

非稳腔主动式直接获取纳秒近似无衍射贝塞尔绿光*

马宝田 吴逢铁[†] 马 亮

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362021)

(2009 年 4 月 30 日收到; 2009 年 12 月 18 日收到修改稿)

通过对基于轴棱锥的贝塞尔谐振腔和贝塞尔-高斯谐振腔的研究, 设计了一台腔内倍频 Nd:YAG 纳秒近似无衍射贝塞尔绿光激光器. 非稳激光器谐振腔由轴棱锥和凸面镜组成. 实验采用单灯脉冲抽运激光增益介质 Nd:YAG 晶体, 倍频晶体选用 KTP. 当抽运电压为 350 V 时, 由主动式直接产生纳秒近似零阶贝塞尔绿光, 其脉冲宽度为 55.1 ns, 波长为 532 nm, 线宽为 0.8 nm, 近似无衍射零阶贝塞尔绿光的中心光斑直径为 192 μm . 利用 Fresnel-Kirchhoff 衍射积分和 Fox-Li 迭代法, 通过数值计算得出了谐振腔的稳定场分布. 实验结果与理论模拟基本符合.

关键词: 主动式, 纳秒贝塞尔光束, 腔内倍频, 轴棱锥

PACC: 4260D, 4265J

1. 引 言

有限束宽的贝塞尔光束在最大准直范围内传播时, 其横向光场分布为第一类贝塞尔函数^[1], 不随传播距离发生变化. 贝塞尔-高斯光束^[2]是受高斯函数调制的贝塞尔光束, 具有和贝塞尔光束十分相似的特点. 由于贝塞尔和贝塞尔-高斯光束的独特优点, 使得它们在精确测量与准直, 精密加工切割, 带电粒子和中性原子引导^[3,4]以及作为光镊^[5]在生命科学等领域有广泛的应用. 近年来, 国内外学者报道了多种获得贝塞尔和贝塞尔-高斯光束的方法. 这些方法大致可分为两类, 一类称为被动式^[6-11], 一类称为主动式^[12-15]. 被动式是指将其他光束转换为贝塞尔光束, 主要是基于单独的光源和可以分离的光学组件或系统来实现. 主动式是指通过特定结构的谐振腔由激光器直接输出贝塞尔光束. 作者所在的研究小组在 2007 年利用轴棱锥分别通过被动式和主动式获得了稳定的纳秒贝塞尔-高斯脉冲^[15,16].

倍频贝塞尔光束的产生和应用已有相关报道. Wulle 等人 1993 年利用环缝波带片和 KDP 晶体对贝塞尔光束实现了二次频率转换^[17], Piskarskas 等人 1999 年利用轴棱锥和 PPKTP 晶体对贝塞尔光束

实现了二次频率转换^[18], Solomon 等 2008 年利用具有环形周期极化结构的钽酸锂晶体通过实验获得了倍频贝塞尔光束^[19], 文献 [20] 对贝塞尔光束的三次频率转化理论进行了详细地论述. 另外, 文献 [21-23] 中, 还就贝塞尔光束的转换效率、贝塞尔光束与高斯光束的倍频效率做了研究与比较. 然而, 这些方法产生的贝塞尔绿光都是在腔外实现的, 属于被动式. 为了提高倍频转换效率, 我们采取另一重要途径, 那就是采用主动方式由腔内倍频^[24]直接获取贝塞尔或贝塞尔-高斯绿光. 因为二次谐波的转换效率与基波强度成正比, 而共振腔内的光强度是腔外的 $(1-R)^{-1}$ 倍, R 为镜面反射率. 在产生贝塞尔光束的两类方法中, 主动式相对于被动式除了能够直接输出贝塞尔光束外, 另一主要优点是能够实现腔内倍频. 虽然通过设计特定结构的谐振腔直接输出贝塞尔光束的理论实验已有研究^[25,26], 但利用腔内倍频输出贝塞尔光束的实验还未见报道.

