

百瓦级 1.2/1.5 μm 双波长金刚石拉曼激光器 (特邀)

白振旭^{1,2}, 陈 晖^{1,2}, 张展鹏³, 王 坤³, 丁 洁^{1,2}, 齐瑶瑶^{1,2}, 颜秉政^{1,2}, 李森森⁴,
闫秀生⁴, 王雨雷^{1,2}, 吕志伟^{1,2}

- (1. 河北工业大学 先进激光技术研究中心, 天津 300401;
2. 河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401;
3. 河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401;
4. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要: 具有高功率、高光束质量的双波长激光器在精密光谱、共振干涉测量和激光雷达等领域有着重要的应用。但是受到激光工作物质固有的光谱和增益特性制约, 通过传统的粒子数反转激光器难以直接获得高功率的双波长激光输出, 因此通常需要结合非线性光学频率变换技术将常规的单一波长高功率激光拓展至一个或若干个特殊波段。受激拉曼散射作为一种三阶非线性效应, 具有频移大、自相位匹配和光束净化等优点, 是实现高效率、高光束质量波长转换有效手段。利用具有宽光谱透过范围 ($>0.23 \mu\text{m}$)、超高热导率 ($>2\ 000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) 和大拉曼频移 ($1\ 332 \text{ cm}^{-1}$) 等优异特性的金刚石晶体作为拉曼增益介质, 通过外腔振荡结构实现了 $1 \mu\text{m}$ 泵浦光直接向 $1.2 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 双波长激光的高效转换, 在最高稳态泵浦功率 414 W 的条件下获得了 $1.2 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 功率分别为 72 W 和 110 W 的输出。该研究为实现高功率的双波长激光输出开辟了新的途径。

关键词: 激光器; 金刚石; 拉曼; 双波长; 高功率

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210685

Hundred-watt dual-wavelength diamond Raman laser at 1.2 /1.5 μm (Invited)

Bai Zhenxu^{1,2}, Chen Hui^{1,2}, Zhang Zhanpeng³, Wang Kun³, Ding Jie^{1,2}, Qi Yaoyao^{1,2},
Yan Bingzheng^{1,2}, Li Sensen⁴, Yan Xiusheng⁴, Wang Yulei^{1,2}, Lv Zhiwei^{1,2}

- (1. Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China;
3. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
4. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

Abstract: Dual-wavelength lasers with high power and high beam quality are critical to the applications such as precision spectroscopy, resonant interferometry, lidar, etc. However, limited by the intrinsic spectral and gain characteristics of currently available laser gain materials, it is difficult to realize high-power dual wavelength lasing directly from inversion lasers. To overcome this problem, nonlinear optical frequency conversion has been applied to convert the high-power laser in a conventional band to another or several hard-to-reach bands. As a

收稿日期: 2021-06-20; 修订日期: 2021-07-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61905061, 61927815, 6200031329, 61905065); 河北省自然科学基金 (F2019202337); 河北省引进留学人员资助项目 (C20190177); 国防科技重点实验室基金 (6142107190308); 河北省教育厅在读研究生创新能力培养资助项目 (CXZZSS2021039)

作者简介: 白振旭, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事高功率金刚石激光技术方面的研究。

third-order nonlinear effect, stimulated Raman scattering has advantages including large frequency shift, self-phase matching, and beam clean-up effect that lead to Raman laser an effective means to achieve high efficiency and high beam quality wavelength conversion. In this paper, diamond crystal that with a wide spectral transmission range ($>0.23 \mu\text{m}$), ultra-high thermal conductivity ($>2\ 000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) and large Raman frequency shift ($1\ 332 \text{ cm}^{-1}$) was used as the Raman gain medium. By using a $1 \mu\text{m}$ laser as pump source, dual-wavelength lasing at 1.2 and $1.5 \mu\text{m}$ was achieved based on an external cavity Raman oscillator. With a maximum steady-state pump power of 414 W , output powers up to 72 W at $1.2 \mu\text{m}$ and 110 W at $1.5 \mu\text{m}$ were obtained. This study has opened a new way to realize high-power dual-wavelength laser output.

