

文章编号: 0258-7025(2007)04-0485-06

角锥棱镜腔 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 内腔式光参量振荡器

刘 旭^{1,2}, 卢常勇¹, 王小兵¹, 郭延龙¹, 程 勇¹, 陈建文²

(¹ 中国人民解放军武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075
² 中国人民解放军空军雷达学院兵器运用工程全军重点实验室, 湖北 武汉 430019)

摘要 通过对角锥棱镜腔实现 KTP II 类非临界相位匹配光参量振荡的理论分析, 发现腔内存在特殊偏振方位角的本征模式, 其满足 II 类非临界相位匹配条件。实验上不但实现了该腔的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 内腔式光参量振荡器 (OPO) 运转, 而且得到了优于平-平腔的转换效率, 改善了信号光的稳定性。分析了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率和腔内功率密度的关系, 实验获得不同 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率、抽运能量和信号光能量的关系曲线。通过腔内功率密度的优化, 电光效率高达 0.25%, 设计出结构紧凑、小型高效的工程实用光参量振荡器器件, 抽运能量阈值为 4.7 J, 输出能量为 11.8 mJ, 脉宽为 6.9 ns, 发散角为 7 mrad, 能量稳定性为 5%。

关键词 激光技术; 内腔式光参量振荡器; 角锥棱镜谐振腔; 被动调 Q

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Passively Q -Switched Intracavity Optical Parametric Oscillator with Corner-Cube Resonator

LIU Xu^{1,2}, LU Chang-yong¹, WANG Xiao-bing¹,
GUO Yan-long¹, CHENG Yong¹, CHEN Jian-wen²

¹Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-commissioned Officers Academy,
The Chinese People's Liberation Army, Wuhan, Hubei 430075, China

²Key Laboratory of Radar Armament and Utilization Engineering, Air Force Radar Academy,
The Chinese People's Liberation Army, Wuhan, Hubei 430019, China

Abstract The theory of the non-critical phase-matched KTP II crystal placed in corner-cube resonator was discussed. It was found that there existed eigen mode of special polarization azimuth to meet the non-critical phase-matched condition. Experiment based on $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q -switched intracavity optical parametric oscillator (OPO) was performed, and the conversion efficiency was higher than that in the plane-parallel resonator. The effects of the transmission of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal upon the intracavity power density were analyzed, and the relationship of signal-pulse energy versus pump energy with different transmission of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal was obtained. The performance of OPO laser was much better than that in plane-parallel resonator for the electro-optical efficiency can be up to 0.25%. A compact and efficient OPO was designed, the pump energy threshold was 4.7 J, the pulse energy was 11.8 mJ, the pulse width was 6.9 ns, the beam divergence was 7 mrad and the pulse stability was 5%.

Key words laser technique; intracavity optical parametric oscillator; corner-cube resonator; passively Q -switched

收稿日期: 2006-06-19; 收到修改稿日期: 2006-08-28

基金项目: 国防科技重点实验室基金 (51438060404JB7201) 资助项目。

作者简介: 刘 旭 (1983—), 男, 河南民权人, 助理讲师, 硕士研究生, 主要从事全固化激光器及光参量振荡器方面的研究。

E-mail: gdyjs@263.net

1 引 言

鉴于 II 类非临界相位匹配光参量振荡器(OPO)相比于受激拉曼散射,Er 玻璃激光器突出的技术优势^[1],该方案已成为获得人眼安全激光波长输出的最具发展前景的技术途径,迅速成为新一代激光装备又一重要的前进方向和研究热点。由于手持测距机对于体积和效率的要求,被动调 Q 内腔式光参量振荡器具有明显的优势,但同时也存在如下问题:1) 动力学过程复杂^[2~5],Cr⁴⁺:YAG 可饱和吸收体的不稳定性导致了信号光输出的不稳定;2) 腔内较高的光功率密度容易引起光损伤^[2];3) 光参量振荡器器件的相位匹配有较强的取向性,被动调 Q 方案中,只有部分平行于晶体 y 轴的分量满足相位匹配条件,其效率很低。因此,如何提高 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 方式下光参量振荡器的转换效率,改善小型被动调 Q 内腔式光参量振荡器的稳定性,仍然是这一领域里棘手而又活跃的课题。

