

文章编号: 0253-2239(2010)07-2164-06

# 表面等离子体共振膜系结构优化设计

洪小刚<sup>1</sup> 徐文东<sup>1</sup> 赵成强<sup>1</sup> 唐晓东<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup>华东师范大学信息科学技术学院, 上海 200241

**摘要** Kretschmann 型激发表面等离子体共振 (SPR) 膜系结构是探针诱导表面等离子体共振耦合纳米光刻技术 (PSPRN) 的关键部分之一。采用多层介质的特性矩阵法计算膜系结构的透射系数和反射率, 对 PSPRN 所需的单膜层、双膜层及三膜层膜系结构进行了优化设计。计算结果表明, 光波波长为 514.5 nm 时, 对于选定材料的最佳膜系结构是 Ag 膜厚度为 46 nm 的单膜层结构, Ag 膜厚度为 24 nm, AgO<sub>x</sub> 厚度为 95 nm 的双膜层结构及 Ag 膜厚度为 44 nm, SiO<sub>2</sub> 厚度为 180 nm, AgO<sub>x</sub> 厚度为 10 nm 的三膜层结构, 提出了记录层材料应选择折射系数小且吸收系数尽可能小的光刻材料的观点。

**关键词** 薄膜光学; 表面等离子体共振膜系结构; 特性矩阵法; 透射系数; 反射率

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2164

## Optimal Design of Surface Plasmon Resonance Films Structure

Hong Xiaogang<sup>1</sup> Xu Wendong<sup>1</sup> Zhao Chengqiang<sup>1</sup> Tang Xiaodong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>School of Information Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China

**Abstract** Kretschmann surface plasmon resonance (SPR) films structure is one of the most important parts of probe induced surface plasmon resonance coupling nanolithography (PSPRN). The film characteristic matrix method is used to calculate the transmission coefficient and the reflectivity of the layers for optimal design of single-, two- or three-films structure of PSPRN. Optimal results for the selected film materials are obtained at the wavelength of 514.5 nm. For single film structure, the optimal thickness of Ag film is 46 nm. The optimal thickness of the Ag film is 24 nm and the AgO<sub>x</sub> film is 95 nm for two-film structure. For three-film structure, the optimal result is that the thickness of Ag film is 44 nm, SiO<sub>2</sub> film is 180 nm, and AgO<sub>x</sub> film is 10 nm. Furthermore, it is presented that the material with small refractive index and low absorption coefficient is more effective as the recording layer.

**Key words** thin films optics; surface plasmon resonance films structure; characteristic matrix method; transmission coefficient; reflectivity

## 1 引 言

表面等离子体共振 (SPR) 技术在近几年来发展非常迅速, 尤其是采用棱镜耦合方式激发 SPR 的 Kretschmann 型结构的 SPR 技术已在多个科学领域得到应用, 如传感器<sup>[1~4]</sup>、薄膜光学参数和膜厚测量、表面等离子体 Q 开关、全息成像<sup>[5]</sup> 及近场光

刻<sup>[6,7]</sup>等, 其原理是将金属薄膜直接镀在棱镜面上, 入射光通过棱镜在金属—棱镜分界面处会发生全反射; 当全反射的倏逝波实现与表面等离子体波的波矢量匹配, 光的能量便能有效地传递给表面等离子体, 从而激发出表面等离子体共振。这是目前广泛用于表面等离子体共振科研与产品生产的一种结

收稿日期: 2009-09-01; 收到修改稿日期: 2009-10-14

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60490294), 上海曙光计划(06SG30)资助课题。

作者简介: 洪小刚(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事近场纳米光刻等方面的研究。E-mail: hxg910@siom.ac.cn

导师简介: 徐文东(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光存储相关测试、特殊光学显微镜、特殊 SPM 显微镜和特殊光学设计等方面的研究。E-mail: xuwendong@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