Key words: laser; diamond; Raman; dual wavelength; high power

0 引言

具有高光束质量的激光器以其空间相干性好、聚焦功率密度高、光束发散小、易于长程传输等优点,在遥感、工业加工以及定向能武器等领域发挥着重要作用^[1-3]。经过长达 60 余年的发展,人们已经利用固体、光纤等激光工作物质在 $1 \mu\text{m}$ 波段实现千瓦级的高光束质量连续波激光输出^[3-5]。但是直接获得可见光、人眼安全等特殊波段的高功率运转却仍面临很大的挑战,究其原因受到掺杂离子固有发射光谱、工作物质的热物性以及可用泵浦源等因素的限制。例如,虽然掺 Nd^{3+} 离子 YAG 晶体的发射光谱除了常用的 $1\ 064 \text{ nm}$ 之外也覆盖了 946 、 $1\ 122$ 、 $1\ 319 \text{ nm}$ 等多个波长,但由于其他波长的荧光强度较弱,目前只有 $1\ 064 \text{ nm}$ 辐射波长最为常用且易于实现高功率运转^[6];掺 Er^{3+} 离子(或 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺)的光纤激光器是产生高功率 $1.5 \mu\text{m}$ 波段人眼安全激光的最常用手段,但是高功率运转下光纤激光器固有的横模模式不稳定(TMI)及光谱展宽现象限制了其亮度的进一步提升及在诸多领域的应用^[7-8];掺 Pr^{3+} 、 Dy^{3+} 等离子晶体是目前常用的可直接获得可见光辐射的增益介质,但受到掺杂离子的固有增益特性和基质热物性的限

制、并且所需的高功率蓝光泵浦源本身就难以获得,因此其输出功率往往仅有瓦量级^[9]。

除了获得单一的特殊波长输出,双波长激光也因其精密激光光谱、共振激光干涉、分子多光子分解及激光雷达等方面的应用而备受关注^[10-12]。 $1.2 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 波段激光位于重要的大气透过窗口,自然界中广泛存在的 CO_2 和水分子对这两个波段的吸收率也远小于目前最常见的 $1 \mu\text{m}$ 波段激光(见图 1),因此 $1.2 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 波段激光在遥感监测、雷达、通信等领域具有重要的应用前景^[13-15]。为实现激光的长程传输,开展高功率高光束质量的 $1.2 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 波段激光的研究具有重要的实际意义,但是受限于现有激光工作物质的可用发射光谱以及不同发射谱的增益差别较大,通过传统的粒子数反转激光器直接获得高功率 $1.2 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 波段激光的同时输出仍存在较大挑战,甚至针对 $1.2 \mu\text{m}$ 单一波长激光的高效产生和放大至今也并没有十分成熟的解决途径。

基于三阶非线性光学效应受激拉曼散射(SRS)的拉曼激光器是一种实现激光波长变换的有效手段,其原理是通过强光激发增益介质内部的分子或原子振动产生具有较大频移的 Stokes 光并进行放大输出^[16]。

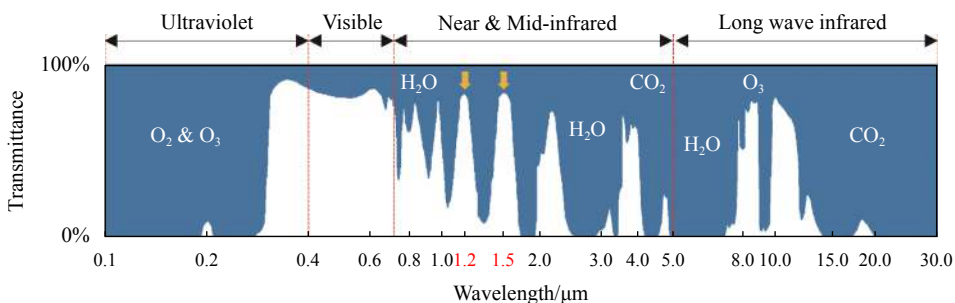


图 1 大气吸收带和主要吸收粒子

Fig.1 Atmospheric absorption bands and the particles responsible for the absorption

