



·强激光物理与技术·

## 分布反馈量子级联激光器光栅反馈特性\*

刘 莹, 蒋 涛, 杨 奇, 王雪敏, 湛治强, 邹蕊娇,  
罗佳文, 樊 龙, 陈风伟, 吴卫东

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 为探究 Bragg 光栅结构对 TM 模反馈特性的影响, 利用有限时域差分法对具有 TM 模的分布反馈 (DFB) 量子级联激光器 Bragg 光栅结构进行仿真研究。重点分析了侧向耦合光栅的光学特性以及光栅侧壁倾角对光栅反射谱、损耗的影响及原因, 并探究了光栅刻蚀深度及占空比与 TM 模的耦合系数、损耗的关系。结果表明有效折射率是影响 Bragg 波长的主要因素, 而光限制因子是不同周期的侧向耦合光栅结构耦合系数产生巨大差别的原因, 当光栅侧壁倾角  $90^\circ$  时镜面损耗最小。光栅周期、占空比、刻蚀深度与耦合系数的关系表明: 这些参数不仅影响光栅的相对介电常数, 也会对光限制因子产生作用, 从而影响耦合系数的大小; 耦合系数与刻蚀深度具有正比关系, 大周期光栅耦合系数随占空比的变化率较小。对光栅光反馈特性的理论研究有利于提升对 DFB 量子级联激光器的认识, 促进激光器性能的提升和发展。

**关键词:** 量子级联激光器; Bragg 光栅; 分布反馈; 耦合系数; TM 模

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220131

## Study on grating feedback characteristics of distributed feedback quantum cascade laser

Liu Ying, Jiang Tao, Yang Qi, Wang Xuemin, Zhan Zhiqiang, Zou Ruijiao,  
Luo Jiawen, Fan Long, Chen Fengwei, Wu Weidong

(Key Laboratory of Plasma Physics, Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The grating feedback characteristics of distributed feedback (DFB) quantum cascade lasers with TM mode were simulated by difference time domain method. Comparative analysis was mainly focused on the optical properties of lateral coupled grating and ridge waveguide grating. The causes of differences, the effects of side wall angle on reflection spectrum and loss of grating were also investigated. The results show that the main factor influencing the Bragg wavelength is the effective refractive index, the optical limiting factor is the reason for the great difference of coupling coefficient between the two grating structures, the specular loss is minimum when the side wall angle of the grating is  $90^\circ$ . The relationship between grating period, duty cycle, etching depth and the coupling coefficient shows that the parameters not only affect the relative dielectric constant of grating, but also affects the light limiting factor, thus affecting the coupling coefficient; the coupling coefficient is proportional to the etching depth, and the variation of the coupling coefficient with duty cycle is smaller. Theoretical research on grating optical feedback characteristics is beneficial to improve the understanding of DFB quantum cascade lasers and promote the improvement and development of laser performances.

**Key words:** quantum cascade laser, Bragg grating, distributed feedback, coupling coefficient, TM mode

量子级联激光器(QCL)作为中红外波段重要的激光光源,其输出功率、斜率效率、光谱线宽等性能不断得到发展,激光波长也不断向长波方向扩展,在环境监测、医学应用、分子谱研究、国防安全等领域有着重要的应用<sup>[1-4]</sup>。其中,在气体检测方面,QCL表现出其他激光器无法比拟的优势,原因不仅在于量子级联激光器具有体积小、便携、成本低等优点,更在于QCL具有单纵模、可调谐、准直度高等特点。较窄的光谱线宽可以分辨更窄的光谱间

\* 收稿日期:2022-04-28; 修订日期:2022-06-27  
基金项目:重点实验室基金项目(KLLD2020076)  
联系方式:刘莹, 1016819837@qq.com。  
通信作者:王雪敏, wangxuemin75@sohu.com。

隔,提高系统检测的分辨率;较好的单色性和准直度可增加吸收气体光程,获得较高的灵敏度。此外,通过调谐激光器波长,在光电检测器端可直接检测到吸收光谱,使得气体检测简洁有效<sup>[5-7]</sup>。

目前用于气体检测的 QCL 多为外腔可调谐,检测系统较为复杂,不利于器件集成化、便携化,因此分布反馈 (DFB)QCL 逐渐得到发展和关注<sup>[8-9]</sup>。DFB-QCL 功率、线宽、光束质量、调谐范围等性能的进一步提升对提高气体检测水平具有重要意义<sup>[10-12]</sup>。目前,DFB-QCL 中 Bragg 光栅通常采用二次外延光栅和表面光栅结构,表面光栅位置一般可分为在脊波导两侧的侧向耦合光栅 (LCG)和在脊波导上的光栅 (WG)。在量子级联激光器中,针对 TM 模的 LCG 结构很少得到关注和研究,但由于分布在脊波导两侧,LCG 结构与 RWG 相比不会破坏表面外延层结构,所以电流注入较均匀,这对提升 DFB-QCL 的电、热特性具有一定的帮助。光栅刻蚀过程中工艺误差会导致光栅反馈特性的变化,例如光栅侧壁倾角、刻蚀深度等会通过影响光栅折射率从而影响耦合系数及损耗,结构与光场之间的相互作用也会导致激光器横模的变化,因此探究光栅结构参数与反馈特性的关系对实验具有重要的参考意义,也能够节约时间成本<sup>[13-17]</sup>。

