

基于扭转模腔的全固态单纵模拉曼黄光激光器设计

李小丽 谈宜东 杨昌喜 张书练*

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要 输出波长在 560~590 nm 的全固态拉曼黄光激光器是近几年兴起的激光器之一。目前, 此类激光器内部多模振荡引起的黄光输出谱线单色性较差的问题还没有得到解决。针对这一情况, 提出将扭转模腔与拉曼复合腔相结合的新型解决方案, 从根本上消除增益介质中空间烧孔效应引起的基频光多模振荡, 实现单纵模黄光输出。拉曼复合腔由 L 型基频光谐振腔与直线型拉曼谐振腔耦合而成, 既保证各个非线性变换过程可充分利用腔内的高功率密度, 又可相对独立地对不同波长的光路进行优化调节, 从而使整个系统实现最佳输出。该设计有助于在全固态拉曼激光器中实现毫瓦量级的单纵模黄光输出, 为基于黄激光的生物医疗、钠导星、空间目标识别等系统提供理想的固体黄光光源。

关键词 激光器; 单纵模; 全固态黄光激光器; 受激拉曼散射; 扭转模腔; 复合腔

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1214001

Design of Single-Longitudinal-Mode Operation in a Solid State Yellow Laser with Twisted-Mode-Cavity

Li Xiaoli Tan Yidong Yang Changxi Zhang Shulian

(Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract All-solid-state yellow Raman lasers working in the spectra range of 560 ~ 590 nm have promising development in recent years. However, it is still facing the problem of yellow spectrum impurity resulting from the multimode operation within the laser resonator. To solve this problem, a novel design of single-longitudinal-mode yellow Raman laser based on the twisted-mode-cavity combined with Raman couple cavity is proposed. It can suppress the multimode oscillations at the fundamental wavelength caused by the spacial hole burning effect in the laser gain medium, and then realize the single-longitudinal-mode operation at the yellow wavelength. The Raman couple cavity consists of a L-shape fundamental resonator and a linear Raman resonator, which can benefit from high intensity of intracavity fields to reduce the laser threshold. It also has advantage of flexible adjustment to optimize different resonators separately for the best laser performance. This design is of practical significance to enable single-longitudinal-mode yellow laser source with milliwatt output power, which paves the way for applying yellow lasers in biomedicine, laser-guide-star and space target recognition.

Key words lasers; single-longitudinal-mode; solid state yellow laser; stimulated Raman scattering; twisted-mode-cavity; couple cavity

OCIS codes 140.3550; 140.3410; 190.5650; 190.2620

1 引 言

随着晶体材料生长技术和非线性光学技术的不断完善, 全固态激光器的输出光谱得到极大拓展, 覆盖了从红外到紫外的多个波段。其中一个亮点是

560~590 nm 波段黄激光的获得。已有报道表明这一波段的黄橙光与人体氧基血红蛋白和特定荧光物质的吸收峰相匹配, 因此在血细胞计数、激光眼科和皮肤科治疗、生物医学检测等领域有广泛的应用前

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(61036016)

作者简介: 李小丽(1983—), 女, 博士, 主要从事新型全固态激光器及其应用方面的研究。

E-mail: qingxinlxl@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: zsl-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

景^[1-2]。此外,黄激光可以有效激发大气中的钠原子层,在自适应光学、大气探测、空间目标识别等领域也有重要应用^[3-5]。

现有全固态黄光激光器的实现方案主要分为两类:双波长和频以及拉曼倍频。前者是在同一个激光器系统中同时激射两个近红外波长,并在非线性晶体中进行和频得到黄光^[6-10]。由于系统结构复杂,所需元件数目多,因此该类激光器抽运阈值高,不易操作。相对而言,拉曼变频与腔内倍频相结合,为实现黄光输出提供了一种更简单有效的解决方案。利用它既能得到高功率黄激光脉冲,还能实现连续黄光输出^[11-15]。然而,全固态黄光拉曼激光器中存在多纵模振荡现象,这会导致激光器输出功率不稳定,黄光谱线纯净度恶化。因此,抑制腔内的多模振荡实现单纵模黄激光输出成为该领域亟需解决的问题。

