



·激光数值仿真·

# 大功率半导体激光器光谱合束 光栅热效应分析\*

傅博文<sup>1,2</sup>, 章勤男<sup>1,2</sup>, 田 勇<sup>1</sup>, 田劲东<sup>1,2</sup>

(1. 深圳大学 物理与光电工程学院, 广东 深圳 518061; 2. 深圳市智造激光技术研究院, 广东 深圳 518107)

**摘 要:** 提出了一种大功率半导体激光器光谱合束光栅仿真模型。该模型针对光谱合束中的核心器件光栅的光-热-应力变化特性进行了分析。数值分析结果表明,当激光巴条功率为 200 W,自然对流系数为  $10 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$  时,衍射光栅上温度最高点可升高至 346.52 K,应力最高点可升高至 0.4825 Pa,光栅表面变量最高为 52.28 nm/mm,这将会使得反馈光束中心位置发生 0.25~0.3 mm 的偏移,从而影响激光功率以及合束效率。减少衍射光栅基底厚度,在相同激光光源条件下工作,温度、应力、面形以及应变的变化均能有效抑制,这与实验结果具有较高的一致性。该方法为大功率半导体激光器的结构设计和光学器件的测试分析提供了有效的多物理场分析,为激光器设计和测试提供了综合分析数值模型。

**关键词:** 光谱合束; 半导体激光器; 衍射光栅; 多物理场; 数值模型

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210271

## Analysis of thermal effect of high-power semiconductor laser spectral combining grating

Fu Bowen<sup>1,2</sup>, Zhang Qinnan<sup>1,2</sup>, Tian Yong<sup>1</sup>, Tian Jindong<sup>1,2</sup>

(1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China;

2. Research Institute of Laser Processing Technology and Intelligent Manufacturing, Shenzhen 518107, China)

**Abstract:** This paper presents a simulation model of a high-power semiconductor laser beam combining grating. This model analyzes the optical-thermal-stress change characteristics of the core device grating in the spectrum combining. The numerical analysis results show that when the power of the laser bar is 200 W and the natural convection coefficient is  $10 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ , the highest temperature on the diffraction grating can be increased to 346.52 K, and the highest stress point can be increased to 0.4825 Pa, The maximum deformation per millimeter of the grating surface is 52.28 nm, which will cause the center position of the feedback beam to shift by 0.25 to 0.3 mm, which will affect the laser power and beam combining efficiency. By reducing the thickness of the diffraction grating substrate and working under the same laser light source conditions, the changes in temperature, stress, surface shape and strain can be effectively suppressed, which is consistent with the experimental results. This method provides an effective multi-physics analysis method for the structural design of high-power semiconductor lasers and the testing and analysis of optical devices, and provides a comprehensive analysis numerical model for laser design and testing.

**Key words:** spectral beam combining, semiconductor laser, diffraction grating, multiphysics, numerical model

半导体激光器具有高电光转换效率、寿命长、体积小和质量小等优点,被广泛用于材料加工、医疗、通讯以及军事技术等领域<sup>[1-4]</sup>。高功率半导体激光器的研制是国防科工委重点项目之一,也是国防十六项关键技术中光电技术,而激光器光束合束技术是进一步提高激光器功率以及光束质量的关键技术。高功率半导体激光器合束方式包

\* 收稿日期:2021-10-06; 修订日期:2021-10-30

基金项目:广东省重点领域研发计划资助项目(2020B090922005);国家自然科学基金面上项目(62075140)

联系方式:傅博文, 1910454038@email.szu.edu.cn。

通信作者:田劲东, jindt@szu.edu.cn。

括常规激光合束 (TBC)<sup>[5]</sup>、密集波长合束 (DWDM)<sup>[6-7]</sup> 和光谱合束 (SBC)<sup>[8]</sup>。光谱合束技术具有合束效率高、合束光束质量好的特点,因而被广泛用于 kW 级半导体激光器的研制。2011 年, TeraDiode 公司采用光谱合束技术得到 900 W 的光纤耦合泵浦激光器,用于金属切割<sup>[9]</sup>; 2017 年, Trumpf 公司报道了一种连续输出功率 880 W、电光效率大于 60% 的高功率激光器<sup>[10]</sup>; 2016 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所报告了一种基于偏振无关多层介质光栅的 10.8 kW 功率光谱合束半导体激光器,其合束效率为 94%<sup>[11]</sup>。随着高功率半导体激光器技术的发展以及激光器功率的提高,光谱合束的核心器件衍射光栅的热损伤和形变将对激光器的合束效率和稳定性产生较大影响。常规的检测手段难以在不破坏激光光路的前提下检测和分析光栅器件在强激光作用下的变化。这为激光器的设计和分析带了困难。

