

文章编号: 1001-3806(2018)05-0673-08

## 固体自喇曼黄光激光器研究进展

伍锡山, 张 鹏\*, 刘 彬, 龙江雄

(陆军工程大学石家庄校区 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 黄光激光作为激光研究领域的一大热点, 取得了丰硕的研究成果及广泛的应用。随着可同时作为激光晶体和喇曼晶体的自喇曼晶体的发展, 逐渐掀起了自喇曼黄光激光器的研究热潮。总结归纳了近10年来固体自喇曼黄光激光器的研究进展。按激光器的工作方式将其分成连续式和脉冲式激光器, 通过分类比较不同工作方式的激光器各自的优缺点, 明确了自喇曼黄光激光器今后的研究趋势是多方法并用。结构紧凑、低阈值等特点使其在生物医疗领域拥有巨大的应用潜力。以后的研究重点更偏向于高转换率、高稳定性、低成本及小型化。该研究报告为后续研究方向提供了参考。

**关键词:** 激光器; 黄光激光器; 自喇曼激光器; 固体黄光激光器

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.05.017

## Research progress of solid-state self-Raman yellow lasers

WU Xishan, ZHANG Peng, LIU Bin, LONG Jiangxiong

(Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** As one hot spot in the field of laser research, yellow lasers have achieved fruitful research results and extensive application. With the development of self-Raman crystal, which can be used as laser crystal and Raman crystal at the same time, the research upsurge of self-Raman yellow lasers has been set off gradually. The research progress of solid self-Raman yellow lasers in recent ten years is summarized. According to the way of laser operation, yellow lasers are divided into continuous lasers and pulsed lasers. By classifying and comparing the advantages and disadvantages of lasers with different working modes, it is clear that future research trend of self-Raman yellow laser would adopt multiple methods. The characteristics of compact structure, low threshold and so on will make yellow lasers have great potential in the field of biological medicine. Future research will focus on high conversion, high stability, low cost and miniaturization. The study provides the reference for the future research direction.

**Key words:** lasers; yellow laser; self-Raman laser; solid-state yellow laser

## 引 言

黄光波段的激光在钠导引星<sup>[1]</sup>、生物医学<sup>[2-3]</sup>、激光舞台展示等方面有着广泛的应用。例如天文学上, 589nm 的黄色激光可以引起钠原子(D<sub>2</sub>线)共振, 产生高亮度的后向散射荧光, 形成钠导星, 结合自适应光学, 使地基大型望远镜可得到近衍射极限的高分辨率图像; 医学上, 由于血红蛋白对 585nm~595nm 波长的黄光吸收率高, 黄光激光可用于鲜红斑痣及眼科的激光治疗。黄光激光器的研究已经掀起了可见光激光器

研究中的一股热潮。

早期直接产生黄光激光的染料激光器和气体激光器因其体积大、安全性差、功率低、激光循环冷却系统复杂等原因已逐步退出历史舞台。在全部激光介质材料的增益谱线跃迁表中, 1178nm 附近还没有发现较强的受激辐射跃迁, 所以不能直接倍频基频光得到 589nm 黄光激光。喇曼介质的出现拓展了激光光谱范围, 为黄光激光器的发展奠定了基础。

喇曼介质有固体、液体和气体。气体喇曼介质浓度小, 喇曼增益比较小, 热传导能力差, 导致激光器无法长期连续工作; 液体喇曼介质易挥发、容易产生沉淀, 不少液体介质有毒, 导致液体喇曼介质在实际应用中特别少见; 固体喇曼介质克服了以上两者的缺点, 其喇曼增益较高、热传导性能好、光光转换效率较高并且工作性能稳定, 使得固体喇曼激光器应用于产生黄光

作者简介: 伍锡山(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光技术及应用方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhp\_optics@163.com

收稿日期: 2017-11-23; 收到修改稿日期: 2017-12-04

就具有了可行性。现阶段得到黄光激光的主要手段是和频法或倍频法。例如 YUAN 等人<sup>[4]</sup>在 2015 年以三硼酸锂 ( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , LBO) 晶体为和频介质, 将 1064nm 和 1319nm 两束基频光腔内和频输出连续 589nm 黄光。和频方法的主要缺点在于, 无论是使用一块晶体还是两块晶体产生两束基频光, 在激光器设计上比较困难, 结构比较复杂, 对镀膜的工艺要求也高。倍频法是通过受喇曼曼散射效应, 将基频光频移得到波长更长的 1 阶斯托克斯光, 再倍频 1 阶斯托克斯光获得黄光激光<sup>[5]</sup>或者先直接倍频 1064nm 基频光产生 532nm 的绿光, 然后再将其频移到黄光波段<sup>[6]</sup>。激光器腔内基频光激发和受喇曼曼散射效应所引起的热效应对谐振腔的稳定性影响特别大, 所以这种方法对散热系统有着极高的要求。

在喇曼激光器的研究中, 一些能同时作为激光增益介质和喇曼增益介质的材料逐渐被发现。在一个晶体中实现基频光的激发和 1 阶斯托克斯光的激发, 称之为自喇曼激光器。这类新型激光器的出现, 一方面减少了腔内元件数目, 降低了损耗, 提高了激光器效率, 使激光器结构越发紧凑; 另一方面又因其内部显著的热效应, 使此类激光器的输出功率受到限制。在生物医学领域对黄色激光的功率需要通常低于 100mW, 只对光束质量、功率稳定性及低成本的需求高<sup>[7]</sup>, 因此这类激光器在生物医学方面有着巨大的应用潜力。本文中着眼于固体自喇曼黄光激光, 对近 10 年的相关报道进行了广泛调研及归纳。

## 1 理论基础

### 1.1 受激喇曼曼散射

1928 年, 印度物理学家喇曼最先发现了喇曼曼散射效应, 指光波在被散射后频率发生变化的现象。图 1 为自发喇曼曼散射过程能级分布图。当分子或原子处于下能级基态 ( $v=0$ ) 时, 其会吸收频率为  $\omega_i$  的入射光子, 同时激发出频率为  $\omega_s$  的散射光子, 频率为  $\omega_r$  的声子, 其中  $\omega_i = \omega_s + \omega_r$ 。可知出射光频率变小、波长变长, 通常称为 1 阶斯托克斯光。当条件允许时, 还能通过级联喇曼曼散射得到 2 阶、3 阶斯托克斯光。

