤掺杂离子浓度、腔内光子寿命等都有关,但随着泵浦抽运速率的降低,系统的阻尼振荡系数增大。

进一步分析高功率光纤激光器过冲效应,模拟不同阻尼振荡系数的激光器输出功率与时间的关系,结果如图 1 所示,此处对输出强度进行了归一化处理,光纤激光器的受激辐射光子数密度做简谐衰减振荡运动,阻尼振荡系数越大,振荡衰减越快,振幅随时间增大而减小,最终趋于平衡位置。

综上所述,增光纤激光器系统的阻尼振荡系

数,即通过降低泵浦抽运速率能够遏止稳态工作之前上能级“反转粒子”过量积累,可以降低激光过冲的峰峰值,能够有效地抑制高功率光纤激光器过冲效应。

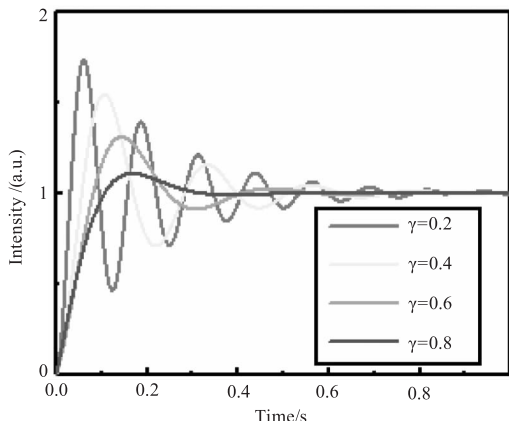


图1 不同阻尼下的激光器输出功率随时间的变化

Fig. 1 Variation of laser output power with time under different damping

3 实验与分析

3.1 泵浦调制方案设计

根据高功率光纤激光器对泵浦抽运速率的需求和大功率光纤耦合半导体泵浦源的直接调制特性^[14],设计如图2所示泵浦调制电路,其主要由MOS管、运算放大器、三极管、滞后RC、高精度采样电阻等部分构成线性恒流闭环负反馈系统^[15]。

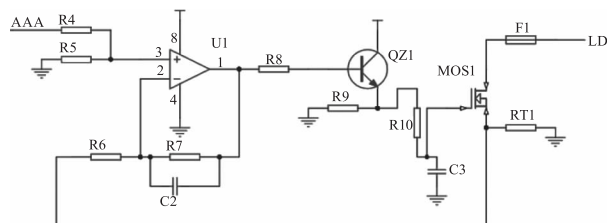


图2 泵浦调制电路拓扑图

Fig. 2 Topology of pump modulation circuit

泵浦调制电路工作过程为:主回路电源接通后,运算放大器(U1,LM258)的同相端输入基准电压信号、反向端输入高精度采样电阻(RT1)的电压采样信号,但由于MOS管(MOS1,IRPF4468PbF)存在输入电容,这要从电路中汲取较大的电流以在一定时间内完成导通,所以运算放大器输出的电压信号需要由功放三极管(QZ1,9013)、电阻(R8、R9)组成的射极跟随器来增强带负载能力,射极跟随器输出电流经时间滞后网络^[11](R10、C3)驱动MOS管,随着电容(C3)充电,MOS管栅极电压逐渐升高,当栅极电压达导通阈值后,MOS管逐渐导通,驱动电流从0缓慢上

升到最大值,当电容(C3)充电饱和时,MOS管工作在放大区,回路电流趋于稳定,此时输出电流为:

$$I = (V_D - V_1 \cdot K_2 + V_{ref} \cdot A \cdot K_1 \cdot K_2) / [(1 + A \cdot K_1 \cdot K_2) \cdot R_T + R_L] \quad (5)$$

其中, A 为差分放大器放大倍数; K₁ 为功放三极管的放大倍数; K₂ 为 MOS 管工作在放大区时的电流放大倍数; V_D 为回路直流电源电压; V₁ 为三极管的前置电压; V_{ref} 为基准电压; R_L 与 R_T 分别为泵浦等效电阻值以及采样电阻值。