近年来,角锥棱镜腔技术在提高激光器的可靠性、稳定性和改善光束质量等研究领域里引起了人们极大的兴趣^[6~11]。由于角锥棱镜的退偏效应^[8],其能否稳定地运行于相位匹配严格的光参量振荡一直令学术界许多人士质疑,因此本文通过对角锥棱镜腔本征模式的理论分析,发现腔存在相互正交的线偏振光,可以满足 KTP 非线性晶体相位匹配条件。经过实验研究,在角锥棱镜腔内实现了光参量振荡,不但获得了 1.57 μm 波长激光输出,而且得到了优于平-平腔光参量振荡器的转换效率,电-光效率提高到 0.25%,稳定性和可靠性得到改善,实验结果和理论分析相吻合。

2 理论分析

2.1 角锥棱镜腔运行光参量振荡器

将角锥棱镜腔应用于具有非线性或双折射特性激光晶体,首先需要研究角锥棱镜的偏振特性^[8~11]。此时必须考虑全反射的相位突变和空间坐标系变换^[9]。相位突变由菲涅耳公式决定

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

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。光线在三个直角面上的入射角相同,有 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$

$= 54.7^\circ$ 。显然,存在关系 $\delta_p = \delta_s$ 使得两个光矢量分量相位差为 0,通过计算可得 $n = 1.22$,即选择满足该折射率的材料时,角锥棱镜不改变入射光的偏振态,而目前尚无这种材料,所以一般情形下,角锥棱镜具有“退偏”效应。

利用琼斯(Jones)矩阵来描述角锥棱镜对偏振光线的变换。当棱镜材料为熔融石英($n = 1.46$)时,(1)式有 $\delta_p = 117.3^\circ, \delta_s = 75.2^\circ$,则三个直角反射面的琼斯矩阵表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{ACO} &= \mathbf{R}_{ABO} = \mathbf{R}_{BCO} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos 117.3^\circ + i\sin 117.3^\circ & 0 \\ 0 & \cos 75.2^\circ + i\sin 75.2^\circ \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -0.459 + 0.889i & 0 \\ 0 & 0.255 + 0.967i \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

如图 1 所示,利用空间坐标系的变换来分析光波矢量 \mathbf{E} 的变化,遵循右手系原则,设轴 x', y' 相对于 x, y 绕 z 轴逆时针旋转 θ 角,由投影关系可得

$$\begin{bmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

记为

$$E_{x'y'} = T(\theta)E_{xy}. \quad (4)$$

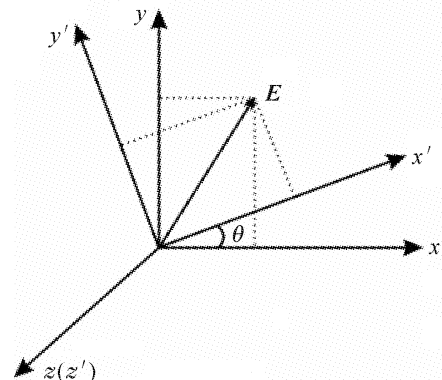


图 1 角锥棱镜内反射光线的矢量坐标变换

Fig. 1 Coordinate transformations of normals between internal reflections for corner-cube retro-reflector

表 1 反射光线的矢量坐标变换的旋转角度

Table 1 Angles of rotation of coordinates

| Normals of coordinates | Rotation | Angle |
|------------------------|------------|--------------|
| n_{ABC}, n_{ACO} | θ_1 | -60° |
| n_{ACO}, n_{ABO} | θ_2 | -60° |
| n_{ABO}, n_{BCO} | θ_3 | 60° |
| n_{BCO}, n_{ABC} | θ_4 | -120° |

