

# 用于光谱合束技术的透射光栅设计与优化

张俊明, 吴肖杰, 马晓辉, 张 贺, 邹永刚

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 设计并制作了一种亚波长透射光栅, 利用该光栅实现了半导体激光阵列光谱合束。基于严格耦合波理论, 对光栅占空比、脊高和周期等进行了设计, 模拟了不同结构参数对光栅衍射效率的影响, 从而实现了光栅衍射效率的优化。理论计算表明, 优化后的光栅对 940 nm 激光的 -1 级衍射效率可达 92%。实验结果表明, 激光阵列光谱合束后, 输出功率为 46.2 W, 光束质量为 3.9 mm·mrad。

**关键词** 光栅; 光谱合束; 透射光栅; 激光二极管阵列; 衍射效率

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1005001

## Design and Optimization of Transmission Gratings for Spectral Beam Combining Technique

Zhang Junming, Wu Xiaojie, Ma Xiaohui, Zhang He, Zou Yonggang

State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** A sub-wavelength transmission grating is designed and fabricated, which is utilized for the realization of diode laser array spectral beam combining. Based on the strictly coupled wave theory, the grating duty ratio, ridge height and period are designed, the effect of different structural parameters on grating diffraction efficiency is simulated, and thus the optimization of the grating diffraction efficiency is realized. The theoretical calculations show that, for a 940 nm laser, the -1 order diffraction efficiency of the optimized grating can reach 92%. The experimental results show that the output power is 46.2 W and the beam quality is 3.9 mm·mrad after the laser array spectral beam combining.

**Key words** gratings; spectral beam combining; transmission grating; diode laser array; diffraction efficiency

**OCIS codes** 050.2770; 050.6624; 140.2020

## 1 引 言

半导体激光器可靠性高, 价格有竞争力, 但功率密度较低, 不能直接应用于材料加工<sup>[1]</sup>、医疗<sup>[2-3]</sup>、抽运<sup>[4-5]</sup>等领域。光谱合束(SBC)是一种可扩展的产生高亮度光束的方法, 在 SBC 技术中, 整个外腔激光器由半导体激光阵列、快慢轴准直镜、变换透镜、衍射光栅和输出耦合器组成<sup>[6]</sup>。借助于衍射光栅的色散特性, 多个半导体激光单元的光束被合为一束。SBC 技术可以实现多个合束单元的功率叠加, 同时, 合束输出光束与单个发光单元具有相同的光束质量, SBC 技术被证明是实现高亮度半导体激光输出的最为有效的合束技术之一<sup>[7-9]</sup>。

SBC 技术依赖衍射光栅的色散特性<sup>[10]</sup>, 因此衍射光栅是 SBC 技术的关键。反射光栅和透射光栅均可作为选择, 前者如闪耀光栅、多层介质膜反射光栅等, 后者如熔融石英透射光栅等。反射光栅中含有有机物, 激光损伤阈值低, 限制了其在高功率激光方面的应用; 而透射光栅在相同条件下能够获得更高的衍射效率。

**收稿日期:** 2017-04-07; **收到修改稿日期:** 2017-05-23

**基金项目:** 吉林省科技计划重点项目(20140204028GX, 20150204068GX)

**作者简介:** 张俊明(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器方面的研究。E-mail: 13843183398@163.com

**导师简介:** 张 贺(1985—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光电子技术及应用方面的研究。

E-mail: zhanghe@cust.edu.cn(通信联系人)

国内于 2013 年首次提出基于透射式光栅的外腔 SBC 结构<sup>[11]</sup>。

本文基于 Rsoft 光学软件的严格耦合波理论<sup>[12-13]</sup>, 利用性能稳定的熔融石英材料设计了一种亚波长矩形透射式衍射光栅, 实现了高亮度的激光二极管阵列 SBC。通过对光栅的优化设计, 获得了波长为 940 nm、功率为 46.2 W、光束质量为 3.9 mm·mrad 的激光光束。

