

文章编号: 1001-3806(2011)02-0210-04

光纤黄光激光器的研究进展

刘晓娟, 付圣贵, 韩克祯, 葛筱璐
(山东理工大学 理学院, 淄博 255049)

摘要: 相对于固体黄光激光器, 光纤黄光激光器结构简单紧凑、可集成为一体、易于调节、便于维护, 在现代医疗、材料加工、光谱分析、军事以及天文观测领域、激光引导星等技术领域有迫切的需求。综述了国际上光纤黄光激光器的研究方法、进展情况, 对各种方法所面临的技术问题进行了对比分析和讨论。

关键词: 光纤光学; 喇曼光纤; 黄光激光器; 倍频; 和频

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.019

Recent progress in fiber yellow lasers

LIU Xiao-juan, FU Sheng-gui, HAN Ke-zhen, GE Xiao-lu
(School of Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Fiber yellow lasers are more compact and insensitive to alignment than their bulk laser counterparts. Because of the heat-dissipation characteristics of fibers and the excellent spatial mode characteristics, fiber yellow lasers are preferred candidates for various applications such as modern medicine, material processing, high-resolution spectroscopy, military applications and laser guided stars. Recent progress in fiber yellow lasers were reviewed. Key techniques and methods to realize fiber yellow lasers were analyzed and discussed.

Key words: fiber optics; Raman fiber; yellow lasers; double frequency; sum frequency

引言

波长在 560nm ~ 600nm 范围的黄光激光在生物医学、医疗美容、食品药品检测、信息存储、通讯(军工、大气遥感等方面有广泛的应用。例如在医学上, 因为血红蛋白对波长 585nm ~ 595nm 的激光吸收率高, 因此该波长的激光在眼科和皮肤科有重要应用前途; 在军事上, 黄光激光可用于空间目标的探测与识别; 在天文领域和军事领域, 利用波长 589nm 的黄色激光使高空钠层产生反向谐振散射, 可以用作激光导引星来代替传统的钠导信号光源, 应用于地基大型望远镜的自适应光学系统中, 使望远镜产生近衍射极限的高分辨率图像。目前, 黄光激光器已经成为可见光激光器研究领域中的研究热点。

早期的黄光激光器主要是染料激光器, 但是染料激光器能耗高、稳定性差、难于维护, 应用起来有相当大的不便, 此外, 绝大多数染料有毒, 处理不当会留有

安全隐患, 因此, 黄光染料激光器的设计方案已经很少使用。20 世纪 90 年代以来, 随着激光二极管技术和固体激光材料的迅速发展, LD 抽运固体激光器在非线性和频率变换输出红、绿、蓝激光技术方面日趋完善^[1-2]。然而, 截止目前尚没有高效运转于 1120nm ~ 1200nm 基频激光的固体激光介质, 也就难以通过直接倍频固体激光材料的办法产生高效工作于 560nm ~ 600nm 波长的黄光激光。就目前来讲, 波长 560nm ~ 600nm 的黄光激光主要通过激光二极管抽运的固体激光器与非线性光学晶体的组合来获得。

归纳起来, LD 抽运的全固体激光器在实现黄光激光输出方面一般采用以下几种方法: (1) 直接抽运发射黄光的激光材料^[3-4]; (2) 喇曼激光器经非线性晶体倍频输出黄光激光^[5-7]; (3) 532nm 绿光激光器抽运 970nm 种子注入光参量放大器产生 589nm 黄光激光^[8]; (4) 掺钕离子激光器中 1064nm 和 1319nm 两束激光束的和频产生黄光激光^[9-13]。目前应用最多的是第 4 种方法, 并已经取得了许多优良的实验结果。如美国 Air Force Research 实验室的 LU 等人^[9] 用 Nd:YAG 激光器, 采用种子注入 + 锁定放大 + 外腔和频的方法, 得到了最大功率 50W 的 589nm 连续波黄光输出, 是目前所获得的最高功率的黄光激光。国内有多个研究团队也积极开展了固体黄光激光器的研究工