以面 ACO-ABO-BCO 的反射次序为例分析,如图 2 所示,通过对棱镜中的光束追迹^[10],根据各反

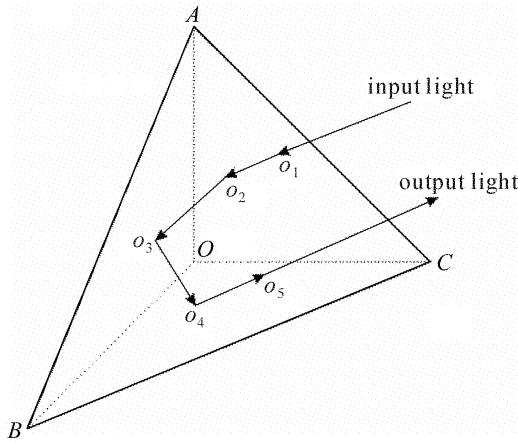


图2 角锥棱镜内反射光线的追迹

Fig. 2 Ray trace through a corner-cube retro-reflector

射工作面法线矢量的空间几何关系,可以列出各个参考空间坐标系变换的夹角,参见表1。文献[11]中作者用矢量变换的方法也同样给出了这些角度,两种方法的结果一致。至此可以计算出该反射次序角锥棱镜的琼斯矩阵形式

$$\begin{aligned} J &= T(-120^\circ)R_{BCO}T(60^\circ)R_{ABO} \times \\ &T(120^\circ)R_{ACO}T(-60^\circ) = \\ &\begin{bmatrix} -0.227 - 0.935i & -0.257 - 0.087i \\ -0.257 - 0.087i & 0.749 - 0.604i \end{bmatrix}, \quad (5) \end{aligned}$$

同样的方法考察其可逆反射次序(BCO-ABO-ACO反射次序)的琼斯矩阵形式为

$$\begin{aligned} J' &= T(120^\circ)R_{ACO}T(120^\circ)R_{ABO} \times \\ &T(-120^\circ)R_{BCO}T(-120^\circ) = \\ &\begin{bmatrix} -0.227 - 0.935i & 0.257 + 0.087i \\ 0.257 + 0.087i & 0.749 - 0.604i \end{bmatrix}. \quad (6) \end{aligned}$$

通过计算可得,以上对可逆反射次序的琼斯矩阵有着相同的本征值 $\eta_1 = 0.813 - 0.582i$, $\eta_2 = -0.290 - 0.957i$,且这两个本征值对应的本征矢量相互正交 $E_{g1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 4.052 \end{bmatrix}$, $E_{g2} = \begin{bmatrix} 1 \\ -0.247 \end{bmatrix}$,同理可以得到另外两对反射次序的本征态,具有相同特性。这就说明角锥棱镜谐振腔内存在特殊偏振方位角的本征模式振荡,可以得到具有线偏振特性的腔内振荡光。该振荡光作为抽运光遇KTP晶体时,在晶体y轴上的分量即可满足KTP相位匹配条件,发生光参量振荡。存在合理的角锥轴向旋转角度可以使在晶体y轴上的光强分量最大,这时最大限度地利用了抽运光能量,效率优于平-平腔,这与实验过程中得到的结果一致。

2.2 腔内功率密度的管理

确定最佳腔内功率密度是设计内腔式光参量振

荡器需要考虑的又一重要因素,直接影响着信号光的转换效率,需要合理设计输出镜反射率和 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体透过率。高效光参量振荡器设计的“经验法则”是:最佳功率密度至少4倍于阈值功率密度^[12]。首先给出可返回抽运光束的光参量振荡器器件阈值强度 I_{th} 表达式^[12]和包含内腔光参量振荡器的被动调Q的速率方程^[4,5]

$$I_{th} = \frac{1.12}{kg_s l_{eff}^2 (1+r)^2} \times \left(\frac{L}{t_p c} \ln \frac{P_s}{P_n} + 2al + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 4 \right)^2, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_p t}{dt} &= \left| \frac{\sigma n l}{t_r} - \frac{\sigma_{gs} n_{gs} l_s + \sigma_{es} n_{es} l_s}{t_r} - \right. \\ &\left. \frac{\ln |1/R| + L}{2t_r} \right| \times E_p - \\ &\frac{\delta \omega_p I}{4\epsilon_p} \frac{I_{OPO}}{l'} \frac{I_{crystal}}{I_{OPO}} E_s(t) E_1(t) \sin \varphi(t), \quad (8) \end{aligned}$$

