

高功率准连续波腔内和频全固态黄光激光器^{*}

鲁远甫^{1)†} 谢仕永^{1)‡} 薄 勇¹⁾ 崔前进^{1)‡} 宗 楠^{1)‡}
高宏伟¹⁾ 彭钦军¹⁾ 崔大复¹⁾ 许祖彦¹⁾

1) 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 5 月 28 日收到, 2008 年 8 月 15 日收到修改稿)

报道了高功率准连续波腔内和频全固态黄光激光器的研究结果. 为获得高功率的黄光输出, 首先, 激光器采用准连续方式运转, 在保持抽运水平的条件下降低热效应, 从而提高光束质量和光光转换效率; 第二, 采用热近非稳腔腔型设计, 双棒串接补偿热致双折射技术, 获得大基模体积高光束质量的基频光; 第三, 通过优化腔型, 采用 L 型共折叠臂平-凹对称腔, 使两束基频光达到空间重合且满足功率配比. 通过这些方法, 得到了输出功率 7.6 W, 重复频率 1.1 kHz 的准连续波黄光输出. 据我们所知, 这是目前腔内和频方案所获得的最高功率全固态黄光输出.

关键词: 黄光激光, 腔内和频, Nd:YAG 激光, 全固态激光器

PACC: 4260B, 4260D, 4265M

1. 引 言

黄光波段的激光光源在激光显示、生物医学、大气探测、高精度光谱学等领域都有着广泛而重要的应用^[1-4]. 染料激光器作为获取这一波段激光输出的主要手段, 自 20 世纪 80 年代中期就已被普遍使用, 然而近年来随着全固态激光器的不断发展, 其地位已被逐步替代. 相对于染料激光器, 激光二极管 (LD) 抽运的固体激光器效率高、体积小、寿命长、可靠性高、无污染、电驱动、运转方式灵活, 因而采用全固态激光技术产生高功率黄激光已成为目前黄光激光研究的热点之一. 对于黄光激光, 由于缺乏合适的固体激光介质, 一般无法通过倍频方式直接获得, 因而采用和频方式, 例如, 通过将 Nd:YAG 激光的 1319 nm 谱线与 1064 nm 谱线在非线性介质中进行和频, 便可产生 589 nm 的黄光激光. 国际上已对此开展了大量研究, 并已逐步走向实际应用. 例如, 日本 Solid-State Optical Science Research 实验室将两路主动锁模的 1319 和 1064 nm 激光腔外和频, 获得了平均功率 4.6 W 的黄激光输出^[5]. 美国 Air Force Research 实验室用种子注入 + 锁定放大 + 外腔和频的方法, 得

到了 50 W 的连续波黄激光^[6]. 但是, 这些激光器都采用腔外和频的方式, 其系统较为庞大复杂. 我国在这方面的研究起步较晚, 目前所见报道的最高输出是本研究组之前获得的 4.8 W 连续波黄光激光输出^[7].

本文采用了双 Nd:YAG 棒串接, L 型共折叠臂平-凹对称腔腔内 KTP 和频的方案. 为了获得高功率的黄光输出, 我们采取了以下一些技术方法: 一是采用专门研制的脉冲方式运转的高功率激光头, 使用脉冲方式抽运, 在保持抽运水平的条件下降低热效应, 从而提高光束质量和光光转换效率; 二是采用热近非稳腔腔型设计及双棒串接加旋光晶体补偿热致双折射技术, 以此获得高功率大基模体积的基频光; 三是通过优化腔型设计, 使两束基频光能同时满足空间重合和功率配比, 以此提高和频效率. 通过这些方法, 我们获得了平均功率 7.6 W, 脉冲频率 1.1 kHz (占空比 18.7%) 的准连续波黄光输出. 据我们所知, 这是目前国内获得的最高功率黄光激光输出, 同时也是腔内和频方案获得的最高功率黄光激光输出.

2. 实验结果及分析

黄光激光器的光路如图 1 所示, 腔型采用 L 型

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60508013)资助的课题.

