

# 表面等离子体波检测的新技术研究

郭继华 刘 通 神 帅

(清华大学现代应用物理系, 北京 100084)

**摘 要** 报道表面等离子体波的一种新的检测技术, 可以同时获得表面等离子体波激发过程中反射光的相位和光强变化。理论计算表明, 表面等离子体激发过程中, P 偏振反射波相位的变化可达  $300^\circ$ 。在此基础上建立了光学外差测量装置, 可同时获得相位和强度变化的信息, 实验数据和理论计算吻合非常好。此方法比仅能给出强度变化的角度扫描衰减全反射(ATR)方法, 提供了更多的信息, 而且相位检测比强度检测灵敏度高, 为表面光学性质的研究、LB 膜特征研究以及表面等离子体波传感器的研究提供了更有力的工具。

**关键词** 表面等离子体波, 相位检测, 光学外差。

表面等离子体波(SPW)技术在表面以及界面的光学性质研究中有重要的意义, 在表面非线性光学检测、表面膜层特性研究以及表面生物、物理、化学传感器的研究领域已经取得了广泛应用。传统的表面等离子体波检测方法是角度扫描全反射方法(ATR), 这种方法利用表面等离子体波共振激发时 P 偏振反射光光强的变化来研究表面等离子体波的性质和表面光学性质的特征。因为它直观和装置简单而被广泛应用, 但 P 偏振波反射不仅光强发生了变化, 而且相位也发生了变化, 此种方法不能检测相位变化, 丢掉了一些有用的信息。本文报道的新的研究方法和装置, 不仅可以给出反射光强变化, 而且可以给出相位的变化。实验表明, 利用相位变化的方法比角度扫描衰减全反射方法有更高的灵敏度。

## 1 理论基础

表面等离子体波在物理上指沿两个介质的分界面传播的电磁波, 并且在偏离分界面时其振幅指数地衰减。P 偏振波在满足一定条件下可以激发表面等离子体波, S 偏振波不可以激发表面等离子体波。由于表面等离子体波很难传出, 因而不宜直接进行检测。但 P 波激发表面等离子体波时, 一部分能量共振转移, 所以反射的能量少于入射能量。通常检测反射能量的变化, 这就是常用的角度扫描衰减全反射方法。反射波能量的计算建立在多层膜表面等离子体波激发理论上<sup>[1]</sup>。对简单的单层膜模型, 计算表明, P 偏振幅反射率

$$r_P = [r_{01}^P + r_{12}^P \exp(2ik_{1z}d)] / [1 + r_{01}^P r_{12}^P \exp(2ik_{1z}d)] \quad (1)$$

其中  $r_{i,i+1}^P = (x_i^P - x_{i+1}^P) / (x_i^P + x_{i+1}^P)$   $i = 0, 1$ ;  $k_0 = \omega/c \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta$ ;  
 $x_i^P = \epsilon / k_{iz}$   $i = 0, 1, 2$ ;  $k_{iz} = [(\omega x)^2 \epsilon - k_0^2]^{1/2}$   $i = 0, 1, 2$

这里第一层 ( $i = 0$ ) 是介质, 通常是玻璃, 第二层 ( $i = 1$ ) 通常为银或其他金属, 第三层 ( $i = 2$ ) 通常是空气或其他介质。  $d$  是银层厚度, 通常为  $40 \sim 60$  nm,  $\theta$  是入射角。  $r_P$  是复数, 可以记作  $r_P = |r_P| e^{i\Phi}$ 。其中  $\Phi$  表示相位变化,  $|r_P|$  表示电场的振幅变化。传统角度扫描衰减全反射法检测出  $R_P = |r_P|^2$ 。若要在表面等离子体波激发过程中检测  $\Phi$ , 就必须用干涉法或外差法, 这都需要用另一束光, 本研究选择 S 偏振波。经过计算发现, S 偏振波振幅反射率

$$r_s = [r_{01}^s + r_{12}^s \exp(2ik_{1z}d)] / [1 + r_{01}^s r_{12}^s \exp(2ik_{1z}d)] \quad (2)$$

其中  $r_{01}^s, r_{12}^s$  表示形式与(1)式相同, 唯一不同的是:  $x_i^s = k_{iz}, (i = 0, 1, 2)$ ,  $r_s$  显然也是复数, 可以记作  $r_s = |r_s| e^{i\Phi_s}$ , 由于 S 波不能激发表面等离子体波, 所以  $|r_s|$  和  $\Phi_s$  的变化都非常小, 在感兴趣的表面等离子体波激发角度范围内可以认为它们为常数。

