

文章编号: 0258-7025(2006)01-0009-04

4 ~ 5 μm 全固化可调谐激光实验研究

卞进田¹, 秦树军², 聂劲松¹, 孙晓泉¹

(¹ 中国人民解放军电子工程学院光电系, 安徽 合肥 230037; ² 科苑集团博士后流动站, 安徽 合肥 230088)

摘要 报道了采用 KTP 晶体和 LiIO₃ 晶体实现 4 ~ 5 μm 可调谐激光输出的光参量振荡器(OPO)至差频产生器(DFG)的全固化结构和相应的实验结果。其中光参量振荡器的抽运源为倍频 Nd:YAG 激光, 差频产生器的抽运源分别是上述光参量振荡器激光和 Nd:YAG 基频激光经 KTP 倍频晶体后剩余的 1.064 μm 激光。实验中 Nd:YAG 基频脉冲激光脉宽 12 ns, 单脉冲能量 300 mJ。观察到最大倍频效率达到 66.7%, KTP 参量量子转换效率达到 50%, 差频量子转换效率为 1.5%, 在 4.45 μm 得到了单脉冲 100 μJ 的激光输出。差频光的调谐范围为 4.1 ~ 4.5 μm , 发散角为垂直方向 12 mrad, 水平方向 4 mrad。

关键词 非线性光学; 光学差频产生器; 光参量振荡器; 角度调谐; 相位匹配

中图分类号 O 437; TN 248.1 文献标识码 A

Experimentation of Tunable All-Solid-State Laser Producing 4 ~ 5 μm Radiation

BIAN Jin-tian¹, QIN Shu-jun², NIE Jin-song¹, SUN Xiao-quan¹

¹ Department of Optronics, Electronic Engineering Institute of
Chinese People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230037, China

² Keyuan Group, Postdoctoral Workstation, Hefei, Anhui 230088, China

Abstract An all-solid-state LiIO₃ difference frequency generator (DFG), pumped by a singly resonant KTP optical parametric oscillator (OPO) pumped by the second harmonic of a pulsed Nd:YAG laser, which have a pulse width of 12 ns and pulse energy of 300 mJ, operating at 1.064 μm and the fundamental frequency Nd:YAG laser, is experimentally demonstrated and analyzed. The maximum frequency-doubling conversion efficiency is 66.7%; quantum conversion efficiency of KTP OPO is 50%; the quantum conversion efficiency of difference frequency generator is 1.5%, and 100 μJ energy of single pulse is achieved at 4.45 μm wavelength. The frequency tuning range is 4.1 ~ 4.5 μm . The beam divergence is 12 mrad in vertical direction and 4 mrad in horizontal direction.

Key words nonlinear optics; optical difference frequency generator; optical parameter oscillator; angle tuning; phase matching

1 引言

3 ~ 5 μm 的中红外激光在光谱测量、遥感、环保、军事等领域具有很高的应用价值^[1,2]。目前,国内外对这一波段的激光技术都有广泛的研究。在这一波段能够实现可调谐激光输出的主流途径是非线性光学技术,具体有两种方法:一是利用光参量振荡技术,但它对镀膜技术要求较高^[2,3];二是利用激光抽运非线性介质实现差频激光输出,得到中红外波

段可调谐辐射。它与参量振荡不同,混频过程没有阈值效应,而且对膜层要求较低,而这些恰恰是现今国内实现 4 ~ 5 μm 光参量振荡器(OPO)激光输出的瓶颈所在,所以利用差频产生 4 ~ 5 μm 激光是一个很好的选择。迄今为止,在这方面的研究大多局限于利用液体染料激光器作为差频抽运源^[4~7],抽运激光波长处于 600 nm 左右,在相同的量子效率下,差频能量转换效率低。另外,从实用的角度看,染料激光器也不符合小型化、固体化的要求。

收稿日期:2005-07-06; 收到修改稿日期:2005-09-20

作者简介:卞进田(1979—),男,湖南人,中国人民解放军电子工程学院光电系博士研究生,主要从事非线性频率变换技术研究。E-mail:bianjt@126.com

