

正交双光栅结构的导模共振光谱特性

王振华 吴永刚 凌磊婕 夏子奂 陈乃波 刘仁臣

(同济大学精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

摘要 将两个弱调制导模共振光栅相互垂直放置构成新型正交光栅结构。应用严格耦合波理论计算了横电/横磁 (TE/TM) 偏振光入射时的光谱特性, 并分析了该结构的导模共振现象。研究表明, 当改变两光栅间隔距离时, 正交光栅结构呈现出较大的光谱可调范围(共振峰间距由 0~62.7 nm 连续可调); 当分别以 TE/TM 偏振光正入射时, 两种偏振光对应的共振波长位置保持不变、光谱曲线相同, 相当于平行双光栅结构对应光谱的叠加。TE/TM 偏振光倾斜入射时反射峰发生分裂, 同时在入射面为 P_1 面时 582.3 nm 和 590.8 nm 共振波长位置处, 及入射面为 P_2 面时 590.8 nm 和 612.4 nm 共振波长位置处呈现出峰位随入射角的增加保持不变的特性。

关键词 光栅; 导模共振; 正交光栅; 偏振光; 严格耦合波理论

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0505002

Guided-Mode Resonance Spectral Characteristics in Tunable Orthogonal Grating

Wang Zhenhua Wu Yonggang Ling Leijie Xia Zihuan Chen Naibo Liu Renchen

(*Institute of Precision Optical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract A new tunable orthogonal grating consisting of two weakly modulated subwavelength gratings perpendicularly to each other is presented. Using the rigorous coupled-wave analysis (RCWA), the spectra are calculated and the characteristics of guided-mode resonance for transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarized light is analyzed. It is demonstrated that a wide-range tunability of such structure is obtained via varying the spacing between the gratings (the distance between the two resonant wavelengths is continuously tunable from 0 to 62.7 nm). For the normally incident waves of both TE and TM polarized light, the structure turns out to have the same spectrum and resonance peaks, and it is the same as the overlay result of parallel double grating. For the obliquely incidence of TE/TM polarized light, the separation of the resonant peaks appears. At the same time, some specific wavelengths are maintained with the increase of the incident angle, such as the resonance peaks of 582.3 nm and 590.8 nm for incident plane P_1 , and those of 590.8 nm and 612.4 nm for P_2 .

Key words gratings; guided-mode resonance; orthogonal grating; polarized light; rigorous coupled-wave theory analysis

OCIS codes 050.2770; 050.6624

1 引 言

借助于对由亚波长介质光栅和平板波导组成的结构中泄露模式和衍射光波耦合现象本质的全面和深入的了解, 越来越多的利用导模共振现象制作的应用装置被设计出来, 包括窄带高反射滤光片、宽带反射滤光片、偏振片和生物传感器等^[1~17]。利用两个相同结构中导模之间的相互作用, 可以设计可调

式共振光学装置。这种结构支持的模式间耦合有两种类型: 1) 平板波导泄露模式间的直接耦合; 2) 空间传播模式间的间接耦合。根据不同的耦合机制设计的结构, 可以呈现出不同的共振特性^[7~9]。Suh 等^[7,8]数值计算了可调式光子晶体平板结构的共振透射光谱, 发现两个相似结构可以通过调节间距来实现带通和带阻光谱特性。据了解, 在以往对导模

收稿日期: 2010-10-21; **收到修改稿日期**: 2010-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(10576021, 60977028)和上海市重点科研项目基金(09JC1413800)资助课题。

作者简介: 王振华(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事亚波长光栅及光学薄膜等方面的研究。E-mail: wz0821@live.cn

导师简介: 吴永刚(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事低维光子晶体、薄膜太阳能电池微纳结构、真空紫外、极紫外及软 X 射线滤光薄膜等方面的研究。E-mail: ygwu@tongji.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

共振现象的研究中主要是通过调整单层光栅结构参数实现对光谱曲线的调整,而基于导模共振效应设计的可调式双光栅结构目前报道得还很少。Song等^[9]分析了两个光栅平行放置时的光谱特性,发现随着光栅结构间距的减小,两共振峰间距逐渐增大,该特性可以用来测量微小间距。本文设计并讨论了新型可调式正交导模共振光栅结构,利用严格耦合波理论数值计算该结构在不同光栅间距分别以横电/横磁(TE/TM)偏振光入射时的光谱特性。

