

文章编号: 1007-5461(2005)05-0814-03

近场光学方法测量大气折射率起伏

张斗国¹, 王沛¹, 鲁拥华¹, 唐麟¹, 袁仁民², 饶瑞中³, 明海¹

(1 中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026;

2 中国科学技术大学地球和空间科学系, 安徽 合肥 230026;

3 中国科学院安徽光学精密机械研究所国家 863 计划大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 精确测量大气的折射率起伏, 对于研究大气的性质及其在环境监测中的应用有着重要的意义。建立了用近场光学方法测量大气折射率起伏的模型: 采用全内反射方法激发金属的表面等离子共振, 在金属 - 空气 - 金属组成的平面波导中形成振荡的导模, 选取衰减全反射曲线中变化最快的一点的角度作为入射光的角度, 测量相应的反射光光强的变化, 就可以得到相应空气的折射率的变化。初步数值模拟了该模型的测量精度, 折射率变化的精度可以达到百万分之五。

关键词: 大气光学; 近场光学; 表面等离子体共振效应; 折射率起伏

中图分类号: P401 **文献标识码:** A

1 引言

折射率是大气重要的物理属性之一, 也是影响光波传播的重要物理量。大气折射对于天文和大地测量、雷达探测以及激光测距有一定的影响, 对测量精度要求比较高时, 必须用大气折射的测量结果进行修正。大气折射率的准确测量对于激光束产生的热畸变效应的研究也起着至关重要的作用, 是大气辐射遥感探测的物理基础, 大气折射率的准确测量也为气象业务、环境监测以及其它有关国民经济活动提供必要的资料。

目前常规的大气折射率测量都是通过测量大气温度来实现的。温度的测量有很多种方法, 常用的有铂电阻温度计, 热线温度计。这些温度计通常体积较大, 响应较慢。因此寻求一种直接测量大气折射率的方法是非常有实用价值和理论意义。我们提出了通过近场光学方法研究大气折射率起伏, 该方法具有高灵敏度和响应快等优点, 可实现直接通过光学的方法测量大气折射率的变化。本文建立了用近场光学方法测量大气折射率起伏的模型: 利用棱镜的全内反射形成的隐失场激发金属的表面等离子体, 在由金属 - 空气 - 金属平面波导中形成振荡的导模。探测反射光的强度的变化, 就可以得到空气的折射率的变化^[1,2], 初步数值模拟了该模型的测量精度, 折射率变化的精度可以达到百万分之五。

2 金属的表面等离子体效应

当光场入射到金属和介质的界面的时候, 只有在入射光场、金属和介质的介电常数等满足一定的条件时, 才会在金属表面激发表面等离子体波, 表面等离子体波的波矢可以表述为 $k_z = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \right)^{1/2}$ ^[3]。通过衰减全内反射的方式(如: Otto 方式、Kretschmann 方式)可以激发表面等离子体波。

3 装置结构以及相应的理论模型

本装置的结构如图 1 所示, 入射光照射到棱镜上, 形成全内反射, 然后在与棱镜接触的金膜上表面激

基金项目: 安徽省自然科学基金基金(03046204)

