

# 脉冲钛宝石激光作种子注入调谐的高分辨 BBO 光学参量振荡激光器\*

张裕飞 邓道群 张秀兰 冯宝华 张东香 许祖彦

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

**提要** 报道了采用窄线宽脉冲钛宝石激光器作种子注入的 BBO 光学参量振荡激光器, 并且整个系统只使用一台 Nd: YAG 激光器, 其中钛宝石激光的泵源为 Nd: YAG 三倍频(OPO 的泵浦光)后剩余的二倍频, 不额外消耗能量, 所以整个激光系统效率较高。现有泵浦条件下, 信号波能量转换效率达 25%, 并实现了 589~ 892 nm 的连续可调谐窄线宽( $< 0.01$  nm)激光输出。

**关键词** BBO, 光学参量振荡器, 钛宝石激光器, 种子注入

## 1 引言

自从 1965 年第一次实现光参量振荡以来<sup>[1]</sup>, ns 脉冲光学参量振荡器(OPO)已被证明是一种有效的宽调谐光源。它在固态特性、高效率 and 宽广的调谐范围等方面显示出了优于另外一些可调谐激光器的性能。但只是在从高质量的激光泵浦源和新型非线性晶体如 BBO( $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sup>[2]</sup>的利用后, OPO 的发展和应用才取得很大的进展。

1985 年, 中国科学院福建物质结构研究所发明了性能优越的 BBO 非线性晶体。它具有较高的非线性系数, 宽广的透过谱和可匹配范围, 高的光破坏阈值。因而 BBO 晶体作为非线性晶体是 OPO 最好的选择; 并可利用 532 nm, 355 nm, 308 nm 或 266 nm 波长的激光作泵浦源。1986 年报道了 BBO 晶体的首次光参量振荡后<sup>[3]</sup>, 其调谐宽度很快就覆盖了从紫外至近红外(302~ 3036 nm)的范围, 输出能量可达到 100 mJ/脉冲, 能量转换效率可达 61%<sup>[4]</sup>。

但自由运转的 BBO OPO(除靠相位匹配调谐无其他调谐形式)不能输出足够窄线宽的激光, 以满足某些高分辨光谱技术及激光化学等应用的需要。传统获得窄线宽激光的方法是在 OPO 的谐振腔内加入选频元件, 如光栅和标准具等<sup>[5]</sup>。但这些元件增大了 OPO 的腔内损耗, 以致于增大了 OPO 的振荡阈值, 减少了其输出激光能量; 并且由于结构复杂, 使 OPO 波长调谐难度增大, 对于要求能连续调谐的激光器更是如此。

另一种能代替腔内选频元件的方法是利用种子注入的办法来实现 OPO 的连续可调谐窄线宽输出(包括信号波和闲置波)。这一技术于 1969 年首次被证明和定性解释<sup>[6]</sup>。种子注入的窄线宽 OPO 需要一能量较低的窄线宽激光作为种子注入 OPO 谐振腔内, 这种种子源可以是连续激光, 也可以是脉冲激光(如连续、脉冲染料激光<sup>[7]</sup>、连续色心激光、单模半导体激光、单模

\* 本工作得到中国科学院重点科研项目支持, 全部实验在中国科学院物理所光学物理开发实验室完成。

参量光<sup>[8]</sup>等)。对于脉冲种子激光,种子光必须同时或略前于 OPO 的泵浦光进入谐振腔内。种子既可以信号波(谐振波)形式注入 OPO 谐振腔,也可以闲置波(非谐振波)形式注入;两种形式同样可达到压窄 OPO 线宽的目的。

本实验就是采用窄线宽脉冲钛宝石激光器作种子,并以闲置波形式注入 BBO OPO 谐振腔中,其中钛宝石激光使用一组膜片就可在 680~ 892 nm 间连续窄线宽( $< 0.01$  nm)调谐<sup>[9,10]</sup>。

