

# 用增加频带宽度的方法提高钎玻璃 高功率激光器输出功率

邓锡铭 余文炎 陈时胜 丁丽明 谭维翰\*

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

阐明了影响固体激光器输出功率的根本原因是自聚焦效应,而非涅耳衍射产生的空间高频调制是加速自聚焦过程的重要因素。为了消除硬边光阑产生非涅耳衍射,作者建议采用宽频带激光,并用实验演示了其消衍射效果。

众所周知,由于军事和科学研究的需要,推动了钎玻璃高功率激光技术的迅速发展。仅仅在七十年代,激光器的总输出功率就提高了6~7个量级。但是,激光束亮度的增长却不到两个量级。在大多数情况下,激光系统输出功率的增加是以扩大输出口径或增加路数为代价的。

影响高功率激光束亮度的一个根本原因是光束自身强电场引起的自聚焦效应。它降低了光束的亮度甚至破坏介质本身。这种效应由  $B$  积分所表征<sup>[1]</sup>,并定义为:

$$B = \frac{2\pi}{\lambda_0} \int_0^L \frac{\Delta n}{n_0} dz = \frac{K_0 \gamma}{n_0} \int_0^L I dz, \quad \gamma = \frac{4\pi n_2}{n_0 c \times 10^{-7}}, \quad (1)$$

式中  $\lambda_0$ ,  $K_0$  分别为激光的波长及波数,  $n_2$  是介质的非线性折射率,  $\Delta n = n_2 \langle E \rangle^2$  为强光引起的折射率改变,  $I$  为光强,量纲是  $W/cm^2$ 。

如果激光束强度出现空间调制时,  $B$  则代表最容易引起自聚焦的调制的指数增长率。在单色平面波条件下,引用横向波数  $k_x$  和轴向波数  $k_z$  来描述光束的非线性传输,得出一个物理意义十分清楚的表达式<sup>[2]</sup>:

$$k_z^2 = \left[ \left( \frac{k_x}{2k_0} \right)^2 - \frac{4\pi n_2}{c} I \right] k_x^2, \quad (2)$$

式中  $k_x = \frac{2\pi}{\Lambda_x}$ ,  $\Lambda_x$  为横向调制周期。而  $k_z$  则决定自聚焦的“焦距”。令  $\frac{dk_z}{dk_x} = 0$ , 便可求得引起自聚焦最严重的光束强度分布的横向波数:

$$k_x = \left( \frac{8\pi n_2 I}{c} \right)^{1/2} k_0. \quad (3)$$

收稿日期: 1981年12月3日

\* 作者分属于上海光学精密机械研究所第一、第三研究室和六路激光装置运行组。

$I$  的单位取  $\text{erg}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ , 或写成通用单位  $10^{-16} \text{GW}/\text{cm}^2$ ; 对国产硅酸盐铍玻璃  $n_2 \approx 1.5 \times 10^{-13} \text{esu}$ , 则  $k_x = 68.4 I^{1/2} \text{cm}^{-1}$ ; 如果  $I$  接近  $1 \text{GW}/\text{cm}^2$  时, 便很容易造成自聚焦破坏。此时有  $A_x = 0.09 \text{cm}$ 。

通过上述讨论得出两点结论:

- (1) 减少  $n_2$  可以使激光系统的负载功率增加;
- (2) 应力求避免  $1 \text{mm}$  量级的光强空间起伏。

为此, 近几年来, 不少实验室开始采用磷玻璃或氟磷玻璃作工作物质, 以期降低  $n_2$  值。但是由于材料的物理化学性质的不同, 更换激光材料所得到的亮度提高似乎不太显著。

在提高光束空间平滑度方面, 最根本的是消除 Fresnel 衍射造成的强度起伏。这方面的努力包括软边光阑<sup>[3]</sup>、空间滤波和象传递技术<sup>[4]</sup>的应用。遗憾的是, 这些光学元件不单要求高, 制造困难, 并且由于插入损耗严重, 因而大大增加了激光系统的规模和投资。