2 原理及结构设计

图1所示为亚波长单光栅结构示意图及利用严格耦合波理论计算得到的TE/TM偏振光正入射时的反射光谱曲线。图中取光栅层材料折射率(n_1 ,

n_1)分别为1.85和1.7,厚度为169.3 nm,光栅周期为 $\Lambda=381.3$ nm,占空比为 $f=0.5$,基底折射率为 $n_s=1.52$,入射媒质(折射率为 n_c)为空气。当分别以TE/TM偏振光正入射时,该结构对应的共振波长分别在600 nm和585 nm。根据等效媒质理论,可将亚波长光栅结构等效为单层膜均质波导,求解得到以TE/TM偏振光入射时的等效折射率为

$$n_{\text{eff}} = \begin{cases} \sqrt{fn_1^2 + (1-f)n_c^2}, & \text{TE} \\ \sqrt{n_1^2 n_c^2 / [fn_1^2 + (1-f)n_c^2]}, & \text{TM} \end{cases} \quad (1)$$

然后通过求解多层波导结构的本征值方程确定导模共振波长位置^[6]:

$$P_c A + P_c P_s B + C + P_s E = 0. \quad (2)$$

式中各参量定义参考文献^[6]。

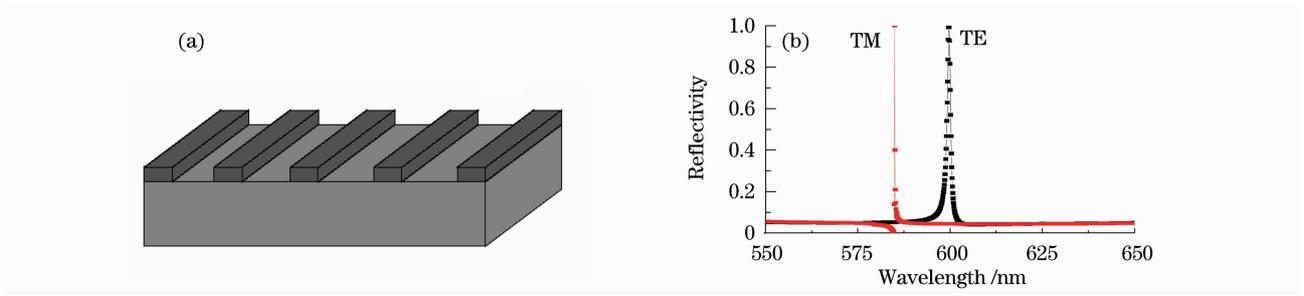


图1 (a)单层膜光栅结构示意图,(b)分别以TE/TM偏振光正入射时,单层光栅反射光谱曲线

Fig. 1 (a) Structure of the single grating, (b) reflection spectra for a normally incidence of TE/TM polarized light

图2为研究的两种双光栅结构。将同样参数的两个光栅相互平行和垂直放置时即构成了平行双光栅结构和正交双光栅结构,其中光栅间距为 D ,光栅参数与图1中所采用的相同。为了更好地研究新型正交双光栅结构光谱特性,对平行双光栅结构光谱特性进行了分析。利用波导近似理论,可将图2(a)中平行双光栅结构等效为由两个光栅等效均质层和

中间空气间隙组成的波导结构,入射介质和出射介质均为基底 n_s 。通过调节平行双光栅间隔,即改变空气层厚度,可以调整波导结构支持的传播模式,使得共振波长位置改变。对图2(b)中新型正交双光栅结构,可类比平行双光栅结构,用波导近似理论进行分析。再利用严格耦合波方法,即可精确计算两种双光栅结构的光谱曲线。