构。文献[7]提出的探针诱导表面等离子体共振耦合纳米光刻 (PSPRN) 技术采用 Kretschmann 型激发 SPR 膜系结构, 通过探针的局域场增强效应<sup>[8]</sup>在记录层上实现纳米量级的近场光刻。这一技术的一个关键部分就是 Kretschmann 型激发 SPR 膜系结构, 其主要作用是增大倏逝场的场强, 提高入射光的能量利用率。而对膜系结构的优化设计就是要获得大的电场强度透射系数, 减少全反射的反射光强, 从而提高能量利用率。此优化设计不但对 PSPRN 有重要的实际意义, 对于传感器等其他采用 Kretschmann 型激发 SPR 膜系结构的、特别是利用 SPR 场增强效应的 SPR 技术具有重要的指导意义及参考价值。

本文采用分层介质的 p 偏振光的特性矩阵法对 PSPRN 所采用的 Kretschmann 型激发 SPR 膜系结构进行优化设计, 分别就文献[9]提出的单膜层 (Ag), 双膜层 (Ag/AgO<sub>x</sub>) 以及三膜层 (Ag/SiO<sub>2</sub>/AgO<sub>x</sub>) 的膜系结构进行计算优化, 获取最大的电场强度透射系数以得到最佳的膜系结构。

## 2 特性矩阵法

Kretschmann 型膜系结构激发 SPR 过程实际上就是 p 偏振光在多层介质中的传播过程, 为此可以通过采用菲涅耳公式或者分层介质的特性矩阵法来计算多层介质膜系结构的反射率、透射率、电场强度反射系数及透射系数来分析 SPR 特性<sup>[10~14]</sup>。本文采用的是分层介质的特性矩阵法<sup>[15]</sup>。

$N+1$  层介质结构, 包括一层衬底、 $N-1$  层膜层及一层光出射介质

$$n_0 | n_1(d_1) | n_2(d_2) | \cdots | n_j(d_j) | \cdots \times | n_{N-1}(d_{N-1}) | n_N,$$

式中  $n_j$  为第  $j$  层介质的折射率 ( $j=0\sim N$ ),  $d_j$  为第  $j$  层膜的厚度 ( $j=1\sim N-1$ )。

第  $j$  层膜的特性矩阵为

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -i \sin \delta_j / \eta_j \\ -i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\delta_j = (2\pi/\lambda)n_j d_j \cos \theta_j$ , 为膜层的相位厚度,  $\eta_j = \cos \theta_j / n_j$ ,  $\theta_j$  为各层介质中的折射角 ( $j=1\sim N$ ),  $\theta_0$  为入射角。

则  $N-1$  层膜层的总特性矩阵为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_{N-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

令

$$m_1 = a_{11} + a_{12} \eta_N, \quad m_2 = a_{21} + a_{22} \eta_N, \quad (3)$$

得电场强度反射系数

$$r = (m_1 \eta_0 - m_2) / (m_1 \eta_0 + m_2), \quad (4)$$

反射率

$$R = |r|^2 = |(m_1 \eta_0 - m_2) / (m_1 \eta_0 + m_2)|^2, \quad (5)$$

磁场强度透射系数

$$t_H = |2\eta_0 / m_1 \eta_0 + m_2|, \quad (6)$$

由文献[16]可得电场强度透射系数

$$t_E = |t_H n_0 / n_N|. \quad (7)$$

透射率

$$T = |t_H|^2 \text{Re}(\eta_N) / \eta_0 = |t_E|^2 \text{Re} n_N \cos \theta_N / (n_0 \cos \theta_0). \quad (8)$$

PSPRN 技术利用的是 SPR 对倏逝场的场增强, 它不同于一般的 SPR 技术, 如传感器技术, 采用的是衰减全反射的方法。而 SPR 共振场是一个倏逝场, 膜系结构的透射率  $T$  为 0, 因此后面只需讨论反射率  $R$  及电场强度透射系数  $t_E$ 。

## 3 膜系结构优化设计

文献[9]提出的膜系结构示意图如图 1 所示。膜系结构优化设计采用的光波波长为 514.5 nm。对于指定光波长和材料的膜系结构, 只有入射角及膜层厚度对电场强度透射系数有影响, 因此优化设计主要是对膜层厚度 (包括 Ag 膜厚度  $d_{Ag}$ , SiO<sub>2</sub> 膜厚度  $d_{SiO_2}$  和 AgO<sub>x</sub> 膜厚度  $d_{AgO_x}$ ) 及入射角 ( $\theta_0$ ) 进行优化。优化设计过程: 采用特性矩阵法计算  $t_E$ , 得到计算范围内的最大透射系数  $t_{E_{max}}$ , 膜系结构的最优解 (各膜层厚度), 及  $t_{E_{max}}$  对应的入射角  $\theta_{E_{max}}$  和反射率  $R$ ; 其次分析该膜系结构的  $R(\theta_0)$ , 获得反射率最小值  $R_{min}$  及  $R_{min}$  对应的入射角  $\theta_{R}$  和  $t_E$ ; 最后分析

