

# 空间滤波器失调对 2 kW 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器输出光束的影响

肖龙胜<sup>1,2</sup> 秦应雄<sup>2</sup> 王 振<sup>2</sup> 唐霞辉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湖北第二师范学院光电信息科学与工程系, 湖北 武汉 430205

<sup>2</sup>华中科技大学光学与电子信息学院激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074

**摘要** 2 kW 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器光束整形系统中空间滤波器具有消除旁瓣、提升光束质量的作用, 研究其失调对输出光束的影响具有现实意义。通过理论和实验研究了空间滤波器失调对光强分布的影响, 理论分析与实验结果基本一致。数值模拟了失调对输出功率的影响。结果表明, 空间滤波器非稳方向横向位移失调对输出功率的影响不是线性的, 输出功率损耗随着横向位移的增加急剧增大; 对整形光束光强分布的影响很大, 失调量大于 0.2 mm 时就会使整形光束非稳方向出现明显的旁瓣。空间滤波器轴向位移失调对功率影响较小, 但对光斑形状有比较明显的影响, 失调量达到 10 mm 时, 整形光束两个方向的直径差可达 3 mm。空间滤波器旋转失调角度在 10° 以下时, 对整形光束非稳方向光束的影响可以忽略, 主要影响波导方向光束, 旋转失调会使模式变差。旋转失调对功率也有较大的影响, 失调角度为 10° 时, 功率损耗增加到 25%。

**关键词** 物理光学; 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器; 非稳波导混合腔; 光束整形; 空间滤波器; 失调特性

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1026012

## Shaped Beam of a 2 kW Radio Frequency Slab CO<sub>2</sub> Laser with Misaligned Spatial Filter

Xiao Longsheng<sup>1,2</sup> Qin Yingxiong<sup>2</sup> Wang Zhen<sup>2</sup> Tang Xiahui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Optoelectronic Information Science and Engineering, Hubei University of Education, Wuhan, Hubei 430205, China

<sup>2</sup>National Engineering Research Center for Laser Processing, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** The spatial filter in the beam shaping system of a 2 kW radio frequency slab CO<sub>2</sub> laser is used to eliminate side lobes and improve quality of output beams. It is important to study the effect of misaligned spatial filters on the characteristics of the shaped beam. The effect of the misaligned spatial filter on intensity distribution of the shaped beam was studied theoretically and experimentally. The theoretical simulation results are in agreement with the experimental results. Meanwhile, the effect of the misaligned spatial filter on output power of the shaped beam was studied by theoretical simulation. The results show that the effect of lateral displacement in the unstable direction of the spatial filter on the output power and the intensity distribution of the shaped beam is significant. The output power decreases and the side lobes appear as the lateral displacement increases. The shaped beam is not a circle while the spatial filter is axially-misaligned. The diameter difference is up to 3 mm when the axial displacement is 10 mm. The angle misalignment of the spatial filter mainly has impact on the shaped beam in the waveguide direction. The side lobes appear and the beam quality decreases as the angle misalignment increases. The loss of output power is up to 25% when the angle misalignment is 10°.

**收稿日期:** 2016-05-31; **收到修改稿日期:** 2016-08-08

**基金项目:** 湖北省自然科学基金(2015CFB502)、湖北省教育厅基金(B2015011)

**作者简介:** 肖龙胜(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光光束传输与激光加工方面的研究。

E-mail: xiaolongsheng0118@foxmail.com

**导师简介:** 唐霞辉(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光器与激光加工方面的研究。

E-mail: txh1116@hust.edu.cn(通信联系人)

**Key words** physical optics; radio frequency slab CO<sub>2</sub> laser; unstable-waveguide hybrid resonator; laser beam shaping; spatial filter; misalignment properties

**OCIS codes** 260.3060; 140.3470; 140.3300; 140.3295

## 1 引 言

板条型增益激光器的设计是为了充分利用增益物质,并同时解决增益物质散热问题而设计的一种结构相对紧凑的激光器。由于其输出光束具有高光束质量、短脉宽、高脉冲与峰值能量等优点,一直是激光器研究热点之一。其谐振腔通常会采用非稳-波导混合腔结构(垂直板条是波导腔结构,平行板条是非稳腔结构),并应用于不同类型的激光器中。如射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器、Nd:YAG 板条激光器<sup>[1-4]</sup>、Er:YSGG 板条激光器<sup>[5]</sup>、Tm:YLF 板条激光器<sup>[6-7]</sup>、Tm:LiYF<sub>4</sub> 激光器<sup>[8]</sup>、Tm:YAG 陶瓷板条激光器<sup>[9]</sup>、ND:YLF 脉冲板条激光器<sup>[10]</sup>、Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器<sup>[11-12]</sup>等。混合腔除了作为谐振腔直接应用于激光器,还被很多研究人员作为皮秒激光和飞秒激光的放大器使用,这种放大器的优点是能够兼顾高放大效率和高放大倍数<sup>[13-16]</sup>。在非稳波导混合腔带来显著功率提升的同时,其光束传输特性和重构成为必要的研究内容之一。