以上改善光束质量, 提高光束亮度的措施仅着眼于采用外部措施使光束强度空间分布均匀化, 从而抑制非线性自聚焦效应的增长, 而忽略了光束内部的频带宽度对抑制自聚焦效应的影响。从激光技术的发展历史来看, 人们往往习惯于追求激光束单色亮度(即光子简并度)的提高。而对激光核聚变的研究对象而言, 应该追求的是激光束的亮度而不是单色亮度。单色性过高反而强化了等离子体临界密度面的各种非线性效应, 也加剧由衍射引起的光束的空间调制, 不利于在激光系统中对非线性自聚焦的抑制。鉴于这一点, 本文作者建议用增加激光光谱宽度的方法消除高级 Fresnel 衍射, 抑制自聚焦效应的增长, 从而提高大功率激光系统的输出功率。同时, 减少过热电子的产生, 有利于激光和靶的相互作用。

## 二

中心波长为  $\lambda_0$  的单色平面波, 通过半径为  $a$  的光阑后发生 Fresnel 衍射, 条纹数可以用 Fresnel 数表示为  $N = \frac{a^2}{\lambda_0 L}$ , 将其微分得到

$$-dN = \frac{a^2}{L} \frac{d\lambda}{\lambda_0^2} = N \frac{d\lambda}{\lambda_0} \quad (4)$$

随着变量  $d\lambda$  的增加, Fresnel 衍射环带数目减少, 如果光谱宽度增加到一定程度, 使得最大波长和最小波长之差引起环带数目的改变量为  $|dN| > 0.5$  时, 中心衍射环带将消失。将此值代入(4)式得出消除 Fresnel 衍射的条件是:

$$d\lambda > 0.5 \lambda_0 / N。$$

前面已经讨论过, 对大 Fresnel 数所产生的高频空间调制具有最大的危害性, 如果选择  $N_c = 50$  作为截止的 Fresnel 数, 而  $\lambda_0 = 1.06 \times 10^{-4} \text{cm}$ , 则  $d\lambda \geq 10^{-6} \text{cm} = 100 \text{\AA}$ 。

事实上, 只要  $d\lambda$  具有足够的宽度, 即使对较低级的 Fresnel 衍射, 也因条纹展宽而使衍射分布平滑化。

为了取得宽频带的激光束, 并演示其消衍射效果, 我们以一束高功率激光照射平面靶, 从靶面反回的激光受高温等离子体调制而产生加宽。实验是在六路铍玻璃激光系统的一路中进行的, 激光系统的排布及输出特性见文献[5]。靶面功率密度为  $5 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$  量

级。典型的等离子体电子温度为  $0.8 \text{ KeV}$ 。

图 1 是用一米光栅光谱仪拍摄的反射激光光谱。作为比较,我们以激光器输出的窄带激光作为定标线。其谱线宽度经法布里-珀洛干涉仪测定,约为  $0.17 \text{ \AA}^{[5]}$ 。

典型的反射激光光谱宽度为  $100 \text{ \AA}$  (关于反射激光加宽的机制及打靶效果的分析,我们曾经作过报导<sup>[6,7]</sup>)。实验中光束口径约为  $\phi 50 \text{ mm}$ 。

本文用  $\phi 20 \text{ mm}$  的硬边光阑拦截两种频带宽度的激光束,在不同的传输距离接收场图,即相应于不同 Fresnel 数的地方观察衍射现象。

图 2, 图 3 是分别在  $N=50$  和  $N=20$  情况下获得的照片。每张图片的第一象限加入  $T=62.5\%$  衰减器,以供强度定标之用。(a) 表示窄带激光的情况,(b) 为宽带在相同条件下的结果。

