

半导体激光端面抽运 Nd:YVO₄ 自拉曼和频 559 nm 激光

段延敏 朱海永 凤正荣 张耀举 郑崇伟

(温州大学物理与电子信息工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要 报道了采用激光二极管端面抽运 *a* 轴切割的 Nd:YVO₄ 晶体自拉曼和频激光的实验研究。从谐振腔结构、晶体膜系以及和频晶体的选择方面对激光系统进行了设计,对连续运转和声光调 Q 下和频激光器的性能进行了研究。以 KTP 晶体为和频晶体,在 12 W 的抽运功率下,获得了 580 mW 的 558.6 nm 连续黄绿激光输出,光-光转化效率为 5%。在 17.5 W 的抽运功率和 30 kHz 的声光调 Q 重复频率下,获得了最高平均功率为 1.71 W、脉冲宽度为 21 ns 的黄绿激光输出,光-光转化效率为 9.8%。

关键词 激光器;自拉曼;Nd:YVO₄ 晶体;和频;端面抽运;声光调 Q

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0502002

Laser Diode End-Pumped Nd:YVO₄ Self-Raman Laser at 559 nm with Sum-Frequency Mixing

Duan Yanmin Zhu Haiyong Feng Zhengrong Zhang Yaoju Zheng Chongwei

(College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University,
Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

Abstract Sum-frequency mixing of a laser diode end-pumped *a*-cut Nd:YVO₄ self-Raman laser is reported. Reasonable designing of cavity construction and crystal coating, as well as choosing of sum-frequency mixing crystal are considered. The laser system is optimized for continuous-wave mode and Q-switched mode operation. Continuous-wave yellow-green laser with output power of 580 mW and wavelength of 558.6 nm is achieved at a pump power of 12 W, and the corresponding optical-optical conversion efficiency is about 5%. With pump power of 17.5 W and Q-switch repetition frequency of 30 kHz, yellow-green laser output power up to 1.71 W is achieved whose pulse width is 21 ns and optical-optical conversion efficiency is 9.8%.

Key words lasers; self-Raman; Nd:YVO₄ crystal; sum-frequency mixing; end-pumped; Q-switched

OCIS codes 140.3550; 140.7300; 190.2620; 140.3480

1 引 言

550~560 nm 波段的黄绿激光是人眼最敏感的可见波段激光,在激光显示和照明,以及有雾气情况下的地面测量和准直方面有重要应用^[1]。此外黄绿光激光在医学上可用于治疗眼底黄斑水肿去除多余的毛细血管等,军事上可用于激光雷达及空间目标的探测。目前固体激光获得黄绿光的最常见的方式包括直接倍频红外波长的黄光激光^[2,3]和全固态拉曼和频黄光激光等^[4]。拉曼变频是获得新的激光波

长的重要手段,可通过改变基频激光波长,结合拉曼转化和混频,得到不同波长的可见波段激光。

2001 年, Kaminskii 等^[5]发现钒酸钪晶体具有较大的拉曼增益系数,是优良的拉曼介质,并提出 Nd:YVO₄ 可以通过自拉曼晶体实现可见和近红外波段的激光输出。2004 年, Chen^[6]实现了 Nd:YVO₄ 晶体的自拉曼激光运转,从而使得 Nd:YVO₄ 作为自拉曼介质的研究获得了广泛关注。*a* 轴切割和 *c* 轴切割的 Nd:YVO₄ 自拉曼及其倍频与

收稿日期: 2013-01-04; 收到修改稿日期: 2013-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(10904143, 61078023), 浙江省自然科学基金(LY12F05003, LQ13F05004, Y6090220), 浙江省新苗人才计划(2012R424060)和温州市科技计划项目(G20110002)资助课题。

作者简介: 段延敏(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事激光和非线性光学等方面的研究。E-mail: ymduan12@gmail.com

和频的研究结果相继报道^[7-10]。2010年,Lü等^[11]采用880 nm半导体激光直接抽运技术,实现了 a 轴切割Nd:YVO₄自拉曼和频890 mW(18.3 W抽运)的连续559 nm激光输出。2011年,Zhu等^[12]报道了采用808 nm的半导体激光抽运 a 轴切割Nd:YVO₄晶体分别获得了1.53 W、1176 nm和480 mW、559 nm连续激光输出。同年,Duan等^[13]采用 c 轴切割的Nd:YVO₄晶体自拉曼和频获得了840 mW的560 nm调Q激光输出。Li等^[14]报道了Nd:YVO₄自拉曼倍频获得了320 mW、588 nm倍频光及660 mW、559 nm和频光输出。

