

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0210-03

# 增强近场的测量方案及 Goos-Hänchen 位移的共振增强

段 毅<sup>1,2</sup>, 杨晓燕<sup>1</sup>, 李春芳<sup>1,3</sup>, 张纪岳<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068)  
(<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039; <sup>3</sup>上海大学理学院物理系, 上海 200444)

**摘要** 光在受抑全内反射过程中 Goos-Hänchen(GH)位移会由于光在第三个区域中的耦合输出而减小。而在镀有电介质膜的受抑全反射结构中,由于光在介质膜内的共振,可使反射光束、透射光束的 GH 位移得到极大的增强。在共振点上,光疏介质内的衰减场强也会得到增强。为了测量增强的衰减场,可采用具有耦合输出的类似于受抑全内反射的结构。研究表明,在此结构中反射光束和透射光束 GH 位移与入射角大小及薄膜厚度有关,当空气层达到一定厚度时,反射光束的位移等于透射光束位移的两倍。

**关键词** 物理光学;有限光束;增强近场测量方案;电介质膜;受抑全内反射

**中图分类号** O435.1 **文献标识码** A

## Measurement of Enhanced Near Field and Resonant Enhancement of Goos-Hänchen Shift

DUAN Tao<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-yan<sup>1</sup>, LI Chun-fang<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji-yue<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xian, Shaanxi 710068, China)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)  
(<sup>3</sup> Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract** It is predicted that the Goos-Hänchen (GH) shift of both reflected and transmitted light beams in the sketch of thin-film frustrated total reflection can be resonantly enhanced. At same time the evanescent wave field in the medium of lower refractive index is still enhanced. In order to measure enhanced evanescent wave field, sketch of frustrated total reflection is used. The results indicate that the GH shifts of reflected and transmitted wave beams can be modulated by changing incident angle and the thickness of the thin film. When the thickness of the vacuum layer satisfies some condition, the GH shift of transmitted beams are half approximately of the reflected beam.

**Key words** physical optics; finite-sized light beam; measurement of enhanced near field; thin dielectric film; frustrated total reflection

## 1 引 言

当光束从光密介质入射到光疏介质,入射角大于临界角时发生全反射,反射光束在入射面内相对于几何反射光束会产生一段位移,这段位移被称为 Goos-Hänchen(GH)<sup>[1,2]</sup>位移。理论和实践证明, GH 被应用于声学<sup>[3]</sup>、薄膜光学<sup>[4]</sup>、量子力学等领域中。在全反射结构中折射率较低的介质中的场为衰减场,通常 GH 位移与衰减场穿透深度成正比<sup>[5]</sup>。在光学领域,衰减场穿透深度很小<sup>[6]</sup>,全反射光束位

移量只有波长量级<sup>[7,8]</sup>。而在受抑全反射过程中 GH 位移会由于第三个区域的耦合输出而减小,实验上很难测量。

最近, Yin Xiaobo 等<sup>[9]</sup>在棱镜表面镀一层金属膜形成量子阱,使得反射光束的 GH 位移共振增强而透射光束仍只有波长量级。本文则通过对称双棱镜任意表面镀一层折射率较小的电介质膜使光在介质膜内共振,反射光束、透射光束的 GH 位移达波长的数百倍,同时光疏介质内的衰减场强也会得

**基金项目:** 国家自然科学基金(60377025, 60407007)、上海市教委基金(04AC99)、上海市青年科技启明星跟踪计划(03QMH1405)、上海市科委基础研究重点项目(04JC14036)和上海市重点学科(T0104)资助课题。

**作者简介:** 段 毅(1980—),女,陕西西安人,中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室博士研究生,主要从事光信息传输方面的研究。E-mail: duantao@opt. ac. cn

到增强。为了测量增强的衰减场,可采用具有耦合输出的受抑全内反射的结构,通过测量透射率变化趋势来确定衰减场趋势。

## 2 稳态相位法

物理模型如图 1 所示,折射率为  $n_g$  的对称直角双棱镜任意表面镀厚度为  $a$ ,折射率为  $n_f$  的电介质薄膜,薄膜与另一表面间距离为  $d$ ,折射率  $n_v=1$  的空气层,假设各介质均为非磁性介质,折射率关系为

