

## 研究快讯

# 整形种子脉冲克服放大过程中增益窄化效应的研究\*

曹东茂<sup>1)</sup> 魏志义<sup>2)</sup> 滕浩<sup>2)</sup> 夏江帆<sup>2)</sup> 张杰<sup>2)</sup> 侯洵<sup>1)B)</sup>

<sup>1)</sup> 西北大学光学与光子技术研究所, 西安 710069)

<sup>2)</sup> 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

<sup>3)</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点开放实验室, 西安 710069)

(2000 年 3 月 10 日收到)

对飞秒脉冲放大中通过整形种子脉冲光谱补偿增益窄化效应的过程进行了数值模拟, 对比研究了普通种子脉冲放大过程和整形种子脉冲放大过程中的光谱增益特性, 定义了带宽窄化率, 讨论了初始啁啾量对注入种子脉冲及增益窄化效应的影响. 计算结果表明, 借助整形种子光谱可理想地补偿啁啾脉冲放大中的光谱窄化效应.

PACC: 4280W D660 A260F

## 1 引 言

近年来由于飞秒激光啁啾脉冲放大技术<sup>[1]</sup> (chirped pulse amplification, CPA) 的迅速发展及宽带增益优质激光介质的不断出现, 使台面超短激光脉冲的峰值功率在短短几年内提高了 6—7 个数量级, 从而为科学家探索自然科学提供了一种强有力的新型实验手段, 并带动了物理学许多新领域的形成和发展, 如实验室天体物理、惯性约束核聚变、X 射线激光、加速器物理、强场物理等<sup>[2]</sup>. 目前采用这一技术, 人们在实验室利用钛宝石增益介质产生的激光峰值功率已超过了 100 TW<sup>[3]</sup>, 而将钛宝石激光的超短脉冲特性与传统钕玻璃激光的高能量特性相结合, 则可达到 PW 以至更高的峰值功率<sup>[4]</sup>. 通常这种高功率的获得最直接的办法是增加抽运能量, 但是, 由于这种方法需要较高的成本, 因此通过有效缩短放大激光的脉宽, 不仅对许多实验室来讲是更为经济有效的手段, 而且还具有先进的超快特性. 然而, 脉宽很短的飞秒脉冲同时还伴随着极宽的带宽, 这种宽带脉冲在放大过程中一方面存在着复杂的色散延时, 另一方面也存在着更加严重的增益窄化效应, 从而使得放大脉宽小于 30 fs 的激光脉冲成为具有挑战性的课题.

针对飞秒放大过程中的增益窄化效应, Barty 等

于 1994 年通过在再生放大腔中加入薄膜标准具 (thin-film polarizer etalon, TFPE) 等元件整形再生放大脉冲的技术手段<sup>[5]</sup>, 首次报道了由于补偿光谱窄化效应而获得的短于 20 fs 的钛宝石激光放大结果<sup>[6]</sup>. Salin 等则通过蓝移种子脉冲而使红端得到较多放大而补偿增益窄化<sup>[7]</sup>. 但是前者不仅增加了再生放大腔内的损耗, 而且调节复杂, 不能用于多通放大; 后者除窄化效应有限外, 蓝移也降低了种子脉冲的平均功率. 本文在我们所提出的通过直接整形振荡器种子脉冲光谱的基础上, 通过对钛宝石激光增益特性的数值模拟计算, 对比研究了普通种子脉冲放大过程和整形种子脉冲放大过程中的光谱窄化过程, 计算结果与实验完全一致<sup>[8]</sup>, 表明腔内整形种子光谱是一种可理想补偿啁啾脉冲放大中光谱窄化效应的新方案.

