

高峰值功率Nd:YLF/BaWO₄正交偏振双波长拉曼激光器

樊莉 向柯赞 沈君 朱骏

High-peak-power orthogonally-polarized dual-wavelength Nd:YLF/BaWO₄ Raman laser

Fan Li Xiang Ke-Yun Shen Jun Zhu Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 094203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211727

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211727>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双端泵浦Nd³⁺掺杂MgO:LiNbO₃正交偏振双波长连续激光调控

Regulation of orthogonally polarized dualwavelength continuous wave laser based on double-end pumped Nd³⁺ doped MgO:LiNbO₃

物理学报. 2021, 70(18): 184203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210449>

声光调Q Nd:YVO₄晶体级联拉曼倍频窄脉宽657 nm激光器

Frequency doubling of acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ cascaded Raman laser for narrow pulse-width 657 nm laser

物理学报. 2021, 70(22): 224209 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210695>

波长锁定878.9 nm激光二极管抽运内腔式YVO₄/BaWO₄连续波拉曼激光器

Continuous-wave intracavity YVO₄/BaWO₄ Raman laser pumped by a wavelength-locked 878.9 nm laser diode

物理学报. 2018, 67(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171848>

基于偏振依赖多模-单模-多模光纤滤波器的波长间隔可调谐双波长掺铒光纤激光器

Continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on polarization-dependent in-line multimode-single-mode-multimode fiber filter

物理学报. 2019, 68(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190297>

双波长外腔面发射激光器

Dual-wavelength external-cavity surface-emitting laser

物理学报. 2019, 68(11): 114204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182261>

自拉曼混频黄绿波段三波长可切换激光

Triple wavelength-switchable lasing in yellow-green based on frequency mixing of self-Raman operation

物理学报. 2020, 69(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200324>

高峰值功率 Nd:YLF/BaWO₄ 正交偏振双波长拉曼激光器*

樊莉[†] 向柯赞 沈君 朱骏

(扬州大学物理科学与技术学院, 应用光子技术研究所, 扬州 225002)

(2021 年 9 月 16 日收到; 2022 年 1 月 6 日收到修改稿)

正交偏振双波长激光在精密测量、太赫兹产生、差分雷达、光谱分析等领域有着重要的应用前景. Nd:YLF 晶体具有两个发射截面相近的正交偏振发射峰, 加上优异的储能性能和热性能, 是适合产生正交偏振双波长激光的优良增益介质. 本文采用低掺杂浓度的 Nd:YLF 晶体作为激光增益介质产生 1047 nm 和 1053 nm 的正交偏振双波长基频光, 通过适当增大抽运光斑降低 Nd:YLF 晶体热裂的风险, 利用 BaWO₄ 晶体的腔内拉曼频移, 实现了高峰值功率的 1159.9 nm 和 1167.1 nm 正交偏振双波长脉冲拉曼激光输出. 在 40 W 的总入射抽运功率和 5 kHz 的脉冲重复频率下, 获得平均输出功率为 2.67 W 的双波长拉曼激光输出, 相应的光光转换效率为 6.7%. 1159.9 nm 和 1167.1 nm 拉曼激光输出功率分别为 1.31 W 和 1.36 W, 最窄脉冲宽度分别为 1.50 ns 和 1.53 ns, 对应的峰值功率分别高达 174.7 kW 和 177.8 kW. 结果表明, 降低掺杂浓度和增大抽运光斑可有效解决 Nd:YLF 晶体在高抽运功率下发生热裂的问题, Nd:YLF/BaWO₄ 是实现正交偏振双波长拉曼激光输出的一种较有前途的晶体组合.

关键词: 双波长拉曼激光, 正交偏振, 主动调 Q, Nd:YLF 晶体

PACS: 42.55.Ye, 42.55.Xi, 42.60.Gd, 42.60.-v

DOI: 10.7498/aps.71.20211727

1 引言

近年来, 随着激光在通信、国防、医学、工业加工等领域的广泛应用, 单一波长的激光已不能满足应用需求, 人们对激光器的研究重点逐渐从单波长输出转变为实现多波长或双波长激光输出. 其中正交偏振双波长激光由于在差分雷达、光谱分析、激光干涉、精密测量、差频产生太赫兹等领域有着重要应用, 成为了当前激光领域的一个研究热点. 2009 年开始, 研究人员就开始利用各种稀土离子掺杂的各向异性激光晶体, 如掺 Nd 激光晶体 Nd:GdVO₄^[1], Nd:YLF^[2-5], Nd:LuVO₄^[6,7], Nd:YAP^[8], Nd:YAG^[9,10], Nd:YVO₄^[11,12], Nd:LLF^[13], Nd:

LMB^[14], 掺 Yb 激光晶体 Yb:KGW^[15], Yb:CGB^[16], Yb:GMB^[17] 以及其他激光晶体 Tm, Ho:LLF^[18] 等, 直接受激辐射产生正交偏振双波长激光输出. 但由于受激光介质固有能级结构的限制, 目前正交偏振双波长基频激光器的输出波长范围有限, 主要集中在 0.9, 1.0, 1.3 和 2.0 μm 几个常见的波段.

