

文章编号: 0258-7025(2003)03-0199-04

双晶体双向非共线抽运 BBO 光参量振荡器

姚宝权, 王月珠, 王 骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 演示了利用一套光学元件对 BBO 光参量振荡器(OPO)进行宽带调谐的结构,即双晶体走离补偿、双向非共线抽运。谐振腔中 90%高耦合输出镜同时起到滤除抽运光和反向抽运的作用,无需更换腔片可实现信号光 0.43~0.63 μm 和闲频光 0.8~2.0 μm 调谐输出,最高能量输出 41 mJ,相应的转换效率 50%。

关键词 光电子学;BBO;光参量振荡器;非共线抽运;走离补偿

中图分类号 O 437.4 文献标识码 A

BBO Optical Parametric Oscillator with the Configuration of Walkoff-compensating Crystals and Noncollinear Dual-direction Pumping

YAO Bao-quan, WANG Yue-zhu, WANG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Non-collinear cavity with dual-direction pumping geometry and high output coupling mirror are used in BBO OPO resonators to ensure continuously tunable without changing optics. Total output energy of 41 mJ and highest conversion efficiency of 50% have been attained with tuning range of 0.4~2.0 μm , which is pumped by a Nd:YAG laser with energy of 80 mJ at 355 nm.

Key words optical electronics; BBO; optical parametric oscillator; noncollinear pumping; walkoff compensation

1 引言

BBO 是一种优质非线性晶体,有效非线性系数大($d_{11} = 1.78 \text{ pm/V}$),0.19~3.5 μm 的透明范围宽,抗强激光(5 GW/cm^2 ,脉宽 10 ns)损伤^[1],并有合适的相位匹配角,适用于 Nd:YAG 倍频光 532 nm,三倍频 355 nm 及四倍频 266 nm 抽运的光参量振荡器(OPO)晶体。355 nm 激光抽运的 I 类匹配($e \rightarrow o+o$) BBO OPO,信号光调谐范围 0.41~0.71 μm ,闲频光 0.71~2.7 μm 。在高功率脉冲激光器抽运的光参量振荡器中,单共振 OPO 较双共振 OPO 具有频率和能量输出更稳定的优点,因而得以广泛采用。为有效降低单共振 BBO OPO 的阈值和保持高效输出,其输入镜必须是对信号光或闲频光全反,输出镜对信号光和闲频光高反射(50%~80%)。由于镀膜工艺的限制,在可见光波段的全反

带范围只能镀到 80~100 nm。BBO OPO 的信号光调谐范围近 300 nm,需要用“蓝绿黄”三套膜片来实现宽带可调谐输出^[2]。为了完成全波段调谐而不需要像染料激光器那样频繁更换染料或其他光学元件,有必要研究毋需更换元件的宽调谐 BBO OPO。我们采用双向非共线抽运方式和双晶体走离补偿结构,利用一套光学元件实现了信号光 200 nm 的自动调谐输出。

2 BBO OPO 的结构

2.1 抽运源

抽运源为 PIANO-1000 型 Nd:YAG 激光器,倍频晶体为 LBO,切割角 $\theta = 90^\circ$,采用的是 I 类匹配方式($e+e \rightarrow o$)。三混频晶体为 BBO 晶体,II 类匹配,尺寸为 7 mm×7 mm×8 mm,两端未镀膜,由

收稿日期:2001-08-06;收到修改稿日期:2001-11-28

作者简介:姚宝权(1970),男,主要从事非线性光学应用及固体激光技术研究。E-mail: bqyao@mail.hl.cn

于 BBO 晶体在空气中略微潮解,因此把它封在一个密闭的空气室中,前窗片两端面镀 532 nm 和 1064 nm 增透膜,后窗片为 JGS1 石英窗片。基频光脉冲宽度(FWHM)约 10 ns,全宽度发散角小于 1 mrad, M^2 因子约等于 2,三次谐波 355 nm 输出为水平偏振,能量大于 150 mJ。光阑将 355 nm 光束直径限定在 5 mm,既保证光束质量好的中心部分参与抽运,又阻隔了 OPO 各种反射光进入激光器中。

2.2 双晶体走离补偿

BBO 是负单轴晶体,因为 I 类匹配方式有效非线性系数大和调谐范围宽(0.4~2.0 μm)而普遍被采用。而 BBO 晶体的相位匹配角集中在 30° 左右的范围内,远离 90° 非临界匹配角,产生的走离角约为 70 mrad,导致 e 光的抽运光与 o 光的参量光坡印廷矢量在空间上不能完全重合。采用非临界相位匹配或极化率的周期性极化技术^[3],可消除走离效应,但都不适用于 BBO OPO。

