

## 水平腔面发射 DFB 激光器光栅调控出光特性研究

王睿, 邹永刚\*, 田赜, 李瑞冬, 唐慧, 范杰

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** 以面发射分布反馈(SE-DFB)半导体激光器为研究对象,基于耦合模理论,通过耦合系数表征器件的出光特性,研究二阶光栅对器件出光特性的调控作用。使用时域有限差分法(FDTD)进行光栅的结构仿真和参数优化,在器件衬底部位引入分布布拉格反射镜(DBR)协同光栅调控出光特性,以 980 nm 波段半导体激光器为例,重点研究 DFB 光栅占空比、DFB 光栅周期长度、DFB 光栅刻蚀深度、DFB 光栅倾角、DBR 反射镜占空比、DBR 反射镜材料折射率、DBR 反射镜周期介质层数对光栅耦合系数的综合影响,得到优化的光栅参数,为后续器件设计与制备提供理论依据。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 耦合系数; 表面发射; 布拉格光栅

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0814001

## Study on Grating-controlled Emission Characteristics of Horizontal Cavity Surface Emitting Distributed Feedback Laser

Wang Rui, Zou Yonggang\*, Tian Kun, Li Ruidong, Tang Hui, Fan Jie

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

**Abstract** Regarding surface emitting distributed feedback (SE-DFB) semiconductor laser as the research object, this paper investigates the controlling effects of second-order gratings on the emission characteristics of the laser characterized by the coupling coefficient in light of the coupled-mode theory. The finite-difference time-domain (FDTD) method is used to simulate the grating structure and optimize the grating parameters. The distributed Bragg reflector (DBR) is introduced onto the substrate of the laser to coordinate with the gratings to control the emission characteristics. With a 980 nm semiconductor laser, this paper focuses on the comprehensive influences of various parameters on the grating coupling coefficient to obtain the optimal grating parameters. Those parameters include DFB grating duty cycle, length of DFB grating period, etching depth of DFB gratings, tooth angle of DFB gratings, duty cycle of the DBR reflector, material refractive index of the DBR reflector, and number of period medium layers of the DBR reflector. This research provides a theoretical basis for the design and fabrication of subsequent devices.

**Key words** lasers; semiconductor laser; coupling coefficient; surface emitting; Bragg grating

## 1 引言

随着半导体工艺技术和配套设备的不断革新,人们已经开发出了涵盖诸多波长的半导体激光器,因具有尺寸小、价格低、效率高和寿命长等优点在工

业、医疗和军事等众多领域广泛应用。分布反馈(DFB)半导体激光器具有线宽窄、波长稳定性好等特点,在信息传输、科学研究等领域发挥了重要作用,一直是科研人员关注的热点之一<sup>[1-3]</sup>。

为了实现更高的功率、更小的远场发散角和更

收稿日期: 2021-09-30; 修回日期: 2021-10-28; 录用日期: 2021-11-04

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20190302052GX)

通信作者: \*zouyg@cust.edu.cn

窄的光谱线宽,人们开发出了多种类型的 DFB 激光器。常见的折射率耦合 DFB 激光器是由沿腔长方向折射率周期性变化的光栅对光进行反射形成振荡,结构相对简单,但非对称模式激射导致难以实现远场单瓣出光,且易出现模式简并,影响其实际应用<sup>[4]</sup>。为了消除简并模,引入了添加光栅相移及非对称端面镀膜等方案。虽然提升了 DFB 激光器的性能,但也导致激光器结构变得复杂,系统稳定性降低,制作成本提高<sup>[5]</sup>。增益耦合 DFB 激光器是在有源层制备增益或损耗周期性变化的光栅,从而在布拉格波长上得到一个损耗最低的模式。虽然具备单模出射、无简并模的优点,但由于其光栅位于在有源区,会引起由于自发辐射导致的激光器工作稳定性降低<sup>[6]</sup>。

为了进一步提升 DFB 激光器的出光特性,人们研制出了水平腔面发射分布反馈(SE-DFB)激光器。通过在器件中引入二阶光栅,利用二阶光栅的衍射特性,由一级衍射光实现表面出射,二级衍射光沿水平腔体反馈振荡。由于水平腔面发射 DFB 激光器的腔体较长,可以获得较高的光增益和单模输出功率。同时,更小的光谱温度漂移带来了更高的可靠性(更高的表面损伤阈值),更小的发散角带来了更好的光束质量<sup>[7]</sup>。2014 年, Sigler 等<sup>[8]</sup>设计了一种波长 4.6  $\mu\text{m}$  的二阶光栅 DFB 面发射量子级联激光器,通过在两端添加分布布拉格(DBR)光栅来限制光场,阈值电流低至 0.45 A,斜率效率达到 3.4 W/A。2015 年,刘颖慧等<sup>[9]</sup>通过引入二阶金属光栅制作了一种波长 4.8  $\mu\text{m}$  的面发射 DFB 量子级联激光器,在室温下实现了 94 mW 的连续波输出功率,阈值电流密度低至 1.21 kA/cm<sup>2</sup>,边模抑制比达到 30 dB。2016 年,Boyle 等<sup>[10]</sup>结合二阶金属光栅与 DBR 光栅,提出了一种波长 4.75  $\mu\text{m}$  的光栅耦合量子级联面发射 DFB 激光器,实现峰值功率达到 0.4 W 的单模出射。相较于传统 DFB 激光器,二阶光栅面发射 DFB 具有光束质量高、光谱线宽窄、波长稳定性好等显著优点<sup>[11]</sup>。由于芯片结构和

