

文章编号: 1001-3806(2006)02-0192-03

紧凑型 1.57 μm OPO 激光器

钟 鸣^{1,2}, 王 骥¹, 翟 刚², 张 翼², 樊红英²

(1 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001; 2 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 设计了紧凑型 1.57 μm OPO 激光器, 以满足工程化的需要。分别采用两种非稳腔型的 1.57 μm OPO 激光器, 同样为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q , 在 7J 的电能量输入下, 得到输出能量 6mJ 发散角 3.0mrad 和输出能量 4mJ 发散角为 3.0mrad 的两种高光束质量的 1.57 μm 人眼安全激光输出。以极其简单的结构克服了 OPO 激光器光束质量不好的困难。

关键词: 非线性光学; OPO 激光器; 高光束质量; 人眼安全激光测距

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Compact OPO laser at 1.57 μm

ZHONG Ming^{1,2}, WANG Qi¹, ZHAI Gang², ZHANG Yi², FAN Hongying²

(1 Harbin Institute of Technology Harbin 150001, China; 2 Southwest Institute of Technical Physics Chengdu 610041, China)

Abstract 1.57 μm OPO laser is designed to meet project needs. OPO lasers are realized with $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passive Q -switch for two different unstable cavities. Under the power supply of 7J, laser output at 1.57 μm is attained with high beam quality. For one of the cavities, the laser output energy and divergence are 6mJ and 3.0mrad, respectively. For the other cavity, 4mJ and 3.0mrad. The difficulty of poor beam quality of OPO is overcome with the simple and compact structure.

Key words nonlinear optics; OPO laser; high beam quality; eyesafe laser rangefinder

引 言

OPO (optical parametric oscillator) 是一种获得 1.5 μm 激光的常用技术。利用 OPO 技术将 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器 1.06 μm 激光转换为 1.57 μm 人眼安全波段。1.57 μm 激光由于其良好的人眼安全性能和穿透大气、战场烟雾的性能, 同时由于其技术成熟性和具有阈值低、转换效率高、重复频率高、体积小、重量轻、可靠性高等优点, 是现役军用 1.06 μm $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器升级换代的最佳选择。可以预见, 今后它将成为人眼安全激光测距的主要光源。

OPO 的发展可以追溯到 20 世纪 60 年代。1961 年, FRANKEN 等人在光波段观察到二次谐波^[1]。1962 年, AMSTRONG^[2], KROLL^[3], AKHMANNOV 和 KHOKHLOV 分别提出了利用光参量振荡产生可调谐激光的建议。1965 年, WANG 和 RACETTE 成功实现了参量振荡, 他们所用的非线性材料是铌酸锂 (LiNbO_3), 由调 Q $\text{Nd}:\text{CaWO}_4$ 激光器的 0.529 μm 倍频光抽运。之后不久, 俄罗斯莫斯科国立大学的 AKHMANOV 演示了 KDP 光参量振荡器, 由调 Q 钕玻璃激

光器抽运, 调谐范围 957.5nm ~ 1177.5nm。1968 年, SMITH 及 BYER 等人研制成功了连续运转的光参量振荡器。在 20 世纪 70 年代中期, 由 Chromatic 公司生产了第 1 台商品化的光学参量振荡器。

由于研究初期, 为了降低抽运阈值、提高输出能量多采用腔长较短的平行平面腔或稳定谐振腔, 这就导致了 OPO 振荡光的发散角都非常大, 这在很大程度上限制了 OPO 技术的应用。因此, 近年来, 人们的工作集中在如何有效地提高 OPO 的输出光束质量上。国内 Baozhaorigetu 等将渐变反射率镜 (VRM) 虚共焦非稳腔成功地应用于 OPO, 在工作重复频率 20Hz 时, 获得了能量 40mJ, 光束发散角 4mrad 的 1.57 μm 激光输出^[4]。并利用 1.06 μm 激光抽运非临阶相位匹配 KTP-OPO, 获得了重复频率 20Hz 输出能量 115mJ 的 1.57 μm 激光输出^[5]。BAO 等也采用变反射率镜虚共焦非稳腔, 得到了输出能量 60mJ/pulse 重复频率 1Hz, $M^2 < 3$, 光-光效率 40% 的 1.57 μm 人眼安全激光^[6]。在小型化方面, Baozhaorigetu 采用内腔式非临阶相位匹配 KTP-OPO, 获得了发散角 7mrad 输出能量 12mJ 脉冲重复频率 1Hz 的 1.57 μm 激光输出。CHEN 等人采用双定向棱镜谐振腔, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 晶体、 $\text{Ce}:\text{Nd}:\text{YAG}$ 作为激光介质、非临阶相位匹配 KTP 晶体, 获得了 5.3mJ 脉宽 6ns, 发散角 5mrad 重复频率 3Hz 的 1.57 μm OPO 激光输出^[7]。这几位作者的

