

脉冲半导体泵浦掠入射 Nd:YVO₄ 板条振荡器储能优化

李之通, 于灏洋, 程思齐, 姜梦华, 惠勇凌, 雷 旬, 李 强

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘 要: 板条放大器中寄生振荡的存在严重影响了激光放大器的效率, 降低了板条晶体的储能。为抑制掠入射板条寄生振荡、提高晶体储能, 对掠入射板条放大器的增益介质 Nd:YVO₄ 晶体进行了表面处理。该处理用离子溅射的方法, 对板条的上下两个梯形面和梯形长边所在的矩形面镀锗, 抑制板条内部的寄生振荡。通过实验对镀锗和未镀锗板条振荡器的自由振荡输出和调 Q 输出特性进行了对比, 镀锗板条振荡器在调 Q 下的阈值电流降低了 15%, 晶体的储能提高了 86.9%; 而两种板条在调 Q 条件下输出的光束质量、脉宽大小、光斑形状基本一致。实验结果表明, 板条表面镀锗是抑制其内部寄生振荡、提高储能的有效方法。

关键词: 储能; 板条结构; 镀锗; 寄生振荡

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0205003

Energy storage optimization of grazing incident Nd:YVO₄ slab oscillator pumped by pulsed laser diode

Li Zhitong, Yu Haoyang, Cheng Siqu, Jiang Menghua, Hui Yongling, Lei Hong, Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Parasitic oscillation in the slab amplifier affects the efficiency of laser amplifier and reduces the stored energy of slab crystal. The surface of Nd:YVO₄, gain of grazing incident slab amplifier was processed to suppress the parasitic oscillation in the slab and improve the energy storage ability of slab crystal. Through ion sputtering method, the germanium was plated on top and bottom surface and the back surface to suppress the parasitic oscillation. In germanium plated and without germanium plated conditions, the slab oscillator's output characteristics were compared between free oscillation and Q-switched mode, threshold current reduced 15% in plating germanium slab oscillator, and the stored energy improved 86.9%. The beam quality, pulse duration and spot pattern of plating germanium slab oscillator were basically the same to without plating germanium slab oscillator in Q-switched mode. Experimental result indicates plating germanium on the face of slab is an effective method to suppress the parasitic oscillation and improve the energy storage ability of crystal.

Key words: stored energy; slab structure; plating germanium; parasitic oscillation

收稿日期: 2016-06-06; 修订日期: 2016-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(61378023)

作者简介: 李之通(1991-), 男, 硕士生, 从事固体激光技术方面的研究。Email: lizhitong@email.bjut.edu.cn

导师简介: 雷旬(1970-), 男, 副教授, 博士, 主要从事固体激光技术方面的研究。Email: leihong@bjut.edu.cn

通讯作者: 姜梦华(1981-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事固体激光技术方面的研究。Email: jmh@bjut.edu.cn

0 引言

高峰值功率、高光束质量、窄脉冲宽度的激光脉冲在激光探测、激光加工、科学研究等方面具有重要的应用价值和研究价值。为了获得高峰值功率、高光束质量、窄脉冲宽度的激光脉冲,激光器通常采用振荡-放大结构。由振荡器获得高光束质量的窄脉冲激光,放大器对振荡器获得的种子激光器进行放大,获得高峰值功率。对于半导体侧面泵浦掠入射板条放大器,种子光在放大器内部经历一次全反射,能够实现高增益、高光束质量激光放大,而且结构简单紧凑,有广阔的应用前景。

近年来,对窄脉宽、高峰值功率的板条放大器已经有了很多报道。例如:Takaharu Yoshino^[1]等人设计了一种多通板条激光放大器,通过 70 W 的连续泵浦实现了对皮秒种子激光的高功率、高效率、高光束质量的放大。J. Morgenweg 等人^[2]首次在掠入射式板条放大结构中用 880 nm 准连续泵浦源,泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,得到了近衍射极限的脉冲序列,其中每个脉冲的能量超过 100 μJ,且强度稳定性超过 1%。2015 年 Takashige Omatsu 等人^[3]在多通放大的板条放大器中通过在 Nd:YVO₄ 晶体上键合蓝宝石来解决结构中的热效应,得到了 1 064 nm,脉宽 8.8 ps,近衍射极限($M^2 < 1.1$)的脉冲输出。其中平均输出功率达到 44.5 W,光学效率达到 56%。Mateusz Kaskow 等人^[4]使用堆叠式二极管在单通情况下,对比了不同入射角度和腔长下输出光的斜效率。并且在一通时,晶体内部光线和晶体底边为 4°的条件下,通过双通放大得到了超过 20 mJ 的能量输出。斜效率达到 24.5%,光束质量为 1.25。