数值仿真是目前研究光谱合束效率最为常用的方法。国内外围绕光谱合束衍射光栅的仿真技术进行了大量研究,提出了分析衍射光栅衍射效率以及光谱合束半导体激光器效率的仿真模型。侯睿等<sup>[12]</sup>利用相位迭加方法分析了衍射光栅参数对激光合束系统效率的影响。张俊明等<sup>[13]</sup>模拟了一种亚波长矩形透射式衍射光栅,通过优化光栅结构,控制光栅衍射级次,实现了光栅波分复用,减小了光谱合束系统的损耗。上述的衍射光栅数值模型仅分析光场作用下,不同结构对光栅衍射效率的影响。徐姣等<sup>[14]</sup>研究了高功率激光作用下光栅的温升,推导出温度场方程。王汉斌等<sup>[15]</sup>模拟了激光功率、光斑半径、衬底尺寸和辐照时间对多层介质光栅热变形的影响。然而,上述模型都缺少光栅微结构发生热应变后光栅衍射效率和反馈光束偏移的数值模型。常用的衍射光栅数值分析方法包括单矩法<sup>[16]</sup>、有限差分法<sup>[17]</sup>和有限元法。有限元法由于其离散的网格剖分能够匹配模型任意几何形状,可适用任意几何模型的光栅模型及线栅单元的数值建模,具有良好的通用性。本文提出了一种多物理场的高功率半导体激光器光谱合束仿真模型,基于有限元法建立以热传导和弹性力学方程为基础,耦合光学、热力学物理模型的透射式衍射光栅 (TDG) 数值分析模型。通过耦合激光器功率与模型的光热响应参数,实现光栅在激光器工作中的温度变化与分布的分析;根据温度与光栅应力的关系建立热-应力模型,分析温度变化与分布对光栅应力分布影响,并分析其面形变化量、光栅衍射效率及衍射角变化量等参数。

## 1 多物理场模型

### 1.1 基于 COMSOL 的激光器光谱合束模型

光谱合束半导体激光器由激光光源、转换透镜、衍射光栅及输出耦合镜组成。光栅位于转换透镜后焦面,激光光源输出不同波长的激光经转换透镜会聚于衍射光栅上一点;不同波长不同入射角激光经衍射光栅后, -1 级衍射光以相同角度出射,并经输出耦合镜输出。激光器结构示意图如图 1 所示。

基于 mini-bar 的光谱合束半导体激光器具有更小的“Smile”效应、慢轴尺寸以及可以通过沿快轴方向上的堆叠,均化合束激光的快慢轴光束质量,便于进一步的光纤耦合输出<sup>[18]</sup>,所以本仿真采用 5 个 mini-bar 半导体激光器作为激光光源。mini-bar 输出功率为 200 W, mini-bar 输出光中心波长  $\lambda_i (i=1,2,3,4,5)$  分别为 951.2 nm、961.4 nm、971.0 nm、981.1 nm 和 990.5 nm。mini-bar 与距离光栅  $l_1=40$  mm, 光栅距离输出耦合镜  $l_2=16$  mm。根据上述结构,利用 COMSOL 对光谱合束结构进行建模,建模对象为用于光谱合束激光器的 T-1600-970s 高效率衍射光栅。将传输衍射光栅周期性结构的散射问题转换成一个线栅单元的周期性边界,该边界由  $\Gamma_i (i=1,2,3,4)$  组成,衍射光栅周期性结构如图 2 所示。线栅单元周期性边界参数如表 1 所示。

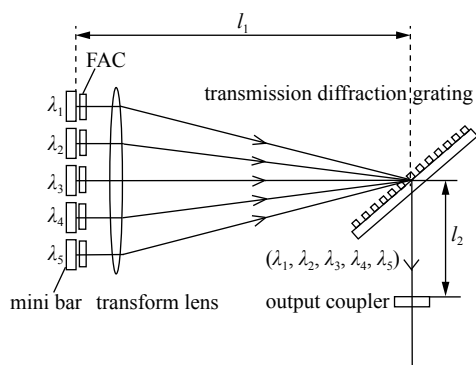


Fig. 1 Schematic diagram of laser structure

图 1 激光器结构示意图

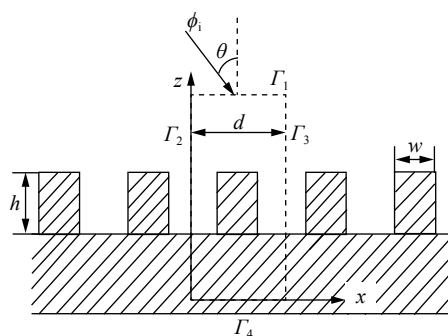


Fig. 2 Periodic structure of diffraction grating

图 2 衍射光栅周期性结构

表 1 线栅单元周期性边界参数

Table 1 Periodic boundary parameters of wire grid unit

grating period $d/\text{nm}$	microstructure height $h/\text{nm}$	microstructure width $w/\text{nm}$	air refractive index $n_0$	incident angle $\theta/(\circ)$
625.0	1725.0	400.0	1.0	$\theta_i(i=1,2,3,4,5)$

对由  $\Gamma_i(i=1,2,3,4)$  组成的周期性边界进行建模, 激光光束为 TE 模平面波以  $\theta$  入射, 根据文献 [19] 的推导, 边界-1 级衍射光衍射效率

$$\eta_{-1} = \frac{\sqrt{k_0^2 - (k_0 \sin \theta - 2\pi/d)^2}}{\sqrt{k_0^2 n^2 - (k_0 \sin \theta - 2\pi/d)^2}} \left| \int_0^d \frac{\varphi(x, z)}{\sqrt{d}} e^{-j(k_0 \sin \theta - 2\pi/d)x} dx \right|^2 \quad (1)$$

式中: 零阶弗洛盖本征模  $\phi(x, z) = e^{-jk_0 \sin \theta \cdot x} e^{-jk_0 \cos \theta \cdot z}$ ,  $d$  为光栅周期。通过对  $\Gamma_4$  边界  $x$  方向各微元的-1 级衍射分量的电场求和取平方, 即可得到该线栅单元-1 级衍射光衍射效率。

