

文章编号: 1007-5461(2004)04-0444-04

# 一种脉冲宽调谐 BBO 光参量振荡器的实验研究

冯 瑜, 王进祖, 余吟山, 徐之海, 陆志贤

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 使用 Nd:YAG 激光器的倍频 ( $0.532 \mu\text{m}$ ) 光泵浦 BBO 晶体光参量振荡器, 使用一组腔片, 获得  $0.7\sim 2.1 \mu\text{m}$  可调谐激光输出, 并对实验结果进行了分析。

**关键词:** 非线性光学; 光参量振荡器 (OPO); BBO 晶体; 角度调谐

**中图分类号:** O437.4 **文献标识码:** A

## 1 引 言

早在 1962 年, Korll 就提出了光参量振荡的理论。1965 年, Giordmaine 和 Miller 在脉冲激光器上实现了 OPO 的首次成功运转<sup>[1]</sup>。OPO 的研究经历了以下几个阶段<sup>[2]</sup>: 1) 1970 年以前, 是其探索阶段, 由于所用非线性晶体存在的一些缺点, 科学家们只是建立了较为完善的参量互作用理论。2) 1980 以后, OPO 技术大发展。以 KTP、BBO、LBO 等为代表的性能优良的非线性晶体使研究工作突飞猛进, 出现了可见和近红外、中红外的 OPO 产品。3) 1980 年中后期, 材料学家开始研究透明范围更宽、可匹配波长更长的非线性晶体, RTA、KTA、CTA 等晶体的研制成功, 进一步拓展了 OPO 的中、远红外调谐范围。而近几年迅速发展起来的 LN、LT 等光学超晶格材料, 为 OPO 的发展提供了更广阔的空间。OPO 具有宽带可调谐、高相干辐射输出的特点, 是得到可调谐激光的主要方法。在光谱分析、光化学、环境监测和军事<sup>[3]</sup>、激光测距、激光测温、医学诊疗、科学仪器、材料处理、通讯等领域中, OPO 技术都发挥着不可替代的作用。

本文主要介绍一种脉冲可调谐 BBO 光参量振荡器的设计与实验研究。

## 2 原 理

当两束频率不同的光入射到非线性晶体上时, 将产生频率不同的极化行波, 如果极化行波在晶体中传播的速度与电磁波自由传播的速度一致, 将引起累积增长。频率为  $\omega_p$  的泵浦光与频率为  $\omega_s$  的信号光同时入射非线性晶体后, 由于二阶非线性极化, 在晶体内产生一个频率为:  $\omega_i$  ( $\omega_i = \omega_p - \omega_s$ ) 的差频空闲光波, 此空闲光的振幅正比于泵浦光和信号光振幅的乘积; 空闲光又与泵浦光发生非线性耦合, 再由二阶非线性极化辐射出  $\omega_s$  ( $\omega_s = \omega_p - \omega_i$ ) 的信号光, 其振幅正比于泵浦光振幅和空闲光振幅的乘积。由于泵浦光的强度远大于信号光和空闲光的强度, 在满足一定的相位匹配条件下, 上述非线性混频过程可以持续进行, 泵浦光的能量不断耦合到信号光和空闲光中去, 从而形成光参量放大<sup>[4]</sup>(OPA)。由能量守恒得到频率条件, 泵浦光和参量光波长应满足关系式:

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

其中  $\lambda_p$  为泵浦光波长， $\lambda_s$  为信号光波长， $\lambda_i$  为空闲光波长。由动量守恒得到相位匹配条件，泵浦光和参量光还应满足关系式：

$$\frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_i}{\lambda_i} = 0, \tag{2}$$

其中  $n_p$ 、 $n_s$ 、 $n_i$  分别是材料对泵浦光、信号光和空闲光频率的折射率。

如果把非线性晶体置于光学谐振腔内 (如图 1)，当参量放大等于或者大于腔内损耗加耦合损耗时，就可以分别在信号光频率和空闲光频率处得到持续的相干光振荡输出<sup>[4]</sup>，这就是参量振荡的原理。联立 (1)、(2) 两式得

$$\frac{\omega_s}{\omega_i} = \frac{(n_i - n_p)}{(n_p - n_s)} \tag{3}$$

由 (3) 式可见，泵浦光、信号光、空闲光折射率的改变将使

$\omega_s$ 、 $\omega_i$  作相应的变化，得到新的相位匹配。就是说泵浦光以波长  $\lambda_p$  入射时，折射率在相位匹配条件附近的微小变化都会导致参量光波长的改变，而达到新的相位匹配<sup>[5]</sup>。要满足 (3) 式，只有在各向异性晶体中才能实现，且泵浦光和参量光还应满足一定的偏振态，其相位匹配方式如表 1。