## 2 研究方法 with 理论

阵列激光束以  $\theta$  角入射到矩形光栅上, 其衍射效率表达式为

$$\begin{cases} \eta_0 = 1 - 2\rho(1 - \rho)(1 - \cos\Delta\phi) \\ \eta_{m>0} = \frac{1}{m^2\pi^2}(1 - \cos 2m\pi\rho)(1 - \cos\Delta\phi) \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $m$  为衍射级次;  $\rho$  为占空比, 其值为光栅槽宽  $d$  与光栅周期  $\Lambda$  的比值 ( $\rho = d/\Lambda$ );  $\Delta\phi$  为光束通过光栅时产生的相位延迟, 可表示为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}h \left( \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} - \frac{1}{\cos\theta} \right), \quad (2)$$

式中  $h$  为光栅的脊高,  $n$  为光栅材料的折射率,  $\lambda$  为入射激光的波长。由 (1) 和 (2) 式可知, 在材料确定的情况下, 光栅的衍射效率由周期、占空比、脊高和入射角度共同决定。因此, 首先对光栅的结构参数, 即周期、占空比和脊高进行优化设计; 然后根据优化后的光栅结构模型选择最佳入射角, 以期获得最佳衍射效率。

利用严格耦合波理论, 基于麦克斯韦方程组, 求得入射光场区域及透射光场区域电磁场的表达式, 然后将光栅区域内的介电常数及电磁场按照不同的衍射级次用傅里叶级数展开<sup>[14]</sup>, 并与边界条件进行匹配, 推导出耦合波方程组, 通过数学方法求得各级衍射波的振幅及衍射效率。得出的透射波的衍射效率为

$$\eta_{T,m} = T_m T_m^* \operatorname{Re} \left( \frac{k_{2,zm}}{k_0 n_1 \cos\theta} \right), \quad (3)$$

反射波的衍射效率为

$$\eta_{R,m} = R_m R_m^* \operatorname{Re} \left( \frac{k_{1,zm}}{k_0 n_1 \cos\theta} \right), \quad (4)$$

式中  $R_m$  和  $T_m$  分别为第  $m$  衍射级的反射光波和透射光波的归一化电场振幅;  $T_m^*$  和  $R_m^*$  分别为  $T_m$  和  $R_m$  的共轭函数;  $n_1$  为空气折射率;  $k_0$  为入射光在真空中的波矢大小;  $k_{l,zm} = (k_0^2 n_l^2 - k_{xm}^2)^{1/2}$ ,  $l=1, 2$ , 其中  $k_{xm}$  和  $k_{l,zm}$  只能取正实数或负虚数, 分别为入射光区与透射光区第  $m$  级衍射光波矢的  $x$  分量大小和  $z$  分量大小,  $n_2$  为光栅材料的折射率。

## 3 熔融石英透射光栅的模拟

采用矩形模型优化光栅的每个单元, 以实现最高的耦合效率, 待优化的参数包括光栅入射角、光栅周期、脊高、占空比。在模拟实验中, 采用的波长为 940 nm, 即半导体激光阵列的中心波长, 光栅的介电常数参考 Palik 编写的光学手册中的数据<sup>[15]</sup>。光栅结构参数与衍射效率的关系如图 1 所示。

光栅的周期决定了其工作波长, 故首先应确定光栅的周期。工作波长应小于周期的两倍, 兼顾分辨率因素, 将周期设置为 540 nm, 如图 1(a) 所示。为了获得理想的耦合效率, 对不同衍射级次的衍射效率进行对比。当入射角为  $60^\circ$  时, 衍射能量集中在  $-1$  级, 如图 1(b) 所示。对  $-1$  级衍射效率进行优化, 由于周期和衍射级次已经确定, 故继续优化槽深度和占空比。不同脊高对应的衍射效率如图 1(c) 所示, 当脊高为 0.96  $\mu\text{m}$  时, 衍射效率最高。不同的占空比对应的  $-1$  级衍射效率如图 1(d) 所示, 可以看出, 占空比为 0.5 时, 光栅的衍射效率最高。

