

薄膜-光栅混合结构中的古斯-亨兴位移与 光束形变现象

罗震岳 刘 旭 薛 辉 沈伟东 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 讨论了基于薄膜-光栅混合结构的导模共振滤光片中的古斯-亨兴位移与光束形变现象。模拟结果表明,这种结构可以产生入射光波长 300 倍量级的横向位移量,同时位移最大的波长上反射率也最大,因而便于实验观测与在实际应用中提高能量利用率。分别采用经典的稳态位相法以及基于高斯光束角谱展开的数值计算方法,计算了有限大小光束入射到薄膜-光栅结构后所产生的古斯-亨兴位移效应以及相伴的光束变形效应,着重讨论了入射光束腰斑大小对位移量的影响,这些数值模拟可为下一阶段的实验打下理论基础。

关键词 薄膜光学; 古斯-亨兴位移; 导模共振效应; 严格耦合波分析

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2338

Goos-Hänchen Shift and Pulse Deformation Properties in Thin Film-Grating Hybrid Structures

Luo Zhenyue Liu Xu Xue Hui Shen Weidong Gu Peifu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Large Goos-Hänchen(GH) lateral shift and beam deformation for the guided mode resonant filter are fully discussed. Simulation results proved that this structure could generate lateral displacement as large as $300 \lambda_0$. Light waves that experience largest lateral displacement have maximum reflectivity, so it is relatively easier for experimental verification, and would facilitate practical application for its high energy utilization. Two analysis methods based on stationary approach and Gaussian angular decomposition technique are applied, and the lateral shift properties as well as accompanied beam deformation is fully analyzed. Dependence of the lateral displacement depends on the incident beam width is mainly discussed. This theoretical analysis paves the wave for the next step of manufacturing and testing.

Key words thin film optics; Goos-Hänchen lateral shift; guided-mode resonant effect; rigorous coupled-wave analysis

1 引 言

古斯-亨兴位移^[1]指的是反射光的实际反射点与入射点有一段距离的偏移的现象,这是由于入射光中不同的单色平面波分量具有不同的反射相移而造成的,由于其隐含丰富的物理含义和潜在的应用价值,在最近几年再度受研究人员关注,一系列用于产生并利用巨古斯-亨兴位移的结构也被相继提出。Martina^[2]、孙雪铮等^[3,4]先后设计了基于多层薄膜

(主要是 Fabry-Pérot 腔与 Gires-Tournois 腔)干涉结构的器件来产生位移的器件,可作为一种波分复用器件使用,Xiaobo Yin^[5]等人则完善了基于表面等离子体共振机理的受抑全反射(ATR)结构,以作为一种灵敏度极高的探测器。然而上述两种结构共同的问题是在产生最大反射光位移的位置对应的反射率最小,也即其位移的产生是以牺牲能量利用率为代价的。

收稿日期: 2008-10-11; 收到修改稿日期: 2008-11-08

作者简介: 罗震岳(1986—),男,硕士,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: surpassluo@hotmail.com

导师简介: 刘 旭(1963—),男,教授,主要从事光电显示与光学薄膜等方面的研究。E-mail: lliuxu@zju.edu.cn

基于薄膜-光栅混合结构的导模共振滤光片^[6~16]是最近几年比较热门的一个研究方向,以往研究人员主要关注导模共振滤光片的频谱滤波特性,而对于反射引起的相移变化以及随之造成的古斯-亨兴位移不太重视。事实上,当导模共振滤光片被集成到微光学系统中之后,光在表面反射引起的位移以及相伴而生的光斑形变会对整个系统的光学特性有非常大的影响。因而本文将重点关注这一现象,并分别利用稳态相位法与高斯光束角谱展开法详细讨论。模拟结果表明,导模共振滤光片产生最大反射位移量可以达到 300 倍波长的量级,并且与其他结构中不同的是其位移最大的光对应有最大的反射率,因而这种现象更加便于观测,能量利用率也更高。同时利用位移量对波长、入射角极强的依赖性,可望发出灵敏度非常高的频谱或角度探测器件。

2 薄膜-光栅混合结构的设计

经典的导模共振滤光片(GMRF)结构如图 1,其中第一层光栅起到衍射分光的作用,第二层是增透层,主要是让非谐振波长的光尽量透过,达到较好的滤波效果。第三层是泄漏波导层,当某一波长的衍射波级次正好符合波导传播的条件时,会产生导模共振,导致反射光谱上出现一个该波长附近的反射峰。最下面的基板为熔融石英玻璃。

