

高功率固体激光系统小型化相关技术研究

李传东 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

TN248.1

A 摘要 从设计的角度研究了光泵系统的耦合效率; 用国产 LD 实现了 Nd:YVO₄ 激光器的高重复频率调 Q 和单纵模预激光调 Q; 发展了稳态锁模理论, 并在国内首次报导了连续锁模 DPL 的实验结果, 锁模脉冲宽度为 43 ps; 对在较低泵浦功率下观察到的振幅调制现象提出新的物理解释。实现了钛宝石激光器的连续自锁模运转, 锁模脉宽 24.6 fs, 并获得了 FWHM 为 53 nm 的稳定锁模光谱, 观察到了由于热效应而造成的高阶孤子的时间演变。从理论上模拟了二介质激光放大器的工作特性; 理论分析了 CPA 中的若干问题, 得到了 CPA 中最短脉宽的解析表达式。研究了增益饱和在啁啾脉冲放大中的影响; 提出了利用非共振放大以弥补光谱畸变的技术设想。

关键词: 固体激光器; 半导体泵浦激光器; 啁啾脉冲放大

小型化是激光科学永恒的研究热点, 近年来一系列新技术、新思路的出现与完善, 使激光系统的小型化正在以前所未有的速度发展。这一发展成果体现在单一激光器上就是激光二极管泵浦的固体激光器(DPL)的飞速发展, 其高效、紧凑、长寿命和全固化等优点, 在军事、工业、医学和科研等方面的应用前景异常广阔, 直接导致了固体激光技术新一轮的全面进步; 在大型激光系统方面, 啁啾脉冲放大(CPA)技术的提出和发展戏剧性地降低了高功率激光系统的规模, 使得只有传统巨型激光系统才能达到的功率水平在实验台上就可以实现, 从而为此类系统的实际应用最终扫除了障碍。而基于 CPA 技术所获得的超短高功率光脉冲更是开辟了以强场物理为代表的全新的研究领域。

本文介绍了我们在激光系统小型化若干技术方面所进行的理论和实验研究。

1 光泵系统的耦合效率

研究光泵系统耦合效率的出发点是空间相关的四能级速率方程, 由此可以得到描述泵浦光与腔模激光场重叠程度的匹配函数的计算方程,^[1]从该空间匹配函数出发, 我们可以从设计的角度对泵浦光的发散角、焦点位置等因素对激光系统效率的影响等问题进行讨论。

收稿日期: 1996年8月1日

我们从数值计算中发现,在旁轴近似下,匹配函数的最大值随泵浦光发散角的增大而增大,泵浦阈值功率也随之相应降低,但是由于像散的限制, θ_p 的增大是有限的,利用数值计算可以得到适用于国产 LD 泵浦的发散角的参考值。至于另一个影响输出激光斜效率的参数一二阶匹配函数,数值计算表明,使一阶匹配函数达到最大的优化方案,也基本上使其达到最佳值。

对侧泵直线腔的模式匹配问题,我们可以套用端泵系统的分析方法,仍然通过对匹配函数的数值计算,找到最优化的设计方案。

2 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 激光器

我们以国产 LD 作为泵浦源,对 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 激光器进行了一系列的实验研究,包括准连续、连续、调 Q、单纵模预激光调 Q 等。

在准连续运转条件下,我们观察到了高阶横模在起振时间上的差异,原因是由于泵浦光在介质中没有很好地圆化,腔内激光模形成后造成反转粒子数在横向上的空间烧空。对 Nd:YVO₄ 晶体,它的受激发射截面较大,未被消耗掉的反转粒子数容易形成新的激光横模输出,但后继的弛豫振荡在时间上有一个延迟,延迟时间与泵浦光的强度及其在增益介质内的场分布有关。这个实验现象有助于判断腔模与泵浦光的匹配程度,使我们有可能利用示波器来监测激光输出的横模情况。在连续运转的条件下,我们获得了 23.6% 的光—光转换效率,相应的斜效率为 28.8%。

随后我们进行了 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 激光器的高重复频率调 Q 的实验,得到了 2.4% 的光—光转换效率,斜效率为 12.5%,脉冲宽度 60 ns。

在单纵模激光调 Q 中,为了克服泵浦光的不均匀,实现激光输出的基横模运转,我们选用了曲率半径为 1.5 m 的腔片作为输出镜,以提高腔模尺寸,利用软光阑完成选横模。这种实验布置,使我们即使在较高的超阈度的情况下仍然能够获得良好的基横模激光输出,在 209 mW 泵浦功率时的平均输出功率为 4 mW,斜效率 10%,峰值功率 50W。这些结果都优于相同条件下在 Nd:YAG 激光器上得到的结果。

3 半导体泵浦连续锁模激光器

描述锁模脉宽的理论基础是 A-S 稳态锁模理论^[1],然而半导体泵浦的锁模固体激光器 (ML-DPL) 却对这一理论提出了挑战,ML-DPL 上所实现的锁模脉冲宽度远窄于 A-S 理论的预言。造成这种差距的原因在于 A-S 理论只是单纯地考虑了振幅或位相调制的作用,然而对于 ML-DPL,其优良的单色性克服了灯泵激光器的热不稳定性,从而使自相位调制 (SPM) 的作用突出出来。因此为了描述此时激光器的锁模行为,就必须同时考虑到 SPM 的作用。采用自解解的方法,我们可以得到如下的锁模脉宽表达式:

$$\alpha_1 = \frac{-2\delta_{\text{SPM}} + \sqrt{4\delta_{\text{SPM}}^2 + 16g_0T_2^2(\delta_L^2\pi^2\Delta\nu_0^2 + \frac{\delta_{\text{SPM}}^2}{4g_0T_2^2})}}{8g_0T_2^2} \quad (1)$$

这里 δ_{SPM} 为自位相调制量,其它各参数的意义见文献^[2]。从上式可以知道,SPM 越大,锁模激光的宽度越窄,但这种变窄的趋势受到锁模稳定性的限制。

在实验的设计中,我们采用了常用的四镜折叠腔,同时为了提高系统的稳定性,将注意力放在增大激光腔的稳定区上。利用矩阵光学的理论对腔进行辅助设计,可以获得 δ 为 40 mm 的稳定区,激光器的阈值功率为 42 mW。

在实验中,我们首先将激光器工作于准连续状态,通过观察弛豫振荡的波形来调整锁模状态,在泵浦功率为 120 mW 时,我们得到了 7 mW 的输出功率,锁模脉冲宽度为 43 ps。值得一提的是,本实验中所用的激光器都是国产 LD,从而为国内这类器件的发展提供了有价值的参考。

另外,我们还在较低泵浦功率下观察到了弛豫振荡的振幅调制现象,这种调制现象是不能用 SPM 来解释的,因为腔内光场很低。我们认为造成这种弱场调制现象的原因是驻波光栅导致的光波耦合,降低了端泵激光器的噪声线宽,从而为腔内光场的拍频提供了一个可以维持的环境。

4 自锁模钛宝石激光器

自锁模钛宝石激光器是小型化 TW 级激光系统的最普遍的振荡器,我们常采用四镜折叠腔实现了其连续自锁模运转,锁模脉宽 24.6 fs,光谱宽度 34 nm,时间—带宽乘积为 1.15 倍变换极限。实验中还实现了 FWHM 为 53 nm 的稳定锁模光谱,对应变换极限脉宽为 15.7 fs,但由于自相关仪的色散限制无法观测到相应的脉冲宽度。

实验中观察到了由于热效应而造成的高阶孤子的时间演变。

5 二介质激光放大器工作特性的数值模拟

二介质激光放大器是为了克服单一介质放大器中存在着的比较严重的“增益窄化”现象而提出的,它利用多种介质增益光谱的适当叠加来提供更宽的放大谱。

我们从简明的物理模型出发,从理论上模拟了二介质激光放大器的工作特性。数值计算表明,如果设计不当,二介质放大器在可发提供更窄脉冲的同时,将显著降低压缩脉冲的信噪比,这时对于用 TW 激光系统进行的物理实验来说是必须克服的。改善这种善需要从光谱整形的角度入手,可以通过调整各介质的放大比率、避免可能存在的光谱光阑的存在而使其有所改善。另一个非常有效的手段是在放大过程中引入光谱整形的技术,对光谱进行更加直接的干预而得到良好的光谱形状,从而为高对比度压缩脉冲的获得提供必要的条件。

6 啁啾脉冲放大中的理论分析

啁啾脉冲放大是目前实现 3T 系统的唯一技术手段,但同时也存在着许多有待进一步研究的问题。

6.1 啁啾脉冲放大中的脉宽限制

对一般 CPA 系统,脉冲展宽经 m 与描述啁啾量的参数 b 之间有一个明确而简单的关系式:

$$b = m \quad (2)$$

Table 1. Comparison between experiments and theoretical

ref.	initial pulse	stretched pulse	amplified pulse	recompressed pulse	theoretical predication
3	270 fs	50 ps, 1nJ	3.5 mJ	305 fs	305 fs
4	90 fs	260 ps, 73 pJ	5 mJ	105 fs	104.4 fs
5	30 fs, 3nJ	372 ps	700 mJ	55±3 fs	58 fs
6	100 fs, 1 nJ	200 ps	400 mJ	160 fs	157 fs

利用这个关系式在小信号和窄线宽近似下,我们可以得到如下关系式:

$$r^2(z) = \frac{[2\tau_0^2 + K(z) + b_0 D(z)]^2 + [D(z) - b_0 K(z)]^2}{4\tau_0^2 + 2K(z) + 2b_0^2 K(z)} \quad (3)$$

$$b(z) = \frac{2\tau_0^2 b_0 + (1 + b_0^2 D(z))}{2\tau_0^2 + K(z) + b_0^2 K(z)} \quad (4)$$

$$D(z) = 2\beta^2 z \quad (5)$$

以上各式中参数的物理意义可以参见作者的其它文章。再利用 b 和 m 的关系式就可以得到最小压缩脉宽。表一是我们的理论与一些实验的比较,由其可见,理论与实验符合得相当好。

6.2 增益饱和在 CPA 中的影响

由于啁啾脉冲频率在时间上的分布,增益饱和的存在使放大脉冲的光谱发生畸变,这种畸变类似于在增益饱和条件下激光脉冲在时域上所产生的变化。同样,这种光谱上的畸变也使得压缩脉冲的信噪比大为下降。为了克服这种情况,我们设想利用非共振放大来对光谱进行整形,所谓非共振放大,就是使入射脉冲的中心频率与介质的增益中心频率有一个差异,利用这个差异来弥补增益在时间上的差异给脉冲造成的时域和频域的畸变,获得良好的放大光谱形状,以提高压缩脉冲的信噪比。数值计算证明该方案可以用来修正光谱畸变以提高放大压缩后的信噪比。

参 考 文 献

- [1] T. Y. Fan, et al., Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser, IEEE J. Q. E., 1982, 23, 605
- [2] D. J. Kuizenga, et al., Development of short pulse source for ICF, IEEE J. Q. E., 1970, 6, 694
- [3] M. Pessot, et al., Chirped pulse amplification of 300 fs pulses in an Alexandrite regenerative amplifier, IEEE J. Q. E., 1989, 25, 61
- [4] J. Squire, et al., 100-fs pulse generation and amplification in $Ti:Al_2O_3$, Opt. Lett., 1991, 16, 324
- [5] J. V. Rudd, et al., Chirped-pulse-amplification of 55 fs pulses at a 1kHz repetition rate in a $Ti:Al_2O_3$ regenerative amplifier, Opt. Lett., 1993, 18, 2044
- [6] J. Squire, et al., Amplification of femtosecond pulses at 10kHz repetition rate in $Ti:Al_2O_3$, Opt. Lett., 1993, 18, 625

Researching on the Compacting Techniques of Solid-state Laser System

Li Chuandong, Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract

The paper reports our proceedings on the compacting techniques of laser systems; from the point of view of design, we investigated the coupling efficiency of light-pumped system. We have taken a series experiments on the diode-pumped Nd:YVO₄ laser, including high-repetition rate Q-switching and single-axial-mode pre-lase Q-switching; We develop the steady-state mode-locking theory and obtain calculation formula of the pulse width of actively mode-locking with the consideration of the self-phase-modulation of the laser medium. The continuous wave mode-locking is achieved on a Nd:YVO₄ laser pumped by a home-made LD with pulse width of 43 ps. Self-mode-locking of Ti:sapphire laser is achieved. The steady-state pulse width is 24.6 fs. Spectrum width FWHM as wide as 5 nm is also achieved. We calculate the working properties of the double-medium amplifier and investigate several questions in CPA. The formula of minimum pulse width that could be achieved in CPA is obtained. Gain saturation in chirped pulse amplification is also researched. It is found that the lower SNR corresponds to spectrum aberration. The concept of non-resonant amplification (NRA) is proposed to reform the spectrum aberration and increase the SNR of compressed pulses.

Key Words: Solid-state lasers, Diode-pumped lasers, Chirped pulse amplification.

李传东 男, 1965 年 月 出生, 1993 年起在中国科学院上海光机所攻读博士学位, 主要从事固体激光器小型化相关技术的研究。