本文主要开展了连续运转和声光调Q下的 a 轴切割的Nd:YVO₄自拉曼和频激光器研究。从谐振腔结构、晶体膜系及和频晶体选择方面对激光系统进行设计。以光纤耦合的808 nm激光二极管(LD)作为抽运源,以KTP晶体为和频晶体,通过优化谐振腔结构和选择合适的重复频率,分别实现了连续运转的580 mW和声光调Q的1.71 W(重复频率为30 kHz,脉冲宽度为21 ns)的558.6 nm黄绿激光输出,光-光转化效率分别为5%和9.8%。

2 实验装置设计

图1所示为LD端面抽运Nd:YVO₄自拉曼和频的559 nm激光器实验装置示意图。抽运源为光纤束耦合输出的中心波长为808 nm的半导体激光器,其光纤芯径为200 μ m、数值孔径为0.22。光纤输出激

光经一对放大比例为1:2的平凸透镜组成的耦合系统准直聚焦成束腰直径为400 μ m的光斑,并入射到激光晶体内。实验中采用Nd³⁺掺杂原子数分数为0.3%,尺寸为3 mm \times 3 mm \times 20 mm的 a 轴切割的Nd:YVO₄晶体作为自拉曼激光晶体。晶体的抽运入射面S1镀有对808 nm抽运光的增透(HT,透射率 $T>95\%$)、同时对1064 nm基频光及1176 nm的一阶斯托克斯光的高反(HR,反射率 $R>99.9\%$)的膜系;另一对应面S2镀有对1064 nm及1176 nm激光的增透膜。为防止反向传输的559 nm黄绿光激光被自拉曼晶体吸收,以实现和频光的单向输出,S2面同时镀有对559 nm黄绿光的高反膜,从而能代替实现黄光单向输出的耦合腔镜,以减少腔内插入损耗,并使得腔结构更紧凑。为了保证激光晶体的导热效果良好,其侧面用铝箔包裹并置于紫铜块内,晶体温度用半导体制冷控温系统控温在20 $^{\circ}$ C左右。输出镜OC镀有对1064 nm及1176 nm激光的高反($R>99.9\%$)、同时对559 nm黄绿光高透($T=95\%$)的膜系。基频谐振腔和拉曼振荡腔场由自拉曼晶体入射面S1和输出镜OC组成。为了实现脉冲调Q输出,将介质长为20 mm的声光调Q开关(Gooch & Housego公司生产,型号QS41-10G-GH28)放在自拉曼激光晶体与和频晶体中间,声光介质两通光面同时对1064 nm和1176 nm激光增透,驱动中心频率为40 MHz,射频功率为10 W。

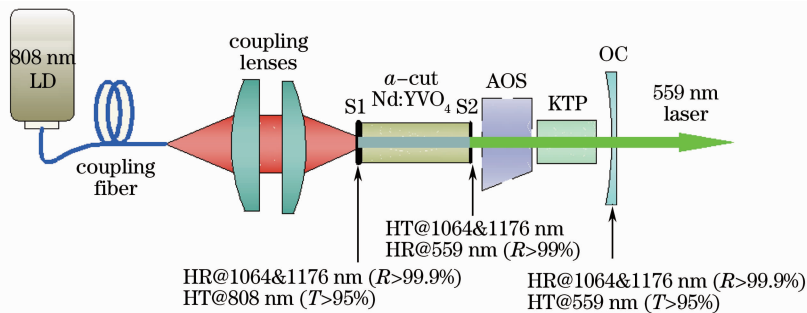


图1 LD端面抽运Nd:YVO₄自拉曼和频激光装置示意图

Fig. 1 Schematic of sum-frequency mixing of LD end-pumped Nd:YVO₄ self-Raman laser

为了实现1064 nm基频光和1176 nm一阶斯托克斯光的和频,对两种常用的非线性频率转换晶体KTP晶体和LBO晶体的匹配特性作了比较。在1176 nm倍频的实验中,LBO晶体的临界相位匹配温度(约314 K)略高于室温,比较容易控制,而KTP晶体的走离角较大(约34 mrad),所以通常多采用非临界相位匹配的LBO晶体^[8]。而对于1176 nm和1064 nm和频实验,KTP晶体和LBO

