

LD 端面泵浦的 1.57 μm 内腔式 OPO

曲 瑜, 李宇飞, 孙渝明, 侯学元, 戚焕筠

(山东大学 信息学院, 山东 济南 250100)

摘要: 1.57 μm 波长激光为人眼安全波长激光。将 KTP 晶体置于一个由 LD 端面泵浦、声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 晶体双凹谐振腔内, 利用 KTP 表面镀膜建立了内腔式 OPO, 实现了重复率在 5~40 kHz 范围内 1.57 μm 脉冲激光的稳定输出。实验结果表明, 激光的阈值将随声光调 Q 器重复率的增加而升高, 重复率为 5 kHz 时得到最低阈值 1.52 W。重复率为 15 kHz、泵浦功率为 3.7 W 时, 输出光平均功率为 305 mW, 脉冲宽度 50 ns, 峰值功率 400 W。

关键词: LD 端面泵浦; 声光调 Q; 1.57 μm 激光; OPO 技术

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2006)06-0683-04

Diode-end-pumped 1.57 μm intracavity OPO

QU Yu, LI Yu-fei, SUN Yu-ming, HOU Xue-yuan, QI Huan-jun

(School of Information Science & Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: 1.57 μm eye-safe laser is experimentally realized by using an intracavity optical parametric oscillator (OPO) pumped by a diode-end-pumped, acousto-optically (A-O) Q-switched Nd:YVO₄ laser. Stable pulsed output with repetition rate ranging from 5 to 40 kHz is obtained. The laser threshold increases with increasing repetition rate of Q-switching and the lowest threshold of 1.52 W is obtained at a 5 kHz repetition rate. A stable laser output with an average power of 305 mW, a peak power of 400 W, and a pulse width of 50 ns is achieved at a diode pumping power of 3.7 W and a repetition rate of 15 kHz.

Key words: Diode-pumping; AO Q-switching; 1.57 μm laser; OPO technique

0 引 言

1.57 μm 波长激光对人眼是安全的, 适合它的探测器较高, 且在此波长的大气窗口激光辐射与在 1.06 μm 上的相比, 对烟雾有更强的穿透能力, 因而在激光预警、激光测距、激光跟踪等领域有巨大的应用潜力。OPO (Optical Parametric Oscillator) 是一种波长可以大范围调谐的高相干激光技术^[1,2]。根据相位匹配条件, 当 OPO 输出 1.57 μm 光时, KTP 晶体恰好可达到 II 类非

临界相位匹配点 ($\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$), 此时走离角变为 0, 接收角达到最大 (约 3.2°), 有效非线性系数约为 3.64 pm/V。采用 1.064 μm 波长抽运非临界相位匹配 OPO, 因具有阈值低、转换效率高、全固体化等特点, 成为获得 1.57 μm 波长激光输出的一种有效方法^[3], 在高重频大能量 OPO 中广泛应用。与外腔式泵浦 OPO 相比, 内腔式泵浦^[4]的 OPO 具有结构紧凑、设计简单、低阈值和高转换效率的优点, 但由于腔内基频振荡光的功率密度很高, 对非线性晶体的抗光伤性能有较高要求, KTP 晶体

收稿日期: 2005-12-10; 修订日期: 2006-02-09

作者简介: 曲瑜 (1977-), 男, 湖北宜昌人, 研究生, 主要从事激光物理与技术方面的研究。Email: quyu73076@sdu.edu.cn

因具有抗光伤阈值高的特点,成为适合于内腔式泵浦 OPO 的非线性晶体^[5,6]。文中介绍的 OPO 谐振腔结构,是通过在由 LD 连续光泵浦、声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 双凹谐振腔内放置一 KTP 晶体,利用 KTP 晶体表面镀膜在 1.064 μm 谐振腔内形成的内腔式 OPO。当声光调 Q 的重复率在 5~40 kHz 范围内变化时,激光器都能获得稳定的 1.57 μm 脉冲激光输出。

