

# 亚波长抗反射光栅的设计

田 镔 邹永刚 海一娜 王 丹 白云峰 范 杰 王海珠 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** 设计了一种具有波长和偏振模式选择特性的 GaAs 材料的亚波长抗反射光栅, 工作波长为 976 nm。采用等效介质理论与薄膜理论对光栅进行初步设计, 基于严格耦合波法依次对光栅占空比、脊高和周期进行优化确定, 同时分析了各个参数对光栅透射率的影响。所设计的抗反射光栅分别具有 99.99% (横电模) 和 99.86% (横磁模) 的高透射率, 并且在  $976\text{ nm} \pm 30\text{ nm}$  的范围内保持 99% 以上的高透射率, 满足器件应用要求。最后研究了工艺误差导致的光栅非矩形形貌对光栅透射率以及偏振优势模式的影响。

**关键词** 光栅; 亚波长结构; 等效介质理论; 半导体激光器

**中图分类号** TN202

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0901004

## Design of Subwavelength Anti-Reflective Grating

Tian Kun Zou Yonggang Hai Yina Wang Dan Bai Yunfeng Fan Jie

Wang Haizhu Ma Xiaohui

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

**Abstract** A subwavelength anti-reflective grating made from GaAs material is proposed, with optional wavelength and polarization mode and a working wavelength of 976 nm. On the basis of effective medium theory and membrane theory, the grating is initially designed. Parameters of duty cycle, ridge height and period of the grating are optimized and determined according to the rigorous coupled wave theory. Meanwhile, the influence of various parameters on the grating transmissivity is analyzed. The designed anti-reflective grating is of high transmissivity, 99.99% for TE mode and 99.86% for TM mode, respectively. In the range of  $976\text{ nm} \pm 30\text{ nm}$ , the transmissivity is above 99% for both mode gratings, which meets the requirements of device application. The effect of non-rectangular shape of the grating caused by fabrication error on the transmissivity and dominant polarization mode is studied.

**Key words** gratings; subwavelength structure; effective medium theory; diode lasers

**OCIS codes** 050.2770; 050.6624; 140.2065; 140.2020

## 1 引 言

亚波长光栅是一种典型的亚波长衍射光学元件, 具有抗/增反射、偏振双折射、低吸附性、大角度范围高透射率、高耐久性与高损伤阈值等优良特性。随着近年来微加工技术的发展及相应理论的日渐成熟, 具有特殊性能的亚波长光栅备受青睐, 广泛应用于多种光学器件及光源, 如偏振耦合器<sup>[1-5]</sup>、探测器<sup>[6-8]</sup>、光学滤波器<sup>[9]</sup>、集成光波导<sup>[10]</sup>、平板波导<sup>[11]</sup>、法布里-珀罗腔<sup>[12]</sup>、太阳能接收器<sup>[13]</sup>、垂直腔面发射激光器<sup>[14]</sup>、面发射量子级联激光器<sup>[15]</sup>, 另外还可用于 UV-LED 光束偏振特性的控制<sup>[16]</sup>、表面等离子体激发波长的连续控制<sup>[17]</sup>以及光涡流的产生<sup>[18]</sup>等。亚波长光栅作为这些光学器件的核心元件, 发挥着不可替代的作用。目前, 亚波

**收稿日期:** 2016-04-28; **收到修改稿日期:** 2016-05-16

**基金项目:** 吉林省科技计划重点项目(201502040689X)

**作者简介:** 田 镔(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电子技术及应用方面的研究。E-mail: springwulitk@sina.cn

**导师简介:** 邹永刚(1982—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光电子技术及应用方面的研究。

E-mail: zouyg@cust.edu.cn(通信联系人)

长光栅应用领域的进一步拓展也促使其向更大的材料体系、纷繁的结构类型以及更多样的衍射特性和功用方向发展。

在分析光栅方面,等效介质理论(EMT)要比严格耦合波理论(RCWA)简明,前者依赖有效折射率的准确性,后者精确度高,所以本文采用 EMT 与薄膜理论对工作波长为 976 nm、GaAs 材料的亚波长抗反射矩形光栅进行初步设计。采用 RCWA 依次对矩形光栅占空比、脊高和周期进行参数优化确定并分析讨论各个参数对光栅透射率的影响;建立了非矩形形貌光栅理论模型,讨论分析了非矩形形貌对光栅透射率以及偏振优势模式的影响。

