

532 nm 激光抽运 CO₂ 气体的多光谱拉曼激光

李仲慧¹, 刘栋¹, 蔡向龙¹, 卞进田², 王颜超¹, 王鹏远¹, 陈莹¹, 刘金波¹, 胡墅¹, 李慧¹, 郭敬为^{1*}

¹中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023;

²国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 基于受激拉曼散射(SRS),研究了一种获得多光谱激光的方法。以 Nd:YAG 的二倍频 532 nm 激光为抽运光,以高压 CO₂ 作为拉曼活性介质,最多可同时输出位于 390~755 nm 的 10 种波长。通过优化 CO₂ 压力,得到一级斯托克斯光(S1, 574 nm)、二级斯托克斯光(S2, 624 nm)和三级斯托克斯光(S3, 683 nm)的最大光子转换效率分别为 36.6%、19.6%和 11.2%。

关键词 激光光学; 受激拉曼散射; 二氧化碳; 一级斯托克斯光; 高级斯托克斯光; 反斯托克斯光

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0208003

Multispectral Raman Laser in CO₂ Gas Pumped by 532 nm Laser

Li Zhonghui¹, Liu Dong¹, Cai Xianglong¹, Bian Jintian², Wang Yanchao¹,
Wang Pengyuan¹, Chen Ying¹, Liu Jinbo¹, Hu Shu¹, Li Hui¹, Guo Jingwei^{1*}

¹Key Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences,
Dalian, Liaoning 116023, China;

²State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology,
Hefei, Anhui 230037, China

Abstract Based on stimulated Raman scattering (SRS), we study a method for obtaining multispectral laser. The frequency doubled Nd:YAG laser at 532 nm is used as the pumping light, and the high pressure CO₂ is used as Raman active medium, and ten different Stokes lasers between 390 nm and 755 nm are generated simultaneously. By optimizing CO₂ pressure, the maximum photon conversion efficiencies for first-order Stokes (S1, 574 nm), second-order Stokes (S2, 624 nm) and third-order Stokes (S3, 683 nm) reach 36.6%, 19.6% and 11.2%, respectively.

Key words laser optics; stimulated Raman scattering; carbon dioxide; first-order Stokes; high order Stokes; anti-Stokes

OCIS codes 140.3470; 290.5860; 290.5890; 290.5910

1 引言

受激拉曼散射(SRS)是拓展激光波长范围的有效手段^[1]。受激拉曼变频的研究一直受到了国内外研究人员的关注。1990年, Lempert等^[2-3]利用 Nd:YAG 激光(532 nm, 带宽约为 1 cm⁻¹)进行了氧气的单程 SRS 研究, 获得了约 6% 的能量转换效率; 随后他们又利用宽带荧光种子注入的方法来提高氧气中的拉曼转换效率, 其中一级斯托克斯光的能量转换效率达到了 21%。郑义等^[4]采用宽带倍频 Nd:YAG 激光(532 nm)研究了高压氧气及氧-氦混合气

体中的 SRS, 探索了抑制氧气中二级斯托克斯产生的方法。吴峰等^[5]采用序列脉冲倍频 YAG 激光器作为基频光研究了氧气中 SRS 热效应的影响, 实验结果表明: 重复频率的基频光产生的拉曼激光脉冲个数最多为 3 个, 且脉冲幅值依次下降。2017 年, 陈育斌等^[6]利用 1.5 μm 种子激光进行了乙烷分子的受激拉曼实验, 实现了 1553 nm 拉曼激光输出, 光子转化率为 47.5%。李仲慧等^[7]采用 1064 nm Nd:YAG 抽运高压 CO₂ 得到 1248 nm 的一级斯托克斯光, 最大光子转换效率可达 36.6%。

上述工作都获得了较好的单波长拉曼激光输

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-11-09; 录用日期: 2018-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(11475177, 61505210)、中国科学院化学激光重点实验室开放课题基金(KLCL-2017-N10)

