

皮秒拍瓦激光系统宽带激光放大的精确模型和性能分析

李大为 王韬 尹晓蕾 李佳美 王利 张腾 张天雄 崔勇 卢兴强 王丽 张杰 徐光

Accurate model and performance analysis of broadband pulsed amplification in picosecond petawatt laser system

Li Da-Wei Wang Tao Yin Xiao-Lei Li Jia-Mei Wang Li Zhang Teng Zhang Tian-Xiong Cui Yong
Lu Xing-Qiang Wang Li Zhang Jie Xu Guang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 104202 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201830

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201830>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

啁啾脉冲放大激光系统中展宽器色散的解析算法

Analytical algorithm of stretcher dispersion in chirp pulse amplification laser system

物理学报. 2020, 69(2): 024201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191587>

高效率三倍频产生355 nm皮秒激光的实验研究

Efficient third harmonic generation of 355 nm picosecond laser pulse

物理学报. 2019, 68(12): 124205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190513>

基于带电粒子活化法开展的SG II-U皮秒激光质子加速实验研究

Picosecond laser-driven proton acceleration study of SG II-U device based on charged particle activation method

物理学报. 2018, 67(22): 225202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181504>

不同缓冲气体中ArF准分子激光系统放电特性分析

Analysis of ArF excimer laser system discharge characteristics in different buffer gases

物理学报. 2020, 69(17): 174207 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200087>

相对论皮秒激光在低密度等离子体中直接加速的电子束的横向分布特征研究

Transverse distribution of electron beam produced by relativistic picosecond laser in underdense plasma

物理学报. 2019, 68(19): 195203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191106>

考虑钕玻璃放大器增益特性的光谱色散平滑系统性能研究

Performance of smoothing by spectral dispersion with consideration of the gain characteristic of Nd:glass amplifier

物理学报. 2017, 66(12): 124204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.124204>

皮秒拍瓦激光系统宽带激光放大的精确模型和性能分析*

李大为¹⁾⁵⁾ 王韬^{2)†} 尹晓蕾³⁾ 李佳美¹⁾⁵⁾ 王利¹⁾ 张腾¹⁾⁵⁾
张天雄²⁾ 崔勇²⁾ 卢兴强^{1)‡} 王丽⁴⁾ 张杰⁴⁾ 徐光¹⁾

1) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

2) (中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

3) (常州工学院理学院, 常州 213032)

4) (上海市激光技术研究所, 上海 201800)

5) (中国科学院大学, 材料科学与光电研究中心, 北京 100049)

(2020 年 11 月 3 日收到; 2021 年 2 月 22 日收到修改稿)

为准确分析皮秒拍瓦激光系统的频域放大特性, 通过引入钕玻璃实际受激发射截面, 建立了宽频带激光放大的精确模型, 对比分析了常用高斯线型近似的不足. 针对神光 II 高能拍瓦激光系统, 分析了不同线型下, 注入种子的光谱形状、中心波长以及能量稳定性对放大系统的影响. 结果表明: 实际线型会加剧增益窄化效应; 对于 10^7 增益, 光谱将窄化为 3 nm, 系统累积 B 积分增大至 1.7; 窄化效应降低了注入种子中心波长的要求, 增益饱和会使输出能量稳定性提升近一倍. 在上述基础上, 进行了宽频带激光放大的实验研究, 对于注入的 10 nm (FWHM) 超高斯、1054 nm 中心波长、3% (RMS) 稳定性的参量放大种子, 实现了 1900 J、中心波长 1054.2 nm、谱宽 3 nm 的输出, 发能能量稳定性 $< 1.8\%$, 与分析结果一致. 本文结果将对国内基于钕玻璃的高能宽带激光装置建设和改进提供重要的参考依据.

关键词: 皮秒拍瓦激光系统, 宽频带激光, 钕玻璃, 受激发射截面, 增益窄化

PACS: 42.40.My, 42.25.Lc, 42.15.Eq, 42.55.-f

DOI: 10.7498/aps.70.20201830

1 引言

自啁啾脉冲放大技术^[1,2]被提出以来, 高能量、宽频带、高功率的激光放大技术一直是国际研究热点之一^[3-5], 为惯性约束聚变、强场物理等物理实验提供了强有力的探索手段^[6-8]. 在获得单束线拍瓦级高峰值功率激光输出方面, 按压缩脉宽和能量分类, 主要有两类技术路线: 一是脉宽 30 fs 级、能量为数百焦耳, 目标实现 10 PW (10^{15} W)

级输出, 选用增益介质为支持超宽带放大的钛宝石或大口径非线性晶体; 二是脉宽皮秒级、输出能量为数千焦耳的拍瓦激光, 选用增益介质主要为掺杂玻璃. 更进一步地, 国际上很多装置计划采用相干组束实现百拍瓦级宽频带激光输出. 在获得千焦耳级甚至更高能量输出的皮秒拍瓦激光放大方面, 由于钕玻璃具有支持大口径、高增益等优点, 成为首选的增益介质. 然而, 钕玻璃只有 20 nm (full width at half maximum, FWHM) 带宽的受激发射截面 (stimulated emission cross section, SECS),

* 张江国家自主创新示范区专项发展资金重点项目 (批准号: ZJ2020-ZD-006) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: Taowang@siom.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: xingqianglu@siom.ac.cn

这会对皮秒拍瓦激光的放大特性产生影响,从而制约激光装置的性能. 首先, SECS 限制了宽频带激光的输出带宽,进而决定了装置可获得的最短压缩脉冲. 目前,多数千焦耳级高能拍瓦激光装置^[9–13]带宽设计输出约 3 nm,只能保障 0.5—1 ps, PW 级激光输出,为了进一步获得更高的输出功率,在提升激光输出能量的同时,还需要拓展光谱宽度来达到缩短脉宽的目的. 为此,宽频带激光的光谱整形及拓展工作成为了研究热点^[14–17]. 其次, SECS 会影响增益饱和及增益窄化过程,进而影响装置性能. 对于线性啁啾的宽频带激光,放大过程中的频谱特性与时域特性一一对应,增益饱和效应对时间特性的影响会体现在光谱特性上,导致光谱中心波长红移,这会影响与中心波长相关的压缩器的效率. 并且,放大过程光谱增益窄化的同时也会带来脉宽变窄,使得光强变大,除了对激光系统的损伤提出要求外,也会导致系统累积 B 积分随之增大,这些都会限制高能拍瓦激光的能量输出. 为此,深入研究皮秒高能拍瓦激光系统的宽频带放大特性,对分析、判断宽频带激光装置的性能及扩展其应用领域具有重要的意义.