## 2 基本原理

制备亚波长光栅普遍选用的半导体材料有 Si、Ge、InP、GaAs 以及  $Al_xGa_{1-x}As$ 。选 GaAs 为例进行分析,其折射率为  $n_g$ ;空气作填充介质,折射率为  $n_i$ 。如图 1,光栅周期为  $\Lambda$ ,脊高为  $h$ 。当光波正入射亚波长光栅时,仅发生零级衍射。此时,亚波长光栅对于横电(TE)、横磁(TM)光的折射率不同,分析时可将其等效为一层各向异性、厚度均匀的薄膜。研究人员已证明利用 EMT 对亚波长光栅进行分析得到的结果与 RCWA 分析结果的偏差较小,并得出可根据光栅需要的设计结构参数(如占空比、脊高、周期等)来获得 0~100% 的任意透射率<sup>[19]</sup>。

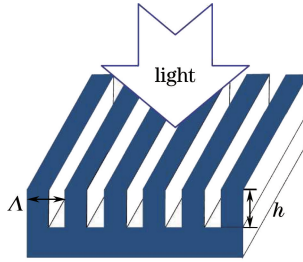


图 1 光垂直入射亚波长光栅

Fig. 1 Subwavelength grating under vertically incident light

### 2.1 等效介质理论

当光栅周期远小于入射光波长( $\Lambda < 0.1\lambda$ )时<sup>[20-23]</sup>,可选用零级 EMT 近似公式分别对入射 TE 和 TM 光的光栅进行分析,即

$$n_{0,TE} = \sqrt{(1-f)n_i^2 + fn_g^2}, \quad (1)$$

$$n_{0,TM} = \frac{n_i n_g}{\sqrt{fn_i^2 + (1-f)n_g^2}}, \quad (2)$$

当光栅周期接近入射光波长( $\Lambda \rightarrow \lambda$ )时,可选用二级 EMT 近似公式分别对入射 TE 和 TM 光的光栅进行分析,即

$$n_{2,TE} = \sqrt{n_{0,TE}^2 + \frac{\pi^2}{3} f^2 (1-f)^2 (n_g^2 - n_i^2)^2 \left(\frac{\Lambda}{\lambda}\right)^2}, \quad (3)$$

$$n_{2,TM} = \sqrt{n_{0,TM}^2 + \frac{\pi^2}{3} f^2 (1-f)^2 \left(\frac{1}{n_g^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)^2 n_{0,TM}^6 n_{0,TE}^2 \left(\frac{\Lambda}{\lambda}\right)^2}. \quad (4)$$

相应的光栅透射率为

$$T = 1 - \frac{(n_i - n_g)^2 \cos^2 \delta + \left(\frac{n_i n_g}{\eta} - \eta\right)^2 \sin^2 \delta}{(n_i + n_g)^2 \cos^2 \delta + \left(\frac{n_i n_g}{\eta} + \eta\right)^2 \sin^2 \delta}, \quad (5)$$

式中  $\delta = 2\pi h n_{\text{eff}} \cos \theta / \lambda$ , TE 光  $\eta_{TE} = n_{\text{eff}} \cos \theta$ , TM 光  $\eta_{TM} = n_{\text{eff}} / \cos \theta$ ,  $n_{\text{eff}}$  为等效介质折射率,  $n_i$ 、 $n_g$  分别为光栅填充材料折射率与光栅材料折射率,  $n_{0,TE}$ 、 $n_{0,TM}$  分别为 TE 光和 TM 光的零级近似等效折射率,  $n_{2,TE}$ 、 $n_{2,TM}$  分别为 TE 光和 TM 光的二级近似等效介质折射率,  $\Lambda$  为光栅周期,  $f$  为光栅占空比,  $\lambda$  为入射光波长,

$h$  为光栅脊高,  $\theta$  为入射角, 为正入射时,  $\theta$  取  $\pi/2$ 。由(1)~(4)式可知, 一维亚波长矩形光栅的等效折射率与基底材料、光栅周期和占空比有关; 由(5)式可知, 透射率与脊高、周期以及占空比有关。