受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 是一种高效的非线性光学频率变换技术. 拉曼激光器就是利用介质的 SRS 效应对基频激光进行频率变换, 产生新波长的拉曼激光输出. 通过不同激光与拉曼频移介质的组合, 可获得丰富的新波长激光, 并且 SRS 过程还具有光束净化效应, 相比基频激光, 获得的拉曼激光具有更好的光束质量、更窄的脉冲宽度和谱线宽度^[19]. 因此, 研究人员开

* 国家自然科学基金 (批准号: 11774301) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: fanli@yzu.edu.cn

始利用 SRS 效应来产生正交偏振双波长激光, 大大拓宽了正交偏振双波长激光的光谱范围. 2012 年, Huang 等^[20] 利用 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 键合晶体产生了 1064 nm 被动调 Q 脉冲基频激光, 再通过 KTP 和 KTA 两块晶体的腔内拉曼频移, 实现了 1091 nm 和 1095 nm 正交偏振双波长拉曼激光的同步输出, 对应的最高输出功率分别为 170 mW 和 150 mW. 2014 年, Liu 等^[21] 采用耦合腔结构, 利用两块 Nd:YLF 晶体分别产生正交偏振的 1047 nm 和 1053 nm 基频激光, 再通过 BaWO₄ 晶体拉曼频移获得了 423 mW 的 1159.4 nm 和 332 mW 的 1166.8 nm 正交偏振双波长拉曼激光输出. 2016 年, Sun 等^[22] 利用 Yb:GAB 晶体产生的 1042.8 nm 和 1047.5 nm 两束正交偏振基频光, 分别经过 KGW 晶体的 901 cm⁻¹ 和 768 cm⁻¹ 两个拉曼频移峰, 实现了 1133.1 nm 和 1156.6 nm 以及 1137.8 nm 和 1151.9 nm 两套正交偏振双波长拉曼激光输出. 但实验中为了防止激光晶体损坏, 抽运功率只加到 6.6 W, 获得的各波长拉曼激光输出功率都较低 (< 100 mW).

在目前常用的产生正交偏振双波长基频激光的晶体中, Nd:YLF 晶体由于具有两个发射截面相近的正交偏振发射峰 1047 nm (π 偏振, 发射截面为 1.8×10^{-19} cm²) 和 1053 nm (σ 偏振, 发射截面为 1.2×10^{-19} cm²)^[2], 被认为是一种非常适合产生正交偏振双波长激光的晶体材料. 另外, Nd:YLF 晶体还具有较长的上能级荧光寿命 (约 520 μ s) 和较弱的热透镜效应^[23,24], 因此是一种适合产生高脉冲能量和良好光束质量激光的优良晶体材料. 此外, 在常用的拉曼晶体中, BaWO₄ 晶体具有较高的拉曼增益、较好的散热性能且不容易损伤等优势, 是一种性能优良的拉曼介质. 该晶体的最强拉曼频移峰为 925 cm⁻¹, 当使用波长 1064 nm 的基频光抽运时, 其稳态拉曼增益可达 8.5 cm/GW, 明显高于 YVO₄, GdVO₄, KGd(WO₄)₂ 等其他常用拉曼晶体, 因此被广泛应用于连续波拉曼激光器中以获得高效率的拉曼转换^[25–27], 这意味着采用 Nd:YLF/BaWO₄ 晶体组合将有望获得高功率的正交偏振双波长拉曼激光输出. 然而, 在文献^[21] 中却由于 Nd:YLF 晶体存在在高抽运功率下容易发生热断裂的问题, 两台抽运源的功率分别只加到 5.73 W 和 4.85 W, 严重限制了双波长拉曼激光输出功率的提高.

本文采用 Nd:YLF 晶体作为激光增益介质, BaWO₄ 晶体作为拉曼晶体, 通过采用降低掺杂浓度和增大抽运光斑^[28] 的技术途径来降低 Nd:YLF 晶体发生热断裂的风险, 进一步探索在高抽运功率下 Nd:YLF/BaWO₄ 主动调 Q 正交偏振双波长拉曼激光器的输出性能, 系统研究了输出镜曲率半径以及抽运光斑大小对激光器性能的影响. 最终在 40 W 总抽运功率和 5 kHz 脉冲重复频率下, 获得了 2.67 W 正交偏振双波长拉曼激光输出, 相应的光光转换效率为 6.7%. 其中 1159.9 nm 拉曼激光最大平均输出功率为 1.31 W, 1167.1 nm 拉曼激光输出功率为 1.36 W, 双波长拉曼激光的最短脉冲宽度分别为 1.50 ns 和 1.53 ns, 相应的最高峰值功率分别为 174.7 kW 和 177.8 kW. 与之前的研究结果相比^[21], 正交偏振双波长拉曼激光的输出功率和峰值功率都显著提高.

2 实验装置与设计

图 1 为 Nd:YLF/BaWO₄ 主动调 Q 正交偏振双波长拉曼激光器实验装置图. 激光器采用双谐振腔结构并用两台抽运源进行抽运. 两台抽运源均为光纤耦合输出的 808 nm 半导体激光器 (808 nm LD), 其中抽运源 A (北京凯普林, DS3-51412-0906) 的最大输出功率为 40 W, 其光纤芯径为 400 μ m, 数值孔径为 0.22. 为了增大抽运光斑防止 Nd:YLF 晶体发生热裂, 该抽运光采用成像比为 1:2 或 1:3 的耦合器准直聚焦后入射到晶体前端, 因此抽运光斑直径大约为 800 或 1200 μ m. 与抽运源 A 不同的是, 抽运源 B (Coherent, FAPSys-30 W-808 nm) 的最大输出功率为 30 W, 光纤芯径为 800 μ m, 该抽运光经过平凸透镜 F1 和 F2 构成的透镜组准直聚焦后入射到晶体中. 其中透镜 F1 的焦距固定为 50 mm, 透镜 F2 的焦距则分别采用 50 和 75 mm, 以保证该抽运光斑大小与另一路相同, 光斑直径约为 800 和 1200 μ m.