非稳波导混合腔的输出光束的重构最早由 Nowack 等提出。引入双柱面镜系统对一台混合腔射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的输出光束进行重构<sup>[17]</sup>。两个柱面镜对波导方向的光束进行扩束准直,光束重构后两个方向上的光束半宽与发散角基本一致。这种系统结构简单、易于安装,一直到现在为止还是气体和固体板条激光器上广泛使用的光束整形系统。但是,重构后的光束远场分布不是近基模高斯分布,未能提升输出光束的光束质量。在某一方向上的远场分布存在旁瓣<sup>[1-12]</sup>,不利于光束的实际使用。为了解决这个问题, Habich 等<sup>[18]</sup>率先在 Nowack 等的工作基础上做了改良,在重构系统中引入了一件简单但非常有效的光学元件——空间滤波器。并在一台环形增益射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器上进行实验,得到了比较好的激光输出。但缺点在于系统复杂,参与光束重构的元件数量过多。对安装调试的要求较高,不利于大批量生产使用。

在国内,焦文涛等<sup>[19-20]</sup>提出了一种射频激励扩散冷却层叠式板条波导 CO<sub>2</sub> 激光器结构,并研究了其输出光束特性。高允贵等<sup>[21]</sup>在正支混合腔射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器上进行了光束重构实验,为了平衡两种整形系统的优势,空间滤波器被直接放置在柱面望远镜系统之后,相比 Nowack 等的系统,此方法优势在于重构后的近场光束不存在旁瓣,光束质量有所改善;相比 Habich 等的系统,重构系统的光学元件较少。但是,因为空间滤波器是在重构系统的最后截断了光束,从而改变了光束的传输特性,所以重构后的光束远场分布不能满足设计要求。Xiao 等<sup>[22-23]</sup>研制了 2 kW 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器,并对上述光束整形系统进行改进,将空间滤波器设计在整形系统中部,光束经过空间滤波器后再次经光学元件重构光束,将初始带有高空间频率振荡的矩形像散光束重构成近基模高斯分布的圆形光束,并分析了不同空间滤波器宽度对重构光束的影响。但是,空间滤波器在实际应用中会因为各种原因产生失调,其失调对输出光束的影响少有专门的文献进行分析。

本文通过理论分析和实验研究空间滤波器非稳方向横向位移失调、轴向位移失调、空间滤波器垂直于输出光束旋转失调对光强分布和输出功率的影响。

## 2 基本原理

### 2.1 基本原理

失调光学系统的广义衍射积分公式为<sup>[24]</sup>

$$E_2(x_2, y_2) = (ik/2\pi B) \times \exp(ikl_0) \iint E_1(x_1, y_1) \times \exp\{(-ik/2B) \times [A(x_1^2 + y_1^2) - 2(x_1x_2 + y_1y_2) + D(x_2^2 + y_2^2) + Ex_1 + Fy_1 + Gx_2 + Hy_2]\} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

$$E = 2(\alpha_T \epsilon_x + \beta_T \epsilon'_x), \quad (2)$$

$$F = 2(\alpha_T \epsilon_y + \beta_T \epsilon'_y), \quad (3)$$

$$G = 2(B\gamma_T - D\alpha_T)\epsilon_x + 2(B\delta_T - D\beta_T)\epsilon'_x, \quad (4)$$

$$H = 2(B\gamma_T - D\alpha_T)\epsilon_y + 2(B\delta_T - D\beta_T)\epsilon'_y, \quad (5)$$

式中  $k$  为波矢,  $A, B, C, D$  为外光路的传输矩阵因子,  $\alpha_T, \beta_T, \gamma_T$  和  $\delta_T$  称为失调光学矩阵参数,

$$\alpha_T = 1 - A, \quad (6)$$

$$\beta_T = l_0 - B, \quad (7)$$

$$\gamma_T = -C, \quad (8)$$

$$\delta_T = \pm 1 - D. \quad (9)$$

(9)式中,当光学元件为凸面透镜时取+1,光学元件为凹面镜时取-1。 $\epsilon_x, \epsilon_y$  分别表示光学系统  $x$  方向与  $y$  方向的位移失调; $\epsilon'_x, \epsilon'_y$  分别表示两个方向角度失调; $l_0$  表示轴向光程。(1)式中  $E_1(x_1, y_1)$  表示初始光场,从非稳波导混合腔射出但尚未经过外光束整形系统重构。详细计算方法可参考文献[23]。得到初始光场后,根据设计的外光束整形系统计算出传输矩阵,从而得到  $A, B, C, D$  的具体数值,进而根据(6)~(9)式和失调量计算出失调光学矩阵,再将结果代入(2)~(5)式得到  $E, F, G, H$ , 计算得到重构后的光场  $E_2(x_2, y_2)$ 。

