

文章编号: 0253-2239(2007)10-1827-4

# 板条激光放大器中寄生振荡的研究\*

程小劲 徐剑秋

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 寄生振荡的存在使得放大器在信号光到达之前消耗了大量的反转粒子数,降低了放大器的激光增益和储能效率,严重地影响了激光放大器的性能,尤其对高功率激光放大器。在理论分析和实验研究的基础上,以 Nd:YAG 晶体板条为例,用 8 条半导体激光阵列对晶体进行双侧抽运,研究了高功率激光放大器的寄生振荡现象,分析了板条晶体寄生振荡产生的原因,并详细比较了晶体在不同的抽运功率和表面处理下的放大效果,得到了 2 倍的单程放大,当输入能量为 140 mJ 时,获得了 278 mJ 的激光输出。

**关键词:** 固体激光器; 半导体激光抽运; 板条晶体; 寄生振荡

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Research on Parasitic Oscillation in Slab Amplifiers

Cheng Xiaojin Xu Jianqiu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** Existence of parasitic oscillation makes the amplifier consume lots of inversed population before the arrival of signal pulse, which reduces peak gain and storage efficiency and influence amplification performance greatly, especially for high-power amplifiers. By pumping Nd:YAG slab with 8 laser diode arrays, parasitic oscillation in high-power amplifier was studied both theoretically and experimentally. The parasitic oscillations in the slab with different surfaces treatment were compared. When the pump energy was 1.28 J and the input pulse energy was 140 mJ, the single-pass amplification of  $\beta=2$  and the output pulse energy of 278 mJ was obtained.

**Key words:** solid-state lasers; laser-diode pumping; crystal slab; parasitic oscillation

## 1 引 言

如果放大器光学表面的反射能够引起足够的反馈,放大器就会在信号脉冲到达前发射激光,这就是放大器的自发辐射(ASE),工作介质边缘的内反射能显著增大自发辐射,当这些反射能导致产生封闭路径时自发辐射现象更为严重,并且得到强的反馈机理,当激光介质内的增益超过损耗时,就建立起寄生振荡<sup>[1]</sup>。寄生振荡对激光器<sup>[2]</sup>和激光放大器的性能有很大影响,对于放大器而言,寄生振荡的存在使得放大器在信号光到达之前就消耗了大量的反转粒子数,降低了晶体的峰值增益和存取效率,影响了激光放大器尤其是高功率激光放大器的性能,因此消

除激光器工作物质内的寄生振荡对提高激光器的功率有着很重要的意义。

中科院上海光学精密机械研究所的研究人员对神光二号中片状放大器的寄生振荡做过一些研究,得到可以通过减少掺杂浓度,并相应增加钕玻璃片厚度的方法来减小寄生振荡,这种方法以减小抽运能量的吸收率为代价<sup>[3]</sup>。中国工程研究院的贺少勃等人也对高功率片状激光放大器的自发辐射进行了研究,重点研究了自发辐射对储能的影响<sup>[4]</sup>。

20 世纪 70 年代研究人员对盘片激光器的寄生振荡做过研究<sup>[5~10]</sup>。对于固体板条激光器,斯坦福大学的 Shally Saraf 等<sup>[11]</sup>研究端面抽运板条激光器