传统的实现单纵模激光的办法包括短腔长法,它是利用缩短谐振腔长度,拉大纵模间隔来实现单纵模激射。然而,对于拉曼倍频的黄光激光器而言,腔内至少要包括激光晶体、拉曼晶体以及倍频晶体,晶体长度过短会导致增益长度不够,激光无法起振,谐振腔总长度的缩减受到极大限制,短腔长法并不适用。利用环形谐振腔实现单向行波传输是产生单纵模激光的另一有效方案。常见的环形激光腔是“8”字四镜结构,腔内还需要光学单向器、F-P 标准具等额外元件^[16-17],导致整个光路的调节非常困难,激光阈值较高,这限制了其在拉曼黄光激光器中的应用。1965年,Etuhov等^[18]首次提出了利用扭转模腔实现单纵模激光输出的方法。相对于一般的驻波腔,扭转模腔的特点在于腔内包含布儒斯特片和1/4波片等偏振元件,可以控制腔内光束的偏振状态,实现粒子数密度沿轴向均匀分布,从而消除空间烧孔效应引起的多模振荡。目前,该技术已经在1~1.5 μm 红外激光器中得以应用^[19-21],成功获得了单纵模基频光输出,其在固体拉曼激光器中的应用尚未见报道。

已有的单纵模黄光激光器的实现大多借助于特殊的选频元件对激光纵模进行选择,如文献^[9,22]中报道了利用体布拉格光栅实现窄线宽黄激光输出,2010年,Tomi等^[3]利用半导体量子阱激光器与双折射滤光片结合实现了窄线宽589 nm 激光输出。此类方法仍面临选频元件制作难度大、腔结构

复杂、激光输出功率受限等问题。

为此,本文提出了一种实现单纵模黄光的新型解决方案,在原有的腔内拉曼倍频结构中引入扭转模腔设计,通过控制激光晶体中传播的光的偏振态,使反转粒子数沿谐振腔轴线均匀分布,从根本上抑制空间烧孔效应,实现单纵模黄激光输出,具体原理及结构设计详见第2.2节。由于腔内存在多个非线性过程同时发生,为保证基频光、拉曼光和倍频光场可以充分利用腔内的高功率密度以降低激光阈值,同时又保证不同波长的光场有相对独立的光路,本文采用新式分束镜设计和拉曼复合腔结构,有利于不同的谐振腔的独立调节,实现整个系统的最优化输出,第2.3节将对此进行详细介绍。此外,文章第3节还将结合具体的实施例对这一新型单纵模黄光激光器设计进行全面而深入的说明。

2 结构设计

2.1 腔内倍频黄光拉曼激光器的基本结构

本文采用的是腔内拉曼倍频结构,将拉曼移频与腔内倍频相结合产生黄光输出,其基本结构如图1所示。它包括3个同时发生的非线性作用过程:吸收抽运光能量产生基频光激射,基频光到斯托克斯光的拉曼频移,以及倍频斯托克斯光产生黄光。具体到本文,采用激光二极管(LD)端面抽运,抽运源提供808 nm 抽运光,与激光晶体Nd:YAG的吸收峰相匹配。808 nm 抽运光经光学耦合系统的准直聚焦作用后,注入到Nd:YAG激光晶体中产生1064 nm 基频光。Nd:YAG晶体两个通光面均镀有1064 nm 增透膜以减小腔内损耗,同时,由于Nd:YAG晶体自身在1064 nm 的受激发射截面较大,有利于降低抽运阈值,在腔内形成较高的基频光功率密度。基频光经过拉曼晶体时由于受激拉曼散射效应的作用,损失能量,发生频率转换,产生1176 nm 的一阶斯托克斯光,又称为拉曼光。拉曼光经过非线性晶体的倍频作用转换为588 nm 的黄光,输出到腔外。这一结构的优势在于:拉曼晶体位于基频光谐振腔内,充分利用了腔内的高功率密度,可极大地降低拉曼阈值;同时,倍频晶体位于拉曼谐振腔内,有助于提高倍频效率和倍频光输出功率;还可以通过谐振腔膜系设计对输出波长进行有效控制,提高输出光束质量。

