

# 可调谐掺钛蓝宝石激光器的一种新型倍频器\*

蒋 捷 张雨东 庄欣欣 吴柏昌 陈创天  
(中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

**摘 要** 介绍掺钛蓝宝石激光器的一种新的倍频系统, 利用色散棱镜对把不同频率的激光从空间色散开, 然后利用透镜使这些光从不同方向入射到 BBO 晶体上, 这些方向恰好是这些光在 BBO 晶体上的相位匹配角, 从而不需转动倍频晶体在掺钛蓝宝石激光器的可调谐范围内均实现角度相位匹配。

**关键词** 可调谐掺钛蓝宝石激光器, 倍频, 角度相位匹配, 色散。

钛蓝宝石激光器(简称钛宝石激光器)是一种新型的固体可调谐激光器<sup>[1, 2]</sup>, 除了具有结构简单、运转方便、性能稳定、寿命长、室温运转等一般固体激光器所具有的特点外, 其最突出的特点是调谐范围宽, 可输出从 660 nm 至 1200 nm 的连续可调谐激光, 辅之以倍频技术, 波长范围可以扩展到 330~ 600 nm<sup>[3]</sup>, 相当于多组染料所覆盖的激光波段的总和。但是可调谐钛宝石激光器的腔外倍频目前存在一个问题, 就是针对在调谐范围内的某一特定波长, 转动倍频晶体以改变入射角, 实现角度相位匹配, 当激光器调谐到另一波长时, 又要适时地转动倍频晶体以重新满足角度相位匹配。

本文针对可调谐激光器腔外倍频的这一缺点, 提出了一套新型腔外倍频系统, 利用色散棱镜对把不同频率的激光从空间色散开, 然后利用透镜使这些光从不同方向入射到 BBO 晶体上, 这些方向恰好是这些光在 BBO 晶体上的相位匹配角, 从而不需转动倍频晶体在掺钛蓝宝石激光器的可调谐范围内均实现角度相位匹配<sup>[4]</sup>。

## 1 实验装置设计

对于可调谐钛宝石激光器的腔外倍频, 设计了如图 1 所示的实验装置。其中  $M_1$ 、 $M_2$  为可调谐钛宝石激光器的腔镜,  $M_1$  对 700~ 860 nm 有高反射率,  $M_2$  在中心波长 780 nm 处透过率约为 60%。 $P_0$  为 SF<sub>10</sub> 色散棱镜, 用以调谐激光波长。 $Ti \cdot Al_2O_3$  为 5×5×12 mm 的钛宝石棒。 $P_1$  和  $P_2$  均为 SF<sub>10</sub> 色散棱镜, 顶角为 60.6°, 两腰边长为 30 mm。 $F_1$  和  $F_2$  均是焦距为 59 mm 的透镜, crystal 为倍频晶体 BBO, 切角为 29.9°, I 类匹配, 通光方向长度为 10 mm。可调谐钛宝石激光器由光谱物理公司的 DCR-3G 纳秒高斯镜非稳腔 Nd·YAG 激光器腔外倍

\* 福建省自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1998-07-10; 收到修改稿日期: 1998-09-10

频产生的 532 nm 绿光抽运。DCR-3G 输出的绿光单脉冲最大能量可达 360 mJ, 脉冲宽度为 8 ns, 脉冲重复频率为 1~ 10 Hz 可调, 能量稳定度为 ±3%。

