

文章编号: 0253-2239(2004)04-481-4

激光二极管抽运被动调 Q 周期极化铌酸锂腔内 倍频激光特性的研究*

张少军¹ 王青圃^{2*} 徐现刚¹ 董春明¹ 张行愚² 李平² 张伟² 刘兆军² 李昀初²

(¹ 山东大学晶体材料研究所晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)
(² 山东大学光学系, 济南 250100)

摘要: 提出了将饱和吸收 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体被动调 Q 开关同时作为布儒斯特片在三镜 V 型折叠谐振腔中起像散补偿作用的腔内倍频设计方案。在连续激光二极管端面抽运情况下, 给出了 V 型谐振腔结构光束束腰半径和位置、像散补偿 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的厚度和谐振腔折光角度的设计方法以及计算公式。采用周期极化铌酸锂晶体作为倍频元件, 由于谐振腔内的基波和谐波具有相同的偏振方向, 避免了腔内双折射引起的绿光噪声问题, 得到了输出稳定的序列脉冲。在连续抽运功率为 500 mW 时, 得到了平均功率 42.7 mW 的脉冲绿光输出。

关键词: 激光技术; 被动调 Q ; 激光二极管抽运; 腔内倍频; 周期极化; LiNbO_3 晶体
中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Passively Q -Switched Periodically Poled LiNbO_3 Intracavity Frequency-Doubling Laser Pumped by Diode-Laser

Zhang Shaojun¹ Wang Qingpu² Xu Xiangang¹ Dong Chunming¹ Zhang Xingyu²
Li Ping² Zhang Wei² Liu Zhaojun² Li Yunchu²

(¹ Institute of Crystal Materials of Shandong University, State Key Lab.
of Crystal Materials, Jinan 250100
² Optics Department, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 11 February 2003; revised 23 September 2003)

Abstract: A folded 3-mirror laser resonator in which a $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal is employed as a saturable absorber for passively Q -switching and a Brewster plate to compensate astigmatism was designed. The resonator has small radius of laser waists, so it is very suitable to the laser diode pumped intercavity frequency-doubling lasers with quasi-phase-matched frequency-doubler. The expressions to calculate the radius and the place of laser waist, curvature of the mirrors used in the resonator, the thickness of a Brewster plate, and folding angle of the resonator were presented. The performance of continuous-wave laser diode pumped passively Q -switched PPLN intercavity frequency-doubling laser with the folded 3-mirror laser resonator was investigated. As the result that both fundamental and second harmonic waves have the same polarization, no green-noise problem exists. The pulse series of laser output are stable. The laser has the average output power 42.7 mW under the CW input power 500 mW.

Key words: laser technique; passively Q -switching; laser-diode pump; intracavity-frequency-doubling, periodic poling; LiNbO_3 crystal

* 国家自然科学基金(69978009)、教育部高校骨干教师、山东省自然科学基金资助课题。

** E-mail: qpwang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2003-02-11; 收到修改稿日期: 2003-09-23

1 引 言

目前, 具有输出窄脉冲(小于 100 ns)和高峰值功率(大于几个 kW)的小型绿光脉冲激光器在许多领域内有着广泛的需求, 如激光测距、激光雷达等。

虽然这种高功率、高重复率的绿光激光可以通过声光调 Q 的倍频激光器来获得,但其需要庞大、复杂而且功耗大的驱动设备和声光调 Q 器件,不适于激光二极管(LD)抽运的微小型激光器。随着 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的成熟,高重复率被动调 Q 技术的研究也取得了重要的进展^[1~3]。用激光二极管抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为被动调 Q 开关的激光器可容易地获得高重复率(kHz 到十几 kHz)窄脉冲(10 ns 量级)激光输出。

本研究采用连续激光二极管抽运的 V 型三镜谐振腔结构,增益介质 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 和饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体置于谐振腔的一个腔臂上,腔内倍频用的周期极化铌酸锂(PPLN)置于谐振腔的另一个臂腔上。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体在光路中同时起被动调 Q 和像散补偿^[4]双重作用。众所周知,掺 Nd 离子的激光增益介质对其倍频光具有很强的吸收,在三镜折叠腔中,倍频光不经过激光增益介质,避免了激光增益介质对倍频光的吸收,降低了热效应,使腔热稳定性有了很大提高。本文给出了有关 V 型谐振腔结构光束束腰半径和位置,像散补偿 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的厚度和谐振腔折光角度的设计方法以及计算公式。