### 2.2 实验装置

图1是整形系统实物图与示意图。空间滤波器在波导方向的宽度很宽,因此着重研究空间滤波器非稳方向的横向位移失调。

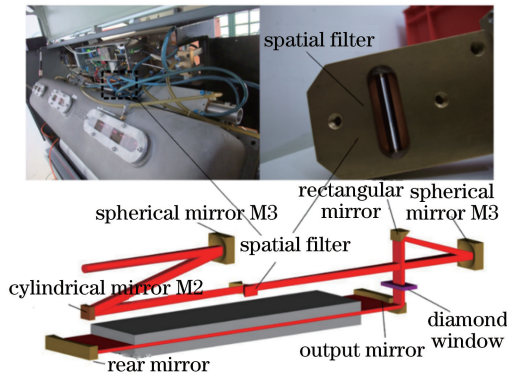


图1 配备空间滤波器的整形系统实物图与示意图

Fig. 1 Photo and scheme of the beam shaping system with a spatial filter

## 3 仿真与实验结果分析

### 3.1 横向位移失调对光强分布的影响

图2所示为空间滤波器非稳方向横向位移失调示意图。 $\delta_{xs}$ 表示横向位移距离。

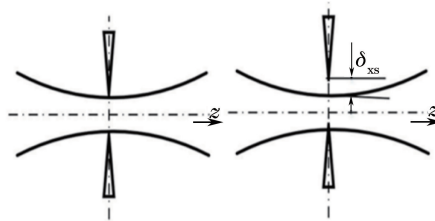


图2 空间滤波器非稳方向横向位移失调示意图

Fig. 2 Scheme of lateral displacement of spatial filter in the unstable direction

图3描述了空间滤波器横向位移失调时光束传输至  $z=2000$  mm 处的光强分布。颜色条从0到1代表光强由弱到强。图3(a)和3(b)分别为理论模拟和实验结果,从左至右失调量依次为0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm。图中水平分布为非稳腔方向,竖直方向为波导方向。将图1所示整形系统中的球面镜 M3 定义为参考平面  $z=0$ 。从图中可以明显地看到整形光束随着失调位移的增加发生了明显的变形,光斑左侧形成不规则的形状。理论分析和实验结果均表明横向位移的增加会导致非稳方向的光强分布在某一侧的子峰越来越明显,直至形成旁瓣。这同时也说明由于空间滤波器非稳方向尺寸很小,光强分布对空间滤波器横向位移失调非常敏感。

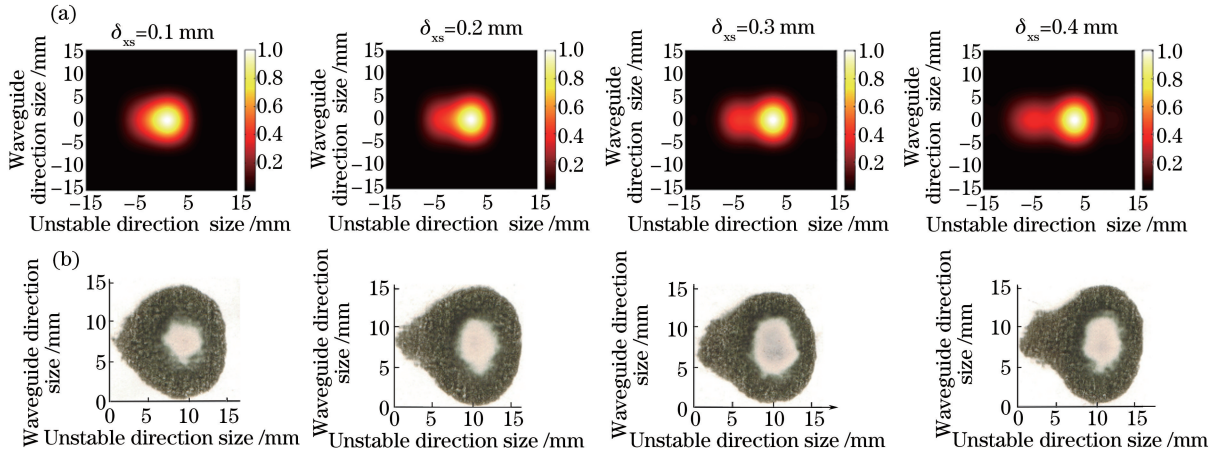


图 3 空间滤波器横向失调量为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm 时整形光束传输至  $z=2000$  mm 时的光强分布。

