

温度调谐 MgO:LiNbO₃ 晶体 光参量振荡器*

王殿奎 龙 晓 周定文** 张 锐 吴 峰 姚建铨

(天津大学精密仪器工程系, 天津 300072)

提 要

采用调 Q Nd:YAG 激光倍频光 (0.532 μm) 泵浦温度调谐 MgO:LiNbO₃ 晶体单、双谐振光参量振荡器(OPO 包括 DRO、SRO)的实验结果. 双谐振(DRO)调谐范围达 844.1~1411.3 nm, 最低泵浦阈值 0.22 mJ/pulse; 单谐振(SRO)调谐范围达 738.9~1032.2 nm, 最低泵浦阈值 0.66 mJ/pulse. 最大能量转换效率为 10.4%.

关键词 光参量振荡器(OPO), 双谐振(DRO), 单谐振(SRO), MgO:LiNbO₃ 晶体.

1 引 言

近几年来, 光参量振荡器的研究取得了迅速进展. 1987年吴令安等人^[1]在研究光场压缩态时用 Nd:YAG 激光腔内放置 Ba₂NaNb₅O₁₅ 晶体产生倍频光来泵浦 MgO:LiNbO₃ 晶体, 在相位匹配温度 98°C 时实现了简并参量光输出. 1989年 Kozlovsky 等人^[2]用一长脉冲放大二极管泵浦的 Nd:YAG 倍频光泵浦整块环形腔 MgO:LiNbO₃ 晶体, 由温度调谐实现了 0.834~0.958 μm 和 1.2~1.47 μm 波段的单谐振(SRO)参量光输出. 1989年他们^[3]又利用一稳频二极管泵浦的 Nd:YAG 倍频光泵浦整块环形腔 MgO:LiNbO₃ 晶体, 温度调谐实现了 1.01~1.13 μm 波段的双谐振(DRO)参量光输出. 何慧娟等人^[4]采用 Nd:YAG 高重复频率 ps 倍频激光系统泵浦一对 MgO:LiNbO₃ 晶体, 由角度调谐实现了 0.7~2.2 μm 波段的 ps 行波参量激光输出, 单脉冲峰值功率达 MW 级.

本文报道了用调 Q Nd:YAG 激光器的二次谐波 (0.532 μm) 泵浦 MgO:LiNbO₃ 晶体温度调谐的单、双谐振光参量振荡器的实验研究结果. 并分析了影响阈值、转换效率、线宽的因素.

2 实验方案与装置

1) MgO:LiNbO₃ 晶体是单轴晶体, 属 3m 点群. 本课题中所用的 MgO:LiNbO₃ 晶体其 Sellmeier 方程经实验可确定非寻常光折射率平方公式中常数项修正为 4.5457. 利用修正后的 Sellmeier 方程可计算出在 MgO:LiNbO₃ 晶体中能够实现 I 类非临界位相匹配的参

收稿日期: 1991年7月24日; 收到修改稿日期: 1991年10月31日

* 本课题得到国家人工晶体联合研究与发展中心的资助.

** 天津大学精密仪器中心.

量过程: $e \rightarrow oo(\omega_p \rightarrow \omega_s, \omega_i)$, e, o 分别是非寻常光和寻常光, 下标 p, s, i 分别指泵浦、信号和闲频光. 实验中所用晶体的尺寸为 $4 \times 4 \times 35 \text{ mm}^3$, 沿 x 方向通光, 两端未镀膜.

2) 参量振荡器谐振腔为双平面平行腔, 各腔镜的透过率曲线如图 1 所示. 图中 $D1$ 、 $D2$ 为双谐振光参量振荡器腔片, 其余的为单谐振腔片. 单谐振腔片对空闲光的透过率要求尽量高些, 实验中的各腔镜在波长为 $1.08 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 之间的透过率为 $60 \sim 95\%$.