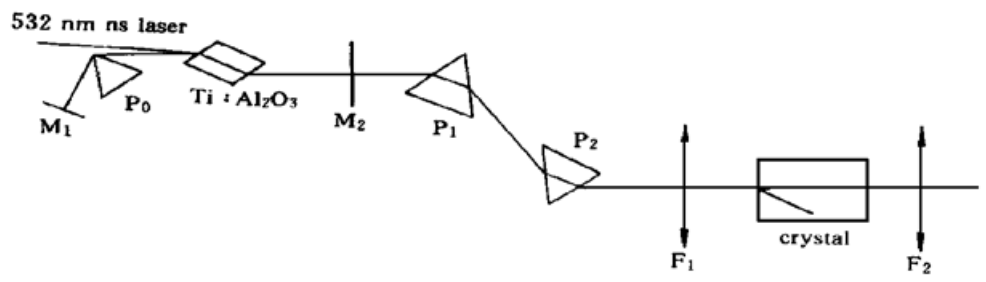


Fig. 1 The schematic of tunable Ti:sapphire laser and its new frequency-doubler

532 nm 绿光经透镜聚焦后以近轴方式抽运钛宝石晶体。钛宝石激光腔由色散棱镜 P<sub>0</sub> 和腔镜 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 组成, 通过微调 P<sub>0</sub> 的角度, 可以实现从 730 nm 到 830 nm 范围的调谐。532 nm 抽运光的聚焦透镜的焦距为 500 mm, 钛宝石激光器腔长为 150 mm, 钛宝石激光器最大单脉冲输出能量为 80 mJ, 脉冲宽度为 10 ns。

当钛宝石激光器产生的 730~ 830 nm 可调谐输出经过色散棱镜对 P<sub>1</sub>-P<sub>2</sub> 后, 各个不同频率的光从空间色散开, 各波长出射方向均和入射方向平行, 但是相对于中心波长 780 nm 具有垂直偏移量, 该垂直偏移量由 P<sub>1</sub>-P<sub>2</sub> 两棱镜之间的距离决定。通过研究 SF<sub>10</sub> 棱镜对的色散特性以及 BBO 晶体的倍频特性可以发现, 当选取合适的棱镜间的垂直距离和合适的透镜焦距后, 各波长对 BBO 晶体的入射外角均能够满足共线角度相位匹配, 实现高效倍频。

## 2 SF<sub>10</sub>棱镜对的色散特性

SF<sub>10</sub>棱镜对的色散特性如图 2 所示。对中心波长为 780 nm, 调谐宽度为 730 nm 至 830 nm 的钛宝石激光器的可调谐输出, 采用 SF<sub>10</sub>棱镜对作为色散元件, 中心波长 780 nm 以布儒斯特角入射, SF<sub>10</sub>棱镜在 780 nm 处的折射率为 1.7123, 布儒斯特角为 59.7°, 由此可得 SF<sub>10</sub>棱镜的顶角为 60.6°。棱镜的两个腰长度为 30 mm, 780 nm 激光均从离顶角 15 mm (中心) 处入射。两棱镜的垂直距离为 32 cm。

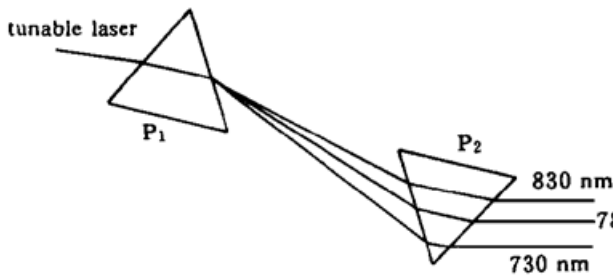


Fig. 2 The dispersion characteristic of SF<sub>10</sub> prisms

根据 SF<sub>10</sub>棱镜的色散方程:

$$n = 1.692 + 0.013/\lambda^2 - 0.0004/\lambda^4,$$

以及各个波长在 P<sub>1</sub> 棱镜的入射角均为 59.7°, 可以计算出, 从 730 nm 到 830 nm 所有波长在 P<sub>1</sub> 棱镜出射面相对于 780 nm 激光的偏移量和出射角。再根据 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 两棱镜的垂直距离为 32 cm, 780 nm 激光从离顶角 15 mm(中心)处以布儒斯特角入射的条件, 可以计算出, 从 730 nm 到 830 nm 所有波长在 P<sub>2</sub> 棱镜出射面相对于 780 nm 激光的垂直偏移量。如表 1 和图 3 所示。正、负相对垂直偏移量分别表示该激光在中心波长 780 nm 的上下两侧。由图 3 可见, 虽然波长以 780 nm 为对称中心, 但是相对垂直偏移量却并不以 780 nm 为对称中心。透镜 F<sub>1</sub> 的焦距为 59 mm, 可以计算出从

