

锁模激光泵浦的内腔光参量振荡器的中红外输出特性

宋朋¹, 王静¹, 张海鹞¹, 周城¹, 刘仕鹏¹, 吕峰¹

(济南大学物理科学与技术学院, 山东 济南 250022)

摘要: 在实验上实现了连续(CW)锁模激光泵浦的内腔光学参量振荡器(OPO)的运转, 并得到中红外闲频光的输出。实验中采用的腔型、腔镜位置和腔长等参数是在考虑稳定腔条件的基础上通过 ABCD 矩阵计算确定, 同时匹配 OPO 腔和基频激光谐振腔的腔长来满足同步泵浦条件。首先测量了没有 OPO 振荡情况下的半导体饱和吸收镜(SESAM)锁模激光的输出波形, 并找到稳定连续锁模运转的阈值; 其次测量了内腔 OPO 的闲频光、信号光和基频光的输出功率、输出波形、重复频率及脉冲宽度等参数, 并通过测量信号光和基频光的光谱来确定中红外闲频光的输出中心波长在 3.3 μm 。

关键词: 连续锁模; 内腔光参量振荡; 同步泵浦; 中红外

中图分类号: TN243 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S206001

Mid-infrared output characteristic from a mode-locking laser pumping intra-cavity optical parametric oscillator

Song Peng¹, Wang Jing¹, Zhang Haikun¹, Zhou Cheng¹, Liu Shipeng¹, Lv Feng¹

(School of Physics and Technology, Jinan University, Jinan 250022, China)

Abstract: The continuous-wave (CW) mode-locking laser pumping intra-cavity optical parametric oscillator (OPO) was realized with experiment, output of mid-infrared idle light was gotten. The cavity shape, position of cavity mirror, cavity length were determined by ABCD matrix considering stable cavity. By matching the length of the OPO cavity and the fundamental frequency laser cavity to meet pumping condition synchronously. Firstly, the output profile of SESAM mode-locking laser was measured without OPO oscillating, the threshold of stable continuous-wave mode-locking running was found. Secondly, output power, output waveform, repetition frequency, and pulse width of the idle frequency, signal and fundamental frequency light of intra-cavity OPO were also measured. It is concluded that the central wavelength of the idle frequency light is about 3.3 μm through measuring spectrum of signal light and fundamental frequency light.

Key words: continuous-wave mode locking; intra-cavity optical parametric oscillator; synchronously pumping; mid-infrared

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(61308057); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2012DX003, BS2013DX024); 济南大学科研基金(XKY1225)

作者简介: 宋朋(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光技术方面的研究。Email: ss_songp@ujn.edu.cn

通讯作者: 王静(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要从事红外固体激光及其非线性转换方面的研究。Email: wang_jing2588@163.com

0 引言

由于中红外激光在遥感探测、医学治疗、光谱研究、军事等众多领域具有广泛的用途,因此近几年来有众多研究工作围绕中红外波长激光展开。光学参量振荡器(optical parametric oscillator, OPO),能够在较宽频谱范围内实现连续可调谐波长的输出,成为实现 3~5 μm 中红外光脉冲输出的重要手段^[1-5]。

用锁模近红外激光作为基频光,可以实现 OPO 的中红外皮秒、飞秒脉冲的输出,因此锁模基频激光器的运转对 OPO 的输出特性至关重要。而近几年来,锁模激光器的发展也较为迅速。在众多的锁模手段中,半导体饱和吸收镜(SESAM)可以在腔内实现自启动的克尔锁模,并且具有结构简单、稳定性和可靠性好等优点,从而成为锁模激光领域的研究热点。已有报道介绍了用 SESAM 锁模激光泵浦的 OPO 信号光输出并研究了特性,输出信号光具有波形稳定、转换效率较高等优点。但目前对同样锁模方式的 OPO 中红外闲频光输出特性的报道较少^[6-9]。

腔型是影响 OPO 输出特性的另外一个重要因素。相比于外腔型,内腔 OPO 具有基频光光强高、转换效率高优点,而内腔型也被广泛地应用于连续(CW)和调 Q OPO 的设计中^[10],但由于要实现同步泵浦,锁模 OPO 一般采用的是外腔型。如果能够解决同步泵浦问题,内腔 OPO 有望能够得到优良的锁模闲频光输出。

文中主要介绍了 SESAM 连续锁模泵浦的全固态内腔 OPO 的实验运转,通过信号光的振荡,得到中红外闲频光的输出。在腔型设计时,将采用 ABCD 传输矩阵的方法计算腔长以满足稳定腔条件,并通过匹配 OPO 腔和基频激光谐振腔来满足同步泵浦条件。测量闲频光和信号光的输出功率、锁模波形等输出特性,及它们的光谱来计算闲频光的中心波长。