制造工艺更为简单,更加适合量产,具有更好的应用前景。主要的应用领域包括但不限于高峰功率的激光传感、中低亮度的大功率激光加工和窄线宽激光泵浦等。

二阶光栅的耦合特性是调控 SE-DFB 激光器出光特性的主要因素,故光栅的耦合系数是该项研究的重点。本研究基于耦合模理论,分析 SE-DFB 激光器的综合出光特性,以表面出射率、反射率和耦合系数作为衡量器件出光特性的指标。在此基础上,重点讨论 DFB 光栅占空比、DFB 光栅周期长度、DFB 光栅刻蚀深度、DFB 光栅倾角、DBR 反射镜占空比、DBR 反射镜材料折射率、DBR 反射镜周期介质层数对光栅耦合系数的综合影响。使用 FDTD 仿真软件进行光栅结构的仿真和光栅参数的优化,同时设计了一种通过在衬底位置引入 DBR 反射镜改善出光特性的器件结构,得到优化后的光栅参数,为后续面发射 DFB 激光器的器件设计与制备提供理论依据。

## 2 基本原理(实验仿真)

研究二阶光栅的方法主要是基于耦合模理论的传输矩阵。主要涉及的参数包括有效折射率  $n_{\text{eff}}$ ,光栅周期  $\Lambda$ ,光栅长度  $L$ ,耦合系数  $k$ 。

引入基本耦合模方程<sup>[12]</sup>

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} = k \exp[i(2\Delta\beta z - \phi)]B + gA \\ \frac{dB}{dz} = k \exp[-i(2\Delta\beta z - \phi)]A + gB \end{cases}, \quad (1)$$

$$\Delta\beta = \beta - \beta_B = \beta - q\pi/\Lambda, \quad (2)$$

式中, $k$  为前向波  $A$  与后向波  $B$  之间的耦合系数, $\phi$  为光栅的相移, $q$  为光栅阶数。 $\beta$  为传播常数, $\Delta\beta$  为相对于 Bragg 波长  $\beta_B$  的相位失配,满足  $\Delta\beta = (2\pi/\lambda - 2\pi/\lambda_B)n_{\text{eff}}$ , $\lambda$  为激射波长。

计算得到关于前向波  $A(z)$  与后向波  $B(z)$  的方程如下<sup>[13]</sup>

$$\begin{bmatrix} A(z) \\ B(z) \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} A(0) \\ B(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma z) - \frac{i\Delta\beta' \sinh(\gamma z)}{\gamma} & -\frac{ik \sinh(\gamma z)}{\gamma} \\ \frac{ik \sinh(\gamma z)}{\gamma} & \cosh(\gamma z) + \frac{i\Delta\beta' \sinh(\gamma z)}{\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(0) \\ B(0) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $\Delta\beta' = \Delta\beta + ig$ ,  $g$  为阈值增益; $\gamma^2 = k^2 - (\Delta\beta')^2$ ;矩阵  $\mathbf{T}$  即为传输矩阵。

在已知  $A(0)$  与  $B(0)$  的情况下,通过传输矩阵就可以得到  $A(z)$  与  $B(z)$ 。还可以通过矩阵元素

计算反射系数  $r$  与透射系数  $t$ <sup>[14]</sup>

$$r = -\frac{T_{12}}{T_{22}}, \quad (4)$$

$$t = T_{11} - \frac{T_{12}T_{21}}{T_{22}}. \quad (5)$$

对于二阶光栅,耦合系数  $k = ik_1 + k_2$ ,  $k_1$  为表面发射耦合系数,由一级衍射引起;  $k_2$  为反馈耦合系数,由二阶光栅的二级衍射引起。耦合模方程形式变化为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} -\frac{dA}{dz} = i\Delta\beta'A + ikB \\ \frac{dB}{dz} = ikA + i\Delta\beta'B \end{cases}, \quad (6)$$

对于矩形薄光栅,耦合系数  $k_1$ 、 $k_2$  满足<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} k_1 = \frac{2\Delta n d_g}{\lambda} \tan(\pi\sigma) k_2 \\ k_2 = k_0 \Delta n \Gamma_g \frac{\sin(2\pi\sigma)}{2\pi} \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $\Delta n = n_g - n_c$ , 即上波导层和上包层的折射率差;  $\Gamma_g$  为光栅限制因子;  $d_g$  为光栅深度;  $\sigma$  为占空比,满足  $\sigma = b/\Lambda$ , 其中  $b$  为光栅槽的宽度。通过以上分析,可由(7)式可得到相应的反馈耦合系数和表面发射耦合系数。

