

单层亚波长金属光栅偏振器透射机理研究

王志文 褚金奎 王倩怡

大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 为从物理层面理解亚波长金属光栅偏振透射现象以及光栅参数对偏振透射的影响,基于等效介质理论定性解释了单层亚波长金属光栅的偏振透射现象,给出了各个光栅参数对偏振性能的影响规律。对于不同条件下透射峰值产生的机理,基于法布里-珀罗共振理论给出了定量解释。对于等效介质理论和法布里-珀罗共振理论的准确性给出了验证及分析。通过两理论定性或定量的对单层亚波长金属光栅偏振器透射机理的系统分析,将有助于更清晰地理解金属光栅偏振器的偏振透射影响规律。

关键词 光栅;透射机理;等效介质理论;亚波长金属光栅;法布里-珀罗共振

中图分类号 O431.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0705002

Transmission Analysis of Single Layer Sub-Wavelength Metal Gratings

Wang Zhiwen Chu Jinkui Wang Qianyi

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract In order to understand the transmission phenomena of sub-wavelength metal gratings and the effect of grating parameters on polarization transmission, the polarization transmission is analyzed qualitatively based on the equivalent medium theory. The influence of the grating parameters on polarization transmission and the reason why these influences generated are presented. The mechanism of the transmission peaks is analyzed quantitatively by using the Fabry-Pérot resonance theory. The accuracy of the two theories is carefully verified and analyzed. The qualitative and quantitative analysis of the transmission mechanism of sub-wavelength metal gratings will be helpful for better understanding of the effect of grating parameters on polarization transmission.

Key words grating; transmission mechanism; equivalent medium theory; sub-wavelength metal gratings; Fabry-Pérot resonance

OCIS codes 050.2065; 050.2230; 310.5448

1 引言

单层亚波长金属光栅偏振器由一组间距小于入射波长的金属线条组成。它具有体积小、偏振性能优良、允许的入射角度宽、易于集成等优点。在光通讯、液晶显示等领域具有广泛的应用前景。近些年来,研究者优化设计了多种类型的偏振光栅^[1-2],对亚波长金属光栅优异的偏振性能进行了分析。张娜等^[3-4]基于严格耦合波理论计算分析了光栅参数对偏振性能的影响规律。刘镜等^[5]研究了亚波长金属光栅在共振波长处的异常透射现象,指出其中三种共振波长可以分别由金属材料、金属周期和厚度调制。何启浩等^[6]利用时域有限差分法证明了一维金属光栅的透射增强是起源于光场的类法布里珀罗共振,透射光谱也受之调制。Zhang等^[7]从传播常数等角度解释了金光栅与铝光栅在偏振性能上的差异。

收稿日期: 2015-02-10; 收到修改稿日期: 2015-03-30

基金项目: 国家973计划(2011CB302101,2011CB302105)

作者简介: 王志文(1988-),男,博士研究生,主要从事纳米压印相关工艺及纳米金属光栅偏振器设计方面的研究。

E-mail:wangzw226@163.com

导师简介: 褚金奎(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事微机械电子系统(MEMS)、微传感器和微执行器、机构学、智能机器人和微机器人等方面的研究。E-mail:chujk@dlut.edu.cn(通信联系人)

可以看出光栅参数对偏振性能的影响已有相关研究,通过计算可以得出光栅参数与偏振性能的影响规律。但这是数值计算结果,计算较为繁琐,而且并不能给出清晰的物理解释。等效介质理论和法布里珀罗共振理论具有清晰的物理概念,计算公式也比较简单。本文借助两理论定性及定量的系统解释单层亚波长金属光栅的偏振透射现象以及光栅参数对偏振性能的影响,从物理层面上利用简洁的公式来分析为什么光栅参数会对偏振性能产生如此的影响。使得对单层亚波长金属光栅有更清晰的理解。

2 分析理论

亚波长金属光栅的周期小于入射波长,传统的标量衍射理论已不再适用。目前用于分析亚波长光栅理论有矢量衍射理论和等效介质理论。矢量衍射理论是一种严格精确的计算理论,包括严格耦合波理论,时域有限差分理论,模态理论等。严格耦合波理论(RCWA)首先由 Moharam 等^[8]提出,计算较其他几种方法而言相对简单、通用性较强,近些年得到了广泛应用。虽然从光栅参数对偏振性能的影响规律而言,它不能给出物理解释,但它的计算结果是准确的。借助严格耦合波理论来验证等效介质理论及法布里-珀罗共振理论解释的准确性,然后利用等效介质理论及法布里-珀罗共振理论从物理层面对单层亚波长金属光栅偏振器进行分析,使得对单层亚波长金属光栅偏振器有更深层次的理解。

