

β -BaB₂O₄ 倍频掺钛宝石可调谐激光

邬承就 韦 丽 周东方 赵梅荣 汤洪高

(中国科学院安徽光机所, 合肥 230031)

提要: 在钛宝石激光调谐范围(660~1200 nm)BBO的I类匹配角是36.0°~21.2°, 已获得1.4 mJ/脉冲以上紫外倍频输出, 转换效率达26.2%以上。

关键词: 钛宝石可调谐激光, 倍频, BBO应用

Frequency doubling of tunable Ti:sapphire laser in β -BaB₂O₄

Wu Chengjiu, Wei Li, Zhou Dongfang, Zhao Meirong, Tang Honggao

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei)

Abstract: The phase match angles of type I in BBO are 36.0~21.2° for Ti:Al₂O₃ tuning range of 660~1200 nm. The UV output energy of SHG of a tunable Ti:Al₂O₃ laser of above 1.4 mJ/pulse, conversion efficiency of 26.2% have been obtained. An analysis shows that higher output energy and conversion efficiency are possible and BBO is better than KDP and LiIO₃ for frequency doubling.

Key words: Ti:sapphire tunable laser, frequency doubling, β -BaB₂O₄

一、引 言

固体可调谐激光器中最引人瞩目的新型激光器之一是掺钛宝石(Ti:Sapphire, Ti:Al₂O₃) (可调谐激光器)。自1982年首次产生激光以来,已经实现用多种泵浦源泵浦、脉冲和连续多种方式运转,1989年已出现若干种商品激光器。到目前为止,由固体直接产生红光以下短波长可调谐激光还很困难,不论顺磁离子晶体、半导体或色心激光均如此(除少数窄波段外几乎是空白)。因此,通过非线性倍频仍然是实现短波长激光的简单有效办法,也是扩大可调谐范围的重要途径。

钛宝石可调谐激光的最宽调谐范围是660~1200 nm,通过非线性倍频可以产生330~600 nm可调谐激光,经高次倍频或混频可以产生更短波长的可调谐激光,从而可以实现固体化的紫外~近红外全波段可调谐激光,中间仅有60~70 nm空隙。1987年, A. Pinto^[1]报道用KDP倍频,实现了400~600 nm可调谐激光,转换效率为3%,据1989年报道,用KDP倍频911 nm波长激光,转换效率为25%。

我们采用中国特产品晶体BBO对钛宝石可调谐激光倍频获得成功,倍频紫外光输出大于

1.4 mJ/脉冲, 在线宽 0.5 nm 条件下, 转换效率达 26.2%。

二、实验和结果

β -BaB₂O₄ (简称 BBO) 晶体是一种优良的新型非线性光学材料^[2], 点群 3, 负单轴晶体。我们利用较精确的 Sellmeier 方程^[3] 计算不同波长的折射率, 进而计算两类倍频的相位匹配角。相应于钛宝石激光的可调谐波长范围 (660~1200 nm), 计算所得的 I 类匹配角为 36.0°~21.2°, II 类为 53.3°~30.6°。I 类和 II 类倍频的转换效率可能相差很大, 因为其有效非线性系数不同。比较两类有效非线性系数^[4], 近似地有以下关系:

$$\frac{d_{eff}(I)}{d_{eff}(II)} \approx \frac{\cos \theta_I}{\cos^2 \theta_{II}}$$

在钛宝石可调谐波段相应的 I 类和 II 类匹配角 θ_I 和 θ_{II} 范围内, $d_{eff}(II) \leq (37 \sim 79\%) d_{eff}(I)$ 。可见 II 类倍频效率要比 I 类低得多。

实验采用 I 类倍频, 选取 $\theta = 29^\circ$ 。BBO 晶体由中国科学院福建物质结构研究所提供, 尺寸为 4×5×7 mm, 通光长度为 7 mm。