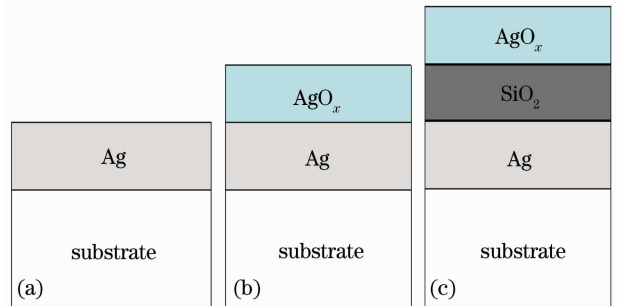


图 1 SPR 膜系结构示意图。(a)单膜层,

(b)双膜层,(c)三膜层

Fig. 1 Schematic diagram of SPR film structure.

(a) single-film, (b) two-film, (c) three-film

$t_E$  的各个影响因素,主要是通过  $t_E$  灰度图,一定膜系结构的  $t_E(\theta_0)$  及其最大透射系数  $t_m, t_m$  对应的入射角  $\theta_{IE}$  和  $R$  的对比分析。

膜系结构优化设计首先是选择衬底材料。为了使入射光在棱镜内具有较大的波矢量,增大波矢量匹配的角度调节范围,衬底材料选择折射率为 1.768 的 ZF6 玻璃棱镜。光出射介质为空气,折射率为 1。衬底材料与空气的临界全反射入射角为  $\theta_c = 34.4^\circ$ 。

### 3.1 单膜层

单膜层结构表示棱镜/金属/空气的三层介质结构。Au 膜、Ag 膜、Al 膜和 Cu 膜是在表面等离子体共振中得到应用的金属薄膜,其中 Au 膜和 Ag 膜是最常用的。由于 Ag 膜具有很高的反射率及共振时具有较大的场增强效应<sup>[9]</sup>,因此对于 PSPRN 方法而言,它是最佳的金属膜层材料。计算时 Ag 膜的折射率采用实验室测量数据,在波长为 514.5 nm 时其折射率为  $n_{Ag} = 0.144 + 2.993i$ 。

计算  $t_E(\theta_0, d_{Ag})$ ,得到  $t_{E_{max}} = 8.5163$ ,单膜层结构的最优解是  $d_{Ag} = 46$  nm,对应  $\theta_{E_{max}} = 36.9^\circ, R = 0.022$ 。计算  $R(\theta_0)$ ,得到  $R_{min} = 0.0011$ ,对应  $\theta_{IR} = 37^\circ, t_E = 8.2593$ 。 $d_{Ag}$  对  $t_E$  的影响如图 2 所示,随着  $d_{Ag}$  的增大, $t_m$  接近 0,但  $\theta_{IE}$  几乎不随  $d_{Ag}$  变化,计算时可将  $d_{Ag}$  的范围设为 0~100 nm。

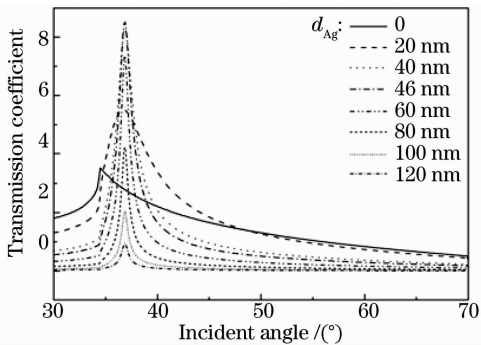


图 2 不同 Ag 膜厚度的单膜层膜系结构的透射系数曲线  
Fig. 2 Transmission coefficient curves for single Ag film structure with different thicknesses