(a)理论仿真结果;(b)实验结果

Fig. 3 Intensity profiles of the shaped beam propagating to  $z=2000$  mm while the lateral displacement of the spatial filter is 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm. (a) Simulation results; (b) experimental results

### 3.2 轴向位移失调对光强分布的影响

图 4 为空间滤波器轴向失调示意图。 $\delta_a$  表示空间滤波器轴向位移,  $L_1$  表示球面镜 M1 与空间滤波器的距离,  $L_2$  表示空间滤波器与柱面镜 M2 的距离,  $L_3$  表示柱面镜 M2 与球面镜 M3 之间的距离。规定空间滤波器向右移动时位移为正, 往左移动位移为负。

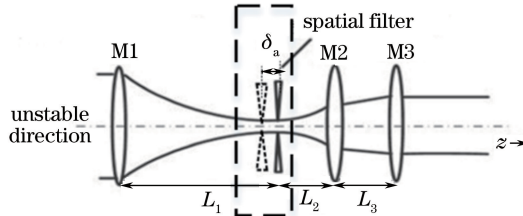


图 4 空间滤波器轴向失调示意图

Fig. 4 Diagram of the axial misalignment of the spatial filter

图 5 描述了空间滤波器向右移动 0, 3, 5, 10 mm 时, 整形光束在  $z=2000$  mm 处的光强分布。球面镜 M3 处定义为  $z=0$  平面。由于空间滤波器的初始位置是在球面镜 M1 的焦平面处, 此时非稳方向光束的光斑半径最小。而空间滤波器的宽度也是根据此时的光束束腰宽度决定的。因此, 当空间滤波器向右移动时, 光束的旁瓣一定会被消除。轴向位移失调主要影响光斑形状和输出功率, 对光斑形状的影响是由于两个方向的直径出现差值, 由于差值不大, 在图 5 中表现不明显。

图 6 描述了空间滤波器轴向失调后, 光束通过整个整形系统后束腰宽度的变化。虚线表示通过整形系统后整形光束非稳方向的束腰宽度变化; 实线表示通过整形系统后整形光束波导方向的束宽变化。波导方

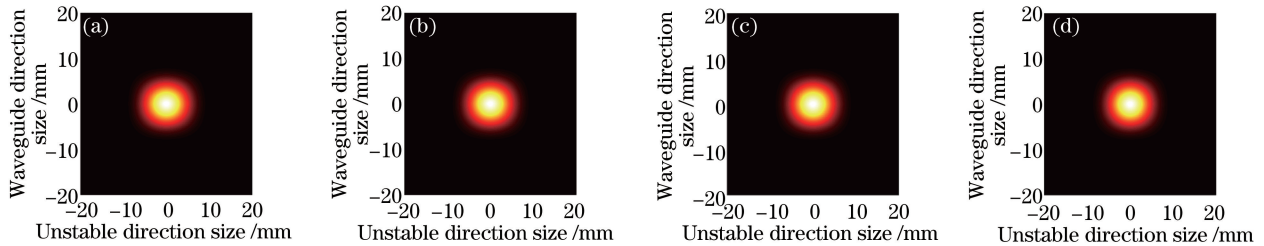


图 5 不同空间滤波器轴向失调时整形光束在  $z=2000$  mm 处的光强分布。(a)  $\delta_a=0$  mm;

(b)  $\delta_a=3$  mm; (c)  $\delta_a=5$  mm; (d)  $\delta_a=10$  mm

Fig. 5 Intensity distribution of the shaped beam at  $z=2000$  mm caused by axial displacement of the spatial filter.

