

光学学报

一维 TiO₂ 亚波长光栅的衍射异常现象及其结构设计

臧茂荣¹, 贾志刚^{1*}, 董海亮¹, 张爱琴², 梁建³, 马淑芳⁴, 许并社^{1,4**}

¹太原理工大学新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

²太原理工大学轻纺工程学院, 山西 太原 030024;

³太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024;

⁴陕西科技大学材料原子·分子科学研究所, 陕西 西安 710021

摘要 研究了一维 TiO₂ 亚波长光栅(SWG)的衍射异常现象,具体表现为泄漏模共振效应和瑞利异常。研究表明,一定参数条件下的横磁波(TM 偏振)和横电波(TE 偏振)入射均会出现瑞利异常和泄漏模共振效应。在 TM 偏振光情况下,会出现传统的窄带、高衍射效率泄漏模共振效应,而在 TE 偏振光情况下,由于多个接近的泄漏模共振峰相互叠加,故会形成宽带、高衍射效率的反射谱。采用严格耦合波理论计算了一维 TiO₂ SWG 的衍射效率,研究了光栅周期、高度和占空比对光栅反射率的影响。当光栅周期为 0.49 μm,高度为 0.25 μm,占空比为 0.34 时,SWG 具有 TE 偏振选择性,在 0.52 μm 波段处的反射率接近 1,且高反带(反射率达到 99.9%以上)宽度为 26 nm。优化各结构参数,得到光栅周期、占空比、高度的制作容差分别为 1.6%、8.3%、2.0%,故 SWG 理论上可以作为垂直腔面发射激光器的反射镜。

关键词 衍射; 垂直腔面发射激光器; 亚波长光栅; TiO₂; 严格耦合波理论

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0905001

Diffraction Anomalies and Structural Design of One-dimensional TiO₂ Subwavelength Gratings

Zang Maorong¹, Jia Zhigang^{1*}, Dong Hailiang¹, Zhang Aiqin², Liang Jian³,
Ma Shufang⁴, Xu Bingshe^{1,4**}

¹Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

²College of Textile Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

³College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

⁴Institute of Atomic and Molecular Science, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract The diffraction anomalies of a one-dimensional TiO₂ subwavelength grating (SWG) are studied, which are characterized by leakage mode resonance effect and Rayleigh anomalies. The results show that Rayleigh anomalies and leakage mode resonance effect occurs for transverse magnetic wave (TM polarization) and transverse electric wave (TE polarization) incident under certain parameter conditions. In the case of TM polarized light, the traditional leakage mode resonance effect with narrow band and high diffraction efficiency will occur, while in the case of TE polarized light, due to the superposition of several close leakage mode resonance peaks, the reflection spectra with broad band and high diffraction efficiency will be formed. The diffraction efficiency of a one-dimensional

收稿日期: 2021-09-23; 修回日期: 2021-11-07; 录用日期: 2021-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(21972103, 61904120, 61604104, 51672185)、国家重点研发计划(2016YFB0401803)、山西省基础研究项目(201801D221183, 201801D221124, 201801D121101, 201901D111111, 201901D111127, 201901D211090)、山西省重点研发项目(201803D31042)、山西浙大新材料与化工研究院研发项目(2021SX-AT001)

通信作者: *jiazhigang@tyut.edu.cn; **xubs@tyut.edu.cn

TiO₂ SWG is calculated by the rigorous coupled-wave theory (RCWA), and the effects of grating period, height and duty cycle on the reflectivity of the grating are studied. When period, height, and duty cycle of the grating are 0.49 μm, 0.25 μm and 0.34 respectively, the SWG exhibits TE polarization selectivity. The reflectivity at 0.52 μm is close to 1, and the high reflection band (reflectivity is higher than 99.9%) had a width of 26 nm. By optimizing the structural parameters, the manufacturing tolerances of the grating period, duty cycle, and height are 1.6%, 8.3%, and 2.0% respectively, so the SWG can be theoretically used as the reflector of a vertical cavity surface emitting laser.

Key words diffraction; vertical cavity surface emitting laser; subwavelength grating; TiO₂; rigorous coupled-wave analysis

1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有阈值电流低、单纵模工作、可以形成圆形光斑和光纤耦合效率高等优点^[1-6], 被广泛应用于光通信、光互连和光信息处理等领域中^[7-8], 受到了国内外研究人员的广泛关注。VCSEL 是在两个反射镜之间设置有源区所构成的, 传统的 VCSEL 反射镜为分布布拉格反射镜 (DBR)。为实现极高的反射率, DBR 的对数通常要达到 20~40 对。DBR 对数增多会导致更高的串联电阻和严重的发热, 影响器件性能。同时, DBR 对数增多会增加工艺难度和生长成本, 不利于器件的小型化^[9-11]。亚波长光栅 (SWG) 的突出特点是高折射率光栅条纹完全被低折射率介质包围, 折射率差大, 通过改变光栅的介质材料、厚度、占空比和光栅周期等参数, 反射率可以超过 99.9%, 可以替代 DBR 作为 VCSEL 的反射镜, 避免多层双 DBR 引起的串联电阻高和吸收损耗大的问题的出现。同时, 该方法能够提高激光的输出质量, 改善 VCSEL 的偏振特性, 满足器件小型化的发展需求^[11-14]。