1 实验设置

以 LD 泵浦的 SESAM 锁模激光作为基频光的内腔 OPO 的实验装置图如图 1 所示。基频激光腔采用 X 腔型。20 mm 长的激光增益介质 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 的入射面镀有 808 nm 的增透膜和 1064 nm 的高透膜。非线性转换介质采用 KTA 晶体,长度为 26.7 mm,并

沿 x 轴切割($\theta=90^\circ, \phi=0^\circ$)以实现 II 类非临界相位匹配。KTA 两面均镀有 1550 nm、1064 nm 和 3.4 μm 的增透膜。激光晶体和非线性晶体均用水冷控制温度,分别在 20 $^\circ\text{C}$ 和 22 $^\circ\text{C}$ 。

平镜 M_1 和凹面镜 M_2 镀有 1.06 μm 的高反膜; M_4 在 1.50 μm 和 3.4 μm 波长处镀有高反膜,在 1.06 μm 处镀有高透膜;输出镜(OC) M_5 镀有 1.06 μm 的高反膜和 1.50 μm 的 5% 反射膜。基频激光在 X 腔内振荡,而产生的信号光在 M_4 和 M_5 间振荡。耦合镜 M_5 输出闲频光和信号光。所有腔镜均被置于六维调节架上以精密调节位置。

SESAM 在 1020~1110 nm 波长范围内镀有 >98% 的反射膜,1064 nm 位置处的饱和损耗为 1%,非饱和损耗为 0.4%,饱和通量为 $\Phi_{\text{sat}}=70 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。弛豫时间为 1 ps。

基于 ABCD 传输矩阵理论,并考虑到激光晶体的热效应,通过计算可以确定 X 腔的参数^[11]。 M_1 和 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体的入射面距离为 15 mm; $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 的另一面与 M_2 取为 335 mm; M_2M_5 腔取为 785 mm; M_1M_3 腔长为 460 mm。所以基频激光腔的光学长度大概为 1595 mm,而 OPO 谐振腔长大概为 63.8 mm,因此当基频光在腔内往返一周时,信号光正好往返 25 次,满足同步泵浦条件^[12-14]。

产生的信号光和闲频光功率用 MAX500AD 型号的激光功率计测量(Coherent Inc, U.S.A.),信号光的时间波形用 TDS620B 的数字示波器记录(Tektronix, U.S.A.)。

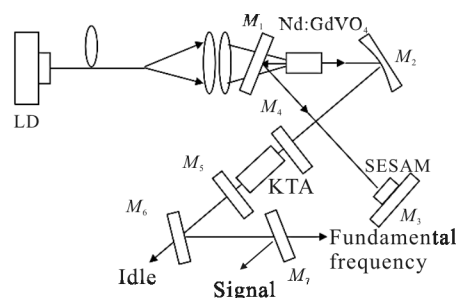


图 1 实验设置图

Fig.1 Experimental setup

2 实验结果分析

图 2 是没有 OPO 腔时 SESAM 锁模的 1.06 μm 激光的输出波形图。在输入功率较低时,输出为调 Q

锁模,当泵浦功率达到 1.2 W 以上时,输出为稳定的连续锁模。

频光的约为 1 063.57 nm,由相位匹配条件可计算闲频光的中心波长约为 3.31 μm 。

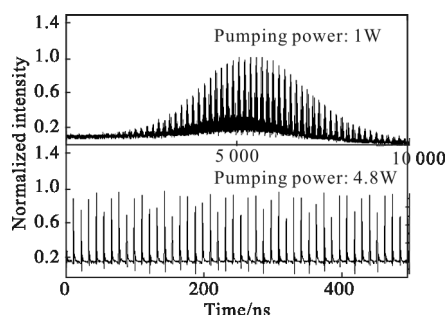


图 2 没有 OPO 腔基频激光锁模波形图

Fig.2 Mode-locked fundamental frequency light trains without OPO cavity

图 3 为 LD 泵浦功率为 4 W 时的信号光波形图,可以看到锁模脉冲周期大概为 11.1 ns,正好等于基频光在谐振腔内往返一周的时间,说明信号光的锁模脉冲来源于其基频光的锁模。图 3 还给出了单个锁模脉冲的时间波形,可以看出信号光脉冲大约为 540 ps。