在本研究中,仿真计算的直接结果由监视器的反射率展示,为了研究耦合系数的变化,需要建立反射率与耦合系数的关系。通过散射矩阵的方法导出反射率与其耦合系数  $k$  的表达式<sup>[17]</sup>:

$$R = |r|^2 = \tanh^2(kL), \quad (8)$$

式中,  $r$  是结构的反射系数,  $R$  是有效反射率,  $L$  是腔体长度。从(8)式中,DFB 光栅的反射率由  $kL$  决定。本文中建模的实际结构腔长在  $1500 \mu\text{m}$  左右,根据经验公式,  $kL$  的乘积约等于 1 时具有较好的出光效果。

使用时域差分计算工具进行仿真。使用二维 FDTD 进行建模,器件模型如图 1 所示。该结构由  $0.9 \mu\text{m}$  的 p-AlGaAs 上包层、总厚度  $0.4 \mu\text{m}$  的 p-AlGaAs 波导层、 $0.05 \mu\text{m}$  的有源层、 $1.5 \mu\text{m}$  的 n-AlGaAs 下包层以及衬底构成。在上包层的位置加入光栅结构,同时,在衬底位置引入了 DBR 反射镜。由于高材料折射率和低材料折射率之间不同界面的反射波存在相干性,故 DBR 反射镜在较宽的波长范围内具有较高的反射率,可以用于加强上表面出光<sup>[18]</sup>。有效腔长为  $118.8 \mu\text{m}$ ,目标出射波长设定为  $980 \text{ nm}$  波段。

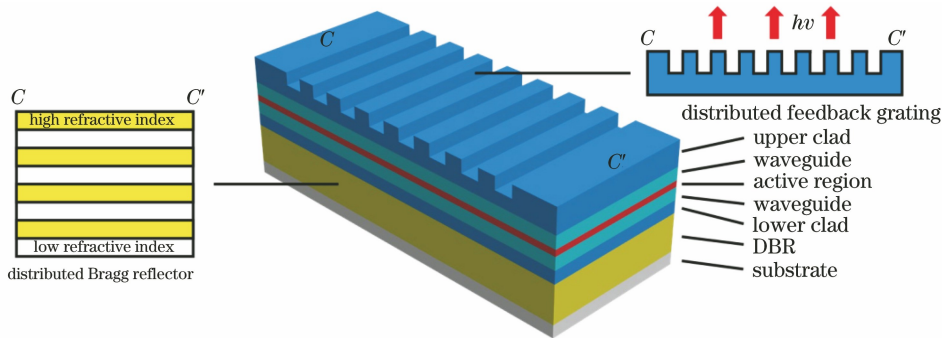


图 1 面发射 DFB 激光器结构图

Fig. 1 Schematic diagram of surface emitting DFB laser

### 3 分析与讨论

对以下多个不同的参数进行了仿真计算,分别是 DFB 光栅占空比、DFB 光栅周期长度、DFB 光栅刻蚀深度、DFB 光栅倾角、DBR 反射镜占空比、DBR 反射镜材料折射率、DBR 反射镜周期介质层数。图 2 为光栅部分的示意图,  $b$  为光栅槽宽度,  $\Lambda$  为光栅周期长度,  $\theta$  为光栅倾角。

#### 3.1 DFB 光栅对出光特性的影响

不同 DFB 光栅占空比下的表面出射率和反射率变化趋势如图 3(a)、(b)所示。占空比取值  $0.3 \sim$

$0.9$ 。由图可知,在  $980 \text{ nm}$  波段附近,当表面出射率大于  $0.06$  时,出射波长的位置在  $973 \sim 983 \text{ nm}$  之间波动,占空比从  $0.55$  变化至  $0.73$ 。超过该范围后表面出射率开始减小。当反射率大于  $0.005$  时,反射峰位置在  $983 \sim 984 \text{ nm}$  之间变化,变化范围小于  $1 \text{ nm}$ ,占空比从  $0.63$  变化至  $0.71$ 。当占空比小于  $0.55$ ,反射峰降低同时会产生大量杂模。综合考虑占空比对表面出射率和反射率的影响后,取 DFB 光栅占空比为  $0.72$ ,在波长等于  $983 \text{ nm}$  的位置耦合系数为  $6.29 \text{ cm}^{-1}$ 。  $983 \text{ nm}$  处耦合系数随占空比的变化如图 3(c)所示。