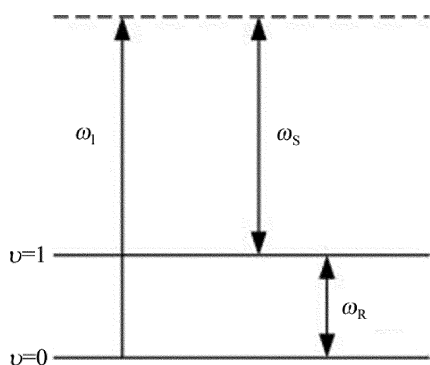


图 1 自发喇曼曼散射能级图

子, 同时激发出频率为  $\omega_s$  的散射光子, 频率为  $\omega_r$  的声子, 其中  $\omega_i = \omega_s + \omega_r$ 。可知出射光频率变小、波长变长, 通常称为 1 阶斯托克斯光。当条件允许时, 还能通过级联喇曼曼散射得到 2 阶、3 阶斯托克斯光。

受激喇曼曼散射现象最早由 WOODBURY 等人于 1962 年发现<sup>[8]</sup>, 受激喇曼曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 是由强激光的光电场和原子中的电子激发、分子中的振荡或与晶体中的晶格耦合所产生的。当入射光强较弱时, 散射过程主要是自发喇曼曼散射, 而当入射光是很强的激光时, 散射过程会出现受激喇曼曼散射, 散射光的强度可以达到和入射光相比较的程度, 此时散射光会具备激光的一切特性, 受激喇曼曼散射比自发喇曼曼散射的转换率提高  $10^3$  倍以上。

当喇曼曼散射过程的退相干时间小于入射到喇曼曼介质中的抽运光的脉冲持续时间时, 可用稳态方程求解, 斯托克斯光沿入射光传播方向  $z$  的光强分布如下式所示<sup>[9]</sup>:

$$I_s(z) = I_s(0) \exp(g_R I_p z) \quad (1)$$

$$g_R = \frac{8\pi c^2 N}{\hbar \mu_s^2 \omega_s^3 \Gamma} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} \right) \quad (2)$$

式中,  $I_p$  为入射光光强,  $c$  为光速,  $\sigma$  为喇曼曼散射发射截面,  $\Omega$  为立体角,  $\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega}$  表示归一化的喇曼曼散射发射截面,  $\mu_s$  为斯托克斯光在喇曼曼晶体中的折射率,  $\hbar$  为普朗克常数,  $g_R$  为稳态条件下喇曼曼增益系数,  $N$  代表喇曼曼激活分子个数,  $\Gamma$  是喇曼曼频移的线宽。可知, 稳态条件下喇曼曼增益与斯托克斯光波长和喇曼曼频移线宽成反比关系, 与喇曼曼散射发射截面成正比关系。由于晶体的晶向与抽运光偏振方向之间的关系影响着喇曼曼散射发射截面的大小和出射的斯托克斯光的偏振方向, 理论与实践都已证明, 较强的喇曼曼增益通常出现在抽运光和斯托克斯光的偏振方向相同的条件下<sup>[10]</sup>。

### 1.2 激光晶体的热透镜效应

在自喇曼曼激光器腔内, 激光晶体同时作为喇曼曼晶体, 内部热负载积累严重, 会引发严重的热效应。其中制约激光器性能的最重要因素是晶体内部形成的热透镜效应。热透镜效应严重制约着激光器的稳定性及光束质量, 在激光器设计时往往需要计算分析晶体的热透镜焦距。INNOCENZI 等人<sup>[11]</sup>推导出了热透镜焦距计算公式, 为激光器设计提供了理论支撑:

$$f = \frac{\pi \kappa_c w_p^2}{P_{ph} (dn/dT)} \left[ \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (3)$$

式中,  $\kappa_c$  是激光晶体的热导率,  $w_p$  是抽运光的高斯半径,  $P_{ph}$  表示抽运光引起热积累的部分功率,  $\alpha$  指晶体

材料的吸收系数,  $l$  指晶体长度,  $dn/dT$  表示热光系数。

## 2 研究进展

### 2.1 自喇曼材料

随着钽酸盐晶体应用于喇曼增益介质领域, 自喇曼激光器迈入了快速发展阶段。KAMINSKII 等人<sup>[12]</sup>曾在 1999 年预言包括  $YVO_4$  和  $GdVO_4$  晶体在内的钽酸盐基质作为喇曼介质的应用潜力, 并于 2001 年通过实验证明了这一预言。CHEN 在 2004 年报道了一系列半导体激光器 (laser diode, LD) 抽运  $Nd:YVO_4$  晶体<sup>[13-15]</sup>及  $Nd:GDVO_4$  晶体<sup>[16-17]</sup>的实验。实验中选用  $Nd:YVO_4$  同时作为激光增益介质和喇曼增益介质, 光光转换效率达 7%; 选用  $Nd:GdO_4$  晶体实现了转换率达 8.7% 的 1521nm 激光输出。JIANG 等人<sup>[18]</sup>于 2017 年在自喇曼激光器的基础上, 将  $Nd:YAG$  和  $Nd:YVO_4$  晶体在腔内共轴抽运, 得到的 1 阶斯托克斯光转换效率高达 23.3%。

