

文章编号: 0258-7025(2008)05-0712-04

# 光束在单层金属界面上反射时的纵向位移

张纪岳<sup>1</sup> 葛国库<sup>1,2,4</sup> 李春芳<sup>1,3</sup> 段 波<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049; <sup>3</sup> 上海大学物理系, 上海 200444  
<sup>4</sup> 西安科技大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054

**摘要** 光束在弱吸收介质板上反射时,会产生纵向位移。采用稳态相位法从理论上研究了线偏振光在单层金属界面上反射时的纵向位移。结果表明,在吸收频率区,TE 偏振反射光束的纵向位移很小,随入射角增大单调增加,掠射时趋于饱和,而 TM 偏振反射光束的纵向位移为负位移,在入射角为  $80^\circ$  附近达到峰值约  $\lambda$ ; 在反射频率区,TE 反射光束的纵向位移随入射角的变化规律与在吸收频率区相同,饱和值更小,TM 反射光束的纵向位移为负位移,掠射时约几个波长。

**关键词** 物理光学;纵向位移;稳态相位法;金属

中图分类号 O 435.1 文献标识码 A

## Longitudinal Shift of a Light Beam Reflected from the Single Metal Layer

Zhang Jiyue<sup>1</sup> Ge Guoku<sup>1,2,4</sup> Li Chunfang<sup>1,3</sup> Duan Tao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China  
<sup>4</sup> School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China

**Abstract** The finite-sized light beam reflected from a weakly absorbing dielectric slab would experience a longitudinal displacement. The longitudinal displacement of a linear-polarized light beam reflected from the single metal layer is theoretically investigated. It is shown that, in the region of absorbed frequency, the longitudinal displacement of TE polarized light beam is not only positive and very small but also grows slowly. The displacement is saturated to maximum when the incidence angle is very large. The longitudinal displacement of TM polarized light beam is negative and has a peak near  $80^\circ$ . The peak value is about one wavelength. It is also shown that the longitudinal displacement of TE polarized light beam keeps a similar action and its maximum is smaller in the region of reflected frequency. The negative displacement of TM polarized light beam is several wavelengths near  $90^\circ$ .

**Key words** physical optics; longitudinal displacement; stationary phase approach; metal

## 1 引 言

1947 年, F. Goos 等<sup>[1]</sup> 在实验上观察到当一束平行光束入射到光密与光疏介质的界面上时,在入射角大于临界角的情况下,反射光束在入射面内发生位移,这个纵向位移后来被称为古斯-汉欣(Goos-Hänchen(G-H))位移。近年来,光束全反射时纵向位移的研究热点主要集中在位移增强的理论与实

验<sup>[2~6]</sup>、负纵向位移<sup>[7~9]</sup>、负折射率材料的纵向位移<sup>[10]</sup>、各向异性左手介质界面的纵向位移<sup>[11]</sup>及周期性结构的纵向位移<sup>[12,13]</sup>等。在这些研究中界面两侧介质为电介质但结构复杂,或者为简单结构但采用奇异材料。尽管在光学技术中,金属反射器件具有反射率高的特点,可应用在许多场合,然而与电介质相比,金属的电导率不为零,在理论研究中,折射

收稿日期:2007-09-01; 收到修改稿日期:2007-11-20

基金项目:国家自然科学基金(60377025),上海市基础研究重点项目(04JC14036)和上海市重点学科(T0104)资助课题。

作者简介:张纪岳(1935—),男,四川人,研究员,主要从事微结构光学理论方面的研究。E-mail:jijue\_zhang@126.com

率不易确定。

本文研究了有限光束在单层金属界面上反射时的纵向位移。在不同的情况下,得到了线偏振反射光束的相位变化,根据稳态相位方法,计算了反射光束的纵向位移。

## 2 理论分析

### 2.1 不同入射光波情况下金属的折射率和消光系数

根据极化率公式<sup>[14]</sup>,金属中自由电子没有原子核的约束力,其固有频率为零。复介电系数  $\epsilon_\gamma$  可表示为

$$\epsilon_\gamma = 1 - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} + i \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)}, \quad (1)$$