[†] E-mail: lyf_laser@yeah.net

共折叠臂平-凹对称腔. 光路包含两个谐振腔：1319 nm 激光谐振腔包括腔镜 M1, M4, M5, M6, 激光头 LH1, LH2, 旋光晶体 QR1 及 KTP 晶体；1064 nm 激光谐振腔包括腔镜 M2, M3, M4, M5, M6, 激光头 LH3, LH4, 旋光晶体 QR2 及 KTP 晶体；两谐振腔共用腔镜 M4, M5 和 M6 组成折叠臂. 基频光在 KTP 晶体中和频得到黄光激光, 并通过 M5 镜输出. 实验所

用腔镜除 M6 镜外均为平面镜, 其中 M1 和 M2 分别镀有 1319 nm 和 1064 nm 高反膜；M3 镀有 45° 1064 nm 高反膜；M4 镀有 45° 1319 nm 垂直偏振高反和 1064 nm 水平偏振高透膜；M5 镀有 45° 1319 nm 垂直偏振高反 1064 nm 水平偏振高反及 589 nm 高透膜；凹面镜 M6 镀有 1319, 1064 和 589 nm 高反膜.

系统中所用的 4 个相同的激光头均为本研究组

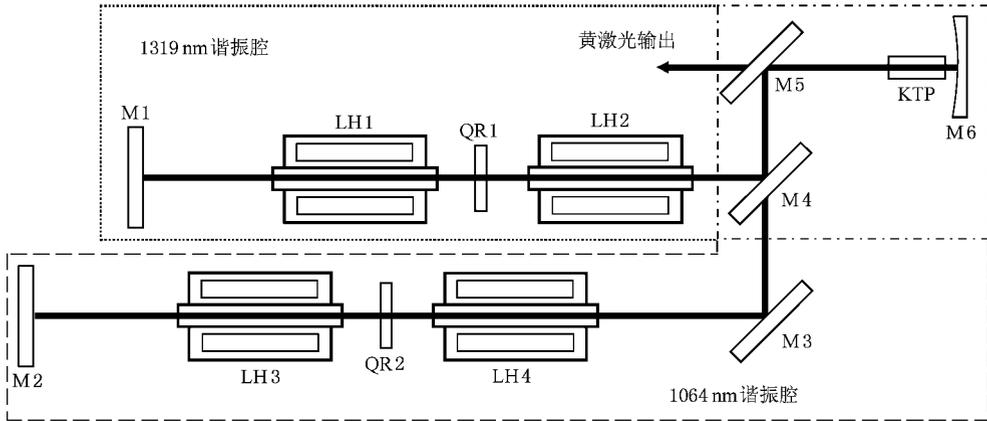


图 1 Nd:YAG 激光腔内和频产生黄光激光的光路图

自行设计组装, 其结构如图 2 所示. 激光头采用侧面抽运结构, 12 个准连续运转的 LD 条呈三向单线四列分布, 提供最大 240 W 的抽运功率. 激光头内所有的 LD 条都经过仔细挑选, 以便在确定的抽运功率和冷却温度下, LD 条的中心发射波长能与 Nd:YAG 激光晶体的吸收波段相符合. 3 个镀金的反光体对称放置在 LD 阵列的对面, 用来将未吸收的抽运光多次反射回激光晶体中, 从而提高抽运光的耦合效率以及激光棒内抽运光的均匀度. 一个石英玻璃管置于激光头的中心被 LD 条及反光体包围, 将激光棒放置在玻璃管中, 蒸馏水在激光棒和石英管之间高速流动, 以带走抽运过程中所产生的废热, 对激光棒进行冷却. 所用的 Nd:YAG 圆棒长度为 80 mm, 直径 3 mm, 采用较低掺杂浓度的激光晶体, 使激光棒中的增益分布更为均匀. 为了降低激光棒端面的反射损耗, 激光头 LH1, LH2 中的激光棒双面镀 1319 nm 增透膜, 激光头 LH3, LH4 中的激光棒双面镀 1064 nm 增透膜. 每两个完全相同的激光头之间插入一块 90° 石英旋光晶体, 用来补偿热致双折射效应, 使得振荡光角向偏振位相延迟与切向偏振的位相延迟相互交换, 实时补偿由热致双折射效应带来的退偏效应, 保证高功率高光束质量基频光的获得^[8].

