

文章编号: 1000-7032(2018)06-0830-08

基于 LD 双端面泵浦的 Nd:YAG 高效率倍频激光器

范嗣强¹, 李麒麟², 路永乐^{3*}

(1. 重庆师范大学 市级高校光电材料与工程重点实验室, 重庆 401331;

2. 重庆市第一中学, 重庆 400030; 3. 重庆邮电大学 光电学院, 重庆 400065)

摘要: 报道了一种利用激光二极管(LD)双端面泵浦的 Nd:YAG 激光晶体, Cr⁴⁺:YAG 晶体被动调 Q, LBO 临界相位匹配腔内倍频的高转换效率的绿光激光器。分析了双端面泵浦 YAG 激光器的热效应, 实验中 LD 双端面泵浦, 采用 U 型平行平面腔结构对 Nd:YAG 进行传导冷却。当总泵浦光为 33.8 W 时, 得到被动调 Q 频率 10 KHz、功率 8.21 W 的线偏振基频光输出。6.72 W 的绿光输出的倍频效率为 86%, 输出光束为基模, M^2 为 1.4。实验表明双端面泵浦 YAG 倍频激光器具有很高的转换效率。

关键词: 双端面泵浦; 被动调 Q; 腔内倍频; 部分偏振光; 高效率

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183906.0830

Experimental Study on High Efficiency Double Frequency Laser with LD Dual Pump Nd:YAG

FAN Si-qiang¹, LI Qi-lin², LU Yong-le^{3*}

(1. Key Laboratory of Photoelectric Material and Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

2. Chongqing No. 1 Middle School, Chongqing 400030, China;

3. Department of Photoelectric, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

* Corresponding Author, E-mail: luy1@cqupt.edu.cn

Abstract: A high efficiency all-solid-state green laser was reported which was double end-pumped by the laser diode(LD) Nd:YAG, passive Q-switched by Cr⁴⁺:YAG, and critical phase matched by LBO intracavity. The thermal effect of double end-pump YAG laser was analyzed. In the experiment, double end-pump of LD is used to conduct the conduction cooling of Nd:YAG with the U-type parallel flat cavity structure. When the input power is 33.8 W, the output power of linear polarized light with 10 kHz passive Q-switch is 8.21 W which leads to the output power instability of 6.72 W and frequency doubling efficiency of 86%. The output beam is the fundamental model and M^2 reaches 1.4. The experiments show that the double end-pumped YAG frequency multiplication laser has quite high conversion efficiency.

Key words: double end-pumping; passive Q-switched; intracavity frequency; partially polarized light; high efficiency

收稿日期: 2017-10-16; 修订日期: 2017-12-22

基金项目: 重庆市教委应用基础研究项目(KJ1600311, KJ130655); 重庆市科委前沿基础研究项目(cstc2014jcyjA70005); 重庆市高校创新团队计划(CXTDX201601016)资助项目

Supported by Basic Research Project for Application of Chongqing Education Commission(KJ1600311, KJ130655); Basis and Foreland Research Project of Chongqing Science Commission(cstc2014jcyjA70005); Foundation for The Creative Research Groups of Higher Education of Chongqing(CXTDX201601016)

1 引言

全固态绿光(532 nm)激光具有波长短、易聚焦、能量集中、分辨率高等优点,在精密材料加工、医疗、光谱分析和科学研究等领域有广泛的应用^[1],更为广泛的应用是将其混频或者再倍频产生深紫外激光^[2-4]。绿光的输出是通过激光二极管(LD)泵浦Nd:YAG、Nd:YVO₄产生1 064 nm的基频光,再与KTP、LBO等非线性晶体进行倍频输出,其特征是光学结构复杂、元器件多、输出功率低、转换效率低下。如何优化激光器结构以获得出光质量好、出光功率高、转换效率高的激光一直是全固态绿光激光领域的研究热点^[5-7]。其转换效率也包含了基频光(1 064 nm)的转换效率,同时基频光的脉冲峰值功率和光束质量也严重影响和制约倍频光的输出效率,因此优化结构包括对基频光的优化。中小功率用于倍频的基频光通常采用LD端面泵浦Nd:YVO₄的结构,其主要缺点是单端泵浦使晶体内部的热量分布不均匀、热效应高、严重影响输出光束质量和效率,同时YVO₄不适合注入功率高的情况。近年来,在超快激光、特殊波长激光的研究过程中,为获得更加优良的基频光源,开始探索激光二极管端面泵浦Nd:YAG的激光器结构方式,相关研究人员对该方式的晶体热效应^[8-11]、被动调Q技术^[8,12]、晶体键合技术^[13]、微片激光器^[12]、腔体结构技术^[14]等领域进行了大量的研究。