式中  $\omega_p$  为等离子体振荡频率,  $\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}$ , 仅决定于金属中自由电子的体密度。 $N, e$  为电子电荷,  $m$  为电子质量,  $\epsilon_0$  为真空介电常量;  $\omega$  为入射光波的角频率,  $\omega = 2\pi c/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射光波长;  $\tau$  为自由电子的弛豫时间。根据复折射率  $\tilde{n}$  与复介电系数  $\epsilon_\gamma$  的关系  $\epsilon_\gamma = \tilde{n}^2$ , 设  $\tilde{n} = n + i\kappa$ ,  $n$  为折射率,  $\kappa$  为消光系数, 代入 (1) 式可知

$$\begin{cases} n^2 - \kappa^2 = 1 - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \\ n\kappa = \frac{\omega_p^2 \tau}{2\omega(1 + \omega^2 \tau^2)} \end{cases} \quad (2)$$

为了分析反射光束的特性方便, 将  $\omega$  分为在吸收频率区和反射频率区。在吸收频率区,  $0 < \omega <$

$1/\tau$ ; 在反射频率区,  $1/\tau < \omega < \omega_p$ 。在吸收频率区, 由 (2) 式可知折射率  $n$  和消光系数  $\kappa$  可表示为

$$n^2 = \kappa^2 \approx \frac{\omega_p^2 \tau}{2\omega}; \quad (3)$$

而在反射频率区, 折射率  $n$  和消光系数  $\kappa$  分别为

$$n = \frac{\omega_p}{2\omega^2 \tau}, \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{\omega_p}{\omega}. \quad (5)$$

### 2.2 反射光束的相移

如图 1 所示, 一束平行光以  $\theta_i$  角入射在单层金属界面上, 金属层厚度为  $a$ , 两侧均为折射率  $n_1$  的半无限大电介质。首先考虑光束入射在介质 - 金属单界面上的情况。设  $\theta_2$  为金属中的折射角, 根据斯涅耳定律, 易知  $\tilde{n} \cos \theta_2$  为复数。设  $\tilde{n} \cos \theta_2 = p + iq$ ,  $p, q$  均为实数, 则它们应满足关系

$$\begin{cases} p^2 - q^2 = n^2 - \kappa^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i \\ pq = n\kappa \end{cases}, \quad (6)$$

解方程组 (6),  $p, q$  可分别表示为

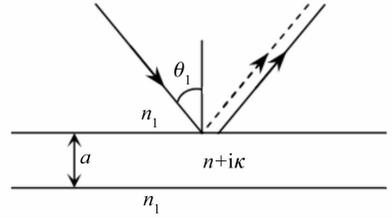


图 1 光束在单层金属界面上的反射

Fig. 1 Light beam reflected from the single metal layer

$$p = \sqrt{\frac{\sqrt{(n^2 - \kappa^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i)^2 + 4n^2 \kappa^2} + (n^2 - \kappa^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i)}{2}}, \quad (7)$$

$$q = \sqrt{\frac{\sqrt{(n^2 - \kappa^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i)^2 + 4n^2 \kappa^2} - (n^2 - \kappa^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i)}{2}}, \quad (8)$$

对横电 (TE) 波, 在介质与金属界面可将反射系数表示为复数形式

$$r_{12}^{\text{TE}} = \rho_{12}^{\text{TE}} \exp(i\varphi_{12}^{\text{TE}}), \quad (9)$$

式中振幅和相位分别为

$$\rho_{12}^{\text{TE}} = \sqrt{\frac{[(n_1 \cos \theta_i - p)^2 + q^2]}{[(n_1 \cos \theta_i + p)^2 + q^2]}}, \quad (10)$$

$$\varphi_{12}^{\text{TE}} = \arctan\{2n_1 q \cos \theta_i / [(p^2 + q^2) - n_1^2 \cos^2 \theta_i]\}, \quad (11)$$

而横磁 (TM) 波光束的反射系数为

$$r_{12}^{\text{TM}} = \rho_{12}^{\text{TM}} \exp(i\varphi_{12}^{\text{TM}}) \quad (12)$$

时, 振幅和相位分别为

$$\rho_{12}^{\text{TM}} = \sqrt{\frac{[(n^2 - \kappa^2) \cos \theta_i - n_1 p]^2 + (2n\kappa \cos \theta_i - n_1 q)^2}{[(n^2 - \kappa^2) \cos \theta_i + n_1 p]^2 + (2n\kappa \cos \theta_i + n_1 q)^2}}, \quad (13)$$

$$\varphi_{12}^{\text{TM}} = \arctan\{2n_1 \cos \theta_i [2n\kappa p - (n^2 - \kappa^2) q] / [(n^2 + \kappa^2)^2 \cos^2 \theta_i - n_1^2 (p^2 + q^2)]\}. \quad (14)$$