周期极化的准相位匹配倍频器件(如 PPLN^[5], PPKTP^[6])可利用最大有效非线性系数,从而提高转换效率。由于基频光和倍频光具有相同的偏振方向,因而不存在双折射相位匹配倍频器件容易出现的模式跳跃和绿光噪声问题。产生绿光噪声问题的原因之一就是相互正交的偏振模之间的耦合^[7,8]。但由于制作工艺限制,周期极化的准相位匹配倍频晶体器件的通光孔径比较小($<1\text{ mm}$)。采用本文设计的三镜 V 型折叠腔可以灵活调节倍频晶体处

光腰半径,以满足基频光高功率密度要求和通光孔径小的限制。

2 三镜 V 型腔内倍频谐振腔的设计

三镜 V 型折叠腔存在 M_1M_2 和 M_2M_3 两个腔臂,相应的存在两个光腰(ω_1 和 ω_2)。在实验中,可以把增益介质 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 和倍频晶体分别放在两个光腰处。这样以来,一方面可以容易地在增益介质 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 中满足基模光斑略大于抽运光斑的匹配要求^[9],充分利用抽运光,保证单横模(TEM_{00})振荡;另一方面,可以将倍频晶体放在另一腔臂(M_2M_3)的瑞利长度之内,得到较大的基频光功率密度,提高倍频效率。反射镜 M_3 镀 1064 nm 和 532 nm 双高反膜可有效地反射后向传播的基频和倍频光,实现双向倍频、单向大功率输出。与直腔相比,折叠腔还有模参量调整灵活以及腔内有效空间大等优点。

三镜 V 型折叠腔结构图和实验装置图如图 1 所示。

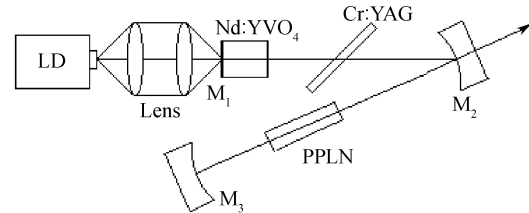


Fig. 1 Configuration of V-type resonator and experimental setup

由反射镜 M_1 、反射镜 M_2 和反射镜 M_3 构成的折叠腔的稳定性,可以用等效直腔求出。即对 1064 nm 的光束往返传播矩阵

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 l_1, l_2 分别为 M_1M_2, M_2M_3 两臂长, R_2, R_3 分别为 M_2, M_3 的曲率半径。另外, (1) 式中已经考虑到了取反射镜 M_1 的曲率 $R_1 = \infty$ 的情况。选取适当的 l_1, l_2, R_2, R_3 的取值,使得

$$\left| \frac{A+D}{2} \right| < 1, \quad (2)$$

即满足谐振腔稳定条件。由 ABCD 定律可以求得反射镜 M_1 上的腰斑半径为^[10]

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi}} |B| \left[1 - \left(\frac{A+B}{2} \right)^2 \right]^{1/4}, \quad (3)$$

(1) 式中 λ 是振荡激光的波长。

将折光镜 M_2 看作一透镜,其等效焦距为 $F = R/2$, 利用 q 参量和透镜公式,可求出腰斑 ω_1 通过 M_2 传输后的腰斑的位置 l_2 及大小 ω_2 , 以便确定倍频晶体的放置位置和晶体处的共焦参量 f 。

$$l'_2 = F + \frac{(l_1 - F)F^2}{(l_1 - F)^2 + (\pi\omega_1^2/\lambda)^2}, \quad (4)$$

$$\omega_2^2 = \frac{F^2\omega_1^2}{(l_1 - F)^2 + (\pi\omega_1^2/\lambda)^2}, \quad (5)$$

$$f = \pi\omega_2^2/\lambda, \quad (6)$$

我们选取 $l_1 = 55 \text{ mm}$, $l_2 = 200 \text{ mm}$, $R_2 = 100 \text{ mm}$, $R_3 = 500 \text{ mm}$, 根据(1)式~(6)式得到谐振腔是稳定腔, 并且算得: ω_1 约为 0.24 mm , ω_2 约为 0.1 mm , $l'_2 = 110 \text{ mm}$, $f = 13.8 \text{ mm}$ 。

在三镜折叠谐振腔中, 由于球面反射镜 M_2 处于离轴工作状态, 将引起像散, 使子午面(由光轴与镜面法线所组成, 记为光束的 x 方向)内的光线与弧矢面(与子午面垂直, 记为光束的 y 方向)内光线有不同的焦距。在光路中放置一布儒斯特片(BP), 其也会产生像散, 合理设计布儒斯特片的厚度和腔的折叠角 2θ , 可使系统总像散趋于零。