激光器采用热近非稳腔运转. 对于这样的运转

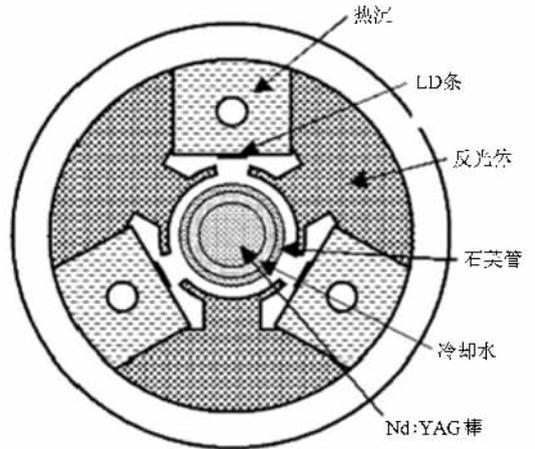


图 2 LD 侧面抽运激光头结构示意图

方式, 热透镜效应是一个非常重要的因素, 因此首先采用非稳腔法仔细测量了 1319 和 1064 nm 激光头中 Nd:YAG 激光棒在不同抽运功率下的热透镜焦距^[9]. 测量结果如图 3 所示, 从图中可以看出, 在相同的 LD 抽运功率下, 1319 nm 激光头中 Nd:YAG 激光棒产生的热透镜焦距较短, 其原因是由于在同样的 LD 抽运条件下, 产生 1319 nm 激光时的量子亏损 (即斯托克斯频移是 39%), 而产生 1064 nm 激光时的量子亏损为 24%. 因此, 在相同的 LD 抽运功率

下, 激发 1319 nm 激光辐射时在 Nd:YAG 棒中产生的总热量大于激发 1064 nm 激光辐射时产生的总热量, 因而 1319 nm 激光头中 Nd:YAG 激光棒产生的热透镜焦距较短. 比如, 当抽运功率为 220 W 时, 1319 nm 激光头中 Nd:YAG 激光棒产生的热透镜焦距为 245 mm, 而此时 1064 nm 激光头中 Nd:YAG 激光棒产生的热透镜焦距为 323 mm.

