

文章编号: 0258-7025(2004)03-0257-05

新型大焦斑钛宝石激光放大器腔型的设计与实验研究

陈雯倩, 王清月, 曹士英, 韩英魁, 王专, 柴路

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要 为了克服放大自发辐射在飞秒激光放大器中对放大脉冲的影响,将增益介质掺钛蓝宝石晶体从腔内束腰位置处移至腔内光斑最大处是一个有效的办法。设计并实验了此种新型大焦斑直线形折叠腔。计算了腔内的光斑尺寸与腔结构参数的关系,得出了腔内光斑尺寸分部图,系统实验了输出功率与腔结构参数:曲面镜半径,输出耦合镜透射率,腔长等的关系,并进行了理论验证。本文为进一步将其做成新型、高效、低噪声再生放大器提供了必要的依据。

关键词 激光技术;再生放大;飞秒激光;大焦斑;折叠腔

中图分类号 TN 242;TN 248.1 文献标识码 A

Design and Experiment Research on the Cavity of a New-Style Large Beam Size Ti:Sapphire Amplifier

CHEN Wen-qian, WANG Qing-yue, CAO Shi-ying,
HAN Ying-kui, WANG Zhuan, CHAI Lu

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, EMS, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract In order to overcome the influence of amplified spontaneous emission (ASE) on the amplified pulse in the femtosecond laser amplifier, it is an effective way to move the Ti:sapphire from the waist in the cavity to where the size of the beam is largest. The experiments are carried out on such a new-style folded linear Ti:sapphire amplifier cavity with the large beam size. The relationship between the beam size and the cavity parameters is calculated and the beam size distribution in the cavity is provided. The systemic experiments are done on the relationship between the output power and the cavity parameters such as the radius of the curved mirror, the reflectivity of the output mirror, the length of the two arms and so on.

Key words laser technique; regenerative amplifier; femtosecond laser; large beam size; folded cavity

1 引言

飞秒激光具有极窄的脉冲宽度以及经过放大后极高的峰值功率两个特点。时域上持续时间如此短和峰值功率如此高的激光聚焦到很小的空间区域上,光束截面上的功率密度达到 $10^{18} \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$,超过了原子核对其周围电子的场强,可以产生高温、

高压、高场强、高密度等极端的物理条件。这样的极端参量使飞秒激光在许多方面都有重要用途,比如探测物理、化学、生物学中的超快过程,强场物理,激光受控核聚变,以及超精细加工,高密度的信息存储和记录等。直接对飞秒激光器输出的超短脉冲进行放大不可能获得太瓦级的峰值功率,一般采取啁啾

收稿日期:2002-10-23;收到修改稿日期:2002-12-09

基金项目:国家重点基础研究(G1999075201)资助项目。

作者简介:陈雯倩(1979—),女,湖北人,天津大学超快激光研究室硕士,主要从事飞秒激光技术的研究。E-mail:

chenwenqia@tju.edu.cn

万方数据

脉冲放大技术(CPA)^[1]对激光脉冲的能量进行放大。但是在CPA系统发展的前期,一般将增益介质(大部分为掺钛蓝宝石晶体)放在腔内光束的束腰位置,这样不仅可以得到较高的抽运功率密度,而且钛宝石的能量提取效率也比较高。但是随着抽运源质量的改善,增益系数越来越大,放大的自发辐射(ASE)也越来越高,从而背景噪声越来越强。ASE是一种介于荧光和激光的中间状态,由于在增益级有很高的激发效率,上能级粒子数密度很快就饱和了,自发辐射在种子光导入到放大器之前就已经被放大形成了ASE。因此,ASE的存在不仅严重减少了信号光的放大增益,而且被放大后的激光脉冲也带上了很强的背景噪声。尤其是在百太瓦的激光放大系统中,功率密度达 $10^{18} \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$,ASE也高达 $10^{12} \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$,已经超过了原子电离的能量,从而严重影响了飞秒强激光与靶体相互作用的物理过程^[2]。

为了克服ASE对放大脉冲的影响,密歇根大学的G. Mourou等提出了将增益介质掺钛蓝宝石晶体从腔内束腰位置处移至腔内光斑最大处的环形再生放大器。实现了将5 nJ的种子脉冲放大到90 mJ,斜率效率为37%的输出^[3]。这种腔型的再生放大器,增益介质处的光斑较大,上能级粒子数饱和得比较慢,能有效地抑制ASE效应。Mourou在实验中提出环形的再生放大器有着重要的优点:输出能量较高,ASE的强度较小,对比度较大^[4]。但是环腔有一个严重的缺点,也就是在实验室中的调节比较困难,调节所需要的精度很高。同时,环腔稳定区域很小,阈值也较高,这都不利于实验工作。为了克服上述困难和缺陷,我们设计并实验了一种直线形折叠再生腔。实验表明,这种新型大焦斑钛宝石激光放大器的直线折叠腔型与环腔相比具有易调谐、调节范围大、阈值低等优点。

