

波长锁定 878.9 nm 激光二极管抽运内腔式 $\text{YVO}_4/\text{BaWO}_4$ 连续波拉曼激光器

张蕴川 樊莉 魏晨飞 顾晓敏 任思贤

Continuous-wave intracavity $\text{YVO}_4/\text{BaWO}_4$ Raman laser pumped by a wavelength-locked 878.9 nm laser diode

Zhang Yun-Chuan Fan Li Wei Chen-Fei Gu Xiao-Min Ren Si-Xian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 024206 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171848

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171848>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Nd:YSAG 单晶的光谱和激光性能](#)

Spectral and laser properties of Nd:YSAG single crystal

物理学报.2017, 66(15): 154204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.154204>

[885nm 双端泵准连续微秒脉冲 1319nm 三镜环形腔激光](#)

A quasi-continuous dual-end 885 nm diode-pumped three-mirror ring-cavity laser operating at 1319 nm

物理学报.2016, 65(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154205>

[掺镱硼酸钙氧钇飞秒激光器及在拉锥光纤中产生跨倍频程超连续光](#)

Generation of octave-spanning super-continuum in tapered single mode fibre pumped by femtosecond Yb:YCOB laser

物理学报.2015, 64(5): 054206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054206>

[28.2 W 波长锁定 878.6 nm 激光二极管共振抽运双晶体 1064 nm 激光器](#)

A 28.2-W wave-locked 878.6 nm diode-laser-pumped multi-segmented Nd:YVO₄ laser operating at 1064 nm

物理学报.2014, 63(21): 214206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214206>

[激光二极管抽运的 Nd:YVO₄ 连续自拉曼 1175nm 激光器](#)

Laser diode end-pumped continuous-wave Nd:YVO₄ self-Raman laser at 1175 nm

物理学报.2014, 63(15): 154208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154208>

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*

张蕴川¹⁾ 樊莉^{1)2)†} 魏晨飞¹⁾ 顾晓敏¹⁾ 任思贤¹⁾

1)(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)

2)(南京大学, 固体微结构物理国家重点实验室, 南京 210093)

(2017年8月16日收到; 2017年9月19日收到修改稿)

采用波长锁定878.9 nm激光二极管共振抽运复合Nd:YVO₄激光晶体, 改善热效应的同时提高抽运吸收率, 分别以YVO₄和BaWO₄晶体作为拉曼介质, 实验和理论研究了晶体性能、谐振腔结构和稳定性对内腔分体式连续波拉曼激光器性能的影响. 结果表明: 由于内腔分体式拉曼激光器腔长较长, 谐振腔稳定性对激光器性能影响较大, 选择高增益的拉曼晶体, 不仅可获得高拉曼转换效率, 还能一定程度上减轻热效应. 而平凹腔结构中输出镜的曲率半径越小, 拉曼晶体中基频光的功率密度越大, 腔的动态稳定区越宽, 获得的拉曼激光输出功率更高. 最终以30 mm的BaWO₄晶体作为拉曼介质, 在抽运功率25.1 W时, 获得了3.02 W的连续拉曼激光输出, 光-光转换效率达到12%.

关键词: 内腔拉曼激光, 连续波, 共振抽运, 谐振腔结构设计

PACS: 42.55.Ye, 42.60.Pk, 42.55.Xi, 42.60.By

DOI: 10.7498/aps.67.20171848

1 引言

固体拉曼激光器是利用固体拉曼非线性晶体的受激拉曼散射(stimulated Raman scattering, SRS)效应, 对原激光波长进行频率转换从而获得新波长激光输出的一种激光器^[1-3], 是获得新波长激光的一种有效手段. 由于脉冲激光器中基频光具有较高峰值功率更易达到拉曼转换阈值, 因此以往报道的拉曼激光器大多是脉冲激光器. 直到2004年, 第一个连续波固体拉曼激光器才由Grabtchikov等^[4]利用高拉曼增益的Ba(NO₃)₂晶体实现. 近年来, 得益于腔镜镀膜和晶体生长技术的成熟连续波固体拉曼激光器的研究取得了很大进展^[5-10], 成为了固体激光器的一个研究热点.