当银膜厚度小于最佳共振厚度时, 在共振角度附近, 入射角改变约  $2^\circ$ , P 偏振波相位改变近  $300^\circ$  且单调变化, 如图 1(c) 所示; 当银膜厚度大于最佳共振厚度时, 相位变化在共振点附近是非单调曲线, 有两个峰值, 角度改变也仅  $100^\circ$ , 见图 1(d)。比较此两种厚度, 角度扫描衰减全反射要检测的  $|r_P|^2$  曲线没有多少差别, 而相位的理论曲线差别是非常大的。

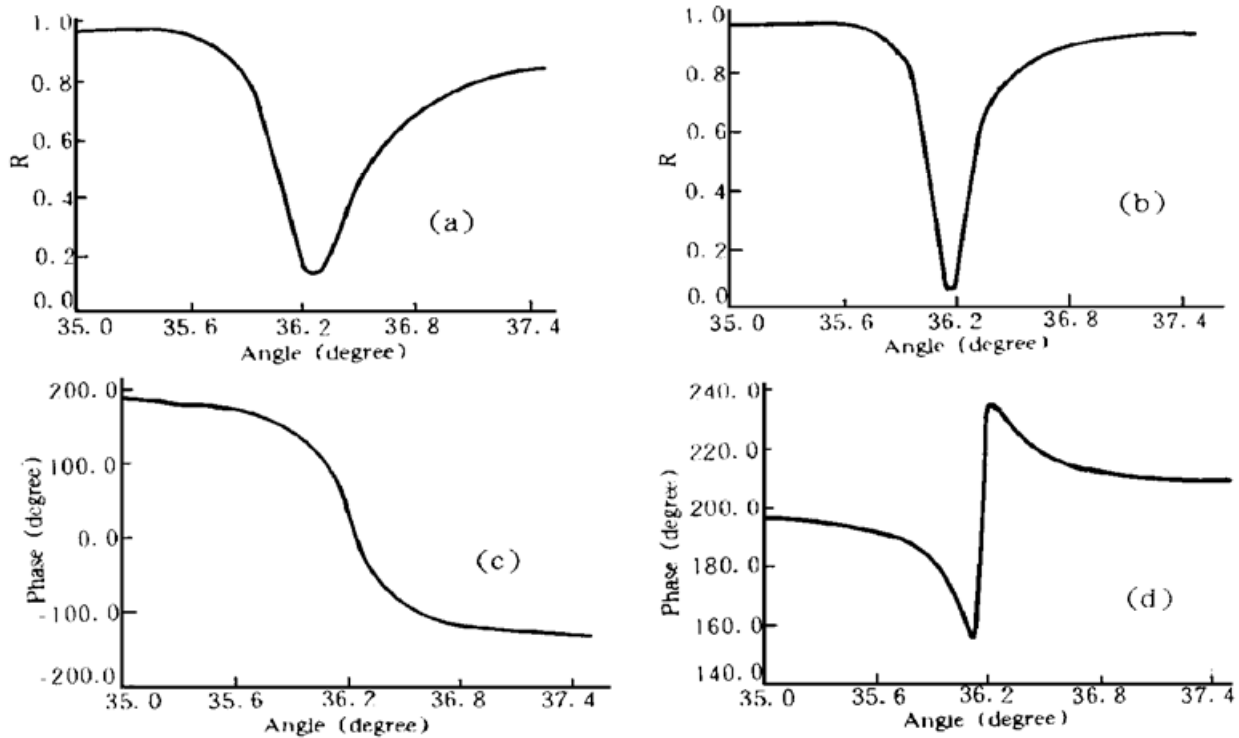


Fig. 1 Theoretical results. ( $\epsilon_0 = 3.066, \epsilon_1 = -16.205 + 0.85(Ag), \epsilon_2 = 1; \lambda = 632.8$  nm); (a)  $d = 40$  nm  $|r_P|^2 - \theta$ ; (b)  $d = 55$  nm  $|r_P|^2 - \theta$ ; (c)  $d = 40$  nm  $\Phi_P - \theta$ ; (d)  $d = 55$  nm  $\Phi_P - \theta$

## 2 实验装置及其实验结果

实验装置如图 2 所示, 横向塞曼(Zeeman)激光器输出两个不同频率, 偏振方向互相垂直的线偏振光, 用拍频法稳频, 频率稳定度约为  $1 \times 10^{-8}$ , 两不同频率的光频差约为 200 kHz, 一个作为 P 偏振波, 一个作为 S 偏振波。分出一小部分检偏后作为参考信号,

$$U_r = A \cos \Delta\omega t$$

其中  $A$  为常数,  $\Delta\omega$  为频差。另一部分光入射到 Kretschmann 装置中激发表面等离子体波, 反

射波拍频得到测量信号:

$$U_s = A' \cos (\Delta\omega + \Phi)$$

其中  $A' = |r_s| |r_p| AK$ ,  $\Phi = \Phi_p - \Phi_s$ 。因为  $|r_s|$  近似为 1,  $\Phi_s$  近似为常数, 所以  $A'$  实际表示  $|r_p|$  的变化,  $\Phi$  表示  $\Phi_p$  的变化。