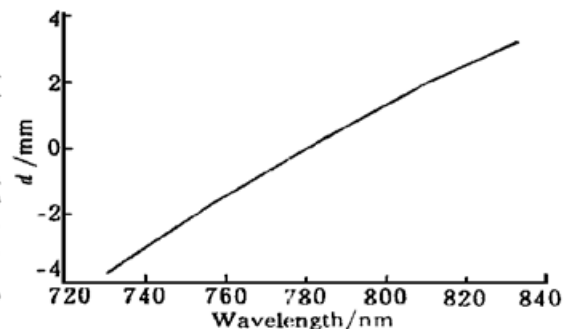


Fig. 3 The relative vertical shift dispersed by a pair of SF<sub>10</sub> prism in the wavelength range from 730 nm to 830 nm

730 nm 到 830 nm 各个波长的实际入射外角, 如表 2 第 2 列所示。

Table 1. The relative vertical shift in the wavelength range from 730 nm to 830 nm

wavelength/nm	relative shift/mm	wavelength/nm	relative shift/mm	wavelength/nm	relative shift/mm
730	- 3. 7799	765	- 1. 0509	800	1. 3044
735	- 3. 3642	770	- 0. 6933	805	1. 6144
740	- 2. 9575	775	- 0. 3431	810	1. 9183
745	- 2. 5596	780	0	815	2. 2164
750	- 2. 1703	785	0. 3361	820	2. 5086
755	- 1. 7892	790	0. 6654	825	2. 7952
760	- 1. 4162	795	0. 9881	830	3. 0764

Table 2. The comparison between actual incident angle and theoretical incident angle of BBO crystal

wavelength/nm	actual incident angle/( $^{\circ}$ )	theoretical incident angle/( $^{\circ}$ )
730	3. 666	3. 627
740	2. 87	2. 844
750	2. 107	2. 078
760	1. 375	1. 363
770	0. 673	0. 665
780	0	0
790	- 0. 646	- 0. 648
800	- 1. 266	- 1. 279
810	- 1. 862	- 1. 876
820	- 2. 434	- 2. 457
830	- 2. 985	- 3. 005

### 3 倍频晶体 BBO 的倍频特性

如图 4 所示, 选用一块切角为  $29.9^{\circ}$  的 I 类 BBO 晶体作为倍频元件, 它对于 780 nm 激光

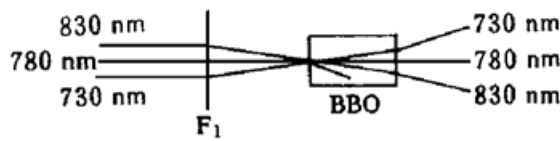


Fig. 4 The double frequency characteristic of BBO

正好是垂直入射。通过 BBO 晶体的色散方程, 以及波长调谐范围为 730 nm 至 830 nm, 可以计算出在满足角度相位匹配的条件下各个波长的入射外角, 如表 2 第 3 列和图 5 所示。正、负角度分别表示该激光在中心波长 780 nm 的上下两侧。由图 5 可见, 虽然波长以 780 nm 为对称中心, 但是入射外角却并不以 780 nm 为对称中

心。所幸的是, 比较表 2 第 2 和第 3 列可见, 730 nm 至 830 nm 调谐激光经过透镜  $F_1$  后入射到 BBO 晶体上的实际入射外角也并不以 780 nm 为对称中心, 且实际入射外角和 BBO 晶体所需的入射外角相差很小, 最大只有  $0.04^{\circ}$ 。各个波长的有效倍频系数  $d_{\text{eff}}$  的计算结果如表 3 和图 6 所示。由图 6 可见, 在 730~ 830 nm 调谐范围内各个波长的有效倍频系数  $d_{\text{eff}}$  变化并不显著, 仅从 730 nm 处的  $1.32 \text{ pm/V}$  变化至  $1.38 \text{ pm/V}$ , 因此各个波长的倍频转换效率主要取决于各个波长的光强。365~ 415 nm 的倍频光从 BBO 晶体中出射情形如图 7 所示。365~ 415 nm 的倍频光从 BBO 晶体中出射时的出射外角如图 8 所示。正、负角度分别表示该激光在中心波长 390 nm 的上下两侧。计算表明, 出射的倍频光相当于从 BBO 晶体中的  $O$  点出