在以钕玻璃为增益介质的高能皮秒拍瓦激光系统中,激光的频谱特性主要体现在光谱宽度、光谱形状和中心波长三个方面,受到增益介质的 SECS、增益窄化和增益饱和效应的综合影响,并会间接地影响系统累积 B 积分和输出稳定性等激光装置性能. 对于宽频带激光放大特性的研究,国内外学者已经开展了广泛的工作:在理论研究方面,Chuang 等^[18]、Ross 等^[19]、卢兴强等^[20]和管相合等^[21]开展了公式推导和理论分析工作,使得激光传输放大模型日益完善,但是,报道中的增益介质 SECS 都采用了高斯型或洛伦兹近似,虽然具有普适性,但与实际情况存在差异;在实验研究方面,常规商业的钕玻璃,如日本 Hoya 生产的 LHG-8、美国 Schott 生产的 LG-770 和 APG-1 已经被应用到 NIF 和 LMJ 等激光装置中. 其中,日本 Osaka 大学对 LHG-8 型钕玻璃激光系统的宽频带放大特性开展了实验研究,桑迪亚国家实验室利用 APG-1 型钕玻璃实际 SECS 开展了光谱整形的实验研究工作,但并未深入研究增益介质 SECS 影响增益窄化及增益饱和过程的物理机制. 不同于国外钕玻璃,国内自主研发的 N_{31} 和 N_{41} 型钕玻璃带宽约为 20 nm (FWHM),目前已经应用在神光系列装置上. 以上这

些钕玻璃受激发射界面约为 $(3.4–3.9) \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 非线性折射率在 $(1.02–1.18) \times 10^{-13} \text{ esu}$, 带宽在 20–22 nm (FWHM), 参数差异会对宽频带激光放大的增益、 B 积分、增益窄化和增益饱和产生影响. 随着国内高能物理实验对宽频带激光的迫切需求,为了向脉冲压缩、宽带倍频^[22]、光谱整形及信噪比提升^[23]等研究提供准确的宽频带激光放大依据,本文针对国内应用,以 N_{31} 钕玻璃为例,分析增益介质的特异性和高斯型 SECS 近似的局限性,深入地研究了 N_{31} 型磷酸盐钕玻璃 SECS 对高能皮秒拍瓦激光系统宽频带放大特性的影响.

本文利用宽频带激光传输放大模型,通过引入实际 N_{31} 型磷酸盐钕玻璃 SECS,与高斯 SECS 近似相对比,建立了更加精确的宽频带激光放大模型,并针对神光 II 高能拍瓦激光系统,对激光放大特性进行了分析. 首先,分析了实际 SECS 和高斯近似 SECS 对系统输出光谱宽度、中心波长、光谱形状和系统累积 B 积分的影响,并对比了两者的区别,发现实际线型导致输出光谱变窄的同时也将降低输出能量,但使得 B 积分增大. 其次,分析了注入种子的光谱形状、中心波长以及能量稳定性对放大系统的影响,发现:与高斯形状注入相比,超高斯光谱形状会加剧窄化效应;实际 SECS 线型下,对于 10^7 的增益,输出光谱将窄化到 3 nm,同时使得 B 积分增大至 1.7;窄化带来的好处使得输入中心波长变化 $\pm 2 \text{ nm}$ 时,输出光谱形状和中心波长保持不变;增益饱和会使能量稳定性从输入的 $\pm 3\%$ 降低到放大后的 $\pm 1.8\%$. 在此基础上,利用神光 II 皮秒拍瓦激光系统开展了实验研究,对于光参量啁啾脉冲放大注入的 10 nm (FWHM) 超高斯形状、1054 nm 中心波长、3% (RMS) 能量稳定性种子,实现了 1900 J、中心波长 1054.2 nm、谱宽 3 nm 的输出,发次间能量稳定性 $< 2\%$,与采用实际 SECS 理论分析结果一致. 本文的研究结果将对国内高能宽频带激光装置建设及性能提升提供必要的参考依据.

2 宽频带激光的放大传输模型

宽频带激光脉冲在能级型增益介质中放大传输时,电场、极化强度和反转粒子数等重要物理量的表征,可以用以下公式^[18]来描述:

$$\frac{\partial E_0(z, t)}{\partial z} = -i \frac{\omega_0}{2\epsilon c} P_0(z, t) + i \frac{\beta''}{2} \frac{\partial^2 E_0(z, t)}{\partial^2 t} - i \frac{\beta_2}{2} |E_0(z, t)|^2 E_0(z, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_0(z, t)}{\partial t} = -\frac{\Delta\omega_a}{2} \left[1 + i \frac{2(\omega_0 - \omega_a)}{\Delta\omega_a} \right] P_0(z, t) + i \frac{K}{2\omega_0} N(z, t) E_0(z, t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial N(z, t)}{\partial t} = -\frac{2^*}{\hbar\omega_a} \sigma_0(\lambda) N(z, t) I(z, t), \quad (3)$$

其中 $E_0(z, t)$, $P_0(z, t)$ 和 $N(z, t)$ 分别表示激光电场强度, 极化强度和增益介质反转粒子数; z 为传输距离; t 为时间变化量; ω_0 和 ω_a 分别为激光及增益介质能级跃迁对应的中心频率; ϵ 和 c 为真空中介电常数和光速; β'' 为激光在增益介质中的群速度色散; $\Delta\omega_a$ 为增益介质的发射线宽. 常数 $K = \epsilon c \sigma_0(\lambda) \Delta\omega_a$, 其中 $\sigma_0(\lambda)$ 为增益介质的 SECS, 2^* 为饱和因子 (取值在 1—2 之间); \hbar 为普朗克常数; $I(z, t)$ 为光强. 在本文中, 暂不考虑光束空间分布对宽频带激光放大的影响, 只考虑时域 (频域) 的一维情况.

