

# 多波长黄光激光器研究

谭勇 程光磊 蔡红星 刘丽炜 黄勇强 张喜和\*

(长春理工大学物理系, 吉林 长春 130022)

**摘要** 利用光纤中的多阶受激拉曼散射和声光可调谐滤波器(AOTF), 设计了可输出单一波长的黄光可调谐拉曼激光器。得到了 558~583 nm 内 6 个波长的黄激光, 该激光器输出单一波长脉冲能量约为 5  $\mu\text{J}$ , 激光半峰全宽小于 5.4 nm, 脉冲宽度约为 2.5 ns, 发散角小于 1°。所利用的 AOTF 调谐为新波长可调谐拉曼激光的发展提供了一个方向。

**关键词** 激光器; 可调谐; 声光可调谐滤波器; 受激拉曼散射

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.121402

## Study on Multi-Wavelength Yellow Laser

Tan Yong Cheng Guanglei Cai Hongxing Liu Liwei  
Huang Yongqiang Zhang Xihe

(Physics Department, Changchun University of science and technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** We design a yellow light multi-wavelength tunable Raman laser by multi-stage stimulated Raman scattering in fiber and acousto-optic tunable filter, which can output a single wavelength. We get six wavelengths of yellow laser from 558 to 583 nm. Pulse energy of a single wavelength is about 5  $\mu\text{J}$ , the full-width at half-maximum of the laser is less than 5.4 nm, the pulse width is about 2.5 ns, and the divergence angle is less than 1°. This work provides a new direction for new wavelength Raman tuning laser using tunable AOTF.

**Key words** lasers; tunable; acousto-optic tunable filter; stimulated Raman scattering

**OCIS codes** 140.3600; 190.4370; 290.5910; 060.3510

## 1 引言

拉曼光纤激光器基于受激拉曼散射(SRS)效应, 能够得到较宽范围内的激光发射, 引起了国内外学者的广泛关注。2004年, Zhao等<sup>[1]</sup>开发了一套由窄带掺杂  $\text{Nd}^{3+}$  光纤激光器抽运的拉曼光纤激光器, 测得在 1230 nm 的第三级斯托克斯光处的输出功率在 1.3 W 以上, 带宽小于 1.3 nm, 光转换效率约为 28%。2004年, Yang Feng等利用倍频效应, 得到了多个波长的黄光和红光发射的可调谐拉曼光纤激光器<sup>[2]</sup>。2008年, 英国阿斯顿大学的光子研究组与俄罗斯的电子自动控制协会等几家科研机构研究了超长光纤激光器产生的辐射性质<sup>[3]</sup>。2008年, Bélanger等<sup>[4]</sup>设计了一套高功率、宽谱可调谐的全光纤拉曼激光器。该拉曼光纤激光器可在 1075~1135 nm 的 60 nm 范围内调谐, 在发射功率 6.5 W 时输出功率高达 5.0 W 的斯托克斯光。2009年, Turitsyn等<sup>[5]</sup>实现了超长拉曼光纤激光器, 该激光器拥有最长的激光解析纵模结构的腔长(270 km)。国内团队也研究了各种拉曼光纤激光器。2003年, 刘吉清等<sup>[6]</sup>介绍了一种高效率、简洁的拉曼光纤激光器的结构及其数值模拟结果。2003年, 苏红新等<sup>[7]</sup>实现了二级拉曼转换, 在 1176.8 nm 波长获得了 309 mW 的最大输出功率, 斜率效率接近 51.5%。2004年, 杜戈果等<sup>[8]</sup>用双色镜与光纤端面组成谐振腔, 实现了一级拉曼激光输出。Xiong等<sup>[9]</sup>对 1495 nm 波段高功率硅酸盐光纤拉曼激光器进行了实验性优化。

**收稿日期**: 2011-07-30; **收到修改稿日期**: 2011-09-19; **网络出版日期**: 2011-10-25

**作者简介**: 谭勇(1975—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事非线性光学、光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: laser951111@yahoo.com.cn

**导师简介**: 张喜和(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性物理、光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: xihezhang@sina.com

