

侧向非对称光栅光场耦合特性的理论研究

刘莹, 范杰*, 齐军, 邹永刚, 王海珠, 郝永芹, 马晓辉

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 受光栅制作工艺的影响, 光栅参数的轻微偏移极易导致耦合系数偏离设计值从而影响分布式反馈(DFB)半导体激光器性能。通过微扰下的耦合模理论与数值仿真相结合的方式, 对侧向非对称光栅的耦合系数特性进行了深入分析。当光栅宽度与脊型区宽度之比在一定范围内时, 两个亚光栅之间非对称距离的引入使波导内的光场产生轻微偏移, 光场的耦合状态发生改变。这有利于光栅的耦合系数稳定在一个合理的范围内, 有效地缓解了占空比等参数对光栅耦合系数的影响, 降低光栅工艺误差对 DFB 半导体激光器性能的影响; 此时谐振腔内光子密度均匀分布, 避免了常规光栅结构易引发的空间烧孔效应, 有助于半导体激光器窄线宽激光的输出。本文工作将为侧向非同步耦合光栅的设计与应用提供理论参考。

关键词 光学器件; 布拉格光栅; 耦合系数; 非同步耦合; 半导体激光器

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0823020

Theoretical Study on Light Field Coupling of Lateral Asymmetric Gratings

Liu Ying, Fan Jie*, Qi Jun, Zou Yonggang, Wang Haizhu, Hao Yongqin, Ma Xiaohui

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

Abstract Affected by the manufacturing process of gratings, the slight deviation of grating parameters can easily lead the coupling coefficients to deviating from the design values, deteriorating the distributed feedback (DFB) semiconductor lasers. In this paper, the coupling coefficients of lateral asymmetric gratings were analyzed by combining the coupled mode theory in the case of perturbation with numerical simulations. When the ratio of grating width to ridge width is in a certain range, the light fields in the waveguide slightly deviate due to the introduction of the asymmetric distance between two sub-gratings, thus changing the coupling of the light fields. This is beneficial for the coupling coefficients to stabilize in a reasonable range and considerably alleviates the influence of such parameters as duty ratio on the coupling coefficients. Besides, it lowers the influence of errors in the grating process on the properties of DFB semiconductor lasers. Furthermore, the uniform distribution of photon density in the resonator avoids the space hole-burning effect that easily occurs in the conventional grating structure, which is helpful for the output of laser with narrow line width from the semiconductor laser. In conclusion, this work provides a theoretical reference for the design and application of gratings with lateral asynchronous coupling.

Key words optical devices; Bragg grating; coupling coefficient; asynchronous coupling; semiconductor laser

OCIS codes 230.1480; 140.5960; 220.3740

收稿日期: 2020-08-19; 修回日期: 2020-09-23; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(11474038)、吉林省科技发展计划项目(20190302052GX, 20200519018JH)、吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20190543KJ)

* E-mail: fanjie@cust.edu.cn

1 引言

在激光通信等领域,光谱线宽是激光源的重要性能指标之一,较窄的光谱线宽可以有效地提升通信系统的性能^[1-4]。如在相干光通信系统和密集波分复用光纤传输系统中,窄线宽激光光源可以适应更高效复杂的调制格式,降低光纤色散损耗并增加传输距离;当通信系统在低功率下工作时,窄线宽激光光源可以保证系统具备较小的误码率,有效地降低通信系统成本^[5-7]。借助谐振腔中的布拉格光栅结构,分布式反馈(DFB)半导体激光器能够有效压缩窄激光线宽,因此其广泛应用于激光通信等领域^[8-12]。传统的 DFB 半导体激光器通常将光栅制作在波导结构中,其制作过程中所必须的二次外延生长工艺容易在器件波导材料中引入杂质^[13-15],导致非辐射复合增强,造成半导体激光器温度升高、电阻增大,并对光谱线宽造成一定影响。为解决这一问题,近年来研究人员逐渐针对表面光栅结构的 DFB 半导体激光器开展了探索研究。由于避免了二次外延生长工艺,折射率耦合型表面光栅 DFB 半导体激光器降低了器件的制作难度,一定程度上提高了器件的稳定性和可靠性^[16-18]。