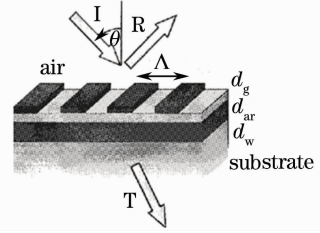


图 1 薄膜-光栅混合结构的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a thin film-grating hybrid structure

针对导模共振波长 $1.55 \mu\text{m}$,设计了具有如下参数的导模共振滤光片:光栅区周期 $\Delta = 0.594 \mu\text{m}$,厚度 $d_g = 0.0382 \mu\text{m}$, $n_h = 2.298$ (二氧化钛), $n_1 = 1$,增透层 $d_w = 0.1465 \mu\text{m}$, $n_w = 1.44$ (二氧化硅),波导层 $d_{ar} = 0.288 \mu\text{m}$, $n_{ar} = 2.298$ (二氧化钛)入射与出射媒介折射率分别为 1 和 1.51,入射光是 TE 光, 45° 入射。

采用严格耦合波算法(RCWA)^[11]得到了反射率曲线,如图 2 实线所示,可以看到强烈的反射峰。如果把这个薄膜-光栅混合结构视为一个传输系统,那么根据信号与系统的基本原理可知。当系统传递函数的幅度被强烈调制,往往意味着其相位也被强烈的调制,而强烈的相位变化会引发横向位移,基于这一基本原理,我们猜想这一结构会存在大的古斯-亨兴横向位移,下面将通过理论计算来验证这一点。

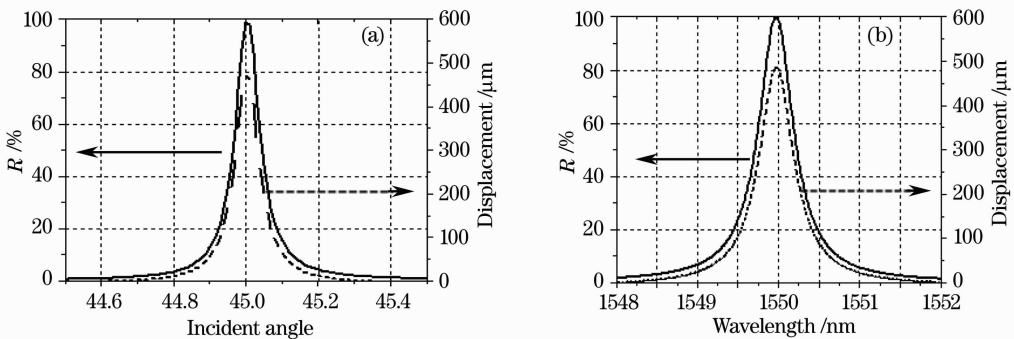


图 2 利用稳态相位法计算得到(a)反射率、位移随入射角的变化;(b)反射率、位移随波长的变化

Fig. 2 Calculation of reflectance and lateral displacement as a function of(a)incident angle; (b)wavelength

3 稳态相位法原理与计算结果

稳态相位法自从被提出以来,一直用于计算光入射层状介质所产生的古斯-亨兴位移,其形式非常简单: $S = -\frac{d\varphi}{d\beta}$ ^[1]其中 S 是位移量, $\beta = k_0 n \sin \theta$ 为入射波的横向波矢, φ 为对应某一入射角入射光波的反射相移,因此,只要通过严格耦合波分析得到反射系数的相位,就可以求出位移量。我们基于稳态

相位法分别计算了薄膜-光栅混合结构的反射率、位移随波长和入射角的变化,如图 2 所示,可以看到这一结构的光谱响应有以下几个显著特点:1)反射率、位移对于波长和入射角的变化非常敏感。2)位移最大的位置反射率也最大;3)最大古斯-亨兴位移量为波长的 300 倍。特性 1)使得这种结构可以作为一种很好的滤波或者探测器件。特性 2)是这种结构相比于其他产生古斯-亨兴位移的结构最大的优点。

在 Fabry-Pérot 腔中, 横向位移的产生是反射光相消干涉造成的效果, 而在受抑全反射 (ATR) 结构中, 由于存在金属层因而会造成传输损耗, 使得位移最大的光反射率最小, 因而以上两种结构中古斯-亨兴位移的产生是以牺牲反射率为代价的。而在导模共振滤光片中之所以出现横向位移, 是因为满足导模共振条件的光被耦合到介质波导层中横向传播, 从而在出射面上产生一定量的横向位移, 整个过程在理想情况下不存在任何损耗, 因而可以保证较高的能量利用率, 并且在实际实验时更加容易观察到位移的变化。