## 2.2 薄膜原理

根据薄膜理论<sup>[24]</sup>, 欲实现亚波长光栅的增透功能, 需等效膜层的折射率、厚度和光栅周期满足

$$n_{\text{film}} = \sqrt{n_i n_g}, \quad (6)$$

$$d_{\text{film}} = \frac{\lambda}{(4n_{\text{film}})}, \quad (7)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{n_i + n_g}, \quad (8)$$

式中  $n_{\text{eff}} = n_{\text{film}}$ , 等效膜层厚度即为光栅的脊高 ( $d_{\text{film}} = h$ ),  $\Lambda$  为仅有零级衍射光波的光栅周期的最大取值。

## 2.3 严格耦合波理论

严格耦合波理论也简称耦合波理论或耦合波法, 它是通过在适当的边界条件上严格地求解 Maxwell 方程组来数值分析光栅的衍射问题<sup>[25]</sup>。耦合波理论主要包括 3 个步骤: 1) 由麦克斯韦基本方程组求得入射区域及透射区域电磁场的表达式, 这可以由 Rayleigh 展开式直接给出; 2) 将光栅区域内的介电常数及电磁场用傅里叶级数展开, 并由麦克斯韦基本方程组推导出耦合波方程组; 3) 在不同区域边界面上运用电磁场边界条件, 通过一定的数学方法求得各级衍射波的振幅及衍射效率。所得透射波衍射效率为

$$\eta_{T,m} = T_m T_m^* \text{Re} \left( \frac{k_{2,zm}}{k_0 n_i \cos \theta} \right), \quad (9)$$

反射波衍射效率为

$$\eta_{R,m} = R_m R_m^* \text{Re} \left( \frac{k_{l,zm}}{k_0 n_i \cos \theta} \right), \quad (10)$$

式中  $T_m$  和  $R_m$  分别是第  $m$  级的透射波和反射波的归一化电场振幅,  $k_0$  为入射光在真空中的波数,  $k_{l,zm} = (k_0^2 n_l^2 - k_{xm}^2)^{1/2}$ ,  $l=1, 2$ 。  $k_{xm}$  和  $k_{l,zm}$  只能取正实数或负虚数, 分别代表入射区与透射区第  $m$  级衍射光波矢的  $x$  分量和  $z$  分量。

对于无损耗光栅, 由能量守恒定律可得, 透射波和反射波的衍射效率总和应为 1, 即

$$\sum_m \eta_{T,m} + \eta_{R,m} = 1. \quad (11)$$

## 3 设计与优化

基于 EMT, 并结合薄膜理论对亚波长抗反射光栅进行初步设计得到光栅参数: 周期为 212.6 nm, 脊高为 128.8 nm, 占空比为  $f_{0,TE} = 0.218$ 、 $f_{0,TM} = 0.7821$ 、 $f_{2,TE} = 0.178$ 、 $f_{2,TM} = 0.913$ 。占空比与光栅透射率的关系如图 2 所示。

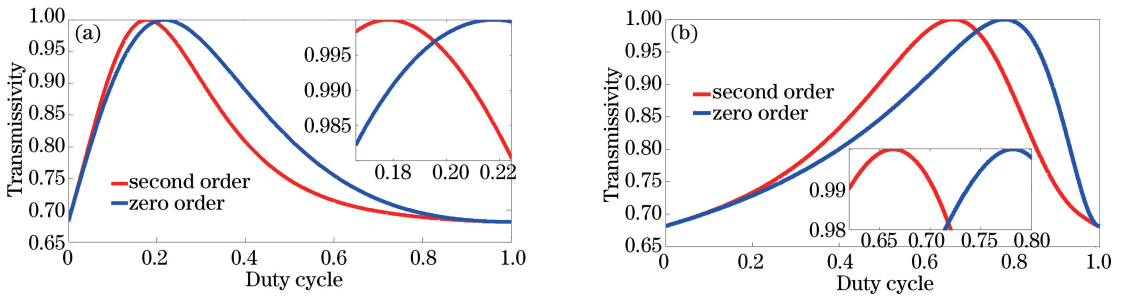


图 2 不同占空比下 TE 和 TM 模式光栅的透射率。(a) TE; (b) TM

Fig. 2 Transmissivity of the grating for TE mode and TM mode under different duty cycles. (a) TE; (b) TM