通过改变时间滞后网络中电阻(R10)和电容(C3)的值可以调节主回路电流的缓升时间,但由于MOS管的自身存在导通、开启延迟^[16]和电路中散布电容的影响,电流实际缓升时间要略长于4RC^[17],根据上述泵浦调制原理搭建泵浦调制电路,并对其调制性能进行测试,测试结果如图3所示,这里电流强度归一化处理,泵浦驱动电流从0缓升到16 A,达到0.99 I_{max}的时间0~3 ms可调,本文搭建的泵浦调制电路满足光纤激光器的需求。

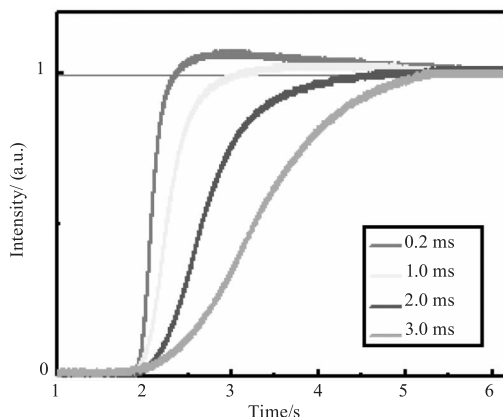


图3 泵浦驱动电流缓升时间测试图

Fig. 3 Test chart of slow rise time of pump drive current

3.2 激光过冲抑制实验与分析

为了测试光纤激光器的过冲效应并验证理论的准确性,搭建一套750 W的光纤激光振荡器测试系统,如图4所示,采用双向泵浦方式对振荡器进行泵浦,半导体激光器(LD)(中心波长为976 nm,额定功率130 W,输出端光纤135/155 μm)通过正向6×1光纤合束器(PC)(输入端光纤135/155 μm,NA 0.22,输出端光纤20/400 μm,NA 0.065/0.46)和反向(2+1)×1光纤合束器(输入光纤135/155 μm,输出端光纤14/250 μm)耦合到振荡器中。光纤激光振荡器由高反光纤光栅(中心波长为1080 nm,带宽(-3 dB)为3.2700 nm,反射率大于

99.6%)、低反光纤光栅(中心波长为 1080 nm,中心带宽(-3 dB)为 0.9027 nm,反射率为 9.3%)和长度为 30 m 的增益光纤(LMA-YDF-14/250-HP-M, NA 0.065/0.46)组成。低反光纤光栅后连接包层光剥离器(CPS)去除不需要的包层光,用石英端帽(QBH)输出信号光。使用功率计(Spiricon, 1500 W)测量输出功率,来自功率计的散射光由光电二极管(PD)(TTI, TIA525I-FC)收集。

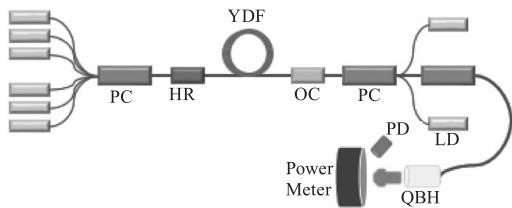


图 4 光纤激光振荡器系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fiber laser oscillator system

首先,采用程控电源(IT6523D 3 kW/220 V/60 A)为光纤激光器系统供电,此时光纤激光振荡器中的泵浦光可视为阶跃输入,测试结果如图 5 所示,这里激光、电流强度归一化处理,当设置程控电源输出电流为 16 A 时,光纤激光振荡器稳态输出功率 750 W,光光转换效率能够达到 70.8%,过冲峰值功率高达 1450 W,接近两倍稳态功率。结果表明,测试结果与仿真结果吻合较好,在阶跃泵浦光输入情况下,泵浦抽运速率较快导致“反转粒子”过量积累,引起光纤激光振荡器产生远高于激光器额定稳态功率的激光过冲。

