

微微秒自动调谐参量激光的研究

何慧娟 陆雨田 董景元 赵庆春 李永春

(中国科学院上海光学精密机械研究所激光技术开放实验室, 上海 201800)

提 要

采用一对 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 角度调谐覆盖了红近外波段 $0.7\sim 2.2\ \mu\text{m}$, 并配以自动波长扫描。文中分析了影响脉冲宽度与线宽的因素, 与实验结果相吻合。脉宽 $< 30\ \text{ps}$, 线宽 $\sim 1\ \text{nm}$ (简并波长附近 $\sim 10\ \text{nm}$), 单脉冲峰功率达 MW 级, 参量光总能量转换效率达 5.4%。

关键词: $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体, 参量激光, 微微秒激光。

一、引 言

由于红外染料的转换效率甚低, 色心、喇曼等其他方法的调谐范围太窄, 光参量转换为产生近红外波段宽调谐超短脉冲激光的主要手段。参量振荡器的调谐范围受其谐振腔膜的限制, 宽带膜难以做到高抗损伤, 腔内晶体容易被破坏, 更有群速色散引起输出光脉冲加宽等缺点。行波参量系统虽然增益低些, 但能避免这些问题, 参量光的脉冲从泵浦光脉宽进一步得到压缩, 光谱纯度和方向性也比较好, 而且参量光脉冲与泵浦光脉冲精确地同步, 有利于直接混频和同步测量。

近年来, 对近红外波段的微微秒参量激光做了进一步研究。1980年 Seilmeier 等^[1]用铍玻璃激光器的二次谐波 (529 nm) 泵浦两对 LiNbO_3 晶体, 并附加低温调谐填补波长空缺, 得到了 $0.6\sim 3.7\ \mu\text{m}$ 的 ps 光输出; 1983年 Wordrazek 等^[2]用铍玻璃激光器的三次谐波 (353 nm) 泵浦 ADP 晶体, 得到了 $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$ 的 ps 光输出; 1987年 Anthon 等^[3]用 Nd:YAG 激光器的三次谐波 (355 nm) 泵浦 KDP 晶体, 得到了 $0.45\sim 0.65\ \mu\text{m}$ 和 $0.8\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 的 ps 光输出, 都是采用行波参量系统实现的。Ionazhauskas 等^[4]用铍酸镧激光器的二次谐波 (535 nm) 同步泵浦三种不同晶体的参量振荡器并进行了比较。

本文采用 Nd:YAG 激光器的二次谐波 (535 nm) 泵浦 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$, 仅用一对晶体获得了覆盖 $0.7\sim 2.2\ \mu\text{m}$ 的 ps 激光。

二、实验方案

用一对非线性晶体组成行波参量系统。部分泵浦光被第一块晶体转换成信号光和空闲光两支波长互补的荧光, 荧光产生于自发参量过程, 由于离轴的相位失配而具有相当宽的谱线和相当大的发散角。该荧光和剩余的泵浦光在第二块晶体中进行参量放大, 它只放大窄线宽的泵浦光所对应的光谱分量, 因而得到窄线宽的参量光输出。

信号光(以角标 s 表示)和空闲光(以角标 i 表示)与泵浦光(以角标 p 表示)间应符合能量守恒律和动量守恒律,即

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad (1)$$

$$\frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} + \frac{n_i}{\lambda_i}, \quad (2)$$

式中 n 是晶体的折射率。适当选择泵浦光波长和非线性光学晶体及其取向,可以使之满足相位匹配条件(1)和(2)而产生所要求的波长的参量光。

用 Nd:YAG 的二次谐波(532 nm)泵浦普通的 LiNbO₃ 晶体只在低温下才有完全的角度匹配,得以填满简并点附近的区域^[1,5]。掺镁的 LiNbO₃ 不仅可在高温下存在完全的角度匹配范围,而且具有较高的破坏阈值^[6],所以本文采用 MgO:LiNbO₃* 作非线性晶体。

晶体以 $Z-73^\circ$ 方向切割,恒温于 72.8°C ,按 I 类相位匹配条件($e \rightarrow o + o$)运转,当晶体内部光线偏角 θ 在 $\pm 12^\circ$ 之间变化时可以完全覆盖 $0.7 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 。调谐曲线如图 1 所示。实测结果与理论计算符合得很好。晶体尺寸 $6 \times 12 \times 26 \text{ mm}$,其通光面匹配直径 5 mm 的泵浦光束,并保证角度偏转范围内有足够的通光口径。长度保证足够的增益。