图 2 中(a)、(b)两部分分别为 TE 和 TM 模式的光栅透射率与占空比的关系。光栅占空比的变化会影响光栅透射率, 尤其在高透射率附近较为明显。通过局部放大图可以看出, 将 TE 和 TM 模式光栅占空比分别设计在 0.17~0.23 和 0.6~0.9 范围内便可使光栅透射率达到 98% 以上。零级和二级 EMT 因自身适应

条件、公式应用不同,所得最优占空比不同,可用于确定占空比取值范围。占空比的微小变动对光栅透射率的影响较为明显,因此首先采用 RCWA 对占空比进行分析确定(对光栅分析时,由于光栅厚度较薄,忽略 GaAs 材料对光的吸收)。

### 3.1 光栅占空比

图 3 为不同占空比下 TE 模和 TM 模的光栅透射率极大值对应波长的变化图。由图 3 可知,在光栅周期和脊高确定的情况下,随着占空比在设计范围内逐渐增大,光栅透射率极大值对应的波长亦线性或近线性增大。对应波长 976 nm 处获得光栅透射率极大值时的 TE 和 TM 模式光栅占空比分别约为 0.172 和 0.62。由图可 2 知,两偏振模式不能同时实现高透射( $T > 99\%$ ),即当某一偏振模式光栅所对应的模式获得高透射率时,另外偏振模式的透射率只能达到 67%~75%。因此,将 TE 和 TM 模式的光栅占空比分别定为 0.172 和 0.62。下面对光栅脊高和周期进行参数确定时只考虑偏振模式光栅及其对应的模式。

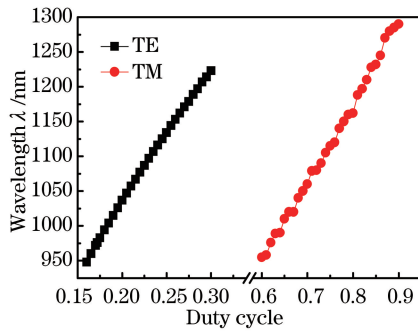


图 3 不同占空比下 TE 和 TM 模式的光栅透射率极大值对应的波长( $\Lambda = 212.6 \text{ nm}$ ,  $h = 128.8 \text{ nm}$ )  
Fig. 3 Wavelength corresponding to the highest transmissivity of the grating for TE mode and TM mode under different duty cycles( $\Lambda = 212.6 \text{ nm}$ ,  $h = 128.8 \text{ nm}$ )

图 4 是基于二阶 EMT 近似公式作图,用作后面进一步优化参数的基础。由图 4 可知,对于脊高、占空比一定的条件下,TE 和 TM 模式光栅透射率随脊高的增大呈周期性变化;当周期在某一范围内取值时可实现光栅  $T > 99\%$  的高透射率。

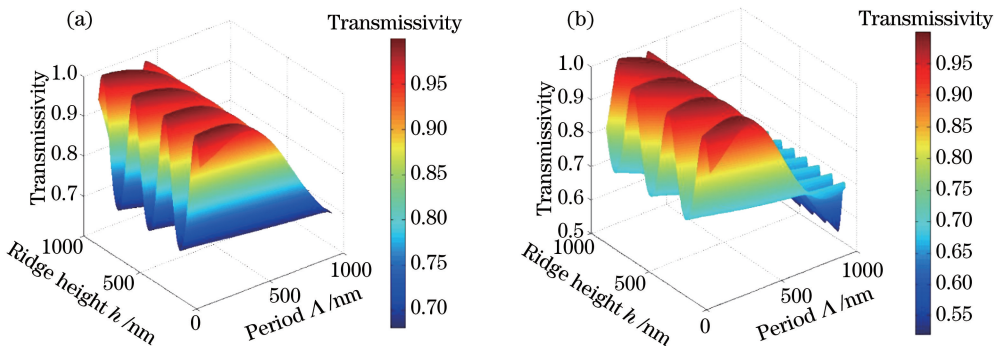


图 4 不同脊高和周期下的光栅透射率( $f_{\text{TE}} = 0.172$ ,  $f_{\text{TM}} = 0.62$ )。(a) TE 模式; (b) TM 模式

Fig. 4 Transmissivity of the grating under different ridge heights and periods( $f_{\text{TE}} = 0.172$ ,  $f_{\text{TM}} = 0.62$ ).

