

# 960 线光谱合束光栅的热畸变分析

徐姣<sup>1,2</sup>, 陈俊明<sup>1,2</sup>, 陈鹏<sup>2</sup>, 王勇禄<sup>1</sup>, 张益彬<sup>1</sup>, 孔钊宇<sup>1</sup>, 晋云霞<sup>1</sup>, 邵建达<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高能激光材料重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 前期通过实验和理论研究了 960 线合束光栅在不同功率密度激光辐照下的表面热畸变及远场光束质量, 认为基底受热膨胀是导致合束光栅面形质量和光束质量下降的主要原因, 但没有对合束光栅表面热量沉积和远场光束质量如何改善进行分析。通过模型改进分析了合束光栅在不同辐照功率密度下的表面温度、热畸变以及远场光束质量的变化, 而且计算分析了基底厚度对合束光栅表面温度、热畸变以及远场光束质量的影响, 并得出结论: 增加基底厚度有利于提高合束光栅的功率耐受性以及衍射光斑的远场光束质量。

**关键词** 光栅; 合束光栅; 热畸变; 光束质量; 基底厚度

中图分类号 TB131

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0505002

## Thermal Distortion of 960-Line Spectral Beam Combining Grating

Xu Jiao<sup>1,2</sup>, Chen Junming<sup>1,2</sup>, Chen Peng<sup>2</sup>, Wang Yonglu<sup>1</sup>, Zhang Yibin<sup>1</sup>,  
Kong Fanyu<sup>1</sup>, Jin Yunxia<sup>1</sup>, Shao Jianda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Lab of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In our previous work, the surface thermal distortion and far-field beam quality of 960-line spectral beam combining grating, which is irradiated by laser with different power densities, are studied by experiment and theory. The conclusion is that the thermal expansion of the substrate is the main cause of the distortion of the grating surface and the decrease of the beam quality. However, the improvement of grating surface heat deposition and the far-field beam quality are not considered. In this paper, the surface temperature, thermal distortion of grating and far-field beam quality at different irradiation power densities are analyzed with the improved model. The influences of the substrate thickness on the temperature, thermal distortion and far-field beam quality of the spectral beam combining grating are also calculated and analyzed. The conclusion is that the increase of substrate thickness can improve the power tolerance of beam combining gratings and the far-field beam quality of diffraction spots.

**Key words** gratings; spectral beam combining gratings; thermal distortion; beam quality; substrate thickness

**OCIS codes** 050.2770; 350.5340

## 1 引 言

目前, 光谱合束技术(SBC)是最有潜力实现高光束质量、高功率激光的输出方法之一<sup>[1-2]</sup>。SBC 作为非相干合束技术, 主要利用衍射元件将不同频率的子光束衍射至同一角度出射, 从而实现光谱合束,

该技术要求衍射元件必须具有宽带特性及较高的衍射效率<sup>[3-4]</sup>。多层介质光栅作为理想的衍射元件, 被普遍应用到 SBC 系统中<sup>[5-7]</sup>。随着合束功率的增加, 合束光栅在激光辐照下的温度逐渐升高, 其表面的热畸变增加, 从而导致衍射光远场光束的质量下降<sup>[8]</sup>。曾有研究人员利用迈克耳孙干涉仪测量了

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(11604352, 10704079, 11604352)、固体激光技术重点实验室基金(61424040104162404002)

作者简介: 徐姣(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事光谱合束光栅热畸变方面的研究。E-mail: xujiao@siom.ac.cn

导师简介: 晋云霞(1976—), 女, 研究员, 硕士生导师, 主要从事光功能薄膜和微结构材料设计及研制方面的研究。

E-mail: yxjin@siom.ac.cn(通信联系人)

合束光栅形变的干涉条纹,当激光功率密度为  $1.5 \text{ kW/cm}^2$  时,合束光栅的面形畸变在  $1 \mu\text{m}$  时可达  $0.1\lambda$  ( $\lambda$  为波长)。由于入射激光的功率密度太高,合束光栅畸变导致的远场光束调制还未有人研究<sup>[9-10]</sup>。2017年,本研究组的 Li 等<sup>[11]</sup>通过实验和理论研究了 960 线合束光栅在激光作用下的表面热畸变及其对远场光束质量的影响,结果表明:基底受热膨胀是导致合束光栅面形质量以及远场光斑光束质量下降的主要原因。但由于计算方法的局限性, Li 等并没有深入研究基底参数的改变对合束光栅表面温度、热畸变以及远场光束质量的影响。