2.1 等效介质理论

等效介质理论(EMT)可以在物理层面上对亚波长光栅进行分析,是研究亚波长结构比较直观的近似理论,但它只有在光栅远小于入射波长时才有较高的精度^[9]。它是用一层均匀介质代替周期结构,即把周期结构光栅看成一层均匀介质。运用EMT后,可以运用成熟的相关理论对亚波长结构器件进行理论分析和设计。

根据等效介质理论,对于TE偏振光(电场分量平行于光栅)、TM偏振光(电场分量垂直于光栅),光栅的等效折射率分别为

$$n_{TE} = \sqrt{f(n_1 + ik_1)^2 + (1-f)(n_2 + ik_2)^2}, \quad (1)$$

$$n_{TM} = \sqrt{\frac{(n_1 + ik_1)^2(n_2 + ik_2)^2}{f(n_2 + ik_2)^2 + (1-f)(n_1 + ik_1)^2}}, \quad (2)$$

式中 f 为光栅的占空比(光栅宽度与周期的比值), n, k 分别为材料折射率与消光系数,下标1、2分别代表光栅材料与光栅缝隙中的材料。一般光栅缝隙中为空气, $k_2=0$ 。为了简化计算,将金属视为完美导体,即 $k \rightarrow \infty$ 。TE和TM偏振光的等效折射率的简化结果如下:

$$n_{TE} = ik_1 \sqrt{f}, \quad (3)$$

$$n_{TM} = n_2(1-f)^{-\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

可以看出,简化后,金属光栅的折射率对于TE光来说只有虚部,对于TM光来说只有实部。对于常见的介质材料,在可见光范围,材料的折射率只有实数部分;对于常见的金属材料,其折射率的实部和虚部都不为零,且虚部一般要大于实部。通过(3)式、(4)式可以很好地理解金属光栅偏振器的性质:对于TE偏振光,光栅折射率只有虚部,认为光栅层相当于金属膜,大部分TE偏振光被反射和吸收,但实际上金属并不是完美金属,所以会有少量的光被透射过去;对于TM偏振光,光栅折射率只有实部,认为光栅层相当于一介质层,但实际上金属并不是完美导体,光栅对于TM光有微弱的吸收,因此光栅层相当于具有微弱吸收性质的电介质层,大部分TM偏振光被透射。下面对这些假定进行验证。

对于所涉及的光栅结构,初定各参数为:光栅周期 $P=100$ nm,光栅高度 $h=100$ nm,光栅宽度 $w=50$ nm,金属为铝,基底为二氧化硅。首先对于TE偏振光,图1为用等效介质理论计算得到的各金属光栅材料等效折射率虚部与真实折射率虚部的比较。

图2为用等效介质理论计算得到的各金属折射率实部与真实折射率实部的比较。

可以看出,虽然具体的数值不同,但各金属折射率随波长变化的规律是相同的,可以用等效介质理论来对亚波长金属光栅进行定性分析。具体数值不同,则用等效介质理论计算得到的金属光栅透射率也必然与严格耦合波的结果有差异,具体相差的多少与光栅周期大小有关,图3为用等效介质理论计算得到的金属铝光栅的TE透射率与用严格耦合波理论计算得到的不同光栅周期TE透射率的比较。

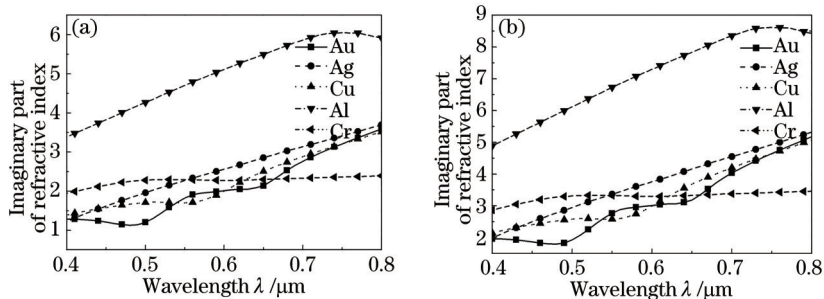


图 1 不同金属折射率虚部。(a) 等效介质理论计算的结果; (b) 严格耦合波理论计算的结果

Fig.1 Imaginary part of refractive index of several metals. (a) Results calculated by EMT; (b) results calculated by RCWA