拉曼激光器相对于传统粒子数反转激光器,其特点在于只要相互作用的波长在材料的光谱透射区且达到激发阈值,理论上就可以通过选择泵浦波长和控制级联 SRS 实现任何波段的激光输出;结合 SRS 固有的光束净化特性,拉曼激光器已成为获得多波长、高功率且高光束质量激光输出的重要方式^[17-21]。目前,光纤和晶体拉曼激光器是实现拉曼转换的主要手段,但是光纤拉曼激光器在功率提升中难以抑制的光谱展宽和 TMI 在一定程度上限制了其功率提升;晶体材料虽然和光纤相比能够负载高峰值功率的脉冲激光泵浦,但是受到传统拉曼晶体固有热物性的制约,输出功率很难突破百瓦量级。

随着化学气相沉积法 (CVD) 等晶体制备工艺的提升,具有优异物理和化学稳定性、高导热率 (>2 000 W·m⁻¹·K⁻¹) 和极宽光谱透过范围 (>0.23 μm)

的人造金刚石晶体逐渐走入人们的视野,光学级单晶金刚石晶体也因其高的拉曼增益系数 (10 cm/GW@ 1 μm),成为高功率拉曼激光器的理想选择^[2,22-24]。表 1 列举了常用拉曼晶体以及石英光纤的关键物理及拉曼参数特性。从表 1 可以看出,包括金刚石在内的晶体材料的拉曼增益线宽相较于光纤拉曼激光器中常用的石英光纤低了 2~3 个数量级,这意味着光纤拉曼激光器中难以抑制的光谱展宽现象在晶体拉曼激光器中可以得到有效控制;此外,金刚石的热导率是其他常用拉曼晶体的百倍以上,拉曼增益系数、拉曼频移和光谱透过范围也明显优于其他晶体。以上特性使得金刚石晶体在实现高功率、高效率、无光谱展宽的拉曼转换中具有巨大的优势。经过十余年的快速发展,金刚石拉曼激光器的波长覆盖范围也越来越广(短至紫外、长至中红外)、功率也达到了千瓦量级^[25-30]。

表 1 常见拉曼晶体及石英光纤特性对比

Tab.1 Comparison of properties of common Raman crystals and silica fiber

Raman gain media	Thermal conductivity/ W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Raman gain coefficient @1 μm /cm·GW ⁻¹	Raman shift/ cm ⁻¹	Raman linewidth/ cm ⁻¹	Spectral transmission/ μm
Diamond	2 000	10-12	1 332.5	2	>0.23
YVO ₄	5.2	4.5	890	3.0	0.4-5
KGd(WO ₄) ₂	2.6(a),3.8(b),3.4(c)	3.5	767, 901.5	7.8, 5.9	0.34-5.5
Ba(NO ₃) ₂	1.17	11	1 047.6	0.4	0.35-1.8
CaWO ₄	16	3.0	908	4.8	0.2-5.3
GdVO ₄	10.5	>4.5	885	3.0	0.35-5
BaWO ₄	3.0	8.5	926	1.6	0.26-3.7
Silica fiber	1.38	9.4×10 ⁻³	440	1 333	0.38-2.1

文中报告了一台 1.2 μm 和 1.5 μm 双波长输出的金刚石拉曼激光器。利用 1 μm 准连续激光作为泵浦源,通过线性结构的外腔拉曼振荡器,在 1 μm 泵浦光稳态功率为 414 W 时分别获得了 1.2 μm 一阶拉曼 72 W 和 1.5 μm 二阶拉曼 110 W 的输出,总输出功率 182 W(转换效率 44.0%),并在实验中观察到双波长激光同时实现光束净化的现象。该研究结果为实现高功率的双波长激光输出提供了新的途径。