相比于脊波导表面光栅,侧向耦合光栅可以令 DFB 半导体激光器具有均匀、稳定的电流注入,因此目前报道的折射率耦合型表面光栅 DFB 半导体激光器多采用侧向耦合光栅结构。2014 年英属哥伦比亚大学报道了一种利用干涉相消原理减小耦合系数的硅基波导光栅,并模拟证明这种结构的谐振腔具有较高的品质因数^[19]。2017 年纽约州立大学石溪分校采用侧向耦合光栅结构研制了耦合系数为 1 cm^{-1} 、波长为 $3.22 \mu\text{m}$ 的稳定单模半导体激光器,并实现了 15 mW 的输出功率^[20]。同年,坦佩雷理工大学报道了一种交替侧向耦合表面光栅结构,实验表明,采用这种光栅结构的半导体激光器具有更低的阈值电流和更高的斜率效率^[21]。受微纳加工技术水平的影响,近年报道的侧向耦合光栅多应用于工作波长较长的量子级联 DFB 半导体激光器中,此时光栅具有相对较大的周期。与此同时,侧向耦合光栅的耦合系数对占空比等结构参数较为敏感,光栅制作工艺的精度将显著影响半导体激光器的窄线宽、工作稳定性等特性。因此,在表面光栅的制作过程中,通常采用电子束曝光、纳米压印等精度较高的曝光工艺^[22],并严格控制刻蚀条件以实现窄宽度图形的精准刻蚀^[23-24],以尽量避免工艺误差等

原因导致的光栅耦合系数偏离。例如,对于常规光栅如果占空比具有 0.01 的误差耦合系数通常会产生 500 cm^{-1} 以上的偏差,对光栅的性能影响非常大。通过分析侧向非对称光栅耦合系数与光栅各结构参数的关系,优化设计侧向耦合光栅结构,可以在一定程度上避免工艺精度对光栅耦合系数的影响,深入的理论研究对光栅的应用具有重要意义,但相关报道较少。

本文基于微扰下的耦合模理论与模拟仿真全面分析了一种侧向非对称光栅结构的光场耦合特性,分析了非对称距离影响光栅耦合系数的机理。仿真分析发现,在非对称距离和脊型区宽度与光栅宽度之比控制在一定范围内时可以将光栅耦合系数稳定在一定范围内,此时光栅耦合系数对占空比和非对称距离的影响最小,有效缓解了光栅工艺误差对光栅性能的影响。

2 侧向非对称光栅耦合系数理论模型与仿真研究

2.1 侧向非对称光栅耦合系数理论模型

图 1 为侧向非同步耦合光栅的结构示意图。在侧向非同步耦合光栅结构中,两个具有相同周期 Λ 、占空比 γ 和刻蚀深度 Δh 的亚光栅分别位于半导体激光器脊型波导的两侧,两侧光栅宽度均为 h ,脊型区宽度 w ,且沿着腔长方向存在非对称距离 Δz 。考虑到光栅的周期性,不对称距离 Δz 的取值范围为 $0 \sim \Lambda$ 。为方便分析,图 1 中同时标出了理论分析时所用的三维坐标系。

耦合系数 κ 是 DFB 半导体激光器光栅性能的重要表征参数。对于腔长为 L 的 DFB 半导体激光器,耦合强度 κL 表征了其光栅的纵模选择能力。相关研究表明,将耦合强度设计在适当的范围(约为 1),DFB 半导体激光器可以实现谐振腔内光子的均匀分布,令激光器具有良好的单纵模性能^[25]。光栅耦合系数 κ 与光栅折射率的周期性分布有关。根据耦合模理论,常规光栅的耦合系数^[26]可以写为

$$\kappa(z) = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int_s \Delta \epsilon(x, y, z) \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* ds, \quad (1)$$

式中: ω 为光的圆频率; ϵ_0 为真空相对介电常数; $\Delta \epsilon(x, y, z)$ 是由于光栅折射率周期性变化而产生的相对介电常数微扰; \mathbf{E} 为光栅中的光场函数。式中积分区域为垂直光传播方向的光栅截面。光栅中 n 阶空间谐波的相对介电常数微扰为