### 3.2 双膜层

双膜层结构表示棱镜/金属/记录层/空气的 4 层介质结构。其中金属膜仍选用 Ag,记录层选择  $AgO_x$ ,它在波长 514.5 nm 时实验室测得的折射率为  $n_{AgO_x} = 2.378 + 0.087i$ 。计算  $t_E(\theta_0, d_{Ag}, d_{AgO_x})$ ,其中  $0 \leq d_{Ag} \leq 100$  nm,  $0 \leq d_{AgO_x} \leq 200$  nm。结果发现  $t_{E_{max}}$  对应的最优解是单膜层结构的最优解,因此有必要先分析  $d_{AgO_x}$  对  $t_E$  的影响。图 3 为  $d_{Ag} = 40$  nm 时,  $d_{AgO_x}, \theta_0$  与  $t_E$  的灰度关系图。由图可见,

随着  $d_{AgO_x}$  的增加,  $t_E$  呈“周期性变化”,只是每个周期内的  $t_{E_{max}}$  随  $d_{AgO_x}$  的增加而减小,并且第一个周期是不完整的。后面将第一周期与其他周期分开讨论,并主要讨论第一周期的变化规律。

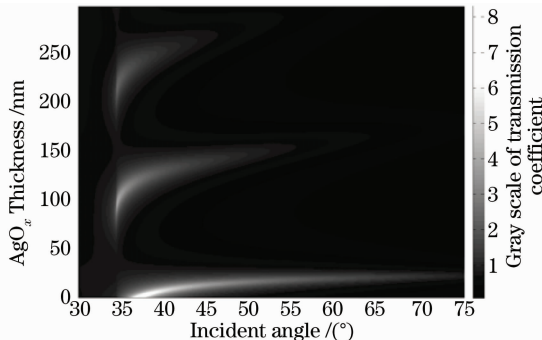


图 3 双膜层结构的透射系数关于  $AgO_x$  厚度及入射角度的灰度图

Fig. 3 Grayscale of the transmission coefficient of two films structure on the thickness of  $AgO_x$  film and the incident angle

在第一周期,假定  $0 \leq d_{AgO_x} \leq 50$  nm,  $d_{Ag} = 40$  nm,计算  $t_E(\theta_0)$ 。如图 4 所示,  $t_m$  是随着  $d_{AgO_x}$  增加而减小的,  $\theta_{IE}$  却增大;当  $d_{AgO_x}$  超过 25 nm 时  $t_m$  接近 1,SPR 已没有增强效果了,可见  $AgO_x$  的加入对倏逝场起着衰减的作用,其厚度越小越好。对于其他周期如图 3 所示,在一个周期内,  $d_{AgO_x}$  对  $t_m$  的影响是先增后减的;当  $d_{AgO_x}$  增加且  $t_m$  也增大时,对应  $\theta_{IE} = \theta_c$ ;当  $t_m$  到达周期内的最大值后,  $d_{AgO_x}$  对  $t_m$  及  $\theta_{IE}$  的影响就如第一周期了。

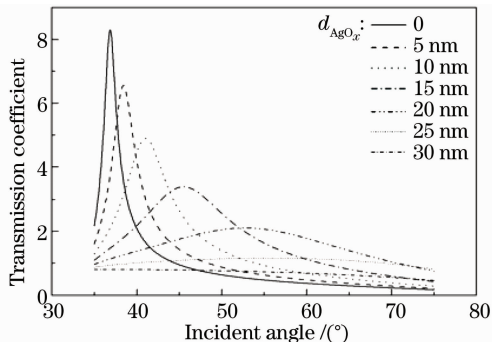


图 4 不同  $AgO_x$  厚度时电场强度透射系数与入射角度关系曲线图

Fig. 4 Curves of the relation between the electric-field intensity transmission coefficient and the incident angle with different thicknesses of  $AgO_x$

$AgO_x$  厚度影响着最佳  $d_{Ag}$ 。计算结果如图 5(a)所示,在第一个周期内,最佳  $d_{Ag}$  随着  $d_{AgO_x}$  的增加而减小,且  $\theta_{IE}$  也随之增大;当  $d_{AgO_x}$  大于 14 nm,最佳  $d_{Ag}$  将小于 36 nm,其场增强不如光吸