## 2 种子脉冲的整形拟合

假设入射种子脉冲为高斯型啁啾脉冲<sup>[9]</sup>:

$$E_{in}(t) = E_0 \exp\left(-2 \frac{t^2}{T^2}\right) \exp\left[-i \frac{\beta}{2} \left(\frac{t}{T}\right)^2\right] \cdot \exp(i\omega_0 t), \quad (1)$$

其中  $T$  为脉冲的半高宽度,  $\beta$  为描述线性啁啾量的参数,  $\omega_0$  为入射脉冲的中心频率. 对 (1) 式进行傅里叶变化, 则其在频域的分布为

\* 国家自然科学基金 (批准号: 19854001) 及国家 863 惯性约束聚变领域基金资助的课题.

$$E_{in}(\omega) = \frac{E_0}{2\pi} F\left[\exp\left[\left(-2 - \frac{i\beta}{2}\right)\left(\frac{t}{T}\right)^2\right]\right]$$

$$\otimes F(\exp(i\omega_0 t)) = \frac{\sqrt{2\pi} T \exp\left[\frac{-T^2(\omega - \omega_0)^2}{2(4 + \beta i)}\right]}{\sqrt{4 + \beta i}}, \quad (2)$$

由此可得入射脉冲的光谱强度为

$$I_{in}(\omega) = \frac{\pi \epsilon_0 c n T^2 \exp\left[-\frac{8T^2(\omega - \omega_0)^2}{2(16 + \beta^2)}\right]}{\sqrt{16 + \beta^2}}, \quad (3)$$

取脉冲的半宽度  $T = 13$  fs, 中心频率  $\omega_0 = 2.36 \times 10^{15}$  Hz (对应波长  $\lambda_0 = 800$  nm), 可以算得在不同啁啾下的对应光谱曲线如图 1 所示. 从图中可看出, 随着  $\beta$  值即脉冲啁啾量的增加, 脉冲的频谱呈展宽趋势.

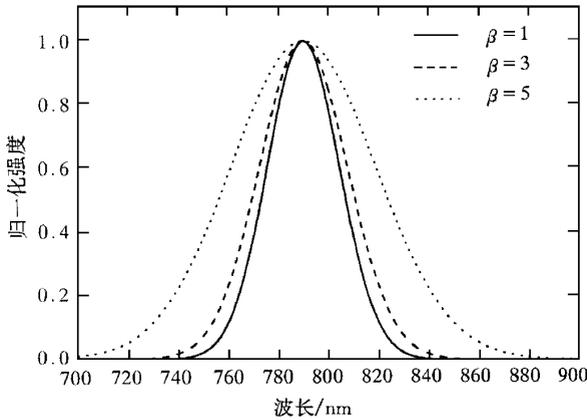


图 1 不同啁啾量对输入脉冲光谱的影响

在此引入振幅依赖于频率  $\omega$  和控制调制深度参数  $\zeta$  的种子脉冲调制函数  $T(\zeta, \omega)$ :

$$T(\zeta, \omega) = \zeta - 0.999 \cos[15.708(\chi + 0.01)], \quad (4)$$

式中  $\chi = \pi c / 50 \omega$ , 由此可以算得在 700 nm 到 900 nm 波长范围内, 调制深度参数  $\zeta$  取不同值时的调制曲线如图 2 所示.

同样考虑脉宽 13 fs、光谱宽度 120 nm 的种子脉冲, 其经过调制后的光谱分布可表示为

$$I'_{in}(\omega) = I_{in}(\omega) T(\zeta, \omega). \quad (5)$$

由此可得在调制深度参数  $\zeta = 1.05$  时所获得的种子脉冲调制谱如图 3 所示, 可以看出通过调制后的脉冲光谱已经发生了变化, 与实验结果基本一致.