\* 国家自然科学基金(60678016)资助课题。

作者简介:程小劲(1978—),男,安徽人,博士研究生,主要从事固体激光器的研究。E-mail: xjcheng@siom.ac.cn

导师简介:徐剑秋(1969—),男,陕西人,研究员,博士生导师,主要从事固体激光器的技术和理论研究。

E-mail: jqxu@siom.ac.cn

收稿日期: 2007-01-19; 收到修改稿日期: 2007-03-15

的寄生振荡。本文以 Nd:YAG 为工作介质,分析比较不同表面处理和抽运条件下工作介质的放大效果,解决了侧面抽运的板条晶体的寄生振荡问题。

## 2 实验模型及理论分析

图 1 为实验装置的示意图,振荡器输出的 1064 nm 的激光经隔离器和全反镜  $M_1, M_2$  反射后进入放大级,放大级的 Nd:YAG 晶体的掺杂原子数分数为 1.0%,晶体板条在 X 方向的高度为 10 mm, Y 方向的宽度为 5 mm, Z 方向的长度为 50 mm。晶体每侧各有 4 组半导体激光二极管阵列(LD),激光二极管发出的 808 nm 抽运光经柱透镜耦合后抽运到两个 XZ 面上,两个 XZ 面同时也是冷却面,直接与冷却水接触。晶体的两个输入输出端面(10 mm×5 mm)与 XZ 面切成 87° 夹角,使得两个端面与两个 XZ 面在 YZ 截面内成梯形结构,不易在这两个端面之间直接形成寄生振荡。

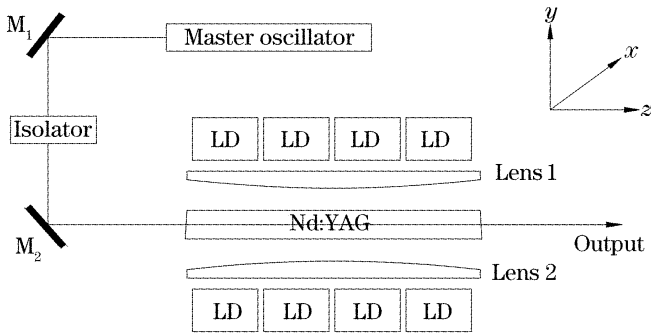


图 1 主振荡器-功率放大器示意图

Fig. 1 Master oscillator-power amplifier

激光振荡器的阈值条件是<sup>[1]</sup>

$$R_1 R_2 \exp[(g - \alpha)L] = 1, \quad (1)$$

式中  $R_1, R_2$  为振荡器两个镜子表面的反射率,  $g$  为晶体单位长度内的增益系数,  $\alpha$  为单位长度内的损耗系数,  $L$  为光在两个镜子之间往返一次的距离。晶体自身形成寄生振荡时,晶体表面就相当于振荡器的反射镜。在晶体内部,存在不止一条路径能形成回路,根据(1)式,可以推导出晶体内部第  $i$  条回路形成寄生振荡的阈值条件:

$$\prod_j R_j \exp[(g_i - \alpha_i)L_i] = 1, \quad (2)$$

式中  $j$  为在表面发生反射的次数,  $R_j$  为  $j$  次反射表面的反射率,  $g_i$  为单位长度内的增益系数,  $\alpha_i$  为单位长度内的损耗系数,  $L_i$  为光在晶体内部走过的路程。根据(2)式,可以推导出  $g_i$  的表达式:

$$g_i = -\ln \prod_j R_j / L_i + \alpha_i. \quad (3)$$

晶体内部存在不止一条寄生振荡的路径,由于晶

体掺杂的不均匀性,可以得到平均单位长度内的增益系数:

$$\bar{g} = \sum_i g_i / (\sum_i i). \quad (4)$$

根据以上公式可知,减小  $g$  的大小可以降低寄生振荡产生的可能性,但这同时降低了抽运能量的吸收率。因此如果不想降低抽运能量的吸收率,就要减小激光在晶体表面的反射率,降低激光在晶体内部形成回路的可能性。

## 3 不同表面处理和抽运条件下的寄生振荡

为了不降低抽运能量的吸收率,采用降低晶体表面反射率的方法来消除寄生振荡。晶体的两个输入输出端面镀了 1064 nm 的增透膜,并且两个端面不平行,因此在这两个表面间不会直接形成寄生振荡。下面分析其它 4 个侧面在不同的表面处理下的寄生振荡情况。