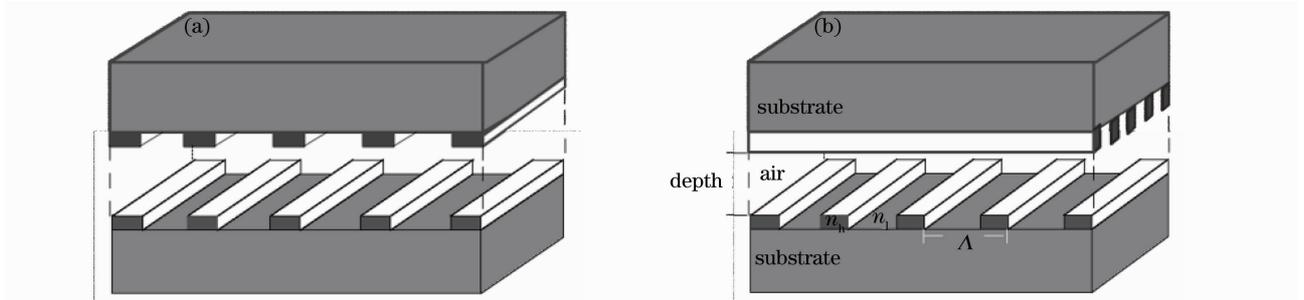


图2 (a)平行双光栅结构,(b)正交双光栅结构示意图

Fig. 2 (a) Structure of parallel double grating, (b) structure of orthogonal double grating

为明确表示文中所讨论的双光栅结构的不同入射条件,图3给出了不同入射平面与光栅矢量对应关系。其中 \mathbf{k} 为入射光波矢, θ 为入射角, Φ 为方位

角。当以TE/TM偏振光入射到光栅结构时,根据方位角的不同,入射平面可以分为两种正交情况:1)入射平面与光栅矢量方向平行的 P_1 平面;2)入射

平面与光栅矢量垂直的 P_2 平面，即方位角相差 90° 。本文计算双光栅结构的光谱曲线时，均以上层光栅为基准，入射面为 P_1 或 P_2 面。入射光偏振特性由电场矢量 \mathbf{E} 与入射面关系确定： \mathbf{E} 垂直入射面时为 TE 偏振光； \mathbf{E} 平行入射面时为 TM 偏振光。

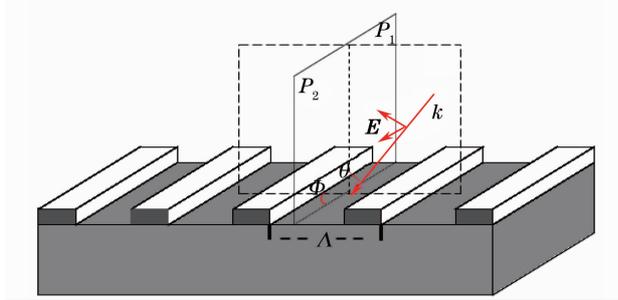


图3 不同入射平面与光栅矢量对应关系示意图

Fig. 3 Geometry of dielectric grating with illumination in both cases of the grating vector parallel and perpendicular to the incident planes

当入射光以 P_1 面入射时，平行双光栅结构中上下层光栅横向波矢分量为^[18~20]

$$k_{p_1,mm} = k_0 \sin \theta + m \frac{2\pi}{\Lambda} + n \frac{2\pi}{\Lambda} = k_0 \sin \theta + M \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (3)$$

式中 m, n 分别为上下两层光栅衍射子波级次，真空中波矢 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 。当入射光以 P_2 面入射时，平行双光栅结构中上下层光栅横向波矢分量为^[18~20]

$$k_{p_2,mm} = \sqrt{(k_0 \sin \theta)^2 + \left(m \frac{2\pi}{\Lambda} + n \frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2} = \sqrt{(k_0 \sin \theta)^2 + \left(M \frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2}. \quad (4)$$

若上下两层光栅第 m/n 级子波的横向波矢分量 k_{mm} 与光栅等效传播常数 β_i 近似相等，则将出现导模共振效应。当倾斜入射时，在两种入射面情况下，子波级次的空间对称性也不同：由(3)式， $\pm M$ 级次子波对应的 $|\pm k_{p_1,mm}|$ 不再相同，因此二者共振峰波长也不同，即共振峰发生分裂；由(4)式， $\pm M$ 级次子波对应的 $|\pm k_{p_2,mm}|$ 相同，因此二者共振峰波长相同，共振峰不发生分裂。