本文从绿光激光器的基频产生方式上提出了LD双端面泵浦Nd:YAG的结构方式,优化散热模式、减小晶体热效应,同时在倍频结构中采用1/4波片与偏振片组合以提高倍频效率。实验结果证明其转换效率高,在小型化、便携式、低能耗倍频激光器领域有极好的产业化前景。

2 激光二极管双端面泵浦Nd:YAG倍频激光器实验结构与分析

激光二极管双端面泵浦Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG被动调Q、腔内倍频激光器实验结构装置如图1所示。两台光纤输出半导体激光器经过耦合透镜分别从YAG晶体的两个端面入射,采用U形折叠腔,腔长为500 mm。其中M1为1 064 nm全反射镜;M2和M3为1 064 nm高反、808 nm高透透镜,与泵浦光轴成45°角放置,形成U形结构;激光晶

体Nd:YAG的尺寸为3 mm×3 mm×10 mm,掺杂浓度1%;M4为1 064 nm 1/4波片;M5为偏振片;被动调Q晶体Cr⁴⁺:YAG的透过率 $T=75%$;M6为532 nm激光输出镜,靠近LBO晶体面镀1 064 nm高透、532 nm高反膜,另一面镀1 064 nm高透膜,与LBO光轴成45°角放置,所有镜片尺寸为 $\Phi 20$ mm×3 mm。LBO倍频晶体尺寸为3 mm×3 mm×20 mm,采用电子温控器精确控制晶体温度。

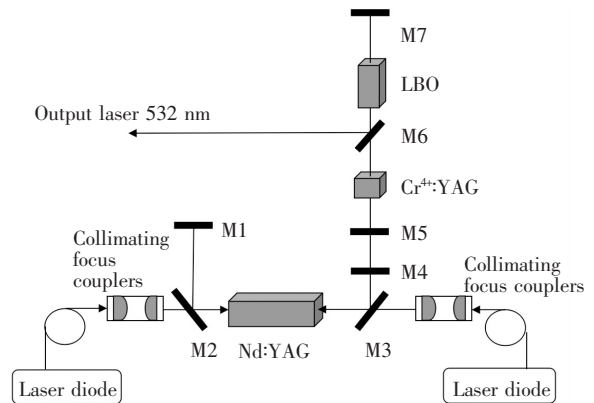


图1 LD双端面泵浦Nd:YAG被动调Q腔内倍频激光器示意图

Fig. 1 Schematic of LD double end pumped Nd:YAG passively Q-switched intracavity frequency doubling laser

2.1 双端面泵浦Nd:YAG及热效应分析

对于中小型的DPSSL而言,采用双端面激光二极管泵浦方式可以使泵浦光在谐振腔内形成的增益区与激光腔模体积空间交叠增大,从而实现降低阈值功率、提高斜效率的目的。更进一步,相比于单端泵浦,其热源区温度梯度更为平缓、中心温度更低、热效应更低、输出光束质量更好。在双端面泵浦光的照射下,一部分能量被激光晶体吸收,一部分变为废热,影响激光器的正常工作,因而对晶体棒进行冷却散热十分必要。常用的方法是水冷或者传导冷却,使其侧表面保持在恒定的温度点。实验中的泵浦源采用大族天成半导体公司的808 nm半导体光纤输出激光器,型号为M808±3-30-D400/22-T6-P,如图2所示,中心波长808 nm,光谱宽度3 nm,最高输出功率38 W,阈值电流1.54 A,斜效率5.21 W/A,电光转换效率41.6%。采用T封装模式,输出光纤芯径400 μm、数值孔径0.22。半导体激光器泵浦光的光纤芯径为400 μm,从尾纤出来具有一定的发散角,为了有效地将泵浦光注入到晶体中,采用两个

焦距为 60 mm 和 30 mm 的平凸透镜组成一望远镜系统耦合透镜组,其放大比例为 2:1,使得泵浦光在晶体端面的焦斑直径为 800 μm ,并在两个耦合透镜底座放置水平可调装置,在实验中调节耦合透镜与晶体端面的距离以便输出最大功率。

