

文章编号: 0253-2239(2006)11-1744-5

# 电介质膜对受抑全内反射结构中古斯-汉欣位移的增强\*

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

1 中国科学院西安光机所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068  
2 上海大学理学院物理系, 上海 200444  
3 中国科学院研究生院, 北京 100039

**摘要:** 受抑全反射结构中, 反射光束和透射光束的古斯-汉欣(Goos-Hänchen)位移同时存在, 对称双棱镜结构的受抑全反射古斯-汉欣位移通常只有波长量级, 在实验中很难测量。计算了在入射角大于棱镜与空气界面的临界角小于棱镜与薄膜界面临界角时, 镀有电介质膜的对称双棱镜的受抑全反射过程中入射光束的反射系数和透射系数的复数表达式。利用稳态相位法计算出透射光束和全反射光束的古斯-汉欣位移。结果表明, 反射光束和透射光束古斯-汉欣位移量相同, 与入射角大小、薄膜厚度以及空气层厚度有关。在入射角小于但接近棱镜与薄膜界面的临界角, 薄膜厚度和空气层厚度一定时, 古斯-汉欣位移量共振增强达到波长的数百倍。

**关键词:** 物理光学; 有限波束; 稳态相位法; 受抑全反射; 共振增强  
中图分类号: O431.2 文献标识码: A

## Thin-Film Enhanced Goos-Hänchen Shift in Frustrated Total Reflection Configuration

Duan Tao<sup>1,3</sup> Li Chunfang<sup>1,2</sup> Yang Xiaoyan<sup>1</sup> Zhang Jiyue<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xian 710068  
2 Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444  
3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

**Abstract:** Goos-Hänchen (GH) shifts of reflected and transmitted wave beams in frustrated total reflection structure occur simultaneously. Commonly, GH shift of frustrated-total-reflection in symmetric double-prism configuration is only of the order of the wavelength. It's difficult to measure it in experiment. According to Maxwell equations, the complex expressions of reflection coefficient and transmission coefficient are presented when the incident angle is less than the critical angle of prism-film interface but larger than the critical angle of prism-air interface in the thin-film enhanced frustrated total reflection configuration. The GH shifts of reflected and transmitted wave beams are investigated by stationary-phase approach. The results show that the GH shifts of reflected and transmitted wave beams are equal and can be modulated by changing the incident angle and thickness of thin film and air gap. When the incident angle is less than, but close to the critical angle of prism-film interface, the magnitude of the shifts is enhanced by a factor of  $10^2$  with given thickness of thin film and air gap.

**Key words:** physical optics; finite-sized light beam; stationary-phase approach; frustrated total reflection; Resonance enhancement

\* 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, 中国科学院西安光机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

导师简介: 李春芳(1964~), 男, 山西人, 中国科学院西安光学精密机械研究所研究员, 主要从事光信息传输方面的研究。E-mail: chunfang@opt.ac.cn

收稿日期: 2005-09-21; 收到修改稿日期: 2006-04-01

## 1 引言

光束在电介质分界面上发生全反射时,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,这个位移被称为古斯-汉欣(Goos-Hänchen, GH)位移<sup>[1,2]</sup>。理论和实验表明,古斯-汉欣位移应用于声学<sup>[3]</sup>、表面光学、薄膜光学<sup>[4]</sup>、非线性光学<sup>[5,6]</sup>以及量子力学<sup>[7]</sup>等领域的研究中,在金属材料<sup>[8,9]</sup>负折射率材料<sup>[10]</sup>、吸收材料<sup>[11,12]</sup>及空间色散材料<sup>[13]</sup>等中出现的古斯-汉欣位移的各种新的现象受着广泛的关注。在受抑全反射结构中,反射光束和透射光束的古斯-汉欣位移量同时存在<sup>[14,15]</sup>,但是通常受抑全反射过程中古斯-汉欣位移会由于光在第三个区域中的耦合输出而减小只有波长量级<sup>[16]</sup>,在实验中很难测量,在一定程度上阻碍了在实际中的应用。

