

固体黄光拉曼激光器的研究进展

郭家锡^{1,2}, 陆宝乐^{1,2}, 张韧剑^{1,2}, 向光华³, 白杨^{1,2}, 任兆玉^{1,2}, 白晋涛^{1,2,3}

(1. 西北大学光子学与光子技术研究所, 陕西 西安 710069; 2. 陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心, 陕西 西安 710069;
3. 西北大学物理学系, 陕西 西安 710069)

摘要: 简述了目前产生黄光波段激光的主要方法, 对基于受激拉曼散射效应的内腔式、自拉曼式和外腔式三类固体黄光拉曼激光器技术特点及进展进行了讨论, 并对它们的发展做出了展望。

关键词: 固体拉曼激光器; 黄激光; 受激拉曼散射; 频率变换

中图分类号: TN284.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.001

Research and progress of solid-state yellow Raman laser

GUO Jia-xi^{1,2}, LU Bao-le^{1,2}, ZHANG Ren-jian^{1,2}, XIANG Guang-hua³

BAI Yang^{1,2}, REN Zhao-yu^{1,2}, BAI Jin-tao^{1,2,3}

(1. Northwest University, Institute of Photonics and Photo-Technology, Xi'an 710069, China; 2. Shaanxi Engineering Technology Research Center for All-solid-state Laser and Application, Xi'an 710069, China;
3. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: The main methods to generate yellow laser are briefly introduced. Three ways to generate yellow laser based on Stimulated Raman Scattering are discussed. The characteristic and progress of solid-state Raman laser are demonstrated, and the development trend of all-solid-state yellow Raman lasers is pointed out.

Key words: solid-state Raman laser; yellow laser; stimulated Raman scattering; frequency conversion

1 引言

550 ~ 600 nm 黄光波段激光在医疗、演示、卫星导引、水下探测等领域具有不可替代的应用价值, 结构紧凑、运行稳定、成本低廉的黄光激光器逐渐成为众多研究者关注的热点。铜蒸汽激光器^[1]、染料黄光激光器^[2]、光泵浦半导体激光器^[3]、双波长和频钕激光器^[4]、拉曼激光器^[5]等各种类型黄光激光器应运而生。

铜蒸汽激光器结构复杂, 为了使铜气化, 该激光器必须具备一个电热装置将铜加热到 1500 °C 的温度。一般使用能耐高温并有良好真空密性能的氧化铝材料做外壳, 并在其外面绕上电热丝来加热管内金属。这种激光器工作温度相当高, 存在着严重的工艺问题。

染料黄光激光器是黄光激光器早期研究的一个重要方向, 但是其输出功率低、安全性差、染料有毒且性能不稳定、循环冷却系统复杂等原因制约了它

的发展。

光泵浦半导体激光器理论上可产生 477 ~ 600 nm 波段内的任何波长激光, 但是对于每个目标波长, 半导体都要经过特殊的设计, 成本高昂。

双波长和频钕激光器主要是利用非线性晶体在谐振腔内对掺钕工作物质产生的 1.06 μm 和 1.31 μm 波长激光和频产生 590 nm 附近的激光, 这种方式输出波长较为单一, 转换效率较低, 应用范围有限。

固体黄光拉曼激光器是利用晶体介质的受激拉曼散射效应(SRS)将已有绿光波段激光直接频移至黄光波段或是先将 1.06 μm 激光频移至 1.1 μm 再对 1.1 μm 倍频获得黄光。通过 SRS 效应实现黄光

作者简介: 郭家锡(1985 -), 男, 在读硕士研究生, 从事全固态激光器方面的研究工作。

收稿日期: 2010-12-02; **修订日期:** 2011-02-25

输出的激光器主要有三类:内腔式拉曼激光器、自拉曼激光器、外腔式拉曼激光器。与其他黄光激光器相比,拉曼激光器结构简单(SRS效应与全固态激光技术相结合)、转换效率高、成本低廉,加之晶体生长技术的发展,20多种优质的拉曼晶体已获得广泛的应用,通过这些晶体人们已高效地获得550~600 nm波段内10多个波长的激光,其发展前景非常可观。