当入射光以 P_1/P_2 面入射时，正交双光栅结构中上下层光栅横向波矢分量分别为^[18~20]

$$\begin{cases} k'_{p_1,mm} = \sqrt{\left(k_0 \sin \theta + m \frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2 + \left(n \frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2} \\ k'_{p_2,mm} = \sqrt{\left(k_0 \sin \theta + n \frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2 + \left(m \frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2} \end{cases}, \quad (5)$$

由(5)式可得，正交光栅结构中一个光栅表现出 P_1 面入射特性，同时另一光栅表现出 P_2 面入射特性，

因此在两种入射面情况下，上下两层光栅所起作用具有对称性。通过比较(3)~(5)式，可得正交双光栅结构中波矢横向传播常数与平行双光栅结构在 P_1/P_2 面入射情况下横向传播常数间关系：

$$(k_{p_1,mm})^2 + (k_{p_2,mm})^2 = (k'_{p_1,mm})^2 + (k'_{p_2,mm})^2 + \left(2N \frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2. \quad (6)$$

3 平行双光栅结构光谱特性

为更好地说明新型正交双光栅结构的光谱特性，首先对平行双光栅结构在正入射和倾斜入射两种情况下的光谱特性进行了分析。

图4所示为平行双光栅结构以 TE/TM 偏振光在 P_1 面入射时，波导近似理论及严格耦合波理论计算的共振波长与光栅间距的对应关系，其他参数如图2(a)所示。TE 偏振光正入射时，利用严格耦合波理论计算结果如图4(a)所示。从图中可以看到，随着光栅间距的减小，两共振峰间距逐渐增大。如在 $D=50$ nm 时，两共振峰分别为 586 nm 和 620 nm，相差 34 nm；在 $D=10$ nm 时，两共振峰分别为 581 nm 和 635.6 nm，相差 54.6 nm；随着光栅间距从 500 nm 逐渐减小到 0，两共振峰的间距由 0~62.7 nm 连续可调。将此平行双光栅结构等效为三层均质波导，入射、出射介质折射率均为 1.52，求解多层波导 TE 偏振光本征值方程，结果如图4(b)所示。图中共振波长位置与图4(a)中几乎相同，因此可通过简单的波导结构模型近似确定所设计光栅结构的共振波长位置。图4(c)所示为 TM 偏振光正入射时，光栅间距 D 与共振波长的对应关系。从图中可以看到，随着平行光栅间距的减小，两共振峰间距也逐渐增大。如在 $D=50$ nm 时，两共振峰分别为 581 nm 和 600 nm，相差 19 nm； $D=10$ nm 时，两共振峰分别为 580.3 nm 和 630.1 nm，相差 49.8 nm。求解该结构 TM 偏振光等效波导本征值方程，结果如图4(d)所示，与图4(c)中共振波长位置几乎相同。通过比较图4(a)，(c)发现，随着光栅间距的增大，两共振峰间距会逐渐减小至仅有单个共振峰，表现为图中的直线部分，TE/TM 偏振光对应的共振波长分别在 600 nm 和 585 nm，光谱曲线与图1(b)中所示相同，此时平行双光栅结构光谱逐渐转变为两个相同结构光栅单独使用时的光谱。另外，相同间隔平行双光栅结构以 TE/TM 偏振光分别入射时光栅等效折射率不同，对应的导模共振波长位置及旁带光谱特性均不同，所以相同平行双光栅结构具有不同的偏振光谱特性。

