

文章编号: 1001-3806(2005)05-0511-03

## 用混合玻璃配置提高激光装置输出能力的研究

杨 菁<sup>1,2</sup>, 张小民<sup>2\*</sup>, 胡东霞<sup>2</sup>, 粟敬钦<sup>2</sup>, 王文义<sup>2</sup>

(1. 山东大学 信息科学与工程学院, 济南 250100; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 在分析几种激光基质材料的光谱和激光特性的基础上, 提出了在功率受限型激光装置的主放大级中混合使用高增益激光玻璃和低非线性折射率  $n_2$  玻璃的新思路, 以期在降低  $n_2$  的基础上提高激光装置的系统输出能力。采用光传输程序模拟计算的结果表明, 主放大器前级用磷酸盐玻璃, 后级换用低  $n_2$  的氟磷酸盐玻璃的混合配置, 可以有效地减小级间  $B$  积分条件对系统输出能力的约束, 系统的最大能量输出有近百分之十几的增长。

关键词: 高功率钕玻璃激光装置; 能量增益; 数值模拟; 激光玻璃; 非线性折射率

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

### Study on improving output capability of power-limited lasers using different laser glass together in an amplifier

YANG Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaomin<sup>2</sup>, HU Dongxia<sup>2</sup>, SU Jingqin<sup>2</sup>, WANG Wenyi<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China; 2. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract** The laser and optics properties of several kinds of laser glass have been discussed. A new method is pointed out to increase the output energy of power limited laser that is high gain glass and low nonlinear refractive index coefficient  $n_2$  glass used in an amplifier together. The simulated calculation by light propagation procedure shows that the configuration using phosphate glass in the forefront of amplifier and fluorophosphate glass in the rear end can reduce the restriction on the output capability from  $B$  integral. The largest output energy has a increase of 10~20 percent.

**Key words** high-power neodymium laser facility; energy gain; numerical simulation; laser glass; nonlinear refractive index coefficient

## 引 言

用于惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 研究的高功率钕玻璃激光装置一直努力朝着大能量、高功率的方向发展。但是在脉冲宽度为纳秒或更短时, 系统功率密度的提高极大程度上受到材料非线性折射率  $n_2$  引起的自聚焦的限制, 激光装置属于功率受限型。因此, 降低  $n_2$  成为功率受限型激光装置对材料的主要要求之一。目前, 世界各国广泛使用的钕玻璃放大器工作物质为磷酸盐玻璃。另据相关文献证实<sup>[1]</sup>, 在氟磷酸和氟铍酸等氟化玻璃中  $n_2$  值降至最小, 是最理想的激光材料。氟磷酸盐玻璃虽然具有  $n_2$  值低的优点, 但由于其受激发射截面  $\sigma$  相对磷酸盐玻璃较小, 不能获得较大的增益, 因此, 对于功率受限型

激光装置, 在激光材料的选择和配置方面, 要结合增益和非线性双重特性。磷酸盐玻璃在增益放大级更佳, 氟磷酸盐玻璃在功率受限级更佳。

结合不同基质材料的激光特性参数  $n_2$  和  $\sigma$  对激光输出能力的影响, 本着提高钕玻璃放大系统能量输出特性的目的, 笔者提出了混合玻璃配置的想法, 即在放大器不同放大段, 根据增益特点, 采用不同基质材料, 以期为激光介质材料的优化乃至激光装置的系统优化提供一条可行的新思路。

## 1 理论分析

受激发射截面  $\sigma$  和非线性折射率  $n_2$  是激光材料最重要的光谱和光学本征参数<sup>[2]</sup>。以下重点分析这两个参数对激光放大系统能量输出能力的影响。

### 1.1 非线性折射率 $n_2$

介质非线性折射率  $n_2$  引起的自聚焦效应会造成激光材料的损伤, 限制了功率受限型激光装置功率密度的提高。在激光放大器中自聚焦效应常用  $B$  积分 (光程长度方向累积的非线性相位延迟) 来表征<sup>[3]</sup>, 表达式为:

基金项目: 国家高技术惯性约束聚变领域资助项目 (0345011)

作者简介: 杨 菁 (1975-), 女, 博士研究生, 从事高功率激光技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: xmzhang@caep.ac.cn

收稿日期: 2004-07-09; 收到修改稿日期: 2004-10-08

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l I(z) dz \quad \gamma = \frac{4\pi n_2 \cdot 10^7}{n_0 c} \quad (1)$$

