

引用本文: 韦佳天, 金奇, 黎志刚, 等. 单频调制的相位调制激光在频率损失下激发的幅频效应[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 31–35.

单频调制的相位调制激光在频率损失下激发的幅频效应

韦佳天, 金奇, 黎志刚, 李晓晖*, 吕宏伟, 杨万里, 邢宇鹏, 杨小亮

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 鉴于当前对幅频效应的研究主要局限于从时域角度关注脉冲顶部调制, 无法全面揭示其在频域或其它维度上的特性, 从单频激光相位调制模型出发, 结合理论仿真和实验验证, 从波形强度调制度、激发的幅度调制信号强度和频谱分布变化等角度, 研究了单阶次频率损失、整体频率损失以及调制深度变化对幅频效应激发的影响。研究结果表明, 随着相位调制激光偏离滤波器中心位置距离增大, 波形强度调制度随之增强, 但激发的调制信号强度则呈现先上升后下降的趋势; 与单阶次频率损失相比, 整体频率损失所激发的幅频效应中, 调制信号主要集中在基频和二次谐波上; 此外, 调制深度的增加会导致光谱宽度增大以及激发的调制信号强度增强。

关键词: 幅频效应; 相位调制激光; 滤波

中图分类号: TN91 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2024)04-0031-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Amplitude-frequency effect excited by the phase-modulated laser with single-frequency modulation under frequency loss

WEI Jiatian, JIN Qi, LI Zhigang, LI Xiaohui*, LYU Hongwei, YANG Wanli, XING Yupeng, YANG Xiaoliang

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Given that the current research on amplitude-frequency effects is primarily limited to focusing on pulse top modulation from a time-domain perspective, which fails to comprehensively reveal its characteristics in the frequency domain or other dimensions, this study commences from a single-frequency laser phase modulation model, combining theoretical simulations and experimental verifications. It investigates the impact of single-order frequency loss, overall frequency loss, and modulation depth changes on the excitation of amplitude-frequency effects, considering factors such as waveform intensity modulation, excited amplitude modulation signal strength, and spectrum distribution changes. The research results indicate that as the phase-modulated laser deviates further from the center position of the filter, the waveform intensity modulation increases accordingly, while the excited modulation signal strength exhibits a trend of first rising and then falling. Compared with single-order frequency loss, the amplitude-frequency effects excited by overall frequency loss mainly concentrate on the fundamental frequency and second harmonic. Additionally, an increase in modulation depth leads to an enhancement in spectral width and an intensification of the excited modulation signal strength.

Key words: amplitude-frequency effect, phase modulated laser, filtering

0 引言

在惯性约束聚变(ICF)研究的高功率激光驱动装

置中, 为了抑制受激布里渊散射(SBS)并满足光谱色匀滑(SSD)的需求, 需要对单频激光脉冲进行相位调制以展宽光谱^[1-4]。然而, 相位调制激光在激光系统的传输过程中, 由于其频谱幅度和相位的不均匀传输, 会导致激光时域出现强度调制, 这种现象被称为幅频(FM-to-AM)效应^[5-6]。这种效应会严重影响高功率激光驱动装置的运行安全和物理实验效果, 因此必须加以抑制^[3-4]。2016年, QIAO Z等人^[7]指出, 导致高功率光纤激光器出现FM-to-AM效应的主要因素包括偏振模色散(PMD)、群速度色散(GVD)^[8]、弱标准器效应^[9]以

收稿日期: 2024-06-25。

基金项目: 广西重点研发计划项目(合同号: MY2326001)资助。

作者简介: 韦佳天(1989—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为新型光纤激光器及窄线宽光纤激光系统, 参与了多项国家级和地方级重大科技专项研究工作, 相关研究成果在国家科学研究工程建设任务中得到推广与应用。

*通信作者: 李晓晖(1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为高能光纤激光系统及超快光纤激光器。