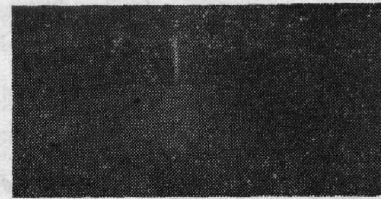
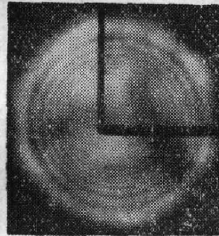
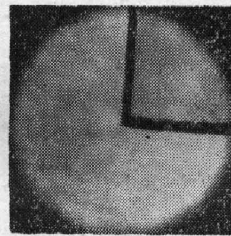


图 1 正向激光(上)和反向激光(下)光谱

Fig. 1 Spectrum of incident laser (top) and retro-reflected laser (bottom)



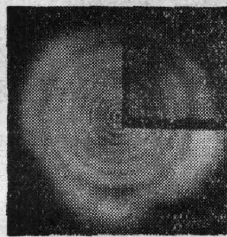
(a)



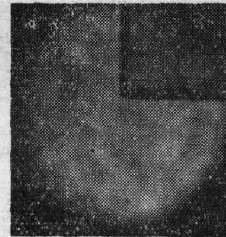
(b)

图 2  $N=50$ , 正向激光(a)和反向激光(b)产生的 Fresnel 衍射图

Fig. 2  $N=50$ , the Fresnel diffraction patterns of laser beam (a) and retro-reflected beam (b)



(a)



(b)

图 3  $N=20$ , 正向激光(a)和反向激光(b)产生的 Fresnel 衍射图

Fig. 3  $N=20$ , the Fresnel diffraction patterns of laser beam (a) and retro-reflected beam (b)

黑密度曲线表明,在宽频带的情况下 Fresnel 衍射环基本消失,并且由于宽带衍射而使边缘软化(图 4)。

此外,在实验中观察到窄带激光透过光路中的平行平板(如偏光膜、分光板、窗口等)时,由于表面反射而出现明显的直边干涉条纹(这些条纹也将导致光束的自聚焦)。而对宽频带激光则完全不出现这种干涉,原因是  $100 \text{ \AA}$  的激光所对应的相干长度只有  $0.1 \text{ mm}$ ,比光路中任何一块平板的厚度要小得多。

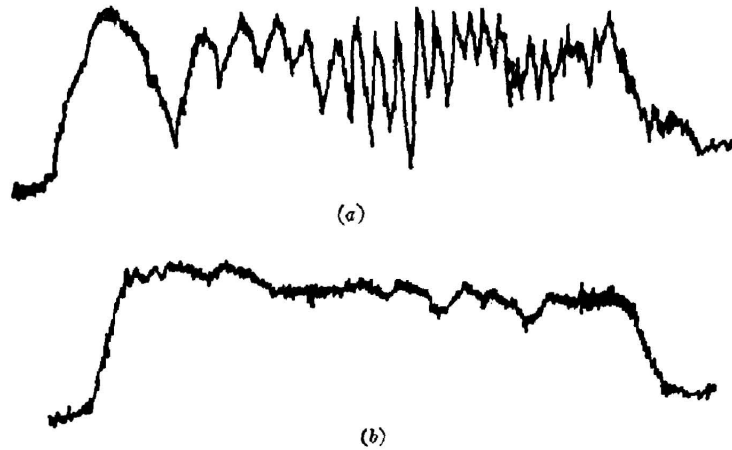


图 4 对应于图 3(a), (b) 的 Fresnel 衍射环黑度曲线  
 Fig. 4 Relative density of the Fresnel diffraction fringes  
 corresponding to Fig. 3(a), (b)

### 三

获得宽频带的方法大体有三个途径:

- (1) 振荡器多纵模输出;
- (2) 高功率激光在非线性介质中传输引起的谱线加宽;
- (3) 激光与等离子体相互作用引起的加宽。

三种加宽机制不同,加宽的形式也有所区别。

振荡器输出的频带加宽往往表现为非均匀光谱加宽的多线结构。

高功率激光在非线性介质中传输产生一个附加的相位(由  $B$  积分所表示),这个相位与光功率一样是时间和空间的函数,空间分布的相位导致光束的总体自聚焦和空间分裂,附加相位随时间的改变引起频带的加宽:  $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \Delta \omega$ 。对于特定的激光时间过程来说,不同时刻  $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$  具有不同的确定值,因此,这类加宽是在时间积分的意义上的加宽。