目前报道的全固态连续拉曼激光器可分为内

腔分体式 and 自拉曼激光器两种. 与自拉曼激光器相比, 内腔分体式拉曼激光器是采用两块晶体分别作为激光和拉曼介质, 减轻了晶体的热效应, 并且激光和拉曼晶体中的腔模尺寸可分别灵活优化, 因此可获得较高的转换效率. 2005年, Pask以Nd:YAG晶体作为激光晶体, 以KGd(WO₄)₂晶体作为拉曼介质, 首次实现了内腔分体式连续拉曼激光器的运转, 获得了800 mW的1176 nm连续拉曼激光输出^[11]; 2006—2009年, 研究人员分别选用各种晶体组合成功实现了1.1 μm连续波拉曼激光输出^[12-15], 最高拉曼激光转换效率达到13.2%^[15]. 研究中发现由于内腔分体式拉曼激光器腔内元件多, 腔长较长, 随着抽运功率的增加, 严重的热透镜效应会使激光器不能工作在谐振腔稳定区内, 限制了激光输出功率的提高. 为了改善热效应, 研究者进行了各种努力. 2010年, Lee等^[16]采用880 nm

* 国家自然科学基金(批准号: 11774301)、江苏省自然科学基金青年科学基金(批准号: BK20130453)和南京大学固体微结构物理国家重点实验室开放课题(批准号: M29027)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fanli@yzu.edu.cn

激光二极管(LD)共振抽运Nd:GdVO₄/BaWO₄晶体组合,改善热效应,结合腔内倍频获得了2.9 W的590 nm黄光连续波输出. 2012年, Jakutis-Neto等^[17]采用881 nm LD共振抽运Nd:YLF/KGW晶体组合,利用共振抽运技术和Nd:YLF晶体的负热光系数减轻热透镜效应,实现了红外和黄绿波段多波长连续拉曼激光的稳定输出. 2016年, Wang等^[18]采用940 nm LD抽运Yb:YAG/Nd:YVO₄微晶片,由于Yb:YAG晶体的量子缺陷小,热效应好,有效改善了热效应,首次实现了多波长连续波微片拉曼激光器的运转. 以上研究表明,共振抽运技术通过减小抽运光和产生激光之间的量子亏损,可从根本上减轻激光晶体的热效应. 但由于一般激光工作物质对共振抽运光吸收率偏低,限制了激光器整体效率的提升. 近几年,有些研究者^[19–21]引入波长锁定窄线宽的LD端面抽运Nd:YVO₄晶体,通过LD发射波长与晶体共振抽运吸收峰的精确匹配,在改善热效应的同时有效提高了抽运吸收率,实现了高效率的拉曼激光运转.

本文采用波长锁定的878.9 nm LD作为共振抽运源,以复合Nd:YVO₄晶体作为激光晶体,分别采用YVO₄晶体和BaWO₄晶体作为拉曼介质,对不同腔结构内腔分体式拉曼激光器的输出特性进行了实验研究. 并采用 $ABCD$ 传输矩阵法和等效 G 参数法对激光腔的稳定性及腔内振荡激光腔模参数进行计算,详细分析了晶体性能、输出镜曲率半径、腔长、抽运光斑大小对激光器输出性能的影响. 最终以30 mm BaWO₄晶体作为拉曼介质,在抽运功率25.1 W时,获得了3.02 W的1180 nm连续拉曼激光输出,光-光转换效率达到12%,拉曼阈值为2.54 W,斜率效率为13%.

2 谐振腔理论

对于两腔镜高功率固体激光器,考虑激光晶体的热透镜效应,谐振腔可等效看成一个如图1所示的热透镜腔. 其中, M_1 , M_2 为谐振腔镜(R_1 , R_2 分别为其曲率半径),腔内激光晶体被看作是一个焦距 f 随着抽运参数变化的热透镜,它到 M_1 , M_2 的距离分别为 d_1 , d_2 ,腔内振荡激光与 M_1 , M_2 镜相邻的基横模高斯光束的束腰半径分别为 ω_{01} , ω_{02} ,束腰位置分别用到 M_1 , M_2 的距离 L_{01} , L_{02} 表示.