(a)  $\delta_a=0$  mm; (b)  $\delta_a=3$  mm; (c)  $\delta_a=5$  mm; (d)  $\delta_a=10$  mm

向束宽与非稳方向束宽的差值越小,则整形光束光斑形状越接近圆形。从图 6 中可以发现,对应图 5 整形光束传输  $z=2000$  mm 处两个方向的光束半宽差对应失调距离分别为 0,0.2,0.35,0.8 mm,两个方向的直径差值为 0,0.4,0.7,1.6 mm,差值很小,因此在图 5 中光强分布表现不明显。

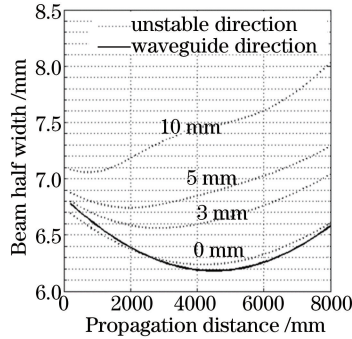


图 6 空间滤波器轴向失调后光束通过整形系统后束宽的变化

Fig. 6 Beam width in the two directions after different propagation distances when axial displacement of the spatial filter happens

为了有明显区别,选取传输至 4000 mm 处的光束进行实验比较。图 7 为空间滤波器轴向失调与无失调时整形光束在 4000 mm 处的光强分布实验结果。图 7(a)是无失调时的实验结果,图 7(b)是轴向失调量为 10 mm 时的实验结果。实验中激光器功率选取 90 W。图中水平方向为非稳方向,竖直方向为波导方向。可以看到,当空间滤波器无失调时,非稳方向上的光束宽度为 12 mm,波导方向上光束宽度也为 12 mm,两者的差值为 0。而当轴向失调量为 10 mm 时,非稳方向光束宽度为 15 mm,波导方向宽度为 12 mm 左右,两者的直径差值为 3 mm。图 6 模拟结果中,4000 mm 处光束半宽差为 1.25 mm,直径差为 2.5 mm,与实验结果相比误差为 0.5 mm。可以认为,理论模拟结果与实验结果基本一致。

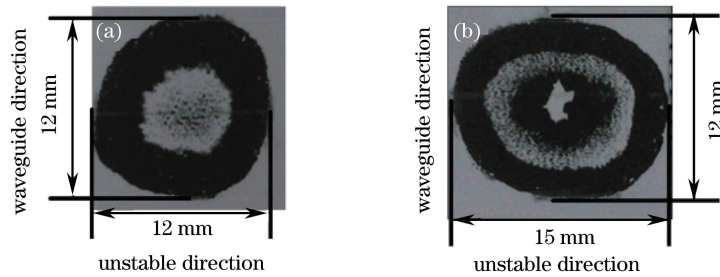


图 7 空间滤波器轴向失调后整形光束实验结果。(a)  $\delta_a=0$  mm; (b)  $\delta_a=10$  mm

Fig. 7 Experimental results of the shaped beam at  $z=4000$  mm after the axial displacement of the spatial filter happens. (a)  $\delta_a=0$  mm; (b)  $\delta_a=10$  mm

由于加工精度的限制,对空间滤波器的加工并不十分理想,空间滤波器的两个垂直方向同输出光束的两个垂直方向有可能不是重合的,存在着细微的角度偏差。因此,空间滤波器相对输出光束旋转失调对整形光束的影响也是一个必须考虑的问题。

### 3.3 角度旋转失调对光强分布的影响

图 8 是空间滤波器旋转失调示意图。为了便于说明,示意图中空间滤波器尺寸比例与实际使用的不一致。图 8 中,水平方向是光束非稳方向,竖直方向是光束波导方向。输出光束经球面镜 M1 聚焦后射入空间滤波器。从图中可以看到空间滤波器旋转失调后,光束非稳方向在空间滤波器处的尺寸由  $d$  变为  $d_a$ ,光束波导方向在空间滤波器处的尺寸由  $d_w$  变为  $d_{wa}$ 。旋转失调后,水平方向尺寸与竖直方向的尺寸都与  $d$  相关,它们之间关系为