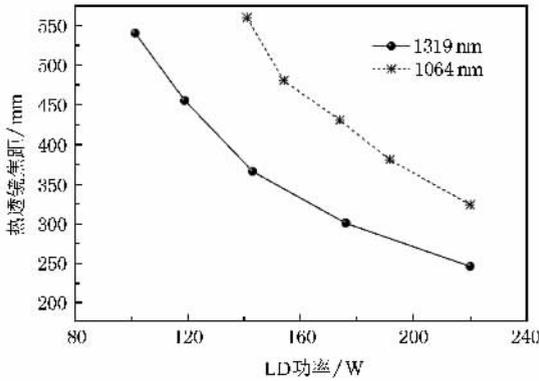


图 3 1319 nm 和 1064 nm 激光头中 Nd:YAG 棒在不同抽运功率下的热透镜焦距

在准确测量激光头的热透镜焦距以后, 我们对谐振腔进行了优化设计以确定腔长. 激光器的腔型采用平-凹对称腔, 即腔镜 M1 及 M3 距激光头 LH1 及 LH3 左端面的距离与腔镜 M6 距激光头 LH2 及 LH4 右端面的距离分别相等. 相对于平-平对称腔, 平-凹对称腔能够在和频晶体提供更小的基频光光斑半径, 从而提高基频光的峰功率密度以增加和频效率. 腔的优化设计主要遵循两个原则, 一是上面提到的热近非稳腔运转, 即 1319 nm 路谐振腔与 1064 nm 路谐振腔都运转在稳区的边缘, 接近非稳区, 以使 Nd:YAG 棒中有大的基模体积^[10]; 二是要使两束基频光在腔内尽量达到空间重合. 选定两路谐振腔的腔长分别为 $L_{1319\text{ nm}} = 635\text{ mm}$, $L_{1064\text{ nm}} = 795\text{ mm}$ 进行理论计算. 图 4 是用 ABCD 传输矩阵计算的 Nd:YAG 棒中基模半径随热透镜焦距变化的理论曲线, 图中实线代表 1319 nm 路谐振腔, 虚线代表 1064 nm 路谐振腔. 选择谐振腔工作在近非稳区, 即 1319 nm 路 Nd:YAG 棒中的热透镜焦距在 245 mm 附近, 1064 nm 路 Nd:YAG 棒中的热透镜焦距在 323 mm 附近, 此时其基模半径分别约为 0.778 和 0.774 mm, 大大高于谐振腔工作在稳区时的基模半径. 大的基模半径可以有效抑制高阶模振荡并增加基模的输出功率, 因此可以极大地提高激光的输出功率和光

束质量.

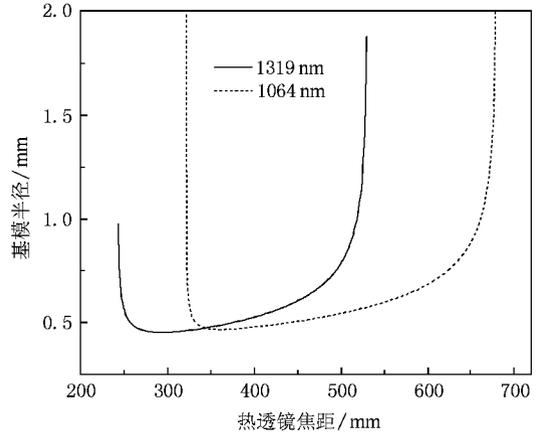


图 4 1319 nm 和 1064 nm 谐振腔 Nd:YAG 棒中的基模半径随热透镜焦距的变化关系

谐振腔优化设计的第二条原则是要使两束基频光在腔内尽量达到空间重合, 即基频光束腰位置重合且大小基本相等, 从而提高和频效率. 然而, 在具体的实验过程中很难确定激光腔内的光束大小, 为此, 我们也使用 ABCD 传输矩阵对其进行了理论处理. 图 5 是计算的基频光光斑大小随离 M6 镜距离变化的理论曲线. 此时, 选定的腔长为 $L_{1319\text{ nm}} = 635\text{ mm}$, $L_{1064\text{ nm}} = 795\text{ mm}$, 选定的热透镜焦距分别为 $f_{1319\text{ nm}} = 245\text{ mm}$, $f_{1064\text{ nm}} = 323\text{ mm}$. 由计算可知, 在距 M6 镜约 30 mm 的距离内, 1319 nm 路的光斑半径与 1064 nm 路的光斑半径大小基本一致 (差别小于 $4\text{ }\mu\text{m}$), 在距 M6 为 22 mm 处, 两路基频光的光斑半径大小达到一致, 均为 0.137 mm. 将 KTP 晶体放置在此处进行和频产生黄光激光, 并从 M5 镜输出. 由上面的分析可以看出, 我们选定的腔长很好的满足了腔型优化设计的两条原则.

除满足两束基频光的空间重合外, 为了进一步增加和频效率, 两束基频光的功率须满足一定的功率配比. 根据能量守恒定律: $h\nu_{1319\text{ nm}} + h\nu_{1064\text{ nm}} = h\nu_{589\text{ nm}}$, 即一个 1319 nm 的光子和一个 1064 nm 的光子产生一个 589 nm 的光子. 因此, 1319 nm 激光和 1064 nm 激光理论上的最佳腔内功率配比为 $P_{i(1319\text{ nm})} : P_{i(1064\text{ nm})} = 1 : 1.24$, P_{in} 表示激光的腔内功率. 然而, 非线性晶体处入射基频光的腔内功率很难从实验上直接测量, 为此我们想到了一个巧妙的解决办法. 因为已知腔内功率与腔外输出功率满足以下关系: $P_{in} : P_{out} = (1 + R) : (1 - R)$, 其中 P_{out} 和 R