$Nd:YVO_4$  晶体和  $Nd:GdVO_4$  晶体拥有受激发射面大、吸收系数高、吸收带宽宽等优点<sup>[19-20]</sup>, 是目前自喇

曼激光器研究中最受人青睐的晶体之一。

### 2.2 连续式自喇曼黄光激光器

对于自喇曼激光器而言, 自喇曼晶体既是激光晶体又是喇曼晶体, 基频光激发和受激喇曼散射都在自喇曼晶体内发生, 大大地简化了激光器结构, 使得倍频晶体可以很轻松地置于腔内, 充分利用腔内 1 阶斯托克斯光功率大的优势, 提高了倍频光的转换率, 因此这类激光器大部分都是内腔型。表 1 中列出了近 10 年的典型连续式固体自喇曼内腔型黄光激光器的国内外研究进展<sup>[21-37]</sup>, 可以看出, 目前自喇曼晶体以  $Nd:YVO_4$  和  $Nd:GdVO_4$  居多, 倍频晶体以偏硼酸钡 ( $BaB_2O_4$ , BBO)、LBO 和磷酸钛氧钾 ( $KTiOPO_4$ , KTP) 为主。由于激光激发过程与受激喇曼散射发生在同一块晶体内, 导致晶体内大量的热载荷累积, 引发了严重的热效应, 从而限制了激光器的输出功率, 导致连续式自喇曼黄光激光器的输出功率一直在毫瓦至数瓦的量级。随着研究的深入, 人们不断通过创新优化激光器结构、尝试复合介质等手段, 在降低阈值、提高光光转换效率及小型化等各方面取得了诸多进展。

表 1 近 10 年连续式自喇曼黄光激光器研究进展

| 时间                   | 激光晶体<br>(喇曼晶体)                 | 倍频晶体 | 输出波长/<br>nm   | 最大输出<br>功率/W      | 转换<br>效率              | 时间                   | 激光晶体<br>(喇曼晶体)            | 倍频晶体 | 输出波长/<br>nm  | 最大输出<br>功率/W        | 转换<br>效率                |
|----------------------|--------------------------------|------|---|-------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|------|--|---------------------|-------------------------|
| 2007 <sup>[21]</sup> | $Nd:GdVO_4$                    | LBO  | $\lambda_1 = 1173$<br>$\lambda_2 = 586.5$                   | 2<br>0.678        | 9.1%<br>4.2%          | 2011 <sup>[30]</sup> | $Nd:YVO_4$                | BBO  | $\lambda_1 = 1176$<br>$\lambda_2 = 587.8$                      | 0.16<br>0.22        | 4.7%<br>5.8%            |
| 2007 <sup>[22]</sup> | $Nd:YVO_4$                     | LBO  | $\lambda_1 = 1176$<br>$\lambda_2 = 588$                     | 0.32<br>0.14      | 7.6%<br>4.4%          | 2011 <sup>[31]</sup> | $Nd:YVO_4$                | BBO  | $\lambda_1 = 1176$<br>$\lambda_2 = 587.8$                      | 0.7<br>0.33         | 18.4%<br>8.6%           |
| 2008 <sup>[23]</sup> | $Nd:GdVO_4$                    | LBO  | $\lambda = 586.5$   | 2.51              | 12.2%                 | 2011 <sup>[32]</sup> | $Nd:YVO_4$                | LBO  | $\lambda_1 = 588$<br>$\lambda_2 = 549$                         | 0.32<br>0.66        | 8.4%<br>17%             |
| 2010 <sup>[24]</sup> | $Nd:GdVO_4$                    | LBO  | $\lambda = 559$   | 5.3               | 21%                   | 2012 <sup>[33]</sup> | $Nd:GdVO_4$               | BBO  | $\lambda_1 = 1173$<br>$\lambda_2 = 559$<br>$\lambda_3 = 586.5$ | 4.1<br>4.05<br>3.46 | 11.2%<br>12.5%<br>10.7% |
| 2010 <sup>[25]</sup> | $Nd:YVO_4$                     | LBO  | $\lambda = 559$   | 0.89              | 4.9%                  | 2012 <sup>[34]</sup> | $Nd:YVO_4 /$<br>$Ba:WO_4$ | LBO  | $\lambda = 590$  | 0.194               | 5.1%                    |
| 2010 <sup>[26]</sup> | $Nd^{3+}:LuVO_4 /$<br>$LuVO_4$ | LBO  | $\lambda = 589$   | 3.5               | 13.3%                 | 2013 <sup>[35]</sup> | $Nd:LuVO_4$               | LBO  | $\lambda = 560$  | 4.2                 | 22.9%                   |
| 2010 <sup>[27]</sup> | $Nd:GdVO_4$                    | LBO  | $\lambda_1 = 532$<br>$\lambda_2 = 559$<br>$\lambda_3 = 586$ | 4.6<br>5.3<br>4.3 | 16%<br>20.4%<br>17.1% | 2013 <sup>[36]</sup> | $Nd:YVO_4$                | KTP  | $\lambda = 558.6$  | 0.58                | 5%                      |
| 2011 <sup>[28]</sup> | $Nd:KGW$                       | LBO  | $\lambda = 561$   | 0.57              | 3.3%                  | 2015 <sup>[37]</sup> | $Nd^{3+}:YVO_4$           | LBO  | $\lambda = 588$  | 0.82                | 6.7%                    |
| 2011 <sup>[29]</sup> | $Nd:YVO_4$                     | KTP  | $\lambda_1 = 1176$<br>$\lambda_2 = 558.6$                   | 1.53<br>0.48      | 6.8%<br>4%            |                      |                           |      |  |                     |                         |

2005 年, DEMIDOVICH 等人<sup>[38]</sup>首次报道了连续型固体自喇曼激光器实现连续喇曼光输出, 实验中选用  $Nd:KGW$  同时作为自喇曼晶体, 1 阶斯托克斯光阈值为 1.15W, 在抽运功率 2.06W 时输出光最大输出功率为 54mW, 转换效率仅为 2.6%。2007 年, DEKKER

等人<sup>[21]</sup>首次报道了连续型腔内倍频自喇曼激光器, 得到 586.5nm 黄光激光输出, 其实验原理图如图 2 所示。实验中选用  $Nd:GdVO_4$  作为自喇曼晶体, LBO 内腔倍频, 在抽运功率为 16.3W 时, 黄光激光输出最大功率为 678mW, 光光转换效率达 4.2%。