* E-mail: jingweigu@dicp.ac.cn

出,但是需要通过改变抽运源和拉曼介质实现不同波长的拉曼光同时输出,可见,实现多光谱激光输出具有一定的现实意义,例如应用于激光雷达^[8-10]。若要在短时间内探测多种物质成分,就需要同时发射多种不同波长的激光,因此必须研制一套能同时发射多种波长的激光系统^[11]。在传统的焊接行业中,多波长激光焊接技术占据独特优势,Hess等^[12]提出了1030 nm红外激光和515 nm连续绿激光傍轴复合焊接铜合金的工艺方案,绿激光和红外激光复合焊接可以显著提高光的吸收率,同时能够极大地降低铜的深熔焊接阈值。由此可见,多波长激光复合焊接新工艺具有重要的研究价值和工程应用意义。多波长激光在医疗领域也有广泛应用,可用于肿瘤切除、眼科治疗等^[13],除此以外,其在激光成像与显示、环境监测、光谱分析^[14-17]等领域具有广阔的应用前景。本文利用CO₂气体作为拉曼介质进行了探索实验,研究了多光谱激光输出特性与气压、抽运能量之间的关系。

2 实验方案

CO₂气体SRS实验装置如图1所示,抽运光源

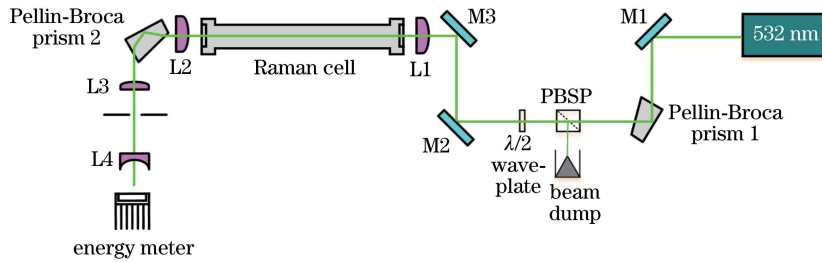


图1 CO₂气体SRS实验装置

Fig. 1 Experimental setup of SRS in CO₂ gas

3 实验结果及讨论

3.1 拉曼光光谱图及各级斯托克斯光子转换效率随气压的变化

图2是使用光谱仪(日本,HORIBA公司,型号iHR320)采集到的532 nm抽运CO₂输出光光谱图,此时抽运光能量为350 mJ,CO₂气体压力为2 MPa。能够从图2中明显看到的波长有四级斯托克斯光S4(755 nm)、三级斯托克斯光S3(683 nm)、二级斯托克斯光S2(624 nm)、一级斯托克斯光S1(574 nm)、剩余抽运光S0(532 nm),以及S0(532 nm)和S1(574 nm)通过四波混频(FWM)作用产生的一级反斯托克斯光AS1(495 nm),AS1(495 nm)和S0(532 nm)通过四波混频作用产生的

为Nimma-600型固体激光器(北京镭宝光电公司生产),其输出光斑的直径为6 mm,波长为532 nm,输出最大能量为350 mJ,脉宽为10 ns。M1、M2、M3为45°入射的532 nm高反镜(反射率 $V_{HR} = 99.8\%$ @532 nm),抽运光由高反镜M1反射后经过摆放好的佩林·布洛卡棱镜、分束立方体(PBSP)和四分之一波片的组合。佩林·布洛卡棱镜1可以防止后向拉曼光进入激光器损坏YAG棒,分束立方体和四分之一波片的组合可以隔离出后向布里渊光。抽运光经过M2、M3的反射后进入到拉曼池(长度 $L = 1.8$ m)中,拉曼池两端装有未镀膜的窗口片(透过率 $T = 93.5\%$ @532 nm),内部充有高压CO₂(纯度为99.999%),在拉曼池前后分别放置透镜L1、L2(焦距 $f = 1000$ mm),两透镜的距离为2 m。摆放透镜时尽可能使焦点处位于拉曼池的中心位置,L1使抽运光聚焦,L2使输出光束变为平行光。为了使各级拉曼光分离开,在L2后边放置佩林·布洛卡棱镜2和透镜L3(焦距 $f = 500$ mm),使用光阑分离出待测拉曼光。为了保护能量探头,用薄玻璃片(反射率 $R = 9\%$ @532 nm)反射出一小部分光进行测量。