1 实验原理及装置

由于金刚石晶体具有极高的热导率和极低的热膨胀系数,因此相比于其他晶体材料,金刚石能够在

数十个微秒量级即可达到热稳态^[31],且达到热稳态的时间与热负载无关,仅仅随着热源半径的增加有小幅度增加(根据参考文献 [32] 报道,对于常用的体积约为 0.04 cm³ 的金刚石晶体,40 μm 和 100 μm 热源半径对应的达到热稳态时间分别仅有 45 μs 和 62 μs)。该研究中,基于有限体积和有限单元耦合数值方法 (FVM-FEM),对高功率运转下金刚石晶体的温度随时间的变化规律进行了数值模拟。采用连续运转激光进行泵浦,对于尺寸为 8 mm×4 mm×1.2 mm 的金刚石晶体,当晶体中心热源半径为 60 μm、热负载为 100 W 时(对应输出功率可达 kW 量级),金刚石晶体内部热源中心和上表面的温差能够在 55 μs 左右达到稳态,

如图 2(a) 所示。在持续运转的过程中,其温差能够一直保持常数 83 K,即持续时间在 55 μs 以上的脉冲激光泵浦状态可获得连续稳态运转。将泵浦光从连续波改为持续时间为 250 μs 、重复频率 40 Hz 的脉冲激光,模拟结果如图 2(b) 所示,可见金刚石晶体内部每一个泵浦脉冲所产生的温差均与连续波泵浦完全相同 (83 K),且脉冲停止工作后其快速的冷却时间使得相邻的脉冲之间不会产生温度的叠加,即每个脉冲的工作状态均与连续波保持一致,该仿真结果也与理论的热稳态预期相吻合^[32]。另外,当泵浦的脉冲持续时间

大于拉曼跃迁退相时间 T_R 时,拉曼转换过程和增益系数也将遵循稳态规律,而对于晶体拉曼材料来说通常 T_R 为皮秒量级,因此当泵浦光的脉冲宽度达到皮秒量级以上,其增益系数即符合连续波运转状态^[18]。综上分析可知,采用脉冲宽度在百微秒量级的激光作为泵浦源,金刚石拉曼振荡器中晶体的热效应、拉曼增益以及产生放大过程均与连续波相一致,该结论为研究高功率运转下的金刚石拉曼激光器的晶体热稳定性、谐振腔稳定性以及功率特性等提供了更为简便的条件^[29,31-33]。

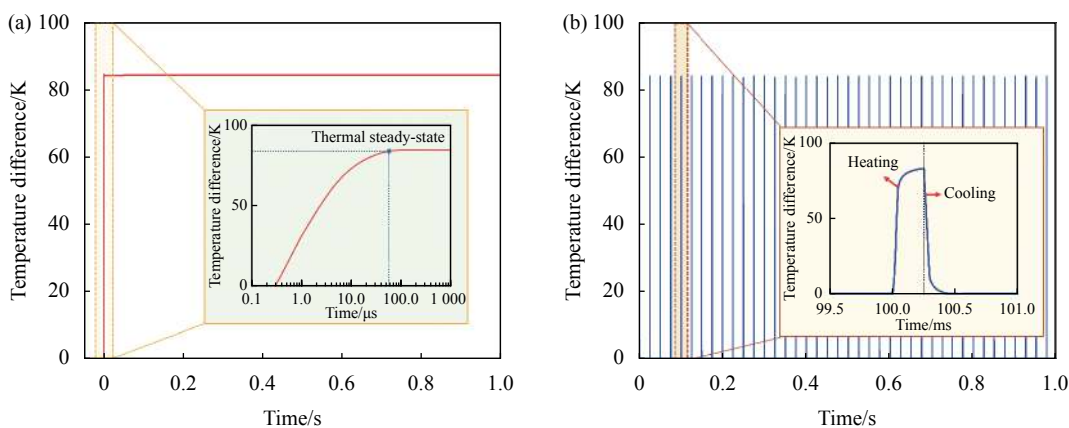


图 2 金刚石晶体的热梯度。(a) 1 s 连续泵浦;(b) 脉冲宽度 250 μs 泵浦 (重复频率 40 Hz)