基金项目: 山东省高等学校科技计划资助项目 (J09LG11); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2010FQ024)

作者简介: 刘晓娟 (1976-), 女, 博士, 讲师, 主要从事全固态激光器和光纤激光器方面的研究。

E-mail: liuxjuan@gmail.com

收稿日期: 2010-06-21; 收到修改稿日期: 2010-07-22

作,如中国科学院物理研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、山东大学、华侨大学和长春理工大学等。其中,中国科学院物理研究所采用双 Nd:YAG 棒串接、L 型折叠臂平-凹对称腔内 KTP 和频的方法,获得了平均功率 7.6W 的准连续波黄光激光输出^[9],这是国内固体黄光激光器所获得的最高功率。

相比于 LD 抽运的固体激光器,光纤激光器具有紧凑、易于调节、散热性能好、光束质量高、转换效率高、可柔化操作等诸多优势。近几年,随着超低损耗掺杂光纤和光纤布喇格光栅技术的应用和发展,光纤激光器可发射的波长范围得到了极大拓展。在此基础上,光纤黄光激光器的研究引起了科研人员的高度关注,德国、英国、美国、日本和俄罗斯等国家均开展了相应的研究,不断有突破性进展见诸报道。特别是发射波长为 589nm 的光纤黄光激光器更是吸引了人们极大的研究兴趣。由于与钠原子的 D₂ 跃迁谱线相吻合,因此,589nm 激光可以使位于地球大气中间层(海拔 90km 左右)的原子钠层产生受激的反向散射,并可以作为大型天文望远镜自适应光学系统中激光引导星光源,在军事和天文上用于形成近衍射极限的高分辨率图像。因此,光纤黄光激光器的研究不断有技术突破,其发展可谓日新月异。

1 国外研究现状

国际上实现光纤黄光激光器(波长 560nm~600nm)有以下 3 种技术途径。

1.1 倍频法

实验中采用红外波长光纤激光器的倍频获得黄光激光输出。2006 年,加利福尼亚斯坦福大学的 SINHA 等人^[14]用 980nm 二极管激光器抽运掺 Yb 光纤激光器获得 1150nm 红外激光,然后利用周期极化铌酸锂(periodically poled lithium niobate, PPLN)波导倍频获得 40mW 的 575nm 黄光激光输出,所采用的实验装置如图 1 所示。2008 年,俄罗斯的 DVOYRIN 等^[15]用

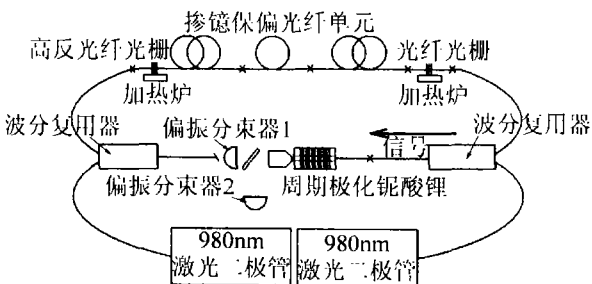


图1 PPLN 倍频掺铯光纤黄光激光器

1060nm 掺 Yb 光纤激光器抽运掺 Yb 铝硅光纤获得 1160nm 红外基频光,然后用 PPLN 倍频获得 860mW 的 580nm 黄光激光输出,系统采用自加热原理很好地抑制

了短波长(1070nm 左右)放大自发辐射(amplifier stimulated emission, ASE)。2009 年,日本的 MARUYAMA 等人^[16]采用 975nm 二极管激光器抽运掺铯实心光子晶体光纤获得红外基频光,然后用掺 MgO 周期极化铌酸锂(magnesium-doped periodically poled lithium niobate, MgO:PPLN)倍频获得 1.4W 连续 589nm 黄光激光输出,如图 2 所示。此外, MARUYAMA 等人还采用