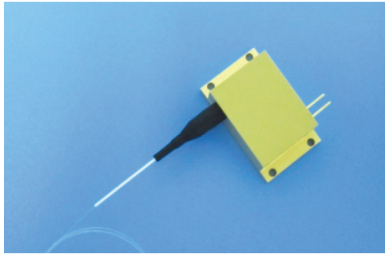


图2 光纤输出半导体激光器

Fig. 2 Semiconductor laser by fiber output

激光介质晶体采用中国电子科技集团 11 所研制的 Nd:YAG 晶体介质,3 mm \times 3 mm \times 10 mm 的长方体结构,其掺杂浓度为 1%,受激发射截面为 $2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-2}$,热导率为 14 W/mK。传统的侧面 YAG 激光器由于光-光转换效率不高,晶体发热量大,其散热方式通常为水冷却直接冲刷晶体表面、带走热量,水冷的缺点是水温不稳定,影响激光功率输出的稳定性。端面泵浦由于其转换效率高,发热量小,一般采用传导冷却的方式,而双端面泵浦由于泵浦光在晶体内分布更为均匀,进一步提高了转换效率,同时为了确保冷却效果,本实验采用晶体表面传导冷却、热沉通水的方式进行散热。

根据 Nd:YAG 激光晶体的形状,设计了用含铜 4.5% 的硬铝(编号 6061)来制作散热热沉,其热导率为 177 W/mK。图 3 为晶体散热热沉结构示意图与实物图,热沉由底座和左上紧固块构成,晶体放置在中间通孔内,孔的尺寸与晶体尺寸相同。为了更好地散热,用钢膜包裹晶体的侧面,通过紧固螺丝 1 和紧固螺丝 2 提供压力使晶体侧面和热沉表面紧密结合并固定晶体。将热沉固定在通水基座上,该方式确保冷却的效果,同时使得冷却水的温度变化被热沉吸收,晶体内的温度分布均匀、热流量恒定、输出激光稳定。

被动调 Q 晶体 Cr^{4+} :YAG 的尺寸为 5 mm \times 5 mm \times 2.2 mm,在高功率被动调 Q 情况下其累积热效应不容忽视,与 YAG 晶体的散热方式相同,如图 4 所示。将 Cr^{4+} :YAG 晶体的后端面紧密粘贴到热沉上,前端面用一薄盖片通过紧固螺丝与

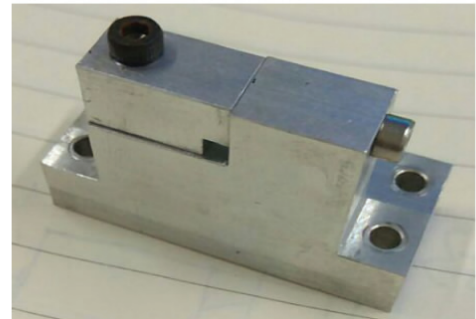
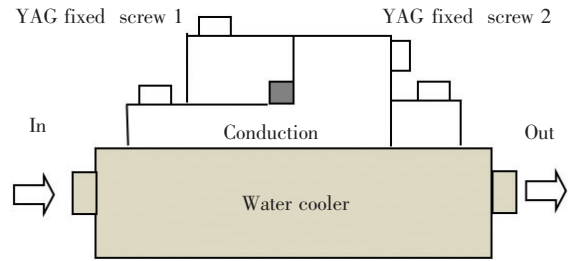


图3 晶体热沉结构示意图

Fig. 3 Schematic of crystal heat sink

热沉连在一起,形成一个传热模块,再将该模块与通水热沉相连,保证对晶体散热的能力与均匀性。由于激光介质 YAG 晶体的热透镜效应,照射到 Cr^{4+} :YAG 上的光斑将会被会聚,用红外镜观察发现其光斑约为 0.4 mm,因此在 Cr^{4+} :YAG 的前盖片和后热沉的中间开 $\Phi 1 \text{ mm}$ 的小孔,以便激光光束通过。

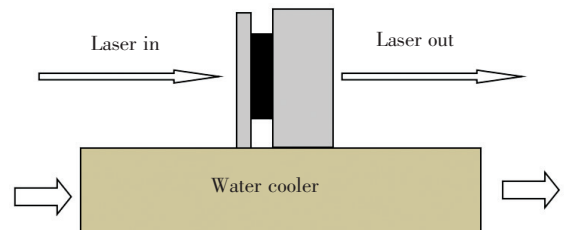


图4 Cr^{4+} :YAG 晶体热沉结构示意图

Fig. 4 Schematic of Cr^{4+} :YAG crystal heat sink

对于激光二极管输出的激光光束的分布,较多文献将其视为平行平面光或者理想高斯光束,但对于光纤耦合输出泵浦光而言,激光二极管出射光束经过微透镜聚焦后进入光纤,从尾端射出,再经过耦合透镜进入激光晶体的端面,其光斑分布采用超高斯光束描述更为合理^[11]。超高斯光束沿 z 轴进入晶体的两个端面($z=0, z=1$),其光束光强分布表达式为:

$$I(r) = I_0 e^{-2\frac{r^2k}{\omega^2k_0}}, \quad (1)$$

激光晶体 Nd:YAG 产生热能的原因很多,主要来

源是荧光量子效应^[10],此处只考虑其产生的热量,则晶体两边注入泵浦光在体内产生的热功率密度为左右两边注入光热量之和,左边泵浦光在晶体内产生的热源分布:

$$q_1(r,z) = \frac{2\beta\eta p_{in} e^{-2r^2/\omega_p^2} e^{-\beta z}}{\pi \omega_p^2}, \quad (2)$$