晶体的相位匹配参数可通过SLNO软件计算得到,如表1所示^[15],其中NCPM I、CPM I和CPM II分别代表I类非临界相位匹配、I类临界相位匹配和II类临界相位匹配。由于与KTP晶体的匹配角($\theta=83.7^{\circ},\phi=0^{\circ}$)相对对应的倍频角度($\theta=69.1^{\circ},\phi=0^{\circ}$)向非临界相位匹配角靠拢,晶体走离角变小;而LBO晶体需要在362 K的高温下才能实现非临界相位匹配,温度控制不便。所以实验中,采用尺寸

为 4 mm × 4 mm × 10 mm，匹配角为 $\theta = 83.4^\circ$ ， $\phi = 0^\circ$ 的 KTP 晶体作为和频晶体，其侧面用铝箔包

裹放置于紫铜块内，晶体温度通过半导体制冷控温系统控制在 300 K 左右。

表 1 KTP 晶体和 LBO 晶体作为和频晶体的匹配参数

Table 1 Phase matching parameters of KTP and LBO for sum-frequency mixing

Crystal	LBO	LBO	KTP
Phase matching type	NCPMI	CPMI	CPMII
Temperature /K	362	300	300
Effective nonlinear coefficients $d_{\text{eff}} / (\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$	0.844	0.836	3.82
Phase matching angle	$\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$	$\theta = 90^\circ, \phi = 7.9^\circ$	$\theta = 83.7^\circ, \phi = 0^\circ$
Walk-off angle /marad	0	4.82	11.31
Acceptance angle / (mard · cm)	Large	Large	5.7

3 实验结果与分析

3.1 连续 Nd:YVO₄自拉曼和频黄绿激光

在连续自拉曼和频实验中，实验装置相对于图 1 的示意图省去了声光调 Q 开关，同时为减少腔内损耗，各元件紧凑放置，总腔长约为 45 mm。通过数值计算不同曲率半径输出片下平凹腔的腔模半径，可知曲率半径 $R_c = 100$ mm 的平凹腔基模半径比曲率半径 $R_c = 300$ mm 的平凹腔基模半径小。拉曼效应作为一种三阶非线性光学效应，转化效率随着基频光强的增加而增大，所以较小的基模半径有利于拉曼转化，以获得更低的拉曼激光阈值，在拉曼激光输出功率上占优势，这与实验结果符合得很好。所以相对文献[11]的连续拉曼和频实验，增加对比了两种不同曲率半径($R_c = 100, 300$ mm)的输出镜片。

采用曲率半径 $R_c = 300$ mm 和 $R_c = 100$ mm 的输出镜片时，对应的激光阈值功率分别为 2.8 W 和 1.9 W，在 12 W 的抽运功率下分别获得了 480 mW 和 580 mW 的 559 nm 的黄绿光输出。图 2 所示为采用曲率半径 $R_c = 100$ mm 的输出镜片的输出功率和转换效率随 LD 抽运功率的变化曲线。对应的斜率效率为 6.1%，最大光-光转化效率约为 5%。采用型

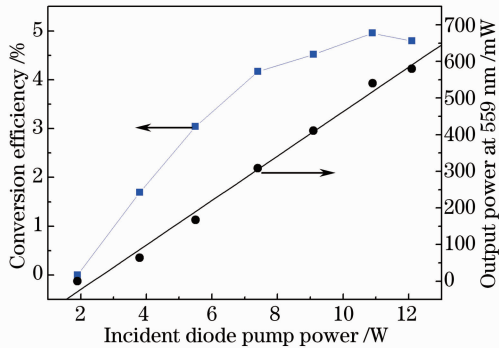


图 2 连续黄绿光输出功率及对应的转换效率

Fig. 2 Output power and the corresponding conversion efficiency of continuous-wave yellow-green laser

号为 LPE-1A 的功率计对最高输出功率时激光稳定性进行测量，十分钟内输出功率波动在 6% 以内。

3.2 声光调 Q Nd:YVO₄自拉曼和频黄绿激光输出特性

采用曲率半径 $R_c = 100$ mm 的输出镜，腔内放置了声光 Q 开关，总腔长为 75 mm。实验得出了不同重复频率 f_{PR} 下的 559 nm 黄绿光输出，如图 3 所示。

