

# 高光束质量磷酸盐钕玻璃板条多程放大系统的研究\*

吕百达 邵怀宗 冯国英 罗时荣 蔡邦维  
(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 建立了磷酸盐钕玻璃布儒斯特角板条激光振荡-多程放大系统, 其中, 提出了用两棱镜折返光路的新式三程放大器, 用  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 色心晶体作为被动 Q 开关。实验得到高光束质量( $M_x^2 = 1.49$  和  $M_y^2 = 1.57$ ) 和能量增益为 23 的激光脉冲输出。实验数据与数值计算结果比较, 符合得较好。

关键词: 磷酸盐钕玻璃板条 多程放大器 光束质量

## Study of phosphate Nd glass slab multipass amplifier system with high beam quality

L Baida, Shao Huaizong, Feng Guoying, Luo Shirong, Cai Bangwei  
(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

**Abstract:** A phosphate Nd glass Brewster angled slab oscillator and multipass amplifier system has been built up, where a novel three-pass amplifier with two prisms has been proposed and a  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG colour center crystal has been used as the passive Q-switcher. In our experiment the output with high beam quality of  $M_x^2 = 1.49$  and  $M_y^2 = 1.57$  and with an energy gain of 23 has been achieved. The experimental data have been compared with the numerical calculation results, showing a good consistency.

**Key words:** phosphate Nd glass slab multipass amplifier beam quality

\* 国家高技术惯性约束聚变主题资助。

关系曲线。除了  $\lambda_0$  与  $\lambda_f$  的相对关系在不断变化之外, 求解时使用的反射率曲线与图 1 相同。图中两个实心圆点是实验测得的数据。从图中可以看到最佳波长  $\lambda_{opt}$  的存在。

我们曾假想反射率曲线可以用不太复杂的解析函数来描述, 然后用计算机进行计算; 同时, 在计算中也使用过好几种函数。计算结果表明, 图形分析对 ARLD 的主要特征所作的预测, 在用假象曲线进行的计算中都得到了反映。

### 参 考 文 献

- 1 Eisenstein G, Raybon G, Stulz L. W. IEEE Lightwave Technol, 1988; 6(1): 12~ 15
- 2 Luo B, Wu L, Chen J et al. IEEE Photonics Technol Lett, 1993; 5(11): 1279~ 1281
- 3 Olsson N A, Oberg M G, Tzang L D et al. Electron Lett, 1988; 24(9): 569~ 570
- 4 Saitoh T, Mukai T, Mikami O. IEEE Lightwave Technol, 1985; 3(2): 288~ 293
- 5 Wang J, Chen J, Hao Y et al. IEEE Photonics Technol Lett, 1993; 5(10): 1171~ 1173
- 6 Vassalo C. Electron Lett, 1988; 24(1): 61~ 62
- 7 Dutta N K, Deimel P P. IEEE Quantum Electron, 1983; 19(4): 496~ 498

\* \* \*

作者简介: 李大义, 男, 1940 年 6 月出生。副教授。现从事光纤通信及非线性光学方面的科研和教学工作。

收稿日期: 1997-10-30 收到修改稿日期: 1998-01-18

# 引 言

在主振荡器-功率放大系统(MOPA)中,脉冲宽度、光束质量和光谱宽度主要由振荡器决定,而由放大器将输出能量和功率提高到所要求的水平,并应采取有效措施以保持良好的光束质量。采用多程放大技术可有效地提高系统的提取效率,近年来有关研究工作发展迅速。例如,美国国家点火设施(NIF)的组合式四程放大器<sup>[1]</sup>、菲涅耳棱体磷酸盐钕玻璃四程放大器<sup>[2]</sup>和二极管泵浦的带受激布里渊散射相位共轭器的振荡-多程功率放大系统等。本文报道我们提出利用棱镜折返光路的新型磷酸盐钕玻璃板条多程放大器和用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 色心晶体调 Q 的实验研究结果。理论计算与实验结果比较表明,二者符合甚好。

## 一、计 算 模 型

从 Frantz-Nodvik 方程出发,在集中损耗近似下,将放大介质的体损耗等效为通过介质后总损耗因子  $T$ ,可推导出多程放大器激光脉冲经第  $k+1$  程放大后能量密度和增益的表达式<sup>[3]</sup>:

$$J_{k+1} = TJ_s \ln\{ G_{k+1} [\exp(J_k/J_s) - 1] + 1 \} \tag{1}$$

$$G_{k+1} = G_k \exp[-p(J_{k+1}/T - J_k)/J_s] \tag{2}$$

式中,  $J_k$  为第  $k$  程放大后的输出能量密度,  $J_s = h\nu/(2\sigma)$  为饱和能量密度,  $p$  为恢复系数,  $0.5 \leq p \leq 1$ , 当  $p = 1$ , 放大器增益完全没有恢复,  $p = 0.5$ , 放大器增益完全恢复。上面公式可以递推迭代求出多程放大器的数值解。