分别代表激光的腔外输出功率和输出耦合镜的反射率.那么当取 1319 nm 和 1064 nm 激光腔的输出耦合镜反射率相同时,就有 $P_{in(1319\text{ nm})} : P_{in(1064\text{ nm})} = P_{out(1319\text{ nm})} : P_{out(1064\text{ nm})}$,而 1319 nm 和 1064 nm 激光的输出功率又对应着相应的 LD 的抽运功率,通过选择两束激光合适的 LD 抽运功率配比,就可以保证两路基频光在非线性晶体上满足最佳的功率配比,从而提高和频效率.关于此方面更为具体的论述请参阅我们之前的工作^[11].

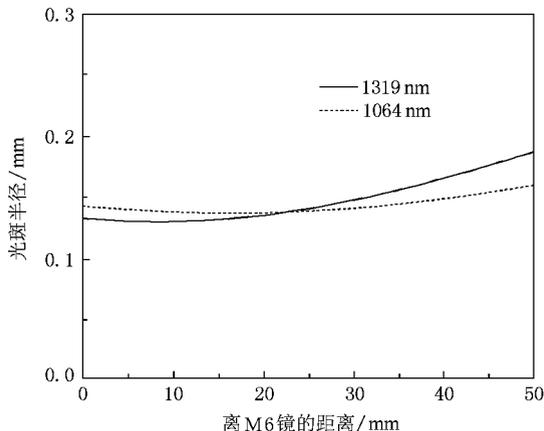


图 5 光斑半径随 M6 镜距离变化的关系

和频晶体选用一块 II 类临界相位匹配的 KTP 晶体,KTP 晶体有着较大的非线性系数.1319 nm 的 e 光和 1064 nm 的 o 光在其中的和频产生 589 nm 的 o 光.以 KTP 晶体中心为标准将其放置在距 M6 镜 22 mm 处,和频产生的黄光从 M5 镜处输出.KTP 晶体截面尺寸为 4 mm × 4 mm,有效非线性系数 $d_{\text{eff}} = 3.71 \text{ pm/V}^{[12]}$,晶体两端面镀有 1319,1064 和 589 nm 增透膜.将晶体置于自行研制的高精度温控炉中,使用水冷方式冷却,控温精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

按上述实验装置进行实验,图 6 显示了不同 LD

抽运功率(4 个激光头的总抽运功率)下,黄光激光的输出功率曲线.由图中可以看出,当 LD 总抽运功率为 880 W 时,获得了最高平均功率为 7.6 W 的准连续波黄光激光输出,相对于之前采用平-平腔连续工作方式的结^[7],其光光转换效率提升了 13.6%.同时,我们用快速光电二极管对黄光脉冲进行了测量,其重复频率约为 1.1 kHz.

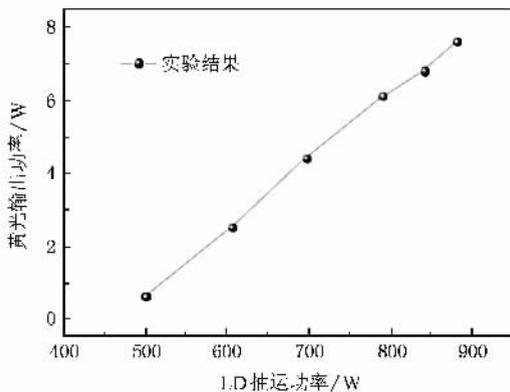


图 6 不同 LD 抽运功率下黄光激光的输出功率

3. 结 论

本文研究了 L 型共折叠臂平-凹对称腔 Nd:YAG 激光腔内 KTP 和频的方案,通过对腔型进行优化设计,获得了高功率的准连续波全固态黄光激光源.其最高功率 7.6 W,脉冲频率 1.1 kHz,这是目前腔内和频方案所获得的最高功率全固态黄光输出,说明此种方案是获得高功率黄光的一种有效方案,通过进一步提高 LD 的抽运功率及光光转换效率,有望获得更高功率的黄光输出.