本文对利用 LiIO_3 晶体实现 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 激光输出的激光器结构和相关的实验结果进行报道。实验中用来进行差频的两束抽运激光为:一束是由 Nd:YAG 激光器产生的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光经倍频后,再利用该倍频光进行参量振荡产生的 $1.39 \sim 1.44 \mu\text{m}$ 调谐激光;另一束为 Nd:YAG 激光器产生的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光经倍频后剩余的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光。以上两束激光差频产生 $4.1 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 的红外激光输出。

2 实验装置

图 1 为实验装置原理图,电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器产生 $1.064 \mu\text{m}$ 基频光,经过一块 KTP 晶体倍频, 532 nm 倍频光再经过另一块 KTP 参量晶体产生 $1.39 \sim 1.44 \mu\text{m}$ 的参量光,倍频后剩余的基频光经旁路引出与参量光在 LiIO_3 晶体中差频产生 $4.1 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 的红外激光输出。 $1.064 \mu\text{m}$ 的基频光偏振方向为垂直方向;倍频晶体采用 I 类相位匹配,相应的倍频光的偏振方向为水平方向;参量晶体为 II 类相位匹配,参量光偏振方向为水平方向;差频采用 II 类相位匹配,差频光偏振方向为水平方向。

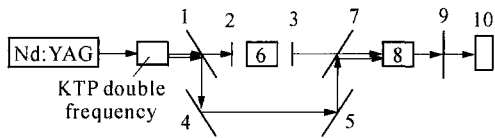


图 1 实验装置原理图

1: $0.532 \mu\text{m}$ 高透, $1.064 \mu\text{m}$ 45° 全反滤光片; 2, 3: 光参量振荡器谐振腔片; 4, 5: $1.064 \mu\text{m}$ 45° 全反平面镜片; 6: KTP 晶体; 7: $1.39 \sim 1.44 \mu\text{m}$ 高透, $1.064 \mu\text{m}$ 45° 高反滤光片; 8: LiIO_3 晶体; 9: 白宝石滤光片, $4.1 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 高透, $1.064 \mu\text{m}$, $1.39 \sim 1.44 \mu\text{m}$ 全反; 10: 探测器

Fig. 1 Experimental setup of $4 \sim 5 \mu\text{m}$ DFG

1: filter, $0.532 \mu\text{m}$ HT, $1.064 \mu\text{m}$ 45° HR; 2, 3: OPO laser-cavity mirrors; 4, 5: planar mirror, $1.064 \mu\text{m}$ 45° HR; 6: KTP crystal; 7: filter, $1.39 \sim 1.44 \mu\text{m}$ HT, $1.064 \mu\text{m}$ 45° HR; 8: LiIO_3 crystal; 9: filter, $4.1 \sim 4.5 \mu\text{m}$ HT, $1.064 \mu\text{m}$, $1.39 \sim 1.44 \mu\text{m}$ HR; 10: detector

如图 1 所示,平面镜 2, 3 和晶体 6 构成光参量振荡器谐振腔,腔长 2.5 cm ;镜 2 为参量后腔片,对 $0.532 \mu\text{m}$ 波长的光透过率达到 92% ,在 $0.844 \sim 0.862 \mu\text{m}$ 波段内高透 ($T > 90\%$),在 $1.39 \sim 1.44 \mu\text{m}$ 波段内全反 ($R > 99.5\%$);镜 3 为参量前腔片,对 $0.532 \mu\text{m}$ 波长的光全反 ($R > 97.5\%$),在 $0.844 \sim 0.862 \mu\text{m}$ 波段内全反 ($R > 96\%$),在 1.39

$\sim 1.44 \mu\text{m}$ 波段内高反 ($R > 85\%$);镜 1 与光路成 45° 放置,在 $1.064 \mu\text{m}$ 波长处全反 ($R > 98\%$),对 $0.532 \mu\text{m}$ 波长的光透过率达到 93% ;镜 4, 5 与光路成 45° 放置,对 $1.064 \mu\text{m}$ 波长的光全反 ($R > 96\%$);镜 7 与光路成 45° 放置,对 $1.064 \mu\text{m}$ 波长的光全反 ($R > 96\%$),在 $1.39 \sim 1.44 \mu\text{m}$ 波段内高透 ($T > 88\%$),其作用是使参加差频的两束光共线;6 为参量晶体,8 为差频晶体,分别置于角度调谐装置上;镜 9 为白宝石片,在波长 $1.064 \mu\text{m}$, $1.39 \sim 1.44 \mu\text{m}$ 处全反,对 $4.1 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 波长的光透过率大于 60% 。