对于由轴棱锥和凹面镜组成的稳定腔, 由于平-凹腔支持高斯光, 轴棱锥支持贝塞尔光而输出贝塞尔-高斯光束, 也就是贝塞尔光束亮环受到强度高斯分布的径向调制, 其截面光强沿径向方向衰减的快慢受高斯光束的光腰半径的影响. 高斯光束的光腰半径越小, 贝塞尔光束的截面光强沿径向方向衰减越快, 高斯光束的光腰半径越大, 贝塞尔光束的截

* 国家自然科学基金 (批准号: 60977068) 和泉州市科技重点项目 (批准号: 2009G4) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn

面光强沿径向方向衰减越慢,当高斯光束的光腰半径趋近于无穷大时,贝塞尔-高斯光束就演变为理想的贝塞尔光束. 而由轴棱锥和凸面镜组成的非稳腔,由于平-凸腔可支持均匀球面波,使轴棱锥支持的贝塞尔光的振幅受到的调制更加均匀^[25]而输出近似贝塞尔光束. 只要凸面镜的曲率半径选择适当,就能输出高质量的近似贝塞尔光束. 对于由轴棱锥和凸面镜组成的非稳腔来说,轴棱锥的通光孔径越小,腔长越短,贝塞尔亮环的振幅受到的调制越强,光强衰减越快,亮环数目越少.

本文设计了一种腔内倍频 Nd:YAG 纳秒近似贝塞尔绿光激光器^[27],通过腔内倍频实验获得了纳秒近似贝塞尔绿光,并对光束中心光斑直径、脉冲宽度和频谱进行了测量. 实验结果与理论模拟基本符合.

2. 腔内倍频 Nd:YAG 纳秒近似无衍射贝塞尔绿光激光器的设计和数值模拟

2.1. 激光器的设计

如图 1 所示,激光器的谐振腔由轴棱锥和凸面镜组成,这是一种非稳腔结构. 利用轴棱锥产生无衍射光具有转换效率高^[28]、光损伤阈值高^[16]等其他方法所不具备的优势,因此,轴棱锥的特性得到了相关的研究^[29,30]. 实验采用的轴棱锥的底面镀有对基频 1064 nm 和倍频 532 nm 的全反射膜,作为谐振腔的一个全反镜,材料为 K9 玻璃,其底角 $\alpha = 0.5^\circ$,折射率 $n = 1.506$. 凸面镜为耦合输出镜,凸面镀膜对激光器基频波 1064 nm 全反、对倍频波 532 nm 高透,其曲率半径为 $R = -2000$ mm. 凸面镜与轴棱锥相距 L ,激光增益介质为 Nd:YAG 棒,其长为 $l = 80$ mm,直径为 $d = 5$ mm. 倍频晶体为磷酸氧钛钾 KTiOPO_4 (KTP),具有大的非线性系数、大的容许温度和容许角度、激光损伤阈值较高、倍频转化效率高等特性,其尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 3 mm. 调 Q 材料为 BDN[双(4-二甲基氨基二硫代苯乙烯)镍]染料片. 该激光器产生的近似贝塞尔光束具有中心光斑小(微米量级),脉冲宽度小(纳秒量级)等特点,高的光功率密度可大大提高倍频转换效率.

轴棱锥产生的贝塞尔光的最大无衍射距离^[31]

$$z_{\max} = a / (n - 1) \alpha, \quad (1)$$

谐振腔长度^[32]

$$L = z_{\max} / 2 = a / [2(n - 1) \alpha]. \quad (2)$$

以上两式中 a 是轴棱锥的通光孔径, n 是轴棱锥的折射率, α 是轴棱锥的底角. 在我们的实验中, $a = 2.5$ mm, 这样计算出最大无衍射距离 $z_{\max} \approx 56$ cm, 腔长 $L = 28$ cm, 因为输出镜放置在最大无衍射距离一半处, 所以腔外的无衍射距离为 28 cm.

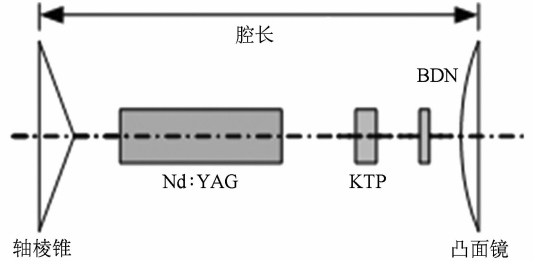


图 1 腔内倍频 Nd:YAG 纳秒贝塞尔绿光激光器的结构

2.2. 数值模拟

我们用 Fresnel-Kirchhoff 衍射积分和 Fox-Li 迭代法,通过数值计算得出了谐振腔的稳定场分布. 首先,求光线在谐振腔内的传输矩阵. 假设近轴光线的径向坐标为 r , 光线经过轴棱锥的折射角为 θ , 那么光线从轴棱锥到凸面镜的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2\theta/r & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 2L\theta/r & L \\ -2\theta/r & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

