

文章编号: 1001-3806(2017)02-0221-04

参量变化对长程表面等离子体波特性的影响

刘瑾¹, 杨海马²

(1. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620; 2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了掌握长程表面等离子体波的共振角度、共振峰半峰全宽以及衰减峰深度等重要特性, 采用棱镜耦合激发介质-金属薄膜-介质对称结构中的长程表面等离子体波, 研究了金属膜材料、厚度、介质折射率及介质厚度等参量变化时对长程表面等离子体波特性的影响。结果表明, 实验中激发的长程表面等离子体波的衰减峰半峰全宽比传统的窄1~2个数量级; 当介质膜厚度为500nm和1300nm时, 激发的表面等离子体波的衰减深度只有薄膜厚度为700nm和1000nm时的1/2左右; 随着介质膜厚度的增加, 半峰全宽减小, 金属膜越薄, 衰减深度越深, 衰减峰的半峰全宽值越小; 介质膜折射率的改变对于半峰全宽的影响不明显; 金属膜参量的变化将改变共振峰的位置。该研究为长程表面等离子体波的激发及应用于传感领域提供了有效依据, 有利于其在波导和生物传感等方面的应用。

关键词: 物理光学; 特性影响; 棱镜耦合; 长程表面等离子体波

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.02.015

Influence of parameters change on the characteristics of long-range surface plasma wave

LIU Jin¹, YANG Haima²

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to acquire the characteristics of long-range surface plasma wave, such as the resonance angle, full width at half maximum of resonance peak and depth of attenuation peak, a prism coupling method was used to excite the long-range plasma surface wave of media-metal film-media symmetrical structure. The influences of the changes of material film material, metal film thickness, medium refractive index, medium thickness and other parameters on the characteristics of long-range surface plasma wave were studied. The results show that, the full width at half maximum of the attenuation peak of long-range surface plasma wave is narrower about 1 or 2 orders of magnitude than that of traditional surface plasma wave. When the dielectric film thickness is 500nm and 1300nm, the attenuation depth of plasma surface wave is only about 1/2 of those of dielectric film thickness 700nm and 1000nm. The full width at half maximum decreases with the increasing of dielectric film thickness. The thinner metal film is, the deeper attenuation depth is, the smaller full width at half maximum of attenuation peak is. The changes of medium refractive index has no obvious influence on full width at half maximum. The various metal film parameters will change the position of resonance peak. The study provides the effective basis for the application of long-range surface plasma wave in sensing, waveguide, and biosensors field.

Key words: physical optics; influence on characteristic; prism coupling; long-range surface plasma wave

引言

长程表面等离子体波(long-range surface plasma

wave, LRSPW)是一种特殊的表面波,若满足波矢匹配条件,当介质-金属薄膜-介质结构中的两介质折射率接近,金属薄膜足够薄,则传播在金属薄膜上下两层界面上的表面等离子体波相互耦合,产生长程表面等离子体波^[1-6]。长程表面等离子体波的共振峰半宽度比普通的表面等离子体波的共振峰半峰全宽(角宽)窄得多,因此相对于普通的表面等离子体波来说,其共振角谱对角度和膜厚度以及金属表面的情况更加的敏感^[7-10]。

本文中研究棱镜耦合角度调制的方法激发长程表

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61302181);上海市自然科学基金资助项目(14ZR1418400;14ZR1418500);上海市教委科研创新基金资助项目(13YZ111)

作者简介:刘瑾(1978-),女,博士,副教授,主要研究光电检测及智能监控。

E-mail: flyingpine@sina.com

收稿日期:2016-01-27;收到修改稿日期:2016-03-11

面等离子体波时,金属膜材料及厚度、介质折射率,介质厚度等因素对长程表面等离子体波特性的影响,为长程表面等离子体波的激发以及应用于传感领域提供有效依据^[11-14]。