在连续激光二极管端面抽运下,激光晶体热透

镜效应的热焦距^[23]可表示为

$$f = \frac{\pi K_C \omega_p^2}{P_{in} \eta_h (dn/dT)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right], \quad (1)$$

式中: K_C 为激光晶体的热传导率; ω_p 为抽运光斑半径; P_{in} 为抽运功率; η_h 为激光器中的热负载比,即吸收抽运光转换为热量的比例,可表示为 $\eta_h = 1 - \eta_p \eta_l (\lambda_p / \lambda_l)$. 对于1064 nm基频激光,当采用880 nm LD共振抽运时,一般取 $\eta_p \approx 1$, $\eta_l = 0.98$, λ_p / λ_l 为抽运光与激光波长之比,则热负载比 $\eta_h = 1 - 0.98 \times \frac{880}{1064} = 18.9\%$,相比传统808 nm抽运时的33%减小很多^[24],可见880 nm共振抽运方式可以明显减轻激光器热效应. 此外,式中 dn/dT 和 α 为晶体热光系数和吸收系数, l 为激光晶体掺杂部分的长度,实验中,对于采用的掺杂浓度为0.3 at.%的Nd:YVO₄晶体, $K_C = 0.054$ W/cm·K, $dn/dT = (4.7 \pm 0.6) \times 10^{-6}$ ^[25], $\alpha = 1.25$ cm⁻¹ ^[26]. 将这些参数代入(1)式,可以算出Nd:YVO₄晶体在不同抽运功率下的热透镜焦距.

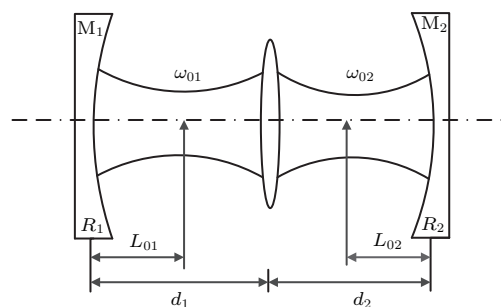


图1 热透镜腔结构示意图^[22]

Fig. 1. Resonators with an internal thermal lens^[22].

对于热透镜腔,以镜 M_1 作为参考,腔内单程变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d_2}{f} & d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{d_1}{f} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

采用等效 G 参数法,谐振腔对应的 G 参数为 $G_1 = a - b/R_1$, $G_2 = d - b/R_2$,当满足 $0 < G_1 G_2 < 1$ 条件时谐振腔为稳定腔.

在拉曼激光器中,为了获得高功率、高光束质量的激光输出,需考虑两方面的因素: 1) 激光晶体前端面振荡激光腔模尺寸应尽量与抽运光斑相匹

配; 2) 由于拉曼转换效率与拉曼晶体中基频光的功率密度成正比, 因此应尽量让拉曼晶体中基频光束腰半径更小, 且居于拉曼晶体中部. 由自在现模条件可求得镜 M_1 处基模高斯光束的光斑半径 ω_1 (由于激光晶体一般紧贴输入镜, 即等于激光晶体前端面振荡激光腔模尺寸) 为

$$\omega_1^2 = \frac{\lambda b}{\pi} \sqrt{\frac{G_2}{G_1(1 - G_1 G_2)}}. \quad (3)$$