射,  $O$  点在 780 nm 的通光方向上, 离 BBO 晶体的出射端面约 6 mm。因此选用合适的透镜就能够将倍频光准直输出。

Table 3. The effective double frequency coefficient  $d_{\text{eff}}$  in the wavelength range 730~ 830 nm

wavelength/nm	$d_{\text{eff}}/(\text{pm}/\text{v})$	wavelength/nm	$d_{\text{eff}}/(\text{pm}/\text{v})$	wavelength/nm	$d_{\text{eff}}/(\text{pm}/\text{v})$
730	1.32	765	1.345	800	1.365
735	1.324	770	1.348	805	1.368
740	1.328	775	1.351	810	1.37
745	1.331	780	1.354	815	1.373
750	1.335	785	1.357	820	1.375
755	1.338	790	1.36	825	1.378
760	1.341	795	1.362	830	1.38

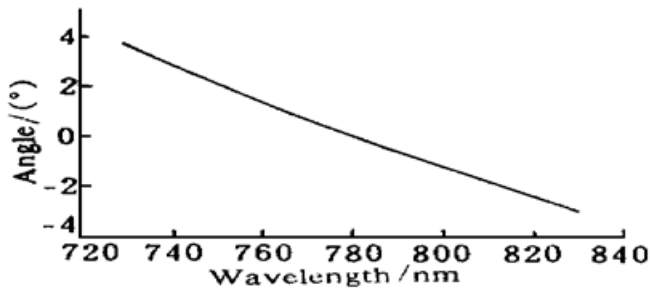


Fig. 5 The external incident angle of BBO in the wavelength range from 730 nm to 830 nm

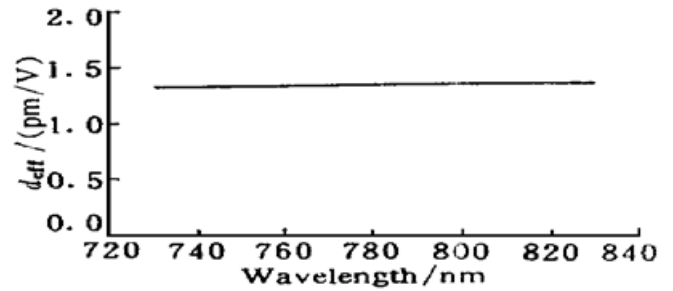


Fig. 6 The effective double frequency coefficient  $d_{\text{eff}}$  in the wavelength range from 730 nm to 830 nm

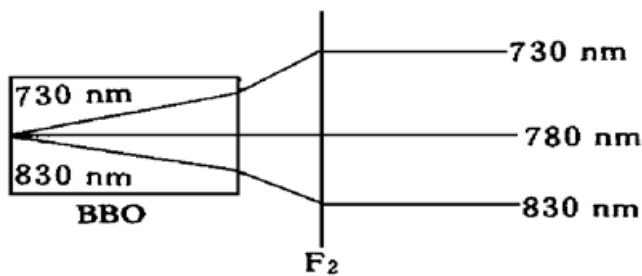


Fig. 7 The double frequency characteristic of BBO

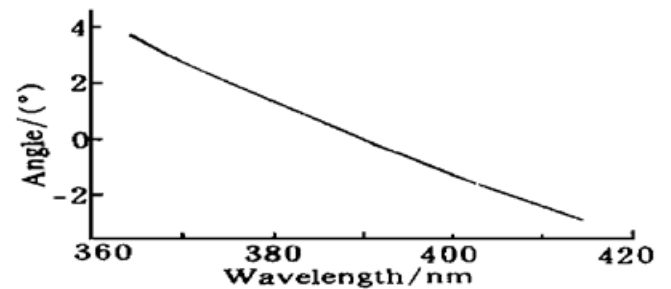


Fig. 8 The external output angle of BBO in the wavelength range from 365 nm to 415 nm