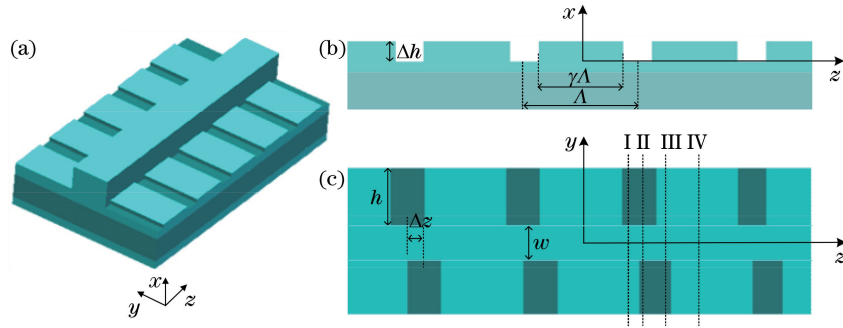


图 1 非同步耦合光栅示意图。(a) 三维图；(b) 侧视图；(c) 俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of an unsynchronized coupled grating. (a) Three dimensional stereogram; (b) side view; (c) top view

$$\Delta\epsilon_{1,n}(x,y,z) = \frac{2(n_g^2 - n_a^2)\sin(n\pi\gamma)}{n\pi} \exp\left(j\frac{2n\pi}{\Lambda}z\right), \quad (2)$$

式中： n_g 、 n_a 分别为光栅高、低折射率区。由(2)式可以看出，单一光栅的相对介电常数微扰受占空比、周期等光栅结构参数的影响。

由于具有相同的结构参数，仅需将坐标系沿着 z 轴平移 Δz 距离，即可采用相同的方法获得另一侧亚光栅的 n 阶空间谐波相对介电常数微扰，表示为

$$\Delta\epsilon_{2,n}(x,y,z) = \frac{2(n_g^2 - n_a^2)\sin(n\pi\gamma)}{n\pi} \exp\left[j\left(\frac{2n\pi}{\Lambda}z + \frac{2n\pi}{\Lambda}\Delta z\right)\right]. \quad (3)$$

通过对比(2)式和(3)式可以看出，由于两个亚光栅在 z 方向存在非对称距离 Δz ，因此在(3)式中产生了相对相位差项 $\frac{2n\pi}{\Lambda}\Delta z$ 。当两个亚光栅的非对称距离 $\Delta z = \Lambda$ 时，会产生 $2n\pi$ 的相对相位差；当非对称距离继续增加时，相位差是 $2n\pi$ 的整数倍，所以非对称距离只需考虑一个光栅周期。

根据耦合模理论，分别将(2)式和(3)式代入(1)式中并相加整理，可以得到 n 阶侧向非对称光栅的耦合系数为

$$\kappa_n = \frac{\omega\epsilon_0(n_g^2 - n_a^2)\sin(n\pi\gamma)}{n\pi} \Gamma \cos^2\left(\frac{n\pi}{\Lambda}\Delta z\right), \quad (4)$$

式中： $\cos^2\left(\frac{n\pi}{\Lambda}\Delta z\right)$ 项体现了非对称距离 Δz 对耦合系数的影响； Γ 为光栅光限制因子， $\Gamma = \int \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* ds$ ，但在非对称光栅中，单一的光限制因子不足以正确描述波导中两个光栅的光限制因子，由于两侧光场非对称分布，同一位置不同的折射率决定两个光栅的光限制因子一定不同，并且两侧光场由于相位

的不同具有一定的相互作用，并且脊型区宽度 w 、光栅宽度 h 通过影响两侧光栅的光限制因子大小以及它们之间相互作用的强弱都会导致光场耦合的效果不同，所以非对称光栅中的光限制因子是关于两侧光栅光限制因子 Γ_1 、 Γ_2 以及 w 、 h 的函数。则(4)式变为

$$\kappa_n = \frac{\omega\epsilon_0(n_g^2 - n_a^2)\sin(n\pi\gamma)}{n\pi} \cdot \Gamma(\Gamma_1, \Gamma_2, w, h) \cos^2\left(\frac{n\pi}{\Lambda}\Delta z\right). \quad (5)$$

光栅耦合系数与反射率的关系为

$$R = \tanh^2(\kappa_n L), \quad (6)$$

式中： L 为光栅的长度。本文根据这个关系对光栅非对称距离对反射率的影响进行了模拟仿真，间接分析波导及光栅结构参数与耦合系数的关系。

2.2 侧向非对称光栅的仿真研究

不同脊型区宽度时光栅反射率随非对称距离在一个光栅周期内仿真与计算结果如图 2 所示，模型脊型区高度 $0.9 \mu\text{m}$ ，光栅高度 $0.2 \mu\text{m}$ ，光栅周期 $0.86 \mu\text{m}$ ，占空比为 0.6 ，长度 $100 \mu\text{m}$ ，利用 MODE Solution 软件进行了模拟。这里因无法确定光栅的光限制因子以及它们之间的相互作用情况，所以光限制因子为对应不同脊型宽度下没有非对称距离时的光限制因子，利用 Matlab 对(4)式进行计算。从图中可以看出，反射率五个峰值的强度相同，模拟结果与推导得出的计算结果基本吻合。减小脊型区宽度至 $5 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ ，进一步模拟仿真，可以看出，随着脊型区的宽度减小，光栅的反射率增大，这是由于减小脊宽后进入光栅中的光增加，导致光栅的光限制因子提高，两侧光场的相互作用增强，所以仿真与计算结果也产生差异。进一步对比 w 为 $5 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 的情况可以发现，当 $w = 5 \mu\text{m}$ 时，中间峰值的强度有所下降，当 $w = 2 \mu\text{m}$ 时，随着非对称距离的

