第 16 卷 第 2 期 强 激 光 与 粒 子 束 Vol. 16, No. 2
2004 年 2 月 HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS Feb., 2004

文章编号:1001-4322(2004)02-0141-04

二极管泵浦内腔倍频抑制绿光噪声的实验研究*

王鹏飞[1], 姜东升[2], 吕百达[1], 赵 鸿[2], 杨 涛[2], 王建军[2], 赵书云[2]

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所,四川 成都 610064; 2. 华北光电技术研究所 国防科技重点实验室,北京 100083)

摘 要: 报道了在 Nd:YAG 棒和腔镜间插入四分之一波片,或在 KTP 倍频晶体和腔镜间插入四分之一波片,以及使用交叉双倍频晶体用以抑制二极管泵浦内腔倍频 Nd:YAG 激光器绿光噪声的实验结果。实验研究表明,使用上述三种方法之一能有效地减小折叠腔内的绿光噪声。用交叉倍频晶体可使噪声减小 18%~25%。实验结果与理论一致,对实验中一些问题和值得进一步改进的地方也进行了讨论。

关键词: 非线性光学; 内腔倍频固体激光器; 绿光问题; 折叠腔

中图分类号:TN248.13 **文献标识码**:A

二极管泵浦固体激光器的内腔倍频效率较高,但在腔内插入倍频晶体后,由于纵模之间的交叉饱和效应以及和频效应等非线性效应的影响,将导致输出倍频激光有较大的强度波动,这就是著名的“绿光问题”[1],它一直是限制二极管泵浦内腔倍频固体激光器应用的一个因素。针对线性腔中的“绿光问题”已经作了许多研究[2~7],折叠腔的情况讨论得较少,我们在文[6]中使用 Jones 矩阵法推导出了若干折叠腔内消除绿光噪声的腔配置方式,并提出了一些实验方案,如 QWP 片法(四分之一波片法)、交叉双倍频晶体法等,本文对其中一些典型方案给出实验结果及分析,并针对实验结果提出一些改进措施。

1 实验结果和分析

实验采用华北光电所研制的泵浦腔,该腔采用 25 个单条为 20W 的连续 LD bar(激光二极管条)作为泵浦源,单条的最大输出功率为 20W,输出波长 808nm,线宽约为 4nm。

激光二极管阵列的输出波长随温度的升高将向长波方向移动。我们通过控制冷却水的温度,使其输出波长中心与 Nd:YAG 晶体的中心最强吸收峰 808nm 相匹配,并确保整个泵浦腔内二极管阵列之间的最大温差不超过 1℃。

利用 EPM1000 型能量计+PM150-50 型功率探头测量输出绿光功率,用 THORLABS-DET210 PIN 管探测激光噪声,接在 PIN 管上的 Tektronix TDS 3052 型双通道彩色数字示波器用来记录激光噪声。

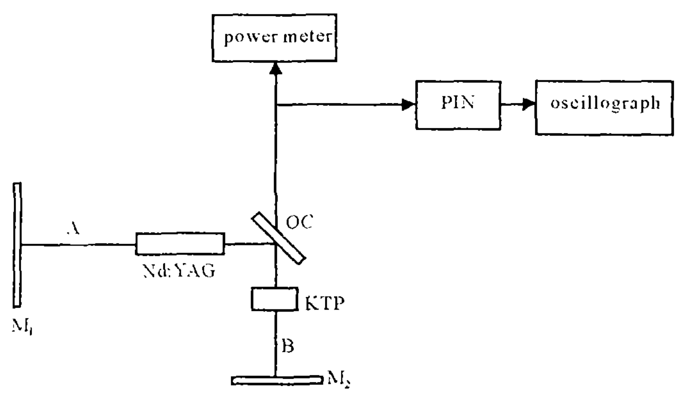


Fig. 1 Experimental set-up

图 1 实验装置示意图

1.1 在 Nd:YAG 棒与反射镜之间加入 QWP 片

图 1 是在 Nd:YAG 棒和反射镜之间(即 A 处)加入 QWP 片以抑制噪声的实验装置示意图。

折叠腔是由反射镜 M_1, M_2 和折叠镜(兼作绿光输出耦合镜 OC)构成,总腔长为 400mm,Nd:YAG 棒中心距 OC 85mm,KTP 距 OC 25mm,增益介质为 ϕ5mm ×95mm 的 Nd:YAG 棒,倍频晶体为 7mm×7mm×7mm 的 KTP 晶体,II 类相位匹配,镀有对 1 064nm 和 532nm 高透的膜层。M_1 为半径 R=7m 的凹面反射镜,镀有对 1 064nm 高反、对 532nm 高透的膜层,M_2 为平面镜,镀有对 1 064nm 高反、对 532nm 高透的膜层,折叠镜同时作为输出耦合镜 OC,镀有对 1064nm 高反、对 532nm 的透过率为 94%的二向色膜,QWP 为 ϕ20mm 的四分之一波片(λ=1 064nm)),为抑制噪声,其主轴方向应与 OC 镜的 S 偏振轴平行放置。