$$d_a = d / \cos \beta, \tag{10}$$

$$d_{wa} = d / \sin \beta, \tag{11}$$

式中  $\beta$  为空间滤波器旋转失调角度。

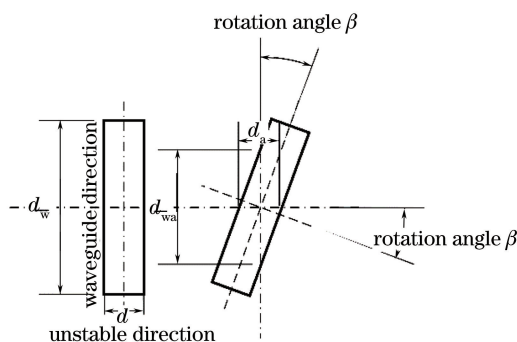


图 8 空间滤波器旋转失调示意图

Fig. 8 Scheme of rotation misalignment of spatial filter

图 9 描述了空间滤波器旋转失调  $3^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $7^\circ$  和  $10^\circ$  时, 光束在  $z = 2000$  mm 处的光强分布。图中,  $x$  轴为非稳方向,  $y$  轴为波导方向。当失调角度为  $3^\circ$  时, 可以发现光强分布的中心区域出现了变形。失调角度进一步增大到  $5^\circ$ , 光强分布中心区域失调更加明显, 光斑的中心区域出现了两个极强点。非稳方向光强分布没有明显的变化, 光束在波导方向比非稳方向对空间滤波器旋转失调更加敏感。这是因为非稳方向无失调时,  $d$  为  $0.9$  mm。空间滤波器旋转  $5^\circ$  时, 水平方向尺寸即  $d_a$  改变为  $0.9034$  mm, 仅增加  $0.0034$  mm, 对整形后光束的光强分布影响可以忽略不计。此时, 波导方向上的尺寸由  $d_w = 30$  mm 减小到  $d_{wa} = 10.3262$  mm, 减小  $20$  mm。所以波导方向上的光强分布发生了明显的变化, 而非稳方向没有明显的变化。当失调角度进一步增大到  $7^\circ$  时, 如图 9(c) 所示, 波导方向的光强分布中心区域不再是两个极强点, 而是在两侧出现了很明显的旁瓣。失调角度达到  $10^\circ$  时, 这种现象更加明显。

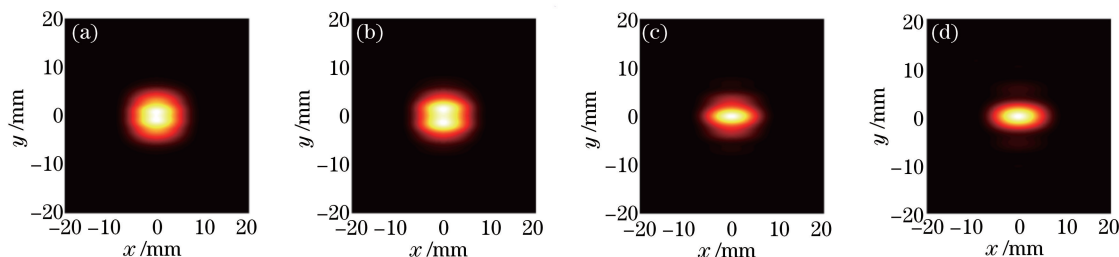


图 9 空间滤波器旋转失调时整形光束在  $z = 2000$  mm 处的光强分布。(a)  $\beta = 3^\circ$ ; (b)  $\beta = 5^\circ$ ; (c)  $\beta = 7^\circ$ ; (d)  $\beta = 10^\circ$

Fig. 9 Intensity distribution of the shaped beam at  $z = 2000$  mm under different rotation misalignments of spatial filter. (a)  $\beta = 3^\circ$ ; (b)  $\beta = 5^\circ$ ; (c)  $\beta = 7^\circ$ ; (d)  $\beta = 10^\circ$

在实验中同样观察到了空间滤波器旋转失调的情况。如图 10(a) 所示, 整形光束在  $z = 2000$  mm 处的光强分布近似为高斯基模分布, 但顶部出现轻微凹陷。

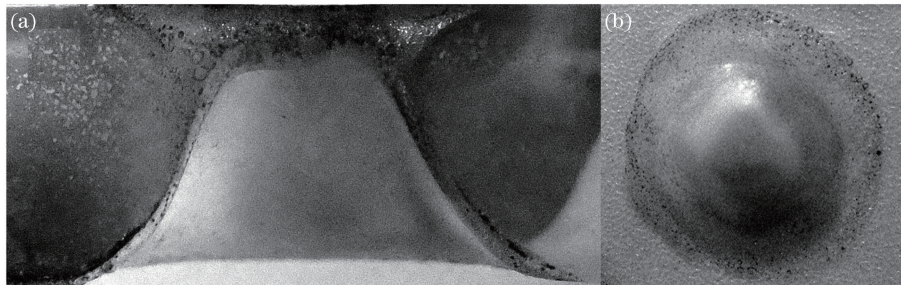


图 10 空间滤波器旋转失调时整形光束在  $z = 2000$  mm 处波导方向的顶部凹陷。(a) 剖面图; (b) 俯视图

Fig. 10 Sunken top in intensity distribution of the shaped beam at  $z = 2000$  mm when the rotation misalignment of spatial filter happens. (a) Sectional view; (b) vertical view