韦佳天, 金奇, 黎志刚, 等: 单频调制的相位调制激光在频率损失下激发的幅频效应

及光学元件膜层透射率不一致^[10]等, 这些因素为 FM-to-AM 效应的研究提供了方向^[11]。2017 年, LI L 等人^[12]对 FM-to-AM 效应的时间波形与光谱的关联特性进行了仿真及实验研究, 探讨了不同阶次频率损失对时间波形的影响, 分析了导致相位调制激光脉冲出现 FM-to-AM 效应的因素, 并提出了相应的抑制方案^[13]。然而, 当前针对 FM-to-AM 效应的研究主要集中在高功率激光驱动装置的应用上, 且多从时域角度关注脉冲顶部调制情况, 缺乏对频率域和连续光领域应用的关注^[14-17]。实际上, 相位调制不仅用于高功率激光驱动装置中抑制 SBS, 还广泛应用于高功率窄线宽光纤激光器、非线性频率变换等领域。当其用于对单频激光进行光谱宽度时, 同样会产生 FM-to-AM 效应。因此, 应更全面地对 FM-to-AM 效应的产生原因进行分析评估。本文专门针对单频调制的相位调制激光在传输过程中因频率损失所引发的 FM-to-AM 效应进行深入研究。

1 理论仿真

1.1 单频激光相位调制及滤波器模型

利用相位调制拓宽单频光纤激光器的光谱带宽的方案具有操作简单及可控性强等特点, 已成为抑制高功率光纤激光器系统中 SBS 效应的研究热点^[18-20]。在相位调制器上施加电压对单频激光的相位进行调制, 若调制的是正弦信号, 则调制后的信号可以表示为

$$E(t) = E_0(t) e^{-i\omega t} e^{-im \cos 2\pi f_m t} \quad (1)$$

其中, $E_0(t)$ 为单频激光振幅, ω 为单频激光的圆频率, t 为时间, m 为调制深度, f_m 为正弦信号的频率。

对于具有超高斯型滤波曲线特征的光滤波器, 其透射率表达式为

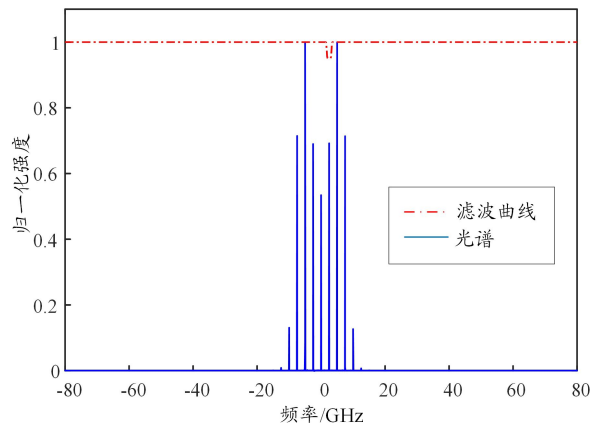
$$T_{\text{filter}} = T_{\text{max}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_e} \right)^{2n}} \quad (2)$$

其中, T_{max} 为滤波器的最大透射率, λ 为工作波长, λ_0 为滤波器中心波长, $\Delta\lambda_e$ 为透射谱半宽度 (透射率峰值的 $1/e$); n 为超高斯波形的阶数, 当 $n=1$ 时, 滤波器波形为高斯波形。本文主要基于高斯波形的滤波器对不同频率损失状态下的 FM-to-AM 效应进行讨论。

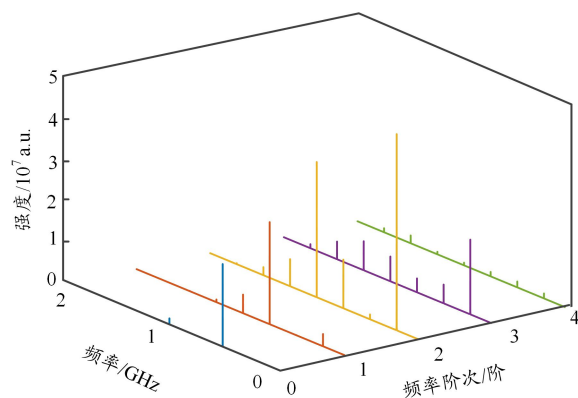
1.2 单阶次频率损失下的 FM-to-AM 效应

为方便分析单阶次频率损失的影响, 本文构建近似矩形缺口的滤波器, 其缺口可造成该位置的光谱成分强度损失 5%。本文选取 2.5 GHz 正弦波对单频激光进行相位调制, 调制深度 $m=3$, 仿真得到单阶次频率