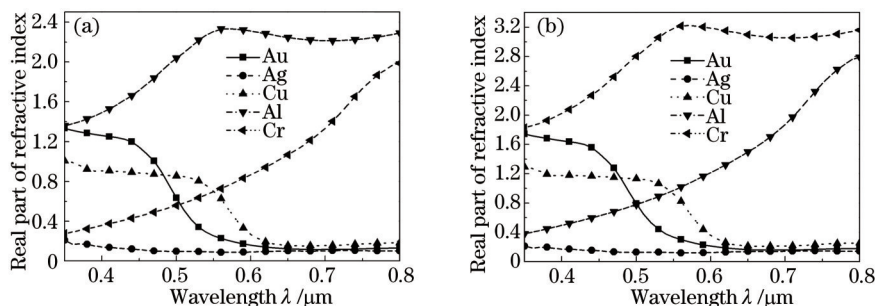


图 2 不同金属折射率实部。(a) 等效介质理论计算的结果; (b) 严格耦合波理论计算的结果

Fig.2 Real part of refractive index of several metals. (a) Results calculated by EMT; (b) results calculated by RCWA

可以看出,光栅周期越小,等效介质理论得出的结果与严格耦合波理论得出的结果越接近,也就是说光栅周期越小,等效介质理论得到的数据越精确。

综上,对于TE偏振光,等效介质的计算结果虽与严格耦合波理论的计算结果有偏差,但总的趋势是一致的。将金属光栅在TE偏振光下等效成一金属膜进而对偏振光栅进行定性的分析是可行的。

图 4 为用等效介质理论计算得到的金属铝光栅的TM透射率与用严格耦合波理论计算得到的不同光栅周期TM透射率的比较。

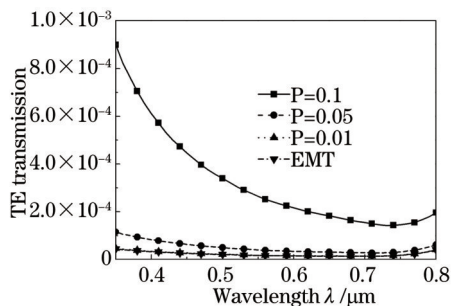


图 3 用等效介质理论计算得到的金属铝光栅的TE透射率与用严格耦合波理论计算得到的不同光栅周期TE透射率

Fig.3 TE transmission efficiency calculated by RCWA with different grating periods and by EMT

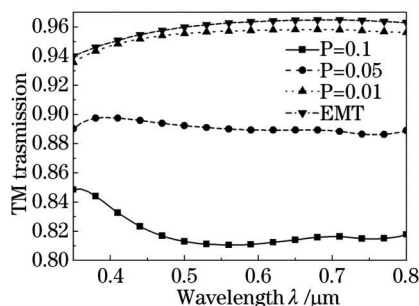


图 4 用等效介质理论计算得到的金属铝光栅的TM透射率与用严格耦合波理论计算得到的不同光栅周期TM透射率

Fig.4 TM transmission efficiency calculated by RCWA with different grating periods and by EMT

同样的,光栅周期越小,等效介质理论得到的结果越精确。但从定性的角度将金属光栅在TM偏振光下等效成一有微弱吸收的介质膜也是可行的。对金属光栅透射现象进行分析时,将用等效介质理论对其进行定性分析。

2.2 法布里-珀罗共振理论

单层金属光栅是由金属-介质-金属这种周期性的结构组成的,认为这种金属-介质-金属的结构构成了一个波导,这种波导类似于一个法布里-珀罗(F-P)共振腔,光栅就是由无数个这样的波导组成的。电磁波在此狭缝中传播,狭缝内产生表面等离子并通过这个共振腔的作用导致透射光谱的周期性变化。根据F-P共振理论,最为简化的公式是当 $h = N \frac{\lambda}{2}$ (N 为正整数)时^[10]透射达到峰值。此公式与严格耦合波理论计算的结