Fig.2 Thermal gradient of diamond crystal. (a) 1 s continuous pumping; (b) 250 μs pulse width pumping at 40 Hz repetition rate

图 3 为实验采用的外腔金刚石拉曼激光器的结构示意图。其中,泵浦源为光束质量因子 $M^2=1.50\pm 0.05$ 的 1 064 nm 准连续 Nd:YAG 激光器,脉冲宽度 250 μs ,重复频率为 40 Hz,最高稳态功率为 414 W。泵浦光经过二分之一波片和光隔离器装置,可以在实现泵浦光单向通过的同时实现激光功率的连续可调。拉曼腔前的二分之一波片对泵浦光偏振方向进行调节,使其偏振方向平行于金刚石晶体的 $\langle 111 \rangle$ 轴以获得最大的拉曼增益。泵浦光通过一个焦距为

100 mm 的透镜 L1 被聚焦到金刚石晶体中心,其束腰尺寸约为 60 μm 。金刚石晶体的尺寸为 $8\times 4\times 1.2\text{ mm}^3$ 且被置于谐振腔焦点处,其两端均镀有对 1 064 nm 泵浦光、1 240 nm 一阶 Stokes 光和 1 485 nm 二阶 Stokes 光的增透介质膜。输入镜曲率半径为 100 mm,其端面镀有对泵浦光高透、一阶和二阶 Stokes 高反射的介质膜;输出镜曲率半径为 100 mm,其端面镀有对泵浦光高反射膜以实现金刚石晶体的双通泵浦,同时镀有一阶 Stokes 光反射率 $>99\%$ 和二阶 Stokes 光反射

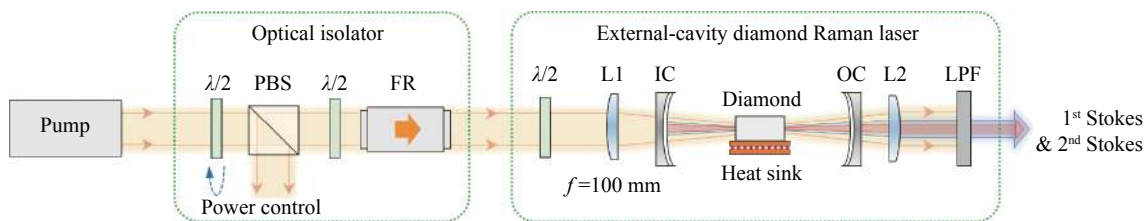


图 3 实验装置图

Fig.3 Schematic of experiment setup

率 20% 的介质膜, 以实现双波长的谐振。谐振腔采用近共心腔结构, 总长度约为 203 mm, 对应的一阶和二阶 Stokes 光的本征束腰尺寸分别为 60 μm 和 65 μm 。透镜 L2 用于实现输出光束的准直; 长通滤光片 LPF 用于吸收泵浦光, 实现纯净的一阶和二阶 Stokes 的双波长输出。

2 实验结果及分析

图 4 为金刚石拉曼激光器的输出功率随泵浦光功率的变化关系。图中可见一阶和二阶 Stokes 光的产生阈值分别为 67 W 和 163 W。笔者利用外腔拉曼理论模型^[34-35] 对该转换的阈值功率进行计算, 得出一阶和二阶 Stokes 的理论阈值约为 57 W 和 138 W, 基本与实验结果相吻合, 其中实验数值略高于理论值的主要原因是光路实际调节及泵浦耦合的偏差所导致。在达到二阶 Stokes 光产生阈值之前, 一阶 Stokes 光的输出功率呈线性增长, 斜效率约为 56.9%; 当达到二阶 Stokes 光阈值后, 一阶 Stokes 光功率基本保持不变 (与理论趋势相吻合^[36]), 最高功率值为 78 W, 而二阶 Stokes 光的功率呈线性增长, 斜效率约为 41.7%, 在有限的泵浦功率下获得最高输出功率为 110 W; 在最高泵浦功率下, 一阶和二阶 Stokes 光的总功率为 182 W, 整体转换效率为 44.0%、斜效率为 52.1%。由于受到现有输出镜透过率的限制, 即使进一步提升泵浦光功率, 理论上腔内一阶 Stokes 光的功率密度依旧保持为常数, 持续注入的泵浦光功率将向

