

## 分布布拉格反射器半导体激光器中光栅结构设计

朱坤, 李辉\*, 郝永芹, 钱冉, 王东岳

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** 半导体激光器发射光谱中的边模存在恶化了其光束质量, 严重限制了其在通信领域中的应用。基于分布布拉格反射器(DBR)半导体激光器中光栅的占空比、耦合系数、材料折射率三者之间的关系, 研究了光栅占空比分布对边模抑制的影响, 同时对矩形均匀光栅和矩形渐变占空比光栅结构的边模进行了分析与比较。优化了DBR光栅结构, 分析了矩形均匀光栅与锥形渐变占空比光栅结构的旁瓣强度大小。利用时域有限差分(FDTD)法对器件结构进行仿真模拟, 在不同光栅占空比分布下, 分析了光栅的占空比和反射率的关系, 并讨论了渐变占空比光栅反射峰值与光栅长度的关系。结果表明, 渐变占空比光栅相比于矩形均匀光栅, 边模得到有效抑制。当注入电流为 63 mA 时, 在温度 300 K 下, 矩形渐变占空比光栅结构的器件边模抑制比达到 48 dB, 并且渐变占空比光栅的反射峰值达到 96%。通过分析矩形均匀光栅和锥形渐变占空比光栅结构在远场侧向切面上的光场分布, 发现利用锥形渐变占空比光栅制作 DBR 有助于降低 DBR 半导体激光器的旁瓣强度。

**关键词** 激光器; 分布布拉格反射半导体激光器; 边模抑制; 渐变占空比光栅; 旁瓣

**中图分类号** TN248.4

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL221297

## 1 引言

半导体激光器具有体积小、重量轻、效率高等优点, 因此, 它在军事、医疗、工业、光通信等领域中有着重要的应用<sup>[1]</sup>。各领域对半导体激光器的性能需求不断提升。目前半导体激光器主要追求更高的输出功率和更好的光束质量。现在大功率输出一般采用激光阵列形式, 阵列中的单管激光器输出光束质量与阵列合成输出光束质量息息相关, 所以提高单管半导体激光器光束质量是阵列激光器高功率输出的前提。在光通信领域的波分复用(WDM)系统中, 较大的旁瓣或功率较大的边模可能会掩盖住较小的信号或造成信号信道之间的串扰, 并且可能会被接收系统误认为是目标信号<sup>[2]</sup>。因此, 研究旁瓣强度<sup>[3]</sup>和边模抑制<sup>[4]</sup>具有重要意义。通信领域中应用的激光器主要是分布反馈(DBF)激光器<sup>[5]</sup>和分布布拉格反射(DBR)半导体激光器<sup>[6]</sup>。DFB 半导体激光器将布拉格光栅置于谐振腔中, 具有波长选择和光学反馈特性, 可实现稳定的单纵模输出, 缺点是易造成空间烧孔, 工艺中需要二次外延生长, 成本高。而 DBR 半导体激光器的光栅是在脊形波导上刻蚀, 不需要二次外延生长, 工艺易制备, 同时具有波长选择性。

针对 DBR 光栅结构对器件输出旁瓣强度和边模抑制的影响, 研究人员开展了大量的研究。早在 1961

年, 研究人员在光栅辅助垂直耦合器中基于呈截断高斯分布的占空比降低了旁瓣强度, 矩形光栅长度中心位置处的占空比(0.64)向光栅两端降低至 0.024, 在 830 nm 处旁瓣强度低于 40 dB<sup>[7]</sup>。1976 年, Kogelnik<sup>[8]</sup>研究了非均匀波导结构中的滤波响应, 使用龙格-库塔法对黎卡提方程进行了数值求解, 给出了线性锥度和二次锥度与耦合系数的关系式。1994 年, Shibata 等<sup>[9]</sup>提出了非周期采样光栅结构, 通过改变波导每段光栅长度与光栅间隔的比值来调制耦合系数, 当周期为 0.24  $\mu\text{m}$  时, 与同周期均匀光栅相比, 边模抑制比提高了 7 dB。2000 年, Wiesmann 等<sup>[10]</sup>首次把变化占空比应用到基于氮氧化硅的布拉格光栅上, 中心波长 1360 nm 处的带宽外旁瓣抑制优于 20 dB。2011 年, Millett 等<sup>[11]</sup>采用步进光刻机制作了 1310 nm 横向耦合分布反馈(LC-DFB)激光器, 在注入电流 150 mA、温度 298 K 下, 在 4  $\mu\text{m}$  宽度的脊波导侧向刻蚀了光栅结构, 剩余波导宽度为 3  $\mu\text{m}$ , 边模抑制比超过了 52 dB。2021 年, 齐军等<sup>[12]</sup>制备了侧向微结构宽脊半导体激光器, 通过在 120  $\mu\text{m}$  脊波导两侧刻蚀 35  $\mu\text{m}$  侧向微结构, 降低了近场光斑中的多瓣强度。根据上述研究发现, 制备啁啾结构 DBR 或者调节 DBR 刻蚀深度能够降低边模强度, 但工艺复杂并且很难量产。调节 DBR 占空比能够降低边模强度并简化工艺, 但具体调节机制和原理尚不明确。

收稿日期: 2022-10-05; 修回日期: 2022-11-10; 录用日期: 2022-12-05; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(61864002)、长春市科技发展计划项目(21ZY59)

通信作者: \*lihui@cust.edu.cn

本文研究了 DBR 占空比的分布对边模的抑制规律,通过时域有限差分(FDTD)法建立仿真模型,分析了不同占空比分布对边模抑制和中心波长反射峰值的影响,确定了最佳占空比分布。分析了渐变占空比光栅的反射峰值与光栅长度的关系。建立了三维锥形光栅结构<sup>[13]</sup>和矩形光栅结构 DBR,通过对锥形光栅结构的远场场强分布进行分析,研究了光栅结构对 DBR 半导体激光器输出旁瓣强度的影响,为进一步利用光栅结构改善 DBR 半导体激光器的光束质量提供了参考。

## 2 理论分析基本原理

### 2.1 光栅占空比分析

DBR 半导体激光器中光栅的选频特性对光束质量起到至关重要的作用,而光栅两端折射率突变,形成 F-P 效应,导致更多的波长反射,边模抑制效果差。布拉格光栅是由两种不同介质组成的,两种不同介质可视为是相互平行的平板。图 1 为平板介质示意图,平板介质 1 置于空气(等效为平板介质 2)中,平板介质 1 的介电常数为  $\epsilon_1$ ,厚度为  $t_1$ ,平板介质 2 的介电常数为  $\epsilon_2$ ,厚度为  $t_2$ 。