一般情况下, 对于线性啁啾下的宽频带激光, 电场可以描述为

$$E_0(0, t) = E_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{\tau} \right)^{2n} \right] \exp \left[-iC \frac{1}{2} \left(\frac{t}{\tau} \right)^2 \right], \quad (4)$$

其中 E_0 为初始脉冲电场峰值强度; n 为高斯脉冲阶数 ($n = 1$ 高斯, $n > 1$ 为超高斯); τ 表示脉冲时间宽度 ($1/e$); C 为宽带激光啁啾系数.

在高能量、宽频带激光放大过程中, B 积分作为制约激光装置能量输出的一个重要物理量, 可以描述为

$$B(t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \int_0^L n_2(z) I(z, t) dz, \quad (5)$$

式中, λ_0 为宽带激光中心波长; L 为增益介质长度; n_2 为增益介质的非线性折射率; $I(z, t)$ 为激光脉冲传输到 z 位置时对应的光强. 本文中考虑的 B 积分为最大 B 积分, 没有考虑不同波长权重对 B 积分的影响^[24].

国内 N_{31} 型磷酸盐钽玻璃的 SECS^[25,26] 与高斯近似下的 SECS (为描述方便, 后文简称实际 SECS 和高斯 SECS) 如图 1 所示. 从图 1 中可以

看出, 虽然两种情况具有相同的 1054 nm 中心波长和 20 nm 带宽 (FWHM), 但是实际 SECS (蓝实线) 为非对称结构, 形状更为尖锐.

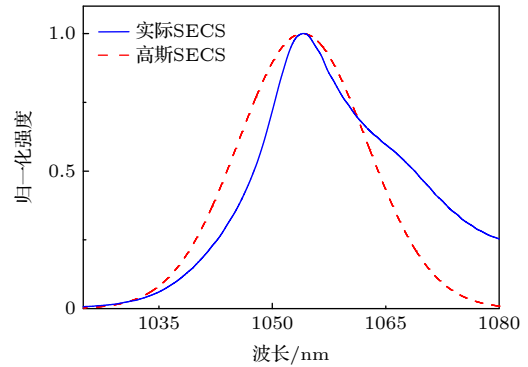


图 1 国内 N_{31} 型磷酸盐钽玻璃实际 SECS 和高斯近似 SECS 对比

Fig. 1. The compared SECSs between real N_{31} glass and Gaussian approximation.

在利用高斯 SECS 分析增益窄化等物理过程时, (1) 式—(4) 式存在解析解, 便于研究宽频带放大过程的物理规律, 但与实际 SECS 相比, 会存在差异. 为此, 首先我们校核了数值程序的准确性. 对于高斯型光谱注入 (图 2(a)) 和高斯 SECS 的情况^[20], 在小信号增益下, 输出光谱宽度可以用公式 $1/\Delta\lambda^2 = \ln G_0/\Delta^2 + 1/\delta\lambda^2$ ($\Delta\lambda$, Δ 和 $\delta\lambda$ 分别为输出谱宽, 高斯 SECS 宽度和注入光谱带宽, G_0 为小信号增益倍数) 来描述, 输出光谱宽度与增益的变化趋势如图 2(b) 中的红点线 (解析解) 和绿短线 (数值解) 所示, 而实际 SECS 下的光谱窄化趋势如图 2(b) 中的蓝实线 (数值解) 所示. 可以看出, 与高斯 SECS 相比, 实际 SECS 会加剧光谱的窄化. 因此, 如果采用高斯 SECS 分析、设计宽频带激光输出特性, 必然会带来偏差, 进而影响实际装置性能评估. 为了更加准确地分析宽频带激光的放大特性, 将针对神光 II 高能拍瓦宽频带激光系统, 深入对比不同 SECS 对宽频带放大光谱特性及装置性能分析结果的影响.

3 理论分析

神光 II 高能皮秒拍瓦宽频带激光系统的钽玻璃放大链路主要由棒放和片放构成^[12], 分别起到高增益和高能量提取的作用. 本文将对这两个位置的宽频带激光放大输出特性进行分析和研究.

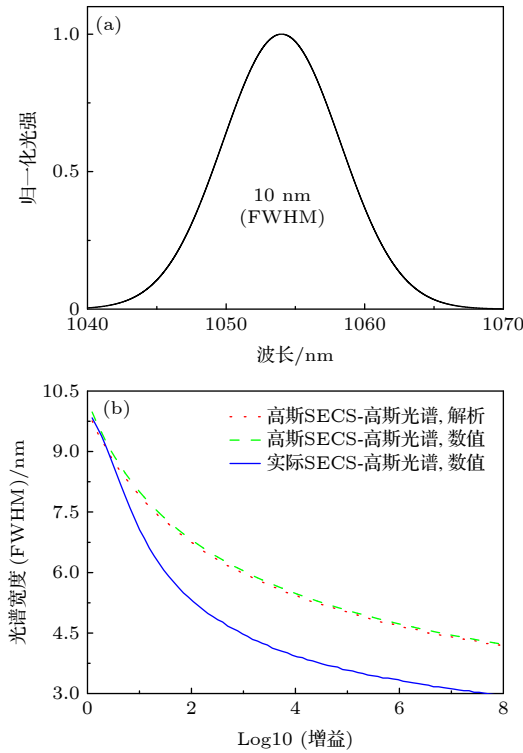


图2 小信号增益下, 10 nm (FWHM) 高斯型光谱注入时, 不同SECS下增益窄化分析结果的对比 (a) 10 nm (FWHM) 高斯光谱注入; (b) 高斯SECS和实际SECS下光谱窄化分析结果对比

Fig. 2. In small-signal-gain regime and input of 10 nm (FWHM) Gaussian spectrum, the compared results of gain narrowing by different SECSs: (a) Input of 10 nm(FWHM) Gaussian spectrum; (b) the results of gain narrowing by Gaussian SECS and real SECS.