### 1) 4 个侧面均抛光

4 个侧面均抛光处理时,振荡器输出光如图 1 所示进入晶体,在抽运频率 100 Hz,抽运能量从 320 mJ 到 1280 mJ 的情况下均没有看到放大效果(如图 2 的曲线 I 所示)。关掉振荡器,用示波器分别测量抽运光进入放大器晶体前后的波形(图 3)。图 3(a)是单纯的抽运背景光的波形,图 3(b)为出现寄生振荡时测得的波形图。通过比较图 3(a),图 3(b)可以看出,出现寄生振荡后,波形成为了一个有台阶的形状。再通过光谱仪确认,在没有振荡器输出光经过的情况下,只打开放大器的抽运源,用光谱仪还能在放大器晶体附近检测到 1064 nm 的荧光。波形(2)的台阶就因为抽运光经过晶体后产生 1064 nm 的荧光导致的。这表明在 4 个侧面均抛

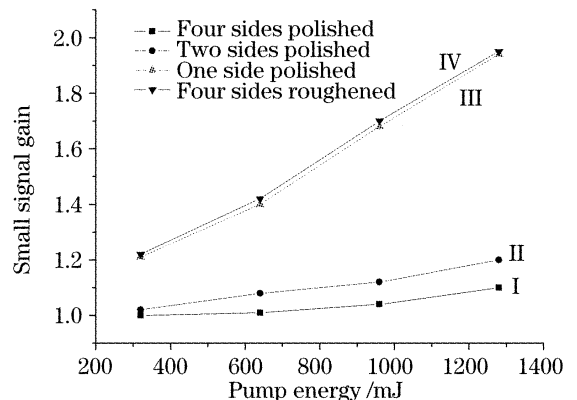


图 2 不同表面处理下的小信号增益

Fig. 2 Small signal gain in different surface treatment

光的情况下,晶体本身的寄生振荡非常强,放大器晶体在信号脉冲到来之前消耗掉了反转粒子数,因此看不到放大现象。当遮掉一部分抽运光,也就是晶体只有部分面积有抽运光时,在抽运功率不变的情

况下,台阶变宽,如图 3(c)所示。这说明部分抽运在改善晶体热效应的同时<sup>[12]</sup>,也延缓了寄生振荡产生的时间。

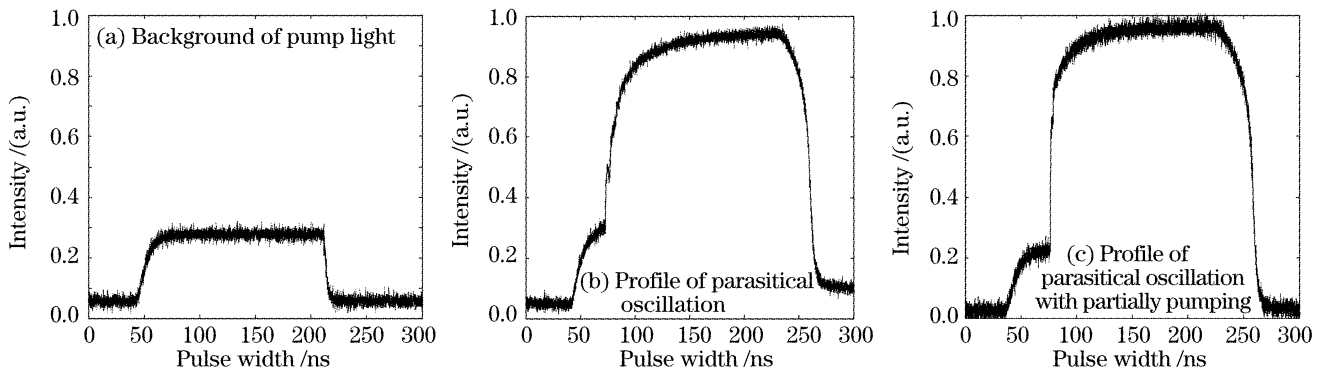


图 3 寄生振荡的时间波形图

Fig. 3 Temporal profile of parasitical oscillation

当光束在晶体内形成的回路接近全内反射条件时,寄生振荡产生的阈值显著降低。Nd:YAG 晶体的折射率为 1.82,这样晶体与空气的全反角为  $33.35^\circ$ ,与水接触的全反角为  $47^\circ$ 。因此,当每个侧面都抛光时,如图 4 所示,在每个截面内均存在路径使得光至少可以在 3 个表面全反,这样就为寄生振荡的存在提供了有利条件。

