

文章编号: 1001-3806(2016)02-0195-04

## 腔内四倍频激光增强反射腔设计

柯 达<sup>1,2</sup>, 翟苏亚<sup>2</sup>, 王小蕾<sup>2\*</sup>, 林海枫<sup>2</sup>, 陈玮冬<sup>2</sup>, 李丙轩<sup>2</sup>, 廖文斌<sup>2</sup>, 张 戈<sup>2</sup>

(1. 福州大学 材料科学与工程学院, 福州 350108; 2. 中国科学院 福建物质结构研究所, 福州 350002)

**摘要:** 腔内反射增强技术可有效提高紫外激光四倍频效率,但反射增强腔存在多次反射光斑不重合、光束发散角不一致的问题。为了获得更好的光束质量,设计了一种实现多次反射绿光光束可重现的反射腔结构,采用传输矩阵法计算了反射光束及四倍频转换等参量。结果表明,可重现的反射腔不仅能有效避免反射增强腔内光束半径不一致导致的光束质量差的问题,还可进一步提升四倍频效率。

**关键词:** 激光光学; 四倍频; 反射增强腔计算; 反射光束重现

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.009

## Design of a reflective cavity for laser enhancement of the fourth harmonic generation

KE Da<sup>1,2</sup>, ZHAI Suyu<sup>2</sup>, WANG Xiaolei<sup>2</sup>, LIN Haifeng<sup>2</sup>, CHEN Weidong<sup>2</sup>,  
LI Bingxuan<sup>2</sup>, LIAO Wenbin<sup>2</sup>, ZHANG Ge<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Reflective enhancement has been proved to be an efficient way to raise the transfer efficiency of 266nm laser generation by the fourth harmonic generation (FHG). However, the reported enhancement cavities have some disadvantages, such as, the light beams reflected by different times are not overlapped well and the beam quality of violet light is poor. In order to obtain better beam quality, a new reflective cavity was described to realize the well overlap of the beams reflected by different times. The beam profile and transfer efficiency were calculated. The results show that a good beam quality of FHG violet light can be achieved and the efficiency of FHG can be further improved.

**Key words:** laser optics; fourth harmonic generation; reflective enhanced cavity calculation; reproduction of reflected beam

## 引 言

紫外激光由于波长短、聚焦性能好、光点面积小、光子能量高、衍射效应小、分辨率高、冷加工等特点,成为塑料和金属等材料精密加工的理想工具<sup>[1-4]</sup>。全固态紫外激光器由于其小型化、长寿命、性能稳定等特点,成为目前紫外激光器研究的热点<sup>[5-9]</sup>。

全固态 266nm 紫外激光普遍采用腔外四倍频 (fourth harmonic generation, FHG) 方案<sup>[10-12]</sup>,将 1064nm 激光采用腔内或腔外倍频 (second harmonic generation, SHG) 方式产生 532nm 绿光,产生的绿光在腔外聚焦单次通过偏硼酸钡 (barium metaborate, BBO) 晶体,产生四倍频 266nm 激光输出。采用腔四

外倍频方式,由于绿光无法通过谐振增强,因此,通过紧聚焦产生高功率以获得足够的转化效率成为必然选择。而在紧聚焦下,由于激光集中在很小的面积内,倍频晶体容易损伤,且由于激光发散度过大,受到 BBO 晶体容忍角的限制,其转换效率仍然受限。ZHUANG 等人于 2010 年<sup>[13]</sup>报道了一种采用腔内多次反射增强的技术方案,在多纵模腔内倍频绿光器谐振腔中设计一个反射腔,倍频的绿光在反射腔内多次反射,四倍频的 BBO 晶体放置于反射腔内,当绿光多次通过 BBO 晶体时,被多次转换成 266nm 紫外光输出。这种方案可以在相对低的功率密度下,提高四倍频转换效率。该报道中的反射腔由平平镜组成,由于绿光在反射腔内仅是反射过程,而不是相干谐振,因此,多次反射中,绿光光束持续发散,影响了效率的提升。ZHAI 等人于 2013 年<sup>[14]</sup>报道了一种改进的反射增强腔,他们采用带光束压缩作用的凹面镜,代替平面镜,实现了绿光在反射腔内多次反射时的光束压缩,绿光光斑被限制在一定的范围内变化,从而极大提高了四倍频的转换效

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2013J05106)

作者简介:柯 达(1988-),男,硕士研究生,现主要从事固体激光及频率变换的研究。

\* 通讯联系人。E-mail:55041583@qq.com

收稿日期:2015-03-18;收到修改稿日期:2015-03-24

率,808nm 抽运光到 266nm 四倍频光的转化效率达到 10.7%。由于该报道采用的仍为直线腔结构,其多次反射的绿光光斑在 BBO 晶体上是变化的,因此,其输出的 266nm 紫外光是由不同半径的光束叠加而得,光束质量仍然不高,聚焦时其焦斑将会散乱,很难得到应用。