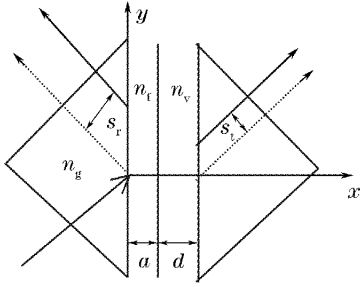


图 1 任意面镀电介质薄膜的对称双棱镜示意图  
Fig. 1 Schematic of symmetric double-prism coating thin film onto either surface of them

$$n_g > n_f > n_v.$$

假设入射光束为不同方向传输的平面波包,光束中心对应的入射角为  $\theta_0$  ( $\theta_0$  小于棱镜与薄膜界面的临界角  $\theta_{ic}$  而大于棱镜与空气界面的临界角  $\theta_{vc}$ ) 的光束从左向右入射到棱镜与薄膜界面上,时间依赖关系为  $\exp(-i\omega t)$ 。入射光束为 TE 波的电场强度分布为  $E=A(k_y)\exp[i(k_{gx}x+k_yy)]z$ 。计算得反射、透射系数分别为

$$r(k_y) = \frac{g_2 \exp(i\phi_1)}{g_1 \exp(-i\phi_2)},$$

$$t(k_y) = \frac{4k_{fx}k_{vx}}{\Delta_{fv}\Delta_{vg}g_1} \exp(i\phi_1),$$

其中

$$k_{ix} = k_i \cos \theta_i, k_i = n_i k (i = g, f, v), k_{vx} = i\kappa,$$

$$\kappa = (k_y^2 - k_v^2)^{1/2}, k_y = k_g \sin \theta_g,$$

$$\cos \theta_v = i(\sin^2 \theta_g / \sin^2 \theta_{vc} - 1)^{1/2},$$

$$k_{fx} + k_{vx} = \Delta_{fv} \exp(i\delta_{fv}),$$

$$k_{gx} + k_{vx} = \Delta_{vg} \exp(i\delta_{vg}),$$

其中  $\delta_{fv}, \delta_{vg}$  分别为薄膜与空气层界面、棱镜与空气层界面光束的相移。当空气层厚度  $d$  满足一定条件使得  $\kappa d > 1, \exp(\kappa d) > \exp(-\kappa d)$  时,  $g_1, g_2$  和  $\phi_1, \phi_2$  的关系为

$$g_1 \exp(-i\phi_1) = \rho_1 \exp(\kappa d) \cos(\varphi_1 - \delta_{vg}) - i\rho_1 \exp(\kappa d) \sin(\varphi_1 - \delta_{vg}) = \rho_1 \exp(\kappa d) \exp[-i(\varphi_1 - \delta_{vg})], \quad (1)$$

$$g_2 \exp(-i\phi_2) = \rho_1 \exp(\kappa d) \cos(\varphi_1 + \delta_{vg}) + i\rho_1 \exp(\kappa d) \sin(\varphi_1 + \delta_{vg}) = \rho_1 \exp(\kappa d) \exp[i(\varphi_1 + \delta_{vg})], \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} \cos(k_{fx}a - \delta_{fv}) + i \frac{k_{fx}}{k_{gx}} \sin(k_{fx}a - \delta_{fv}) = \rho_1 \exp(i\varphi_1), \\ \cos(k_{fx}a + \delta_{fv}) + i \frac{k_{fx}}{k_{gx}} \sin(k_{fx}a + \delta_{fv}) = \rho_2 \exp(i\varphi_2), \end{cases} \quad (3)$$

反射、透射光束的 GH 位移被定义为反射、透射光束中心相对入射光束中心的位移,如图 1 所示,由反射率、透射率公式得

$$r(k_y) = |r(k_y)| \exp[i(\phi_1 + \phi_2)],$$

$$t(k_y) = |t(k_y)| \exp(i\phi_1),$$

可知反射、透射光束的相移。由稳态相位法<sup>[10]</sup>知,反射光束、透射光束的 GH 位移是相移相对入射角的导数。

## 3 结果分析

根据(1)式,(2)式以及反射系数和透射系数,反

射光束、透射光束的相移近似地写为  $\phi_1 + \phi_2 = 2\varphi_1$ ,  $\phi_1 = \varphi_1 - \delta_{vg}$ ,由稳态相位法计算可近似得到

$$\begin{cases} s_r = -\frac{2}{k_g} \frac{d\varphi_1}{d\theta_g} \Big|_{\theta_g=\theta_0}, \\ s_t = -\frac{1}{k_g} \left( \frac{d\varphi_1}{d\theta_g} - \frac{d\delta_{vg}}{d\theta_g} \right) \Big|_{\theta_g=\theta_0}, \end{cases} \quad (4)$$

其中  $d\delta_{vg}/d\theta_g$  是单界面全反射位移的一半,在(4)式中可被忽略,则  $s_r \approx 2s_t$ 。而在  $a=0$  的没有镀膜的双棱镜系统中反射光束和透射光束的 GH 位移相等<sup>[11]</sup>。

图 2 给出反射光束、透射光束 GH 位移及透射率与薄膜厚度的关系,其中  $n_g = 1.78, n_f = 1.41,$

$n_v=1$ , 入射角  $\theta_0 = 51^\circ$  (保证入射角小于但接近  $\theta_{ic} = 52.38^\circ$ ,  $\theta_{ic} - \theta_0 \gg \delta\theta$ ,  $\delta\theta$  为光束的发散角), 空气层厚度  $d = 0.2\lambda$ 。反射光束位移为实线, 透射光束的位移为虚线, 透射率为点虚线。