1 实验装置

实验装置如图1所示。泵浦源为美国 Coherent 公司生产的光纤束耦合输出的半导体激光器。全反镜为一平凹镜,曲率半径 R=250 mm,凹面镀 808 nm 增透

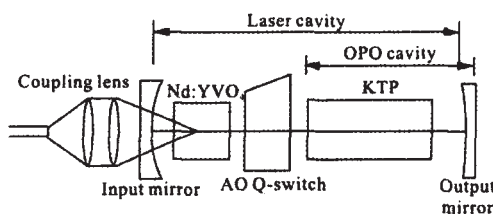


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental laser setup

膜和 1.06 μm 全反膜,平面镀 808 nm 的增透膜;输出镜为一平凹镜,镀 1.06 μm 全反膜和 1.57 μm 透射率 (T=1.8%) 的介质膜,它与全反镜共同构成 1.06 μm 激光谐振腔。激光晶体为某晶体所生长的 Nd:YVO₄, 尺寸为 4 mm×4 mm×5 mm, 掺杂浓度为 0.5% 原子比,两面各镀 1.06 μm 增透膜;声光调 Q 开关为 QSGSU-6Q 型,重复率范围 5~40 kHz,作用长度 20 mm,两通光面镀 1.06 μm 增透膜。KTP 晶体尺寸为 5 mm×5 mm×25 mm,一面镀 1.06 μm 增透膜和 1.57 μm 全反膜,与输出镜共同构成 1.57 μm 激光的谐振腔。另一面镀 1.06 μm 增透膜和 1.57 μm 增透膜。激光晶体和 KTP 晶体的侧面用铝箔包于紫铜块内,并用半导体制冷器控温在 20℃。

激光器腔长设置为 175 mm。实验中尽量将 KTP 晶体靠近输出镜放置,使 OPO 腔长保持在 30 mm。

2 实验结果及分析

信号光放大率的参量增益系数 g 为^[6]:

$$g = \sqrt{kl_p} \quad (1)$$

式中: k 为耦合常量; l_p 为泵浦光功率密度。由该式可知

参量转换器最佳结构的关键取决于非线性晶体中的泵浦光强度。实验中采用的输出镜 $R=1\ 000$ mm, 根据 ABCD 定律可得腔内束腰位置公式^[7]:

$$L_{02} = \frac{(1-g_2)g_1}{g_1+g_2-2g_1g_2}L \quad (2)$$

式中: g_1 、 g_2 分别为谐振腔参数; L 为腔长。根据公式(2)可算出在腔内热效应不严重的情况下,束腰位于距离输出镜 14.6 mm 的位置,也就是说正好位于 KTP 晶体内部。这样,能够使通过 KTP 晶体的泵浦光功率密度尽量达到最大,从而提高信号光放大率增益系数。

本实验的 OPO 结构系具有返回泵浦光的单谐振 OPO,其阈值公式为^[8]:

$$I_{th} = \frac{1.12}{kg_s l_{eff}^2 (1+\gamma)^2} \left(\frac{L}{t_p c} \ln \frac{P_s}{P_n} + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 4 \right)^2 \quad (3)$$

式中: k 为耦合常量; g_s 为信号光增益系数; l_{eff} 为有效长度; γ 为晶体后向与前向泵浦强度之比值; t_p 为泵浦脉冲 ($1/e^2$) 强度的全宽度; L 为腔长; P_s 和 P_n 分别为阈值信号功率和噪声功率; α 为腔内损耗; R 为输出镜反射率。由公式(3)可以看出较长的有效长度 l_{eff} 和较短 OPO 腔长 L 以及使用低透射率的输出镜都能有效地降低阈值。对于本实验,由于采用了非临界相位匹配,不用考虑离散角的影响,可以认为有效长度为晶体长度。为了降低 OPO 阈值,在实验中选择长度为 25 mm 的 KTP 晶体;使用了对 1.57 μm 输出光低透射率 (T=1.8%) 的输出镜;将 KTP 紧靠输出镜放置,有效地缩短了 OPO 腔长。