本文重点探究了侧向及脊波导光栅结构光反馈特性,以及 DFB-QCL Bragg 光栅侧壁倾角对 TM 模反馈特性及损耗的影响,根据波导内光场分布情况分析了两种光栅结构光学特性产生差异的原因,也分析了光栅周期、占空比等参数对耦合系数及反射谱的影响规律。

## 1 理论分析

耦合模理论是分析 Bragg 光栅常用的理论,可以利用麦克斯韦方程和微扰理论推导 Bragg 光栅耦合系数。光栅耦合系数是分析光栅常用的参数,耦合系数与光栅长度的乘积为耦合强度,耦合强度表征光栅选择纵模的能力,一般 DFB 激光器耦合强度设计为 1~2,这样既能够具有选择纵模的能力,又可避免过耦合引起激光器空间烧孔效应,保证激光器工作的稳定性。大多数研究中耦合系数  $\kappa$  以  $\kappa = \frac{\pi}{\lambda_B} n_1 + i \frac{\alpha_1}{2}$  计算 ( $\lambda_B$  为 Bragg 波长,  $n_1$  为折射率,  $\alpha_1$  为损耗),很少将 TM 模耦合系数加以细致的分析<sup>[18-19]</sup>。本文将对耦合系数的多种影响因素加以分析,将光栅看作周期性微扰结构,相对介电常数微扰可以表示为傅里叶级数<sup>[20]</sup>

$$\Delta\varepsilon(x,y,z) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \Delta\varepsilon_q(x,y)e^{-jqKz} \quad (1)$$

式中:  $q$  为空间  $q$  次谐波,光栅常数  $K=2\pi/\Lambda$ ,  $\Delta\varepsilon_q(x,y)$  为傅里叶系数,如图 1 所示,在一个光栅周期  $\Lambda$  内,该光栅的相对介电常数微扰可表示为

$$\Delta\varepsilon(x,y,z) = \begin{cases} n_g^2 - n_s^2 & (h - \Delta h < y < h, |z| \leq \frac{\gamma}{2}\Lambda) \\ 0 & (h - \Delta h < y < h, \frac{\gamma}{2}\Lambda \leq |z| \leq \frac{1}{2}\Lambda) \end{cases} \quad (2)$$

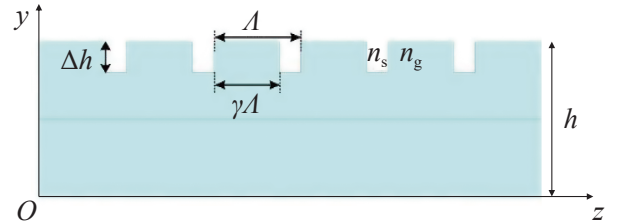


Fig. 1 Schematic diagram of grating

图 1 光栅示意图

式中:  $n_g$  和  $n_s$  分别为光栅中两种材料的折射率,  $\Delta h$  为光栅刻蚀深度,  $h$  为光场在谐振腔中  $y$  方向分布的大小,  $\gamma$  为占空比。傅里叶级数展开系数为

$$\Delta\varepsilon_q(x,y) = \frac{2}{\Lambda} \int_{-\frac{\gamma}{2}\Lambda}^{\frac{\gamma}{2}\Lambda} (n_g^2 - n_s^2) \cos(q\omega z) dz \quad (3)$$

其表示空间  $q$  次谐波对应的相对介电常数微扰的大小,其中  $\omega=2\pi/\Lambda$ 。将式(3)积分并取第  $q$  阶项,可以得到  $q$  阶空间谐波的相对介电常数微扰为

$$\Delta\varepsilon_q(x,y) = \frac{2(n_g^2 - n_s^2) \sin(q\pi\gamma)}{q\pi} \quad (4)$$

所以 TM 模的耦合系数表示为<sup>[21]</sup>

$$\kappa = \frac{\Delta\varepsilon_q(x,y)}{2j\beta_0} \left\{ -\beta_0^2 \int_{h-\Delta h}^h H^2 dy + \int_{h-\Delta h}^h \left[ \frac{dH}{dx} \right]^2 dy \right\} \bigg/ \int_0^h \left[ \frac{1}{n^2} + \Delta\varepsilon_{00} \right] H^2 dy \quad (5)$$