BBO 晶体尺寸都为 8 mm \times 10 mm \times 12 mm,两个端面镀增透膜,切割角度都是 29.2° ($\varphi = 0^\circ$)。两块 BBO 晶体的晶轴相对于谐振腔轴交叉对称放置,如图 1 所示。双晶体 OPO 较单晶体 OPO 有一定的优越性:1) 走离效应得到一定的补偿,增加了晶体的接受角,允许发散角较大的激光参与抽运^[4]; 2) 增益长度增加了近一倍,有利于阈值的降低和效率的提高;3) 在一定程度上抑制了调谐过程中输出参量光束的水平偏移。

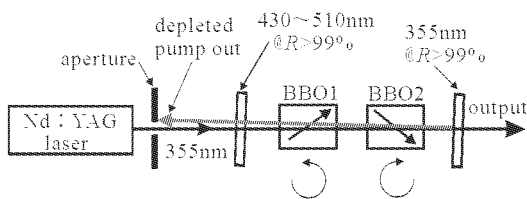


图 1 直线腔双向非共线抽运 BBO 光参量振荡器结构

Fig. 1 Scheme of linear cavity BBO OPO with noncollinear and dual-direction pumping configuration

2.3 双向非共线抽运

图 2 为在 $24^\circ\sim 33^\circ$ 相位匹配范围内,355 nm 激光抽运的 BBO OPO 的接受角小于 0.3 mrad,但抽运光发散角要小于 0.3 mrad 是很困难的。BBO OPO 可通过非共线正切相位匹配的方法,使其接受角比共线相位匹配大一个量级,允许的抽运光全宽度发散角约 9 mrad^[5,6]。实验中将输入输出镜及晶体构成的谐振腔轴与入射抽运光波矢偏离 $2^\circ\sim 5^\circ$ 。

利用 355 nm 全反镜将通过 BBO 晶体的抽运光

按谐振腔轴线的方向返回,这样后向抽运进一步降低了阈值抽运功率^[7]。由于双晶体走离补偿和双向抽运结构保证了 OPO 低阈值运转,为提高转换效率,输出镜直接以 355 nm 全反镜作为输出镜,输出镜对信号光的反射率在 10%~20%之间,输入镜对波长范围 0.44~0.52 μm 反射率大于 99%,如图 3 所示,整个 OPO 腔长约 60 mm。

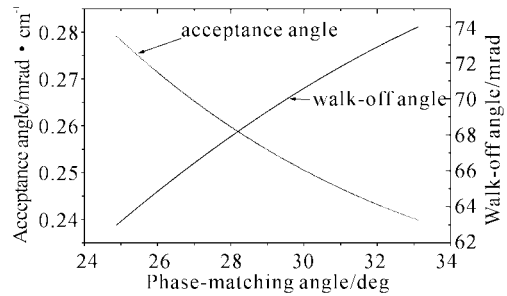


图 2 BBO OPO 同晶体内角对应的走离角和晶体对抽运光接受角

Fig. 2 Walkoff angle and acceptance angle in BBO OPO pumped at 355 nm versus phase-matching angle

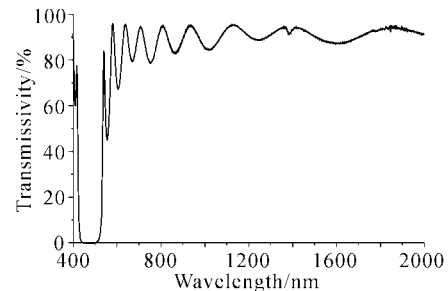


图 3 BBO OPO 输入镜在 0.4~2.0 μm 范围内的透射率曲线

Fig. 3 Transmissivity of input mirror of BBO OPO in the range of 0.4~2.0 μm

3 实验结果及分析

3.1 BBO OPO 的调谐

355 nm 激光抽运的 BBO OPO,晶体的内角转动不超过 10° 就能实现全波段调谐,因而调谐过程中不需要更换晶体。利用晶体折射率的 Sellmeier 方程可建立起晶体转角和输出波长的对应关系。但 Sellmeier 方程系数的得出是依据实验测量,测量存在的误差和晶体生长工艺流程的不同,使折射率都有差异,因而以 Sellmeier 方程计算的调谐曲线为根据控制 OPO 输出有较大的误差。

实验中将晶体置于由步进电机控制的转角精度为 0.001° 精密转动平台上,由计算机发出脉冲信号

控制晶体转动,其中脉冲频率控制转速,脉冲个数控制转角大小,波长的测量用 Burleigh WA-4500 脉冲波长计。将晶体正放置时定位初始位置,步进马达每运行 100 步,记录一个信号光波长,在接近筒并点附近每隔 50 步测量一个波长。然后将波长和相应步进马达所走的步数做成一个表,这样通过三次样条插值以查表的方式得出相互对应关系,如图 4 所示。在筒并点附近线宽较宽,波长测量的误差较大,影响三次样条的拟合精度,因此实验中最长信号光波长只测到 630 nm;由于闲频波 2 μm 以后吸收严重,OPO 起振阈值高,因此最短波长测到 428 nm。因为波长间隔可以做到小于 1 nm,波长定位精度可以得到保证。