增大,反射率峰值逐渐降低,并出现六个强度不等的峰,这表明随着脊型区宽度的减小非对称距离对光

限制因子的影响以及它们之间的相互作用逐渐增强。

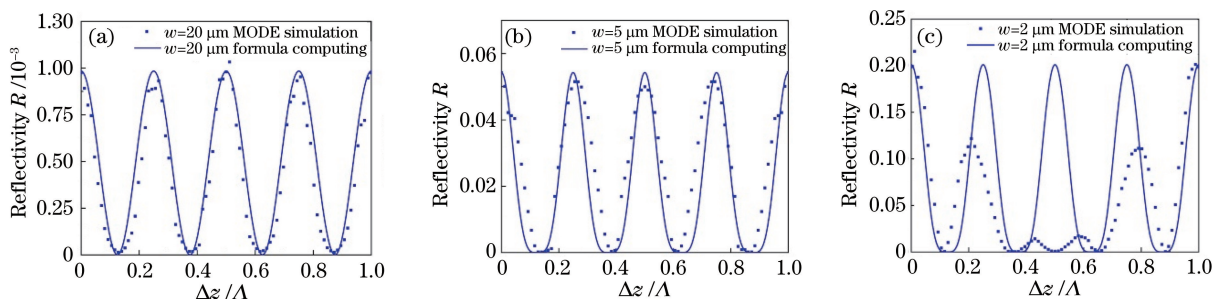


图 2 不同脊宽时侧向非对称光栅反射率变化仿真与计算对比。(a) $w=20 \mu\text{m}$; (b) $w=5 \mu\text{m}$; (c) $w=2 \mu\text{m}$
 Fig. 2 Comparison between simulation and calculation of lateral asymmetric grating reflectance changes with different ridge widths. (a) $w=20 \mu\text{m}$; (b) $w=5 \mu\text{m}$; (c) $w=2 \mu\text{m}$

图 3 给出了 $w=2 \mu\text{m}$ 及 $w=5 \mu\text{m}$ 侧向非对称光栅 $\Delta z/\Lambda=0.5$ 时不同截面处的横向光斑分布情况,对应位置在图 1 中已标出。但在光栅高、低折射率重叠区,由于低折射率区对波导内光场限制作用的增强,导致光场分布偏向高折射率区一侧,如图 3 (a1)、(a3)所示,根据相干光理论,两干涉光的能量不同是影响干涉效果的重要原因。当两干涉光的能量不同时,干涉叠加的强度会降低,当非对称距离在 $\Delta z/\Lambda=0.5$ 时,两侧光场能量非对称性最大,因而

反射率降低。图 3(a2)、(a4)分别是两侧光栅折射率相等时的光斑对称分布,这种对称分布遵循原本的规律,所以随着非对称距离的增大,非对称区增大,对称区域减小,反射率峰值越低。随着脊型区宽度增加,如图 3(b1)~(b4)所示,光栅对光场的限制作用减弱导致这种现象变得不再明显。这种由于材料的细微不同而导致的两侧光场传播常数略微差异称之为非同步耦合,这种耦合会影响场间能量交换的有效性,从而导致反射率的降低^[27-28]。