激光系统的种子采用光参量啁啾脉冲放大技术, 主要参数为: 中心波长 1054 nm, 带宽 10 nm (FWHM), 脉宽 5 ns, 输出能量 50 mJ ($\text{RMS} < 3\%$), 光谱 (脉冲) 形状为超高斯 ($n = 5$) 分布, 在理论分析中将采用上述主要参数作为宽频带激光放大的注入条件.

针对宽频带激光系统, 利用 (1) 式—(5) 式, 对比研究采用实际 SECS 和高斯 SECS 对宽频带放大光谱特性的影响.

3.1 小信号近似下, 不同 SECS 增益窄化对放大激光谱宽的影响

首先分析了不同 SECS 作用时, 增益窄化效应对输出光谱宽度的影响, 注入光谱如图 3(a) 所示, 输出结果如图 3(b) 所示. 由图 3 可以看出, 当增益为 10^7 时, 宽频带放大输出的光谱宽度分别为 5 nm (对应约 350 fs 压缩极限脉宽) 和 3 nm (对应

约 500 fs 压缩极限脉宽). 实际 SECS 明显地加剧了增益窄化效应.

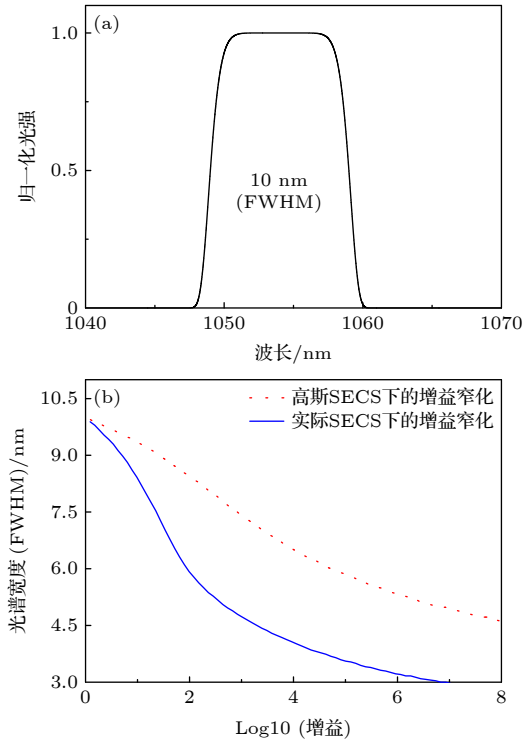


图3 采用不同 SECS 时, 增益窄化对输出光谱宽度影响的对比分析 (a) 10 nm(FWHM), 5 阶超高斯注入光谱; (b) 采用高斯 SECS 和实际 SECS 时, 光谱窄化分析结果对比
Fig. 3. The influence results of gain narrowing to spectrum bandwidth by different SECSs: (a) Input of 10 nm (FWHM), 5-order super-Gaussian spectrum; (b) the compared gain narrowing results between Gaussian SECS and real SECS.

3.2 增益饱和下, 不同 SECS 对放大光谱形状、中心波长、谱宽和能量的影响

在宽频带激光放大过程中, 为了获得高的能量提取效率, 提高输出稳定性, 激光放大需要进入饱和和放大区域, 伴随的增益饱和效应会导致脉冲时间前沿消耗更多的上能级粒子数, 由此对脉冲时间波形和光谱形状同时产生作用, 进而影响宽频带激光的放大特性. 下面, 对比在增益饱和情况下, 不同 SECS 对放大光谱形状、中心波长、谱宽、上能级粒子数变化和输出能量的影响.

当宽频带激光注入能量为 1.2 mJ 时 (放大链路棒放和片放全部开启, 对应系统输出约 2 kJ), 分别分析了棒放输出 (图 4(a) 和图 4(b)) 和片放输出位置 (图 4(c) 和图 4(d)) 的放大光谱形状及上能级粒子数变化情况, 结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出: 1) 棒放输出位置, 从上能级粒子数变化的趋

