

文章编号: 0258-7025(2009)09-2257-05

激光二极管抽运正交波罗棱镜腔光学参量 振荡激光器

刘旭 卢常勇 程勇 王小兵 王会升 王淑云 丁方正

(武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075)

摘要 将正交波罗棱镜谐振腔应用于激光二极管(LD)抽运的光学参量振荡(OPO)激光器,实现了Ⅱ类非临界相位匹配 KTP 晶体的内腔式光参量振荡,获得了高机械稳定性、高热稳定性和较高光束质量的 $1.57 \mu\text{m}$ 人眼安全激光输出。正交波罗棱镜腔存在腔内振荡光束线偏振运行条件,匀化了内腔 OPO 的抽运光光场。正交波罗棱镜腔 OPO 激光器解决了内腔式光参量振荡信号光输出不稳定,以及腔内光功率密度较高容易引起光学损伤等工程应用难题。器件采用热传导冷却半圆柱面 LD 阵列侧向抽运 Nd:YAG 抽运几何,在 20 Hz 运行条件下获得平均脉冲能量 86 mJ,脉冲宽度 5.4 ns,光束发散角 5 mrad,能量稳定性优于 $\pm 2.5\%$,光-光转换效率($808 \text{ nm} \rightarrow 1570 \text{ nm}$)9% 的优异性能。

关键词 激光技术; 光学参量振荡; 正交波罗棱镜腔; 激光二极管抽运

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2257

Laser Diode Pumped Optical Parametric Oscillator Laser with Orthogonal Porro-Prism Resonator

Liu Xu Lu Changyong Cheng Yong Wang Xiaobing Wang Huisheng
Wang Shuyun Ding Fangzheng

(Institute Opto-Electronics Technology, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy,
Wuhan, Hubei 430075, China)

Abstract Laser diode pumped optical parametric oscillator (OPO) laser is operated in the orthogonal porro-prism resonator. The $1.57 \mu\text{m}$ eye-safe laser with high mechanical stability, high thermal stability and high beam quality is obtained base on the KTP type Ⅱ non-critical phase-matching. A linear polarized-oscillating condition exists in the resonator, and the field of the pump laser for the OPO can be homogenized. The laser solves the problems such as unstable signal output in the intracavity OPO and optical damage due to the exorbitant intracavity power density. The OPO laser is operated in the heat-conducted half-circular LD arrays pumped Nd:YAG laser, and produces the average pulse energy of 86 mJ at 20 Hz in a 5.4 ns pulse with an optical-to-optical conversion efficiency of 9%, the energy stability of $\pm 2.5\%$, and the beam divergence of 5 mrad.

Key words laser technique; optical parametric oscillator; orthogonal porro-prism resonator; laser diode pumped

1 引言

$1.57 \mu\text{m}$ 激光波段处于近红外大气窗口,战场烟雾的穿透能力极强,对人眼来说接近于“零伤害”,是最为安全的激光波段^[1],已经成为新一代人眼安全激光装备的首选波长。非线性 KTP 晶体Ⅱ类非临界相位匹配光学参量振荡(OPO)技术是实现 $1.57 \mu\text{m}$ 激光波段的有效途径^[1~7],该技术与激光二

极管抽运技术相结合构成全固化的人眼安全激光器件的 OPO 激光,器具有阈值低、转换效率高、可以获得大能量输出和高重复频率运转等特点,在军用激光目标指示器、激光测距机、激光雷达等领域有极大的应用前景。按照抽运光谱谐振腔和信号光谱谐振腔的位置关系,OPO 激光器可以分为内腔式和外腔式两种,外腔式 OPO 信号光谱谐振腔置于抽运光谱谐振腔

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-10

作者简介: 刘旭(1983—),男,硕士,助理讲师,主要从事半导体抽运全固化激光器及光参量振荡器等方面的研究。

E-mail: 01055108@163.com

之外,二者相对独立,但是其 OPO 阈值较高,信号光转换效率较低,并且对抽运光功率密度依赖性较大,目前外腔式 OPO 的研究热点主要在采取有效的技术^[2,3](如环形腔、双通抽运等)提高信号光转换效率以及解决抽运返回光对抽运源的影响上。内腔式 OPO 信号光谐振腔置于抽运光谐振腔之内,OPO 建立时间短,参量转换效率高,但同时也存在着如下问题:1)动力学过程十分复杂^[4-6],且不易控制;2)腔内较高的光功率密度容易引起光学损伤^[4];3)光束质量较差^[5,6];4)抽运光与信号光二者的谐振腔依赖性很大,稳定的参量转换需要器件有较高的机械稳定性。我们曾经研究报道过提高 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 方式下 OPO 的转换效率,改善内腔式 OPO 稳定性的问题^[6],并且采用 LD 抽运平-平腔内腔式 OPO 获得了脉冲能量 90 mJ,脉冲宽度 4 ns,重复频率 30 Hz 的高效率 1.57 μm 激光运转^[7],发现传统内腔式 OPO 机械稳定性较差,对热效应敏感造成重复频率工作能量下降等一些列问题,因此,如何改善内腔式 OPO 激光器的重复频率工作稳定性,提高输出性能是一富有意义并充满挑战的课题。

