第7卷 第5期
1987年5月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 7, No. 5
May, 1987

吸收媒质反射束 Goos–Hänchen 位移的直接计算公式

冷 光 垚
(浙江大学物理系)

提 要

本文导出了从吸收媒质上反射的 s 和 p 两种偏振的 Goos-Hänchen 位移的一般表达式。若令消光系数等于零，它们就简化成 McGuirk 和 Carniglia 给出的仅用于非吸收媒质的公式[1]。吸收媒质的位移，在任何不为零的入射角度时都有。在镓的表面上，位移有几个波长。

关键词：Goos-Hänchen 位移的计算，吸收媒质。

一、引 言

电磁波的实际反射束相对于理想的几何光学反射可能产生横向平移，称为 Goos-Hänchen 位移。自 1947 年提出这一现象的实验证据后[2]，引起不少学者的关注。先后有稳相法 (stationary-phase) 能量守恒、时间延迟散射以及较近的角谱处理等方法用以研究这个现象。过去的理论及实验[3]大多是关于非吸收媒质的。1982 年 Wild 和 Giles[4] 讨论从吸收媒质表面反射的情况，提出可能出现负的位移。

本文在文献[4]工作的基础上，导出电磁波从吸收媒质表面反射时，Goos-Hänchen 位移大小的直接计算式。所得结果同样适用于非吸收媒质，因为非吸收媒质不过是消光系数为零的一种特殊情况。

二、位 移 D_p 和 D_s

图 1 中的媒质 (I) 是非吸收的，实折射率为 n_1；但媒质 (II) 是吸收的，其复折射率为 $N_2=n_2+ik_2$，虚部 k_2 为消光系数。两种媒质都是均匀和各向同性的。入射束 io 经过准直，发散角足够地小。$o'r'$ 是实际反射束，它相对于理想的几何光学反射 or 有一大小为 D 的横向平移，这就是 Goos-Hänchen 位移。

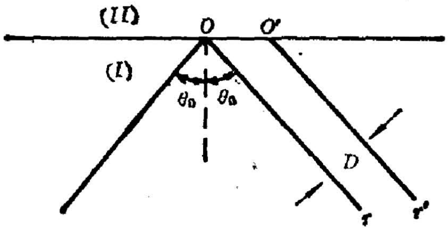

Fig. 1 Schematic diagram of Goos–Hänchen shift

文献[1]、[4]利用角谱处理方法[5]，从已知的入射场分布求出未知的反射场分布。再把实际反射场和理想的几何光学反射场(对应于振幅反射率 $r=1$ 的情况)相比较，证明了：Goos-Hänchen 位移的大小正比于反射波相移 δ 对入射角 θ_1 的一

收稿日期：1986年6月2日；收到修改稿日期：1986年8月22日

阶导数

$$D=-\frac{\lambda}{2\pi}\left.\frac{d\delta}{d\theta_1}\right|_{\theta_1=\theta_0},\tag{1}$$

式中 θ_0 是平均入射角反射束的相移由菲涅耳公式给出。在媒质(II)有吸收的情况下，折射角 θ_2 是复数。它虽不具有直觉上的几何意义，但在物理上却是场的边界条件所要求的。把菲涅耳公式写成对称形式

$$r_s=\frac{n_1\cos\theta_1-N_2\cos\theta_2}{n_1\cos\theta_1+N_2\cos\theta_2},\quad r_p=\frac{G\cos\theta_1-N_2\cos\theta_2}{G\cos\theta_1+N_2\cos\theta_2},\tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned}&G=\frac{N_2^2}{n_1}=g_1+ig_2,\\&g_1=\frac{n_2^2-k_2^2}{n_1},\quad g_2=\frac{2n_2k_2}{n_1}。\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

利用折射定律，得

$$N_2\cos\theta_2=\sqrt{N_2^2-n_1^2\sin^2\theta_1}。\tag{4}$$

设 $N_2\cos\theta_2=\sqrt{A+iB}$，则得

$$A=n_2^2-k_2^2-n_1^2\sin^2\theta_1,\quad B=2n_2k_2。\tag{5}$$

令 $N_2\cos\theta_2=q+i\tau$ 目的是能从菲涅尔公式中求相移。其中 q 和 τ 为实数。容易看出，q 和 τ 应满足下列方程

$$q^2-\tau^2=A,\quad 2q\tau=B。\tag{6}$$

它一般有四组根，其中合乎物理要求的一组 (q, $\tau\geqslant0$) 是:

$$q=\sqrt{\frac{A+\sqrt{A^2+B^2}}{2}},\quad \tau=\sqrt{\frac{-A+\sqrt{A^2+B^2}}{2}}。\tag{7}$$

利用 $N_2\cos\theta_2=q+i\tau$，把菲涅耳公式中分子及分母分别都写成实部与虚部之和的形式。相移是分子分母两复数幅角之差。分别得 p 偏振和 s 偏振的相移

$$\delta_p=\operatorname{arc\,tg}\frac{g_2\cos\theta_1-\tau}{g_1\cos\theta_1-q}-\operatorname{arc\,tg}\frac{g_2\cos\theta_1+\tau}{g_1\cos\theta_1+q},\tag{8}$$

$$\delta_s=\operatorname{arc\,tg}\frac{-\tau}{n_1\cos\theta_1-q}-\operatorname{arc\,tg}\frac{\tau}{n_1\cos\theta_1+q}。\tag{9}$$