二阶 Stokes 光转换, 因此输出的 1.2 μm 激光功率将基本保持不变、而 1.5 μm 激光功率将会在热负载能力范围内保持线性增长。另外, 若想进一步提升 1.2 μm 拉曼激光的输出功率, 需要提高输出镜在该波段的透过率, 但这也会导致 1.5 μm 二阶 Stokes 光阈值功率的增加。因此, 在具体的应用中, 需要根据泵浦光总功率和耦合参数对输出镜的透过率进行具体的优化设计。

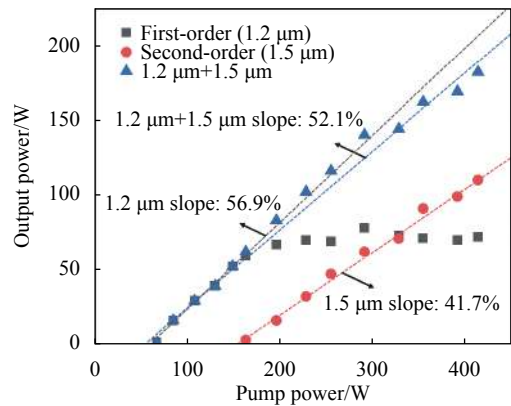


图 4 输出拉曼光功率随泵浦光功率的关系

Fig.4 Relationship between output Raman laser power and pump laser power

图 5(a)~(c) 分别为利用光谱仪 (型号 MS9710C, Anritsu Inc.) 测得的最高功率运转情况下的泵浦光、一阶 Stokes 光和二阶 Stokes 光的光谱图。得益于金刚石较窄的拉曼增益带宽 ($\sim 2 \text{ cm}^{-1}$), 从结果可见一阶 Stokes 光和二阶 Stokes 光的光谱并没有出现光纤拉曼激光器中常见的谱展宽现象, 且相对与泵浦光的

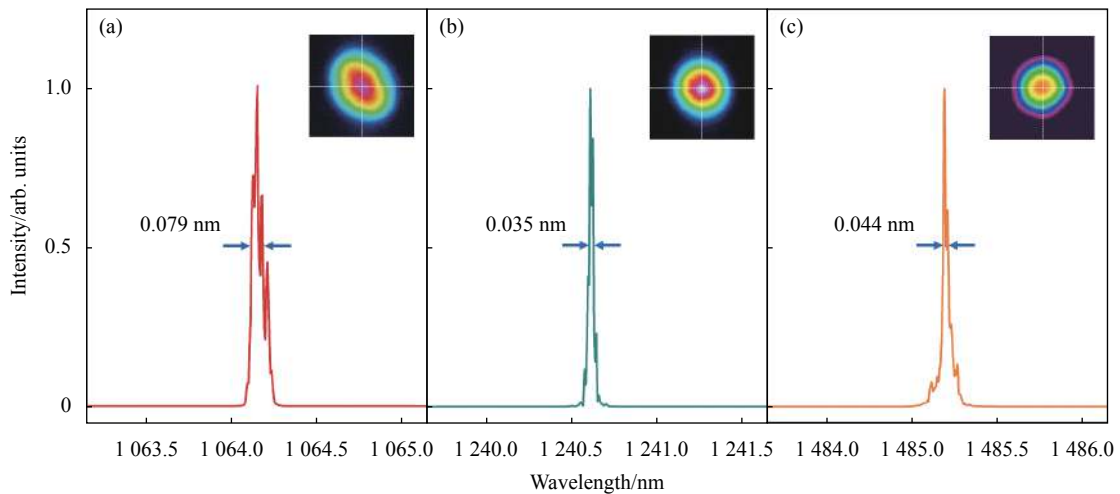


图 5 激光的光谱图 (a) 泵浦光、(b) 1.2 μm 和 (c) 1.5 μm (插图: 近场光斑图)