最近, Broe 和 Keller<sup>[9]</sup>发现在入射角小于临界角时,若在相对的两个对称棱镜表面分别镀一层很薄的金属膜形成量子阱,由于表面电流被棱镜表面的量子阱增强使得反射波束古斯-汉欣位移得到增强,但透射波束的位移仍为波长量级。Broe 和 Keller 在讨论古斯-汉欣位移共振增强时利用金属膜的特有性质。而我们的研究表明, Broe 和 Keller 所用的金属量子阱并不是必要的,若将金属膜换成一定厚度的电介质膜,当入射角小于棱镜与薄膜界面的临界角而大于棱镜与空气界面的临界角时,反射光束和透射光束的位移均会产生共振增强。

本文从麦克斯韦方程组及边界条件出发,计算了镀电介质膜的对称双棱镜结构中,当入射角小于棱镜和电介质膜界面的全反射临界角,同时为保持受抑全内反射特征,入射角又大于棱镜与空气界面的临界角时,入射光束的反射系数和透射系数的复数表达式。利用稳态相位法求得反射光束及透射光束古斯-汉欣位移的共振增强,分析了共振增强的古斯-汉欣位移与光束的入射角、薄膜厚度及空气层厚度的关系。

## 2 物理模型

如图 1 所示,折射率为  $n_1$  的对称直角双棱镜斜边平行地靠在一起分别镀有厚度为  $a$ , 折射率为  $n_2$  电介质薄膜,薄膜间的距离为  $d$ , 折射率为  $n_3=1$  的空气层,  $D$  为反射光束的古斯-汉欣位移。假设各介质均为非磁性介质,其折射率的关系为  $n_1 > n_2 > n_3$ 。

假设入射光束为不同方向传输的平面波包,频率为  $\omega$ , 光束中心对应的入射角为  $\theta_1$  [ $\theta_1$  小于棱镜与薄膜界面的临界角  $\theta_{1c} = \arcsin(n_2/n_1)$  而大于棱镜与空

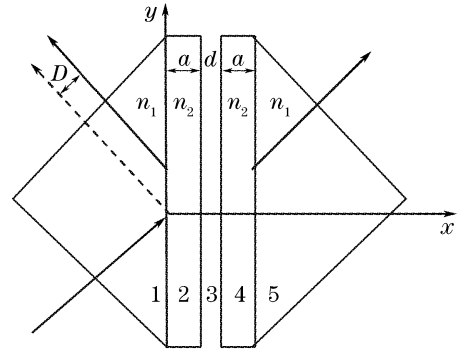


图 1 镀电介质薄膜的对称双棱镜示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the thin film enhanced symmetric double-prism

气界面的临界角  $\theta_{2c} = \arcsin(n_3/n_1)$ ,  $\theta_{1c} > \theta_1 > \theta_{2c}$ ] 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  $\exp(-i\omega t)$ 。

设入射光束为 TE 偏振波,电场强度的傅里叶分量为:  $\mathbf{E}_{in} = E_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}) \mathbf{e}_z$ , 镀有电介质薄膜对称双棱镜各区域对应的电场强度分别为

$$\mathbf{E}_1 = [A \exp(ik_{1x}x) + B \exp(-ik_{1x}x)] \exp(ik_y y) \mathbf{e}_z, \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_2 = \{C \exp[ik_{2x}(x-a)] + D \exp[-ik_{2x}(x-a)]\} \exp(ik_y y) \mathbf{e}_z, \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_3 = \{F \exp[ik_{3x}(x-a-d)] + H \exp[-ik_{3x}(x-a-d)]\} \exp(ik_y y) \mathbf{e}_z, \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_4 = \{I \exp[ik_{2x}(x-2a-d)] + J \exp[-ik_{2x}(x-2a-d)]\} \exp(ik_y y) \mathbf{e}_z, \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_5 = K \exp[ik_{1x}(x-2a-d)] \exp(ik_y y) \mathbf{e}_z, \quad (5)$$