与镜 M_2 相邻的 (即拉曼晶体中) 光束腰大小 ω_{02} 和位置 L_{02} 为

$$\omega_{02}^2 = \frac{\lambda b}{\pi} \frac{\sqrt{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)}}{G_2 + d^2 G_1 - 2d G_1 G_2},$$

$$L_{02} = \frac{b G_1 (d - G_2)}{G_2 + d^2 G_1 - 2d G_1 G_2}. \quad (4)$$

3 实验装置

分体式全固态连续拉曼激光器的实验装置如图2所示. 激光晶体为复合 $\text{YVO}_4/\text{Nd:YVO}_4/\text{YVO}_4$ 晶体, 该晶体大小为 $(4 \times 4 \times 14) \text{ mm}^3$, 沿 a 轴切割, 中间 Nd:YVO_4 部分长度为 10 mm, 掺杂浓度为 0.3 at.%, 前后键合的 YVO_4 晶体长为 2 mm. 拉曼晶体分别为 YVO_4 和 BaWO_4 晶体, 实验中采用的 YVO_4 晶体有两块, 尺寸分别为

$(4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 30 \text{ mm})$ 和 $(4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm})$, 均沿 a 轴切割, 在 1064 nm 激光抽运下其稳态拉曼增益系数为 4.5 cm/GW^[27]. 实验中采用的另一种拉曼介质为高增益的 BaWO_4 , 当 1064 nm 激光抽运下其稳态拉曼增益系数高达 8.5 cm/GW^[28], 该晶体大小为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 沿 b 轴切割. 晶体两端面都镀有 1064/1176/1180 nm 波长的增透膜, 为了减轻晶体热效应的影响, 晶体都用铝箔包裹装在采用循环水冷却的铜制热沉中, 水温控制在 17.5 °C.

抽运源为 nLight 公司的 878.9 nm 波长锁定光纤耦合输出 LD 激光器, 其最大输出功率 30 W, 光纤芯径 200 μm , 数值孔径 0.22. 其内部利用布拉格光栅对输出波长进行锁定, 输出光谱线宽很窄 ($< 0.3 \text{ nm}$), 且输出峰值波长非常稳定, 随着工作条件的变化漂移很小, 从而可以保证与 Nd:YVO_4 晶体 880 nm 共振抽运带吸收峰的精确匹配, 提高抽运光的吸收效率. 抽运光经 1 : 2 的耦合系统入射到激光晶体前端面上, 抽运光斑直径为 400 μm . 激光腔采用平凹腔的结构, 输入镜为平镜, 输出镜为凹镜, 镀膜情况为对 880 nm 高透 ($T > 99\%$), 对 1064 nm ($R = 99.9\%$), 1176 nm ($R = 99.8\%$) 和 1180 nm ($R = 99.7\%$) 波长的光高反.

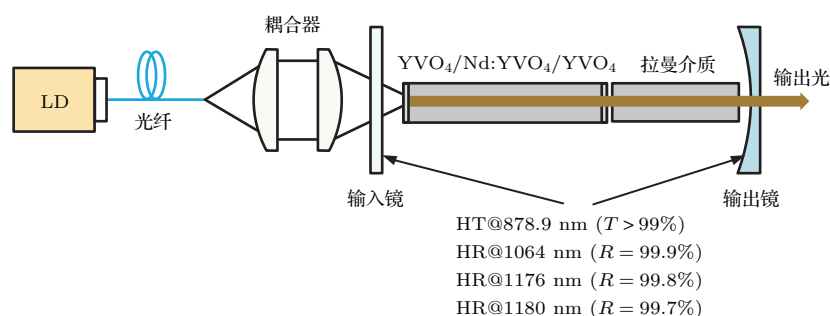


图2 内腔分体式连续波拉曼激光器结构图

Fig. 2. Arrangement of the diode-end-pumped continuous-wave intracavity Raman laser.

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

由于拉曼激光器中拉曼转换效率与拉曼晶体长度成正比, 因此实验中首先采用 30 mm 较长的 YVO_4 和 BaWO_4 晶体作为拉曼介质, 腔长达 51 mm. 图3为采用不同晶体、不同曲率半径 ($R = 100, 200, 500 \text{ mm}$) 输出镜时连续拉曼激光输