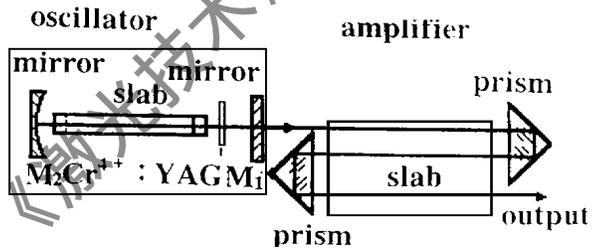


Fig.1 Schematic diagram of the Cr<sup>4+</sup>:YAG Q-switch oscillator and three pass amplifier system

我们设计的三程放大器光路如图 1 所示,光三次通过同一介质。针对它进行理论计算时,为了减小误差,我们采用了薄片模型<sup>[4]</sup>,薄片模型计算方法类似于积分计算,此方法将放大介质分成许多等厚的薄片,每片有一损耗和增益分布,并将整个放大介质视为许多小片介质的串接进行处理,而损耗和增益则由实验确定。

## 二、实验和与计算结果的比较

### 1. 主振荡器-三程放大系统实验装置

我们设计和研制了一台图 1 所示的多程 MOPA 板条固体激光系统,用 5mm × 13mm × 130mm 的磷酸盐钕玻璃作为工作介质,端面磨成布儒斯特角。为了避免对偏振光产生损耗,实验中没有采用波片来改变激光的偏振性,而采用了棱镜折返光路的方法成功地实现了在板条中光路往返三次的多程放大。

### 2. 实验的关键技术

(1) Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体调 Q 技术 调 Q 固体激光器能提供脉宽在数百纳秒到纳秒量级的高峰值功率的光脉冲。掺四价铬的 YAG 晶体具有宽的吸收带和良好的饱和吸收性质。经理论分析<sup>[5]</sup>和反复实验,我们在磷酸盐钕玻璃板条激光谐振腔内插入高质量的新型 Cr<sup>4+</sup>:YAG 调 Q 晶体,实现了被动调 Q 输出,其关键是要仔细选择 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的几何参数和 Cr<sup>4+</sup> 的浓

度, 以与板条激光介质和谐振腔的输出耦合率等参数相匹配。与用电光或声光开关主动调 Q 激光器相比,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体被动调 Q 装置较为简单; 与被动调 Q 激光器中使用的染料调 Q 器件相比,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体被动调 Q 有光化学性质稳定、热导性好、损伤阈值高等优点。实验中用平凹稳定腔, 激活介质在低泵浦能量下工作在阈值附近, 重复频率为 0.2 Hz, 调 Q 晶体首先在激光束中心处即基模位置附近打开, 这样, 从振荡器就可以得到稳定的脉宽为 100 ns 线偏振基模高斯激光脉冲输出。

(2) 棱镜偏折光路技术 由于振荡级内置布氏角板条介质, 输出为  $p$  方向的线偏振光。用图 1 所示的棱镜偏折光路的方法实现多程放大, 比一般的偏振耦合方式有效地避免了板条对  $s$  光的反射与  $1/4$  波片和偏振片的吸收, 因而提高了效率。同时, 这种多程放大装置结构简单, 性能稳定, 对失调不灵敏。实验中仔细调节光路, 利用此装置还可实现五程、七程等多程放大, 当然, 这样也增加了调节光路的难度。

### 3. 实验结果和与计算的比较

(1) 光束质量的测量 用我们研制的二维 CCD 激光光束质量诊断系统<sup>[5]</sup> 测量三程放大后的光束质量。实验测得振荡级输出激光为基模高斯光束 ( $M_x^2 = 1.06$ ,  $M_y^2 = 1.08$ )。泵浦能量为 480 J 时, 经三程放大后输出光束的束宽随传输距离的变化见图 2, 对应于图 2 输出光束的光强分布见图 3, 图 4 给出了

放大器输出激光的  $M_x^2$ ,  $M_y^2$  因子随放大级的泵浦能量的变化。由图可看出输出的光束质量  $M^2$  因子随泵浦能量的增大变化不大。泵浦能量为 480 J 时, 获得近衍射极限的输出, 光束质量因子  $M_x^2 = 1.49$ ,  $M_y^2 = 1.57$ 。其主要

原因是: 在我们的实验中, 采用了布儒斯特角板条激光技术, 光束在板条介质内沿“之”字形光路前进, 有效补偿了热效应。采用流水-静态气体均匀面冷却技术, 获得较好冷却效果, 大大改善了光束质量。

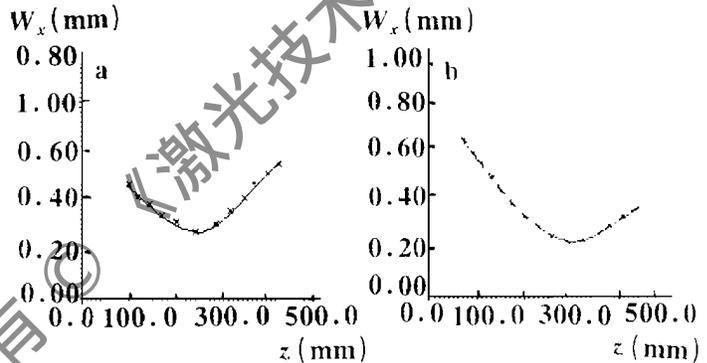


Fig. 2 Measured beam widths  $W_x$  and  $W_y$  as a function of the propagation distance  $z$  along a—the  $x$  and b—the  $y$  directions for the three pass amplifier  
× —measured value