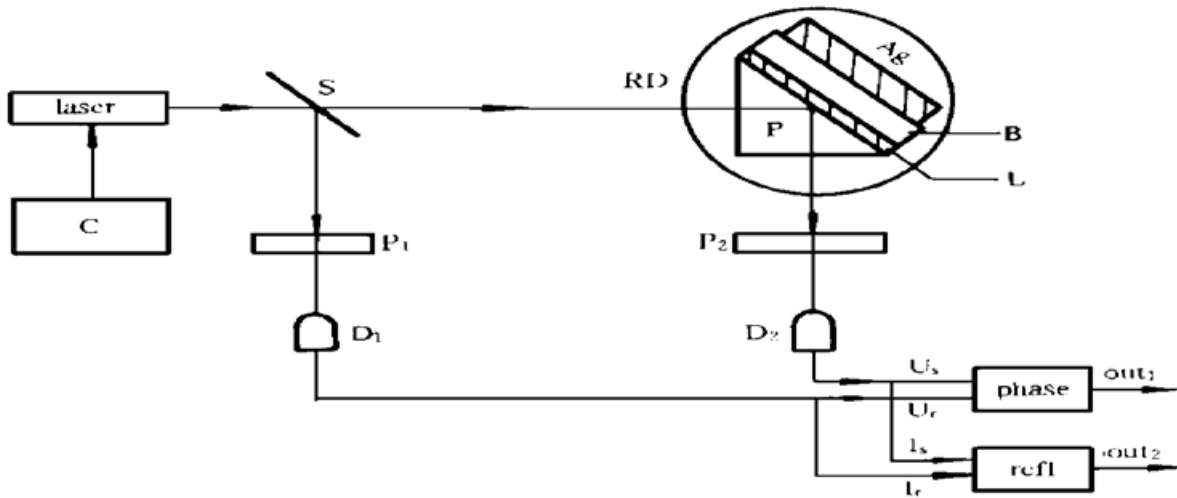


Fig. 2 Experimental apparatus. laser: Zeeman laser; C: frequency stabilization system; S: beam splitter; RD: rotator; phase: phasemeter; D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>: opto-electrical detector; L: reflection matching liquid; B: glass plate; REFL: reflectance mater; P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>: polarizer

相位计用来检测  $\Phi$ , 它是自己制作的模拟灵敏相位计。由于采用了调制和解调技术, 有效地抑制了零点漂移。它的最高检测灵敏度可达  $0.01^\circ$ 。实验上采用  $0.1^\circ$  灵敏度档, 量程为正负  $\pi$ 。线性度与数字相位计相比较相关系数为 0.9999。

Kretschmann 装置的直角棱镜放在分辨率为  $0.01^\circ$  的分度台上, 直角棱镜采用火石玻璃 ( $n = 1.751$ ), 金属膜用银膜, 镀在火石平板玻璃上, 平板玻璃和棱镜用匹配液实现光学接触。

反射率计可用来检测  $|r_p|$ , 由于本装置实际主要用于检测  $\Phi$ , 所以不详细讨论。

由于 S 波和 P 波在测量中没有分开, 是严格共光路等光程, 所以非常有效地抑制了振动, 波长及空气折射率变化等干扰, 整个系统相位稳定度约为  $0.1^\circ$ 。

用图 2 的实验排列, 分别检测出 Kretachmann 装置中金属膜为 Ag 膜时, 厚膜与薄膜两种情况下 P 偏振波位相随入射角度的变化曲线。入射波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ; 塞曼激光器输出频差  $\Delta\omega = 180 \text{ kHz}$ ; 整机工作相位分辨为  $0.1^\circ$ 。银膜  $\epsilon_1 = -16.205 + 0.835i$ , 棱镜  $\epsilon_0 = 3.066$ ; 空气取  $\epsilon_2 = 1.000$ 。当 Ag 膜厚度  $d = 52.7 \text{ nm}$ ,  $\Phi_p$  相对变化曲线如图 3(a) 所示; 当 Ag 膜厚度  $d = 43.5 \text{ nm}$  时,  $\Phi_p$  相对变化如图 3(b) 所示。可见实验值与理论曲线吻合很好。在相位显著变化的角度  $\theta = 36.2^\circ$  时, 反射率曲线出现共振凹陷。实验结果表明,  $\Phi_p - \theta$  曲线与  $R_p - \theta$  曲线共振位置相同;  $\Phi_p$  对 Ag 膜厚薄两种情况表现不同共振方式。