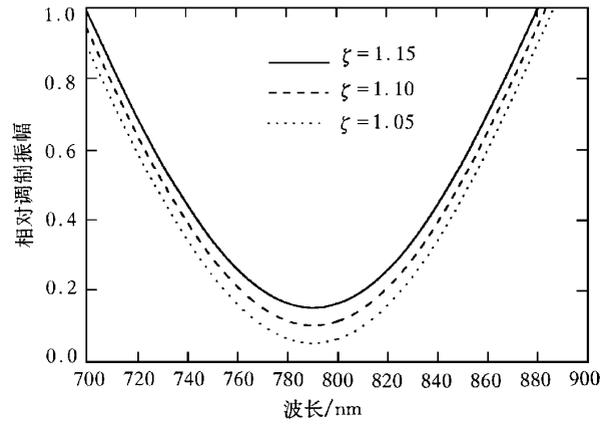


图 2 不同参数下的调制曲线

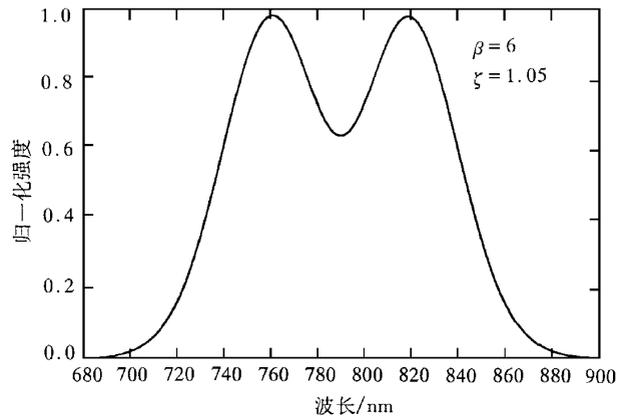


图 3 调制深度参数  $\zeta = 1.05$  时的种子脉冲调制光谱

### 3 增益窄化效应及补偿

#### 3.1 一般放大器中的增益窄化效应

假设忽略增益饱和的影响, 同时展宽器和压缩器具有宽带透射特性, 其只是使不同的频谱成分产生一个相对的延迟, 即对脉冲附加一个相位  $\phi_{str}$  或  $\phi_{com}$ , 因此可认为并不影响脉冲的光谱成分, 这样激光脉冲放大后的光谱可表示为

$$I_{out}(\omega) = I_{in}(\omega) G(\omega)^n, \quad (6)$$

式中  $G(\omega) = e^{g l}$  为依赖于频率的增益,  $l$  为钛宝石的增益长度,  $n$  为放大次数,  $g$  为增益系数, 对于均匀加宽介质:

$$g = g_H(\omega_0) \cdot \frac{1}{1 + 4(\omega - \omega_0)^2 / \Delta\omega_H^2} \quad (7)$$

其中  $g_H(\omega_0)$  为中心频率  $\omega_0$  处的小信号增益, 在此

取  $g_H(\omega_0) = 1.75$ . 代入钛宝石激光的有关参数, 不难得到如图 4 所示的  $G(\omega)$  随频率  $\omega$  变化的关系曲线. 相应的种子光脉冲在放大中的光谱演化过程及情况如图 5 所示.