式中:  $\Delta\varepsilon_q(x,y)$  展开式中无  $x, y$  变量,所以无需置于积分式中,  $\beta_0 = \frac{q\pi}{\Lambda}$ , 为光栅常数,  $n$  为无微扰的折射率,  $\Delta\varepsilon_{00}$  为 0 级傅里叶级数展开系数,将式中有关磁场  $H$  积分的部分定义为光栅的光限制因子。由于 TM 模中包含  $H_y, E_x, E_z$  三

个电磁场分量,导致光限制因子不同,因此这里 TM 模的耦合系数与 TE 模的耦合系数具有差异,所以在 DFB 量子级联激光器中,光栅参数对光栅反馈特性的影响与 TE 模光栅有所不同。耦合系数、光栅长度  $L$  与反射率  $R$  的关系如式(6)所示,可以看出光栅的反射率是光栅耦合系数或耦合强度的体现<sup>[22]</sup>。

$$R = \tanh^2(\kappa L) \tag{6}$$

## 2 仿真分析

### 2.1 位置对光栅光反馈特性的影响

图 2 为 RWG 和 LCG 结构示意图。光栅位置不同对光栅光反馈特性的影响也不同,如图 3 所示,仿真计算了相同周期、占空比(0.8)及长度(600  $\mu\text{m}$ )时一阶( $\Lambda_1=1.2556 \mu\text{m}$ )、二阶( $\Lambda_2=2.5175 \mu\text{m}$ ) LCG 和 RWG 的反射谱,仿真所用结构如表 1 所示。从图 3 中可以看出一阶 LCG 对应的 Bragg 波长相比 RWG 向短波方向偏移,并且反射率增大。通过计算得到刻蚀深度 7.76  $\mu\text{m}$  时的侧向光栅结构基模有效折射率  $n_{\text{eff}}=3.14$ ,而相同周期及占空比 RWG 的有效折射率  $n_{\text{eff}}=3.16$ ,由于光栅的有效折射率不同,根据 Bragg 条件  $2n_{\text{eff}}\Lambda=q\lambda$  分析,基模有效折射率增大, Bragg 波长也有所增加。对比图 3 中二阶 LCG 和 RWG 的反射谱可以看出, RWG 结构在  $\lambda=7.5 \mu\text{m}$  波长处反射率达到 0.68, LCG 结构在 7.5  $\mu\text{m}$  波长处的反射率为 0.009,计算得到两种光栅结构有效折射率均为 3.14,因此在两种光栅结构的有效折射率相同时,导致耦合系数产生巨大差别的原因并非有效折射率。