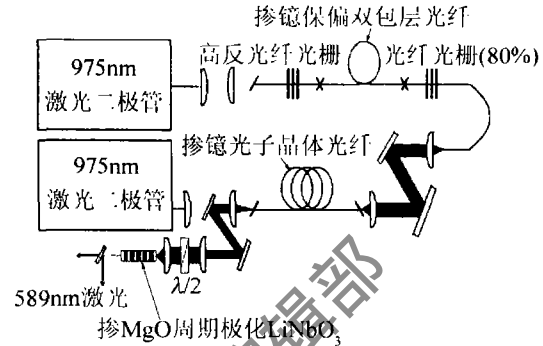


图2 掺 MgO 周期极化 LiNbO₃ 倍频掺 Yb 实心光子晶体光纤黄光激光器

976.4nm 尾纤输出的二极管激光器抽运保偏铯光纤激光器获得 1178nm 基频光,然后用 MgO:PPLN 倍频获得 589nm 黄光激光输出。

倍频法中,在用 LD 抽运此类光纤增益介质时,相对于长波长(大于 1100nm),短波长(1070nm 左右)位于光纤增益介质 ASE 谱峰值附近,因此有大得多的增益系数。ASE 效应大大降低了抽运光到 1120nm~1200nm 波长的转换效率,甚至于不能形成长波长的激光振荡。因此,倍频法中,抽运光至黄光激光的转换效率比较低。SINHA 等人^[14]采用在增益光纤中间熔接一段高 Yb³⁺ 掺杂浓度的光纤来增加 1030nm 左右波长的基态吸收, Yb³⁺ 对 1150nm 的吸收相当弱,可抑制短波长红外激光的 ASE 效应而增大长波长红外激光的增益。DVOYRIN 等人^[15]则充分利用 1160nm 光纤激光器运转时产生的热对光纤增益介质进行加热(自加热)来消除 ASE 效应。一般来讲,为了抑制 ASE 效应,均需要在光纤激光器两端熔接高精度窄带宽光纤布喇格光栅,来使长波长红外激光获得最大增益,增大 Yb³⁺ 激发态布居数消耗实现对短波长 ASE 效应的抑制^[17]。此外,光纤增益介质的两端还可采用角倾斜来减小不需要的反馈。如此,红外光纤激光器倍频法获得黄光激光输出技术,对光学谐振腔的腔镜或光纤布喇格光栅有极高的要求,这增大了激光器制作的技术难度。

1.2 和频法

截止目前,利用该方法获得黄光激光的研究报道比较少,仅限于美国 Lawrence Livermore 国家实验室。自 2004 年起,该实验室将 589nm 黄光激光的输出功

率从 0.5W 依次提高至 2.7W 和 3.5W^[18], 实验装置如图 3 所示。系统采用的基频光分别为 1583nm 的

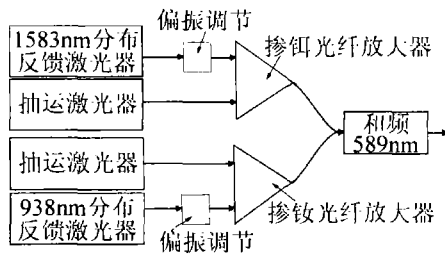


图3 和频光纤黄光激光器

Er/Yb 共掺光纤放大器和 938nm 掺 Nd 光纤放大器, 然后, 两路基频光耦合进入周期极化晶体进行非线性 和频获得 589nm 波长黄光激光。由于 938nm 激光放大器的功率有限, 因此, 实验获得黄光激光的功率较低, 若提升 938nm 激光功率, 可使 589nm 黄光激光的功率提升到 5W ~ 10W 量级。

和频方法需要两套 LD 抽运源, 两套光纤放大器, 设备相对复杂; 另外, 需要利用光纤耦合器将两路基频光耦合输入周期极化倍频波导, 耦合过程中引入了较大的基频光功率损耗, 因此, 利用 1583nm 和 938nm 两光纤激光器和频获得的黄光激光功率相对较低。