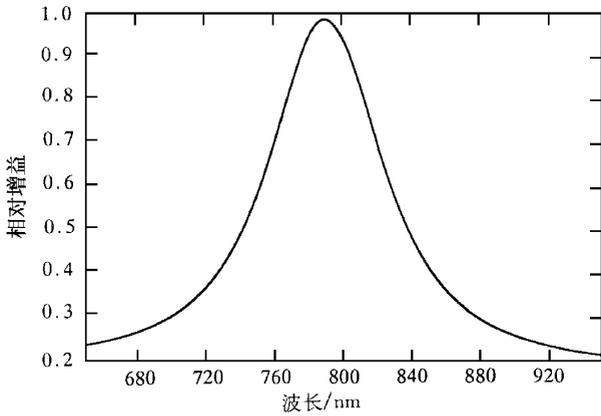


图 4 增益  $G(\omega)$  随波长的变化关系

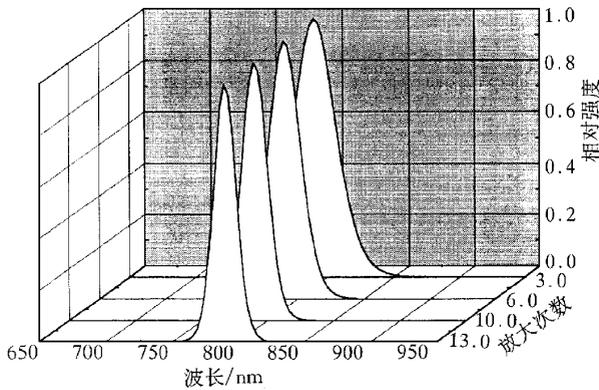


图 5 啁啾种子脉冲在放大中的光谱演化过程

从图中可以看出, 由于增益  $G(\omega)$  随频率变化呈钟形分布, 只有靠近中心频率处的频率才能获得较大的增益. 随着放大次数的增加, 脉冲的光谱宽度迅速减小, 在此定义脉冲带宽窄化率  $\sigma = \Delta\omega_{in} / \Delta\omega_{out}$ , 其中  $\Delta\omega_{in}$  为入射种子光谱宽度,  $\Delta\omega_{out}$  为放大后出射脉冲的光谱宽度, 同样取中心波长  $\lambda_0 = 800$  nm, 对 13 fs、入射带宽  $\Delta\omega_{in} = 2.4 \times 10^{14}$  Hz 相应的  $\Delta\lambda_{in} \approx 80$  nm) 的脉冲, 算得经 13 次放大后的带宽  $\Delta\omega_{out} = 6 \times 10^3$  Hz (相应  $\Delta\lambda_{out} \approx 20$  nm), 对应窄化率  $\sigma = 4$ .

### 3.2 种子脉冲整形后的放大光谱特性

由于放大中各光谱成分的增益不均匀是造成光谱窄化效应的主要原因, 因此通过整形种子脉冲对放大过程中能量增长较快的成分进行适当的“抑

制”, 则可以达到补偿增益窄化效应的目的. 由于放大后的带宽决定着最后压缩脉冲可达到的脉冲宽度, 这对获得高强度超短脉冲来说, 是一条行之有效的手段. 考虑整形后的种子脉冲, 其放大后的能量分布可表示为

$$I_{out}(\omega) = I'_{in}(\omega)G(\omega)^n \\ = I_{in}(\omega)G(\omega)^n T(\zeta, \omega). \quad (7)$$

同样计算脉宽 13 fs、但整形后光谱宽度为 120 nm 的种子脉冲  $I'_{in}(\omega)$  (如图 3 所示), 其经过 13 次放大 (含一八通预放大和一五通主放大) 后, 可以得到脉冲光谱的演化情况如图 6 所示. 从图中可看出, 由于不同频率的激光脉冲在谐振腔内经历不同的调

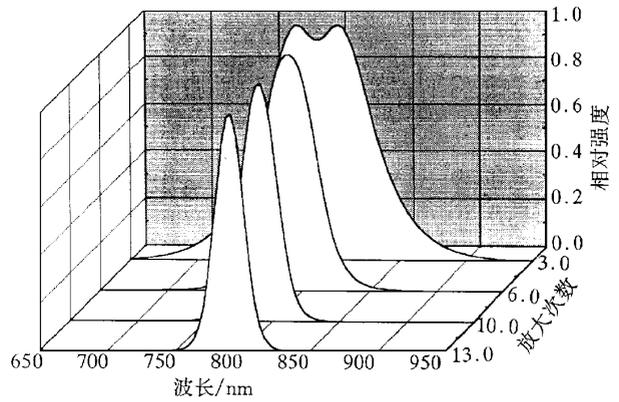


图 6 调制整形后的种子脉冲在放大中的光谱演化过程

制, 因此合理选取调制深度参数  $\zeta$ , 则可以有效的抑制放大过程中中心频率处能量的较快增长, 通过将增益向脉冲两边的转移, 从而实现对增益窄化效应的有效控制, 同时相应放大脉冲的脉宽窄化比为  $\sigma = 1.2$  (相应  $\Delta\lambda_{out} = 48$  nm), 远低于一般放大过程中的带宽窄化程度 (如图 7 所示).

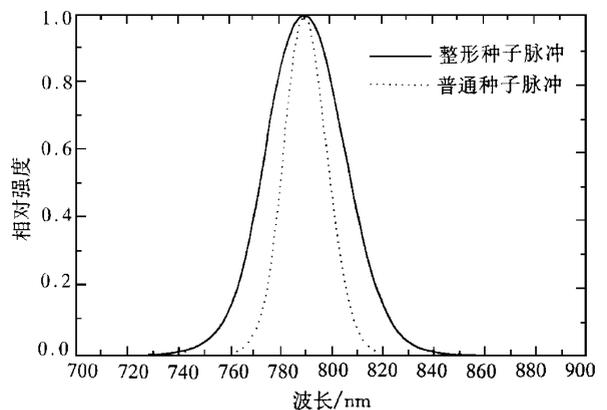


图 7 整形种子脉冲前(虚线)后(点线)放大脉冲带宽的比较

## 4 结 论

在分析讨论飞秒激光器中整形脉冲光谱的基础上,通过数值计算模拟了普通脉冲及该整形脉冲作种子的啁啾脉冲放大过程,研究了两种情况下放大脉冲的光谱演化及光谱窄化特性,理论计算表明,采用光谱优化整形后的飞秒脉冲作种子,可以理想地克服啁啾脉冲放大中的光谱窄化效应,其结果与已报道的实验相吻合,是实现啁啾脉冲宽带放大,从而产生极短脉宽放大结果的新途径.

- [ 1 ] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.*, **56**( 1985 ), 185.
- [ 2 ] Zhang Jie, Wu Li, **26**( 1997 ) 643( in Chinese )
- [ 3 ] K. Yamakawa *et al.*, *Opt. Lett.* **23**( 1998 ), 1468.
- [ 4 ] M. D. Perry *et al.*, *Opt. Lett.* **24**( 1999 ), 160.
- [ 5 ] C. P. J. Barty *et al.*, *Opt. Lett.* **19**( 1994 ), 1442.
- [ 6 ] C. P. J. Barty *et al.*, *Opt. Lett.* **21**( 1996 ), 668.
- [ 7 ] J. P. Chambaret *et al.*, *Opt. Lett.* **21**( 1996 ), 1921.
- [ 8 ] Wei Zhiyi *et al.*, *High Power Laser and Particle Beams.* **11**( 1999 ), 538( in Chinese )]
- [ 9 ] Li Chuandong *et al.*, *Acta Optica Sinica*, **16**( 1996 ), 290( in Chinese )
- [ 10 ] Zhang Ruobing *et al.*, *Acta Physica Sinica* **44**( 1995 ), 1222( in Chinese )

## CONTROL THE GAIN-NARROWING IN FEMTOSECOND Ti SAPPHIRE AMPLIFIER BY SHAPING OSCILLATOR PULSE

CAO DONG-MAO<sup>a)</sup> WEI ZHI-YI<sup>b)</sup> TENG HAO<sup>b)</sup> XIA JIANG-FAN<sup>b)</sup> ZHANG JIE<sup>b)</sup> HOU XUN<sup>a,b)</sup>

<sup>a)</sup> ( *Institute of Photonics and Photon Technology, North West University, Xi'an 710069* )

<sup>b)</sup> ( *Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080* )

<sup>c)</sup> ( *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068* )

( Received 10 March 2000 )

### ABSTRACT

Numeric simulation of compensating gain-narrowing in femtosecond Ti:sapphire amplifier by shaping seed pulse is made in this paper, the gain spectral narrowing process are compared for multipass amplifiers with general and shaping seeding pulses injection respectively. On this base we define the band width narrowing ratio, the simulation results show the gain-narrowing effect can be well overcome by shaping laser pulses from oscillator.

PACC : 4280W ; 0660 ; 4260F