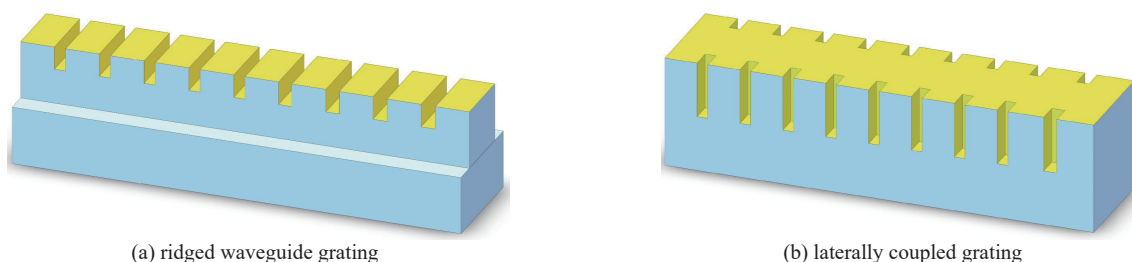


Fig. 2 Diagram of grating structures

图 2 光栅示意图

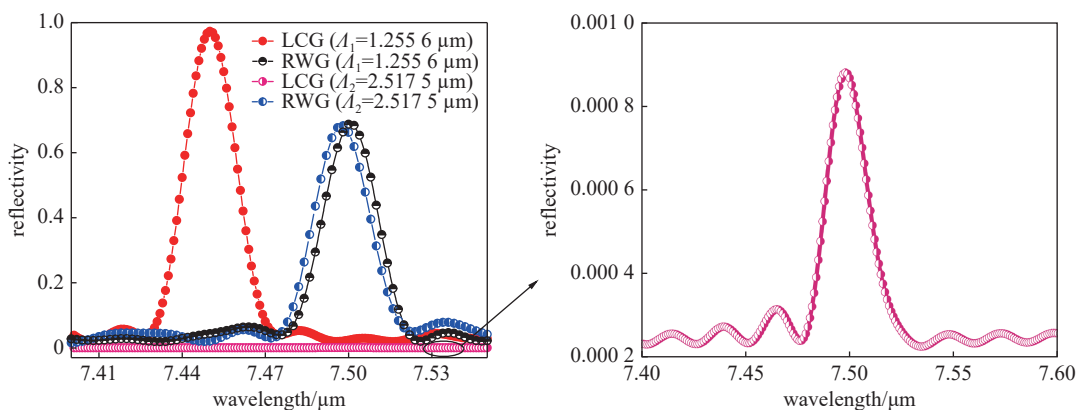


Fig. 3 Reflection spectra at different grating positions

图 3 光栅位置不同时的反射谱

为了探究上述两种光栅结构在有效折射率基本相同时耦合系数产生差别的原因,对波导结构中模式的分布进行了分析,图 4 为两种周期的 LCG、RWG 波导结构中光模式分布,如图 4(a)、(b)所示,一阶 LCG 结构中脊波导侧向部分刻蚀,因此在  $z$  方向波导对光的限制作用减弱,所以在  $z$  方向光进入到光栅结构中的光增多,即光栅的光限制因子增加,因此具有更大的耦合系数和反射率。在 RWG 结构中脊波导上刻蚀的光栅结构中的光明显减少,所以耦合系数降低。图 4(c)、(d)为二阶 LCG、RWG 结构光波导中的光模式分

表 1 外延结构

Table 1 Epitaxial layer structure

layer structure	thickness/ $\mu\text{m}$
highly doped InP	1.00
InP	4.00
InGaAs	0.30
active region	2.67
InGaAs	0.30
InP	4.00
InP substrate	-

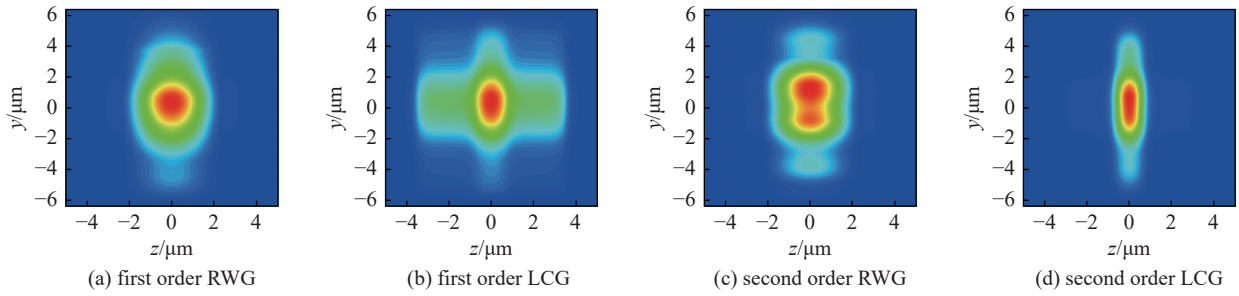


Fig. 4 Transverse mode distribution in two structures

图 4 两种结构中的横模分布

布,从图中可以看出 RWG 结构在  $y$  方向上光场与光栅结构的重叠较大且呈现多横模分布,而 LCG 结构在  $z$  方向上进入到光栅中的光非常少,耦合系数明显减小,所以导致反射率降低很多。光栅位置对反射谱的影响表明,光栅的有效折射率主要影响反射率峰值波长,而光栅的光限制因子主要影响耦合系数大小。

### 2.2 侧壁倾角对光栅光反馈特性的影响

深刻蚀的光栅一般很难保持侧壁的垂直度,光栅侧壁的倾角示意图如图 5(a)所示。图 5(b)、(c)、(d)、(e)所示仿真分析了光栅倾角  $\theta$  与反射率以及波长的关系,从图中可以看出,随着光栅倾角从  $87.5^\circ$  增加至  $91^\circ$  过程中,