其中  $k_{ix} = k_i \cos \theta_i$ ,  $k_i = (\epsilon_i \mu_0 \omega^2)^{1/2}$  ( $i = 1, 2, 3$ );  $k_y = k_1 \sin \theta_1 = k_2 \sin \theta_2$ ;  $k_{3x} = i\kappa$ ;  $\epsilon_1$  为棱镜的介电常量,  $\epsilon_2$  为薄膜的介电常量,  $\epsilon_0$  为空气的介电常量,  $\mu_0$  为介质磁导率。由斯涅耳(Snell)定律决定:  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ,  $\cos \theta_3 = i(\sin^2 \theta_1 / \sin^2 \theta_{2c} - 1)^{1/2}$ 。整个系统的透射系数、反射系数分别是透射光束振幅、反射光束振幅和入射光束振幅的比值,即  $t(k_y) = K/A$ ;  $r(k_y) = B/A$ 。根据方程组(1)~(5)求得:

$$\begin{cases} A = \frac{\Delta^2}{4ik_{1x}\kappa} [\rho_1^2 \exp(-2i\gamma_1) \exp(\kappa d) - \rho_2^2 \exp(-2i\gamma_2) \exp(-\kappa d)] K, \\ B = \frac{\Delta^2}{4ik_{1x}\kappa} [\rho_1^2 \exp(\kappa d) - \rho_2^2 \exp(-\kappa d)] K. \end{cases} \quad (6)$$

利用麦克斯韦方程组及其边界条件可以求出透射系数和反射系数的表达式分别为

$$t(k_y) = G_1 \exp(i\Phi), \quad r(k_y) = G_2 \exp(i\Phi), \quad (7)$$

其中:

$$\tan \Phi = \frac{\exp(\kappa d) \rho_1^2 \sin 2\gamma_1 - \exp(-\kappa d) \rho_2^2 \sin 2\gamma_2}{\exp(\kappa d) \rho_1^2 \cos 2\gamma_1 - \exp(-\kappa d) \rho_2^2 \cos 2\gamma_2}, \quad (8)$$

$$G_1^2 = \frac{k_{1x}^2 \kappa^2}{\Delta_{23}^4} g^2, \quad (9)$$

$$G_2^2 = [\rho_1 \exp(\kappa d) - \rho_2 \exp(-\kappa d)]^2 g^2, \quad (10)$$

$$g^2 = \frac{\exp(2\kappa d) \rho_1^4 + \exp(-2\kappa d) \rho_2^4 - 2\rho_1^2 \rho_2^2 \cos 2(\gamma_1 - \gamma_2)}{[\exp(2\kappa d) \rho_1^4 \cos 4\gamma_1 + \exp(-2\kappa d) \rho_2^4 \cos 4\gamma_2 + 2\rho_1^2 \rho_2^2 \cos 2(\gamma_1 + \gamma_2)]^2}, \quad (11)$$

$$\rho_i^2 = \left( \frac{k_{1x}}{k_{2x}} \cos \alpha_i \right)^2 + \sin^2 \alpha_i, \quad (12)$$

$$\tan \gamma_i = \frac{k_{2x}}{k_{1x}} \tan \alpha_i, \quad (i = 1, 2) \quad (13)$$

$$\alpha_1 = \beta - \delta, \quad \alpha_2 = \beta + \delta, \quad (14)$$

$$\beta = k_{2x} a, \quad (15)$$

$$\Delta^2 = k_2^2 - k_3^2, \quad (16)$$

$$\tan \delta = \kappa / k_{2x}. \quad (17)$$

### 3 稳态相位法计算

由(7)式知透射系数和反射系数的指数因子相同,即透射光束与反射光束的古斯-汉欣相移相同。根据稳态相位分析方法<sup>[17,18]</sup>  $D = -\frac{1}{k_1} \frac{d\Phi}{d\theta} \Big|_{\theta=\theta_1}$ , 由(8)式计算得镀膜电介质薄膜的对称双棱镜结构中反射光束和透射光束的古斯-汉欣位移量相同:

$$D = -\frac{1}{G_0^2 k_1^2} \left\{ 2\rho_1^2 \rho_2^2 \sin 2(\gamma_1 - \gamma_2) \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_3 \cos \theta_3} \kappa d \tan \theta_3 - 2\rho_1^2 \rho_2^2 \cos 2(\gamma_1 - \gamma_2) (s_1 - s_2) - 2\exp(2\kappa d) \rho_1^4 s_1 - 2\exp(-2\kappa d) \rho_2^4 s_2 + 2 \frac{k_{1x}^2}{k_{2x}^2} \sin 2(\gamma_1 - \gamma_2) (\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha_1 - \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_1) \left( \tan \theta_1 - \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_2} \tan \theta_2 \right) + \left( 1 - \frac{k_{1x}^2}{k_{2x}^2} \right) \sin 2(\gamma_1 - \gamma_2) \left[ (\rho_2^2 \sin 2\alpha_1 - \rho_1^2 \sin 2\alpha_2) \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_2} \beta \tan \theta_2 - (\rho_2^2 \sin 2\alpha_1 + \rho_1^2 \sin 2\alpha_2) l \right] \right\}, \quad (18)$$

其中:

$$l = \frac{d\delta_{23}}{d\theta_1} = -\frac{\kappa \cdot k_{2x}}{\Delta^2} \left( \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_3 \cos \theta_3} \tan \theta_3 - \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_2} \tan \theta_2 \right), \quad (19)$$

$$s_i = \gamma'_i = \frac{1}{\rho_i^2} \left[ \frac{k_{1x}}{2k_{2x}} \sin 2\alpha_i \tan \theta_1 - \frac{k_{1x}}{2k_{2x}} (\sin 2\alpha_i - 2\beta) \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_2} \tan \theta_2 + \frac{k_{1x} l}{k_{2x}} \right], \quad (i = 1, 2), \quad (20)$$

$$G_0^2 = \exp(2\kappa d) \rho_1^4 + \exp(-2\kappa d) \rho_2^4 - 2\rho_1^2 \rho_2^2 \cos 2(\gamma_1 - \gamma_2). \quad (21)$$

根据(18)式,反射光束与透射光束的古斯-汉欣位移和入射角大小,薄膜厚度及空气层的厚度有关。 $\delta_{23}$ 表示光束在2、3界面上透射光束相对入射光束产生的相移(反射光束的相移为负),由稳态相位法知(19)式  $l$  是  $\delta_{23}$  的一阶导数表示23界面上的古斯-汉欣位移。 $\gamma_1, \gamma_2$  表示光束在1、2、3部分组成的结构中反射光束和透射光束的古斯-汉欣相移,故(20)式  $s_1, s_2$  是  $\gamma_1, \gamma_2$  的一阶导数表示镀膜棱镜的反射光束、透射光束相对入射光束的位移<sup>[19]</sup>。图2、图3、图4分别表示(18)式的结果,古斯-汉欣位移随薄膜厚度、空气层厚度、入射角的变化趋势。

如图2可看出古斯-汉欣位移  $D$  随薄膜厚度  $a$  增加产生周期性的振荡,在特定的薄膜厚度产生共振增强。计算中入射角  $\theta_1$  满足小于棱镜与薄膜界面的临界角  $\theta_{1c} = 52.39^\circ$  而大于棱镜与空气界面的临界角  $\theta_{2c} = 34.18^\circ$ , 取  $\theta_1 = 50^\circ, n_1 = 1.78, n_2 = 1.41, n_3 = 1, d = 0.5\lambda$ 。

图3给出古斯-汉欣位移量  $D$  随空气层厚度  $d$  的变化曲线,计算中  $a = 4\lambda$  其他参量取值与图2相同,可看出,空气层厚度小于波长0.5倍时位移量随空气层厚度呈线性增加趋势,在厚度大于波长的0.5倍时位移量达到饱和基本保持不变。

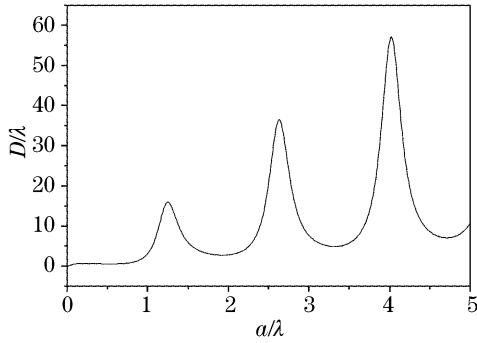


图 2 反射光束和透射光束古斯-汉欣位移量随薄膜厚度的变化

Fig. 2 Dependence of the Goos-Hänchen shift of reflected and transmitted light beams on the thickness of thin film