果相比,会有偏差,但在多个峰值出现的情况下,峰峰值的距离可以令 $N=1$ 非常准确地求出。具体的计算在分析光栅高度对偏振性能的影响时给出。F-P共振理论是一个非常有效的定量的分析理论,同时它本身物理概念清晰,对从物理层面上分析偏振光栅透射现象非常有利,所以将利用此理论来对单层亚波长金属光栅进行定量的分析。

需要指出的是本文所使用的两个理论并没有很直接的联系。前者是一种定性分析的理论,后者是一种定量分析的理论。但二者都具有一个特性,就是物理概念清晰,这对从物理层面上分析单层亚波长金属光栅非常有力,二者从不同角度对同一现象进行分析,将更有助于从物理层面上理解单层亚波长金属光栅的透射现象。

3 单层亚波长金属光栅偏振性能的分析

3.1 光栅金属材料对偏振性能的影响

这里涉及到趋肤深度的问题。前面提到亚波长金属光栅对于TE光来说相当于一金属层。TE光入射到金属层后将有一个趋肤深度,即电磁波经过深度 d 后,其强度降低为原来的 $1/e$ 。为了使进入金属层的TE光能够尽可能多的吸收,光栅的金属层深度应数倍于 d 。

从固体光学理论^[11]可知,金属的趋肤深度(δ)可以用(5)式来计算:

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi n_i}, \quad (5)$$

式中 δ 是金属的趋肤深度, λ 是入射光波长; n_i 是金属折射率的虚数部分。

通过对(5)式的分析,发现金属的趋肤深度与金属的折射率的虚数部分成反比。由图1可知,金属铝折射率的虚数部分明显大于其它几种常用金属材料折射率的虚数部分,所以入射的TE偏振光在金属铝层中的趋肤深度最小。亚波长金属光栅对于TE偏振光等效为金属层,所以入射的TE偏振光在金属铝光栅的光栅层中传播的距离最短,使得金属铝光栅的TE偏振光的透射效率远低于其它金属光栅的TE偏振光的透射效率。同一光栅尺寸的TM透射率相差不大,都在同一量级,所以使得金属铝光栅的消光比(TM透射率与TE透射率的比值)明显高于其他金属光栅的消光比。因此,亚波长金属光栅偏振器大多使用金属铝作为其金属材料。

3.2 光栅占空比对偏振性能的影响

首先对光栅占空比变化时光栅TM透射率及消光比随波长的变化进行建模。建模设定:周期 $P=0.1 \mu\text{m}$,光栅高度 $h=0.1 \mu\text{m}$,入射波长 $0.35\sim 0.8 \mu\text{m}$ 。首先保持其他参数不变,占空比分别设定为0.4、0.5、0.6、0.7。严格耦和波理论计算结果如图5所示。

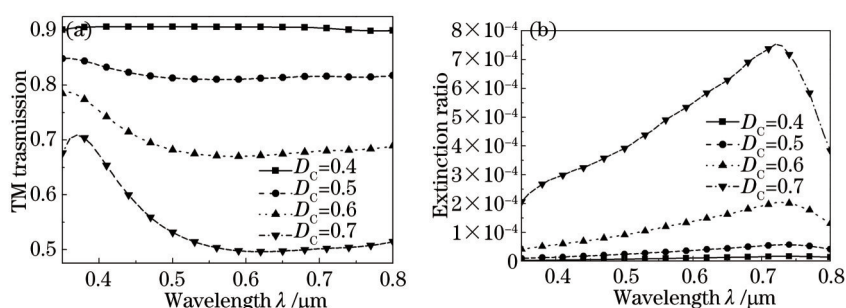


图5 光栅占空比对偏振性能的影响。(a)不同占空比时入射波长与TM透射率的关系;(b)不同占空比时入射波长与消光比的关系

Fig.5 Effect of duty cycle (DC) on polarization performance. (a) Relation of wavelength with TM transmission;