从凸面镜到轴棱锥的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 2L/R & L \\ -2/R & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

然后,将含有 ABCD 矩阵的菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程应用到沿传播方向呈圆柱对称的非稳近似贝塞尔谐振腔,同时考虑到轴棱锥和凸面镜对光线的传输函数,可得凸面镜处光场的振幅 $U_2(x_2, y_2)$ 和轴棱锥平面处光场的振幅 $U_1(x_1, y_1)$ 的迭代关系

$$\begin{aligned} U_2(x_2, y_2) &= \frac{ik}{2\pi B_1} \exp \left[-ikL - \frac{ik}{2B_1} \left(D_1 - \frac{1}{A_1} \right) \right. \\ &\quad \left. \times (x_2^2 + y_2^2) \right] \\ &\quad \times \iint_{S_1} U_1(x_1, y_1) \exp \left[-i2k\theta \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \exp\left[-\frac{ik}{2B_1}A_1\left(x_1 - \frac{x_2}{A_1}\right)^2\right] \\ & \times \exp\left[-\frac{ik}{2B_1}A_1\left(y_1 - \frac{y_2}{A_1}\right)^2\right] dx_1 dy_1, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} U_1(x_1, y_1) &= \frac{ik}{2\pi B_2} \exp\left[-ikL - \frac{ik}{2B_2}\left(D_2 - \frac{1}{A_2}\right)\right. \\ & \left. \times (x_1^2 + y_1^2)\right] \\ & \times \iint_{S_1} U_2(x_2, y_2) \exp(-ik(x_2^2 + y_2^2)/R) \\ & \times \exp\left[-\frac{ik}{2B_2}A_2\left(x_2 - \frac{x_1}{A_2}\right)^2\right] \end{aligned}$$

$$\times \exp\left[-\frac{ik}{2B_2}A_2\left(y_2 - \frac{y_1}{A_2}\right)^2\right] dx_2 dy_2. \quad (6)$$

两式中 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别是轴棱锥平面和凸面镜镜面上点的坐标, $k = 2\pi/\lambda$ 是波矢, λ 是波长. 根据上式,代入具体数值利用计算机计算时,我们假定初始入射波的光场为随机噪声分布. 图2(a)–(e)是谐振腔内外沿光轴方向五处不同地方光束的横截面光强分布图,(f)和(g)分别是(c)的光强分布3D图和光强径向分布曲线图. 从图可看出,在腔内和腔外一定范围内,激光光束的横截面光强分布基本保持不变即无衍射,中心光斑强度大,外围亮环光强受均匀调制而衰减,与贝塞尔光束横截面光强分布非常相似.