本文主要利用有限元理论和合束光栅与激光相互作用的改进模型,分析了不同功率激光辐照下合束光栅的表面温升和热畸变,以及它们对衍射光束远场调制的影响,并进一步计算了合束光栅基底厚

度对表面温度、热畸变以及远场光束质量的影响。

## 2 实 验

为了研究合束光栅与激光的相互作用,采用合束光栅热畸变实验装置(如图 1 所示)测量了不同辐照功率密度下合束光栅表面的最大热畸变量、最高温度以及衍射光远场光束的质量。抽运激光和探测激光的波长分别为  $1080 \text{ nm}$  和  $1058 \text{ nm}$ ,抽运激光的功率为  $0\sim 452.6 \text{ W}$ ,探测激光的功率恒定为  $10 \text{ W}$ ,两束激光光束的半径均为  $2 \text{ mm}$ ,光栅表面的辐照功率密度为  $0\sim 3.6 \text{ kW/cm}^2$ 。图 1 左边为迈克耳孙干涉仪,用于测量光栅表面形貌的干涉条纹,利用傅里叶变换和 Zernike 多项式解析干涉条纹求得光栅的表面形貌变化。图 1 左上角的红外观测仪可以实时测量光栅表面的最高温度<sup>[11]</sup>。

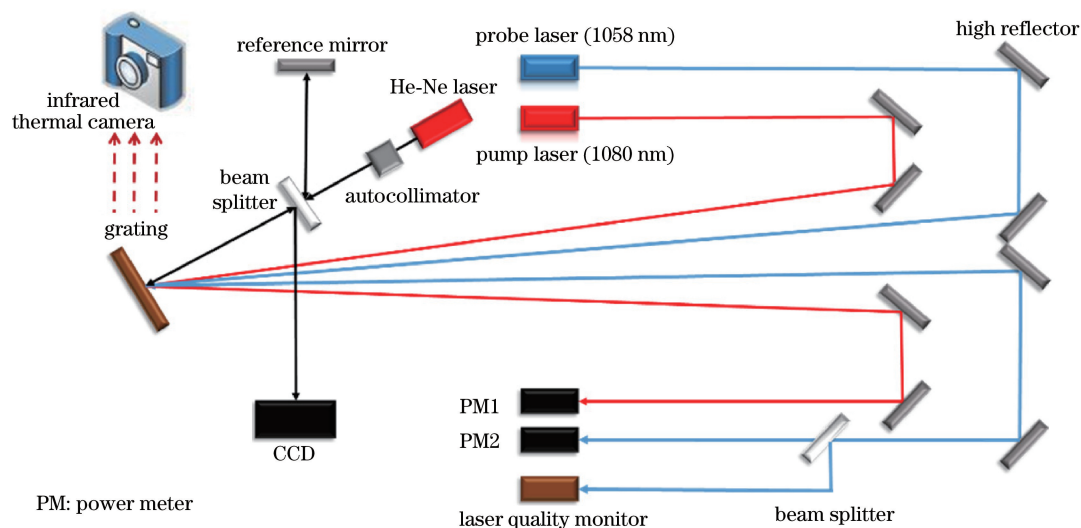


图 1 合束光栅热畸变实验装置

Fig. 1 Experimental device for thermal distortion of spectral beam combining grating

图 2(a)给出了合束光栅表面最高温度随辐照功率密度的变化。当辐照功率密度从  $0$  升高到  $3.6 \text{ kW/cm}^2$  时,合束光栅表面的最高温度从  $25.1 \text{ }^\circ\text{C}$  升至  $196.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 2(b)示出在不同辐照功率密度下,合束光栅表面的最大热畸变量  $H_{\text{max}}$  以及衍射光斑的远场光束质量  $M^2$  的变化。由图 2(b)可见:随着辐照功率密度增加,合束光栅表面的  $H_{\text{max}}$  呈线性增加,最高达到  $140 \text{ nm}$ ,  $M^2$  从  $2.35$  升高到  $2.56$ 。即当辐照功率密度为  $3.6 \text{ kW/cm}^2$ ,合束光栅表面的最高温度达到  $196.1 \text{ }^\circ\text{C}$  时,  $H_{\text{max}} \approx 140 \text{ nm}$ 。