2 理论及实验研究

由于再生放大器自身就有一个谐振腔,要求入射的种子脉冲模式和再生放大器的腔模相吻合,所以可以在不加普克尔盒的情况下使之振荡出光。同时调节腔的几何结构参数以符合腔内光斑尺寸较大,输出较高的要求。实验中采用的折叠腔结构如图1所示,这样种子光在一次光程中能够两次通过增益介质,提高了有效增益。脉宽为10 ns,重复频率为10 Hz,激光数据532 nm的YAG倍频抽运光经

过一个望远镜系统将光束的直径从8 mm压缩至3 mm,以确保较高的抽运功率密度。抽运光从折叠腔两臂的角平分线直接入射到布儒斯特角切割的钛宝石晶体上。 M_1 为全反镜, M_2 为曲率半径为 R 的曲面镜,OC为有透射率的输出耦合镜。

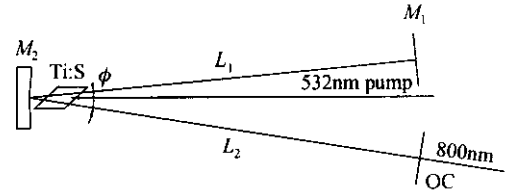


图1 实验结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment

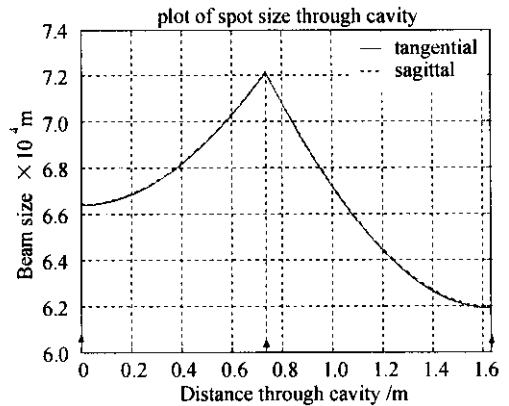


图2 腔内光斑尺寸分布

图中横轴上从左到右↑分别为 M_1 , M_2 和OC所在位置

Fig. 2 Beam size distribution in the cavity

$R=4 \text{ m}$, $L_1=0.735 \text{ m}$, $L_2=0.9 \text{ m}$, $\phi=6^\circ$

The ↑ in the x axis from the left to the right are the sites of M_1 , M_2 and OC

通过ABCD矩阵以及 $\omega = (\lambda/\pi)^{1/2} \cdot |B|^{1/2} / \left[1 - \left(\frac{D+A}{2}\right)^2\right]^{1/4}$ 可以计算出腔内的光斑尺寸。曲率半径 $R=4 \text{ m}$ 时,计算得到的谐振腔内光斑尺寸分布如图2所示。实验中将钛宝石晶体放置在靠近曲面镜 M_2 的地方,即腔内光斑尺寸最大处。从图中还可以看出,在曲面镜小角度入射的情况下,光斑在子午面和弧矢面的尺寸基本相同。这样就可以保证较好的光斑质量。

在有效抽运的情况下,谐振腔内从噪声中建立起来的辐射通量将迅速增大,增益系数因辐射通量的增大而减小,最终稳定在确定的值上。部分腔内功率从谐振腔中耦合输出,并表现为有效的激光输出。激光输出可表示为

$$P_{\text{out}} = A \left(\frac{1-r}{1+r} \right) I_s \left(\frac{2g_0 l}{L - \ln r} - 1 \right) \quad (1)$$