用美国 Moletron 公司的 EPM2000 型功率计对 1.57 μm 输出光平均功率进行测量,探测器前加滤光片,滤掉腔内逸出的 1.06 μm 和 0.53 μm 激光,图 2 为在不同重复率下的平均功率输出曲线。激光器阈值随

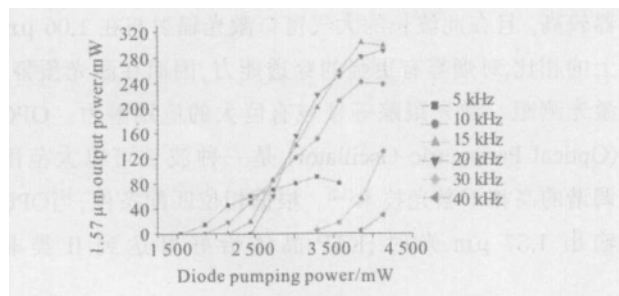


图 2 1.57 μm 平均功率输出曲线

Fig.2 Variation of average power of 1.57 μm output laser versus diode pumping

声光开关重复率的增加逐渐升高。究其原因,在达到 OPO 阈值前,对于相同的 LD 泵浦功率,腔内 1.06 μm 振荡光的光子浓度可以认为保持不变,在振荡光脉冲宽度变化缓慢时,振荡光脉冲的峰值功率则应该与声光调 Q 重复率近似成反比。当重复率较低时,在较低 LD 泵浦功率下就可获得较高峰值功率的脉冲,因而使得 OPO 在较低的阈值时便可起振。重复率 5 kHz 时阈值为 1.52 W,重复率 40 kHz 时阈值为 3.73 W。当重复率为 15~20 kHz 时有较为理想的输出曲线,曲线的斜率效率分别为 20.5%和 17.5%。

重复率在 5、10、15、20 kHz 时,输出曲线在末端均出现饱和,而且调 Q 重复率越低饱和出现越早。重复率 30 kHz 和 40 kHz 时,分别在 LD 泵浦光功率达 3.7 W 和 4.2 W 时获得稳定输出,其饱和点的测量由于泵浦源条件限制而未进行。输出曲线出现饱和点现象的原因,一是由于腔内功率较高引起 KTP 晶体的热效应所致;二是在一定谐振腔情况下,泵浦功率存在一个最佳值,超过这个值,腔内会发生参量逆过程 $\omega_s + \omega \rightarrow \omega_p$ (ω_s 为信号光频率, ω 为闲频光频率, ω_p 为泵浦光频率),它将抑制正过程 $\omega_p \rightarrow \omega_s + \omega$ 的进行,导致参量输出效率下降,由于较低重复率将会带来较高的泵浦脉冲峰值功率,因而较早出现这一逆过程;三是随着 LD 泵浦功率的增加, Nd:YVO₄ 晶体产生的热效应造成 1.06 μm 泵浦光的偏振特性和光束质量均有所下降。对于本实验所采用的双凹腔,1.06 μm 激光束腰位于 KTP 晶体内部,因而 KTP 晶体的热效应相对严重,且参量振荡的逆过程也会因为较高泵浦功率密度而出现得较早,这都将导致在 OPO 有较低阈值的同时,也会较早出现饱和。

采用美国 Judson Technologies 公司生产的锗探测器(响应波长范围 800~1800 nm)及美国 Tektronix 公司生产的 TDS 3032B 型示波器对 1.57 μm 输出脉冲波形进行测量。图 3 为输出脉冲宽度随 LD 泵浦光功率的变化曲线。由图可知在不同调 Q 重复率下,1.57 μm 脉冲宽度随着 LD 光功率的加大逐渐变窄。在输出稳定后,脉冲宽度大致在 45~60 ns 范围内。图 4 为泵浦功率 2.8 W,重复率 10 kHz 时的脉冲形状。由于探测器电路设计的原因,示波器采用脉冲下降沿触发,脉冲显示为