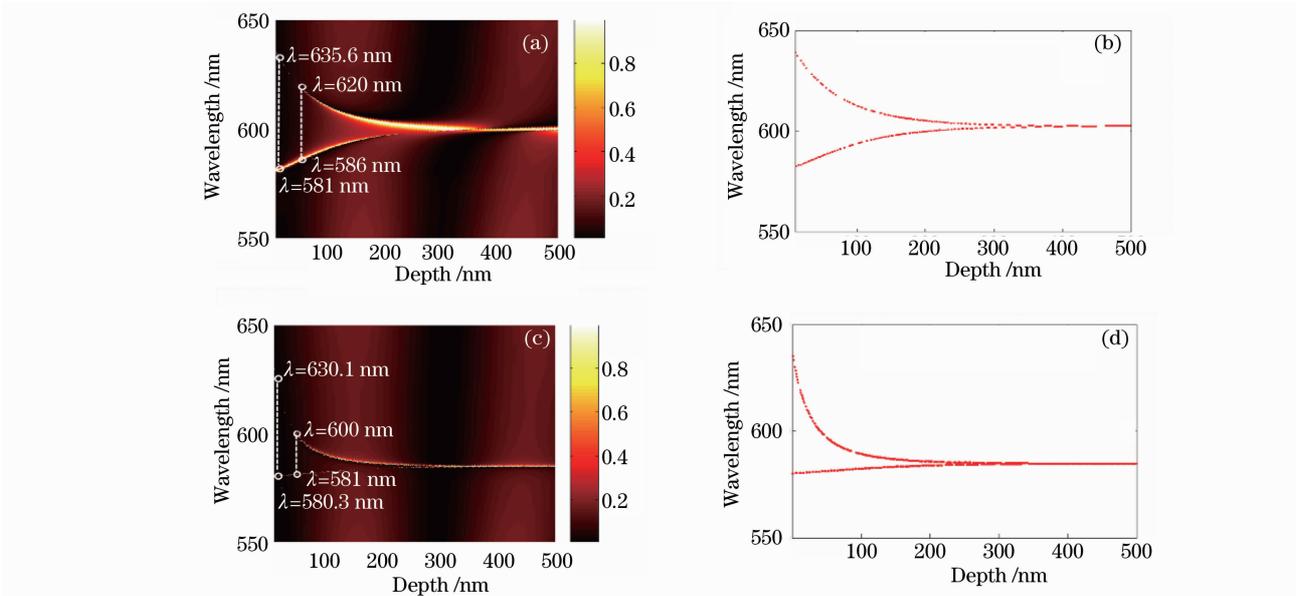


图 4 入射面为 P_1 时,不同理论计算光栅间距与共振波长的对应关系

Fig. 4 Reflection spectra as a function of D with the incident plane of P_1

图 5 所示为平行双光栅结构以 P_2 面入射时,利用严格耦合波理论及波导近似理论计算入射角度与共振波长的对应关系。其中光栅间距为 87 nm,入射角度计算范围为 $0^\circ \sim 2^\circ$,其他光栅参数与图 2(a)中所采用的相同。以 TM 偏振光入射时,不同入射角度与共振波长关系如图 5(a)所示,共振波长分别为 590.8 nm 和 612.4 nm;以 TE 偏振光入射时,不同入射角度与共振波长关系如图 5(b)所

示,共振波长分别为 582.3 nm 和 590.8 nm。利用(4)式中的光栅等效传播常数,分别求解 TE/TM 偏振光对应的波导本征值方程,结果如图 5(c)所示,共振波长分别为 613, 591.5 和 582 nm,与图 5(a), (b)中共振波长位置几乎相同。由图 5 可以看到,当入射面与光栅矢量垂直时,随着入射角度的增加,共振峰并没有发生分裂,共振波长始终保持在原来位置不变。

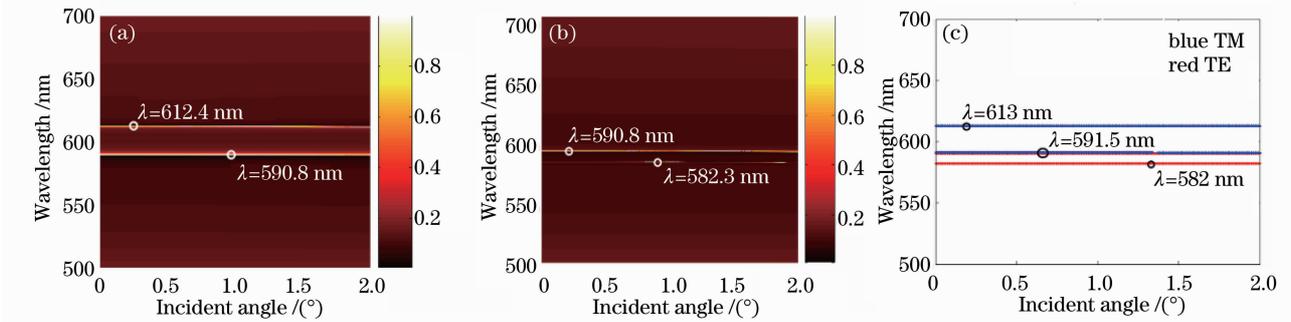


图 5 入射面为 P_2 时,不同理论计算入射角度与共振波长的对应关系

Fig. 5 Reflection spectra as a function of incident angle with the incident plane of P_2