式中,  $\gamma$  为非线性折射率系数,  $I(z)$  是激光功率密度,  $n_0$  是介质的线性折射率。

由 (1) 式可看出, 在  $I(z)$  较高处,  $B$  积分较大, 此时可通过降低  $n_2$  有效减小  $B$  积分。过去的实验还表明, 在高功率激光驱动器主放大级, 应严格控制任意两个空间滤波器小孔之间的  $B$  积分值  $\Delta B \leq 1.8 \mu\text{rad}$  以抑制强光传输过程中的小尺度自聚焦。在这样的  $B$  积分限制条件下, 功率密度  $I(z)$  与  $n_2$  成反比, 降低  $n_2$  值, 可有效增大功率密度。

降低  $n_2$  已成为近几十年激光玻璃发展的一个方向, 一些典型的钕玻璃的基质材料特性如表 1 所示。

Table 1 Properties of the different neodymium glass types

glass	$n_2 / 10^{-13} \text{esu}$	$\lambda/\text{nm}$	$\sigma / 10^{-20} \text{cm}^2$	$\Delta \lambda/\text{nm}$
silicate	1.5~2	1057~1062	1~3	28~35
phosphate	1~1.2	1053~1056	2~4.5	19~28
fluorophosphate	0.5~0.7	1050~1055	2.5~3.0	22~31
beryllium fluoride	0.3~0.5	1046~1050	1~4	18~24

### 1.2 受激发射截面 $\sigma$

根据 F-N 方程<sup>[4]</sup>, 激光放大器增益  $G$  表示为:

$$G = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \frac{E_s}{E_{\text{in}}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{E_{\text{in}}}{E_s} \right) - 1 \right] \exp(g_0 l) \right\} \quad (2)$$

式中,  $E_{\text{in}}$  为输入脉冲的能流密度,  $l$  为增益介质长度,  $E_s$  为饱和能流密度, 表示为:

$$E_s = h\nu/\gamma\sigma \quad (3)$$

$g_0$  为小信号增益系数:  $g_0 = \sigma N$  (4)

能量提取效率表示从放大器提取的能量与脉冲到达上能级时存储的能量之比<sup>[4]</sup>:

$$\eta = \frac{E_{\text{out}} - E_{\text{in}}}{g_0 E_s} = \frac{GE_{\text{in}} - E_{\text{in}}}{g E_s} \quad (5)$$

由 (2) 式 ~ (5) 式可看出, 介质的增益及能量的提取效率在很大程度上取决于受激发射截面  $\sigma$ , 因而在考虑材料的非线性效应以选择激光材料的同时, 必须考虑材料的增益系数或受激发射截面  $\sigma$ 。

表 2 中列出了几种掺钕激光玻璃的  $\sigma$  值, 利用

Table 2 Induced emission cross sections of the different neodymium glass types<sup>[5-7]</sup>

	phosphate	silicate	fluorophosphate	beryllium fluoride
type of glass	EV2 LG770 N31 ED-2	LFP LHG 10	B-2	
$\sigma / 10^{-20} \text{cm}^2$	4.7 3.9 3.9 2.9	2.84 2.7	2.9	

(2) 式 ~ (5) 式可以计算出激光脉冲通过单片放大器片 ( $l$  固定) 时, 不同的  $\sigma$  值对增益和能量提取效率的影响, 如图 1 图 2 所示。图 1 和图 2 中曲线上的标注

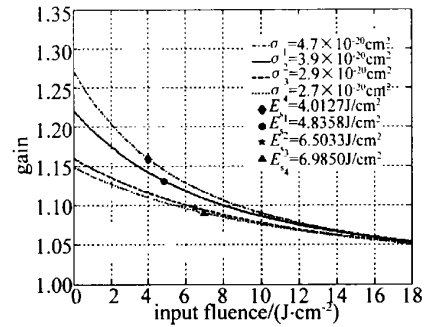


Fig 1 Gain as a function of input energy in the laser glasses with different  $\sigma$

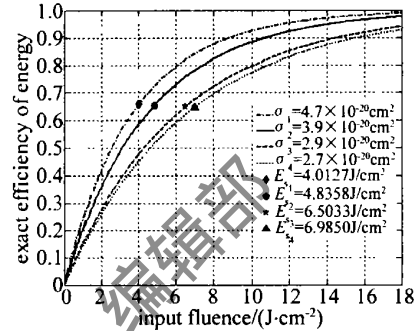


Fig 2 Exact efficiency of energy as a function of input energy in the laser glasses with different  $\sigma$