但是在上述板条放大器中并没有对放大过程中产生的寄生振荡进行抑制,因此其效率都不够高。人们知道在放大过程中,特别是 LD 侧面脉冲泵浦时会易获得较高的泵浦功率^[5],由于增益区域内储能密度很高,晶体内部很小的剩余反射就会放大自发辐射,当自发辐射的增益超过损耗时就会在晶体内部建立起寄生振荡^[6]。形成的寄生振荡会消耗密度高的反转粒子数,导致在放大过程中增益降低,影响晶体内部能量的存取效率,进而影响了激光放大器的性能和效率^[7-8]。为了使寄生振荡最小化,目前的常

用方法是对掠入射板条切割一定的角度,通常为布儒斯特角,或者镀上增透膜,或者给侧面打毛^[6],但 these 方法并未去除晶体内部高储能密度的寄生振荡。如:2001 年 M.J.Damzen 等人^[9]采用掠入射式侧面泵浦的激光振荡器中,使用 1% 掺杂的 Nd:YVO₄,板条尺寸 22 mm×5 mm×2 mm,在 5 mm×2 mm 的两边上镀有增透膜,对晶体采用 5°的切角来减小自激振荡。最终在连续泵浦功率 35 W 时,多模时输出功率 22.5 W,光光转换效率 64%,斜效率 72%。单模输出时功率 13.8 W,光光转化效率 40%。对板条晶体切角进行寄生振荡的抑制是常用的方法,然而这种方法只对光路振荡方向进行了抑制,未抑制由非通光面的反射引起的寄生振荡。除此之外还有对晶体进行玻璃包边的方式进行寄生振荡的抑制。2006 年 A. K. Sridharan 等人在 Zigzag 激光放大器中比较了抛光/粗糙表面、晶体切角、晶体包边,这三种方法对寄生振荡的抑制^[10],但是玻璃包边的方式经常用在较大的晶体上,并且需要考虑热应力和折射率匹配等一些列问题^[11]。

为了进一步抑制寄生振荡提高晶体储能,文中对 Nd:YVO₄ 掠入射板条进行切角、镀增透膜、侧面打毛的同时还对增益介质上下表面和侧面进行了表面处理,用离子溅射的方法镀铱来吸收板条晶体内部的自发辐射,抑制板条内部的寄生振荡从而提高晶体储能。文中分析比较了板条在镀铱和未镀铱条件下激光振荡器阈值的变化和阈值附近输出的能量大小。根据储能对比实验结果,晶体储能提高了 86.9%。

1 对比实验系统结构

激光振荡器实验装置如图 1 所示。泵浦源采用 808 nm、200 Hz、50 μs 脉冲半导体 bar 侧面泵浦,增益介质选择为掺杂浓度为 1 at% 的 Nd:YVO₄。Nd:YVO₄ 晶体沿 a 轴切割,尺寸为 22 mm×5 mm×2 mm,板条晶体呈梯形,两侧切角 13°,并且镀有 1 064 nm 增透膜,泵浦面镀 808 nm 增透膜,在两个梯形面上分别加铜热沉进行冷却,如图 2 所示。实验比较的两种板条,一种板条除三通光面,其他面未处理;另一板条用离子溅射的方法对其两个梯形大面,以及梯形板条长边所在的矩形表面(22 mm×2 mm)进行镀铱,如图 3 所示,镀铱层的厚度为 1 μm,进行了单面

镀锗层的小信号的吸收测量,得到此厚度下镀锗层对 1064 nm 光的吸收可达 99%,而且镀锗层大于 1 μm 时,吸收率变化不大。实验中振荡光的角度为 30°(晶体外部光线与晶体底边夹角),为了提高输出脉冲的能量密度,分别采用焦距为 170 mm 和 38.1 mm 的柱透镜对泵浦光的快轴和慢轴方向进行压缩,压缩后泵浦光斑尺寸,水平方向 4 mm,垂直方向 0.5 mm。实验中为了获得调 Q 脉冲输出,在谐振腔内靠近全反镜一侧加入透过率 $T=4.78\%$ 的 Cr:YAG 调 Q 晶体,输出镜的透过率 $T=90\%$ 。