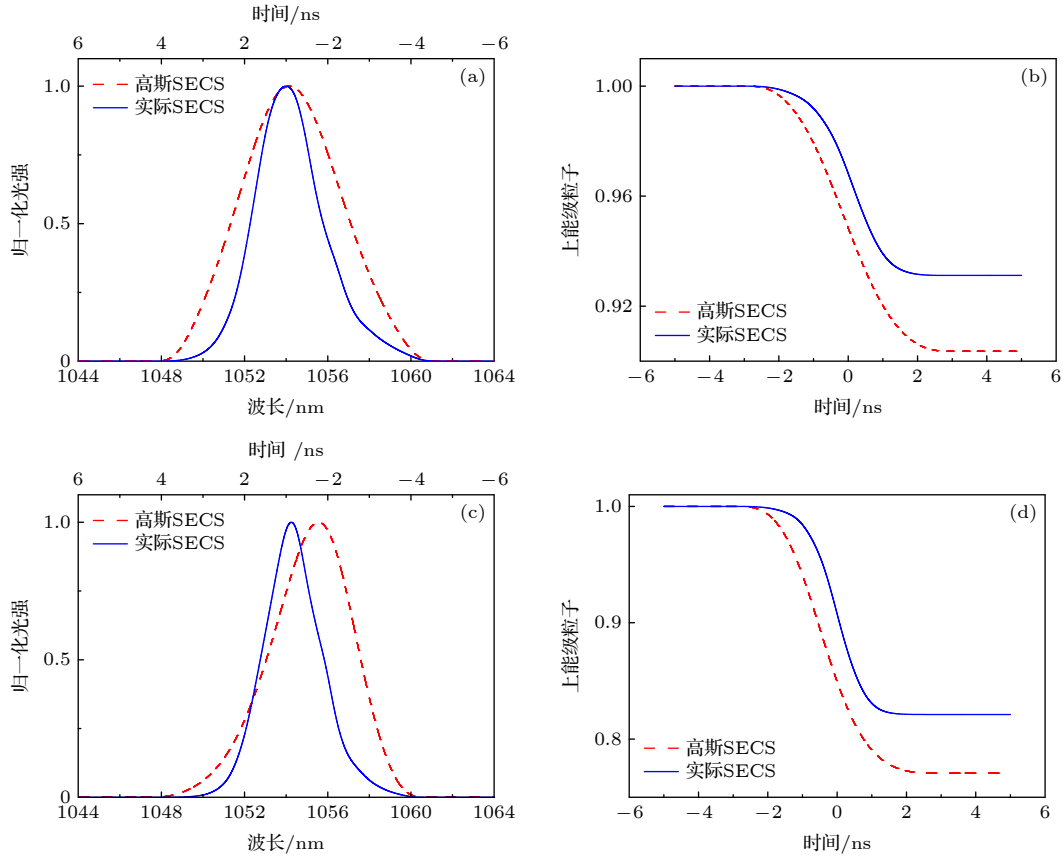


图 4 不同 SECS 下, 棒放 (a), (b) 和片放 (c), (d) 输出光谱形状及上能级粒子变化分析结果的对比

Fig. 4. The compared numerical results of spectrum and upper state population after 70 (a), (b) and 350 (c), (d) amplifier, which influenced by different SECSs.

势来看, 此时饱和效应不明显, 属于高增益放大阶段, 由此带来的光谱中心红移较小; 2) 片放输出位置, 从粒子数变化来看, 饱和效应的影响增强, 对于高斯 SECS, 光谱中心红移至 1055.5 nm, 而对于实际 SECS, 其中心波长为 1054.2 nm, 中心波长并未发生明显红移, 这主要是由实际 SECS(图 1 所示) 非对称结构和饱和效应共同决定的。

从图 4(d) 还可以看出, 在宽带激光系统的输出能力方面, 对于高能拍瓦激光来说, 为了保障压缩脉冲的时间质量, 需要控制系统的累积 B 积分小于 2, 这限制了拍瓦激光输出能量小于 2 kJ。但是, 从上能级粒子数变化趋势来看, 此时, 仍有较大的剩余储能, 这对系统累积 B 积分要求并不苛刻的宽带倍频等应用来说, 系统可支持更大的能量输出。

为了进一步定量比较不同 SECS 在不同位置的激光输出能量、光谱宽度、中心波长和系统累积 B 积分等, 对比了棒放和片放的数据, 结果如表 1 所列。从表 1 可以看出, 在棒放后, 不同 SECS 下的放大输出光谱宽度变化主要由增益窄化导致, 对

于约 2×10^4 (从 1.2 mJ 放大至 24 J) 的增益, 实际 SECS 下光谱窄化至 3.6 nm, 而高斯 SECS 则窄化为 6 nm, 这在图 4(b) 中也有所体现; 对于片放, 实际 SECS 中心波长仍为 1054.2 nm (谱宽 3.1 nm), 而高斯 SECS 中心波长则从 1054 nm 红

表 1 注入 1.2 mJ, 5 ns, 10 nm 宽带种子, 不同 SECS 下, 棒放和片放输出位置主要参数分析结果对比。

Table 1. Input a 1.2 mJ, 5 ns, 10 nm broadband seed, and the main simulation parameters after bar and disk amplifier, which influenced by different SECSs.

| 位置 | 激光参数 | 实际SECS | 高斯SECS |
|----|------------|--------|--------|
| 棒放 | 能量/J | 24.43 | 34.23 |
| | 光谱谱宽/nm | 3.6 | 6 |
| | 中心波长/nm | 1054 | 1054.5 |
| | ΣB | 0.24 | 0.22 |
| 片放 | 能量/J | 1957 | 2369 |
| | 光谱宽度/nm | 3.1 | 4.5 |
| | 中心波长/nm | 1054.2 | 1055.5 |
| | ΣB | 1.7 | 1.57 |

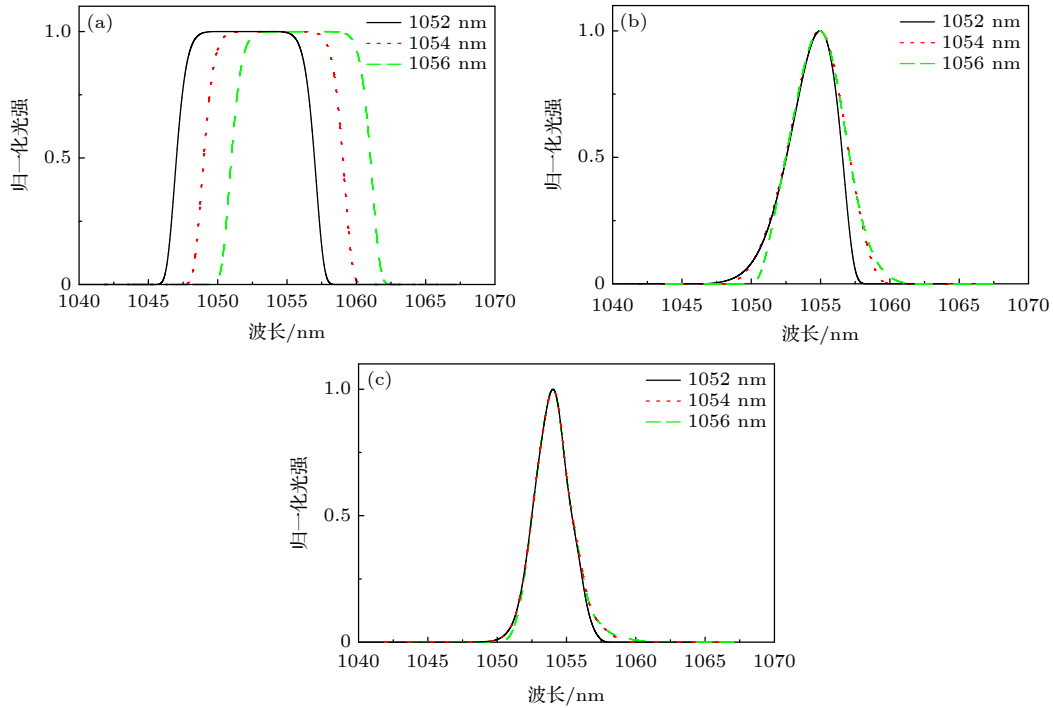


图 5 不同 SECS 下, 注入种子中心波长变化对放大光谱特性的影响, 其他参数与图 4(c) 相同 (a) 不同中心波长的注入光谱; (b) 高斯 SECS 下的放大光谱; (c) 实际 SECS 下的放大光谱

Fig. 5. The influences of different inputted center wavelength spectrums to amplified spectrum by different SECSs: (a) Input spectrums of different center wavelength; the amplified spectrums by Gaussian SECS (b) and real SECS (c).