(a) TE mode; (b) TM mode

考虑到光栅衍射理论与实际光栅刻蚀情况,应将脊高取尽量小的值,脊高和周期分别设置为 125~140 nm、150~250 nm。脊高的变化相对周期更易引起光栅透射率的变动,下面采用 RCWA 分析确定脊高以及脊高变化对光栅透射率的影响。

### 3.2 光栅脊高

图 5 为不同脊高下的 TE 模和 TM 模的光栅透射率极大值对应的波长变化图和光栅透射率变化图。由图 5(a)可知,在光栅占空比和周期一定时,随着光栅脊高的增大,TE 和 TM 模式的光栅透射率极大值对应的波长亦增大,但两者波长增长速率不同。在光栅脊高一定时,光栅实现透射率极大值时对应的 TE 和 TM 模式波长不同,两者在波长 976 nm 附近相差约 7 nm,而 976 nm 波长处的 TE 和 TM 模式相应脊高相差约

2 nm,这说明光栅脊高的微小改变会导致对应波长的明显变化。TE 和 TM 模式光栅具有不同的脊高,但差值不明显:对于 TE 模式,脊高约为 130 nm;对于 TM 模式,脊高约为 131 nm。由图 5(b)可知,在占空比已定、脊高相同条件下,976 nm 波长处的 TE 和 TM 模式光栅光透射率不同,这是由于该条件下的光栅周期使得两种偏振光具有不同的透射率,且由透射率的走势可以看出两种偏振光实现透射率极大值时对应的脊高取值不同。另外图 5(a)和(b)在光栅透射率达到极大值时对应的脊高存在偏差,但没有对透射率产生较大影响,两图的最优脊高取值不吻合是由于周期及脊高对透射率的影响并非线性的。

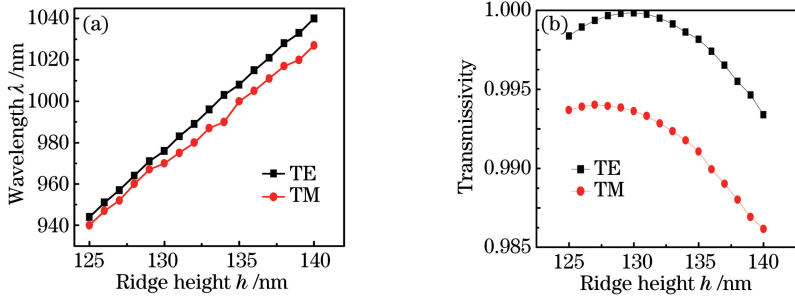


图 5 (a) 不同脊高下 TE 和 TM 模式的光栅透射率极大值对应的波长; (b) 不同脊高下波长 976 nm 处 TE 和 TM 模式的光栅透射率 ( $f_{TE}=0.172$ ,  $f_{TM}=0.62$ ,  $\Lambda=212.6$  nm)

Fig. 5 (a) Wavelength corresponding to the highest transmissivity of the grating (TE mode and TM mode) under different ridge heights; (b) transmissivity of the grating for TE mode and TM mode at the wavelength of 976 nm under different ridge heights( $f_{TE}=0.172$ ,  $f_{TM}=0.62$ ,  $\Lambda=212.6$  nm)

### 3.3 光栅周期

图 6 (a)、(b)分别为在给定周期和脊高但周期条件不同时,TE 和 TM 模式光栅透射率取极大值时对应的波长和波长为 976 nm 时光栅透射率和周期的关系。由图 6(a)可知不同光栅周期取值对应实现透射率极大值的 TE 和 TM 光波长存在差别(两者之间亦存在一点同周期同波长),优化参数时将周期交叉点设计在 200 nm 处。图 6(b)中 TE 模式光栅透射率极大值稍微向右偏移,这是由于计算和模拟过程中占空比和脊高取值的精确度不够所致。对于参数已定的光栅,976 nm 波长处 TE 模式光栅透射率随周期变化较平缓而 TM 模式光栅透射率随周期变化较大,TE 和 TM 模式光栅不易实现相同透射率。此外,理论上可实现光栅对 TE 或 TM 光的全透(100%),但图中 TE 和 TM 模式光栅的透射率均未达到 100%,且两者之间的透射率存在差别,这是由于在分析过程中的参数取值并未达到特别高的精度所致。

