

文章编号: 1001-3806(2017)01-0051-05

## 具有两个瑞利长度三镜折叠腔的设计

薛竣文, 方宇杰, 谢海军, 苏秉华

(北京理工大学珠海学院 信息学院 电子工程系, 珠海 519088)

**摘要:** 为了提高倍频效率、分析倍频晶体内束腰位置对倍频效率的影响, 根据基模高斯光束传输特性, 结合稳定三镜折叠腔中端镜处等相位面曲率半径与腔镜曲率半径相等这一特点, 在激光光束传输的合适位置上, 放入与等相位面曲率半径相同的腔镜, 构成倍频晶体内具有两个瑞利长度的三镜折叠腔, 提高了倍频效率。对比了相同端镜构成的具有一个瑞利长度和两个瑞利长度谐振腔, 相对于分臂长度变化的稳区范围。结果表明, 使用 5W 光纤耦合 880nm 激光二极管, 端面抽运 3mm×3mm×5mm 的 Nd:YVO<sub>4</sub>, 采用 10mm×2.1mm×0.5mm 的 PPMgOLN 为倍频晶体, 使用具有两个瑞利长度的谐振腔比具有一个瑞利长度的谐振腔, 整体提高倍频效率约 18%, 两种腔型的光束质量相同, 倍频光与基频光偏振方向一致, 输出稳定的低噪声绿光, 验证了谐振腔设计的有效性。该研究对腔内倍频效率的提高是有帮助的。

**关键词:** 激光光学; 谐振腔; 等相位面; 瑞利长度

**中图分类号:** TN248.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.01.011

## Design of three-mirror-folded cavity with two Rayleigh length

XUE Junwen, FANG Yujie, XIE Haijun, SU Binghua

(Department of Electrical Engineering, School of Information Technology, Beijing Institute of Technology, Zhuhai 519088, China)

**Abstract:** In order to improve the doubling frequency efficiency, the influence of beam waist position in frequency doubling crystal on the frequency doubling efficiency was analyzed. According to the propagation property of fundamental mode Gaussian beam, combining with the characteristic that equal phase plane of end mirror and cavity mirror having the same radius of curvature in the stable three-mirror-folded cavity, cavity mirror with the same radius of curvature was placed on the proper position and three-mirror-folded cavity with two Rayleigh length was realized. The efficiency of frequency doubling was improved. The stability regions of the cavity with one and two Rayleigh length were compared and the same stability regions were obtained. The experimental results show that when 5W fiber coupling 880nm laser diode is used to pump 3mm×3mm×5mm Nd:YVO<sub>4</sub> and quasi-phase matched PPMgOLN with dimension of 10mm×2.1mm×0.5mm is used as frequency doubling crystal, the overall conversion efficiency is improved about 18%. For the two types of cavity, beam quality is the same. The polarization direction of doubling frequency light is consistent with that of fundamental frequency light. Stable low noise green laser is obtained. The effectiveness of resonant cavity design is verified. The study is helpful to improve the efficiency of intracavity frequency doubling.

**Key words:** laser optics; resonator; equal phase plane; Rayleigh length

## 引言

绿光激光在激光显示、非线性光学、海洋探测、全息、医疗、可调谐激光器抽运等方面有着重要的应用。目前对于连续绿光激光产生的方案主要有激光二极管

直接产生绿光<sup>[1]</sup>、固体或光纤激光器腔外单程通过周期极化晶体倍频产生绿光<sup>[1-2]</sup>、外腔谐振产生绿光<sup>[3]</sup>、激光二极管抽运半导体芯片腔内倍频产生绿光<sup>[4]</sup>、激光二极管抽运晶体工作物质腔内倍频产生绿光<sup>[5-6]</sup>等。最后一种方案以其易于实现而获得广泛研究和开发。