2004年,陈晴川等<sup>[10]</sup>把掺Yb双包层光纤激光器输出的1117 nm或1064 nm作为抽运源,采用高掺磷光纤(该光纤的频移量为 $1330\text{ cm}^{-1}$ ),经过两次频移得到 $14xx$ 波段拉曼激光。2005年,张敏明等<sup>[11]</sup>提出了一种新型结构的光纤拉曼激光器,即用于抽运的宽带平坦放大的光纤拉曼放大器。在利用声光可调谐滤波器(AOTF)作为激光器的器件方面,胡斌等<sup>[12]</sup>研究了利用AOTF的可调谐掺铒光纤激光器的特性,郭巍等<sup>[13]</sup>研究了声光可调谐掺铒光纤激光器,利用AOTF调谐输出激光,并作为信号光在掺铒光纤放大器中实现增益。

但是,直接利用光纤拉曼效应研制的黄光波段的可调谐激光,除了文献[12,13]以外,目前可见报道较少。本文正是基于受激拉曼散射原理和AOTF研制了一套可调谐拉曼黄光光纤激光器系统。

## 2 实 验

选用抽运激光为调Q倍频Nd:YAG激光器,波长为532 nm,脉宽约为33 ns,重复频率为5 Hz,输出能量约为 $60\text{ }\mu\text{J}$ 。抽运光经70 mm聚焦镜耦合进入光纤,其出射光再经50 mm聚焦镜耦合进入AOTF,获得单一波长的光纤拉曼激光器。测试系统由光纤光谱仪、CCD、示波器、脉冲探头和计算机组成,实验时所用的光纤长度为2 km单模光纤,AOTF选用 $\text{TeO}_2$ 晶体为工作物质,波长范围为400~650 nm,衍射折射率大于35%。具体实验系统结构如图1所示。

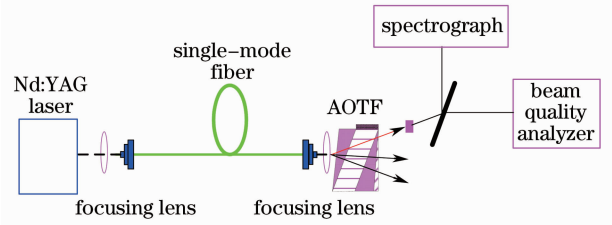


图1 黄光多波长光纤激光器的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of yellow light multi-wavelength fiber laser

## 3 结果与分析

### 3.1 多阶受激拉曼散射过程

在光纤中,强激光抽运产生受激拉曼散射,其斯托克斯光相对抽运光的频移大小由 $\text{SiO}_2$ 振动模式决定,并且当斯托克斯光强度增加到一定程度后,它自身就能够作为抽运光,产生更高阶的斯托克斯光散射。图2是抽运功率为1.8 kW时的斯托克斯光谱,7条斯托克斯线清晰可辨,后一级斯托克斯线的半峰全宽(FWHM)比前一级要宽,甚至每一个主峰都伴随有次峰结构,这种展宽或次峰是由于四波混频、自相位调制等非线性过程妨碍了高阶斯托克斯线产生,为级联拉曼激光器奠定了物质基础<sup>[14]</sup>。

### 3.2 AOTF调谐激光波长原理

$\text{TeO}_2$ 晶体AOTF可对波长进行调谐,当射频信号加到换能器上时,激励出超声波并耦合到声光介质。当自然光以一定的入射角入射到该声光介质时,被衍射输出两束正交的线偏振光,即o光和e光。改变超声波频率,两偏振光波长也将相应改变。由于 $\text{TeO}_2$ 晶体是各向异性介质,因此以 $\text{TeO}_2$ 晶体作为分光元件的AOTF的工作原理应用的是反常布拉格衍射。由狄克逊方程整理得到超声波频率公式为<sup>[15]</sup>

$$f_a = \left( \frac{V_a}{\lambda_0} \right) [n_i^2 + n_d^2 - 2n_i n_d \cos(\theta_d - \theta_i)]^{-1/2}, \quad (1)$$