(b) relation of wavelength with extinction ratio

由图5可知,对于占空比对偏振性能的影响,简单来讲为占空比越大,TM透射率越小而消光比越大。应用等效介质理论解释为:占空比越大,由(1)式,(2)式可计算得到,TE偏振光的折射率虚部是单调上升的(占空比由0.1升到0.9时,等效折射率虚部由1.7上升到5.8),所以光栅更具有金属的性质,使得光栅的等效趋肤深度变小,所以TE透射率变小,而且是以指数形式急剧减少。对于TM偏振光,其等效折射率的虚部也在慢慢变大(占空比由0.1升到0.9时,等效折射率虚部由 3.9×10^{-4} 上升到0.14),但其虚部整体仍非常小,所以TM透射率有降低,但降低的程度较小,总的结果使得消光比急剧增加。

此外, 占空比变化时透射率的峰值也随之产生偏移, 这可以从 F-P 共振理论来解释。占空比变化时, 在共振腔中传播的表面等离子波长 (λ_g , $\lambda_g = \lambda_0/n_{\text{eff}}$, λ_0 为入射波长, n_{eff} 为光栅缝隙的有效折射率) 受到影响。(6) 式为等离子波在缝隙中传播时缝隙的有效折射率的计算公式^[12]:

$$\begin{cases} \varepsilon_d k_m + \varepsilon_m k_d \tanh\left(\frac{k_d}{2}w\right) = 0 \\ k_d^2 = \beta^2 - \varepsilon_d k_0^2 \\ k_m^2 = \beta^2 - \varepsilon_m k_0^2 \\ n_{\text{eff}} = \beta/k_0 \\ \lambda_g = \lambda_0/n_{\text{eff}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 ε_d 、 ε_m 分别为光栅中介质、光栅金属材料的介电常数; k_d 、 k_m 分别代表缝隙中传播的表面等离子在介质、金属中的衰减长度; w 为缝宽宽度; k_0 为入射光的波矢; n_{eff} 为光栅缝隙的有效折射率; β 为波导模式内的电磁波的传播常数; λ_0 为狭缝内电磁波的传播波长。图 6 为计算得到的缝宽与有效折射率的关系曲线。可以看出缝宽对有效折射率有一定的影响, 随着狭缝宽度的增加, 金属光栅狭缝的有效折射率降低, 这导致狭缝内表面等离子波长的增加。在光栅其他参数不变的情况下, 产生透射极大时的等离子波长是一定的, 所以透射峰值点应该在此时的等离子波长的左边。即缝宽增大会使得透射峰值向左移动, 也就是说占空比减小时会使得透射谱的峰值位置发生蓝移。相反的, 占空比增大时会使得透射谱的峰值位置发生红移。

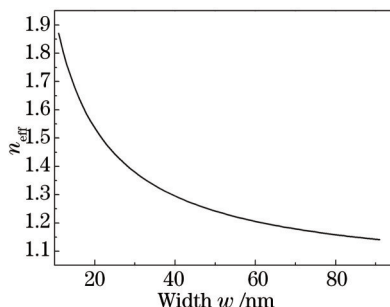


图 6 缝宽与有效折射率的关系曲线

Fig.6 Relation of slit width with effective refractive index

3.3 光栅高度对偏振透射的影响

首先对光栅高度变化时的光栅 TM 透射率和消光比进行计算。建模设定为: 周期 $P=0.1 \mu\text{m}$, 占空比为 0.5, 入射波长 $\lambda_0=0.5 \mu\text{m}$ 。首先保持其他参数不变, 光栅高度 h 从 $0.05 \mu\text{m}$ 增大到 $0.4 \mu\text{m}$ 。严格耦合波理论计算结果如图 7 所示。

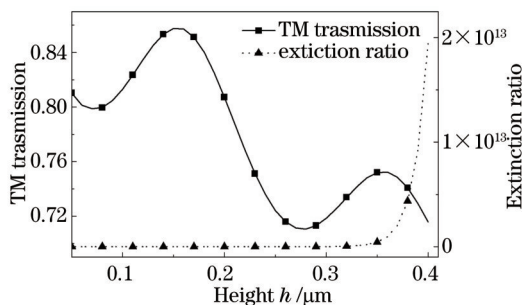


图 7 光栅高度对偏振性能的影响

Fig.7 Effect of grating height on polarization performance

可以看出, 随着光栅金属层厚度的增大, 亚波长金属光栅偏振器的 TM 透射效率呈现周期性减小趋势, 亚波长金属光栅偏振器的消光比随着光栅高度的增加呈指数增加。

从等效介质理论方面来说, 对于 TE 偏振光, 光栅层的折射率虚数部分较大, 相当于入射到金属膜上, 增加光栅金属层厚度也就增加了金属层对 TE 偏振光的吸收, 由趋肤深度理论可知, TE 偏振光透射率会迅速减小; 对于 TM 偏振光来说, 光栅层的折射率具有实数部分和很小的虚数部分, 在理想情况下, 先假定只有实数