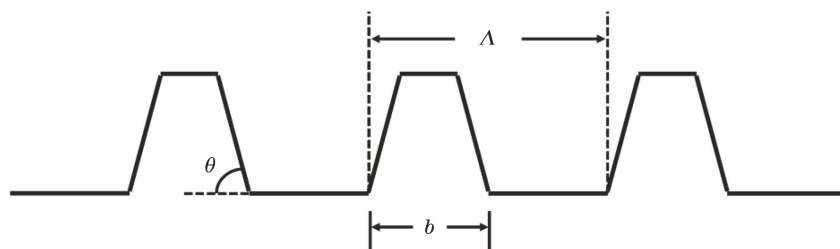


图 2 二阶光栅示意图

Fig. 2 Schematic diagram of second-order grating

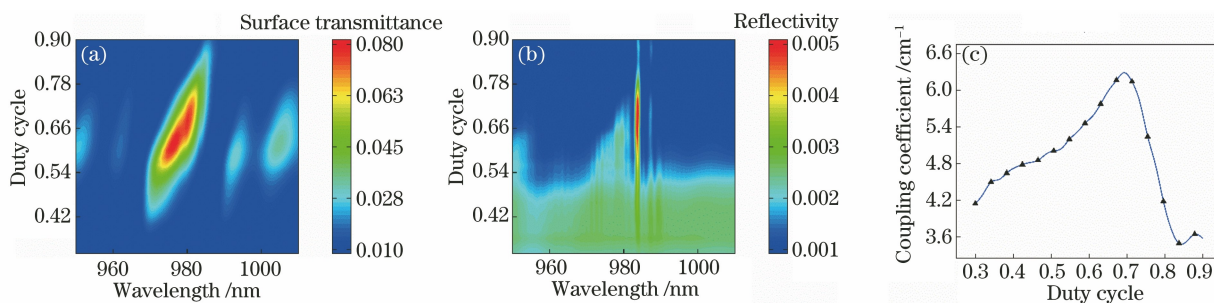


图 3 DFB 光栅占空比对出光特性的影响。(a) 表面出射率;(b) 反射率;(c) 983 nm 处的耦合系数变化

Fig. 3 Influence of DFB grating duty cycle on emission characteristics. (a) Surface transmittance; (b) reflectivity; (c) variation of coupling coefficient at 983 nm

不同 DFB 光栅周期长度下的反射率和耦合系数的变化趋势如图 4 所示。根据布拉格公式  $2n_{\text{eff}}\Lambda = q\lambda$ , 当  $q = 2, n_{\text{eff}} = 3.3, \lambda = 980 \text{ nm}$  时  $\Lambda = 0.297 \mu\text{m}$ 。适当扩大范围后周期长度取值  $0.291 \sim 0.306 \mu\text{m}$ 。可以看出, 反馈耦合的中心波长位置随着周期长度的增大而右移。在有效折射率与阶数确

定的情况下, 周期长度与中心波长成正相关, 符合布拉格条件。因此, DFB 光栅的周期长度可用于波长调节, 在特定的周期长度下, 只有与之对应的波长会产生激射。在设定周期长度为  $0.297 \mu\text{m}$  时, 可以将中心波长的位置移动到  $980 \text{ nm}$  附近。

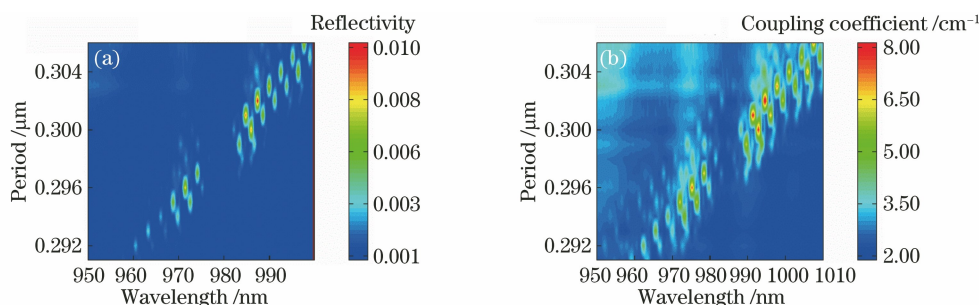


图 4 DFB 周期长度对出光特性的影响。(a) 反射率;(b) 耦合系数

Fig. 4 Influence of DFB grating period length on emission characteristics. (a) Reflectivity; (b) coupling coefficient

不同 DFB 光栅刻蚀深度下的表面出射率和反射率变化趋势如图 5(a)、(b) 所示。光栅刻蚀深度取值范围  $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 。由图可知, 在  $980 \text{ nm}$  波段附近, 当表面出射率大于  $0.06$  时, 出射波长的位置在  $973 \sim 983 \text{ nm}$  之间变化, 刻蚀深度从  $0.1 \mu\text{m}$  变化至  $0.3 \mu\text{m}$ 。当反射率大于  $0.005$  时, 反射峰位置在  $983 \text{ nm}$  左右, 变化范围小于  $1 \text{ nm}$ , 刻蚀深度从  $0.29 \mu\text{m}$  增加至  $0.3 \mu\text{m}$ 。刻蚀深度与耦合系数在

整体上呈正相关趋势, 但随着刻蚀深度增加引起的杂模也会越来越明显。综合考虑光栅刻蚀深度对表面出射率和反射率的影响后, 控制 DFB 光栅刻蚀深度在  $0.35 \mu\text{m}$  以内。在波长等于  $983 \text{ nm}$  的位置, 光栅刻蚀深度取  $0.3 \mu\text{m}$  时, 耦合系数为  $6.13 \text{ cm}^{-1}$ 。  $983 \text{ nm}$  处耦合系数随光栅刻蚀深度的变化如图 5(c) 所示。