收稿日期: 2004-07-05; **修改日期:** 2004-09-06

E-mail: dgzhang@mail.ustc.edu.cn

发表面等离子体波。金膜厚度为 50 nm. 在空气层中形成振荡的导模。入射光的角度选取由理论模型计算所得衰减全反射曲线中斜率最大的一点角度。

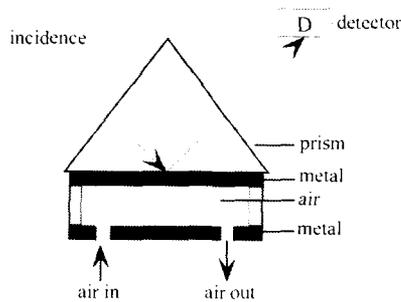


Fig.1 Scheme of experimental set-up

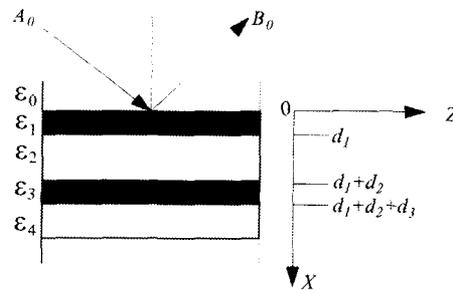


Fig.2 Model of numerical simulation

图 2 是相应结构的理论计算模型。其中，棱镜的介电常数 $\epsilon_0 = 3.6$, 金属银膜的介电系数 $\epsilon_1 = \epsilon_3 = -18 + i0.7$. 空气的介电常数 $\epsilon_2 = \epsilon_4$. 金属银膜的厚度 $d_1 = 50 \text{ nm}$, $d_3 = 50 \text{ nm}$, 空气层的厚度 $d_2 = 1500 \text{ nm}$. A_0 、 B_0 分别代表入射光和反射光的振幅。入射光的波长为 632.8 nm . 入射光照射到棱镜上, 形成全内反射。在此理论模型中, 入射光是 TM 模。相应的反射率的公式如下 [4,5]

$$k_0 = 2\pi/\lambda_0, \beta = k_0\sqrt{\epsilon_0} \sin\theta, \kappa_j = i(\beta^2 - k_0^2\epsilon_j)^{1/2} \quad (j = 0, 1, 2, 3),$$

$$r_{01} = \frac{\epsilon_1\kappa_0 - \epsilon_0\kappa_1}{\epsilon_1\kappa_0 + \epsilon_0\kappa_1}, \quad r_{12} = \frac{\epsilon_2\kappa_1 - \epsilon_1\kappa_2}{\epsilon_2\kappa_1 + \epsilon_1\kappa_2}, \quad r_{23} = \frac{\epsilon_3\kappa_2 - \epsilon_2\kappa_3}{\epsilon_3\kappa_2 + \epsilon_2\kappa_3}, \quad r_{34} = \frac{\epsilon_4\kappa_3 - \epsilon_3\kappa_4}{\epsilon_4\kappa_3 + \epsilon_3\kappa_4},$$

$$r_{234} = \frac{r_{23} + r_{34}e^{i2\kappa_3d_3}}{1 + r_{23}r_{34}e^{i2\kappa_3d_3}}, \quad r_{1234} = \frac{r_{12} + r_{234}e^{i2\kappa_2d_2}}{1 + r_{12}r_{234}e^{i2\kappa_2d_2}}, \quad r = \frac{B_0}{A_0} = \frac{r_{01} + r_{1234}e^{i2\kappa_1d_1}}{1 + r_{01}r_{1234}e^{i2\kappa_1d_1}}, \quad R = \left| \frac{B_0}{A_0} \right|^2 = |rr^*|.$$

其中 R 就是所求得反射率。

4 数值模拟的结果和讨论

采用数值模拟得到的衰减全内反射曲线如图 3 所示。我们选取其中斜率最大的点对应的入射角度作为固定的入射光的入射角。在图 3 中斜率最大的点是入射角度为 0.5500 弧度。我们选取此点为固定的入射

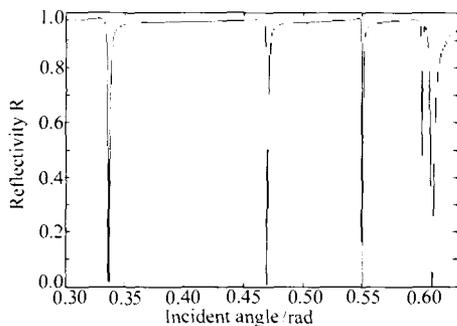


Fig.3 Attenuated total internal reflection ($n=1.00000$)