4 正交双光栅结构光谱特性

图 6 所示为正交光栅结构以 TE/TM 偏振光在 P_1 面正入射时,利用严格耦合波理论计算共振波长与光栅间距的对应关系,及光栅间距为 87 nm 时的反射光谱曲线,光栅其他参数与图 2(b)相同。计算发现当该正交光栅结构分别以 TE/TM 偏振光正入射时,对应的共振峰位置、反射峰高度及旁带光谱特

性几乎相同,故此处只给出其中一种偏振光的计算结果,如图 6(a)所示。

由图 6(a)可以看到,随着光栅间距的减小,共振波长间距逐渐增大。当取光栅间距 $D=87$ nm,即图中交点处的光栅间隔时,共振波长为 582.3, 590.8 和 612.4 nm,光谱曲线如图 6(b)所示;当 $D=50$ nm 时,共振波长分别为 581, 586, 597 和 620 nm,与图 4(a),

(c)所示平行双光栅结构光谱叠加结果几乎相同。随着光栅间距逐渐增大,该正交光栅结构光谱也逐渐转为两个相同结构光栅单独使用时的光谱,表现为

图 6(a)中的两平行直线部分,即以 TE/TM 偏振光正入射时对应共振波长均是双峰,为 600 nm 和 585 nm,与图 1(b)两共振峰位置相同。

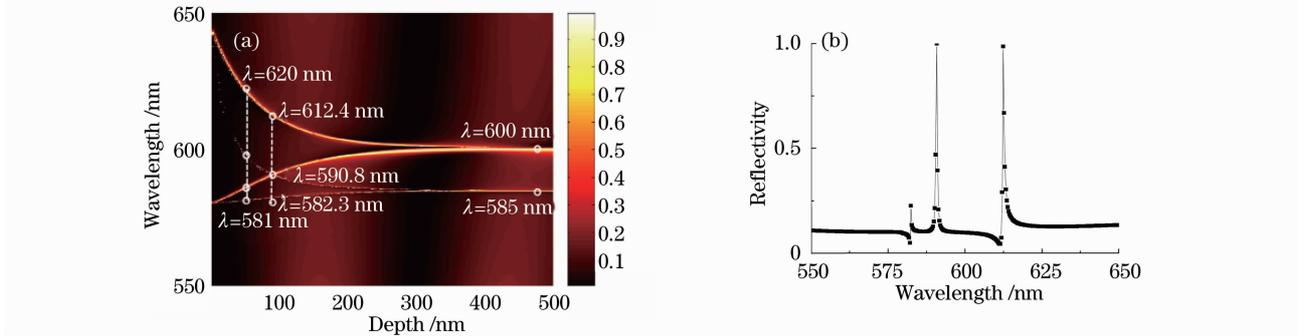


图 6 入射面为 P_1 平面,RCWA 计算正交双光栅结构光谱特性。(a)共振波长与光栅间距之间的关系, (b)光栅间距为 87 nm 时反射光谱曲线

Fig. 6 Reflection spectra of orthogonal double grating for TE/TM illumination with the incident plane of P_1 . (a) as a function of D , (b) for $D=87$ nm

通过以上分析发现:1)当偏振光正入射时,正交光栅结构中一个光栅表现出 TE 偏振光入射特性,同时另一光栅表现出 TM 偏振光入射特性,因此正交双光栅结构能够同时呈现出平行双光栅结构中的 TE/TM 两种偏振光谱特性;2)以 TE/TM 偏振光分别正入射时,正交光栅结构对应的两种偏振光谱特性相同。

入射平面 P_1 平行,因此反射光谱呈现出 TE 偏振光倾斜入射时的光谱特性,即随着入射角度的增加,对称级次衍射波产生的导模共振波长位置发生分离,每个反射峰分为两个;同时由于下层光栅矢量与入射平面 P_1 垂直,因此反射光谱在图中入射角度计算范围内($0^\circ \sim 2^\circ$),呈现出两个不随入射角改变的共振峰,分别为 582.3 nm 和 590.8 nm。

