

波长锁定 878.6 nm LD 调制泵浦 Nd:YVO₄ 自拉曼激光器

孙冰^{1,2}, 丁欣^{1,2}, 姜鹏波³, 白云涛^{1,2}, 禹宣伊⁴, 王靖博^{1,2}, 赵蕾^{1,2}, 刘阳^{1,2},
李腾腾^{1,2}, 吴亮^{1,2}, 张贵忠^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

- (1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072;
2. 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 齐鲁工业大学(山东省科学院)激光研究所, 山东济南 250014;
4. 南开大学物理科学学院, 天津 300071)

摘要: 报道了一款基于调制共振泵浦技术的 Nd:YVO₄ 自拉曼激光器。针对全固态自拉曼激光器中热效应严重导致的激光器输出功率及光光效率普遍偏低的问题, 合理地将共振泵浦技术和调制泵浦技术相结合, 实现了激光器的有效热管控, 缓解了激光器的热效应, 提高了泵浦上限, 从而实现了激光器输出功率和光光效率的大幅提高。当泵浦源的调制频率为 10 kHz、占空比为 40%、平均泵浦功率为 30 W、声光 Q 开关的调制频率为 100 kHz 时, 获得了最大平均功率为 8.57 W 的 1176 nm 斯托克斯光输出, 相应光光转换效率 28.6%。相较于相同泵浦功率的连续泵浦机制下的实验结果, 斯托克斯光平均输出功率提高了 42%, 光光效率提高了 8.5%。实验结果表明: 共振泵浦和调制泵浦技术相结合的方式可以有效缓解热效应, 提高泵浦功率上限, 从而提高自拉曼激光器的输出功率和光光效率。

关键词: 自拉曼激光器; Nd:YVO₄ 激光器; 二极管调制泵浦; 共振泵浦

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200227

Efficient wavelength-locked 878.6 nm diode-modulated-pumped Nd:YVO₄ self-Raman laser

Sun Bing^{1,2}, Ding Xin^{1,2}, Jiang Pengbo³, Bai Yuntao^{1,2}, Yu Xuanyi⁴, Wang Jingbo^{1,2}, Zhao Lei^{1,2}, Liu Yang^{1,2},
Li Tengting^{1,2}, Wu Liang^{1,2}, Zhang Guizhong^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

- (1. Institute of Laser and Opto-electronics, School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 30072, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China;
3. Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Ji'nan 250014, China;
4. College of Physics Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: An in-band pumped and diode-modulated-pumped Nd:YVO₄ self-Raman laser was demonstrated. Aiming at the problem of low output power and optical conversion efficiency caused by thermal effect in all-solid self-Raman laser, the in-band pump and diode-modulated pump schemes were both adopted to mitigate the thermal effects and increased the upper limit of the pump power, so as to improved the output power and optical conversion efficiency of the Nd:YVO₄ self-Raman laser greatly. With a diode-pump modulation frequency of

收稿日期:2021-06-10; 修订日期:2021-08-16

基金项目:国家自然科学基金(11674242, 11674243); 山东省自然科学基金青年基金(ZR2020QF092)

作者简介:孙冰,男,博士生,主要从事固体激光器及非线性频率变换技术方面的研究。

导师简介:丁欣,男,教授,博士,主要从事固体激光器及非线性频率变换技术方面的研究。

10 kHz and duty cycle of 40%, the maximum average power of 8.75 W Stokes wave output at 1 176 nm was obtained under a diode pump power of 30 W at a pulse repetition frequency (PRF) of 100 kHz. The corresponding optical conversion efficiency was 28.6%. Compared with the experimental results under the continuous pumping mechanism with the same pump power, the average output power of Stokes wave was improved by 42%, with the optical conversion efficiency improved by 8.5%. The experimental results show that the combination of in-band pump and diode-modulated pump schemes can effectively mitigate the thermal effect and increase the upper limit of pump power, so as to improve the output power and optical conversion efficiency of the self-Raman laser.