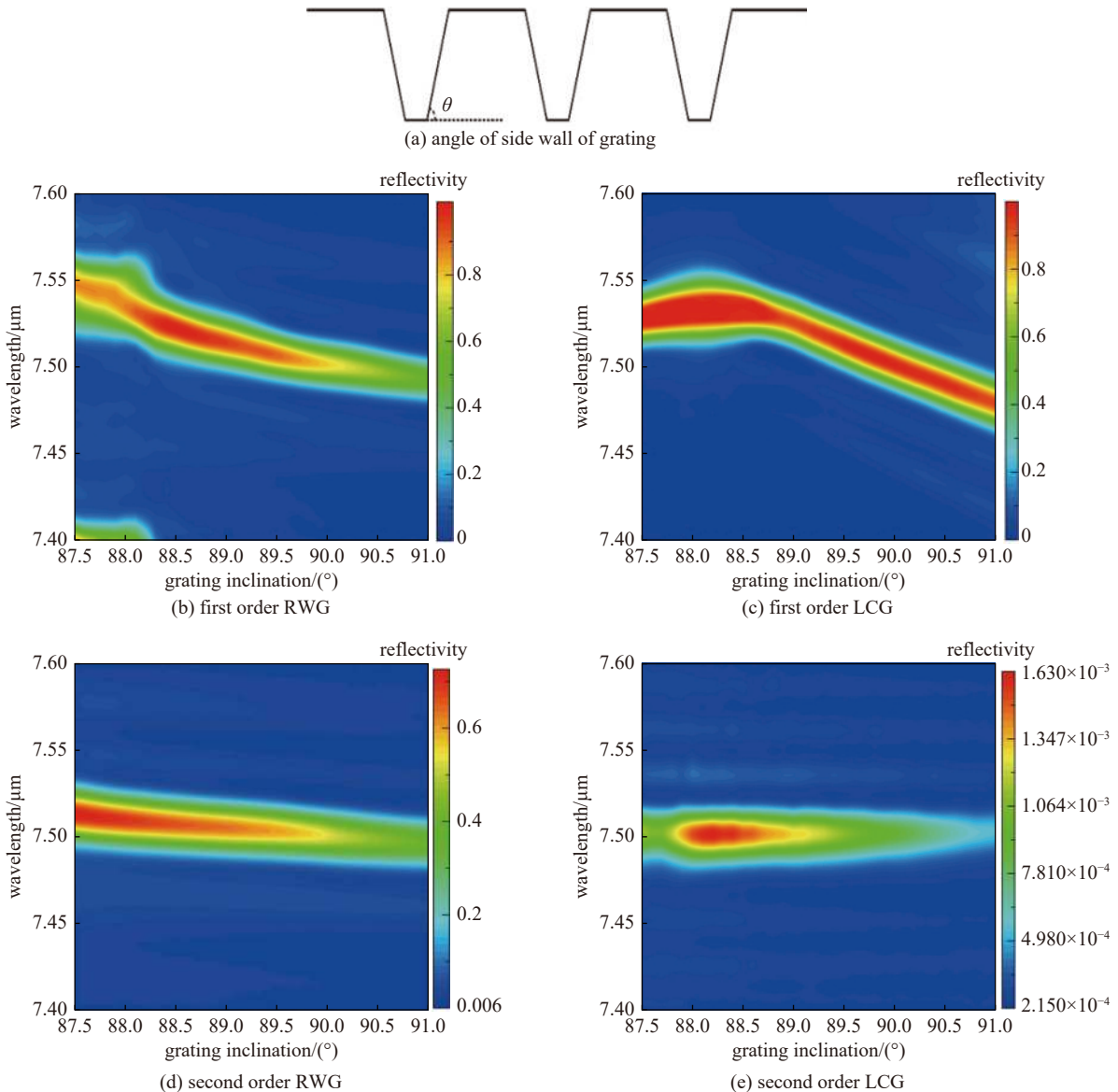


Fig. 5 Angle of side wall of grating and the relationship between dip angle, wavelength and reflectivity of grating

图 5 光栅侧壁倾角及其与波长、反射率的关系

Bragg 波长逐渐向短波方向移动, 反射率呈现先增大后降低的趋势, 其他纵模逐渐减少且反射率逐渐降低, 相比二阶光栅, 一阶光栅在侧壁倾角变化过程中 Bragg 波长变化范围更大。由于光栅高折射率区随着侧壁倾角增大不断减少, 导致光栅区折射率减小, 所以波长向短波方向偏移, 从此也可以看出折射率对 Bragg 波长的影响非常明显, 一阶光栅侧壁倾角变化  $3.5^\circ$  致波长偏移 50 nm, 二阶 RWG 光栅波长变化约 12 nm, 而二阶 LCG 基本不变, 这意味着二阶 LCG 具有更大的工艺容差。由于光栅倾角从  $87.5^\circ$  增加至  $91^\circ$ , 光栅结构中低折射率区逐渐增大, Bragg 波长处的光限制因子逐渐降低, 这是耦合系数及反射率降低的原因。

在腔面反射率一定时, 仿真分析两种周期的 LCG 及 RWG 结构镜面损耗与光栅倾角的关系, 如图 6 所示。随着光栅倾角从  $87.5^\circ$  增加至  $91^\circ$  过程中, 谐振腔损耗逐渐减小, 当倾角大于  $90^\circ$  时损耗逐渐增加。这是因为  $7.5 \mu\text{m}$  波长处, 从  $87.5^\circ$  增加至  $91^\circ$  过程中, 耦合系数呈现先增大后减小的变化过程, 所以镜面损耗具有上述的变化规律, 这与文献 [22] 中耦合系数与镜面损耗的解析关系是一致的。从图 6 中也可以看出二阶光栅损耗对倾角的变化不敏感, 这表明二阶光栅对光栅倾角的工艺容差更大。DFB 激光器的线宽与镜面损耗密切相关, 越小的镜面损耗可以获得更窄的光谱线宽, 良好形貌的光栅可以增大耦合系数、降低谐振腔损耗, 从而有利于获得单纵模的 DFB 激光器。从对光栅侧壁倾角的仿真分析中

可以发现, 侧壁倾角通过影响光栅折射率及光限制因子从而分别影响 Bragg 波长、耦合系数及镜面损耗。低阶光栅对光栅侧壁倾角制备工艺的精度要求更高, 高阶光栅具有更大的工艺容差。