1.3 喇曼光纤频移法

受激喇曼散射能够高效地转换激光波长。通过受激喇曼散射的方法产生黄光, 成为获得光纤黄光激光的一种重要途径, 并在近年获得了巨大进展。截止目前, 喇曼光纤频移法是光纤黄光激光器中应用最多的一种技术途径, 也是获得黄光激光功率最高的一种技术途径。

利用光纤喇曼频移获得黄光激光输出技术可分为以下两种情况。

1.3.1 红外波段的喇曼频移 此方案首先由光纤喇曼频移获得红外波段基频光, 然后用周期极化晶体倍频输出黄光激光。2005 年, 德国的 GEORGIEV, GAPONTSEV 与英国的 RULKOV 等人^[19]用 40W 工作于 1118nm 的掺 Yb 光纤抽运 10m 喇曼光纤作为种子, 注入 20m 掺铈单模光纤放大器得到 23W 的 1178nm 激光输出, 用准相位匹配 MgO:PPLN 倍频获得 3.03W 的 589nm 黄光激光, 所采用的实验装置如图 4 所示。

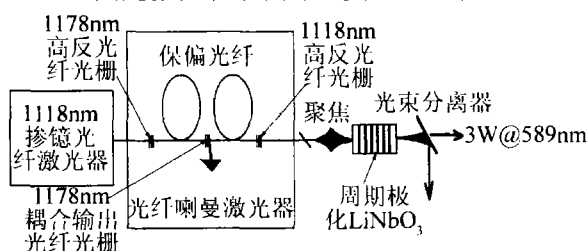


图4 掺 Yb 光纤激光器抽运喇曼光纤黄光激光器

2006 年 RULKOV 等人^[20]用同样的实验装置获得

3.1W 的 589nm 黄光激光输出。2007 年, 他们^[21]改用 50W 掺 Yb 光纤激光器抽运掺铋喇曼光纤得到 6.4W 1178nm 激光输出, 然后用准相位匹配 MgO:PPLN 倍频获得 125mW 的 589nm 黄光激光输出, 实验装置如图 5 所示。2009 年, TAYLOR 等人^[22]采用 55W 1120nm 线

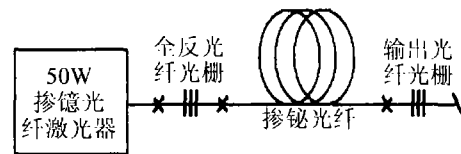


图5 掺 Yb 光纤激光器抽运掺 Bi 喇曼光纤黄光激光器

偏振光纤激光器抽运 1178nm 喇曼光纤放大器, 然后用 14mm 长 LBO 倍频获得 20.1W 的 589nm 黄光激光输出。2009 年, 德国的 TAYLOR 和 CALIA 等人报道了功率依次为 14.5W, 25.4W 和 26.5W^[23-24] 的 589nm 光纤黄光激光器。所采用的实验装置如图 6 所示。2010 年, 他们采用 3 路激光相干合成技术将黄光激光

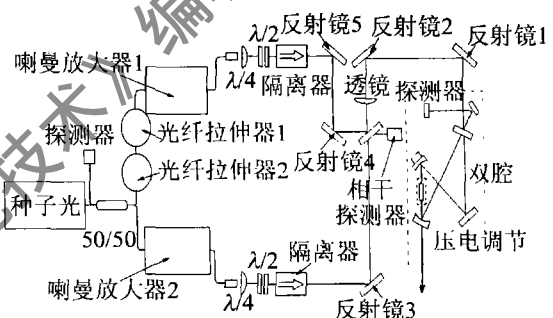


图6 1120nm 激光器抽运种子注入相干合成喇曼光纤黄光激光器功率提升至 50W^[25]。

1.3.2 可见光波段的喇曼频移 实验方案采用可见光激光器抽运喇曼增益光纤直接产生黄光激光输出。2007 年, FENG 等人^[26]模拟了用大功率 532nm 绿光激光器抽运级联喇曼光纤激光器获得 574nm 激光输出, 然后用该激光器抽运 1 级喇曼光纤激光器获得 589nm 黄光激光输出的可能性, 基本过程如图 7 所示。不过,