出功率随着抽运功率的变化曲线. 当以 YVO_4 晶体为拉曼介质, 输出镜曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$ 时拉曼激光输出功率最高, 如图中红线所示, 在 25.1 W 抽运功率下, 仅获得了 0.25 W 拉曼激光输出功率, 光-光转换效率仅达到 0.99%, 实验结果并不理想. 当采用 BaWO_4 晶体作为拉曼介质时, 仍然是采用曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$ 输出镜时获得的拉曼激光输出功率最高, 如图3中黑线所示, 并且谐振腔的稳定区更宽, 随着抽运功率的增加, 拉曼激光输出功

率一直保持上升的趋势,直到抽运功率大于25.1 W时才开始下降,出现了输出功率饱和现象.最终在抽运功率25.1 W时,获得了3.02 W的拉曼激光输出功率,明显高于YVO₄晶体为拉曼介质时,光光转换效率达到12%,拉曼阈值为2.54 W,斜率效率为13%.由此可见,尽管实验中采用了878.9 nm LD共振抽运复合Nd:YVO₄晶体改善热效应,但由于内腔分体式拉曼激光器腔长较长,严重的热透镜效应仍会使激光器不能工作在谐振腔稳定区内.对比以YVO₄和BaWO₄晶体为拉曼介质时连续拉曼激光输出特性,可以看出,由于BaWO₄晶体具有高拉曼增益系数,1064 nm基频光被有效转换成拉曼激光输出,获得了较高的拉曼激光输出功率,且在一定程度上减轻了激光器的热效应,输出功率较稳定,腔的动态稳定区较宽.

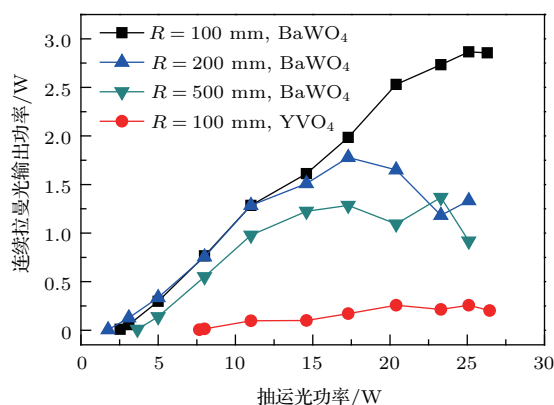


图3 不同曲率半径输出镜时拉曼激光输出功率

Fig. 3. Output powers of Raman laser for output couplers with different radii of curvature.

实验过程中,采用YokoGAWA的AQ6370C光谱分析仪对激光器的输出光谱进行测量,观测到除了1064 nm基频光的谱线外,拉曼介质为YVO₄晶体时只有波长为1176 nm的拉曼激光输出,与晶体拉曼谱最强频移波数890 cm⁻¹符合;拉曼介质为BaWO₄晶体时只有波长1180 nm的拉曼激光输出,与BaWO₄晶体拉曼谱中最强的频移波数925 cm⁻¹符合.

4.2 理论分析与优化

为了分析输出镜曲率半径对拉曼激光输出性能的影响,根据具体实验装置,取参数 $d_1 = 4$ mm, $d_2 = L - d_1$ (L 为腔长).利用(3)式计算出不同输出镜曲率半径时,输入镜处振荡基频光的基横模光

斑半径 ω_1 随抽运功率的变化曲线,如图4所示.由图4可知,当输出镜曲率半径 R 为100和200 mm时, ω_1 在125—200 μ m范围内变化,与抽运光斑模式匹配较好.而在相同抽运功率下,输出镜曲率半径越小,基横模光斑半径 ω_1 也越小.同时由(4)式可计算出不同输出镜曲率半径下拉曼晶体中基频光基横模束腰半径 ω_{02} 随抽运功率的变化,结果与 ω_1 随抽运功率的变化曲线类似(未示出).由此可见,抽运功率相同时,输出镜的曲率半径越小,拉曼介质中的基频光束腰半径越小,基频光功率密度也越大,可获得更高功率的拉曼激光输出,这与前面实验中采用 $R = 100$ mm的输出镜时拉曼激光输出功率最高的结果一致.