类似于图 4(b)的回路所导致的寄生振荡。在同样的测试条件下,得到了图 2 曲线 III,由于受到电抽运源的限制(电源的工作极限是 100 A,1000 Hz),晶体在 100 A 抽运时还未到饱和状态,如果抽运电流能继续增加的话,放大倍数还可以增加。当将放大器内的光路由直通改成在抛光大面上反射一次(图 5),得到的放大倍数与直通类似,但测出的热透镜焦距比直通大,这说明在晶体内折射一次可以在一定程度上改善晶体的热透镜效应。

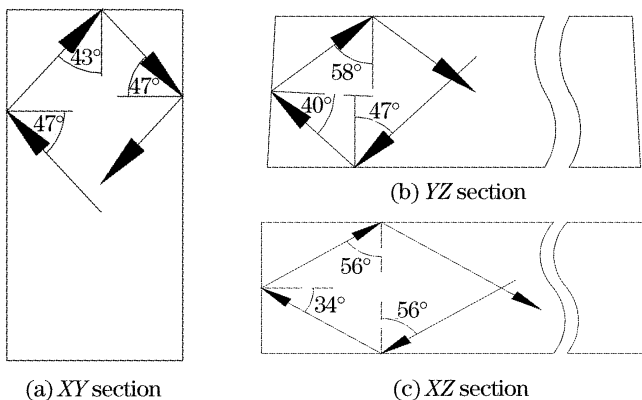


图 4 不同截面内的全内反射路径

Fig. 4 Total internal reflection in different cross-sections

2) YZ 两个侧面(50 mm×5 mm)加工成毛面

为了解决寄生振荡问题,先将 YZ 两个侧面加工成毛面,使得光在这两个侧面上散射,因此应该可以消除掉类似于图 4(a)和图 4(c)所示的回路造成的寄生振荡。在同样的抽运条件下对放大器的放大倍数进行了测试,测试结果如图 2 的曲线 II,虽然与 4 个侧面均抛光的情况相比,有一定的放大效果(最高可到 1.2 倍),但仍不能达到设计要求,这表明晶体内部仍存在严重的寄生振荡。

3) YZ 两个侧面和其中一个 XZ 面加工成毛面  
再将 XZ 面中的一个加工成毛面,这样可以消除

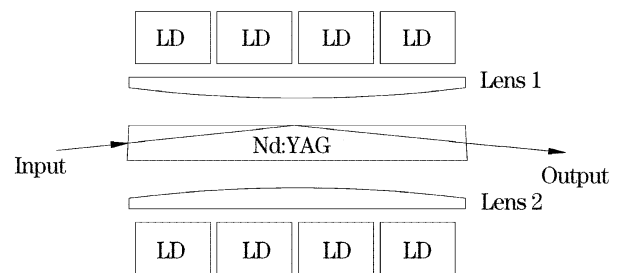


图 5 1064 nm 激光反射一次经过放大器晶体

Fig. 5 1064 nm laser passing amplifier slab by reflecting on slab surface

4) 将晶体 4 个侧面均加工成毛面

再将晶体另一个 XZ 面(50 mm×10 mm)加工成毛面,然后在同样的条件下测试晶体的放大效果,得到的晶体的放大效果与将一个 XZ 面加工成毛面时的结果类似(图 2,曲线 IV),在 1280 mJ 的抽运能量下,同样得到了 2 倍的放大。这表明,再将晶体的另一个 XZ 面加工成毛面对提高晶体的放大系数并无显著的影响,因此,实验最终使用的晶体均是只有 3 个侧面是毛面的晶体。另一个 XZ 面作为反射面让振荡器输出光在晶体内部反射一次以改善热透镜效