2 内腔式黄光拉曼激光器及其进展

2.1 内腔式黄光拉曼激光器的结构与特点

内腔式黄光拉曼激光器的基本结构如图1所示,激光晶体、拉曼晶体、和频晶体被置于同一个光学谐振腔内。

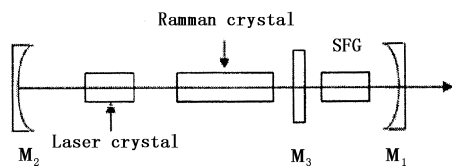


图1 内腔式黄光拉曼激光器结构

Fig. 1 structure of the intracavity yellow Raman laser

工作过程:泵浦光泵浦掺钕激光工作物质使激活粒子数反转,并在谐振腔内建立起1064 nm基频激光振荡。基频激光在腔内振荡时泵浦拉曼晶体发生受激拉曼散射,产生1160 nm附近的斯托克斯光,斯托克斯光克服各种损耗在腔内建立振荡。和频晶体对谐振腔内的斯托克斯光、基频光和频或直接对斯托克斯光倍频产生黄光。

内腔式拉曼激光器的特点:谐振腔内基频光功率密度高,在腔内进行受激拉曼可以使SRS阈值大为降低,非常适合在泵浦功率相对低的情况下获得黄光,例如端面泵浦系统。

内腔式拉曼激光器也有难以克服的缺点:膜系比较复杂。为了让基频光和一阶斯托克斯光建立振荡,谐振腔两个腔镜 M_1 和 M_2 要对这两个波长高反,同时为了避免由拉曼级联效应产生的高阶斯托克斯光振荡,腔镜还应对高阶斯托克斯光高透。激光晶体、拉曼晶体、倍频晶体等则要尽量让基频光、斯托克斯光透过,在它们的通光端面上应镀有相应的增透膜。和频晶体的两个光学端面还要镀有目标黄光波长的增透膜。靠近和频晶体的腔镜 M_1 要对黄光耦合输出,要镀有目标黄光波长的增透膜。另一方面,激光器运行的稳定性受热效应影响严重。受激拉曼散射属于非弹性散射,在散射过程中一部

分能量以热的形式存储在拉曼晶体内部,除此以外拉曼晶体对泵浦光和黄光的吸收也会产生热量,这些热量会使晶体产生热负载。热负载导致了热透镜效应和热致双折射效应。激光器高平均功率运转时,拉曼晶体的热焦距减小使谐振腔的稳定性降低,在设计激光器时应对晶体采取冷却措施,并对热透镜效应进行补偿。热致双折射使通过晶体的基频光、斯托克斯光褪偏,而受激拉曼散射的发生依赖于基频光的偏振方向(基频激光的偏振方向与拉曼晶体具有拉曼活性的光轴平行时才会发生受激拉曼散射),因此谐振腔中经常需要插入起偏元件将基频光变为线偏振状态,但是这会引入插入损耗,降低转换效率。此外,不同的拉曼晶体对基频光散射后得到的斯托克斯光波长不同,需要根据斯托克斯光波长和目标黄光波长专门切割倍频晶体。腔内过多的光学元件不仅增加了谐振腔的插入损耗,并且使得系统的稳定性大为降低。

2.2 内腔式黄光拉曼激光器的进展

1999年,H. M. Pask等使用LD端面泵浦系统、Nd:YAG激光晶体、 LiIO_3 拉曼晶体和声光调Q装置,先获得1155 nm的一阶斯托克斯光,再使用LBO晶体在腔内对一阶光倍频,当泵浦电流为25 A,脉冲重复频率为10 kHz时,获得平均功率1.2 W的578 nm黄光^[6]。

