

# KNbO<sub>3</sub> 高效倍频产生 427~470 nm 蓝紫光

陆雨田 赵庆春 李永春 何慧娟

(中国科学院上海光学精密机械研究所激光技术开放实验室上海, 201800)

邹 群 陆 征 耿兆华

(南京大学物理系, 南京 210008)

## 提 要

厚 1.5 mm 的 KNbO<sub>3</sub> 晶体在室温下角度相位匹配倍频脉冲参量激光获得 427~470 nm 蓝紫光, 能量转换效率超过 40%, 输出单脉冲蓝紫光的峰功率达 60 kW。对相位匹配曲线、倍频效率与基波光强的关系和相位匹配角允差作了计算和讨论。

关键词: KNbO<sub>3</sub> 倍频。

## 一、引 言

国外已报道用 KNbO<sub>3</sub> 倍频连续的或脉冲的半导体激光或染料激光, 在室温下非临界相位匹配获得了 430 nm<sup>[1]</sup>、421 nm<sup>[2]</sup> 的蓝紫光输出, 通过温度相位匹配获得了最宽波段 420~475 nm 的蓝紫光输出, 最高的能量转换效率达 28%, 输出光峰功率接近 1.5 kW<sup>[3]</sup>。本文用 KNbO<sub>3</sub> 晶体在室温下作角度相位匹配倍频脉冲参量激光, 获得了更高的转换效率和输出光峰功率, 所用晶体的长度要短得多。

## 二、实验的装置与条件

图 1 是整个实验装置的示意图, 实验在室温下进行。采用射频加热提拉法生长的 KNbO<sub>3</sub> 晶体, 按通光面法向对  $\alpha$  轴夹角 6° 左右切割, 通光面尺寸 8×16 mm<sup>2</sup>, 厚 1.5 mm, 倍频利用其光学非线性系数  $d_{32}$ , I 类相位匹配。基波光由微微秒自动调谐参量激光器产生。该激光器能在 700~2200 nm 的近红外波段上自动调谐输出任一波长的 ps 单脉冲激

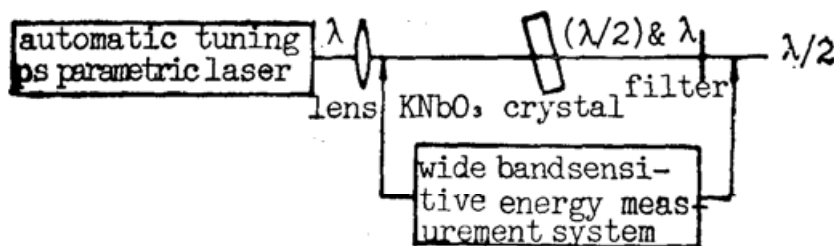


Fig. 1 Experimental arrangement (schematic)

光,方便地实行自动波长扫描,输出光脉宽 <30 ps,线宽~1 nm,光束发散角 3 mrad,运转重复率 1~10 pps<sup>[4]</sup>。基波光经焦距 70 mm 的透镜会聚后入射到 KNbO<sub>3</sub> 晶体上,在 KNbO<sub>3</sub> 晶体处光斑直径为 1 mm。宽波段高重复率激光脉冲能量的高灵敏度实时监测系统同时测量基波光和倍频光的能量,并得出转换效率。该系统能以 100 pps 的速率采集和处理数据,响应范围 350~2500 nm。灵敏度可达 0.1 nJ。

### 三、结果与分析

KNbO<sub>3</sub> 是双轴晶体,主轴折射率  $n_c < n_a < n_b$ ,均可由一双项 Sellmeier 方程给出<sup>[3]</sup>

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{s_1 \lambda_1^2}{1 - (\lambda_1/\lambda)^2} + \frac{s_2 \lambda_2^2}{1 - (\lambda_2/\lambda)^2}, \quad (1)$$

式中  $n(\lambda)$  是主轴折射率,  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  是常数。获得蓝紫光的倍频利用其非线性光学系数  $d_{32}$  按 I 类相位匹配实现。基波光沿  $b$  轴方向偏振,在  $a-c$  平面内入射,对  $a$  轴的偏角为  $\theta$ ,因此匹配条件是

$$n_b(\lambda) = n'_{ac}\left(\frac{\lambda}{2}\right) = \left[ \frac{\sin^2 \theta}{n_a^2(\lambda/2)} + \frac{\cos^2 \theta}{n_c^2(\lambda/2)} \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

由此得出

$$\theta_{PM} = \sin^{-1} \left[ \frac{n_c^{-2}(\lambda/2) - n_b^{-2}(\lambda)}{n_c^{-2}(\lambda/2) - n_a^{-2}(\lambda/2)} \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Table 1 Sellmeier parameters fitted to the refractive index data of KNbO<sub>3</sub>, measured by Wiesendanger Uematsu and Günter