二级反斯托克斯光AS2(463 nm),AS2(463 nm)和AS1(4495 nm)通过四波混频作用产生的三级反斯托克斯光AS3(435 nm),AS3(435 nm)和AS2(463 nm)通过四波混频作用产生的四级反斯托克斯光AS4(410 nm),还有AS4(410 nm)和AS3(435 nm)通过四波混频作用产生的五级反斯托克斯光AS5(390 nm),共10个波长的多光谱激光。此外,还能够看出每个拉曼光谱线的周围都很干净,没有其他杂散光。可见,532 nm抽运CO₂是一种获得多光谱激光的有效方法。从图2中还可以看出,反斯托克斯光的可放大性不如斯托克斯光,这主要是因为两者的机理不同。与斯托克斯光是由受激拉曼放大产生的机理不同,反斯托克斯光作用的机理是四波混频,因此增加反斯托克斯光转换效率的途

径是增加相关光束共同作用区域内的能量乘积、增加粒子数密度以及降低相位失配。

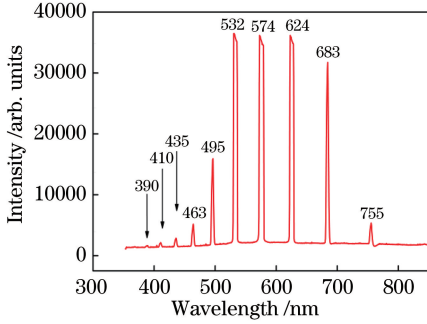


图 2 拉曼散射光的光谱图

Fig. 2 Spectrum of Raman scattered light

在各级斯托克斯光中,由于能量计量程的限制,只能测到 S1、S2 和 S3 的能量大小,虽然其他斯托克斯光也能够观测到,但由于其能量较低,能量计(加拿大, Gentec 公司,型号 QE65LP-H-MB-D0)并没有测到数值。如图 3 所示是 S1、S2、S3 和剩余抽运光(RES)光子转换效率随 CO₂ 压力变化的关系图。此时进入拉曼池中的抽运能量是 330 mJ,当拉曼池内气压小于 0.5 MPa 时,S1 的光子转换效率为 25%~30%。这是由于此时的 CO₂ 压力较小,大部分抽运光都转化为 S1,随着气压不断增加,S1 的转换效率呈现逐渐下降的趋势,因为发生级联 SRS,达到一定阈值后 S1 向高级斯托克斯光转换。

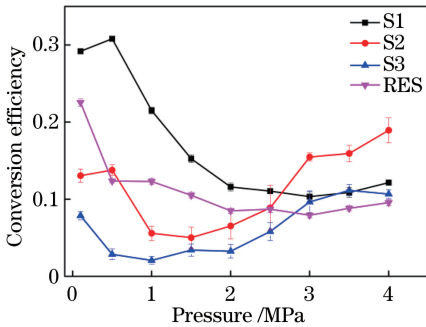


图 3 光子转换效率随气压的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of photon conversion efficiencies with pressure

当拉曼池内的气压小于 0.5 MPa 时,S2 的光子转换效率在 13%左右;随着气压从 0.5 MPa 增加到 1.5 MPa,S2 的转换效率从 13.1%下降到 5%;当气压进一步增加到 4 MPa 时,S2 的转换效率达到最大值 18.9%。这是因为:高压条件增加了四波混频的波矢失配比,使四波混频(FWM)的效率降低,而 AS 是通过四波混频产生的,所以向反斯托克斯转化的抽运能量减少,转而向 S2、S3 等高级斯托克