本文中设计了一种适用于多纵模激光系统的 T 型四倍频反射增强腔,绿光多次反射的光斑半径由 T 型腔的参量来控制,通过腔设计,实现了绿光多次反射光束的重合,理论计算表明,这种反射腔结构,可进一步提高四倍频转换效率。

### 1 反射腔计算方法

本文中设计的 T 型四倍频反射增强腔见图 1。图中,  $M_1, M_2, M_3$  组成 1064nm 激光谐振腔,其中  $M_3$  为透射绿光、反射基频光的双色片, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体产生的 1064nm 基频激光在谐振腔内来回振荡,通过三硼酸锂 (lithium triborate, LBO) 时,倍频产生绿光,绿光在  $M_2$  和  $M_4$  组成的反射腔内来回反射,通过 BBO 晶体时,转化为 266nm 四倍频光。

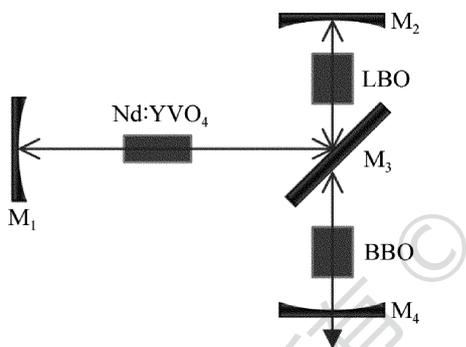


Fig. 1 Structure of T-type reflective cavity for FHG

本文中采用 ABCD 矩阵分析腔内光束的传输:

$$q = \frac{1}{\frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi w^2}} \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D} \quad (3)$$

式中,  $q$  为高斯光束的  $q$  参量,它表征了高斯光束的特性;  $R$  为高斯光束的曲率半径;  $w$  为光束半径;  $\lambda$  为波长;  $M$  为光学传输系统的传输矩阵,不同元件的传输矩阵可由参考文献[15]中获得;  $q'$  为经过光学传输系统变换后的新高斯光束的参量,由  $q'$  参量,即可获得变换后的高斯光束半径。

由谐振腔产生的 1064nm 基频激光,在 LBO 上倍频时,产生的绿光光束与基频激光具有相同的波前曲

率,光束半径为:

$$w_{532} = \frac{w_{1064}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

基频光通过 LBO 产生的绿光光束,通过上述 ABCD 矩阵法计算在腔内来回反射的光束变化,可确定每次通过 BBO 时的光束大小,设定初始功率密度,根据下述计算方法,可计算转换的 266nm 紫外光的功率密度。

绿光第  $N$  次通过 BBO 倍频后剩余绿光的中心光强  $I_{g,N}$  为:

$$I_{g,N} = I_{g,N-1} \frac{w_{N-1}^2}{w_N^2} - i_N - \alpha I_{g,N-1} \frac{w_{N-1}^2}{w_N^2} \quad (5)$$

式中,  $I_{g,N}$  为第  $N$  次通过 BBO 时的绿光光强,  $w_N$  为反射第  $N$  次的绿光光斑,  $i_N$  为第  $N$  次转化为 266nm 紫外光的光强,  $\alpha$  为绿光衰减系数。绿光第  $N$  次倍频产生的第  $N$  次紫外激光的中心光强  $i_N$  为:

$$i_N = \beta \left( I_{g,N-1} \frac{w_{N-1}^2}{w_N^2} \right)^2 \quad (6)$$

式中,  $\beta$  为绿光转化为紫外光的转换系数,  $I_{N-1}$  为第  $N-1$  次倍频后剩余的绿光光束的中心光强。  $N$  次反射后,产生的紫外光总强度为:

$$i_{\text{all},266} = i_1 + \sum_{n=2}^N i_n = \beta \left( I_0 \frac{w_{532}^2}{w_1^2} \right)^2 + \sum_{n=2}^N \beta \left( I_{g,n-1} \frac{w_{n-1}^2}{w_n^2} \right)^2 \quad (7)$$

式中,  $i_1$  为第 1 次转化为 266nm 紫外光的光强,  $I_0$  为绿光第 1 次通过 BBO 进行倍频时的光束中心光强,  $w_{532}$  为第 1 次通过 BBO 时的绿光光斑半径,考虑到 BBO 倍频接收角度和走离效应等因素的影响,计算中设定倍频转换系数  $\beta = 2 \times 10^{-9}$ ,参考实际激光系统参量,衰减系数  $\alpha$  设定为 0.04。