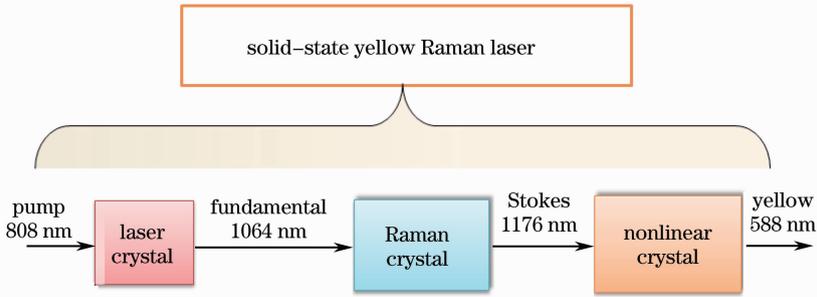


图1 全固态拉曼黄光激光器基本原理示意图

Fig.1 Schematic of the design principle of solid-state yellow Raman laser

选择拉曼晶体的首要原则是具有较高的拉曼增益系数以便实现低阈值激射,降低对抽运功率的要求;其次要有适宜的拉曼频移量,能够实现从基频光到所需的斯托克斯波长的转换;在晶体的自发拉曼频谱中,拉曼频移峰的间隔要比较大,防止多条拉曼谱线同时起振造成激光器输出不稳。再者,考虑到斯托克斯光一旦起振,腔内损耗、模式匹配和热学作用等因素对拉曼光场造成的影响将更加显著,因此在选择晶体时还要考虑光学损伤阈值、晶体热导率等参数是否合适。

目前常用的拉曼晶体主要包括钽酸盐晶体、钨酸盐晶体以及新近发展起来的钼酸盐、钻石、KTP、KTA等多种晶体^[1,23-24]。这里,选用a向切割的钽酸钇(YVO₄)晶体主要是看重其拉曼增益系数较高(4.5 cm/GW),有利于实现低阈值激射^[25]。主拉曼峰位于 890 cm⁻¹,在拉曼频移作用下可以实现1064 nm基频光到1176 nm一阶斯托克斯光的频率转换。同时,该晶体具有热光系数各向同性、生长技术成熟、成本低等优点,为后续实现扭转模腔对光偏振态的控制以及降低整个系统的成本奠定基础。

除此之外,选用BBO晶体进行腔内倍频,它的有效非线性系数为2.2 pm/V^[26],高于LBO晶体的0.85 pm/V^[27]因此利用较短的BBO晶体就能实现较高的倍频效率。此外,BBO晶体对应的是一类相位匹配,对环境温度不敏感,实验中可通过角度调节实现1176 nm倍频所需的相位匹配条件。

2.2 扭转模腔-消除空间烧孔效应引起的基频光多模振荡

由激光原理可知,全固态激光器内部多模振荡的根本原因是增益介质中的空间烧孔效应。它的存在削弱了纵模间的模式竞争,不同纵模可能消耗介质中不同空间部位的反转粒子数,建立起多纵模振荡会使激光器的输出谱线加宽,单色性变差。因此,本文采用扭转模腔设计从根本上消除空间烧孔效应引起的基频光多模振荡,从而提高黄光输出光谱的单色性。