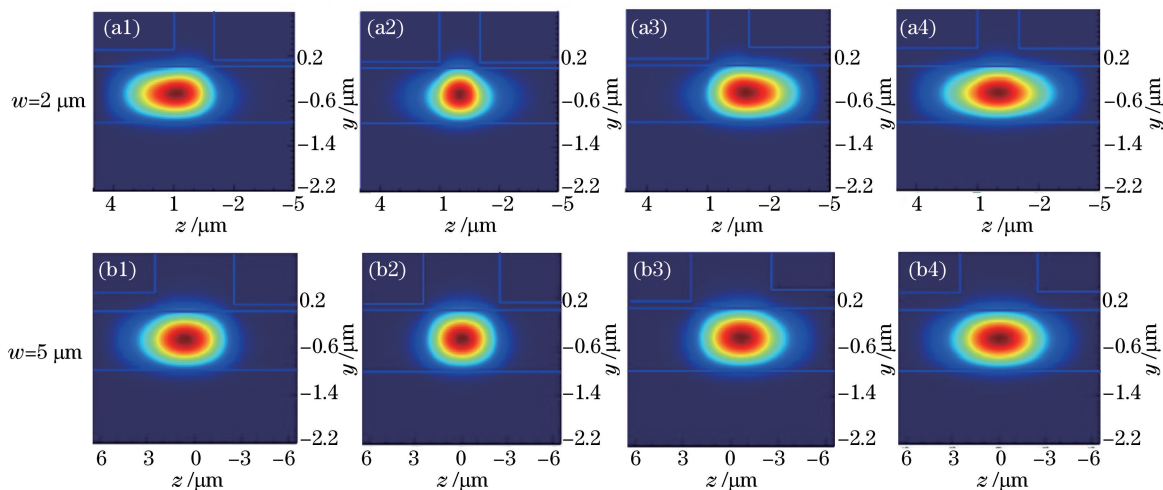


图 3 侧向非对称光栅不同位置横向光斑分布。(a1)(b1) I; (a2)(b2) II; (a3)(b3) III; (a4)(b4) IV
 Fig. 3 Transverse spot distribution at different positions of lateral asymmetric grating.
 (a1) (b1) I; (a2)(b2) II; (a3)(b3) III; (a4)(b4) IV

图 4 为侧向非同步耦合光栅对 $w=2 \mu\text{m}$ 谐振腔内光场分布的影响。由于两侧亚光栅的不对称分布使得其中光场产生相对偏移,影响两侧光场叠加的效果,结合图 2 及图 4 不同非对称距离时的纵向光场可以看出,通过设计侧向非对称光栅 $\Delta z/\Lambda$ 在 $0.35\sim 0.65$ 之间无论处于波峰或是波谷位置,耦合

系数均稳定在一定范围内,在光栅起到选模作用的同时谐振腔传播方向上的光子分布均比较均匀,避免常规光栅易发生的空间烧孔效应,同时减小了谐振腔的镜面损耗,有利于激光器实现良好的单纵模性能。但对于 $\Delta z/\Lambda$ 在 $0\sim 0.35$ 范围时,光子密度分布明显不均匀,谐振腔内部损耗较大。

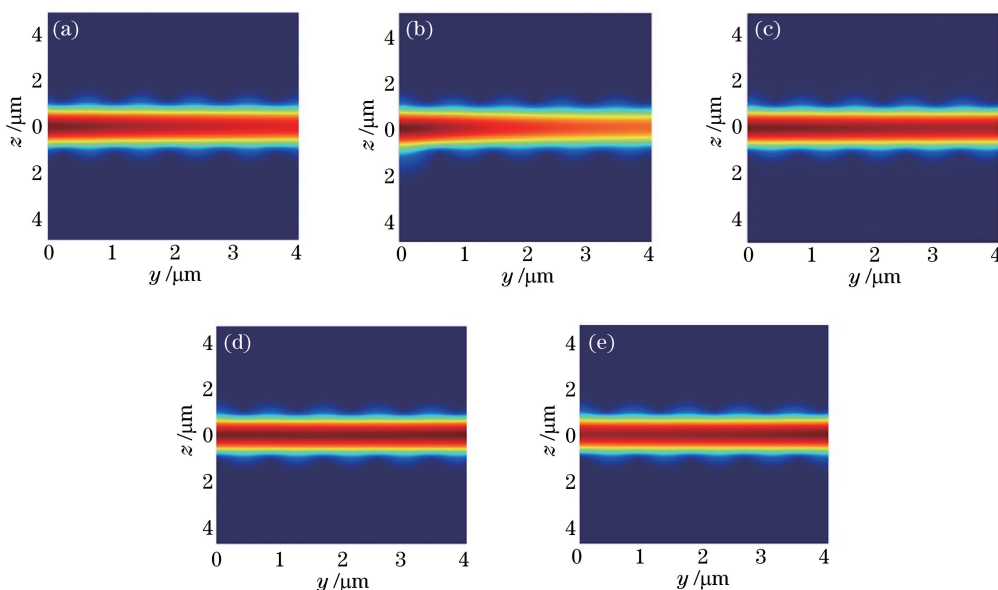


图 4 侧向非同步耦合 DFB 半导体激光器谐振腔纵向光场分布。(a) $\Delta z/\Lambda=0$; (b) $\Delta z/\Lambda=0.23$; (c) $\Delta z/\Lambda=0.43$; (d) $\Delta z/\Lambda=0.50$; (e) $\Delta z/\Lambda=0.58$