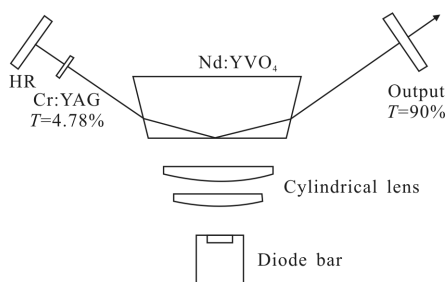


图 1 振荡器结构俯视图

Fig.1 Construction of oscillator

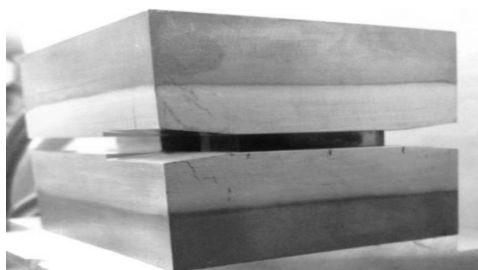


图 2 晶体与热沉整体图

Fig.2 Picture of Nd:YVO₄ bounce slab welt with heat sinks

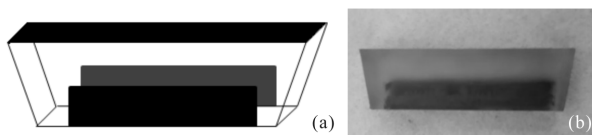


图 3 镀锗板条

Fig.3 Plating Ge slab

2 镀锗抑制寄生振荡的基本原理

晶体内部的自发辐射只要经过反射形成回路就会形成振荡消耗晶体上能级粒子数,实验中采用镀锗的目的就在于阻断晶体内部的自发辐射的反射形成振荡环路。

在不对晶体表面镀锗条件下,板条晶体内部的

光束就会在水平和垂直方向形成振荡自激的闭合回路。在水平方向上,如果不镀锗就会在梯形长边所在的面(22 mm×2 mm)反射,形成寄生振荡环路,如图 4 所示。垂直方向,晶体内部自发辐射振荡的情况如图 5 所示,自发辐射在板条两个梯形大面之间来回反射,消耗晶体的能量。笔者对晶体的两个梯形大面,以及梯形板条长边所在的矩形表面(22 mm×2 mm)进行镀锗后,因为镀锗层对 1064 nm 的光吸收为 99%,所以当自发辐射的光达到此界面时绝大部分的光被镀锗层吸收,几乎没有自发辐射光发生反射,阻止了振荡环路的形成。晶体内自发辐射的光没有被放大,从而降低了自发辐射对晶体内部能量的损耗,提高了晶体储能。

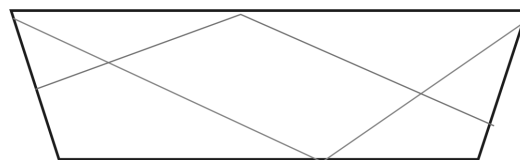


图 4 自发辐射在晶体内部水平方向的振荡

Fig.4 Oscillation of spontaneous radiation in the horizontal direction inside the crystal



图 5 自发辐射在晶体内部垂直方向的振荡

Fig.5 Oscillation of spontaneous radiation in the vertical direction inside the crystal

3 对比实验结果及分析

为了验证板条镀锗会抑制晶体内部的寄生振荡提高晶体的储能,分别对镀锗和未镀锗的同尺寸板条晶体进行了实验比较。实验中分别比较了镀锗和未镀锗板条在自由振荡和调 Q 振荡下的输出。其中,自由振荡(不加 Cr:YAG 调 Q 晶体)的板条振荡器,除不含有 Cr:YAG 外,整体结构如图 1 所示,振荡器通过脉冲泵浦获得脉冲激光输出。调 Q 板条振荡器整体结构如图 1 所示,通过调 Q 获得脉冲。通过对比镀锗与未镀锗晶体在振荡器刚好输出脉冲激光时的阈值来比较两种晶体的储能能力。