收, Ag 膜对电场强度起了衰减作用, 表面等离子体共振已没有实际意义。AgO<sub>x</sub> 对最佳  $d_{Ag}$  会产生比较大的影响主要是因为 AgO<sub>x</sub> 是吸收介质。而非吸收介质, 对最佳  $d_{Ag}$  影响较小, 如 SiO<sub>2</sub> (在波长 514.5 nm 时实验室所测得的折射率为  $n_{SiO_2} =$

1.464), 它对最佳  $d_{Ag}$  及  $\theta_{IE}$  影响不大, 如图 5(b) 所示, 在 0~16 nm 范围内最佳  $d_{Ag}$  只变化了 0.5 nm,  $\theta_{IE}$  只变化了 4°, 并且如图 5(c) 所示  $t_m$  的衰减也较 AgO<sub>x</sub> 弱。因此记录层应选择折射系数与吸收系数尽可能小的材料。

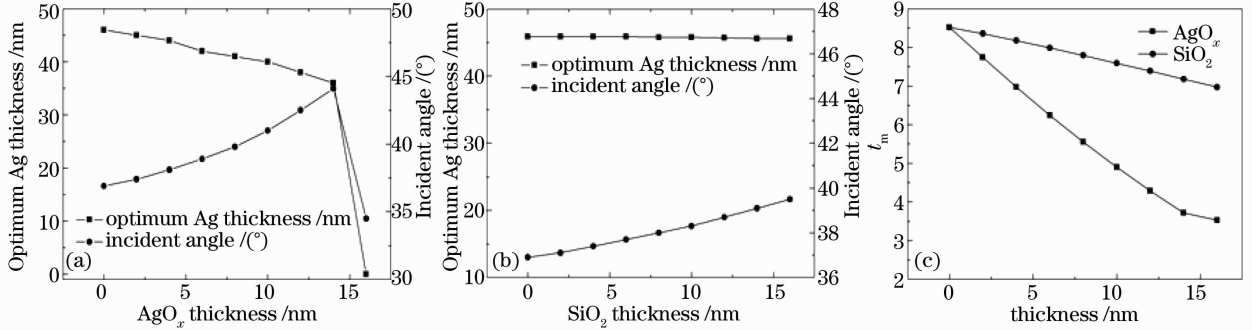


图 5 (a)最佳 Ag 厚度及  $\theta_{IE}$  关于 AgO<sub>x</sub> 厚度的变化曲线; (b)最佳 Ag 厚度及  $\theta_{IE}$  关于 SiO<sub>2</sub> 厚度的变化曲线; (c) AgO<sub>x</sub> 及 SiO<sub>2</sub> 厚度对  $t_m$  的影响

Fig. 5 (a) Curves for the optimal Ag thickness and  $\theta_{IE}$  dependent on AgO<sub>x</sub> thickness; (b) curves for the optimal Ag thickness and  $\theta_{IE}$  dependent on SiO<sub>2</sub> thickness; (c) effects of the thickness of AgO<sub>x</sub> and SiO<sub>2</sub> on  $t_m$

AgO<sub>x</sub> 膜对倏逝场起着衰减的作用并影响着最佳  $d_{Ag}$ , 而本实验室制备最小  $d_{AgO_x}$  为 10 nm。再次计算  $t_E$  得到第一周期内  $t_{E_{max}} = 4.9$ , 最优解是  $d_{Ag} = 40$  nm,  $d_{AgO_x} = 10$  nm, 对应  $\theta_{E_{max}} = 41^\circ$ ,  $R = 0.01$ 。而  $R_{min} = 9.1 \times 10^{-4}$ , 对应  $\theta_{iR} = 41.8^\circ$ ,  $t_E = 4.67$ 。

前面讨论的是 AgO<sub>x</sub> 为薄膜层的情况, 随着  $d_{AgO_x}$  的增加,  $t_E$  将产生周期性变化, 如图 4 所示。除第一个周期外, 其他周期内  $\theta_{E_{max}}$  都等于  $\theta_c$ 。经计算, 当  $d_{AgO_x}$  超过 50 nm 时, 对应的双膜层膜系结构的最优解是  $d_{Ag} = 24$  nm,  $d_{AgO_x} = 95$  nm,  $t_{E_{max}} = 5$ , 如图 6 所示。此时  $R_{min}$  对应的  $\theta_{iR} = \theta_c$ 。