下损失的 FM-to-AM 效应表现如图 1 所示。从图 1(a) 可以看出, 滤波曲线的近似矩形缺口位于梳状光谱的 0 Hz 频率附近; 从图 1(b) 可以看出, 单阶次频率的损失, 容易激发多种不同阶次的谐波调制。



(a) 单频调制的光谱及滤波曲线示意图



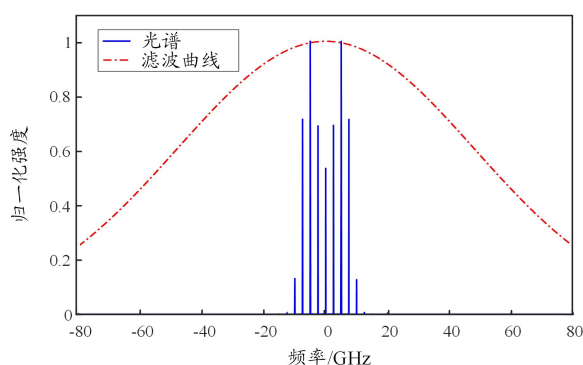
(b) 不同阶次频率损失激发的 AM 信号的频谱

图 1 单阶次频率下损失的 FM-to-AM 效应表现

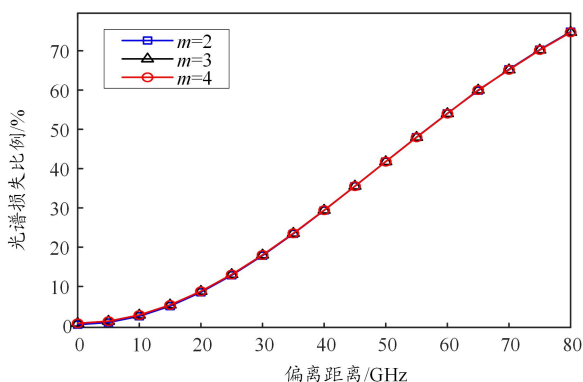
1.3 整体频率损失下的 FM-to-AM 效应

在实际光纤激光系统中, 虽然相位调制后的光谱宽度较小, 存在单阶次频率损失的情况, 但主要的频率损失通常是整体频率损失, 例如掺杂光纤的增益谱影响、器件透过率谱以及滤波器的滤波作用等。本文采用 2.5 GHz 正弦信号、80 GHz 谱宽的高斯型滤波曲线进行仿真, 得到归一化的滤波曲线和调制深度 $m=3$ 时对应的光谱形态如图 2(a) 所示。改变调制深度 m 和相位调制光谱与滤波器的相对位置 (频率损失状态), 研究在不同的调制深度 m 和频率损失状态下激发的 FM-to-AM 效应的表现。相位调制光谱偏离滤波器中心距离 (下文简称偏离距离) 与光谱损失比例、波形强度调制度、幅度调制 (AM) 信号强度之间的关系分别如图 2(b)、图 2(c)、图 2(d) 所示。