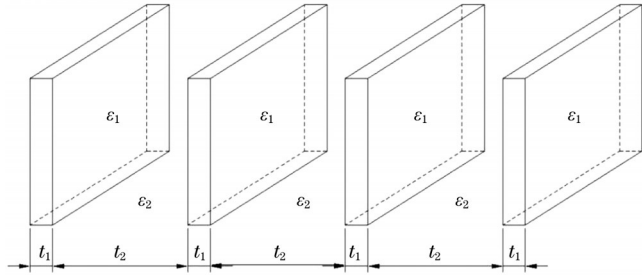


图 1 平板介质示意图

Fig. 1 Schematic of plate media

首先,假设有一个平面单色波照射布拉格光栅并且假设光波的电矢量垂直光板平面。两种介质的厚度小于入射波长,则可以认为两种介质里的场是均匀的。根据电磁场的边值关系,电位移矢量( $D$ )在两种介质分界面的法向上是连续的,因此它们的电位移矢量值相同。两种介质对应的电场分别为

$$\begin{cases} E_1 = \frac{D}{\epsilon_1} \\ E_2 = \frac{D}{\epsilon_2} \end{cases} \quad (1)$$

在光栅的一个周期里,平均电场是

$$E = \frac{t_1 \frac{D}{\epsilon_1} + t_2 \frac{D}{\epsilon_2}}{t_1 + t_2} \quad (2)$$

根据介质边界条件  $D = \epsilon E$ ,有

$$\epsilon = \frac{D}{E} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{f_1 \epsilon_1 + f_2 \epsilon_2} \quad (3)$$

式中: $\epsilon$ 是有效介电常数; $f_1$ 和 $f_2$ 是两种介质的占空比,

$$\text{且 } f_1 = \frac{t_1}{t_1 + t_2}, f_2 = \frac{t_2}{t_1 + t_2}.$$

其次,假设平面单色波的电矢量平行于平板,电场强度在两种介质分界面上是连续的。两种介质的电场具有相同值。

$$\begin{cases} D_1 = \epsilon_1 E \\ D_2 = \epsilon_2 E \end{cases} \quad (4)$$

式中: $D_1$ 是介质 1 的电位移矢量; $D_2$ 是介质 2 的电位移矢量。所以平均电位移矢量为

$$D = \frac{t_1 D_1 + t_2 D_2}{t_1 + t_2} = \frac{t_1 \epsilon_1 E + t_2 \epsilon_2 E}{t_1 + t_2} \quad (5)$$

有效介电常数为

$$\epsilon = \frac{D}{E} = \frac{t_1 \epsilon_1 + t_2 \epsilon_2}{t_1 + t_2} = f_1 \epsilon_1 + f_2 \epsilon_2. \quad (6)$$

从上述分析可以看出,在平行于平板的方向上介电常数都是相同的,在垂直于平板的方向上介电常数则是不同的,所以光栅表现出负单轴晶体特性。

本文致力于抑制边模与降低旁瓣强度,利用耦合模理论<sup>[14]</sup>分析耦合系数<sup>[15]</sup>与介电常数的关系。一般采用正向行波和反向行波相互耦合的耦合波理论分析光在周期结构中的传播或反射。在布拉格反馈光栅中,每一点的光场是正向行波和反向行波的和;而且每一行波在传输方向上的变化,都有一定比率(称为耦合系数的)的相向传播行波与其耦合。

在周期介质中,介电张量的周期性变化被认为是一种微扰,它耦合了结构的未受扰动的正常模式<sup>[16]</sup>。介电张量函数表示为

$$\epsilon(x, y, z) = \epsilon_0 + \Delta\epsilon, \quad (7)$$

式中: $\epsilon_0$ 是介电张量未受扰动的部分; $\Delta\epsilon$ 是传播方向上介电张量周期变化的部分。

如果考虑小发散角的光束,对于在横向上折射率变化不大的介质,矢量波动方程可简化为标量波动方程。假设场矢量在空间和时域上是可分离的,这些模式满足标量波动方程

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \omega^2 \mu \epsilon_0(x, y) - \beta_m^2 \right] E_m(x, y) = 0, \quad (8)$$

式中: $\omega$ 是角频率; $\mu$ 是磁导率; $\beta_m$ 是传播常数; $E_m(x, y)$ 是模式振幅; $m$ 是模式阶数。光在光栅中的传播可看作是正向行波和反向行波的耦合相长干涉传播。因此,正向模式( $\beta_s$ )和反向模式( $-\beta_s$ )之间的耦合模式方程为

$$\begin{cases} \frac{dA_s}{dz} = -ikB_s \exp(i\Delta\beta z) \\ \frac{dB_s}{dz} = ik^* A_s \exp(-i\Delta\beta z) \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $A_s$ 是正向模式 $\beta_s$ 的振幅; $B_s$ 是反射模式 $-\beta_s$ 的振幅; $k$ 为反向模式耦合系数; $k^*$ 为正向模式耦合系数。入射波与反射波强烈耦合时满足相位匹配条件:

$$\Delta\beta = \beta_s - (-\beta_s) = m' \left( \frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (10)$$

式中： $m'=1, 2, 3, \dots$ ； $\Lambda$  是光栅周期。光栅中的耦合系数形式是

$$k = \frac{i\omega\epsilon_0(n_1^2 - n_2^2)}{4l\pi} \int |E_s|^2 dx, \quad (11)$$

式中： $n_1$  为填充介质材料的折射率； $n_2$  为波导介质材料的折射率； $l$  为介质扰动的傅里叶分量， $l=1, 3, 5, \dots$ 。该耦合系数表示在布拉格光栅中在介质扰动的第  $l$  阶傅里叶分量下正向模式和反向模式的耦合程度。从以上分析可知，布拉格光栅类似于负单轴晶体，可通过调节耦合系数来改变折射率分布。

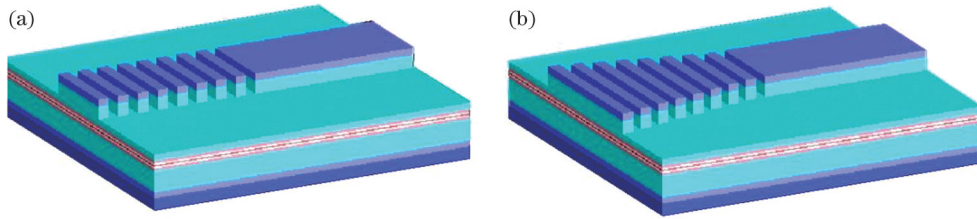


图 2 光栅结构示意图。(a) 矩形均匀占空比光栅；(b) 锥形均匀占空比光栅

Fig. 2 Structural diagrams of gratings. (a) Rectangular grating with uniform duty cycle; (b) tapered grating with uniform duty cycle

### 3 仿真模型

#### 3.1 渐变占空比光栅模型

光栅结构不仅能起到选频的作用，而且还可以降低旁瓣强度以改善光束质量。光传输方向上的光栅折射率调制，可以理解为在材料有效折射率基础上，通过刻蚀光栅产生微小的调制折射率。根据光栅中的介电常量，可以将光栅中的折射率分布<sup>[17]</sup>写为

$$n_{\text{eff}}(z) = n_0 + \delta n_{\text{eff}}(z) \left\{ 1 + \nu \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\}, \quad (12)$$