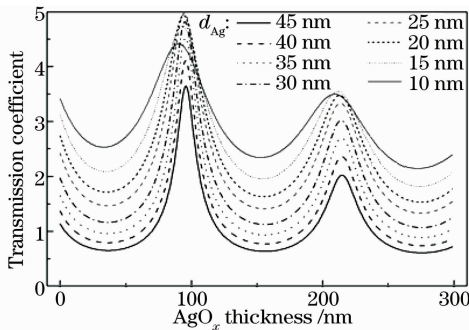


图 6 不同 Ag 膜厚度时 AgO<sub>x</sub> 厚度与透射系数的关系曲线图

Fig. 6 Dependence of transmission coefficient on AgO<sub>x</sub> thickness with different thickness of Ag film

综合上述分析, 双膜层结构的最优解为  $d_{Ag} = 24$  nm,  $d_{AgO_x} = 95$  nm, 其  $t_m$  大小与  $d_{AgO_x} = 10$  nm 时的  $t_{E_{max}}$  相近。如果  $d_{AgO_x}$  可以小于 10 nm 时, 那么如

图 5(c) 所示, 双膜层结构的最优解, 即为  $d_{AgO_x}$  最小时加其对应的最佳  $d_{Ag}$  的膜系结构。

### 3.3 三膜层

三膜层结构表示棱镜/金属/介质层/记录层/空气的 5 层介质结构。其中金属膜及记录层材料不变, 介质层选用光热性质较稳定的 SiO<sub>2</sub>。计算  $t_E(\theta_0, d_{Ag}, d_{SiO_2}, d_{AgO_x})$ , 其中  $0 \leq d_{Ag} \leq 100$  nm,  $0 \leq d_{SiO_2} \leq 200$  nm,  $0 \leq d_{AgO_x} \leq 200$  nm。结果表明,  $t_{E_{max}} = 10.65$ , 最优解是  $d_{Ag} = 46$  nm,  $d_{SiO_2} = 196$  nm,  $d_{AgO_x} = 0$ , 对应  $\theta_{E_{max}} = \theta_c$ , 这是个双膜层结构。利用本实验室制备膜层厚度的限制 10 nm, 再次计算得到  $t_{E_{max}} = 10.05$ , 最优解是  $d_{Ag} = 44$  nm,  $d_{SiO_2} = 180$  nm,  $d_{AgO_x} = 10$  nm, 对应  $\theta_{E_{max}} = \theta_c$ , 此时  $R_{min}$  对应的  $\theta_{iR}$  也等于  $\theta_c$ 。

下面来分析 SiO<sub>2</sub> 及 AgO<sub>x</sub> 对  $t_E$  的影响。由双膜层结构分析可得,  $d_{AgO_x}$  或  $d_{SiO_2}$  较大时  $t_m$  对应的  $\theta_{E_{max}} = \theta_c$ ;  $t_E$  随着  $d_{SiO_2}$  及  $d_{AgO_x}$  呈周期性变化, 如图 7 所示, 图中  $d_{Ag}$  都为 40 nm。由图 7(a), (b) 可得, 当确定一个膜层厚度时另一个膜层厚度对  $t_m$  及  $\theta_{IE}$  的影响与双膜层结构一样。

为了与单膜层和双膜层结构相比较, 计算第一周期内的  $t_E$ , 并取实验室制备薄膜厚度限制 10 nm。计算得到  $t_{E_{max}} = 3.95$ , 最优解是  $d_{Ag} = 38$  nm,  $d_{SiO_2} = 10$  nm,  $d_{AgO_x} = 10$  nm, 对应  $\theta_{E_{max}} = 44.4^\circ$ ,  $R = 0.11$ ; 此时  $R_{min} = 0.07$ , 对应的  $\theta_{iR} = 45.7^\circ$ ,  $t_E = 3.75$ 。可见在第一周期, 膜层越多,  $t_{E_{max}}$  越小, 且对应  $\theta_{E_{max}}$  越大。