部分,则可计算得到随着介质层厚度的增加,TM 透射率是周期性震荡的。但实际等效的介质层同时具有实数部分和虚数部分,随着厚度的增加,对光的吸收也在增加,所以对于TM 偏振光来说,随着光栅金属层厚度的增加,金属光栅偏振器的TM 透射效率呈现周期性减小趋势。光栅高度增加带来的TE 光透射率的减小远远大于TM 光的透射率变化,因此,光栅的消光比会因为光栅高度的增加而得到明显的改善。

另外,前边提到,根据F-P的理论,最为简化的公式是当 $h = N \frac{\lambda_g}{2}$ (N 为正整数)时透射达到峰值。这只是简化后的近似公式,与实际的仿真结构存在一定的偏移量。但相邻两个透射峰值的距离可以通过令 $N=1$ 计算得到: $h' = \frac{\lambda_g}{2}$ 。在模型中,入射波长为 500 nm 时, $n_{\text{eff}}=1.243$, $\lambda_g = 402$ nm,计算得到的相邻峰值距离为 201 nm,这与严格耦合波理论计算得到的结果(202 nm)是一致的,其中出现的误差与求解有效折射率时的拟合方法有关。根据这个简化的公式,随着光栅高度的增加,TM 透射谱上会有多个峰值。但随着高度的增加,损耗也会增加,所以从透射曲线上来看 TM 透射率是震荡性下降,峰值的间隔为在缝隙中传播的等离子光波长的一半。

3.4 光栅面型对偏振透射的影响

对于光栅面型对偏振透射的影响,对三角形面型和正梯形面型进行建模。设定两种面型底边为 100 nm,高度均为 100 nm,正梯形定边宽度为 50 nm,光栅周期 200 nm,入射波长 350~800 nm。计算的 TM 透射率、消光比与入射波长的关系如图 8 所示。

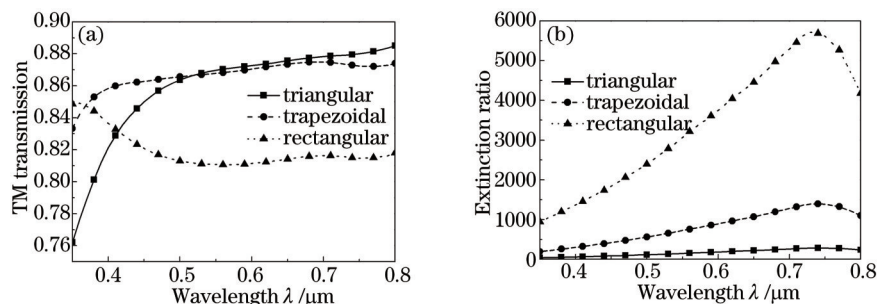


图 8 不同光栅面型对偏振性能的影响。(a) 不同光栅面型时入射波长与 TM 透射率的关系;
(b) 同光栅面型时入射波长与消光比的关系

Fig.8 Effect of different grating types on polarization performance. (a) Relation of wavelength with TM transmission;
(b) relation of wavelength with extinction ratio

可以看出在波长较长的情况下,三角形及梯形光栅的 TM 透射率要优于矩形,波长较短时矩形光栅的 TM 透射率要更优。对于消光比,矩形光栅总是优于其他光栅面型。这是由于光栅面型等效于改变了金属光栅的占空比和厚度,进而改变了金属光栅的偏振性能。这些矩形以外的面型等效于减小了光栅占空比或减少了光栅高度,占空比减小或高度减小均会引起消光比降低,因此三角形面型或梯形面型光栅的消光比要比矩形的差。对于 TM 透射率,占空比减小会使 TM 透射率增加。光栅高度减小时要考虑图 7 中的拐点:对于设定的模型,经计算,在入射光为 350 nm 时,光栅高度减小会使得 TM 透射率减小;入射波长为 600 nm 时,光栅高度减小会使得 TM 透射率增大。即在短波长时占空比减小和光栅高度减小对于 TM 透射率的影响是相反的;在长波长时二者对于 TM 透射率的影响是相同的,所以在图 8 中在短波长入射时三角形面型的光栅 TM 透射率最低,梯形的其次,矩形的最高;而在长波段时三角形面型的光栅 TM 透射率最高,矩形的最低。综上,这些矩形以外的面型等效于减小了光栅占空比或减少了光栅高度,会造成消光比迅速减小,从而影响亚波长金属光栅的偏振性能。