斯光转换了;随着 CO₂ 压力增加,增益系数相应增加,造成 S2 和 S3 的增益系数增大。两种机制的共同作用使得高级斯托克斯转化率提高。当 CO₂ 气压达到 4 MPa 时,S3 略有下降,而 S1 增大,这是因为此时的四波混频效率过低,抑制了 SRS 中高级斯托克斯的转化。

从图 3 中还可以看出,随着气压增大,各级斯托克斯光的转换效率呈现出先降低后升高的趋势,这主要是由增益系数的变化引起的。本节结合增益系数进行定性分析,增益系数可表示为^[18]

$$g_s = \frac{8 \pi c^2 \Delta N}{n_s^2 \hbar \omega_s^3 \Delta \nu_R} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right), \quad (1)$$

其中,

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\hbar \omega_s^4}{2m\omega_R c^4} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)^2, \quad (2)$$

式中: ΔN 为粒子数密度之差,常温时振动激发态的粒子仅占总数的 10^{-9} ,因此 ΔN 取总粒子数密度之差; ω_s 为 S1 的角频率; $\Delta \nu_R$ 为拉曼介质线宽; Ω 为空间立体角; $d\sigma/d\Omega$ 为微分散射截面; m 为拉曼活性粒子的质量; ω_R 为分子振动的共振频率; c 为真空中的光速; \hbar 为约化普朗克常数; $\partial \alpha / \partial q$ 为微分极化率,该值与分子能级有关,本研究中拉曼跃迁为 CO₂ 分子 Σ_g^+ 振动模式的基频跃迁,即 $\partial \alpha / \partial q$ 为一固定值。因此 $d\sigma/d\Omega$ 正比于 S1 频率的 4 次方。结合本实验条件,可得

$$g_s \propto \frac{\omega_s \Delta N}{\Delta \nu_R}. \quad (3)$$

一、二级斯托克斯光的 ω_s 差别不大,可以认为处于同一量级。常温下 CO₂ 分子大部分处于基态振动能级, ΔN 近似于 CO₂ 分子的粒子数密度,所以 ΔN 正比于拉曼池中的压力。CO₂ 分子的基频振动能级的线宽 $\Delta \nu_R$ 随压力的变化关系缺乏实验数据,但可以参考其他分子(例如 H₂)的相关信息^[19],故认为本实验条件下的 $\Delta \nu_R$ 与拉曼池气压的函数为一阶导数大于 0、二阶导数小于 0 的增函数。因此, g_s 随气压升高而先降低后增加,从而导致各级斯托克斯光的变化呈相同的趋势。

3.2 S1、S2 和 S3 光子转换效率的优化结果

在 0.5 MPa 下,S1 的转换效率最高,为 30.8%,在此气压下通过调节抽运能量继续优化 S1 的转换效率。图 4 所示是 S1 光子转换效率随抽运光能量的变化:S1 的阈值能量为 57 mJ,当抽运能量达到 79.7 mJ 时,S1 的转换效率很快从 7%增大到 31.7%;在抽运光能量继续增加到 128.1 mJ 过程

中, S1 的转换效率呈锯齿形增长, 且误差明显, 因为此时抽运能量达到 S2 的阈值, S2 由 S1 的级联作用产生, 抽运光能量进一步增强时, S1 整体转换效率略有降低, 因为部分 S1 光向更高级转换。在抽运能量为 128.1 mJ、聚焦透镜焦距 $f=1000$ mm、气压为 0.5 MPa 的条件下, S1 的光子转换效率峰值为 36.6%。

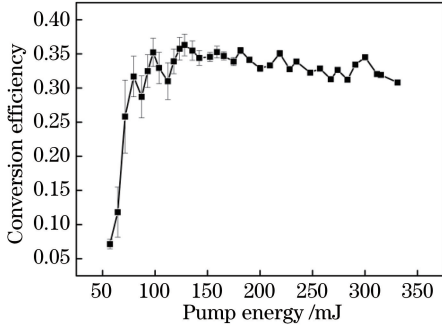


图 4 S1 光子转换效率随抽运能量的变化曲线
Fig. 4 Variation curve of photon conversion efficiency of S1 with pump energy

