

文章编号: 0258-7025(2006)06-0805-04

一维金属亚波长周期光栅的衍射特性

张亮, 李承芳, 张飞

(武汉大学物理科学与技术学院, 湖北 武汉 430072)

摘要 利用严格耦合波理论(RCWA)计算了一维金属亚波长光栅刚好出现一级衍射透射波时的周期/波长比(临界周期点), 并利用最小二乘法拟合出临界周期点随光栅基底折射率的变化关系, 即 $y = 1/x$ 。为了验证该规律的正确性, 选取不同的金属材料、占空比、金属厚度、光栅周期、入射光偏振态进行计算分析。结果表明, 对于一维亚波长金属光栅, 一级衍射的出现都满足临界周期点的变化规律, 并且与入射光的偏振态及波长无关, 从而为设计一维金属亚波长光栅提供了仅存在零级衍射的条件。

关键词 衍射与光栅; 严格耦合波理论; 临界周期点; 一维金属亚波长光栅

中图分类号 O 436.1 **文献标识码** A

Diffractive Characteristics of 1D Metal Gratings with Subwavelength Periodic Structure

ZHANG Liang, LI Cheng-fang, ZHANG Fei

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract Rigorous coupled wave approach (RCWA) was used to calculate the value of one-dimensional (1D) subwavelength metal grating's maximum period that allows only propagation of the zeroth diffraction order (the maximum period is also called critical periodic point). Assuming the surrounding medium is air, some different refractive indexes of the substrate material are chosen to calculate the critical periodic point. It is shown that the critical periodic point is only decided by the refractive indexes of the substrate, no matter which kind of metal, refractive indexes of grating layer, grating period, duty cycle, grating thickness and the polarization and wavelength of incidence are chosen. The results are useful for designing and fabricating novel nano-optics based on 1D subwavelength metal grating by avoiding complicated calculation and the failure of fabricating.

Key words diffraction and gratings; rigorous coupled wave theory; critical periodic point; one-dimensional subwavelength metal grating

1 引言

亚波长光栅具有改进和取代传统光学元件的潜力, 而且具有适合集成化、减少光路元件、增加光学系统设计的灵活性等优点, 因而引起了广泛的关注^[1~6]。在很多应用中, 希望只有零级衍射光透过^[7]。但是在光栅的周期小于并接近波长的情况下, 当光栅周期与波长的比值达到某一值时, 光栅的透射光中有一级衍射光, 当比值再增大时, 逐渐出现二级以及其他级次的衍射光。因此, 需要研究亚

波长光栅的衍射级次的变化规律, 以便在制作光栅时通过控制光栅周期来控制其他级次衍射光的出现, 这对于设计和制作亚波长光栅器件很有意义, 可避免由于选择光栅周期过大而导致制作光栅失败。

目前对亚波长光栅衍射级次的研究主要针对电介质光栅^[8]。金属亚波长光栅的机制和电介质亚波长光栅不同, 金属栅条表面的电子在入射光作用下沿栅条方向自由振荡, 但在垂直于栅条方向上受到限制, 因而体现出强烈的偏振特性, 具有作为偏振器或者偏振分束器的应用价值。在设计和应用中, 为

收稿日期: 2005-11-14; 收到修改稿日期: 2006-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(10474076)资助项目。

作者简介: 张亮(1980-), 男, 湖北武汉人, 武汉大学物理科学与技术学院硕士研究生, 主要从事微结构光学性质方面的工作。E-mail: liangliangz801021@yahoo.com.cn

保证只存在零级衍射光,需要进行较复杂的计算。本文利用严格耦合波理论(RCWA)^[9],研究了一维亚波长金属光栅刚好出现一级衍射的临界周期点(周期/波长之比)随基底折射率、入射光偏振态和其他光栅参数的变化规律,从而得到了普遍情况下,要保证仅有零级衍射存在,光栅周期与工作波长之间必须满足一定的关系,为设计和制作光栅提供了依据。

2 临界点的计算及曲线拟合

理论计算模型如图 1 所示,取光栅周期 $d = 150 \text{ nm}$,光栅厚度 $h = 500 \text{ nm}$,光栅的占空比 $c/d = 0.5$,金属栅条为铝,基底材料的折射率为 n_3 ,光栅上面的介质为空气,折射率取为 1,入射光为线偏振光。对于这种亚波长光栅结构,当光栅的周期和

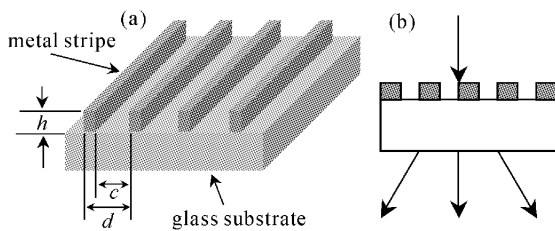


图 1 计算所选取的光栅模型 (a) 及入射光和衍射光方向示意图 (b)