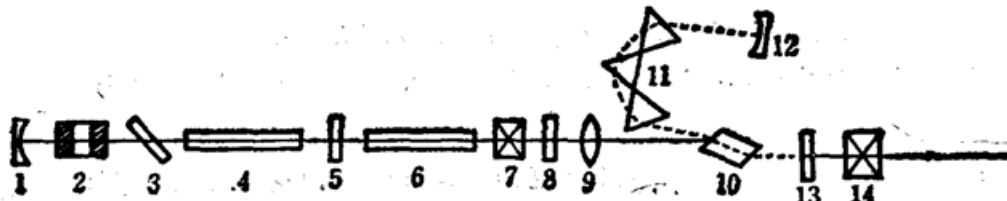


Fig. 1 Schematic of experimental setup for SHG of Ti:Al₂O₃ laser in β -BaB₂O₄

1~6—Q-switched Nd:YAG oscillator-amplifier system; 7—SHG crystal KTP; 8—dichroic; 9—lens; 10—Ti:Al₂O₃ laser rod; 11—prism; 12—HR mirror; 13—output mirror; 14—SHG crystal BBO

实验装置如图 1 所示。调 Q 的 Nd:YAG 激光经 KTP 倍频后, 泵浦钛宝石激光器。钛宝

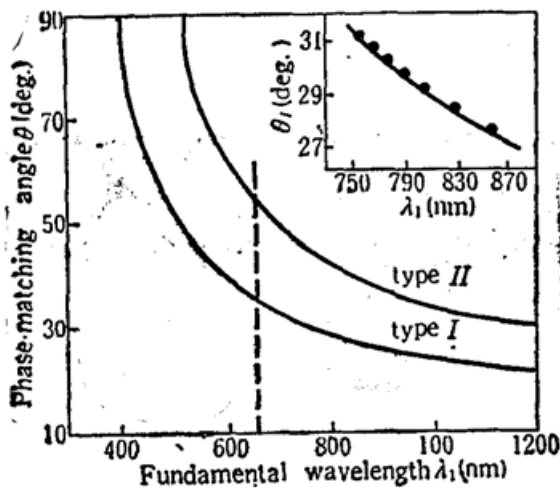


Fig. 2 Phase-matching curves for type I and II SHG in β -BaB₂O₄

石由我单位提拉法生长, 加工成 Brewster 端面, 通光长度为 20 mm。谐振腔为稳定的平凹腔。腔内用三块 ZF₆ 棱镜作调谐及压窄线宽。泵浦方式为同轴或近轴, 由聚焦透镜使泵浦光功率密度提高。倍频晶体 BBO 安装在带有测微头的三维调节架上, 在激光腔外倍频。532 nm 泵浦光的脉宽 10 ns, 重复频率 1~10 Hz, 能量 100 mJ 以下可调, 钛宝石激光最大输出 20 mJ 以上, 为近 TEM₀₀ 低阶模。实验使用一对硬膜腔镜, 在其带宽范围内, 实现了全范围倍频, 获得蓝-紫外 (425~365 nm) 可调谐激光。测量了不同波长相应的相位匹配角, 结果如图 2 所示, 同理论计算符合得很好, 最大误差 0.2°。

钛宝石激光经 BBO I 类倍频后, 偏振方向发生 90° 变化。实验采用 ZF₆ 棱镜分离输出光束中的谐波和剩余基波, 用能量计测量倍频光强度和转换效率。

实验将钛宝石激光调节到波长 780 nm, 测得光斑直径 $d = 1.28$ mm, 发散角 1.06 mrad, 线

宽 0.5 nm。当其能量为 6.2 mJ 时, 倍频光(390 nm)能量为 1.4 mJ, 平均功率可达 14 mW。计及 ZF₃ 棱镜的吸收, 实际倍频转换效率为 26.2%。由于倍频光脉宽压缩, 实际获得的紫外可调谐激光峰值功率约达 0.2 MW。以上并不是可以实现的最大调谐范围、最大输出和最佳转换效率。