实验结果表明,在高功率密度激光辐照下,合束光栅的温度升高,其表面会不可避免地发生热畸变,且温度越高,合束光栅的面形畸变越明显。

## 3 模型的建立

在高功率密度激光辐照下,合束光栅表面的面形会发生畸变,但面形畸变的范围远大于其畸变的高度  $H$ ,因此相邻光栅槽形结构的高度差  $\Delta H$  可以忽略不计,所以不考虑面形畸变对合束光栅衍射角度的影响;加之基底膨胀是合束光栅发生面形畸变的主要原因,所以在建模过程中忽略膜层以及光栅槽形的畸变高度,利用石英基底代替合束光栅<sup>[11]</sup>。

如图 3(a)所示,光束的入射角和出射角都为 Littrow 角  $\alpha$ ,图中黑色平面  $p$  为衍射光束的测量面。首先将衍射光束沿着光栅面做镜面对称得到图 3(b)所示的光路图,图 3(b)中左右两条光路的

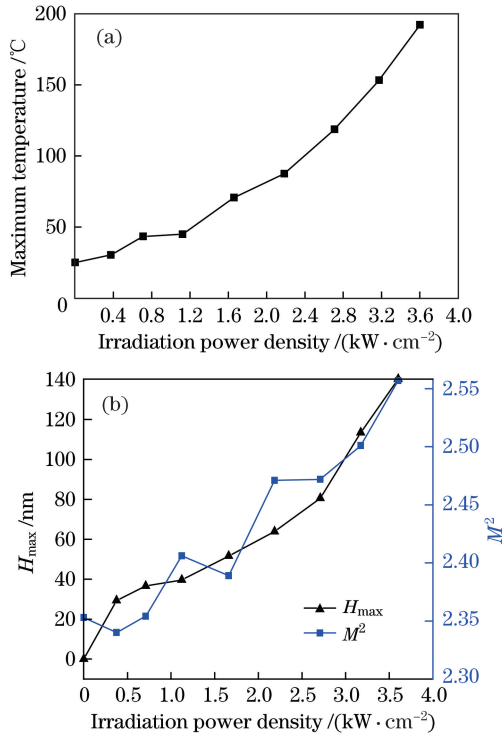


图 2 (a)合束光栅表面的最高温度随辐照功率密度的变化;  
(b)  $H_{\max}$  和  $M^2$  随辐照功率密度的变化

Fig. 2 (a) Variation of maximum temperature of spectral beam combining grating surface with irradiation power density;  
(b) variations of  $H_{\max}$  and  $M^2$  with irradiation power density

光程差为  $2a$  (其中  $a = 2r \tan \alpha$ ,  $r$  为激光光束的半径);然后将图 3(b)中的衍射光束绕着合束光栅上的表面几何中心做中心对称得到图 3(c)所示的光路图,保持测量面  $p$  上的相位分布不变,则  $p$  面与光线传输方向成  $\theta$  角,满足  $\tan \theta = 2r / (2a)$ 。为研究  $H$  对衍射远场光斑的调制,  $p$  距合束光栅的距离理论上为无限远,根据夫琅禾费衍射,可以借助凸透镜(焦距为  $f$ )将无穷远处的衍射图像移至透镜的像方焦平面上,所以激光通过合束光栅后的远场衍射可以简化为图 3(d)所示的光路模型。合束光栅前为准直透镜,点光源放置在准直透镜的焦点处,点光源的数值孔径  $NA = \sin[\arctan(r/f'')]$ ,  $f''$  为准直透镜的焦距,准直后光束的直径为  $2r$ 。实验测得的  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ , 光束直径  $2r = 4 \text{ mm}$ , 合束光栅基底(石英)与光路的夹角  $\alpha = 30^\circ$ 。石英基底的热力学参数如表 1 所示。合束光栅对激光的吸收为面吸收,以光栅层以及多层膜中的热量沉积为主,定义合束光栅的表面吸收系数为  $1468.5 \times 10^{-6}$ , 合束光栅的初始温度为  $25^\circ\text{C}$ , 光栅面与空气的对流换热系数为  $15 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。利用 Comsol 的几何光学、固体传热、固体力学的多物理场耦合建立如