激光管二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 腔内倍频绿光激光器中, 为了提高效率, 在非线性晶体、抽运源波长等方面进行了改进。如使用有效非线性系数大且损伤阈值较高的 PPMgOLN 代替有效非线性系数相对较小的 LBO<sup>[6]</sup>; 使用 880nm 或 888nm 激光二极管直接抽运, 提高抽运量子效率的同时降低了工作物质热效应<sup>[7-8]</sup>。而在谐振腔方面, 往往使用结构相对简单的三镜折叠腔, 将工作物质和倍频晶体在光路上分开, 使具有较大

基金项目: 广东省高等学校优秀青年教师培养计划资助项目(YQ2013208); 广东省高等学校优秀青年创新人才培养计划育苗工程(自然科学)资助项目(2013LYM\_0101); 北京理工大学珠海学院科研发展基金资助项目(2013JS02)

作者简介: 薛竣文(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为新型激光器及其应用。

E-mail: xuejunwen001@126.com

收稿日期: 2015-12-10; 收到修改稿日期: 2016-03-21

光斑的一路放置工作物质充分利用工作物质内的能量,使具有较小光斑的一路放置倍频晶体提高倍频效率的同时构成双通倍频。然而在现有的谐振腔中,倍频晶体内的光束一般仅有一个瑞利长度<sup>[5,9-13]</sup>(也称共焦长度,即束腰到 $\sqrt{2}$ 束腰位置之间的距离),将影响倍频效率<sup>[14]</sup>。

通过分析倍频晶体内束腰位置对倍频效率的影响,根据基模高斯光束传输特性,结合稳定三镜折叠腔中端镜处等相位面曲率半径与腔镜曲率半径相等这一特点,在激光光束传输的合适位置上,放入与等相位面曲率半径相同的腔镜,构成倍频晶体内具有两个瑞利长度的三镜折叠腔,以提高倍频效率。对比了相同端镜构成的具有一个瑞利长度和两个瑞利长度谐振腔,相对于第 2 个分臂长度变化的稳区范围。实验上使用 5W 光纤耦合 880nm 激光二极管,端面抽运  $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 5\text{mm}$  的 Nd:YVO<sub>4</sub>,采用  $10.0\text{mm} \times 2.1\text{mm} \times 0.5\text{mm}$  的 PPMgOLN 为倍频晶体,研究了两种腔型的倍频效率、光束质量、偏振、噪声等特性,验证了谐振腔设计的有效性。

## 1 理论分析

### 1.1 束腰位置对倍频效率影响

当高斯光束聚焦在非线性晶体内进行倍频时,倍频光功率正比于函数  $h_m(B, \xi, \mu)$ <sup>[14]</sup>。对于周期极化晶体,双折射参量  $B=0$ 。以束腰半径  $w_0=50\mu\text{m}$  的高斯光束聚焦到长度为 10mm 的 PPMgOLN 为例,此时聚焦参量  $\xi \approx 0.68$ 。固定  $B$  和  $\xi$  这两个参量,绘制出  $h_m(B, \xi, \mu)$  关于束腰在晶体位置参量  $\mu$  的关系,如图 1 所示。为方便分析,已对最大值 0.5244 归一化。其中  $\mu=0$  对应束腰位于晶体中心; $\mu=-1$  或  $\mu=1$  对应束腰位于晶体的前或后端面处; $-1 < \mu < 0$  或  $0 < \mu < 1$  对应束腰位于晶体内部但偏离中心靠前或靠后的位置; $\mu < -1$  或  $\mu > 1$  对应束腰位于晶体之前或之后。

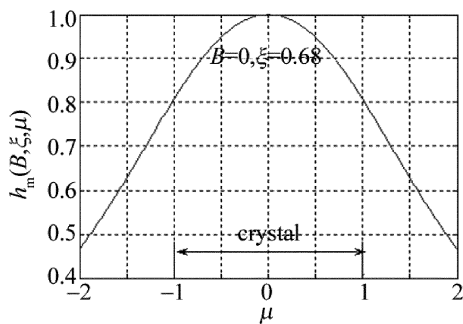


Fig. 1 Relationship between  $h_m(B, \xi, \mu)$  and focus position parameter  $\mu$