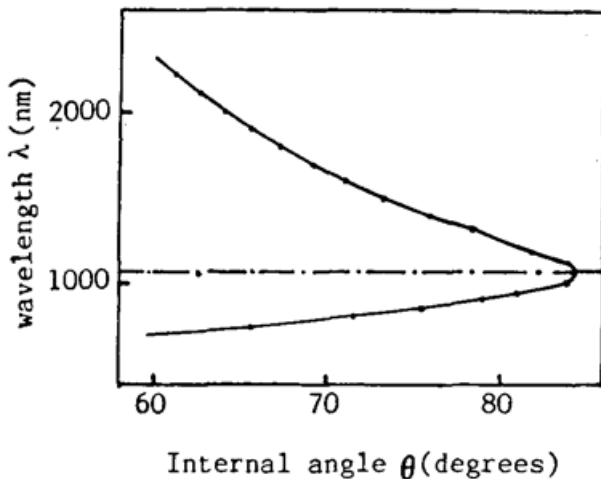


Fig. 1 Angular tuning curve. line: theory, dots: experimental points

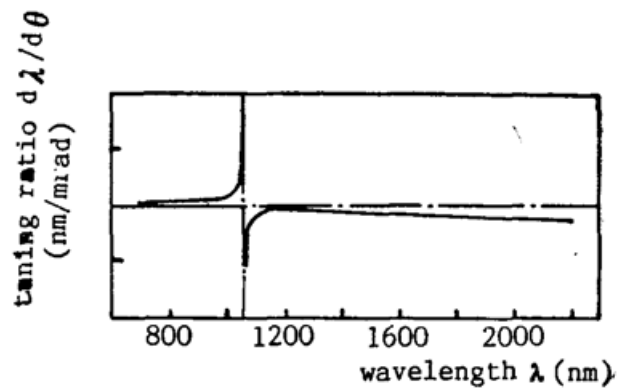


Fig. 2 Angular tuning ratio curve

波长调谐由单片机控制步进电机调节晶体平台实现。两晶体以 0.01° 精度同步转动,并伴随相应的平动以保证通光口径。从调谐曲线可得到角度调谐率曲线,如图 2 所示。显然,按 0.01° 的步距调节晶体的角度,除十分接近简并处外波长误差均小于 1 nm。即调谐精度始终优于参量光的谱线宽度,也优于波长显示的精度(1 nm)。

LiNbO₃ 的折射率与温度关系很大,环境温度的变化能严重影响参量光波长的稳定。图 3 给出了波长的温度敏感率曲线,得自角度调谐曲线对温度的变分。可见,晶体处于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的恒温下,参量光波长稳定性与调谐精度相同水平,即优于参量光的谱线宽度和波长显示精度(除简并点附近外)。

泵浦光的线宽和发散角都影响着参量光的线宽,泵浦光的脉宽也与参量光的脉宽直接成正比,因此,为了得到有良好光束质量的参量光,一个窄脉宽,窄线宽和小发散角的泵浦光

* 中国科学院上海硅酸盐研究所产品。

源是十分必要的。泵浦源是一个 Nd:YAG 高重复率 ps 激光系统,由振荡器、放大器,单脉冲选择器和倍频器组成。振荡器是具有热稳定腔的高重复率主-被动锁膜 YAG 激光器^[7],单脉冲选择器采用雪崩管控制普克尔开关选出序列中的一个脉冲^[8],经扩束放大后倍频得到 532 nm 的单脉冲激光,脉宽 30~50 ps,线宽 0.05 nm,光束发散角 0.2 mrad。