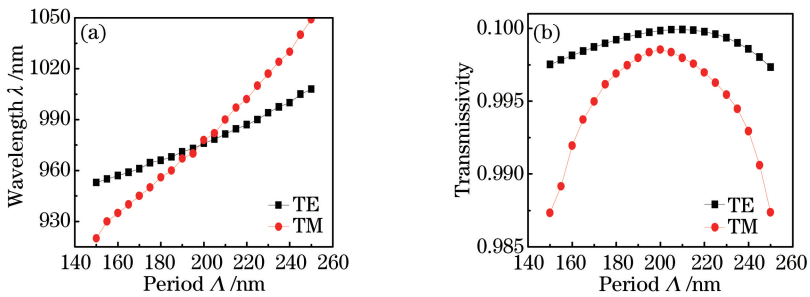


图 6 (a) 不同周期下 TE 和 TM 模式的光栅透射率极大值对应的波长; (b) 不同周期下波长 976 nm 处 TE 和 TM 模式的光栅透射率( $f_{TE}=0.172$ ,  $f_{TM}=0.62$ ,  $h_{TE}=130$  nm,  $h_{TM}=131$  nm)

Fig. 6 (a) Wavelengths corresponding to the highest transmissivity of the grating for TE mode and TM mode under different periods; (b) transmissivities of the grating for TE mode and TM mode at the wavelength of 976 nm under different periods( $f_{TE}=0.172$ ,  $f_{TM}=0.62$ ,  $h_{TE}=130$  nm,  $h_{TM}=131$  nm)

至此,优化后的 TE 和 TM 偏振模式矩形光栅参数为: $f_{TE}=0.172$ ,  $f_{TM}=0.62$ ,  $h_{TE}=130$  nm,  $h_{TM}=131$  nm,  $\Lambda_{TE}=\Lambda_{TM}=200$  nm。所设计光栅参数达到的透射率已满足器件的应用要求( $T_{TE,MAX}=99.99\%$ ,  $T_{TM,MAX}=99.86\%$ ),且模拟计算结果表明,两种偏振模式的光栅透射率在 976 nm  $\pm$  30 nm 波段范围内保持在 99% 以上。



### 3.4 非矩形形貌光栅

在光栅刻蚀过程中,刻蚀越深,光栅形貌的控制就越困难,制备过程中的误差将导致更大的结果误差,这样刻蚀出的光栅的透射率和偏振特性具有很大的不确定性,进而影响器件的整体性能。刻蚀光栅易造成光栅脊边倾角的偏差,使得矩形光栅变成梯形光栅,即偏差越大对应的斜边倾角越小。

对称面形光栅的峰值衍射效率始终大于非对称面形光栅的峰值衍射效率<sup>[26]</sup>,且日常普遍使用的也是对称面形光栅,下面基于所得光栅参数对对称面形梯形光栅进行分析。图7为梯形光栅模型,其斜边倾角为 $\alpha$ ,脊高为 $h$ ,周期为 $\Lambda$ ,脊宽为 $b$ 。

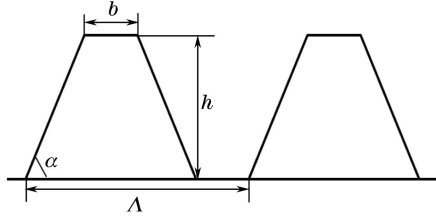


图7 梯形光栅模型

Fig. 7 Model of the trapezoid grating

由图7模型可推知光栅参数之间的关系:

$$b + 2 \cdot \frac{h}{\tan \alpha} \leq \Lambda. \quad (12)$$

由(12)式可得

$$\alpha \in [\arctan \frac{2h}{\Lambda - b}, 90^\circ]. \quad (13)$$

根据已知光栅参数可算出:对于TE光, $\alpha$ 取值范围为 $[58^\circ, 90^\circ]$ ;对于TM光, $\alpha$ 取值范围为 $[74.2^\circ, 90^\circ]$ 。由RCWA可得光栅斜边倾角对光栅透射率与偏振模式透射率差的影响,如图8所示。