这两个表示式是很对称的，只须作映射 $g_1\to n_1$ 和 $g_2\to0$，可从(8)式得到(9)式。因此，如果求得($d\delta_p/d\theta_1$)，作同样的映射立即得到($d\delta_s/d\theta_1$)。

对(8)式求导，得 p 偏振相移的一阶导数

$$\begin{aligned}\frac{d\delta_p}{d\theta_1}=&\left\{\frac{1}{(g_1\cos\theta_1-q)^2+(g_2\cos\theta_1-\tau)^2}+\frac{1}{(g_1\cos\theta_1+q)^2+(g_2\cos\theta_1+\tau)^2}\right\}\\&\times\left\{\sin\theta_1(g_2q-g_1\tau)-\frac{n_1^2}{\sqrt{A^2+B^2}}\sin\theta_1\cos^2\theta_1(g_2q+g_1\tau)\right\}\\&+\left\{\frac{1}{(g_1\cos\theta_1-q)^2+(g_2\cos\theta_1-\tau)^2}-\frac{1}{(g_1\cos\theta_1+q)^2+(g_2\cos\theta_1+\tau)^2}\right\}\\&\times\frac{2n_1^2q_1\tau}{\sqrt{A^2+B^2}}\sin\theta_1\cos^2\theta_1,\end{aligned}\tag{10}$$

式中 g_1、g_2、A、B 及 q 和 τ 分别由(3)式、(5)式和(7)式给出，它们都是入射角 θ_1 的函数。由(1)式得 Goos-Hänchen 位移

$$D_p = -\frac{\lambda}{2\pi}\frac{d\delta_p}{d\theta_1}\bigg|_{\theta_1=\theta_0}, \quad D_s = -\frac{\lambda}{2\pi}\frac{d\delta_s}{d\theta_1}\bigg|_{\theta_1=\theta_0}, \tag{11}$$

籍(10)式和相应的映射式得到直接的解析表示式。

三、讨 论

根据(10)式，吸收媒质几乎在任何入射角下($\theta_0=0$ 除外)都有位移效应。n 和 k 在可见波段附近一般只有一位数，且 A、B、q、τ、g_1 及 g_2 大致和 n 同数量级，所以位移通常只有几个波长左右。图 2 是取入射媒质为空气($n_1=1.00$)，反射媒质为镓($\lambda=0.7\,\mu$m 时，$N_2=1.65+i7.60$)时计算得到的理论曲线。图中横坐标每格 10°。

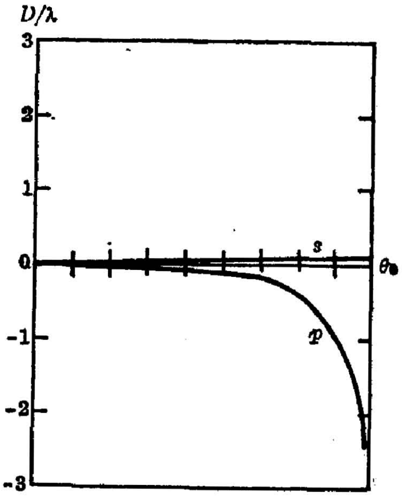

Fig. 2 D/λ vs. θ_0 for s and p polarization on the Gallium

在全反射情况下，$k_2=0$，$n_2<n_1$ 且 $\sin\theta_0>(n_2/n_1)$ 可得到

$$\left.\begin{aligned} D_s &= \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)\frac{n_1\sin\theta_0}{\sqrt{n_1^2\sin^2\theta_0-n_2^2}}, \\ D_p &= \frac{D_s}{[(n_1^2/n_2^2)+1]\sin^2\theta_0-1}。\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

(12)式即文献[1]中给出的公式。

参 考 文 献

[1] M. McGuirk, C. K. Carniglia; *J. O. S. A.*, 1977, **67**, No. 1 (Jun), 103
[2] Von F. Goos, H. Hänchen; *Ann. Physik.*, 1947, **1**, 333~346.
[3] J. J. Cowan, B. Aničin; *J. O. S. A.*, 1977, **67**, No. 10 (Oct), 1307~1314.
[4] W. Wild, C. L. Giles; *Phys. Rev.* (*A*), 1982, **25**, No. 4 (Apr), 2099~2101.
[5] J. W. Goodman; «*Introduction to Fourier Optics*», (McGraw-Hill, New York, 1968), 48~54.

Study of Goos-Hänchen shift of reflected beam from absorbing medium

LENG GUANGYAO
(*Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou*)

(Received 2 June 1986; revised 22 August 1986)

Abstract

General expressions of Goos-Hänchen shift for both *s* and *p* polarizations from absorbing medium has been derived in this paper. Let the extinction coefficient be equal to zero, they will be simplified to the formulae[1] given by M. McGuirk and C. K. Carniglia, which are only fit for non-absorbing medium. The shift from absorbing medium occurs at any incident angle except zero angle. On Gallium surface, Goos-Hänchen shift may have several wavelengths.

Key Words: study of Goos-Hänchen shift, absorbing medium