通过理论分析和实验研究发现,正交波罗棱镜腔存在保证腔内振荡光束线偏振运行的条件,并且在“零退偏”工作点上可以满足 KTP 晶体的 II 类非临界相位匹配,实现高效的内腔式光参量振荡。推导波罗棱镜腔的失调矩阵证明了其高性能的机械稳定性,腔内光束在平行于光轴的对称位置自准直地互换振荡,匀化了抽运光光场,有效地改善了内腔式 OPO 腔内光功率密度较高容易引起晶体及膜片光学损伤的问题。波罗棱镜腔内腔抽运 OPO,一定程度上修正了抽运光的波前畸变、热光楔以及热致双折射,保证了抽运光大动态范围内的稳定性,解决了内腔式 OPO 信号光输出不稳定的工程难题,获得了输出性能优异的 1.57 μm 激光工程实用器件。

2 理论分析

2.1 波罗棱镜腔线偏振工作条件

OPO 器件运转对相位匹配有较强的取向性,较高的参量转换效率需要线偏振振荡光满足相位匹配条件,即当振荡光作为抽运光遇 KTP 晶体时,与晶体 Y 轴平行的偏振态才能够产生光参量振荡,因此首先讨论波罗棱镜腔的线偏振工作条件。波罗棱镜内全反射的相位突变由菲涅耳公式决定

$$\delta_p = 2\arctan\left[\frac{n(n^2\sin^2\alpha - 1)^{1/2}}{\cos\alpha}\right],$$

$$\delta_s = 2\arctan\left[\frac{(n^2\sin^2\alpha - 1)^{1/2}}{n\cos\alpha}\right], \quad (1)$$

式中 δ_p, δ_s 分别表示平行光矢量分量、垂直光矢量分量的附加相位差, n 为棱镜材料折射率, α 为入射角。对于每次全反射,平行光矢量分量和垂直光矢量分量相位差为

$$\delta_1 = \delta_p - \delta_s. \quad (2)$$

如图 1 所示,波罗棱镜的屋脊棱线与水平线成方位角 β ,发射全反射时,入射光和出射光的 δ_p 分量方向相反,而 δ_s 分量方向不变,对于两次全反射,平行光矢量分量和垂直光矢量分量的总相位差为

$$\delta = \pi + 4\arctan\left(\frac{\cos\alpha\sqrt{\sin^2\alpha - 1/n^2}}{\sin^2\alpha}\right). \quad (3)$$

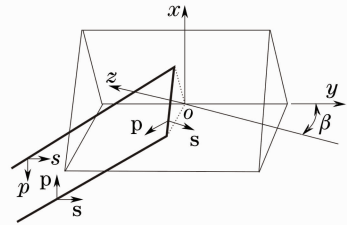


图 1 波罗棱镜内反射光线的光学矢量变换

Fig. 1 Vector transformations in Porroprism internal reflections

当光线垂直于波罗棱镜底面入射时,光线在两个直角面上的入射角相同,有 $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$, (3) 式可以简化为

$$\delta = \pi + 4\arctan\sqrt{1 - \frac{2}{n^2}}. \quad (4)$$

由(4)式可知,总相位差仅由棱镜的材质折射率 n 所决定。由于这一相位差 δ ,波罗棱镜与腔内偏振器构成了一个偏振耦合系统,退偏输出量由腔内偏振器所决定的偏振面和光线全反射时的入射面的夹角所决定,这一夹角即方位角 β 。因此,由空间坐标变换和矩阵光学可知,经波罗棱镜后的出射光遇腔内偏振器,透射耦合分量 T_p 和反射输出分量 T_s 由

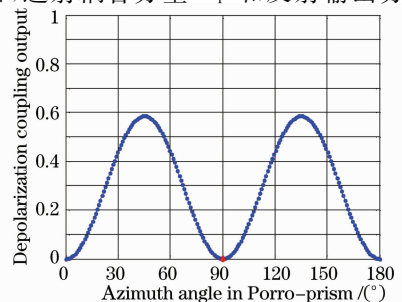


图 2 波罗棱镜中退偏输出透过率随方位角的变化

Fig. 2 Variation of depolarization coupling output with azimuth angle in porro-prism