### 3.4 失调对功率的影响

图 11 为空间滤波器失调对功率影响的数值模拟结果。图 11(a) 为空间滤波器横向位移失调量为  $0.1$ ,

0.2, 0.3, 0.4 mm 时, 空间滤波器所导致的输出功率损耗; 图 11(b) 为轴向位移失调量达到 10 mm 时的功率损耗; 图 11(c) 是失调角度为  $10^\circ$  时的功率损耗。横向位移造成的功率损耗随着距离的增加急剧增大。横向位移为 0.2 mm 时, 失调造成的损耗是 1.2%; 横向位移增加至 0.4 mm 时, 造成的额外损耗达到了 31.4%。而空间滤波器轴向位移失调对输出功率造成的损耗小得多, 失调达到 10 mm 时, 其造成的功率损耗仅为 1.2%, 空间滤波器旋转失调导致的功率损耗变化曲线同横向位移失调类似。失调角度为  $5^\circ$  时导致的功率损耗仅为 2%, 达到  $10^\circ$  时功率损耗迅速增加到 25%。

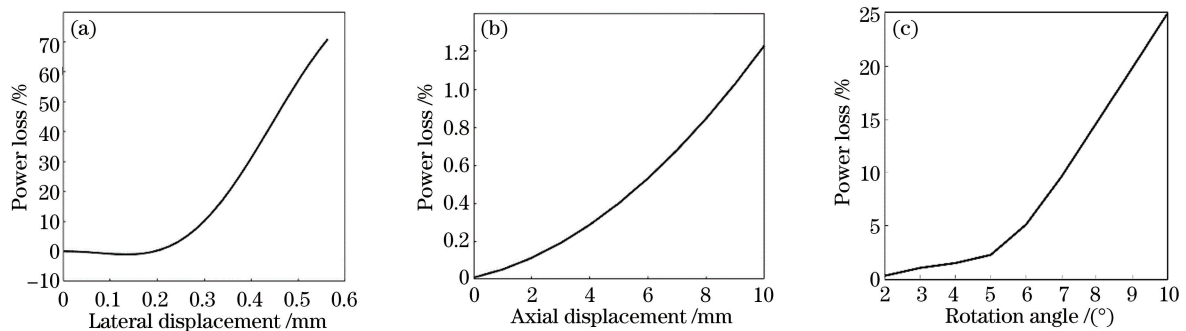


图 11 空间滤波器失调引起的功率损耗。(a) 横向位移失调; (b) 轴向位移失调; (c) 角度失调

Fig. 11 Power loss caused by the misaligned spatial filter. (a) Lateral displacement; (b) axial displacement; (c) angle misalignment

## 4 结 论

在前期工作的基础上, 对空间滤波器失调对射频板条  $\text{CO}_2$  激光器输出光束光强分布的影响进行了理论模拟与实验研究, 同时通过数值模拟研究了空间滤波器失调对输出功率的影响。

1) 横向位移失调在失调量小于 0.2 mm (空间滤波器宽度 0.9 mm) 时, 主要影响光强分布 (出现旁瓣), 输出功率变化很小; 当位移失调量大于 0.3 mm 时, 光强分布和输出功率都受到很大的影响, 光束一侧出现明显的旁瓣。

2) 轴向位移失调对输出功率的影响很小, 对输出光束光强分布有较强的影响, 但表现与横向失调不同, 光束无旁瓣但近似变成椭圆光强分布, 非稳方向与波导方向的束腰宽度差值随着输出距离的增加而增加。轴向位移正向失调 10 mm 时, 在  $z=2000$  mm 处的束腰宽度差值为 0.5 mm, 在  $z=4000$  mm 处的束腰宽度差值增加至 2.5 mm。

3) 旋转失调在失调角度小于  $5^\circ$  时, 对输出功率影响较小, 主要影响光强分布, 但与横向失调和轴向失调的影响不同, 光束中心出现凹陷; 当失调角度大于  $7^\circ$  后, 光束两侧均出现旁瓣, 与横向位移的情况不同; 此时功率受到的影响较大, 当失调角度为  $10^\circ$  时, 输出功率损耗达到 25%。

## 参 考 文 献

- 1 Maleki A, Tehrani M K, Saghafifar H, *et al.* A compact diode-pumped pulsed Nd:YAG slab laser based on a master oscillator power amplifier configuration[J]. *Laser Physics*, 2016, 26(2): 025003.
- 2 Chen J C, Li J, Xu J L, *et al.* 4350 W quasi-continuous-wave operation of a diode face-pumped ceramic Nd:YAG slab laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 50-53.
- 3 Zendzian W, Jabczynski J K, Kaskow M, *et al.* 250 mJ, self-adaptive, diode-side-pumped Nd:YAG slab laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2598-2600.
- 4 Du K M, Wu N L, Xu J D, *et al.* Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(5): 370-372.
- 5 Shen B J, Kang H X, Chen P, *et al.* Performance of continuous-wave laser-diode side-pumped Er:YSGG slab lasers at  $2.79 \mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics B*, 2015, 121(4): 511-515.
- 6 Shen Y J, Duan X M, Yuan J H, *et al.* Investigation of high-power diode-end-pumped Tm:YLF laser in slab geometry [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(8): 1958-1962.