Key words: self-Raman laser; Nd:YVO₄ laser; diode-modulated pumped; in-band pumping

0 引言

基于受激拉曼散射这一非线性光学频率变换技术的拉曼激光器是实现光谱拓展的有效途径^[1]。近年来,基于 Nd:YVO₄、Nd:GdVO₄ 晶体的自拉曼激光器凭借结构紧凑、体积小、成本低的优势引起研究人员重视,并被广泛研究^[2-7]。然而由于自拉曼激光器增益介质除了作为激光介质产生基频光外又作为非线性光学频率变换晶体实现频率转换,在受激拉曼散射这个非弹性散射过程中,在产生斯托克斯 (Stokes) 散射光的同时,泵浦光子与 Stokes 光子之间的能量差以声子的形式释放出来,转化为热量,进一步加重了晶体中的热负载,因此,自拉曼激光器中的热效应远比相同条件下基频光单独运转时严重。由于拉曼增益是温度的减函数^[8],因而晶体温度上升会导致拉曼增益严重下降。Y. F. Chen 曾指出相较于采用低掺杂浓度 Nd:YVO₄ 晶体,使用高掺杂浓度 Nd:YVO₄ 晶体作为自拉曼激光器增益介质时,由于热效应的加剧,激光器转换效率明显下降^[2],合理地采用低掺杂浓度的自拉曼介质能够在一定程度上缓解热效应。对于目前报道的多数端泵自拉曼激光器,严重的热效应限制了泵浦功率上限,从而阻碍了输出功率的进一步提升^[6,9]。目前缓解热效应的方式有很多,如共振泵浦技术^[10-12]和采用键合晶体^[10]等,其中最为行之有效的方式是共振泵浦技术^[4,13-16],通过降低激光产生过程中由于量子亏损所产生的热,从根本上缓解了激光器的热效应。尤其是采用锁波长 878.6 nm 共振泵浦方式,相较于传统 808 nm 泵浦和 914 nm 热助推共振泵浦,其既可以较大程度上缓解热效应,又可以保证泵浦光的充分吸收,从而获得高的激光器光光效率^[8,14]。此外,锁波长半导体激光器 (LD) 输出波长随 LD 温度变化不敏感,保证了激光器运转的稳定性。

为了追求更高效率、更高输出功率的全固态自拉曼激光器,在缓解热效应的同时尽可能提升泵浦功率上限是具有可行性的途径。调制泵浦技术即通过外接信号源对半导体激光器的工作频率及占空比进行调制,进而控制泵浦光作用于工作介质上的时间,相对于连续泵浦机制,在相同平均泵浦功率下,调制泵浦能够提供更高的瞬时泵浦功率,大幅提升反转粒子数密度,实现更高增益。2007 年, P. Dekker 等^[9]采用斩波器对 LD 输出泵浦光进行外调制后泵浦 Nd:GdVO₄ 自拉曼黄光激光器,将连续泵浦机制下受热透镜限制的泵浦功率上限由 16.3 W 提升到 25.7 W, 586.5 nm 黄光输出功率由 678 mW 提升到 1.88 W, 相应的光光效率由连续泵浦机制下的 4.16% 提高到调制泵浦机制下的 7.32%。

文中将共振泵浦和调制泵浦技术相结合,在共振泵浦缓解热效应的基础上,利用调制泵浦技术提升泵浦功率上限,从而保证自拉曼激光器高效运转。当泵浦源的调制频率为 10 kHz、占空比为 40%、连续泵浦功率为 75 W (平均功率为 ~30 W) 时,在声光 Q 开关的重复频率为 100 kHz 下获得 8.57 W 的 1 176 nm 斯托克斯光输出,光光转换效率 28.6%。较相同泵浦功率的连续泵浦机制下,斯托克斯光平均输出功率提高了 42%,光光效率提高了 8.5%。实验结果表明,采用共振泵浦和调制共振泵浦相结合的方式可以有效缓解热效应,提高泵浦功率上限,从而提高自拉曼激光器的光光效率。此外,得益于调制泵浦机制下可提供瞬时的高泵浦功率,提高了反转粒子数密度,从而有效地压缩了输出斯托克斯光脉冲的宽度。在相同平均泵浦功率及重复频率下 (70、100、130 kHz),斯托克斯脉冲宽度分别由连续泵浦机制下的 18、20、21 ns 减小到调制泵浦机制下的 11、12、14 ns,相应的斯托克