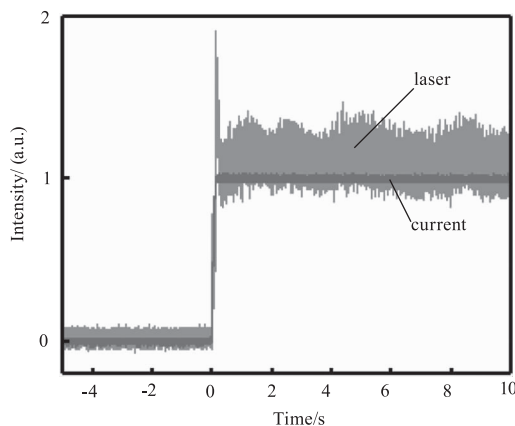


图 5 750 W 光纤激光器过冲测试图

Fig. 5 Overshoot test chart of 750 W fiber laser

降低泵浦抽运速率可以有效地抑制光纤激光器的过冲效应,为了验证这一点,采用上述泵浦调制电路对光纤激光振荡器进行供电测试,测试结果如图 6 所示,这里激光、电流强度归一化处理,泵浦调制

电路输出电流 16 A,缓升时间 0.16 ms,光纤激光振荡器稳态输出功率 750 W, $0.97 P_{\max}$ 时间小于 1 ms,无激光过冲。

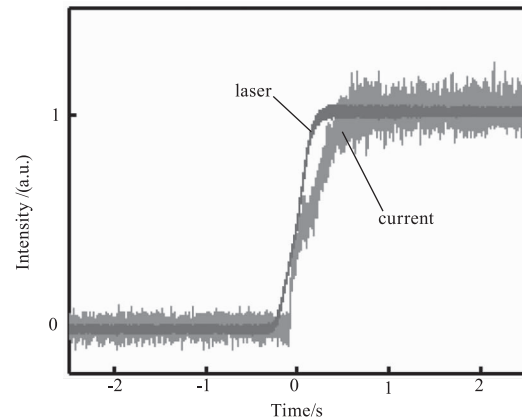


图 6 泵浦调制后 750W 光纤激光器测试图

Fig. 6 Test chart of 750 W fiber laser after pump modulation

上述实验结果分析表明,泵浦抽运速率是影响光纤激光振荡器产生过冲效应的主要因素之一,通过泵浦调制可以抑制光纤激光器的过冲效应;本文设计的泵浦调制电路满足光纤激光器对泵浦抽运速率的需求;通过滞后 RC 控制 MOS 管的导通,泵浦驱动电流缓升时间 0 到 3 ms 可调;大功率光纤耦合半导体泵浦源的直接调制特性良好,泵浦调制电路可根据光纤激光振荡器的需求,对泵浦抽运速率进行不同程度的优化;经泵浦抽运速率过优化后,光纤激光器输出达到 $0.97 P_{\max}$ 的时间小于 1 ms,光纤激光器瞬态响应特性良好,无激光过冲。

4 结论

本文针对大功率激光器的过冲效应会导致光束质量恶化并极有可能造成激光器损坏的问题,理论分析了光纤激光器的过冲效应产生机理,结果表明,过冲效应与泵浦抽运速率和自发辐射率等因素有关,泵浦抽运速率影响光纤激光振荡器中受激辐射光子数密度方程的阻尼振荡系数、振荡频率,通过降低泵浦抽运速率能有效地抑制光纤激光器的过冲效应。设计泵浦调制电路对泵浦抽运速率进行优化,并搭建了一套 750 W 光纤激光器系统,激光过冲峰值功率 1450 W,相同条件下经泵浦调制后,激光过冲得到衰减了 -2.86 dB, $0.97 P_{\max}$ 时间小于 1 ms,光束质量和光谱特性不发生变化,通过实验验证了理论与实验结果的一致性。

参考文献:

- [1] Dang W J, Li Z, Li Y T, et al. Recent advances in high-power continuous-wave ytterbium-doped fiber lasers [J]. Chinese Optics, 2020, 13(4): 676 – 694. (in Chinese)
党文佳, 李哲, 李玉婷, 等. 高功率连续波掺镱光纤激光器研究进展[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 676 – 694.
- [2] Lv X, Liao T, Yi Y. Research on Multi-wavelength Fiber Laser Based on Nonlinear Effect [J]. Journal of Physics: Conserence Series, 2019, 1213(4): 042053.
- [3] Yang Yongqiang, Wu Shibiao, Zhang Yue, et al. Application progress and prospect of fiber laser in metal additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 203 – 215. (in Chinese)
杨永强, 吴世彪, 张越, 等. 光纤激光器在金属增材制造中的应用进展及展望[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 203 – 215.
- [4] Sanchez, Le Boudec P, François, et al. Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers [J]. Physical Review A, 1993, 48(3): 2220 – 2229.
- [5] Fang Yan. Research on all fiber passively Q-switched Yb doped fiber laser [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
方妍. 全光纤化被动调 Q 掺镱光纤激光器研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [6] Xianzhu Meng. Analyses of rate equations of fiber lasers with Three-Energy-Level Dopants [J]. Applied Physics, 2015, 5(8): 77 – 82.
- [7] Ammar Hideur, Thierry Chartier, Cafer Özkul, et al. Dynamics and stabilization of a high power side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. Optics Communications, 2000, 186(4): 311 – 317.
- [8] Bülend Ortaç, Ammar Hideur, Thierry Chartier, et al. Influence of cavity losses on stimulated Brillouin scattering in a self-pulsing side-pumped ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. Optics Communications, 2003, 215(4): 389 – 395.
- [9] Liang Xu, Wang Yunxiang, Qiu Qi, et al. Intensity noise properties and suppression of nonplanar ring oscillator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 33 – 37. (in Chinese)
梁旭, 王云祥, 邱琪, 等. 非平面环形腔激光器的强度噪声及其抑制[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 33 – 37.
- [10] Kim Dohyun, Zhang Shuangyou, Kwon Dohyeon, et al. Intensity noise suppression in mode-locked fiber lasers by double optical bandpass filtering [J]. Optical Society of America, 2017, 42(20): 4095 – 4098.
- [11] El Amili Abdelkrim, Loas Goulc'hen, Pouget Lucien, et al. Buffer reservoir approach for cancellation of laser resonant noises [J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 5014 – 17.
- [12] Guo Yongrui, Lu Huadong, Peng Weina, et al. Intensity noise suppression of a high-power single-frequency CW laser by controlling the stimulated emission rate [J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 6033 – 6036.
- [13] Yuan Yuan Gu, Yue Ming Fu, Hui Lu, et al. Study on energy level and spectral characteristics of high power Yb doped fiber laser [J]. Applied Mechanics and Materials, 2019, 4676: 57 – 61.
- [14] Sun Hong, Wei Kaihua, Qian Kai, et al. An all fiber pulsed Yb fiber laser based on gain modulation technology [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 43 – 47. (in Chinese)
孙宏, 魏凯华, 钱凯, 等. 一种基于增益调制技术的全光纤化脉冲 Yb 光纤激光器 [J]. 光子学报, 2013, 42(1): 43 – 47.
- [15] Baris Baykant Alagoz, Nusret Tan, Furkan Nur Deniz, et al. Implicit disturbance rejection performance analysis of closed loop control systems according to communication channel limitations [J]. IET Control Theory and Applications, 2015, 9(17): 2522 – 2531.
- [16] Fan chunshuai, Zhang Yang, Peng Lijun. Influence of gate parasitic capacitance on electrical parameter measurement of MOSFET [J]. Electronic World, 2019(17): 37 – 38. (in Chinese)
范春帅, 张杨, 彭丽君. MOSFET 栅极寄生电容对电参数测试影响 [J]. 电子世界, 2019(17): 37 – 38.
- [17] Yoshiro Tamura, Ryo Sekiyama, Shu Sasaki, et al. RC polyphase filter as complex analog Hilbert filter [J]. Applied Mechanics and Materials, 2019, 4918: 29 – 36.