由于光栅微结构高度仅数百纳米, 该型衍射光栅仿真仅考虑基底的多物理场模型, 光栅模型示意图如图 3 所示。衍射光栅基底几何尺寸长度  $L=31.8 \text{ mm}$ , 高度  $H=12.3 \text{ mm}$ , 厚度  $W=1 \text{ mm}$ , 光栅线密度为 1600 线/mm。常见衍射光栅基底材料物理参数如表 2 所示, 其中  $n$  为材料的折射率,  $\kappa$  为材料的衰减系数,  $k$  为热导率,  $\rho$  为材料密度,  $C_p$  为比热容,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $E$  为杨氏模量,  $\mu$  为泊松比。本文选择石英玻璃作为衍射光栅材料。利用 COMSOL 进行多物理场仿真求解时, 取时间步长为 1/6 min, 总时长为 10 min。衍射光栅初始温度  $T_0=293.15 \text{ K}$ , 外界流体温度  $t_\infty=293.15 \text{ K}$ , 对流传热系数  $h_0=10 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。

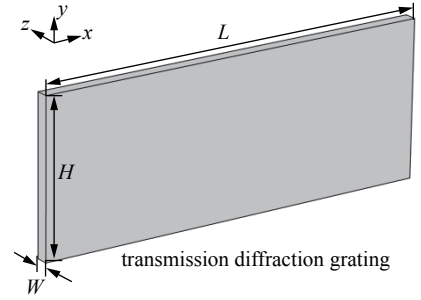


Fig. 3 The geometric model of the diffraction grating substrate

图 3 衍射光栅基底几何模型

表 2 常见衍射光栅基底材料物理参数

Table 2 Physical parameters of common diffraction grating substrate materials

material	$n$	$\kappa$	$k/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$C_p/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})]$	$\alpha/\text{K}^{-1}$	$E/\text{MPa}$	$\mu$
quartz glass	1.508	$2.89 \times 10^{-8}$	1.38	2203	703	$5.5 \times 10^{-7}$	$7.31 \times 10^4$	0.17
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	1.816	—	11.06	4551	1582.7	$6.94 \times 10^{-6}$	$2.86 \times 10^5$	0.25
Si(100)	3.579	$7.49 \times 10^{-4}$	152.46	2330	707.12	$2.57 \times 10^{-6}$	$1.31 \times 10^5$	0.28

## 1.2 多物理场模型

当高功率激光光束射入光栅时, 根据朗伯定律, 激光光强随射入介质的深度增加而逐渐减少<sup>[20]</sup>。入射光强度  $I_0$  与光栅上激光强度  $I$  的关系为

$$I = I_0 e^{-At} \quad (2)$$

式中:  $A$  为材料的吸收系数,  $A = -2k_0 \kappa / n$ , 其中,  $n$  为材料的折射率,  $\kappa$  为材料的衰减系数,  $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ , 为真空中波数,  $\lambda_0$  为真空中波长。激光光束以功率  $P_0$  入射透射过光学元件后, 光学元件吸收的光功率

$$P = P_0 (1 - e^{-At}) \quad (3)$$

根据传热学原理, 控制体总能量的增量等于单位时间内质量力和表面力所做的功、进入控制体内的净热量和控制体内的内热源发热。光学元件被材料吸收的光能转换为材料的内能, 透光区域温度升高的同时内能从温度高的区域向温度低的区域传导, 当内能传播到光栅表面时, 原本光栅表面与外界空气的热平衡被破坏, 在光栅表面发生对流传热。根据能量平衡方程<sup>[21]</sup>与边界条件, 我们可以计算光栅温度分布。能量平衡方程表达式为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \nabla^2 T + \varphi_v \quad (4)$$

式中:  $T = T(x, y, z, \tau)$  为某一时刻光栅上某点的温度,  $\tau$  为时间;  $k$  取正值时, 表示热量目标光学元件的从高温区向低温区流动。 $\varphi_v$  为内热源, 按照有限元法, 我们将光栅分成多个体积微元进行计算, 可表示为

$$\varphi_V = \frac{dP_V}{dV} \quad (5)$$

式中:  $dP_V$  为单位体积微元内吸收的光功率,  $dV$  为单位体积微元体积。  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子, 表达式为

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (6)$$

式 (3) 的初始条件:  $\tau=0, T=T_0$ 。

$$\text{边界条件: } \begin{cases} x=0, -k \frac{\partial T}{\partial x} + h_0 T = h_0 t_\infty \\ x=W, k \frac{\partial T}{\partial x} + h_0 T = h_0 t_\infty \\ y=0, -k \frac{\partial T}{\partial y} + h_0 T = h_0 t_\infty \\ y=L, k \frac{\partial T}{\partial y} + h_0 T = h_0 t_\infty \\ z=0, -k \frac{\partial T}{\partial z} + h_0 T = h_0 t_\infty \\ y=H, k \frac{\partial T}{\partial z} + h_0 T = h_0 t_\infty \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $L$ 、 $W$ 、 $H$  分别为光栅的长、宽、高;  $h_0$  为光栅表面自然换热系数,  $t_\infty$  为光栅外部流体温度。

随后根据热膨胀效应原理, 每个体积微元的热膨胀效应根据拉梅方程进行计算。拉梅方程表达式为<sup>[22]</sup>

$$\begin{cases} \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \frac{\partial \theta}{\partial x} + f_x = \frac{E\alpha}{1-2\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \frac{\partial \theta}{\partial y} + f_y = \frac{E\alpha}{1-2\mu} \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \frac{\partial \theta}{\partial z} + f_z = \frac{E\alpha}{1-2\mu} \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\theta = \frac{\partial \mu_x}{\partial x} + \frac{\partial \mu_y}{\partial y} + \frac{\partial \mu_z}{\partial z}$ , 为体积应变;  $u_x = u_x(x, y, z)$ 、 $u_y = u_y(x, y, z)$  和  $u_z = u_z(x, y, z)$  为待求解的三个正交方向位移分量;  $f_x, f_y, f_z$  为三个正交方向的体积力;  $E$  为杨氏模量,  $\alpha$  为热膨胀系数。根据柯西公式, 式 (8) 的边界条件有

$$\begin{cases} x=0, u_x = u_y = u_z = 0 \\ x=W, u_x = u_y = u_z = 0 \end{cases} \quad (9)$$