Fig. 4 Longitudinal optical field distribution in a resonator cavity of lateral asynchronous coupled DFB semiconductor laser. (a) $\Delta z/\Lambda=0$; (b) $\Delta z/\Lambda=0.23$; (c) $\Delta z/\Lambda=0.43$; (d) $\Delta z/\Lambda=0.50$; (e) $\Delta z/\Lambda=0.58$

3 分析与讨论

图 5(a)为反射率随脊型区宽度的变化。从图中可以看出,随着脊型区宽度 w 从 $2 \mu\text{m}$ 增加至 $7 \mu\text{m}$ 光栅的反射率先急剧下降,当脊型区宽度继续增加时,反射率下降的趋势逐渐趋于平缓,这是由于光栅

的光限制因子随脊型区宽度增加而逐渐减小。图 5 (b)为脊型区宽度、非对称距离对光栅反射率的影响,当光栅宽度固定, $w=2.8 \mu\text{m}$ 附近即光栅宽度与脊宽之比小于 1.5,两侧光栅光限制因子降低,光场的能量分布逐渐均匀,此时只有由于 Δz 引起的相位项影响光栅的反射率,所以仿真结果逐渐与计算吻合。

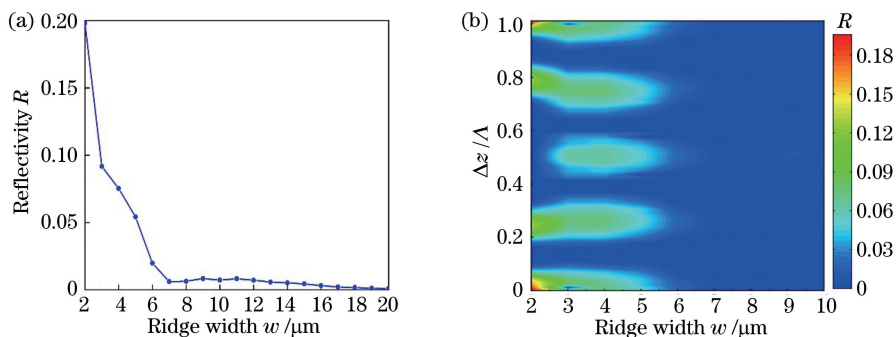


图 5 光栅反射率与脊型区宽度的关系。(a)脊型区宽度与光栅反射率的关系;(b)脊型区宽度、非对称距离与光栅反射率的关系($h=4 \mu\text{m}$)

Fig. 5 Relationship between grating reflectivity and ridge width. (a) Relationship between ridge width and grating reflectivity; (b) relationship between ridge width, asymmetric distance, and grating reflectivity ($h=4 \mu\text{m}$)

图 6 给出了侧向非对称光栅宽度 h 和非对称距离 Δz 与反射率之间的关系。从图中可以看出,反射率在 $\Delta z/\Lambda=0.50$ 两侧呈现对称分布。与图 5 (b)不同的是,在脊型区宽度不变的情况下随着光栅宽度的增加,反射率呈现先增加后减小然后再增加的趋势,当光栅宽度 h 增加至 $7 \mu\text{m}$ 即脊型区宽度与光栅宽度之比大于 1.5 时,随着光限制因子的

增大,由于非对称分布光场之间的相互作用也增强,所以在 $\Delta z/\Lambda=0.50$ 附近反射率变化平缓。

图 7 给出了 $1.06 \mu\text{m}$ 波长四阶 ($\Lambda=0.86 \mu\text{m}$) 侧向非同步耦合光栅占空比 γ 和非对称距离 Δz 与反射率之间的关系。从图中可以看出,当占空比 $\gamma>0.5$ 时,随着 Δz 由 0 增加至 Λ ,反射率先后出现 4 个峰值,可以推测耦合系数变化将非常剧烈。而

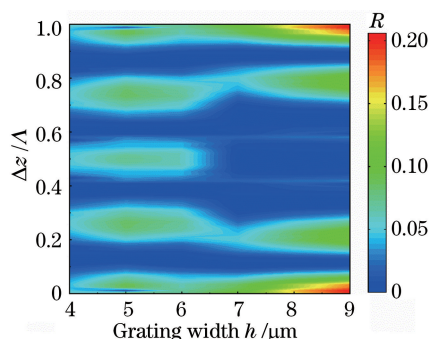


图 6 光栅宽度、非对称距离与反射率的关系 ($w=5 \mu\text{m}$)