点为不同  $\sigma$  材料所对应的饱和能流密度, 可以看出,  $\sigma$  大的增益介质, 饱和能流密度小, 介质较易达到饱和。

由图 1 可知: (1) 受激发射截面  $\sigma$  大的材料增益较高, 因而在增益未饱和处应该使用高  $\sigma$  值的材料, 以使得得到最大的增益, 由表 2 可知, 现有激光玻璃中磷酸盐玻璃的  $\sigma$  值比硅酸盐, 氟磷酸盐, 氟铍玻璃的都高, 增益特性占优; (2) 增益随着注入能量密度的增加而降低,  $\sigma$  大的材料增益降低得快, 达到增益饱和后,  $\sigma$  值不再是影响增益的主要因素。由图 2 可得: 能量提取在高能流情况下最有效, 尤其是超过饱和能流两倍的能流。高受激发射截面  $\sigma$  的激光玻璃, 饱和能流密度小, 这样可在更低能流时获得有效提取, 因而相应提取效率较高。

由以上理论分析可知, 最好的激光玻璃应该同时具有低的非线性折射率系数  $n_2$  和高的受激发射截面  $\sigma$ 。但由表 1 表 2 看出, 目前低  $n_2$  的激光材料,  $\sigma$  相对较小。基于这一现状, 并根据高功率激光放大器各段的增益性能不同的特点, 提出在主放大级采用混合玻璃配置的方案, 即: 放大器前级采用高增益磷酸盐玻璃; 后级 ( $I(z)$  较高, 对  $B$  积分贡献较大) 优先考虑用氟磷酸盐等低  $n_2$  激光玻璃, 以期减小  $\Delta B \leq 1.8 \mu\text{rad}$  对输出能力的约束, 提高输出能量。由于氟磷酸盐玻璃与磷酸盐玻璃中  $\text{Nd}^{3+}$  的激光波长相差很小, 两者的混合使用有可能实现<sup>[1]</sup>。但从能流角度讲, 也正是需要在后级采用  $\sigma$  大的介质有效地提取储能, 以提高整个装置的能量提取效率。因此, 还需进一步利用强光传

输模型针对具体构型进行模拟计算, 综合性地权衡级间  $B$  积分  $\Delta B$ 、增益与提取效率  $\eta$  的得失。

## 2 模拟计算与分析

为验证采用混合玻璃的优化思路的有效性, 利用 SG99 光传输软件对神光 III 原型装置构型进行了模拟计算, 神光 III 原型装置主放大级采用主放大器 ( $A_1$ ) 四程放大加助推放大器 ( $A_2$ ) 单程放大的构型<sup>[8]</sup>, 钽玻璃片数配置为 8-6 如图 3 所示。目前该装置采用的玻璃是磷酸盐钽玻璃 N31。

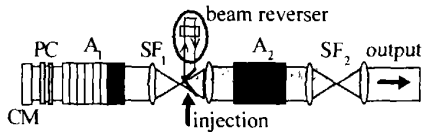


Fig 3 Schematic layout of the prototype facility of SG III

$A_1$  的四程输出端和  $A_2$  处的能流密度较高, 对级间  $B$  积分贡献最大, 因此, 拟将主放大器  $A_1$  后两张片和助推放大器  $A_2$  的 6 张片依次换用非线性折射率较低的氟磷酸盐玻璃 LFP, IHG10<sup>[5]</sup> 和氟钽玻璃 B-2<sup>[6]</sup> (如图 3 阴暗区所示), 玻璃参数列于表 3 中。

Table 3 Laser properties of the different Nd glasses

glass	$\lambda$ /nm	$\sigma$ / $10^{-20}$ cm <sup>2</sup>	$n_0$ / $10^{-13}$ esu	$n_2$ / $10^{-13}$ esu
N31	1053	3.9	1.528	1.15
LFP	1053	2.84	1.48	0.685
IHG10	1053	2.62	1.454	0.58
B-2	1047	2.9	1.343	0.4

依次对 21 种换片配置进行模拟计算, 主放大器不换片、换最后一张片和换最后两张片情况下, 助推放大器从后往前依次换为 0~6 张低  $n_2$  玻璃, 例如, “7/1-4/2” 表示 “主放大器 7 张 N31/1 张低  $n_2$  玻璃加助推放大器 4 张 N31/2 张低  $n_2$  玻璃” 的配置。计算中输入脉宽取 1 ns, N31 的小信号增益系数  $g = 0.0525$  cm<sup>-1</sup>, 假设各种换片配置的钽玻璃片总储能保持不变。在空间滤波器级间  $B$  积分严格满足  $\Delta B = 1.8$  的限制条件下, 模拟计算得到各种配置下最大输出能量值  $E_{out}$ ; 并根据公式  $\eta_{ext} = E_{ext} / E_{store}$  分别计算得到  $A_1$ ,  $A_2$  和系统总的能量提取效率。计算结果如图 4 所示。