从(7),(8)式可以看出决定 I_{th} 的主要因素之一是光参量振荡器输出镜反射率 R ,最佳反射率可以维持光参量振荡器的阈值功率 I_{th} 与抽运光强 I_p 良好的抽运匹配以获得最高的转换效率。另一方面还需要考虑调整光参量振荡器阈值使反转粒子数在一个脉冲内完全耗尽以防止信号光出现多脉冲,这是被动调Q内腔式光参量振荡器最容易发生的,设计时值得注意。在后面的实验研究中,观测到了信号光双脉冲现象。

输出镜反射率确定后,对于一定的抽运源谐振腔,腔内所能达到的最高抽运强度 I_p 是由 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的初始透过率 T_0 决定的,文献[13]利用速率方程数值分析了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调Q方式下,激活介质反转粒子数密度、可饱和吸收体基态粒子数密度以及腔内光子数密度随时间的变化方程,得到了脉冲能量 E ,峰值功率 P 与脉宽 t_p , $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率和输出镜反射率 R 的解析解。本文理论模拟了在一定输出镜反射率 R 情况下,不同 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率 T_0 和抽运源腔内光功率密度 I_p 的关系,同时在后面的实验研究中,通过对经 M_3 输出的残余抽运光能量和脉宽的监测,腔内光功率密度和腔外光功率密度关系可表示为^[12]

$$\frac{p_{in}}{p_{out}} = \frac{1+R}{1-R}, \quad (9)$$

同样也近似得到了 T_0 和 I_p 的关系,理论模拟和实验研究结果如图3所示。

从图3中可以看到,理论计算和实验结果的整体趋势是一致的,不过实验结果小于理论结果。分

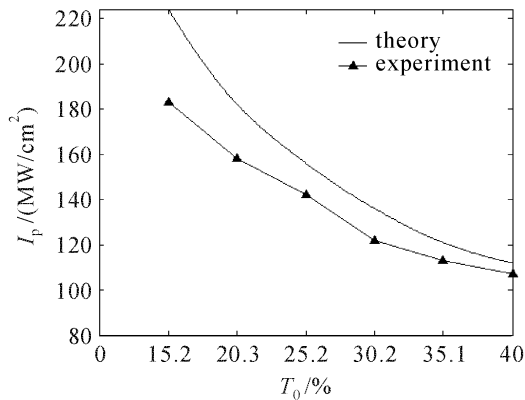


图3 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率对抽运源腔内光功率密度的影响

Fig. 3 Intracavity power density I_p as a function of the transmission of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal T_0

析其可能原因主要有三点,一是以(9)式的简化工程计算来表征复杂的被动调Q过程中腔内外功率密度引起的误差;二是理论分析是以假设反转粒子数密度在激活介质各处是均匀的为前提的,而实际上是有差别的,实际的输出脉冲是由中心到边缘许多

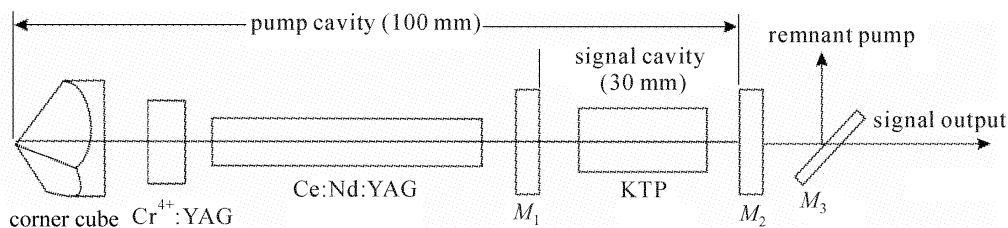


图4 角锥棱镜腔 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调Q内腔式KTP OPO结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the passively Q-switched intracavity KTP OPO with corner-cube resonator

实验采用自制的小型重复频率激光电源,储能电容 $20\ \mu\text{F}$,用EPM1000型激光功率/能量计监测激光输出, $1.06\ \mu\text{m}$ 抽运光及 $1.57\ \mu\text{m}$ 信号光脉宽分别采用Si, Ge光电探头和TEK-TDS3052型500 MHz示波器进行测量。