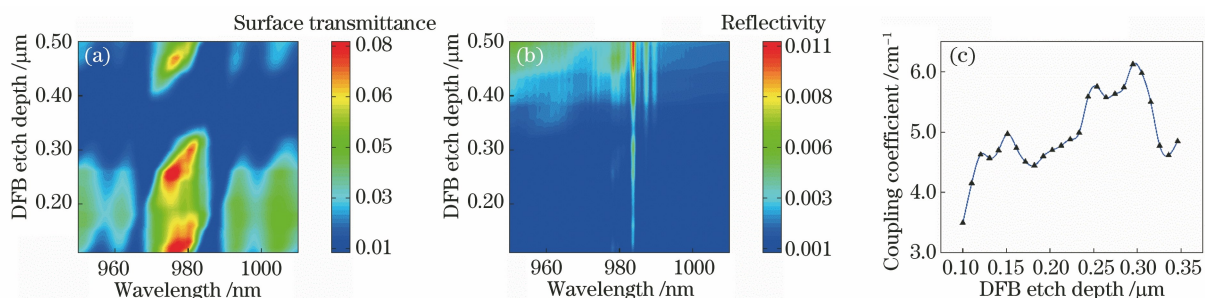


图 5 DFB 光栅刻蚀深度对出光特性的影响。(a)表面出射率;(b)反射率;(c) 983 nm 处的耦合系数变化

Fig. 5 Influence of DFB grating etching depth on emission characteristics. (a) Surface transmittance; (b) reflectivity; (c) variation of coupling coefficient at 983 nm

不同 DFB 光栅倾角下的表面出射率和反射率变化趋势如图 6(a)、(b)所示。光栅倾角取值范围  $70^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 。由图可知,在 980 nm 波段附近,当表面出射率大于 0.06 时,出射波长的位置在 972 ~ 983 nm 之间变化,光栅倾角从  $70^{\circ}$  变化至  $91^{\circ}$ 。当反射率大于 0.005,在光栅倾角小于  $90^{\circ}$  的情况下,反射峰的位置在 983 nm 附近,变化范围小于 1 nm,光栅倾角从  $87^{\circ}$  变化至  $90^{\circ}$ ;在光栅倾角超过  $90^{\circ}$  时

(倒梯形光栅),反射率会继续增大但会出现大量杂峰,同时表面出射率迅速降低。虽然耦合系数仍在增大,但是这种倒梯形光栅在应用中缺乏实际意义,且工艺复杂结构脆弱。故取光栅倾角为  $90^{\circ}$ ,即矩形光栅,在波长等于 983 nm 的位置耦合系数为  $6.04 \text{ cm}^{-1}$ 。983 nm 处耦合系数随光栅倾角的变化如图 6(c)所示。

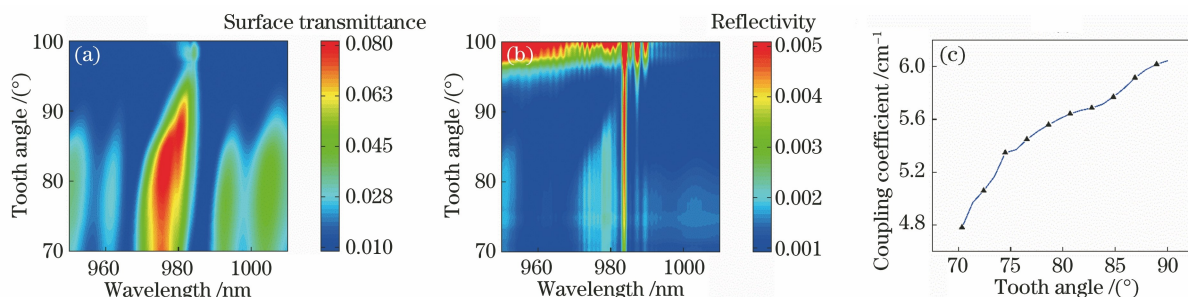


图 6 DFB 光栅倾角对出光特性的影响。(a)表面出射率;(b)反射率;(c) 983 nm 处的耦合系数变化

Fig. 6 Influence of DFB grating tooth angle on emission characteristics. (a) Surface transmittance; (b) reflectivity; (c) variation of coupling coefficient at 983 nm

### 3.2 DBR 反射镜对出光特性的影响

DBR 反射镜取不同占空比时,DFB 光栅的表面出射率与反射率变化趋势如图 7(a)、(b)所示,反射镜占空比取值范围 0.3 ~ 0.9。当表面出射率大于

0.06 时,出射波长的位置在 979 ~ 983 nm 之间,反射镜占空比从 0.36 变化至 0.67。当反射率大于 0.005 时,反射峰在 983 ~ 984 nm 之间小于 1 nm 的范围内变化,反射镜占空比从 0.38 变化至 0.51。