应。

## 4 结果分析与结论

寄生振荡是困扰放大器设计的一个重要问题,对高功率的激光放大器尤其如此。本文在分析寄生振荡现象产生机理的基础上,详细研究了 Nd:YAG 板条晶体的4个侧面在不同的表面处理下的放大效果,分析结果与斯坦福大学的 Shally Saraf 等人对端面抽运的板条晶体的研究结果有些差异,这可能与晶体的大小和形状有关,Shally Saraf 等使用的晶体的激光输入输出端面很小,只有  $1.1\text{ mm} \times 0.9\text{ mm}$ ,并且将其中两个相对的侧面加工成不平行,这在一定程度上可以防止寄生振荡的产生,因此 Shally Saraf 等在对两个侧面进行处理后就得到了良好的放大效果。

当将抽运光的重复频率从 10 Hz 逐渐增加到 1000 Hz 时,发现放大器的放大倍数并没有因为功率变大而降低,输入能量为 140 mJ 时,获得了 278 mJ 的激光输出。这表明由于晶体的两个 XZ 面直接与冷却水接触,因此有很好的冷却效果,使得在高功率时没有使晶体的热效应恶化到可以影响晶体放大倍数的程度。合理的晶体结构和适当的表面处理方式对消除激光放大器的寄生振荡很重要。对于高功率激光放大器,良好的冷却系统同样是必须的。

## 参 考 文 献

- 1 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 150~194
- 2 Wang Chunyu, Lu Yutian, Zhu Xiaolei. Effect of amplified

- spontaneous emission on performance of all solid state laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(4): 433~437 (in Chinese)
- 王春雨,陆雨田,朱小磊. 放大器自发辐射对全固态激光器调 Q 性能的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 433~437
- 3 Zheng Yuxia, Zhu Jian, Qian Liejia *et al.*. Investigation of parasitic oscillation in main amplifier of the facility "SHENGGUANG-II"[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1367~1370
- 郑玉霞,朱 俭,钱列加 等. "神光-II"实验装置主放大器中寄生振荡的研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(10): 1367~1370
- 4 He Shaobo, Yu Haiwu, Zheng Wanguo *et al.*. Research of amplified spontaneous emission in high power slab laser amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(5): 603~606 (in Chinese)
- 贺少勃,於海武,郑万国 等. 高功率激光片状放大器中自发辐射放大研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(5): 603~606
- 5 J. B. Trenholme. Fluorescence amplification and parasitic oscillation limitations in disk lasers [R]. *Memorandum Rep.*, 2480, Naval Research Lab, Washington DC, July 1972
- 6 J. A. Glaze, S. Guch, J. B. Trenholme. Parasitic suppression in large aperture Nd:glass disk laser amplifiers[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(12): 2808~2811
- 7 David C. Brown. Parasitic oscillations in large aperture Nd<sup>3+</sup>: glass amplifiers revisited [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(10): 2215~2217
- 8 David Benfey, David brown, Joseph Chernoch. Amplified spontaneous emission in high power slab lasers [J]. *Adv. Solid-State Lasers*, Salt Lake City, UT(1990); paper We1-1
- 9 Gary J. Linford, Lowell W. Hill. Nd:YAG long lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(6): 1387~1394
- 10 G. P. Kostometov, N. N. Rozanov. Amplified spontaneous radiation emitted from disk laser amplifiers[J]. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1976, **6**(6): 696~699
- 11 Shally Saraf, Supriyo Sinha, Arun Kumar Sridharan *et al.*. Status of high power laser development at Stanford [C]. LSC2003, Hannover, Germany, 2003
- 12 Cheng Xiaojin, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effects in partially laser-diode pumped slab lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 854~858 (in Chinese)
- 程小劲,牛金富,徐剑秋. 部分抽运的板条激光器的热效应分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 854~858