3) 泵浦源为调 Q Nd:YAG 激光倍频输出 ($0.532 \mu\text{m}$), 重复频率 $1 \sim 15 \text{ pps}$, 脉冲宽度 10 ns , 线宽 0.2 cm^{-1} . 因这种激光器 $1.064 \mu\text{m}$ 振荡的特殊非稳腔结构, 输出的倍频光斑横向分布中心的光强较弱, 周围环带光强较大, 所以在经 $f=2 \text{ m}$ 聚焦透镜后, 离透镜 150 cm 处放置一半径为 1 mm 光孔, 通光中心位于环斑光强较大处, 以使通光光孔的光强横向分布趋于均匀. 参量振荡腔入射镜置于离光孔 10 cm 处, 腔后的输出光经特制的滤光片进行滤光, 使泵浦光全反掉, 信号与闲频光(SRO 时只有信号)透过滤光片, 再经 WDG 500-1 A 型光栅单色仪分光, 由 GT102 型 III 硅 PIN 光电二极管探测单色仪输出, 用 1727 A 型 275 MHz 示波器来观察参量光波型. 在波长大于 $1.1 \mu\text{m}$ 时, 改由 NJ-J1 型激光能量计探头配以 AC15/直流复射式检流计探测单色仪的输出.

4) $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体置于一特制的温控炉中. 由于晶体通光方向与 yz 面垂直, 要实现 I 类非临界位相匹配, 故要将晶体光轴方向(z 轴)调节与泵浦光($0.532 \mu\text{m}$)偏振方向一致. 实验中温控炉装在一四维调整架上, 使晶体在参量振荡腔内其端面与腔镜面调节平行, 以减小振荡腔的衍射损耗. 整个实验装置如图 2 所示.

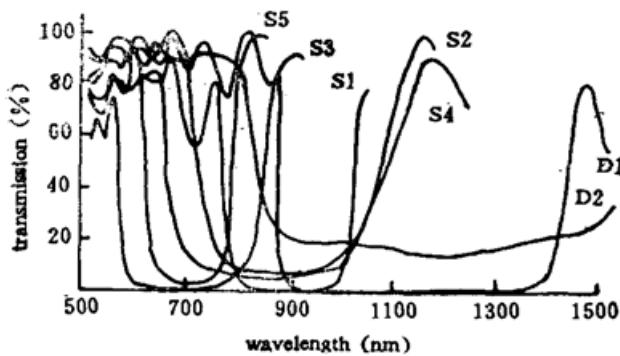


Fig. 1 Transmissions of mirrors of the DRO and SRO resonators

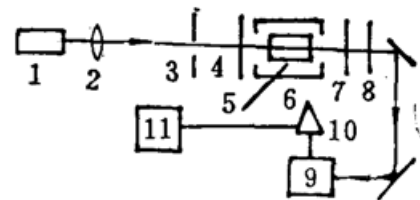


Fig. 2 Experimental schematic

1—pump, 2—lens, 3—aperture, 4, 7—mirrors, 5— $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$, 6—oven, 8—filter, 9—monochromator 10—detector, 11—OSC

3 实验结果与分析

3.1 调谐波长范围

实验测得参量光脉冲宽度 7 ns , 略小于泵浦光的脉冲宽度. 图 3 是温度调谐曲线, 实线为计算的理论值, “●”与“×”点分别为测得的双、单谐振光参量振荡波长值. 使用的腔片与相应的调谐波长范围列于表 1. 由图 3 看出, 理论值与实验值符合, 简并点晶体温度 84.5°C .

图 4 给出了调谐率曲线 ($|\Delta\lambda/\Delta T| \sim T$) 的实验数据, 以简并点 $1.064 \mu\text{m}$ 为分界, 下半支(信号●)的调谐率随温度升高渐小, 同一温度下, 上半支(闲频光×)调谐率一般要比下半支大些, 这一点从调谐曲线的变化上可看出, 闲频部分曲线较陡. 与其它调谐方式比较, 温度调谐率比较小, 调谐波长较容易控制.