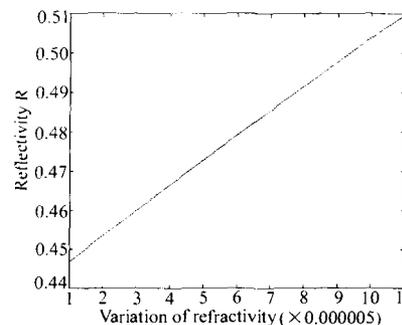


Fig.4 The curve of reflectivity vs the fluctuation of the atmosphere refractivity

角度, 探测器和入射光源都固定不动, 探测反射光强的变化即反射率的变化。我们在计算中选用初始的大气折射率为 1.00000, 当大气折射率每改变 0.000005 时计算一次反射率 R , 得出得一组数据后绘图。反射率的变化随空气折射率的变化曲线如图 4 所示。该曲线近似为一条直线, 说明入射光反射率的变化随空气折射率的变化成线性关系。对曲线进行拟合, 可以得到此直线的方程为 $y = 0.4469 + 0.0063x$, 其中 x 每变化一个单位就表示大气的折射率变化百万分之五。当大气折射率变化 0.000005 得时候相应得反射率就变化 0.0063, 这样就将测量大气折射率得变化转换测量反射率得变化。可以看到折射率变化很小时, 反射率的变

化就比较大, 反射率的变化是折射率变化的约 1000 倍。这样只要探测器的灵敏度比较高就能分辨出反射光强的变化, 由此大气折射率的变化就可以得到。在计算中我们还发现 ε_4 对计算结果的影响不是很大, 对反射率的影响比较大的是 ε_2 。

5 小 结

本文主要建立了用近场光学方法测量大气折射率的模型: 利用棱镜的全内反射激发金属的表面等离子体波, 在由金属 - 空气 - 金属平面波导中形成振荡的导模。探测反射光的强度的变化, 就可以得到空气的折射率的变化。利用数值模拟的方法计算了论证了采用近场光学的方法测量大气折射率的变化, 为今后的实验提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Jiang Y, Cao Z, Shen Q S, *et al.* Low voltage electro-optic polymer light modulator using attenuated total internal reflection [J]. *Opt. & Laser Tech.*, 2001, 33: 417.
- [2] Okamoto T, Yamamoto M, Yamaguchi I. Optical waveguide sensor using a single coupling prism [J]. *J. Opt. Soc. Am*, 2000, 17: 1880.
- [3] Heinz Raether. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings* [M]. Springer-Verlag, 1988.
- [4] Cao Zhuangqi. *Transfer Matrix Method in Waveguide Optics* (导波光学中的转移矩阵方法) [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2002. (in Chinese).
- [5] Jiang Yi. Investigation of optoelectronic devices based on attenuated-total-internal-reflection [D]. *Doctor Dissertation of Shanghai Jiaotong University* (上海交通大学博士学位论文), 2001, (in Chinese).

Measurement of fluctuation of atmosphere refractivity using the near-field optical method

ZHANG Dou-guo¹, WANG Pei¹, LU Yong-hua¹, TANG Lin¹,
YUAN Ren-min², RAO Rui-zhong³, MING Hai¹

(1 Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China ;

2 Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China ;

3 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Exactly measurement of the fluctuation of the atmosphere refractivity is important for the research on the optical property of atmosphere and its application on the environmental detection. A theoretical model of measuring the fluctuation of the atmosphere refractivity using the near-field optical method is proposed: The surface plasmon resonance effect of the metal is stimulated by the internal total reflection. As a result the propagation mode will be induced in the planar waveguide. The point of the maximum slope in the curve of attenuated internal total reflection is selected as the angular of the incident beam. The variation of the intensity of the reflection beam demonstrates the variation of the refractivity of the atmosphere. The precision achieved using the numerical simulation is 0.000005.

Key words: atmosphere optics; near-field optical method; surface plasmon resonance effect; fluctuation of refractivity

作者简介: 张斗国 (1980 -), 男, 博士研究生, 主要从事近场光学的研究。