激光器采用 M1-P-M4 和 M2-P-M4 的双谐振腔结构, 两个谐振腔通过一块偏振片 P 连接在一起. 当偏振片以布儒斯特角插入谐振腔时, 对 p 偏振光高透 ($T > 90\%$), 对 s 偏振光高反 ($R > 99.9\%$). 因此当两块激光晶体的 c 轴垂直于实验台放置时, p 偏振的 1053 nm 和 s 偏振的 1047 nm 基频激光将分别在 M1-P-M4 和 M2-P-M4 两个谐振腔中振

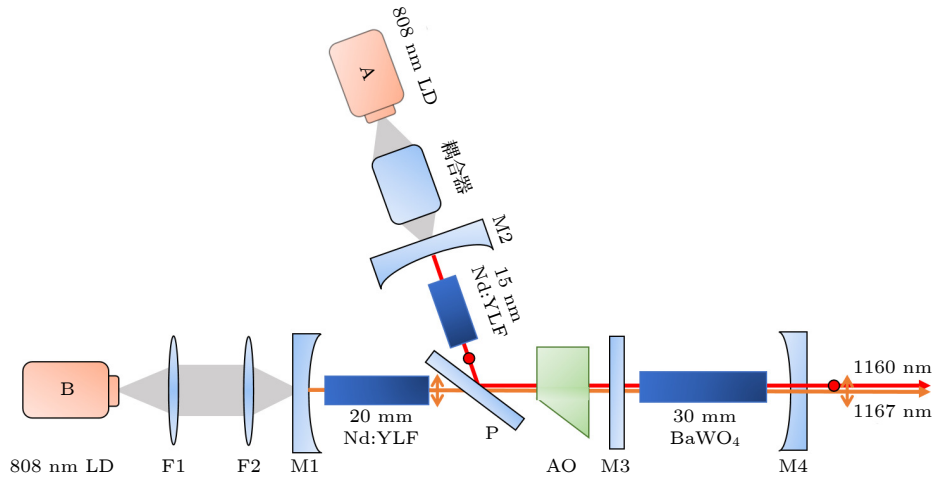


图1 主动调Q正交偏振双波长拉曼激光器装置图

Fig. 1. Schematic of actively Q-switched orthogonally polarized dual-wavelength Raman laser.

荡. 输入镜 M1 和 M2 是曲率半径为 200 mm 的平凹镜, 镀有抽运光 808 nm 的高透膜 ($T > 95\%$) 以及 1047—1053 nm 波段基频激光的高反膜 ($R > 99.9\%$). 输出镜 M4 为不同曲率半径 ($R = 300, 500, 800$ mm) 的平凹镜, 镀有 1047—1053 nm 基频激光的高反膜 ($R > 99.9\%$) 以及 1159—1167 nm 拉曼激光的部分透膜 ($T = 10\%$). 为减少拉曼激光腔内振荡的损耗, 基频谐振腔内插入平镜 M3, 其朝着 Nd:YLF 晶体的端面镀有 1047—1053 nm 的增透膜 ($R < 0.2\%$), 另一个面上镀有 1159—1167 nm 高反膜 ($R > 99.9\%$) 以及 1047—1053 nm 高透膜 ($T \approx 95\%$), 因此拉曼激光将仅在 M3 和 M4 之间振荡. 实验中基频激光腔长约为 180 mm, 拉曼腔长为 35 mm.

为了降低 Nd:YLF 晶体发生热断裂的风险, 实验中选用低掺杂浓度 (原子百分比为 0.55%) 的 a 切 Nd:YLF 晶体作为激光晶体, 为了提高晶体对抽运光的吸收率, 选择长度较长的晶体, 两块晶体的长度分别为 15 和 20 mm, 横截面积均为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$. 由于 Nd:YLF 晶体中 1047 nm 激光的受激发射截面略大于 1053 nm 激光, 为了平衡双波长基频激光的输出功率, 实验中将长度为 20 mm 的 Nd:YLF 晶体用于产生 1053 nm 激光, 长度略长于 15 mm 的 Nd:YLF 晶体用于产生 1047 nm 激光. 两块晶体的入射端面均镀有 808 nm 抽运光和高透膜 ($T > 99.3\%$), 而另一面除了镀有 1047—1053 nm 激光的高透膜 ($T > 99\%$) 之外, 还镀有抽运光 808 nm 的高反膜 ($R > 95\%$), 以将未吸收的抽运光再次反射回晶体内, 进

一步提高晶体对抽运光的吸收率. 实验中在激光晶体与中间镜 M3 之间插入工作波长为 1064 nm 的声光 (acousto-optic, AO) Q 开关 (Gooch&Housego, I-QS027-4 C4 G-U5-ST1) 来实现调 Q 输出的正交偏振双波长激光. 拉曼晶体采用 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的 b 切 BaWO_4 晶体. 由于当基频光偏振方向平行于 BaWO_4 晶体 c 轴时获得的拉曼增益较高, 因此实验中将 BaWO_4 晶体的 c 轴放置在水平方向上, 与发射截面较小的 1053 nm 激光偏振方向相同, 以使该激光获得较高的拉曼增益, 提高频移后相应拉曼激光的输出功率, 从而进一步平衡双波长拉曼激光的输出功率. 以上激光和拉曼晶体均用铝箔包裹后置于水温设置为 18°C 的水冷紫铜架中. 激光器输出的正交偏振双波长拉曼激光由一个偏振分束器 (PBS) 分成两路光, 分别使用 LP-3C 和 PM100D 两台功率计测量其输出功率, 并使用 Yokogawa 公司的 AQ-6370C 型光谱仪测量输出光谱.