1 基本理论

长程表面等离子体波的激发方式为棱镜耦合激发介质-金属-介质的对称结构,如图1所示。棱镜的介电常数为 $\varepsilon_0\varepsilon_p$, ε_0 为真空介电常数, ε_p 为棱镜的相对介电常数。图中金属薄膜的厚度为 d_1 ,设金属薄膜及其上下介质(指非金属介质:电介质、空气等)都是非磁(相对磁导率 $\mu_r=1$)的各向同性介质,它们的介电常数分别记为 $\varepsilon_0\varepsilon_m$ 和 $\varepsilon_0\varepsilon_c$, ε_m 为金属的相对介电常数, ε_c 表示金属两侧介质的相对介电常数,其中 $\varepsilon_m=\varepsilon_{m,r}+j\varepsilon_{m,i}$ 是复数。金属膜上方介质膜的厚度为 d_2 ,下方介质的厚度可认为半无限大, $x=-d_1$ 和 $x=0$ 的面是金属与介质的两个界面。若要激发表面等离子波,则入射光波的模式需为TM模式(H_y, E_x, E_z)。设入射偏振光在棱镜底面与法线的夹角(简称入射角)为 θ_p 。

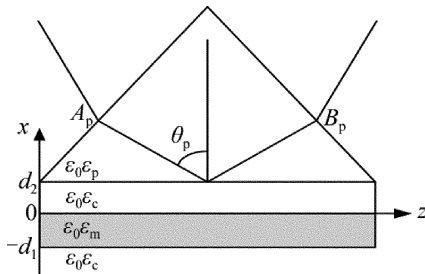


Fig. 1 System of long-range surface plasma wave excited by prism coupling

设沿 z 传播的TM波的磁场强度分布为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{i}_y H_y = \mathbf{i}_y \exp[-j(\omega t - \beta z)] \cdot \begin{cases} A_p \exp[\alpha_p(x - d_2)] + B_p \exp[-\alpha_p(x - d_2)], (x > d_2) \\ A_c \exp(\alpha_c x) + B_c \exp(-\alpha_c x), (0 < x < d_2) \\ A_m \exp(\alpha_m x) + B_m \exp(-\alpha_m x), (-d_1 < x < 0) \\ A_e \exp[\alpha_c(x + d_1)], (x < -d_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω 代表光频, β 代表磁场沿着 z 轴方向的传播常数; A, B 分别表示入射波磁场和反射光波磁场的振幅, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\alpha_p = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \varepsilon_p}$, $\alpha_c = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \varepsilon_c}$, $\alpha_m = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \varepsilon_m}$;下标 p, c 和 m 分别表示棱镜、介质和金属。波动方程由下式给出:

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \frac{\varepsilon_r}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

根据TM模在 $x=-d_1, x=0, x=d_2$ 界面上的电磁场连续条件,可得出反射率公式:

$$R = \left| \frac{B_p}{A_p} \right|^2 = \left| \frac{r_{c,p} + r_{c,m,c} e^{-\alpha_c d_2}}{1 + r_{c,p} r_{c,m,c} e^{-\alpha_c d_2}} \right|^2 \quad (3)$$

式中, $r_{c,m,c}$ 和 $r_{c,p}$ 分别表示相应层的菲涅耳系数,可由菲涅耳公式计算得出,其值为:

$$r_{c,m,c} = \frac{r_{m,c} + r_{c,m} e^{-\alpha_m d_1}}{1 + r_{m,c} r_{c,m} e^{-\alpha_m d_1}}, r_{c,m} = \frac{\varepsilon_c \alpha_m - \varepsilon_c \alpha_c}{\varepsilon_c \alpha_m + \varepsilon_m \alpha_c},$$

$$r_{m,c} = \frac{\varepsilon_m \alpha_c - \varepsilon_c \alpha_m}{\varepsilon_m \alpha_c + \varepsilon_c \alpha_m}, r_{c,p} = \frac{\varepsilon_c \alpha_p - \varepsilon_p \alpha_c}{\varepsilon_c \alpha_p + \varepsilon_p \alpha_c} \quad (4)$$

当棱镜材料的折射率足够大,从而通过调整棱镜底面的入射角使入射光(TM模式)在界面方向的波矢分量等于表面等离子体波的波矢(即满足波矢匹配条件),长程表面等离子体波可以被激发。由(3)式可以看出,金属膜材料及厚度、介质厚度和折射率 n 的小范围变化都将对反射率造成影响。