图 3(d)所示的光路图,模拟了石英基底在激光照射下表面受热膨胀产生的热畸变以及石英表面热畸变对衍射激光远场光斑调制的影响。

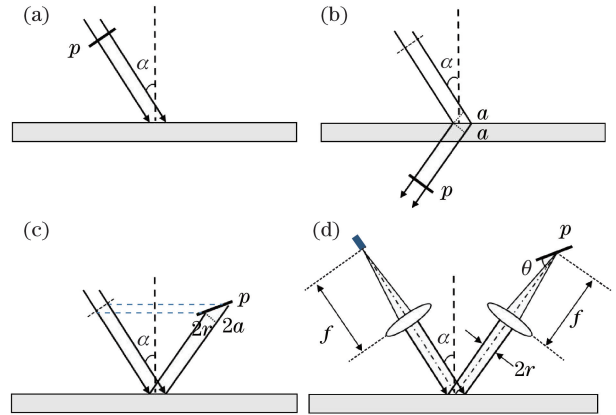


图 3 (a)~(c)建模的中间过程;(d)简化后的模拟光路图  
Fig. 3 (a)~(c) The middle processes of model building;  
(d) the simulated light path diagram after simplification

表 1 石英基底的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of silica substrate

Parameter	Value
Density / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2200
Refractive index	1.44
Heat capacity / ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	670
Thermal conductivity / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1.4
Thermal expansion / ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	0.55
Young's modulus / GPa	72
Poisson ratio	0.17

## 4 计算结果分析

### 4.1 辐照功率密度对合束光栅表面温度、热畸变以及光束质量的影响

图 4(a)为不同辐照功率密度激光照射下合束光栅表面的面形畸变,当辐照功率密度为  $3.6 \text{ kW/cm}^2$  时,合束光栅的面形畸变  $H = 136 \text{ nm}$ , 与实验测量值( $140 \text{ nm}$ )接近。图 4(b)、(c)、(d)、(e)分别对应  $0.08, 2.00, 3.60, 10.00 \text{ kW/cm}^2$  辐照功率密度下衍射光斑的远场像,可以看出,随着辐照功率密度增加,远场光斑的光束质量逐渐下降。表 2 为不同辐照功率密度下合束光栅表面的最高温度、 $H_{\max}$  以及  $M^2$ , 其中  $M^2$  的计算公式为:  $M^2 = \pi D_0 D_F / (f' \times 4\lambda)$ ,  $D_0$  为束腰半径,  $D_F$  为透镜聚焦后光斑的尺寸,  $f'$  为聚焦透镜焦距,  $\lambda$  为入射光波长。当合束光栅表面没有热畸变时,远场光斑纵向( $y$ 轴方向,  $p$  面内垂直于纸面方向)的光束质量  $M_y^2$  近似为 1, 此时对应的

纵向光斑尺寸为  $D_{F0}$ , 所以图 4 中不同辐照功率密度下的远场光束质量可通过光斑直径  $D_F$  与  $D_{F0}$  的比值计算得到。

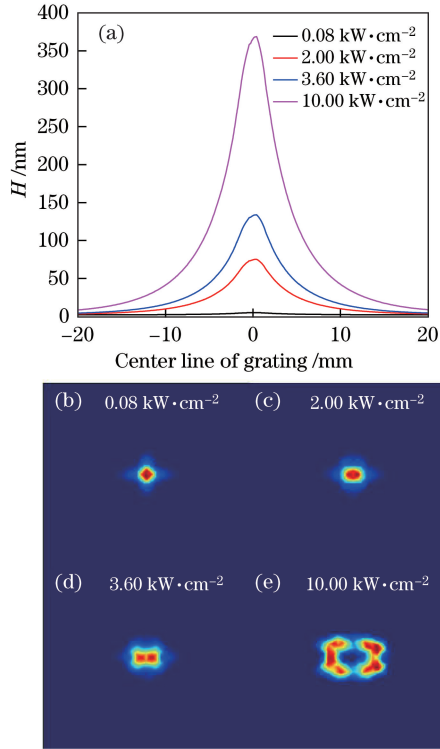


图 4 (a) 不同辐照功率密度下合束光栅表面的畸变；  
(b)~(e) 不同辐照功率密度下远场光斑的强度分布  
Fig. 4 (a) Distortion of spectral beam combing grating surface at different irradiation power densities;  
(b)-(e) the intensity distributions of far-field beam spots at different irradiation power densities