2007年,Shutao Li等使用LD侧面泵浦系统、Nd:YAG激光晶体、 BaWO_4 拉曼晶体、KTP倍频晶体和声光调Q装置,先获得1180 nm的一阶斯托克斯光,并在腔内对其倍频,在脉冲重复频率为10 kHz,LD泵浦功率为99 W时,获得了平均功率3.14 W的590 nm黄光^[7]。

2009年,Zhenhua Cong等采用LD端面泵浦、Nd:YAG激光陶瓷、 SrWO_4 拉曼晶体、KTP倍频晶体和声光调Q装置,在泵浦功率为14.1 W,脉冲重复频率为15 kHz时,获得了平均功率2.73 W的590 nm黄光,从LD到黄光的转换效率高达19.2%,这是目前转换效率最高的内腔式黄光拉曼激光器^[8]。

2010年,Andrew J. Lee等采用LD端面泵浦系统、Nd:GdVO₄激光晶体、 BaWO_4 拉曼晶体和LBO倍频晶体,获得了功率为2.9 W波长为589 nm的连续黄光,这是目前功率最高的连续内腔式黄光拉曼激光器^[9]。

2010年,Zhenhua Cong等使用LD侧面泵浦系统、Nd:YAG激光晶体、BaWO₄拉曼晶体、KTP倍频晶体和声光调Q装置,在泵浦功率125.8W,脉冲重复频率15kHz时,获得8.3W的590nm黄光,其结构如图2所示,这是目前功率最高的准连续黄光拉曼激光器^[10]。

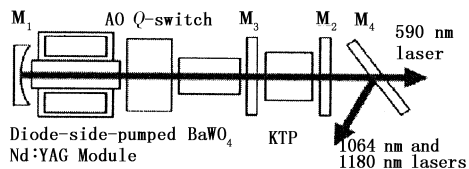


图2 BaWO₄内腔式黄光拉曼激光器结构

Fig.2 structure of the intercavity yellow Raman laser with BaWO₄

3 黄光自拉曼激光器及其进展

3.1 黄光自拉曼激光器的结构与特点

自拉曼激光器的结构如图3所示。此种激光器的激光晶体既是激光增益介质又是拉曼增益介质。自拉曼激光器的拉曼增益介质也在基频激光谐振腔内,其特点与内腔式拉曼激光器相似,但是由于腔内少了单独的拉曼晶体,插入损耗减小,腔长缩短,结构更为紧凑,运行更加稳定。目前研制出的人工均酸盐拉曼晶体中有一部分可以掺杂三价激活粒子如Nd³⁺:KGW,Nd³⁺:PbWO₄等。另外还发现一部分激光工作物质也具有拉曼活性,如Nd³⁺:YVO₄和Nd³⁺:GdVO₄。在这些晶体中都实现了高的拉曼转换效率,自拉曼激光器引起了研究者的极大关注。

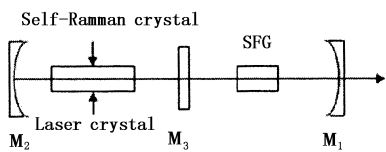


图3 自拉曼激光器结构

Fig.3 structure of the yellow Self-Raman laser

3.2 黄光自拉曼激光器的进展

2000年,J.Findeisen等采用侧面泵浦系统、Nd:KGd(WO₄)₂自拉曼增益介质、声光调Q装置,实现了自拉曼运转,获得1162nm的一阶斯托克斯光,使用LBO晶体在腔外对其倍频,获得平均功率1.5mW的581nm黄光^[11]。

2008年,Helen M.Pask等采用880nm LD端面泵浦系统、Nd:GdVO₄自拉曼晶体,实现了1063nm基频光和1173nm一阶斯托克斯光振荡,采用LBO晶体在腔内对一阶光倍频,获得了2.5W的586nm连续黄光输出,从LD到586nm黄光的转换效率为

12.2%^[12]。2010年该课题组采用同样的自拉曼介质和腔型结构,用LBO晶体在腔内对基频光、一阶光和频,获得559nm连续黄光,功率达5.3W,从LD到黄光的转换效率达21%^[13]。