式中： $n_0$  是材料有效折射率； $\delta n_{\text{eff}}(z)$  是折射率调制幅度变化； $\nu$  为折射率变化的条纹可见度； $\phi(z)$  是相移量； $z$  是光传播方向的位置。这里  $\delta n_{\text{eff}}(z)$  可视为本底

#### 2.2 锥形光栅结构分析

惠更斯阐述了光波在空间中传播的机理，认为空间中的点光源发出光波，波阵面上的每一个点作为一个次波扰动中心发出子波，这些子波相干叠加，形成新的波阵面。

根据惠更斯-菲涅耳原理，光波接触的面积元越大，衍射回的子波越多，由干涉叠加原理可知能量中心值相对更大。而锥形均匀占空比 DBR 光栅（光栅结构为锥形，占空比为常数，图 2(b)）相对于矩形均匀占空比 DBR 光栅（光栅结构为矩形，占空比为常数，图 2(a)）有较大的光波接触面积，能更充分地将窄脊波导边缘处的光波反射、耦合进窄脊波导中。

折射率， $\delta n_{\text{eff}}(z) \nu \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right]$  可视为交流折射率。

均匀光栅和渐变占空比光栅的本底折射率与交流折射率如图 3 所示。

图 3(a) 中的交流折射率在光栅两端突变，形成 F-P 效应，这是引起反射光谱中边模的主要原因。因此，降低光栅两端的折射率突变是必要的。从上面的推导可以看出，耦合系数  $k$  和折射率呈正比的变化关系，沿光栅长度方向调节耦合系数分布，使光栅长度中心位置处的耦合系数值向光栅两端逐渐衰减，削弱光栅两端的折射率突变，降低谐波振荡，改善光束质量<sup>[18]</sup>。光栅占空比与耦合系数满足  $k \propto \sin(\pi \times d_c)$ ，其中  $d_c$  是占空比。通过调节占空比来改变耦合系数，进而抑制边模。

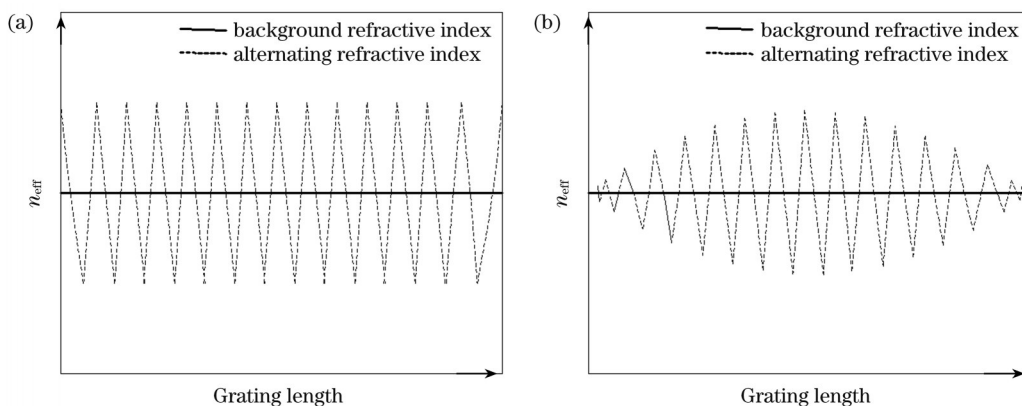


图 3 折射率分布示意图。(a) 均匀光栅折射率分布；(b) 渐变占空比光栅折射率分布

Fig. 3 Schematics of refractive index distributions. (a) Refractive index distribution of uniform grating; (b) refractive index distribution of grating with gradient duty cycle



### 3.2 锥形渐变占空比光栅结构模型

宽条形半导体激光器虽然能增大输出功率,但由于受到腔面灾变损伤<sup>[19]</sup>、空间烧孔<sup>[20]</sup>的限制,随着工作电流的增加,极易产生高阶模<sup>[21]</sup>。而 DBR 半导体激光器的脊形区可抑制高阶模式激发,在激光器窄脊波导上制作的集成光栅区能够起到选频的作用,可更加有效地提高模式过滤效率。

为了使光栅基模更好地耦合进脊形波导,减少脊形波导边缘处的能量损失,可采用锥形光栅结构。锥形光栅结构的光波接触面积比矩形光栅结构大,且锥形结构能够使光波更好地耦合进窄脊波导中,避免激发高阶模式。所以根据光的干涉叠加原理,当反射光强度增加时,干涉场中心位置的能量增加。器件模

拟时使用时域有限差分法分析器件结构。表 1 为模拟的锥形渐变占空比 DBR 半导体激光器光栅的结构参数。图 4 为模拟的器件结构示意图。

表 1 锥形渐变占空比光栅的结构参数

Table 1 Structural parameters of tapered grating with gradient duty cycle

Structural parameter	Value
Grating length ( $L_{\text{Grating}}$ ) /mm	1
Grating width ( $W_1$ ) / $\mu\text{m}$	10
Grating period ( $\Lambda$ ) / $\mu\text{m}$	0.991
Grating height ( $H_{\text{Grating,etch}}$ ) / $\mu\text{m}$	1.1
Ridge waveguide width ( $W_2$ ) / $\mu\text{m}$	4
Ridge waveguide height ( $H_{\text{RW,etch}}$ ) / $\mu\text{m}$	1.1

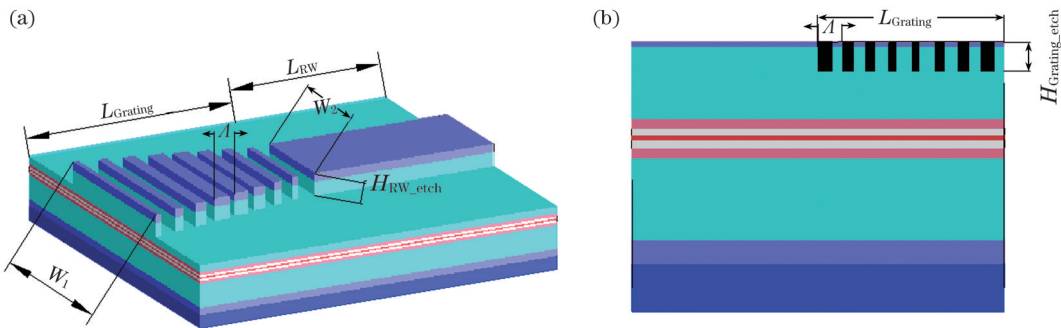


图 4 带有锥形渐变占空比光栅的 DBR 半导体激光器结构示意图。(a) 三维; (b) 二维

Fig. 4 Structural diagrams of DBR semiconductor laser including tapered grating with gradient duty cycle. (a) Three-dimensional; (b) two-dimensional