3 实验结果与分析

3.1 输出镜曲率半径的影响

为了最大程度降低 Nd:YLF 晶体发生热裂的风险, 实验中首先采用大光斑抽运晶体, 分别采用成像比 1:3 的耦合器和焦距为 50/75 mm 的透镜组将两路抽运光斑放大到 $1200 \mu\text{m}$. 此时为了提高拉曼激光输出功率和转换效率, 谐振腔的设计需要考虑实现以下 3 个方面: 1) 激光晶体内要获得与大抽运光斑相匹配的较大的基频激光振荡光斑,

在提高抽运光能量利用率的同时,又具有大的模体积,从而获得较高的腔内基频光功率;2) 由于拉曼转换效率与基频光功率密度成正比,因此应尽量使拉曼晶体振荡的基频激光光斑小一些,从而提高基频光功率密度,获得更高的拉曼转换效率;3) 由于拉曼晶体振荡的拉曼激光光斑半径越小获得的拉曼转换效率越高^[29],因此应使拉曼晶体振荡的拉曼激光光斑也尽量小一些. 由于实验条件限制,谐振腔中输入镜及中间镜的曲率半径已经确定,因此只能通过输出镜曲率半径的选择来对谐振腔结构进行优化,因此实验中分别采用曲率半径 R 为 300, 500 和 800 mm 的输出镜搭建了激光器并测量其输出性能. 根据前期研究结果^[4,21], Nd:YLF 激光器中重复频率越小,基频光的峰值功率越高,有利于获得更高的拉曼转换效率. 但重复频率太小的话容易出现次脉冲,反而会降低主脉冲的峰值功率及拉曼转换效率. 实验中观察到声光 Q 开关的

重复频率 (pulse repetition frequency, PRF) 设置为 5 kHz 时激光输出功率最高,因此后续实验中激光器的重复频率固定为 5 kHz. 图 2 为重复频率为 5 kHz 时,采用不同曲率半径输出镜时测得的 1160 和 1167 nm 正交偏振双波长拉曼激光平均输出功率随抽运功率的变化 (为了防止晶体损伤,抽运功率最高加到 10 W). 从图 2 可以看出,采用曲率半径 $R = 500$ mm 的输出镜时双波长拉曼激光输出功率最高.

图 3 所示为不同曲率半径输出镜情况下,采用 $ABCD$ 传输矩阵计算的在 10 W 抽运功率下腔内不同位置处 1047, 1053 nm 基频激光和 1160, 1167 nm 拉曼激光基横模光斑的半径. 从图 3 可以看出,输出镜曲率半径越大,激光晶体腔内 (腔前侧靠输入镜处) 振荡的基频光斑越大,模体积较大的同时与大抽运光斑 (半径为 600 μm) 的模式匹配也较好. 并且输出镜曲率半径越大,拉曼晶体腔内

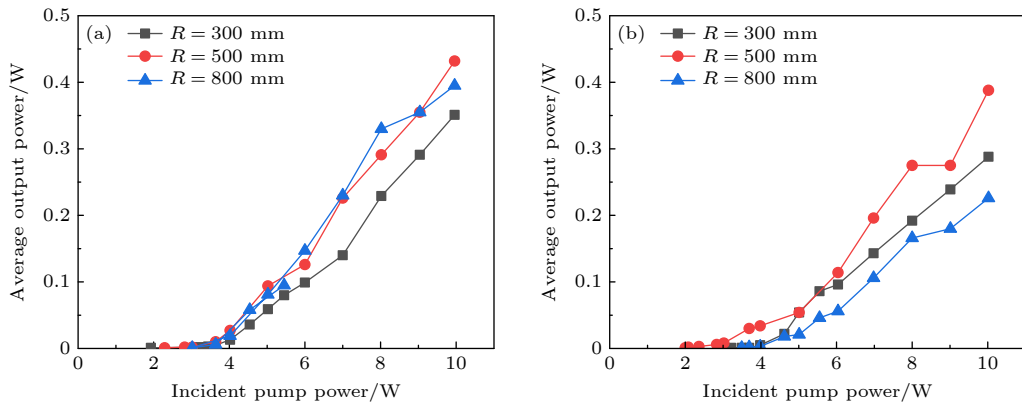


图 2 不同曲率半径输出镜下 (a) 1160 nm 和 (b) 1167 nm 拉曼激光的平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2. Average output power at (a) 1160 nm and (b) 1167 nm versus the incident pump power for output couplers with different radii of curvature.