Fig. 6 Relationship between grating width, dislocation distance, and reflectivity ($w=5 \mu\text{m}$)

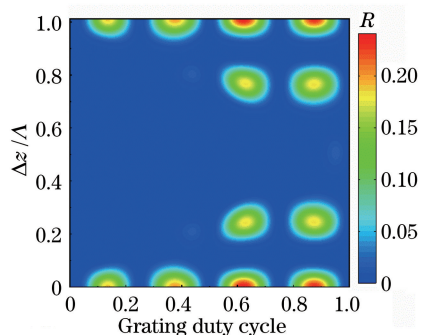


图 7 占空比、非对称距离与反射率的关系
($w=2 \mu\text{m}$; $h=4 \mu\text{m}$)

Fig. 7 Relationship between grating duty cycle, dislocation distance, and reflectivity ($w=2 \mu\text{m}$; $h=4 \mu\text{m}$)

当 $\gamma < 0.5$ 时,反射率仅在 $\Delta z/\Lambda$ 为 0 和 1 附近出现峰值,在其余区域变化非常平缓,波导层对光的限制作用增强,光场的非对称性降低并且非对称区域也变小,反射率变化平缓的区间也因此变大。相反,高占空比时光栅对光的限制作用降低,所以高占空比时的峰值也较多。当 $\Delta z/\Lambda = 0.50$ 时,若占空比变化 0.01,则耦合系数只有 70 cm^{-1} 左右的变化,远小于常规光栅的变化。这表明将两个低占空比的亚光栅设计为非对称分布结构,可以有效地降低耦合系数对占空比的依赖度,增加光栅参数的工艺容差,有效地降低工艺精度对侧向非同步耦合光栅耦合系数的影响,实现预期的耦合系数,并降低光栅的制备工艺难度。

以上模拟分析表明在光栅宽度与脊型区宽度之比大于 1.5 时,将侧向光栅设计成非对称的结构使得波导内的光场发生非同步耦合,在一定范围内光栅反射率不再随光栅占空比剧烈变化,并且随着光栅占空比的减小,耦合系数在非对称距离变化过程中稳定区间越来越大,这有利于光栅以及激光器性能的稳定,降低光栅制作的工艺难度。

4 结 论

本文对一种表面侧向非对称光栅进行了系统地仿真研究,并基于微扰下的耦合模理论对其进行了分析。研究发现,当光栅宽度与脊宽之比大于 1.5 时,光栅的非对称分布使得光场不对称分布,从而导致两侧光场耦合叠加有效性降低,造成光栅反射率的降低。根据仿真结果可知,在光栅占空比 $\gamma < 0.5$ 时,侧向非对称光栅的耦合系数对占空比和非对称距离的依赖度在 $\Delta z/\Lambda = 0.50$ 附近的很大范围内都非常低,这增加了光栅制作工艺的容差及光栅参数设计的灵活性,并减小了制作工艺缺陷对光栅性能的影响。模拟结果同时表明,侧向非同步耦合光栅可以实现半导体激光器谐振腔内良好的光子密度分布和较小的激光器镜面损耗,有利于减小半导体激光器光谱线宽。该研究为相关器件结构和光栅的设计与研制提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] Lang X K, Jia P, Chen Y Y, et al. Advances in narrow linewidth diode lasers [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019, 49(6): 649-662.
郎兴凯, 贾鹏, 陈泳屹, 等. 窄线宽半导体激光器研究进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(6): 649-662.
- [2] Zhang J, Chen Y Y, Qin L, et al. Advances in high power high beam quality diode lasers [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(32): 3719-3728.
张俊, 陈泳屹, 秦莉, 等. 高功率、高光束质量半导体激光器研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(32): 3719-3728.
- [3] Qiu C, Chen Y Y, Gao F, et al. Design of a multimode interference waveguide semiconductor laser combining gain coupled distributed feedback grating [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(16): 164204.
邱橙, 陈泳屹, 高峰, 等. 一种结合增益耦合分布反馈光栅的多模干涉波导半导体激光器的研制[J]. 物理学报, 2019, 68(16): 164204.
- [4] Du W C, Kang J J, Li Y, et al. Optimization of facet reflectivity of 450 nm GaN-based semiconductor lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0614002.
杜维川, 康俊杰, 李弋, 等. 450 nm GaN 基半导体激光器腔面反射率的优化[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0614002.
- [5] Tao J J. Researches on several key technologies for high-speed coherent optical communication systems