## 4 分析与讨论

### 4.1 矩形均匀光栅结构的反射率与占空比的关系

传统 DBR 半导体激光器采用占空比为固定常数的矩形结构光栅,当满足布拉格条件时,DBR 激光器激励波在光栅中发生干涉衍射,光栅起到选频的作用:

$$m\lambda = 2n\Lambda, \quad (13)$$

式中: $m$ 为光栅阶数; $\lambda$ 为波长; $n$ 为有效折射率。

虽然光栅阶数越小,损耗越小,反射率越大,但根据式(13),光栅阶数越小,光栅周期越小,工艺难度增加,很难工业量产化。因此,选择六阶 DBR 光栅,以  $1.1 \mu\text{m}$  刻蚀深度为准。半导体激光波长为  $1060 \text{ nm}$ ,材料有效折射率约为  $3.2$ ,根据式(13)计算出周期为  $991 \text{ nm}$  左右。因为 FDTD 法的计算需要较大的计算机内存,为了满足内存需求且保证计算相对准确,这里选择模拟的矩形均匀光栅结构参数为光栅长度  $L_{\text{Grating}} = 0.6 \text{ mm}$ ,光栅宽度  $W_1 = W_2 = 4 \mu\text{m}$ ,如表 2 所示,其他参数与表 1 相同。图 5 为光栅反射率与占空比的关系。

从图 5 可以看出,当光栅占空比为  $0.58$  时,其反射率最大,但当占空比为  $0.58$  时,边模反射率也非常大。矩形均匀光栅两端存在折射率差,致使更多的波长反

表 2 矩形均匀光栅结构参数

Table 2 Structural parameters of rectangular uniform grating

Structural parameter	Value
Grating length ( $L_{\text{Grating}}$ ) /mm	0.6
Grating width ( $W_1$ ) / $\mu\text{m}$	4
Ridge waveguide width ( $W_2$ ) / $\mu\text{m}$	4

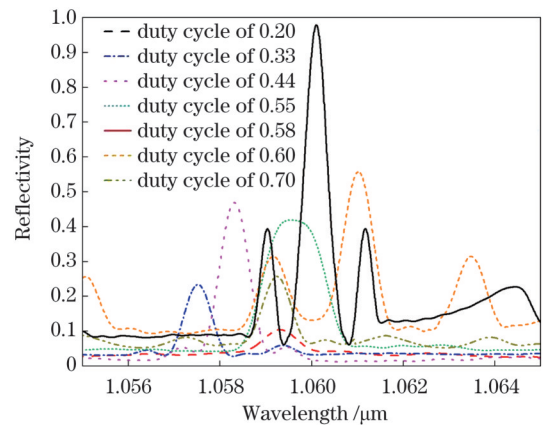


图 5 反射率与占空比的关系

Fig. 5 Reflectance versus duty cycle

射。为了抑制半导体激光器的边模,采取渐变占空比 DBR 光栅结构。

#### 4.2 耦合系数与光栅占空比的关系

采用渐变占空比光栅结构的目的是调节耦合系数、消除 F-P 效应。所以模拟光栅占空比与耦合系数的关系,寻找最佳占空比渐变区间以调节耦合系数。为了使结果更加准确,在 0.1~0.9 的占空比区间,选取了 22 个点作为研究对象,如图 6 所示。

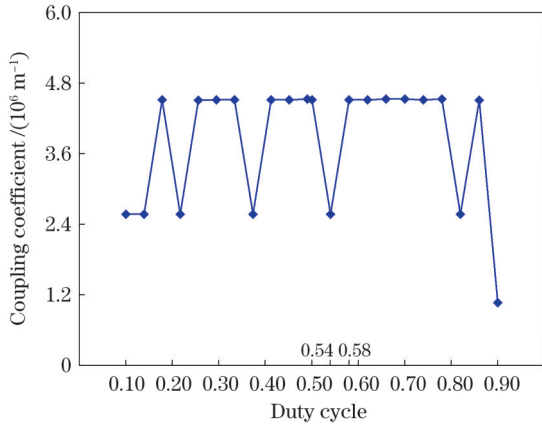


图 6 耦合系数与占空比的关系

Fig. 6 Coupling coefficient versus duty cycle

均匀光栅在占空比为 0.58 时反射率最大(图 5),所以本文选择矩形均匀光栅占空比为 0.58。图 6 显示,当占空比为 0.54~0.58 时,耦合系数随光栅占空比的增加而逐渐增大。通过改变光栅占空比来降低光栅两端的耦合系数,因此以 0.58 为光栅长度中心位置处的占空比值,分别向光栅两端减小占空比至 0.54。之后在占空比渐变区间内,研究占空比的分布规律以抑制边模。

#### 4.3 矩形渐变占空比光栅与矩形均匀光栅的边模抑制

根据图 6 所示耦合系数与矩形占空比的关系,得到矩形渐变占空比光栅的最佳占空比渐变区间为 0.54~0.58 和 0.58~0.54。以 0.58 为矩形渐变占空比光栅长度中心位置处的占空比值,分别向光栅两端减小占空比至 0.54。模拟结果如图 7 所示,占空比呈截断辛格函数分布。

从图 7 可以看出,对于占空比呈截断辛格函数分布的矩形渐变占空比光栅,在渐变区间 0.54~0.58 和 0.58~0.54 中(光栅长度中心位置处的占空比为 0.58,占空比向光栅两端递减到 0.54),相对于渐变区间 0.545~0.580 和 0.580~0.545(光栅长度中心位置处的占空比为 0.58,占空比向两光栅两端递减到 0.545),边模反射强度的降低程度几乎相同,但中心波长处的反射峰值小于渐变区间为 0.545~0.580 和 0.580~0.545 时的反射峰值。因此,选择 0.545~0.580 和 0.580~0.545 作为矩形渐变占空比光栅的占空比渐变区间。截断辛格函数公式为

$$F = \text{sinc}(x') = \frac{\sin(x')}{x'}, \quad (14)$$

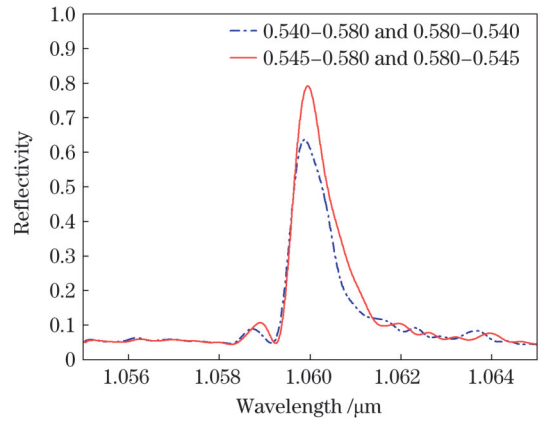


图 7 不同占空比区间下的矩形渐变占空比光栅反射谱

Fig. 7 Reflection spectra of rectangular grating with gradient duty cycle under different duty cycle ranges

