

文章编号: 1001-4322(2009)02-0203-05

BBO 晶体四倍频全固态小功率紫外激光器*

胡 森¹, 葛剑虹², 陈 军², 刘 崇²

(1. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要: 利用 KTP 晶体和 BBO 晶体,进行了激光二极管泵浦的 Nd:YVO₄ 声光调 Q 激光脉冲四倍频实验。在不同绿光功率入射时,获得光束的束腰半径和紫外转换效率的依赖关系:当绿光功率为 1.10 W,束腰半径为 12.4 μm 时,得到了 210 mW 的准连续 266 nm 紫外脉冲输出,四倍频转换效率为 19.1%。实验还对紫外远场光斑分别在 o 光振动面和 e 光振动面内进行分析,指出了 BBO 晶体在该两平面内不同的倍频接受角是造成椭圆形紫外光斑和主光斑附近明暗条纹的主要原因。

关键词: BBO 晶体; 优化束腰半径; 相位匹配接受角

中图分类号: TN241 **文献标志码:** A

激光二极管(LD)泵浦的全固态紫外激光器具有结构紧凑、效率高和寿命长等优点。1999 年陈国夫等首次采用 BBO 晶体获得 266 nm 紫外激光输出^[1-2]。何京良等在 2000 年获得平均功率为 63 mW 的紫外激光,转换效率达 11%^[3];2005 年又获得平均功率为 196 mW 的紫外激光,转换效率为 30.1%^[3-4]。同年,谭成桥等人对被动调 Q 激光器四倍频,得到平均功率为 215 mW 的紫外激光,转换效率为 25.2%^[5]。为了提高转换效率,在考虑晶体的损伤阈值为 0.3 GW/cm²,脉冲重复频率为 10 Hz 情况下,一般采用对二倍频(SHG)绿光透镜会聚。但 BBO 晶体 e 光振动面和 o 光振动面内倍频接受角不相同,因此在考虑晶体内的功率密度和光束发散引起的相位失配共同作用的情况下,需要优化入射绿光的束腰半径。本文研究了不同功率绿光光束的束腰半径大小和四倍频(FHG)转换效率的依赖关系。测得高效率四倍频优化束腰半径,解释了产生紫外光远场椭圆形光斑以及光斑附近明暗条纹的原因。

1 实验装置

紫外四倍频实验装置如图 1 所示,左边虚线方框内是 SHG 绿光产生装置图,KTP 按 II 类匹配切割:入射角 $\theta=90^\circ$, $\varphi=23.5^\circ$,规格为 3 mm×3 mm×9 mm,两端面镀增透膜。基频光为声光调 Q 的 1 064 nm 激光;通过 KTP 二倍频得到 532 nm 脉冲序列,重复频率在 50~200 kHz 可调。为了得到高脉冲峰值功率和好的光束质量,将重复频率设定在 15 kHz。此时脉宽为 32 ns,输出功率为 1.15 W。图 1 右边为紫外实验装置。BBO 按照 25 °C 常温的 I 类匹配切割: $\theta=47.6^\circ$, $\varphi=0$,规格为 4 mm×4 mm×8 mm,两端面镀增透膜。L₂ 为绿光会聚透镜,控制绿光束腰半径。为了保证 266 nm 远场光斑真实,分光棱镜采用双棱镜补偿的方式,最后对紫外输出功率进行测量。为兼顾 BBO 的倍频接受角和绿光功率密度,选择合适焦距的 L₂。倍频晶体采用温控铜热沉。

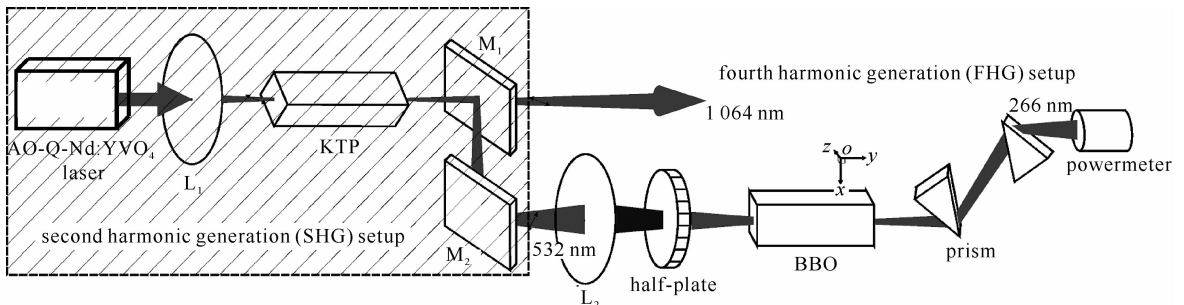


Fig. 1 Experimental setup of fourth harmonic ultraviolet laser

图 1 紫外四倍频实验装置图

* 收稿日期:2008-03-05; 修订日期:2008-12-05

基金项目:浙江省自然科学基金项目(20062612E11)

作者简介:胡 森(1982—),男,浙江永嘉人,博士研究生,主要从事固体激光器技术研究; miao-hu@hotmail.com。

2 实验结果及讨论

2.1 二次谐波的产生

为了获得高 SHG 转换效率,将 KTP 放置于会聚透镜 L_1 后的光束束腰位置处。图 2 所示为绿光输出功率和转换效率随基频光功率的变化。图 2(a)中,随着基频光功率的增加,绿光功率呈增加趋势:当基频光从 0.64 W 增加到 2.99 W 时,绿光从 0.06 W 增加到 1.37 W;图 2(b)中,当基频光功率小于 2.44 W 时,转换效率随基频光功率的增加而增加;当基频光功率大于 2.44 W 时,转换效率随基频光功率增加而缓慢下降。

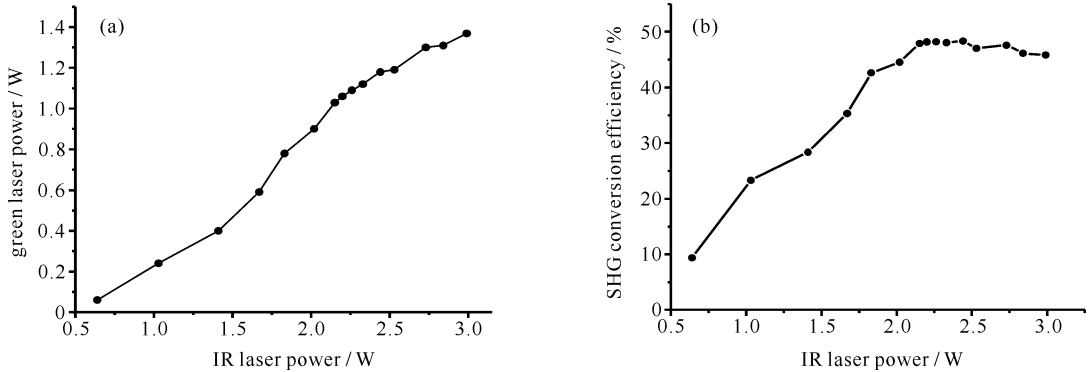


Fig. 2 Green laser power and SHG conversion efficiency vs input IR laser power

图 2 二倍频绿光输出功率和转换效率随基频光入射功率的变化关系

用 CCD 测量远场光斑图样,发现当基频光小于 2.45 W 时,绿光远场光斑为均匀的圆形;当基频光在 2.45 ~ 3.00 W 之间时,绿光远场光斑图样有所变形,不再是理想的圆形。图 3(a)和图 3(b)分别是绿光功率为 2.44 W 和 3.00 W 时的远场光斑图样。产生上述现象的原因主要是声光调 Q 激光器在输出较高功率时,基频光不再具有良好的模式,因而导致 SHG 转换效率降低。在紫外倍频实验中,为排除绿光光束质量变化对 FHG 转换效率的影响,将基频光保持在 1.50 ~ 2.44 W 之间,即绿光在 0.48 ~ 1.15 W 之间。此时绿光光束质量变化可忽略不计,测量得到绿光的光束质量因子 M^2 为 1.4。

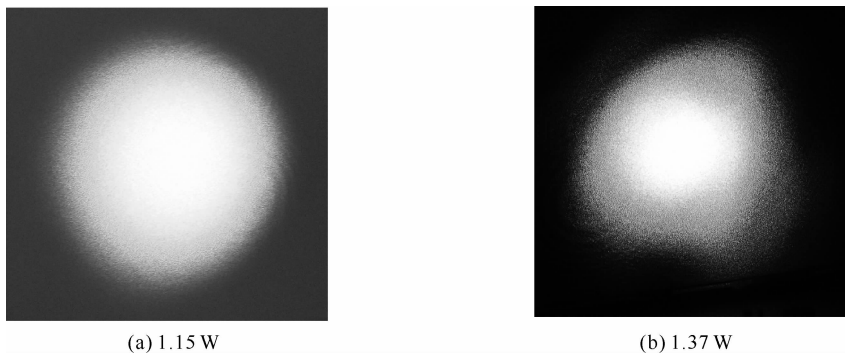


Fig. 3 Far field intensity distributions of the green laser when the laser power are 1.15 W and 1.37 W

图 3 绿光功率分别为 1.15 W 和 1.37 W 时的远场光斑

2.2 FHG 转换效率

绿光光束经过透镜变换之后的远场发散角 θ 和束腰半径 ω_0 满足关系^[6]

$$\omega_0 \theta = M^2 \lambda / \pi \quad (1)$$

式中: θ , λ 分别表示晶体外光束的远场发散角和在真空中的波长,在晶体内须以 θ/n_1 , λ/n_1 计算, n_1 为绿光在 BBO 晶体内的折射率。实验中通过测量晶体外绿光远场发散角便可得到 BBO 晶体中的绿光束腰宽度。

图 4 显示了不同功率时,不同束腰的绿光高斯光束对应的 FHG 转换效率。横坐标为束腰半径,纵坐标为转换效率。通过改变 L_2 的焦距和位置,将绿光束腰半径控制在 9 ~ 18 μm 之间。如图 4(a)所示,当入射绿光为 0.5 W 时,减小束腰半径, FHG 转换效率随着束腰半径的减小而增加;当束腰半径降到 9 μm 时,实验测得转换效率为 10.1%。在图 4(b) ~ (d) 中, FHG 转换效率先随着束腰半径的减小而增加,当减小束腰半径小于某一最优值时,倍频效率随束腰的减小迅速下降。这种现象的原因主要是:由于基频光为高斯光,不可能达到完全相位匹配。当光束束腰半径减小时,虽然晶体内绿光的功率密度增加,但是晶体中光束的发散角也增大,

而发散角的增大会导致相位失配加剧。这两方面因素中前者使倍频效率增加,后者使倍频效率降低;当相互之间达到有机平衡时倍频效率达到最高点,即最优化的束腰半径,偏离该最优化的束腰半径就会导致倍频效率的降低。

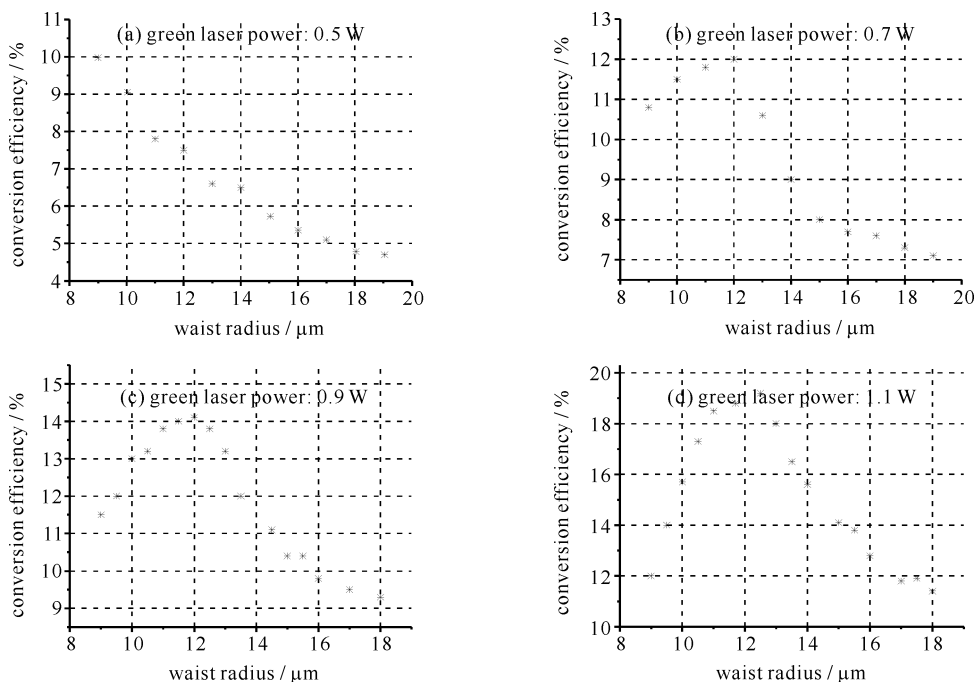


Fig. 4 FHG conversion efficiency varies with green laser beam waist radius for different laser power

图 4 不同绿光功率下,倍频效率随绿光束腰半径的变化关系

表 1 给出了不同绿光入射功率和各自优化绿光束腰半径时的最高的紫外转换效率。当绿光功率为 1.1 W,束腰半径为 12.4 μm 时,最多获得了 19.2% 的转换效率和 211 mW 的紫外光脉冲输出。观察表 1 的规律,当绿光输入功率较小(0.7 W)时,获得最高的转换效率时需要的光束半径较小;反之当绿光功率较大(1.1 W)时,获得最高转换效率需要的束腰半径较大。其原因是:当绿光功率较小时,绿光功率密度过低对 FHG 转换效率的影响较大,因此需要强会聚(小束腰半径)才能获得最优的紫外转换效率;反之,当绿光功率较大时功率密度也较大,倍频接受角对 FHG 转换效率影响较大,因此弱会聚才能获得最优的紫外转换效率。

表 1 紫外转换效率和最优绿光束腰半径的依赖关系

Table 1 UV conversion efficiency vs optimum beam waist radius of green laser

green laser power/W	optimum radius/μm	FHG conversion efficiency/%
0.5	—	—
0.7	11.2	11.8
0.9	12.0	14.1
1.1	12.4	19.2

2.3 四倍频 266 nm 激光的远场光斑分析

根据角度相位匹配倍频定义,计算得到 BBO 晶体在 e 光振动面(Oy 方向)和 o 光振动面内(Ox 方向)的倍频接受角分别为 $\Delta\theta_y=0.346 \text{ mrad/cm}$ 和 $\Delta\theta_x=50.33 \text{ mrad/cm}$ ^[8],如图 5 所示。上述两振动平面内的倍频接受角相差很大,可以解释如下:晶体光轴在的平面 yOz 为 e 光振动面,所以入射光的角度偏差直接造成与相位匹配角 θ_m 的偏差;而入射光在 o 光振动面 xOz 内的角度偏差,需要通过球面三角学的转换才可以得到有效的相位失配。所以入射光在 o 光振动面的倍频接受角要远大于 e 光振动面的倍频接受角。

图 6 为当绿光入射功率为 1.10 W, M^2 为 1.4,束腰半径为 12 μm 时,激光的远场光斑分析。图 6(a)为实验紫外光远场光斑,距离晶体后表面为 3 m,中心为 O。图 6(b)和图 6(c)中交叉连线是测得在 o 光振动面(Ox 轴)和 e 光振动面(Oy 轴)上的光强分布;实线表示计算得到的绿光在远场的光强分布,虚线表示光束发散而引起的相位失配因子 $\text{sinc}(\Delta kL/2)$ 。如图 6(b)所示,在 Ox 轴上紫外光斑光强分布近似为顶端较为平坦的类高斯分布。这是因为:首先,晶体在 Ox 轴上的倍频接受角 $\Delta\theta_x$ 大于绿光的远场发散角,绿光光束在 Ox 轴上

的发散引起的相位失配量较小,因而光斑在 Ox 方向的分布主要取决于绿光的高斯光强分布;其次,由于绿光光束中央位置功率密度较高而导致倍频饱和效应(饱和绿光光强为 300 GW/m^2)^[8],还使得光束中心区域的倍频转换效率相比于周边相邻区域反而较低,进而造成紫外光斑为中心比较平坦的类高斯分布。图 6(c)中,在 Oy 轴上紫外主光斑光强分布为波浪形,主光斑两侧出现明显的明暗条纹。其中主光斑宽度相对于 BBO 晶体出射面的张角(全角)为 0.45 mrad ,每个亮条纹之间的距离相对于 BBO 晶体出射面的张角为 0.22 mrad 。

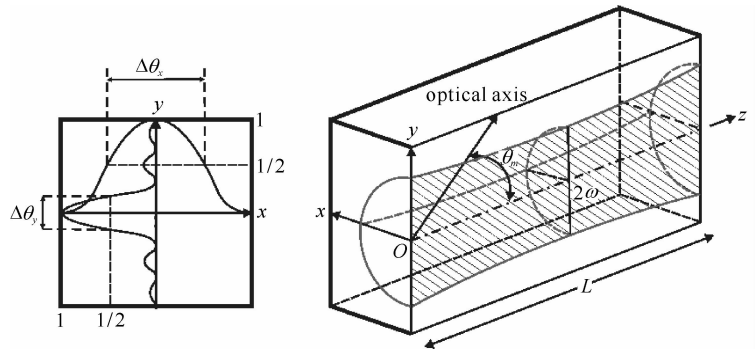
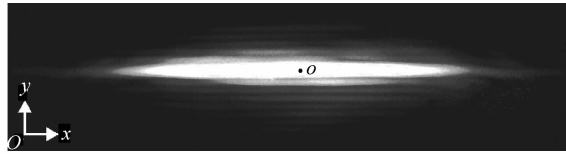
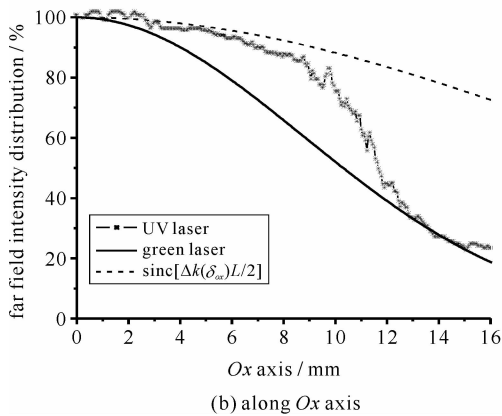


Fig. 5 Acceptance angle of BBO crystal

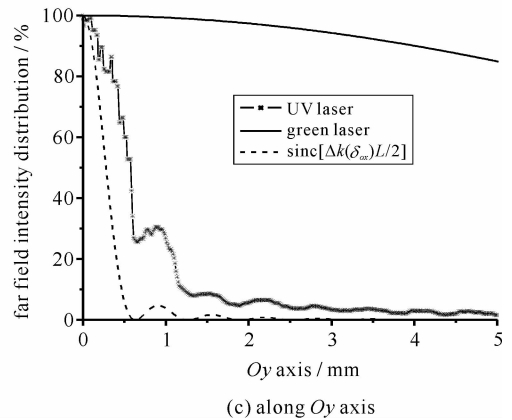
图 5 BBO 晶体的倍频接受角示意图



(a) far field intensity distribution of UV laser



(b) along Ox axis



(c) along Oy axis

Fig. 6 Far field intensity distributions of UV laser, when the green laser power is 1.10 W , $M^2=1.4$, the radius of beam waist $\omega_0=12 \mu\text{m}$

图 6 当绿光入射功率为 1.10 W , M^2 为 1.4 , 束腰半径 ω_0 为 $12 \mu\text{m}$ 时, 远场光斑图样和光强分布曲线

根据理论计算紫外倍频 8 mm 长的 BBO 晶体在 Oy 轴上倍频接受角为 0.42 mrad ^[8], 而实验中绿光的远场发散角远大于 Oy 轴的接受角。因此光斑在 Oy 轴上的分布主要取决于相位失配因子; 即光束中发散较小的部分因为相位匹配实现高效的紫外倍频, 而光束其他发散较大的部分则因为相位失配而使倍频效率骤降; 又由于在 Ox 轴上的紫外光强分布仅与基频光的高斯参数有关, 因而在远场屏上紫外主光斑呈椭圆形状分布。另外在图 6(c)中, 还发现理论计算得到的相位失配因子曲线的波峰和波谷与紫外的光强分布亮条纹和暗条纹相互对应。可以认为椭圆形的远场光斑, 在 Oy 方向上明暗条纹主要是由于发散角造成的周期性上下起伏的相位匹配因子造成的。观察图 6(c)中各级亮纹以及各个相对的相位匹配因子波峰, 还发现 Oy 轴上四倍频效应的限制, 不仅包括相位失配还包括由于光束中央位置功率密度高导致倍频饱和和效应。

3 结 论

对声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器进行紫外四倍频实验, 得到在不同绿光功率入射时最优化绿光束腰半径并且分析了最优化绿光束腰半径的物理意义。实验结果最多得到了 210 mW 的准连续 266 nm 紫外脉冲输出, 紫外转换效率为 19.1% 。BBO 晶体 o 光振动面和 e 光振动面上的倍频接受角不同, 不仅造成了紫外远场光斑明暗条纹分布; 而且影响进一步提高紫外转换效率。为了克服 BBO 晶体 e 光振动面上极小倍频接受角带来的坏处, 可以考虑对入射到 BBO 晶体中的光束采用柱透镜汇聚。

参考文献:

- [1] 陈国夫, 杜戈果, 王贤华. LD 泵浦 Nd:YVO₄/KTP/BBO 紫外激光器[J]. 光子学报, 1999, **28**(8):684-687. (Chen Guofu, Du Geguo, Wang Xianhua. LD pumped Nd:YVO₄/KTP/BBO frequency quadrupled ultraviolet laser. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(8):684-687)
- [2] 陈国夫, 王贤华, 杜戈果. 全固态紫外激光器的研究[J]. 光子学报, 1999, **28**(9):785-788. (Chen Guofu, Wang Xianhua, Du Geguo. All solid state ultraviolet laser. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(9):785-788)
- [3] 何京良, 卢兴强, 贾玉磊, 等. BBO 四倍频全固态 Nd:YVO₄ 紫外激光器[J]. 物理学报, 2000, **49**(10):2106-2108. (He Jingliang, Lu Xingqiang, Jia Yulei, et al. All solid-state Nd:YVO₄ UV laser at 266 nm by fourth harmonic using a BBO crystal. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(10):2106-2108)
- [4] 范秀伟, 王云, 彭倩倩. 二极管泵浦 Nd:GdVO₄ 晶体紫外激光器的研究[J]. 激光与红外, 2005, **35**(5):331-334. (Fan Xiuwei, Wang Yun, Peng Qianqian. Laser-diode pumped Nd:GdVO₄ ultraviolet laser. *Laser and Infrared*, 2005, **35**(5):331-334)
- [5] 谭成桥, 薛庆华, 贾富强, 等. LD 泵浦 Nd:YAG/Cr:YAG 腔外频率变换高功率紫外激光器[J]. 光子学报, 2005, **34**(9):1289-1291. (Tan Chengqiao, Xue Qinghua, Jia Fuqiang, et al. LD-pumped Nd:YAG out-cavity fourth harmonic generation high power ultraviolet laser. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1289-1291)
- [6] Hodgson N, Weber H. Laser resonators and beam propagation: fundamentals advanced concepts and applications[M]. New York: Springer, 2005:714.
- [7] 王屹山, 赵尚弘, 于连君. 高效全固态 263 nm 紫外激光脉冲的产生[J]. 光子学报, 2005, **29**(10):917-919. (Wang Yishan, Zhao Shanghong, Yu Lianjun. The generation of high efficiency all solid state 263 nm ultraviolet laser pulse. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **29**(10):917-919)
- [8] Kochner W. Solid-state laser engineering[M]. New York: Springer, 2002:638.

Fourth harmonic all-solid-state low power ultraviolet laser by BBO crystal

Hu Miao¹, Ge Jianhong², Chen Jun², Liu Chong²

(1. College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A series of fourth harmonic generation (FHG) experiments based on a laser diode pumped acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser employing KTP and BBO crystals was conducted. When the incident pump power of the green laser was 1.10 W and the beam waist radius was 12 μm, a 210 mW quasi-continuous UV laser pulse train was obtained and the power conversion efficiency was 19.1%. The results illustrate that for the same incident power, the FHG conversion efficiency varies with the waist width of the green laser beam. At last, we investigate the far field distributions of the UV laser in both o and e light vibration planes, and point that the elliptical shape distribution and the fringe pattern a caused by the different acceptance angles of the BBO crystal in the two planes.

Key words: BBO crystal; radius of optimal beam waist; phase matching acceptance angle