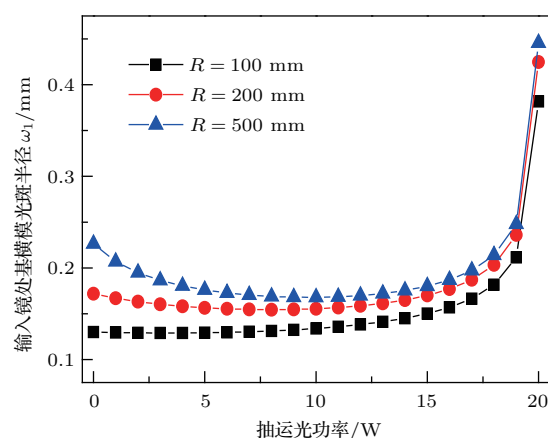


图4 输出镜不同曲率半径下输入镜处基模光斑半径 ω_1 随抽运功率的变化

Fig. 4. The mode beam radius at the input mirror as a function of the incident pump power for output couplers with different radii of curvature.

从图4中还可以看出,当腔长为51 mm时,随着抽运功率的增加,光斑半径 ω_1 先减小再增大,在高抽运功率下曲线陡峭, ω_1 快速增大.这是由于随着抽运功率的增加,晶体的热透镜效应越来越严重,导致谐振腔变成非稳腔,此时拉曼激光输出功率将出现饱和甚至下降.仔细观察可发现,输出镜曲率半径 $R = 100$ mm时,谐振腔变成非稳腔对应的抽运功率较高,也就是腔的动态稳定范围较大,在高抽运功率下拉曼激光输出功率仍保持增长趋势,因此获得的拉曼激光输出功率最高.

由于实验中发现严重的热透镜效应限制了拉曼激光输出功率的提高,而根据(1)式可知,晶体热透镜焦距与抽运光斑半径 ω_P 的平方成正比,增大抽运光斑将有助于减轻热效应.由谐振腔稳定性条件计算可知:当抽运功率增大到最高抽运功

率 26 W 时, 在现有抽运光斑 200 μm 下, 当腔长超过 37.5 mm, 激光腔已经变为非稳腔, 所以实验中腔长 51 mm 时出现了拉曼激光输出功率不稳定和高功率下的饱和现象. 而如果将抽运光斑增大到 300 μm , 激光腔长增加到 70 mm 时也能保持稳定腔, 则可以充分发挥分体式拉曼激光器的结构优势, 选用更长的拉曼晶体, 获得更高功率和转换效率的拉曼激光输出.

最后, 为了验证以上理论分析的正确性及进一步优化实验结果, 在现有抽运光斑 200 μm 情况下, 选取了一块实验室现有长度为 10 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体作为拉曼介质, 将腔长缩减到 30.5 mm, 仍采用曲率半径 $R = 100$ mm 的输出镜, 结果如图 5 中黑线所示, 当抽运功率为 26.3 W 时, 最高拉曼激光输出功率为 2.61 W, 拉曼阈值为 2.28 W, 光-光转换效率达到 9.9%, 斜率效率为 10.9%, 且输出功率较稳定, 起伏较小. 为了对比, 图 5 中也给出了采用 30 mm BaWO₄ 晶体、腔长为 51 mm, $R = 100$ mm 输出镜时的拉曼激光输出功率. 从图中可以看出, 尽管 YVO₄ 晶体的拉曼增益低于 BaWO₄, 且长度也短于 BaWO₄, 但其获得的拉曼输出功率只是略低于 BaWO₄ 拉曼激光器, 且在高抽运功率下仍然保持增长的趋势, 没有出现增益饱和现象. 这些均说明保持稳定腔对于提高拉曼激光输出功率的重要性.

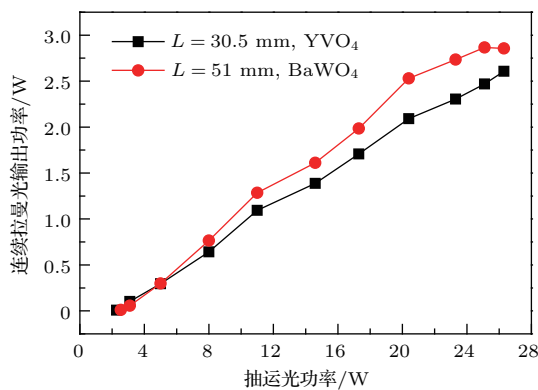


图5 不同拉曼介质、不同腔长时拉曼光输出功率

Fig. 5. Output powers of Raman laser for different Raman media and cavity lengths.