由图 4 模拟结果分析可得: (1) 由图 4a 可看出, 通过更换低  $n_2$  材料, 在  $B$  积分限制条件下, 系统最大输出能量有一定增长, 用 LFP 玻璃更换时, 配置 6/2-0/6 效果最佳, 比原来 8-6 配置能量增加了 9.86%; 用 IHG10 玻璃更换时, 配置 6/2-1/5 效果最佳, 比 8-6 配置能量增加了 14.27%; 用 B-2 玻璃更换时, 配置 6/2-1/5 效果最佳, 比 8-6 配置能量增加了 18.94%, 总体来看, 助推放大器换片效果显著; (2) 由图 4b 可得, 助

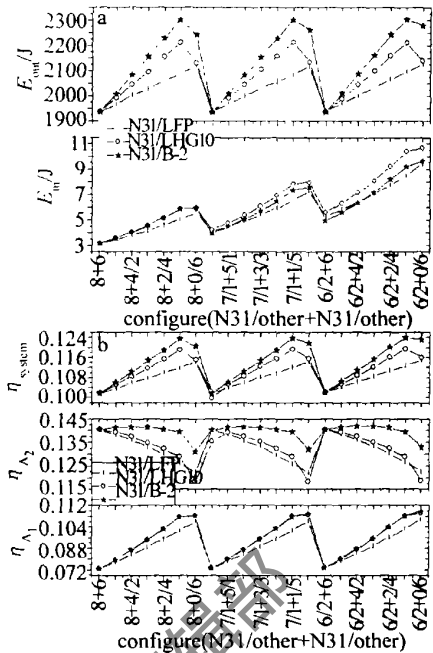


Fig 4 Output capability of the different configurations with different glass types (1 ns)  
a— $E_{in}$  and  $E_{out}$  as a function of the configurations b—exact efficiency of energy of  $A_1$ ,  $A_2$  and system as a function of the configurations

助推放大器  $A_2$  换为低  $n_2$  材料后, 由于材料的  $\sigma$  相应减小, 助推级提取效率降低, 换片越多, 提取效率越小; 但降低  $n_2$  也使  $E_{in}$  随之增大,  $A_1$  段能流密度提高, 提取效率相应增大; 系统总的提取效率为增大趋势; (3) 由图 4a 和图 4b 还可同时看出, 在换用的 3 种低  $n_2$  玻璃中, B-2 玻璃效果最好, LHG10 玻璃次之, LFP 玻璃效果最不明显。此结论与衡量激光材料性能的品质因子 FOM (figure of merit) 值  $\eta_{FOM} (= \sigma \times n^2 / n_2)$  是一致的, 由表 4 可知,  $(\eta_{FOM})_{B-2} > (\eta_{FOM})_{IHG10} > (\eta_{FOM})_{LFP}$ 。因此, 应该尽量选择 FOM 值较大的激光材料。但同时由表 3 可知, 氟钽玻璃 B-2 的激光峰值波长与磷酸盐玻璃 N31 有小部分差异; 而氟磷酸盐玻璃 LFP, IHG10 与磷酸盐玻璃 N31 的峰值波长相一致, 两者混合使用可得到实际应用。

Table 4 FOM of merit of the different neodymium glass types

glass	$\sigma$ / $10^{-20}$ cm <sup>2</sup>	$n_0$ / $10^{-13}$ esu	$n_2$ / $10^{-13}$ esu	$\sigma \times n^2 / n_2$
LFP	2.84	1.48	0.685	9.081366
IHG10	2.62	1.454	0.58	9.549972
B-2	2.9	1.343	0.4	13.07646

## 3 结 论

以上模拟计算及分析表明, 根据功率受限型激光装置的构型特点, 在主放大级的前级采用高增益玻璃,

(下转第 521 页)

涉模型做出弱反馈情况下的归一化阈值  $P$  随时间  $t$  的变化曲线如图 2 所示。图 2a 中假定外腔按正弦形式做往复运动, 且  $k_1 = 4\pi$ ,  $k_2 = a \tan(2.1)$ ,  $C = 0.8$ 。在图 2b 中, 在一个周期内随机取出 40 个采样点, 由这 40 个点的幅值组成  $P_i (i = 1, 2, \dots, 40)$  作为实验值。