#### 4 激光器的发散角、线宽和倍频晶体的允许角宽度、允许线宽对倍频器的影响

用于抽运可调谐钛宝石激光器的 DCR-3G 纳秒高斯镜非稳腔 Nd:YAG 激光器的光束发散角为 0.5 mrad, 线宽为 0.1 nm。钛宝石激光器的发散角为 1.5 mrad, 在腔内加入三个棱镜时线宽可以压缩至 0.1 nm。在倍频晶体长度为 10 mm、波长为 730 nm 到 830 nm 时 BBO 晶体的允许角计算结果如表 4 所示, 允许线宽计算结果如表 5 所示。计算方法参考文献[5]。由表 4 可见, 在调谐范围为 730 nm 到 830 nm 时最小允许角为 0.502 mrad。由表 5 可见, 在调谐范围为 730 nm 到 830 nm 时最小允许线宽为 0.18 nm。钛宝石激光器的发散角为 1.5 mrad, 经过透镜  $F_1$  聚焦后发散角增大至 2.8 mrad, 远比 BBO 的最小允许角大。为了保证 BBO 晶体在 730 nm 到 830 nm 范围内的最小允许角, 同时保证各个波长均以相位匹配角入射, 透镜  $F_1$  焦距必须增大至 177 mm, 同时在透镜  $F_1$  和棱镜  $P_2$  之间加入一组倍率为 1.3 的扩束望远镜, 使得棱镜对  $P_1$ 、 $P_2$  的色散位移被放大 3 倍。在调谐范围为 730 nm 到 830 nm 时

BBO 最小允许线宽为 0.18 nm, 而可调谐钛宝石激光器在腔内加入三个色散棱镜时线宽可以压缩至 0.1 nm, 满足 BBO 的允许线宽。

Table 4. Acceptance angles of different wavelengths in BBO

fundamental wavelength/nm	acceptance angle/mrad	fundamental wavelength/nm	acceptance angle/mrad	fundamental wavelength/nm	acceptance angle/mrad
730	0.502	770	0.551	810	0.601
740	0.514	780	0.563	820	0.614
750	0.526	790	0.576	830	0.627
760	0.538	800	0.589		

Table 5. Spectral acceptance bandwidth of different wavelengths in BBO

fundamental wavelength/nm	spectral acceptance bandwidth/nm	fundamental wavelength/nm	spectral acceptance bandwidth/nm	fundamental wavelength/nm	spectral acceptance bandwidth/nm
730	0.1818	770	0.2324	810	0.2936
740	0.1936	780	0.2466	820	0.3108
750	0.2059	790	0.2615	830	0.3288
760	0.2188	800	0.2772		

## 5 应 用

如图 1 所示, 这种包含  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $F_1$ 、倍频晶体、 $F_2$  的新型倍频器除了应用于可调谐激光器的腔外倍频外, 对于象飞秒脉冲钛宝石激光器等超短脉冲激光器来说, 由于超短脉冲意味着超宽谱宽, 因此在腔外倍频时也需要一套这样的倍频器, 所不同的是对于飞秒脉冲而言, 所包含的所有光谱成分同时出现, 而可调谐激光器的光谱成分是分步出现的。另外由于该倍频器在倍频时不需转动倍频晶体, 所以可应用于一些需要实现快速调谐或倍频的场合<sup>[6]</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] Moulton P F. New development of titanium sapphire laser. *Opt. News*, 1982, **8**(1) : 9~ 11
- [2] Moulton P F. New development in solid-state lasers. *Laser Focus World*, 1983, **19**(5) : 83~ 88
- [3] Pinto A. All solid-state tunable titanium sapphire laser. *Laser Focus/Electro-Optics*, 1987, **23**(8) : 57~ 61
- [4] 蒋 捷, 张雨东, 庄欣欣等. 激光倍频器. 中国发明专利, No. 98116521.4
- [5] 张雨东, 毛宏伟, 谢发利等. 快速调谐光参量激光器. *中国激光*, 1998, **A25**(12) : 1065~ 1068
- [6] 姚建铨著. 非线性光学频率变换及激光调谐技术. 北京: 科学出版社, 1995. 20~ 50

## A New Type of Frequency-Doubler for Tunable Ti·Sapphire Laser

Jiang Jie Zhang Yudong Zhuang Xinxin Wu Baichang Chen Chuangtian  
(Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, The Chinese Academy of Sciences, )

(Received 10 July 1998; revised 10 September 1998)

**Abstract** A new type of frequency-doubler is presented to meet the requirement of angle phase-matching in the tunable range of Ti·sapphire laser without turning the frequency doubling crystal. The frequency-doubler ensure phase-matching of Ti·sapphire laser in BBO crystal by dispersive effect of combination system of prisms and lens.

**Key words** tunable Ti·sapphire laser, double frequency, angle phase-matching.