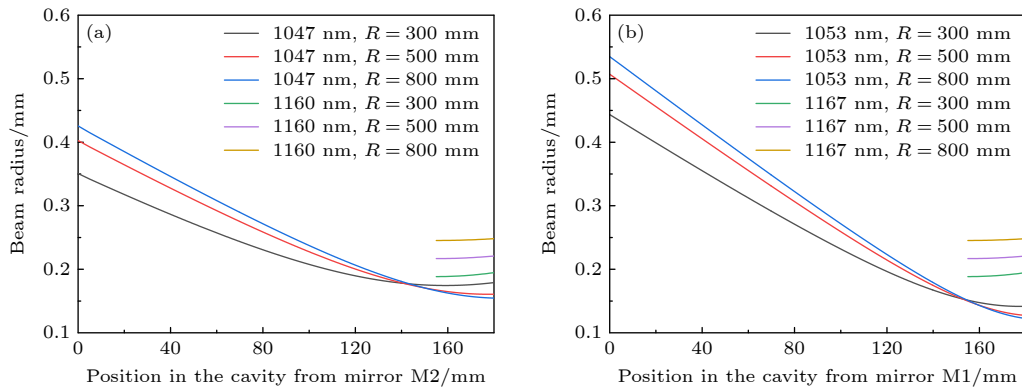


图 3 不同曲率半径输出镜下,腔内不同位置处基频和拉曼激光光斑半径

Fig. 3. Cavity mode radius of fundamental and Raman laser at different positions inside the cavity for output couplers with different radii of curvature.

(后侧靠输出镜处) 基频光斑越小, 基频光功率密度越高, 可以获得更高的拉曼转换效率. 因此选用曲率半径较大的 500 和 800 mm 输出镜时, 获得的激光输出功率将更高. 此外, 观察图 3 中拉曼晶体内振荡的拉曼激光光斑可以发现, 输出镜曲率半径越大, 拉曼激光振荡光斑越大. 因此当选用曲率半径 800 mm 的输出镜时, 拉曼激光振荡光斑最大, 与基频光斑相差较大, 将降低拉曼转换效率. 基于以上分析可知, 当选用曲率半径 500 mm 的输出镜时, 激光晶体内获得的基频激光模体积较大, 且与抽运光斑匹配良好, 拉曼晶体内基频和拉曼激光光斑都较小, 因此获得的拉曼激光输出功率最高. 后续实验中将输出镜曲率半径固定为 500 mm.

3.2 抽运光斑大小的影响

以上实验中为了防止 Nd:YLF 晶体发生损伤, 直接将抽运光斑放大到 1200 μm . 但在激光器中如果抽运光斑太大, 它与振荡激光腔模匹配效率会下降, 抽运能量将不能有效耦合到振荡激光模体积中, 将导致激光器的转换效率下降. 而如果抽运光斑过小, 激光晶体则容易损伤, 并且小抽运光斑的发散角较大也会导致与激光腔模的耦合效率降低, 因此实验中抽运光斑的大小需要综合考虑以上因素, 选取一个合适的值. 基于 3.1 节的研究, 当抽运光斑直径为 1200 μm 、输出镜曲率半径为 500 mm、重复频率设置为 5 kHz 时, 首先继续增加抽运功率到 20 W, 探索该正交偏振双波长拉曼激光器在高抽运功率下的性能. 接着又改为采用 1:2 放大的耦合器和焦距为 50/50 mm 的透镜组来放大抽运光斑, 将两路抽运光斑直径从 1200 μm 缩小到 800 μm , 研究对比不同抽运光斑大小时激光器的输出性能.

图 4 为当抽运光斑直径分别为 1200 和 800 μm 时测得的双波长拉曼激光平均输出功率和脉冲宽度随抽运功率的变化. 从图 4(a) 可以看出, 当采用较小的 800 μm 抽运光斑时, 由于抽运光能量更集中, 拉曼激光振荡阈值更低, 1160 nm 和 1167 nm 拉曼激光的振荡阈值分别为 1.7 W 和 2.5 W. 此外, 采用 800 μm 抽运光斑时获得的双波长拉曼激光平均输出功率明显高于 1200 μm 抽运光斑时. 其中当抽运功率为 13 W 时, 获得的光光转换效率最高, 相应的 1160 nm 和 1167 nm 拉曼激光平均输出功率分别为 0.98 W 和 1.06 W, 光光转换效率分别为 7.5% 和 8.2%. 此后继续增加抽运功率, 平均输出功率依然会增加但光光转换效率却有所下降. 最终当总抽运功率为 40 W (两台抽运源功率各为 20 W) 时, 获得了最高平均输出功率为 2.67 W 的正交偏振双波长拉曼激光输出, 相应的光光转换效率为 6.7%. 其中 1160 nm 和 1167 nm 拉曼激光的平均输出功率分别为 1.31 W 和 1.36 W, 相应的光光转换效率分别为 6.6% 和 6.8%. 在最高拉曼激光输出功率时, 测量了激光器输出功率的长期稳定度. 测量结果表明, 60 min 内 1160 nm 和 1167 nm 双波长拉曼激光的最高输出功率起伏分别为 6.3% 和 8.7%. 最后, 值得注意的是, 随着抽运功率的增加, 双波长拉曼激光的输出功率基本保持增长趋势, 在高抽运功率下没有出现饱和现象, 晶体也没有出现热断裂的现象. 与文献 [21] 中抽运功率高于 7 W 时观察到 Nd:YLF 晶体热裂相比 (抽运光斑直径为 600 μm , Nd:YLF 晶体的掺杂浓度为原子百分比 1%), 说明降低晶体掺杂浓度和适当放大抽运光斑可以有效解决 Nd:YLF 晶体热裂的问题.