2009年,Haiyong Zhu采用LD端面泵浦系统、Nd:YVO₄自拉曼晶体、声光调Q装置,LBO倍频晶体,在脉冲重复频率110kHz,泵浦功率26.5W时,获得平均功率为7.93W的588nm黄光,从LD到黄光的转换效率高达30%,其结构如图4所示^[14]。

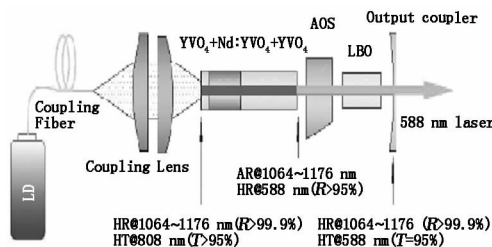


图4 Nd:YVO₄黄光自拉曼激光器结构

Fig.4 structure of the yellow Self-Raman laser with Nd:YVO₄

4 外腔式黄光拉曼激光器及其进展

4.1 外腔式黄光拉曼激光器的结构与特点

外腔式黄光拉曼激光器的基本结构如图5所示,拉曼晶体置于与基频激光谐振腔相独立的拉曼谐振腔内。拉曼谐振腔的输入耦合镜M₂对泵浦光高透,对各阶次斯托克斯光高反;输出耦合镜M₁对目标阶次的斯托克斯光高透,对泵浦光和比目标阶次光低阶次的斯托克斯光高反。

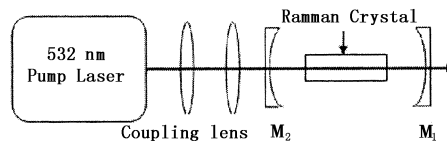


图5 外腔式黄光拉曼激光器结构

Fig.5 structure of the external cavity yellow Raman laser

工作过程:532nm泵浦激光通过光学耦合系统输入拉曼谐振腔泵浦拉曼晶体,当泵浦功率达到SRS阈值时迅速发生受激拉曼散射产生一阶斯托克斯光(560nm附近,属于黄光波段),一阶光克服损耗在拉曼腔内建立起振荡,并通过输出耦合镜输出。如果目标输出波长是高阶斯托克斯光,则应该选择合适的输出耦合镜(对目标阶次的斯托克斯光高透,对比目标阶次光低阶的斯托克斯光都高反),让低阶光在腔内振荡并泵浦拉曼晶体,发生拉曼级联效应获得高阶斯托克斯光并对其耦合输出。

外腔式拉曼激光器的特点:系统的热稳定性好,

受激拉曼散射过程在独立的拉曼谐振腔内进行, SRS 非弹性散射引起拉曼晶体的热透镜效应不会对基频光谐振腔的稳定性造成影响, 激光晶体的热透镜效应亦不会影响拉曼腔的稳定性。另一方面, 532 nm 激光对拉曼晶体的泵浦效率高, 1064 nm 基频光的倍频过程在受激拉曼散射过程之前, 所产生的 532 nm 倍频光是线偏振的, 可直接泵浦拉曼晶体而不必使用额外的起偏元件, 减少了插入性损耗。此外, 拉曼谐振腔镜置于拉曼晶体两侧, 缩短了腔长, 提高了功率密度, 同时降低了损耗; 独立的拉曼谐振腔更为灵活, 可以通过光学耦合系统与现有的绿光激光器相结合, 而不用对泵浦激光器做任何改动。

外腔式拉曼激光器的缺点: 拉曼谐振腔的输入耦合镜要对泵浦光高透, 对各阶斯托克斯光高反; 输出耦合镜要对目标输出阶次的斯托克斯光高透, 对泵浦光和比目标输出阶次光低阶的斯托克斯光高反。泵浦光与各阶次斯托克斯光的波长差仅为几十纳米, 对镀膜工艺要求非常高, 实现起来较为困难, 镀膜成本高昂。