从图 1 中可以看出,在三镜折叠腔中如果倍频晶体内部高斯光束只具有一个瑞利长度,此时束腰一般位于晶体端面附近,相应的倍频效率比束腰位于晶体中

心要低近 20%。因此为了获得高效率频率转换,希望腔内高斯光束具有两个瑞利长度,使倍频晶体中心置于束腰位置处。

### 1.2 基模高斯光束传输

基模高斯光束传输时,以束腰位置为坐标原点,位置  $z$  处等相位面曲率半径  $R(z)$  为<sup>[15]</sup>:

$$R(z) = Z_0 \left( \frac{z}{Z_0} + \frac{Z_0}{z} \right) \quad (1)$$

式中,  $Z_0$  是波长为  $\lambda$ 、束腰为  $w_0$  的激光在真空中的瑞利长度,数值为  $Z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ 。

基模高斯光束在位置  $z$  处的光斑半径  $w(z)$  为<sup>[16]</sup>:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{z}{Z_0} \right)^2} \quad (2)$$

选取激光波长  $\lambda = 1064\text{nm}$ ,束腰半径  $w_0 = 50\mu\text{m}$ ,对应的瑞利长度  $Z_0 = 7.4\text{mm}$ 。利用(1)式和(2)式绘制的等相位面曲率半径和光斑大小随位置  $z$  的变化关系如图 2 所示。从图形可以看出,等相位曲率半径  $R(z)$  为关于位置  $z$  的非对称抛物线。在瑞利长度  $z = Z_0$  处取最小值为  $2Z_0$ ;在束腰位置  $z = 0$  处为平面;在无穷远  $z = \infty$  处也为平面;在  $0 < z < Z_0$  和  $Z_0 < z < \infty$  范围为球面,但前者较后者的变化要快得多。即高斯光束在  $z > 0$  范围整体变化过程为平面波变为曲率半径最小的球面波,再变为平面波,那么在  $0 < z < Z_0$  和  $Z_0 < z < \infty$  范围内,必然有两个位置对应的等相位面的曲率半径是相同的。由于对称性,在  $z < 0$  的范围与上面的情况相同。

分析(1)式可以看到,当已知等相位面曲率半径  $R(z)$  和瑞利长度  $Z_0$  时(对应激光的束腰半径  $w_0$ ),则公式为关于  $z$  的一元二次方程。满足  $R(z) > 2Z_0$  条件时有两个根,这两个根分别对应图 2 中瑞利长度位置(7.4mm)两侧的两个位置;满足  $R(z) = 2Z_0$  具有两个相同的根,对应图 2 中抛物线的最低点位置;满足  $R(z) < 2Z_0$  条件时无根。结合图 2 和(1)式,当  $R(z)$  取比较接近  $2Z_0$  时,两个根比较接近,这为选取合适的

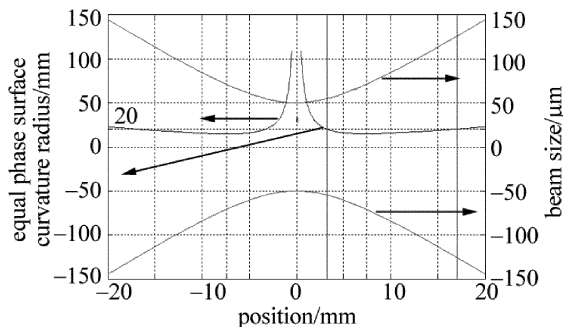


Fig. 2 Relationship between equal phase curvature radius, spot radius and position