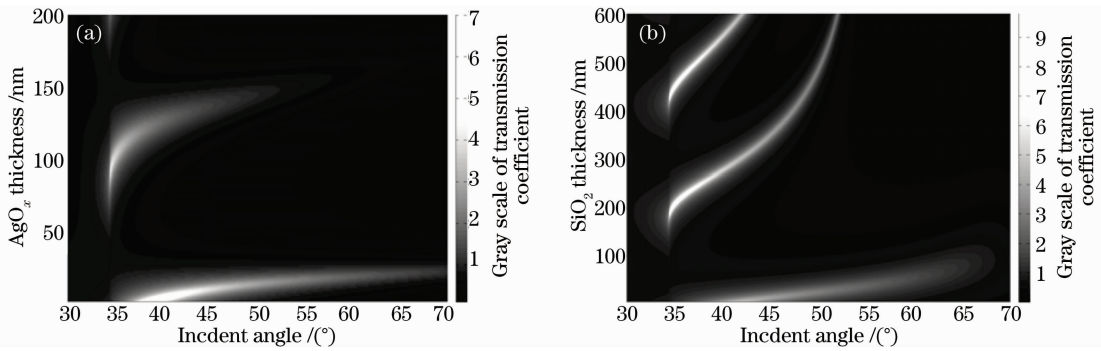


图 7 三膜层结构的透射系数关于膜层厚度及入射角度的灰度图 (a)AgO<sub>x</sub> ( $d_{\text{SiO}_2} = 10 \text{ nm}$ ); (b)SiO<sub>2</sub> ( $d_{\text{AgO}_x} = 10 \text{ nm}$ )

Fig. 7 Gray scale of transmission coefficient of three films structure on thickness of films and incident angle.

(a)AgO<sub>x</sub> ( $d_{\text{SiO}_2} = 10 \text{ nm}$ ); (b)SiO<sub>2</sub> ( $d_{\text{AgO}_x} = 10 \text{ nm}$ )

从前面三种膜系结构的优化设计的结果来看,不论是单膜层、双膜层还是三膜层结构,对于固定膜系结构,反射率最小及透射系数最大对应的入射角,除了为临界全反射角时,其他情况下是不相等的,这与文献[16]的观点“如果反射率最小,则表面电场强度达到最大值”是不相符的,且透射系数最大对应的入射角要相对较小;透射系数会随着 SiO<sub>2</sub> 及 AgO<sub>x</sub> 的厚度呈周期性变化,且除第一周期外其他周期内的最大透射系数对应的入射角为临界全反射角。优化设计获得的膜系结构对应的透射系数曲线如图 8 所示。

优解是 Ag 膜层厚 24 nm, AgO<sub>x</sub> 膜层厚 95 nm,且由于 AgO<sub>x</sub> 膜层较厚不容易被刻穿,因此这个膜系结构相比单膜层膜结构要更稳定,只不过这个结构的最大透射系数不是很大。三膜层膜系结构的最优解是 Ag 膜层的厚度为 44 nm, SiO<sub>2</sub> 膜层的厚度为 180 nm, AgO<sub>x</sub> 膜层厚度为 10 nm, 此三膜层膜系结构的最大透射系数是最大的,膜层稳定性也较好,只是透射系数曲线的半峰全宽太小,不利于实验现象的观察。计算结果也表明:对于双膜层和三膜层膜系结构,随着非金属膜层的增厚,膜系结构的透射系数呈“周期性变化”,并且每个周期内的最大透射系数对应的入射角都为临界全反射角。

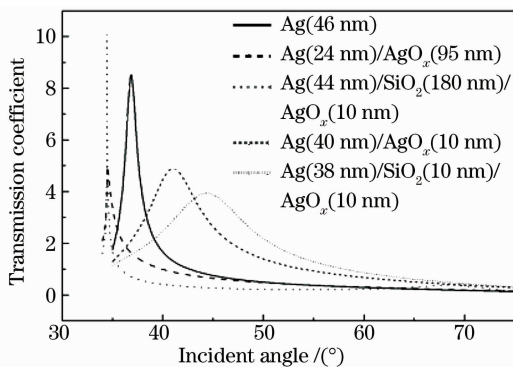


图 8 优化膜系结构的透射系数曲线图

Fig. 8 Transmission coefficient curves for optimum films structures

上述的优化设计结果有待于采用文献[17]提出的基于原子力显微镜(AFM)的PSPRN光刻系统进行实验检测。

## 4 结 论

结合上述计算分析及讨论得出膜系优化设计的结果表明:当膜层厚度均较小时,膜系结构最优解随着膜层的增多,最大透射系数会减小,对应的入射角会增大,最优的是单膜层膜结构,在波长 514.5 nm,最佳 Ag 膜厚度是 46 nm。对于双膜层结构,其最