进一步实验表明,  $\Phi_p - \theta$  曲线对银膜厚度反应敏感, 对银表面氧化过程、吸附过程灵敏。初步研究得到在 Ag 膜厚度较小情况下, 采用  $0.1^\circ$  相位分辨, 可测量的 Ag 膜厚度变化灵敏度达  $0.01 \text{ nm}$  比传统角度扫描衰减全反射反射率  $R_p$  曲线测量技术分辨率高一个量级。

### 3 讨论和总结

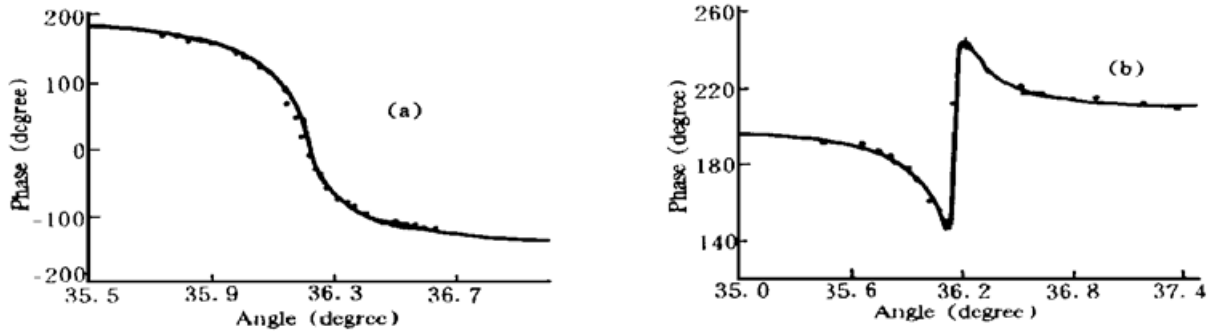


Fig. 3 Experimental results. • : experiment point; real line: theoretical curve

本实验方法及装置可以同时测量表面等离子体波激发过程中相位变化及反射率变化曲线, 因而为表面性质的研究以及其它相关领域的理论分析提供了更丰富的信息。

理论计算表明在表面等离子体波共振激发时, 若介质介电常数  $\epsilon_2$  变化  $1 \times 10^{-5}$ , 可引起反射光相位变化达  $0.3^\circ$ , 计算曲线如图 4 所示。采用文中所述的研究方法, 测量介质折射率最小分辨可达  $2 \times 10^{-6}$ , 比较传统角度扫描衰减全反射方法所得到的测量分辨值约高一个量级。用此原理制成的传感器灵敏度可大大地提高。

总之, 表面等离子体波的相位特征研究不仅为理论与实验提供了更多的信息, 而且以较高的测量分辨本领为在物理、生物、化学等领域获得进一步应用拓展了道路。

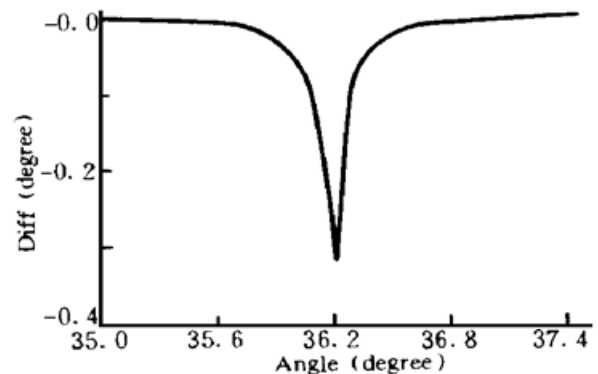


Fig. 4 Phase change relative to  $\epsilon_2$  shift of  $1 \times 10^{-5}$

### 参 考 文 献

- [1] A. D. Boardman, *Electromagnetic Surface Modes* John Wiley & Sons, Chichester, 1982: 119~ 142  
 [2] R. C. Jorgenson, S. S. Yee, A fiber-optic chemical sensor based on surface plasma resonance. *Sensors and Actuators*, 1993, **B12**(3): 213~ 220

## A New Technique for Studying Surface Plasma

Guo Jihua Liu Tong Shen Shuai

(*Modern Applied Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 16 March 1995; revised 18 December 1995)

**Abstract** A new technique for studying surface plasma is reported. With this technique, the phase and amplitude information of the reflection light can be detected as surface plasma is excited. Theory shows that the phase of P polarization can change from  $180^\circ$  to  $\sim -120^\circ$  during the excitation of surface plasma. An optical heterodyne system for measuring phase and amplitude is set up. Not only phase and amplitude information can be detected at the same time, but also the sensitivity is better than that of the ART method. This new method can be used for studying LB film and surface sensors.

**Key words** surface plasma, phase detection, optical heterodyne.