通过对式 (8)、(9) 求解可以得到光栅上各点的位移变化, 再结合几何方程 (10) 和物理方程 (11) 即可得到各点的应变及应力。

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \\ \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = 2\mu\varepsilon_{xx} + \frac{\mu(E-2\mu)}{3\mu-E}\theta \\ \sigma_{yy} = 2\mu\varepsilon_{yy} + \frac{\mu(E-2\mu)}{3\mu-E}\theta \\ \sigma_{zz} = 2\mu\varepsilon_{zz} + \frac{\mu(E-2\mu)}{3\mu-E}\theta \\ \sigma_{yz} = 2\mu\varepsilon_{yz} \\ \sigma_{zx} = 2\mu\varepsilon_{zx} \\ \sigma_{xy} = 2\mu\varepsilon_{xy} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  为正应变； $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$  为剪应变； $\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$  为正应力； $\delta_{xy}, \delta_{yz}, \delta_{zx}$  为剪应力。

### 1.3 COMSOL 实施流程

首先设置高功率激光光源的参数，例如激光功率、激光快慢轴发散角等；其次构建衍射光栅三维几何模型以及设置光栅各物理场的物理参数；然后构建各物理场的求解方程组，设置初始条件及边界条件求解得到光栅光-热-应力变化；最后根据衍射光栅的热应变分布，得到线栅单元结构变化后光栅衍射效率和衍射角的变化。大功率半导体激光器光谱合束 COMSOL 实施流程如图 4 所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 光栅温度变化结果

中心波长不同的激光光束以入射角  $\theta_i=48.20^\circ, 49.62^\circ, 51^\circ, 52.49^\circ$  和  $53.93^\circ$  入射衍射光栅，各光束 -1 级次衍射光均以衍射角  $\theta_d=50.94^\circ$  射出，实现了大功率半导体激光器光谱合束光场仿真。衍射光栅光场及光栅前表面光强分布仿真结果如图 5(a) 所示，经过衍射光栅前，激光光束的总功率为 1000 W，光栅前表面处光斑强度呈高斯分布；经过光栅衍射后，激光光束总功率为 937.09 W。如图 5(b) (c) (d) 所示，由于激光功率高，光栅透光区域的温度随时间快速升高，当  $\tau=10$  min 时，受照区域中心点温度升至 353.65 K；同时，由于光栅材质热导率较高，光栅热传导速度大于光栅与空气自然对流散热的速度，因此，光栅未透光区域的温度同样快速升高。为了分析衍射光栅基底厚度对光栅温度分布的影响，激光光源功率及光束半径不变，改变衍射光栅厚度，厚度范围为 0.9~1.1 mm，步长为 0.1 mm。不同基底厚度衍射光栅透光中心点温度变化曲线如图 5(e) 所示。当光热效应作用开始阶段，光栅平均温度和透光中心点温度线性升高；持续一段时间后，温度升高的趋势开始减缓，并且对流传热系数越高，温升趋势减缓越明显。当基底厚度 ( $W$ ) 为 0.9、1.0 和 1.1 mm 时，透光中心点温度到达稳定时分别为 337.62、346.52 和 342.67 K。

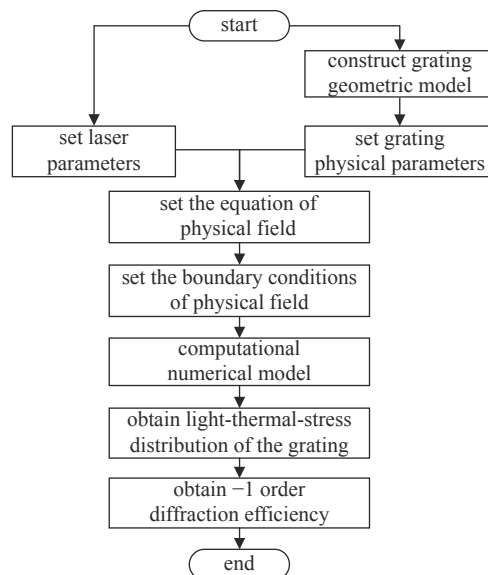
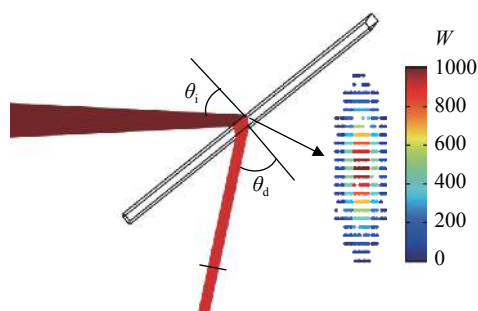
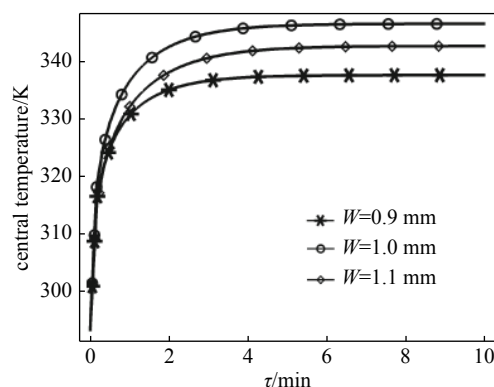