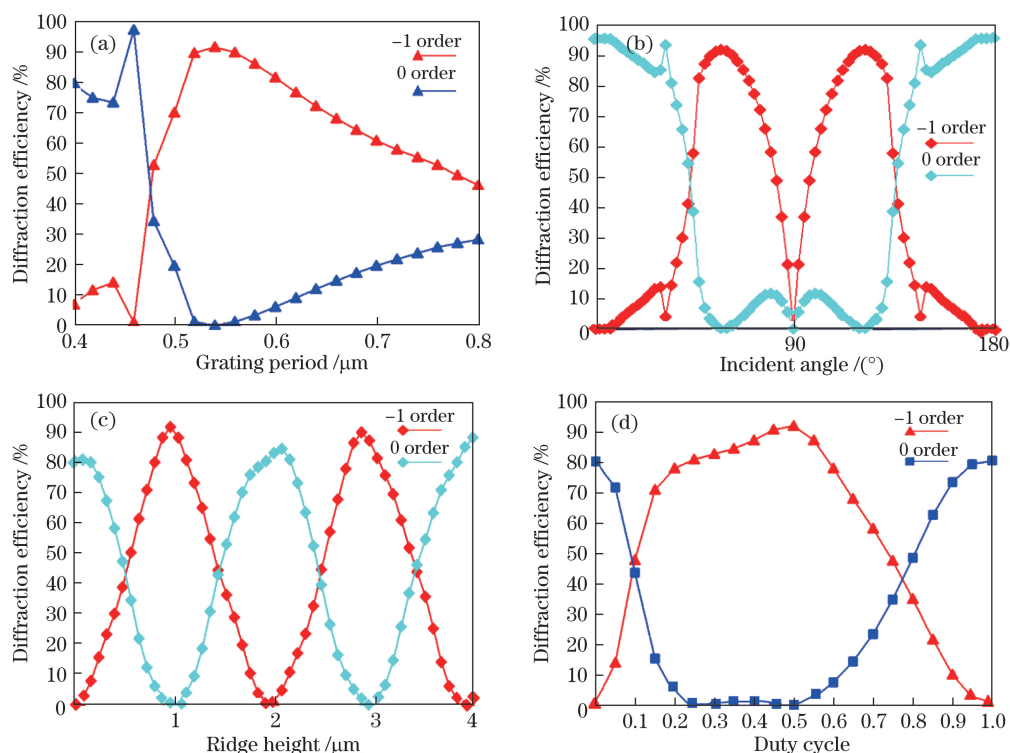


图 1 光栅衍射效率与不同结构参数关系。(a)周期;(b)入射角;(c)脊高;(d)占空比

Fig. 1 Diffraction efficiency of grating versus different structural parameters.

(a) Period; (b) incident angle; (c) ridge height; (d) duty cycle

对周期、脊高和占空比进行优化后,得到了光栅衍射效率与波长、衍射级次的关系,如图 2 所示,其中插图为衍射率 0.8~1.0 部分的放大图。可以看出,当周期为 540 nm、脊高为 0.96 μm、占空比为 0.5、入射角度为 60°时,光栅得到了最大衍射效率。此透射光栅将能量集中在-1 级上,其他衍射级次的能量被压缩,仅在 0 级存在低于 1.2% 的衍射能量。在特定的情况下,光栅在 940 nm 处,-1 级的衍射效率可达 91.2%,且 0 级的衍射能量为 0,如图 2 中内插图所示。

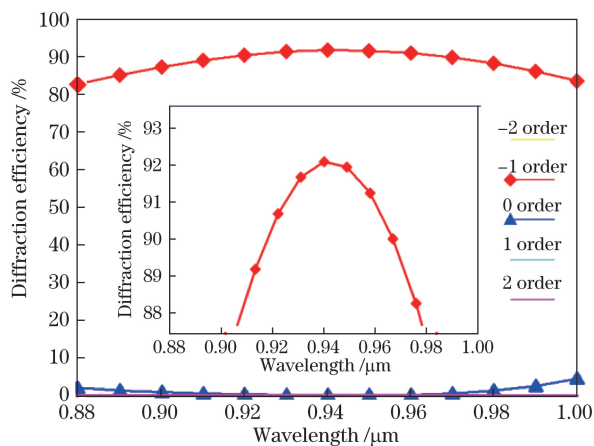


图 2 光栅衍射效率与衍射级次、波长的关系,内插图为特定条件下,0 级衍射能量为 0

Fig. 2 Diffraction efficiency versus diffraction order and wavelength, where inset shows that

0 order diffraction energy is 0 under specified conditions

基于上述优化参数,可采用全息法制备熔融石英透射光栅。将两束激光的干涉条纹场暴露在涂有光致抗蚀剂的抛光衬底上,曝光后光致抗蚀剂的溶解度会发生变化,因此条纹图案被光致抗蚀剂记录下来,并转移到基板的表面上。然后,在熔融石英衬底上镀增透膜。原子力显微镜(AFM)下的光栅如图 3 所示。

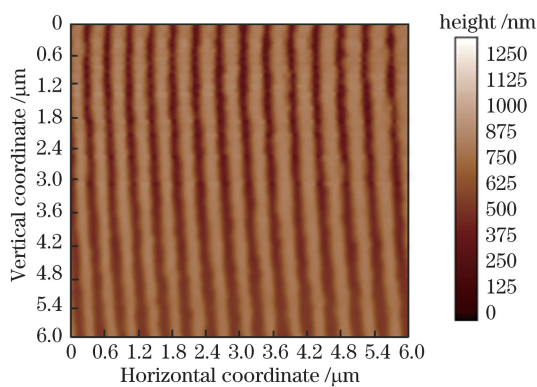


图 3 基于优化后的参数制备的光栅的 AFM 图像

Fig. 3 AFM image of fabricated grating based on optimized parameters

## 4 实 验

SBC 的实验装置如图 4 所示,采用分散式的激光外腔完成合束,利用外腔中的光栅控制每个发射单元的输出波长。整个外腔 SBC 系统的长度为 520 mm,实验装置包括中心波长为 940 nm 的二极管激光阵列,有效焦距为 200 mm 的变换透镜,刻线密度为 1850 lp/mm 的透射式衍射光栅和反射率为 10% 的输出耦合器。二极管激光阵列由 19 个发光单元构成,前腔面镀有透过率大于 99% 的增透膜。激光阵列通过快轴准直透镜(FACS)和慢轴准直透镜(SACS)进行准直。阵列和光栅分别位于变换透镜的前、后焦平面上,变换透镜将各个发光单元的输出光束聚焦到光栅上。激光合束发生在输出耦合器和光栅之间。二极管激光阵列的每个发光单元接收来自输出耦合器的反馈激光,由于光栅的色散作用,反馈回激光单元的光束具有不同波长,并在此外谐振腔内形成稳定振荡。

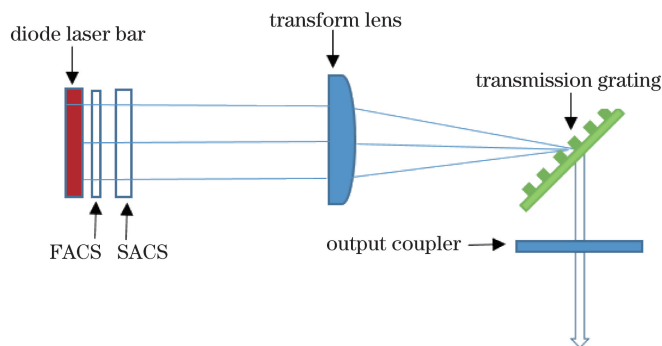


图 4 SBC 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of SBC experimental device

实验的目标有三个:1)输出光谱应包含阵列上所有发射器的输出波长,即 19 个输出波长,每个输出光谱中的强度峰均匀分布;2)输出光斑的光束质量较好;3)输出功率最大。SBC 实验结果如图 5 所示,合束后中心波长为 940 nm,光谱宽度为 14.36 nm,有 19 个峰,这与激光阵列激光单元的数目相同。光谱是高度周期性的,表明激光单元波长锁定情况良好。

图 6 所示为工作电流和输出功率的关系。由于激光阵列表面镀有增透膜,外腔反馈的作用减小了激光阵列的腔内损耗。当工作电流小于或等于 23 A 时,自由运转的激光器阵列的输出功率小于 SBC 的输出功率,阈值电流由自由运转时的 10 A 下降至 5 A。

由图 6 可知,当系统处于最大工作电流状态下,即 77.9 A 时,最大输出功率为 46.2 W,SBC 腔的效率为 80.5%,略低,可能由以下原因导致:1)制作过程中光栅出现恶化,衍射效率降低;2)激光阵列的 Smile 效应减少了 SBC 反馈到激光单元的能量<sup>[16]</sup>。

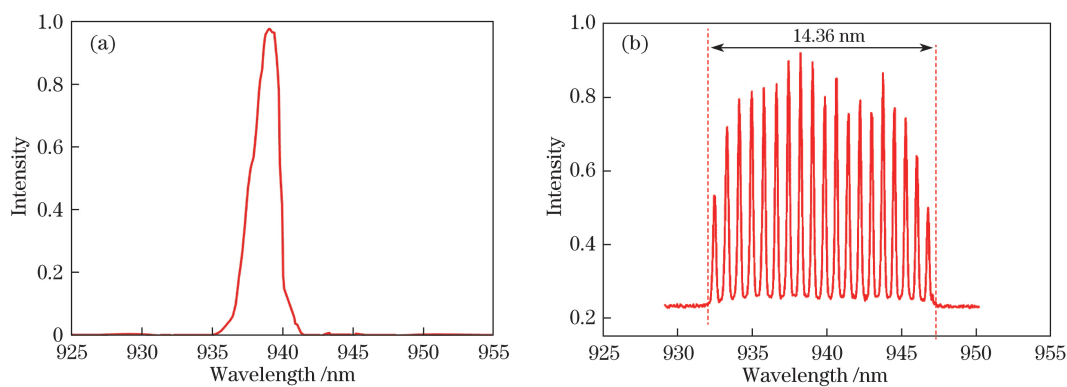


图 5 激光阵列(a)SBC 前和(b)SBC 后的光谱

Fig. 5 Spectra of laser array (a) before and (b) after SBC

图 6 中的内插图为 SBC 后光斑的能量分布图像,可以看到,由于发散角度较大,高阶腔模式的旁瓣光斑降低了光束质量。优化谐振腔后,高阶空间模式的输出减少,通过二阶矩方法计算获得光束质量为  $3.9 \text{ mm}\cdot\text{mrad}^{[17]}$ ,这近似于单个的发光单元的光束质量。

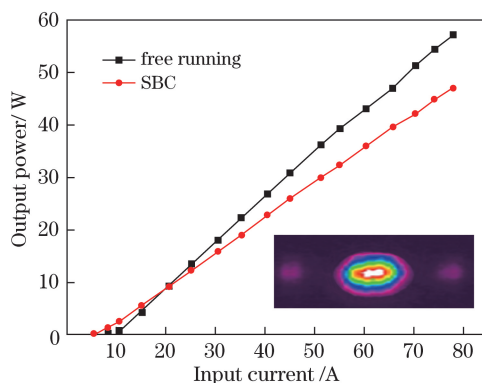


图 6 工作电流与输出功率之间的关系,内插图为输出光斑能量分布

Fig. 6 Output power versus working current, where inset shows energy distribution of output spot

## 5 结 论

基于一维亚波长矩形光栅结构模型,采用严格耦合波理论,优化设计了  $940 \text{ nm}$  透射式衍射光栅,优化后的光栅周期为  $540 \text{ nm}$ ,脊高为  $0.96 \mu\text{m}$ ,占空比为  $0.5$ 。理论上,该光栅能将  $92\%$  以上的衍射能量集中在  $-1$  级,其他衍射级次的能量被有效抑制。制作了该光栅并进行了 SBC 实验,得到输出功率为  $46.2 \text{ W}$ 、光束质量为  $3.9 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  的高亮度激光,SBC 转换效率达到  $80.5\%$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Dong X Z, Zhao Z S, Duan X M. Improving spatial resolution and reducing aspect ratio in multiphoton polymerization nanofabrication[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(9): 091113.
- [2] Feng Y, Ma Z Z. Transscleral diode photocoagulation of large retinal and choroidal vascular lesions[J]. PLOS One, 2012, 7(7): e39340.
- [3] Hayashi H, Terao A, Kunimatsu R, *et al.* Effects of a low level laser on periodontal tissue in hypofunctional teeth[J]. PLOS One, 2014, 9(6): e100066.
- [4] Zhu J F, Tian W L, Wang J L, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Yb:GYSO laser generating 324 fs pulses at  $1091 \text{ nm}$ [J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5190-5192.
- [5] Liu B L, Wang Z G, Yang F, *et al.* High brightness  $556 \text{ nm}$  laser by frequency doubling of a  $1112 \text{ nm}$  Nd:YAG laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(10): 969-972.
- [6] Yang Y Y, Sun W, Li Q G, *et al.* MHz isolated XUV attosecond pulses generation using plasmonic enhancement in

- asymmetric metallic nanoantenna[C]. SPIE, 2012, 8564: 856421.
- [7] 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]. SPIE, 2012, 8241: 824102.
- [8] Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, *et al.* 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks[J]. Optics Express, 2012, 20(3): 3296-3301.
- [9] Meng Huicheng, Tan Hao, Li Jianmin, *et al.* Development of spectral beam combining of diode laser by grating and external cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 020003.  
孟慧成, 谭昊, 李建民, 等. 半导体激光器光栅外腔光谱合束技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 020003.
- [10] Dan B, Figueroa L. Laser diode technology and applications II[C]. SPIE, 1990, 1219: 6018495.
- [11] Peng Hangyu, Zhang Jun, Fu Xihong, *et al.* High-efficiency external cavity spectral-beam-combined diode laser array[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702015.  
彭航宇, 张俊, 付喜宏, 等. 高效外腔光谱合束半导体激光器阵列[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702015.
- [12] Moharam M G, Gaylord T K, Leger J R. Diffractive optics modeling: Introduction[J]. JOSA A, 1995, 12(5): 1026-1026.
- [13] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. JOSA, 1981, 71(7): 811-818.
- [14] Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Wen Jun, *et al.* Diffractive order of phase grating[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(7): 870-876.  
傅克祥, 王植恒, 文军, 等. 位相光栅的衍射级次[J]. 光学学报, 1998, 18(7): 870-876.
- [15] Palik E D. Handbook of optical constants of solids[M]. San Diego: Academic Press, 1998.
- [16] Wang J W, Yuan Z B, Kang L J, *et al.* Study of the mechanism of "smile" in high power diode laser arrays and strategies in improving near-field linearity[C]. Electronic Components and Technology Conference, 2009: 10702976.
- [17] Nemes G, Serna J. Laser beam characterization with use of a second order moments: An overview[C]. Diode Pumped Solid State Lasers: Applications and Issues, 1998, 17: 200-207.