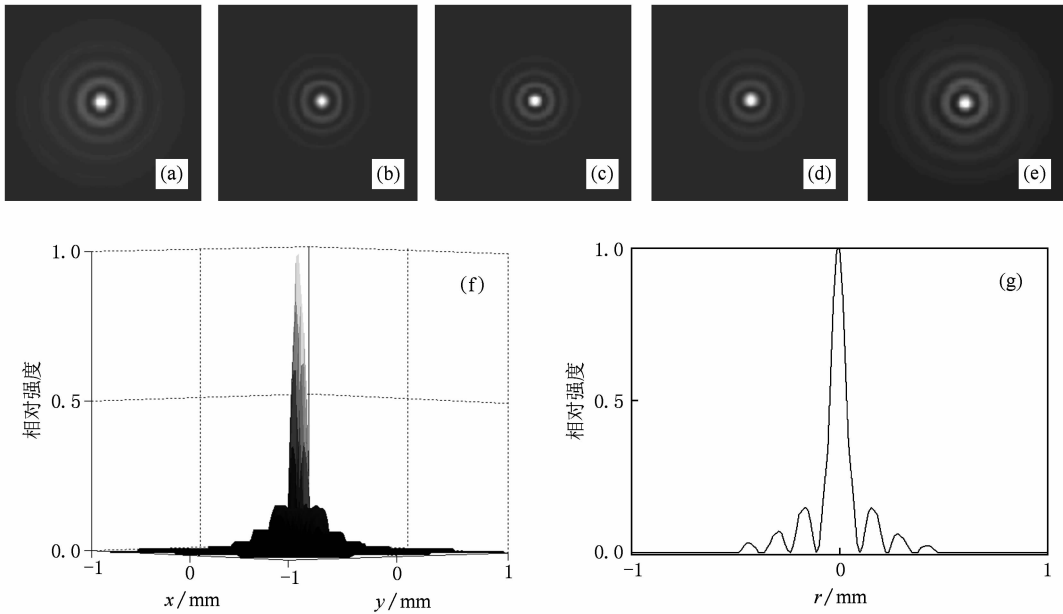


图2 沿Z轴上不同点的贝塞尔光束的光强分布 (a)轴棱锥处;(b)腔内中心处;(c)输出镜面处;(d)腔外距输出镜L/2处;(e)腔外距输出镜L处;(f)和(g)分别是(c)的光强分布3D图和光强径向分布曲线图

3. 倍频光的场强

从前面的数值模拟可知,在谐振腔内振荡形成的是近似零阶贝塞尔光束. 零阶基频 (ω) 贝塞尔光束的光场振幅可写为

$$E^{(\omega)}(r, \varphi, z, t) = J_0(k_r r) \exp(ik_z z - i\omega t), \quad (7)$$

式中 r 和 φ 分别表示径向坐标和角向坐标, k_r 和 k_z 分别是径向波矢和纵向波矢, J_0 是一类贝塞尔函数. 当基频 (ω) 贝塞尔光束光穿过非线性倍频晶体KTP会产生二次谐波,根据三波耦合方程,在二次谐波生产的情况下,倍频 (2ω) 贝塞尔光束的光场振

幅沿光轴方向的微分为

$$\frac{dE(2\omega)}{dz} = -i\omega \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} d[E^{(\omega)}(Z)]^2 e^{i(\Delta k)z}, \quad (8)$$

式中 $\Delta k = k^{(2\omega)} - 2k^{(\omega)}$ 是相位匹配条件, d 是非线性光学系数, μ 和 ε 分别是磁导率和介电常数. 基频 (ω) 贝塞尔光束光场振幅 $E^{(\omega)}$ 沿光轴方向可以认为是不变的,在这种情况下,将(8)式沿晶体长度方向进行积分,可得长度为 L 处的晶体端面处的倍频光场振幅为

$$E^{(2\omega)}(l) = -i\omega \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} d[E^{(\omega)}]^2 \frac{e^{i(\Delta k)l} - 1}{i\Delta k}. \quad (9)$$

将倍频光场振幅平方可得倍频光的强度为

$$U^{(2\omega)}(l) = \frac{\mu\omega^2 d^2}{\varepsilon_0 n^2} |E^{(\omega)}|^4 l^2 \frac{\sin^2(\Delta kl/2)}{(\Delta kl/2)^2}. \quad (10)$$

当基频光束垂直入射 KTP 晶体表面时,满足相位匹配条件 $\Delta k = k^{(2\omega)} - 2k^{(\omega)} = 0$,所以倍频光的强度可进一步写为

$$U^{(2\omega)}(l) = \frac{\mu\omega^2 d^2}{\varepsilon_0 n^2} |E^{(\omega)}|^4 l^2. \quad (11)$$

将(7)式代入(11)式,可得

$$U^{(2\omega)}(l) = \frac{\mu\omega^2 d^2}{\varepsilon_0 n^2} |J_0(k_r r) \exp(ik_z z - i\omega t)|^4 l^2. \quad (12)$$

从倍频光强度表达式(12)可看出,倍频光强度与基频光强度的平方成正比,与倍频晶体的长度的平方成正比,因此,设法提高基频光强度是增大贝塞尔绿光强度的有效途径.

4. 实验结果

实验装置如图 1 所示,腔内倍频 Nd:YAG 纳秒贝塞尔绿光激光器是一个简单的直线腔结构,激光工作物质 Nd:YAG 棒通过单灯抽运工作在脉冲状态下,脉冲频率为 1 Hz. 当抽运电压达到 350 V 时,激光器输出贝塞尔绿光脉冲. 关于脉冲的横截面光

强分布,脉冲宽度和激光谱线,我们分别做了测量.