下面式子可得

$$\begin{bmatrix} A_s \exp(i\epsilon_s) \\ A_p \exp(i\epsilon_p) \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中, \mathbf{R} 为变换矩阵, $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ 为波罗棱镜传输矩阵。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos(2\beta) & i \sin \frac{\delta}{2} \sin(2\beta) \\ i \sin \frac{\delta}{2} \sin(2\beta) & \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos(2\beta) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

即 $T_s = (A_s)^2 = \sin^2(\delta/2) \sin^2(2\beta)$ 。如图 2 所示, 当方位角 $\beta = \pi/2$ 时, 反射输出分量 $T_s = 0$, 腔内 P 光振荡, 无退偏损耗, 满足 OPO 相位匹配条件, 即我们选择的工作点。

2.2 波罗棱镜腔的失调矩阵

可用失调矩阵研究波罗棱镜腔的机械稳定性。文献[8]利用琼斯矩阵的方法推导了底面为球面的波罗棱镜在 xoz 面和 $yo z$ 面的变换矩阵

$$\mathbf{T}_{xoz,i} = \begin{Bmatrix} -1 + 2l_0 [(n-1)/R_i] & -2l_0 \\ (n-1) \{ (2/R_i) - 2l_0 [(n-1)/R_i] \} & -1 + 2l_0 [(n-1)/R_i] \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

$$T_{yo z,i} = -T_{xoz,i} \quad (8)$$

式中 R_i 为入射球面半径, $l_0 = \frac{d}{n}$, d 为棱镜厚度。设波罗棱镜失调, 在 xoz 面内绕 y 轴存在转动角 α_{ix} , 在 $yo z$ 面内存在绕 x 轴转动角 α_{iy} , 令 $R'_i = \frac{R_i}{n-1}$, 按照文献[9]的方法将(7)和(8)式增广可得在 xoz 面和 $yo z$ 面的失调矩阵为

$$\mathbf{M}_{xoz,i} = \begin{bmatrix} -1 + \frac{2l_0}{R'_i} & 2l_0 & 0 & 2l_0 \alpha_{ix} \\ \frac{2}{R'_i} \left(1 - \frac{l_0}{R'_i}\right) & -1 + \frac{2l_0}{R'_i} & 0 & -\frac{2l_0 \alpha_{ix}}{R'_i} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_{yo z,i} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{2l_0}{R'_i} & 2l_0 & 0 & -2l_0 \alpha_{iy} \\ -\frac{2}{R'_i} \left(1 - \frac{l_0}{R'_i}\right) & 1 - \frac{2l_0}{R'_i} & 0 & -2 \left(1 - \frac{l_0}{R'_i}\right) \alpha_{iy} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

在实际应用中一般有 $l_0 \ll R_i$, 可认为其是一个小量。因此, 在 xoz 面内由(9)式可知失调角 α_{ix} 对失调矩阵 $M_{xoz,i}$ 的影响是很小的, 即正交波罗棱镜绕 y 轴的失调不灵敏。在 $yo z$ 面内由(10)式可知, 失调角 α_{iy} 仍然对失调矩阵 $M_{yo z,i}$ 有一定影响。

3 结构设计及输出性能

3.1 结构设计

器件采用环形激光二极管侧向抽运结构, 抽运源为 8 个国产 LD 半圆形阵列, 每个阵列有 9 个线阵, 激光介质为 Nd:YAG 晶体, 尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$, 掺杂为 1%, 两端镀 1064 nm 增透膜, 侧面打毛。LD 阵列采用热电制冷器 (TEC) 控制温度并通过散热片

导热, 激光介质两端固定处可与金属热沉传导散热。抽运光谱谐振腔由两个尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的波罗棱镜 Porro1 和 Porro2 以及两个腔内 45° 镜 M1 和 M2 构成, 由 2.1 节的理论分析可知, Porro2 棱镜的棱线需与偏振器的偏振面成 90° 夹角, 即方位角 $\beta = 0^\circ$ 时为内腔式 OPO 工作条件。Porro1 镜距离 M1 镜 200 mm, M1 镜距离 M2 镜 50 mm, 信号光谱

振腔由波罗棱镜 Porro2 和输出镜 M3 构成,腔长为 200 mm,KTP 晶体尺寸为 7 mm×7 mm×20 mm。可以看出,抽运光谱振腔构成稳定的正交波罗棱镜腔结构,内腔式抽运 KTP 晶体产生光参量振荡。