斯光峰值功率得到大幅度提升。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 泵浦源为 878.6 nm 波长锁定光纤耦合输出半导体激光器, 其最大连续输出功率 75 W, 线宽 0.3 nm, 如此窄的线宽可以很好地与晶体的吸收峰相匹配, 弥补了共振泵浦吸收带宽窄的缺点, 并且该泵浦源具有很好的温度稳定性, 当热沉温

度由 10~40 °C 发生变换时, 其发射的中心波长仅移动 0.3 nm, 线宽基本保持不变, 这使得利用该半导体激光器作为泵浦源具有极高的温度稳定性。通过给驱动源控制信号可以对泵浦源的调制频率和占空比进行设定。传能光纤芯径为 400 μm, 数值孔径 0.22。由传能光纤输出的泵浦光经过 1 : 1.5 透镜组成像聚焦到 Nd:YVO₄ 晶体中。

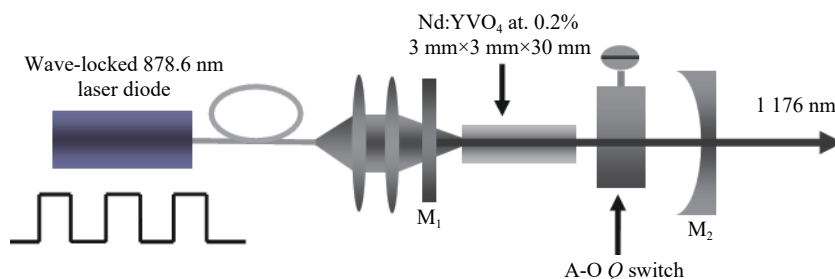


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Setup of the experiment

激光器谐振腔为线型平凹腔结构, M₁ 为平平镜, 镀有对 878.6 nm 泵浦光高透、对 1064 nm 基频光及 1176 nm 斯托克斯光高反膜系; M₂ 为曲率半径为 500 mm 的平凹镜, 镀有 1064 nm 高反和 1176 nm 透射率 10% 的膜系。Nd:YVO₄ 晶体的规格为 3 mm×3 mm×30 mm, Nd³⁺ 掺杂浓度为 0.2%, 双面镀有 1000~1200 nm 的增透膜。声光 Q 开关的超声波频率为 80 MHz, 最大射频功率为 20 W。激光器总腔长为 80 mm。

2 实验结果及分析

首先对连续泵浦方式进行了实验, 结果如图 2 所示。当激光器的重复频率为 70 kHz, 泵浦功率为 27.8 W 时最高获得了 4.2 W 的 1176 nm 斯托克斯光输出, 继续增加泵浦功率出现功率下降; 当重复频率增加到 100 kHz 时, 泵浦功率为 30.2 W, 获得了 6.04 W 的 1176 nm 斯托克斯光输出, 光光转换效率 20.1%, 继续增加泵浦功率后也出现了饱和现象; 继续增加重复频率至 130 kHz, 泵浦功率 32.5 W 时获得了 5.76 W 的 1176 nm 斯托克斯光输出, 相比于 70 kHz 和 100 kHz, 最高泵浦功率有所提高。激光器在 70 kHz、100 kHz 和 130 kHz 重复频率下工作时的阈值分别为 2.81 W、

3.22 W 和 3.19 W, 脉冲宽度分别为 18 ns、20 ns 和 21 ns。实验结果表明, 对于连续泵浦方式由于激光器的热效应比较严重, 容易过早出现热饱和现象, 这种热饱和阻碍了激光器功率的进一步提升, 从而不能获得高功率输出, 光光转换效率也受到限制。