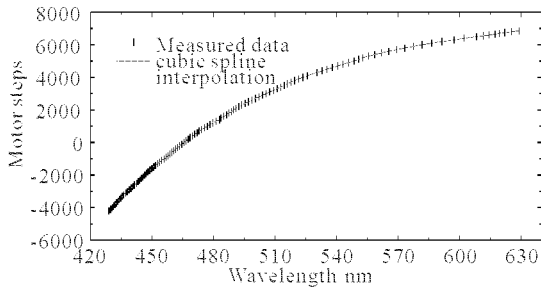


图 4 测量和样条插值拟合的 BBO OPO 信号光波长与步进电机步数的对应关系

Fig.4 Motor steps relative to BBO OPO signal wavelength according to data measured experimentally and fitting curve with cubic spline interpolation

3.2 能量及效率

高输出耦合率输出镜避免了腔内高功率密度的信号光使参量增益达到饱和,影响 OPO 输出能量及效率。图 5 为不同抽运能量下,双 BBO 晶体走离补偿光参量振荡器输出能量及效率。将抽运功率和输出功率线性拟合,得出阈值约 20 mJ。当抽运功率为 80 mJ,相当于四倍阈值抽运功率时,OPO 总输出能量最大 41 mJ,最高总能量转换效率近 50%。当 BBO OPO 调谐到绿黄红波段(>530 nm),虽然超出了输入镜的反射范围,但 OPO 维持较高的能量输出。在 75 mJ 的抽运能量下,480 nm 和 530 nm 处参量光输出能量为 34 mJ,在超出输入镜反射带范围的 580 nm 处输出能量为 25 mJ,输出仅下降 25%,如图 6 所示。这种双向抽运、双晶体走离补偿的 OPO 结构在降低起振阈值、提高参量增益所起的作用比单向抽运、单晶体 OPO 更具优越性,后向抽运弥补了输入镜对谐振波反射率小的问题,此时

OPO 更像一个具有弱信号反馈的多程放大器。

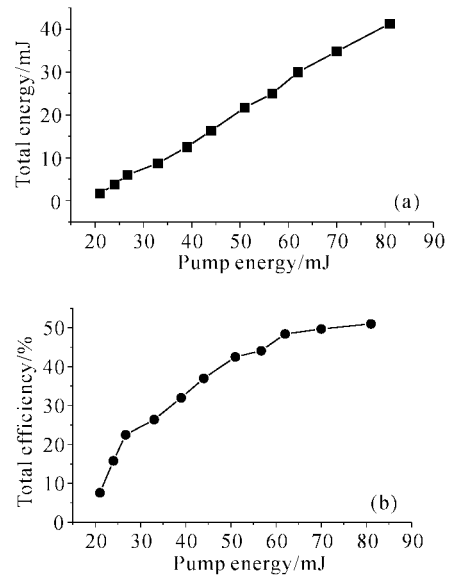


图 5 BBO OPO 输出能量(a)及能量转换效率(b)与抽运能量的关系

Fig.5 Output energy (a) and conversion efficiency (b) of BBO OPO versus pump energy

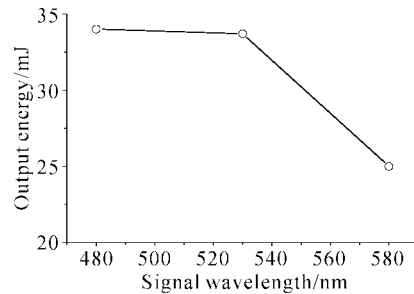


图 6 BBO OPO 不同波长处输出的能量

Fig.6 Output energy of BBO OPO at different wavelengths

OPO 内的谐振波在腔内建立及形成稳定输出物理过程可以这样描述:前向抽运是非共线的,而后向抽运是共线的。这样避免了腔镜将 355 nm 激光反射回抽运光谐振腔内,损伤抽运激光源的元器件。由于两块晶体的晶轴是在谐振的轴线上对称放置,如果第一块晶体满足非共线条件,而第二块晶体不满足此条件,此时其作用就是光线补偿的作用。输出镜虽然不能提供高反馈以利于下一次往返放大,但由于后向抽运光能够对反馈的参量光又进行一次放大,并达到一定的幅度,即使输入镜对参量光的反射率小于 10%,其反射的参量光仍对前向放大提供了类似于对谐振波高反的振荡条件。