虽然可以通过稳态相位法较为简单地得到位移信息, 然而仔细推敲这一计算方法, 可以发现其推导基于以下两个前提^[13]: 1) 反射相位在入射角临近区域近似线性 2) 反射率在入射角临近区域近似为常数。这两个条件只对空间上足够宽的光束有效, 因为只有这种情况下才可以把光束看作近似理想的单色平面波。然而, 通常在测试古斯-亨兴位移过程中为了便于观察位移量, 常常选用小光斑以加强对比, 这种情况下稳态相位法的计算结果就不够精确了。

这促使我们采用别的数值方法。

4 高斯光束角谱展开法原理与计算结果

基于文献^[10]中用计算单层负折射率材料介质平板的侧向位移的方法, 我们将其推广到薄膜-光栅混合结构中, 引入了如下基于严格耦合波 (RCWA) 与角谱展开的方法。

首先, 入射的高斯光束可以按角谱展开为一系列平面波的叠加:

$$E_{iy} = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \exp[i(k_x x + k_z z)] \Psi(k_x), \quad (1)$$

其中

$$\Psi(k_x) = \frac{g}{2\pi^{1/2}} \exp\{-[g^2(k_x - k_{ix})^2/4]\}. \quad (2)$$

此高斯光束中心在 $(0, 0)$, $\mathbf{k}_i = \mathbf{x}k_{ix} + \mathbf{z}k_{iz} = \mathbf{x}k_0 \sin \theta_i + \mathbf{z}k_0 \cos \theta_i$ 为高斯光束角频谱的中心; θ_i 是中心平面波的入射角; g 为高斯光束宽度参数, 表示强度衰减到最大值 $1/e$ 时的半径。在入射面内, 电场分布是入射波与各个平面波的各个级次反射波的叠加:

$$E_y = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \exp[i(k_x z + k_x x)] + \sum_j R_j \exp[i(-k_{zj} z + k_{xj} x)] \Psi(k_x), \quad (3)$$

上式中 j 表示衍射级次, 而每一个级次的 R 可以由严格耦合波方法 (RCWA)^[12] 得到, 把 (5) 式代入 Maxwell 方程, 可以相应的求出磁场分量以及能流密度:

$$H_x = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \frac{k_z}{\omega\mu_0} \exp[i(k_x z + k_x x)] - \sum_j R_j \exp[i(-k_{zj} z + k_{xj} x)] \Psi(k_x), \quad (4)$$

$$H_z = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \frac{k_x}{\omega\mu_0} \exp[i(k_x z + k_x x)] + \sum_j R_j \exp[i(-k_{zj} z + k_{xj} x)] \Psi(k_x), \quad (5)$$

$$|\langle \bar{S} \rangle| = \frac{1}{2} \{ [\text{Re}(E_y \cdot H_z^*)]^2 + [\text{Re}(E_y \cdot H_x^*)]^2 \}^{1/2}. \quad (6)$$

按照这个计算流程, 分别得到入射光、反射光在结构表面能流密度的横向分布之后, 横向位移量为交界面上入射与反射能流密度最大值之间的距离。这种数值模拟方法更加直观, 避免了稳态相位法中求导带来的误差, 并且可以提供更多电磁场空域分布信息。

为了与经典的稳态相位法相对比, 我们基于角谱展开的方法计算了谐振中心波长产生的位移量与入射光束腰大小的关系, 如图 3(a) 所示。可以看出, 随着入射光腰斑的减小, 带来入射光频谱的增加, 产生类似平均效应的效果, 古斯-亨兴位移量也

随之降低。图 3(b) 进一步采用两种计算方法计算了位移量随波长的变化关系, 从中可以看出, 入射光腰斑越大, 采用两种计算方法得到的结果就越接近, 因而稳态相位法可以看作是大入射光斑条件下的一种近似。同时随着入射光束腰的减小, 不同波长间的位移差距也大大的被缩小了。这些都说明, 在实验中合理选取入射光腰斑的大小是非常重要的: 选用小光斑入射固然容易观察到反射光斑相对于入射光斑的位移, 但同时入射的光斑不能取得太小, 否则会降低该结构作为一种波长分离器件的分辨率。