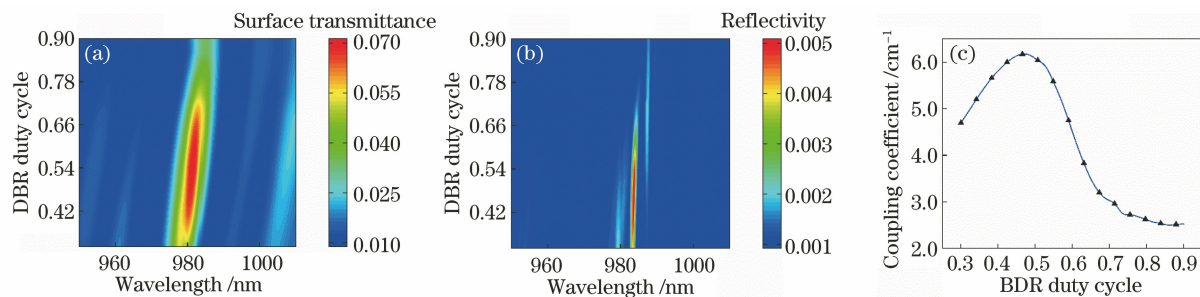


图 7 DBR 反射镜占空比对出光特性的影响。(a)表面出射率;(b)反射率;(c) 983 nm 处的耦合系数变化

Fig. 7 Influence of DBR duty cycle on emission characteristics. (a) Surface transmittance; (b) reflectivity; (c) variation of coupling coefficient at 983 nm

超过这个范围以后,反射率开始减小并会出现杂峰。综合考虑反射镜占空比对光栅表面出射率与反射率的影响后,取反射镜占空比为 0.51,在波长等于 983 nm 的位置反馈耦合系数为  $6.04 \text{ cm}^{-1}$ ,983 nm 处耦合系数随 DBR 反射镜占空比的变化如图 7(c) 所示。

DBR 反射镜取不同材料折射率时,DFB 光栅的表面出射率和反射率的变化趋势如图 8(a)、(b) 所示。DBR 反射镜高材料折射率取值范围 3.24~3.32(低材料折射率保持 3.20 不变)。由图可知,当表面出射率大于 0.06 时,出射波长的位置在 980~

987 nm 之间,高材料折射率从 3.26 变化至 3.32。表面出射率随着高材料折射率的增大而增大。当反射率大于 0.005 时,反射峰在 983~984 nm 之间,高材料折射率从 3.26 变化至 3.27。当高材料折射率大于 3.28 时,会出现另一个较为明显的杂模。随着材料折射率增大,反射峰会完全向右侧偏移。综合考虑反射镜材料折射率对光栅表面出射率与反射率的影响后,取反射镜高材料折射率为 3.27,在波长等于 983 nm 的位置反馈耦合系数为  $6.06 \text{ cm}^{-1}$ ,983 nm 处耦合系数随 DBR 反射镜材料折射率的变化如图 8(c) 所示。

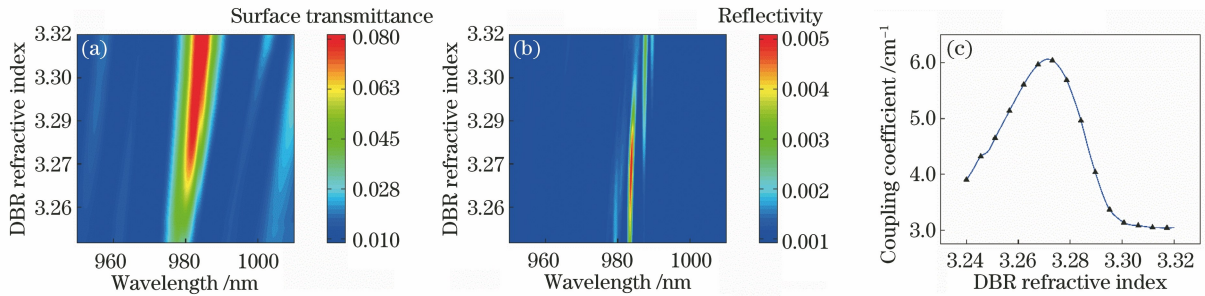


图 8 DBR 反射镜材料折射率对出光特性的影响。(a)表面出射率;(b)反射率;(c) 983 nm 处的耦合系数变化

Fig. 8 Influence of DBR material refractive index on emission characteristics. (a) Surface transmittance; (b) reflectivity; (c) variation of coupling coefficient at 983 nm

DBR 反射镜取不同周期介质层数时,DFB 光栅的表面出射率和反射率的变化趋势如图 9 所示。周期介质层数取值范围 30~60 对。由图可知,在 975~985 nm 波段,当反射镜周期介质层数大于 40 对时,即可获得超过 0.06 的表面出射率。随着反射镜周期介质层数的增多,表面出射率逐渐增大,验证