2 实验

2.1 长程与传统表面等离子体波的对比

采用波长为632.8nm的He-Ne激光器作为光源,底角为45°的ZF6材质的直角棱镜,分别激发传统结构和介质-金属薄膜-介质组成的对称结构。采用图2所示的系统进行测试,激光器发出的光经过偏振器产生TM模式的偏振光,经光阑、准直透镜组后,入射到棱镜中,采用光功率计检测出射光的光强,采用测角转盘来实现入射角度的测量,入射角的范围为 $\theta_p = 57.5^\circ \sim 75^\circ$ 。传统结构中在棱镜斜边上镀50nm的金膜,被测介质是质量分数为0.25的NaCl溶液,在632.8nm时,其折射率为1.3792。采用棱镜耦合方法激发介质-金属薄膜-介质中的长程表面等离子体波时,介质采用聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)薄膜,在632.8nm波长下的折射率为1.49,其厚度为 $d_2 = 1000\text{nm}$;金属采用金膜 $d_1 = 15\text{nm}$,在632.8nm时的折射率为 $n_{Au} = 0.19609 + j3.2558$ 。测得的归一化光强与角度变化曲线如图3所示。图中横轴为入射角度,纵轴是反射光的归一化光强,由于测得的光强值较小,因此做归一化处理,其值没有单位。从图中可以看出,当采用棱镜耦合的方式来激励PMMA-金属薄膜-PMMA结构时,产生的衰减峰的半峰全宽比传统的棱镜耦合的方式激励金属薄膜-被测介质的半峰全宽小得多,即其衰减峰更加尖锐,说明此时的损耗比传统的表面等离子体波(surface plasma wave, SPW)的损耗要小得多,因此能够传输更长的距离,所以,也把这种表面等离子体波称为长程表面等离子体波,其对于角度和膜厚度以及金属表面的情况更加的敏感。测试结果显示,长程表面等离子体波的半峰全宽为 0.121° ,传统的表面等离子体波的半峰全宽为 5.365° 。

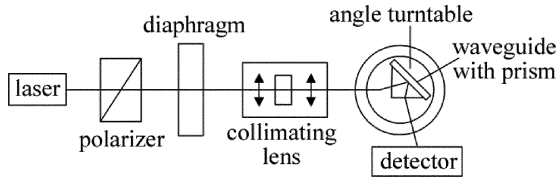


Fig. 2 Diagram of testing system

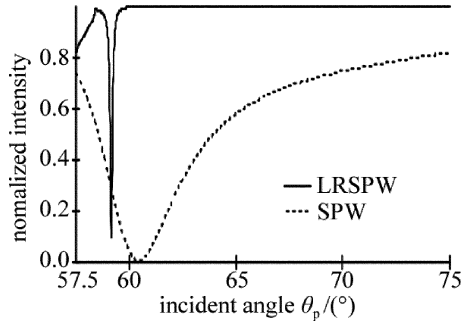


Fig. 3 Comparison of long-range surface plasma wave and the traditional structure

2.2 不同材质的金属薄膜对衰减峰的影响

光源与棱镜不变,激发长程表面等离子体波时,介质采用 PMMA 薄膜, $d_2 = 1000\text{nm}$; 金属厚度 $d_1 = 15\text{nm}$, 金属薄膜分别采用金膜、银膜、铝膜和铜膜进行测试。在 632.8nm 时各金属的折射率分别为 $n_{\text{Au}} = 0.19609 + j3.2558$, $n_{\text{Ag}} = 0.15677 + j3.8045$, $n_{\text{Al}} = 0.12667 + j7.2811$, $n_{\text{Cu}} = 0.30703 + j3.4345$, 入射角范围为 $\theta_p = 58.5^\circ \sim 59.5^\circ$, 测得的结果如图 4 所示。从图中可以看出,在激励长程表面等离子体波时,采用不同的金属材质,对于衰减峰的位置和半峰全宽都会产生影响,对于金膜、银膜、铝膜和铜膜,所对应的共振峰角度分别为 $59.164^\circ, 59.077^\circ, 58.851^\circ$ 和 59.125° , 所对应的半峰全宽分别为 $0.121^\circ, 0.085^\circ, 0.167^\circ$ 和 0.184° 。因此铝膜所对应的最大衰减时的入射角度最小,金膜对应最大衰减峰时的入射角度最大,银膜对应的衰减峰最尖锐,且衰减最大。因此,采用不同的金属薄膜对于长程表面等离子体波的衰减峰位置、共振峰的半峰全宽以及衰减峰的深度都有影响,可以根据需要选择不同的金属薄膜。由于银、铝和铁的化学性质不是特别稳定,长期与外界接触容易产生氧化,因此常采