由于种子注入高分辨 BBO OPO 需要窄线宽激光作种子,所以一般需要两个激光源,一个是 BBO OPO 的泵浦源,再一个就是种子源;因而此高分辨激光系统既造价高,在两激光源的调节匹配上也有很大的难度;其激光效率要把两个泵浦源都计算起来的话要低得多。一般设计 BBO OPO 中,采用 355 nm 激光作为它的泵浦源,而 355 nm 是由 Nd: YAG 激光器的基波(1.06  $\mu\text{m}$ )先二倍频(得到 532 nm 波长激光)再三倍频(实际上是 1.06  $\mu\text{m}$  和 532 nm 的和频)得到的。由于三倍频效率只有 20~ 30%,所以三倍频后剩余的二倍频能量比三倍频的还要大得多。对于大多数 OPO 利用 355 nm 作泵浦源的 OPO 来说,二倍频这部分能量却被白白浪费了。考虑到这点,我们在设计中利用了剩余二倍频激光作为种子钛宝石激光器的泵浦源,因而整个 BBO OPO 系统结构简单,只使用一台 Nd: YAG 泵浦源,并且钛宝石激光没有消耗额外能量,所以整机效率较高,且方便了调谐,降低了整机价格。

## 2 实验装置

图 1 为 ns 脉冲钛宝石激光作种子注入的 BBO OPO 的结构示意图。由泵浦源射来的激光的成分有基波(1.06  $\mu\text{m}$ )、二倍频(532 nm)和三倍频(355 nm),其中基波通过分光镜  $M_1$ ,  $M_2$  被透射出去;二倍频通过分光镜  $M_1$ ,  $M_2$  和  $M_3$ , 透镜组  $L_1$  入射到钛宝石晶体(由上海光机所提供)上,光栅  $G$  和输出镜  $M_4$  组成钛宝石的谐振腔,  $BP$  为色散型布儒斯特扩束器。三倍频激光通过分光镜  $M_1$ ,  $M_6$ ,  $M_7$ ,  $M_8$  进行延时,以使种子光同时或略前于 355 nm 进入 OPO 谐振腔内<sup>[11]</sup>,再通过透镜组  $L_2$  调至适当的光束状态。种子钛宝石激光和 OPO 泵浦光(355 nm)共同通过分光镜  $M_9$ , 进入参量谐振腔  $M_{10}$ ,  $M_{11}$ 。BBO 晶体为中国科学院福建物构所提供,截面为  $8 \times 6$  mm<sup>2</sup>,长度为 15 mm,晶体采用 I 类相位匹配切割,其中  $\theta = 28.5^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ 。

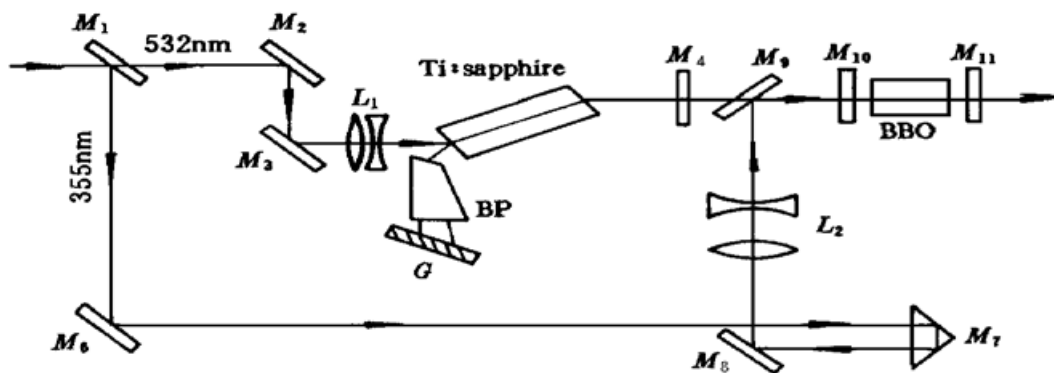


Fig. 1 Schematic of the Ti: sapphire laser injection-seeded BBO OPO system

实验中使用中国科学院福建物理研究所的 LPE 型激光能量计测量输出激光能量,使用四平光学仪器厂制造的半米光栅光谱仪测量参量激光的调谐范围及粗略的激光线宽,使用标准

具(自由光谱程为 0.1 nm)测量 BBO OPO 被压窄后的线宽,并把光栅光谱仪上的谱线位置和标准具的干涉环拍照下来,从而计算出参量激光的线宽。

### 3 实验结果及分析

通过窄线宽钛宝石激光种子以闲置波(710~ 892 nm)的形式注入调谐,本实验实现了窄线宽可调谐运转。通过光栅光谱仪和标准具对信号波的测量可知,不注入种子时参量激光的线宽大于 5 nm,激光以闲置波形式注入 OPO 后,此时输出激光线宽小于 0.01 nm,特别在 BBO OPO 简并点 710 nm 处也成功被压缩至 0.01 nm 以下。因为  $\nu = \nu_s + \nu_r$ , 泵浦光是  $\nu$  单频的,所以闲置波的线宽也小于 0.01 nm。显然若种子光线宽更窄的话,输出参量激光线宽可望更窄。实验中种子钛宝石激光以信号波(680~ 710 nm)形式注入参量谐振腔时,也得到同样的结果。