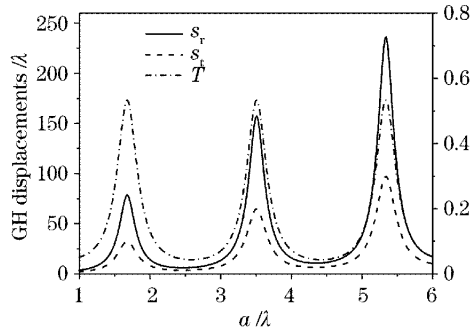


图2 反射光束、透射光束 GH 位移及透射率随薄膜厚度的变化

Fig.2 Dependence of the GH displacements of TE reflected beam, transmitted beam and transmitted intensity on thickness of thin film

图3给出了反射光束、透射光束的 GH 位移及透射率与入射角的关系, 其中薄膜厚度  $a = 3\lambda$ , 其他参量与图2的相同。

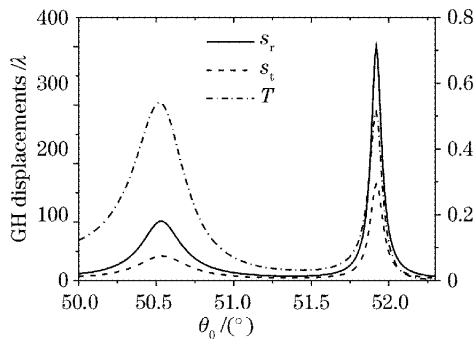


图3 反射光束、透射光束 GH 位移及透射率随入射角的变化

Fig.3 Dependence of the GH displacements of TE reflected beam, transmitted beam and transmitted intensity on incidence angle

由图2,3知, GH 位移随薄膜厚度及入射角变化产生振荡, 当薄膜厚度或入射角大小满足共振条件时, GH 位移可增大到波长的数百倍。透射光束的位移只有反射光束位移的一半。

在全反射结构中透射光束的 GH 位移增强时, 电场在空气层中的衰减场也共振增强。在受抑全反

射结构中右边棱镜将倏逝波耦合输出, 透射波的强度表现了空气层中衰减场的强度, 如图2,3中的透射率反映了衰减波场的强度, 可看出反射光束、透射光束的 GH 位移增大时透射率也共振增强。光在介质膜内共振, 可使反射光束的 GH 位移得到极大的增强, 同时光疏介质内的衰减场强也会得到增强。

## 4 结 论

在任意表面镀电介质膜的对称双棱镜, 当入射角小于但接近棱镜与电介质膜界面的临界角时, 反射光束、透射光束的 GH 位移同时共振增强。GH 位移随电解质薄膜厚度、入射角的大小变化产生周期性的振荡, 共振点最大可达波长的数百倍。GH 位移与透射场的强度有关, 透射场强度最大时 GH 位移共振增强。另外, 当空气层满足一定厚度时透射光束的 GH 位移是反射光束 GH 位移的一半。

## 参 考 文 献

- 1 F. Goos, H. Hänchen. Ein neuer und fundamentaler versuch zur totalreflexion [J]. *Ann. Physik*, 1947, **1**(6): 333~346
- 2 F. Goos, H. Hänchen. Neumessung des strahlversetzungeffektes bei totalreflexion [J]. *Ann. Physik*, 1949, **5**(3): 251~252
- 3 R. Briers, O. Leroy, G. Shkerdin. Bounded beam interaction with thin inclusions. Characterization by phase differences at Rayleigh angle incidence [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, **108**(4): 1622~1630
- 4 N. J. Harrick. Study of physics and chemistry of surfaces from frustrated total internal reflections [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1960, **4**(5): 224~226
- 5 I. Newton. Opticks (1704) [M]. Reprinted edition, Dover, NY, 1952. 215~232
- 6 E. Pfléghaar, A. Marseille, A. Weis. Quantitative investigation of the effect of resonant absorbers on the Goos-Hänchen shift [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(15): 2281~2284
- 7 Herve Gilles, Sylvain Girard, Joseph Hamel. Simple technique for measuring the Goos-Hänchen effect with polarization modulation and a position-sensitive detector [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(16): 1421~1423
- 8 Fabien Bretenaker, Albert Le Floch, Laurent Dutriaux. Direct measurement of the optical Goos-Hänchen effect in lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(7): 931~933
- 9 Xiaobo Yin, Lambertus Hesselink, Zhaowei Liu *et al.*. Large positive and negative lateral optical beam displacements due to surface plasmon resonance [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(3): 372~374
- 10 Chunfang Li. Comment on "Photonic tunneling time in frustrated total internal reflection" [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **65**(6): 066101-1~066101-3
- 11 J. J. Cowan, B. Anicin. Longitudinal and transverse displacements of a bounded microwave beam at total internal reflection [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(10): 1307~1314