首先,在腔外无衍射范围内对倍频贝塞尔绿光脉冲的横截面光强分布和传输特性进行测定. 实验使用 DataRay 公司的 TaperCamD-UCM-20-15 型光束分析仪,其主要技术参数为:感光元件 CCD 的尺寸 (19.6 mm × 14.8 mm),像素单元尺寸 (14.4 μm × 14.4 μm),有效像素 (1200 × 1024),图 3(a)是输出镜处的光强数值模拟图,图 3(b),(c)和(d)是光束分析仪分别放在距离输出镜 3 cm,10 cm 和 18 cm 处捕捉到的贝塞尔绿光脉冲的横截面光强分布的 3D 图和径向分布曲线图. 对比图 3(b),(c)和(d)可以看出,在一定的传输范围内光束横截面光强分布保持不变;对比图数值模拟图 3(a)和实验图 3(b),(c)和(d)可以看出,由激光器输出的脉冲与数值模拟的零阶近似无衍射贝塞尔光束横截面光强分布结构基本一致,即以中央亮斑为圆心,外围环绕一些同心亮环,由于受到均匀调制,贝塞尔亮环强度沿径向往外逐渐减弱. 图 3(a)中的曲线描述了光束横截面某一径向的光强分布,根据图形结构和图示分度值,我们测量了中央亮斑的直径,其值 $d = 192 \mu\text{m}$,与理论值 $184 \mu\text{m}$ 十分接近. 中央亮斑直径的理论值的计算式可由表达式(11)推导为

$$d_0 = 2 \times \frac{2.405}{k \sin \theta} = \frac{0.7659 \lambda}{(n-1)\alpha}.$$

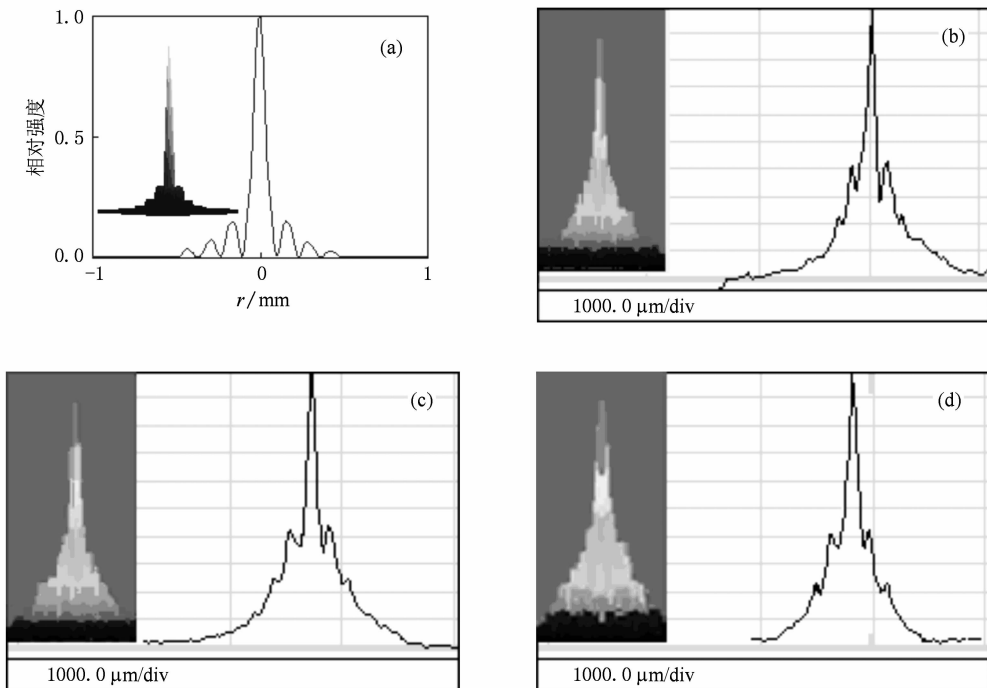


图 3 倍频贝塞尔绿光脉冲的横截面光强分布的 3D 图和径向分布曲线图 (a)数值模拟图; (b) $z = 3 \text{ cm}$; (c) $z = 10 \text{ cm}$; (d) $z = 18 \text{ cm}$

其次,对倍频贝塞尔绿光脉冲光谱进行测定. 实验中,我们使用美国 Ocean Optics 公司的 USB4000 微型光谱仪,其主要技术参数为:响应波长(350—1000 nm),积分时间(10 μ s),光学分辨率(FWHM 可达 0.02 nm). 图 4 是倍频贝塞尔绿光脉冲的光谱,其中心波长为 534 nm(与绿光中心波长 532 nm 相差 2 nm 的误差可能是由于光谱仪没有校准引起的,因为用同一光谱仪对氦氦基准光谱线进行测量,也有 +2 nm 的误差),线宽为 0.8 nm.