右边泵浦光在晶体内产生的热源分布:

$$q_2(r,z) = \frac{2\beta\eta p_{in} e^{-2r^2/\omega_p^2} e^{-\beta(l-z)}}{\pi \omega_p^2}, \quad (3)$$

式中,光量子效率 $\eta = 1 - 808/1064 = 0.24$, 808 nm 为泵浦光,1 064 nm 为输出激光。

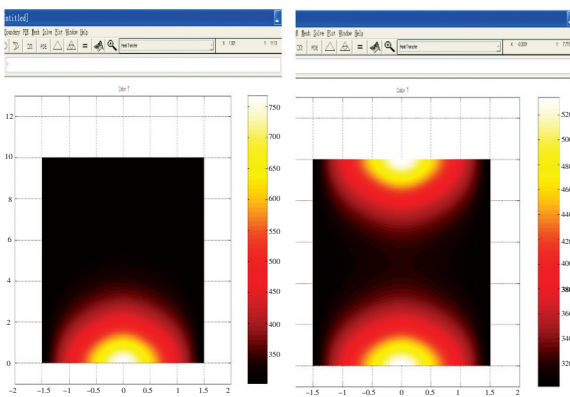


图5 单端泵浦与双端泵浦棒内温度场分布

Fig. 5 Temperature field distribution of single end-pumping and double end-pumping

利用 Matlab 软件热分析微分方式对晶体进行温度场数值模拟分析,设定激光晶体的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,对 808 nm 的泵浦光吸收系数 $\beta = 9.1 \text{ cm}^{-1}$,设定晶体侧面温度恒定为 300 K,两个通光端面绝热。注入相同总功率为 40 W 时,得到单端注入晶体的端面中心最高温度为 760 K,而双端面注入时端面中心最高温度为 530 K,晶体内部温度分布如图 5 所示,可见通过双端泵浦的方式可使 YAG 晶体内部的发热量均匀,温度梯度更小,晶体热效应更低,输出光束质量就更好。

2.2 腔内倍频结构设计

通常 Nd:YAG 晶体输出的基频光为自然偏振光,而倍频晶体 LBO 需要线偏振光,通常的做法是在腔内加上一个偏振片,但是加上偏振片后会使其输出基频光的功率减半、废热增加,同时使晶体内部的能量提取分布不均匀,加大晶体的热效应,使基频光产生严重的畸变,降低倍频效率。因此,在偏振片的前端加上 $1/4$ 波片,根据波片的

理论^[15],腔内的基频光将分成两个部分:以偏振片为界,穿过 Nd:YAG 晶体的 1 064 nm 光束将是椭圆偏振光,相比于线偏振光而言,椭圆偏振光在晶体内的能量提取率分布均匀、提取效率高、热效应低从而保证高功率输出;而腔内另一侧将是线偏振光,保证倍频效率。

常用的倍频晶体主要有 KTP 和 LBO, KTP 晶体在高功率密度激光的长期作用下容易产生“灰迹”,影响激光器的稳定性, LBO 的非线性系数小于 KTP,但有较高的损伤阈值且生产工艺成熟,适合高功率密度下工作。本实验采用 1 类相位匹配倍频晶体 LBO,相位匹配角 $\theta = 90^\circ$ 、 $\Phi = 0^\circ$, LBO 倍频晶体需要精确控制其温度以提高倍频效率,采用 TEC 温控装置控制温度保持在 $148 \text{ }^\circ\text{C}$,控制精度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,图 6 为 LBO 温控器。