在偏振光倾斜入射时,根据入射面的不同,对正交双光栅结构分如下两种情况讨论:入射面在 P_1 面和入射面在 P_2 面。

图 8 所示为正交双光栅结构以 P_2 平面为入射面、TM 偏振光倾斜入射时,利用严格耦合波理论计算的反射光谱特性。当 TM 偏振光以一定角度入射到正交光栅结构时,上下两层光栅对反射光谱曲线所起的作用也不同。据(6)式,此时下层光栅矢量与入射平面 P_2 平行,表现出 TM 偏振光倾斜入射时的光谱特性,即随着入射角度的增加,反射光谱中导模共振波长位置发生分离,每个反射峰分为两个;

图 7 所示为正交双光栅结构以 P_1 平面为入射面、TE 偏振光倾斜入射时,利用严格耦合波理论计算的反射光谱特性。光栅间距为 87 nm,其他光栅参数与图 6 所采用的相同。当 TE 偏振光以一定角度入射到正交光栅结构时,上下两层光栅对反射光谱所起的作用不同。据(6)式,由于上层光栅矢量与

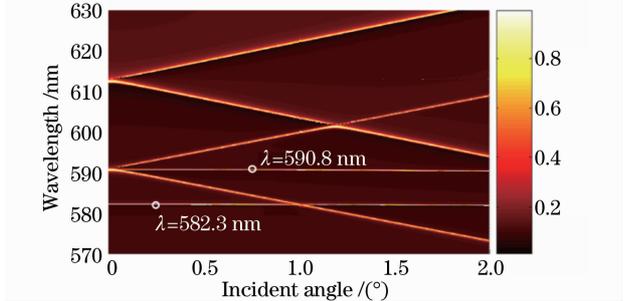


图 7 以 P_1 平面为入射面、TE 偏振光倾斜入射时,正交光栅反射光谱特性

Fig. 7 Reflection spectrum of orthogonal grating for an obliquely incidence of TE polarized light and incident plane P_1

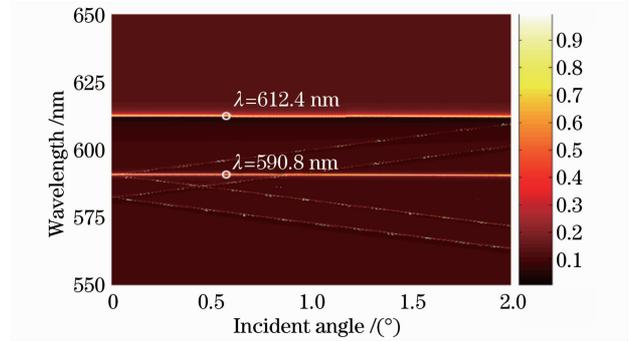


图 8 以 P_2 平面为入射面、TM 偏振光倾斜入射时,正交光栅反射光谱特性

Fig. 8 Reflection spectrum of orthogonal grating for an obliquely incidence of TM polarized light and incident plane P_2

同时上层光栅矢量与入射平面 P_2 垂直,在图中入射角度计算范围内($0^\circ \sim 2^\circ$),呈现出两个不随入射角改变的共振峰,分别为 590.8 nm 和 612.4 nm。

综上所述,当分别以 TE/TM 偏振光正入射时,在正交光栅结构中同时呈现出 TE, TM 偏振光谱特性,如图 6 所示。对比图 4 和图 6 可见,在正入射时正交双光栅结构光谱特性相当于平行光栅结构 TE/TM 偏振光对应光谱的叠加。在倾斜入射条件下,当入射平面与光栅矢量垂直时,在文中入射角度计算范围内($0^\circ \sim 2^\circ$),入射角度对共振峰位没有影响,共振波长不发生分裂,波长位置保持不变,如图 5 所示。由于正交光栅对应的两个光栅矢量相互垂直,因此存在两光栅矢量分别平行和垂直于同一入射平面的情况,当 TE/TM 偏振光倾斜入射时反射峰会发生分裂,同时呈现出光栅矢量与入射平面垂直时的特性,即某些共振波长随着入射角的增加位置保持不变,如图 7 和图 8 所示。