本文主要研究面向 GaN 基 VCSEL 的 SWG 及其衍射异常现象, 运用严格耦合波理论 (RCWA) 对一维 TiO₂ SWG 进行数值计算和理论分析。在理论分析的基础上, 设计了一种用于绿光波段 (0.52 μm) VCSEL 的横电波 (TE 偏振) SWG 反射镜, 为 SWG 的结构设计提供了理论指导。

2 严格耦合波理论与可靠性验证

利用 RCWA^[15-17] 对一维 TiO₂ SWG 的衍射效率进行求解。RCWA 是 Moharam 和 Gaylord^[18] 提出的一种基于麦克斯韦方程组的严格矢量衍射分析方法。由于该方法具有周期性特性, 故其非常适合用于模拟光场通过光栅结构的反射率和透射率。

RCWA 将 SWG 分 3 个区域进行求解, 分别为入射区 (区域 I, $z < 0$)、光栅区 ($0 < z < d$) 和透射区 (区域 II, $z > d$)。假设入射区的折射率为 n_1 (一般

为空气, 此时 $n_1 = 1$), 光栅区的折射率为 n_g , 透射区的折射率为 n_2 。图 1 为一维 SWG 结构示意图。其中: 灰色区域代表入射光平面; k 为入射光波矢; t 为入射平面内与入射波矢垂直的矢量; n 为入射平面的法向矢量; E 为电场矢量; ϕ 为方位角, 即 X-Z 平面与入射平面之间的夹角; ψ 为电场方向与入射平面之间的夹角; θ 为入射光的入射角; Λ 为光栅周期; f 为占空比; $f \cdot \Lambda$ 为光栅宽度; d 为光栅厚度。

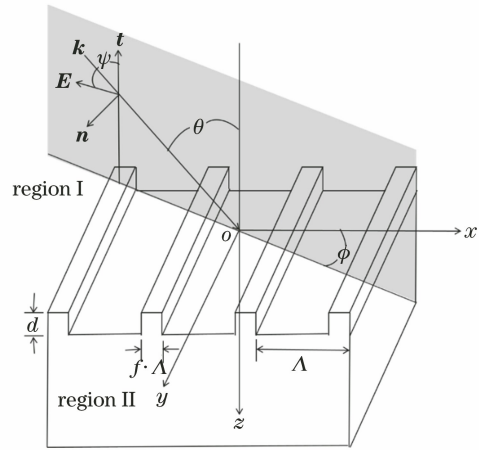


图 1 一维 SWG 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one-dimensional SWG

首先, 对各区域进行傅里叶级数展开以获得电磁场表达式。然后, 将电磁场表达式代入麦克斯韦方程组严格求解以获得耦合波方程。最后, 通过连续性边界条件求解衍射效率。TE 偏振的衍射效率可定义为

$$D_{r,i} = R_i R_i^* \operatorname{Re} \left(\frac{k_{\parallel,z,i}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right), \quad (1)$$

$$D_{t,i} = T_i T_i^* \operatorname{Re} \left(\frac{k_{\parallel,z,i}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right), \quad (2)$$

式中: $D_{r,i}$ 为反射衍射效率; $D_{t,i}$ 为透射衍射效率; k_0 为波数; i 为衍射波级次; n_1 为区域 I (入射区) 的折射率; $k_{\parallel,z,i}$ 和 $k_{\parallel,z,i}$ 为入射区和透射区中沿 z 轴方向的波矢; R_i 是反射区第 i 级衍射波电场的归一化振幅; T_i 是透射区第 i 级衍射波电场的归一化振幅; R_i^* 为 R_i 的复共轭; T_i^* 为 T_i 的复共轭。对于