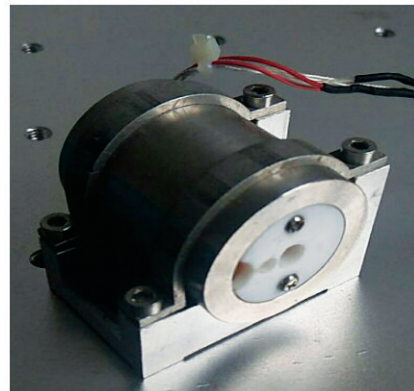


图6 LBO 温控器

Fig. 6 Temperature control of LBO

3 激光二极管双端面泵浦 Nd:YAG 倍频激光器实验及数据分析

3.1 基频光实验及数据

将图 1 中的 M7 镜片换成 1 064 nm 波长 90% 反射的输出镜,倍频晶体、被动调 Q 晶体、M4-M6 镜片去掉,保持腔长不变,即为 LD 双端面泵浦 YAG 的基频光输出实验装置。打开水冷设备,确保水温恒定在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。用一套电源控制系统控制两个泵源的输出功率,确保两端注入的泵浦光功率相同,在输出镜后面用激光功率计(中国计量科学研究所的 NIM-P1000 激光功率计)进行输出功率测试。测得的数据如表 1 所示,第一列为半导体激光器电流增加数据,第二列、第三列分别为在相应电流下单端输出的能量和总的输出能量,第四列为振荡激光输出。

表 1 泵浦光电流、单泵源功率、双泵源功率、激光输出功率数据

Tab. 1 Electricity of pumping light, power of single pumping light, power of single pumping light, power of output laser

电流/A	单泵源功率/W	双泵源功率/W	输出功率/W
3	3.8	7.6	0.78
3.5	5.1	10.2	2.81
4	6.4	12.8	4.23
4.5	7.75	15.5	5.76
5	9.05	18.1	7.92
5.5	10.3	20.7	9.79
6	11.6	23.2	11.8
6.5	12.9	25.8	13.8
7	14.2	28.4	15.9
7.5	15.5	31	17.8
8	16.8	33.6	19.1
8.5	18.1	36.2	21.2
9	19.4	38.8	22.3

根据表 1 的数据得到双端面泵浦 Nd: YAG 激光器的输出激光和泵浦光的拟合关系如图7所示。可以看出,激光输出功率与泵浦功率呈线性关系、均匀增强,其对应拟合线性关系为

$$P_{out} = 0.712 \times P_{in} - 4.756, \quad (4)$$

在注入总功率为 38.8 W 时,输出最大功率为 22.3 W,阈值功率为 6.68 W,光-光转换斜效率为 71.2%,具有极高的转换效率。

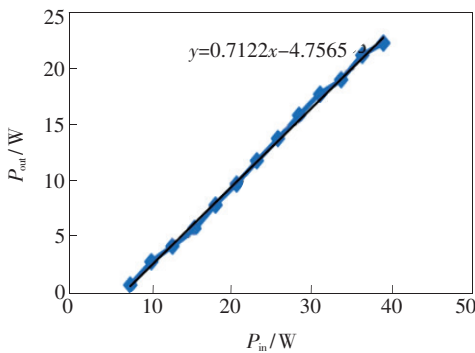


图 7 输出激光与注入激光关系曲线

Fig. 7 Relationship of output power and input power

采用激光 M^2 测试仪对该激光器的输出光束进行了测试,得到如图 8 所示的光斑和 M^2 因子。其输出激光光束模式为基模, M^2 因子为 1.4,可见采用双端泵浦方式极大地提升了 YAG 激光器

的输出光束质量。

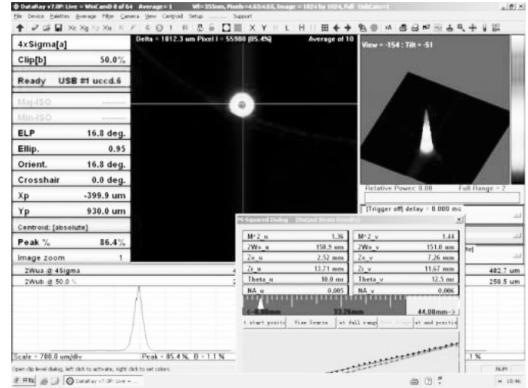


图 8 1 064 nm 激光光斑分布及 M^2 平方因子

Fig. 8 Intensity of facula and M^2 factor of 1 064 nm wavelength laser

添加 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q 晶体进行调 Q 后得到脉冲宽度为 8.93 ns、频率为 10 kHz 的脉冲光输出,计算得到脉冲峰值功率高达 250 kW,有利于倍频效率的提高。图 9 为测量得到的脉冲宽度波形。