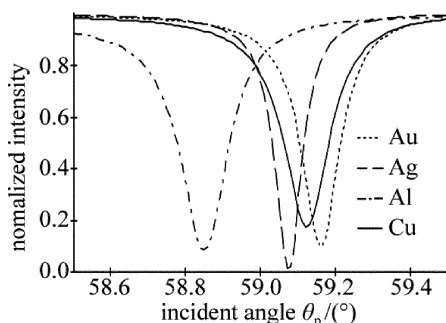


Fig. 4 Test results of long-range surface plasma wave excited by different metal

用金膜来实现传感应用。

2.3 介质膜厚度对衰减峰的影响

光源和棱镜与前面实验一致,激发长程表面等离子体波时,金属薄膜采用金膜,其厚度 $d_1 = 15\text{nm}$, 介质采用 PMMA 薄膜,金属薄膜与棱镜之间的介质膜厚度 d_2 分别采用 $500\text{nm}, 700\text{nm}, 1000\text{nm}$ 和 1300nm 时,改变入射角 θ_p ,其变化范围为 $58.4^\circ \sim 59.5^\circ$,测得的光强随入射角变化的曲线如图 5 所示。所对应的共振峰角度分别为 $58.954^\circ, 59.093^\circ, 59.166^\circ$ 和 59.183° 。从图 5 中可以看出,激励长程表面等离子体波时,当棱镜与金属薄膜之间的介质膜厚度不同时,对于衰减峰的位置、深度及衰减峰的半峰全宽都会产生影响。随着介质膜厚度的增大,衰减峰对应的共振角度增大。若要取得较大的衰减深度,则介质膜选择既不能太厚也不能太薄,当介质膜厚度为 500nm 和 1300nm 时,激发的表面等离子体波的衰减深度只有 700nm 和 1000nm 厚度薄膜时的 $1/2$ 左右。而介质膜的厚度对于长程表面等离子体波的半峰全宽影响较为显著,当介质膜厚度为 500nm 时,半峰全宽的值最大, 1300nm 时半峰全宽的值最小。而介质厚度为 700nm 和 1000nm 时,共振曲线具有近似相等的衰减程度,但介质厚度为 1000nm 时,具有较小的半峰全宽值。随着介质膜厚度的增加,所激发的长程表面等离子体波的半峰全宽减小。

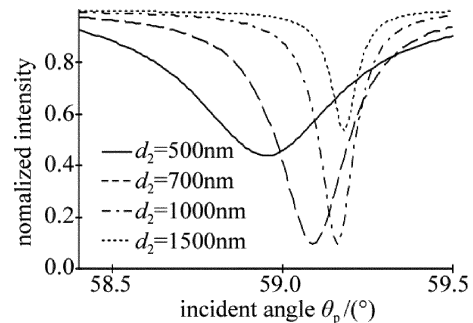


Fig. 5 Results with the excitation of dielectric film with different thickness

2.4 金属膜厚度对衰减峰的影响

激发长程等离子体表面波时,保持光源与棱镜不变,介质采用 PMMA 膜,波长为 632.8nm 时折射率为 1.49 ,厚度 $d_2 = 1000\text{nm}$,金属薄膜采用金膜,膜厚 d_1 分别采用 $10\text{nm}, 15\text{nm}, 20\text{nm}, 30\text{nm}$ 时,改变入射角 θ_p ,其变化范围为 $58^\circ \sim 62^\circ$,测得的光强随入射角变化的曲线如图 6 所示,分别在 $58.691^\circ, 59.164^\circ, 59.769^\circ$ 和 61.281° 处产生最大衰减。从图 6 中可以看出,在激励长程表面等离子体波时,采用不同的金属膜厚度,对于衰减峰的位置和衰减峰的半峰全宽都会产生影响,图中当金膜为 10nm 的时候,衰减深度最深,衰减峰的半峰宽度最小;而当金属膜为 30nm 时,衰减峰非常不明

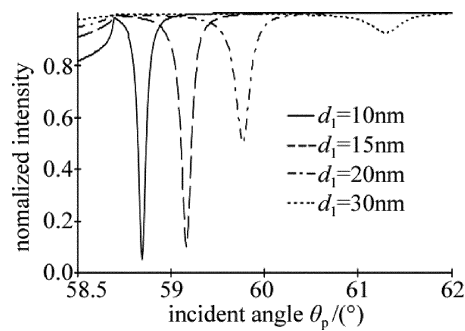


Fig. 6 Results with the excitation of metal film with different thickness

显,因此,在激发长程表面等离子体波时,金属材质越薄,则衰减深度越深,衰减峰的半峰全宽值越小,当金属膜厚度大于20nm时,激励的长程表面等离子体波的衰减峰不明显,这是由于金属膜上下与介质接触界面表面波的耦合产生了长程表面等离子体波,当金属薄膜越厚时,产生的耦合效应越小。