	$s_1 \cdot \lambda_1^2$	$\lambda_1^2 [10^{-20} \text{ m}^2]$	$s_2 \cdot \lambda$	$\lambda_2 [10^{-20} \text{ m}^2]$
$n_a$	1.4392	5985156	2.3592	2302662
$n_b$	0.1362	11308698	3.8013	4087914
$n_c$	0.0875	10724149	3.3023	3130828

根据 Wiesendanger<sup>[7]</sup>、Uematsu<sup>[5]</sup> 和 Günter<sup>[1]</sup> 等测定的 Sellmeier 常数(列于表 1)<sup>[3]</sup>,由(1)式\*和(3)式计算出角度相位匹配曲线如图 2 实线所示。

基波光对晶体切割面的入射角  $\theta_{\text{ext}}$  与它在晶体内对  $a$  轴的偏角  $\theta$  应有关系

$$\sin \theta_{\text{ext}} = n_b(\lambda) \sin(\theta - \Theta), \quad (4)$$

式中  $\Theta$  是晶体通光面对其  $a$  轴的切割角度。根据(2)式可以从匹配条件下测得的入射角算出实际的内偏角即匹配角度。实验结果如图 2 中“·”所示。

倍频的转换效率<sup>[6]</sup>

$$\eta = \tan h^2 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} d_{32} l \left( \frac{2I}{n_b^3(\lambda) c \epsilon_0} \right)^{1/2} \right], \quad (5)$$

式中  $d_{32} = 21 \text{ pm/V}$ ,  $\epsilon_0$  是真空中介电常数,  $l$  是晶体厚

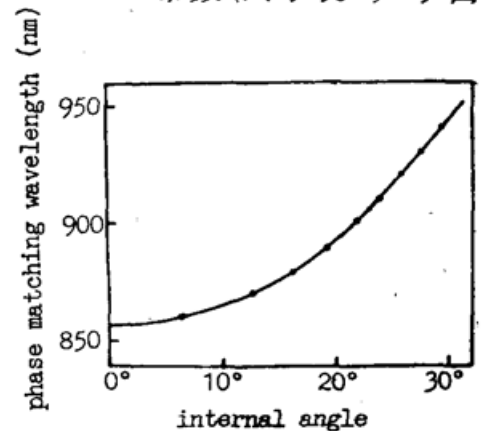


Fig. 2 Angular dependence of the Phase matching wavelength. (Solid curve is theoretical, dots are the experimental.)

\* 且按文献[6]给出的资料加以温度修正。

度,  $I$  是基波光的功率密度。

改变基波光强度, 倍频效率随之改变, 实测结果见图 3, 同时给出了按本实验条件计算所得的理论曲线(图 3 中实线)供比较。当基波光峰功率为 200 kW 时, 倍频的能量转换效率达 30%, 扣除未涂膜晶体表面的反射损耗。实际的能量转换效率超过 40%。倍频输出的蓝紫光峰功率达 60 kW。

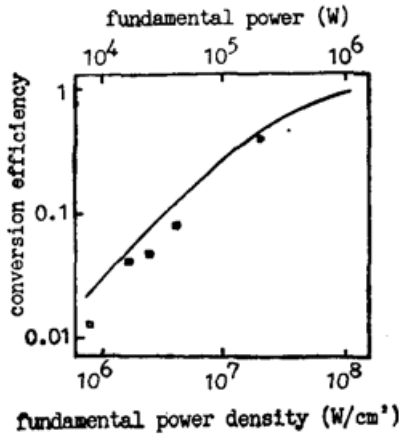


Fig. 3 Calculated optimum of the Conversion efficiency, compared with experimental results

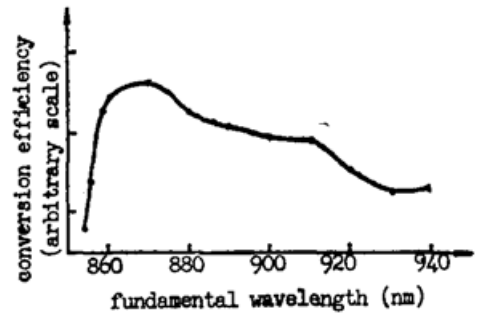


Fig. 4 Conversion efficiency versus fundamental wavelength

对不同波长的基波光, 其倍频效率如图 4 所示\*, 可以看出, 从 860 nm 到 870 nm 的波长范围内倍频效率最高。实验没有继续向长波延伸, 是因为晶体按倍频 860 nm 的匹配角度切割, 倍频 940 nm 时基波光的入射角已经太大。