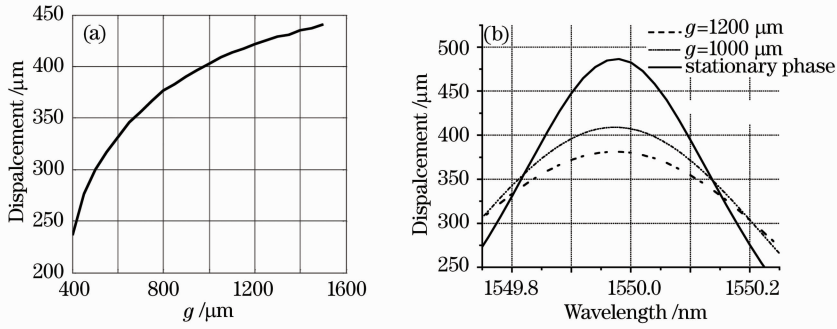


图 3 (a)位移随入射光束宽的变化(针对中心波长 1.55 μm , 45° 入射 TE 波);(b)采用高斯光束角谱展开方法(分别针对 $g=1000$ μm 与 $g=1200$ μm)和稳态相位法计算出位移量随波长的变化关系

Fig. 3 (a) Displacement as a function of incident beam width (for TE incident wave and central wavelength 1.55 μm); (b) Calculation of the relation between displacement and wavelength by Gaussian beam decomposition method (for $g=1000$ μm and $g=1200$ μm) and stationary phase approach

此外,采用高斯光束角谱展开的办法,可以获得更多光在空域的信息。图 4 画出了入射介质中的能

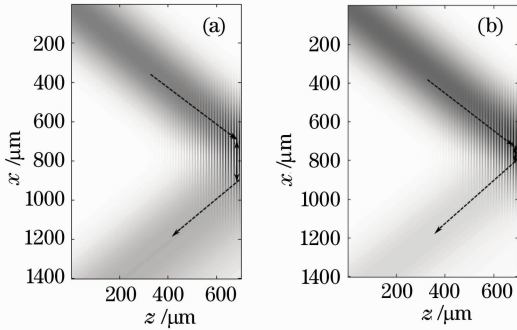


图 4 在入射介质中能流分布,其中腰斑参数 $g=300$ μm . (a) 1.55 μm (导模共振波长中心);(b) 1.5497 μm
Fig. 4 Time-averaged power density in the incident medium ($g=250$ μm). (a) 1.55 μm ; (b) 1.5497 μm

流分布,从中可以看到,当入射波长变化 0.3 nm,反射波的电场分布强度和中心位置就会发生较大的改变,这进一步说明了该结构非常适于超精细的频谱分辨和分离。

进一步,我们还计算了入射光与反射光的能流密度沿表面横向的变化,从中可以得到一些仅用稳态相位法无法发现的性质。由图 5,可以看到 $g=250$ μm 时反射光的能量相比与 $g=500$ μm 时有了明显的下降,这是由于入射光包含的角谱更宽,很大一部分光因为无法产生导模共振而透射,从而造成反射光的能量损失。同时还可以观察到 $g=500$ μm 时反射光束有明显的展宽,这是各个平面波分量位移不同而造成的,而当 $g=250$ μm 时,入射光的角谱更宽,各个平面波之间位移量的差距进一步加大,使得反射光产生较明显的形变,并且趋向分裂。

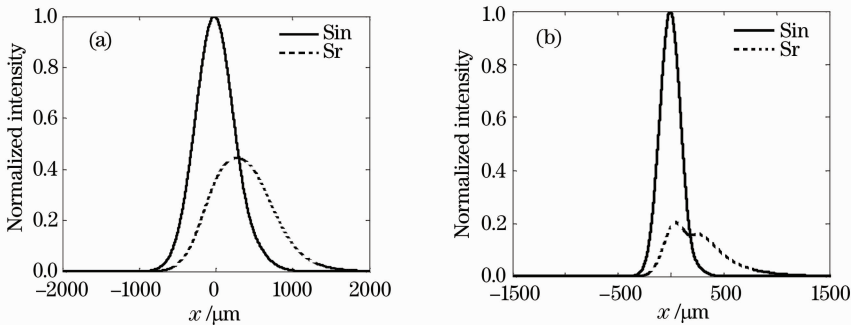


图 5 入射光与反射光的能流密度沿表面横向的变化. (a) $g=500$ μm ; (b) $g=250$ μm
Fig. 5 Time-averaged power density distribution along the incident phase. (a) $g=500$ μm ; (b) $g=250$ μm

上述特性也可以通过对电场强度的分析从另一个方面得到印证与解释。图 6 画出了高斯光束入射到光栅-薄膜混合结构而在其中形成的电场强度分布图。图中至上而下依次是入射介质、光栅-薄膜结构以及入射介质。从图 6(a)中可以看出,对于大光束入

射的情况,波导层内产生极强的驻波场分布。这是由于大部分入射光能量都集中在共振中心波长附近,因而可以较好的耦合入波导内,光被暂时局域在波导层内传输,从而在出射面产生较大的位移。然而对于小光束入射的情况,随着入射光频谱的增加,波导对于