改变折射率的方法通常有两种，一是改变泵浦光与非线性晶体光轴之间的夹角，二是改变晶体的温度，即角度调谐和温度调谐。利用各向异性晶体折射率与角度变化关系的角度调谐方法简单易行，被广泛采用。角度调谐中，由于匹配角稍有偏离，就会破坏原来的相位匹配，因此也称为临界相位匹配；温度调谐是取匹配角等于  $90^\circ$  的时候，此时就不再存在离散效应，通过调节晶体的温度来实现的相位匹配又叫非临界相位匹配。本文将讨论的 OPO 系统即是采用临界相位匹配 (角度调谐) 的 BBO 光参量振荡系统。

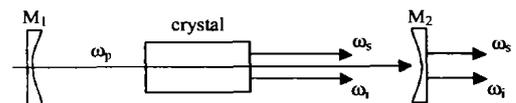


Fig.1 Sketch map of optical parametric oscillators' simple former

表 1 参量振荡器中单轴晶体的相位匹配方式

晶体	匹配方式	泵浦光、信号光、空闲光
负单轴	I 类	$e \rightarrow o + o$
	II 类	$e \rightarrow o + e$
正单轴	I 类	$o \rightarrow e + e$
	II 类	$o \rightarrow o + e$

### 3 实验装置

实验装置如图 2 所示，主要包括 Nd:YAG 激光器、Q 开关、起偏器、倍频晶体、光束控制组件、光参量振荡器 (OPO) 等几个主要部分组成。在实验系统中，OPO 晶体选用的是  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (BBO) 晶体。它具有从紫外到中红外的高非线性频率转换效率，较大的非线性系数、大的温度容限、小吸收和高损伤阈值。晶体尺寸为  $6 \times 8 \times 12$ ， $\theta = 21.5^\circ$ ， $\phi = 0$ 。

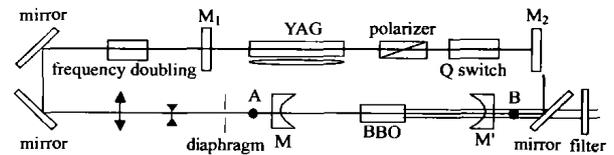


Fig.2 Experimental system of OPO with BBO crystal

选用角度调谐可以实现波长的快速调谐。采用 I 类相位匹配方式，因 BBO 为负单轴晶体，由表 1 可知：泵浦光要求为  $e$  光，信号光和空闲光则均为  $o$  光。以 Nd:YAG 激光器的倍频 ( $0.532 \mu\text{m}$ ) 输出作为光参量振荡器的泵浦光源，为了提高倍频输出的光束质量，并且满足 OPO 对泵浦光的偏振态的要求，倍频晶体也选用 BBO 晶体，匹配方式为 I 类相位匹配，基频波为  $o$  光，倍频输出 ( $0.532 \mu\text{m}$ ) 为  $e$  光。在 Nd:YAG 谐振光路中加入电光调 Q 晶体，提高泵浦脉冲的输出峰值功率。由于电光调 Q 需要起偏器，而且 BBO 倍频的基波输入也要求为线偏振光，我们在 Nd:YAG 腔中采用布儒斯特角放置的镀膜片起偏的方法获得线偏振光。利用缩束镜和光阑限制泵浦光束的光束直径，以达到对准光参量振荡器谐振腔中非线性晶体的目的。因为角度调谐是通过改变泵浦光与非线性晶体光轴之间的夹角来调谐输出光波长。所以，首先就要了解改变角与参量振荡输出光波长之间的函数关系。通过已知的泵浦光的偏振特性，以及 BBO 晶体的色散关系函数。由寻常光、非常光频率随角度的变化关系，可计算出  $0.532 \mu\text{m}$  脉冲激光泵浦的 BBO 光参量