作者简介: 钟 鸣 (1957-), 男, 研究员, 从事军用固体激光器件研究。

Email: office@xjtu.net

收稿日期: 2004-12-27; 收到修改稿日期: 2005-05-15

研究方法虽然取得了较好的结果,但是结构复杂,成本较高。

1 紧凑型 OPO 人眼安全激光实验研究

1.1 1.57μm OPO 激光器试验装置

作为军用激光测距光源,要求体积小、重量轻、输入能量阈值低,最好采用被动调 Q,前面已提及国内外研究人员在改进 OPO 激光器光束质量方面做了大量的工作,也取得了很好的效果,但在工程应用中,其结构尚嫌复杂。作者的工作则着重于紧凑型(体积小、重量轻、工程化)、须经过高、低温环境考核(高温工作 + 55℃,低温工作 - 43℃)的 OPO 激光器,采用 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q,在 7J 的电输入下,获得了 4mJ 光束发散角 3mrad 的 1.57μm 激光输出。图 1 是紧凑型 1.57μm OPO 激光器结构图,其外形封装尺寸为 120mm × 30mm × 40mm。图中,1 为 1.06μm 全反片;2 是 YAG 晶体 ∅4 × 60mm;3 为 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 片;4 为两面镀 1.06μm 高透,右面镀 1.57μm 全反膜片;5 为 KTP 晶体;6 为左面镀 1.06μm 高反、部分 1.57μm 激光输出,右面镀 1.57μm 增透膜片。

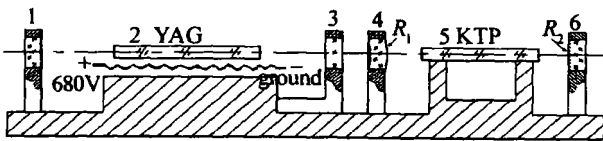


Fig 1 Structural drawing of compact 1.57μm OPO laser

由图 1 可知,1,6 两个 1.06μm 高反膜片形成 1.06μm 全封闭腔,目的是降低激光器的振荡阈值和提高转换效率。4,6 组成 1.57μm 激光振荡腔,该腔是非稳腔(实验时分别采用了平凸腔与虚共焦腔,图 1 中只画了半凸腔形式),使得 1.57μm 激光光束质量大大得到改善。图 2 是激光脉冲波形图。

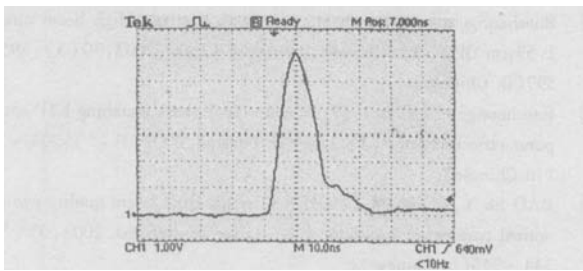


Fig 2 Waveform picture of 1.57μm OPO laser

1.2 实验装置理论分析

如图 3 所示,以虚共焦 OPO 腔光波在腔内的一个

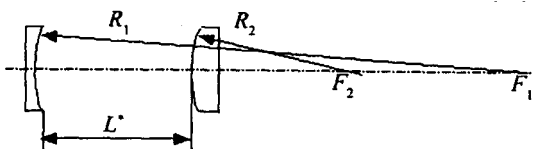


Fig 3 Optical schematic of unstable resonator

往返。其变换矩阵为^[8]:

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{2L^*}{R_2} & 2L^* \left(1 - \frac{L^*}{R_2}\right) \\ -\frac{2}{R_1} - \frac{2}{R_2} \left(1 - \frac{2L^*}{R_1}\right) & \left(1 - \frac{2L^*}{R_1}\right) \left(1 - \frac{2L^*}{R_2}\right) - \frac{2L^*}{R_1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, R_1, R_2 为腔镜曲率半径, L^* 为腔长(光程)。谐振腔本征模式问题,数学上归结为该变换作用的本征值与本征态的求解问题。

本征模式的求解又可以归结为自再现条件下 ABCD 定律的方程的求解。该变换作用的本征态及本征值分别用 F 及 λ 表示,它们满足的本征方程为:

$$TF = \lambda F \quad (2)$$

几何光学中,对于傍轴光线,在轴对称的情况下,变换作用由 2×2 的变换矩阵 T 表示,本征态 F 用 $\begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix}$ 表示,其中 r 为光线离开轴线 z 的距离, θ 为光线传播方向与 z 轴方向的夹角。则(2)式为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

考虑到光学系统变换矩阵满足:

$$AD - BC = 1 \quad (4)$$

则本征值 λ 所满足的一元二次方程为:

$$\lambda^2 - (A + D)\lambda + 1 = 0 \quad (5)$$

而本征态所满足的方程为:

$$\begin{cases} (A - \lambda)r + B\theta = 0 \\ Cr + (D - \lambda)\theta = 0 \end{cases} \quad (6)$$

因此,只需根据 λ 取值的不同情况,求解上述方程,即可对相应的本征模式进行讨论:

$$\lambda = \frac{1}{2}(A + D) \pm i \sqrt{1 - \left(\frac{A + D}{2}\right)^2} \quad (7)$$

非稳腔的情况为: $\left(\frac{A + D}{2}\right)^2 > 1$, 这时本征方程实数解为:

$$\lambda_{\pm} = \frac{A + D}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A + D}{2}\right)^2 - 1} \quad (8)$$

所对应的本征态,是实曲率半径为 ρ 的球面波:

$$\rho_{\pm} = \frac{r}{\theta} = \frac{B}{\lambda - A} = \frac{\lambda - D}{C} \quad (9)$$

将(8)式代入,得:

$$\rho_{+,-} = \frac{A-D}{2C} \pm \frac{\sqrt{[(A+D)/2]^2 - 1}}{C} \quad (10)$$

式中,下标“+,-”分别代表(8)式中分别取+,-时的解。将(1)式代入,得:

$$\rho_{+,-} = \frac{\pm \sqrt{L^* (L^* - R_1)(L^* - R_2)(L^* - R_1 - R_2)} - L^* (L^* - R_2)}{2L^* - R_1 - R_2} \quad (11)$$

其两个解满足 $\lambda_+ \lambda_- = 1$, 即两个本征值的解同号, 其中一个本征值的绝对值大于 1, 对应着发散球面波, 在非稳腔中能够实现自再现; 另一个本征值的绝对值小于 1, 对应着汇聚球面波多次往返后汇聚于一点, 不能实现自再现:

$$\rho_- = \frac{\sqrt{L^* (L^* - R_1)(L^* - R_2)(L^* - R_1 - R_2)} - L^* (L^* - R_2)}{2L^* - R_1 - R_2} \quad (12)$$

因此, 可以通过控制膜片 4 的 R_1 来改变腔型, 获得满足使用要求的激光能量, 有关该器件作者正在申报专利。

1.3 实验结果

由 1.1 节及图 1 可知, 由膜片 4 6 组成 1.57 μm 激光振荡腔, 是一个非稳腔, 输出波面是一个球面波, 因此, 在测试系统前加一准直透镜 1、2(聚焦透镜)、3(可调小孔光阑)、4(能量计)、是按 GB/T 13740-92^[9] 建立的激光辐射发散角测试系统, 见图 4。测试工作在西南技术物理研究所计量检验中心进行。