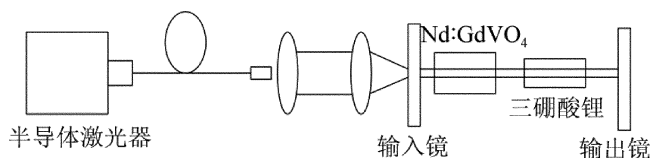


图2 DEKKER 等人设计激光器原理图<sup>[21]</sup>

从表1可以看出,目前光光转换率提高最大的自喇曼黄光激光器是LEE等人<sup>[24]</sup>于2010年设计的Nd:GdVO<sub>4</sub>自喇曼激光器,抽运光到黄光的光光转换效率首次突破20%,其原理图如图3所示。LEE等人在Nd:GdVO<sub>4</sub>与LBO之间放置一内置腔镜M<sub>2</sub>,M<sub>2</sub>镀膜对1063nm/1173nm高透、对559nm高反,能减少反向的黄光激光的损失量,提高了输出光转换效率的同时也降低了反向黄光激光对激光器的反向损伤及热效应。2013年,TAN等人<sup>[35]</sup>设计了相似的实验,激光器结构相同,但是把自喇曼晶体换成了Nd:LuVO<sub>4</sub>。Nd:LuVO<sub>4</sub>有着更大吸收和发射截面,其热损失阈值高,更适用于大功率激光器。TAN等人在抽运功率18.3W时,得到连续

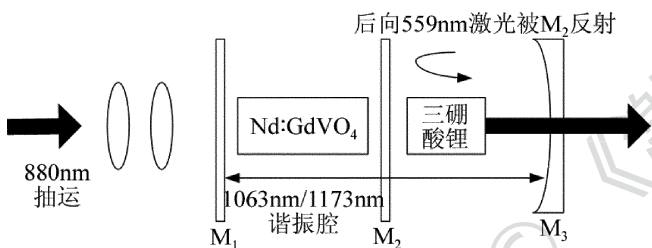


图3 LEE 等人所设计的激光器原理图<sup>[24]</sup>

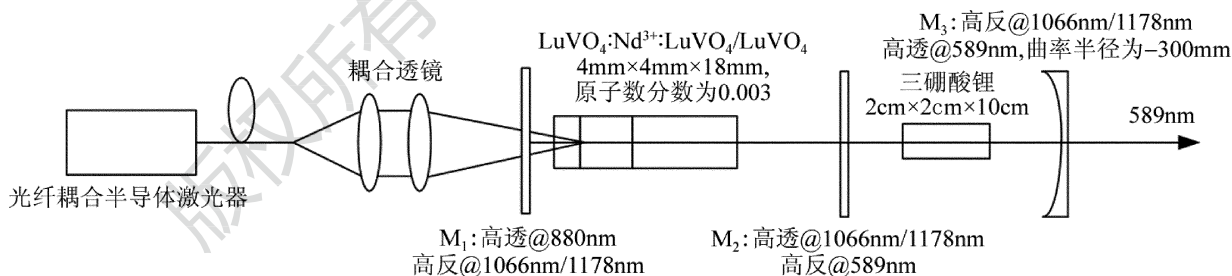


图5 LÜ 等人所设计的激光器原理图<sup>[26]</sup>

在抽运方式方面,2015年,KORES等人<sup>[37]</sup>首次报道了侧面抽运连续自喇曼黄光激光器。自喇曼晶体选用Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub>,倍频晶体选用LBO,在抽运功率22W时,588nm黄光激光最大功率为820mW,光光转换效率仅为3.7%,相对于端面抽运而言其转换率偏低。

### 2.3 脉冲式自喇曼黄光激光器

2.3.1 调Q式自喇曼黄光激光器 通过内腔调Q可以有效降低受激喇曼散射阈值。在理论研究方面,山东大学ZHANG课题组建立了受激喇曼散射速率方程,对喇曼激光器速率方程进行了大量研究<sup>[39-41]</sup>。

黄光激光的输出功率达4.2W,将光光转换效率提升至22.9%,4h输出功率波动稳定在3.5%以内。

在激光器小型化方面,LI等人<sup>[32]</sup>于2011年报道的实验中,总腔长仅15mm,是已有报道中腔长最小的黄光激光器,其原理图如图4所示。LI等人通过理论分析得到了阈值与内腔长度成反比的结论,于是采用在Nd:YVO<sub>4</sub>晶体一侧镀膜代替激光器谐振腔的输入镜,大大缩小了内腔长,降低了阈值及损耗,简化了激光器结构,提高了转换效率,并且通过LBO的温控系统来控制相位匹配状态,实现和频及倍频的选择,得到了不同波长的输出光。

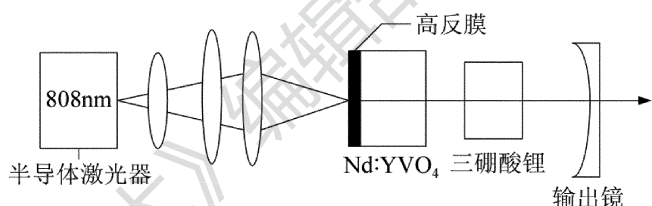


图4 LI 等人所设计的激光器原理图<sup>[32]</sup>

在晶体材料改进方面,LÜ等人<sup>[26]</sup>于2010年报道的实验中,589nm黄光激光最大功率为3.5W,光光转换效率为13.3%。该实验中采用了3mm×5mm×10mm,LuVO<sub>4</sub>/Nd<sup>3+</sup>:LuVO<sub>4</sub>/LuVO<sub>4</sub>复合晶体作为自喇曼晶体。复合晶体有效地抑制了热效应,提高了受激喇曼散射的作用长度。同时在腔内也加入了内置腔镜M<sub>2</sub>,减少黄光的反向反射损失,提高了输出光转换效率,如图5所示。