4.2 外腔式黄光拉曼激光器的进展

2001 年, P. Zverev 等人采用脉宽 300 ~ 450 ns、脉冲重复频率 1 kHz 的 527 nm 激光 ($\text{Nd}^{3+}:\text{YLiF}_4$ 激光的倍频光) 为泵浦源, 泵浦 BaWO_4 拉曼晶体, 获得了 544 nm 的一阶斯托克斯光和 583 nm 的二阶光, 拉曼阈值功率仅为 1 W^[15]。

2004 年, R. P. Mildren 等人使用空气冷却的 532 nm 激光器作为泵浦源, 泵浦 KGW 拉曼晶体, 泵浦激光脉冲重复频率为 5 kHz, 泵浦功率为 1 W 时, 得到功率为 400 mW 的 589 nm 二阶斯托克斯光输出, 绿光到二阶光的转换效率达 40%, 拉曼阈值功率仅为 290 mW^[16]。

2004 年, A. S. Grabtchikov 等采用 514 nm 的连续 Ar 激光为泵浦源, 泵浦 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 拉曼晶体, 成功获得了连续 543 nm 一阶斯托克斯光输出, 拉曼阈值功率仅为 2 W, 拉曼腔内泵浦光功率密度 60 kW/cm², 一阶光的功率密度达 500 kW/cm², 514 nm 到 543 nm 的转换效率为 5% 左右^[17]。

2006 年, H. M. Pask 等采用脉冲重复频率 5 kHz、脉宽 10 ns、532 nm 绿光为泵浦源, KGW 晶体为拉曼增益介质, 在泵浦功率为 2.3 W 时, 获得了功率为 1.5 W 的 588 nm 黄光, 转换效率高达 68%, 其结构如图 6 所示^[18]。

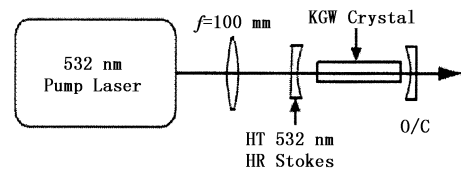


图 6 KGW 外腔式黄光拉曼激光器

Fig. 6 structure of the external cavity yellow Raman laser with KGW

2007 年, A. I. Vodchits 等采用脉冲重复频率为 1 kHz、脉宽 190 ns 的 532 nm 激光为泵浦源, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 晶体作为拉曼介质, 在泵浦功率为 3.4 W 时, 获得了 1.2 W 的 599 nm 的二阶斯托克斯光, 532 ~ 599 nm 转换效率达 35%^[19]。

5 结束语

固体黄光拉曼激光器结构简单、运行稳定、转换效率高、成本低廉, 并且晶体拉曼介质丰富, 可获得黄光波段内多个波长激光, 拉曼频移法已成为获取黄激光最为有效的方法之一。对于内腔式拉曼激光器, 目前已获得了数瓦黄光输出, 成为固体黄光拉曼激光器技术中的佼佼者, 但是目前其功率水平与绿光激光器相比还较低, 这可通过优化腔型结构, 使用高增益拉曼介质和大功率泵浦源进一步提高, 获得数十瓦级平均功率的黄激光输出将指日可待。外腔式拉曼激光器结构灵活, 可以通过光学耦合系统与已有的激光器相结合, 而不用对泵浦激光器做任何改动, 是一种有效的技术手段, 随着镀膜工艺的发展, 拉曼腔镜的抗破坏阈值将会进一步增加, 采用百瓦级的连续绿激光对其泵浦有望获得数十瓦级的连续黄光输出。随着新型拉曼晶体的不断涌现, 相信在不久的将来会有更多的拉曼激光器走入人们的生产、生活中。

参考文献:

- [1] Richard P, Mildren, James A Piper. Compact and efficient kinetically enhanced copper-vapor lasers of high average power[J]. Opt. Lett, 2003, 28(20): 1936 - 1938.
- [2] Tian Laike, Bai Jintao, Tian Dongtao. Laser devices and technology[M]. Xi'an: Northwest University Press, 2002. (in Chinese)
田来科, 白晋涛, 田东涛. 激光器件与技术[M]. 西安: 西北大学出版社, 2002.
- [3] J Chilla, Q Z Shu, H Zhou, et al. Recent advances in optically pumped semiconductor lasers, in: Proceedings of Solid State Lasers XVI: Technology and Devices[C]. SPIE, 2007.