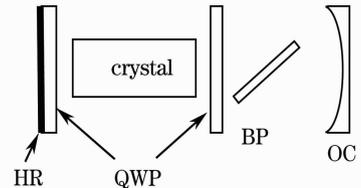


图2 扭转模腔装置示意图

Fig.2 Design principle of a twisted-mode cavity

图2所示是扭转模腔的基本设计,它的工作原理是在激光晶体两侧放置快轴方向相互垂直的两个λ/4波片(QWP),通过布儒斯特片(BP)产生沿z轴传播的线偏振光,其偏振方向与波片主轴成45°夹角,通过右侧波片后转变成圆偏振光,再经过位于左侧的第二个波片后圆偏振光变为线偏振光,由左侧腔镜上的高反射(HR)镀膜反射回来,在反方向进行类似转换过程。这样,在激光晶体内部形成两个相向传播的圆偏振光合成,表达式为^[21]:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_0 \exp[-i(kz - \pi/2)] + E_0 \exp[-i(2kl - kz - \pi/2)] \\ E_0 \exp(-ikz) + E_0 \exp[-i(2kl - kz - \pi)] \end{bmatrix} \diamond E_x^2 + E_y^2 = 4E_0^2, \quad (1)$$

式中 \mathbf{E} 是两个圆偏振光相互叠加的电场矢量表达式,其中波数 $k=2\pi/\lambda$, λ 是波长, z 是光束沿腔轴向的传播的位置, l 是腔长。晶体内部合成光场的光

强是沿 x 轴和 y 轴两个电场分量 E_x 和 E_y 的平方加和。从(1)式可以看出,光强的空间分布与光束的位置无关,也就是说增益介质中反转粒子数密度能

够沿谐振腔轴向均匀分布,消除了“空间烧孔”现象,有助于实现激光器单纵模运转。与短腔法、标准具法、双折射率滤光片法、环形腔等其他单频运转方案相比,扭转模腔法插入损耗较小,结构简单,调节方便,适于设计结构紧凑、转换效率高的单纵模固体激光器。

2.3 新型拉曼复合腔设计-不同光场相对独立调节以实现最优化输出

如第 2.1 节所述,全固态拉曼黄光激光器中存在多个非线性过程同时发生,既包括从抽运光到基频光的转换,又包括实现拉曼频移的非弹性散射过程,以及从拉曼光到黄光的倍频过程。腔内光场复杂,多个非线性过程相互作用,增加了谐振腔的设计难度。

为保证不同光场能充分利用腔内高功率密度,同时各波长的光路又要保持相对独立以便分别进行优化调节,本文提出图 3 所示的拉曼复合腔设计,以期实现系统的最优化输出。其中 1064 nm 基频光在由镜子 M1、M2 和 M3 组成的 L 型谐振腔中往返传播,位于 Nd:YAG 激光晶体两侧的扭转模腔设计保证了激光晶体中传播的光是圆偏振光,有助于消除空间烧孔引起的多模振荡;产生的单纵模基频光经分束镜 M2 反射注入拉曼晶体中转换为 1176 nm 拉曼光,拉曼光可以透过 M2 在镜子 M3 和 M4 组成的谐振腔中往返传播,又经过 BBO 晶体倍频最终产生单纵模黄光;其中一部分黄光直接发射到分束镜 M2 并经其反射输出,另一部分黄光发射到 M4 后再被反射回来进行输出。

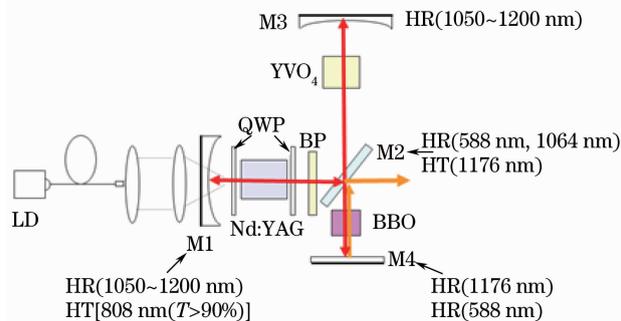


图 3 基于扭转模腔的全固态单纵模黄光激光器示意图

Fig. 3 Schematic of single-longitudinal-mode yellow Raman laser based on twisted-mode cavity

这样的设计既保证相互关联的转换过程可以充分利用腔内的高功率密度,实现低阈值激射,同时各波长的光路又有相对独立的部分,能够实现不同波长的优化调节,从而使整个系统的输出达到最佳。