Fig.5 Laser spectrogram of the (a) pump light, (b) 1.2 μm and (c) 1.5 μm (Insets: near-field beam profile)

光谱均有一定的窄化现象。受到光谱仪分辨率制约 (~0.05 nm), 目前无法测得更高精度的光谱数值, 但是未来通过利用 SRS 过程无空间烧孔效应的特性, 引入非线性损耗和优化振荡器设计, 有望实现更窄线宽或单纵模的高功率拉曼激光运转^[37-38]。图 5 中的插图分别为最高功率运转下泵浦光、一阶 Stokes 光和二阶 Stokes 的光斑近场分布, 结果表明 1.2 μm 和 1.5 μm 双波长拉曼激光均实现了近高斯分布的高质量激光输出, 并表现出明显的光束净化效果。此外, 实验测得的一阶 Stokes 光和二阶 Stokes 光的光束质量因子 M^2 数值分别为 1.13±0.04 和 1.11±0.04, 相较于泵浦光 $M^2=1.5±0.05$ 均有较为显著的提升。

3 结 论

文中报道了一台基于外腔谐振金刚石拉曼转换的百瓦级 1.2 μm/1.5 μm 双波长激光器, 在有限功率的 1 μm 激光泵浦情况下同时获得了 1.2 μm 一阶拉曼 72 W 和 1.5 μm 二阶拉曼 110 W 的输出, 总输出功率高达 182 W, 最大转换效率 44.0%, 整体斜效率为 52.1%。实验结果表明, 产生的 1.2 μm 和 1.5 μm 激光的光束质量均相对于泵浦光有显著的提升, 且没有出现光纤拉曼激光器中的光谱展宽现象。结合理论分析可知, 通过进一步优化谐振腔设计和提高泵浦功率将有望进一步提升双波长激光的输出功率。不仅如此, 结合金刚石晶体极宽的光谱透过范围 (>0.23 μm) 特性, 改变泵浦光波长将能够有效拓展双波长激光的输出波段; 另外, 通过设计谐振腔腔镜的波长反射率, 有望进一步拓展转换阶次, 进而实现三波长及以上的高功率拉曼激光输出^[36,39]。该研究结果为获得高功率、高光束质量且无光谱展宽的多波长激光输出提供了新的技术路径, 并有望为遥感监测、雷达等应用领域提供新的激光光源。

参考文献:

- [1] Extance A. Military technology: Laser weapons get real [J]. *Nature News*, 2015, 521(7553): 408.
- [2] Williams R J, Kitzler O, Bai Z, et al. High power diamond Raman lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1602214.
- [3] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [4] Comaskey B J, Beach R, Albrecht G, et al. High average powers diode pumped slab laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(4): 992-996.
- [5] Wang H, Lin L, Ye X. Status and development trend of high power slab laser technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190456. (in Chinese)
- [6] Koehner W. Solid-state Laser Engineering [M]. US: Springer, 2006.
- [7] Supradeepa V R, Nicholson J W. Power scaling of high-efficiency 1.5 μm cascaded Raman fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2538-2541.
- [8] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [9] Huo Xiaowei, Qi Yaiyao, Li Yuqi, et al. Research progress of LD-pumped Pr³⁺-doped solid-state laser in visible wavelength [J]. *Electro-optic Technology & Application*, 2019, 34(5): 7-15. (in Chinese)
- [10] Sharma U, Kim C S, Kang J U. Highly stable tunable dual-wavelength Q-switched fiber laser for DIAL applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(5): 1277-1279.
- [11] Akbari R, Zhao H, Major A. High-power continuous-wave dual-wavelength operation of a diode-pumped Yb: KGW laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1601-1604.
- [12] Deng Q, Wu D, Kuang Z, et al. 532 nm/660 nm dual wavelength lidar for self-calibration of water vapor mixing ratio [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1230004. (in Chinese)
- [13] Alavipanah S K, Matinfar H R, Rafiei Emam A, et al. Criteria of selecting satellite data for studying land resources [J]. *Desert*, 2010, 15(2): 83-102.
- [14] Vatnik I D, Churkin D V, Babin S A, et al. Cascaded random distributed feedback Raman fiber laser operating at 1.2 μm [J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18486-18494.
- [15] Bai Z, Williams R J, Kitzler Ondrej, et al. 302 W quasi-continuous cascaded diamond Raman laser at 1.5 microns with large brightness enhancement [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 19797-19803.
- [16] Boyd R W. Nonlinear Optics[M]. 3 ed, US: Academic Press, 2008.
- [17] Pask H M. The design and operation of solid-state Raman lasers [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, 27(1): 3-56.
- [18] Piper J A, Pask H M. Crystalline raman lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 692-704.