### 2.3 占空比、刻蚀深度对光反馈特性的影响

图 7 显示了一阶、二阶光栅耦合系数与占空比、刻蚀深度的关系, 可以看出二阶光栅的耦合系数最大值对应的占空比是变化的, 这是因为当光栅有效折射率改变后光栅的有效周期会相对发生变化, 因此光栅耦合系数峰值对应的占空比不同。当一阶光栅刻蚀深度从  $2.531 \mu\text{m}$  增加至  $2.885 \mu\text{m}$  过程中, 耦合系数峰值对应的占空比没有明显变化, 这表明刻蚀深度的变化对二阶光栅有效折射率的影响更显著。从图 7 中也可以看出, 一阶光栅的耦合系数随着占空比的变化率更大, 相同刻蚀深度时, 一阶光栅占空比变化 0.1 时耦合系数变化约为  $0.4781 \text{ mm}^{-1}$ , 而二阶光栅仅为  $0.0054 \text{ mm}^{-1}$ 。图 8 显示了一阶、二阶光栅耦合系数随刻蚀深度的变化关系, 随着光栅刻蚀深度的增加耦合系数增大, 二者基本成正比关系; 根据式 (4) 可以看出, 相同刻蚀深度时一阶光栅的相对介电常数微扰是二阶光栅的二倍, 但图 8 的仿真结果并非呈现二倍的关系, 这表明光栅周期通过影响光栅光限制因子从而影响耦合系数。

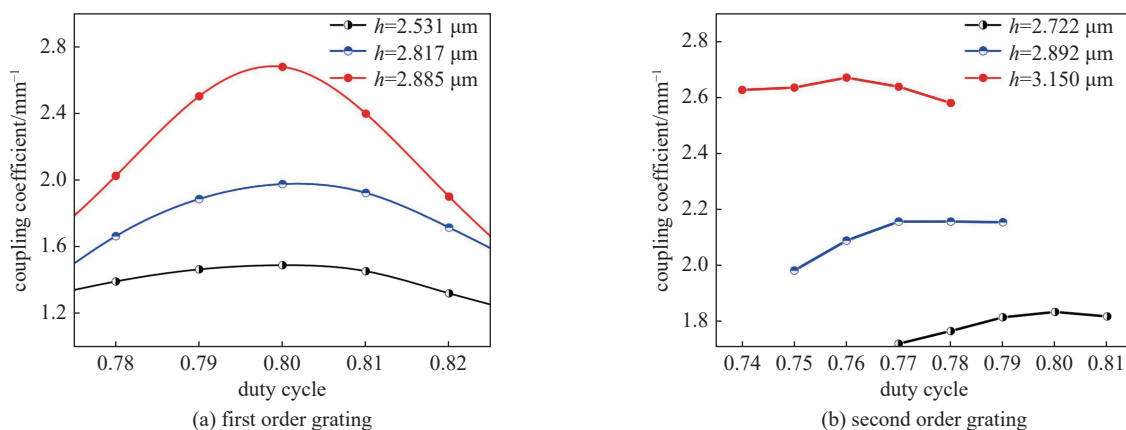


Fig. 7 Grating coupling coefficient varies with duty ratio and etching depth

图 7 光栅耦合系数与占空比、刻蚀深度的关系

如图 9 所示为一阶、二阶 RWG 刻蚀深度对 Bragg 波长以及反射率的影响, 从图中可以看出随着光栅刻蚀深度的增加 Bragg 波长向短波方向移动, 出现其他纵模, 并且各纵模反射率逐渐增大, 这主要与光限制因子随刻蚀深度

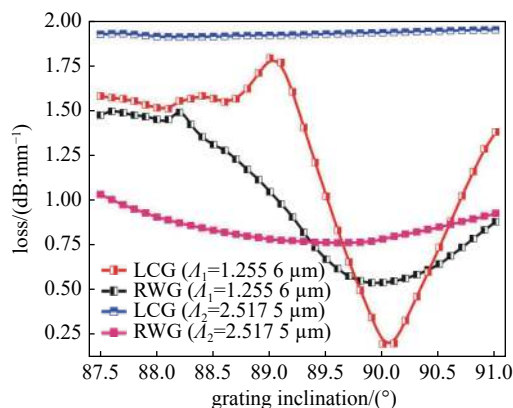


Fig. 6 Influence of grating angle on cavity loss

图 6 光栅倾角对谐振腔损耗的影响

增加有关。比较图 9(a)、(b)可以看出,一阶、二阶光栅 Bragg 波长随刻蚀深度具有线性的变化关系,而二阶光栅刻蚀深度小于 2.7  $\mu\text{m}$  时 Bragg 波长是线性变化的,当大于 2.7  $\mu\text{m}$  时由于出现高阶模,波长的变化不再是线性的。仿真结果表明,可以通过增加刻蚀深度达到提高耦合系数的目的,但刻蚀深度过大会导致激光器多纵模、横模等现象,激光器无法稳定工作。