式中: $F$ 为光栅占空比; $x'$ 为辛格函数的自变量。下面将占空比呈截断辛格函数分布的矩形渐变占空比光栅与矩形均匀光栅进行了对比。图 8 为矩形均匀光栅与占空比呈截断辛格函数分布的矩形渐变占空比光栅的反射谱。

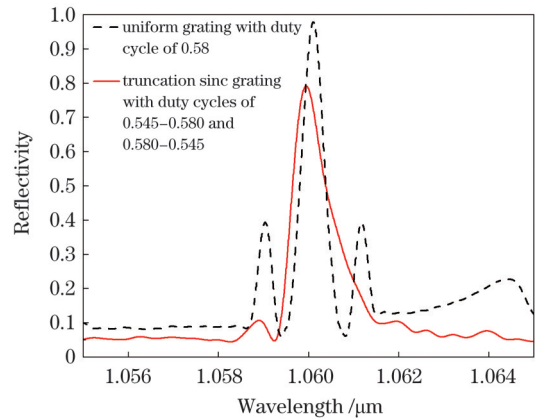


图 8 矩形均匀光栅与矩形渐变占空比光栅的反射谱

Fig. 8 Reflection spectra of rectangular uniform grating and rectangular grating with gradient duty cycle

从图 8 可以看出,对于占空比为 0.58 的矩形均匀光栅,中心波长两侧的边模反射率较大。因为矩形均匀光栅的占空比为一定值,耦合系数为常数,根据耦合模理论中耦合系数与折射率变化率的关系可知,折射率在光栅两端突变,形成 F-P 腔效应,导致谐波振荡加强。而对于矩形渐变占空比光栅,中心波长两侧的边模强度明显较低,但中心波长处的反射率小于矩形均匀光栅。由于占空比在光栅长度方向上呈截断辛格函数分布,因此折射率在光栅两端较小,削弱了 F-P 腔效应,降低了边模反射强度。同时,由于矩形渐变占空比光栅的耦合系数减小,因此中心波长处的反射率小于矩形均匀光栅。

为了使激光器输出光束获得良好的单纵模和中心波长处较大的反射率,这里比较了呈不同函数分布的占空比对边模抑制和中心波长处反射率的影响。根据

图 7 的不同渐变区间分析,选取区间 0.545~0.580 和 0.580~0.545,分别模拟各占空比函数分布对边模的影响。

图 9 为不同占空比函数分布下光栅的反射谱,其中横轴 X 表示相对于光栅长度中心位置的距离。

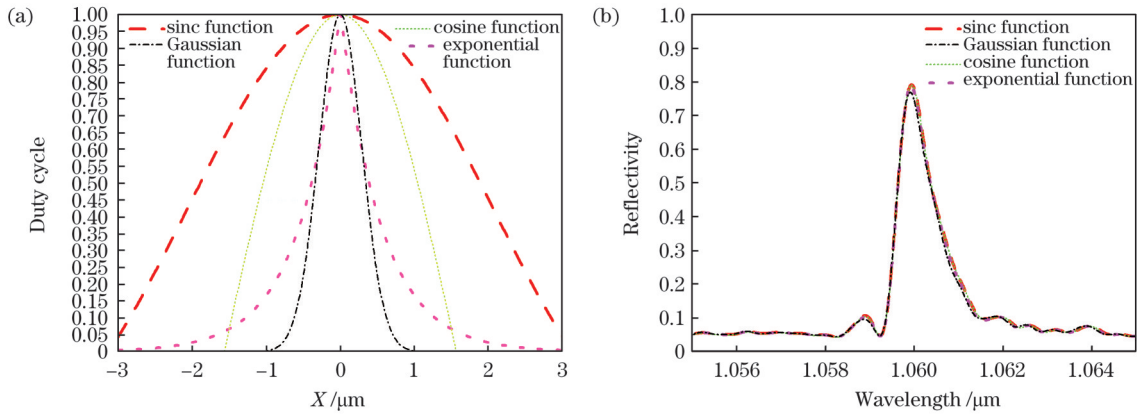


图 9 占空比分布对反射谱的影响。(a)呈不同函数分布的占空比曲线；(b)不同占空比函数分布下光栅的反射谱  
Fig. 9 Influence of duty cycle distribution on reflection spectrum. (a) Duty cycle curves with different function distributions; (b) reflection spectra of gratings under duty cycles with different function distributions

如图 9(b)所示,不同占空比函数分布下光栅的反射谱几乎没有差别。这是因为占空比的渐变区间较小,占空比渐变轮廓不明显,所以模拟软件不能精确识别占空比渐变轮廓。为了增大占空比渐变轮廓的对比度,在不改变函数曲线分布形状的条件下,将各函数的峰值降到 0.583,此时各函数称为降维函数。图 10 为占空比呈降维函数分布时的反射谱。

斜率变化率较大,所以折射率变化大。而对于呈指数函数和截断辛格函数分布的占空比,折射率变化稳定。从图 10(b)可以看到,当占空比呈辛格函数、高斯函数、余弦函数分布时,中心波长附近的边模反射值较大。而对于呈指数函数和截断辛格函数分布的占空比,在中心波长 1060 nm 附近存在较低的边模反射。但中心波长处的反射率依然小,所以需要采用其他方法来增加中心波长处的反射率,如增加渐变占空比光栅的长度。

图 10(a)所示是呈降维函数分布的占空比分布曲线,中心位置 X=0 处两侧的折射率大,占空比曲线的

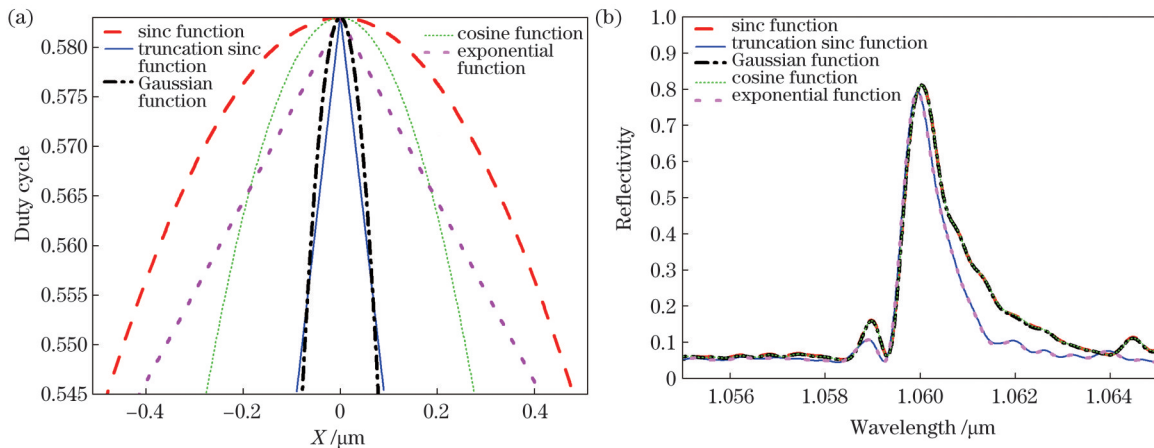


图 10 呈降维函数分布的占空比对反射谱的影响。(a)呈不同函数分布的占空比曲线；(b)不同占空比函数分布下光栅的反射谱  
Fig. 10 Influence of duty cycle with reduced dimension function distribution on reflection spectrum. (a) Duty cycle curves with different function distributions; (b) reflection spectra of gratings under duty cycles with different function distributions