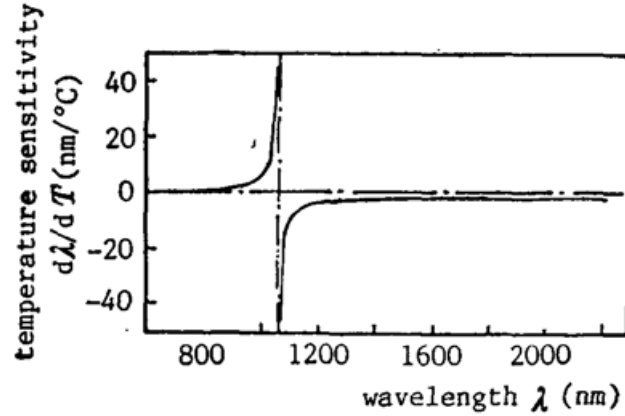


Fig. 3. Temperature sensitivity curve

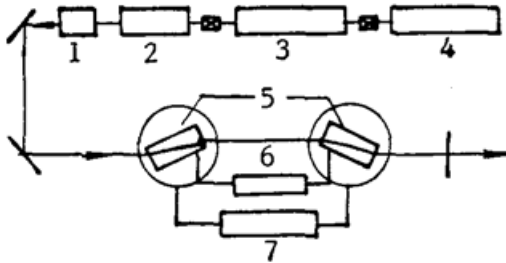


Fig. 4 Schematic of the automatic tunable picosecond parametric laser

1—SHG, 2—amplifier, 3—Single pulse selector,
4—ps YAG laser, 5—MgO:LiNbO₃,
6—thermostat, 7—tuning control

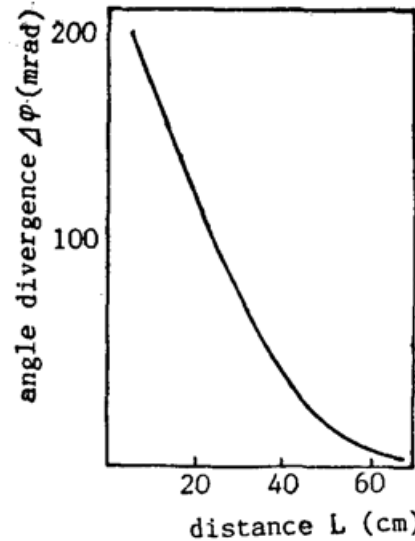


Fig. 5 Angle divergence of the parametric beam versus distance between the two crystals

图 4 示出了实验方框图。

两块晶体的间距显著地影响着参量光束的发散角,测量结果示于图 5,当间距从 5 cm 增大到 50 cm 时,参量光的发散角从 200 mrad 锐减至 10 mrad 以内;但继续增大间距对发散角的改善渐趋缓慢,而输出能量却降低较多。取两者折衷,晶体的间距取 60 cm。在 700 nm 处发散角典型值 < 3 mrad。

三、参量光的特性研究

参量光的脉冲宽度 τ_s 与泵浦光的脉冲宽度 τ_p 和参量放大的增益 G 有关系^[9]

$$\frac{\tau_s}{\tau_p} = \left(\frac{1}{2} \ln G \right)^{-1/2}, \quad (3)$$

按平面波模型处理行波参量放大器,其增益 G 为^[9,10]

$$\left. \begin{aligned} G &= \cosh^2 \Gamma l, \\ \Gamma &= \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{3/4} d_{\text{eff}} \left(\frac{2 \omega_s \omega_i I_p}{n_s n_i n_p} \right)^{1/2}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 l 为参量放大的作用长度, Γ 为增益系数, μ_0 为真空中磁导率, ϵ_0 为真空介电常数, d_{eff} 为有效非线性系数, I_p 为泵浦功率密度, ω 为光频率, n 为折射率。

由本激光器的实际情况, $I_p = 1 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, $l = 2.6 \text{ cm}$, $d_{\text{eff}} = d_{31} \sin(73^\circ \pm 12^\circ) \approx 3 \times 10^{-23} \text{ C} \cdot \text{V}^{-2}$, $\omega_s \omega_i = (2.3 \sim 3.2) \times 10^{30}$, 由(3)、(4)式可以算出 $(\tau_s/\tau_p) \approx (1/1.6)$ 。用条纹相机测得在整个调谐范围内脉宽 $< 30 \text{ ps}$ (FWHM), $(\tau_s/\tau_p) = 1/(1.4 \sim 1.7)$ 。说明实验测量结果与理论计算结果相符。

参量光的谱线宽度 $\Delta\lambda$ 来自四个方面^[1]:

1. 相位失配 ΔK 引起的线宽

$$\left. \begin{aligned} \Delta\lambda_1 &= 2 \left| \frac{d\lambda}{dK} \right| |\Delta K|, \\ \frac{d\lambda}{dK} &= \frac{\lambda^2}{2\pi(n_{\text{eff},s} - n_{\text{eff},i})}, \quad n_{\text{eff}} = n + \lambda \frac{dn}{d\lambda}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $(dn/d\lambda)$ 为非线性晶体的光学色散。在小信号指数放大的情况下, 相位失配 ΔK 时的增益系数为^[10,11]

$$\Gamma' = \left(\Gamma^2 - \frac{\Delta K^2}{4} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

取增益下降一半即 $\exp(2\Gamma'l) = (1/2)\exp(2\Gamma'l)$ 为容许失配 ΔK 的条件, 则有

$$\Delta K \approx 2\sqrt{\ln 2} \cdot \sqrt{\Gamma/l}. \quad (7)$$

2. 泵浦光发散角 ϕ 引起的线宽

$$\Delta\lambda_2 = \frac{d\lambda}{d\theta} \cdot \frac{\phi}{n_p}, \quad (8)$$

式中 $(d\lambda/d\theta)$ 为角度调谐率, 可以从对调谐曲线求导数直接得到, 也可以根据下列关系式算出

$$\frac{d\lambda}{d\theta} = \frac{n_p^2 \lambda_s^2}{2(n_{\text{eff},s} - n_{\text{eff},i}) \lambda_p} \cdot \frac{(n_p^e)^2 - (n_p^o)^2}{(n_p^e)^2 \cdot (n_p^o)^2} \sin 2\theta. \quad (9)$$

3. 参量光与泵浦光之间的离散角 α 引起的线宽

$$\left. \begin{aligned} \Delta\lambda_3 &= \alpha^2 \frac{n_p \lambda_s \lambda_i}{2(n_{\text{eff},s} - n_{\text{eff},i}) n_i n_s \lambda_p}, \\ \alpha &= \frac{d}{L}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 d 为泵浦光束直径, L 为两块晶体间距。

4. 泵浦光本身的谱线宽度 $\Delta\lambda_p$ 引起的线宽

$$\Delta\lambda_4 = 0.3 \frac{n_{\text{eff},p} - n_{\text{eff},i}}{n_{\text{eff},s} - n_{\text{eff},i}} \frac{\lambda_s^2}{\lambda_p^2} \Delta\lambda_p \quad (11)$$

综上所述可知, 线宽随波长而变。短波长端较窄而长波长端较宽, 简并波长 $1.064 \mu\text{m}$

附近明显加宽。测量是在单色仪分光后用 CCD 列阵接收实现的,其输出信号由微机采集存储,频谱曲线由示波器显示或由打印机绘出。图 6 给出了若干典型的频谱曲线。表 1 列出了计算值与实验值作比较,两者相当吻合。

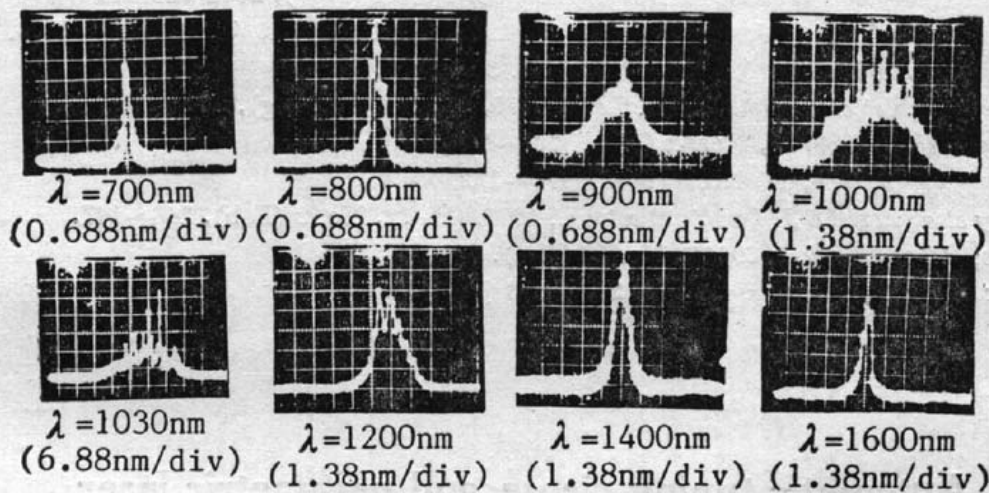


Fig. 6 Spectral profiles of the parametric pulses, obtained from CCD spectrograph