表 2 不同辐照功率密度下合束光栅表面的最高温度、最大热畸变量以及远场光束的质量

Table 2 Maximum temperature, maximum thermal distortion and far-field beam quality of spectral beam combining grating at different irradiation power densities

Irradiation power density / (kW·cm <sup>-2</sup> )	0.08	2.00	3.60	10.00
Maximum temperature /°C	20	118	200	528
$H_{max}$ /nm	4	76	136	372
$M_x^2$	1.04	1.29	1.58	3.17
$M_y^2$	1.00	1.01	1.04	1.83

由表 2 可以看出: 1) 当辐照功率密度为  $3.6 \text{ kW/cm}^2$  时,  $H_{max} = 136 \text{ nm}$ , 合束光栅表面的最高温度为  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , 与实验测得的结果 ( $H_{max} = 140 \text{ nm}$ , 合束光栅表面最高温度为  $196.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 吻合; 2) 合束光栅表面的最高温度以及  $H_{max}$  随着辐照功率密度的增加而增加, 与图 1 中合束光栅表面最高

温度以及  $H_{max}$  的变化趋势相同, 再次验证了模型的正确性; 3) 横向 ( $x$  轴方向,  $p$  平面内平行于纸面方向) 的远场光束质量比纵向下下降得快。

上文中无论是合束光栅表面温度与热畸变之间的关系, 还是它们随辐照功率密度变化的趋势都和实验测量的结果吻合得较好, 所以该合束光栅与激光相互作用的模型可以用于进一步的数据分析。

#### 4.2 基底厚度对合束光栅表面温度、热畸变以及光束质量的影响

为了改善合束光栅表面的热量沉积, 降低高功率激光对合束光栅表面的影响。利用上述模型分析了不同基底厚度的合束光栅在相同功率密度的激光辐照下, 其表面温度、热畸变以及光束质量的变化。

本研究中计算的基底厚度范围为  $1 \sim 5 \text{ mm}$ , 步长为  $0.5 \text{ mm}$ 。保持激光辐照功率密度为  $3.6 \text{ kW/cm}^2$ 、光斑大小为  $2 \text{ mm}$  不变, 合束光栅表面的温度以及热畸变达到稳态后的分析如下。

图 5(a) 为相同辐照功率密度下合束光栅表面最高温度随基底厚度的变化规律, 合束光栅表面最高温度在前期下降得较快, 最后缓慢趋于稳定。图 5(b) 为不同基底厚度的合束光栅的表面热畸变  $H$ ,

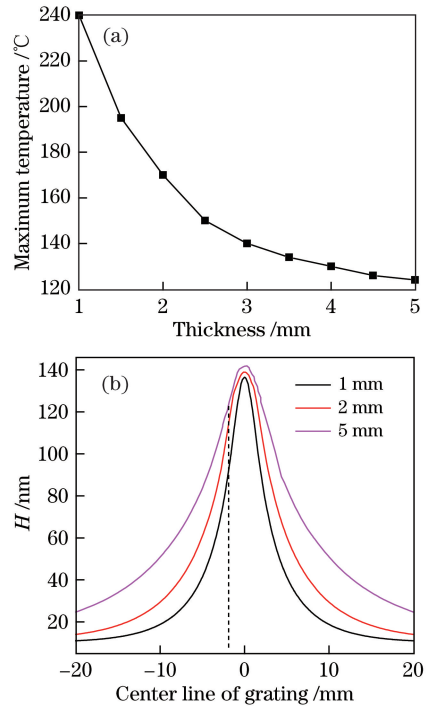


图 5 (a) 合束光栅表面最高温度随基底厚度的变化;  
(b) 不同基底厚度合束光栅的热畸变

Fig. 5 (a) Variation of maximum temperature of spectral beam combining grating with the thickness of substrate;  
(b) thermal distortion of spectral beam combining grating with different substrate thicknesses