3 晶体的选择与参量的确定

混频或参量晶体一般要求在工作波段内具有高透明度,具有合适的非线性系数和较高的损伤阈值,并能在工作波段内实现相位匹配。选择晶体时应充分考虑这些指标,此外还应参考国内生长晶体的现有条件,选择能得到足够尺寸、光学均匀性好、物化性能稳定和易于加工的晶体。

3.1 参量晶体的选择

KTP 晶体的透明范围为 $0.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$,具有很高的光学损伤阈值,在不同波长处晶体的非线性系数相差很小^[8],因而产生的不同波长处参量的输出能量变化也较小,为差频提供了稳定的抽运源。此外,它在我们所需要的波段内容易实现相位匹配。这些都说明 KTP 晶体很适合作为前端高功率密度下的参量晶体。KTP 晶体应用广泛,目前国内生产 KTP 晶体技术成熟,在利用 KTP 晶体进行光参量方面也进行了大量的工作^[8-10]。这里选用济南光电晶体有限公司提供的 KTP 晶体作为参量晶体。晶体尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,切割方向为 $\phi = 0^\circ$, $\theta = 63^\circ$,根据参量相位匹配条件可得到参量振荡的中心波长为 $1.41 \mu\text{m}$ 。利用 KTP 晶体塞耳迈耶尔 (Sellmeier) 公式,通过数值计算得到其波段内的 II 类相位匹配曲线如图 2。

3.2 差频晶体的选择与参量的确定

能在中红外波段或更长波段范围内实现频率变换的非线性光学晶体材料有 LiIO_3 , LiNbO_3 , KNbO_3 , KTP , KTA , ZnGeP_2 , GaSe_2 , AgGaS_2 和 PPLN 等;考虑到透光范围、损伤阈值以及国内晶体生长现状,在实验研究中采用中国科学院福建物质结构研究所生产的 LiIO_3 晶体作为产生 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 差频的混频晶体。图 3 是根据 LiIO_3 晶体的塞耳迈耶

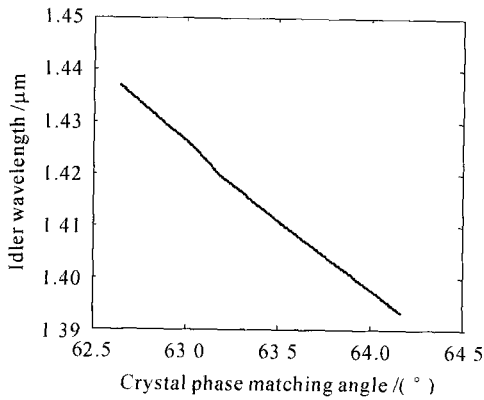


图 2 532 nm 激光抽运 KTP 晶体的角度调谐曲线
($\phi = 0^\circ$, 温度 23)

Fig. 2 Tunable wavelength of KTP OPO pumped by 532 nm laser for type phase matching ($\phi = 0^\circ$, $T = 23$)

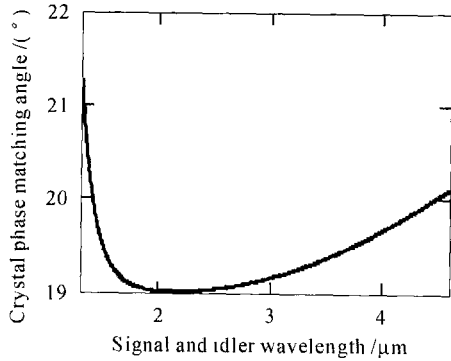


图 3 1.064 μm 激光抽运 LiIO₃ 晶体的角度调谐曲线
Fig. 3 Tunable wavelength of LiIO₃ OPO pumped by Nd:YAG laser for type phase matching

尔方程作出的类匹配 (*e - o - o*) 角度调谐曲线, 为了得到 4~5 μm 差频输出, 晶体按 $\theta = 20^\circ$ 切割。晶体纵向通光长度为 21 mm。