3 设计实例

如图 3 所示,本文所提出的全固态单纵模黄光激光器主要包括 3 部分:抽运源、光学耦合系统和拉曼复合谐振腔。这里采用的 LD 端面抽运源可提供 808 nm 抽运光,最大输出功率为 20 W,自带温控装置,光纤耦合输出,芯径 $\Phi 200 \mu\text{m}$,数值孔径 0.22。光学耦合系统由焦距分别为 30 mm 和 15 mm 的两个透镜组合而成,对光纤耦合出的抽运光进行准直和再聚焦,两透镜均镀有 808 nm 增透膜。

拉曼复合谐振腔包括输入镜 M1、分束镜 M2、第一输出镜 M3、第二输出镜 M4、扭转模腔结构、激光晶体 Nd:YAG、拉曼晶体 YVO₄ 以及倍频晶体 BBO;其中,M1、M2 和 M3 组成的 L 型腔是基频光谐振腔,M3 和 M4 组成的直线腔是斯托克斯光谐振腔。分束镜 M2 用于将 1064 nm 基频光和 1176 nm 斯托克斯光相分离,同时还要将倍频出的黄光反射出腔外,因此镜子两侧采用不同的镀膜。各腔镜的镀膜及曲率半径等参数详见表 1。

表 1 复合式谐振腔各腔镜参数列表

Table 1 List of cavity mirrors and coatings

Mirror	Coatings	Radius of curvature
M1	$T > 90\%$ (808 nm) $R > 99.5\%$ (1000~1200 nm)	Flat
M2 (dichroic mirror)	S1: $R > 99\%$ (1064 nm) $T > 99\%$ (1176 nm) S2: $R > 95\%$ (500~600 nm) $T > 99\%$ (1176 nm)	Flat
M3	$R > 99.5\%$ (1000~1200 nm)	250 mm
M4	$R > 99.5\%$ (1000~1200 nm) $R > 95\%$ (500~600 nm)	Flat

扭转模腔由布儒斯特片和设置在 Nd:YAG 晶体两侧的 $\lambda/4$ 波片 (QWP) 共同构成。其中,布儒斯特片保证 p 偏振 1064 nm 基频光零反射损耗通过同时阻止 s 偏振光通过,它的起偏方向与两个波片的快慢轴夹角均为 45° 。这里的两个 QWP 均为 1064 nm 零级波片,两者的快轴夹角为 90° 。这样的设置可保证激光晶体内传播的基频光是圆偏振光,波片外侧传播的基频光是唯一的线偏振光,从而消除空间烧孔实现单纵模运转。

激光晶体采用各项同性的 Nd:YAG 晶体,掺杂原子数分数为 0.5%,尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,两个通光面上均镀有 808 nm 和 1000~1200 nm 波段的增透膜,晶体的温度控制在约 25°C 。拉曼晶体选用 a 向切割的 YVO₄ 晶体,尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,两个通光面上镀有 1000~1200 nm 波段增透

膜,晶体的温度也控制在约 25 °C。倍频晶体采用 BBO 晶体,尺寸为 4 mm×4 mm×5 mm,切割角度满足 I 类相位匹配条件 $\theta=21.5^\circ, \phi=0^\circ$,两个通光面镀 1000~1200 nm 和 500~600 nm 的增透膜,晶体的角度通过光学调节架进行精确控制以便实现最佳倍频效率。

基于上述设计的全固态单纵模黄光激光器的具体工作过程为:LD 端面抽运源发射 808 nm 抽运光,经光学耦合系统的准直聚焦作用后,注入到 Nd:YAG 晶体中产生 1064 nm 基频光,基频光在输入镜 M1、分束镜 M2 和第一输出镜 M3 组成的基频光谐振腔内往返传播,布儒斯特片和 $\lambda/4$ 波片组合共同构成的扭转模腔结构,保证基频光实现单纵模运转。当基频光光场强度逐渐增加达到拉曼阈值时,1064 nm 基频光在 YVO₄ 中进行拉曼频移输出 1176 nm 单纵模斯托克斯光。斯托克斯光透过 M2 镜注入到 BBO 晶体中进行倍频产生黄光,最后单纵模黄光经分束镜 M2 反射输出到腔外。这里激光晶体和拉曼晶体的冷却采用半导体制冷片(TEC)装置来实现,各元件尽可能地紧密排练以便缩短腔长,减小损耗。