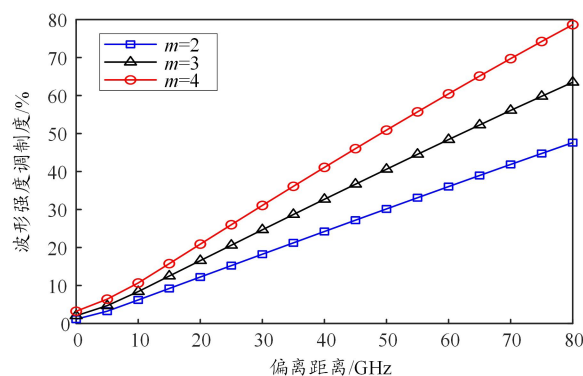
从图 2(b) 可以看出, 随着偏离距离增大, 光谱损



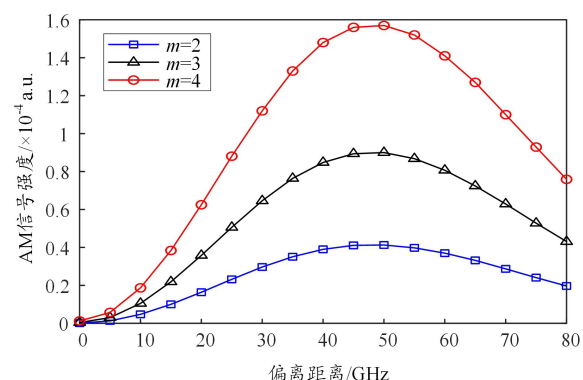
(a) 单频调制的光谱及高斯型滤波曲线



(b) 偏离距离与光谱损失比例的关系



(c) 偏离距离与波形强度调制度的关系



(d) 偏离距离与 AM 信号强度的关系

图 2 整体频率损失下的 FM-to-AM 效应表现

失比例快速增加,调制深度的变化对光谱损失比例的影响较小,即光谱损失比例变化主要与相位调制光谱所处位置相关。

从图 2(c)可以看出,波形强度调制度随着偏离距离增大而近似线性增加;在同一偏离距离下,调制深度越大,波形强度调制度也越大,即在相同的光谱损失比例下,波形强度调制度的变化与调制深度相关。

从图 2(d)可以看出,AM 信号强度随偏离距离的增大,呈现出先快速增加,随后逐步变弱的趋势。原因是随着偏离距离的增大,FM-to-AM 效应变得更强。但是,随着偏离距离的增大,光谱损失严重,透射的激光能量下降。在 AM 信号强度峰值处,调制深度变化引起 AM 信号强度变化最大。由于调制深度的变化与光谱宽度的变化相对应,因此可以通过探测 AM 信号强度来间接衡量光谱宽度。

在 2.5 GHz 正弦信号调制下,本文得到不同调制深度与光谱宽度之间的关系如图 3 所示。可以看出,随着调制深度增加,光谱宽度也相应增加。

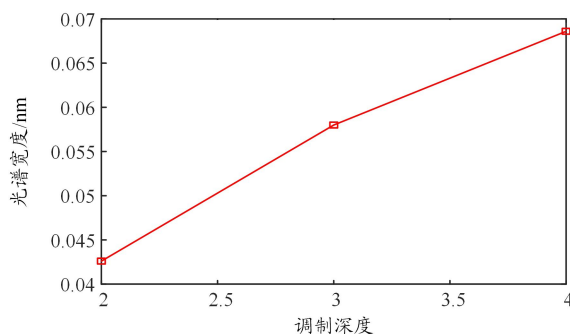


图 3 不同调制深度与光谱宽度之间的关系

在调制深度 $m=3$ 情况下,偏离距离与激发的 AM 信号的频谱变化趋势如图 4 所示,插图为调制光谱处于滤波器中心位置 (0 GHz) 时激发的 AM 信号的频谱。可以看出,随着偏离距离的增加,激发的 AM 信号

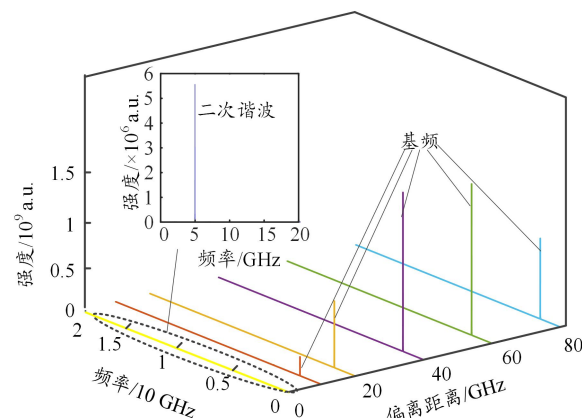


图 4 偏离距离与激发的 AM 信号的频谱关系

韦佳天, 金奇, 黎志刚, 等: 单频调制的相位调制激光在频率损失下激发的幅频效应

频谱发生显著变化; 当调制光谱处于滤波器中心位置时, 光谱同时受到两侧滤波曲线的影响, 导致在对称滤波状态下, 激发的调制信号主要集中在调制频率的二次谐波处, 但由于光谱成分损失较少, 激发出的调制信号强度相对较低; 随着偏离距离的进一步增大, 基频迅速增加, 二次谐波迅速减弱, 且基频成为主导。