虚线( $x = -2$  mm, 光斑边界)与表面热畸变曲线相交,从下往上交点处的斜率依次为 26.7、24.3、19.5,所以基底越厚,光栅中心区域的畸变越平缓,越有利于降低衍射光的远场光束质量  $M^2$ 。表 3 为不同基底厚度的合束光栅在相同辐照功率密度下远场光束质量的变化规律, $x$  轴方向的远场光束质量  $M_x^2$  随着基底厚度的增加而缓慢减小, $y$  轴方向的光束质量近似不变。

表 3 不同基底厚度的合束光栅在相同功率密度激光辐照下的远场光束质量

Table 3 Far-field beam quality of spectral beam combing grating with different substrate thicknesses at laser irradiation with same power density

Thickness /mm	1	2	3	4	5
$M_x^2$	1.60	1.55	1.50	1.45	1.39
$M_y^2$	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03

在相同功率密度激光的辐照下,基底的厚度越大,合束光栅表面的温度越低;随着基底厚度增加,合束光栅表面温度的下降呈先较快后逐渐趋于稳定的趋势,表面最大热畸变略有增加,衍射光的远场光束质量缓慢降低。

## 5 结 论

本研究主要针对合束光栅的热畸变进行了实验和理论研究,首先通过实验测量了合束光栅表面的最高温度、最大热畸变以及远场光束质量随辐照功率密度的变化规律;之后在实验的基础上利用几何光学理论、固体传热以及固体力学的多物理场耦合建立了合束光栅与激光的相互作用模型;最后利用模型模拟计算了合束光栅基底厚度对其表面温度、热畸变及远场光束质量的影响。基底厚度越大,合束光栅的表面温度越低,热畸变略有增加,远场光束质量缓慢减小,所以增加基底厚度有利于提高合束光栅的功率耐受性,改善光栅衍射光的远场光束质量。

虽然在理论上分析了光栅基底厚度对光栅表面热沉积以及远场光束质量的影响,但还需要进行实验验证,所以下一步将制备不同基底厚度的光栅,以验证基底厚度对光栅表面温升以及远场光束质

量的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, *et al.* High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3118-3120.
- [2] Drachenberg D, Divliansky I, Smirnov V, *et al.* High-power spectral beam combining of fiber lasers with ultra high-spectral density by thermal tuning of volume Bragg gratings[C]. SPIE, 2011, 7914: 79141F.
- [3] Loftus T H, Thomas A M, Hoffman P R, *et al.* Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 487-497.
- [4] Augst S J, Goyal A K, Aggarwal R L, *et al.* Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers[J]. Optics Letters, 2003, 28(5): 331-333.
- [5] Wang J P, Jin Y X, Shao J D, *et al.* Optimization design of an ultrabroadband, high-efficiency, all-dielectric grating[J]. Optics Letters, 2010, 35(2): 187-189.
- [6] Zhu Z D, Gou L, Jiang M H, *et al.* High beam quality in two directions and high efficiency output of a diode laser array by spectral-beam-combining[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 17804-17809.
- [7] Zhang J, Peng H Y, Fu X H, *et al.* CW 50 W/ $M^2 = 10.9$  diode laser source by spectral beam combining based on a transmission grating[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3627-3632.
- [8] Yang L, Wu Z, Zhang B. Influence of thermal deformation of a multilayer dielectric grating on a spectrally combined beam[J]. Applied Optics, 2016, 55(32): 9091-9100.
- [9] Liu A P, Mead R, Vatter T, *et al.* Spectral beam combining of high-power fiber lasers[C]. SPIE, 2004, 5335: 81-88.
- [10] Loftus T H, Liu A P, Hoffman P R, *et al.* 522 W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. Optics Letters, 2007, 32(4): 349-351.
- [11] Li L X, Liu Q, Chen J M, *et al.* Polarization-independent broadband dielectric bilayer gratings for spectral beam combining system[J]. Optics Communications, 2017, 385: 97-103.