

文章编号: 0258-7025(2006)06-0753-03

电介质膜增强的 Goos-Hänchen 位移 的微波测量

李春芳^{1,2}, 杨晓燕³, 段 骏¹, 张纪岳¹

(¹ 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)
(² 上海大学理学院物理系, 上海 200444; ³ 华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要 如果在折射率较高的电介质基底上镀一层折射率较低的电介质薄膜(介质膜的另一侧为折射率更低的介质,如空气),并且恰当选择基底内光束的入射角,使得光束在基底-介质膜界面上折射到薄膜内、在薄膜-空气界面上全反射,那么反射光束的 Goos-Hänchen(GH)位移在一定条件下会得到共振增强。采用微波技术直接地测量了这种 Goos-Hänchen 位移随电介质膜厚度的变化,测量结果与理论预言吻合得较好。

关键词 Goos-Hänchen 位移;共振增强;电介质膜;微波测量

中图分类号 O 484 **文献标识码** A

Microwave Measurement of Dielectric Film-Enhanced Goos-Hänchen Shift

LI Chun-fang^{1,2}, YANG Xiao-yan³, DUAN Tao¹, ZHANG Ji-yue¹

¹State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China

²Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China

³Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The Goos-Hänchen shift (GH shift) of reflected beam is resonance enhanced under some conditions when the incident beam transmits from the high-refractive index prism to the low-refractive index dielectric thin-film and is totally reflected from the film-air interface. In this paper, the GH shift versus the film thickness is directly measured by microwave technology. The experimental measurements confirm the theoretical prediction.

Key words Goos-Hänchen shift; resonance enhancement; dielectric film; microwave measurement

1 引 言

Goos-Hänchen (GH) 位移是指当一束光被电介质界面全反射时,反射光束在入射面内相对于几何反射光束的位移。虽然这个效应在 1947 年就在实验上观察到^[1],但对它的解释始终存在争议。与此有关的理论模型有稳态相位模型^[2]、能量传播模型^[3]、光线模型^[4,5]和形变光束模型^[6]。这种状态促使人们在更多的领域内研究这个现象,其中包括声学、等离子体物理、量子力学^[7]、表面物理和化学^[8]。

近年来 GH 位移与所谓的超光速现象联系在一起,从而又得到了人们进一步的关注^[9~11]。此外, GH 位移在光学器件中得到了一定的应用^[12,13]。

人们对 GH 效应的研究大多集中在理论上,实验研究的还不多,其中一个主要原因就是这个位移很小,通常只有波长的数量级,在单次反射的光学实验中很难观察到。到目前为止,除了非线性光学实验^[14~16],实验研究工作大体上有如下三种类型:1) GH 位移大小与光束的偏振状态有关,基于这个现象,在光学领域采用多次反射的方法从空间上把

收稿日期:2005-10-23;收到修改稿日期:2006-01-09

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

作者简介:李春芳(1964—),男,中国科学院西安光学精密机械研究所研究员,博士生导师,中国高等科学技术中心(世界实验室)协联成员,主要从事超光速现象和量子物理的研究。E-mail:chunfang@opt.ac.cn

TE 和 TM 光束分开^[1,17]; 2) 波长较长的微波的单次反射实验^[18,19]; 3) 最近在光学领域出现了利用光束位置灵敏探测器进行测量的单次反射实验^[20,21]。

近年来的理论和实验研究^[22~24]表明,如果在折射率较高的电介质基底上镀一层折射率较低的电介质薄膜(介质膜的另一侧为折射率更低的介质,如空气),并且恰当选择基底内光束的入射角,使得光束在基底-介质膜界面上折射到薄膜内、在薄膜-空气界面上全反射,那么反射光束的 GH 位移在一定条件下会得到共振增强。Kaiser 等^[22]曾采用成像方法对这种现象进行实验研究,最近 Girard 小组^[24]利用位置灵敏探测器测量了这种情况下的 GH 位移随光束入射角的变化情况。本文旨在采用成熟的微波技术测量这种有趣的光学效应。微波的波长比较长,可以利用这个特点在固定入射角的情况下测量厚度不同的薄膜所对应的 GH 位移,从而和理论结果进行比较。

2 理论分析

考虑如图 1 所示的结构,设棱镜基底材料的折射率为 n_s ,介质膜的折射率为 n_f ,空气的折射率为 n_u ,三者满足关系 $n_s > n_f > n_u$ 。据此,有两个全反射临界角, $\theta_{c1} = \arcsin(n_u/n_s)$ 和 $\theta_{c2} = \arcsin(n_f/n_s)$ 。若基底内光束的入射角 θ_0 满足条件 $\theta_{c2} > \theta_0 > \theta_{c1}$,则该光束在第一个界面上折射后被第二个界面全反射,如图所示。对于真空波长为 λ 的一个均匀平面波 $\psi_{in}(\mathbf{x}) = A(k_y)\exp(i\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{x})$,其中省去含时因子 $\exp(-i\omega t)$, $\mathbf{k}_s = (k_{sx}, k_y) = (k_s \cos\theta_s, k_s \sin\theta_s)$, $k_s = n_s k$, $k = 2\pi/\lambda$, θ_s 为该平面波的入射角,当 θ_s 满足 $\theta_{c2} > \theta_s > \theta_{c1}$ 时,根据麦克斯韦方程组和边界条件可求得反射波 $\psi_r(\mathbf{x}) = R(k_y)A(k_y)\exp[i(-k_{sx}x +$