3.1 光谱的测量及分析

采用海洋光学NIR-512型光谱仪(响应波长为 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$)对输出光谱进行了测量,结果如图5所示。在 $1.57\ \mu\text{m}$ 波段处得到了信号光输出,实验证明角锥棱镜腔能够实现相位匹配严格的光参量振荡,验证了2.1节的可行性分析。图中 $1.06\ \mu\text{m}$ 波段处是残余抽运光造成的,同时也发现有少量 $1.32\ \mu\text{m}$ 波段光输出,分析其原因是在Nd:YAG的荧光发射谱中, $1319\ \text{nm}$ 处谱线也是一条突出的发射峰,而采用的光参量振荡器输出镜是一个宽带的部分透过膜系,其在 $1.32\ \mu\text{m}$ 波段处的反射率达

建立时间不同的脉冲的叠加,脉冲宽度加大,因而功率密度也比理论情况低;三是腔内部分抽运光已经参与了光参量振荡,转化为信号光,致使实际功率密度降低。

3 实验研究

角锥棱镜腔被动调Q内腔式光参量振荡器光路设计如图4所示,角锥棱镜为 $1.064\ \mu\text{m}$ 全反镜,熔融石英材质,入射面镀 $1.064\ \mu\text{m}$ 波段高透膜层。角锥棱镜和 M_2 构成抽运源谐振腔,腔长为 $100\ \text{mm}$ 。 M_1 和 M_2 构成光参量振荡器谐振腔,腔长为 $30\ \text{mm}$ 。其中, M_1 对 $1.064\ \mu\text{m}$ 波段高透, $1.5\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 波段全反射, M_2 对 $1.064\ \mu\text{m}$ 波段高反($R=99.55\%$),对 $1.5\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 波段部分反射, M_3 为滤光镜。抽运光源的工作介质采用尺寸为 $\phi 4\ \text{mm}\times 60\ \text{mm}$ 的Ce-Nd:YAG晶体, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体为被动调Q开关。KTP晶体尺寸为 $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$,晶体两面镀有宽带的增透膜,工作在II类非临界相位匹配点,空闲光波长约为 $3.2\ \mu\text{m}$ 。

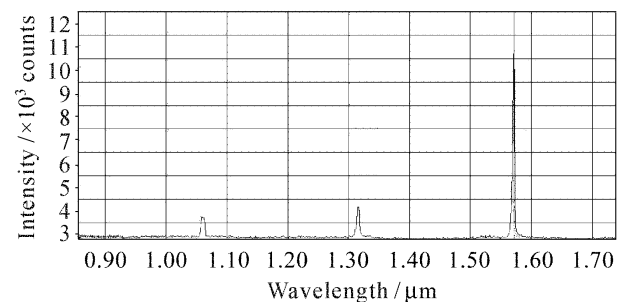


图5 激光输出光谱图

Fig. 5 Output laser spectrum

50%,形成了激光振荡,这一问题可通过控制膜系解决。

3.2 输出能量的优化

根据2.2节的分析,采用了不同初始透过率 T_0 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体进行实验,得到了电注入抽运能量和光参量振荡器信号光输出能量的关系,如图6

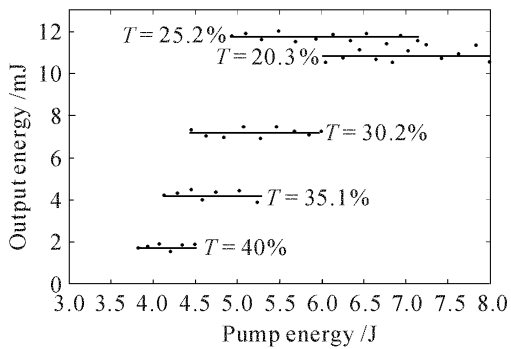


图6 不同 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率下信号光能量和抽运能量的关系

Fig. 6 Signal-pulse energy versus pump energy with different transmission of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal

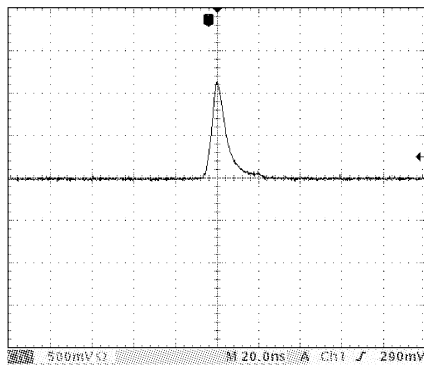


图7 信号光脉冲波形

Fig. 7 Signal-pulse waveform

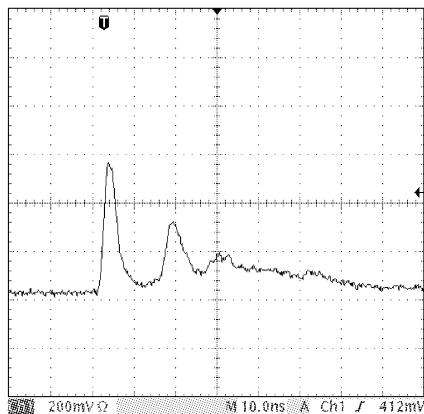


图8 双脉冲图

Fig. 8 Picture of double pulse

所示。随着 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率 T_0 的减小,转换阈值升高,输出能量变大,工作坪区电压展宽。 $T_0 = 40\%$ 时,信号光抽运阈值为 3.7 J, 4.5 J 电注入开始出现信号光双脉冲,工作坪区宽度为 0.8 J。 $T_0 = 25.2\%$ 时,电注入阈值为 4.7 J, 输出能量 11.5 mJ, 脉宽 6.9 ns, 信号光波形如图 7 所示。7.2 J 电注入时开始出现双脉冲,如图 8 所示,在整个坪区范围内,器件都能稳定地工作,能量稳定性高达 5%。同时也能看到, $T_0 = 20.3\%$ 时相比于 $T_0 = 25.2\%$ 时

的输出能量略低,原因是过高的功率密度导致了信号光、闲频光和抽运光之间的逆转换,整体转换效率开始下降。

3.3 平-平腔对比实验

在同等的实验条件下,方案中的角锥棱镜换成平面全反镜,进行对比实验,结果见表 2 和图 9 所示。从表 2 可以看出,虽然角锥棱镜腔光参量振荡器阈值略高,效率为 0.25%, 优于平-平腔,能量和脉宽的稳定性都得到改善,并且信号光脉宽变窄,采用套孔法测量发散角为 7 mrad, 相比于平-平腔得到了压缩,工作坪区宽度增长,各项指标均有改善。

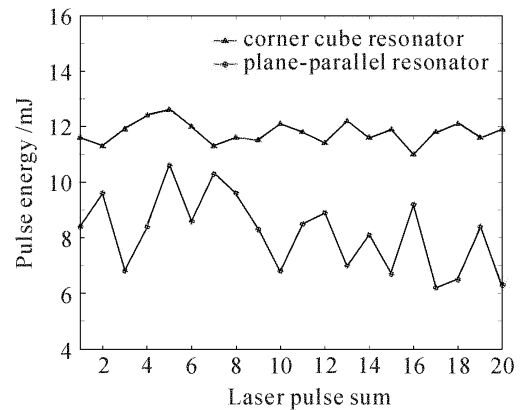


图9 角锥棱镜腔和平-平腔光参量振荡器输出能量和稳定性对比

Fig. 9 Signal-pulse output energy and stability comparison in the corner-cube resonator and in the plane-parallel resonator

表2 角锥棱镜腔和平-平腔光参量振荡器输出性能对比
Table 2 OPO output comparison in the plane-parallel resonator and in the corner-cube resonator

| Resonator | Corner-cube | Plane-parallel |
|-----------------------------------|-------------|----------------|
| Threshold / J | 4.7 | 4.6 |
| Pulse energy / mJ | 11.8 | 7.9 |
| Pulse width / ns | 6.9 | 11 |
| Pulse stability / % | 5 | 9 |
| Efficiency of electro-optical / % | 0.25 | 0.17 |
| Beam divergence / mrad | 7 | 8 |
| Pump range for single pulse / J | 2.5 | 2.0 |