移到 1055.5 nm (谱宽 4.5 nm). 此外, 对于实际 SECS, 由于光谱窄化严重, 导致相同能量水平下的系统累积 B 积分偏大, 在末级输出达到 1.7 (对应能量 1957 J), 而高斯为 1.57 (对应能量 2369 J). 由此可以看出, 采用高斯 SECS 会高估装置输出能量、输出光谱宽度和增益饱和效应带来的中心波长红移, 低估系统累积 B 积分, 进而导致与实际情况存在差异.

3.3 不同 SECS 下, 注入中心波长偏移和能量抖动对装置性能的影响

首先, 分析了注入宽带种子中心波长分别为 1052 nm (黑实线), 1054 nm (红点线) 和 1056 nm (绿短线), 如图 5(a) 所示, 采用高斯 SECS 和实际 SECS 分析时, 片放位置输出光谱特性的对比结果, 分别如图 5(b) 和图 5(c) 所示, 其他参数与图 4(c) 相同. 从图 5(a) 可以看出: 在 SECS 的有效区域内, 注入种子中心波长的变化并不会严重影响输出光谱特性, 只会导致光谱前后沿略有起伏. 而且, 由于实际 SECS 下的光谱窄化更严重, 使得有效放大的光谱范围更小, 这进一步地降低了对注入光谱中心波长的要求.

其次, 分析了不同 SECS 下, 宽频带放大输出能量抖动与输入能量抖动性的关系. 选取注入能量抖动 (相对 1.2 mJ, $\pm 10\%$) 与输出能量抖动的关系如图 6 所示, 其他参数与图 4(c) 相同. 从图 6 可以看出: 当输入能量抖动在 $\pm 10\%$ 变化时, 输出抖动在 $\pm 6\%$ 以内, 而且高斯 SECS 分析结果稳定性优于实际 SECS 情况, 这主要是由于增益饱和效应带来的好处, 饱和程度越大 (如图 4(d)), 输出稳定性越好; 进一步地, 由于皮秒拍瓦宽频带激光系

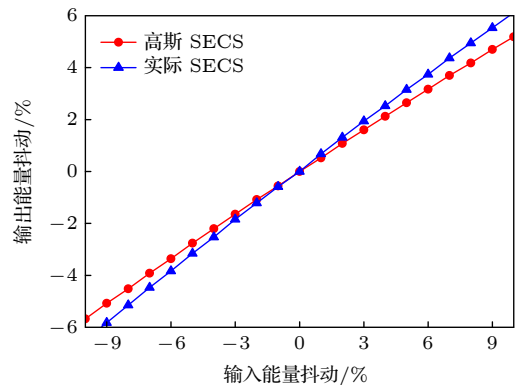


图 6 不同 SECS 下, 宽频带激光放大输出和输入能量抖动性的分析曲线对比

Fig. 6. The simulation relationship between input and output energy jitter by different SECSs.

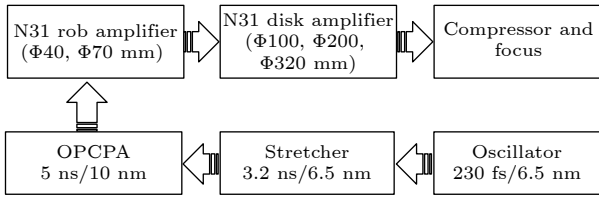


图 7 神光 II 拍瓦激光系统宽频带激光传输放大示意图
Fig. 7. Block diagram of SG II PW laser amplification chain.

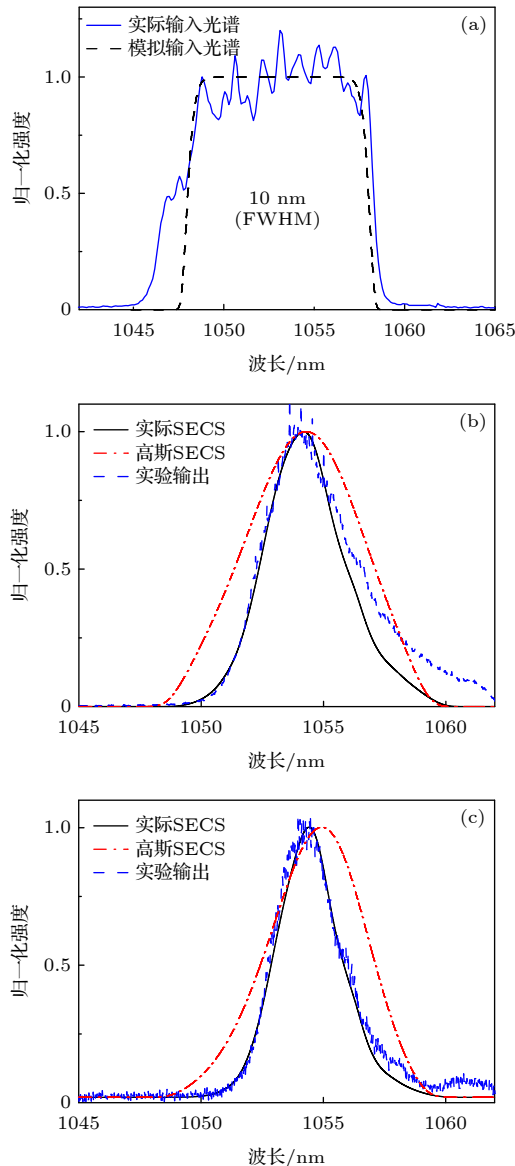


图 8 10 nm(FWHM), 5 阶超高斯光谱注入, 输出 1866 J 时, 棒放和片放位置的实验数据与图 4 理论分析结果的对比 (a) 输入光谱实验及拟合数据; 棒放 (b) 和片放 (c) 位置光谱对比

Fig. 8. The compared results between experiment and simulation results after bar and disk amplifiers: (a) The compared input spectrums of experiment and simulation; the compared spectrum results after rob amplifier (b) and disk amplifier (c).