式中 $\theta_i$ 、 $\theta_d$ 分别为入射光和衍射光与晶体光轴的夹角,即入射光极角和衍射光极角, $\lambda_0$ 为入射光波长, $f_a$ 、 $V_a$ 为超声波频率与超声波声速,可见超声波频率与入射光波长及入射光极角一一对应。(1)式表达了AOTF的基本原理,即当改变超声波频率时,所选择的入射光波长以及入射光极角也相应改变,起到了选择波长的作用。

偏转角定义为衍射光与入射光之间的夹角,满足公式<sup>[15]</sup>:

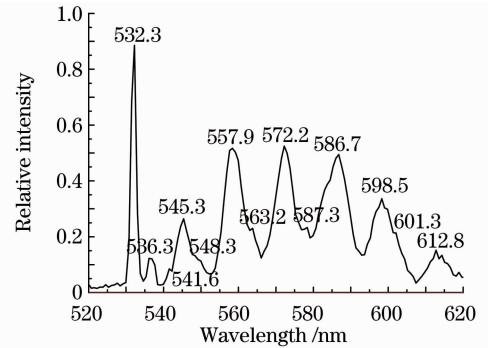


图2 532 nm光抽运光纤产生的多阶斯托克斯线的SRS谱

Fig. 2 Multi-order Stokes SRS spectrum produced by pumping the fiber with 532 nm light

$$\alpha = \theta_i + \theta_d = 2\theta_B = \lambda_0 f_a / V_a, \quad (2)$$

式中  $\theta_B$  为布拉格角。亦即偏转角  $\alpha$  与超声波频率  $f_a$  成反比, 改变超声波频率  $f_a$  即可达到控制光束方向的目的。

### 3.3 调谐输出单一波长激光及分析

在相同的抽运功率条件下, 改变超声波频率, 可得到单一波长激光。图 3 是超声波频率分别为 88.888、89.888、90.888、91.686、92.648、93.648 MHz 时的激光输出光谱。