振荡器的调谐角与输出光波长的关系如图 3。

由调谐曲线可知, 要获得  $0.7\sim 2.1\ \mu\text{m}$  范围内的宽调谐参量输出, 调谐角要求在  $21.25^\circ\sim 22.75^\circ$  的范围变化。在相对较小的角度范围内实现输出波长的精确调谐, 就要求机械调谐的机构精密可靠。我们设计的机械调节机构, 采用手动调节, 精度为  $3.5''$ /格。由于调谐范围很宽, 对 OPO 输入、输出腔镜的镀膜要求也就非常高。其输入反射镜与输出反射镜是选用国外先进的技术镀制的膜片, 镀膜膜层的技术指标严格符合光参量振荡器的输出设计要求。

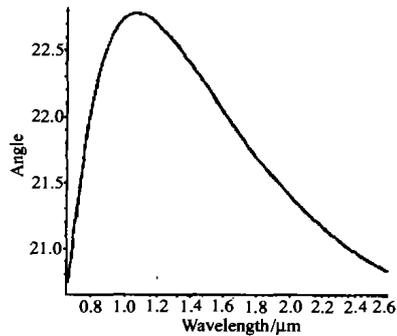


Fig.3 The curve of BBO crystal vs tune of angle

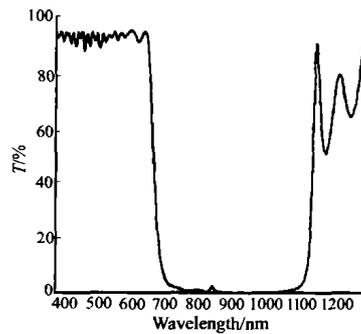


Fig.4(a) The transmittance curve of OPO input mirror's film

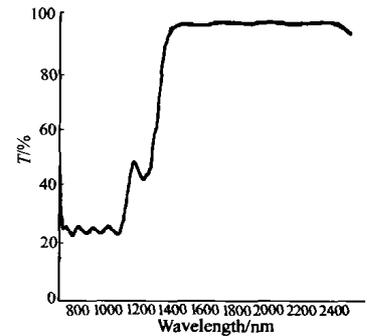


Fig.4(b) The transmittance curve of OPO output mirror's film

OPO 输入、输出腔镜的镀膜实测曲线如图 4(a)、图 4(b) 所示。从图中我们可以看出, 输入反射镜上的膜层对于  $0.532\ \mu\text{m}$  的泵浦光透过率  $T \geq 96\%$ , 对于  $0.7\sim 1.06\ \mu\text{m}$  信号光的反射率  $R \geq 99\%$ ; 而输出反射镜对于  $0.7\sim 1.06\ \mu\text{m}$  的信号光的透过率  $T \cong 25\%$ , 空闲光的透过率  $T \geq 97\%$ , 这就保证了我们可以在一套腔片的前提下实现宽调谐。而且我们选择单谐振 OPO 系统, 只要求信号光谐振, 空闲光波不产生谐振。这样做的好处: 1) 是可以避免双谐振的逆转波的现象、提高转换效率。2) 是可以减小腔长的微动造成的频率波动现象。

## 4 实验结果及结论

### 4.1 实验结果

Nd:YAG 激光器的倍频输出与 OPO 谐振输出光束均为低阶模式, OPO 输出信号光与空闲光均为线偏振寻常光。当输入能量为  $18\ \text{J}$  时, 使用 LPE-1A 型能量计测得输出光束能量与输出波长关系如图 5。其中波长数值是使用 WDX 型小型单色仪测量及根据公式计算而得。

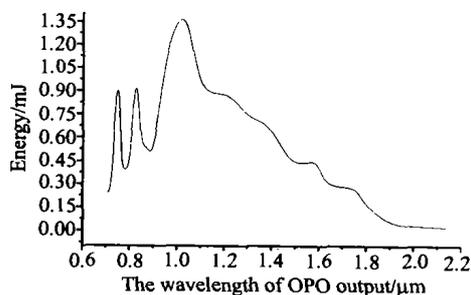


Fig.5 Output energy of opo vs the wavelength of opo output

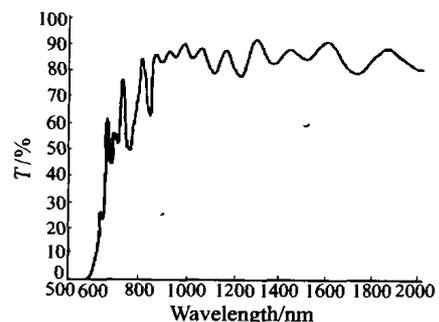


Fig.6 Transmission vs wavelength of  $0.532\ \mu\text{m}$  reflector by  $45^\circ$