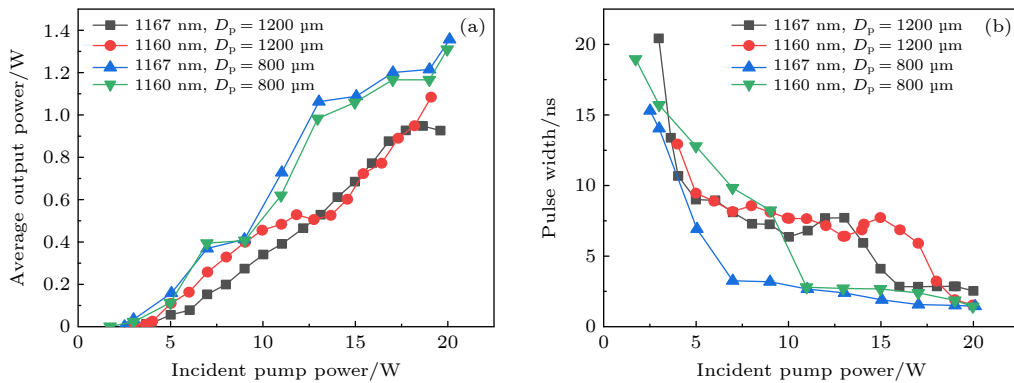


图 4 抽运光斑直径为 1200 和 800 μm 时, 1160 nm 和 1167 nm 拉曼激光的 (a) 平均输出功率和 (b) 脉冲宽度随抽运功率的变化
Fig. 4. (a) Average output powers and (b) pulse widths of 1160 nm and 1167 nm Raman lasers versus the incident pump power with pump spot diameter of 1200 and 800 μm .

从图 4(b) 可以看出, 双波长拉曼激光的脉冲宽度随着抽运功率的增加而减小. 在高抽运功率下采用 800 μm 抽运光斑时获得的双波长拉曼激光脉冲宽度明显小于 1200 μm 大抽运光斑时. 图 5 为拉曼激光平均输出功率最大以及重复频率为 5 kHz 时, 使用示波器 (KEYSIGHT InfiniiVision DSOX6004A, 2.5 GHz 带宽) 和两个高速探测器 (THORLABS, DET08CL/M) 探测的双波长拉曼激光的脉冲序列以及脉冲波形图. 从图 5(b) 可以看出, 获得的 1160 nm 和 1167 nm 拉曼激光最小脉宽分别为 1.50 ns 和 1.53 ns, 计算可得 1160 nm 和 1167 nm 激光的单脉冲能量分别为 262 μJ 和 272 μJ , 相应的峰值功率分别为 174.7 kW 和 177.8 kW.

综上所述, 采用 800 μm 抽运光斑时获得的双波长拉曼激光的输出功率和光光转换效率明显高于 1200 μm 大抽运光斑时, 而脉冲宽度则更小, 相应计算出的最高单脉冲能量和峰值功率则更高, 因此采用 800 μm 抽运光斑时激光器的性能明显优于采用 1200 μm 抽运光斑时. 和文献 [21] 中正交偏振双波长拉曼激光输出功率相比, 本文将正交偏振双波长拉曼激光输出功率提高了大约 3—4 倍, 峰值功率提高了约 30 倍, 相关参数对比可见表 1.

由于在最高抽运功率下拉曼激光输出功率并没有出现饱和现象, 并且实验中采用的谐振腔输入镜、中间镜及偏振片的镀膜参数并没有进一步优化, 因此进一步优化谐振腔和增加抽运功率将有望获得更高功率的正交偏振双波长拉曼激光输出.

图 6 为 40 W 总抽运功率、拉曼激光输出功率最大时测得的双波长拉曼激光的输出光谱. 从图 6 可见, 输出光谱只有双波长拉曼激光, 其中心波长分别为 1159.9 nm 和 1167.1 nm, 相应的谱线半高宽分别为 0.15 nm 和 0.12 nm. 光谱中没有探测到双波长基频激光光谱, 这主要是由于输出镜对基频光的反射率非常高 ($R > 99.9\%$), 基频光被有效抑制在腔内转换成了拉曼激光输出. 当采用 $T = 10\%$ 的 1047—1053 nm 基频激光的输出平镜替代拉曼输出腔镜搭建基频激光器时, 测得双波长基频激光的中心波长分别为 1047.4 nm 和 1053.4 nm, 相应的谱线半高宽分别为 0.17 nm 和 0.18 nm. 经过计算可知, 1159.9 nm 和 1167.1 nm 拉曼激光与 1047 nm 和 1053 nm 基频光的频率差为 925 cm^{-1} , 与 BaWO_4 晶体的最强拉曼频移峰相符合. 实验中使用格兰泰勒棱镜测量输出激光的偏振态后发现: 双波长拉曼激光与相应基频激光的偏振方向相同, 相互正交. 在最高平均输出功率下, 使用刀口法测

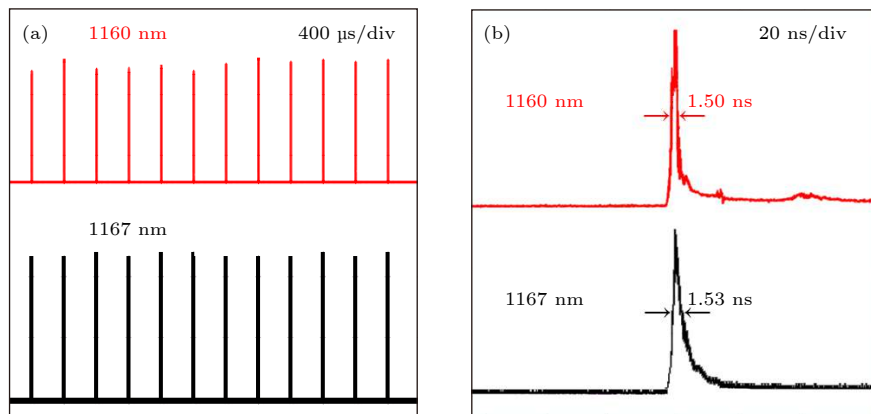


图 5 重复频率为 5 kHz 以及 40 W 抽运功率下, 双波长拉曼激光的 (a) 脉冲列图和 (b) 脉冲波形图

Fig. 5. (a) Actively Q -switched laser pulse train and (b) single pulse profiles of the dual-wavelength Raman laser pulses at the full pump power of 40 W and PRF of 5 kHz.