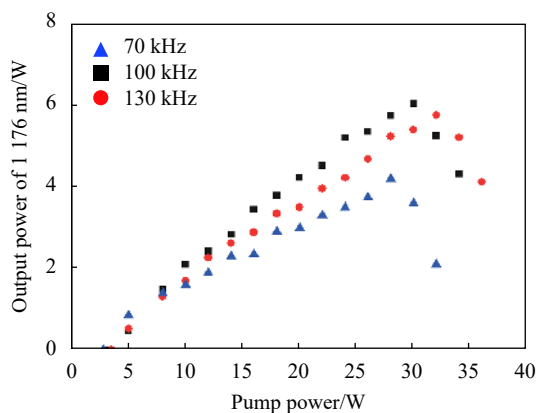


图 2 连续泵浦情况下 1176 nm 的输出功率与泵浦功率的关系

Fig.2 Relationship between output power and pump power of the 1176 nm under continuous-wave pumping

为了缓解自拉曼激光器的热效应, 提高泵浦功率上限, 从而实现输出功率的提升, 将连续泵浦方式改为调制泵浦方式, 调制频率选用经过实验验证的最优 10 kHz。泵浦源的连续输出功率为 75 W, 占空比由

10%~60%变化时,自拉曼激光器的输出功率如图 3 所示。当占空比为 40%、对应的平均泵浦功率为 30 W 时, Q 开关调制频率分别为 70 kHz、100 kHz 和 130 kHz, 分别获得了 6.36 W、8.57 W 和 7.14 W 的最高平均输出功率; 当占空比继续增加, 虽然对应的平均泵浦功率有所上升, 但激光器的输出功率逐渐下降; 当占空比增加到 60% 时, 对应的平均泵浦功率为 45 W, 三种 Q 开关调制频率下分别获得了 2.25 W、3.86 W 和 4.95 W 的自拉曼激光输出。相比于占空比 40% 的情况出现了明显下降, 这是由于占空比增加, 晶体的热效应会进一步加剧, 虽然总体的泵浦功率提高, 但由于热效应的加剧, 导致输出功率出现了明显的下降。

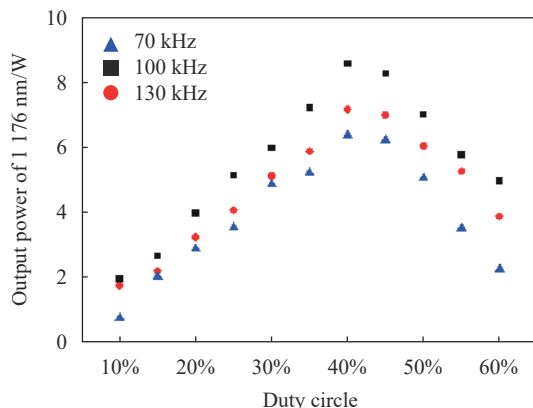


图 3 不同脉冲重复频率下占空比对 1176 nm 斯托克斯光平均输出功率的影响

Fig.3 Influence of duty circle on average output power of 1176 nm Stokes under different pulse repetition frequencies

将泵浦源的占空比固定为 40%, 调制频率为 10 kHz, 调节泵浦源的输出功率, 得到了图 4 所示的输出功率特性曲线。 Q 开关调制频率为 70 kHz、100 kHz 和 130 kHz 情况下最高分别获得了 6.36 W、8.57 W 和 7.14 W 的斯托克斯光输出, 对应的光光效率分别为 21.2%、28.6% 和 23.8%。值得指出的是, 在 LD 所能提供的最大泵浦功率下, 激光器的输出并未出现饱和迹象, 表明斯托克斯光功率仍有上升空间, 限于泵浦源的输出功率最高为 75 W, 笔者没有继续增加泵浦功率。

实验测量了输出斯托克斯光的脉冲宽度, 在 70 kHz、100 kHz 和 130 kHz 重复频率下, 最高平均输

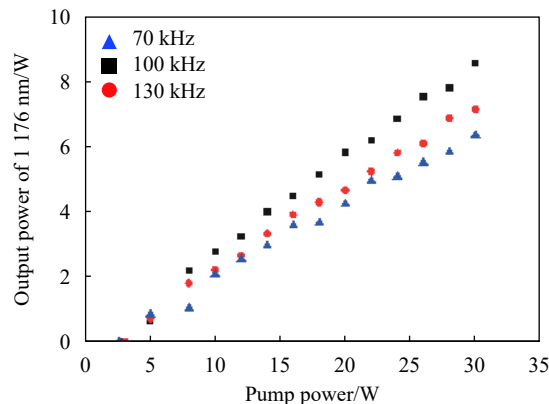


图 4 调制泵浦占空比为 40% 时 1176 nm 与泵浦功率之间的关系

Fig.4 Output power of 1176 nm wave as function of incident pump power at the pump duty cycle of 40%