图 2 是加 QWP 片前测得的绿光输出功率随二极管注入电流的变化曲线。

* 收稿日期:2003-07-15; 修订日期:2003-11-12
基金项目:华北光电技术研究所国防科技重点实验室基金资助项目(51438040101SC0101)
作者简介:王鹏飞(1977—),男,主要从事高功率固体激光技术的研究;E-mail: afengwpf@sohu.com。

图 3 为加入 QWP 片前后探测到的绿光噪声图，二极管注入电流为 22A。可以看出，加入 QWP 片后，均方根(RMS)的绿光噪声由 915.1μV 减少为 774.3μV，减少了大约 15%，可见绿光噪声得到了一定的抑制。

1.2 在 KTP 晶体与反射镜之间加入 QWP 片

在图 1 中 B 处加入 QWP 片，总腔长 470mm，QWP 主轴与 KTP 主轴控制为 45°。图 4 为绿光输出功率与二极管注入电流的关系曲线。

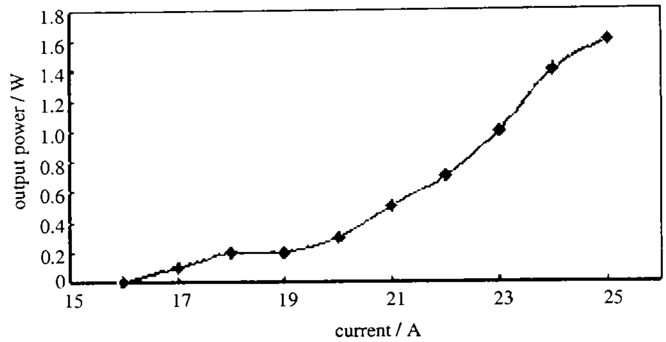
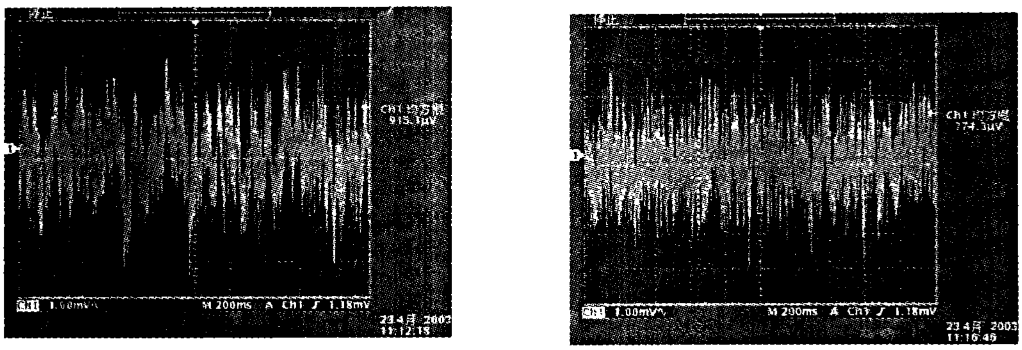


Fig. 2 Output power of the green laser *vs* input current without a QWP

图 2 未加 QWP 片时绿光输出功率随二极管注入电流的变化

加入 QWP 片增加了腔内损耗，在 25A 的二极管注入电流下，连续绿光输出功率由 4.9W 减少为 3.3W。图 5 为加入 QWP 片前后绿光噪声图，二极管注入电流为 22A。可以看出，加入 QWP 片后，由均方根(RMS)表征的绿光噪声由 2.253mV 减少为 1.608mV，减少了大约 29%，可见绿光噪声得到了一定的抑制。