表 1 Nd:YLF/ BaWO_4 正交偏振双波长拉曼激光输出性能对比
Table 1. Comparison of performances of orthogonally polarized Nd:YLF/ BaWO_4 Raman lasers.

增益介质	输出拉曼波长/nm	注入功率/W	重复频率/kHz	输出功率	拉曼转换效率	脉宽/ns	峰值功率/kW	文献
Nd:YLF	1159.9	20	5	1.31 W	6.6%	1.50	174.7	This work
BaWO_4	1167.1	20		1.36 W	6.8%	1.53	177.8	
Nd:YLF	1159.4	5.73	6	423 mW	7.4%	12	5.88	[21]
BaWO_4	1166.8	4.85		332 mW	6.8%	9.3	5.95	

量了双波长拉曼激光光束质量因子, 1159.9 nm 激光的光束质量比较好, x 方向 M^2 为 1.07, y 方向 M^2 为 1.1; 1167.1 nm 激光 x 方向的光束质量略差, M^2 为 1.91, y 方向 M^2 为 1.16. 可以看出, 1167 nm 激光 x 和 y 方向上的光束质量差异较为明显, 这主要是由 Nd:YLF 晶体 1053 nm 基频激光沿 x 和 y 方向的热透镜效应强弱不同导致的^[30]. 图 6 中的插图分别是两个拉曼激光的二维光束强度分布图.

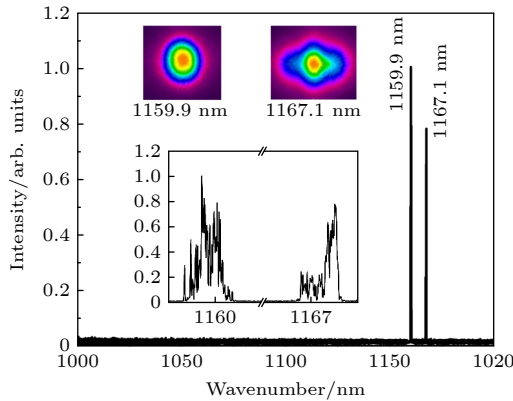


图 6 在 40 W 抽运功率下的双波长拉曼激光输出光谱图, 插图分别为激光二维光束强度分布图和放大的斯托克斯光谱图. Fig. 6. Optical spectrum of the dual-wavelength Raman laser at the full pump power of 40 W (the insets are the two-dimensional beam intensity profiles and zoomed Stokes spectrum).

4 结 论

本文报道了高峰值功率的 Nd:YLF/BaWO₄ 主动调 Q 正交偏振双波长拉曼激光器. 采用降低 Nd:YLF 晶体掺杂浓度和放大抽运光斑的技术途径, 大大降低了 Nd:YLF 晶体在高抽运功率下发生热裂的风险, 详细研究了高抽运功率下输出镜曲率半径、抽运光斑大小对正交偏振双波长拉曼激光器性能的影响, 大大提高了 Nd:YLF/BaWO₄ 正交偏振双波长拉曼激光器的输出功率. 在 40 W 的总入射抽运功率和 5 kHz 的脉冲重复频率下, 获得了平均输出功率为 2.67 W 的正交偏振双波长拉曼激光输出, 其中 1159.9 nm 和 1167.1 nm 拉曼激光输出功率分别为 1.31 W 和 1.36 W, 最短脉冲宽度分别为 1.50 ns 和 1.53 ns, 相应的峰值功率高达 174.7 kW 和 177.8 kW. 结果表明, 降低 Nd:YLF 晶体掺杂浓度和适当放大抽运光斑可有效解决 Nd:YLF 晶体在高抽运功率下发生热断裂的问题, Nd:YLF/BaWO₄ 是一种很有前途的产生正交偏

振双波长拉曼激光的晶体组合.