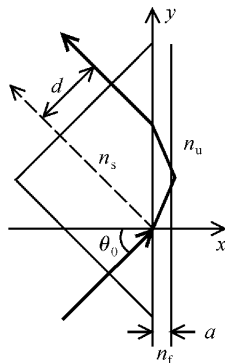


图 1 光束被电介质膜全反射示意图

Fig. 1 Schematic illustration of total reflection by the dielectric film

$k_{y,y})]$,其中振幅反射系数为 $R(k_y) = \exp[i\phi(k_y)]$,其模为 1,相位角 $\phi(k_y)$ 可表示为^[25]

$$\phi(k_y) = 2\pi \cdot \text{int}\left(\frac{k_{fx}a - \phi_0}{\pi} + \frac{1}{2}\right) + 2\arctan\left[\frac{\eta_f \tan(k_{fx}a - \phi_0)}{\eta_s}\right], \quad (1)$$

其中 $\text{int}(\cdot)$ 表示取整数, $\phi_0 = \arctan(\eta_u/\eta_f)$, η_j ($j = s, f$) 和 η_u 与平面波的偏振状态有关,表示为

$$\eta_j = \begin{cases} k_{jx}/\mu_j, & \text{TE 偏振} \\ k_{jx}/\epsilon_j, & \text{TM 偏振} \end{cases}, \quad \eta_u = \begin{cases} \kappa_u/\mu_u, & \text{TE 偏振} \\ \kappa_u/\epsilon_u, & \text{TM 偏振} \end{cases}$$

$k_{fx} = k_f \cos\theta_f$, $k_f = n_f k$, θ_f 由折射定律决定 $n_s \sin\theta_s = n_f \sin\theta_f$, $\kappa_u = (k_y^2 - k_u^2)^{1/2}$ 是波在空气中的衰减系数, $k_u = n_u k$ 。根据稳态相位法可求得 GH 位移为

$$d = -\frac{1}{k_s} \frac{d\phi}{d\theta_0}, \quad (2)$$

其中 $d/d\theta_0$ 表示对 θ_s 微分且取 $\theta_s = \theta_0$ 处的值。

3 微波测量及结果

实验测量采用成熟的 3 cm 微波技术,微波源和选频放大器分别是大华无线电厂生产的 DH1121C 和 DH388A0,抛物面发射喇叭的口径为 40 cm,矩形接收喇叭的口径为 10.5 cm × 14 cm。等腰直角微波棱镜选用的材料为折射率 $n_s = 2.00$ 的环氧树脂(临界角 $\theta_{c1} = 30^\circ$),尺寸为 47 cm × 47 cm × 40 cm,表面尺寸为 40 cm × 66 cm,电介质板材料的折射率为 $n_f = 1.64$ (临界角 $\theta_{c2} = 55^\circ$),厚度分别为 2.5 mm, 5 mm, 10 mm 和 15 mm,微波束在全反射薄膜上的入射角是 $\theta_0 = 45^\circ$ 。实验原理示意图如图 2 所示,信号波长选为 $\lambda = 3$ cm,信号源产生的微波(调制频率 1 kHz)通过波导由隔离器送给发射喇叭,所发射的微波束被介质薄膜全反射后由接收喇叭

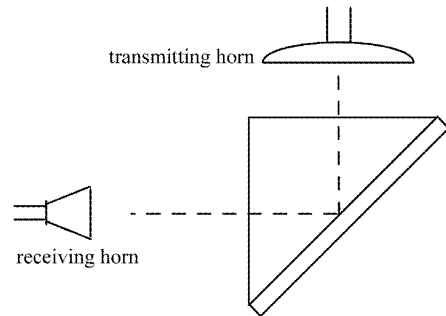


图 2 实验原理示意图

Fig. 2 Schematic representation of the experimental setup

喇叭收集,并通过波导由隔离器送至二极管探测器,探测到的信号最后由选频放大器输出。通过在入射面内、沿与反射光束传播方向垂直的方向连续地移动接收喇叭来确定反射光束的位置,即反射光束的位置对应于扫描过程中输出信号的最大值。