- [1] Glenn W E 1997 *Adv. Solid-State Lasers* **10** 38
- [2] Janousek J, Janousek J, Johansson S, Tidemand-Lichtenberg P, Wang S H, Mortensen J L, Buchhave P, Laurell F 2005 *Opt. Express* **13** 1188
- [3] She C Y, Yu J R, Latifi H, Bills R E 1992 *Appl. Opt.* **31** 2095
- [4] Motomura K, Mitsunaga M 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2456
- [5] Saito Y, Hayano Y, Saito N, Akagawa K, Takazawa A, Kato M, Ito M, Colley S, Dinkins M, Eldred M, Golota T, Guyon O, Hattori M, Oya S, Watanab M, Takami H, Wada S 2006 *Proc. SPIE* **6272** 627246

- [6] Fugate R Q, De nman C A, Hillman P D, Moore G T, Telle J M, De La Rue I A, Drummond J D, Spinhome J M 2004 *Proc. SPIE* **5490** 1010
- [7] Bo Y, Geng A C, Lu Y F, Yang X D, Peng Q J, Cui Q J, Cui D F, Xu Z Y 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1494
- [8] Geng A C, Bo Y, Bi Y, Sun Z P, Yang X D, Lu Y F, Chen Y H, Guo L, Wang G L, Cui D F, Xu Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5227 (in Chinese) [耿爱丛、薄 勇、毕 勇、孙志培、杨晓冬、鲁远甫、陈亚辉、郭 林、王桂玲、崔大复、许祖彦 2006 物理学报 **55** 5227]

- [9] Lancaster D G , Dawes J M 1998 *Opt. Laser Technol.* **30** 103
- [10] Bo Y , Geng A C , Bi Y , Sun Z P , Yang X D , Li R N , Cui D F , Xu Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1171 (in Chinese) [薄 勇、耿爱丛、毕 勇、孙志培、杨晓东、李瑞宁、崔大复、许祖彦 2006 物理学报 **55** 1171]
- [11] Geng A C , Bo Y , Yang X D , Li H Q , Sun Z P , Peng Q J , Wang X J , Wang G L , Cui D F , Xu Z Y 2005 *Opt. Commun.* **255** 248
- [12] SNLO free software for modeling nonlinear frequency conversion processes in nonlinear crystals <http://www.sandia.gov/imrl/X1118/xxtal.htm>

A high power quasi-continuous-wave yellow laser based on intracavity sum-frequency generation *

Lu Yuan-Fu^{1,2)†} Xie Shi-Yong^{1,2)} Bo Yong¹⁾ Cui Qian-Jin^{1,2)} Zong Nan^{1,2)}
Gao Hong-Wei¹⁾ Peng Qin-Jun¹⁾ Cui Da-Fu¹⁾ Xu Zu-Yan¹⁾

1) *Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

2) *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 28 May 2008 ; revised manuscript received 15 August 2008)

Abstract

This paper reports a high-power all-solid-state yellow laser based on intracavity KTP crystal sum-frequency generation. In order to achieve high output power, three key techniques are used: Firstly, the system is designed to operate in a pulsed mode to increase the beam quality and optical-to-optical conversion efficiency under the same pump level. Secondly, thermal near-unstable resonator design and two-rod birefringence compensation is used to acquire large fundamental mode size in Nd:YAG rod. Thirdly, by optimizing an L-shaped co-folding-arm plane-concave symmetrical cavity, the two fundamentals have a high spatial overlap in the sum-frequency crystal and satisfy the power ratio requirement. As a result of the applications of these techniques, a quasi-continuous-wave yellow laser with output power of 7.6 W and repetition frequency of 1.1 kHz is obtained. To the best of our knowledge, this is the highest yellow laser output power produced by an intracavity sum-frequency Nd:YAG laser.

Keywords : yellow laser , intracavity sum-frequency , Nd:YAG laser , all solid-state laser

PACC : 4260B , 4260D , 4265M

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60508013).

† E-mail :lyf_laser@yeah.net