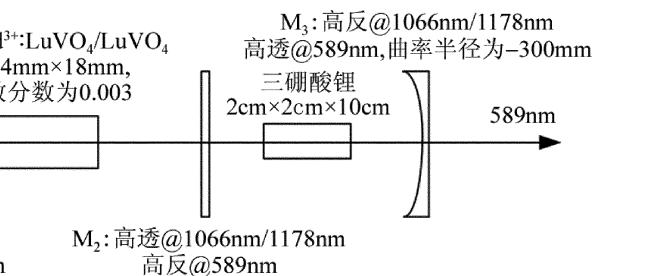


图5 LÜ 等人所设计的激光器原理图<sup>[26]</sup>

DING等人<sup>[42]</sup>于2007年推导出了内腔主动调Q速率方程<sup>[43]</sup>,于2011年建立了主动调Q腔内倍频速率方程。2012年,DING和LIU等人<sup>[44-45]</sup>推导出被动调Q腔内倍频速率方程。

2007年,LIU等人<sup>[46]</sup>首次报道了LD抽运的c切Nd:VO<sub>4</sub>自喇曼腔内倍频调Q激光器研究实验。他们选用声光调Q技术,KTP倍频得到589.4nm黄光激光。在抽运功率7.56W、脉冲重复频率15kHz的条件下,黄光激光平均输出功率达151mW。

在晶体结构研究方面,中国科学院福建物质结构

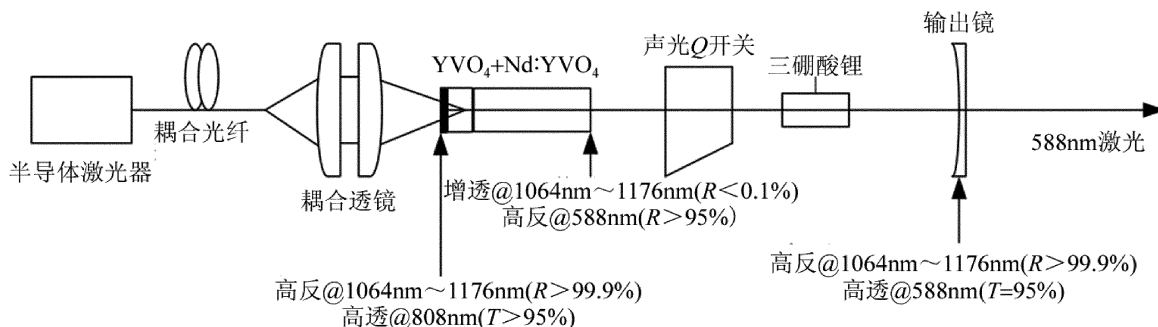


图 6 ZHU 等人所设计的激光器原理图<sup>[47]</sup>

研究所研究了键合晶体并将其应用于自喇曼激光器，键合晶体的结构在充分利用自喇曼晶体的受激喇曼效应的作用长度的同时，更能有效地减轻热效应。ZHU 等人<sup>[47]</sup>于 2009 年报道了利用 2mm + 18mm 的单端键合 YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的主动调 Q 自喇曼激光器，倍频晶体选用 LBO，通过控制 LBO 温度实现内腔倍频，得到 588nm 黄光激光。他们在键合晶体入射端镀膜替代激光器输入镜，通过减少腔内元件减小插入损耗。在抽运功率为 23.5W 时，黄光激光的平均功率达 5.7W，原理图如图 6 所示。图中  $R$  表示反射率， $T$  表示透过率。之后他们又采用了 30mm 长的键合 YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub> 晶体，在抽运功率 26.5W，脉冲频率 110kHz 条件下，黄光激光平均功率提升至 7.93W，光光转换效率提升至了 30%，斜率效率高达 43%<sup>[48]</sup>。同年，OMATSU 等人<sup>[49]</sup>报道了被动调 Q 式复合 Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 自喇曼黄光激光器实验，原理图如图 7 所示。选用 Cr:YAG 作为被动调 Q 装置，其阈值降至 3.5W，抽运功率为 4.5W 时，黄光输出功率达 264mW，光光转换效率为 5.9%。相比 ZHU 等人所报道的结果，OMATSU 所报道的实验阈值低一个数量级，但是转换效率偏低，二者主要区别在于调 Q 装置以及腔内黄光高反膜的镀膜位置不同。次年，ZHU 等人<sup>[50]</sup>又选用 c 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为自喇曼晶体，选用 KTP 腔内倍频，调 Q 方式选用声光调 Q，得到 589nm 的黄光激光。在抽运功率 11.2W，脉冲调 Q 重复频率 10kHz 时，黄光输出最大功率为 570mW，光光转换效率约为 5.1%。

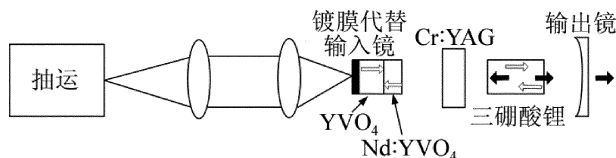


图 7 OMATSU 等人所设计的激光器原理图<sup>[49]</sup>

2011 年，GUO 等人<sup>[51]</sup>选用 30mm 长的键合 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 作为自喇曼晶体，倍频晶体选

用长度为 15mm 的 LBO，调 Q 方式选用声光调 Q，在抽运功率为 65W，脉冲重复频率 50kHz 条件下，587nm 黄光激光功率高达 8.05W，其转换率达 12.38%。

2013 年，DU 等人<sup>[52]</sup>研究了 3mm × 3mm × 30mm  $\alpha$  切键合 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 的自喇曼激光器，调 Q 方式为主动调 Q，和频晶体选用 LBO，在声光调 Q 与 LBO 之间加入一内置腔镜降低黄光的反向损耗，在抽运功率 32W，脉冲重复频率 30kHz 时，559nm 激光功率为 3.55W，其转换效率达 11%。同年，天津大学 SHANG<sup>[39]</sup>报道了共振抽运实验，在其 880nm 抽运输出 1176nm 斯托克斯光实验研究基础上加入 LBO 倍频晶体，在抽运功率 19.05W，脉冲重复频率 120kHz 的条件下，黄光激光功率为 2.03W。

2015 年，SU 等人<sup>[53]</sup>选用 Nd:YVO<sub>4</sub> 作为自喇曼晶体，和频晶体选用 KTP，调 Q 方式选用声光主动调 Q，在抽运功率 13.7W，脉冲重复频率 40kHz 条件下，560nm 的黄光激光的输出功率为 0.9W，光光转换效率为 6.6%。