4 实验结果

实验采用电光调 Q Nd:YAG 激光器输出脉冲激光, 脉宽 12 ns, 能量 300 mJ。脉冲波形测量采用硅 PIN 光敏二极管和 LeCroy 9350A 示波器。能量测量采用 LPE-1A 激光功率能量计。倍频后倍频光脉宽 11 ns, 输出最大能量 200 mJ, 倍频转换效率达到 66.7%。参量光输出通过一角度精确调节装置进行调谐, 实验中测量的参量光输出最大功率 35 mJ, 参量子效率达到 50%。如图 4 所示, (a) 为 Nd:YAG 激光基频光波形; (b) 为倍频光波形, (c) 为光参量振荡器前腔片输出的 532 nm 激光波形。

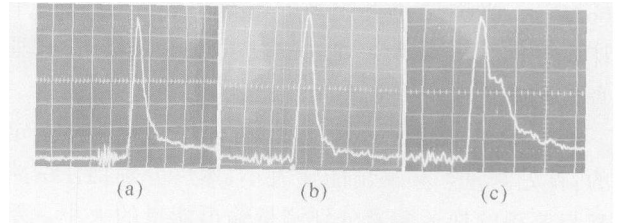


图 4 Nd:YAG 激光器输出脉冲波形

(a) 基频光波形; (b) 倍频光波形;
(c) 参量前腔片输出的倍频光波形

Fig. 4 Pulse temporal profile of Nd:YAG laser

(a) waveform of fundamental frequency; (b) waveform of double frequency; (c) waveform of double frequency from the frontal mirror of OPO

通过调节参量光输出波长和 LiIO₃ 晶体角度, 可以对差频输出波长进行调谐。实验过程中观察到了参量光和 1.064 μm 激光产生的和频光, 此时 LiIO₃ 晶体相位匹配角度为 26°, 与类相位匹配的理论计算公式所得结果一致。由于条件的限制, 实验中通过对和频光波长和发散角的测量来确定差频光的波长和发散角。在 LiIO₃ 晶体产生和频光时, 在宝石片后再加一片对 532 nm 光全反的宝石片, 用 WDX9901 型单色仪测量和频光波长, 单色仪分辨率极限可达 0.6 nm, 因为和频光为可见光, 在单色仪出光端用人眼直接观察即可, 测量时转动鼓轮以人眼感觉最强光时读数为准。实验测得的和频光调谐范围为 603~611 nm, 通过下式计算

$$\text{OPO} + 1064 \text{ nm} = \text{SFG}, \quad (1)$$

得到相应的 KTP 光参量振荡器参量光范围为 1.393~1.437 μm, 可再通过

$$1064 \text{ nm} - \text{OPO} = \text{DFG}, \quad (2)$$

得到差频光的调谐范围为 4.1~4.5 μm。在离输出镜 1.5 m 处测得和频光光斑的大小为 1.2 cm × 2.5 cm, 水平方向 1.2 cm, 垂直方向 2.5 cm。1.064 μm 的基频光和倍频光的光斑分别如图 5 (a),

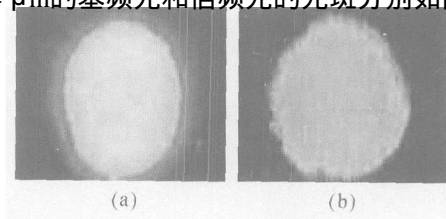


图 5 Nd:YAG 激光光斑

(a) 基频光光斑; (b) 倍频光光斑

Fig. 5 Facula of Nd:YAG laser

(a) facula of fundamental frequency;

(b) facula of double frequency

(b)所示,光斑尺寸大约为6 mm ×7 mm,通过简单计算可得光束在水平方向的发散角约为4 mrad,垂直方向约为12 mrad。

红外差频激光的有无和能量大小是这样确定的:首先测量差频输出能量大小,然后分别挡住两路参与差频的抽运激光分别测量输出能量的大小。差频激光的能量为前者的能量值减去后者的能量值和。测量中采用 Coherent 公司的 EPM2000 激光能量功率计,探头为 J50LP-3。实验中测得最大差频光的单脉冲能量值为100 μJ,差频量子转换效率为1.5%。文献[5]中两个可调染料激光器产生的激光(波长分别为440~510 nm和570~620 nm)在LiIO₃晶体中差频产生1.5~4.8 μm的红外光,转换效率为10⁻⁴;文献[6]中Nd:YAG倍频激光(波长532 nm,能量5.7 mJ)与染料激光(波长640 nm,能量16 mJ)用LiIO₃晶体进行差频得到能量为51 μJ的3.15 μm红外光。