Fig. 4 Flow chart of high-power semiconductor laser spectrum combining COMSOL implementation

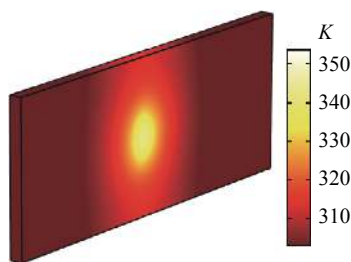
图 4 大功率半导体激光器光谱合束 COMSOL 实施流程图



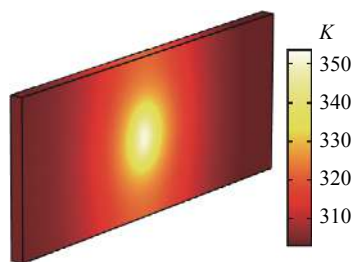
(a) grating light field and light intensity distribution



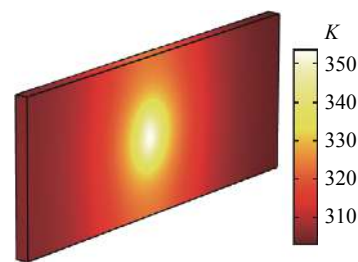
(e) temperature variation of center point of grating



(b) temperature nephogram at 1 min



(c) temperature nephogram at 3 min



(d) temperature nephogram at 10 min

Fig. 5 Light thermal simulation results

图 5 光热仿真结果

基底厚度  $W=0.9$  mm 温度变化最小, 而基底厚度  $W=1$  mm 温度变化最大。该结果表明: 衍射光栅基底厚度越大, 激光光束在光栅中传播时被吸收的能量越多; 光栅基底越厚, 光栅与空气接触的面积越大, 散热越快。因此, 在基底其他参数不变的情况下, 为减小光热效应带来的激光工作区域温度变化, 光栅选型需要从光栅厚度与表面积进行考虑。

### 2.2 光栅应力分布结果

当基底厚度  $W=1.0$  mm 时, 10 min 时刻衍射光栅应力云图如图 6(a) 所示。10 min 时刻光栅每 1 mm 表面形变云图如图 6(b) 所示, 黑色箭头为形变方向, 每 1 mm 表面形变量最大值为 52.28 nm。不同基底厚度衍射光栅中心点应力变化曲线如图 7(a) 所示。由图可知, 当基底厚度 ( $W$ ) 为 0.9、1.0 和 1.1 mm 时, 中心点应力达到稳定时分别为 0.4335、0.4825 和 0.4241 Pa。该结果表明: 衍射光栅温度升高, 衍射光栅中心点应力随时间快速升高; 随着光栅中心点温升速度减缓, 中心点应力趋于平衡。温度变化越大, 中心点应力变化也越大, 且基底厚度增加会限制中心点应力的升高。不同基底厚度衍射光栅表面光照中心形变量随时间变化曲线如图 7(b) 所示。当基底厚度 ( $W$ ) 为 0.9、1.0 和 1.1 mm 时, 光栅形变达到稳定时光照中心每 1 mm 最大形变分别为 41.96、52.28 和 47.78 nm。

