

文章编号: 1001-3806(2009)01-0067-04

倍频过程对激光光束质量及空间分布的影响

郑 晖, 林季鹏, 史 斐, 戴殊韬, 江 雄, 康治军, 翁 文, 林文雄*
(中国科学院 福建物质结构研究所 激光工程技术研究室, 福州 350002)

摘要: 为了研究倍频过程对激光光束质量及光束空间分布的影响, 针对典型的高阶高斯光厄米-高斯光束, 采用理论计算与实验相结合的方法, 得出倍频过程中不同阶数的基频光束对倍频光光束空间分布及光束质量的影响。研究表明, 随着基频光束模式变差, 倍频光束质量严重恶化。而对于相同光束质量的基频基模光束, 倍频光光束质量随着入射在倍频晶体上不同的基频光光斑半径基本不变。实验中得到半导体抽运掺铈钇铝石榴石内腔倍频激光器的绿光输出功率为 49.5W, 波长 1064nm 的基频光光束质量 $M^2 = 4.93$, 波长 532nm 的倍频光光束质量 $M^2 = 10.2$ 。结果与理论基本相符。

关键词: 激光光学; 光束质量; 2 阶矩计算; 光束空间分布; 内腔倍频

中图分类号: TN248.3⁺4 **文献标识码:** A

Effect of frequency doubling on beam quality and space distribution

ZHENG Hui, LIN Ji-peng, SHI Fei, DAI Shu-tao, JIANG Xiong, KANG Zhi-jun, WENG Wen, LIN Wen-xiong
(Office of Laser Engineering Technology Research, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

Abstract: For typical high order modes of Hermite-Gaussian beam, the effect of frequency doubling on beam quality factor and the space distribution was studied by means of calculation and experiments. The beam quality of the frequency doubled beam was deteriorated seriously with the beam quality of basic frequency reducing. The beam quality of the frequency doubled beam was invariant when the radius of the basic beam with the same beam quality was variant in the crystal surface. Green power of 49.5W was generated with a 15kHz repetition rate by intracavity frequency doubling of a diode-pumped Nd:YAG laser. The beam quality factor of the frequency doubled beam was 10.2 with the basic beam quality factor of $M^2 = 4.93$. The result of experiment was the same with the theoretical calculation.

Key words: laser optics; beam quality; second moment calculation; space distribution; intracavity frequency doubling

引 言

激光二极管抽运的全固态高平均功率、高重复频率倍频绿光激光器在激光微细加工、激光医疗设备、激光的军事应用、特别是受控热核聚变的驱动器、铀同位素分离的抽运源等科学和工业领域中得到了广泛的应用^[1]。同时高峰值功率、高重复频率的绿光激光器也可作为掺钛蓝宝石的抽运源, 用以实现波长可调谐的激光输出^[2]。当前谐波转换的研究主要集中于转换效率问题上, 而关于转换过程中光束空间特性及光束质量的变化一直缺乏全面系统的研究。但在实际应用中, 亮度通常是决定性指标, 它与表征光束质量的参量

M^2 成反比, 与平均功率成正比, 因此, 光束质量与平均功率是两个同样重要的因素。目前国内华北光电技术研究所获得了平均功率 68W 的声光调 Q 腔内倍频绿光输出, 光束质量因子 $M^2 \approx 18$ ^[3]; 中国工程物理研究院应用电子学研究所获得了 162W 的调 Q 绿光输出, 光束质量因子 $M^2 \approx 20$ ^[4]。国外已获得了平均功率超过 100W 的稳定的调 Q 脉冲绿光输出, 光束质量因子 $M^2 \approx 11$ ^[5]。

作者针对典型的高阶高斯光束, 通过理论计算出倍频过程中光束空间分布变化, 讨论了不同阶数的基频光束对倍频光光束质量的影响。经实验验证, 得到绿光输出功率 49.5W, 重复频率 15kHz, 光束质量 $M^2 = 10.2$ 。

1 理论计算

假设频率为 ω 的光电场标量振幅如下:

$$E(\omega, z) = \frac{1}{2} E_0(\omega, z) \exp(-i\phi_\omega) \quad (1)$$

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2006J0244)

作者简介: 郑 晖(1978-), 女, 助理研究员, 主要从事全固态激光器研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: wxlin@fjirsm.ac.cn