无损耗光栅,反射和透射衍射效率之和必须为 1,下文中提到的 0 级衍射效率即为反射率。

为验证本文仿真计算的可靠性,使用 Slosberg^[19]研究的 GaN 基 SWG 数据进行计算,并与文献[19]报道的结果进行比较。如图 2 所示,使

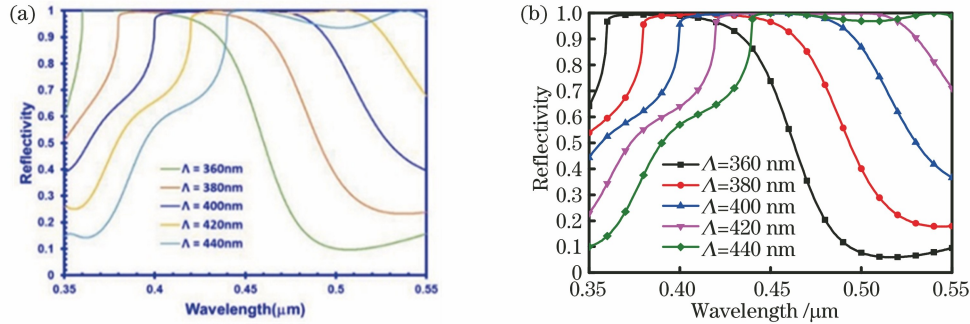


图 2 GaN 基 SWG 反射谱。(a)文献[19]中的反射谱;(b)仿真计算得到的反射谱

Fig. 2 Reflection spectra of GaN-based SWG. (a) Reflection spectra in Ref. [19]. (b) reflection spectra obtained by simulation

3 仿真计算

本文研究的是一维 TiO_2 SWG 面向绿光波段 ($0.52 \mu\text{m}$) 的 VCSEL。设计的 SWG 是一种被空气包围的 TiO_2 光栅,其结构如图 3 所示,其中 H 为 TiO_2 的高度。 TiO_2 与空气可形成较大的折射率差,这会使得中心波长 ($0.52 \mu\text{m}$) 处反射率可以达到 99.9% 以上,并且具有较宽的高反带。

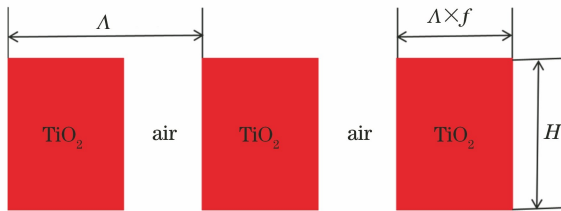


图 3 一维 TiO_2 SWG 结构

Fig. 3 Structure of one-dimensional TiO_2 SWG

Wood^[20]研究金属 SWG 时发现,当改变入射波长或入射角时,SWG 各级次衍射波能量分布会发生很大的变化,即光栅衍射异常,这种现象又被称为 Wood 异常。Hessel 和 Oliner^[21]利用光栅衍射的电磁场理论对 Wood 异常进行了全面的分析,研究发现 Wood 异常主要分为两种,一种是共振异常,另一种是瑞利异常^[22]。

共振异常是指当入射波长、入射角或光栅结构参数发生微小变化时,衍射效率在某一波长处突然增大,随后又骤然减小的现象。亚波长介质光栅的共振异常又被称为泄漏模共振效应或导模共振效

用相同的光栅参数进行计算,仿真得到的结果与文献[19]中的反射谱基本一致,证明了仿真计算的可靠性。其中,光栅高度为 $0.13 \mu\text{m}$,占空比为 0.5,光栅周期范围为 $0.36 \sim 0.44 \mu\text{m}$ 。

应^[23-26],特点为窄带、对入射波长或入射角敏感和高衍射效率。泄漏模共振效应具体的物理机制可以理解为:一维 SWG 可看作周期性调制的平面波导,一部分高阶衍射波(在 z 方向某一入射光波长处会由传播波变为倏逝波)因为衍射效应进入到波导中,此时高阶衍射波与光栅模式相位匹配变为导模。由于光栅的周期性调制使得导模变为泄漏模,故当反射波或透射波与泄漏模发生耦合时,能量会重新分布,表现为衍射效率在某一波长处急剧变化^[27]。图 4 为 TiO_2 SWG 的入射角为 0° 、光栅高度 H 为 $0.25 \mu\text{m}$ 、周期 Λ 为 $0.49 \mu\text{m}$ 、占空比 f 为 0.34 情况下,入射波长在 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 范围内变化时 TE、TM 偏振的反射谱。可以发现:在 TM 偏振情况下,在 $0.542 \mu\text{m}$ 处反射率突然增大到 99.6% 以上,随后反射率骤然降低,明显出现泄漏模共振效应;在 TE 偏振情况下,高衍射效率带宽达到 26 nm,而不是尖锐的共振峰,看似在此参数条件下 TE 偏振没有出现泄漏模共振效应,实则是因为多个相近的泄漏模共振峰相互叠加形成了一个高反带^[28-29]。因此,在这一光栅参数条件下,TM 偏振和 TE 偏振都会产生泄漏模共振效应。

瑞利异常是指当入射波长发生微小变化时,SWG 的某一衍射级次突然消失,变为倏逝波,导致衍射效率重新分布的现象^[22]。发生瑞利异常的入射波长被称为瑞利波长,根据相位匹配条件,瑞利波长的计算公式为 $\lambda_R = \Lambda(n_1 \sin \theta + n_2)/i$,其中 n_1 、 n_2 分别为光栅入射区、透射区的折射率(TiO_2 SWG