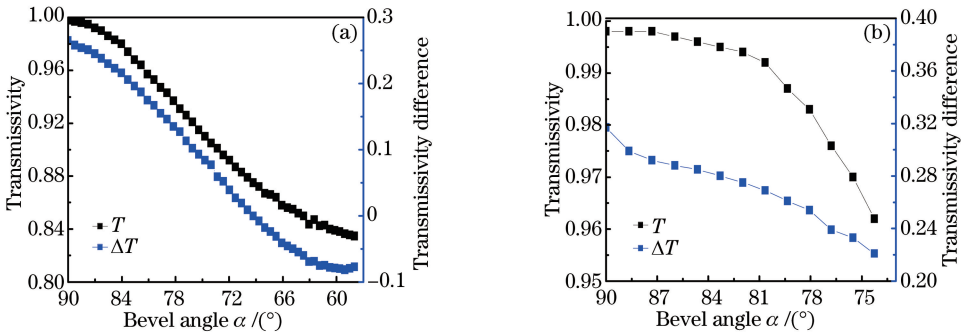


图8 斜边倾角 $\alpha$ 对光栅透射率以及偏振模式透射率差的影响。(a) TE模式光栅;(b) TM模式光栅

$$(f_{TE}=0.172, f_{TM}=0.62, h_{TE}=130 \text{ nm}, h_{TM}=131 \text{ nm}, \Lambda=200 \text{ nm})$$

Fig. 8 Influence of bevel angle on transmissivity of the grating and transmissivity difference of the polarization mode.

(a) TE mode grating; (b) TM mode grating( $f_{TE}=0.172, f_{TM}=0.62, h_{TE}=130 \text{ nm}, h_{TM}=131 \text{ nm}, \Lambda=200 \text{ nm}$ )

图8(a)、(b)均表明:随着梯形光栅斜边倾角的减小,光栅透射率逐渐降低。TE模式相对TM模式的光栅透射率下降得更快,而且偏振模式透射率差亦会随着梯形光栅斜边倾角的减小而减小。光栅透射率的减小降低了光栅偏振对比度,削减了光栅选择抑制偏振光的能力。对于TE模式光栅,当斜边倾角降为 $69^\circ$ 时,TE光的透射率降至与TM光透射率相等;随着斜边倾角的继续减小,TM光的透射率逐渐大于TE光的透射率,改变了光栅偏振优势模式,这种现象对于偏振器件来说是毁灭性的,但以后也可能适用于某种特殊应用。对于TM模式光栅,在斜边倾角减小至其下限过程中,TM光透射率始终比TE光大22%以上,维持了偏振优势模式。总之,根据TE、TM模式光栅透射率降低速率( $\Delta T/\Delta\alpha$ )及其结构差别可知,在光栅脊高保持不变的情况下, TM模式光栅相对于TE模式光栅更易实现偏振模式的稳定控制。

## 4 结 论

基于一维亚波长矩形光栅结构模型,采用等效介质理论、薄膜理论以及严格耦合波理论优化设计了GaAs材料的工作波长为976 nm的亚波长抗反射光栅,其参数为: $f_{TE}=0.172$ , $f_{TM}=0.62$ , $h_{TE}=130$  nm, $h_{TM}=131$  nm, $\Delta_{TE}=\Delta_{TM}=200$  nm,光栅透射率最高达 $T_{TE\_MAX}=99.99\%$ , $T_{TM\_MAX}=99.86\%$ 。分析表明:976 nm波长处两种偏振模式全透光栅(或高透)具有不同的结构参数(占空比、脊高和周期),其中脊高和周期的取值较接近。对于非矩形形貌光栅,梯形斜边倾角的减小会造成光栅透射率以及偏振模式透射率差降低,甚至改变光栅的偏振优势模式,不利于偏振器件的稳定工作。该矩形光栅的设计思路以及对非矩形形貌光栅的分析讨论为后期光栅制备和器件性能分析提供了参考。设计不同的工作条件(入射角、材料,反射率等)及应用领域的光栅亦可采用上述分析方法。