实验中不注入种子时,使用多组膜片 BBO OPO 实现了波长从 415~ 2411 nm 的宽范围的宽带调谐。图 2 为不注入种子,采用一组膜片时的 BBO OPO 输出闲置波的调谐实验曲线,此时  $M_{10}$  的中心波长为 800 nm,反射率约为 99%, $M_{11}$  的中心波长为 800 nm,反射率约为 93%,其闲置波调谐范围为 570~ 655 nm,最大输出闲置波能量为 1.6 mJ。

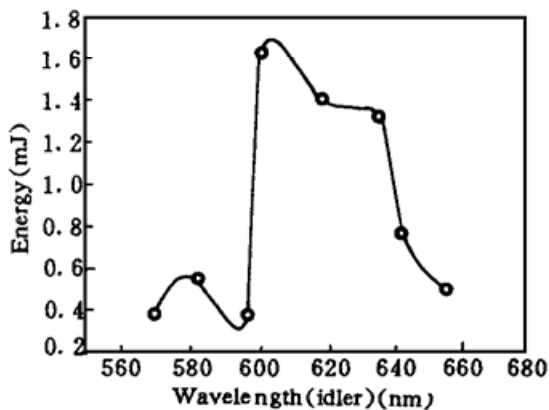


Fig. 2 BBO OPO tuning curve (idler, no injection)

$M_{10}$ : 800 nm,  $R = 99\%$ ;  $M_{11}$ : 800 nm,  $R = 93\%$

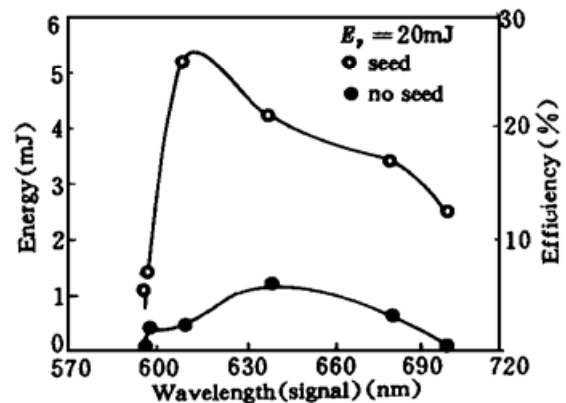


Fig. 3 Injection-seeded BBO OPO tuning lines (signal).

$M_{10}$ : 640 nm,  $R = 99\%$ ;  $M_{11}$ : 640 nm,  $R = 93\%$ ;  $E_p = 20$  mJ. Solid line: with injection-seeded; dotted line: without injection-seeded

注入种子后,钛宝石光参量系统只使用一组膜片就实现了连续窄线宽调谐,调谐范围为 589~ 892 nm。图 3 是参量谐振腔采用中心波长为 640 nm 的膜片,不采用和采用闲置波形式注入,泵浦光能量为 20 mJ 时的输出参量激光信号波的能量和信号波的能量转化效率随波长的实验变化曲线。从图中可以看出种子注入调谐不仅压窄了参量激光,还大大提高了其输出能量。不注入时输出能量最大为 1 mJ,注入种子窄线宽运转后,最大输出能量为 5 mJ/脉冲。整个调谐范围内注入种子后输出信号波能量可提高 4~ 11 倍,主要原因是注入种子后,闲置波初值较大,在非线形作用下,能迅速放大而使信号波振荡放大得更快,从而较早更快地消耗泵浦光能量,使更多的泵能转化为参量激光。

从图 3 中可看到不注入种子时 BBO OPO 转化信号波能量的效率最大为 5%,注入种子后的效率为 25%,最大效率提高了 5 倍。由于实验条件的限制泵浦源离激光系统较远,延时较大,激光发散角较大超过了 BBO 的适配角范围,因而部分能量不能参与振荡,若扣除这部分能