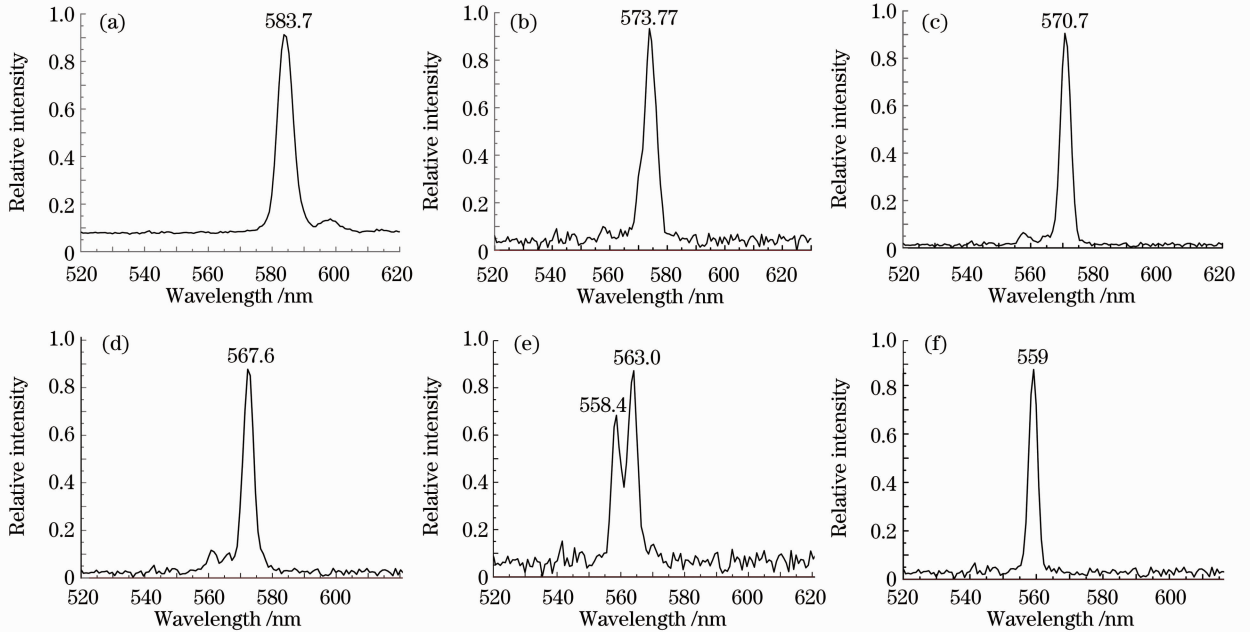


图 3 不同超声波频率时的拉曼激光光谱。(a) 88.888 MHz; (b) 89.888 MHz; (c) 90.888 MHz; (d) 91.686 MHz; (e) 92.648 MHz; (f) 93.648 MHz

Fig. 3 Raman laser spectra of different ultrasonic frequencies. (a) 88.888 MHz; (b) 89.888 MHz; (c) 90.888 MHz; (d) 91.686 MHz; (e) 92.648 MHz; (f) 93.648 MHz

该激光波长与多阶激光拉曼散射的斯托克斯光波长相对应。由于声光晶体调谐频率等原因的限制, 调谐输出的激光波长与多阶激光拉曼散射的斯托克斯光峰值波长略有差异, 但这 6 个波长均位于不同阶次的斯托克斯光谱中。当超声波频率为 92.648 MHz 时, 出现 558.4 和 563.0 nm 的双峰结构, 其他五个波长的激光为单峰结构。多阶斯托克斯线的 FWHM 3.9~5.4 nm, 小于 AOTF 的工作带宽 (7 nm), 成功地得到了单一波长输出激光。AOTF 调谐器的波长、光束偏转角与超声波频率关系见表 1, 可以看出光束偏转角绝对差值小于  $1.5^\circ$ , 误差小于 9.5%, 相当于输出光路方向有一定的偏移。因此, 应用过程中的光路设计必须考虑偏转角差异。光斑分布如图 4 所示, 其发散角为  $0.3^\circ \sim 0.9^\circ$ , 实验中, 激光光斑略有变形, 初步研究认为是偏转角和器件装调结构导致的结果。在 88.888 MHz 时, 584.3 nm 激光脉冲宽度约为 2.5 ns, 比 532 nm 抽运光的脉冲宽度 33 ns 压缩了 92%, 如图 5 所示。利用 MOLETRON Max500 能量计测得拉曼光纤激光器的注入能量约为  $60 \mu\text{J}$ , 故由总光谱能量比值估算各级拉曼激光的输出能量约为  $5 \mu\text{J}$ 。

表 1 AOTF 调谐器的波长、光束偏转角与超声波频率的关系

Table 1 Relationship of wavelength, deflection angle and ultrasonic frequency of AOTF wavelength tuner

Ultrasonic frequency /MHz	Wavelength /nm	Deflection angle /( $^\circ$ )
88.888	584.3	4.6
89.888	574.8	6.1
90.888	570.9	5.6
91.686	569.6	5.9
92.648	563.6	5.6
93.648	564.2	5.6

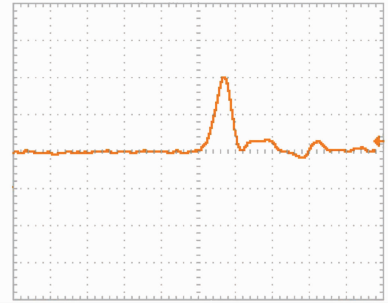
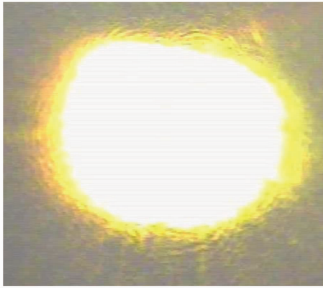