负脉冲。由图 4 可见脉冲下降沿非常陡,而上升沿则相对平缓。图 5 显示了当调 Q 重复率为 10 kHz、LD 泵浦功率 2.8 W 时的输出脉冲序列,可以看出脉冲输出稳定,各峰值功率相当。

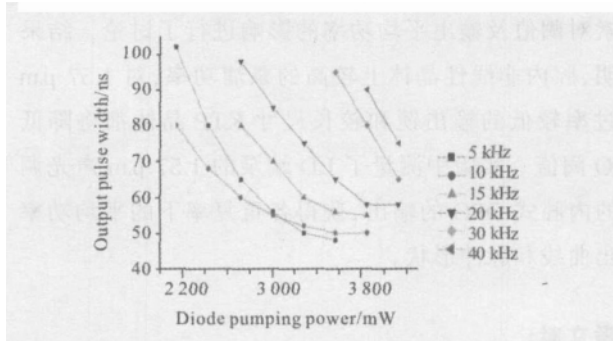


图 3 脉宽随 LD 泵浦功率变化曲线

Fig.3 Variation of the output pulse width versus diode pumping power

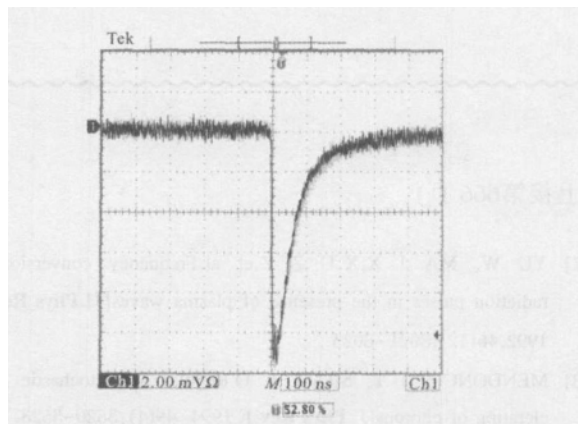


图 4 重复率 10 kHz 时, 1.57 μm 输出脉冲波形

Fig.4 Pulse shape of 1.57 μm output laser at 10 kHz repetition rate

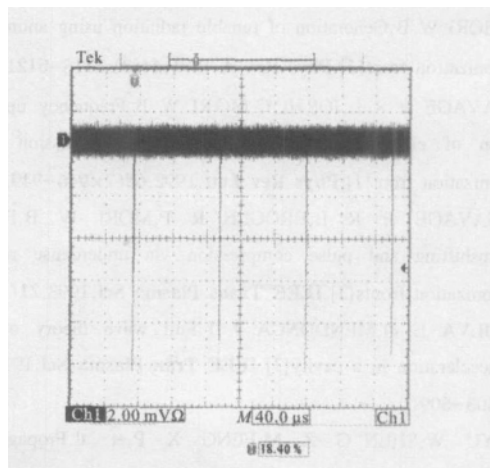


图 5 重复率 10 kHz 时, 1.57 μm 输出脉冲序列图

Fig.5 Train of 1.57 μm output pulses at 10 kHz repetition rate

3 结 论

从阈值公式出发,对腔型结构和输出镜透过率等因素对阈值及输出平均功率的影响进行了讨论,结果表明,腔内非线性晶体上较高的泵浦功率,对 1.57 μm 透过率较低的输出镜和较长尺寸 KTP 晶体都将降低 OPO 阈值。实验中测量了 LD 端泵的 1.57 μm 声光调 Q 的内腔式 OPO 的输出,获得各重复率下的平均功率输出曲线和脉冲形状。

参考文献:

- [1] PENG Xiao-yuan, XU Lei, ASUNDI A. Highly efficient high-repetition-rate tunable all-solid-state optical parametric oscillator [J]. IEEE Quantum Electron, 2005, 41 (1): 53 - 61.
 - [2] MARSHALL L R, KAZ A. Eye-safe output from noncritically phase-matched parametric oscillators [J]. Opt Soc Am B, 1993, 10: 1730-1736.
 - [3] FALK J, YARBOROUGH J M, AMMAN E O. Internal optical parametric oscillation [J]. IEEE J Quantum Electron, 1971, QE-7 (7): 359-369.
 - [4] YASHKIR Y, VAN DRIEL H M. Passively Q-switched 1.57 mm intracavity optical parametric oscillator [J]. Appl Opt, 1999, 38: 2554-2559.
 - [5] CHEN Y F, CHEN Y C, CHEN S W. High-power efficient diode pumped passively Q-switched Nd:YVO₄/KTP/Cr⁴⁺:YAG eye-safe laser [J]. Opt Commun, 2004, 234: 337-342.
 - [6] WALTER Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. 5rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1999: 544-546.
 - [7] L ÜB D. Laser Optics [M]. Beijing: Higher Education Press (吕百达. 激光光学. 北京: 高等教育出版社), 2003: 271.
-
- (上接第666页)
- [7] YU W, MA J X, XU Z Z, et al. Frequency conversion of radiation pulses in the presence of plasma waves [J]. Phys Rev A, 1992, 46(12): 8021-8023.
 - [8] MENDONCA J T, SILVA L O. Regular and stochastic acceleration of photons [J]. Phys Rev E, 1994, 49(4): 3520-3523.
 - [9] SILVA L O, MENDONCA J T. Kinetic theory of photon acceleration: time-dependent spectral evolution of ultrashort laser pulses [J]. Phys Rev E, 1998, 57(3): 3423-3431.
 - [10] MORI W B. Generation of tunable radiation using an underdense ionization front [J]. Phys Rev A, 1991, 44(8): 5118-5121.
 - [11] SAVAGE Jr R L, JOSHI C, MORI W B. Frequency upconversion of electromagnetic radiation upon transmission into an ionization front [J]. Phys Rev Lett, 1992, 68(7): 946-949.
 - [12] SAVAGE Jr R L, BROGLE R P, MORI W B. Frequency upshifting and pulse compression via underdense relativistic ionization fronts [J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1993, 21(1): 5-19.
 - [13] SILVA L O, MENDONCA J T. Full wave theory of photon acceleration in a cavity [J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1996, 24(2): 503-509.
 - [14] YU W, SHEN G Z M, FENG X P, et al. Propagation of electromagnetic radiation in the presence of oncoming ionization fronts [J]. J Phys D: Appl Phys, 1993, 26: 1141-1143.
 - [15] YU W, SHENG Z M, FENG X P, et al. Realization of relativistic reflectors with the use of an electron beam and an ionization front [J]. J Phys D: Appl Phys, 1993, 26: 2093-2095.
 - [16] SPRANGLE P, ESAREY E, TING A. Nonlinear interaction of intense laser pulses in plasmas [J]. Phys Rev A, 1990, 41(8): 4444-4469.
 - [17] DIAS J M, STENZ C, LOPES N C, et al. Experimental evidence of photon acceleration of ultrashort laser pulses in relativistic ionization fronts [J]. Phys Rev Lett, 1997, 78 (25): 4773-4776.
 - [18] DIAS J M, LOPES N C, SILVA L O, et al. Two-dimensional collision of probe photons with relativistic ionization fronts [J]. Phys Rev E, 2002, 65: 036404.
 - [19] BAKUNOV M I, MASLOV A V. Frequency upshifting of electromagnetic radiation via oblique incidence on an ionization front [J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1999, 27 (3): 655-663.
 - [20] BAKUNOV M I, MASLOV A V, IVANOV P A. Interaction of an electromagnetic wave packet with an ionization front: copropagation configuration [J]. Phys Rev E, 2001, 63: 037401.
 - [21] BAKUNOV M I, MASLOV A V, NOVOKOVSKAYA A L. Interaction of an electromagnetic wave with a suddenly stopped ionization front [J]. Phys Rev E, 2002, 66: 026404.
 - [22] DIAS J M, LOPES N C, SILVA L O, et al. Photon acceleration of ultrashort laser pulses by relativistic ionization fronts [J]. Phys Rev E, 2002, 66: 056406.