### 2 计算结果及分析

计算中,设定  $M_2$  曲率半径  $R_1 = 200\text{mm}$ ,  $M_4$  曲率半径  $R_2 = 300\text{mm}$ ,反射腔长度取包含 LBO, BBO 晶体有效光程的等效长度。设  $l_1$  为  $M_2$  到 BBO 晶体中心的等效距离,  $l_2$  为  $M_4$  到 BBO 晶体中心的距离。作者计算了 3 种情况下、BBO 晶体上的绿光光斑半径多次反射时的变化,分别为  $l_1 + l_2$  大于、小于以及等于两镜片曲率半径之和  $R_1 + R_2$ 。由于绿光初始光斑由谐振腔决定,而非反射腔决定,作者以谐振腔在  $M_2$  处的基频光斑半径根据(4)式折算的绿光光斑半径,计算初始值  $w_0 = 0.3\text{mm}$ ,3 种情况均取一样的初始值,结果见图 2。

由图 2 可以看到,当  $l_1 + l_2 > R_1 + R_2$  时,多次反

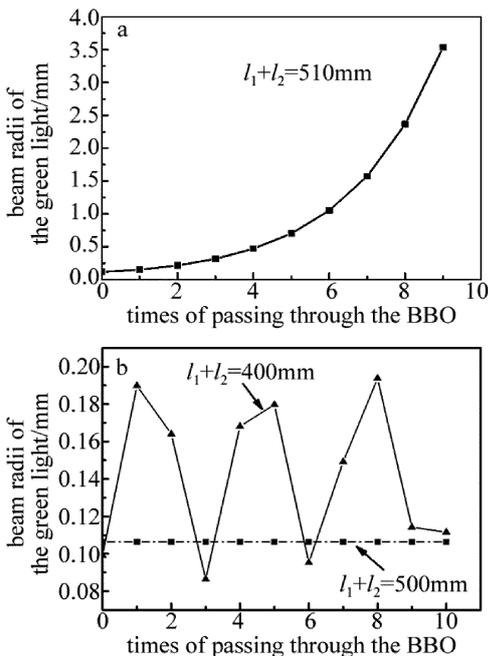


Fig. 2 Relationship between beam radii and the reflected times of green light

a— $l_1 + l_2 = 510\text{mm}$  b— $l_1 + l_2 = 500\text{mm}$  and  $l_1 + l_2 = 400\text{mm}$

射时的绿光半径是持续扩大,即绿光在持续扩散;当  $l_1 + l_2 < R_1 + R_2$  时,绿光半径被局限在一个范围内波动,即反射腔起到了压缩光束的作用;而当  $l_1 + l_2 = R_1 + R_2$  时,绿光基本与初始光斑完全一致,即绿光多次反射时光束是重现的,在这种条件下,多次反射过程产生的四倍频激光,光束基本完全重叠,光束将具有好的光束质量。

作者用同样的计算方法计算了参考文献[13]和参考文献[14]中不带压缩元件和带压缩元件的直线反射腔内的光斑半径变化,结果见图3。参考文献[13]中报道的不带压缩元件的直线腔,其反射光斑持续扩大,而带压缩反射元件反射腔,其反射光斑被局限在一个范围内波动。

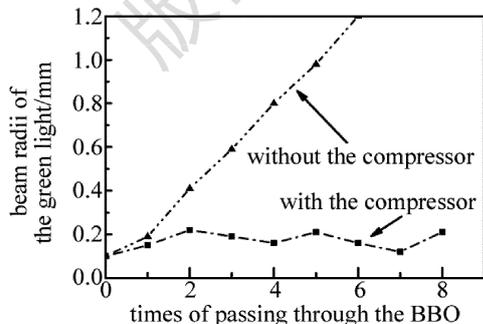


Fig. 3 The variation of beam radii of straight cavity

由计算得到的光斑半径变化,根据(5)式~(7)式,可以计算四倍频光的转化情况。不失一般性,作者用同样的绿光功率密度来计算不同腔结构的四倍频光转化,取初始的绿光功率密度为  $I_0 = 4 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ 。

分别计算了参考文献[13]和参考文献[14]中报道的两种直线腔和本文中设计的 T 型腔的四倍频 266nm 激光的功率密度,见图4。其中,T 型腔取处于光束重现且 BBO 上光斑最小时的参量:  $l_1 = R_1, l_2 = R_2$ 。