单层金属结构包含了两个介质 - 金属单界面, 设  $\eta = (2\pi/\lambda)a$ , 可以推出单层金属界面上反射光束 (TE

或 TM 反射光束)的总相移为

$$\varphi_r = \arctan \frac{[\exp(4\eta q) - \rho_{12}^2] \sin \varphi_{12} - (1 - \rho_{12}^2) \exp(2\eta q) \sin(\varphi_{12} + 2\eta p)}{[\exp(4\eta q) + \rho_{12}^2] \cos \varphi_{12} - (1 + \rho_{12}^2) \exp(2\eta q) \cos(\varphi_{12} + 2\eta p)}, \quad (15)$$

式中省去了表示偏振态的上角标。

### 2.3 反射光束古斯-汉欣位移的计算

利用稳态相位法公式<sup>[15]</sup>, 反射光束的古斯-汉欣位移  $D$  为

$$D = -\frac{\lambda}{2\pi n_1} \frac{d\varphi_r}{d\theta_i}, \quad (16)$$

将(15)式代入(16)式, 可以求出古斯-汉欣位移的解析表达式。但是, 由于反射相移表示复杂, 古斯-汉欣位移的表示十分繁复, 不容易看出物理意义。本文利用差分函数数值计算这一位移, 计算时入射光波长取为  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ , 可以求出  $\omega = 1.2566 \times 10^{15}$  Hz。等离子体共振频率  $\omega_p = 2.51 \times 10^{16}$  Hz, 介质折射率  $n_1 = 1.00$ , 通过选取不同的  $\tau$  可以得到反射光束在吸收频率区和反射频率区古斯-汉欣位移随入射角的变化情况。在吸收频率区, 取  $\tau = 0.4 \times 10^{-16}$  s, 在反射频率区,  $\tau = 2.0 \times 10^{-14}$  s。

## 3 计算结果

TE 反射光束的纵向位移随入射角的变化规律如图 2 所示。为便于比较, 图中同时画出了在吸收频率区和反射频率区的纵向位移。可见, 随着入射角增大, 纵向位移单调增大, 入射角接近  $90^\circ$  时趋于饱和, 在吸收频率区的饱和值约为  $0.05\lambda$ , 大于在反射区的饱和值。无论在吸收区还是在饱和区, 纵向位移均为很小的正位移。

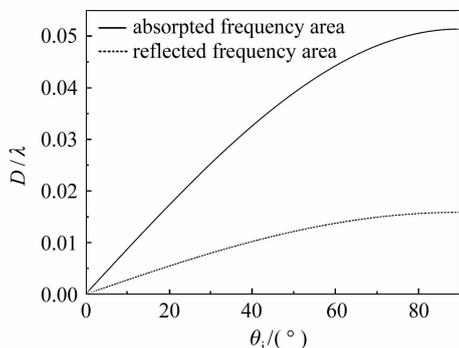


图 2 TE 反射光束的纵向位移随入射角的变化

Fig. 2 Dependence of the longitudinal displacement of TE beam on the angle of incidence

图 3 为 TM 反射光束的纵向位移随入射角的变化, 实线表示在吸收频率区的纵向位移, 虚线表示在反射频率区的纵向位移。可见, 在吸收频率区和

反射频率区存在不同的变化规律。在吸收频率区, 负位移先随入射角增大而增大, 在入射角为  $80^\circ$  左右达最大值约  $\lambda$ , 入射角接近  $90^\circ$  时, 负位移趋于恒定。在反射频率区, 负位移随着入射角增大的单调变化不明显, 入射角接近  $90^\circ$  时, 纵向位移急剧增大, 可达若干波长。

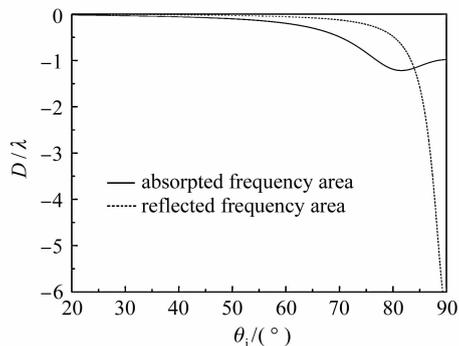


图 3 TM 反射光束的纵向位移随入射角的变化

Fig. 3 Dependence of the longitudinal displacement of TM beam on the angle of incidence