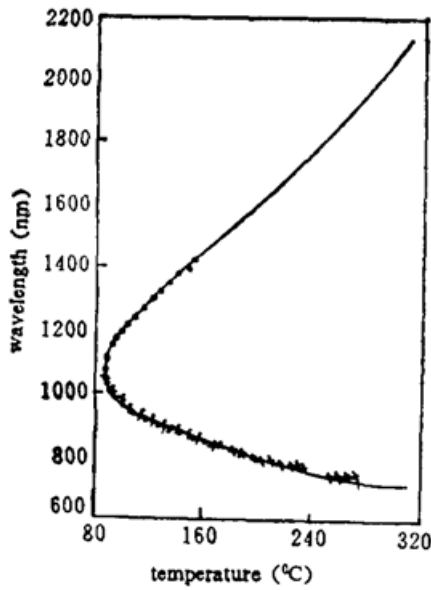


Fig. 3 Tuning curve of OPO in MgO:LiNbO₃, (·) DRO & (×) SRO

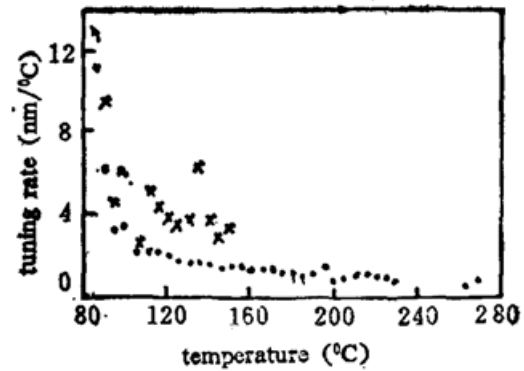


Fig. 4 Tuning rate of OPO in MgO:LiNbO₃ vs. temperature (×) idle & (·) signal

3.2 阈值与转换效率

实验中在腔长 52 mm, 晶体温度 88.0°C、信号波长 1019.30 nm 时双谐振光参量振荡器的泵浦阈值为 0.22 mJ/pulse.

用 S1 作输入镜, S2 作输出镜, 在腔长 52 mm 时测得单谐振光参量振荡器的泵浦阈值为 0.66 mJ/pulse.

Table 1 mirrors and wavelength tuning ranges

tuning forms	input mirrors	output mirrors	tuning ranges (nm)
DRO	D 1	D 2	844.10~1411.28
SRO	S 1	S 2	824.70~1032.20
	S 3	S 4	769.20~851.40
	S 5	S 4	738.90~745.56

图 5 给出了双谐振光参量振荡器阈值能量与腔长变化的关系曲线。随着腔长增大, 相应的阈值能量提高。

由 Vainshtein 的推导结果^[5]可得到, 对于圆形孔径、大菲涅耳数的平行平面谐振腔, 其衍射损耗在忽略横向模式改变的情况下, 有

$$\alpha \sim \sqrt{L}, \quad (1)$$

这里 α 是衍射损耗, L 为腔长。从图 5 看到, 阈值能量随腔长增加逐渐增大, 简单估计增加的趋势: 腔长由 52 mm 增大到 122 mm, 阈值能量则从 0.22 mJ/pulse 增大到 0.33 mJ/pulse, 那么

$$\sqrt{122}/\sqrt{52} \approx 0.33/0.22 = 1.5 \quad (2)$$

与(1)式衍射损耗增加趋势相同, 说明随着腔长增加泵浦阈值的增加主要是由衍射损耗增大引起的。为降低泵浦阈值适当缩短参量腔的长度, 同时仔细地调节腔片与晶体的位置是非常必要的。