收稿日期: 2007-10-16; 收到修改稿日期: 2008-06-02

式中, E_0 为初振幅, ϕ_ω 为相位。2 次谐波产生过程中的基波与倍频波的光电场复振幅 $E_1(\omega, z)$, $E_2(2\omega, z)$ 分别满足微分方程为^[6]:

$$\begin{cases} \frac{dE_2(2\omega, z)}{dz} = \frac{4i\omega^2}{k_{2\omega}c^2}d_{\text{eff}}E_1^2(\omega, z)e^{i\Delta kz} \\ \frac{dE_1(\omega, z)}{dz} = \frac{2i\omega^2}{k_\omega c^2}d_{\text{eff}}E_2(2\omega, z)E_1^*(\omega, z)e^{-i\Delta kz} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta k = 2k_\omega - k_{2\omega}$, $k_{2\omega}$, k_ω 分别为倍频光 2ω 和基频光 ω 的光波传输常数; d_{eff} 为有效非线性极化率, c 为光速, * 表共轭。

在相位匹配条件下可得:

$$E_2(2\omega, z) = E_0(\omega, 0) \text{th} \left[\frac{2\omega^2 d_{\text{eff}}}{k_{2\omega} c^2} E_0(\omega, 0) z \right] \quad (3)$$

对于三硼酸锂晶体 LiB_3O_5 (LBO) 负双轴倍频晶体, 可用于掺钕钇铝石榴石 ($\text{Nd}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_7$, $\text{Nd}:\text{YAG}$) 和掺钕氟化钇锂 ($\text{LiY}_{1-x}\text{Nd}_x\text{F}_4$, $\text{Nd}:\text{YLF}$) 激光 2 倍频、3 倍频的相位匹配。最佳 I 类相位匹配角为 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 11.4^\circ$ 时, 有效倍频系数 $d_{\text{eff}}(\text{I}) = d_{32} \cos\varphi = 0.96$, 最佳 II 类相位匹配角为 $\theta = 22.2^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ 时, 有效倍频系数 $d_{\text{eff}}(\text{II}) = d_{31} \cos\theta = 0.97$ 。

一般的高阶高斯光束 TEM_{mn} , 横向场分布为:

$$E(x, y, z) = E_0 \exp[-(x^2 + y^2)/w_z^2] H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{w_z}\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2}y}{w_z}\right) \quad (4)$$

式中, w 为光斑半径, m, n 分别为 x, y 方向的横模数。

高阶高斯光束的光斑尺寸一般采用 2 阶矩定义^[7], 在 x 方向的光斑半径 $w_x(z)$ 为:

$$\begin{cases} w_x^2(z) = \frac{4 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z) dx dy} \\ \bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z) dx dy} \end{cases} \quad (5)$$

类似地, 在 y 方向的光斑半径 $w_y(z)$ 为:

$$\begin{cases} w_y^2(z) = \frac{4 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (y - \bar{y})^2 I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z) dx dy} \\ \bar{y} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} y I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z) dx dy} \end{cases} \quad (6)$$

远场发散角定义为^[8]:

$$\begin{cases} \theta_x = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w_x(z)}{z} \\ \theta_y = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w_y(z)}{z} \end{cases} \quad (7)$$

因此高阶高斯光束的光束质量 M^2 表示为: $M_{x,y}^2 =$ 高阶高斯光束在 $x(y)$ 方向腰斑半径和远场发散角的乘积方向/基模高斯光束腰斑半径和远场发散角的乘积。

对于基模 TEM_{00} 光束:

$$E_1(x, y, z) = E_0 e^{-(x^2+y^2)/w_z^2} H_0\left(\frac{\sqrt{2}x}{w_z}\right) H_0\left(\frac{\sqrt{2}y}{w_z}\right) \quad (8)$$

假设其束腰半径 $w_0 = 1\text{mm}$, 发散角 $\theta_{1x} = \theta_{1y} = 0.34\text{mrad}$, 位于 LBO 晶体端面上 $z = 0$, 因此 $w_z = w_0 = 1\text{mm}$ 。基频光 $\lambda_1 = 1064\text{nm}$, 光经过长度为 $l = 17\text{mm}$ 的晶体后, 倍频绿光 $E_2(2\omega, l)$ 分布为:

$$E_2(2\omega, l) = E_0 \exp[-(x^2 + y^2)/w_z^2] \times \text{th} \left\{ E_0 \frac{2\pi l d_{\text{eff}}}{\lambda n_0^2} \exp[-(x^2 + y^2)/w_z^2] \right\} \quad (9)$$

式中, n 为折射率。根据 2 阶矩定义, 将 (9) 式代入 (5) 式、(6) 式可求得:

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x E_2^2(2\omega, l) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_2^2(2\omega, l) dx dy} = 0, \bar{y} = 0 \quad (10)$$

因此倍频光 $E_2(2\omega, l)$ 在 LBO 出口端面上的光斑半径为:

$$w_{2x}^2(l) = \frac{4 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 E_2^2(2\omega, l) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_2^2(2\omega, l) dx dy} = 0.9\text{mm} \quad (11)$$

$$w_{2y}^2(l) = 0.9\text{mm}$$

式中,

$$w_z = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad (12)$$

式中, w_0 为束腰半径。将 (12) 式代入 (9) 式、(7) 式可得:

$$\theta_{2x} = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w_{2x}(z)}{z} \quad (13)$$

同理 $\theta_{2y} = \theta_{2x}$ 。在小信号近似情况下, (9) 式可简化为:

$$E_2(2\omega, l) = E_0^2 \exp[-2(x^2 + y^2)/w_z^2] \left[\frac{2\pi l d_{\text{eff}}}{\lambda n_0^2} \right] \quad (14)$$

由 (14) 式可以看出, 2 次谐波也是高斯光束, 它的束腰半径为: $w_{20} = w_0/\sqrt{2} = 0.707\text{mm}$ 。

而在小信号近似情况下, 将 (14) 式代入 (5) 式、(6) 式同样可以得到倍频光束在 LBO 出口端面上的光斑半径为 0.707mm 。由于 LBO 晶体的长度较小, 因此近似认为倍频光束在 LBO 出口端面上光斑半径即为倍频光束束腰。

因此求得倍频光的光斑束腰为 0.707mm , 光束发散角为 0.239mrad , 光束质量 $M^2 = \pi\omega\theta/\lambda = 1.17$ 。相对于基频光 $M^2 = 1$, 光束质量基本不变, 仍为 TEM_{00} 模高斯光束。如图 1 所示。

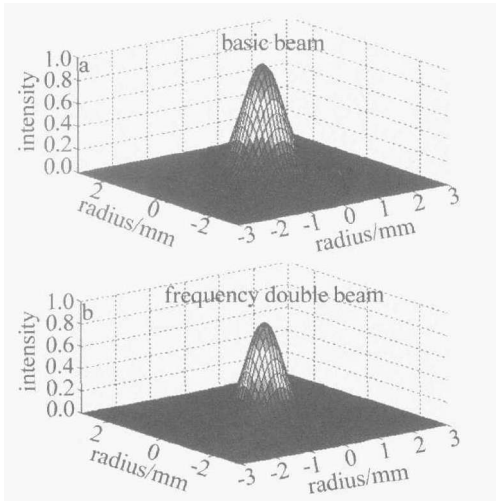


Fig. 1 Space distribution of the basic mode Gaussian beam

对于高阶模高斯光束,例如 $m = 2, n = 2$ 的高阶 TEM_{22} 模,假设基模半径为 0.9mm ,根据 2 阶矩理论,同理可求得基频光光斑半径 $w_{1x} = w_{1y} = 2.0125\text{mm}$,发散角为 $\theta_{1x} = \theta_{1y} = 0.841\text{mrad}$, $M^2 = 4.9974$ 。倍频光光斑半径为 $w_{2x} = w_{2y} = 1.9855\text{mm}$,发散角为 $\theta_{2x} = \theta_{2y} = 0.815\text{mrad}$,光束质量 $M^2 = 9.55$ 。如图 2 所示。

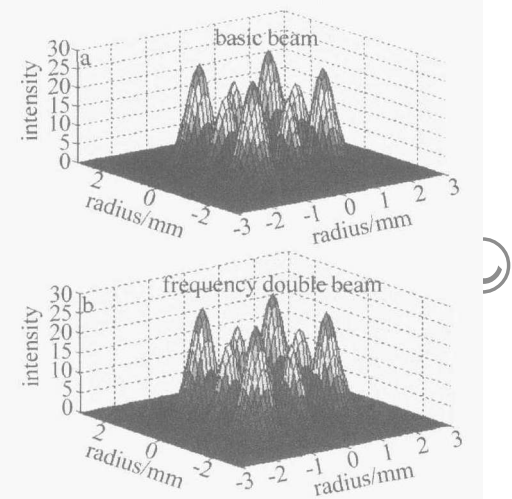


Fig. 2 Space distribution of the high order mode Gaussian beam

可以看出,随着基频光束模式变差,倍频光束质量严重恶化,这是因为随着基频光束质量 M^2 变大,倍频过程中存在走离效应及高斯光束发散影响,倍频效率下降,倍频光束质量变差。因此为获得高质量倍频激光,首先必须保证基频光光束质量,寻找最佳倍频晶体位置,提高倍频晶体效率。