短于 860 nm 时倍频效率迅速下降。但是至 854 nm 时仍有倍频现象可见, 这与理论曲线不符, 也不能用  $\text{KNbO}_3$  晶体仅几十 m rad 的相位匹配外接收角和不到 1 nm 的相位匹配带宽来解释。可能用于表征  $\text{KNbO}_3$  晶体折射率的 Sellmeier 方程 (1) 的计算结果与实际的折射率有一定的差距。若用表征  $\text{KNbO}_3$  晶体的折射率的另一种单项 Sellmeier 方程<sup>[7]</sup>, 其计算结果最短倍频波长可达 843 nm, 然而在其他更多的波长方面, 就不如本文采用的双项方程的计算结果与实验测得的数据符合得好。另外, 不同情况下长成的晶体的实测折射率也有些微差别<sup>[8]</sup>。

相位匹配带宽  $\delta_\lambda$  和相位匹配外接收角  $\delta_\theta$  可分别估算为<sup>[9]</sup>

$$\delta_\lambda = \frac{1.39 \lambda}{2\pi l} \left( \frac{\partial n_b(\lambda)}{\partial \lambda} - \frac{1}{2} \frac{\partial n_o(\lambda/2)}{\partial \lambda} \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$\delta_\theta = \left[ \frac{1.39 \lambda}{\pi l [n_b(\lambda/2) - n_o(\lambda/2)]} \right]^{1/2} n_b(\lambda). \quad (7)$$

1.5 mm 厚的晶体倍频 860 nm 时, 计算得到  $\delta_\lambda = 0.36$  nm, 由此引起的匹配角允差(外角度)接近  $2^\circ$ , 而  $\delta_\theta = 4.5^\circ$ , 总的外角度允差在  $6^\circ$  左右。图 5 给出了对 860 nm 倍频时效率随角度失配的变化。此结果表明, 本实验中倍频效率下降不超过一半, 容许的外角度失配量是  $5^\circ$ , 与按 (8)、(9) 式估算得到的数值相近。增加晶体厚度将使相位匹配角的容许失配量减小。

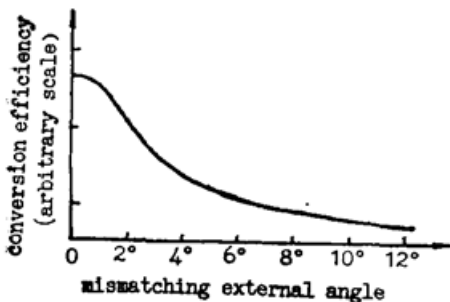


Fig. 5 Sensitivity of conversion efficiency to angular mismatch

\* 因晶体入射角变化引起界面损耗变化的影响已经修改。

参加本工作的还有顾圣如、钱林兴、赵隆兴和单振国同志。

### 参 考 文 献

- [1] P. Günter *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**, No. 6 (Sep), 461~463.
- [2] M. K. Chun *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**, No. 13 (Sep), 1170~1171.
- [3] J.-O. Baumert *et al.*; *Proc. SPIE*, Vol. 492, 374~385.
- [4] 何慧娟等;《光学学报》,1991, **11**, No. 6 (Jun),525~530.
- [5] Y. Uematsu; *Japan. J. Appl. Phys.*, 1974, **13**, No. 9 (Sep), 1362~1368.
- [6] A. Yariv;《Quantum Electronics》, (John Wiley, New York, 1975), Chapt. 16.
- [7] E. Wiesendunger; *Ferroelectrics*, 1970, No. 1, 141.
- [8] W. Xing *et al.*; *J. Crystal Growth*, 1986, **78**, 431~437.
- [9] J.-O. Baumert *et al.*; *Opt Commun.*, 1983, **48**, No. 3 (Dec), 215~220.

## High efficiency second harmonic generation of 427~470 nm in KNbO<sub>3</sub>

LU YUTIAN, ZHAO QINGCHUN, LI YONGOHUN AND HE HUIJUAN  
(*Lab. of laser Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Academia Sinica, Shanghai 201800*)

ZOU QUN, LU ZHENG AND GENG ZHAOHUA  
(*Dept. of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008*)

(Received 24 April 1991; revised 19 June 1991)

### Abstract

Efficient second harmonic generation from pulsed parametric laser to 427~470 nm has been obtained in a KNbO<sub>3</sub> crystal of in 1.5 mm length, by angular tuning at room temperature. The energy conversion efficiency is over 40%. Single pulse blue light reaches 60 kW in peak power. Angular dependenece of phase matching wavelength, the relation between conversion efficiency and fundamental intensity and acceptable angular phase mismatch are studied and discussed.

**Key words:** KNbO<sub>3</sub> crystal, second harmonic generation.