由图 3 可知, 在 4 MPa 下, S2 的转换效率最高, 为 18.9%, 在此气压下通过调节抽运能量继续优化 S2 的转换效率。图 5 是 4 MPa 下 S2 光子转换效率随抽运光能量的变化, S2 的阈值能量为 117.8 mJ, 最大转换效率为 19.6%。图 6 是 3.5 MPa 下 S3 光子转换效率随抽运光能量的变化, S3 的阈值能量为 218.8 mJ, 最大转换效率为 11.2%。

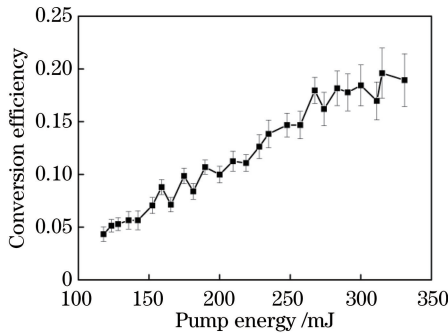


图 5 S2 光子转换效率随抽运能量的变化曲线
Fig. 5 Variation curve of photon conversion efficiency of S2 with pump energy

3.3 多光子受激拉曼激光器的理论模拟

多光谱受激拉曼激光涉及多束波长不同的相干光的相互作用, 单靠实验进行优化组合是一项非常浩繁的工作。为了提高研究的费效比, 本课题组对模拟进行了初步探索。鉴于高级斯托克斯光的转换效率不仅取决于低一级斯托克斯光的能量密度, 还取决于其光束质量(主要包括相关位置的能量密度

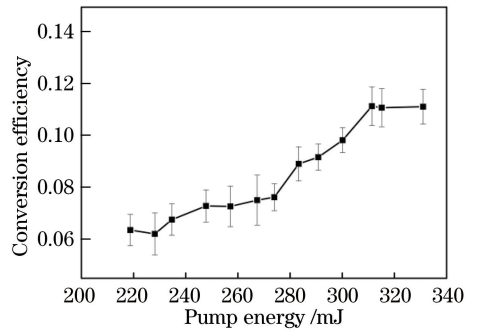


图 6 S3 光子转换效率随抽运能量的变化曲线
Fig. 6 Variation curve of photon conversion efficiency of S3 with pump energy

分布), 所以采用空间三维数学模型进行仿真。仿真模型的方程^[20]组如下

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}_i(r, t) + \frac{n^2 \partial^2 \mathbf{E}_i(r, t)}{c^2 \partial t^2} = -\frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{P}_i^{\text{NL}}(r, t)}{\partial t^2}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{E} 为电场矢量; c 为光速; n 为折射率; r 和 t 分别为空间和时间的坐标。(4)式是一个公式模板, i 分别为 P、S1 和 S2。 $\mathbf{P}_i^{\text{NL}}(r, t)$ 为非线性极化矢量, 可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{P}_P^{\text{NL}}(r, t) = \chi_{R_P}^3 \cdot |\mathbf{E}_S(r, t)|^2 \mathbf{E}_P(r, t), \\ \mathbf{P}_{S_i}^{\text{NL}}(r, t) = \chi_{R_S}^3 \cdot |\mathbf{E}_P(r, t)|^2 \mathbf{E}_S(r, t) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $\chi_{R_P}^3$ 为 CO_2 基频振动能级的非线性系数, 在拉曼介质压力相同的条件下