从图 5 中可以看出系统的输出波长在  $0.7\sim 2.1\ \mu\text{m}$  范围内是连续可调的。输出能量偏低是因为我们在测试中降低了泵浦电压, 是为了保护输入、输出反射镜的镀膜膜层。图中另一个值得注意的地方是  $0.74\sim 0.9\ \mu\text{m}$

波段，OPO 输出出现了两个尖峰，这是不应该出现的现象。

分析其原因，我们认为是 OPO 输出腔镜后所加的  $0.532\ \mu\text{m}$  的  $45^\circ$  全反镜所造成的。我们添加全反镜和滤光片，是为了进一步衰减泵浦光的输出，滤掉除信号光和空闲光以外的干扰光波，使 OPO 的输出光束质量更好。但镜片对不同波长输出光的透过率不同，影响了输出光能量。滤光片对  $0.7\sim 2.1\ \mu\text{m}$  范围的光束透过率均近似相同 ( $T\approx 85\%$ )，可以不考虑其影响，但  $0.532\ \mu\text{m}$  的  $45^\circ$  全反镜的透过率随波长变化的波动较大，其透过率曲线如图 6。从图中可以看出：在  $0.74\sim 0.9\ \mu\text{m}$  的波段，透过率有两个低值点，因此造成了图 5 中的相同位置出现低值点，而使 OPO 输出产生了多余的尖峰。在大于  $1.0\ \mu\text{m}$  以后，透过率趋于相对的平稳。虽然透过率仍有所振荡，但各波长的透过率都在  $85\%$  左右，没有大幅度变化。从图 5 中也可看出简并点以上的部分波形没有出现突变的尖峰。

使用 LPE-1A 型能量计测得图 2 中 A 点平均能量  $E_a=32\ \text{mJ}$ ，B 点平均能量  $E_b=3.28\ \text{mJ}$ ，经换算可得系统的转换效率  $\eta\approx 10\%$ 。可见转换效率不高，原因如下：1) 非线性晶体的透光率是影响转换效率的因素之一，系统中的 BBO 晶体没有镀膜，降低了转换效率；2) 谐振腔的损耗大也会影响转换效率的提高。

#### 4.2 结 论

采用多套腔镜替换的方法来获得宽调谐输出光波是光参量振荡器常用的方法之一。我们设计的在一套输入、输出镜下实现可见到红外范围输出的 OPO 系统，成功获得了  $0.7\sim 2.1\ \mu\text{m}$  范围内的可调谐激光输出，而且实现了手动的精确快速调谐，调节精度在  $3.5''$ /格。实验结果显示，系统基本符合设计要求。整套实验系统的体积小、重量轻，运行稳定，在纳米线栅偏振器测试平台中作为光源系统，取得了比较满意的效果。本系统可广泛应用于科研、国防、军事及工业、农业、食品、医疗卫生等部门，作为激光光谱学、激光化学、医疗、生物学等领域的研究工具，有很大的实用价值，具有非常广阔的应用前景。

#### 参考文献：

- [1] Giordmaine M. Tunable coherent opo in  $\text{LiNbO}_3$  at optical frequency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, 14: 973~976.
- [2] Liu Qiang, Wang Yuezhu, Wang Qi. Developing OPO technique [J]. *Laser Journal*, 1999, 20(2): 11-12.
- [3] Li Chun, An Yuying. Theoretical design of  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  angle-tuned  $\text{LiNbO}_3$  OPO [J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(6).
- [4] Lan Xinju. *Laser Technology* (激光技术) [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995. 199-228 (in Chinese).
- [5] Koechner W. *Solide-State Laser Engineering* [M]. 5th edition, Beijing: Science Press, 2002. 540-545.

## Experimental research of a pulse broadly tunable BBO optical parametric oscillator

FENG Yu, WANG Jin-zu, YU Yin-shan, XU Zhi-hai, LU Zhi-xian

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** By using the second harmonic ( $0.532\ \mu\text{m}$ ) of Nd:YAG for pumping the BBO OPO system, the continuous tunable output from  $0.7$  to  $2.1\ \mu\text{m}$  with only a pair of mirrors was acquired. The experimental results were analyzed in detail.

**Key words:** nonlinear optics; optical parametric oscillator (OPO); BBO crystal; angle tuning

**作者简介：**冯瑜 (1977 -)，男，辽宁人，现为中国科学院安徽光机所硕士研究生，主要从事应用激光技术研究工作。