统要求累积 B 积分小于 2, 直接限制了 2 kJ 输出能量和进入饱和放大区域的程度, 此时输出的能量稳定性只能依靠注入宽带种子源的稳定性来保障, 对于目前预放注入为 3% (RMS) 的稳定性来说, 理论上输出能量稳定性可以控制在 2% (RMS) 以内。

4 实验研究

在上述理论分析基础上, 利用神光 II 高能拍瓦宽频带激光系统开展了实验研究工作, 宽频带激光传输放大示意图如图 7 所示. 实验中钼玻璃棒放注入能量约为 1.2 mJ, 光谱形状如图 8(a) 所示, 为 5 阶超高斯分布, 其中蓝实线为测量结果, 黑短线为拟合结果. 实验过程中, 对钼玻璃片放输出能量和光谱特性进行了测量, 记录了 4 发次大能量实验数据, 并与预估能量进行了对比, 具体数据如表 2 所列. 由表 2 可以看出: 1) 对于输出光谱宽度, 在增益窄化和饱和效应的共同影响下, 谱宽从 10 nm 窄化至 3.1 nm 附近, 这与采用实际 SECS 的分析结果相符 (表 1); 2) 对于输出中心波长, 实验中 kJ 级输出下的中心波长在 1054 nm 附近, 与实际 SECS 的分析结果 (图 4(c)) 一致, 增益饱和和效应带来的红移并不明显; 3) 发次间输出能量偏差最大为 1.8%, 这对于注入能量 3%(RMS) 的抖动来说, 与理论预期的 2% (RMS) 以内一致。

进一步地, 测量了 1866 J 能量下, 棒放和片放输出的光谱形状, 与图 4(a) 和图 4(c) 的理论分析对比, 结果分别如图 8(b) 和 8(c) 所示. 从图 8(b) 和图 8(c) 可以看出, 利用实际 SECS 的理论分析结果和实验数据符合较好, 实际 SECS 可以更为准确地分析宽频带激光放大的光谱特性, 而采用高斯 SECS 在判断输出光谱带宽和中心波长红移等问题时会存在较大差异。

表 2 利用神光 II 高能拍瓦宽频带激光系统得到的实验数据.

Table 2. The experiment results of amplified broadband laser by using SG II PW laser amplification chain.

| 参数 | 发次1 | 发次2 | 发次3 | 发次4 |
|---------|------|------|--------|--------|
| 实际输出/J | 1482 | 1642 | 1711 | 1866 |
| 光谱宽度/nm | 3.1 | 3.2 | 3.0 | 3.0 |
| 中心波长/nm | 1054 | 1054 | 1054.1 | 1054.2 |
| 预估能量/J | 1500 | 1650 | 1700 | 1900 |
| 偏差/% | 1.2 | 0.5 | 0.6 | 1.8 |

5 结 论

本文利用磷酸盐钽玻璃的实际 SECS, 精确分析了高能皮秒拍瓦激光系统中宽频带激光的放大特性. 利用神光 II 高能皮秒拍瓦激光系统, 针对高增益棒放和高能量提取的片放输出位置, 理论分析了不同 SECS 对宽频带激光放大光谱特性及装置输出性能的影响, 发现: 与高斯近似下的 SECS 对比, 实际 SECS 会增强增益窄化效应、降低输出能量、减弱增益饱和效应、增大系统累积 B 积分, 但同时也使得激光系统对输入光谱的中心波长不敏感. 在理论分析的基础上, 利用注入的 10 nm (FWHM) 超高斯形状、1054 nm 中心波长、3% (RMS) 能量稳定性的参量放大种子, 实现了 1900 J、中心波长 1054.2 nm、谱宽 3 nm 的输出, 发次能量稳定性 $< 2\%$, 与理论分析结果一致. 本文阐明了在以钽玻璃为增益介质的高能宽频带激光系统中, 选用实际介质线型的重要性, 弥补了以往采用近似线型在分析和设计中的不足, 这为激光装置的参数精密控制以及工作点的选取提供重要判据. 本文的研究结果将对国内基于磷酸盐钽玻璃的宽频带激光系统的分析和设计提供依据, 并指导类似装置的工程建设.