原因是在我们的实验中, 采用了布儒斯特角板条激光技术, 光束在板条介质内沿“之”字形光路前进, 有效补偿了热效应。采用流水-静态气体均匀面冷却技术, 获得较好冷却效果, 大大改善了光束质量。

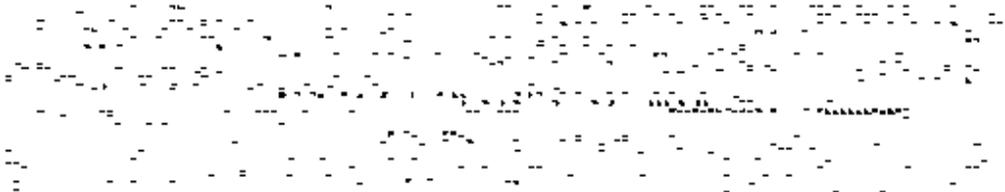


Fig. 3 a—two-dimensional intensity distribution of the amplified output laser pulse b—one-directional beam profiles along the  $x$  and  $y$  directions recorded by a beam quality diagnostic system

(2) 放大系统的输出能量和输出脉冲时间分布 我们用上海光机所生产的 MODEL PT-1 LASER ENERGY METER 来测量放大器的输出能量。输出能量随泵浦能量的变化的实验值示于图 5, 从图可知, 输出能量随泵浦能量的增加而呈指数增大, 放大器增益并未饱和。当放

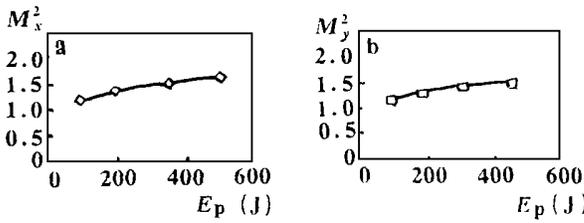


Fig. 4 The beam quality factors a— $M_x^2$  b— $M_y^2$  along the x and y directions are plotted against pumping energy  $E_p$

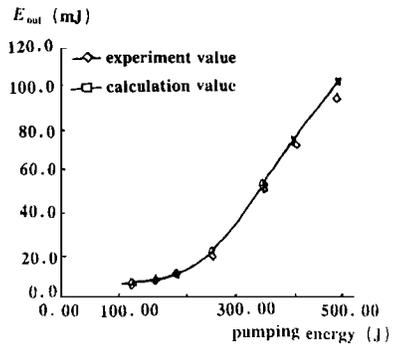


Fig. 5 Comparison of the output energy  $E_{out}$  between experiment and numerical calculation

大级泵浦能量为 480J 时, 输出能量为 91mJ。将由实验测得的放大器增益和介质的损耗系数代入公式进行计算, 所得结果也示于图 5。从图 5 可知, 实验值略为偏小, 其原因主要是在计算中我们没有考虑板条端面和边缘产生的损耗。为了对激光输入和输出的时间脉冲进行比较, 用 TEK7623A 示波器对激光的时间脉冲进行测定, 测得的结果如图 6a 和图 6b 所示, a 为由振荡器输出的时间脉冲, b 为由放大器输出的时间脉冲。图 6c 为拟合图 6a 的曲线作为放大器输入脉冲, 代入公式计算得到的由放大器输出的脉冲波形。计算和实验结果符合得较好。



Fig. 6 Temporal output pulse profiles from a—the Q-switch oscillator b, c—the three-pass amplifier, a, b—experimental result (50ns/division) c—numerical calculation

#### 四、小 结

我们的实验研究表明, 对设计合理的磷酸盐钕玻璃布儒斯特角板条主振荡-多程放大系统, 采用均匀面泵浦、面冷却、在振荡级插入  $Cr^{4+}$ : YAG 晶体调 Q 和棱镜偏折光路技术, 得到光束质量因子  $M_x^2 = 1.49$  和  $M_y^2 = 1.57$ , 能量增益为 23 的近衍射极限脉冲输出。其装置简单, 具有推广应用意义。用实验测得的放大器的参数作了数值计算, 二者符合较好。若优化系统的参数, 增加泵浦能量(目前泵浦能量提高受到电源限制), 可进一步提高增益和输出能量。

#### 参 考 文 献

- 1 Van Wonerghem B M, Murray J E. SPIE, 1997; 3047: 66
- 2 Bikmatov R G, Chemyak V M. SPIE, 1997; 3047: 171
- 3 Lowdermilk W H, Murray J E. J A P, 1980; 51: 2436
- 4 张 彬, 吕百达. 中国激光, 1996; 12: 1061
- 5 冯国英, 吕百达, 孔繁龙 *et al.* 强激光与粒子束, 1997; 9: 491~ 495

作者简介: 吕百达, 男, 1943 年出生。教授, 博士生导师。主要从事新型和高功率固体激光器器件与技术、光腔物理与光束传输变换的研究。