- [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014: 1-5.
- 陶金晶. 高速相干光通信系统中关键技术的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014: 1-5.
- [6] Wang H, Zhang R K, Lu D, et al. 1.55 μm high-power high-speed directly modulated semiconductor laser array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0914001.
- 王皓, 张瑞康, 陆丹, 等. 1.55 μm 大功率高速直调半导体激光器阵列 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0914001.
- [7] Zhu H L, Xia Y M, He J J. Pattern dependence in high-speed Q-modulated distributed feedback laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11887-11897.
- [8] Teng Y J, Song Y S, Tong S F, et al. Acquisition performance of laser communication system based on airship platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0606005.
- 滕云杰, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 基于飞艇平台激光通信系统的捕获性能研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0606005.
- [9] Zheng J S, Shi Y C, Zhang Y S, et al. Monolithically integrated four-channel DFB semiconductor laser array with an equivalent-distributed coupling coefficient [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-9.
- [10] Tilma B W, Mangold M, Zaugg C A, et al. Recent advances in ultrafast semiconductor disk lasers [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(7): e310.
- [11] Funabashi M, Nasu H, Mukaiharu T, et al. Recent advances in DFB lasers for ultradense WDM applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(2): 312-320.
- [12] Liu D D, Wang Y, Ye Z, et al. Grating fabrication of 808 nm distributed feedback semiconductor laser by holographic photolithography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0202008.
- 刘丹丹, 王勇, 叶镇, 等. 全息光刻制备 808 nm 分布反馈半导体激光器的光栅 [J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0202008.
- [13] Gao F. Study of gain-coupled distributed feedback semiconductor lasers based on periodic injection current [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- 高峰. 周期性电注入增益耦合分布反馈半导体激光器的研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- [14] Radziunas M, Hasler K H, Sumpf B, et al. Mode transitions in distributed Bragg reflector semiconductor lasers: experiments, simulations and analysis [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2011, 44(10): 105401.
- [15] Uusitalo T, Virtanen H, Dumitrescu M. Transverse structure optimization of distributed feedback and distributed Bragg reflector lasers with surface gratings [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(6): 1-11.
- [16] Hofstetter D, Romano L T, Paoli T L, et al. Realization of a complex-coupled InGaN/GaN-based optically pumped multiple-quantum-well distributed-feedback laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(17): 2337-2339.
- [17] Masui S, Tsukayama K, Yanamoto T, et al. CW operation of the first-order AlInGaN 405 nm distributed feedback laser diodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(46): L1223-L1225.
- [18] Hofmann R, Wagner V, Neuner M, et al. Optically pumped GaInN/GaN-DFB lasers: overgrown lasers and vertical modes [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 1999, 59(1/2/3): 386-389.
- [19] Wang X, Wang Y, Flueckiger J, et al. Precise control of the coupling coefficient through destructive interference in silicon waveguide Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(19): 5519-5522.
- [20] Feng T, Hosoda T, Shterengas L, et al. Laterally coupled distributed feedback type-I quantum well cascade diode lasers emitting near 3.22 μm [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): H74-H80.
- [21] Uusitalo T, Virtanen H, Karjalainen M, et al. Distributed feedback lasers with alternating laterally coupled ridge-waveguide surface gratings [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3141-3144.
- [22] Yang C A, Zhang Y, Liao Y P, et al. 2 μm single longitudinal mode GaSb-based laterally coupled distributed feedback laser with regrowth-free shallow-etched gratings by interference lithography [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(2): 024204.
- [23] Wenzel H, Fricke J, Decker J, et al. High-power distributed feedback lasers with surface gratings: theory and experiment [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 352-358.
- [24] Fricke J, Wenzel H, Bugge F, et al. High-power distributed feedback lasers with surface gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(16): 1443-1445.
- [25] Virtanen H, Uusitalo T, Dumitrescu M. Simulation studies of DFB laser longitudinal structures for narrow linewidth emission [J]. *Optical and Quantum*

- Electronics, 2017, 49(4): 1-13.
- [26] Chen C L. Foundations for guided-wave optics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [27] Jiang J P. Semiconductor laser [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2000: 257-259.
江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版
- 社, 2000: 257-259.
- [28] Liang Q T. Physical optics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008: 75-76.
梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 75-76.