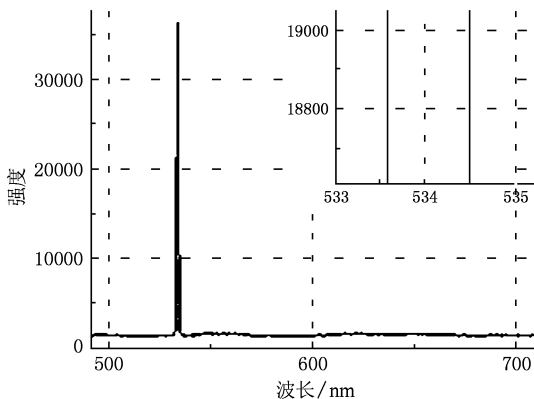


图 4 倍频贝塞尔绿光调 Q 单脉冲光谱图

最后,对倍频贝塞尔绿光脉冲的宽度进行测定. 实验中,我们使用美国 Tektronix 公司 TDS-3032B 双通道数字存储示波器,其主要技术参数为:带宽(300 MHz),单通道采样率(2.5 GS/s),最大记录长度 10 K 点. 图 5 是示波器记录的调 Q 倍频贝塞尔绿光脉冲波形图,其脉冲的半峰全宽为 55.1 ns.

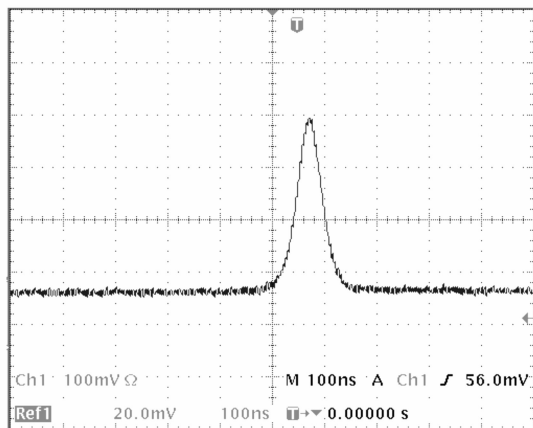


图 5 倍频贝塞尔绿光调 Q 单脉冲波形

5. 结 论

我们设计了一种基于轴棱锥的贝塞尔绿光激光器,首次采用了腔内倍频、平-凸非稳谐振腔结构. 通过实验观察到了从激光器直接输出的纳秒近似无衍射贝塞尔绿光脉冲,并且对输出激光脉冲的主要相关参数进行了测量,如激光谱线、脉冲宽度、光强横向分布以及中央光斑半径等. 实验结果与倍频理论和 Fox-Li 迭代理论的数值模拟结果基本符合. 该激光器结构简单,所用光学元件都已商品化,如果能够进一步优化谐振腔参数,对激光介质 Nd:YAG 棒的和倍频晶体 KTP 进行恒温控制,那么贝塞尔绿光脉冲的模式、倍频效率和稳定性都将会得到提高,为短波长、短脉冲贝塞尔光的应用创造更好的条件.

[1] Durmin J 1987 *J. Opt. Soc. Am. A* **4** 651
 [2] Gori F, Guattari G, Padovani C 1987 *Opt. Commun.* **64** 491
 [3] Florjanczyk M, Tremblay R 1989 *Opt. Commun.* **73** 448
 [4] Manek I, Ovchinnikov Y B, Grimm R 1998 *Opt. Commun.* **147** 67
 [5] Arlt J, Garcés-Chavez V, Sibbett W, Dholakia K 2001 *Opt. Commun.* **197** 239
 [6] Turunen J, Vasara A, Friberg A T 1988 *Appl. Opt.* **27** 3959
 [7] Herman R M, Wiggins R M 1991 *Opt. Soc. Am. A* **8** 932
 [8] Scott G, McArdie N 1992 *Opt. Eng.* **31** 2640
 [9] Burvall A, Kolacz K, Jaroszewicz Z, Friberg A T 2004 *Appl. Opt.* **43** 4838
 [10] Milne G, Jeffries G D M., Chiu D T 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 261101