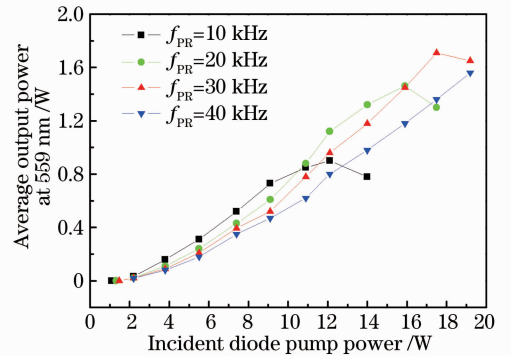


图 3 不同重复频率下的 559 nm 黄绿光的输出功率曲线

Fig. 3 Output power curves of 559 nm yellow-green laser with different pulse repetition frequencies

随重复频率的降低，激光脉宽变窄，基频峰值功率升高，有利于提高拉曼及和频的转换效率，以及降低拉曼阈值。由图 3 可知，在 10 kHz 的重复频率下，拉曼阈值功率只有 1.1 W。但如果重复频率继续降低，将导致激光晶体中积累的热量增加，从而造成较严重的热透镜效应。实验中发现激光失稳临界抽运功率随着重复频率的降低而降低。所以在不同的重复频率下，随着抽运功率的升高，激光输出功率增加到最高值后，由于受热效应导致的激光谐振腔非稳情况的影响，输出功率迅速下降。虽然低重复频率有利于降低激光阈值，实现较高的转换效率，但其此时热效应较为严重，从而限制了输出功率的升高，因此对于不同的抽运功率，重复频率均有最佳取值。实验中在重复频率取 30 kHz 时，获得了最高

平均光功率为 1.71 W(对应抽运光功率为 17.5 W) 的 559 nm 和频激光输出, 阈值功率为 1.47 W, 黄绿光相对半导体抽运光的转换效率达 9.8%。

图 4 所示为重复频率为 30 kHz, 最高输出功率为 1.71 W 时通过 PIN 光电二极管和 500 MHz 泰克数字示波器(型号为 TDS3052B) 测量得到的 559 nm 的脉冲波形。脉冲宽度约为 21 ns, 计算的峰值功率约为 2.71 kW。输出黄绿光的稳定性相对连续运转模式有所提高, 功率波动小于 3%。通过光纤光谱仪(分辨率为 0.07 nm) 对输出的黄绿光波长进行检测, 结果如图 5 所示: 在 500~650 nm 波段只测量到中心波长为 558.6 nm 的黄绿光, 其线宽约为 0.2 nm。

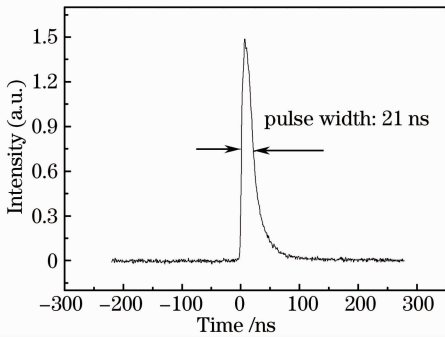


图 4 和频黄绿光的脉冲波形

Fig. 4 Temporal pulse profile of yellow green light

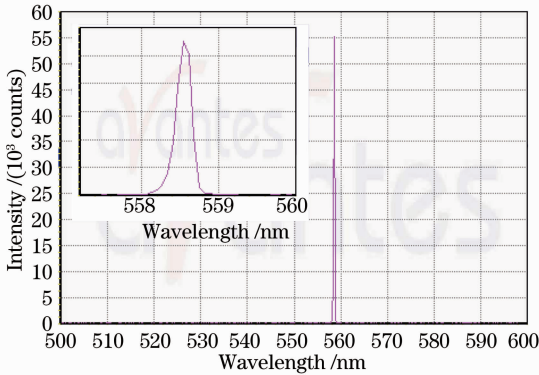


图 5 中心波长为 558.6 nm 的黄绿光的光谱曲线

Fig. 5 Spectrum of yellow-green light with the center wavelength of 558.6 nm

4 结 论

采用半导体激光端面抽运沿 a 轴切割的 Nd:YVO₄ 自拉曼和频激光器, 实现了结构紧凑的黄绿激光输出。实验中从谐振腔结构、晶体膜系及和频晶体选择方面对激光系统进行对比设计。分别研究了连续运转和声光调 Q 下和频激光的输出性能。以 KTP 晶体为和频晶体, 在 12 W 的抽运功率下,