$$\chi_{R_P}^3 \propto \frac{1}{2} g_S. \quad (6)$$

因此, 参考文献[7]将 $\chi_{R_P}^3$ 的值设置为 H_2 的 $1/(2\sqrt{4.8})$, 且与 g_S 一样时就有(1)式的特性。同时, 由(4)~(5)式可得各级斯托克斯光随时间的变化速率正比于乘积值 $|\mathbf{E}_S(r, t)|^2 \mathbf{E}_P(r, t)$, 且(4)式形式的斯托克斯光动力方程的等号两边均含有 $\mathbf{E}_S(r, t)$, 由于正反馈的作用, 当它们的乘积达到一定阈值后, 必然呈指数级变化。由于受激拉曼的级联效应, 当某级斯托克斯光增加到一定值后, 增长速率会减缓, 向更高级的斯托克斯光转化。如前文所述, 一、二、三级斯托克斯光的 ω_S 差别不大, SRS 过程增益介质的跃迁能级相同, 在拉曼介质气体压力相同的情况下, 532 nm 基频光抽运产生的一、二、三级斯托克斯光的 g_S 差别不大, 从而, 各级斯托克斯的转换效率也会很接近, 这进一步增强了级联作用, 在实验上表现为低级斯托克斯光达到一定转换率后, 抽运功率继续增加会导致高级斯托克斯光转

换效率增加。这是与长波长基频光抽运的SRS^[7]的主要不同之处。综上所述,短波长抽运的级联受激拉曼更有利于多光谱拉曼激光的输出。

本研究采用有限元分析法求解上述方程组,模拟330 mJ基频光抽运3.5 MPa CO₂产生的各级拉曼光的变化情况,上述方程组的矢量形式求解复杂,为了保证模拟的可行性,仅考虑了S1、S2和AS1的转换效率;同时鉴于各级斯托克斯光均为偏振光,上述形式的E直接选用标量形式,结果如图7所示。结果表明,模拟得到的各级斯托克斯光的转化阈值和低抽运能量下的转换效率与实验值基本相同,说明数学模型可以为实验提供初步指导。模拟结果和实验结果均表明低级斯托克斯光达到一定转换效率后,继续增加抽运能量仅会提高高级斯托克斯光的转换效率。模拟过程未涉及S3的转化,图中S2的模拟值达到一定转换效率后上升幅度变缓是由向AS1转化导致的。数值模拟结果与定性分析结果、实验结果基本一致,通过修正参数后可以实现定量模拟。

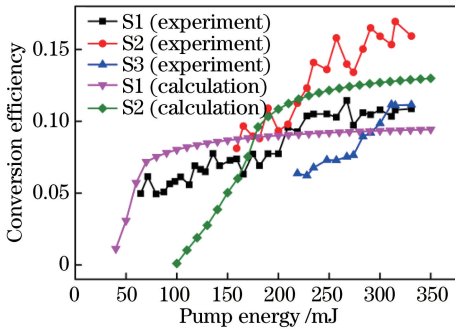


图7 SRS光子转化率

Fig. 7 Conversion efficiency of SRS photon

4 结 论

采用532 nm激光抽运高纯CO₂气体获得了能够同时输出10种波长的多光谱激光,通过调节拉曼池内的气体压力,在气压为0.5 MPa、抽运光能量为131.52 mJ时获得的574 nm波长的S1拉曼激光的最大光子转换效率为36.6%。此外,进行了数值仿真的初步探索,仿真结果初步反映了转换效率和阈值。未来研究工作的重心是实验与理论模拟相互校验,最终实现多光谱激光的可控操作。

参 考 文 献

[1] Hua X Q, Leng J, Yang H P, *et al.* Generation of intense backward stimulated Raman scattering in H₂-He mixture pumped by single longitudinal mode Nd:

YAG laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(4): 451-455.

花晓清, 冷静, 杨何平, 等. 单纵模Nd:YAG激光抽运H₂-He混合气体中的强后向受激拉曼散射[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 451-455.

[2] Lempert W R, Looney J P, Zhang B, *et al.* Stimulated Raman scattering and coherent anti-Stokes Raman spectroscopy in high-pressure oxygen[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990, 7(5): 715-721.

[3] Zhang B, Diskin G, Lempert W R, *et al.* Efficient vibrational Raman conversion in O₂ and N₂ cells by use of super fluorescence seeding[J]. Optics Letters, 1993, 18(14): 1132-1134.