球面反射镜 M_2 离轴工作状态时引起的像散可由下式表示^[10]:

$$F_x = F \cdot \cos \theta, \quad F_y = F/\cos \theta, \quad (7)$$

其中 θ 时光线入射角。

光路中布儒斯特片产生的像散表示式为^[11]

$$d_x = \frac{t\sqrt{n^2+1}}{n^4}, \quad d_y = \frac{t\sqrt{n^2+1}}{n^2}, \quad (8)$$

在谐振腔光路中, 由于球面反射镜 M_2 离轴工作状态, 在 M_2M_3 臂上的光腰处, 光束在 x 方向和 y 方向的光腰位置将不重合。在(2)式中应用(7)式, 即可得到由反射镜 M_2 造成的光腰在 x 方向和 y 方向的不同位置 l'_x 和 l'_y 。布儒斯特片(BP)造成的 d_x 和 d_y 经过一定的传输距离 L 同样使光束在 M_2M_3 臂上的光腰在 x 方向和 y 方向的位置不重合。为此, 分别在 x 方向和 y 方向上定义一个调整小量 δ_x 和 δ_y 。

为达到消除像散, 要求

$$\begin{cases} l'_x + \delta_x = d_x + L, \\ l'_y + \delta_y = d_y + L, \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{和} \quad \delta_x - \delta_y = 0, \quad (10)$$

将(9)式代入(10)式, 并应用到(8)式、(7)式、(4)式。达到消除像散时, 布儒斯特片的厚度 t 与折叠角 θ 的关系为

$$t(n^2 - 1) \frac{\sqrt{n^2+1}}{n^4} - \frac{R_2}{2} \sin \theta \tan \theta - \left[\frac{\left(l_1 - \frac{R_2}{2\cos \theta}\right) \left(\frac{R_2}{2\cos \theta}\right)^2}{\left(l_1 - \frac{R_2}{2\cos \theta}\right)^2 + \left(\frac{\pi\omega_1^2}{\lambda}\right)^2} - \frac{\left(l_1 - \frac{R_2}{2}\cos \theta\right) \left(\frac{R_2}{2}\cos \theta\right)^2}{\left(l_1 - \frac{R_2}{2}\cos \theta\right)^2 + \left(\frac{\pi\omega_1^2}{\lambda}\right)^2} \right] = 0, \quad (11)$$

(11)式中, $n = 1.82$ 是 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的折射率, $R_2 = 100 \text{ mm}$, $l_1 = 55 \text{ mm}$ 。根据(11)式得到二分之一折叠角 θ 与 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体厚度的关系曲线如图2所示。

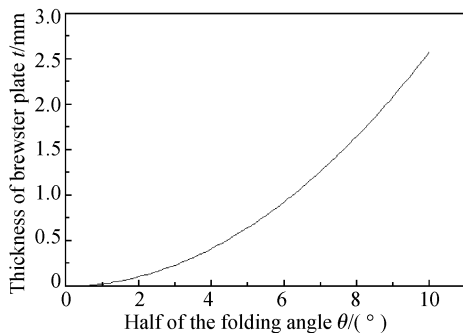


Fig. 2 Thickness of Brewster plate versus folding angle

如果不考虑高斯光束的光腰经过反射镜 M_2 的传输作用, 而只考虑反射镜 M_2 的像散作用, (11)式中第三项可以忽略。这时折叠角 θ 与 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体厚度的关系表达式与文献[11]的公式相同。

3 腔内倍频实验

周期极化铌酸锂晶体腔内倍频实验装置如图1所示。实验中使用的激光二极管为中科院海特公司出品的 L081T2000m 型二极管激光器, 室温下激光发射波长为 807 nm 。经过光学聚焦系统, 得到光腰半径为 $220 \mu\text{m}$ 的抽运光。激光增益介质用 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体(尺寸: $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 掺 Nd 原子分数为 0.02), 晶体的一个端面镀 808 nm 增透膜和 1064 nm 全反射膜作为一个腔镜 M_1 ($R_1 = \infty$), 另一端镀 1064 nm 增透膜, 用半导体制冷片对 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体进行冷却控温在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的厚度为 1.5 mm , 小信号透过率为 94% , 成布儒斯特角放置。根据(7)式计算的 V 型腔两臂的夹角约为 15° 。折光镜 M_2 镀 532 nm 增透膜和 1064 nm 全反射膜。周期极化铌酸锂晶体为周期极化的 LiNbO_3 晶体, 光栅周期为 $6.7 \mu\text{m}$, 尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 双端镀 532 nm 和 1064 nm 增透膜, 置于 M_2M_3 臂的光腰处,