图 10 仿真分析了 Bragg 波长的镜面损耗与刻蚀深度的关系,由于耦合系数与刻蚀深度具有正比的关系,所以当刻蚀深度增加时对应波长的镜面损耗降低,这表明通过增加刻蚀深度可以增大耦合系数以及降低镜面损耗,但是光栅深刻蚀造成的散射损耗增大,这会造成激光器工作时易发生跳模、激光器输出功率降低等现象。

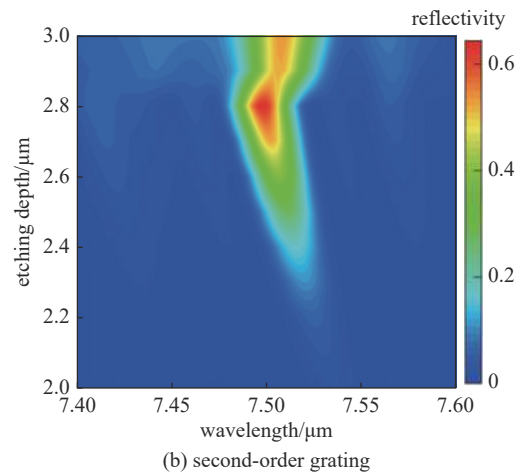
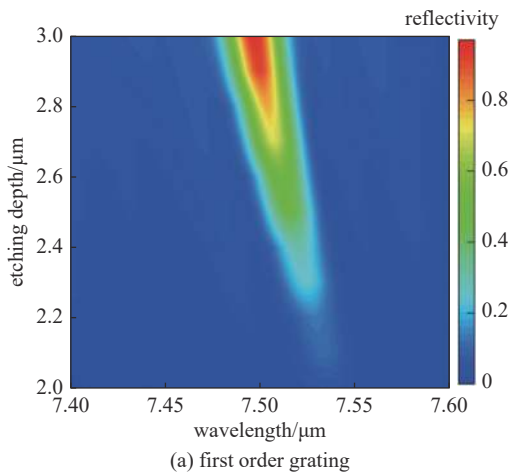


Fig. 9 Relationship between etching depth, wavelength and reflectivity of the period

图 9 光栅刻蚀深度、波长与反射率的关系

通过分析光栅周期、占空比及刻蚀深度对光栅耦合系数及损耗的影响发现,提高光栅耦合系数以及选择纵模的能力可以通过减小光栅周期、增大刻蚀深度实现,相同耦合系数的一阶光栅相比二阶光栅需要更小刻蚀深度,激光器横模特性也更优越。从仿真结果分析,光栅的周期不仅直接影响耦合系数,也通过影响光限制因子间接影响耦合系数,光栅刻蚀深度、占空比等参数及位置通过影响光波导内部场分布从而影响光栅的光反馈特性,其中有效折射率主要影响 Bragg 波长,而光限制因子主要影响耦合系数的大小。将 TM 模耦合系数的多种影响因素加以细致的分析,这对提高 DFB 量子级联激光器的性能具有重要的推动作用。

### 3 结 论

本文通过有限时域差分法,以 7.5  $\mu\text{m}$  DFB-QCL 为例,在前人研究的基础上进一步分析 TM 模 Bragg 光栅周期、占空比、刻蚀深度、位置、倾角等参数对光栅光反馈特性的影响。着重对比分析了 TM 模侧向耦合光栅与脊波导光栅光反馈特性及产生不同的原因,并探究了两种光栅侧壁倾角对光栅性能的影响,通过仿真分析可以发现,影响光反馈特性的因素比较复杂,Bragg 光栅参数对光反馈特性的影响并非独立的,Bragg 波长主要由有效折射率决定,除公式中体现的直接因素外,各参数如光栅的周期、占空比、刻蚀深度、有效折射率以及光限制因子也通过