金属在空气中容易氧化,这也会对光栅的偏振性能造成影响。其原因也和光栅面形的影响相似,氧化层不再具有金属的性质,所以金属氧化相当于减小了光栅的占空比和高度,所以会降低光栅的偏振性能。

4 结 论

从物理层面对单层亚波长金属光栅透射现象以及光栅参数对偏振透射的影响给出了解释。从等效介质理论和法布里-珀罗共振理论定性及定量解释了偏振性能曲线随着光栅结构变化的原因以及透射率曲线

中波峰出现的原因。通过系统地分析单层亚波长金属光栅透射增强现象,对抽象的图表数据给予合理的理论解释,有助于清晰地理解单层亚波长金属透射现象的规律。文中给出的定性以及定量的解释也将对金属光栅偏振器的设计制作提供理论指导。

参 考 文 献

- 1 Zhou Yun, Shen Su, Ye Yan, *et al.*. Research on the characteristics of subwavelength metal grating polarizers with a high refractive-index dielectric layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1158-1161.
周 云, 申 溯, 叶 燕, 等. 带有高折射率介质层的金属光栅偏振器特性的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1158-1161.
- 2 Yamada I, Nishii J, Saito M. Modeling, fabrication, and characterization of tungsten silicide wire-grid polarizer in infrared region[J]. *Appl Optics*, 2008, 47(26): 4735-4738.
- 3 Zhang Na, Chu Jinkui, Zhao Kaichun, *et al.*. The design of the subwavelength wire grid polarizers based on rigorous couple wave theory[J]. *Chinese Journal Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 1739-1743.
张 娜, 褚金奎, 赵开春, 等. 基于严格耦合波理论的亚波长金属光栅偏振器设计[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(5): 1739-1743.
- 4 Meng Fantao, Chu Jinkui, Han Zhitao, *et al.*. Design of the sub-wavelength wire-grid polarizers[J]. *Nanotechnol Precis Eng*, 2007, 5(4): 269-272.
孟凡涛, 褚金奎, 韩志涛, 等. 亚波长金属光栅偏振器设计[J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, 5(4): 269-272.
- 5 Liu Jing, Liu Juan, Wang Yongtian, *et al.*. Resonant properties of sub-wavelength metallic gratings[J]. *Chin Optics*, 2011, 4(4): 363-368.
刘 镜, 刘 娟, 王涌天, 等. 亚波长金属光栅的表面等离子体激元共振特性[J]. *中国光学*, 2011, 4(4): 363-368.
- 6 He Qihao, Wang Guoping. Physical mechanism for transmission enhancement of one-dimensional metallic gratings[J]. *Laser J*, 2003, 24(4): 29-30.
何启浩, 汪国平. 一维金属光栅的透射光增强效应的物理机制[J]. *激光杂志*, 2003, 24(4): 29-30.
- 7 D Zhang, P Wang, X Jiao, *et al.*. Polarization properties of subwavelength metallic gratings in visible light band[J]. *Appl Phys B*, 2006, 85(1): 139-143.
- 8 M G Moharam, E B Grann, D A Pommet, *et al.*. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *JOSA A*, 1995, 12(5): 1068-1076.
- 9 Jing X, Jin Y. Transmittance analysis of diffraction phase grating[J]. *Appl Optics*, 2011, 50(9): C11-C18.
- 10 Astilean S, Lalanne P, Palamaru M. Light transmission through metallic channels much smaller than the wavelength[J]. *Opt Commun*, 2000, 175(4): 265-273.
- 11 Fang Rongchuan. *Solid State Spectroscopy*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003: 4-6.
方容川. *固体光谱学*[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 4-6.
- 12 Yu Z, Liang R, Chen P, *et al.*. Integrated tunable optofluidics optical filter based on MIM side-coupled-cavity waveguide[J]. *Plasmonics*, 2012, 7(4): 603-607.

栏目编辑: 刘丰瑞