信号光谱振腔为直角棱镜腔结构,一定程度上也提高了稳定性和抗失调能力。器件调 Q 运转采用升压式 KD*P 电光调 Q 方式。

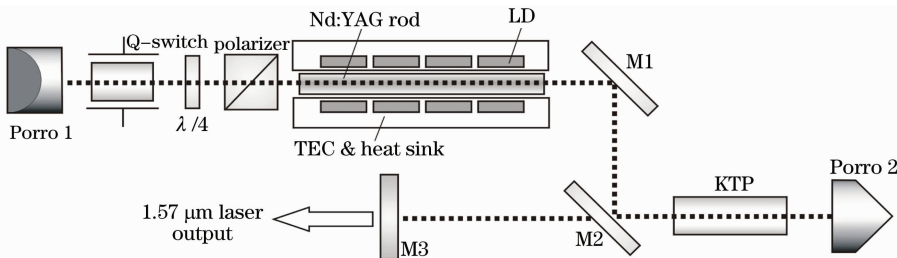


图 3 激光器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the laser

3.2 输出性能

采用 EPM1000 型激光功率能量计测量激光输出能量,TEK-P6701A 型光电探头和 TDS3052 型 500 M 数字式存储示波器测量脉宽,海洋光学 NIR-512 型光谱仪(响应波长为 0.9~1.7 μm)测量输出光谱,Spiricon 公司的 SCOR20-1550 CCD 相机监测远场光场分布。在 LD 抽运脉宽 240 μs,重复频率 1 Hz 条件下测量了该激光器的输出单脉冲能量和脉宽与抽运电流的关系,如图 4 所示,随着抽运电流的增加,激光器的单脉冲能量逐渐增加,脉宽逐渐减小。抽运电流为 66 A 时(对应总的 LD 抽运能量约为 960 mJ),单脉冲能量达 86 mJ,脉宽 5.5 ns,如图 5 所示,峰值功率达 15.6 MW,对应的光-光转换

效率(808 nm→1570 nm)为 9%。

在抽运电流为 66 A 时,激光器以 20 Hz 的重复频率连续工作 1 min,用能量计记录下每个脉冲的能量,以考察该激光器的能量稳定性,结果如图 6 所示。图 6 中的能量最大值为 87.8 mJ,最小 84 mJ,平均 85.6 mJ,能量稳定性优于±2.5%。图 7 为对输出光谱测量的结果,在 1.57 μm 波段处得到了信号光光谱峰值。图 8 为监测到的输出脉冲远场的三维光场分布,可以看出激光器远场只有一个主峰,而且边缘光滑,峰顶相对均匀,通过套孔法测得的发散角约为 5 mrad,显而易见该结构对于改善内腔式 OPO 光束质量还是十分有益的。

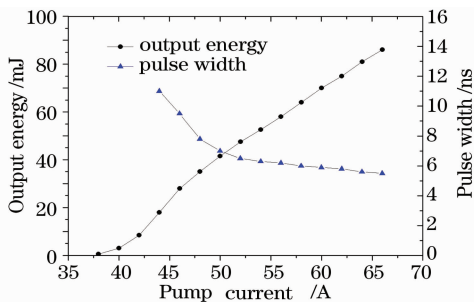


图 4 输出能量和脉冲宽度随抽运电流的关系
Fig. 4 Pulse energy and width versus pump electric current

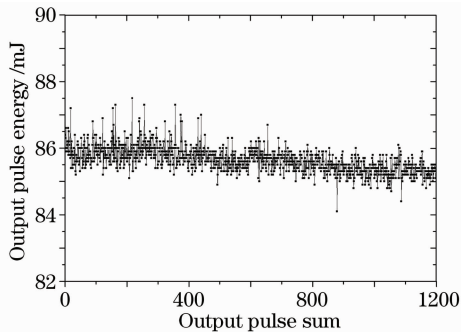


图 6 激光器 20 Hz 重复频率工作的能量稳定性
Fig. 6 Energy stability of the output laser by 20 Hz repetition

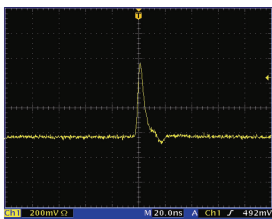


图 5 信号光脉冲波形
Fig. 5 Signal-pulse waveform

采用波罗棱镜腔内腔式抽运 KTP 晶体产生光参量振荡的结构,一定程度上提高了抽运光的稳定性和抗失调能力,光参量振荡过程十分稳定,信号光采用直角棱镜作为谐振腔的全反镜,其输出稳定性又得到很大提高,尤其在重复频率工作条件下,该结构很大程度上改善了抽运光在 OPO 谐振腔内的光场分布,同时对腔内的各种热畸变进行补偿,保证了相对较高的光束质量和稳定的信号光输出。