获得了 580 mW 的连续 558.6 nm 黄绿激光输出, 对应光-光转化效率为 5%, 斜效率为 6%。在 17.5 W 的抽运功率和 30 kHz 的声光调 Q 重复频率下, 获得了最高平均功率为 1.71 W, 脉冲宽度为 21 ns 的激光输出, 光-光转化效率为 9.8%。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhichao, Du Chenlin, Ruan Shuangchen. Research progress of all-solid-state yellow lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 29~36
王志超, 杜晨林, 阮双琛. 全固态黄光激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 29~36
- 2 Z. C. Wang, F. Yang, S. Y. Xie *et al.*. Multiwavelength green-yellow laser based on a Nd:YAG laser with nonlinear frequency conversion in a LBO crystal[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(18): 4196~4200
- 3 Cui Jinjiang, Tan Huiming, Wang Fan *et al.*. High power medical all-solid-state 561 nm yellow laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(1): 011401
崔锦江, 檀慧明, 王帆等. 大功率医用全固态 561 nm 黄光激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(1): 011401
- 4 Y. M. Duan, H. Y. Zhu, G. Zhang *et al.*. Efficient 559.6 nm light produced by sum-frequency generation of diode-end-pumped Nd:YAG/SrWO₄ Raman laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, **7**(7): 491~494
- 5 A. A. Kaminskii, K. Ueda, H. J. Eichler *et al.*. Tetragonal vanadates YVO₄ and GdVO₄-new efficient $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **194**(1-3): 201~206
- 6 Y. F. Chen. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YVO₄ self-Raman laser: influence of dopant concentration [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **29**(16): 1915~1917
- 7 Liu Yongna, Jiang Feihong, Wang Shumei *et al.*. LD-pumped passively Q-switched c-cut Nd:YVO₄ self-Raman laser with Cr³⁺:YAG[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702004
刘永纳, 江飞虹, 王淑梅等. LD 抽运 Cr³⁺:YAG 被动调 Q c-cut Nd:YVO₄ 自拉曼激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 0702004
- 8 Y. M. Duan, H. Y. Zhu, C. H. Huang *et al.*. Potential sodium D2 resonance radiation generated by intra-cavity SHG of a c-cut Nd:YVO₄ self-Raman laser [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(7): 6333~6338
- 9 Liu Bo, Zhang Qingyu, Wang Qingpu *et al.*. Diode-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄ self-Raman yellow laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1777~1780
刘波, 张行愚, 王青圃等. LD 抽运 Nd:YVO₄ 自拉曼倍频黄光激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1777~1780
- 10 Y. T. Chang, H. L. Chang, K. W. Su *et al.*. High-efficiency Q-switched dual-wavelength emission at 1176 and 559 nm with intracavity Raman and sum-frequency generation [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 11892~11897
- 11 Y. F. Lü, W. B. Cheng, Z. Xiong *et al.*. Efficient CW laser at 559 nm by intracavity sum-frequency mixing in a self-Raman Nd:YVO₄ laser under direct 880 nm diode laser pumping[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, **7**(11): 787~789
- 12 H. Y. Zhu, G. Zhang, Y. M. Duan *et al.*. Compact continuous-wave Nd:YVO₄ laser with self-Raman conversion and sum frequency generation [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, **28**(5): 054202
- 13 Y. M. Duan, G. Zhang, Y. J. Zhang *et al.*. LD end-pumped c-cut Nd:YVO₄/KTP self-Raman laser at 560 nm [J]. *Laser Physics*, 2011, **21**(11): 1859~1862
- 14 X. L. Li, H. M. Pask, A. J. Lee *et al.*. Miniature wavelength-selectable Raman laser: new insights for optimizing performance [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(25): 25623~25631
- 15 A. Smith, SNLO Nonlinear Optics Code As-Photonics, Albuquerque, NM, USA [OL]. <http://www.as-photonics.com/snlo>