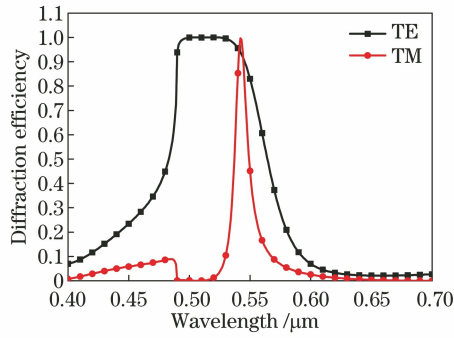


图 4 TiO₂ SWG 中 TE 偏振和 TM 偏振的反射谱
Fig. 4 Reflection spectra of TE polarization and TM polarization in TiO₂ SWG

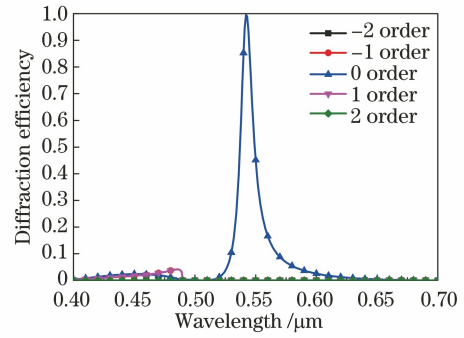


图 5 TiO₂ SWG 不同衍射级次的 TM 偏振反射谱
Fig. 5 TM polarization reflection spectra of TiO₂ SWG at different diffraction orders

中 n_1, n_2 为空气折射率,二者值均为 1)。图 5、图 6 分别为当入射角为 0° 、光栅高度 H 为 $0.25 \mu\text{m}$ 、周期 Λ 为 $0.49 \mu\text{m}$ 、占空比 f 为 0.34 时, TiO₂ SWG 不同衍射级次随波长变化的 TM、TE 偏振反射谱。可以看出,在 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 波长范围内, TM 偏振光和 TE 偏振光的高阶衍射波(衍射级数大于 1 或小于 -1)在此结构参数下均不存在。-1 级和 1 级衍射波都在入射光波长为 $0.49 \mu\text{m}$ 处衍射效率降为 0,变为倏逝波。倏逝波是一种沿光栅表面传播一旦进入介质中会迅速衰减的电磁模式^[30],由传播波变为倏逝波的入射光波长($0.49 \mu\text{m}$)即为出现瑞利异常的入射光波长,很明显可以看出,该波长与计算得到的瑞利波长一致。当 -1 级和 1 级衍射波突然消失时,为保持能量守恒,0 级衍射波的衍射效率将重新分布,之后随着波长的继续增加,只存在 0 级衍射波。

从图 5 和图 6 中可以看出: TM 偏振和 TE 偏振的 0 级衍射波的最高衍射效率出现的位置并不重合; TM 偏振的高反带非常窄,且最高反射率在 $0.542 \mu\text{m}$ 处,未与设计的中心波长重合; TE 偏振的衍射效率在入射波长为 $0.497 \sim 0.530 \mu\text{m}$ 范围内达到 99.5% 以上,可见在绿光波段范围内, TiO₂ SWG 具有良好的 TE 偏振选择性。

在设计过程中,采用严格耦合波法计算在 TE 偏振光下不同光栅参数的反射谱,通过控制变量法确定最优光栅参数,并结合等效介质理论对反射谱的变化规律进行分析。等效介质理论将一维 SWG 等效为平面介质波导,当第 i 级衍射波与波导模式相位匹配时,衍射波变为导模,其传播波数 $\beta^{[26]}$ 可表示为

$$\beta_i = k_0(n_1 \sin \theta - i\lambda/\Lambda), \quad (3)$$

式中: λ 为入射光波长。

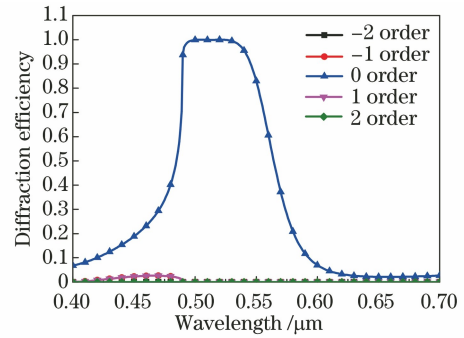


图 6 TiO₂ SWG 不同衍射级次的 TE 偏振反射谱
Fig. 6 TE polarization reflection spectra of TiO₂ SWG at different diffraction orders

将相应的等效折射率 N 定义为 β_i/k_0 , 为使共振发生, N 必须满足的关系^[26]为

$$\max\{n_1, n_2\} \leq |N| = |n_1 \sin \theta - i\lambda/\Lambda| \leq n_g, \quad (4)$$