- [4] Xiuyan Chen, Xiu Li, Haolei Zhang. 589 nm yellow laser generation by intra-cavity sum-frequency mixing in a T-shaped Nd:YAG laser cavity[J]. Opt. Lett, 2009, 7(9): 815–818.
- [5] H M Pask, P Dekker. Wavelength-versatile visible and UV sources based on crystalline Raman lasers[J]. Opt. Commun, 2008, 32: 121–158.
- [6] H M Pask, J A Piper. Efficient all-solid-state yellow laser source producing 1.2 W average power[J]. Opt. Lett, 1999, 24: 1490–1492.
- [7] Li Shutao, Zhang Xingyu, Wang Qingpu, et al. Diode-side-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YAG/BaWO₄ Raman laser generating average output power of 3.14 W at 590 nm[J]. Opt. Lett, 2007, 32(20): 2951–2953.
- [8] Zhenhua Cong, Xingyu Zhang, Qingpu Wang. Efficient diode-end-pumped actively Q-switched Nd:YAG/SrWO₄/KTP yellow laser[J]. Opt. Lett, 2009, 34(17): 2610–2612.
- [9] Andrew J Lee, Helen M Pask, James A Piper. An intracavity, frequency-doubled BaWO₄ Raman laser generating multi-watt continuous-wave, yellow emission[J]. Opt. Express, 2010, 18(6): 5984–5988.
- [10] Zhenhua Cong, Xingyu Zhang, Qingpu Wang. Theoretical and experimental study on the Nd:YAG/BaWO₄/KTP yellow laser generating 8.3 W output power[J]. Opt. Express, 2010, 18(12): 12111–12115.
- [11] J Findeisen, H J Eichler, P Peuser. Self-stimulating, transversally diode pumped Nd³⁺:KGd(WO₄)₂/Raman laser[J]. Opt. Commun, 2000, 181: 129–133.
- [12] A J Lee, H M Pask, P Dekker. High efficiency, multi-Watt CW yellow emission from an intracavity-doubled self-Raman laser using Nd:GdVO₄[J]. Opt. Express, 2008, 16(26): 21958–21963.
- [13] Andrew J Lee, Helen M Pask, David J Spence. Efficient 5.3 W cw laser at 559 nm by intracavity frequency summation of fundamental and first-Stokes wavelengths in a self-Raman Nd:GdVO₄ laser[J]. Opt. Lett, 2010, 25(5): 682–684.
- [14] Haiyong Zhu, Yanmin Duan, Ge Zhang. Efficient second harmonic generation of double-end diffusion-bonded Nd:YVO₄ self-Raman laser producing 7.9 W yellow light[J]. Opt. Express, 2009, 17(24): 21544–21550.
- [15] P Zverev, T T Basiev, I V Ermakov. BaWO₄ crystal for quasi-cw yellow Raman laser[J]. Advanced Solid-State Lasers, 50: 212–215.
- [16] R P Mildren, M Convery, H M Pask. Efficient, all-solid-state, Raman laser in the yellow, orange and red[J]. Opt. Express, 2004, 12(5): 785–790.
- [17] A S Grabtchikov, V A Lisinetskii. Multimode pumped continuous-wave solid-state Raman laser[J]. Opt. Lett, 2004, 29(21): 2524–2526.
- [18] R P Mildren, H M Pask. High-efficiency Raman converter generating 1.5 W of red-orange output[C]//2006 OSA/ASSP, 2006.
- [19] A I Vodchits, D N Busko. Multi-frequency quasi-continuous wave solid-state Raman laser for the ultraviolet, visible, and near infrared[J]. Opt. Commun, 2000, 272: 467–475.