2.5 介质膜折射率对衰减峰的影响

实验中的光源和棱镜与前面实验一致,在激发长程表面等离子体波时,采用金膜,膜厚为15nm,介质膜厚 $d_2 = 1000\text{nm}$,当介质膜折射率 n 分别为1.48和1.49时,改变入射角 θ_p ,其变化范围为 $58^\circ \sim 60^\circ$,测得的光强随入射角变化的曲线如图7所示。分别在 58.571° 和 59.163° 产生最大衰减,从图中可以看出,在激励长程表面等离子体波时,当介质折射率变化时,衰减峰的位置发生变化,随着介质折射率的增大,衰减峰的位置向着大角度方向移动,而介质折射率的改变对于半峰全宽的影响不明显。

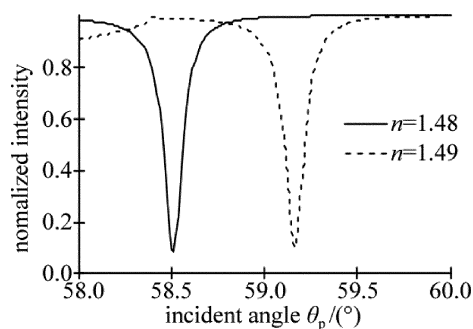


Fig. 7 Results with the excitation of dielectric film with different refractive index

3 结论

本文中通过棱镜耦合激发介质-金属-介质结构中的长程等离子体表面波,研究了传统表面等离子体波与长程表面等离子体波的对比,其衰减峰半宽比传统

的窄1~2个数量级,通过改变金属膜材质和厚度、介质层厚度及折射率等参量时长程表面等离子体波谱线的变化,研究了这些参量改变对长程表面等离子体波的衰减峰位置、衰减深度及半峰全宽等特性的影响,为激发长程表面等离子体波及长程表面等离子体波用于传感器的设计提供了有效依据。

参考文献

- [1] SARID D. Long-range surface-plasma waves on very thin metal films [J]. *Physics Review Letters*, 1981, 47(26): 1927-1930.
- [2] DECK R T, SARID D. Enhancement of second harmonic generation by coupling to long-range surface plasmas [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(12): 1613-1617.
- [3] SHI X L, ZHENG S L, CHI H, *et al.* All-optical modulator with long range surface plasmas resonance [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49(7): 316-319.
- [4] SHI H, LIU Z Y, WANG X X, *et al.* A symmetrical optical waveguide based surface plasmas resonance biosensing system [J]. *Sensors and Actuators*, 2013, B185(8): 91-96.
- [5] PARK S Y, KIM J T, SHIN J S, *et al.* Hybrid vertical directional coupling between a long range surface plasmas polariton waveguide and a dielectric waveguide [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(23): 4513-4517.
- [6] CAO Z Q. *Guided wave optics* [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2007: 144-146 (in Chinese).
- [7] SLAVIK R, HOMOLA J. Ultrahigh resolution long range surface plasmas-based sensor [J]. *Sensors and Actuators*, 2007, B123(1): 10-12.
- [8] NENNINGER G G, HOMOLA J, YEE S S. Long range surface plasmas for high resolution surface plasmas resonance sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 2001, B74(1): 145-151.
- [9] TAN X X, WANG G J, WANG Zh B. Opened suspended core fiber chip based on surface plasma resonance enhancement mechanism [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(2): 209-212 (in Chinese).
- [10] HU M Y, ZHU X, QI L J. Numerical simulation of Otto structure in surface plasma wave light modulator [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 325-327 (in Chinese).
- [11] LI Y X, LIU F, HUANG Y D, *et al.* Coupling between second-order mode in dielectric waveguide and fundamental mode in long range surface plasmas waveguide [J]. *Optics Communications*, 2013, 289(2): 60-63.
- [12] GUO X W, DONG Q M. Long range surface plasmas interference lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88(8): 2184-2187.
- [13] KRUPIN O, WANG C, BERINI P. Selective capture of human red blood cells based on blood group using long-range surface plasmas waveguides [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2014, 53(3): 117-122.
- [14] SUI G R, CHENG L, CHEN L. Large positive and negative lateral optical beam shift due to long-range surface plasmas resonance [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(6): 1553-1556.