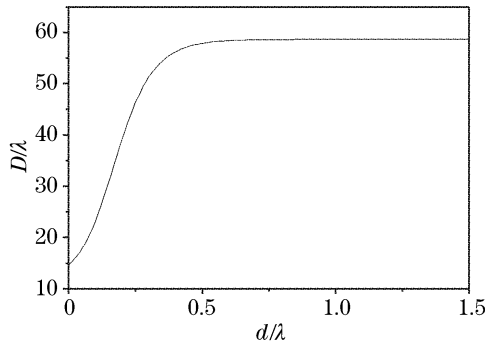


图 3 反射光束和透射光束古斯-汉欣位移量随空气层厚度的变化

Fig. 3 Dependence of the Goos-Hänchen shift of reflected and transmitted light beams on the thickness of air gap

图 4 为古斯-汉欣位移量  $D$  随入射角  $\theta_1$  增大呈周期性的振荡, 在入射角接近棱镜与薄膜界面的临界角时产生极大值。计算中  $d=0.5\lambda, a=4\lambda$ 。入射角  $\theta_1$  满足大于棱镜与空气界面的临界角  $\theta_{2c}=34.18^\circ$  而小于棱镜与薄膜界面的临界角  $\theta_{1c}=52.39^\circ$ 。

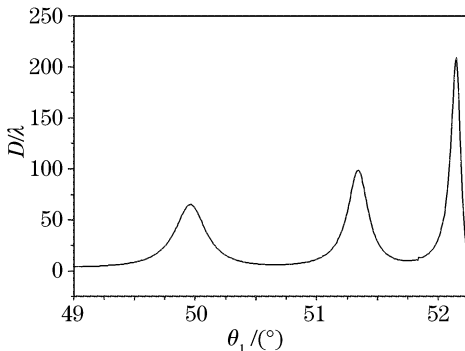


图 4 反射光束和透射光束古斯-汉欣位移量随入射角的变化曲线

Fig. 4 Dependence of the Goos-Hänchen shift of reflected and transmitted light beams on the incident angle

### 4 结果分析

Broe 和 Keller 的文章中对金属膜的厚度没有给出具体的量值, 只是说明是很薄的一层膜, 所以没有给出古斯-汉欣位移与金属薄膜厚度的关系。我们研究发现, 如图 2 电介质膜厚度对古斯-汉欣位移的影响是非常显著的。如果  $G_0^2$  取极小值则位移  $D$  取极大值。由于当空气层厚度一定入射角接近棱镜与薄膜界面的临界角时  $\theta_2 \rightarrow \pi/2, k_{2x} \rightarrow 0$ 。由 (17) 式知  $\delta \rightarrow \pi/2$ , 由 (12) 式、(14) 式、(17) 式、(21) 式知

$$G_0^2 = \left( \frac{k_{1x}}{k_{2x}} \sin \beta \right)^4 [\exp(\kappa d) - \exp(-\kappa d)]^2, \tag{22}$$

$G_0^2$  取极小值的条件是

$$\beta = k_{2x} a = m\pi, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \tag{23}$$

(23) 式正是古斯-汉欣位移量  $D$  随薄膜厚度  $a$  变化时发生共振的条件, 可看出古斯-汉欣位移量  $D$  随着薄膜厚度  $a$  的增加呈周期性的变化, 这样就可以通过薄膜厚度  $a$  来控制古斯-汉欣位移的大小。

Broe 和 Keller 在分析空气层与位移量的关系时, 只讨论了两个不同厚度的空气层对古斯-汉欣位移的影响, 由于空气层的厚度都很小(与波长相当), 所以得出了空气层间距大的结构中古斯-汉欣位移的共振增强更显著。如图 3, 与我们研究发现的空气层厚度在 0.5 倍波长以内基本呈线性增大的现象相似。而我们还得出空气层达到 0.5 波长厚度以后, 古斯-汉欣位移逐渐趋于饱和不再随空气层厚度的变化而变化。