所以,第(1), (2)两种类型的加宽尽管在某些问题上有意义,但并非真正的宽频带。

由激光加热等离子体所引起的加宽,虽然与时间过程有关,但根据它的加宽机制<sup>[8]</sup>及热运动过程的一些随机性质,使得这种加宽过程在时间和空间坐标上是较平滑的。因此,我们认为这种类型的加宽对控制高功率激光的自聚焦增长最为有利。

一般说来,从高温等离子体反回的激光能量大约是原来激光能量的 10% 左右。但考虑到钨玻璃放大器贮能利用率较低,对反射激光仍有较高的增益系数。定量计算表明,只要采用一台附加放大器即可恢复到原激光束的总输出功率。这对一个多级行波放大系统来说,是微不足道的。

我们还注意到,由于钨玻璃荧光光谱具有非均匀加宽的性质,所以,宽频带激光不仅可以消除 Fresnel 衍射,控制自聚焦的发展,而且,还可以减少激光放大过程中的“烧孔”效

应,提高放大器的饱和能量增益,对于宽脉冲大能量输出的激光放大尤为重要。

当然,激光束频带加宽会给倍频技术造成一定困难。有关宽频带和倍频两种技术方案的利弊的权衡和选择,还有待进一步的实验去判明。

作者对六路激光系统运行小组全体同志在实验上给予的协助表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] V. I. Bespalov, V. T. Tanov; *J. E. T. P. Lett.*, 1966, **3**, No. 12, (15 Jun), 307.
- [2] K. A. Brueckner; *App. Opt.*, 1976, **15**, No. 9 (Sep), 2172.
- [3] V. B. Cositich; *Laser Focus*, 1974, **10**, No. 9 (Sept), 43.
- [4] J. T. Hunt *et al.*; *App. Opt.*, 1977, **16**, No. 4 (Apr), 779.
- [5] Deng Ximing, Yu Wenyan *et al.*; 《光学学报》, 1981, **1**, No. 4 (Jul), 289.
- [6] Chen Shisheng, Yu Wenyan *et al.*; 《光学学报》, 1982, **2**, No. 2 (Mar), 108.
- [7] Tan Weihan, Ding Liming; 《激光》, 1981, **3**, No. 11, 1.

## Output power increase of high power Nd:glass laser by bandwidth

DENG XIMING YU WENYAN CHEN SHISHENG DING LIMING AND TAN WEIHAN

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

(Received 3 December 1981)

### Abstract

The self-focusing, the most important effect on the output power of solid state lasers has been described. High frequency spatial modulation induced by Fresnel diffraction accelerates the effect of self-focusing. In order to eliminate the Fresnel diffraction produced by hard aperture, the bandwidth broadening of laser beam for such use is proposed and its effect of diffraction-free has been demonstrated experimently.



### 全国光学玻璃科学技术交流会在厦门市举行

由中国硅酸盐学会光学玻璃专业委员会组织的“全国光学玻璃科学技术交流会”于1982年11月12日至15日在厦门市举行。参加交流会的代表近60人,他们都是来自我国主要的光学玻璃研究单位、高等院校和工厂。会上收到报告摘要40篇,其中31篇在大会上进行了交流。

本届会议是光学玻璃科学技术方面的交流会,主要内容有:光学玻璃熔炼工艺、光学玻璃退火技术、光学玻璃质量改进研究、光学玻璃系统及品种研究以及其它光学玻璃等。从这些方面看,主要反映了我国光学玻璃工艺技术的进展,从生产实际中提出的问题,通过工艺技术的改进,提高了光学玻璃的生产和质量,很受生产单位的重视。体现了科学技术面向生产,和生产相结合,为国民经济服务的方针。会后还进行了业务协调。

(黄振发)