5 结 论

提出了一种新型可调式正交双光栅结构,并对其光谱特性进行了研究。发现随着两光栅间隔距离的减小,两共振峰间距逐渐增大(由 $0 \sim 62.7$ nm 连续可调),在可见光区呈现出较大的光谱可调范围;当分别以 TE/TM 偏振光正入射时,两种偏振光对应的共振波长位置保持不变、光谱曲线相同,相当于平行双光栅结构对应光谱的叠加。

当新型正交双光栅结构中,当入射面分别为两正交平面 P_1, P_2 时,上下两层光栅矢量分别平行和垂直于同一入射平面。当 TE/TM 偏振光倾斜入射时反射峰会发生分裂;同时在入射面为 P_1 面时 582.3 nm 和 590.8 nm 共振波长位置处,及入射面为 P_2 面时 590.8 nm 和 612.4 nm 共振波长位置处,在本文所采用的入射角度计算范围内($0^\circ \sim 2^\circ$),呈现出随入射角的增加峰位保持不变的特性。

参 考 文 献

- 1 T. K. Gaylord, M. G. Moharam. Analysis and applications of optical diffraction by gratings[J]. *IEEE*, 1985, **73**(5): 894~937
- 2 S. S. Wang, R. Magnusson. Theory and applications of guided-mode resonance filters [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2606~2613
- 3 S. S. Wang, R. Magnusson. Design of waveguide-grating filters

- with symmetrical line shapes and low side-bands[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(12): 919~921
- 4 S. Tibuleac, R. Magnusson. Reflection and transmission guided-mode resonance filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(7): 1617~1626
- 5 J. Mouchart. Thin film optical coatings5: buffer layer theory [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(1): 72~75
- 6 S. S. Wang, R. Magnusson. Multilayer waveguide-grating filters[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2414~2420
- 7 W. Suh, M. F. Yanik, O. Solgaard *et al.*. Displacement-sensitive photonic crystal structures based on guided resonance in photonic crystal slabs[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(13): 1999~2001
- 8 W. Suh, S. Fan. Mechanically switchable photonics crystal filter with either all-pass transmission or flat-top reflection characteristics[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1763~1765
- 9 H. Y. Song, S. Kim, R. Magnusson. Tunable guided-mode resonances in coupled gratings[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23544~23555
- 10 M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1995, **12**(5): 1068~1076
- 11 Zhou Chuanhong, Wang Lei, Nie Ya *et al.*. The rigorous coupled-wave analysis of guided-mode resonance in dielectric grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(1): 68~73
周传宏, 王磊, 聂娅等. 介质光栅导模共振耦合波分析[J]. *物理学报*, 2002, **51**(1): 68~73
- 12 Z. Wang, T. Sang, J. Zhu *et al.*. Double-layer resonant brewster filters consisting of a homogeneous layer and a grating with equal refractive index [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(24): 24119
- 13 Z. Wang, T. Sang, J. Zhu *et al.*. Guided-mode resonance brewster filters with multiple channels [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(25): 25115
- 14 H. A. Macleod. Thin-Film Optical Filters [M]. London: Institute of Physics Publishing, 2001. 144~152
- 15 Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Impact of buffer layer on cut-off properties of reflection spectra for guided-mode resonance filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 849~852
王振华, 吴永刚, 桑田等. 缓冲层对导模共振滤光片反射光谱截止特性的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 849~852
- 16 Zhang Dawei, Yuan Limeng, Huang Yuanshen *et al.*. Influence of film on the characteristics of sub-wave grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3060~3063
张大伟, 袁丽萌, 黄元申等. 导模共振滤光片表面镀膜对其物理特性的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3060~3063
- 17 Luo Zhenyue, Liu Xu, Xue Hui *et al.*. Goos-Hänchen shift and pulse deformation properties in thin film-grating hybrid structures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2338~2342
罗震岳, 刘旭, 薛辉等. 薄膜-光栅混合结构中的古斯-亨兴位移与光束形变现象[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2338~2342
- 18 R. B. Hwang, S. T. Peng. Performance evaluation of a bigrating as a beam splitter [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(10): 2011~2018
- 19 S. T. Peng. Rigorous analysis of guided waves in doubly periodic structures[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(8): 1448~1456
- 20 S. T. Peng, R. B. Hwang. Analysis of plane-wave scattering by bigratings[C]. Proc. of ICMMT, 1998, 40~43