光的约束能力也随之下降,从图 6(b)中可见,有相当一部分能量直接就被透射掉了。这些反映在整个器件的光谱响应上,表现为谐振波长附近整体反射率的下降,以及整体位移量的降低。

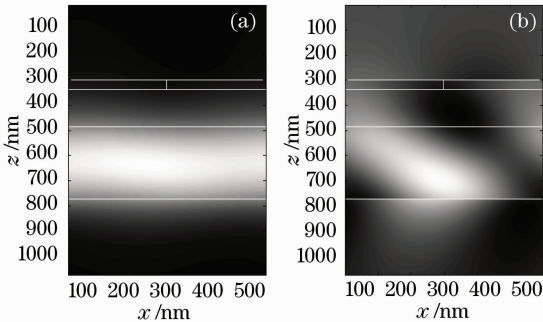


图 6 电场强度分布图。(a) $g=500\ \mu\text{m}$;(b) $g=250\ \mu\text{m}$

Fig. 6 Computed electric intensity inside the structure for incident light with beam size of (a) $500\ \mu\text{m}$ and; (b) $250\ \mu\text{m}$

5 结 论

本文着重研究了导模共振滤光片中的古斯-亨兴位移效应与光束形变现象。模拟结果表明,这种结构理论上能产生几百倍波长量级的位移量,同时位移最大的光对应的反射率也最大。对比稳态相位法与角谱展开法可以发现,入射光束腰宽对于位移量有较大的影响。且当入射光斑较小时会发生光束展宽与变形。对于导模共振滤光片表面横向位移与形变的了解有助于精确分析该器件应用于微光学系统时的光学性能,同时基于位移量对波长和角度这种强烈的敏感性,可望基于这种结构开发超精细频谱或角度分析器件。

参 考 文 献

- S. Zhang, T. Tamir. Spatial modifications of Gaussian beams diffracted by reflection gratings [J]. *Opt. Soc. Am. A*, 1989, **6**: 1368
- M. Gerken, D. A. B. Miller. Multilayer thin-film structures with high spatial dispersion [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**: 1330~1345
- X. Liu, X. Sun, P. Gu. Enhanced superprism effect based on positive/negative lateral shift of reflective beam in a Fabry-Perot filter [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**: 2321~2323
- X. Sun, P. Gu, M. Li *et al.*. Tunable spatial demultiplexer based on the Fabry-Perot filter [J]. *Optics Express*, 2006, **14**: 8470~8475
- X Yin, L Hesselink Goos-Hänchen shift surface plasmon resonance sensor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 89, 261108
- F. Schreier, M. Schmitz, O. Bryngdahl. Beam displacement at diffractive structures under resonance conditions [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**: 576~578
- F. Schreier, M. Schmitz, O. Bryngdahl. Pulse delay at diffractive structures under resonance conditions [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**: 1337~1339
- S. S. Wang, R. Magnusson. Multilayer waveguide-grating filters [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**: 2414~2420
- G. Niederer, H. P. Herzig, J. Shamir *et al.*. Tunable, oblique incidence resonant grating filter for telecommunications [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**: 1683~1694
- J. A. Kong, B. L. Wu, Y. Zhang. A unique lateral displacement of a Gaussian beam transmitted through a slab with negative permittivity and permeability [J]. *Microwave. Opt. Technol. Lett.*, 2002, **33** (2): 136~139
- M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**: 811~818
- Ma J Y, Liu S *et al.*. Design of reflection resonant grating filters [J]. *Acta Physica Sinica.*, 2008, **57**(2): 827
麻健勇,刘世杰等. 反射型导模共振滤波器设计[J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 827
- M. Li, X. Liu, J. Zhang *et al.*. Rigorous analysis of the spatial dispersion effect in multilayer thin-film coatings [J]. *Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**: 2328
- Chen Haixing, Gu Peifu, Lü Weige *et al.*. Superprism effect in thin film fabry-pérot filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26** (1): 157~160
陈海星,顾培夫,吕维阁等. 薄膜法布里-珀罗滤光片中的超棱镜效应[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 157~160
- Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Reflection spectra properties of guided-mode resonance filters with buffer layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1425~1428
王振华,吴永刚,桑田等. 带缓冲层的导模共振滤光片反射光谱特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1425~1428
- Zhang Dawei, Yuan Limeng, Chen Jiabi *et al.*. Design of guided mode resonant filters for authentication applications through azimuthal angles varying [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 776~778