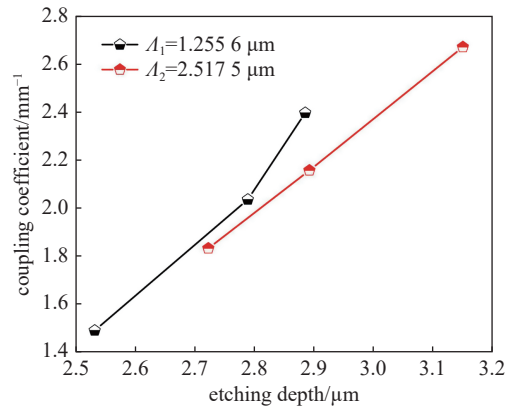


Fig. 8 Relationship between etching depth of grating and coupling coefficient

图 8 光栅刻蚀深度与耦合系数的关系

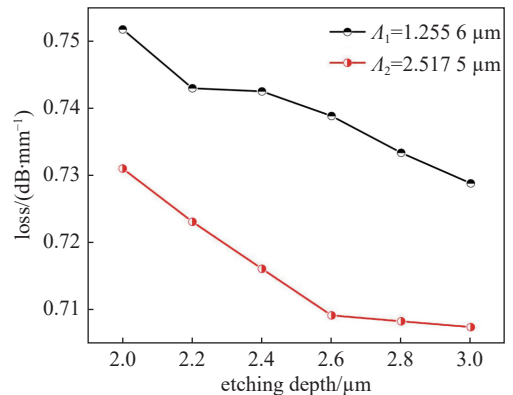


Fig. 10 Influence of etching depth of grating on loss

图 10 光栅刻蚀深度对损耗的影响

互相影响间接作用于耦合系数。另外减小光栅周期、增大刻蚀深度可以提高光栅的耦合系数, 增强光栅选择纵模的能力, 但过大的刻蚀深度会导致高阶模等现象的发生。

#### 参考文献:

- [1] Shu Hong, Suttinger M, Lyakh A, et al. Floquet-Bloch analysis for distributed feedback quantum cascade lasers with a non-rectangular top-metal grating profile[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, 55(1): 1-7.
- [2] Sigler C, Wang Xiaodong, Mawst L J, et al. First-order grating TM coupling coefficients for distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2018, 54: 2300207.
- [3] Babichev A V, Gladyshev A G, Filimonov A V, et al. Heterostructures for quantum-cascade lasers of the wavelength range of 7-8  $\mu\text{m}$ [J]. *Technical Physics Letters*, 2017, 43(7): 666-669.
- [4] Dang Jingmin, Yu Haiye, Sun Yujing, et al. A CO trace gas detection system based on continuous wave DFB-QCL[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 82: 183-191.
- [5] Abramov P I, Budarin A S, Kuznetsov E V, et al. Quantum-cascade lasers in atmospheric optical communication lines: challenges and prospects (review)[J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2020, 87(4): 579-600.
- [6] Babichev A V, Gladyshev A G, Kurochkin A S, et al. Room temperature lasing of multi-stage quantum-cascade lasers at 8  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Semiconductors*, 2018, 52(8): 1082-1085.
- [7] Baranov A N, Bahriz M, Teissier R. Room temperature continuous wave operation of InAs-based quantum cascade lasers at 15  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18799-18806.
- [8] Cui Xiaojuan, Yu Runqing, Chen Weidong, et al. Development of a quantum cascade laser-based sensor for environmental HONO monitoring in the mid-infrared at 8  $\mu\text{m}$ [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2784-2791.
- [9] Tittel F K, Allred J J, Cao Yingchun, et al. Quantum cascade laser-based sensor system for nitric oxide detection[C]//Proceedings of SPIE 9370, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XII. 2015: 9370.
- [10] Wei Qianhe, Li Bincheng, Wang Jing, et al. Impact of residual water vapor on the simultaneous measurements of trace  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in air with cavity ring-down spectroscopy[J]. *Atmosphere*, 2021, 12: 221.
- [11] Deng Yu, Zhao Binbin, Wang Xingguang, et al. Narrow linewidth characteristics of interband cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116: 201101.
- [12] Golyak I S, Morozov A N, Svetlichnyi S I, et al. Identification of chemical compounds by the reflected spectra in the range of 5.3-12.8  $\mu\text{m}$  using a tunable quantum cascade laser[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2019, 13(4): 557-564.
- [13] Pierściński K, Kuźmicz A, Pierścińska D, et al. Optimization of cavity designs of tapered AlInAs/InGaAs/InP quantum cascade lasers emitting at 4.5  $\mu\text{m}$ [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25: 1901009.
- [14] Zhao Yue, Zhang Jinchuan, Jia Zhiwei, et al. Low power consumption distributed-feedback quantum cascade lasers operating in continuous-wave mode above 90  $^\circ\text{C}$  at  $\lambda \sim 7.2 \mu\text{m}$ [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33: 124201.
- [15] Briggs R M, Frez C, Fradet M, et al. Low-dissipation 7.4- $\mu\text{m}$  single-mode quantum cascade lasers without epitaxial regrowth[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14589-14595.
- [16] Zhou Wenjia, Wu Donghai, McClintock R, et al. High performance monolithic, broadly tunable mid-infrared quantum cascade lasers[J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1228-1231.
- [17] Zhuo Ning, Zhang Jinchuan, Liu Fengqi, et al. Tunable distributed feedback quantum cascade lasers by a sampled Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(11): 1039-1042.
- [18] Cheng F M, Zhang J C, Zhao Y, et al. Study on the wavelength detuning distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2018, 18(11): 7523-7526.
- [19] Faist J, Gmachl C, Capasso F, et al. Distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(20): 2670-2672.
- [20] Chen C L. Foundations for guided-wave optics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- [21] Streifer W, Scifres D, Burnham R. TM-mode coupling coefficients in guided-wave distributed feedback lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1976, 12(2): 74-78.
- [22] Virtanen H, Uusitalo T, Dumitrescu M. Simulation studies of DFB laser longitudinal structures for narrow linewidth emission[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49: 160.