[11] Brunel M, Coetmellec S 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 3753
 [12] Litvin I A, Forbes A 2008 *Opt. Commun.* **281** 2385
 [13] Hakola A, Buchter S C, Kajava T, Elfstrom H, Simonen J, Paakkonen P, Turunen J 2004 *Opt. Commun.* **238** 335
 [14] Ling D X, Li J C 2006 *Opt. Soc. Am. B* **23** 1574
 [15] Wu F T, Chen Y B, Guo D D 2007 *Appl. Opt.* **46** 4943
 [16] Wu F T, Chen Y B, Guo D D, Zhang J R 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 1073 (in Chinese) [吴逢铁、陈云彬、郭东栋、张建荣 2007 中国激光 **34** 1073]
 [17] Wulle T, Herminghaus S 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1401
 [18] Piskarskas A, Smilgevičius V, Stabinis A, Jarutis V, Pašiškevičius V, Wang S, Tellefsen J, Laurell F 1999 *Opt. Lett.* **24** 1053
 [19] Solomon S, Wieslaw K, Dragomir N, Kivshar Y S 2007 *Opt. Express* **15** 4132

- [20] Tewari S P, Huang H, Boyd R W 1996 *Phys. Rev. A* **54** 2314
- [21] Glushko B, Kryzhanovsky B, Sarkisyan D 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 243
- [22] Pandit M K, Payne F P 1997 *Optical and Quantum Electronics* **29** 35
- [23] Shinozaki K, Xu C Q, Sasaki H, Kamijoh T 1997 *Opt. Commun.* **133** 300
- [24] Li Y M, Liu Q, Tian X T, Zhang K S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2324
- [25] Hernández-Aranda R I, Chávez-Cerda S, Gutiérrez-Vega J C 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **2** 1911
- [26] Khilo A N, Katranji E G, Ryzhevich A A 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 1986
- [27] Lan R J, Liu H, Wang Z P, Ren Q, Zhang H J, Wang J Y, Yu H H, Lü Y H, Sang Y H, Xu X G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7686 (in Chinese) [兰瑞君、刘宏、王正平、任谄、张怀金、王继扬、于浩海、吕耀辉、桑元华、许心光 2009 物理学报 **58** 7686]
- [28] Angelis M D, Cacciapuoti L, Pierattini G, Tino G M 2003 *Optics and Lasers in Engineering* **39** 283
- [29] Jiang X G, Wu F T 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 4202 (in Chinese) [江新光、吴逢铁 2007 物理学报 **57** 4202]
- [30] Wu F T, Jiang X G, Liu B, Qiu Z X 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 3125 (in Chinese) [吴逢铁、江新光、刘彬、邱振兴 2009 物理学报 **58** 3125]
- [31] Rogel-Salazar J, New G H C, Chavez-Cerda S 2001 *Opt. Commun.* **190** 117
- [32] Gutierrez-Vega J C, Rodriguez-Masegosa R, Chavez-Cerda S 2003 *J. Opt. Soc. Am. A* **20** 2113

Nanosecond non-diffracting Bessel green beam generated directly from an unstable resonator by active method^{*}

Ma Bao-Tian Wu Feng-Tie[†] Ma Liang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

(Received 30 April 2009; revised manuscript received 18 December 2009)

Abstract

An intracavity frequency-doubled Nd: YAG nanosecond Bessel green laser is designed in an axicon-based Bessel and Bessel-Gaussian resonator. The unstable laser resonator is composed of a refraction axicon and a convex mirror. The gain medium Nd: YAG rod is pumped by a single flash-lamp which is working in a pulsed mode and a KTP crystal is used for intracavity second-harmonic generation. Nanosecond Bessel green beam is generated directly from the laser by active method when pumping voltage is 350 V. The pulse with width of 55.1 ns, central wavelength at 532 nm, spectral line width of 0.8 nm and diameter of central spot of 192 μm is obtained. Fresnel-Kirchhoff diffraction integral and the Fox-Li algorithm is used to extract the dominant mode of the cavity and the experimental results are consistent with those of the numerical simulation.

Keywords: active method, nanosecond Bessel beam, intracavity frequency-doubling, axicon

PACC: 4260D, 4265J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60977068) and Science and Technology Key Project of Quanzhou City (Grant No. 2009G4).

[†] Corresponding author. E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn