

激光干涉光刻制备 976 nm 分布反馈式激光器光栅

白云峰, 范杰*, 邹永刚, 王海珠, 海一娜, 田锬

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 分布反馈式(DFB)半导体激光器具有优良的稳定性和单模性,广泛应用于激光器抽运和光通信等领域。光栅作为DFB激光器的关键部件,对激光器性能有重要的影响。针对976 nm波段设计制备了DFB激光器的光栅。基于耦合模理论优化设计光栅的结构参数,采用激光干涉光刻和反应耦合等离子体(ICP)刻蚀技术制备光栅。通过引入表面镀膜SiO₂的方法提高了光栅图形由光刻胶向衬底转移的保真度,显著地改善了光栅的图形质量。探究了曝光时间、ICP刻蚀时间对光栅表面形貌的影响。实验结果表明,所制备的光栅条纹分布均匀,有较好的表面形貌,满足预期设计目标。

关键词 光栅; 激光干涉光刻; 半导体激光器; 干法刻蚀

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.120501

Fabrication of Gratings Used in 976 nm Distributed Feedback Lasers Based on Laser Interference Lithography

Bai Yunfeng, Fan Jie, Zou Yonggang, Wang Haizhu, Hai Yina, Tian Kun

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

Abstract The distributed feedback (DFB) laser, featured in its stability and single-mode emission, is widely used in various domains such as pumping lasers and optical communications. As a key component in the DFB laser, the grating plays an important role in laser performance. The design and fabrication of the grating for the 976 nm DFB semiconductor laser are presented. The experiment starts with the optimization of the grating structure parameters based on the coupled mode theory. The gratings are fabricated through laser interference lithography and inductively coupled plasma (ICP) etching technique. The pattern quality of the fabricated grating is improved by the introduction of surface coating SiO₂, and the fidelity of grating pattern transfer from photoresist to substrate is improved as well. Influence of exposure time and ICP etching time on grating surface morphology is investigated. The experiments show that the fabricated grating has uniformly distributed fringes and better surface morphology, and the expected design is realized.

Key words gratings; laser interference lithography; semiconductor laser; dry etching

OCIS codes 050.2770; 140.5960; 110.4235

1 引言

分布反馈式(DFB)激光器是一种利用内置光栅进行反馈的半导体激光器,具有优良的单模特性和稳定性,广泛应用于固体激光器抽运、光纤通信、激光测量等领域^[1-2]。近年来,随着光电子技术的快速发展,对DFB激光器的要求不断提高,相关的研究也日趋广泛^[3-7]。

收稿日期: 2017-07-18; **收到修改稿日期:** 2017-08-30

基金项目: 长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2015-10)、长春理工大学科技创新基金(XJLJG-2016-07)、吉林省科技计划重点项目(20150204068GX)

作者简介: 白云峰(1991—),男,硕士研究生,主要从事光电子技术及应用方面的研究。E-mail: bai_yun_feng@126.com

导师简介: 邹永刚(1982—),男,博士,副研究员,主要从事光电子技术及应用方面的研究。E-mail: zouyg@cust.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: fan576@163.com

光栅作为DFB激光器的核心部件,对激光器性能有重要的影响,因此光栅的相关研究一直是DFB激光器研究中的热点。2010年,朱洪亮等^[8]采用了一种基于取样光栅原理制作多通道增益-折射率耦合型光栅的方法,成功制作了可用于波分复用光通信系统的8波长DFB激光器阵列。2015年,Zheng等^[9]基于重构等效啁啾(REC)技术将具有等效离散耦合系数(EDCC)特性的光栅引入DFB激光器中,实现了器件稳定的单纵模输出。2017年,Fricke等^[10]提出并通过实验验证了利用刻蚀切趾光栅提高DFB激光器稳定性、转换效率和输出功率的新方法。由于DFB激光器的光栅结构较小(纳米级),所以通常采用微纳加工技术制备光栅。常见的光栅制造技术有电子束光刻、纳米压印和激光干涉光刻等^[11-13],这些技术各有特点,实际应用也不尽相同。电子束光刻不需要掩模板,具有高分辨率和精确度,但其制作成本较高,效率较低,因而多用于科学研究。纳米压印的优点是操作简易,分辨率和制作效率高,但纳米级压印模板制作费用高昂且易损坏,成本较高。激光干涉光刻是一种利用激光干涉曝光的光栅制备方法,与其他两种制备工艺相比,具有无需掩模板、成本低、效率高等优点,是一种应用广泛的光栅制备工艺。

本文针对976 nm波段对DFB激光器的光栅进行设计、制备和测试。相比于传统工艺,实验采用有条纹锁定模块的激光干涉系统并结合表面镀膜技术和反应耦合等离子体(ICP)刻蚀技术,获得了精密的、上底面平整的梯形光栅结构,同时探索了曝光时间、刻蚀时间对光栅形貌的影响,为制备高性能DFB激光器提供了参考。

2 理论分析

在异质结构的半导体激光器的有源层、波导层引入布拉格光栅,即可形成DFB激光器。直接在有源层上刻蚀光栅会使非复合速率变大、阈值电流增加,影响半导体激光器的性能,因此通常把光栅引入靠近有源层的限制层上,并通过调节光栅刻蚀深度,以确保光场与光栅的相互作用。光栅的占空比则会直接影响光场与光栅的耦合作用。因此,光栅的刻蚀深度以及光栅占空比对DFB激光器的性能极为重要。

2.1 光栅周期

在DFB激光器中,内置光栅的周期由有源区光波波长和分布反馈的布拉格级次决定,并满足布拉格条件:

$$2n_{\text{eff}}\Lambda = q\lambda, \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波长, n_{eff} 为有效折射率, Λ 为光栅周期, q 为光栅阶数, $q=1,2,3,\dots$ 。一阶光栅有一个衍射级,二阶光栅有两个衍射级,更高阶光栅有更多的衍射级。研究表明二阶光栅的一级衍射和二级衍射可分别对光进行横向和纵向的耦合^[14],从而使主模和低阶模产生较大的阈值增益差,继而消除简并模式,有利于激光器的单模激射,且二阶光栅周期是一阶光栅的两倍,制作工艺相对简单,因此本文取 $q=2$ 。对于976 nm波段DFB激光器,综合考虑光栅和周围材料的性质以及波导结构, n_{eff} 的典型值为3.25,将 n_{eff} 代入(1)式可得光栅的周期约为300 nm。

2.2 光栅占空比

耦合波分析法是一种按器件特定边界条件求取满足耦合波方程解的前向和后向波的周期结构分析法^[15],常用于DFB激光器性能的分析。

当光在光栅区域进行反馈调制时,满足耦合波方程:

$$\begin{cases} \frac{dA(z)}{dx} = ikB(z)\exp(-i2\Delta\beta z) \\ \frac{dB(z)}{dx} = ikA(z)\exp(-i2\Delta\beta z) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $A(z)$, $B(z)$ 分别为前向波和后向波, k 为耦合系数, $\Delta\beta$ 为相位因子。

由(2)式可得光栅耦合系数与腔长为 L 的激光器件阈值增益 G_{th} 的关系为

$$\frac{k^2}{(2\Delta\beta)^2 + G_{\text{th}}^2} \exp(G_{\text{th}}L) = 1, \quad (3)$$

式中耦合系数 $k=k_2+ik_1$ 且满足

$$k_1 = \frac{2\Delta n d_g}{\lambda} \tan(\pi\sigma) k_2, \quad (4)$$

$$k_2 = k_0 \Delta n \Gamma_g \frac{\sin(2\pi\sigma)}{2\pi}, \quad (5)$$

其中 k_1 为一级衍射耦合系数, k_2 为二级衍射耦合系数, Δn 为光栅材料与波导层的折射率差, d_g 为光栅脊, Γ_g 为光栅限制因子, 空间频率 $k_0 = 2\pi/\lambda$, 占空比 $\sigma = b/\Lambda$, b 为光栅条宽, Λ 为光栅周期。

由(3)式可知耦合系数和器件阈值增益的关系, 由(4)式和(5)式可得耦合系数与占空比、槽深的关系, 再结合激光器的结构特点, 可以计算获得光栅的关键结构参数。

图 1 所示为一级衍射耦合系数 k_1 和二级衍射耦合系数 k_2 与占空比的关系。

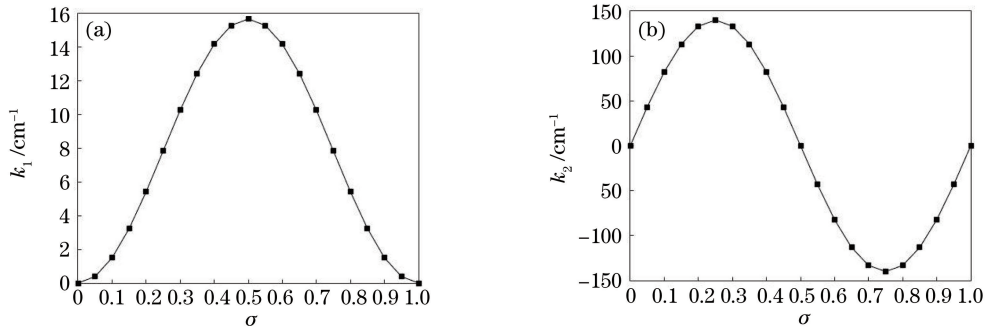


图 1 (a)一级衍射耦合系数 k_1 随占空比 σ 的变化; (b)二级衍射耦合系数 k_2 随占空比 σ 的变化

Fig. 1 (a) Variation in first-order diffraction coupling coefficient k_1 with duty cycle σ ;

(b) variation in second-order diffraction coupling coefficient k_2 with duty cycle σ

图 1(a)表明, k_1 随着占空比 σ 的变大先增大后减小, 且在 $\sigma = 0.5$ 处取得最大值, 在 $\sigma = 0, 1$ 时取最小值 0。由图 1(b)则可看到 k_2 随 σ 呈周期性变化趋势, 分别在 $\sigma = 0.25$ 和 $\sigma = 0.75$ 处取得最大值与最小值, 在 $\sigma = 0, 0.5, 1$ 时 k_2 为 0。需要指出的是, k_2 数值正负的变化只反映光栅自身的相位特性^[16], 耦合系数越高, 光栅的耦合效果越好。结合图 1(a)和图 1(b)并由(3)式可得, 当光栅的占空比 $\sigma = 0.4 \pm 0.01$ 时, 激光器具有高的增益差 ΔG_{th} , 有利于器件的单模激励, 且光栅的一级耦合系数和二级耦合系数也较高。

2.3 光栅槽深

图 2 所示为光栅槽深 d_g 与耦合系数的关系, 由(4)式可知 k_1 与 k_2 呈线性关系, 故而 k_2 与 d_g 的关系可以间接地反映 k_1 与 d_g 的关系, 因此只给出 k_2 随 d_g 的变化曲线。

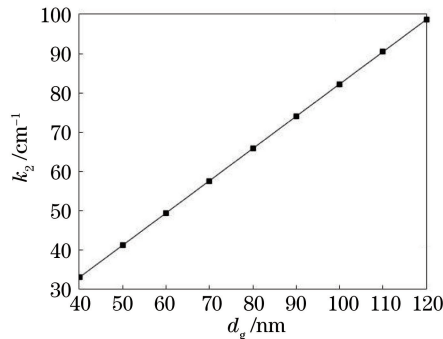


图 2 二级衍射耦合系数 k_2 随槽深 d_g 的变化

Fig. 2 Variation in second-order diffraction coupling coefficient k_2 with groove depth d_g

结合图 2 数据及(4)式可知, 随着槽深的增加, 光栅耦合效率 k_1 与 k_2 均线性增大。然而, 在实际的制备中, 光栅一般不能刻蚀太深, 以免加剧光波的损耗, 因此, 为保证高耦合效率, 光栅的槽深设计为 (100 ± 5) nm。

3 实验

3.1 激光干涉光刻系统

激光干涉光刻是一种高效的微纳图形加工技术,利用两束相干激光在光栅胚体表面的光刻胶上形成干涉图形,再经过显影使光刻胶上形成与干涉条纹对应的图形,进而在衬底上加工出表面微纳结构图形。

实验使用的激光干涉光刻系统如图3所示。由于光栅的尺寸达到纳米级,对光刻系统的稳定性要求较高,实验通过引入叠栅条纹锁定技术提高光刻系统稳定性。在干涉光刻前,先将一块玻璃片放在样品基台上制作叠栅,显影后将叠栅置于基台上,当激光干涉条纹与玻璃片上制作的叠栅相叠加时即产生叠栅条纹。根据叠栅条纹变化反馈的信息^[17],使用计算机调节压电陶瓷位移,实现对光程的补偿,从而达到降低环境干扰、提高衬底图形质量的目的。

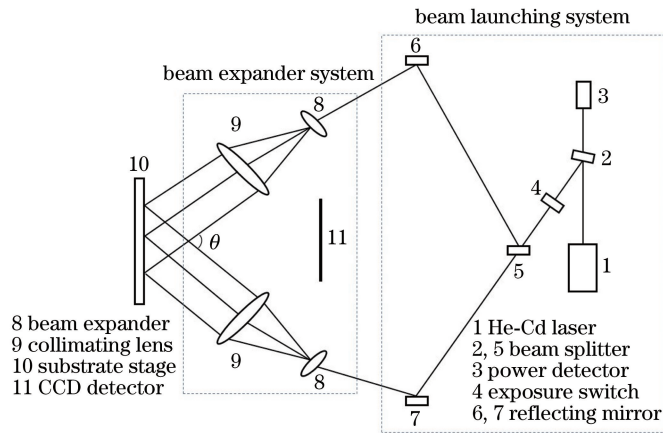


图3 激光干涉光刻系统光路图

Fig. 3 Optical path of laser interference lithography system

激光干涉光刻系统的干涉条纹周期、双光束夹角 θ 、干涉激光波长 λ_0 满足

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2\sin(\theta/2)} \quad (6)$$

实验中光源波长 λ_0 为325 nm,光栅周期 Λ 为300 nm,由(6)式计算获得双光束夹角为 32.8° 。

3.2 光栅的制备

图4所示为光栅制备工艺流程。为了获得更好的光栅图形,实验借助ICP刻蚀以保证图形质量。考虑到制备小周期光栅所需的光刻胶在ICP刻蚀过程中往往无法很好地起到掩模作用,难以保证转移图形的质量,实验采用预制备表面硬掩模的方法获得高质量的光栅图形。首先,在GaAs上镀一层 SiO_2 膜,使用匀胶机在 SiO_2 表面涂一层光刻胶。然后,使用激光干涉光刻技术在光刻胶上刻出图形,用光刻胶作为掩模板腐蚀 SiO_2 形成表面硬掩模。最后,使用ICP刻蚀将 SiO_2 膜上的图形转移到GaAs上,再经过清洗、去 SiO_2 等步骤,即可制备获得光栅。

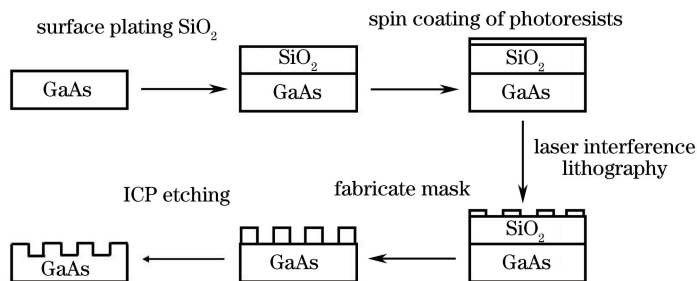


图4 光栅制备工艺流程

Fig. 4 Grating fabrication process

4 测试与分析

4.1 表面镀膜 SiO_2 对光栅形貌的影响

为了探索 SiO_2 硬掩模对光栅图形质量的影响,实验分别制作了无 SiO_2 硬掩模和有 SiO_2 硬掩模的光栅样品,扫描电子显微镜(SEM)测试结果如图 5 所示。

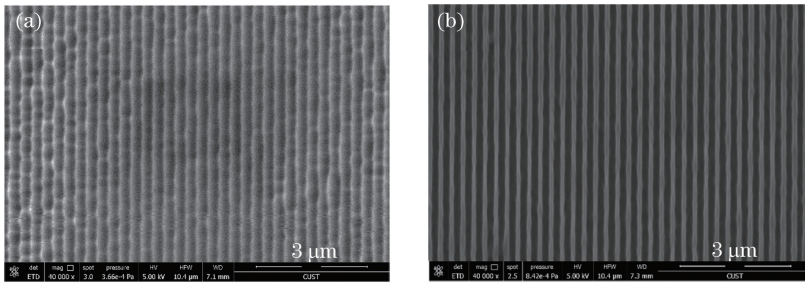


图 5 光栅的 SEM 图像。(a)无 SiO_2 硬掩模;(b)有 SiO_2 硬掩模

Fig. 5 SEM images of gratings. (a) Without SiO_2 ; (b) with SiO_2

实验结果显示,在保持其他工艺参数不变的条件下,无 SiO_2 硬掩模的光栅图形出现了明显的失真,如图 5(a)所示,光栅条纹边界模糊,脊的形状也参差不齐,这表明光刻胶没有很好地起到掩模的作用,图形转移效果差。使用 SiO_2 硬掩模方法,如图 5(b)所示,光栅条纹的图形质量得到了明显的改善,条纹清晰,分布也比较均匀,这说明由于 SiO_2 的稳定性较高,在 ICP 刻蚀过程中 SiO_2 可以较好地起到掩模的作用,从而保证了光栅图形的质量。同时,由于 SiO_2 可以在后期使用氟化氢试剂有效去除,所以并不会影响后续的器件制造。

4.2 曝光时间对光栅形貌的影响

光栅占空比影响光栅的耦合效率,而占空比的大小由条宽和周期确定,当光栅周期固定时,实验通过调节曝光剂量来控制光栅的条宽。图 6 为不同曝光时间下光栅图形结构的 SEM 图像。图 6(a)中曝光时间为 45 s,可以看出样品的条宽较大,说明曝光时间不足。图 6(b)中曝光时间为 55 s,此时样品的条宽适中,图形清楚,说明曝光时间适中。图 6(c)中曝光时间为 65 s,此时样品的条宽较窄,说明曝光过度。可见,随着曝光时间的延长,线宽变窄,占空比也变小,图 6(b)所示样品的曝光时间控制较好,周期为 300 nm,占空比约为 0.4。

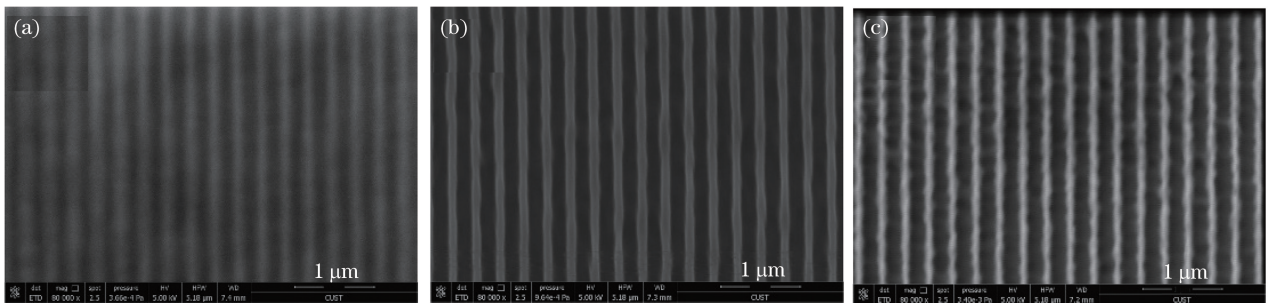


图 6 不同曝光时间的 SEM 图像。(a) 45 s;(b) 55 s;(c) 65 s

Fig. 6 SEM images for different exposure durations. (a) 45 s; (b) 55 s; (c) 65 s

4.3 ICP 刻蚀时间对光栅形貌的影响

为了进一步了解制备光栅的结构特性,并探索 ICP 刻蚀时间与光栅槽深、光栅形貌的关系,实验使用原子力显微镜(AFM)对光栅样品进行接触式表面形貌测试。

图 7(a)为刻蚀时间为 25 s 时光栅的截面二维曲线和表面三维 AFM 图像,此时光栅槽深均匀,约为 100 nm,ICP 的刻蚀速率约为 4 nm/s,且条纹分布均匀,上底面平整,三维图像显示光栅有较好的表面形貌。图 7(b)中刻蚀时间为 35 s,此时槽深约为 145 nm,ICP 刻蚀速率近似为 4.1 nm/s,但此时条纹的均匀性和平整性明显变差,三维图形表面参差不齐。这说明对于小周期的光栅刻蚀,虽然 ICP 刻蚀相比于湿法刻蚀有各向异性的优点,但由于 ICP 刻蚀是离子轰击和化学气体刻蚀共同作用的结果,离子轰击具有无选择性,表

面的化学气体刻蚀往往也会使刻蚀趋于各向同性,进而影响光栅的图形质量,因而需要控制刻蚀的最优时间。

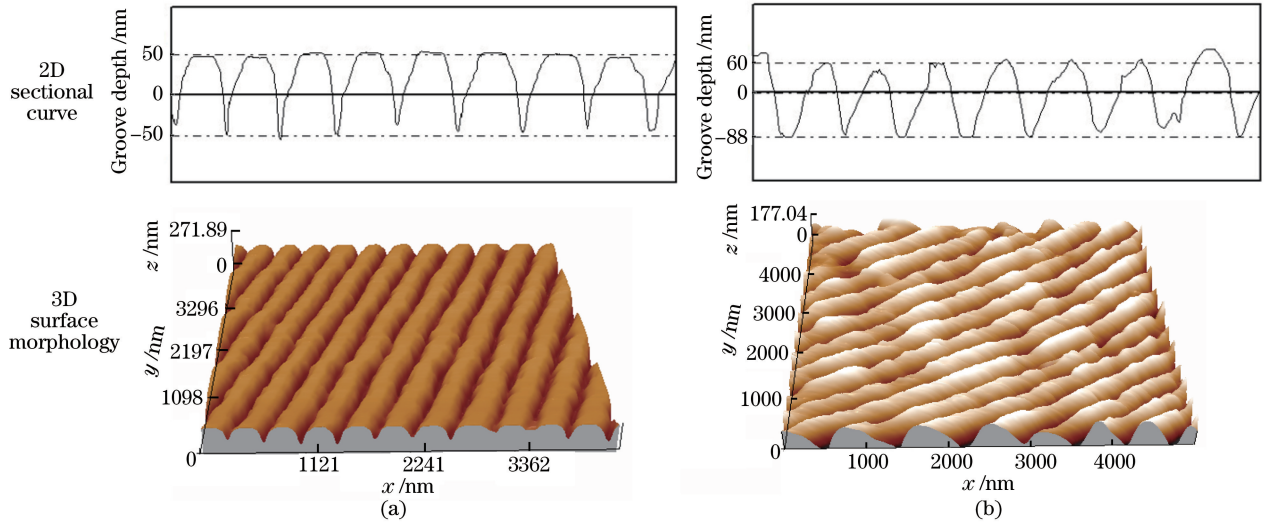


图 7 刻蚀时间为(a) 25 s 和(b) 35 s 时光栅的形貌

Fig. 7 Grating morphologies when etching time is (a) 25 s and (b) 35 s, respectively

5 结 论

针对 976 nm DFB 激光器的光栅,借助耦合模理论优化设计了光栅的周期、占空比和槽深等参数,并使用激光干涉光刻技术和 ICP 刻蚀技术制备光栅。通过在衬底上预先制备一层 SiO_2 膜作为硬掩模,显著地改善了光栅的图形质量。对比分析了曝光时间和 ICP 刻蚀时间对光栅表面形貌的影响,得出最优曝光时间为 55 s、刻蚀时间为 25 s。最终制得的光栅周期为 300 nm,占空比约为 0.4,槽深为 100 nm,光栅的上底面平整,条纹分布均匀。所制备的光栅及制备方法为进一步制备高性能 DFB 激光器提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Fessant T. Gaussian-like tapered grating quarter wave-shifted DFB semiconductor lasers for high-power single-mode operation[J]. Applied Physics B, 1998, 67(6): 769-772.
- [2] Kamp M, Koeth J. High-power pulsed 976-nm DFB laser diodes[C]. SPIE, 2010, 7682: 76820T.
- [3] DiLazaro T, Nehmetallah G. Optical frequency-domain reflectometry using multiple wavelength-swept elements of a DFB laser array[C]. SPIE, 2017, 10110: 101100I.
- [4] Inoue D, Kai F, Nishiyama N, *et al.* Low-bias current 10 Gbit/s direct modulation of GaInAsP/InP membrane DFB laser on silicon[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18571-18579.
- [5] Blauvelt H A, Kwong N S, Chen P C, *et al.* Optimum range for DFB laser chirp for fiber-optic AM video transmission [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(1): 55-59.
- [6] Wang Qi, Guo Jinjin, Chen Wei, *et al.* Widelytunable distributed feedback semiconductor lasers with constant power and narrow linewidth[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(1): 0101004.
王琪, 郭锦锦, 陈伟, 等. 功率稳定且波长可调谐的窄线宽分布式反馈半导体激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0101004.
- [7] Zuo Qiang, Yu Haitao, Yang Yuzhi. Design of an asymmetric three corrugation-pitch-modulated DFB laser for improving output efficiency and stable single longitudinal mode operation[J]. Infrared & Laser Engineering, 2013, 42 (s2): 451-455.
左强, 于海涛, 杨玉枝. 一种同时提高功率效率和单纵模稳定性的不对称三段周期调制光栅 DFB 激光器[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(s2): 451-455.
- [8] Zhu Hongliang, Xu Xiaodong, Wang Huan, *et al.* The study of distributed feedback laser arrays based on sampled

- gratings[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, 21(9): 1280-1282.
- 朱洪亮, 许晓冬, 王桓, 等. 取样光栅分布反馈激光器阵列器件研究[J]. *光电子 • 激光*, 2010, 21(9): 1280-1282.
- [9] Zheng J, Xia D, Tang S, *et al.* DFBsemiconductor laser with discrete coupling coefficient based on the equivalent technique[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1502408.
- [10] Fricke J, Decker J, Maassdorf A, *et al.* DFB lasers with apodized surface gratings for wavelength stabilization and high efficiency[J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2017, 32(7): 075012.
- [11] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Nanoimprint lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1996, 14(6): 4129-4133.
- [12] Vieu C, Carcenac F, Pepin A, *et al.* Electron beam lithography: Resolution limits and applications[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 164(1): 111-117.
- [13] Henk W V, Abelman L, Hennessy T C. Laser interference lithography[J]. *Lithography Principles Processes & Materials*, 2011, 23(3): 133-148.
- [14] Makino T, Glinski J. Effects of radiation loss on the performance of second-order DFB semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(1): 73-82.
- [15] Du Baoxun. Principles of semiconductor lasers[M]. Tianjin: Weapon Industry Press, 2004.
杜宝勋. 半导体激光器原理[M]. 天津: 兵器工业出版社, 2004.
- [16] Shams-Zadeh-Amiri A M, Hong J, Li X, *et al.* Second- and higher-order resonant gratings with gain or loss-Part 1: Green's function analysis[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(12): 1421-1430.
- [17] He Anguo, Yu Honglin, Zhu Chuanxin, *et al.* Subdivision and direction judgment of grating Moiré fringes[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(10): 45-49.
何安国, 喻洪麟, 朱传新, 等. 光栅莫尔条纹细分及辨向方法研究[J]. *光电工程*, 2007, 34(10): 45-49.