差频效率低主要是由于LiIO₃晶体的匹配角太小所致,在长度为 l 的晶体中混频得到的红外功率的大小可表示为^[4]

$$P_1 = (1/2) P_2^2 l^2, \quad (3)$$

式中 l^2 为相位匹配下的小增益限制参量增益,下标1,2,3分别表示差频光、参量光和基频光。在近场情况下,假设高斯光束没有双折射现象,即

$$l^2 = 4 \frac{1}{c^3 m_1 m_2 m_3} \left(\frac{2}{3} + \frac{2}{3} \right) (MKS \text{ 单位}), \quad (4)$$

碘酸锂是负单轴晶体,具有正六面体结构。 $d_{\text{eff}} = d_{31} \sin(\theta_{\text{PM}} + \theta)$, $d_{31} = 7.5 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。双折射角是 $\theta = 0.06 \text{ rad}$,晶体中大的双折射减小了差频增益。 d_{eff} 依赖 \sin^2 项,例如相位匹配为 $\theta_{\text{PM}} = 20^\circ$, $d_{\text{eff}}^2 = 0.16 d_{31}^2$ 。另外实验中用的LiIO₃晶体仅作了抛光处理,没有镀增透膜。这在一定程度上限制了差频激光的输出能量。

5 结 论

设计的光参量振荡器至差频产生器(DFG)产

生红外激光的全固化结构,在4.1~4.5 μm实现了可调谐激光输出,最大输出能量可达100 μJ。从而证明这种激光器结构在4~5 μm实现中红外激光输出是可行的。因此,下一步的工作是对激光器结构再进行优化,进一步提高红外激光的输出能量。

参 考 文 献

- S. Schiller, J. Schoser, C. Braxmaier *et al.*. Single-frequency cw optical parametric oscillators. Devices and applications [C]. *Proc. XIV Int. Conf. Laser Spectrosc.*, 1999, 217~226
- Yao Baoquan, He Wanjun, Li Yufeng *et al.*. Technical study of ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a 2 μm Tm, Ho:YLF laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):39~42
姚宝权,贺万俊,李玉峰等. 2 μm Tm, Ho:YLF激光抽运ZnGeP₂光参量振荡技术研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):39~42
- Li Chun, An Yuying, Zeng Xiaodong *et al.*. Techniques of 3~5 μm angle tuned LiNbO₃ optical parametric oscillator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8):937~940
李春,安毓英,曾小东等. 3~5 μm角度调谐LiNbO₃晶体光参量振荡器的技术研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(8):937~940
- L. S. Goldberg. Narrow-bandwidth tunable infrared difference-frequency generation at high repetition rates in LiIO₃ [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(3):653~656
- H. Garlach. Difference frequency generation in LiIO₃ using two tunable dye lasers [J]. *Opt. Commun.*, 1974, **12**(4):405~408
- U. Chatterjee, A. M. Rudra, G. C. Bhar. Widely tunable difference frequency generation (2.6~7.7 μm) in lithium iodate [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **118**:367~374
- Markus Gerhards. High energy and narrow bandwidth mid IR nanosecond laser system [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**:493~497
- Wen Wuqi, Yao Jianquan, Ding Xin *et al.*. LD pumped Nd:YAG/KTP quasi-continuous wave red light laser with 8.1 W output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1281~1284
温午麒,姚建铨,丁欣等. 8.1 W全固态准连续红光Nd:YAG激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11):1281~1284
- Ding Xin, Shi Xiangchun, Yu Yizhong *et al.*. Study of KTP singly resonant optical parametric oscillator pumped by pulsed tunable Ti:sapphire lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4):444~446
丁欣,施翔春,于意仲等. 可调谐钛宝石激光抽运的KTP单谐振光学参量振荡器的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4):444~446
- Bao Zhaorigetu, Zhou Shouhuan, Zhao Haixia *et al.*. High beam quality 1.57 μm OPO [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5):395~397
包日照,周寿桓,赵海霞等. 高光束质量1.57 μm的光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5):395~397