以没有电介质板时全反射波束的位置为参考,分别测量了介质板厚度为 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, 10 mm, 12.5 mm, 15 mm, 17.5 mm 和 20 mm 时全反射波束的位移,测量结果如图 3 所示,其中每一个厚度下是 10 次测量结果的平均值,误差棒代表标准偏差,连续曲线代表公式(2)计算的结果。实验结果显示在介质板的厚度为 15~16 cm 处有一个共振峰。同时可以看出,当介质板的厚度较小时,测量结果与理论预言吻合得很好;反之,当介质板的厚度较大时,两者有较大的偏差。这是因为微波束的质量不太好,发散角比较大,当介质板的厚度较大时, ϕ 在 $A(k_y)$ 的有效分布范围内线性度不太好。

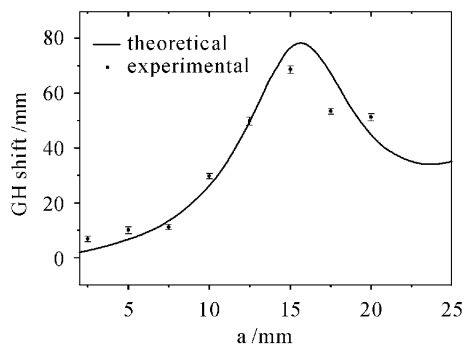


图 3 测量结果和理论预言的比较

Fig. 3 Comparison of the measuring result and the theoretical prediction

总之,通过微波实验观测到了电介质膜对 GH 位移的共振增强效应,在薄膜厚度为 15~16 cm 处有一个共振峰,但这个效应的理论解释值得进一步探讨。

参 考 文 献

- 1 F. Goos, H. Hänchen. Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Totalreflexion [J]. *Ann. Physik*, 1947, **1**(7~8):333~346
- 2 K. Artmann. Berechnung der Seitenversetzung des totalreflektierten Strahles [J]. *Ann. Phys.*, 1948, **2**(1~2):87~102
- 3 R. H. Renard. Total reflection; a new evaluation of the Goos-Hänchen shift [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**(10):1190~1197
- 4 H. Kogelnik, H. P. Weber. Stored energy, power flow in dielectric waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(2):174~185
- 5 C. K. Carniglia, K. R. Brownstein. Focal shift and ray model

- for total internal reflection [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(1):121~122
- 6 J. P. Hugonin, R. Petit. Étude générale des déplacements à la réflexion totale [J]. *J. Optics (Paris)*, 1977, **8**(2):73~87
- 7 N. J. Harrick. Study of physics and chemistry of surface from frustrated total internal reflections [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1960, **4**(5):224~226
- 8 H. K. V. Lotsch. Beam displacement at total reflection; the Goos-Hänchen effect. III [J]. *Optik*, 1971, **32**(4):299~319
- 9 A. M. Steinberg, R. Y. Chiao. Dispersionless, highly superluminal propagation in a medium with a gain doublet [J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **49**(3):2071~2075
- 10 Ph. Balcou, L. Dutriaux. Dual optical tunneling times in frustrated total internal reflection [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(5):851~854
- 11 Chunfang Li. Comment on photonic tunneling time in frustrated total internal reflection [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **65**:066101-1~066101-3
- 12 Takaharu Hashimoto, Toshihiko Yoshino. Optical heterodyne sensor using the Goos-Hänchen shift [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(17):913~915
- 13 T. Sakata, H. Togo, F. Shimokawa. Reflection-type 2×2 optical waveguide switch using the Goos-Hänchen shift effect [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(20):2841~2843
- 14 N. Bloembergen, C. H. Lee. Total reflection in second-harmonic generation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1967, **19**(15):835~837
- 15 O. Emile, T. Galstyan, A. Le Floch *et al.*. Measurement of the nonlinear Goos-Hänchen effect for Gaussian optical beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(8):1511~1513
- 16 Bradley M. Jost, Abdul-Azecz 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
- 17 M. Greena, P. Kirkbya, R. S. Timsita. Experimental results on the longitudinal displacement of light beams near total reflection [J]. *Phys. Lett. A*, 1973, **45**(3):259~260
- 18 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
- 19 A. Habel, G. Nimtz, A. A. Stahlhofen. Frustrated total reflection; The double-prism revisited [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **63**(4):047601-1~047601-3
- 20 Hervé 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
- 21 X. Yin, L. Hesselink, Z. 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
- 22 R. Kaiser, Y. Levy, J. Fleming *et al.*. Resonances in a single thin dielectric layer; enhancement of the Goos-Hänchen shift [J]. *Pure Appl. Opt.*, 1996, **5**(6):891~898
- 23 Li Chunfang, Yang Xiaoyan. Thin-film enhanced Goos-Hänchen shift in total internal reflection [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(3):485~488
- 24 F. Pillon, H. Gilles, S. Girard *et al.*. Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov shifts for leaky guided modes [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(6):1290~1299
- 25 Li Chunfang, Yang Xiaoyan, Zhang Jiyue. Thin-film enhanced Goos-Hänchen shift [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(suppl.):474~476
- 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):474~476