三、讨 论

1. 提高转换效率的可能性和途径

倍频转换效率的计算公式一般由麦克斯韦方程组求解得到。经过不同方面的误差修正, 得出的表达式有许多种, 但是几个基本系数相同。在忽略离散角、光孔效应、介质表面反射和吸收衰减等更深影响情况下, 可以按较简单的转换效率公式来讨论

$$\eta = \tanh^2 \left[\frac{2\pi^2 d_{eff}^2 l^2}{c\epsilon_0 \lambda_2^2 n_1^2 n_2} \cdot \frac{P}{A} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\sin(l \cdot \Delta k / 2)}{l \cdot \Delta k / 2} \right]^2$$

当 η 靠近原点(如 $\eta \leq 10\%$)时, 可取线性近似:

$$\eta = \left[\frac{2\pi^2 d_{eff}^2 \cdot l^2}{c\epsilon_0 \lambda_2^2 n_1^2 n_2} \cdot \frac{P}{A} \right] \cdot \left[\frac{\sin(l \cdot \Delta k / 2)}{l \cdot \Delta k / 2} \right]^2$$

式中 p_{eff} 为晶体有效非线性系数, l 为通光长度, n_1 、 n_2 为基波和谐波折射率, λ_2 为谐波波长, ϵ 为介电常数, c 为光速, P/A 为基波功率密度, Δk 为基波与谐波的波矢量差。上述两式可以分为两项: $\eta = \eta_{max} \cdot \eta_{\Delta k}$, 前项为极限效率, 后项为匹配因子。

(1) 提高倍频转换效率的最简单办法是增加晶体通光长度。在不考虑吸收情况下, 长度极限是孔径相干长度 l_c , 它与基波波长和光束直径有关, 对 BBO 两种基波计算结果如表 1, 实际上必须考虑吸收和获得大尺寸晶体的可能性。

Table 1. Interaction length in BBO

Laser diameter (mm)	1.0	2.0	3.0
Interac. length (mm)			
$\lambda_1=800$ nm	14.7	29.4	44.1
$\lambda_1=1060$ nm	17.9	35.8	53.7

(2) 增大基波功率密度 P/A 。例如在本实验条件下, 若将功率密度由 0.048 GW/cm² 提高到 0.155 GW/cm²(3 倍), 则极限效率可从 67.4% 提高到 87%。增大功率密度的极限受晶体损伤阈值制约。BBO 晶体承受脉宽 10 ns, 波长 532~1064 nm 激光的损伤阈值^[4] I_d 为 1~5 GW/cm², 是相当高的, 但是脉冲钛宝石可调谐激光在高功率情况下仍足以使其损伤。另外, 不宜通过聚焦来提高功率密度, 因为聚焦引起发散, 将大大降低匹配因子。

(3) 压窄线宽和减小发散角。影响转换效率的关键之一是匹配因子 $\eta_{\Delta k} = \sin^2(l \cdot \Delta k / 2) / (l \cdot \Delta k / 2)^2$, 这个函数的特征是, $\eta_{\Delta k} \leq 1$; 在位相完全匹配情况下($\Delta k = 0$), $\eta_{\Delta k} = 1$; 在不匹配情况下($\Delta k \neq 0$) $\eta_{\Delta k}$ 随着失配量 $\Delta k \cdot l / 2$ 增加而下降。引起失配的原因有波长偏离和匹配角偏离。造成匹配因子下降到 1/2 的波长偏离称为该种晶体的倍频容许线宽($\Delta\lambda_0$); 相应地造成 $\eta_{\Delta k} = 1/2$ 的匹配角偏离称为倍频容许角($\Delta\theta_0$, acceptance angle)。它们由计算求出。函数特征表明, 当基波线宽或发散角超过上述容许值时, 匹配因子继续下降, 因而倍频效率进一步下降。所以