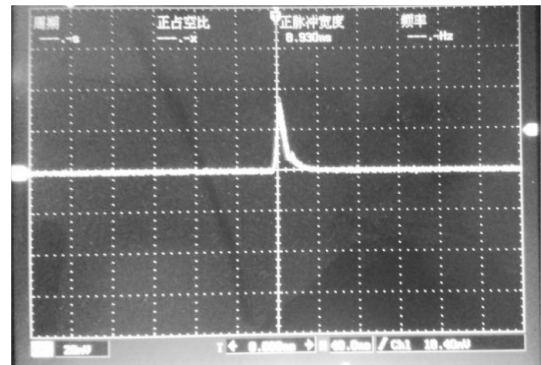


图 9 被动调 Q 脉冲波形

Fig. 9 Pulse laser waveform of passive Q -switched

3.2 倍频光实验及数据分析

在基频光实验装置上首先加上偏振片,用功率计测试偏振基频光输出,得到对应的功率数据;

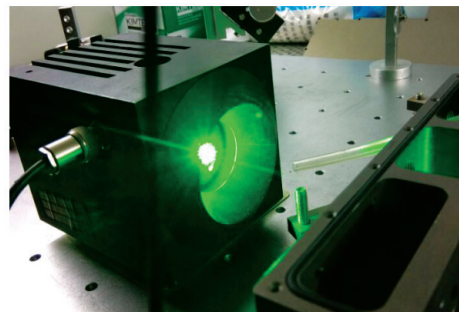


图 10 倍频激光输出照片

Fig. 10 Picture of intracavity frequency doubling laser

再加上被动调 Q 晶体得到脉冲偏振光输出功率数据;最后按照图 1 所示的倍频结构搭建完整的实验装置,测出绿光输出功率,图 10 为输出绿光测试照

片。所有的数据如表 2 所示,其中 1 064①和 1 064②分别表示 1 064 nm 的自然输出光和偏振输出光, QCW 表示调 Q 后的偏振光,532 表示倍频绿光。

表 2 泵浦光电流、LD 功率、基频光、基频偏振光、调 Q 偏振光、倍频光输出功率数据

Tab. 2 Electricity of pumping light, power of LD, power of fundamental frequency laser, power of fundamental frequency polarized laser, power of Q-switched polarized laser, power of output laser

电流/A	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
808	7.6	10.2	12.8	15.5	18.1	20.7	23.2	25.8	28.4	31	33.6	36.2	38.8
1 064①	0.78	2.81	4.23	5.76	7.92	9.79	11.8	13.8	15.9	17.8	19.1	21.2	22.3
1 064②	0	0	2.25	4.24	6.58	8.16	10.4	12.0	13.0	13.8	14.4	15.2	15.6
QCW	0	0	0	0.35	2.42	4.35	5.51	6.44	6.59	7.32	7.8	7.91	8.21
532	0	0	0	0	1.29	2.26	3.20	3.68	4.84	5.61	6.09	6.36	6.72

图 11 为调 Q 偏振光与倍频光的转换效率。总的转换效率为 86%,可以看出在低功率段时转换效率低于 86%,而到高功率段转换效率可达到 90%以上。这是因为:(1)采用了双端泵浦降低晶体热效应,提升了基频光光束质量;(2)运用 1/4 波片与偏振片组合结构,大大提升了对 YAG 晶体内储存能量的提取率、消除空间烧孔效应,提升了倍频前基频光的峰值功率。图 12 为总的光-光转

换效率,基本成线性,转换效率为 26.8%。用 M²测试仪对倍频光的光束质量进行测试,得到其 M²因子为 1.35,相比于基频光,其光束质量稍有提高,分析其原因应该是调 Q 晶体的热沉小孔相当于光阑,过滤了基频光中的高阶模式,使光束质量得到了进一步提高。