式中, I_s 为材料参量, A 和 l 分别表示激光棒的受激截面和长度, r 为耦合输出器的反射率, g_0 为未饱和增益系数, L 为谐振腔内的损耗。

2.1 曲率半径对输出的影响

为了使再生腔获得较高的输出功率, 由式(1)看出就是要设法增大腔内的模式尺寸 A , 同时由于高斯光束模式 $w^2 \sim L\lambda$, 所以要求增大腔长。由于我们采用的是平凹腔结构, 腔长在 $2R$ 以内都为稳定腔, 所以增加腔长的同时也要增加曲面镜的半径。我们分别采用 $R=2\text{ m}$ 和 $R=4\text{ m}$ 的曲面镜来获得较大的光斑尺寸。图1所示的折叠腔在两臂等长、曲面镜曲率半径不同的情况下, 腔内最大光斑处的光斑尺寸与臂长的关系, 如图3所示。从图中可以看出 $R=2\text{ m}$ 曲面镜的最大光斑尺寸小于 $R=4\text{ m}$ 曲面镜的最大光斑尺寸。并且 $R=2\text{ m}$ 时, 总腔长超过 2 m 就超出了稳定区域, 而 $R=4\text{ m}$ 的曲面镜的光斑却能在一般实验室平台上随着腔长的增长一直增加, 以保证腔内各光学元件不被损坏。实验中测量了输出耦合镜的透射率 T 为 3% , 两臂长分别为 $L_1=0.735\text{ m}$ 和 $L_2=0.9\text{ m}$, 曲率半径分别为 2 m 和 4 m 时的输出特性曲线如图4所示。从图中可以看出, 在腔长相等的情况下曲率半径大的腔的阈值低, 输出功率高, 并且能在腔内获得较大的光斑尺寸。

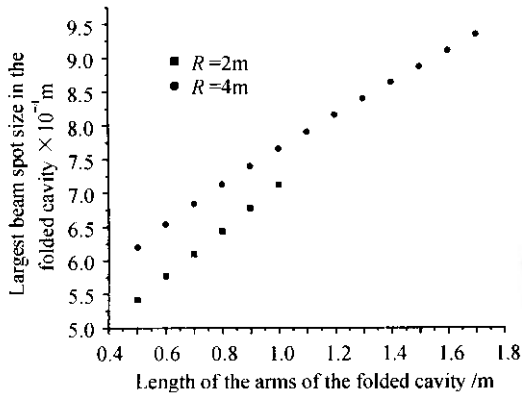


图3 曲率半径不同时, 腔内最大光斑尺寸与臂长的关系

Fig. 3 Relationship between the largest beam spot size in cavity and the length of arm in various curved mirror radius

2.2 输出耦合镜的透射率对输出的影响

不同的腔型具有不同最佳透射率的输出镜, 理论上当透射率增加时, 一方面提高了透射光的比例, 有利于提高输出功率, 而另一方面却又使阈值增加, 从而导致腔内光强的下降, 所以存在一个最佳的输出耦合率。利用式(1)对输出率 T 求导, 可以得出

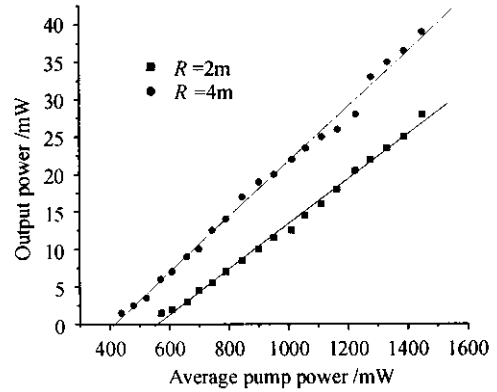


图4 腔长相同曲率半径不同时的输出特性曲线

Fig. 4 Output properties in various curved mirror radius with the same cavity length

$$T_{\text{out}} = (\sqrt{2g_0 l/L} - 1)L \quad (2)$$

从上式可以看出, 如果小信号增益(或输入功率)增大, 就必须增大输出镜的透射率。

我们在 $R=4\text{ m}$ 的情况下对于不同的腔长进行了实验, 得出了在折叠腔两臂长分别为 $L_1=0.735\text{ m}$ 和 $L_2=0.9\text{ m}$, 两臂夹角为 6° , 透射率分别为 2% , 3% , 7% 以及 10% 的输出耦合镜对应的输出功率如图5(a)所示。可以看出此种情况下, 7% 的输出镜为最佳耦合输出。如果拉长腔将两臂变为 $L_1=L_2=1.07\text{ m}$, 并保持两臂的夹角仍为 6° 左右, 得到如图5(b)所示的输出功率特性曲线。从图中可以看出 10% 的输出镜为最佳的耦合输出镜, 这与腔拉长以后衍射损耗增大有关系。

2.3 腔长对输出的影响

折叠腔两臂的长度对腔内光斑尺寸有重要的影响, 从而对激光输出功率有很大的影响。尤其是在腔内功率很高的情况下, 每个光学元件上的光斑尺寸都要保证不能超过其破坏阈值。实验中发现由于镜片镀膜的关系, 一般输出透射镜的破坏阈值都在 100 MW/cm^2 以下, 尤其长时间在高抽运功率情况下运转激光器, 热效应将使镜面出现白炽的亮点, 光学元件的镀膜被破坏, 输出功率急降。