Table 1 Spectral bandwidths of the parametric pulses, calculated values and experimental results are in comparison (nm)

λ	700	800	900	1000	1030	1200	1400	1600	1800	2000	2200
$\Delta\lambda_1$	0.13	0.26	0.58	2.0	4.6	1.9	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4
$\Delta\lambda_2$	0.04	0.06	0.08	0.18	0.34	0.18	0.19	0.23	0.29	0.35	0.42
$\Delta\lambda_3$	0.3	0.4	0.7	1.8	3.8	1.0	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3
$\Delta\lambda_4$	0.03	0.06	0.14	0.44	1.0	0.28	0.15	0.12	0.11	0.1	0.07
$\Delta\lambda$ calculated	0.3	0.5	1.0	2.7	6.1	1.9	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4
$\Delta\lambda$ measured	0.3	0.5	1.3	4.0	8.0	1.9	1.2	1.2		1.4	

四、结 论

本微微秒参量激光器采用角度调谐的 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 组成行波参量系统,一对晶体便实现了 $0.7\sim 2.2\ \mu\text{m}$ 的宽波段运转,获得了具有良好光束质量和较高峰值功率的单个 ps 脉冲输出,脉宽 $< 30\ \text{ps}$,线宽 $1\ \text{nm}$ (简并点 $\sim 10\ \text{nm}$),单脉冲峰功率达 MW 级,参量总能量转换效率达 5.4%,并附加自动波长调谐和显示装置。

参加本工作的还有钱林兴、顾圣如、赵隆兴、郭晶华。感谢中国科学院上海光学精密机械研究所乔福堂同志提供了高精度的机械设计,李庆国同志提供了高质量的截止型滤光片。

参 考 文 献

- [1] A. Seilmeier, W. Kaiser; *Appl. Phys.*, 1980, **23**, No. 2 (Feb), 113~119.
[2] F. Wordrazek *et al.*; *Appl. Phys.*, 1983, **B32**, No. 1 (Jan), 39~42.
[3] D. W. Anthon *et al.*; *Rev. Scient. Instrum.*, 1987, **58**, No. 11 (Nov), 2054~2059.
[4] G. Tonushauskas *et al.*; *Soviet J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-17**, No. 10 (Oct), 1303~1304.
[5] Honer Fay *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **12**, No. 3 (1 Feb), 89~92.
[6] P. M. Bridenbaugh *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **17**, No. 3 (1 Aug), 104~106.
[7] 何慧娟等;《中国激光》, 1983, **10**, No. 11 (Nov), 765~769.
[8] 李永春等;《中国激光》, 1984, **11**, No. 3 (Mar), 170~172.
[9] G. A. Massey *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1976, **QE-12**, No. 2 (Feb), 143~147.
[10] S. E. Harris; *Proc. IEEE*, 1969, **57**, No. 12 (Dec), 2096~2113.
[11] A. Seilmeier *et al.*; *Opt. Commun.*, 1978, **24**, No. 3 (Mar), 237~242.

Automatic tuning picosecond parametric laser

HE HUIJUAN, LU YUTIAN, DONG JINGYUAN, ZHAO QINGCHUN, AND LI YONGCHUN

(Laboratory of Laser Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 20 July 1990 revised 16 November 1990)

Abstract

Research on automatic tuning picosecond parametric laser is reported. Using one couple of MgO:LiNbO₃ for angle tuning, equipped with automatic wavelength scanning system, a picosecond tunable output ranging from 0.7~2.2 μm is obtained. The temporal and spectral characteristics of the parametric pulse are discussed. Analysis fits well with the experimental results. Single pulse width of <30 ps and band width of ~1 nm have been achieved over 1 MW in peak power. The maximum overall conversion efficiency of energy is 5.4%.

Key words: parametric laser using MgO:LiNbO₃; picosecond laser.