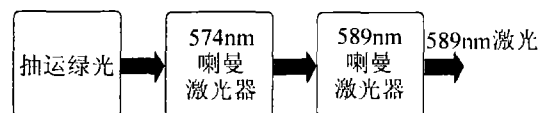


图7 绿光激光器抽运喇曼光纤黄光激光原理图

截止目前, 尚没有用短波长可见光激光器抽运喇曼光纤激光器获得黄光激光输出的实验报道。

喇曼频移获得黄光激光输出技术利用受激喇曼散射原理将激光频率下移至 1178nm 基频光, 相对于倍频法, 避免了红外短波长(1070nm 左右)的 ASE 问题, 降低了写制光纤布喇格光栅的技术难度; 相对于和频法, 喇曼频移法简化了实验设备, 提高了耦合效率。从而使整个激光器结构简单紧凑、可集成为一体、易于调节、便于维护, 有很大的功率提升空间。因此, 喇曼频移黄光激光器特别适合于医疗、材料加工、光谱分析、

军事以及天文观测领域激光引导星等技术领域对高性能黄光激光器坚固耐用、即开即用的要求。

2 国内研究现状与展望

目前,国内尚未有光纤黄光激光器的实验研究报道。在我国研究开发光纤黄光激光器具有以下重要意义:(1)在我国积极开展光纤黄光激光器的相关研究并尽快取得突破性进展,这将缩小我国与国际先进光纤黄光激光器技术的差距;(2)我国在特种光纤技术领域的研究相对薄弱,而光纤激光器在国民经济各个领域均具有迫切而广泛的需求,因此,发展光纤黄光激光器的研究,势必拉动我国光纤技术特别是特种光纤技术的研究与发展;(3)研发具有自主知识产权的光纤黄光激光器,必将极大地推进我国在激光引导星、激光医疗、激光光谱分析等技术领域的快速发展。而且,光纤黄光激光器的研究适应各个技术领域对激光器可柔化操作的需求,具有极为重要的研究价值,对我国可见光光纤激光器的发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] LI Ch Y, WANG Y G, HUANG L. Extra cavity 660nm SHG study of type-I noncritical phase matched LBO crystal[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(5):428-430(in Chinese).
- [2] CAO H Zh, TAN H M, PENG H Y, *et al.* Laser diode end pumped Yb:YAG/LBO 537.8nm green laser[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6):593-595(in Chinese).
- [3] WATANABE H, OMATSU T, TATEDA M. Efficient self-pumped phase conjugation with a loop geometry in a Rhodamine-6G solid dye laser amplifier[J]. *Optics Express*, 2003, 11(2):176-180.
- [4] THOMAS V, ELIZEBETH A, THOMAS H. Studies on the growth and optical characterization of dysprosium praseodymium oxalate single crystals[J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2005, 7(5):2687-2692.
- [5] LIU B, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Diode-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄ self-Raman yellow laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(10):1777-1780(in Chinese).
- [6] HE Ch, CHYBA T H. Solid-state barium nitrate Raman laser in the visible region[J]. *Optics Communications*, 1997, 135(4/6):273-278.
- [7] KAMINSKII A A, McRAY C L, LEE H R, *et al.* High efficiency nanosecond Raman lasers based on tetragonal PbWO₄ crystals[J]. *Optics Communications*, 2000, 183(1/4):277-287.
- [8] VESSELIN K, MALTE D, BARRY L D. Generation of tunable 589nm radiation as a Na guide star source using an optical parametric amplifier[J]. *Optics Express*, 2009, 17(2):437-446.
- [9] LÜ Y F, XIE Sh Y, BO Y, *et al.* A high power quasi-continuous-wave yellow laser based on intracavity sum-frequency generation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(2):970-974(in Chinese).
- [10] LÜ Y F, TAN H M, REN X Sh, *et al.* Laser diode pumped Nd:YVO₄/LBO continuous wave orange-yellow laser with intracavity sum frequency mixing[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5):488-490(in Chinese).
- [11] GENG A C, BO Y, BI Y, *et al.* A 3W continuous-wave 589nm yellow laser based on the intracavity sum frequency generation in a V-shaped cavity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(10):5227-5231(in Chinese).