(a) without a QWP (b) with a QWP

Fig. 3 Time trace of the green laser output

图 3 绿光输出随时间的变化

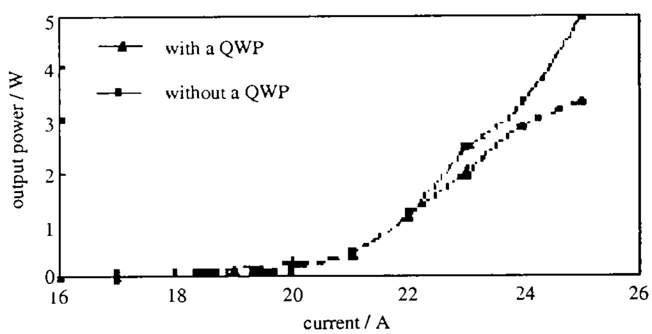
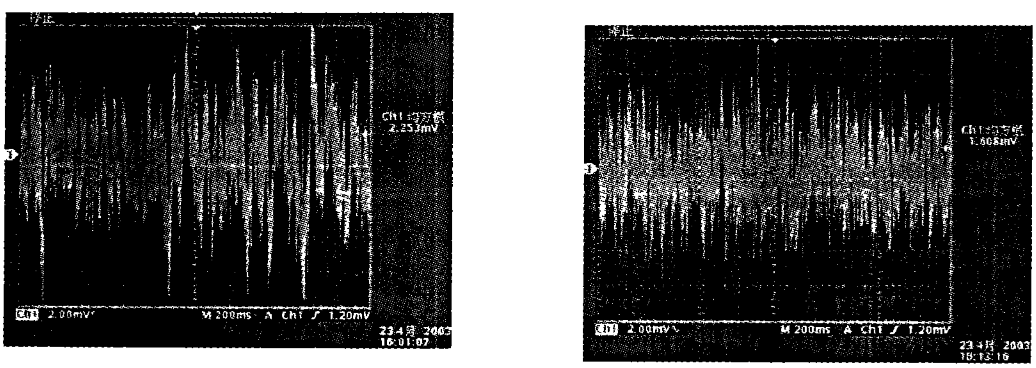


Fig. 4 Output power of the green laser *vs* input current

图 4 加入 QWP 片前后绿光输出功率随二极管注入电流的变化

在加入 QWP 片的两种实验中还发现，当旋转 QWP 片时，噪声有一定的变化。在 YAG 前插入 QWP 片，其主轴与 S 偏振轴平行时噪声最小；在 KTP 前插入 QWP 片，其主轴与 KTP 主轴夹 45°时噪声最小。这些实验结果都与文献[6]中的理论分析结果是一致的。



(a) without a QWP (b) with a QWP

Fig. 5 Time trace of the green laser output

图 5 绿光输出随时间的变化

1.3 交叉双倍频晶体

在KTP与反射镜之间(即图1中B处)插入第二块KTP晶体，两块晶体参数相同，相距105mm，主轴夹角控制在90°，总腔长为470mm。

加入第二块KTP前后，绿光输出功率与二极管注入电流的关系见图6。

25A的二极管注入电流下，加入第二块KTP前后绿光功率分别为0.69W和0.82W，可见，在较高的泵浦功率下，使用两块倍频晶体获得了更高的绿光输出，但在较低的泵浦功率下，使用两块KTP输出绿光功率却相对较低，这可以解释为，泵浦功率增大，新增倍频晶体导致转换效率的提高超过了由此引入的腔内损耗。

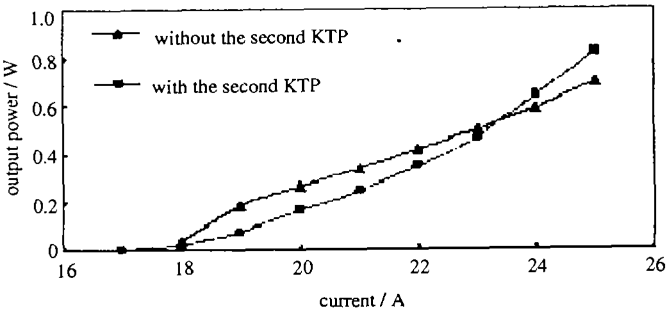
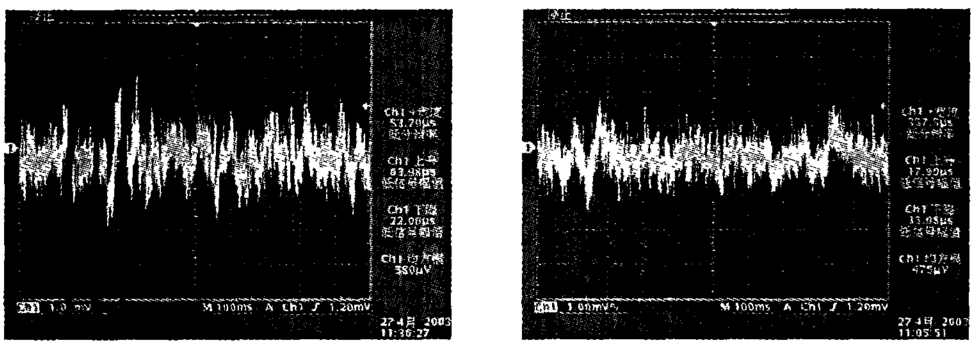