2016 年，SHEN 等人<sup>[54]</sup>报道了被动调 Q 自喇曼激光器，选用 c 切 Nd:GdVO<sub>4</sub> 作为激光自喇曼晶体，选用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 为被动调 Q 开关，通过 LBO 外腔倍频，在抽运功率 10W、脉宽 270ps、重复频率 13kHz 条件下，1.17 $\mu$ m 1 阶斯托克斯光平均功率达 430mW，但 0.58 $\mu$ m 黄光激光平均输出功率仅为 8.96mW。

2.3.2 锁模式自喇曼黄光激光器 SPENCE 等人<sup>[55]</sup>于 1991 年首次在实验中发现自锁模现象，之后经理论分析与实验研究发现其与克尔效应形成的克尔透镜有直接关系，因此自锁模又称为克尔透镜锁模。克尔透镜效应是指谐振腔内光束的空间分布引起强度分布的不同，再利用激光增益介质本身的克尔效应引发的光束自聚焦与激光器内的光阑结合，从而对光束进行幅度调制，实现锁模。光阑既可以是直接在谐振腔内合适位置处增加一个物理光阑（硬光阑），也可以是激光

晶体内呈高斯分布的增益区域所构成的增益光阑(软光阑)。在实验中,激光晶体上高斯增益分布作为软光阑。通过选择合适的抽运光斑,达到足够的功率密度,便可以提供足够的非线性增益调制以实现自聚焦。

PENG 等人<sup>[56]</sup>于2012年报道了被动调Q式锁模自喇曼激光器,选用Nd:GdVO<sub>4</sub>同时作为激光晶体和喇曼晶体,Cr:YAG为Q开关,在抽运功率10W、锁模脉冲频率0.9GHz的条件下,通过LBO将1阶斯托克斯光外腔倍频得到的586.5nm黄光激光功率为6mW,原理图如图8所示。

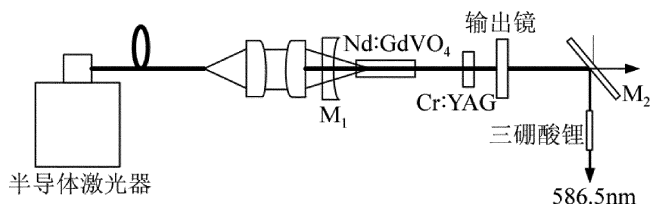


图8 PENG等人所设计的激光器原理图<sup>[56]</sup>

2016年,LI等人<sup>[57]</sup>首次报道了自锁模Nd:GdVO<sub>4</sub>自喇曼激光器,选用Nd:GdVO<sub>4</sub>作为自喇曼晶体,选用LBO外腔倍频,在17W抽运功率条件下,586.5nm黄光激光功率为7.65mW,原理图如图9所示。2017年,他们又改用Nd:VO<sub>4</sub>作为自喇曼晶体,在抽运功率12W条件下,588nm黄光激光功率仅为6mW<sup>[58]</sup>。

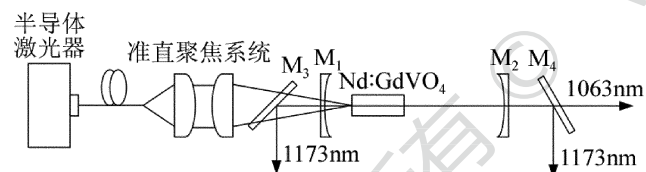


图9 LI等人所设计的激光器原理图<sup>[57]</sup>

在这类激光器中,腔内唯一的晶体同时作为激光晶体、喇曼晶体以及锁模元件,腔型搭建更简单,无需考虑偏振,并最大限度地缩小了激光器体积,在小型化设计中达到了极致。相对于激光晶体、喇曼晶体和锁模元件分离的激光器,自锁模自喇曼激光器由于减少了多块晶体分离时因振动导致的不稳定因素,从而具有更高的稳定性。基频光和1阶斯托克斯光在同一晶体内更容易实现模式匹配,从而降低损耗,提高转化效率。

目前锁模式自喇曼激光器的研究仍集中在1阶斯托克斯光<sup>[54-55]</sup>,黄光的报道很少,有关黄光的报道大多是在完成1阶斯托克斯光实验之后,再加上外腔倍频产生黄光。外腔能量密度较内腔小,使倍频效率偏低,从而黄光激光的转换率不高。其无法腔内倍频的原因在于倍频过程引起的“削峰”效应,会导致锁模脉

冲展宽,从而限制了锁模激光器在黄光激光领域的研究与应用。

### 3 结束语

按激光器工作方式总结了近10年自喇曼黄光激光器的报道及研究进展。对比不同类型的激光器,锁模式自喇曼激光器能实现1阶斯托克斯光的高转换率,但其外腔倍频的特点使得黄光转换率并不理想;调Q式自喇曼激光器,输出光脉冲峰值强,其黄光转换率也相对较高,但是调Q装置的加入会增大腔长,导致激光器结构复杂化,调Q式激光器更适用于高功率黄光的应用研究;连续式自喇曼激光器最大的优势在于其紧凑的结构、低阈值,便于设计小型化、低成本的黄光激光器,在对黄光功率要求不高的生物医疗相关领域的应用潜力十分巨大。在激光器结构研究方面,通过镀膜来替代激光器谐振腔腔镜的方法逐渐被人们广泛采用,尤其在低功率激光器研究上,对降低激光器阈值作用明显,同时使激光器结构更加紧凑、小型化;在晶体材料研究方面,键合晶体不仅能有效降低热效应,而且能增加晶体受激喇曼散射的作用长度,相比于普通结构的晶体抗热负载能力更强,提高了激光器的性能。自喇曼黄光激光器今后的研究的趋势是多方法并用,不断优化激光器结构、改进晶体材料,满足低阈值、高转换率、低成本以及小型化等需求。自喇曼黄光激光器应用的主要领域主要集中于对激光功率需求不高的生物医疗领域,研究的重点更偏向于高转换率、高稳定性、低成本及小型化。