Fig. 1 Grating model in the calculation (a) and schematic of the incidence and diffraction (b)

入射光的波长较接近时,传统的标量衍射理论不再适用,同时等效媒质理论也不能精确成立(要求光栅周期小于波长的 $1/10$),在这种情况下必须采用严格的矢量衍射理论。本文使用目前发展比较成熟的严格耦合波理论计算光栅各衍射级次的强度。图 2 显示了 TE 波正入射时,反射光零级衍射 (R_0),总反射光 (R_{sum}),透射光零级衍射 (T_0),总透射光 (T_{sum}) 的强度随波长的变化情况。可以看出, R_{sum} 和 R_0 的曲线在波长 150 nm 处交汇,在 150 nm 之前 $R_{\text{sum}} > R_0$ 说明除零级衍射之外,存在更高级别的衍射,在 150 nm 之后, $R_{\text{sum}} = R_0$ 说明只存在零级衍射。因此, 150 nm 处是仅存在零级衍射的临界点。同样,对于透射光,该值为 240 nm 。对于透射和反射谱,出现一级(负一级)衍射的波长值不一样,这一差别是基底材料的折射率不同所致。透射光存在于基底介质中,折射率 $n_3 = 1.55$; 反射光存在于空气之中,折射率 $n = 1$ 。

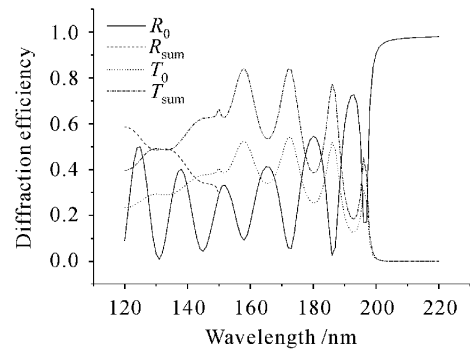


图 2 光栅对 TE 波的透射谱和反射谱

Fig. 2 Diffraction spectrum of transmission and reflection for TE wave

通过模拟计算,进一步发现:

- 1) 若光栅上下表面介质的折射率相同,则反射光和入射光出现一级(负一级)衍射的波长值相同。
- 2) 当基底的折射率 n_3 改变时,出现一级衍射透射波的周期和波长的比值不同,即临界周期点也不同。

为了研究基底折射率和临界周期点之间的变化规律,取基底折射率 $n_3 = 1.0 \sim 5.0$,取值间隔为 0.1 。采用和前面相同的方法计算出不同的折射率值

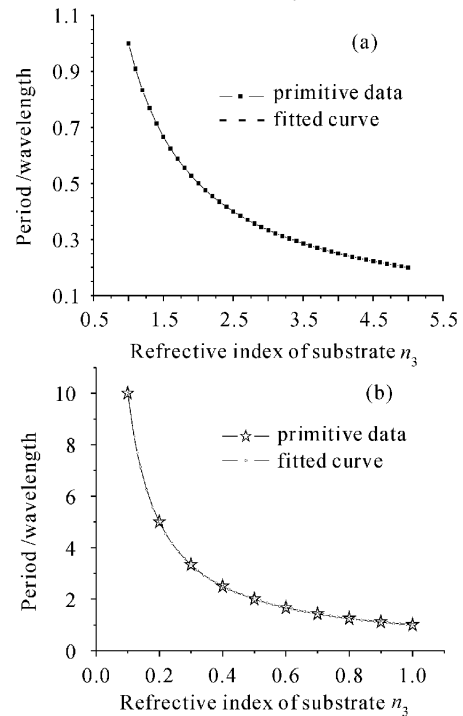


图 3 临界周期点随折射率 $n_3 = 1.0 \sim 5.0$ (a) 和 $n_3 = 0.1 \sim 0.9$ (b) 的变化曲线

Fig. 3 Critical periodic point (period/wavelength) as a function of refractive index

(a) $n_3 = 1.0 \sim 5.0$; (b) $n_3 = 0.1 \sim 0.9$

对应的临界周期点。图 3 为拟合的函数和离散的结果关系图,可以看出,离散的临界周期点随折射率的变化趋势不是线性函数。根据函数变化趋势,选取 $y = 1/ax + b$ 的函数形式利用最小二乘法进行拟合,得到 $a = 1, b = 0$ 。由图可以看出,拟合曲线与计算数值点完全重合,即临界周期点随折射率呈反函数关系 $y = 1/x$ 。特别是,我们计算了在目前的实际应用中不太可能出现的基底折射率 $n_3 = 0.1 \sim 0.9$ 的情况,如图 3(b),经过拟合同样符合 $y = 1/x$ 关系,由此可以得到当 n_3 接近于 0 的时候,临界周期点为无穷大。因为入射光波长总是一个有限值,这就意味着光栅的周期再大也不会产生零级以上的衍射级次。随着人工微结构材料的研究,现在已经可以构造并制作出折射率小于 1 甚至负折射率的材料,因此 $n_3 < 1$ 情况下的临界周期点计算结果对于未来光子器件的设计有参考意义。