式中: n_g 为光栅区折射率; $\max(\cdot)$ 为最大值函数。

根据 VCSEL 的器件结构和工作原理,可以假设光垂直于光栅表面($\theta=0^\circ$)入射,入射光的电场方向垂直于光栅周期方向(TE 偏振)。当 SWG 高度 H 为 $0.25 \mu\text{m}$ 、占空比 f 为 0.34 时,分析比较不同光栅周期下的反射谱,如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出,当周期增大时,反射谱整体发生红移。图 7(b)为高反带顶部的放大图,从中可以清晰地看出高反带是由两个共振峰组合形成的。根据式(3)、(4),光栅周期增大使传播波数增大,共振发生的入射波长范围逐渐红移,从而使共振形成的高反带逐渐向长波长方向移动。当周期为 $0.49 \mu\text{m}$ 时,由式(4)可知, -1 级、1 级衍射波只有在入射波长为 $0.49 \sim 0.88 \mu\text{m}$ 范围内才可能产生共振。由仿真结果可以看出,在入射波长为 $0.500 \sim 0.526 \mu\text{m}$ 范围内发生泄漏模共振效应,进而形成高反带(反射率超过 99.9%),带宽为 26 nm 。当周期继续增加时,两

个共振峰逐渐分开,虽然高反带宽度有所增加,但是其中心凹陷,反射率低于 99.9%。为了实现较宽的高反带和在中心波长处的高反射率,详细计算了周期在 0.488~0.496 μm 范围内的反射谱,如图 8 所

示。在此周期范围内,高反带较宽且在中心波长处的反射率都达到 99.9% 以上,光栅周期制作容差 ($\Delta\Lambda/\Lambda$) 约为 1.6%,其中 $\Delta\Lambda$ 为周期允许范围的最大值与最小值之差。

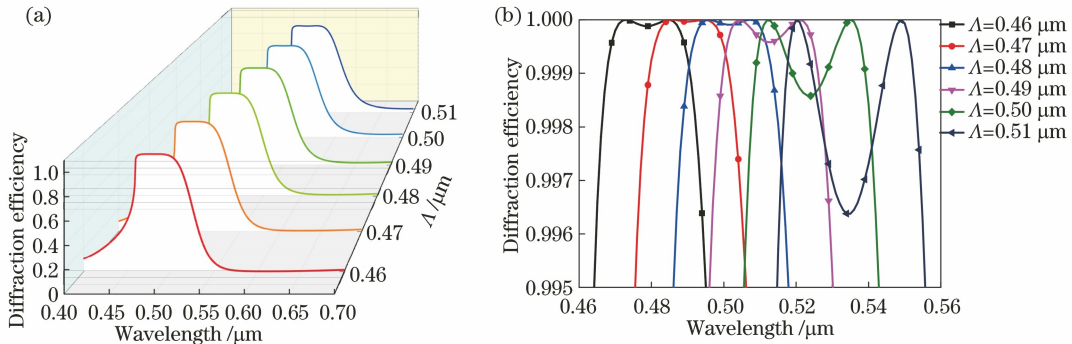


图 7 当光栅高度为 0.25 μm , 占空比为 0.34 时, 不同光栅周期下的反射谱。(a) 完整反射谱; (b) 反射谱的顶部放大图
Fig. 7 Reflection spectra under different grating periods when grating height is 0.25 μm and duty cycle is 0.34.
(a) Full reflection spectra; (b) magnified view of top of reflection spectra

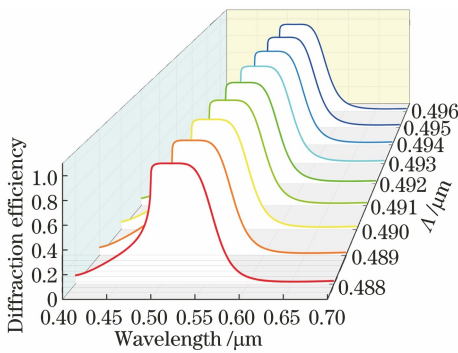


图 8 光栅高度为 0.25 μm , 占空比为 0.34, 周期范围为 0.488~0.496 μm 时的反射谱

Fig. 8 Reflection spectra when grating height is 0.25 μm , duty cycle is 0.34, and period range is 0.488~0.496 μm