端镜曲率半径和设计合适臂长的三镜折叠腔提供依据。同时从图 2 的光斑大小  $w(z)$  随位置  $z$  的变化可以看出,此高斯光束具有两个瑞利长度。

### 1.3 谐振腔设计

无源三镜折叠腔及其内的光束传输情况如图 3 所示,其中端镜  $M_1$  为平面镜,  $M$  为折叠镜,其曲率半径取  $R = 50\text{mm}$ ,两者之间的距离  $L_1 = 65\text{mm}$ 。端镜  $M_2$  的曲率半径  $R_2$  及其与  $M$  之间的距离  $L_{2x}$  是着重需要仔细考虑的。其中  $L_{20}, L_{21}, L_{22}$  分别为束腰与  $M$  之间的距离、具有一个瑞利长度、具有两个瑞利长度时第二分臂的长度。而  $M_{20}, M_{21}, M_{22}$  分别为相应等相位面处放置的腔镜。显然  $M_{20}$  处腔镜为平面镜,取  $L_{20} = 35\text{mm}$ ,在以上参量下,根据谐振腔的自现条件,该三镜腔中两分臂内的束腰光斑半径分别约为  $100\mu\text{m}$  和  $50\mu\text{m}$ 。

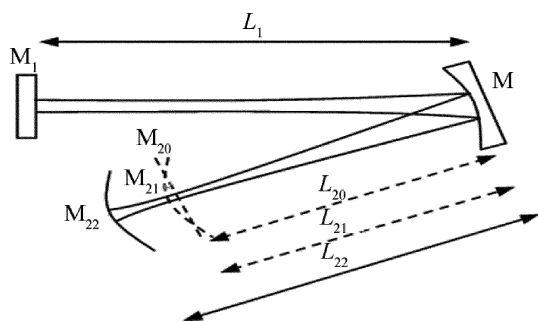


Fig. 3 Passive three-mirror-folded cavity

接下来将第二分臂光束继续传输,根据三镜折叠腔中端镜处高斯光束等相位面曲率半径与端镜曲率半径相同的特点,由(1)式在合适的等相位面位置放置具有相同曲率半径的腔镜,构成具有两个瑞利长度的三镜折叠腔,并利用(2)式计算端镜处的光斑半径,如表 1 所示。表中  $w_{21}, w_{22}$  分别表示具有一个和两个瑞利长度时腔镜上的光斑半径。当然如果在图 3 中的  $M_{20}$  处右侧放置与光束等相位面曲率半径相同的凸面镜,仍可以构成稳定的谐振腔,不过此时在这一分臂上将具有不足一个瑞利长度的高斯光束。类似的,第一分臂上也可以构成具有一个、两个或不足一个瑞利长度的高斯光束。

Table 1 Cavity parameters when beam waist radius is  $50\mu\text{m}$

No.	$R_2/\text{mm}$	$L_{21}/\text{mm}$	$L_{22}/\text{mm}$	$w_{21}/\mu\text{m}$	$w_{22}/\mu\text{m}$
1	20	38.4	51.7	55	122
2	50	36.2	83.9	51	332
3	100	35.6	134.5	51	671
4	200	35.3	234.8	50	1345
5	500	35.2	534.9	50	3360

从表 1 中可以看出,当腔镜  $M_2$  的曲率半径取为  $20\text{mm}$  时,第二分臂长度取  $38.4\text{mm}$  和  $51.7\text{mm}$ ,使得腔内具有一个和两个瑞利长度,并且腔镜上的光斑大

小适中分别为  $55\mu\text{m}$  和  $122\mu\text{m}$ ,此时腔内光束传输情况如图 4 所示。随着腔镜曲率半径的增加,等价于等相位面曲率半径的增加,具有一个瑞利长度的  $L_{21}$  越接近  $35\text{mm}$ ,即越接近束腰位置,具有两个瑞利长度的  $L_{22}$  越大,并接近  $R_2 + 35\text{mm}$ ,与图 2 中的变化相符,并且此时腔镜上的光斑变大,即需要适当增加  $M_2$  的横向尺寸,以免产生大的衍射损耗。