3 分析和讨论

为了进一步考察临界周期点随折射率的反函数变化关系 $y = 1/x$ 的正确性,取不同的金属材料、占空比、金属厚度、光栅周期进行计算比较。图 4 为不同金属光栅的一级衍射效率随临界周期点的变化关系,这里选光栅材料为常见的铝、金、银材料,以及最新报道的金属栅条与介质栅条交替的高性能线栅偏振器结构 (Metal/SiO₂)^[10],取光栅厚度 $h = 500$ nm,光栅的占空比 $c/d = 0.5$,基底折射率 $n_3 = 1.5$ 。图 4 显示对于 4 种金属材料的光栅,临界周期点的位置都相同。根据等效折射率理论,不同金属层的等效折射率不同,并且在金属栅条之间加入介质

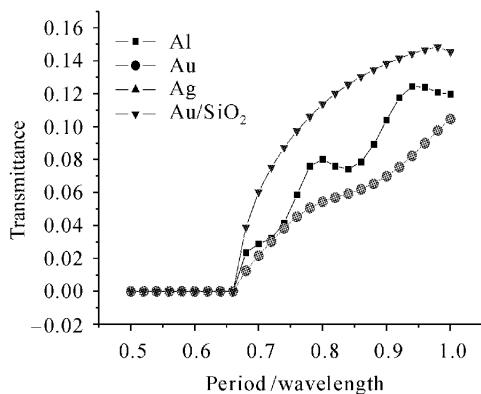


图 4 不同金属材料时,一级衍射的透射率随周期/波长比的变化关系

Fig. 4 Efficiency of first order diffraction as function of periodic for various metal

栅条会较大地改变光栅层的等效折射率。因此图 4 的结果表明,光栅层本身的等效折射率仅改变衍射光的透过率,而对临界周期 / 波长比的位置没有影响。图 5 为不同光栅占空比下 ($f = c/d$) 的一级衍射效率随临界周期点的变化关系,可以看出,占空比的变化对临界周期点没有影响。

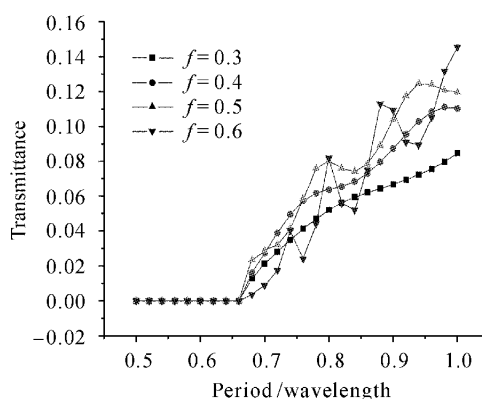


图 5 不同占空比时,一级衍射的透射率随周期/波长比的变化关系

Fig. 5 Efficiency of first order diffraction as function of period with different duty cycles

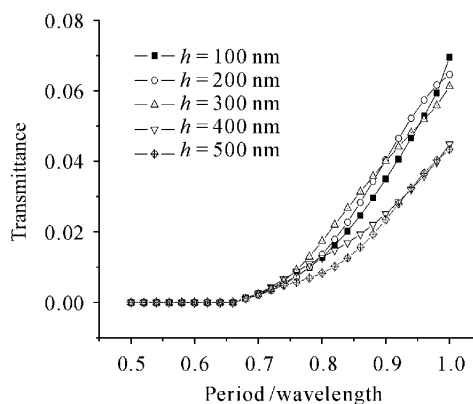


图 6 不同金属厚度时,一级衍射的透射率随周期/波长比的变化关系

Fig. 6 Efficiency of first order diffraction as function of period for various h

图 6 为不同金属栅条厚度下的一级衍射效率随周期/波长比的变化关系,可以看出,光栅厚度的变化对临界周期点没有影响。图 7 为不同偏振态入射时一级衍射效率随周期/波长比的变化关系。取入射光偏振方向(电矢量方向)与金属栅条的夹角为 θ ,分别取 $\theta = 0^\circ$ (TE 波), 30° , 45° , 60° , 90° (TM 波),结果表明入射光的偏振态不影响临界周期点的位置。