对比图 1(b) 与图 4 可知, 在整体频率损失下 FM-to-AM 效应激发的 AM 信号频谱分布与单阶次频率损失激发的 AM 信号频谱分布差异明显, 前者主要频率分布集中在基频和二次谐波上, 而后者主要频率分布集中在基频上。

2 实验结果与分析

为验证仿真结果, 本文搭建了 FM-to-AM 效应激发实验装置如图 5 所示。任意波形发生器(AWG, AWG70001A, Tektronix 公司)输出 2.5 GHz 正弦信号, 通过射频放大器放大后, 注入到相位调制器, 对单频激光进行调制。经过相位调制并展宽的激光的一部分被输入到光谱仪进行测试, 另一部分通过一个近似高斯型的滤波器(BP-1064-02, 光恒公司)滤波后到达高速探测器(20 GHz 带宽, EM169-03, EM4 公司), 再用频谱仪(AV4051H, Ceyear 公司)观察 FM-to-AM 效应的频谱分布情况, 微波功率计(AV2434, Ceyear 公司)测试其射频功率。其中, 归一化的滤波曲线和处于滤波器一侧的相位调制激光光谱如图 6 所示。可以看出, 相位调制光谱的光谱宽度为 0.08 nm。调整 DFB 激光器(DFB-1064-PM-50, InnoLume 公司)的中心波长, 让相位调制激光处于不同的滤波状态, 激发的 AM 信号频谱分布如图 7(a)所示。可以看出, 频谱以基频为主, 随着偏离距离增大, 调制信号强度呈现先增后减趋势, 与仿真结果一致。相位调制激光在滤波器中心位置(波长为 1 063.70 nm 处)时, 未能观察到明显的二次谐波, 原因是该滤波器中心较为平坦, 相位调制光谱谱宽较小, 频率损失少, 激发的 FM-to-AM 效应弱, 信号被噪声淹没。不同波长处激发的 AM 信号的射频功率如图 7(b)所示。可以看出, 滤波器中心波长约

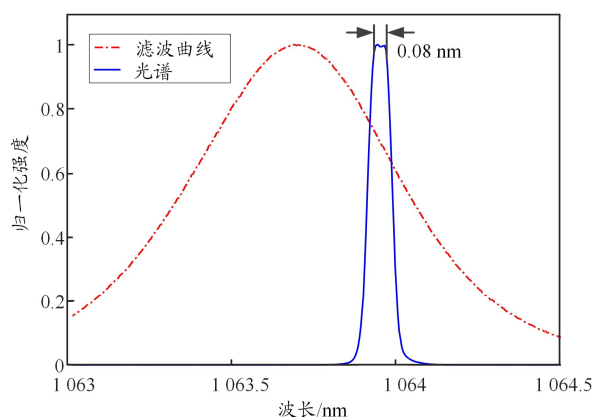
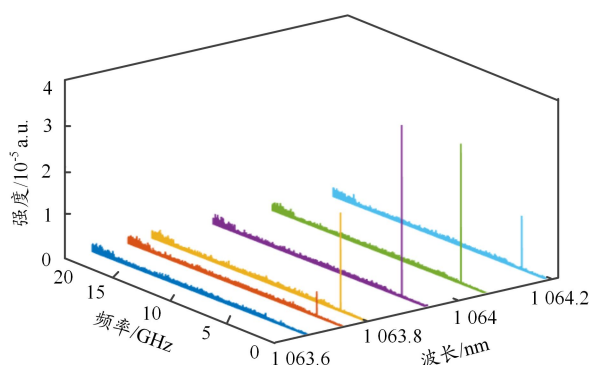
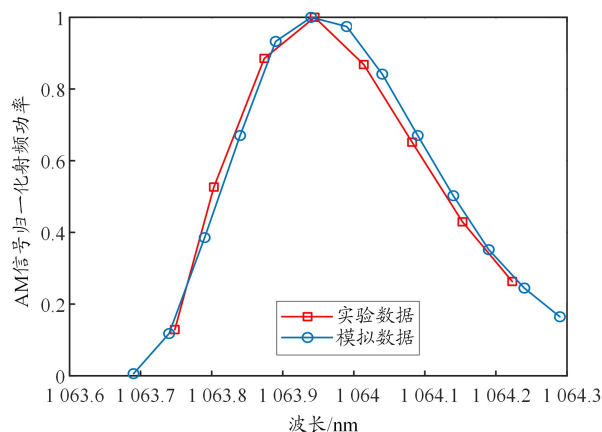