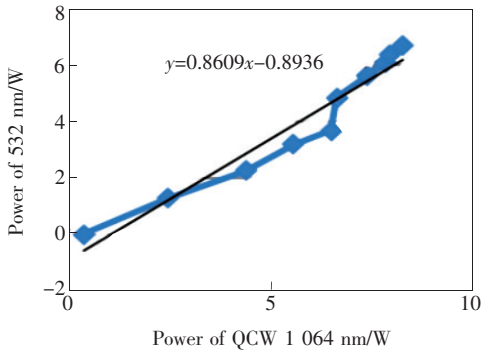


图 11 调 Q 偏振光与绿光转换效率的关系

Fig. 11 Relationship of output power and Q-switched polarized power

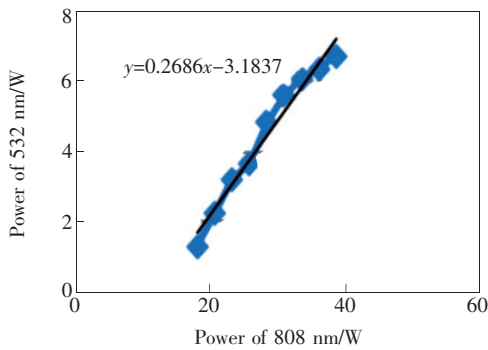


图 12 光-光总转换效率

Fig. 12 Total optical-optical conversion efficiency

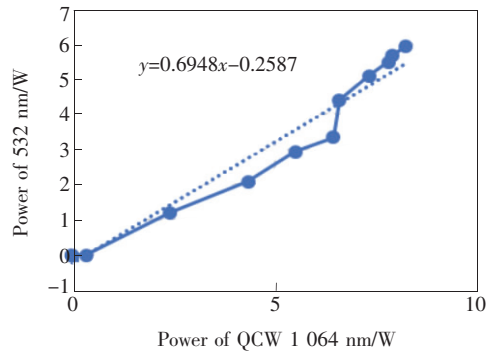


图 13 去掉 1/4 波片后的调 Q 偏振光与绿光转换效率
Fig. 13 Relationship of 532 nm output power and power plate without quarter-wave plate

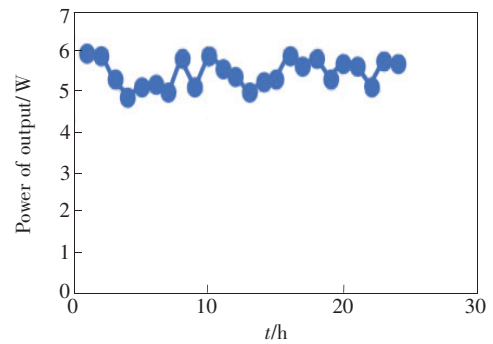


图 14 去掉 1/4 波片后的输出稳定性数据
Fig. 14 Stability of output power without Q-switched polarized quarter-wave

实验中为了验证 1/4 波片与偏振片组合结构对倍频转换效率的影响,特地去掉 1/4 波片,在相同的条件下进行了倍频测试,结果如图 13 所示。最大输出功率为 5.94 W,转换效率约为 69%,有一定的下降。同时其输出稳定性差。图 14 显示,在 24 h 内,输出功率波动幅度较大,波动范围可达 1.04 W。实验结果表明,1/4 波片与偏振片组合结构对倍频转换效率与输出稳定性有较大的提升。

4 结 论

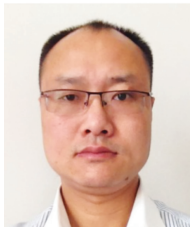
结合 Nd:YAG 晶体与端面泵浦的优点,创新性地提出对 Nd:YAG 晶体进行双端面泵浦的激

光器结构,结合晶体传导冷却、热沉通水的冷却模式,实现了双端面泵浦 YAG 激光器高转换效率输出。同时采用 1/4 波片与偏振片组合结构,优化了 LBO 腔内倍频激光器结构,实现基频光高提取率、倍频光高转换率的倍频激光输出。在注入功率 38.8 W 时,获得 22.3 W 的高输出功率、71.2% 的高光-光转换效率的基频光。经过调 Q 偏振后,实现 QCW 偏振光与绿光 86% 的高倍频效率。得到光束为基模、 M^2 因子近衍射极限的输出光束质量。该结构倍频激光器可在体积和能耗上达到很高的优化,为相应的激光器实现小型化、便携式提供了相应的指导。

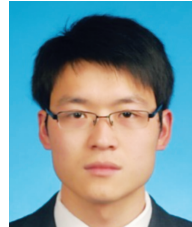
参 考 文 献:

- [1] 柳强, 闫兴鹏, 陈海龙, 等. 高功率全固态紫外激光器研究新进展 [J]. 中国激光, 2010, 37(9):2289-2298.
LIU Q, YAN X P, CHEN H L, *et al.*. New progress in high-power all-solid-state ultraviolet laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2010, 37(9):2289-2298. (in Chinese)
- [2] 于森, 金光勇, 王超. 高峰值功率 KDP 晶体四倍频 266 nm 紫外激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4):27041003.
YU M, JIN G Y, WANG C. High peak power fourth harmonic 266 nm UV laser using a KDP crystal [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2015, 27(4):27041003. (in Chinese)
- [3] 林彦, 霍玉晶, 何淑芳. 深紫外固体激光系统 [J]. 中国激光, 2009, 36(7):1826-1830.
LIN Y, HUO Y J, HE S F. Deep ultraviolet solid-state laser system [J]. *Chin. J. Lasers*, 2009, 36(7):1826-1830. (in Chinese)
- [4] 苏艳丽, 何京良, 姜其畅, 等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 晶体五倍频 213 nm 深紫外激光器 [J]. 中国激光, 2006, 33(12):1590-1592.
SU Y L, HE J L, JIANG Q C, *et al.*. Efficient 213 nm radiation fifth harmonic generation of a laser diode-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(12):1590-1592. (in Chinese)
- [5] 李义民, 檀慧明, 付喜宏, 等. LD 泵浦腔内倍频 Nd:YAG/LBO 蓝光 473 nm 激光器的低噪声运转 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(1):11-15
LI Y M, TAN H M, FU X H, *et al.*. LD pumped intracavity frequency doubling 473 nm Nd:YAG/LBO laser with low noise operation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):11-15. (in Chinese)
- [6] 申高, 檀慧明, 刘飞. 全固态 355 nm 连续紫外激光器的优化设计 [J]. 光学精密工程, 2005, 13(5):731-735.
SHEN G, TAN H M, LIU F. Optimization design for all-solid-state 355 nm continuous-wave ultraviolet laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5):731-735. (in Chinese)
- [7] 马莹, 王成, 缪同群. VCSEL 直接倍频蓝光固态激光器的研究 [J]. 光学精密工程, 2005, 13(3):253-259.
MA Y, WANG C, MIAO T Q. Blue light laser by direct frequency doubling of VCSEL [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3):253-259. (in Chinese)
- [8] 刘宗华, 郑义. LD 泵浦被动调 Q -Yb³⁺:YAG 微晶片激光器的优化设计 [J]. 发光学报, 2013, 34(9):1219-1226.
LIU Z H, ZHENG Y. Design and optimization of LD-pumped passively Q -switched Yb³⁺:YAG microchip laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(9):1219-1226. (in Chinese)
- [9] 郑义, 高明义, 姚建铨. LD 端面泵浦各向异性激光介质的热效应研究 [J]. 光电子·激光, 2003, 14(10):1094-1098.
ZHENG Y, GAO M Y, YAO J Q. Study on thermal effect of anisotropic laser medium by LD end-pumped [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2003, 14(10):1094-1098. (in Chinese)

- [10] 李隆, 聂建萍, 史彭, 等. 端面泵浦热传导各向异性激光棒的温度场 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2931-2938.
LI L, NIE J P, SHI P, *et al.*. Temperature field characteristics of thermal conductive anisotropic laser rods by LD end-pumped [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):2931-2938. (in Chinese)
- [11] 李隆, 耿鹰鸽, 于庚华, 等. 脉冲激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 圆棒晶体热效应 [J]. 应用激光, 2015(5): 597-602.
LI L, GENG Y G, YU G H, *et al.*. Thermal effect of Nd:YAG rod crystal end pumped by pulse LD [J]. *Appl. Laser*, 2015(5):597-602. (in Chinese)
- [12] 王旭, 程光华, 孙哲. LD 泵浦被动调 Q Yb:YAG 薄片激光器的研究 [J]. 光子学报, 2016, 45(3):0314009.
WANG X, CHENG G H, SUN Z. Research of LD-pumped passively Q-switched Yb:YAG thin disk laser [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2016, 45(3):0314009. (in Chinese)
- [13] 江炜, 何青, 陈振强, 等. 基于 Nd:YAG/Cr:YAG/YAG 键合晶体 LD 侧面泵浦激光器 [J]. 光子学报, 2014, 43(4):0414002.
JIANG W, HE Q, CHEN Z Q, *et al.*. LD side-pumped laser based on Nd:YAG/Cr:YAG composite crystal [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2014, 43(4):0414002. (in Chinese)
- [14] 耿鹰鸽, 李隆, 潘晓瑞, 等. LD 端面泵浦变热导率方形 Yb:YAG 微片晶体热效应 [J]. 光学技术, 2017, 43(2): 103-107.
GENG Y G, LI L, PAN X R, *et al.*. Thermal effect of variable thermal-conductivity circular Yb:YAG crystal end pumped by pulse LD [J]. *Opt. Tech.*, 2017, 43(2):103-107. (in Chinese)
- [15] 张学辉, 姜梦华, 刘斌, 等. 高效率 Nd:YVO₄/LBO 临界相位匹配脉冲绿光激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(11):2831-2835.
ZHANG X H, JIANG M H, LIU B, *et al.*. High efficiency Nd:YVO₄/LBO critical phase matching green laser [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2013, 25(11):2831-2835. (in Chinese)



范嗣强(1978 -),男,四川资阳人,博士,高级实验师,2015年于重庆大学获得博士学位,主要从事固体激光与单元器件的研究。
E-mail: mikefan111@163.com



路永乐(1985 -),男,河南南阳人,博士,讲师,2015年于重庆大学获得博士学位,主要从事光学工程的研究。
E-mail: luy@cqpt.edu.cn