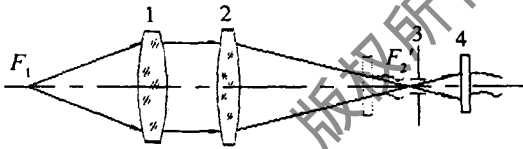


Fig 4 Testing schematic of 1.57 μm OPO laser

1.3.1 平凸腔情况 实验设计数据为: $R_1 = 200\text{mm}$, $R_2 = \infty$; $L^* = 31.56\text{mm}$; 对应的放大率: $M_2 = \frac{\sqrt{1+200/L^*} + 1}{\sqrt{1+200/L^*} - 1} = 2.18$ 对应的损耗: $\delta_2 = 1 - \frac{1}{M_2^2} = 79\%$ 。实验结果为: 当 $R_1 = 210.9\text{mm}$ 时, 1.57 μm 激光输出为 4mJ 发散角为 3mrad 脉宽 10ns

1.3.2 虚共焦腔 实验设计数据为: $R_1 = 317.57\text{mm}$, $R_2 = 254.05\text{mm}$; 对应的放大率: $M = R_1/R_2 = 1.25$ 对应的损耗: $\delta_2 = 36\%$ 。实验结果为: 1.57 μm 激光输出为 6mJ 发散角为 3mrad 脉宽 10ns

从以上实验结果可以看出, 在输入抽运 1.06 μm 激

光参数相同的情况下, 输出 1.57 μm 激光能量与非稳腔腔型有关。由于结构设计中, 输出光部分为由输出镜输出部分, 而非取自逸出腔外部分, 因此, 损耗越大, 输出光能量越小, 与实验结果一致。

而发散角的大小在输入抽运 1.06 μm 激光参数相同的情况下, 主要取决于 1.06 μm 激光与 1.57 μm 激光的模式匹配。模式匹配主要参数为两束光的光腰直径。因非稳腔的最终输出为平面波, 故取出射口径为光腰, 其大小受输出镜限制, 两种激光腔输出镜直径相同, 因此, 发散角近似相同, 也与实验结果一致。

2 结 论

目前, 常用的 3 种 1.5 μm 军用激光技术 (喇曼频移激光技术, OPO 激光技术, 掺钕磷酸盐玻璃激光技术) 中, OPO 激光技术从技术成熟性和具有阈值低、转换效率高、重复频率高、体积小、重量轻、全固态、可靠性高等优点, 最具发展潜力。本文中的 OPO 激光器采用非稳腔结构, 不仅结构紧凑适合工程化使用, 而且在一定程度上克服了 OPO 激光器发散角偏大 (一般在 10mrad 左右) 这一实际应用难题, 使输出发散角可与一般的固体激光器的发散角相比较, 这样更利于工程应用。但缺点在于输出能量偏小, 作者正在进一步改进该器件。

参 考 文 献

- [1] FRANKEN P A, HILLA E G. Generation of optical harmonics [J]. Phys Rev Lett 1961, 7(4): 118~119.
- [2] AMOSTRONG J A, BLOEMBERGEN N. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. Phys Rev 1962, 127(6): 1918~1939.
- [3] KROLL N M. Parametric amplification in spatially extended media and application to the design of tunable oscillators at optical frequencies [J]. Phys Rev 1962, 127(4): 1207~1211.
- [4] Baozhaorigetu ZHOU Sh H, ZHAO H X *et al*. High beam quality 1.57 μm OPO [J]. Chinese Journal of Lasers 2003, 30(5): 395~397 (in Chinese).
- [5] Baozhaorigetu, PEI B. 1.57 μm noncritical phase matching KTP optical parametric oscillator [J]. Laser & Infrared 2001, 31(5): 304~311 (in Chinese).
- [6] BAO Sh Y, GONG M L, CHEN G *et al*. High beam quality eye-safe optical parametric oscillator [J]. Laser & Infrared 2003, 33(5): 344~345 (in Chinese).
- [7] CHEN B, CHENG Y. Consolidated design of eye-safe OPO laser [J]. Laser Technology 2004, 28(1): 91~93 (in Chinese).
- [8] LU Y X, YANG Y P, CHEN S F. Laser transmission and transformation technology [M]. Chengdu UESTC Press 1999, 140~142 (in Chinese).
- [9] GB/T 13740-92. Test method of divergence angle of laser radiation [S] (in Chinese).