下面考虑两种情况。一种是两臂几乎等长, 在这种情况下反射镜 M_1 和输出镜 OC 上的光斑尺寸几乎相等, 光束的弧矢面和子午面的光斑尺寸大小也相等。平面镜以及曲面镜上的光斑大小与臂长的关系如图6所示, 在这里仍假定两臂的夹角为 6° 。可以看出随着两臂臂长增加, 腔长变长, 曲面镜上的光斑尺寸随之增加得很快, 而反射镜和输出镜上的光斑尺寸增加得很缓慢, 这样有利于再生腔能量的

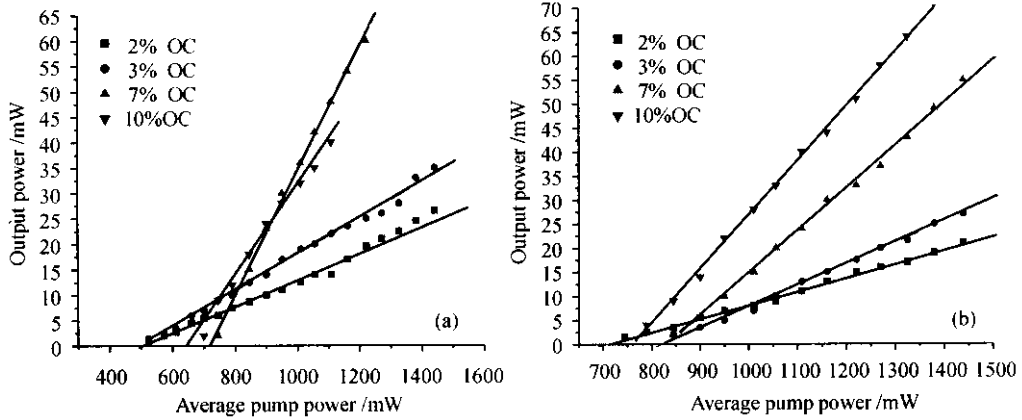


图 5 输出特性曲线

Fig. 5 Output properties

(a) $L_1 = 0.735 \text{ m}, L_2 = 0.9 \text{ m}$; (b) $L_1 = L_2 = 1.07 \text{ m}$

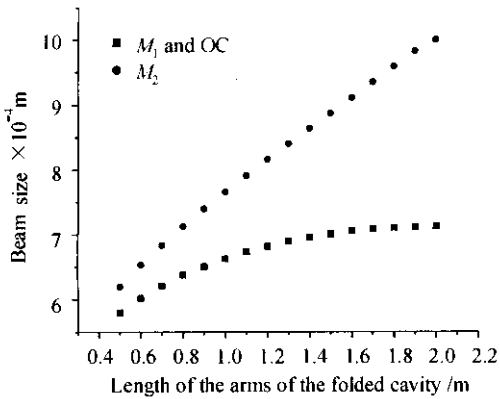


图 6 两臂等长时,镜面上光斑尺寸与臂长的关系

Fig. 6 Relationship between the beam size on the mirrors and the arm length when both arms are equal

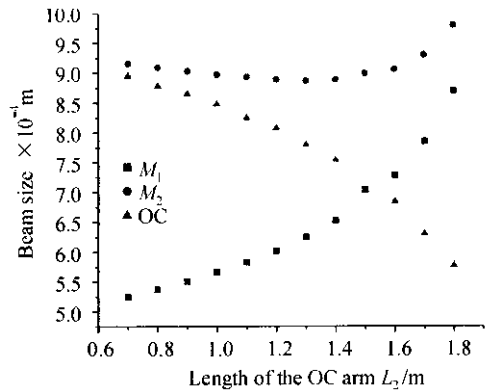


图 8 两臂不等长时,镜面上光斑尺寸与臂长的关系

Fig. 8 Relationship between the beam size on the mirrors and the arm length when two arms are different