4 结 论

目前,国内外围绕全固态黄光激光器开展的研究主要集中在降低腔内损耗、提高转换效率和输出功率等方面,而针对抑制多模振荡提高黄光输出谱线纯净度的研究相对较少。本文提出了一种将扭转模腔与拉曼复合腔相结合从而实现单纵模黄光输出的新型拉曼激光器设计方案,其特征为:利用扭转模腔结构控制基频光的偏振态,保证激光晶体内部只有圆偏振光经过,反转粒子数密度能够沿谐振腔轴向均匀分布,从而消除了传统拉曼激光器中由空间烧孔效应引起的多模振荡,实现单纵模黄光输出;利用多个腔镜及新型镀膜的分束镜构建拉曼复合谐振腔,实现从基频光到斯托克斯光再到黄光的转换,保证多个同时发生的非线性过程可以充分利用腔内的高功率密度,同时又保证不同波长的光有相对独立的光路,有利于独立灵活地对各光场谐振腔进行优化,提高整个激光系统的转换效率和输出功率。

本文提出的全固态单纵模黄光激光器的设计具有简单高效、结构紧凑、成本低等优点,有望实现毫瓦量级的黄光输出,为单纵模黄光在生物医疗、激光眼科以及深空探测等领域的实用化奠定基础。

参 考 文 献

- 1 H M Pask. The design and operation of solid-state Raman lasers [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, 27(1): 3-56.
- 2 W Telford, M Murga, T Hawley, *et al.* DPSS yellow-green 561-nm lasers for improved fluorochrome detection by flow cytometry [J]. *Cytometry Part A*, 2005, 68A(1): 36-44.
- 3 L Tomi, H Anti, K Ville-Markus, *et al.* 589 nm multi-watt narrow linewidth optically pumped semiconductor laser for laser guide stars [C]. in *Advanced Solid-State Photonics*. 2010; Optical Society of America. 2010. ATuA10.
- 4 A D Greentree, S Praver. Yellow lasers: A little diamond goes a long way [J]. *Nat Photon*, 2010, 4(4): 202-203.
- 5 C E Max, S S Olivier, H W Friedman, *et al.* Image improvement from a sodium-layer laser guide star adaptive optics system [J]. *Science*, 1997, 277(5332): 1649-1652.
- 6 Y Tan, X H Fu, P Zhai, *et al.* An efficient cw laser at 560 nm by intracavity sum-frequency mixing in a self-Raman Nd:LuVO₄ laser [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(4): 045806.
- 7 J Janousek. Efficient all solid-state continuous-wave yellow-orange light source [J]. *Opt Express*, 2005, 13: 1188-1192.
- 8 Y F Lü, X H Zhang, X H Fu, *et al.* Diode-pumped Nd:LuVO₄ and Nd:YAG crystals yellow laser at 594 nm based on intracavity sum-frequency generation [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(9): 634.
- 9 Y L Chen, W W Chen, C E Du, *et al.* Narrow-line, cw orange light generation in a diode-pumped Nd:YVO₄ laser using volume Bragg gratings [J]. *Opt Express*, 2009, 17(25): 22578-22585.
- 10 C Xiuyan, L Xiu, Z Haolei, *et al.* 589-nm yellow laser generation by intra-cavity sum-frequency mixing in a T-shaped Nd:YAG laser cavity [J]. *Chin Opt Lett*, 2009, 7(9): 815-818.
- 11 J Lin, H Pask. Nd:GdVO₄ self-Raman laser using double-end polarised pumping at 880 nm for high power infrared and visible output [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2012, 108(1): 17-24.
- 12 J Lin, H M Pask, D J Spence, *et al.* Continuous-wave VECSEL Raman laser with tunable lime-yellow-orange output [J]. *Opt Express*, 2012, 20(5): 5219-5224.
- 13 X Li, A J Lee, H M Pask, *et al.* Efficient, miniature, cw yellow source based on an intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄ self-Raman laser [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(8): 1428-1430.
- 14 Z Cong, X Zhang, Q Wang, *et al.* Theoretical and experimental study on the Nd:YAG/BaWO₄/KTP yellow laser generating 8.3 W output power [J]. *Opt Express*, 2010, 18(12): 12111-12118.
- 15 A J Lee, D J Spence, J A Piper, *et al.* A wavelength-versatile, continuous-wave, self-Raman solid-state laser operating in the visible [J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 20013-20018.
- 16 Sun Guixia, Liu Tao, Qian Jinning, *et al.* Tunable all-solid-state continuous wave intra-cavity frequency-doubled Nd:YVO₄/LBO 671 nm ring laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 97-101.
- 孙桂侠, 刘涛, 钱金宁, 等. 可调谐全固态 Nd:YVO₄/LBO 倍频连续 671 nm 环形激光器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 97-101.
- 17 Jiao Yuechun, Ma Yayun, Li Yuanji, *et al.* All-solid-state single-longitudinal-mode pulse Nd:YVO₄ ring laser [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2014, 20(1): 81-84.
- 焦月春, 马亚云, 李渊骥, 等. 全固态单纵模脉冲 Nd:YVO₄ 环形激光器 [J]. *量子光学学报*, 2014, 20(1): 81-84.
- 18 V Evtuhov, A E Siegman. A "twisted-mode" technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity [J]. *Applied Optics*, 1965, 4(1): 142-143.
- 19 P Polynkin, A Polynkin, M Mansuripur, *et al.* Single-frequency