了 DBR 反射镜加强表面出射的作用。在周期介质层数超过 60 对之后,表面出射率基本不再增大。周期介质层数对反射率的影响相对较小。考虑到实际器件中外延生长工艺的难度,DBR 反射镜周期介质层数不能无限制地增加,应选取较为合理的数量。此处选择周期介质层数为 40 对。

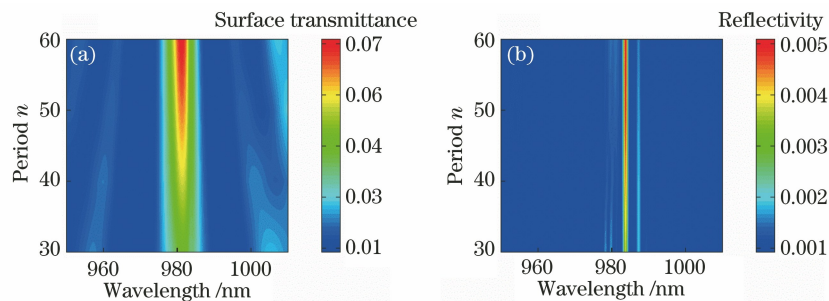


图 9 DBR 反射镜周期介质层数对出光特性的影响。(a)表面出射率;(b)反射率

Fig. 9 Influence of DBR layer number on emission characteristics. (a) Surface transmittance; (b) reflectivity

### 3.3 参数优化结果

通过对不同参数的模拟,得到了最终优化的结构。当表面出射率大于 0.06 时,DFB 光栅的占空比取值范围为 0.55~0.73,刻蚀深度取值范围为 0.1~0.3  $\mu\text{m}$ ,光栅倾角取值范围为  $70^\circ\sim 91^\circ$ ;DBR 反射镜的占空比取值范围为 0.36~0.67,高材料折

射率取值范围为 3.26~3.32(低材料折射率为 3.20)。当反射率大于 0.005 时,DFB 光栅的占空比取值范围为 0.63~0.71,刻蚀深度取值范围为 0.29~0.3  $\mu\text{m}$ ,光栅倾角取值范围为  $87^\circ\sim 90^\circ$ ;DBR 反射镜的占空比取值范围为 0.38~0.51,高材料折射率取值范围为 3.26~3.27(低材料折射率为

3.20)。同时,调整 DFB 光栅的周期长度可以有效控制反射峰的位置,引入 DBR 反射镜具有明显增强表面出射的效果。上述结果归纳于表 1。

通过仿真得到表面出射率与反射率以及光场分

布如图 10 所示。表面出射与反馈耦合的位置均位于 980 nm 波段。在 981.7 nm 的位置,表面出射率取得最大值 0.0944,半峰全宽 4.5 nm。在 981.4 nm 的位置,反射率取得最大值 0.00557。

表 1 参数优化

Table 1 Parameter optimization

| Parameter                     | Surface transmittance (>0.06) | Reflectivity (>0.005)  |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| DFB grating duty cycle        | 0.55–0.73                     | 0.63–0.71              |
| DFB grating period length     | —                             | Wavelength tuning      |
| DFB grating etching depth     | 0.1–0.3 $\mu\text{m}$         | 0.29–0.3 $\mu\text{m}$ |
| DFB grating tooth angle       | 70°–91°                       | 87°–90°                |
| DBR duty cycle                | 0.36–0.67                     | 0.38–0.51              |
| DBR material refractive index | 3.26–3.32                     | 3.26–3.27              |
| DBR layer number              | Enhance surface emitting      | —                      |

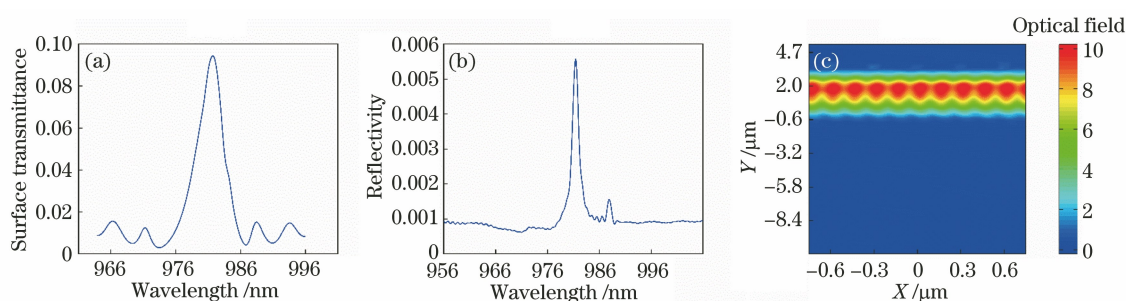


图 10 结构参数优化后的图谱。(a)表面出射率;(b)反射率;(c)光场分布

Fig. 10 Spectrum after optimization of structural parameters. (a) Surface transmittance; (b) reflectivity; (c) optical field

将反射率极值代入(8)式,计算得到反射系数  $r=0.0746$ ,仿真腔长为  $118.8 \mu\text{m}$ ,得到耦合系数  $k=6.29 \text{ cm}^{-1}$ 。代回实际器件中,根据  $kL \approx 1$  得到等价的实际器件长度约为  $1590 \mu\text{m}$ ,与预定的器件长度( $1500 \mu\text{m}$ )基本一致。