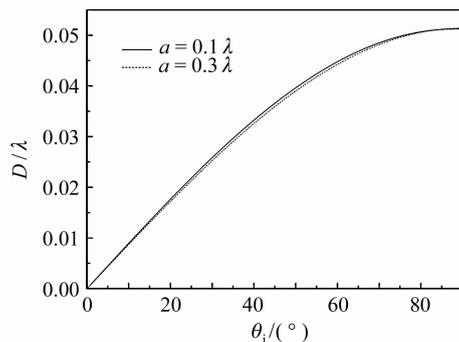


图 4 在吸收频率区 TE 反射光束的纵向位移随金属膜厚度变化

Fig. 4 Dependence of the longitudinal displacement of TM beam on the thickness of metal film at the absorbed frequency region

在电介质材料构成的多层结构中, 膜层厚度对反射光束的特性有至关重要的影响。为了研究薄膜厚度对纵向位移的影响, 图 4 中分别绘出了金属薄膜厚度为  $0.1\lambda$  和  $0.3\lambda$  时, 在吸收频率区 TE 反射光束的纵向位移随介质膜厚度变化的曲线。可以看出, 膜层厚度的变化对纵向位移的影响并不明显。在垂直入射(入射角  $0^\circ$ )和掠射(入射角  $90^\circ$ )附近, 位移没有变化, 在中间区域, 也仅存在微不足道的变

化。

## 4 结 论

研究了有限光束在单层金属界面上反射的纵向位移。结果表明,当入射光波长为  $1.5 \mu\text{m}$ ,金属层厚度为  $0.3\lambda$  时,在吸收频率区,TE 偏振反射光束的纵向位移很小,随入射角增大单调增加,掠射时趋于饱和,而 TM 偏振反射光束的纵向位移为负位移,在入射角为  $80^\circ$  附近达到峰值约  $\lambda$ ; 在反射频率区,TE 反射光束的纵向位移随入射角的变化规律与在吸收频率区相同,饱和值更小,TM 反射光束的纵向位移为负位移,随入射角单调增加,掠射时约几个波长。此外,不同的金属膜层厚度下,线偏振光束的纵向位移随入射角的变化规律不变,仅影响饱和值的大小。

## 参 考 文 献

- 1 F. Goos, H. Hänchen. Ein neuer und fundamentaler versuch zur totalreflektion [J]. *Ann. Physik(Lpz)*, 1947, **6**(1):333~346
- 2 J. L. Birman, D. N. Pattanayak, A. Puri. Prediction of a resonance-enhanced laser-beam displacement at total internal reflection in semiconductors [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, **50**(21):1664~1667
- 3 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
- 4 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
- 5 Duan Tao, Li Chunfang, Yang Xiaoyan *et al.*. Thin-film

enhanced Goos-Hänchen shift in frustrated total reflection configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11):1744~1748

段 毅,李春芳,杨晓燕 等. 电介质膜对受抑全内反射结构中古斯-汉欣位移的增强[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11):1744~1748

- 6 Li Chunfang, Yang Xiaoyan, Duan Tao *et al.*. Microwave measurement of dielectric film-enhanced Goos-Hänchen shift [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):753~755  
李春芳,杨晓燕,段 毅 等. 电介质膜增强的 Goos-Hänchen 位移的微波测量[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6):753~755
- 7 B. A. Aničin, R. Fazlić, M. Koprić. Theoretical evidence for negative Goos-Hänchen shifts [J]. *J. Phys. A; Math. Gen.*, 1978, **11**(8):1657~1662
- 8 C. F. Li, Q. B. Zhu, G. Nimtz *et al.*. Experimental observation of negative lateral displacements of microwave beams transmitting through dielectric slabs [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2):470~473
- 9 Jinlong He, Jin Yi, Sailing He. Giant negative Goos-Hänchen shifts for a photonic crystal with a negative effective index [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7):3024~3029
- 10 P. R. Berman. Goos-Hänchen shift in negatively refractive media [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(6):067603-1~067603-3
- 11 Jiang Yongyuan, Zhang Yongqiang, Shi Hongyan *et al.*. The Goos-Hänchen shift on the surface of uniaxially anisotropic left-handed materials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2):798~804  
姜永远,张永强,时红艳 等. 单轴各向异性左手介质表面的 Goos-Hänchen 位移[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2):798~804
- 12 R. C. Nesnidal, T. G. Walker. Multilayer dielectric structure for enhancement of evanescent waves [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(13):2226~2229
- 13 D. Felbacq, A. Moreau, R. Smaäli. Goos-Hänchen effect in the gaps of photonic crystals [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(18):1633~1635
- 14 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Seventh edition. London: Cambridge University Press, 1999. 735~758
- 15 K. Artmann. Berechnung der seitenversetzung des totalreflektierten strahles [J]. *Ann. Phys.*, 1948, **6**(2):87~102