在镀薄金属膜的受抑全反射结构中, 反射光束古斯-汉欣位移共振增强, 但是透射光束古斯-汉欣位移依然只有波长量级。而在镀一定厚度的电介质的对称受抑全反射结构中, 由于此模型为对称结构, 根据反射系数和透射系数表达式 (7) 知, 反射系数和透射系数表达式的指数因子相同, 模不同。利用稳态相位法知反射光束和透射光束古斯-汉欣位移相同。区别仅在反射光束和透射光束的强度不同。故不但反射光束古斯-汉欣位移可调节, 透射光束古斯-汉欣位移大小亦可调节, 对于将此现象进一步在实际中应用很有意义。

### 5 结 论

在薄膜受抑全反射结构中, 当光束入射角满足小于棱镜与薄膜界面的临界角而大于棱镜与空气界面的临界角时光束的古斯-汉欣位移随入射角的变化产生共振增强, 在入射角接近棱镜与薄膜界面的

临界角时达到最大值,反射光束和透射光束的古斯-汉欣位移可提高到波长的数百倍。并且位移量可通过改变入射角大小、薄膜厚度及空气层厚度来调节。由于对称结构反射光束和透射光束的位移量相同。最后,镀膜对称双棱镜结构中的光学现象将会在诸如测量表面粗糙度的测定、光学传感、新型全光开关、光束位移调制器等一系列光学器件中应用。

### 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 Strahlversetzungeffktes 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 O. Emile, T. Galatyan, A. LeFloch *et al.*. Measurement of the nonlinear Goos-Hänchen effect for Gaussian optical beams[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(8): 1511~1513
- 6 Bradley M. Jost, Abdul-Azeez R. Al-Rashed, Bahaa E. A. Saleh. Observation of the Goos-Hänchen effect in a phase-conjugate mirror[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(11): 2233~2235
- 7 V. K. Ignatovich. Neutron reflection from condensed matter, the Goos-Hänchen effect and coherence [J]. *Phys. Lett. A*, 2004, **322**: 36
- 8 Xiaobo Yin, Lambertus Hesselink. Large positive and negative lateral optical beam displacements due to surface plasmon resonance[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(3): 372~374
- 9 Jacob Broe, Ole Keller. Quantum-well enhancement of the Goos-Hänchen shift for p-polarized beams in a two-prism configuration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(6): 1212~1222
- 10 I. V. Shadrivov, A. A. Zharov, Y. S. Kivshar. Giant Goos-Hänchen effect at the reflection from left-handed metamaterials [J]. *arXiv:physics*, 2003, **1**: 0305032
- 11 Walter J. Wild, C. Lee Giles. Goos-Hänchen shifts from absorbing media[J]. *Phys. Rev. A*, 1982, **25**(4): 2099~2101
- 12 H. M. Lai, S. W. Chan. Large and Negative Goos-Hänchen shift near the Brewster dip on reflection from weakly absorbing media[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 680~682
- 13 A. Puri, D. N. Pattanayak, J. L. Birman. Resonance effects on total internal reflection and lateral (Goos-Hänchen) beam displacement at the interface between nonlocal and local dielectric [J]. *Phys. Rev. B*, 1983, **28**(10): 5877~5886
- 14 A. Haibel, G. Nimtz, A. A. Stahlhofen. Frustrated total reflection; double-prism revisited [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **63**(4): 047601
- 15 Zhu Qibiao, Li chunfang, Chen Xi. Goos-Hänchen shift of the transmitted light beam in a two-prism configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 673~677 (in Chinese)  
朱绮彪,李春芳,陈 玺. 双棱镜结构中透射光束的古斯-汉欣位移[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 673~677
- 16 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
- 17 Aephraim M. Steinberg, Raymond Y. Chiao. Tunneling delay times in one and two dimensions[J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **49**(5): 3283~3295
- 18 Chunfang Li. Comment on "Photonic tunneling time in frustrated total internal reflection" [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **65**(6): 066101-1~066101-3
- 19 Li Chun-Fang, Yang Xiao-Yan, Zhang Jiyue. Thin-film enhanced Goos-Hänchen shift[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(Suppl): 1~3 (in Chinese)  
李春芳,杨晓燕,张纪岳. 薄膜增强的 Goos-Hänchen 位移[J]. *中国激光*, 2004, **31**(增刊): 1~3