Fig. 6 Output power of the green laser vs input current

图6 加入第二块KTP前后绿光功率随二极管泵浦注入电流的变化

图7为用示波器记录下的噪声波形，二极管注入电流为25A。

由测量得到的噪声图可以看出，加入第二块KTP后，绿光噪声RMS值由580μV减少为475μV，减少了大约18%。此前使用同一装置的一次实验中，在25A的二极管注入电流下，加入第二块KTP前获得0.6W的绿光输出，示波器上表征的噪声约为820μV，加入第二块KTP后，绿光功率为1.3W，噪声约为620μV，绿光噪声减少了约25%。



(a) without the second KTP (b) with the second KTP

Fig. 7 Time trace of the green laser output

图7 绿光输出随时间的变化

2 结 论

实验证实了文献[6]中的理论分析结果。比较加入QWP片和交叉倍频晶体法的实验结果可知，交叉双倍频晶体法是一个比较好的方案，它不仅能有效地提高输出绿光的稳定性，而且在较高泵浦功率下还能同时提高倍频效率，获得更高的绿光输出。

理论计算知[6]，实验中角度控制很重要，较小的角度变化可能导致和频系数产生较大的变化，影响偏振调制的结果。由于实验条件所限，对角度控制并不理想，要求45°放置的QWP片和主轴夹90°放置的双KTP晶体，相应的角度并未得到严格控制。为能更好的抑制绿光噪声，应当对这些角度进行更为严格的控制。

实验中采用的折叠镜，理论上要求二向色镜对基频光的透过率尽量达到100%，但实际情况并不如此。我们测量了在功率计前加入一个1 064nm高反、532nm高透的透镜前后的结果，加入前获得4.8W的光功率，但加入后仅有1.4W，这说明采用的折叠镜对基频光仍然有较大的透过率，为了滤除输出绿光中的基频光，实验中在功率计前加入了一片1 064nm高反、532nm高透的透镜，显然，它在滤除基频光成分的同时，也损耗掉一部分倍频绿光。为获得更理想的结果，应提高所采用二向色镜的质量。

实验中在KTP晶体中观察到了灰色线，导致输出功率在同样的腔型下降低，使用单块KTP时，最初的实验中CW绿光功率最高达到4.9W，但在后来用同一块晶体的实验中最高只能达到1.2W，它应该是由KTP的"灰色轨迹效应"[8]引起，在实验中应当避免。

参考文献:

[1] Baer T. Large-amplitude fluctuation due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers[J]. *J Opt Soc Am B*, 1986, **3**(9): 1175—1180.

[2] Oka M, Kubota S. Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode-pumped Nd:YAG lasers[J]. *Opt Lett*, 1988, **13**(10): 805—807.

[3] James G E, Harrel II E M. Intermittency and chaos in intracavity doubled lasers II[J]. *Phys Rev A*, 1989, **41**(5): 2778—2790.

[4] Gaebler V, Liu B N, Eichler H J. Efficient blue cw Nd:YAG microchip laser with two intracavity frequency doublers[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(18): 1343—1345.

[5] Li D H, Zhu C H, Gaebler V, et al. Theoretical and experimental studies of noise suppression for intracavity frequency doubled lasers with phase matching type I or II[J]. *Opt Commun*, 2001, **189**: 357—361.

[6] 王鹏飞, 吕百达. 折叠腔内腔倍频激光器抑制绿光噪声的研究[J]. 激光技术, 2003, **27**(3): 172—174. (Wang P F, Lü B D. Study of noise suppression in intracavity-frequency-doubled lasers with folded resonators. *Laser Tech*, 2003, **27**(3): 172—174)

[7] 王鹏飞, 吕百达. 折叠腔内偏振效应对绿光输出稳定性的影响. 强激光与粒子束, 2003, **15**(2): 137—140. (Wang P F, Lü B D. Influence of polarization effect in folded resonators on the stability of green output. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(2): 137—140)

[8] Motokoshi S. Gray-tracking susceptibility in $KTiOPO_4$[A]. SPIE[C]. 2000, **3889**: 664—650.

Experimental study of suppressing green noise in a diode-pumped intracavity-frequency-doubled laser

WANG Peng-fei[1], JIANG Dong-sheng[2], LÜ Bai-da[1], ZHAO Hong[2], YANG Tao[2], WANG Jian-jun[2], ZHAO Shu-yun[2]

(1. *Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu* 610064, *China*;
2. *North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Experimental results of green noise suppression in a diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG laser by inserting a QWP between the Nd:YAG rod and mirror, or between the KTP frequency doubler and mirror, and using two cross-doubled crystals are presented. It is shown that the green noise in a folded resonator can be effectively reduced if one of the above methods is used. The introduction of two cross-doubled crystals has reduced the noise by 18%~25%. The experimental results are consistent with theoretical predications. Some problems in the experiment and further improvements are discussed.

Key words: Nonlinear optics; Intracavity-frequency-doubled laser; Green problem; Folded-resonator