Table 1 The effect of initialized value of the parameters on the iterative result

$k_1$ (real value= 12.56)			$\alpha$ (real value= 2.1)			$C$ (real value= 0.8)			iterative number
initialized value	final value	error	initialized value	final value	error	initialized value	final value	error	
18	12.5659	4.69E-4	6.9	2.1006	2.85E-4	0.6	0.8000	0	10
15.56	12.5659	4.69E-4	3.1	2.1007	3.33E-4	0.7	0.8000	0	6
13.56	12.5659	4.69E-4	3.1	2.1007	3.33E-4	0.9	0.7999	1.25E-4	5
11.54	12.5657	4.53E-4	3.1	2.1007	3.33E-4	0.9	0.7999	1.25E-4	5
23.56	12.5659	4.69E-4	1.1	2.1006	2.85E-4	0.3	0.8000	0	8
20.56	12.5639	3.10E-4	4.5	2.1006	2.85E-4	1.0	0.8000	0	7
25.56	12.5659	4.69E-4	2.5	2.1006	2.85E-4	1.0	0.8000	0	9
23.56	12.5659	4.69E-4	0.9	2.1006	2.85E-4	2.6	0.8000	0	9

从表 1 可以看出, 该算法迭代次数少, 参数估计误差很小, 且初值选取范围较大, 对拟合结果影响很小。

### 4 结 论

由半导体激光自混合效应的一般模型建立了激光自混合效应的非线性函数模型, 并用非线性最小二乘法估计了模型的两个重要参数: 线宽展宽因数  $\alpha$  和反馈水平因数  $C$ 。仿真分析表明, 该算法运算速度快, 参数估计具有很高的精度, 且初值易于选取, 对拟合结果影响很小。因此, 这种方法对于半导体激光自混合效应模型参数的测量是一种简单且有效的方法。

### 参 考 文 献

[ 1 ] GUIDO G, MICHELE N, SILVANO D *et al*. Laser diode selfmixing technique for sensing applications [ J ]. *J Opt* 2002, A4( 6): 283~294

[ 2 ] WANG W M, BOYLE W J O, GRATAN K T V. Selfmixing interference in a diode laser experimental observations and theoretical analysis [ J ]. *Appl Opt* 1993, 32(9): 1551~1558

[ 3 ] OSNSK IM, BUUS J. Linewidth broadening factor in semiconductor lasers: an overview [ J ]. *IEEE J Q E*, 1987, 23(1): 9~28

[ 4 ] HIYAMA K, HAYASHI K, IIDA Y. Simple method for measuring the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers by optical injection locking [ J ]. *Opt Lett* 1992, 17( 16): 1128~1130

[ 5 ] 禹延光. 激光自混合干涉理论及其位移测量方法的研究 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学工学, 2000. 30~32

[ 6 ] 王武义, 徐定杰, 陈健翼. 误差原理与数据处理 [ M ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001. 93~96

(上接第 513 页)

最后几级能流密度较高处采用低  $n_2$  的氟磷酸盐玻璃, 可以有效地降低级间  $B$  积分条件对系统输出能力的约束, 系统最大能量输出有近百分之十几的增长, 系统总的能量提取效率也呈增大趋势。因此, 在主放大级采用混合玻璃配置的方案是提高系统能量输出能力的一种有效的新思路, 对功率受限型激光装置的材料优化乃至系统总体设计优化都有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 干福熹. 现代玻璃科学技术 (下)——特种玻璃与工艺 [ M ]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. 109~207.

[ 2 ] CAMPBELL J H. 25 years of laser glass development leading to a

1.8MJ 500TW laser for fusion ignition [ R ]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1998. 3~4.

[ 3 ] CAMPBELL J H, SURATWATA T I. Nd-doped phosphate glasses for high energy / high peak-power lasers [ J ]. *Journal of Non-Crystalline Solids* 2000, 263&264: 318~341.

[ 4 ] 克西耐尔 W. 固体激光工程 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2002. 132~138

[ 5 ] 干福熹, 邓佩珍. 激光材料 [ M ]. 北京: 上海科学技术出版社, 1996. 377~380

[ 6 ] COYLE P E. Laser program annual report [ R ]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1976. 2~205

[ 7 ] MARTIN W E, MILLAM D. Ga in saturation in Nd doped laser materials [ J ]. *IEEE J Q E*, 1982, QE18(7): 1155~1163

[ 8 ] 王成程, 於海武, 周海. 新型高功率固体激光阵列式片状放大器 [ J ]. *激光技术*, 2003, 27( 1): 1~3