出功率时对应的脉冲宽度分别为 11 ns、12 ns 和 14 ns。调制泵浦的脉冲宽度相比于连续泵浦情况明显被压缩, 这是由于同等平均泵浦功率下调制泵浦方式的瞬时泵浦功率相比连续波泵浦方式下更高, 从而提高了反转粒子数密度, 使脉冲宽度得到有效的压缩。图 5 给出了重复频率为 100 kHz 时的脉冲波形图。

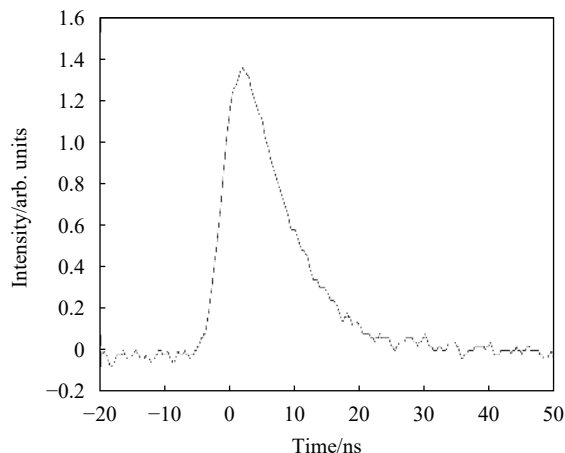


图 5 1176 nm 斯托克斯光输出脉冲波形图 (100 kHz)

Fig.5 Oscilloscope trace of the 1176 nm Stokes output (100 kHz)

如图 6 所示, 在 1176 nm 斯托克斯光最高平均输出功率时采用刀口法对其光束质量进行了测量, 测量结果为 $M_x^2=1.2$, $M_y^2=1.3$ 。将输出镜换为曲率半径为 500 mm、1064 nm 透过率 10% 的输出镜, 获得 1064 nm 输出, 测量 1064 nm 激光的 $M_x^2=2.7$, $M_y^2=2.9$ 。实验结果表明, 斯托克斯光的光束质量明显优于基频光的光束质量, 这是由于受激拉曼散射具有光束清洁效应 (Clean-up effect), 能对光束质量起到一定的优化作用^[17],