## 参 考 文 献

- 1 Qi F, Ma Q Y, Wang Y F, *et al.* Large-aperture subwavelength grating coupler[J]. Applied Optics, 2016, 55(11): 2960-2966.
- 2 Liu L, Deng Q Z, Zhou Z P. Subwavelength-grating-assisted broadband polarization-independent directional coupler[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1648-1651.
- 3 Wang Y, Shi W, Wang X, *et al.* Design of broadband subwavelength grating couplers with low back reflection[J]. Optics Letters, 2015, 40(20): 4647-4650.
- 4 Zhang J J, Yang J B, Lu H Y, *et al.* Subwavelength TE/TM grating coupler based on silicon-on-insulator[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 71: 542-546.
- 5 Li H Q, Cui B B, Liu Y, *et al.* Investigation of the chip to photodetector coupler with subwavelength grating on SOI[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 76: 79-84.
- 6 Li X F, Peng W, Zhao Y L, *et al.* A subwavelength metal-grating assisted sensor of Kretschmann style for investigating the sample with high refractive index[J]. Chinese Physics B, 2015, 25(3): 037303.
- 7 Du M D, Sun J Q. Performance enhancement of photodetector using defect subwavelength metallic grating[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(20): 2646-2649.
- 8 Wang R, Li T, Shao X M, *et al.* Subwavelength gold grating as polarizers integrated with InP-based InGaAs sensors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(25): 14471-14476.
- 9 Xu L H, Zheng G G, Zhao D L, *et al.* Polarization-independent narrow-band optical filters with suspended subwavelength silica grating in the infrared region[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(2): 955-958.
- 10 Nikkhah H, Hall T J. Subwavelength grating waveguides for integrated photonics[J]. Applied Physics A, 2016, 122(4): 1-6.
- 11 Tian H, Cui X, Du Y, *et al.* Broadband high reflectivity in subwavelength-grating slab waveguides[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27174-27179.
- 12 Liang H M, Wang J Q, Wang X, *et al.* Surface plasmon interference lithography assisted by a Fabry-Perot cavity composed of subwavelength metal grating and thin metal film[J]. Chinese Physics Letters, 2015, 32(10): 51-54.
- 13 Huo F, Li Y F, To S, *et al.* Optimal design of broadband antireflective subwavelength gratings for solar applications[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(20): 2626-2628.
- 14 Gebiski M, Dems M, Wasiak M, *et al.* Monolithic subwavelength high-index-contrast grating VCSEL[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(8): 1953-1956.
- 15 Yao D Y, Zhang J C, Liu Y H, *et al.* Small divergence substrate emitting quantum cascade laser by subwavelength metallic grating[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 11462-11469.
- 16 Takashima Y, Tanabe M, Haraguchi M, *et al.* Highly polarized emission from a GaN-based ultraviolet light-emitting diode using a Si-subwavelength grating on a SiO<sub>2</sub> underlayer[J]. Optics Communication, 2016, 369(15): 38-43.
- 17 Honma H, Takahashi K, Ishida M, *et al.* Continuous control surface-plasmon excitation wavelengths using nanomechanically stretched subwavelength grating[J]. Applied Physics Express, 2016, 9(2): 027201.
- 18 Indumathi R S, Li Y, William F D, *et al.* Subwavelength grating based metal-oxide nano-hair structures for optical vortex generation[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19056-19065.
- 19 Ma Youqiao, Zhou Jun, Sun Tietun, *et al.* Design of antireflection structure of photovoltaic cells with sub-wavelength

- grating based on EMT[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2010, 31(10): 1353-1357.
- 马佑桥, 周 骏, 孙铁囤, 等. 基于等效介质理论的光伏电池亚波长光栅减反结构设计[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(10): 1353-1357.
- 20 Cao Zhaoliang. Design analysis and fabrication of subwavelength antireflective gratings[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003: 26-27.
- 曹召良. 亚波长抗反射光栅的设计分析与制作[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003: 26-27.
- 21 Rytov S M. Electromagnetic properties of a finely stratified medium[J]. *Soviet Physics JETP*, 1956, 2(3): 466-475.
- 22 Luo Chenchen. Research on the fabrication and properties of micro/nano grating [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 26-27.
- 罗晨晨. 微纳光栅的制备及特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 26-27.
- 23 Tang Jinfa, Zheng Quan. Applied thin film optics[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984: 45-46.
- 唐晋发, 郑 权. 应用薄膜光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 45-46.
- 24 Li Yunfang. Study on optical characteristics of subwavelength optical elements[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013: 6-9.
- 李云芳. 亚波长光学元件光学特性的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013: 6-9.
- 25 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.
- 26 Gaylord T K, Moharam M G. Analysis and applications of optical diffraction by gratings[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1985, 73(5): 894-937.