4 结 论

通过实验研究发现,角锥棱镜腔不但能够运行内腔式光参量振荡器,也有效地改善了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 光参量振荡激光器的许多缺点。首先,正如 2.1 节中所分析,腔内的振荡光增加了满足 KTP 晶体相位匹配条件的偏振光分量,一定程度上提高

了参量转换效率。另外由于角锥棱镜锥顶的衍射效应,腔内的光场分布有近似于“平顶”的趋势^[7],这有利于提高参量转换效率。

其次,角锥棱镜的“镜像”效应引起了一定的“准相位共轭”能力,有效地补偿了光参量振荡器器件放入腔内引起的相位畸变,角锥棱镜的引入使腔内的光场分布趋于均匀,改善了 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 的稳定性,使抽运光能量稳定性、模式稳定性和脉宽稳定性得到明显改善,大大提高了光参量振荡器信号光的稳定性。结果表明,角锥棱镜腔实现 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 内腔式光参量振荡器运转是可行的方案。

采用此方案,已经在 22 mm×22 mm×110 mm 尺寸上设计定型了小型、高效的全固化人眼安全光参量振荡器器件,输出能量为 11.8 mJ,电光效率达 0.25%,能量稳定性为 5%,脉宽为 6.9 ns,发散角为 7 mrad,重复频率 0.33 Hz 下光轴漂移 ±14.5 μrad。器件结构紧凑、稳定可靠、小型轻量,是满足小型手持式人眼安全激光测距机 5~10 km 测程需求的工程实用器件。

参 考 文 献

- Jin Feng, Gong Mali, Shi Shunsen *et al.*. Design considerations for 1.5X μm eye-safe laser rangefinders [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1998, **9**(5):439~441
金 锋, 巩马理, 时顺森等. 1.5X μm 人眼安全激光测距技术设计[J]. *光电子·激光*, 1998, **9**(5):439~441
- 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
- E. O. Ammann, J. M. Yarborough, M. K. Oshman *et al.*. Efficient internal optical parametric oscillation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**(8):309~312
- Liu Qiang, Gong Mali, Yan Ping *et al.*. Passively Q-switched laser with intracavity optical parametric oscillation for eye-safe-output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):113~116
柳 强, 巩马理, 闫 平等. 被动调 Q 人眼安全内腔光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):113~116
- T. Debuisschert, J. Raffy, J.-P. Pocholle *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator: study of the dynamics in pulsed regime [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7):1569~1587
- Cheng Yong, Mao Shaoqing, Wang Zhihui *et al.*. Avoidance adjust solid state laser [J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(2):68~70
程 勇, 毛少卿, 王志怀等. 免调试固体激光器的研究[J]. *激光技术*, 1999, **23**(2):68~70
- Wang Xiaobing, Sun Bin, Cheng Yong *et al.*. Properties of flattened Gaussian beam in directional prism cavity [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(2):117~118, 122
王小兵, 孙 斌, 程 勇等. 定向棱镜谐振腔的平顶高斯光束特性的研究[J]. *激光技术*, 2002, **26**(2):117~118, 122
- Edson R. Peck. Polarization properties of corner reflectors and cavities [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, **52**(3):253~257
- M. A. Acharekar. Derivation of internal incidence angles and coordinate transformations between internal reflections for corner reflectors at normal incidence [J]. *Opt. Eng.*, 1984, **23**(5):669~674
- Marija S. Scholl. Ray trace through a corner-cube retroreflector with complex reflection coefficients [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(7):1589~1592
- Jian Liu, R. M. A. Azzam. Polarization properties of corner-cube retroreflectors: theory and experiment [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(7):1553~1559
- W. Koehner. Solid-State Laser Engineering [M]. 5th Edition. Beijing: Science Press, 2002
W. 希克耐尔著. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社, 2002
- Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Theoretical and experimental study of Cr⁴⁺:YAG Q-switching characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9):1180~1185
张行愚, 赵圣之, 王青圃等. Cr⁴⁺:YAG 调 Q 特性的理论和实验研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9):1180~1185