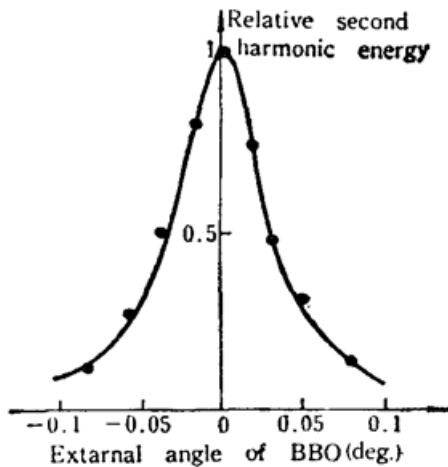


Fig. 3 Relative second harmonic energy versus angle at a fixed wavelength

$\Delta\lambda_0$ 和 $\Delta\theta_0$ 是倍频晶体对基波激光束特性 (线宽和发散角) 要求的尺度。通光长度 7 mm 的 BBO, I 类倍频, 在 $\lambda=780$ nm 时计算出 $\Delta\lambda_0=0.92$ nm, $\Delta\theta_0=0.43$ mrad。实验测量了 ($\lambda=780$ nm) BBO 倍频输出能量随匹配角微小变化而变化的曲线 (图 3)。其半峰角宽度为 1.16 mrad, 大于 $\Delta\theta_0$ (0.43 mrad) 值, 说明钛宝石的发射角大于 BBO 的容许角。倍频转换效率随着激光束质量的改善还可以大为提高。压缩钛宝石激光的线宽、减小发散角, 使 $\eta_{\Delta k}$ 向 1 靠近, 最大理论转换效率为 90% 以上。

2. BBO 同 KDP、LiIO₃ 的性能比较

为可调谐激光器选择倍频晶体的原则是: (1) 可匹配和透过波段范围宽; (2) 转换效率高; (3) 总倍频输出功率高。兹将在 $\lambda=780$ nm 计算出的特性参数示于表 2, 同常用的 KDP 和 LiIO₃ 两种晶体参数以作比较。影响效率的主要参数是倍频晶体品质因素 ($d_{eff}^2/n_1^2n_2$), 从表中可见, BBO 的品质因素虽然比 LiIO₃ 小 (约 1/4), 但比 KDP 大得多 (约 20 倍), 更重要的是 BBO 高得多的损伤阈值 (为 KDP 的 5 倍, LiIO₃ 的 40 倍)。它可以用于脉冲较高功率的倍频, 输出高强度倍频光。而我们的实验已证实, 脉冲钛宝石激光已足以使 LiIO₃ 损伤, 但对 BBO 安然无恙。表 2 列出三种晶体的容许线宽和容许角。对比可见, BBO 的容许线宽和容许角接近 KDP, 而比 LiIO₃ 大得多。可见 BBO 比 LiIO₃ 对基波激光束质量要求低。这一特性使 BBO 可以用于线宽没有压得很窄的情况, 例如用在 0.5 nm 线宽的钛宝石可调谐激光器。同样线宽, 用于 LiIO₃ 则效率降低很多。最后, BBO 还有比较不容易潮解的优点, 这在使用方面是很重要的。可见 β -BaB₂O₄ 晶体比 KDP、LiIO₃ 优越, 适合于钛宝石可调谐激光倍频的良好材料。

Table 2 NLO parameters of BBO, KDP and LiIO₃ ($\lambda_1=780$ nm)

Crystals	β -BaF ₂ O ₄	KH ₂ PO ₄	LiIO ₃
n_1^0	1.6612	1.5021	1.8688
n_2^0	1.5695	1.4810	1.7900
$d_{eff}(d_{36}$ -KDP)	3.57	0.72	8.88
$d_{eff}^2/(n_1^0)^2(n_2^0)$ (d_{36}^2 -KDP)	2.94	0.155	12.5
$L_a(a=1$ mm) (mm)	14.5	33.9	11.4
$\Delta\lambda_0(L=7$ mm) (nm)	0.92	1.158	0.266
$\Delta\theta_0$ (mrad)	0.43	1.12	0.30
I_d (GW/cm ²)	2	0.4	0.05

参 考 文 献

- 1 A. Pinto, *Laser Focus World*, **21**(8), 58 (1987)
- 2 陈创天 et al., *中国科学 B 辑*, (7), 598 (1984)
- 3 K. Kato, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-22**(7), 1013 (1986)
- 4 Chuantian Chen et al., *Proceeding of SPIE*, **681**, 12 (1986)