量激光效率还应更高。并且本泵浦源三倍频到达 OPO 谐振腔的能量最大才逾 20 mJ, 只是刚过 BBO OPO 的阈值, 所以没能作进一步的激光输出-输入能量曲线。若有较大的泵浦源能量的话, 可取得更高的能量转换效率, 获得更大的输出能量。当钛宝石激光以信号波形式注入时, 也获得了类似的结果。

总之, 通过采用窄线宽钛宝石激光作种子以闲置波的形式(也可以信号波形式)注入 BBO OPO 谐振腔内, 使 BBO OPO 实现窄线宽连续可调谐输出, 激光线宽小于 0.01 nm, 窄线宽连续可调范围为 589~ 892 nm, 此参量系统的信号波能量转换效率达 25%, 在整个调谐范围内注入种子后的参量输出能量比不注入时增大 4~ 11 倍。整个系统只使用一台 Nd: YAG 泵浦源, 种子钛宝石激光不消耗额外能量, 整机的能量转换效率因而得以提高。

### 参 考 文 献

- 1 J. A. Giordmaine, R. C. Miller. Tunable coherent parametric oscillation in  $\text{LiNbO}_3$  at optical frequencies. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **14**: 973
- 2 C. Chen, B. Wu, A. Jiang *et al.*. A new-type ultraviolet SHG crystal- $\beta$ - $\text{BaB}_2\text{O}_4$ . *Sci. Sin. Ser. B*, 1985, **28**: 235
- 3 Y. X. Fan, R. C. Eckardt, R. L. Byer *et al.*. Efficient high-power harmonic generation in  $\beta$ - $\text{BaB}_2\text{O}_4$ . CLEO, 1986, THQ4
- 4 A. Fix, T. Schroder, R. Wallenstein *et al.*. Tunable  $\beta$ -barium borate optical parametric oscillator: operating characteristics with and without injection seeding. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(9): 1744
- 5 H. Zhou, J. Zhang, T. Chen *et al.*. Synchronously pumped narrow band LBO-OPO continuously tunable from 0.65 to 2.65  $\mu\text{m}$ . CLEO'94, 250, CWM3
- 6 J. E. Bjorkholm, H. G. Danielmeyer. Frequency control of a pulsed optical parametric oscillator by radiation injection. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**: 171
- 7 J. G. Haub, M. J. Johnson, B. J. Orr *et al.*. Continuously tunable, injection-seeded  $\beta$ -barium borate optical parametric oscillator: spectroscopic applications. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(16): 1718
- 8 A. Fix, R. Urschel, G. Goeritz *et al.*. Single-mode BBO/KNB optical parametric oscillator-amplifier system, broadly tunable from the visible (0.4  $\mu\text{m}$ ) to the infrared (4  $\mu\text{m}$ ). CLEO'94, 199, CWE3
- 9 张裕飞, 邓道群, 刘翔等. 宽调谐窄线宽脉冲钛宝石激光器. 中国激光, 1994, **A21**(12): 933
- 10 张裕飞, 邓道群, 张秀兰等. 采用色散型布儒斯特棱镜扩束器和光栅调谐的高效率脉冲钛宝石激光器. 待发表
- 11 张裕飞, 邓道群, 张秀兰等. 用作高分辨 BBO 光参量振荡激光器种子源的窄线宽脉冲钛宝石激光器的时间特性研究. 待发表

## A Ti: sapphire Laser Injection-seeded BBO Optical Parametric Oscillator with High Efficiency and Narrow Bandwidth Output

Zhang Yufei Deng Daoqun Zhang Xiulan Fen Baohua Zhang Dongxian Xu Zuyan  
(*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

**Abstract** We report on a  $\beta$ -barium borate (BBO) optical parametric oscillator injection-seeded with a narrow bandwidth pulsed Ti: sapphire laser. This device is pumped by only one Nd: YAG laser. The pump source of the Ti: sapphire laser is the residual second harmonic (532 nm) in frequency-tripling (355 nm, OPO's pump source) of the Nd: YAG laser. As the Ti: sapphire laser does not consume other energy, thus the overall energy conversion efficiency is high. The signal conversion efficiency is up to 25%, and a narrow bandwidth (< 0.01 nm) continuous tuning range of 589~ 892 nm is achieved.

**Key words** BBO, parametric oscillator, Ti: sapphire laser, injection seeding