### 参 考 文 献

- [1] JONES K J. Progress in Na laser guide star adaptive optics and lessons learned[J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 9950: 995011.
- [2] SADICK N S, WEISS R. The utilization of a new yellow light laser (578nm) for the treatment of class I red telangiectasia of the lower extremities [J]. Dermatologic Surgery, 2002, 28(1): 21-25.
- [3] KAPOOR V, KARPOV V, LINTON C, et al. Solid state yellow and orange lasers for flow cytometry[J]. Cytometry Part, 2008, A73(6): 570-577.
- [4] YUAN Y Zh, LI B, GUO X Y. Laser diode pumped Nd:YAG crystals frequency summing 589nm yellow laser [J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(2): 710-712.
- [5] LIU Y, LIU Z, CONG Z, et al. Quasi-continuous-wave 589nm radiation based on intracavity frequency-doubled Nd:GGG/BaWO<sub>4</sub>, Raman laser[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 81(28): 184-188.
- [6] FENG Y, CALIA D B, HACKENBERG W, et al. Design of a narrow band 589nm laser by direct Raman shift in single mode fiber[J]. Proceedings of the SPIE, 2006, 6272: 62724A.
- [7] LEE A J, PASK H M, OMATSU T, et al. All-solid-state continuous-wave yellow laser based on intracavity frequency-doubled self-Raman



- laser action[J]. *Applied Physics*, 2007, B88(4):539-544.
- [8] WOODBURY E J, NG W K. Ruby laser operation in near IR[J]. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 1962, 50(11):2367.
- [9] PIPER J A, PASK H M. Crystalline Raman lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3):692-704.
- [10] PASK H M. The design and operation of solid-state Raman lasers [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, 27(1):3-56.
- [11] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, *et al.* Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(19):1831-1833.
- [12] KAMINSKII A A, UEDA K I, EICHLER H J, *et al.* Tetragonal vanadates  $\text{YVO}_4$  and  $\text{GdVO}_4$ -new efficient  $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers[J]. *Optics Communications*, 2001, 194(1):201-206.
- [13] CHEN Y F. Compact efficient all-solid-state eye-safe laser with self-frequency Raman conversion in a  $\text{Nd:YVO}_4$  crystal. [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(18):2172-2174.
- [14] CHEN Y F. Efficient subnanosecond diode-pumped passively  $Q$ -switched  $\text{Nd:YVO}_4$  self-stimulated Raman laser [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(11):1251-1253.
- [15] CHEN Y F. High-power diode-pumped actively  $Q$ -switched  $\text{Nd:YVO}_4$  self-Raman laser; influence of dopant concentration[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(16):1915-1917.
- [16] CHEN Y F. Efficient 1521nm  $\text{Nd:GdVO}_4$  Raman laser [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22):2632-2635.
- [17] CHEN Y F. Compact efficient self-frequency Raman conversion in diode-pumped passively  $Q$ -switched  $\text{Nd:GdVO}_4$  laser [J]. *Applied Physics*, 2004, B78(6):685-687.
- [18] JIANG P, DING X, LI B, *et al.* 9.80W and 0.54mJ actively  $Q$ -switched  $\text{Nd:YAG/Nd:YVO}_4$  hybrid gain intracavity Raman laser at 1176nm[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4):3387-3393.
- [19] WU J, WU Sh F, ZHANG G, *et al.* The influence of stress birefringence on output power of  $\text{Nd:YVO}_4$  [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(6):649-651 (in Chinese).
- [20] DONG W W, LI L, SHI P, *et al.* Thermal effect of  $\text{Nd:GdVO}_4$  crystal end-pumped by fiber coupled diode laser. [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(6):633-637 (in Chinese).
- [21] DEKKER P, PASK H M, SPENCE D J, *et al.* Continuous-wave, intracavity doubled, self-Raman laser operation in  $\text{Nd:GdVO}_4$  at 586.5nm[J]. *Optics Express*, 2007, 15(11):7038-7046.
- [22] LEE A J, PASK H M, OMATSU T, *et al.* All-solid-state continuous-wave yellow laser based on intracavity frequency-doubled self-Raman laser action[J]. *Applied Physics*, 2007, B88(4):539-544.
- [23] LEE A J, PASK H M, DEKKER P, *et al.* High efficiency, multi-watt CW yellow emission from an intracavity-doubled self-Raman laser using  $\text{Nd:GdVO}_4$  [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26):21958-21963.
- [24] LEE A J, PASK H M, SPENCE D J, *et al.* Efficient 5.3W CW laser at 559nm by intracavity frequency summation of fundamental and first-Stokes wavelengths in a self-Raman  $\text{Nd:GdVO}_4$  laser. [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(5):682-684.
- [25] LÜ Y F, CHENG W B, XIONG Z, *et al.* Efficient CW laser at 559nm by intracavity sum-frequency mixing in a self-Raman  $\text{Nd:YVO}_4$  laser under direct 880nm diode laser pumping [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(11):787-789.
- [26] LÜ Y F, ZHANG X H, LI Sh T, *et al.* All-solid-state cw sodium  $\text{D}_2$  resonance radiation based on intracavity frequency-doubled self-Raman laser operation in double-end diffusion-bonded  $\text{Nd}^{3+}:\text{LuVO}_4$  crystal[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17):2964-2966.
- [27] LEE A J, SPENCE D J, PIPER J A, *et al.* A wavelength-versatile, continuous-wave, self-Raman solid-state laser operating in the visible [J]. *Optics Express*, 2010, 18(19):20013-20018.
- [28] XIA J, LÜ Y F, ZHANG X H, *et al.* All-solid-state CW  $\text{Nd:KGd(WO}_4)_2$  self-Raman laser at 561nm by intracavity sum-frequency mixing of fundamental and first-Stokes wavelengths[J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(1):21-23.
- [29] ZHU H Y, ZHANG G, DUAN Y M, *et al.* Compact continuous-wave  $\text{Nd:YVO}_4$  laser with self-Raman conversion and sum frequency generation[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(5):054202.
- [30] ANDREW J L, HELEN M P, JAMES A P, *et al.* Efficient, miniature, CW yellow source based on an intracavity frequency-doubled  $\text{Nd:YVO}_4$  self-Raman laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8):1428-1430.
- [31] LEE A J, PASK H M, PIPER J A, *et al.* 330mW CW yellow emission from miniature self-Raman laser based on direct HR-coated  $\text{Nd:YVO}_4$  crystal [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. New York, USA: IEEE, 2011:1250-1252.
- [32] LI X L, PASK H M, LEE A J, *et al.* Miniature wavelength-selectable Raman laser; new insights for optimizing performance[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25):25623-25631.
- [33] LIN J, PASK H M.  $\text{Nd:GdVO}_4$  self-Raman laser using double-end polarised pumping at 880nm for high power infrared and visible output[J]. *Applied Physics*, 2012, B108(1):17-24.
- [34] LI X, LEE A J, HUO Y, *et al.* Managing SRS competition in a miniature visible  $\text{Nd:YVO}_4/\text{BaWO}_4$  Raman laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17):19305-19312.
- [35] TAN Y, FU X H, ZHAI P, *et al.* An efficient CW laser at 560nm by intracavity sum-frequency mixing in a self-Raman  $\text{Nd:LuVO}_4$  laser [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(4):045806.
- [36] DUAN Y M, ZHU H Y, FENG Zh R, *et al.* Laser diode end-pumped  $\text{Nd:YVO}_4$  self-Raman laser at 559nm with sum-frequency mixing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5):0502002 (in Chinese).
- [37] KORES C C, PASK H M, NETO J J, *et al.* Continuous yellow-orange laser based on a diode-side-pumped  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  self-Raman laser [C]// Advanced Solid State Lasers. Berlin, Germany: Optical Society of America, 2015:ATH2A.17.
- [38] DEMIDOVICH A A, GRABTCHIKOV A S, LISINETSII V A, *et al.* Continuous-wave Raman generation in a diode-pumped  $\text{Nd}^{3+}:\text{KGd(WO}_4)_2$  laser[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13):1701-1703.
- [39] SHANG C. Research on intra-cavity double frequency and  $Q$ -switched  $\text{Nd:YVO}_4$  self-Raman laser at 588nm in-band pumped under 880nm [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014:1-22 (in Chinese).
- [40] SU F F, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Diode pumped actively  $Q$ -switched  $\text{Nd:YVO}_4$  self-Raman laser [J]. *Journal of Physics*, 2006, D39(10):2090.
- [41] DING Sh H, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Theoretical and experimental study on the self-Raman laser with  $\text{Nd:YVO}_4$  crystal[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, D42(9):927-933.
- [42] DING Sh H, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Numerical modelling of passively  $Q$ -switched intracavity Raman lasers [J]. *Journal of*