参考文献

- [1] Wu B, Jiang P P, Yang D Z, Chen T, Kong J, Shen Y H 2009 *Opt. Express* **17** 6004
- [2] Zhao P, Ragam S, Ding Y J, Zotova I B 2010 *Opt. Lett.* **35** 3979
- [3] Zhao P, Ragam S, Ding Y J, Zotova I B 2011 *Opt. Lett.* **36** 4818
- [4] Zuo Z Y, Dai S B, Zhu S Q, Yin H, Li Z, Chen Z Q 2018 *Opt. Lett.* **43** 4578
- [5] Tu Z H, Dai S B, Zhu S Q, Yin H, Li Z, Ji E C, Chen Z Q 2019 *Opt. Express* **27** 32949
- [6] Huang Y P, Cho C Y, Huang Y J, Chen Y F 2012 *Opt. Express* **20** 5644
- [7] Lv Y F, Xia J, Fu X H, Zhang A F, Liu H L, Zhang J 2014 *J. Opt. Soc. Am. B* **31** 898
- [8] Lv Y F, Xia J, Zhang J, Fu X H, Liu H L 2014 *Appl. Opt.* **53** 5141
- [9] Sun G C, Lee Y D, Zao Y D, Xu L J, Wang J B, Chen G B, Lu J 2013 *Laser Phys.* **23** 045001
- [10] Lin B, Xiao K, Zhang Q L, Zhang D X, Feng B H, Li Q N, He J L 2016 *Appl. Opt.* **55** 1844
- [11] Lv Y F, Zhang J, Xia J, Liu H L 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 656
- [12] Xu B, Wang Y, Lin Z, Cui S W, Cheng Y J, Xu H Y, Cai Z P 2016 *Appl. Opt.* **55** 42
- [13] Li H Q, Zhang R, Tang Y L, Wang S W, Xu J Q, Zhang P X, Zhao C C, Hang Y, Zhang S Y 2013 *Opt. Lett.* **38** 4425
- [14] Chen H B, Huang Y S, Li B X, Liao W B, Zhang G, Lin Z B 2015 *Opt. Lett.* **40** 4659
- [15] Brenier A 2011 *Laser Phys. Lett.* **8** 520
- [16] Xu J L, Ji Y X, Wang Y Q, You Z Y, Wang H Y, Tu C Y 2014 *Opt. Express* **22** 6577
- [17] You Z Y, Zhu Z J, Sun Y J, Huang Y S, Lee C K, Wang Y, Li J F, Tu C Y, Lin Z B 2017 *Opt. Mater. Express* **7** 2760
- [18] Zhang X L, Zhang S, Wang C Y, Li L, Zhao J Q, Cui J H 2013 *Opt. Express* **21** 22699
- [19] Murray J T, Austin W L, Powell R C 1999 *Opt. Mater.* **11** 353
- [20] Huang H T, Shen D Y, He J L 2012 *Opt. Express* **20** 27838
- [21] Liu Y, Liu Z J, Cong Z H, Li Y F, Xia J B, Lu Q M, Zhang S S, Men S J 2014 *Opt. Express* **22** 21879
- [22] Sun Y J, Lee C K, Zhu Z J, Wang Y Q, Xia H P, Wang X H, Xu J L, You Z Y, Tu C Y 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 3550
- [23] Zhang Z L, Liu Q, Nie M M, Ji E C, Gong M L 2015 *Appl. Phys. B* **120** 689
- [24] Ryan J R, Beach R 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 1883
- [25] Fan L, Fan Y X, Li Y Q, Zhang H J, Wang Q, Wang J, Wang H T 2009 *Opt. Lett.* **34** 1687
- [26] Sheng Q, Lee A, Spence D, Pask H 2018 *Opt. Express* **26** 32145
- [27] Sheng Q, Li R, Lee A J, Spence D J, Pask H M 2019 *Opt. Express* **27** 8540
- [28] Peng X Y, Xu L, Asundi A 2005 *Appl. Opt.* **44** 800
- [29] Hsiao J Q, Huang Y J, Lee C C, Yu Y T, Tsou C H, Liang H C, Chen Y F 2021 *Opt. Lett.* **46** 2063
- [30] Pollnau M, Hardman P J, Kern M A, Clarkson W A, Hanna D C 1998 *Phys. Rev. B* **58** 16076

High-peak-power orthogonally-polarized dual-wavelength Nd:YLF/BaWO₄ Raman laser^{*}

Fan Li[†] Xiang Ke-Yun Shen Jun Zhu Jun

(Institute of Applied Photonic Technology, College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

(Received 16 September 2021; revised manuscript received 6 January 2022)

Abstract

Orthogonally-polarized dual-wavelength laser has significant practical applications in various fields, such as precision metrology, terahertz radiation generation, differential radar, spectral analysis. The Nd:YLF crystal has two orthogonally-polarized emission peaks with comparable emission cross sections, high-energy storage capability and relatively weak thermal lens effect. Owing to these properties, it has been recognized as a suitable gain medium for generating orthogonally-polarized dual-wavelength laser. In this paper, the Nd:YLF crystal with low doping concentration is employed as a laser gain medium to produce 1047 nm and 1053 nm dual-wavelength fundamental lasers with orthogonal polarizations, and the risk of thermal cracking of Nd:YLF crystal is reduced by appropriately increasing the pump spots. Using the intracavity Raman frequency shift in BaWO₄ crystal, orthogonally-polarized dual-wavelength Raman lasers at 1159.9 nm and 1167.1 nm are achieved to have high peak power. Under the total incident pump power of 40 W and a pulse repetition rate of 5 kHz, the maximum dual-wavelength Raman output power is obtained to be 2.67 W. The corresponding total optical conversion efficiency is 6.7%. For 1159.9 nm and 1167.1 nm Raman laser, their maximum average output power values are 1.31 W and 1.36 W, respectively. Their narrowest pulse widths are 1.50 ns and 1.53 ns, and the corresponding peak power values are as high as 174.7 kW and 177.8 kW, respectively. The results show that the problem of thermal cracking of Nd:YLF crystal at high pump power can be solved by reducing the doping concentration and increasing the pump spot. The Nd:YLF/BaWO₄ is a promising crystal combination for realizing orthogonally-polarized dual-wavelength Raman laser.

Keywords: dual-wavelength Raman laser, orthogonal polarization, actively *Q*-switched, Nd:YLF crystal

PACS: 42.55.Ye, 42.55.Xi, 42.60.Gd, 42.60.-v

DOI: 10.7498/aps.71.20211727

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11774301).

[†] Corresponding author. E-mail: fanli@yzu.edu.cn