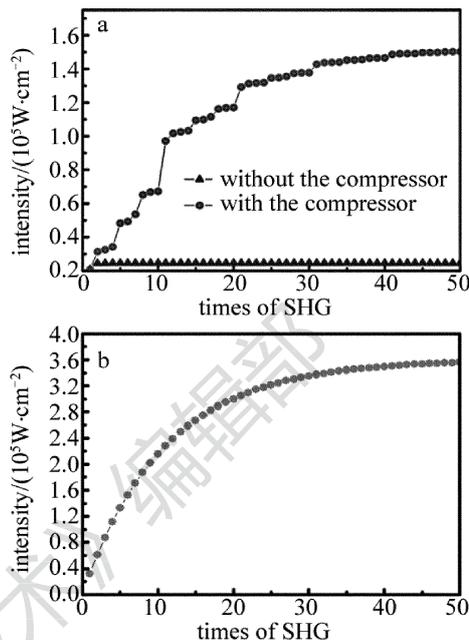


Fig. 4 Power density of 266nm laser of the multi-reflected enhancement cavity

a—straight cavity b—T-type cavity

从计算结果可知,带压缩元件的直线反射腔,其 266nm 光的转化远大于无压缩的直线反射腔,而 T 型反射腔的输出将比压缩的直线腔再提高 1 倍以上。

### 3 结论

计算分析了一种绿光多次反射的 T 型四倍频反射增强腔结构,计算分析表明,当反射腔长度等于腔镜曲率半径之和时,腔内多次反射的绿光光斑基本不变,即实现了光束多次反射的重现。在这种腔结构下,不仅产生的紫外光光束质量将得到提高,而且将比已报道的直线反射增强腔具有更高的转化效率。

### 参 考 文 献

- [1] YU J, ZENG Zh J, ZHU S G, et al. Research on advantages of UV laser in fine processing technology[J]. Infrared, 2008, 29(6):9-13 (in Chinese).
- [2] KONG L R, ZHANG F, DUAN J, et al. Research of water-assisted laser etching of alumina ceramics[J]. Laser Technology, 2014, 38(3):330-334 (in Chinese).
- [3] ZHOU M, WEI X, XIE X Zh, et al. Study on polishing process of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic with 355nm ultraviolet laser[J]. Laser Technology, 2014, 38(4):556-560 (in Chinese).
- [4] FU X, ZHANG F, JIANG M, et al. Study on technology and quality of etching copper clad laminate with 1064nm and 355nm laser[J]. Laser Technology, 2014, 38(4):435-440 (in Chinese).
- [5] KOJIMA T, KONNO S, FUJIKAWA S, et al. 20W ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of an all-solid-state laser

- [J]. Optics Letters, 2000, 25(1): 58-60.
- [6] XIANG Zh, GE J H, ZHAO Zh G, *et al.* 1.9W flash-lamp-pumped solid-state 266nm ultraviolet laser[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(6): 502-504.
- [7] ZHOU Ch, YE Z Q, ZHENG Q, *et al.* Investigation for passively Q-switched Cr<sup>4+</sup>:YAG all-solid-state ultraviolet laser of fourth-harmonic generation[J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 339-341 (in Chinese).
- [8] TIAN M, WANG F, CHE Y. LD pumped QCW 355nm laser by extra-cavity sum-frequency-mixing using double synchronized wavelength lasers[J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 804-806 (in Chinese).
- [9] ZHENG B R, YAO Y Ch, HUANG Ch Y. Experiment of double-end-pumped intra-cavity triple frequency ultraviolet laser[J]. Laser Technology, 2014, 37(2): 155-157 (in Chinese).
- [10] LIU Q, YAN X, GONG M, *et al.* High-power 266nm ultraviolet generation in yttrium aluminum borate[J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2653-2655.
- [11] KLEINBAUER J, KNAPPE R, WALLENSTEIN R. A powerful diode-pumped laser source for micro-machining with ps pulses in the infrared, the visible and the ultraviolet [J]. Applied Physics, 2005, B80(3): 315-320.
- [12] LIU Q, YAN X P, GONG M, *et al.* High power all-solid-state fourth harmonic generation of 266nm at the pulse repetition rate of 100kHz[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(3): 203-206.
- [13] ZHUANG F J, ZHENG Y Q, HUANG C H, *et al.* Efficient and compact intracavity- frequency- doubled YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP laser through analysis of the interaction length[J]. Optics Communications, 2010, 283(17):3324-3327.
- [14] ZHAI S Y, WANG X L, WEI Y, *et al.* A compact efficient deep ultraviolet laser at 266nm[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(4): 1-5.
- [15] MAGNI V. Multielement stable resonators containing a variable lens [J]. Journal of the Optical Society of America, 1987, A4(10): 1962-1969.

《激光技术》编辑部

版权所有 ©