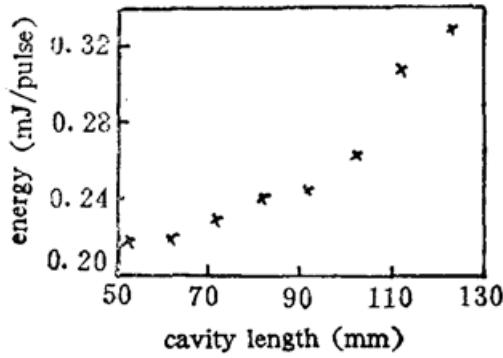


Fig. 5 Threshold of DRO vs. cavity length

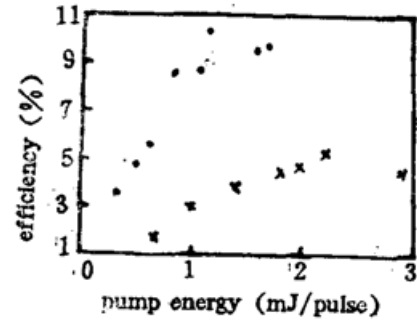


Fig. 6 Conversion efficiencies of DRO (·) & SRO (+) vs. pump energy

实验中测得双、单谐振光参量振荡器的转换效率,如图6所示.这里的效率对双谐振 $\eta_D = (E_s + E_i)/E_p$; 对单谐振 $\eta_s = E_s/E_p$, 其中 E_s , E_i , E_p 分别是信号、闲频和经过输入镜后泵浦光单脉冲能量. 图中●为双谐振效率 η_D , 用 $D1$ 、 $D2$ 腔片; +为单谐振效率 η_s , 用 $S1$ 、 $S2$ 腔片.

转换效率极大值时的泵浦能量 E_M 与阈值能量 E_T 的比值分别是 5.3 和 3.4. 在共振信号慢变化近似下理论值分别为 4 和 2.5, 实验值比理论值略大.

在晶体温度 90°C , 泵浦能量为 1.155 mJ/pulse 下, 测得双谐振光参量振荡器的总能量转换效率达 10.4%; 泵浦能量 2.228 mJ/pulse 时, 单谐振的能量转换效率达 5.3%. 由于进入晶体的泵浦光横向截面小, 没有充满整个晶体的入射面 ($4 \times 4 \text{ mm}^2$), 如适当扩大泵浦光在晶体入射面上的横截面, 同时加大泵浦能量, 并压缩脉宽提高泵浦光峰值功率, 可望参量光的总能量及效率会进一步提高.

3.3 输出线宽与参量光能量横向分布

图7给出了双谐振光参量振荡器的输出线宽. 图中泵浦能量分别是 0.495 mJ/pulse (●), 0.825 mJ/pulse (×). 这里给出的实验值指在某一泵浦下在一段时间内 ($\sim 1 \text{ min}$) 所能起振的全部信号光波长的总宽度. 可看出本实验测得的输出线宽稍宽, 近简并点处线宽最大; 泵浦能量越大, 相应的线宽也越大. 造成这种线宽的原因是多方面的, 除文献[6]中分析的原因外, 在温度调谐脉冲光参量振荡器中由于晶体对泵浦能量的吸收及空气自然流动引起晶体冷却不均匀, 造成晶体温度的时间上起伏与空间不均匀也是形成输出线宽较宽的重要原因. 由 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体 Sellmeier 方程知道, 晶体的温度起伏直接引起参量相互作用的相位失配 Δk , 这一失配量 Δk 引起线宽^[4]

$$\Delta\lambda = 2 \left| \frac{d\lambda}{dT} \right| |\Delta T|, \quad (3)$$

本实验中 ΔT_c (晶体温控器的温度控制精度) 为 0.5°C , 由调谐率数据, 从 (3) 式得 $\Delta\lambda_T \sim (1.0 \sim 11.3) \text{ nm}$; 其次泵浦光的谱线宽度 $\Delta\lambda_p$ 也加宽参量线宽^[7], 实验中 $\Delta\lambda_p \sim 0.6 \text{ nm}$, 则 $\Delta\lambda_p \sim (0.3 \sim 0.4) \text{ nm}$. 即由 $\Delta\lambda_T$ 、 $\Delta\lambda_p$ 产生线宽约 $1.3 \sim 11.7 \text{ nm}$. 如果进一步提高晶体控温精度, 如 ΔT_c 缩小到 0.1°C , 那么 $\Delta\lambda_T \sim 0.2 \sim 2 \text{ nm}$; ΔT_c 如缩小到 0.02°C , 则 $\Delta\lambda_T \sim 0.04 \sim 0.4 \text{ nm}$, 这一部分实验工作仍在进行中.