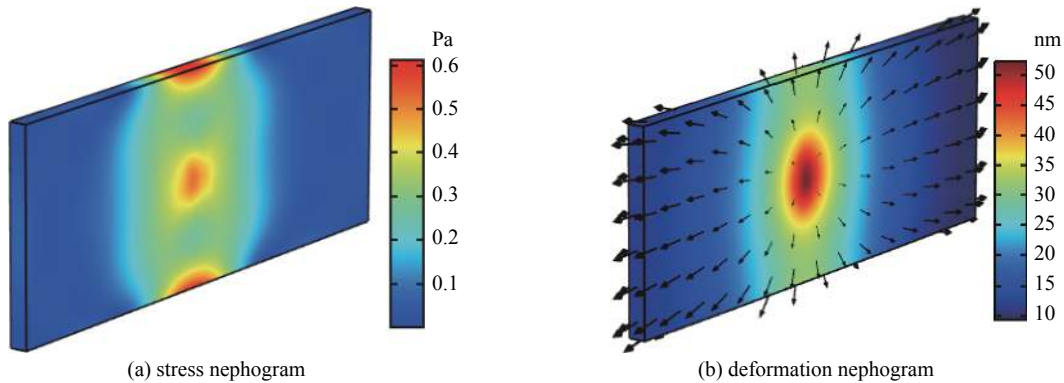


Fig. 6 Stress and deformation nephogram at 10 min

图 6 10 min 时应力及形变分布云图

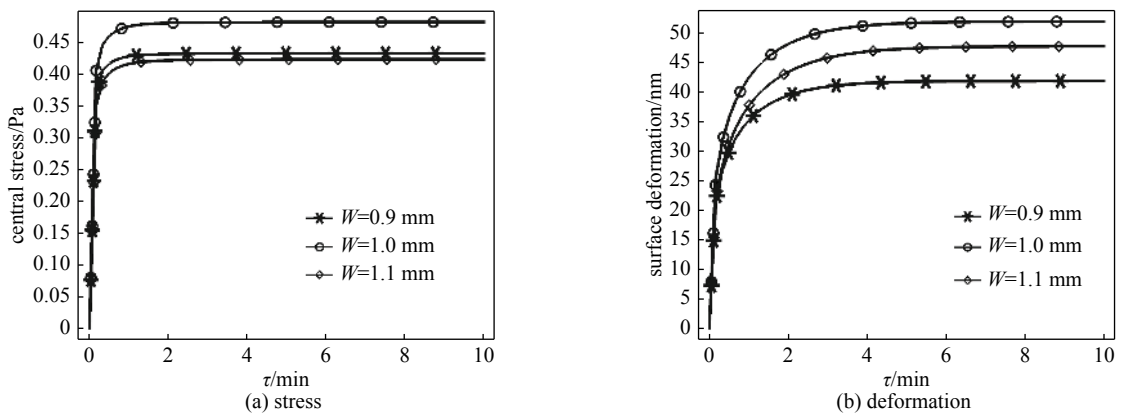


Fig. 7 Variation curves of stress and deformation at the center of diffraction grating with different thickness

图 7 不同厚度衍射光栅中心点应力及形变变化曲线

### 2.3 光栅衍射效率分析

由于激光工作区域光栅表面的正应变远大于剪应变, 将垂直于光栅刻线平面的两个正交方向的形变量分别作为线栅单元  $x$ 、 $z$  方向的形变量。光栅周期  $d$  与微结构宽度  $w$  的形变等于线栅单元  $x$  方向的形变, 微结构高度  $h$  的形变等于线栅单元  $z$  方向形变。进而根据线栅单元数值模型得到不同时刻衍射光栅线栅单元-1 级衍射光的衍射效率。线栅单元  $xyz$  方向的形变量变化曲线如图 8(a)(b)(c) 所示。当基底厚度 ( $W$ ) 为 0.9、1.0 和 1.1 mm 时, 每 1 mm 长度  $x$  方向形变量为 24.62、30.53 和 27.97 nm,  $y$  方向形变量为 21.68、27.01 和 25.13 nm,  $z$  方向形变量为 26.15、32.20 和 29.48 nm。基底厚度  $W=1$  mm 的线栅单元-1 级衍射光衍射效率变化曲线如图 8(d) 所示。对于理想

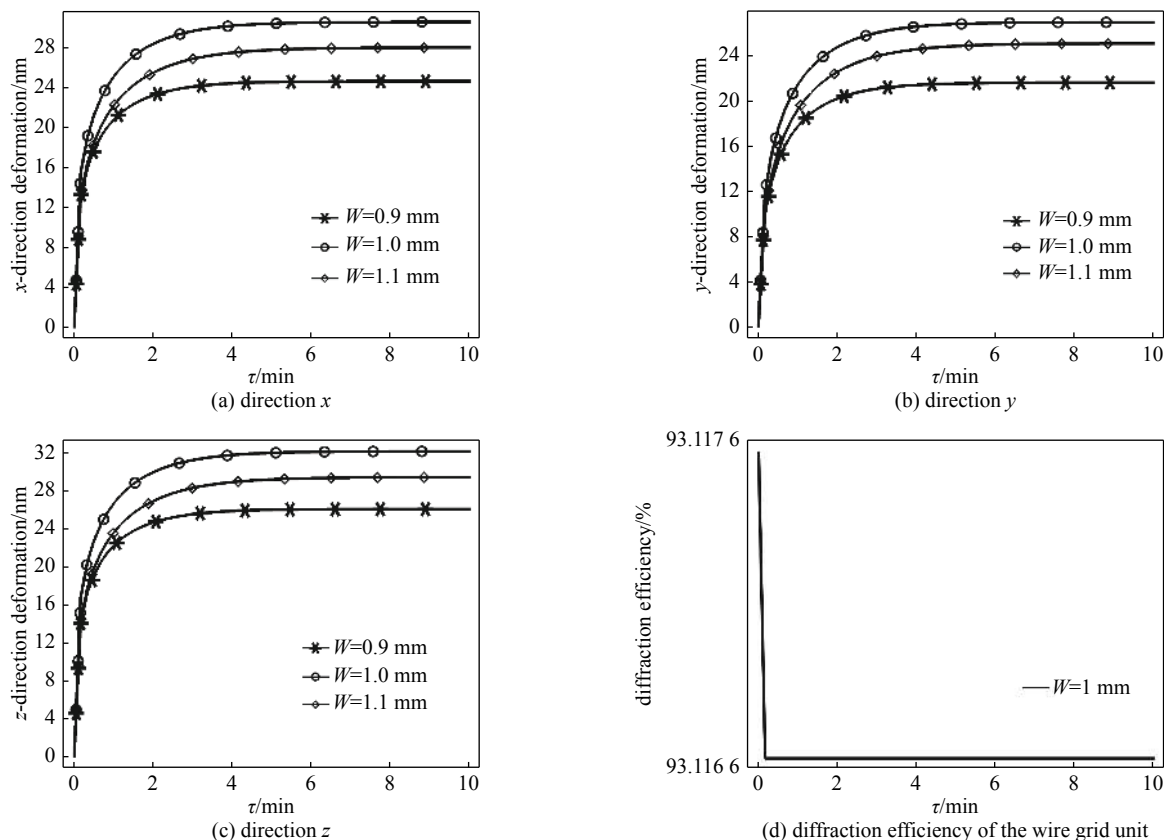


Fig. 8 Grating surface deformation in each direction and -1 order diffraction efficiency variation curves