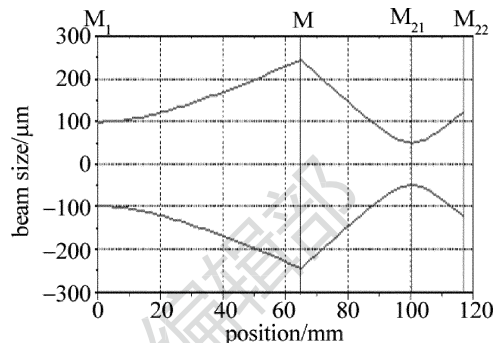


Fig. 4 Beam propagation in passive cavity

选取端镜  $M_2$  的曲率半径为  $20\text{mm}$  构成结构紧凑的三镜折叠腔,其与  $M$  之间的距离对  $M_1$  处光斑半径  $w_1$  和第二分臂束腰半径  $w_{02}$  的影响如图 5 所示。从图中可以看出,第二分臂长度在  $(25 \sim 40.7)\text{mm}$  范围构成具有一个瑞利长度的谐振腔,第二分臂长度在  $45\text{mm} \sim 60.7\text{mm}$  范围构成具有两个瑞利长度的谐振腔,稳区范围均为  $15.7\text{mm}$ 。

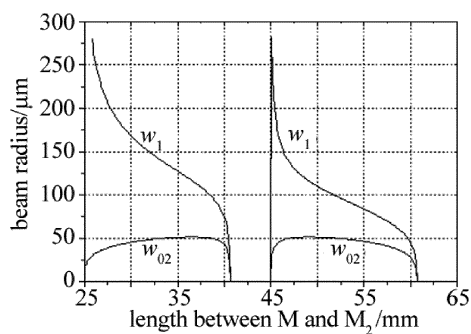


Fig. 5 Effect of second arm length on spot size in the cavity

## 2 实验结果及分析

抽运源采用  $5\text{W}$  光纤耦合  $880\text{nm}$  激光二极管,其纤芯直径为  $200\mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.11$ ,偏振比为  $2:1$ ,偏振方向垂直于工作台面。小的数值孔径使得在工作物质内的抽运光束发散角比较小,约为  $3^\circ$ ,利于抽运光与激光腔模之间的匹配。具有偏振的抽运光利于各向异性工作物质吸收,充分利用抽运光。抽运光经两片焦距为  $15\text{mm}$  的平凸透镜耦合光学系统近似  $1:1$  成像聚焦到工作物质中,对抽运光的透过率大于  $98\%$ 。使用  $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 5\text{mm}$  沿  $a$  轴切割的掺杂质量分数为  $0.005$  的  $\text{Nd:YVO}_4$  为工作物质,一面镀  $880\text{nm}$  高



透、1064nm 高反膜,此面构成三镜折叠腔的  $M_1$ ,另一面镀 880nm 的高反而 1064nm 的高透膜构成双程抽运源,以增加对抽运光的吸收,测得对抽运光的吸收率约为 86%。折叠镜  $M$  的曲率半径为 50mm,凹面镀 1064nm 高反、532nm 高透膜,平面镀 532nm 减反膜。按照上面的理论分析,端镜  $M_2$  的曲率半径为 20mm,凹面镀 1064nm/532nm 双高反膜。倍频晶体为 10mm × 2.1mm × 0.5mm 的 PPMgOLN,极化周期为 6.91  $\mu\text{m}$ ,工作温度约为 47℃。

为对比具有一个瑞利长度和两个瑞利长度谐振腔倍频效果,同时考虑工作物质和倍频晶体折射率,第一分臂  $L_1$  的长度取为 68mm,而第二分臂长度,根据图 5 和表 1 中数据,以 38.4mm 和 51.7mm 为中心前后移动,分别构成具有一个和两个瑞利长度的谐振腔。前后移动  $M_2$  是为了达到腔模与抽运光的模式匹配,充分利用抽运功率的同时获得好的腔模。经过仔细调节谐振腔及 PPMgOLN 晶体的温控,获得稳定的输出功率,结果如图 6 所示,具有两个瑞利长度的谐振腔功率平均比具有一个瑞利长度的谐振腔高约 18%,与图 1 的理论分析符合得较好。