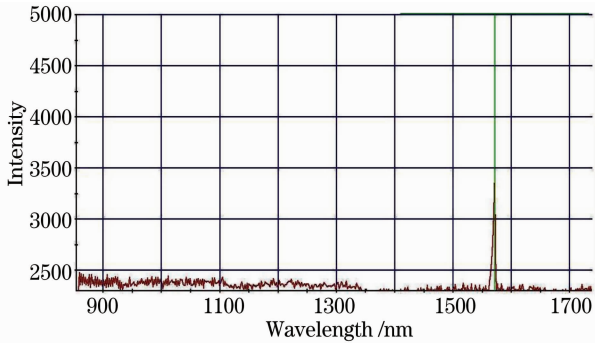


图 7 激光输出光谱图

Fig. 7 Output laser spectrum

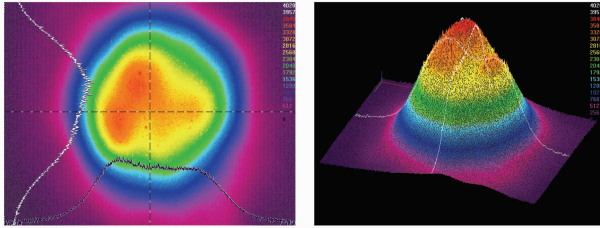


图 8 输出脉冲远场的三维光场分布

Fig. 8 Far field 3D distribution of the output laser

4 结 论

通过对波罗棱镜腔的理论分析,获得了波罗棱镜腔实现相位匹配严格的光参量振荡器的工作点,推导其失调矩阵证明了其较高的抗失调性能。设计了一种 LD 抽运正交波罗棱镜腔内腔式 OPO 激光器,解决了内腔式光参量振荡信号光输出不稳定,重复频率性能较差,以及腔内光功率密度较高容易引起光学损伤等工程应用难题,激光器在 20 Hz 运行条件下,平均脉冲能量 86 mJ,脉冲宽度 5.4 ns,光束发散角 5 mrad,能量稳定性优于 $\pm 2.5\%$,是优异的工程实用器件。

参 考 文 献

- 1 Lu Changyong, Wang Xiaobing, Guo Yanlong *et al.*. Principle and evolution of 1.5 μm wavelength eye-safe military laser rangefinder [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(8): 32~35
卢常勇,王小兵,郭延龙等. 1.5 μm 波长人眼安全的军用激光测距机及其进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(8): 32~35
- 2 Peter Moulton, Alex Dergachev, Yelena Isyanova *et al.*. Recent advances in solid state lasers and nonlinear optics for remote sensing [C]. *SPIE*, 2003, **4893**: 193~220
- 3 Mark S., Webb Peter F. Moulton. High-average-power KTiOAsO₄ optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**, (15): 1161~1163
- 4 T. Debuisschert, J. Raffy, J. P. Pochelle *et al.*. Intracavity optical parametric oscillation; study of the dynamics in pulsed regime [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7): 1569~1587
- 5 Liu Qiang, Ju Youlun, Yao Baoquan *et al.*. Research of properties of an internal optical parametric oscillator and optical parametric amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(8): 683~686
柳 强,鞠有伦,姚宝权等. 内腔单共振光学参量振荡器和光学参量放大器运转特性的研究 [J]. *中国激光*, 1999, **A26**(8): 683~686
- 6 Liu Xu, Lu Changyong, Wang Xiaobing *et al.*. Passively Q-switched intracavity optical parametric oscillator with corner-cube resonator [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(4): 485~490
刘 旭,卢常勇,王小兵等. 角锥棱镜腔 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 内腔式光参量振荡器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 485~490
- 7 Xu Liu, Changyong Lu, Xiaobing Wang *et al.*. Efficient intracavity optical parametric oscillator with diode side-pumped electro-optically Q-switched laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 664~667
- 8 Lü Baida, Cai Bangwei, Liao Yan *et al.*. Slab Nd:YAG laser using crossed prism resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(3): 213~219
吕百达,蔡邦维,廖 严等. 交叉棱镜腔 Nd:YAG 板条激光器 [J]. *光学学报*, 1990, **10**(3): 213~219
- 9 Wang Shaomin, Zhao Daomu. *Matrix Optics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000
王绍民,赵道木. *矩阵光学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000