根据等效介质理论, TE 偏振下一维 SWG 的等效折射率 N 的一阶近似又与光栅占空比 f 有关^[28], 表达式为

$$N = [(1-f)n_1^2 + fn_2^2]^{1/2}. \quad (5)$$

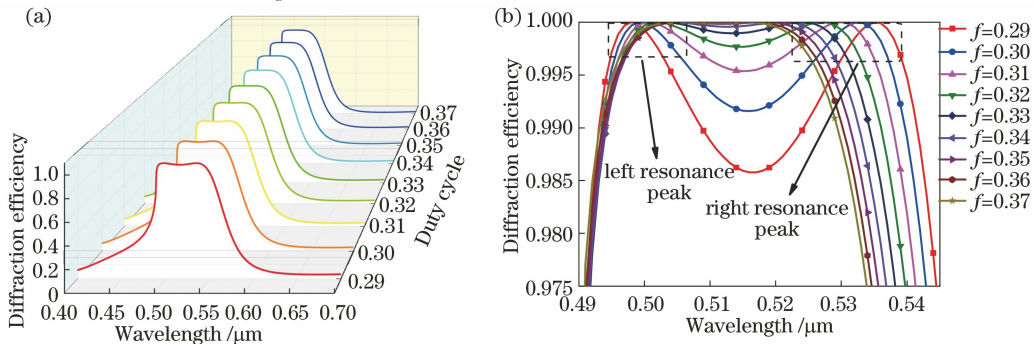


图 9 当光栅周期为 0.49 μm , 高度为 0.25 μm 时, 不同光栅占空比下的反射谱。(a) 完整反射谱; (b) 反射谱的顶部放大图
Fig. 9 Reflection spectra under different grating duty cycles when grating height is 0.49 μm and height is 0.25 μm .
(a) Full reflection spectra; (b) magnified view of top of reflection spectra

由式(5)可知, 改变光栅的占空比会使得光栅的等效折射率发生变化, 故形成泄漏模共振的位置也会产生变化。在 TE 偏振光下, 将光栅周期设为 0.49 μm , 高度设为 0.25 μm , 分析占空比对 SWG 反射谱的影响。如图 9(b) 所示, 高反带由两个明显的共振峰形成。当占空比为 0.29 时, 两个共振峰间距较大, 高反带中间反射率低于 99.9%, 形成一个凹陷。随着占空比的增大, 有效折射率增大, 两个共振峰逐渐靠近, 使得中间凹陷处逐渐变浅, 在 0.52 μm 波段处的反射率逐渐增大到 99.9% 以上。当占空比为 0.34 时, 两个共振峰合并为一个宽度为 26 nm 的高反带, 在 0.52 μm 波段处的反射率接近 1。继续增加占空比, 高反带会逐渐变窄。考虑高反带宽度和中心波长处的反射率, 确定了占空比(范围为 0.33~0.36)的误差允许范围, 相比光栅周期, 占空比的制作容差较大($\Delta f/f$ 约为 8.3%), 其中 Δf 为

占空比允许范围的最大值与最小值之差。

将光栅周期设为 $0.49 \mu\text{m}$, 占空比设为 0.34 , 分析光栅高度对 SWG 反射谱的影响, 如图 10 所示。当光栅高度为 $0.23 \mu\text{m}$ 时, 形成两个满足相位匹配条件的共振峰, 此时两个共振峰中间形成凹陷。随着光栅高度的增加, 左侧共振峰和右侧共振峰逐渐向中间汇聚形成一个宽平带。当光栅高度为 $0.25 \mu\text{m}$ 时, 可形成反射率接近 1、带宽 26 nm 的高反带。当光栅高度继续增加时, 左右两个共振峰逐渐分开, 高反带中间出现凹陷且反射率降低。由式

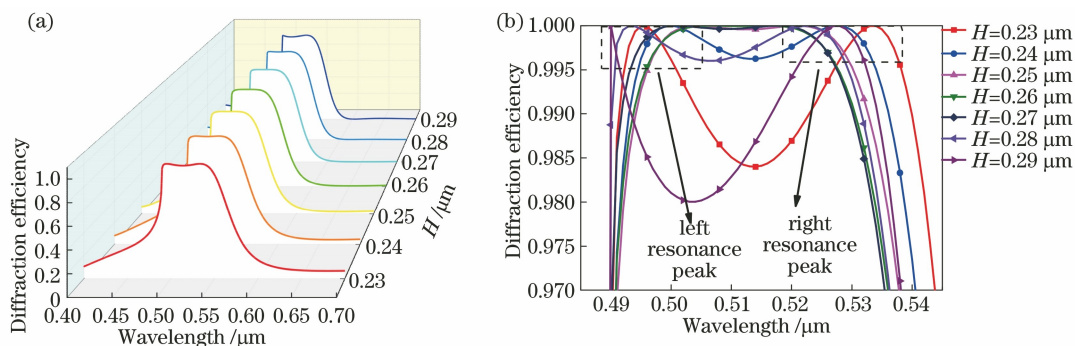


图 10 当光栅周期为 $0.49 \mu\text{m}$, 占空比为 0.34 时, 不同光栅高度下的反射谱。(a) 完整反射谱; (b) 反射谱的顶部放大图

Fig. 10 Reflection spectra under different grating heights when grating period is $0.49 \mu\text{m}$ and duty cycle is 0.34 .