- Physics, 2007, D40(9):2736.
- [43] DING Sh H, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Modeling of actively *Q*-switched intracavity Raman lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(8):722-729.
- [44] DING S, WANG P, QING X, *et al.* Analysis of actively *Q*-switched intracavity frequency-doubled solid-state yellow Raman lasers [J]. Applied Physics, 2011, B104(4):819-827.
- [45] LIU Y N. Theoretical and experimental study on LD pumped passively *Q*-switched intracavity frequency-doubled Raman yellow laser [D]. Yantai: Yantai University, 2012:1-11(in Chinese).
- [46] LIU B, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Diode-pumped intracavity frequency-double Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman yellow laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(10):1777-1780(in Chinese).
- [47] ZHU H Y, DUAN Y M, ZHANG G, *et al.* Yellow-light generation of 5.7W by intracavity doubling self-Raman laser of YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub> composite[J]. Optics Letters, 2009, 34(18):2763-2765.
- [48] ZHU H Y, DUAN Y M, ZHANG G, *et al.* Efficient second harmonic generation of double-end diffusion-bonded Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser producing 7.9W yellow light[J]. Optics Express, 2009, 17(24):21544-21550.
- [49] OMATSU T, LEE A, PASK H M, *et al.* Passively *Q*-switched yellow laser formed by a self-Raman composite Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub>, crystal[J]. Applied Physics, 2009, B97(4):799-804.
- [50] ZHU H Y, ZHANG G, ZHANG Y J, *et al.* LD end-pumped c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 589nm generated by self-Raman conversion and frequency doubling[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(9):373-377(in Chinese).
- [51] GUO Y Y, ZHANG L, HUANG G, *et al.* High-power diode-end-pumped composite YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub>, self-Raman yellow laser[C]//Communications and Photonics Conference and Exhibition. New York, USA: IEEE, 2011:1-6.
- [52] DU Ch L, GUO Y Y, YU Y Q, *et al.* High power *Q*-switched intracavity sum-frequency generation and self-Raman laser at 559nm[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 47(7):43-46.
- [53] SU F F, ZHANG X Y, WANG W T, *et al.* Diode-pumped intracavity yellow-green Raman laser at 560nm with sum-frequency-generation [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 66(6):122-124.
- [54] SHEN G, LI Z H, HAN M. Fabrication of narrow pulse passively *Q*-switched self-stimulated Raman laser with c-cut Nd:GdVO<sub>4</sub>[J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(6):430-432.
- [55] SPENCE D E, KEAN P N, SIBBETT W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser [J]. Optics Letters, 1991, 16(1):42-44.
- [56] PENG J Y, ZHENG Y, ZHENG K, *et al.* Passively *Q*-switched mode locking in a compact Nd:GdVO<sub>4</sub>/Cr:YAG self-Raman laser [J]. Optics Communications, 2012, 285(24):5334-5336.
- [57] LI Z H, PENG J Y, YAO J Q, *et al.* Efficient self-stimulated Raman scattering with simultaneously self-mode-locking in a diode-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. Applied Optics, 2016, 55(32):9000-9005.
- [58] LI Z H, PENG J Y, YAO J Q, *et al.* The characteristics of Kerr-lens mode-locked self-Raman Nd:YVO<sub>4</sub>, 1176nm laser[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 89(1):1-5.