## 4 结 论

本研究以二阶光栅面发射分布反馈激光器为背景,提出了一种在衬底位置添加 DBR 反射镜的结构,并围绕不同光栅及反射镜结构参数对光栅出光及反馈特性的影响,使用 FDTD 仿真软件进行了模拟计算。通过仿真计算得到,在二阶 DFB 光栅周期长度等于  $0.297 \mu\text{m}$  时,出射波长位于 980 nm 波段。选用应用范围较广的矩形光栅,取光栅占空比为 0.72 时,在兼顾表面出射率的同时可以获得较好的耦合效率。同时为了避免出现大量杂模与表面出射率大幅下降,控制 DFB 光栅的刻蚀深度为  $0.3 \mu\text{m}$ 。模拟结果同时表明,DBR 反射镜的占空比在取 0.51 时可以得到较高的反射率与表面出射率,继续增大会出现杂峰。另外,DBR 材料折射率的提高会增强表面出射率,但在超过 3.28 后会引

起反射峰明显的偏移。研究还发现,DBR 周期介质层数可以有效增强表面出射,在考虑工艺难度后选取数量为 40 对。本研究结果可为后续相关器件的结构设计与制备提供理论依据。

## 参 考 文 献

- [1] Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.  
陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.
- [2] Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.  
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(1): 0114001.
- [3] Lu D, Yang Q L, Wang H, et al. Review of semiconductor distributed feedback lasers in the optical communication band[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701001.  
陆丹, 杨秋露, 王皓, 等. 通信波段半导体分布反馈激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701001.

- [4] Cheng C, Xin G F, Feng H Z, et al. Temperature characteristics of volume Bragg grating external cavity semiconductor laser working at continuous wave[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(1): 27-30.  
程灿, 辛国锋, 封惠忠, 等. 连续工作的体布拉格光栅外腔半导体激光器的温度特性[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 27-30.
- [5] Xi Y P, Li X, Sadeghi S M, et al. Dispersive-grating distributed feedback lasers [J]. Optics Express, 2008, 16(14): 10809-10814.
- [6] Robadey J, Gourgon C, Gaud E, et al. CW second-order complex coupled DFB lasers with low threshold current density and high monomode stability [J]. Electronics Letters, 1999, 35(24): 2119-2120.
- [7] Hai Y N, Zou Y G, Tian K, et al. Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers[J]. Chinese Optics, 2017, 10(2): 194-206.  
海一娜, 邹永刚, 田锟, 等. 水平腔面发射半导体激光器研究进展[J]. 中国光学, 2017, 10(2): 194-206.
- [8] Sigler C, Kirch J D, Earles T, et al. Design for high-power, single-lobe, grating-surface-emitting quantum cascade lasers enabled by plasmon-enhanced absorption of antisymmetric modes [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(13): 131108.
- [9] Liu Y H, Zhang J C, Jia Z W, et al. Top grating, surface-emitting DFB quantum cascade lasers in continuous-wave operation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1829-1832.
- [10] Boyle C, Sigler C, Kirch J D, et al. High-power, surface-emitting quantum cascade laser operating in a symmetric grating mode [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(12): 121107.
- [11] Shi J X, Qin L, Ye S J, et al. A 927 nm distributed feedback laser with surface second-order metal grating [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(10): 1488-1491.  
仕均秀, 秦莉, 叶淑娟, 等. 具有表面二阶金属光栅的 927 nm 分布反馈半导体激光器的研制[J]. 光子·激光, 2011, 22(10): 1488-1491.
- [12] Yamada M, Sakuda K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach [J]. Applied Optics, 1987, 26(16): 3474-3478.
- [13] Ye S J. Research and manufacture of second-order grating distributed feedback semiconductor lasers [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010.  
叶淑娟. 二阶光栅分布反馈半导体激光器的研制[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [14] Muriel M A, Carballar A. Internal field distributions in fiber Bragg gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(7): 955-957.
- [15] 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.
- [16] Ye S J, Qin L, Qi X D, et al. Emission characteristics of second-order distributed feedback semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2371-2375.  
叶淑娟, 秦莉, 戚晓东, 等. 二阶光栅分布反馈半导体激光器的出光特性[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2371-2375.
- [17] Fang D W, Zhang Y, Li C X, et al. Effect of DBR geometry on reflectivity and spectral linewidth of DBR lasers [J]. Journal of Semiconductors, 2005, 26(12): 2315-2319.  
方达伟, 张艺, 李晨霞, 等. DBR 几何特性对其反射率和 DBR 激光器线宽的影响(英文)[J]. 半导体学报, 2005, 26(12): 2315-2319.
- [18] Zhang J, Liu A J. Dispersion engineering for a metastructure composed of a high-contrast subwavelength grating and a distributed Bragg reflector [J]. Advanced Photonics Research, 2021, 2(10): 2000172.