[4] Zheng Y, Yao J Q, Zhu S M, *et al.* Stimulated Raman scattering in oxygen or oxygen-helium mixing gas pumped by a Q-switch frequency doubled Nd:YAG laser[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(11): 1594-1597.

郑义, 姚建铨, 朱少明, 等. 调Q倍频Nd:YAG激光泵浦氧气和氧氦混合气体的受激拉曼散射[J]. 光学学报, 1995, 15(11): 1594-1597.

[5] Wu F, Shi X C, Wang X L, *et al.* Stimulated Raman scattering in oxygen pumped by train pulse frequency doubled Nd:YAG laser[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(3): 275-278.

吴峰, 施翔春, 王学礼, 等. 序列脉冲倍频YAG激光器泵浦的氧气受激拉曼散射研究[J]. 光学学报, 1997, 17(3): 275-278.

[6] Chen Y B, Wang Z F, Gu B, *et al.* 1.5 μm fiber ethane gas Raman laser amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0514002.

陈育斌, 王泽锋, 顾博, 等. 1.5 μm光纤乙烷气体拉曼激光放大器[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0514002.

[7] Li Z H, Liu D, Cai X L, *et al.* Stimulated Raman scattering in carbon dioxide gas pumped by Nd:YAG laser at 1064 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0308001.

李仲慧, 刘栋, 蔡向龙, 等. 1064 nm Nd:YAG激光抽运二氧化碳气体中的受激拉曼散射[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0308001.

[8] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, *et al.* Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(2): 100-112.

[9] Chen Y W, Räikkönen E, Kaasalainen S, *et al.* Two-channel hyperspectral LiDAR with a supercontinuum laser source[J]. Sensors, 2010, 10(7): 7057-7066.

- [10] Powers M A, Davis C C. Spectral lidar: towards active 3D multispectral imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7684: 768409.
- [11] Yue G M, Wu Y H, Hu S X, *et al.* A multi-wavelength simultaneous output laser system for lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(s1): 215-217.
岳古明, 吴永华, 胡顺星, 等. 用于激光雷达的多波长同时输出激光系统 [J]. 中国激光, 2002, 29(s1): 215-217.
- [12] Hess A, Schuster R, Heider A, *et al.* Continuous wave laser welding of copper with combined beams at wavelengths of 1030 nm and of 515 nm [J]. Physics Procedia, 2011, 12: 88-94.
- [13] Ning X F, Yao J Q, Wang P, *et al.* Experimental studies of a four-wavelengths (1064/1319, 532/659 nm) Nd:YAG laser treatment machine [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2002, 13(12): 1311-1313.
宁喜发, 姚建铨, 王鹏, 等. (1064/1319, 532/659 nm) Nd:YAG 激光治疗仪的实验研究 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(12): 1311-1313.
- [14] Martinez K, Cupitt J, Saunders D, *et al.* Ten years of art imaging research [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(1): 28-41.
- [15] Chane C S, Mansouri A, Marzani F S, *et al.* Integration of 3D and multispectral data for cultural heritage applications: survey and perspectives [J]. Image and Vision Computing, 2013, 31(1): 91-102.
- [16] Liang H D, Keita K, Vajzovic T. PRISMS: a portable multispectral imaging system for remote *in situ* examination of wall paintings [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6618: 661815.
- [17] Carcagni P, Patria A D, Fontana R, *et al.* Multispectral imaging of paintings by optical scanning [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(3): 360-367.
- [18] Kaiser W, Maier M. Stimulated Reyleigh, Brillouin and Raman spectroscopy [M]. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1972: 1077-1150.
- [19] Bischel W K, Dyer M J. Temperature dependence of the Raman linewidth and line shift for the Q(1) and Q(0) transitions in normal and para-H₂ [J]. Physical Review A, 1986, 33(5): 3113-3123.
- [20] Cheng J X, Volkmer A, Xie X S. Theoretical and experimental characterization of coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2002, 19(6): 1363-1375.