#### 4.4 渐变占空比光栅的反射率与光栅长度的关系

从图 8 可以看出,矩形渐变占空比光栅的反射率比矩形均匀光栅小,并且呈不同函数分布的占空比也不能增加中心波长处的反射率,因此,研究不同光栅长度下矩形渐变占空比光栅的反射率。图 11 为反射率与光栅长度关系的计算曲线。

栅长度在 1000 μm 以外时,矩形均匀光栅的反射率随光栅长度的增加而减小。当光栅长度增加时,光栅区的吸收损耗增加,反射率减小。因此,选择光栅长度为 1000 μm。而对于矩形渐变占空比光栅,当光栅长度在 300 μm 以内时,反射率随光栅长度的增加而增大,当光栅长度在 300 μm 以外时,光栅长度越长,反射率越小。由于光栅渐变占空比的最大值位置随光栅长度的增加而远离脊形波导和光栅交界处,因此光场在光

如图 11 所示,当光栅长度在 1000 μm 以内时,矩形均匀光栅的反射率随光栅长度的增加而增大,当光



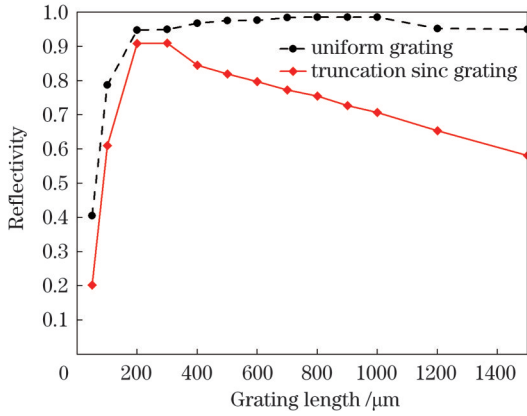


图 11 反射率与光栅长度的关系  
Fig. 11 Reflectivity versus grating length

栅中传播的距离增加,反射率降低。其次,随着光栅长度的增加,较大占空比的区域相对减小。所以,使用一段矩形均匀光栅来增加矩形渐变占空比光栅的耦合系数,在光栅两端使用矩形渐变占空比光栅,在光栅中心区域使用矩形均匀光栅,如图 12 所示。

如图 12 (a) 所示,当光栅长度为 0~250 μm 和

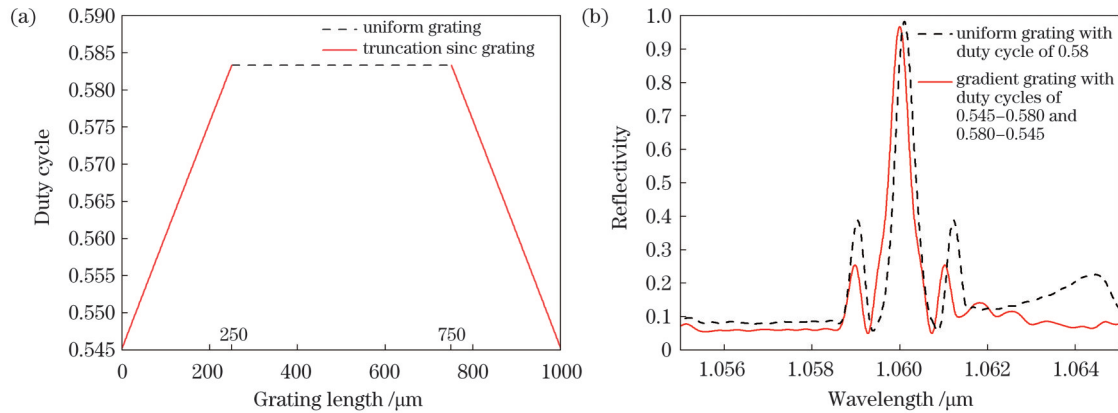


图 12 当光栅长度为 1000 μm 时矩形渐变占空比光栅与矩形均匀光栅的反射谱。(a) 渐变占空比分布曲线;(b) 矩形渐变占空比光栅与矩形均匀光栅的反射谱

Fig. 12 Reflection spectra of rectangular grating with gradient duty cycle and rectangular uniform grating when grating length is 1000 μm. (a) Distribution of gradient duty cycle; (b) reflection spectra of rectangular grating with gradient duty cycle and rectangular uniform grating

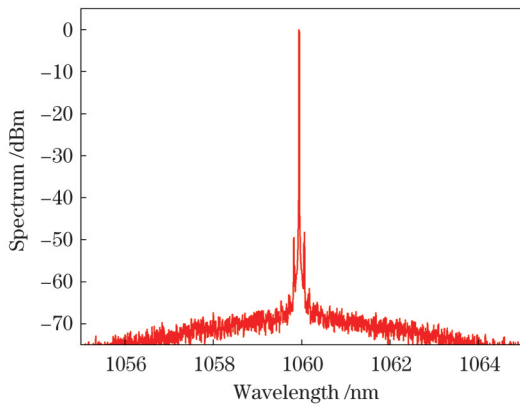


图 13 带有矩形渐变占空比光栅的器件光谱图

Fig. 13 Spectrum of device including rectangular grating with gradient duty cycle

750~1000 μm 时,光栅占空比呈截断辛格函数分布,当光栅长度为 250~750 μm 时使用常数占空比。如图 12 (b) 所示,在光栅长度为 1000 μm 的条件下,当使用呈截断辛格函数分布的占空比和常数占空比的组合(图 12 (a)) 时,渐变占空比光栅的反射率约为 96%,几乎与矩形均匀光栅相等,并且边模也得到抑制。

图 13 为模拟的带有矩形渐变占空比光栅的激光器的发射光谱图。可以看出,当注入电流为 63 mA 时,在温度 300 K 下,带有矩形渐变占空比光栅(占空比分布如图 12 (a) 所示)的器件的边模抑制比达到 48 dB。

#### 4.5 带有锥形渐变占空比光栅的半导体激光器输出的旁瓣强度

半导体激光器激射的激光在侧向切面不同位置处的光场强度不同。在通常情况下,希望光场能量集中在主瓣上,降低旁瓣强度。根据上述分析,选取  $L_{\text{Grating}} = 1 \text{ mm}$ 、 $W_1 = 10 \text{ μm}$ 、 $W_2 = 4 \text{ μm}$ ,具体锥形渐变占空比光栅的结构参数如表 3 所示。矩形均匀占空比光栅参数为  $L_{\text{Grating}} = 1 \text{ mm}$ 、 $W_1 = 4 \text{ μm}$ 、 $W_2 = 4 \text{ μm}$ ,其余参数如表 3 所示。