5 结 论

本文引入波长锁定LD端面共振抽运复合 Nd:YVO₄ 晶体, 分别以 YVO₄ 和 BaWO₄ 晶体作为

拉曼介质, 理论和实验研究了输出镜曲率半径、谐振腔稳定性及晶体性能对连续波拉曼激光输出性能的影响. 结果表明: 1) 由于内腔分体式拉曼激光器腔长较长, 谐振腔稳定性对拉曼激光器性能有很大影响, 选择高增益的拉曼晶体, 不仅可获得高拉曼转换效率, 还能一定程度上减轻热效应, 获得高功率的拉曼激光输出; 2) 平凹腔中输出镜的曲率半径越小, 拉曼晶体中基频光的功率密度越大, 且腔的动态稳定区更宽, 获得的拉曼激光输出功率更高. 最终当以高增益的 30 mm BaWO₄ 晶体为拉曼介质时, 抽运功率 25.1 W 下, 获得了 3.02 W 的最高拉曼激光输出功率, 光-光转换效率达到 12%, 但继续增大抽运功率拉曼激光输出功率开始下降, 出现了饱和现象. 理论计算结果表明: 可通过增大抽运光斑, 进一步减轻热效应, 获得较大的稳定腔范围. 在稳定腔范围内, 充分发挥分体式结构优点, 增大拉曼晶体长度, 有望获得更高功率的连续波拉曼激光输出.

参考文献

- [1] Pask H M 2003 *Prog. Quant. Electron.* **27** 3
- [2] Cerny P, Jelinkova H, Zverev P G, Basiev T T 2004 *Prog. Quant. Electron.* **28** 113
- [3] Piper J A, Pask H M 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **13** 692
- [4] Grabtchikov A S, Lisinetskii V A, Orlovich V A, Schmitt M, Maksimenka R, Kiefer W 2004 *Opt. Lett.* **29** 2524
- [5] Bonne G M, Lin J P, Kemp A J, Wang J Y, Zhang H J, Spence D J, Pask H M 2014 *Opt. Express* **22** 7492
- [6] Neto J J, Artlett C, Lee A, Lin J P, Spence D, Piper J, Wetter N U, Pask H 2014 *Opt. Mater. Express* **4** 889
- [7] Tang C Y, Zhuang W Z, Su K W, Chen Y F 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **21** 142
- [8] Lee C Y, Chang C C, Sung C L, Chen Y F 2015 *Opt. Express* **23** 22765
- [9] Kores C C, Jakutis-Neto J, Geskus D, Pask H M, Wetter N U 2015 *Opt. Lett.* **40** 3524
- [10] Sarang S, Williams R J, Lux O, Kitzler O, McKay A, Jasbeer H, Mildren R P 2016 *Opt. Express* **24** 21463
- [11] Pask H M 2005 *Opt. Lett.* **30** 2454
- [12] Orlovich V A, Burakevich V N, Grabtchikov A S, Lisinetskii V A, Demidovich A A, Eichler H J, Turpin P Y 2005 *Laser Phys. Lett.* **3** 71
- [13] Dekker P, Pask H M, Piper J A 2007 *Opt. Lett.* **32** 1114
- [14] Fan L, Fan Y X, Duan Y H, Wang H T, Jia G H, Tu C Y 2009 *Appl. Phys. B* **94** 553
- [15] Fan L, Fan Y X, Li Y Q, Zhang H J, Wang Q, Wang J, Wang H T 2009 *Opt. Lett.* **34** 1687