图 8 光栅表面各方向形变及-1级衍射效率变化曲线

的线栅单元模型,微结构形变引起的衍射效率变化非常小。0 min时刻至10 min时刻线栅单元衍射效率变化小于0.001%。

## 2.4 光栅合束效率分析

由于线栅单元周期改变,光束衍射角同样也会发生变化。根据光栅方程,基底厚度 $W=1$  mm时,不同波长衍射光衍射角变化曲线如图9(a)所示。由图可知,当衍射光波长( $\lambda_i$ )分别为951.2 nm、961.4 nm、971.0 nm、981.1 nm和990.5 nm时,衍射角变化稳定时相较于初始时刻衍射角变化量均小于 $0.004^\circ$ 。各波长光束经输出耦合镜前表面反射后,部分光束再次入射到光栅表面,衍射角与二次入射角差值变化曲线如图9(b)所示。经光栅二次衍射后的衍射角与入射角差值变化曲线如图9(c)所示。由于光束的传播角度不断变化,各波长反馈光束经光栅二次衍射返回mini-bar阵列的光束中心发生偏移,影响光栅合束效率。不同波长反馈光束中心偏移量变化曲线如图9(d)所示。初始时刻,当光栅温度未升高时,各波长反馈光束均可经输出耦合镜反射后返回mini-bar中心,即偏移量为0 mm。随着温度的升高,光栅产生热形变,光栅刻线结构改变,光束传播角度发生变化,返回mini-bar的光束中心发生偏移。由图可知,当衍射光波长( $\lambda_i$ )分别为951.2 nm、961.4 nm、971.0 nm、981.1 nm和990.5 nm时,反馈光束中心偏移稳定时,分别为0.2585 mm、0.2664 mm、0.2796 mm、0.2927 mm和0.2979 mm。

## 3 结论

本文针对光谱合束半导体激光器衍射光栅的多物理场建模进行了理论分析,并提出了一种高效的多物理场耦合数值模型,用于模拟大功率激光与衍射光栅的光热效应、热膨胀引起的光栅结构应力变化以及热形变对光栅衍射效率的影响。最后以某型光谱合束半导体激光器衍射光栅参量为例,基于COMSOL进行几何建模和模型计算,得到不同mini-bar功率衍射光栅温度、应力、面形变化的时空分布以及线栅单元的-1级衍射光衍射效率与衍射角变化。结果表明:大功率激光作用下,激光作用中心点温度最高;适当增加光栅基底厚度,能够抑制光栅工作区热应力的升高;适当减少衍射光栅基底厚度,在相同激光光源条件下工作,温度、应力及形变量的变化均能够有效抑制;热形变引起的线栅单元结构变化,对线栅单元衍射效率与衍射角影响很小,但对反馈光束中心位置影响较大。该模型为光谱合束半导体激光器中衍射光栅的选型和设计提供了依据。