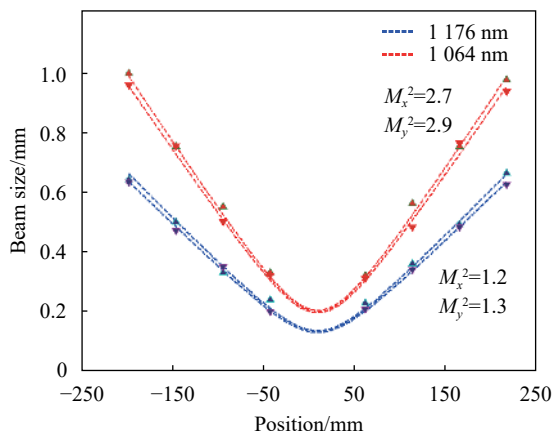


图 6 实验测量的基频光及斯托克斯光光束质量

Fig.6 Beam quality of the fundamental and Stokes wave

即使在基频光光束质量较差的情况下仍然可以获得光束质量较好的拉曼激光输出。

3 结 论

文中采用共振泵浦和调制泵浦技术相结合的方案,有效缓解了自拉曼激光器中的热效应并提高了泵浦功率上限,实现了高效、高功率的自拉曼激光器。采用具有调制能力的 878.6 nm 锁波长 LD 作为泵浦源,在连续 75 W(平均功率~30 W)泵浦光泵浦激励下,当泵浦源的调制频率为 10 kHz、占空比为 40%、Q 开关重复频率为 100 kHz 时,获得了最高平均功率为 8.57 W 的 1176 nm 斯托克斯光,相应光光效率为 28.6%。相较于相同条件的连续泵浦情况下,输出功率提高了 42%,光光效率提高了 8.5%。得益于调制泵浦机制下可以提供更高的瞬时泵浦功率,较之连续泵浦机制,输出的斯托克斯光脉冲宽度得到大幅压缩,有效提升了斯托克斯光的峰值功率。实验结果表明,锁波长调制共振泵浦方式可以有效地降低自拉曼激光器的热效应,提高光光转换效率,为实现大功率自拉曼激光器提供了一种行之有效的技术途径。

参考文献:

[1] Chen W, Inagawa Y, Omatsu T, et al. Diode-pumped, self-stimulating, passively Q-switched Nd³⁺: PbWO₄ Raman laser [J]. *Optics Communications*, 2001, 194(4): 401-407.
 [2] Chen Y F. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YVO₄ self-Raman laser: Influence of dopant concentration [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(16): 1915-1917.

[3] Ding S H, Zhang X Y, Wang Q P, et al. Theoretical and experimental study on the self-Raman laser with Nd:YVO₄ crystal [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(9): 927-933.
 [4] Lin J, Pask H M. Nd:GdVO₄ self-Raman laser using double-end polarised pumping at 880 nm for high power infrared and visible output [J]. *Applied Physics B*, 2012, 108(1): 17-24.
 [5] Kores C C, Jakutis-Neto J, Geskus D, et al. Diode-side-pumped continuous wave Nd³⁺:YVO₄ self-Raman laser at 1176 nm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3524-3527.
 [6] Zhu H, Duan Y, Zhang G, et al. Efficient second harmonic generation of double-end diffusion-bonded Nd:YVO₄ self-Raman laser producing 7.9 W yellow light [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21544-21550.
 [7] Shayeganrad Gholamreza. Actively Q-switched Nd:YVO₄ dual-wavelength stimulated Raman laser at 1178.9 nm and 1199.9 nm [J]. *Optics Communications*, 2013, 292: 131-134.
 [8] Sheng Q, Ding X, Li B, et al. Efficient Nd:YVO₄ self-Raman laser in-band pumped by wavelength-locked laser diode at 878.7 nm [J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(10): 1-5.
 [9] Dekker P, Pask H M, Spence D J, et al. Continuous-wave, intracavity doubled, self-Raman laser operation in Nd:GdVO₄ at 586.5 nm [J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 7038-7046.
 [10] Li X D, Yu X, Chen F, et al. Laser properties of continuous-grown Nd: GdVO₄/GdVO₄ and Nd: YVO₄/YVO₄ composite crystals under direct pumping [J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12869-12874.
 [11] Li F Q, Liu K, Zong N, et al. Compact 7.8-W 1-GHz-repetition-rate passively mode-locked TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser under 880 nm diode direct-in-band pumping [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(19): 4619-4622.
 [12] Sheng Q, Liu L, Ding X, et al. Thermal management of Nd:YVO₄ laser by 808-/880-nm dual-wavelength pumping [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 8(2): 1501307.
 [13] Sheng Q, Li R, Lee A, et al. A single-frequency intracavity Raman laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8540-8553.
 [14] Li B, Ding X, Sun B, et al. 12.45 W wavelength-locked 878.6 nm laser diode in-band pumped multisegmented Nd:YVO₄ laser operating at 1342 nm [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29): 6778-6781.
 [15] Sheng Q, Lee A, Spence D, et al. Wavelength tuning and power enhancement of an intracavity Nd:GdVO₄-BaWO₄ Raman laser

- using an etalon [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 32145-32155.
- [16] Jiang P B, Zhang G Z, Liu J, et al. 16.7 W 885 nm diode-side-pumped actively Q-switched Nd:YAG/YVO₄ intracavity Raman laser at 1176 nm [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(46): 465303.
- [17] Antipov S, Sabella A, Williams R, et al. 1.2 kW quasi-steady-state diamond Raman laser pumped by an $M^2 = 15$ beam [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2506-2509.