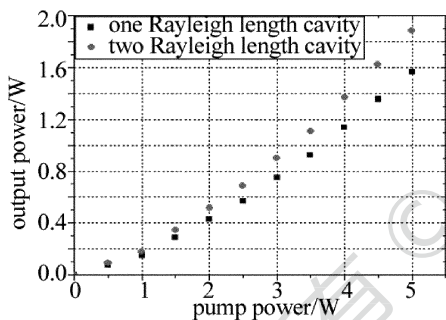


Fig. 6 Relationship between output power and input power

按照图 4 的设计,两种谐振腔设计的腔模一致,同时与抽运光模式匹配,绿光输出光斑为基模圆形,如图 7 所示。圆光斑的原因之一是三镜折叠腔的夹角选取得尽可能小(约 10°)减小了像散;另一个重要原因是准相位匹配中基频和倍频光均无走离,光斑不会像 I 类临界相位匹配 LBO 和 BBO 那样,在紧聚焦时造成

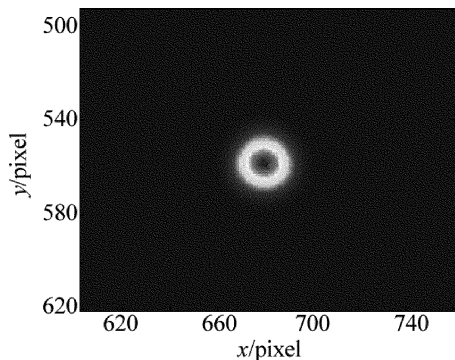


Fig. 7 Beam spot of green laser

倍频光呈现椭圆甚至线状<sup>[16-18]</sup>。

对两种腔型的基频光和倍频光输出偏振特性进行测试,结果与准相位匹配的两个基频 e 光光子产生一个倍频 e 光光子理论一致,基频光和倍频光的偏振方向相同,这为进一步研究三次谐波奠定基础。偏振特性的优良利于腔内倍频绿光噪声的降低<sup>[19]</sup>,如图 8 所示,输出为低噪声绿光。

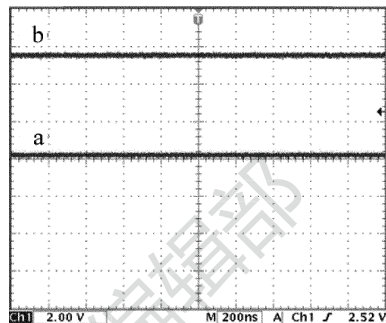


Fig. 8 Green laser noise

a—the response of the detector without laser b—the response of the detector with a laser

### 3 结 论

分析了倍频晶体内束腰位置对倍频效率的影响,根据基模高斯光束传输特性,结合稳定三镜折叠腔中端镜处等相位面曲率半径与腔镜的曲率半径相等这一特点,在激光光束传输的合适位置上,放入与等相位面曲率半径相同的腔镜,构成倍频晶体内具有两个瑞利长度的三镜折叠腔,以提高倍频效率。对比分析了相同端镜构成的具有一个瑞利长度和两个瑞利长度谐振腔相对于第 2 个分臂长度变化的稳区范围。实验上使用 5W 光纤耦合 880nm 激光二极管,端面抽运 3mm × 3mm × 5mm 的 Nd:YVO<sub>4</sub>,采用 10.0mm × 2.1mm × 0.5mm 的 PPMgOLN 为倍频晶体,在倍频效率、光束质量、偏振、噪声等方面进行了详细的测试,验证了谐振腔设计的有效性。所使用的方法可以推广到其它更为复杂的稳定谐振腔设计当中。