对于相同光束质量的基频基模光束,倍频光光束质量随着入射在倍频晶体上不同的基频光光斑半径基本不变(见图 3)。对于长度为 17mm 的 LBO 倍频晶体,当入射基频基模光斑半径为 1mm 时,倍频光的光束质量最好。但一般为了获得高转换效率的倍频光,在倍频晶体表面损伤阈值范围内,入射在倍频晶体上的基频光斑尽量小。

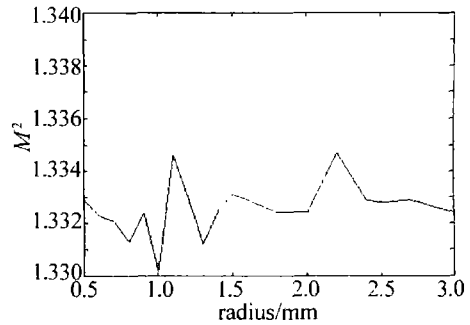


Fig. 3 Beam quality of the frequency doubled beam with radius of the basic beam

2 实验分析

在半导体抽运高功率全固态绿光激光实验中,采用了专利的环形分布 p 偏振抽运高功率半导体模块,其二极管出射光偏振方向对于增益介质是 p 方向入射,使抽运光与增益介质的轴一致且与增益介质更接近,提高抽运密度与效率。采用这种半导体抽运结构,光光效率为 47% ,电光效率为 26% 。

谐振腔的设计必须满足腔内基模半径相对于热透镜焦距保持稳定并尽可能大。权衡各方面因素,采用了平平对称 L 型折叠腔,激光介质为直径 4mm ,长度 76mm 的 Nd:YAG 晶体(见图 4)。腔长为 800mm ,

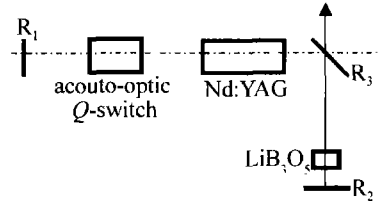


Fig. 4 Schematic drawing of the cavity configuration

R_1, R_2 为 $1064\text{nm}, 532\text{nm}$ 全反镜, R_3 为 1064nm 反射率 99.5% , 532nm 透过率 98% 的 45° 平面镜。根据腔内基模分布情况(见图 5),在连续抽运声光调 Q Nd:YAG

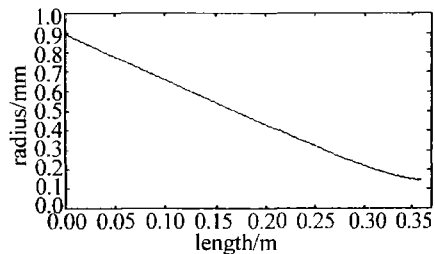


Fig. 5 Distribution of the basic mode with distance from pump cavity to total reflector R_2

激光器内距全反镜最近位置插入 II 类相位匹配的 LBO 晶体进行腔内倍频。Nd:YAG 棒上基模随抽运电流分布如图 6 所示。由图可见,在抽运工作电流下,激光晶体上基模半径为 0.9mm ,根据定义^[9-10],多模激光器的光束质量 M^2 可近似认为等于激光介质半径平方

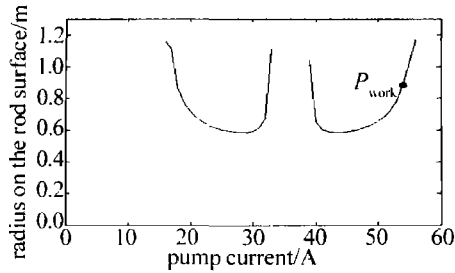


Fig. 6 Radius of the basic mode on the Nd:YAG rod surface with the pump current

除以激光介质上基模半径平方。因此,实验中 1064nm 激光光束质量 $M^2 \approx 2^2/0.9^2 = 4.93$ 。为验证理论计算结果,在实验中当抽运输入电流为 55A 时,得到绿光输出功率为 49.5W,重复频率为 15kHz,光束质量 $M^2 = 10.2$ 。由此可见,当基频光束为高阶模时,倍频光束质量急剧下降。例如基模半径为 0.9mm 光束质量 $M^2 = 4.99$ 的 TEM_{22} 的基频光由 2 阶矩理论计算,可得倍频光光束质量 $M^2 = 9.55$ 。实验结果与理论基本符合。为获得更优光束质量的高功率绿光激光器输出,进一步采用了热效应补偿技术及倍频晶体控温专利技术,已获得 50.6W 的绿光光束质量 $M^2 = 5.25$,将另外报道。