参考文献

- [1] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **56** 219
- [2] Dubietis A, Jonusauskas G, Piskarskas A 1992 *Opt. Commun.* **88** 437
- [3] Backus S, Durfee III C G, Murnane M M, Kapteyn H C 1998 *Rev. Sci. Instrum.* **69** 1207
- [4] Korzhimanov A V, Gonoskov A A, Khazanov E A, Sergeev A M 2011 *Phys. Usp.* **54** 9
- [5] Danson C N, Haefner C, Bromage J, et al. 2019 *High Power Laser Sci. Eng.* **7** e54
- [6] Mourou G A, Sergeev A M, Korzhimanov A V, Gonoskov A A, Khazanov E A 2011 *Her. Russ. Acad. Sci.* **81** 211
- [7] Clayton C E, Ralph J E, Albert F, et al. 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 105003
- [8] Cai H B, Wu S Z, Wu J F, Chen M, Zhang H, He M Q, Cao L H, Zhou C T, Zhu S P, He X T 2014 *High Power Laser Sci. Eng.* **2** e6
- [9] Perry M D, Shore B W 1996 *Petawatt Laser Report* UCRL-ID-124933
- [10] Danson C N, Brummitt P A, Clarke R J, et al. 2005 *Laser Part. Beams* **23** 87
- [11] Kitagawa Y, Fujita H, Kodama R, et al. 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 281
- [12] Xu G, Wang T, Li Z Y, Dai Y P, Lin Z Q, Gu Y, Zhu J Q 2008 *Rev. Laser Eng. (Suppl.)* 1172
- [13] Zhu J Q, Zhu J, Li X C, et al. 2018 *High Power Laser Sci. Eng.* **6** e55
- [14] Yamakawa K, Guo T, Korn G, Blanc G L, Raksi F, Rose-Petruck C G, Squier J A, Yakovlev V V, Barty C P J 1996 *Proc. SPIE. Int. Soc. Opt. Eng.* **2701** 198
- [15] Li M, Zhang B, Dai Y P, Wang T, Fan Z X, Huang W 2008 *Acta Phys. sin.* **57** 4898 (in Chinese) [李铭, 张彬, 戴亚平, 王韬, 范正修, 黄伟 2008 *物理学报* **57** 4898]
- [16] Zhao L, Sui Z, Zhu Q H, Zhang Y, Zuo Y L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3977 (in Chinese) [赵磊, 隋展, 朱启华, 张颖, 左言磊 2009 *物理学报* **58** 3977]
- [17] Zhang Y, Wei X F, Zhu Q H, Xie X D, Wang F R, Zeng X N, Ying C T 2008 *Acta Optic. Sin.* **28** 1767 (in Chinese) [张颖, 魏晓峰, 朱启华, 谢旭东, 王凤蕊, 曾小明, 应纯同 2008 *光学学报* **28** 1767]
- [18] Chuang Y H, Zheng L, Meyerhofer D D 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 270
- [19] Ross I N, Trentelman M, Danson C N 1997 *Appl. Opt.* **36** 9348
- [20] Lu X Q, Fan D Y, Qian L J 2001 *Acta Optic. Sin.* **22** 1059 (in Chinese) [卢兴强, 范滇元, 钱列加 2001 *光学学报* **22** 1059]
- [21] Guan X H, Zhang Y L, Zhang J Y, Zhu J Q 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 0901005 (in Chinese) [管相合, 张艳丽, 张军勇, 朱健强 2020 *中国激光* **47** 0901005]
- [22] Yang D 2009 *M. S. Thesis* (Mianyang: Chinese Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [杨冬 2009 硕士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [23] Hillier D, Danson C, Duffield S, et al. 2013 *Appl. Opt.* **52** 4258
- [24] Liu L Q, Zhang Y, Wang W Y, Huang W Q, Mo L, Guo D, Jing F 2012 *High Pow. Las. Part. Beam.* **24** 1718 (in Chinese) [刘兰琴, 张颖, 王文义, 黄晚晴, 莫磊, 郭丹, 景峰 2012 *强激光与粒子束* **24** 1718]
- [25] Tang J P, Hu L L, Chen S B, Wang B, Jiang Y S, He D B, Zhang J Z, Li S G, Hu J J, Xu Y C 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 248
- [26] He D B, Kang S, Zhang L Y, Chen L, Ding Y J, Yin Q W, Hu L L 2017 *High Power Laser Sci. Eng.* **5** e1

Accurate model and performance analysis of broadband pulsed amplification in picosecond petawatt laser system^{*}

Li Da-Wei¹⁾⁵⁾ Wang Tao^{2)†} Yin Xiao-Lei³⁾ Li Jia-Mei¹⁾⁵⁾ Wang Li¹⁾
 Zhang Teng¹⁾⁵⁾ Zhang Tian-Xiong²⁾ Cui Yong²⁾ Lu Xing-Qiang^{1)‡}
 Wang Li⁴⁾ Zhang Jie⁴⁾ Xu Guang¹⁾

1) (*Joint Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China*)

3) (*Changzhou Institute of Technology, School of Sciences, Changzhou 213032, China*)

4) (*Shanghai Institute of Laser Technology, Shanghai 201800, China*)

5) (*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 3 November 2020; revised manuscript received 22 February 2021)

Abstract

In order to accurately analyze the broadband pulsed amplification performances of the domestic picosecond petawatt laser system, which uses large aperture N_{31} or N_{41} neodymium glass as gain medium, the broadband pulsed amplification model is improved by introducing the actual stimulated emission cross section (SECS) of neodymium glass. Comparing with the SECS under Gaussian approximation, the amplified pulsed spectrum gain narrowing effect with different SECSs are analyzed. It is found that in the actual SECS of N_{31} neodymium glass laser, the gain-narrowing effect is enhanced, the output energy decreases, gain's saturation effect weakens, system's accumulated B integral augments, but the laser system turns insensitive to the center wavelength simultaneously. Based on the Shengguang II high energy picosecond petawatt laser system which uses N_{31} neodymium glass, the spectral shape, center wavelength, and energy stability of amplified output pulse are simulated by using different SECSs. It is shown that the super-Gaussian spectral shape narrows more greatly than Gaussian spectral shape, the spectrum bandwidth narrows from 10 to about 3 nm with gain larger than 10^7 , and the accumulated B integral increases to 1.7. Additionally, the gain-narrowing effect makes the output spectrum (with 1054 nm of center wavelength) less affected by changing the inputted center wavelength from 1052 to 1056 nm, and the gain saturation effect can improve output energy stability to less than 2% (root mean square (RMS)) with about 3% (RMS) inputted energy stability, which are beneficial to the subsequent pulse compression and physical experiment. Based on the above analysis, a broadband pulsed amplified experiment is conducted by using Shengguang II petawatt laser system, the injected seed is about 10 nm (full width at half maximum (FWHM)) with 5 order super Gaussian shape at 1054-nm center wavelength, and 1.2 mJ with 3% (RMS) energy stability from optical parametric chirped pulse amplification. The amplified pulse with 1900 J at 1054.2 nm (3 nm FWHM) and stability $< 2\%$ (shot to shot) is achieved, and the spectral shapes and bandwidths after bar and disk amplifiers are measured, which are consistent with theoretical analysis results. The results can provide a necessary reference for constructing high energy broadband laser system and improving its performances in the future.

Keywords: high energy broadband laser, picosecond petawatt laser system, neodymium glass, stimulated emission cross section, gain narrowing

PACS: 42.40.My, 42.25.Lc, 42.15.Eq, 42.55.-f

DOI: 10.7498/aps.70.20201830

^{*} Project supported by the Key Projects of Special Development Funds for Zhangjiang National Innovation Demonstration Zone (Grant No. ZJ2020-ZD-006).

[†] Corresponding author. E-mail: Taowang@siom.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: xingqianglu@siom.ac.cn