### 参 考 文 献

- [1] MILLER G D, BATCHKO R G, TULLOCH W M, *et al.* 42%-efficient single-pass cw second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(24): 1834-1836.
- [2] KUMAR S C, SAMANTA G K, DEVI K, *et al.* High-efficiency, multicrystal, single-pass, continuous-wave second harmonic generation[J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11152-11169.
- [3] PASCHOTTA R, KÜRZ P, HENKING R, *et al.* 82% Efficient continuous-wave frequency doubling of 1.06  $\mu\text{m}$  with a monolithic MgO:LiNbO<sub>3</sub> resonator[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(17): 1325-1327.
- [4] STEEGMUELLER U, KUEHNELT M, UNOLD H, *et al.* Progress in ultra-compact green frequency doubled optically pumped surface emitting lasers [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2009, 7198: 719807-719814.

- [5] MUKHOPADHYAY P K, SHARMA S K, RANGANATHAN K, *et al.* Efficient and high-power intracavity frequency doubled diode-side-pumped Nd:YAG/KTP continuous wave (CW) green laser[J]. *Optics Communications*, 2006, 259(2): 805-811.
- [6] FEI Q, ZOU X L, ZHOU H, *et al.* Compact and high-efficient intracavity frequency doubling solid-state TEM<sub>00</sub> green lasers by PPMgOLN crystal[J]. *Applied Laser*, 2014, 34(6): 598-601 (in Chinese).
- [7] ZHU P, LI D J, HU P X, *et al.* High efficiency 165W near-diffraction-limited Nd:YVO<sub>4</sub> slab oscillator pumped at 880nm[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(17): 1930-1932.
- [8] MCDONAGH L, WALLENSTEIN R. Low-noise 62W CW intracavity-doubled TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> green laser pumped at 888nm[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 802-804.
- [9] JIANG D Sh, ZHAO H, WANG J J, *et al.* 120W diode pumped green Nd:YAG laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(s1): 7-10 (in Chinese).
- [10] JI F, YAO J Q, ZHANG B G, *et al.* 2.1W continuous wave green light output by first-order quasi-phase-matched intracavity second harmonic generation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(10): 1314-1318 (in Chinese).
- [11] LIU J H, SHAO Z Sh, ZHANG H J, *et al.* Diode-laser-array end-pumped intracavity frequency-doubled 3.6W CW Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP green laser[J]. *Optics Communications*, 2000, 173(1/6): 311-314.
- [12] YANG K J, ZHAO Sh Zh, LI G Q, *et al.* Modeling of a diode-pumped acousto optically Q-switched intracavity doubling Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP green laser[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(11): 114203.
- [13] XUE Q H, ZHENG Q, BU Y K, *et al.* High-power efficient diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 457nm blue laser with 4.6W of output power[J]. *Optics Letters*, 31(8): 1070-1072.
- [14] BOYD G D, KLEINMAN E A. Parametric interaction of focused Gaussian light beam[J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, 39(8): 3597-3639.
- [15] LÜ B D. Laser optics-beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 98-102 (in Chinese).
- [16] TAN Ch Q, XUE Q H, JIA F Q, *et al.* LD-pumped Nd:YAG out-cavity fourth harmonic generation high power ultraviolet laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(9): 1289-1292 (in Chinese).
- [17] ZHENG B R, YAO Y Ch, HUANG Ch Y. Experiment of double-end-pumped intra-cavity triple frequency ultraviolet laser[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 155-157 (in Chinese).
- [18] TIAN M, WANG F, CHE Y. LD pumped QCW 355nm laser by extra-cavity sum-frequency-mixing using double synchronized wavelength lasers[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6): 804-806 (in Chinese).
- [19] XUE Q H, ZHENG Q, YE Z Q, *et al.* Analysis of eigenstates on LD-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP intracavity-doubled green laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(10): 877-880 (in Chinese).