(a) Full reflection spectra; (b) magnified view of top of reflection spectra

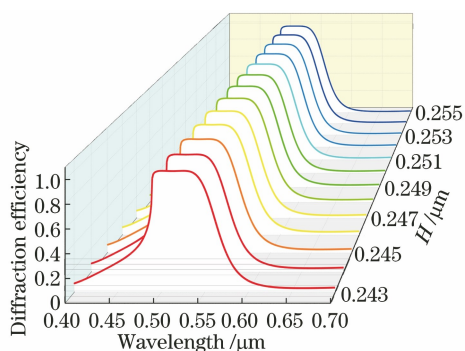


图 11 光栅周期为 $0.49 \mu\text{m}$, 占空比为 0.34 , 光栅高度范围为 $0.243 \sim 0.255 \mu\text{m}$ 时的反射谱

Fig. 11 Reflection spectra when grating period is $0.49 \mu\text{m}$, duty cycle is 0.34 , and grating height range is $0.243 \sim 0.255 \mu\text{m}$

4 结 论

首先, 研究了 SWG 的光栅衍射异常现象。对于 TM 偏振, 在 $0.542 \mu\text{m}$ 处衍射效率突然增大到 99.6% 以上, 随后入射波长发生微小变化, 衍射效率骤然减小, 出现传统窄带类型的泄漏模共振效应。对于 TE 偏振, 多个接近的泄漏模共振峰相互叠加导致宽平带反射谱的形成。TM 偏振和 TE 偏振都具有明显的瑞利异常, 在 $0.49 \mu\text{m}$ 处 -1 级和 1 级

(4) 可知, 当光栅周期为定值 $0.49 \mu\text{m}$ 时, 发生共振的波长最小为 $0.49 \mu\text{m}$, 故随着光栅高度的增加, 即使左侧共振峰不断向短波长方向移动, 其发生共振的入射波长也不会小于 $0.49 \mu\text{m}$, 这与仿真结果一致。为确定光栅高度的制作容差, 详细计算了光栅高度为 $0.243 \sim 0.255 \mu\text{m}$ 范围内的反射谱, 如图 11 所示。当光栅高度在 $0.247 \sim 0.252 \mu\text{m}$ 范围内时, 高反带带宽较宽且反射率高达 99.9% 以上, 制作容差 $(\Delta H/H)$ 为 2.0% , 其中 ΔH 为高度允许范围的最大值与最小值之差。

衍射波都变为倏逝波, 随着入射波长的增大, 只剩下 0 级衍射波。比较 TM 偏振和 TE 偏振 0 级衍射波的反射率最高值所处位置, 发现 TE 偏振在中心波长处具有极高的反射率和宽高反带, 而 TM 偏振衍射效率最高值带宽极窄且不在中心波长处。因此, 在选择的绿光波段范围内, TiO_2 SWG 具有良好的 TE 偏振选择性。

采用 RCWA 对一维 TiO_2 SWG 的衍射效率进行仿真计算, 结合等效介质理论, 研究了 TE 偏振不同光栅参数对衍射效率的影响, 发现光栅周期、光栅高度和光栅占空比都对 SWG 的反射率影响较大。根据仿真结果得出, TiO_2 与空气形成的 SWG 可以实现 99.9% 以上的反射率, 且高反带宽可以达到 26 nm , 光栅周期、占空比、高度的制作容差分别为 1.6% 、 8.3% 、 2.0% , 较大的制作容差更有利于器件的实现。在理论上, 一维 TiO_2 SWG 可以代替 DBR 作为 VCSEL 的反射镜, 因为其偏振依赖性有利于实现 VCSEL 的偏振方向控制, 同时可以实现极高的反射率和宽的高反带, 这符合 VCSEL 对于反射镜的要求。