通过图 6 可以看出,在自由振荡的条件下,镀锗板条振荡器在泵浦电流 100 A 时就开始有了输出,而未镀锗板条在 155 A 时才有输出。镀锗板条振荡

器比未镀锗板条振荡器的阈值电流降低了 35.5%。在 180 A 时镀锗晶体输出的脉冲能量是未镀锗晶体的 5.9 倍。

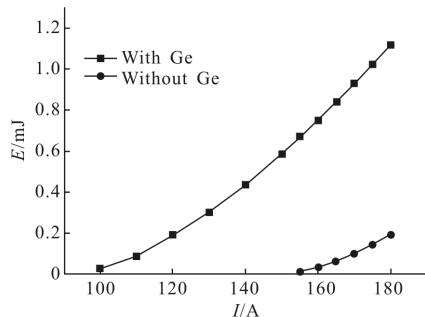


图 6 自由振荡时输出能量图

Fig.6 Output energy free oscillation

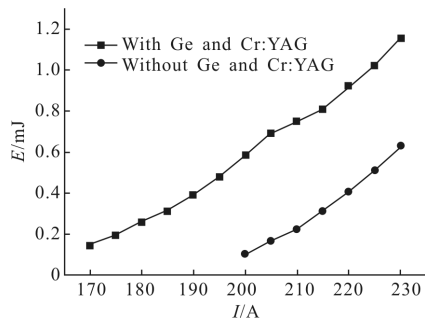


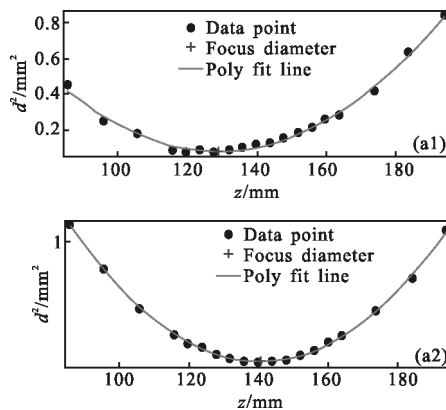
图 7 加调 Q 后输出能量图

Fig.7 Output energy with Q-switch

在腔内加入 Cr:YAG 调 Q 晶体时，镀锗板条振荡器的阈值为 170 A，而未镀锗板条的阈值为 200 A。镀锗板条振荡器的阈值电流比未镀锗板条降低了 15%。在 230 A 时，镀锗板条比未镀锗板条输出的脉冲能量提高了 86.9%。

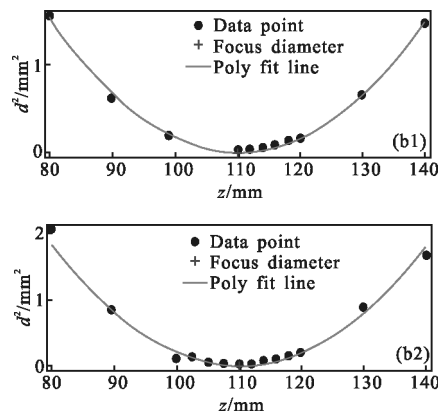
实验中还对两种不同板条振荡器在调 Q 模式下(加 Cr:YAG 调 Q 晶体)输出的光束质量、脉冲宽度、光斑形状进行了对比,如图 8 所示。其中,光束质量的测量,是在输出镜后加入 $f=125\text{ mm}$ 的透镜对光束进行压缩,然后加入衰减片对光束进行衰减,然后通过 CCD 分别测出光束束腰前后对称位置光斑的直径,输入软件求得光束质量 M^2 。

从图 8 中可以看出,镀锗板条输出的光斑光束质量 X 方向 2.86, Y 方向 3.66; 阈值处的脉冲宽度 70.56 ns。未镀锗板条输出的光束质量 X 方向 2.88, Y 方向 3.05; 阈值处脉冲宽度 70.49 ns。两种不同板条振荡器的以上两种输出参数十分接近,而且两者从 CCD 中读出的光斑形状也很相似。