图8是用 CCD 列阵接收由示波器显示的双谐振参量光横向截面上的一维光场能量分布. CCD 列阵从光束中心向外放置. 图中(a)是泵浦阈值情形, (b)为泵浦能量超过阈值 (约 1.14 倍) 情形, 除中心有较大能量分布外, 旁边略有分布, 强度约为中心的 1/10, 反复拍摄

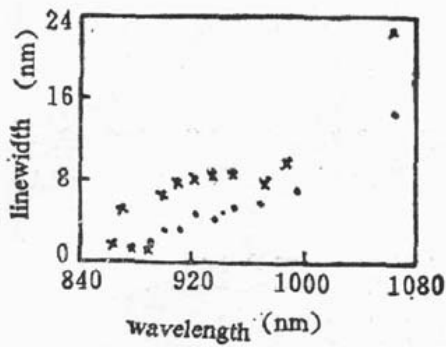


Fig. 7 Linewidth of DRO pumped with 0.495 (·) & 0.825 (×) mJ/pulse

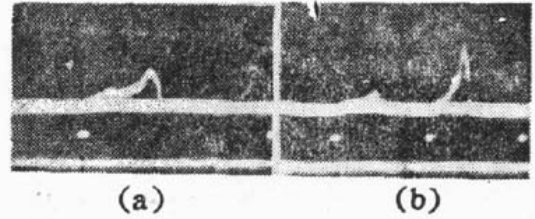


Fig. 8 Transverse energy distributions of DRO (a) 0.22 mJ/pulse, & (b) 0.25 mJ/pulse

均有此现象。此时透过光孔进入参量腔的泵浦光，在示波器上观察周围没有环带分布，说明参量光模式分布与泵浦光模式分布并不是一样的。限于篇幅，这部分的研究将另文发表。

参加实验工作的还有狄勤铭、张立新同学。感谢西南技术物理研究所徐观峰、李斌同志、长春光机所齐钰副研究员在晶体、膜片加工方面的帮助。感谢王兴龙、生卫东在实验上的帮助及有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] Ling-An Wu *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1987, **4** (10): 1465~1475
- [2] W. J. Kozlovsky *et al.*, *Opt. Lett.*, 1988, **13** (12): 1102~1104
- [3] W. J. Kozlovsky *et al.*, *Opt. Lett.*, 1989, **14** (1): 66~68
- [4] 何慧娟等. 光学学报, 1991, **11** (6): 525~530
- [5] W. Koechner. 固体激光工程. 北京: 科学出版社, 1983: 201~202
- [6] 范琦康, 叶建华. 光学学报, 1991, **11** (5): 396~401
- [7] A. Sellmeier, W. Kaiser, *Appl. Phys.*, 1980, **23** (2): 113~119

Temperature tunable optical parametric oscillation in MgO:LiNbO₃

WANG DIANKUI LONG XIAO ZHOU DINGWEN
ZHANG RUI WU FENG YAO JIANQUAN

(Dept. of Precision Instrument Eng., Tianjin Univ., Tianjin 300072)

(Received 24 July 1991; revised 31 October 1991)

Abstract

Temperature tuned MgO:LiNbO₃ doubly and singly resonant optical parametric oscillators (OPO including DRO and SRO) pumped by the second harmonic of a pulsed Q-switched Nd:YAG laser have been demonstrated. The OPO's tuning ranges at the doubly and singly resonant forms tuned with temperature were 844.1~1411.3 nm and 738.9~1032.2 nm and the minimum pump thresholds were 0.22 mJ/pulse and 0.66 mJ/pulse, respectively. The maximum conversion efficiency of energy was 10.4%.

Key words OPO, DRO, SRO, MgO:LiNbO₃.