参 考 文 献

- [1] 张立森. 大功率垂直腔面发射激光器的结构设计与

- 研制[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 1-24.
- Zhang L S. Structure design and fabrication of high power vertical cavity surface emitting laser [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 1-24.
- [2] Qiao P F, Li K, Cook K T, et al. MEMS-tunable VCSELs using 2D high-contrast gratings[J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 823-826.
- [3] Zhang Y H, Robertson J, Xiang S Y, et al. All-optical neuromorphic binary convolution with a spiking VCSEL neuron for image gradient magnitudes [J]. Photonics Research, 2021, 9(5): 603-611.
- [4] Zhang Y H, Xiang S Y, Cao X Y, et al. Experimental demonstration of pyramidal neuron-like dynamics dominated by dendritic action potentials based on a VCSEL for all-optical XOR classification task[J]. Photonics Research, 2021, 9(6): 1055-1061.
- [5] Hu S T, Gu X D, Nakahama M, et al. Non-mechanical beam scanner based on VCSEL integrated amplifier with resonant wavelength detuning design [J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(12): 121403.
- [6] Yan Y G, Liu G, Lin H X, et al. VCSEL frequency stabilization for optically pumped magnetometers[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(12): 121407.
- [7] 王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展 [J]. 中国光学, 2015, 8(4): 517-534.
- Wang L J, Peng H Y, Zhang J. Advance on high power diode laser coupling [J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 517-534.
- [8] Liu Y, Zhang X, Huang Y, et al. OPSR enhancement of high-temperature operating shallow-surface grating VCSELs[J]. Applied Optics, 2018, 57(16): 4486-4490.
- [9] Gebski M, Dems M, Wasiak M, et al. Monolithic subwavelength high-index-contrast grating VCSEL [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(18): 1953-1956.
- [10] 王凤玲. VCSEL 亚波长光栅 P 面反射镜的优化设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020: 3-6.
- Wang F L. Optimal design of VCSEL sub-wavelength grating P-plane mirror [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020: 3-6.
- [11] 王凤玲, 陈磊, 张秋波, 等. 与 GaAs 基 VCSEL 同材料体系高对比度亚波长光栅的设计 [J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(1): 19-24.
- Wang F L, Chen L, Zhang Q B, et al. Design of high contrast subwavelength gratings with GaAs-based VCSEL materials [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(1): 19-24.
- [12] 赵然, 孙崇磊, 徐晓, 等. 基于亚波长光栅的高集成度垂直光耦合器 [J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1405002.
- Zhao R, Sun C L, Xu X, et al. Ultra-compact vertical optical coupler based on subwavelength grating [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1405002.
- [13] 于传洋, 范鑫焯, 房文敬, 等. 基于 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 亚波长光栅的偏振分束器的设计 [J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-12 [2021-02-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20210806.1624.023.html>.
- Yu C Y, Fan X Y, Fang W J, et al. Design of polarization beam splitter based on $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_2\text{O}_3$ subwavelength grating [J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress: 1-12 [2021-02-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20210806.1624.023.html>.
- [14] 张锦龙, 史帅凯, 焦宏飞, 等. 层叠亚波长光栅中的模式匹配分析法 [J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1205001.
- Zhang J L, Shi S K, Jiao H F, et al. Analytical mode matching in stacked subwavelength gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1205001.
- [15] Moharam M G, Eric B G, Drew A P, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [16] Moharam M G, Gaylord T K. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings [J]. Journal of the Optical Society of America, 1982, 72(10): 1385-1392.
- [17] 陈德伟. 衍射光学中的严格耦合波分析方法 [D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2004: 8-22.
- Chen D W. Rigorous coupled wave analysis method in diffraction optics [D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2004: 8-22.
- [18] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71(7): 811-818.
- [19] Slosberg A M. Design analysis of subwavelength gratings as VCSEL mirrors [D]. Bethlehem: Lehigh University, 2017: 24-28.
- [20] Wood R W. XLII. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1902,

- 4(21): 396-402.
- [21] Hessel A, Oliner A A. A new theory of wood's anomalies on optical gratings[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(10): 1275-1297.
- [22] 刘文兴. 可控线宽导模共振滤波器设计及其特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011: 1-3.
Liu W X. Design and characterization of controllable linewidth guided-mode resonance filter [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011: 1-3.
- [23] Wang S S, Moharam M G, Magnusson R, et al. Guided-mode resonances in planar dielectric-layer diffraction gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(8): 1470-1474.
- [24] Magnusson R, Wang S S. New principle for optical filters[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(9): 1022-1024.
- [25] Zhang J L, Shi S K, Jiao H F, et al. Ultra-broadband reflector using double-layer subwavelength gratings[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 426-429.
- [26] Wang S S, Magnusson R. Theory and applications of guided-mode resonance filters[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(14): 2606-2613.
- [27] 邢德财. 几种介质光栅的衍射特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2005: 1-17.
Xing D C. Study on diffraction characteristics of several dielectric gratings [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005: 1-17.
- [28] 汤厚睿. 氧化锌亚波长光栅偏振分束器的设计与分析[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019: 27-29.
Tang H R. Design and analysis of ZnO-based sub-wavelength grating polarizing beam splitter [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019: 27-29.
- [29] 史雪津. 基于导模共振光栅的可见光波段宽谱反射器的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016: 7-15.
Shi X J. Research on the characteristics of reflectors with broad band in visible region based on guided-mode resonance grating [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016: 7-15.
- [30] 黄频波. 基于倏逝波干涉的亚波长光栅制作方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012: 3-15.
Huang P B. The analysis of sub-wavelength gratings fabricating based on evanescent wave interference [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012: 3-15.