- [19] Supradeepa V R, Feng Y, Nicholson J W. Raman fiber lasers [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(2): 023001.
- [20] Bai Z, Williams R J, Jasbeer H, et al. Large brightness enhancement for quasi-continuous beams by diamond Raman laser conversion [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(3): 563-566.
- [21] Bai Zhenxu, Chen Hui, Li Yuqi, et al. Development of beam brightness enhancement based on diamond Raman conversion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(1): 20200098. (in Chinese)
- [22] Mildren R P, Rabeau J R. *Optical Engineering of Diamond* [M]. Berlin: Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [23] Li Y, Ding J, Bai Z, et al. Diamond Raman laser: a promising high-beam-quality and low-thermal-effect laser [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e35.
- [24] Bai Zhenxu, Yang Xuezhong, Chen Hui, et al. Research progress of high-power diamond laser technology (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201076. (in Chinese)
- [25] Granados E, Spence D J, Mildren R P. Deep ultraviolet diamond Raman laser [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10857-10863.
- [26] Yang X, Kitzler O, Spence D J, et al. Diamond sodium guide star laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1898-1901.
- [27] Li Y, Bai Z, Chen H, et al. Eye-safe diamond Raman laser [J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102853.
- [28] Sabella A, Piper J A, Mildren R P. Diamond Raman laser with continuously tunable output from 3.38 to 3.80 μm [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 4037-4040.
- [29] Antipov S, Sabella A, Williams R J, 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.
- [30] Yang X, Bai Z, Chen D, et al. Widely-tunable single-frequency diamond Raman laser [J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 29449-29457.
- [31] Williams R J, Kitzler O, McKay A, et al. Investigating diamond Raman lasers at the 100 W level using quasi-continuous-wave pumping [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(14): 4152-4155.
- [32] Bai Z, Zhang Z, Wang K, et al. Comprehensive thermal analysis of diamond in a high-power Raman cavity based on FVM-FEM coupled method [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(6): 1572.
- [33] Antipov S, Williams R J, Sabella A, et al. Analysis of a thermal lens in a diamond Raman laser operating at 1.1 kW output power [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15232-15239.
- [34] Kitzler O, McKay A, Spence D J, et al. Modelling and optimization of continuous-wave external cavity Raman lasers [J]. *Optics Express*, 2015, 23: 8590-8602.
- [35] Williams R J, Spence D J, Lux O, et al. High-power continuous-wave Raman frequency conversion from 1.06 μm to 1.49 μm in diamond [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 749-757.
- [36] Li M, Kitzler O, Mildren R P, et al. Modelling and characterisation of continuous wave resonantly pumped diamond Raman lasers [J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 18427-18436.
- [37] Lux O, Sarang S, Kitzler O, et al. Intrinsically stable high-power single longitudinal mode laser using spatial hole burning free gain [J]. *Optica*, 2016, 3(8): 876-881.
- [38] Sheng Q, Li R, Lee A J, et al. A single-frequency intracavity Raman laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8540-8553.
- [39] Casula R, Penttinen J P, Guina M, et al. Cascaded crystalline Raman lasers for extended wavelength coverage: Continuous-wave, third-Stokes operation [J]. *Optica*, 2018, 5(11): 1406-1413.