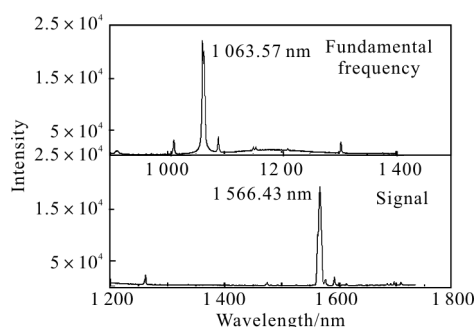


图 5 信号光和基频光的光谱图

Fig.5 Spectroscopy of fundamental frequency and signal light

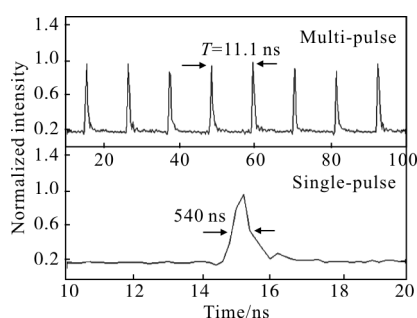


图 3 锁模信号光时间波形图

Fig.3 Profile of mode-locking signal light

图 4 为输出的信号光和闲频光的平均功率随泵浦功率的变化图,而信号光和基频光的光谱图见图 5。可以看到信号光的中心波长约为 1 566.43 nm,基

3 结 论

在实验上实现了 SESAM 连续锁模泵浦的内腔 OPO 的运转,采用 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 和 KTA 作为增益介质和非线性转换晶体,通过信号光的振荡得到了中红外闲频光的输出。首先测量了基频锁模激光器的输出波形,找到使基频激光器稳定连续锁模的阈值功率,在此基础上测量了 OPO 近红外、中红外输出功率、波形及光谱图等,通过相位匹配计算中红外中心波长为 3.3 μm 。

参 考 文 献:

- [1] Yang S, Zhou Y L, Kenneth J, et al. Actively mode-locked fiber optical parametric oscillator [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15 (2): 393-398.
- [2] Chang Y M, Lee J, Jhon Y M, et ai. Q-switched mode-locking of an erbium-doped fiber laser using cavity modulation frequency detuning [J]. *Applied Optics*, 2012, 51 (21): 5295-301.
- [3] Blau P, Pearl S, Fastig S, et al. Single-mode operation of a mid-infrared optical parametric oscillator using volume-Bragg-grating cavity mirrors [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44(9): 867-871 .
- [4] Armaroli A, Feron P, Dumeige Y. Stable integrated hyper-parametric oscillator based on coupled optical microcavities [J]. *Opt Lett*, 2015, 40(23): 5622-5625.
- [5] Sun Q B, Liu H J, Huang N, et al. High energy and high efficiency 3.4 μm extracavity KTA optical parametric oscillator [J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(1): 16-20.
- [6] Grütter A A, Weber H P, Dändliker R. Imperfectly mode-

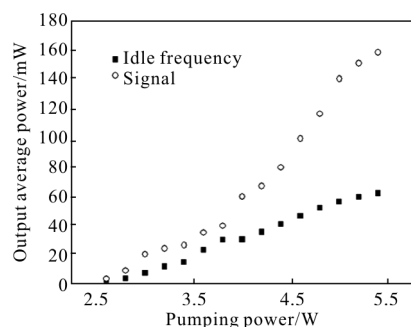


图 4 信号光和闲频光的输出功率

Fig.4 Signal and idle frequency light output average power

- locked laser emission and its effects on nonlinear optics [J]. *Physical Review*, 1969, 185(2): 629–643.
- [7] Dai J, Zhang W, Zhang L, et al. A diode-pumped, self-starting, all-solid-state self-mode-locked Cr:LiSGaF laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(2): 71–73.
- [8] Keller U, Weingarten K J, Kärtner F X, et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2 (3): 435–453
- [9] Zavadilová A, Vyhřídál D, Kubecek V, et al. Subharmonic synchronously intracavity pumped picosecond optical parametric oscillator for intracavity phase interferometry [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(11): 125403–125406.
- [10] Jiao Z, He G, Guo J, et al. High average power 2 μm generation using an intracavity PPMgLN optical parametric oscillator [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(1): 64–66.
- [11] Samimi S, Keshavarz A. Investigation of thermal induced diffraction loss on Q-switched intracavity optical parametric oscillator [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 184–188.
- [12] Haakestad M W, Fonnum H, Arisholm G, et al. Mid-infrared optical parametric oscillator synchronously pumped by an erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 25379–88.
- [13] Ramaiah-Badarla V, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M. Two-crystal, synchronously pumped, femtosecond optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(3): 324–327.
- [14] Mcewan K J, Terry J A C. Synchronously pumped OPO-OPO and OPO-DFM devices [C]//Lasers and Electro-Optics Society (the Meeting of the IEEE), 2001, 2: 667–668.