- 7 Shen Y J, Yao B Q, Qian C P, *et al.* 108-W diode-end-pumped slab Tm:YLF laser with high beam quality[J]. Applied Physics B, 2015, 118(4): 555-559.
- 8 Bai Y, Qi M, Wang S, *et al.* CW mode-locked 1.908  $\mu\text{m}$  Tm:LiYF<sub>4</sub> slab laser based on an output-coupling graphene saturable absorber mirror[J]. Applied Physics Express, 2013, 6(10): 102701.
- 9 Liu X, Huang H T, Shen D Y, *et al.* High-power LD end-pumped Tm:YAG ceramic slab laser[J]. Applied Physics B, 2015, 118(4): 533-538.
- 10 Yang Q, Zhu X L, Ma J, *et al.* High energy 523 nm ND:YLF pulsed slab laser with novel pump beam waveguide design [J]. Optics Communications, 2015, 354: 414-418.
- 11 Xu L, Zhang H L, He J L, *et al.* Double-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser at 1064 nm[J]. Applied Optics, 2012, 51(12): 2012-2014.
- 12 Du K M, Li D J, Zhang H L, *et al.* Electro-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with a high repetition rate and a short pulse width[J]. Optics Letters, 2003, 28(2): 87-89.
- 13 Abe M, Seki H, Kowa M, *et al.* High average power, diffraction-limited picosecond output from a sapphire face-cooled Nd:YVO<sub>4</sub> slab amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2015, 32(4): 714-718.
- 14 von Grafenstein L, Bock M, Ueberschaer D, *et al.* Picosecond 34 mJ pulses at kHz repetition rates from a Ho:YLF amplifier at 2  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33142-33149.
- 15 Strauss H J, Preussler D, Esser M J D, *et al.* 330 mJ single-frequency Ho:YLF slab amplifier[J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1022-1024.
- 16 Kim G H, Yang J, Chizhov S A, *et al.* High average-power ultrafast CPA Yb:KYW laser system with dual-slab amplifier[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 3434-3442.
- 17 Nowack R R, Opower H, Schaefer U, *et al.* High-power CO<sub>2</sub> waveguide laser of the 1-kW category[C]. SPIE, 1990, 1276: 18-28.
- 18 Habich U, Heursch A, Plum H D, *et al.* Beam generation and beam shaping for a 1.5-kW diffusion-cooled annular CO<sub>2</sub> laser[C]. SPIE, 1998, 3267: 66-73.
- 19 Jiao Wentao, Xin Jianguo. Experimental study on a RF-excited slab waveguide CO<sub>2</sub> laser with the far field intensity distribution of a single suppressed peak[J]. Acta Physica Sinica, 1999, 48(10): 1875-1883.  
焦文涛, 辛建国. 射频激励板条波导 CO<sub>2</sub> 激光器远场空间压窄单峰输出模式的研究 [J]. 物理学报, 1999, 48(10): 1875-1883.
- 20 Li Zhiming, Xin Jianguo. Power output characteristic of RF excited all metal slab waveguide CO<sub>2</sub> laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 230-232.  
李志明, 辛建国. 射频激励金属板条波导 CO<sub>2</sub> 激光器的功率输出特性[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 230-232.
- 21 Gao Yungui, Zhu Yongxiang, Ding Yiguo, *et al.* Optical transform of output laser beam of RF excited slab CO<sub>2</sub> laser [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(s): 98-101.  
高允贵, 朱永祥, 丁义国, 等. 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器输出光束的光学变换[J]. 光学学报, 2008, 28(s): 98-101.
- 22 Xiao L S, Qin Y X, Tang X H, *et al.* Beam shaping characteristics of an unstable-waveguide hybrid resonator[J]. Applied Optics. 2014, 53(10): 2213-2219.
- 23 Xiao Longsheng, Tang Xiahui, Qin Yingxiong, *et al.* Shaping characteristics of output beam of 2 kW radio frequency slab CO<sub>2</sub> laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402008.  
肖龙胜, 唐霞辉, 秦应雄, 等. 2 kW 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器输出光束整形特性研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402008.
- 24 Weber H. Collins' integral for misaligned optical elements[J]. Journal of Modern Optics, 2006, 53(18): 2793-2801.