3 结论

针对典型的高阶高斯光束,通过理论计算给出倍频过程中光束空间分布变化,讨论了不同阶数的基频光束对倍频光光束质量的影响。随着基频光束模式变差,倍频光束质量严重恶化。对于相同光束质量的基频基模光束,倍频光光束质量随着入射在倍频晶体上

不同的基频光光斑半径基本不变。实验采用了平平对称 L 型腔,在抽运电流 55A 时,得到输出功率为 49.5W,重复频率为 15kHz,光束质量 $M^2 = 10.2$ 的绿光,与理论计算结果基本符合。

参考文献

- [1] XU D G, YAO J Q, GUO L, *et al.* 104W laser diode-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YAG green light laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(7): 925-928 (in Chinese).
- [2] JIANG D Sh, ZHAO H, WANG J J, *et al.* 120W diode-pumped green Nd:YAG laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(s0): 7-10 (in Chinese).
- [3] JIANG D Sh, ZHAO H, WANG J J, *et al.* 68W green-beam operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, A29(s1): 102-104 (in Chinese).
- [4] YAO Zh Y, JIANG J F, TU B, *et al.* 162W laser diode-pumped Nd:YAG intracavity-doubled laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(11): 1459-1462 (in Chinese).
- [5] KONNO S, KOJIMA T, FUJIKAWA S, *et al.* High-brightness 138W green laser based on an intracavity frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Opt Lett*, 2000, 43(1): 105-107.
- [6] SHI SH X, CHEN G F, ZHAO W, *et al.* *Nonlinear optics* [M]. Xi'an: Xi'an Electron Scientific University Press, 2003: 132-139 (in Chinese).
- [7] NIU Y X, WANG Y F, LIU X, *et al.* Laser beam quality factor M^2 and its measurement [J]. *Laser Technology*, 1999, 23(1): 38-41 (in Chinese).
- [8] LÜ B D. *Laser optics* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992: 65-68 (in Chinese).
- [9] HODGSON N. *Landolt-Börnstein-group VIII advanced materials and technologies* [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2006: 194.
- [10] UPADHYAYA B N, MISRA P, RANGANATHAN K, *et al.* Beam quality considerations of high power Nd:YAG lasers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(3): 193-197.

(上接第 52 页)

- [5] JIN Y, HUANG Sh Y, CHEN X F, *et al.* Study on polarization properties of the photonic crystal defect mode [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 277-280 (in Chinese).
- [6] JIANG M, JIANG X, SHEN X, *et al.* Study on the polarization property of 1-D photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(4): 612-616 (in Chinese).
- [7] SU X Y, GAO Y, WANG H F. Optical transmission properties of one-dimensional ferromagnetic material photonic crystal [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2007, 13(2): 134-137 (in Chinese).
- [8] MALDIVAN M, THOMAS E L, CARTER W C. Layer-by-layer diamond-like woodpile structure with a large photonic band gap [J]. *A P L*, 2004, 84(2): 362-364.
- [9] TANG B Sh, YIN G W, XU J L, *et al.* Study on the transmission spectra of two-dimension photonic crystals with layered composite medium cylinder [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 128-130 (in Chinese).
- [10] QIU M B, JASKOZYNSKA M, BENISTY H. Time-domain 2-D mod-

eling of slabwaveguide based photonic crystal devices in the presence of out-of-plane radiation losses [J]. *Microwave Optical Technology Letters*, 2002, 34(5): 387-393.

- [11] GE D B, YAN Y B. Finite-difference time-domain method for electromagnetic waves [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005: 35-37 (in Chinese).
- [12] TANG B Sh, SHEN T G. Study on transmission property of two-dimension doped photonic crystals with triangular lattices [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 526-528 (in Chinese).
- [13] ZHUANG F, XIAO S Sh, HE J P, *et al.* A FDTD method for calculating defect modes in a two-dimensional photonic crystal consisting of anisotropic cylinders [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(9): 2167-2171 (in Chinese).
- [14] FANG Y T, SHEN T G, TAN Y L. The design and study of a layered photonic crystal fiber [J]. *Laser Journal*, 2004, 25(1): 50-52 (in Chinese).