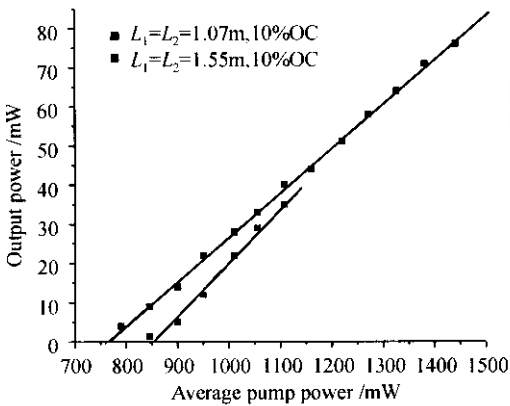


图 7 两臂等长时的输出特性曲线

Fig. 7 Output properties when both arms are equal

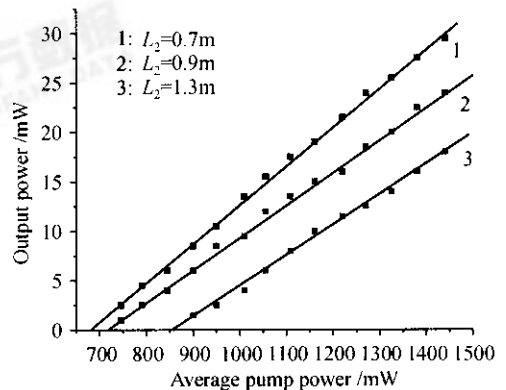


图 9 两臂不等长时的输出特性曲线

Fig. 9 Output properties when two arms are different

提高。实验中测量了在输出耦合镜的透射率为 10%，两臂等长分别为 1.07 m 和 1.55 m 两种情况下的输出特性曲线，如图 7 所示。从图中可以看出，

随着腔长的增长，阈值提高，但相对于 10% 的输出镜，腔越长输出功率的斜率越大。同时可以看出，由于长腔腔内功率增加得较快，而输出镜上光斑尺寸增加得较慢，所以长腔就容易出现反射镜被损坏的

现象。

另外一种情况是两臂不等长的情况,固定一臂 $L_1 = 1.55\text{ m}$,改变另一臂 L_2 的长度,对应的光斑尺寸与臂长的关系如图8所示。可以发现臂长与该臂端镜的光斑尺寸成反比,也就是臂越短,该臂端镜光斑越大,所以实验中应尽量使输出镜端的臂较短。同时发现在两臂等长的情况下,即 $L_2 = 1.55\text{ m}$ 时,曲面镜镜面上的光斑尺寸最小,所以在实验中为了获得较大的光斑尺寸可以调节两臂,使之不等长。通过计算还发现在两臂不等长的情况下,腔内光束的弧矢面和子午面也没有发生什么明显的分离。固定一臂改变另一臂长的情况下得到的输出特性曲线如图9所示。图中表明了随着腔长的增长,阈值增高,输出功率降低的趋势。

2.4 其他因素

从式(1)可以看出影响输出功率的因素不仅有曲率半径、输出镜的透射率以及腔长,其他的参数如 g_0, L 对激光输出功率也有影响,但是由于 g_0, L 都是未知量,不能做定量和定性的实验。在实验中,两臂的夹角、晶体上抽运光的尺寸大小皆可以看作是对 g_0, L 的调节。通过实验发现,在两臂的夹角小于 10° 的情况下腔都处于稳定区域内,而在稳区内,改变两臂夹角的大小对于输出功率没有很大的影响,特别是在实验中由于钛宝石晶体尺寸、调整架、真空管等设备的限制,角度的可调节范围很小,一般在

$5^\circ \sim 7^\circ$ 间,所以我们对于角度没有很严格的限制和要求。同时由于所使用的晶体较大,腔较长,腔内的光斑尺寸也较大,为了保证光两次通过晶体时都能获得较好的增益,我们将抽运光斑压缩至比腔内的最大光斑尺寸稍大,实验证明这样的抽运光尺寸能较好地与振荡光耦合。

3 结 论

本文设计了一种新型大焦斑直线形折叠腔,计算了其光斑尺寸与腔结构参数的关系,并系统实验了输出功率与各参数的关系。实验表明,这种用于大焦斑钛宝石激光放大器的直线型折叠腔与环腔相比,具有易调谐、调节范围大、阈值低等优点,可使再生放大器向高效、低噪声方向发展。

参 考 文 献

- 1 M. D. Perry, G. Mourou. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers [J]. *Science*, 1994, **264**(5161):917~924
- 2 Weili Zhang, Yong Wang, Lu Chai *et al.*. Suppression of amplified spontaneous emission in a femtosecond chirped-pulse amplifier [J]. *Optics and Laser Technology*, 1999, **31**(6):425~430
- 3 V. Yanovsky, C. Felix, G. Mourou. High-energy broad-band regenerative amplifier for chirped-pulse amplification [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(4):539~541
- 4 V. Yanovsky, C. Felix, G. Mourou. Why ring regenerative amplification (regen) [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **74**(suppl.): S181~S183