- [16] Lee A J, Pask H M, Piper J A, Zhang H J, Wang J Y 2010 *Opt. Express* **18** 5984
- [17] Jakutis-Neto J, Lin J P, Wetter N U, Pask H 2012 *Opt. Express* **20** 9841
- [18] Wang X L, Dong J, Wang X J, Xu J, Ueda K I, Kamin-skii A A 2016 *Opt. Lett.* **41** 3559
- [19] Ding X, Fan C, Sheng Q, Li B, Yu X Y, Zhang G Z, Sun B, Wu L, Zhang H Y, Liu J, Jiang P B, Zhang W, Zhao C, Yao J Q 2014 *Opt. Express* **22** 29121
- [20] Sheng Q, Ding X, Li B, Yu X Y, Fan C, Zhang H Y, Liu J, Jiang P B, Zhang W, Wen W Q, Sun B, Yao J Q 2014 *J. Opt.* **16** 105206
- [21] Li B, Lei P, Sun B, Bai Y B 2017 *Appl. Opt.* **56** 1542
- [22] Zhang X, Zhang Y C, Li J, Li R J, Song Q K, Zhang J L, Fan L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 194203 (in Chinese) [张鑫, 张蕴川, 李建, 李仁杰, 宋庆坤, 张佳乐, 樊莉 2017 物理学报 **66** 194203]
- [23] Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, Fields R A 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1831
- [24] Shang C 2013 *M. S. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [尚策 2013 硕士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [25] Mao Y F, Zhang H L, Xu L, Deng B, Sang S H, He J L, Xing J C, Xin J G, Jiang Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 014203 (in Chinese) [毛叶飞, 张恒利, 徐浏, 邓波, 桑思晗, 何京良, 邢冀川, 辛建国, 江毅 2015 物理学报 **64** 014203]
- [26] Sheng Q, Ding X, Li B, Yu X Y, Fan C, Zhang H Y, Liu J, Jiang P B, Zhang W, Wen W Q, Sun B, Yao J Q 2014 *J. Opt.* **16** 105206
- [27] Kaminskii A A, Ueda K, Eichler H J 2001 *Opt. Commun.* **194** 201
- [28] Zverev P G, Basiev T T, Sobol A A 2000 *Quantum Electron* **30** 55

Continuous-wave intracavity $\text{YVO}_4/\text{BaWO}_4$ Raman laser pumped by a wavelength-locked 878.9 nm laser diode*

Zhang Yun-Chuan¹⁾ Fan Li^{1)2)†} Wei Chen-Fei¹⁾ Gu Xiao-Min¹⁾ Ren Si-Xian¹⁾

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

2) (National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(Received 16 August 2017; revised manuscript received 19 September 2017)

Abstract

In this paper, the composite $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ laser crystal is in-band pumped by a wavelength-locked laser diode at 878.9 nm, with the purpose of reducing thermal effects and improving pump absorption simultaneously. By using the YVO_4 and BaWO_4 crystals as Raman media, the influences of crystal properties, resonator structure and stability on the performance of continuous-wave intracavity Raman laser are investigated experimentally and theoretically. The results show that the resonator stability greatly affects laser performance due to the long cavity length of intracavity Raman laser. By choosing the Raman medium with high Raman gain, we can not only obtain higher Raman conversion efficiency, but also reduce the thermal effect to a certain extent. Furthermore, the smaller the curvature radius of the output mirror in the plano-concave cavity structure, the greater the power density of the fundamental laser in the Raman crystal is and the wider the dynamic stability region of the resonator, and hence the higher output power of the Raman laser can be achieved. Finally, by using 30-mm BaWO_4 crystal as Raman medium, a highest Raman output of 3.02 W is obtained at a pump power of 25.1 W, corresponding to a diode-to-Stokes optical conversion efficiency of 12%.

Keywords: intracavity Raman laser, continuous-wave, in-band pumping, design of laser cavity

PACS: 42.55.Ye, 42.60.Pk, 42.55.Xi, 42.60.By

DOI: 10.7498/aps.67.20171848

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11774301), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20130453), and the State Key Laboratory for Solid State Microstructures, Nanjing University, China (Grant No. M29027).

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