以上只是选择基底折射率为 1.5 的计算结果。

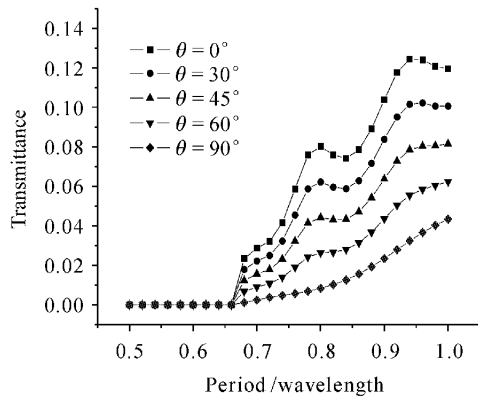


图 7 不同偏振态入射时,一级衍射的透射率随周期/波长比的变化关系

Fig. 7 Efficiency of first order diffraction as function of period for different polarization

更多的计算表明,当基底折射率取其他任意值时,也能得到相同的结论。此外,该结论的成立对于光栅周期和入射波长的适用范围均无要求。因此,临界周期点随基底折射率的变化规律对任意金属材料、光栅层的等效折射率、光栅周期、占空比、光栅厚度的一维亚波长金属光栅都适用,并且对于任意的入射光波长范围和偏振态都成立。临界周期点大小的因素仅由光栅的基底折射率决定,而与其他光栅参数和入射光条件无关。

4 结 论

研究了一维亚波长金属光栅仅存在零级衍射的临界周期点条件,利用严格耦合波理论计算了基底折射率 $n_3 = 1.0 \sim 5.0$ 的离散值时,出现一级衍射透射波的周期临界点,根据计算出的离散数据点,利用最小二乘法拟合出临界周期点随基底折射率的变化规律 $y = 1/x$ 。通过计算不同的金属材料、占空比、金属厚度、光栅周期以及不同偏振态入射时的一级衍射效率随周期/波长比的变化关系,发现都满足临界周期点变化规律的公式。这一规律对设计和制作基于一维亚波长金属光栅的新型光子器件非常有

用。运用这一规律可以避免由于选择光栅周期过大经常出现一级衍射而导致制作失败的情况,可以避免复杂运算,方便地选择光栅的周期。

参 考 文 献

- Li Yigui, Chen Di, Zhu Jun *et al.*. Sub-wavelength gratings based on a new microfabrication technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8):1008~1010
李以贵,陈迪,朱军等.基于一种新微细加工技术的亚波长光栅的研制[J].光学学报,2002,**22**(8):1008~1010
- Chen Sihai, Cheng Zhijun, Huang Gung *et al.*. Design and fabrication of subwavelength antireflection gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11):1359~1361
陈四海,程志军,黄光等.亚波长消反射光栅[J].光学学报,2003,**23**(11):1359~1361
- Yi Deer, Yan Yingbai, Hai Taoliu *et al.*. Broadband polarizing beam splitter based on the form birefringence of a subwavelength grating in the quasi-static domain [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(7):754~756
- Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Dayue *et al.*. The character of high-efficiency reflection of surface sinusoidal dielectric subwavelength grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(9):799~802
傅克祥,王植恒,张大跃等.亚波长表面正弦介质光栅的高反射特性[J].中国激光,1999,**A26**(9):799~802
- Yuan Hui, Zhou Jin, Wang Xiaowei *et al.*. Rigorous coupled wave analysis of a new one-dimensional deep sub-wavelength grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9):795~800
袁惠,周进,王晓伟等.一维深亚波长光栅的耦合波分析及偏振特性的研究[J].中国激光,2002,**A29**(9):795~800
- Yi Deer, Yan Yingbai, Tan Qiaofeng *et al.*. Study on broadband achromatic quarter-wave plate by subwavelength gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5):405~408
伊德尔,严瑛白,谭峭峰等.亚波长光栅用于实现宽光谱消色散1/4波片的研究[J].中国激光,2003,**30**(5):405~408
- Wang Zhiheng, Fu Kexiang, Wen Jun *et al.*. The property and application of reflectivity of subwavelength phase gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(3):270~274
王植恒,傅克祥,文军等.亚波长位相光栅的反射率特性及其应用[J].中国激光,1998,**A25**(3):270~274
- Cao Zhaoliang, Lu Zhenwu, Li Fengyou *et al.*. Diffractive characteristics of antireflective dielectric gratings with subwavelength periodic structure [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(7):694~697
曹召良,卢振武,李凤有等.亚波长周期结构抗反射介质光栅的衍射特性[J].光电子·激光,2003,**14**(7):694~697
- M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(11):1780~1787
- Jian Jim Wang, Wei Zhang, Xuegong Deng *et al.*. High-performance nanowire-grid polarizers [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(2):195~197