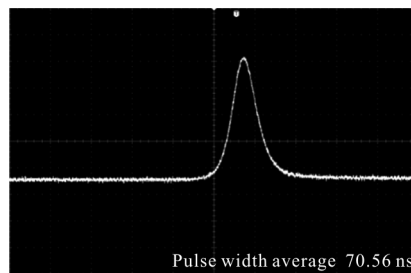
(a) 镀锗板条振荡器 X, Y 方向的光束质量

(a) Beam quality of the oscillator using plating Ge slab in X, Y



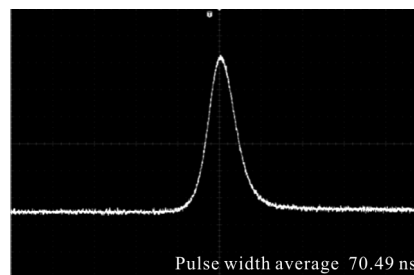
(b) 未镀锗板条振荡器 X, Y 方向的光束质量

(b) Beam quality of the oscillator without plating Ge slab in X, Y



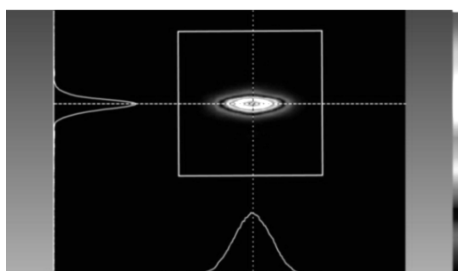
(c) 镀锗板条脉宽

(c) Pulse width with Ge



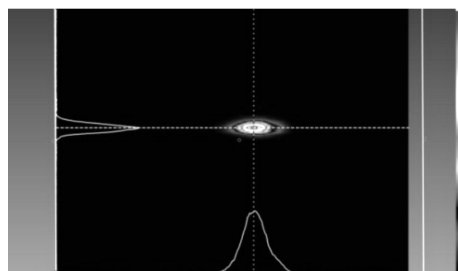
(d) 未镀锗板条脉宽

(d) Pulse width without Ge



(e) 镀锗板条光斑形状

(e) Beam spot shape with Ge



(f) 未镀锗板条光斑形状

(f) Beam spot shape without Ge

图 8 不同板条振荡器输出参数

Fig.8 Output parameter of different slab oscillators

以上实验现象和实现参数可以证明镀锗和未镀锗的板条在输出的光束质量、脉冲宽度、光斑形状都十分接近的条件下,镀锗的Nd:YVO₄掠入射板条振荡器的阈值得到了降低,输出的脉冲能量有很大的提高。

4 结 论

文中对掠入射板条放大器的增益介质Nd:YVO₄晶体进行了表面处理,在板条除了通光面和泵浦面之外,用离子溅射的方法镀锗,吸收板条晶体内部的自发辐射光,抑制板条内部的寄生振荡。文中通过对比实验,分别对镀锗和未镀锗板条自由振荡和调Q下的输出特性进行了对比,根据对比实验结果,镀锗板条的阈值电流降低了15%,晶体的储能提高了86.9%。两种条件下输出的光束质量、脉宽大小、光斑形状十分接近。因此可以看出,表面镀锗抑制了板条内的寄生振荡,提高了掠入射Nd:YVO₄晶体的储能能力。这对下一步进行的提高掠入射板条激光放大器的效率提供了新的方法和思路。

参考文献:

[1] Yoshino T, Seki H, Tokizane Y, et al. Efficient high-quality

picosecond Nd:YVO₄ bounce laser system [J]. *Opt Soc Am B*, 2013, 30(4): 894.

[2] Morgenweg J, Eikema K S. Tailored pulse sequences from an 880 nm pumped Nd:YVO₄ bounce amplifier[J]. *Opt Lett*, 2012. 37(2): 208-210.

[3] Abe M, Seki H, Kowa M, et al. High average power, diffraction-limited picosecond output from a sapphire face-cooled Nd:YVO₄ slab amplifier[J]. *Opt Soc Am B*, 2015, 32(4): 714-718.

[4] Kaskow M, Zendian W, Jabczynski J K, et al. Diffraction-limited, grazing-incidence Nd:YVO₄ slab laser side pumped by 2D laser diode stack [C]//SPIE, 2014, 9441: 94410F-94410F-8.

[5] Meng Peibei, Yan Fanjiang, Li Xu, et al. Influence of boundary condition and pump scheme on thermal effects of laser crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3216-3222. (in Chinese)

蒙裴裴, 颜凡江, 李旭, 等. 热边界和泵浦结构对激光晶体热效应的影响[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3216-3222.

[6] Koehner W. *Solid-state Laser Engineering* [M]. Berlin: Springer, 1999: 165-169.

[7] Cheng Xiaojin, Xu Jianqiu. Research on parasitic oscillation in slab amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1827-1830. (in Chinese)

程小劲, 徐剑秋. 板条激光放大器中寄生振荡的研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1827-1830.

[8] Cheng Xiaojin, Xu Jianqiu. Thermal effect on parasitic oscillation in solid-state slab laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(Z1): 310-313. (in Chinese)

程小劲, 徐剑秋. 固体激光器中热效应对晶体介质寄生振荡的影响[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(Z1): 310-313.

[9] Damzen M J, Trew M, Rosas E, et al. Continuous-wave Nd:YVO₄ grazing incidence laser with 22.5 W output power and 64% conversion efficiency[J]. *Optics Communications*, 2001, 196(1): 237-241.

[10] Arun Kumar S, Shailendhar S, Supriyo S, et al. Zigzag slabs for solid-state laser amplifiers: Batch fabrication and parasitic oscillation suppression [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(14): 3340-3351.

[11] Hu Junjiang, Meng Tao, Wen Lei, et al. Experiment investigation on residual stress of Nd:Glass edge cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 172-178. (in Chinese)

胡俊江, 孟涛, 温磊, 等. 激光钕玻璃包边残余应力实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 172-178.