图4 超声波频率为 89.888 MHz 时的光斑

Fig. 4 Light spot when the ultrasonic frequency is 89.888 MHz

图5 拉曼激光 584.3 nm 输出的脉冲宽度

Fig. 5 Pulse width of output 584.3 nm Raman laser

## 4 结 论

对 532 nm 绿光单频抽运高浓度掺锗光纤拉曼光纤激光器进行了研究。利用掺锗光纤作增益介质,研究了可调谐光纤激光器结构,测试了激光光束的输出性能,包括中心波长、半峰全宽和激光光斑。实现了在 558~583 nm 的 25 nm 带宽内,6 个波长的可调谐激光输出。本文所利用的 AOTF 调谐为新的黄光拉曼调谐激光的发展提供了一个方向。

## 参 考 文 献

- 1 Yucheng Zhao, Yahua Li, Stuart D. Jackson. Grating-free  $n$ th order cascaded Raman fibre lasers using highly Ge-doped low loss fibre[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 4053~4058
- 2 Yan Feng, Senghong Huang, A. Shirakawa *et al.*. 589 nm light source based on Raman fiber laser[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(6A): L722~L724
- 3 S. A. Babin, V. Kalekas, E. V. Podivilov *et al.*. Turbulent broadening of optical spectra in ultralong Raman fiber lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(3): 033803
- 4 Erik Bélanger, Martin Bernier, Dominic Faucher *et al.*. High-power and widely tunable all-fiber Raman laser[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(12): 1696~1710
- 5 S. K. Turitsyn, J. D. Ania-Castanon, S. A. Babin. 270-km ultralong Raman fiber laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(13): 133901
- 6 Liu Jiqing, Huang Dexiu, Mei Jinjie *et al.*. Implement scheme of a single-stage Raman fiber laser[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2003, **16**(3): 15~19  
刘吉清, 黄德修, 梅进杰 等. 一种单级拉曼光纤激光器的实现方案[J]. 光电子技术与信息, 2003, **16**(3): 15~19
- 7 Su Hongxin, Lü Kecheng, Yan Peiguang *et al.*. Output characteristics of a cascaded Raman fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 53~56  
苏红新, 吕可诚, 闫培光 等. 内腔级联拉曼光纤激光器输出特性的实验研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 53~56
- 8 Du Geguo, Deng Ying, Chen Huiling *et al.*. Preliminary study of fiber lasers[J]. *Laser and Infrared*, 2004, **34**(3): 169~171  
杜戈果, 邓莹, 陈慧玲 等. 光纤激光器的初步研究[J]. 激光与红外, 2004, **34**(3): 169~171
- 9 Z. Xiong, N. Moore, Z. G. Li *et al.*. Experimental optimization of high power Raman fiber lasers at 1495 nm using phosphosilicate fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **239**(1-3): 137~145
- 10 Chen Qingchuan, Wang Ying. One-cascaded Raman fiber laser operating at 1428 nm [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(6): 48~50  
陈晴川, 王英. 固体激光器泵浦输出激光波长在 1428 nm 的单级拉曼光纤激光器[J]. 光学与光电技术, 2004, **2**(6): 48~50
- 11 Zhang Minming, Liu Deming, Wang Ying *et al.*. Single-stage Raman fiber lasers for pumping fiber Raman amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1634~1638  
张敏明, 刘德明, 王英 等. 用于光纤拉曼放大器抽运源的单级光纤拉曼激光器[J]. 光学学报, 2005, **25**(12): 1634~1638
- 12 Hu Bin, Hu Hongzhang, Lin Hangyou. Study on characteristics of tunable fiber laser employing AOTF[J]. *Chinese J.*

*Lasers*, 2003, **30**(1): 5~8

胡 斌, 胡鸿章, 林航友. 利用 AOTF 的可调谐光纤激光器的特性研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 5~8

13 Guo Wei. Study on the Acousto-Optical tunable  $\text{Er}^{3+}$ -Doped Fiber Laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. 33~36

郭 巍. 声光可调谐掺铒光纤激光器研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. 33~36

14 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 192~193

G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及其应用[M]. 贾东方, 余震虹 译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 192~193

15 I. C. Chang. Tunable acousto-optic filter utilizing acoustic beam walk-off in crystal quartz[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974,

**25**(6): 323~324