图6 归一化的滤波曲线和相位调制激光光谱



(a) 不同波长处激发的 AM 信号的频谱



(b) 不同波长处激发的 AM 信号的射频功率

图7 滤波后激发的 AM 信号测试情况

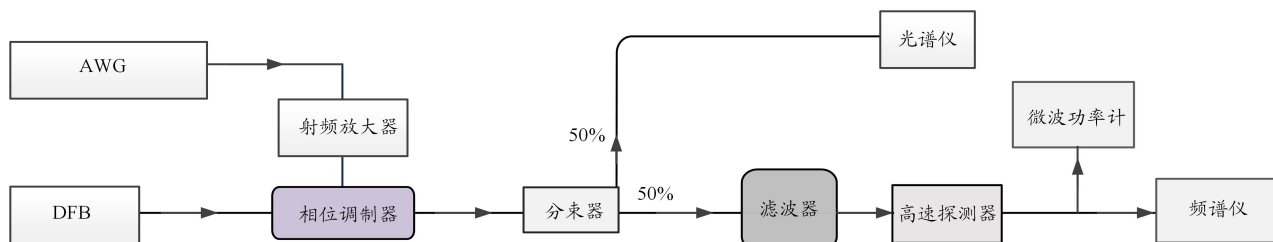


图5 FM-to-AM 效应激发实验装置原理框图

为 1 063.7 nm, 激发的 AM 信号归一化射频功率随着偏离距离增大, 呈现先增后减的趋势。在相同光谱宽度下, 实验测试的 AM 信号的射频功率的变化情况(实验数据)与仿真模拟情况(模拟数据)相吻合。

3 结束语

本文构建了相位调制激光的仿真模型, 针对单频调制的相位调制激光, 从波形强度调制度、AM 信号的强度和频谱分布变化等角度, 仿真研究了其在不同频率损失状态下的 FM-to-AM 效应, 并通过实验验证了仿真结果的准确性。实验结果表明: 当相位调制激光遭遇单阶次频率损失时, 容易激发不同阶次的谐波调制; 而在整体频率损失下, 所激发的 AM 信号频谱则主要以基频和二次谐波调制为主。同时, 本文在分析高斯型滤波曲线时发现随着相位调制激光逐步偏离滤波器中心, 基频调制会迅速占据主导, 二次谐波则迅速下降; 随着相位调制激光进一步偏离滤波器中心位置, 光谱损失频率逐渐增加, 波形强度调制度也随之增加, 导致激发的 AM 信号强度呈现先增后减的趋势。此外, 调制深度的变化对 FM-to-AM 效应的激发具有显著影响。当调制深度增加时, 光谱宽度也相应增加, 即使光谱成分损失比例保持不变, FM-to-AM 效应也会得到增强。本文的研究成果不仅有助于在高功率激光驱动装置中抑制 FM-to-AM 效应, 而且还可能启发基于该效应的新应用。

参考文献:

- [1] PEREZ-MARTIN P, PRENCIPE I, SOBIELLA M, et al. A novel multi-shot target platform for laser-driven laboratory astrophysics experiments [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11(17): 1-9.
- [2] BETTI R, HURRICANE O A. Inertial-confinement fusion with lasers [J]. Nature Physics, 2016, 12(5): 435-448.
- [3] HOCQUET S, PENNINCKX D, BORDENAVE E, et al. FM-to-AM conversion in high-power lasers [J]. Applied Optics, 2008, 47(18): 3338-3349.
- [4] ZHENG W G, WEI X F, ZHU Q H, et al. Laser performance upgrade for precise ICF experiment in SG-III laser facility [J]. Matter and Radiation at Extremes, 2017, 2(5): 243-255.
- [5] HUANG X D, ZHANG X M, WANG J J, et al. The effect of dispersion on FM-AM conversion in high power laser front end [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(3): 1857-1862.
- [6] FAN M Q, TIAN X C, ZHOU D D, et al. Two-dimensional tunable and temperature-insensitive Lyot filter for FM-to-AM compensation [J]. Photonic Sensors, 2020, 11(3): 325-333.
- [7] QIAO Z, WANG X C, FAN W, et al. Suppression of FM-to-AM modulation by polarizing fiber front end for high-power lasers [J]. Applied Optics, 2016, 55(29): 8352-8358.
- [8] LI R, FAN W, JIANG Y, et al. Tunable compensation of GVD-induced FM-AM conversion in the front end of high-power lasers [J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 993-998.
- [9] LI P, WANG W, SU J Q, et al. Analysis on FM-to-AM conversion of SSD beam induced by etalon effect in a high-power laser system [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7(21): 1-6.
- [10] YIN J H, LU L H, CUI Y W, et al. Functional gradient films on aluminum alloy with high absorption efficiencies and damage thresholds for inertial confinement fusion applications [J]. Ceramics International, 2022, 48(13): 19180-19190.
- [11] XU D P, ZHANG R, TIAN X C, et al. Progress on FM-to-AM effect and its suppression in high power laser driver [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 57-68.
- [12] LI L, BO Z, XIA Y W, et al. Correlation of temporal profile and spectrum for small broadband frequency modulation pulse in high power laser facility [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54: 1-6.
- [13] JIANG S B, WANG L J, TANG C, et al. Compensation system for FM-to-AM effects in high-power laser system [Z]. AOPC 2015: Advances in Laser Technology and Applications. 2015: 1-6.
- [14] XU D P, HUANG Z H, WANG J J, et al. A fiber-based polarization - rotation filter utilized to suppress the FM-to-AM effect in a large-scale laser facility [J]. Journal of Optics, 2013, 15(8): 1-4.
- [15] XU D P, WANG J J, LI M Z, et al. Weak etalon effect in wave plates can introduce significant FM-to-AM modulations in complex laser systems [J]. Optics Express, 2010, 18(7): 6621-6627.
- [16] STEVE H, GEOFFREY L, DENIS P. Compensation of frequency modulation to amplitude modulation conversion in frequency conversion systems [J]. Applied Optics, 2009, 48(13): 2515-2521.
- [17] ZHANG Y J, FAN W, WANG J F, et al. Theoretical analysis of frequency modulation-to-amplitude modulation on the final optics and target of the SG II-Up laser facility [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 12(9): 1-15.
- [18] CHANG Z, WANG Y S, SUN Y H, et al. 1.5 kW polarization-maintained Yb-doped amplifier with 13 GHz linewidth by suppressing the self-pulsing and stimulated Brillouin scattering [J]. Applied Optics, 2019, 58(23): 1-6.
- [19] WANG Y S, SUN Y H, PENG W J, et al. 3.25 kW all-fiberized and polarization-maintained Yb-doped amplifier with a 20 GHz linewidth and near-diffraction-limited beam quality [J]. Applied Optics, 2021, 60(21): 1-8.
- [20] CHU Q H, SHU Q, LI F Y, et al. Power scaling of high-power linearly polarized fiber lasers with <10GHz linewidth [J]. Frontiers in Physics, 2023, 21(4): 1-8.