- laser oscillator with watts-level output power at 1.5 μm by use of a twisted-mode technique [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(20): 2745–2747.
- 20 H Pan, S Xu, H Zeng. Passively Q-switched Single-longitudinal-mode c-cut Nd:GdVO₄ laser with a twisted-mode cavity [J]. *Opt Express*, 2005, 13(7): 2755–2760.
- 21 E Wu, H Pan, S Zhang, *et al.*. High power single-longitudinal-mode operation in a twisted-mode-cavity laser with a c-cut Nd:GdVO₄ crystal [J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(4-5): 459–462.
- 22 C Wei-Wen, C Yen-Liang, C Wei-Kuan, *et al.*. Narrow-line, continuous-wave orange 593.5-nm generation in diode-pumped Nd:YVO₄ laser using volume Bragg gratings [C]. in Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference. 2009: Optical Society of America.
- 23 T T Basiev, A A Sobol, P G Zverev, *et al.*. Comparative spontaneous Raman spectroscopy of crystals for Raman lasers [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(3): 594–598.
- 24 A A Kaminskii, H J Eichler, K Ueda, *et al.*. Properties of Nd³⁺-doped and undoped tetragonal PbWO₄, NaY(WO₄)₂, CaWO₄, and Undoped Monoclinic ZnWO₄ and CdWO₄ as laser-active and stimulated Raman scattering-active crystals [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(21): 4533–4547.
- 25 A A Kaminskii, K-i Ueda, H J Eichler, *et al.*. Tetragonal vanadates YVO₄ and GdVO₄-new efficient $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers [J]. *Opt Commun*, 2001, 194(1-3): 201–206.
- 26 R C Eckardt, H Masuda, Y X Fan, *et al.*. Absolute and relative nonlinear optical coefficients of KDP, KD*P, BaB₂O₄, LiIO₃, MgO:LiNbO₃, and KTP measured by phase-matched second-harmonic generation [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, 26(5): 922–933.
- 27 D A Roberts. Simplified characterization of uniaxial and biaxial nonlinear optical crystals: a plea for standardization of nomenclature and conventions [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1992, 28(10): 2057–2074.

栏目编辑: 胡 冰