利用 FDTD 法的模拟功能,在脊形波导与锥形渐变占空比光栅及脊形波导与矩形光栅的交界处,研究了锥形渐变占空比光栅在无穷远处的场分布特性,假设光场传输无损耗。图 14 为不同类型光栅的远场分布。

如图 14 (a) 所示,矩形均匀光栅远场的中心瓣能量较小,两侧的旁瓣能量相对较大。如图 14 (b) 所示,占空比呈截断辛格函数分布的锥形渐变占空比光栅的中心瓣能量比两侧旁瓣能量大。在同样的仿真模拟条件下,可以看出占空比呈截断辛格函数分布的锥形渐变占空比光栅相对于矩形均匀光栅,中心瓣附近的旁瓣能量小,并且中心瓣的能量远高于矩形均匀光栅的中心瓣能量。在对比中还可以发现,锥形光栅结构的

表 3 光栅的结构参数  
Table 3 Structural parameters of gratings

Structural parameter	Tapered grating with gradient duty cycle	Rectangular uniform grating
Grating length ( $L_{\text{Grating}}$ ) / mm	1	1
Grating width ( $W_1$ ) / $\mu\text{m}$	10	4
Ridge waveguide width ( $W_2$ ) / $\mu\text{m}$	4	4
Grating period ( $\Lambda$ ) / $\mu\text{m}$	0.991	0.991
Grating height ( $H_{\text{Grating,etch}}$ ) / $\mu\text{m}$	1.1	1.1
Ridge waveguide height ( $H_{\text{RW,etch}}$ ) / $\mu\text{m}$	1.1	1.1

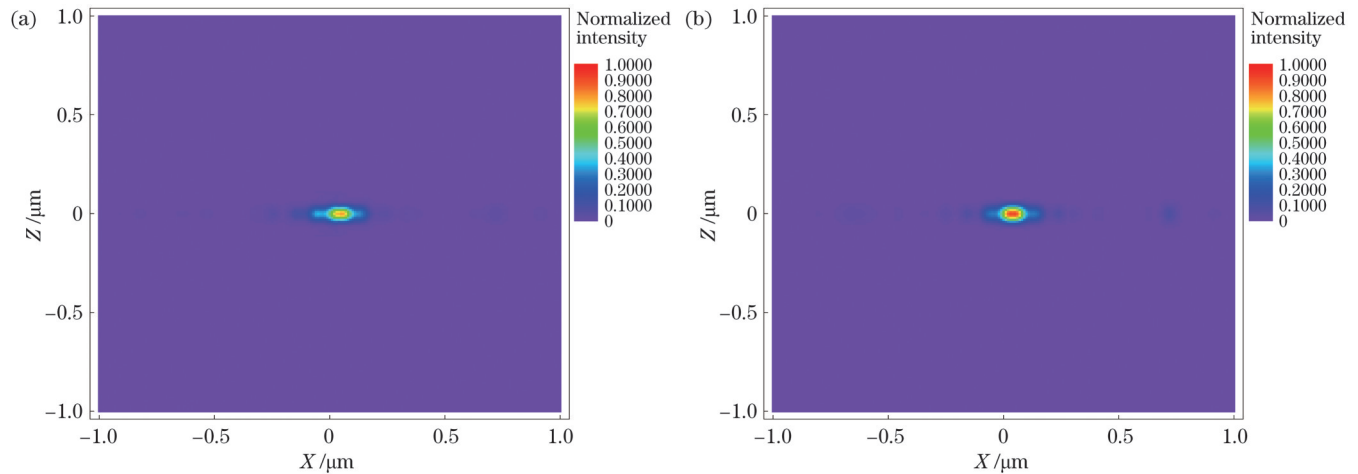


图 14 器件的远场场强分布。(a)矩形均匀光栅的远场分布；(b)占空比呈截断辛格函数分布的锥形渐变占空比光栅的远场分布  
Fig. 14 Far field intensity distributions of devices. (a) Far field distribution of rectangular uniform grating; (b) far field distribution of tapered grating with gradient duty cycle when duty cycle is truncated sinc function distribution

旁瓣强度虽没有下降,但锥形光栅结构的中心主瓣能量高于矩形光栅结构,表明锥形光栅结构可以使激光器输出能量更加集中。

## 5 结 论

研究了布拉格光栅的占空比分布以及光栅结构对边模抑制和旁瓣强度的影响。基于 DBR 半导体激光器建立了结构模型,通过改变光栅占空比的分布以及光栅结构进行仿真。结果表明,矩形均匀光栅两端折射率发生突变,谐波振荡加强,导致谐波反射峰值增大。矩形光栅结构不能将基模充分衍射回窄脊边缘,使干涉能量降低,相对旁瓣强度大。使用呈截断辛格函数分布的占空比和常数占空比的组合,通过对比渐变占空比光栅与矩形均匀光栅结构,得到了边模抑制较好和反射率最大的 DBR 结构参数,并且发现占空比呈截断辛格函数分布的锥形渐变占空比光栅相对于矩形均匀光栅结构降低了激光器输出的旁瓣强度,增大了主瓣能量。相对之前的常规 DBR 结构,这种 DBR 半导体激光器的工艺简单,且仅通过调节锥形光栅结构的占空比分布,既能提高 DBR 半导体激光器的边模抑制比,又可以降低旁瓣强度,为高功率、高光束质量半导体激光器的研究提供了一定参考。

## 参 考 文 献

- [1] 范杰, 龚春阳, 杨晶晶, 等. 分布布拉格反射器半导体激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 060003.  
Fan J, Gong C Y, Yang J J, et al. Research progress of distributed Bragg reflector semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 060003.
- [2] Varshney L R, Thomas D. Sidelobe reduction for matched filter range processing[C] // Proceedings of the 2003 IEEE Radar Conference (Cat. No. 03CH37474), May 8, 2003, Huntsville, AL, USA. New York: IEEE Press, 2003: 446-451.
- [3] Southwell W H. Using apodization functions to reduce sidelobes in rugate filters[J]. Applied Optics, 1989, 28(23): 5091-5094.
- [4] Shi Y C, Li S M, Guo R J, et al. A novel concavely apodized DFB semiconductor laser using common holographic exposure[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 16022-16028.
- [5] 李杨, 冯源, 李洋, 等. 大功率分布反馈半导体激光器研究进展[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(6): 388-396, 407.  
Li Y, Feng Y, Li Y, et al. Research progress of high power distributed feedback semiconductor lasers[J]. Micronanoelectronic Technology, 2018, 55(6): 388-396, 407.
- [6] 贾宝山, 王皓, 李爱民, 等. 窄线宽 1064 nm 分布布拉格反射半导体激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0501006.  
Jia B S, Wang H, Li A M, et al. Narrow linewidth 1064 nm distributed Bragg reflector semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0501006.
- [7] Sakata H. Sidelobe suppression in grating-assisted wavelength-selective couplers[J]. Optics Letters, 1992, 17(7): 463-465.
- [8] Kogelnik H. Filter response of nonuniform almost-periodic structures[J]. The Bell System Technical Journal, 1976, 55(1): 109-126.