- [12] ZHANG J Ch, WANG J X, SU P L, *et al.* Theoretical and experimental study of LD pumped Nd:YVO₄ yellow laser with sum-frequency generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12):2365-2369(in Chinese).
- [13] LIU T H, TAN H M, GAO L L, *et al.* Intracavity sum-frequency mixing with BIBO in 593nm laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(7):1195-1197(in Chinese).
- [14] SINHA S, LANGROCK C, DIGONNET M J F, *et al.* Efficient yellow-light generation by frequency doubling a narrow-linewidth 1150nm ytterbium fiber oscillator[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(3):347-349.
- [15] DVOYRIN V V, MASHINSKY V M, MEDVEDKOV O I, *et al.* Yellow frequency-doubled self-heated Yb fiber laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. California: Optical Society of America, 2008: CWB5.
- [16] MARUYAMA H, SHIRAKAWA A, UEDA K I. 1178nm all Yb-fiber laser source power-scaled by solid-core photonic bandgap fiber for 589nm generation[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Munich, Germany: Optical Society of America, 2009: CJ4_2.
- [17] DIANOV E M, SHUBIN A V, MELKUMOV M A, *et al.* High-power cw bismuth-fiber lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, B24(8):1749-1755.
- [18] PENNINGTON D M, DAWSON J W, DROBSHOFF A, *et al.* Compact fiber laser approach to 589nm laser guide stars[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. San Francisco, American: Optical Society of America, 2004: CFD1.
- [19] GEORGIEV D, GAPONTSEV V P, DRONOV A G, *et al.* Watts-level frequency doubling of a narrow line linearly polarized Raman fiber laser to 589nm[J]. *Optics Express*, 2005, 13(18):6772-6776.
- [20] RULKOV A B, POPOV S V, TAYLOR J R, *et al.* 3W CW generation at 589nm with narrow line linearly polarized Raman fibre laser[C]//Advanced Solid-State Photonics. Nevada, American: Optical Society of America, 2006: MC4.
- [21] RULKOV A B, FERIN A A, POPOV S V, *et al.* Narrow-line, 1178nm CW bismuth-doped fiber laser with 6.4W output for direct frequency doubling[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9):5473-5476.
- [22] TAYLOR L, FRIEDENAUER A, PROTOPOPOV V, *et al.* 20W at 589nm via frequency doubling of coherently beam combined 2MHz 1178nm CW signals amplified in Raman PM fiber amplifiers[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Munich, Germany: Optical Society of America, 2009: PDA_7.
- [23] TAYLOR L, FENG Y, CALIA D B. High power narrowband 589nm frequency doubled fibre laser source[J]. *Optics Express*, 2009, 17(17):14687-14693.
- [24] FENG Y, TAYLOR L R, CALIA D B. 25W Raman-fiber-amplifier-based 589nm laser for laser guide star[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21):19021-19026.
- [25] TAYLOR L R, FENG Y, CALIA D B. 50W CW visible laser source at 589nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8):8540-8555.
- [26] FENG Y, HACKENBERG W, CALIA D. Potential of fiber Raman laser in visible wavelength region[C]//Advanced Solid-State Photonics. Vancouver, Canada: Optical Society of America, 2007: WB18.