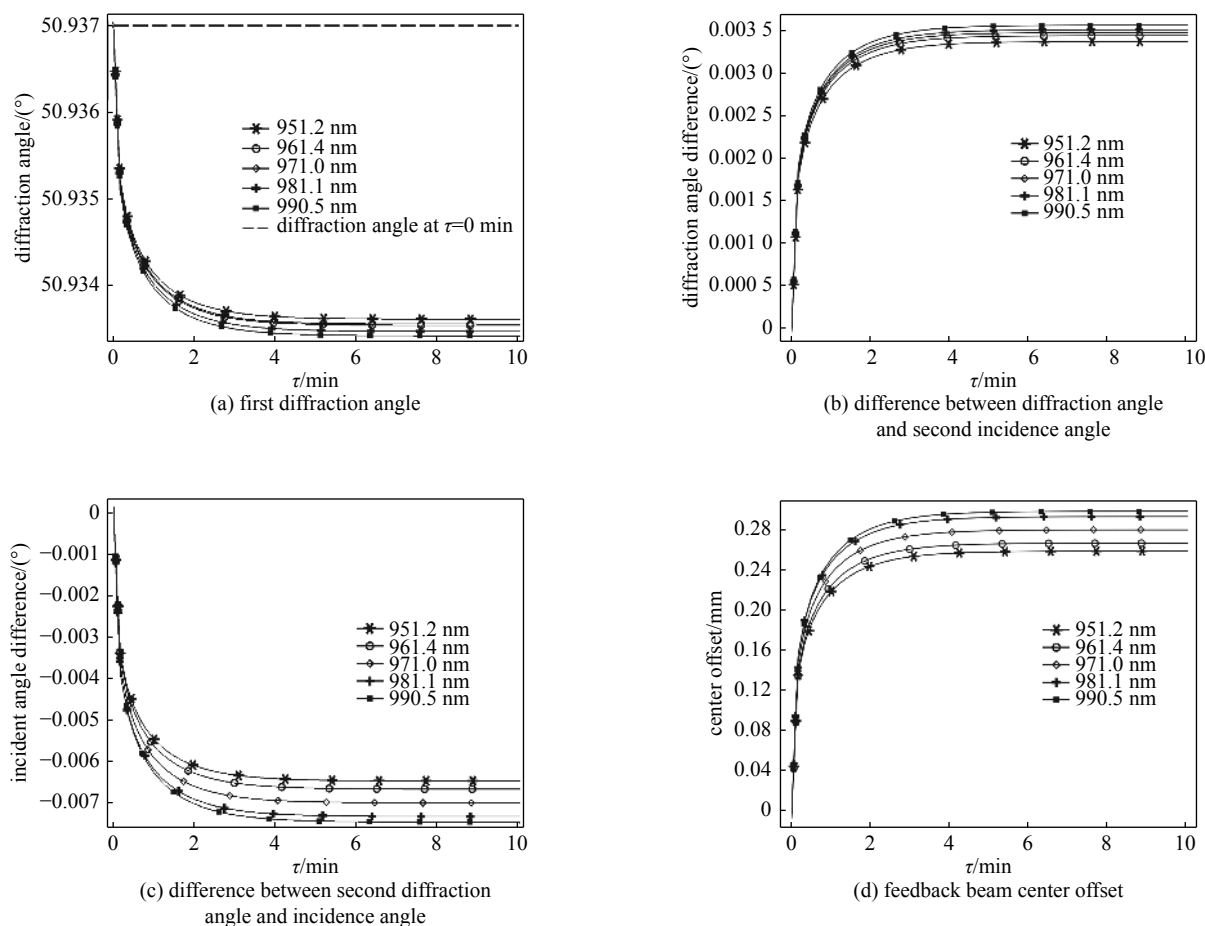


Fig. 9 Simulation results of beam angle and position offset

图9 光束角度及位置偏移仿真结果

## 参考文献:

- [1] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 567-569.
- [2] Huang R K, Chann B, Burgess J, et al. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO<sub>2</sub>, and solid state lasers[C]//Proc of SPIE. 2012: 824102.
- [3] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. *光学学报*, 2021, 41: 0114001. (Ning Yongqiang, Chen Yongyi, Zhang Jun, et al. A brief review of the development and the techniques for high power semiconductor lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41: 0114001)
- [4] Zhang Bo, Wang Zhaorong, Brodbeck S, et al. Zero-dimensional polariton laser in a subwavelength grating-based vertical microcavity[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(1): 1-2.
- [5] Könnig T, Köhler B, Wolf P, et al. Optical components for tailoring beam properties of multi-kW diode lasers[C]//Proc of SPIE. 2017, 100850G.
- [6] Hengesbach S, Krauch N, Holly C, et al. High-power dense wavelength division multiplexing of multimode diode laser radiation based on volume Bragg gratings[J]. *Optics letters*, 2013, 38(16): 3154-3155.
- [7] Zhao Yue, Zhang Jinchuan, Zhou Yuhong, et al. External-cavity beam combining of 4-channel quantum cascade lasers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 52-55.
- [8] Sun Fangyuan, Shu Shili, Hou Guanyu, et al. Efficiency and threshold characteristics of spectrally beam combined high-power diode lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, 55(1): 1-7.
- [9] Huang R K, Chann B, Glenn J D. Ultra-high brightness wavelength-stabilized kW-class fiber coupled diode laser[C]//Proc of SPIE. 2011: 791810.
- [10] Strohmaier S G, Erbert G, Meissner-Schenk A H, et al. kW-class diode laser bars[C]//Proc of SPIE. 2017: 100860C.
- [11] Zheng Ye, Yang Yifeng, Wang Jianhua, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12064-12066.
- [12] 侯睿, 赵尚弘, 胥杰, 等. 非相干光纤激光组束中光栅参数的确定[J]. *光学技术*, 2007, 33(S1): 97-99. (Hou Rui, Zhao Shanghong, Xu Jie, et al. The determination of grating parameters in incoherent fiber laser beam combination[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(S1): 97-99)
- [13] 张俊明, 吴肖杰, 马晓辉, 等. 基于光谱合束技术的透射光栅模拟设计[J]. *应用光学*, 2017, 38(3): 514-520. (Zhang Junming, Wu Xiaojie, Ma Xiaohui, et al. Simulation design of transmission grating based on spectral beam combining technique[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(3): 514-520)
- [14] Xu Jiao, Chen Junming, Chen Peng, et al. Study of the key factors affecting temperature of spectral-beam-combination grating[J]. *Optics Express*, 2018,



26(17): 21675-21678.

- [15] Wang Hanbin, Song Yinglin, Yang Yifng, et al. Simulation and experimental study of laser-induced thermal deformation of spectral beam combination grating[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 33334.
- [16] Tremain D E, Mei K K. Application of unimoment method to scattering from periodic dielectric structures[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1978, 68(6): 775-780.
- [17] 陈军, 洪伟. MEI方法分析介质光栅对平面波的绕射[J]. *通信学报*, 1997, 18(6): 26-31. (Chen Jun, Hong Wei. Analysis of plane wave diffraction by dielectric gratings with MEI[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 1997, 18(6): 26-31)
- [18] 谭昊, 孟慧成, 余俊宏, 等. 基于Mini-bar叠阵的百瓦级光栅-外腔光谱合束半导体激光光源[J]. *光学学报*, 2015, 35. (Tan Hao, Meng Huicheng, Yu Junhong, et al. Hundred-watt level spectral beam combining diode laser source based on mini-bar stack[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35)
- [19] 秦卫平, 方大纲. 有限元法结合周期边界条件分析介质光栅衍射[J]. *电波科学学报*, 2001, 16(4): 480-482. (Qin Weiping, Fang Dagang. Finite element method of solving diffraction problem of dielectric optical grating[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2001, 16(4): 480-482)
- [20] Tang Enling, Lin Xiaochu, Han Yafei, et al. Experimental research on thermal-dynamic damage effect of K9 optical lens irradiated by femtosecond laser[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2019, 11(2): 277-284.
- [21] Guan Kuiwen, Jiang Yanqi, Sun Changsen, et al. A two-layer model of laser interaction with skin: A photothermal effect analysis[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(3): 425-429.
- [22] 刘全喜, 钟鸣. LD端面泵浦薄片激光器的温度和热应力分布研究[J]. *应用光学*, 2010, 31(4): 636-640. (Liu Quanxi, Zhong Ming. Temperature and thermal stress distribution in thin disk laser end-pumped by LD[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4): 636-640)