- [9] Shibata Y, Tamamura T, Oku S, et al. Coupling coefficient modulation of waveguide grating using sampled grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(10): 1222-1224.
- [10] Wiesmann D, David C, Germann R, et al. Apodized surface-corrugated gratings with varying duty cycles[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(6): 639-641.
- [11] Millett R, Dridi K, Benhsaien A, et al. Fabrication-tolerant 1310 nm laterally coupled distributed feedback lasers with high side mode suppression ratios[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2011, 9(2): 111-118.
- [12] 齐军, 邹永刚, 范杰, 等. 1064 nm 侧向微结构宽脊波导半导体激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1301003.  
Qi J, Zou Y G, Fan J, et al. 1064 nm wide-ridge waveguide semiconductor laser with lateral microstructure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1301003.
- [13] Müller A, Zink C, Fricke J, et al. Efficient, high brightness 1030 nm DBR tapered diode lasers with optimized lateral layout[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1501107.
- [14] 黄德修, 黄黎蓉, 洪伟. 半导体光电子学[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2018: 127-131.  
Huang D X, Huang L R, Hong W. Semiconductor optoelectronics [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 127-131.
- [15] Born M, Wolf E. Principles of nano-optics[M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [16] Yariv A, Yeh P. Optical waves in crystals[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1984: 135-160.
- [17] 姜建飞. 硅基多模波导光栅滤波器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
Jiang J F. Study on the multimode grating filter based on silicon [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [18] Matsuhara M, Hill K O. Optical-waveguide band-rejection filters: design[J]. Applied Optics, 1974, 13(12): 2886-2888.
- [19] 郑晓刚. 高激光损伤阈值半导体激光腔面膜热特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.  
Zheng X G. The investigation of thermal characteristics on high laser damage threshold of semiconductor laser facet coating[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [20] Guo R J, Zheng J S, Zhang Y S, et al. Suppressing longitudinal spatial hole burning with dual assisted phase shifts in pitch-modulated DFB lasers[J]. Science Bulletin, 2015, 60(11): 1026-1032.
- [21] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘. 激光原理[M]. 7 版. 北京: 国防工业出版社, 2014.  
Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R. Principle of laser[M]. 7th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.

## Design of Grating Structure in Distributed Bragg Reflector Semiconductor Laser

Zhu Kun, Li Hui\*, Hao Yongqin, Qian Ran, Wang Dongyue

National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

### Abstract

**Objective** The existence of edge modes in the distributed Bragg reflector(DBR)semiconductor laser emission spectrum has a significant influence on the beam quality. The output multi-edge modes and high side lobes deteriorate the semiconductor laser beam and output power. The F-P effect formed on the sides of the DBR laser with a homogeneous duty cycle is one reason for this, resulting in side-mode resonance enhancement. Second, the energy coupled to the narrow-ridge waveguide through the grating decreases near the rim of the narrow ridge. This study proposes a modification scheme of the regular DBR structure to inhibit the edge mode on the DBR laser spectrum, ensuring maximized reflectance at the central wavelength while weakening the side lobe strength.

**Methods** Based on coupled-mode theory, a rectangular grating model with a gradual duty cycle is established for the DBR laser. The influence of the duty cycle distribution on the edge mode suppression and the reflectivity maximization at the central wavelength is analyzed using the finite-difference time-domain (FDTD) method and changing the DBR duty cycle. The electro-optic model of the rectangular grating with gradient duty cycle is simulated, and the reflectance at the central wavelength and the side mode suppression ratio are obtained after device optimization. A tapered duty cycle model for the DBR is established, and the influence of the grating structure with tapered duty cycle on the output side lobe intensity of the DBR laser is analyzed.

**Results and Discussions** In DBR lasers, the F-P effect exists in rectangular uniform duty cycle gratings, resulting in edge-mode oscillation enhancement (Fig. 5). From the relationship of coupling coefficient and duty cycle (Fig. 6) and the duty cycle under the maximum reflectivity at the central wavelength, the grating duty-cycle range can be determined. Within the gradient range, the simulation of grating when the duty cycle is truncated sinc function distribution is carried out. Within the gradient ranges of 0.545–0.580 and 0.580–0.545, the reflection intensity of the edge mode is suppressed, and the reflection peak value at the central wavelength reaches 0.8 (Fig. 7). For a grating with length of 0.6 mm, comparing the reflection spectra of rectangular uniform grating and rectangular grating with gradient duty cycle, it can be observed that, although the edge mode is suppressed for the rectangular grating with gradient duty cycle, its reflection peak value at the central wavelength is lower than that of the rectangular uniform grating. Setting the duty cycle at 0.58 in the center of the grating, the edge mode suppressing effect is studied for the case when the duty cycle decreases from the center of the grating length to the two ends. The results show that the edge mode suppression under truncated sinc functions is enhanced, but the reflectivity at the central wavelength does not improve (Figs. 9 and 10). When the grating length

increases to 1 mm, the central reflection peak value of the grating with gradient duty cycle remains unchanged (Fig. 11). When adopting the grating with gradient duty cycle, the coupling coefficient at the center of the grating length is small; thus, using the combination of duty cycle that presents truncated sinc function distribution and constant duty cycle can increase the coupling coefficient at the center of the grating. Although the reflection peak value at the central wavelength is nearly similar to that of the uniform grating, the edge mode suppression ratio reaches 48 dB (Fig. 13). Finally, by observing the field intensity distribution of tapered grating with gradient duty cycle and rectangular uniform grating on the far-field lateral tangent, we find that tapered gratings with gradient duty cycle can reduce the sidelobe intensity of the DBR laser output.

**Conclusions** The existence of the F-P effect in the rectangular uniform grating for conventional DBR lasers results in side-mode oscillation enhancement. In addition, more side modes in the reflectance spectra of semiconductor lasers not only deteriorate the beam quality but also reduce the output power at the central wavelength. It is found that changing the duty-ratio distribution in the DBR laser can destroy the grating effect, leading to a reduction in the side-mode reflection intensity. Furthermore, using a gradual duty cycle at both ends of the grating and a constant duty cycle in the center of the rectangular grating length, not only reduces the side mode in the reflection spectrum, but also ensures a larger reflectivity at the central wavelength. It is found that the optical field propagating at the edge of the narrow ridge waveguide, when passing through a tapered gratings with gradient duty cycle, can be better coupled into the narrow ridge waveguide, leading to an effective reduction in the intensity of the side lobe. Compared with previous schemes, this requires less complex process steps while enhancing the side mode suppressing ratio. Additionally, it can reduce the side lobe strength, providing a valuable reference for the structural design of high-power and high-beam-quality semiconductor lasers.

**Key words** lasers; distributed Bragg reflector semiconductor laser; side mode suppression; gradient duty cycle grating; side-lobe