用电阻丝加热控温在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验中需要对 Nd:YVO₄ 晶体和周期极化铌酸锂晶体分别进行温度控制。图 3 示出了抽运激光功率与绿激光输出功率的关系曲线,在连续抽运功率为 500 mW 时,得到了平均功率为 42.7 mW 的绿光输出。如果加大抽运功率和周期极化铌酸锂晶体的长度,转换效率将会有比较大的提高。用 MRD500 快速光电二极管和 TEK TDS620B 存储示波器测量了输出激光的脉冲序列如图 4 所示。

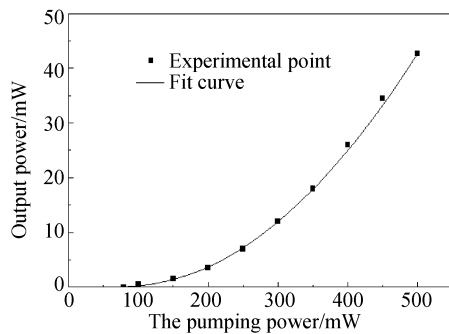


Fig. 3 Output power versus pump power

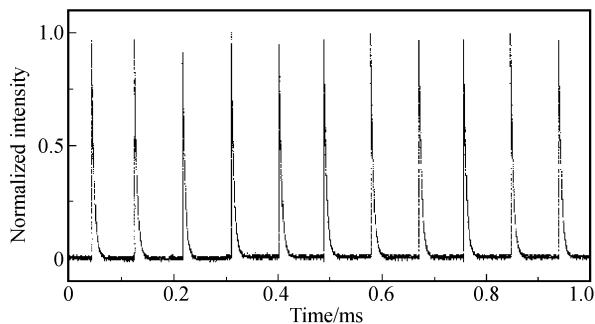


Fig. 4 Output laser trains

总结 本文研究了三镜 V 型折叠谐振腔腔内倍频激光器谐振腔的设计,给出两个腔臂上腰斑半径大小和位置与腔长和反射镜曲率半径关系的表达式。提出了用以布儒斯特角放置的 Cr⁴⁺:YAG 晶体实现被动调 Q 和像散补偿双重作用,并给出了 Cr⁴⁺:YAG 晶体的厚度与第二反射镜折光角关系的计算公式。实验结果表明,V 型折叠谐振腔是实现高效激光二极管端

面抽运腔内倍频输出激光器的理想结构。采用周期性极化铌酸锂晶体作为倍频晶体,使谐振腔内的基波和谐波具有相同的偏振方向,避免了腔内双折射引起的绿光噪声问题。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Modeling of passively Q-switched lasers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2000, **17**(6):1166~1175
- 2 Wang Qingpu, Zhang Xingyu, Li Ping *et al.*. Passively Q-switching of 0.946 μm Nd³⁺:YAG laser with Cr⁴⁺:YAG saturable absorber. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9):1149~1150 (in Chinese)
- 3 Zhao Shengzhi, Wang Jiyang, Zheng Jia'an *et al.*. Passively Q-switched self-frequency doubling Nd³⁺:Ca₄GdO(BO₃)₃ laser with Cr⁴⁺:YAG saturable. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(1):50~53 (in Chinese)
- 4 He Jingliang, Wang Jianming, Hou Wei *et al.*. LD-pumped Nd:YVO₄/LBO intracavity frequency doubling over 1 W green output laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(7):862~865 (in Chinese)
- 5 Chen Yunlin, Xu Jingjun, Song Feng *et al.*. Study on technology of periodic poling bulk LiNbO₃ by applying external field. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(5):618~620 (in Chinese)
- 6 Karlsson H, Laurell F. Electric field poling of flux grown KTiOPO₄. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(24):3474~3476
- 7 Lu Jianren, Mu Xiaodong, Kong Qingyu *et al.*. Study on "green problem" of LD-pumped intracavity-doubled Nd:YVO₄/KTP green lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(1):9~13 (in Chinese)
- 8 Tsunekane M, Taguchi N, Inaba H. Elimination of chaos in a multilongitudinal-mode, diode-pumped, 6-W continuous-wave, intracavity-doubled Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13):1000~1002
- 9 Fan T Y. Pump source requirements for end-pumped lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **QE-26**(2):311~316
- 10 Wang Qingpu *et al.*. *Laser Physics* (激光物理学). Jinan: Shandong University Press, 1985 (in Chinese)
- 11 Kogelnik H W, Ippen E P, Dienes A *et al.*. Astigmatically compensated cavities for CW dye lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1972, **QE-8**(3):373~379