两块晶轴对称放置晶体的相位匹配是 OPO 达

到起振阈值,继而形成高效输出的重要因素。由于阈值高,因此调试时要把输出镜换成 480 nm 高反镜 ($R > 80\%$),调整两块晶体的匹配角,直至输出最大。将输出镜替换为 355 nm 全反镜,调节腔镜构成非共线腔型。因两块晶体相互匹配范围小于 0.3 mrad,使调节较为困难,但一旦满足匹配条件形成稳定振荡,其输出效率最高可达 40%~50%。

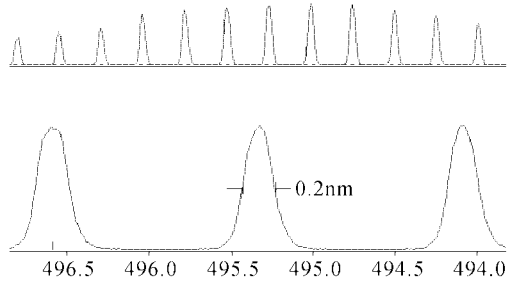


图 7 BBO OPO 输出信号波 496 nm 处的线宽
Fig. 7 Linewidth of signal at 496 nm

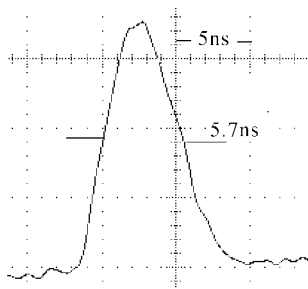


图 8 BBO OPO 496 nm 信号光脉冲波形
Fig. 8 Signal pulse temporal profile of BBO OPO at 496 nm

表 1 BBO OPO 输出信号光的全宽度发散角和
光束质量 M^2 值

Table 1 Full width divergence angle and M^2 value of signal output from BBO OPO

θ_x /mrad	θ_y /mrad	M_x^2	M_y^2
1.5	1.9	4.2	5.3

3.3 参量光线宽、脉冲宽度、光束质量

图 7 为用 Burleigh WA4500 脉冲波长计测量的 496 nm 信号光线宽,约 0.2 nm (8 cm^{-1})。630 nm 以后的波长由于靠近简并点,线宽 (FWHM) 通常达几十个波数,超出 FP 干涉仪的自由光谱范围。图 8 为用快响应强流管和 TEKTRONICS TDS-380 数字示波器测量的信号光 (496 nm) 脉冲时间分布,最大值一半处的全宽度 (FWHM) 为 5.7 ns。光束

质量的测量是用 Spiricon 的 M^2 -101 和 LBA100A 光束分析仪,全宽度发散角和 M^2 值如表 1,因为抽运光束在水平方向受到一定的接受角限制,信号光水平方向上的 M^2 值略大于垂直方向。参量光束的指向及分布不稳定性导致两次测量结果差别较大。

4 结 论

双晶体双向非共线抽运的 BBO OPO,优点是调谐范围宽,调谐过程中不需要更换腔片,输出能量大,转换效率高;缺点是阈值高,调腔较繁琐,另外紫外抽运光对输入镜膜层有损伤。由于两块晶体分别来自不同的单位,晶体的切割角和折射率的 Sellmeier 方程系数有差别,当调谐范围超过 100 nm 时,两块晶体会出现不匹配现象,需要稍微调一下晶体的匹配角。该系统在膜层的抗损伤能力,以及晶体的选择和切割等方面还需要进一步改进。

参 考 文 献

- 1 Fan Qikang, Ye Jianhua. Broad tunable BBO optical parametric oscillator with high conversion efficiency [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1991, **11**(5):396~401 (in Chinese)
- 2 A. Fix, T. Schroder, R. Wallenstein *et al.*. Tunable β -barium borate optical parametric oscillator: operating characteristics with and without injection seeding [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(9):1744~1750
- 3 S. M. Russell, P. E. Power, M. J. Missey *et al.*. Broadband mid-infrared generation with two-dimensional quasi-phase-matched structures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(7):877~887
- 4 D. J. Armstrong, W. J. Alford, T. D. Raymond *et al.*. Parametric amplification and oscillation with walkoff-compensating crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(2):460~474
- 5 Lawrence A. W. Gloster, Zhi Xing Jiang, Terence A. King. Characterization of an Nd:YAG-pumped β -BaB₂O₄ optical parametric oscillator in collinear and noncollinear phase-matched configurations [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(12):2961~2969
- 6 S.-W. Lee, S. H. Kim, D. K. Ko *et al.*. High-efficiency and low-threshold operation of the pump reflection configuration in the noncollinear phase matching optical parametric oscillator [J]. *Opt. Comm.*, 1997, **144**(4~6):241~244
- 7 Stephen J. Brosnan, Robert L. Byer. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **15**(6):415~431