## 参 考 文 献

- Zheng Zheng, Xin Zhao, Jinsong Zhu *et al.*. Optical cavity coupled surface plasmon resonance sensing for enhanced sensitivity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(12): 916~918
- Shuyuen Wu, Hopui Ho. Single-beam self-referenced phase-sensitive surface plasmon resonance sensor with high detection resolution[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 176~178
- Bin Wu, Qingkang Wang. Design optimization of highly sensitive LSPR enhanced surface plasmon resonance biosensors with nanoholes[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 323~326
- Jie Yan, Yonghua Lu, Pei Wang *et al.*. Improving the sensitivity of fiber-optic SPR sensor via radially polarized beam excitation [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 909~911
- Tianhao Zhang, Meirong Yin, Zheyu Fang *et al.*. New applications of surface plasmon resonance technology [J]. *Physics*, 2005, **34**(12): 909~914
- 张天浩,尹美荣,方哲宇等. 表面等离子体共振技术的一些新应用[J]. *物理*, 2005, **34**(12): 909~914
- D. Haefliger, A. Stemmer. Writing subwavelength-sized structures into aluminium films by thermo-chemical aperture-less near-field optical microscopy [J]. *Ultramicroscopy*, 2004, **100**(3~4): 457~464
- Xiaogang Hong, Wendong Xu, Xiaogang Li *et al.*. Numerical simulation of probe induced surface plasmon resonance coupling nanolithography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6643~6648
- 洪小刚,徐文东,李小刚等. 数值模拟探针诱导表面等离子体共振耦合纳米光刻[J]. *物理学报*, 2008, **57**(10): 6643~6648

- 8 Xiaogang Hong, Wendong Xu, Xiaogang Li *et al.*. Field enhancement effect of metal probe in evanescent field[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 74~77
- 9 Li Xiaogang. Study on probe-induced optical recording materials with surface plasma resonance [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 25~26, 50~64  
李小刚. 基于表面等离子体共振的探针诱导光存储材料研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008. 25~26, 50~64
- 10 H. Neff, W. Zong, A. M. N. Lima *et al.*. Optical properties and instrumental performance of thin gold films near the surface plasmon resonance [J]. *Thin Solid Films*, 2006, **496** (2): 688~697
- 11 Biow Hiem Ong, Xiacong Yuan, Swee Chuan Tjin *et al.*. Optimised film thickness for maximum evanescent field enhancement of a bimetallic film surface plasmon resonance biosensor [J]. *Sensors and Actuators B*, 2006, **114** (2): 1028~1034
- 12 Gu Zhengtian, Feng Shimeng, Liang Peihui *et al.*. Sol-gel film sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 83~87  
顾铮天, 冯仕猛, 梁培辉等. 表面等离子体激元共振溶胶-凝胶薄膜传感器[J]. 光学学报, 2001, **21**(1): 83~87
- 13 Cao Zhenxin, Liang Dakai, Guo Mingjiang. Experimental Study on the relationship between film thickness and resonant wavelength based on the optic fiber SPW sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 125~128  
曹振新, 梁大开, 郭明江. 光纤表面等离子体波传感器中膜厚与共振波长关系的实验研究 [J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 125~128
- 14 Zhang Xiaoli, Zeng Jie, Liang Dakai *et al.*. Study on the performance influence of the thickness of the metal film on the optical fiber surface plasma wave resonance sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 373~377  
张晓丽, 曾捷, 梁大开等. 金属膜层对光纤表面等离子传感器的影响研究 [J]. 光学学报, 2008, **28**(s2): 373~377
- 15 Born M, Wolf E. Principles of Optics[M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2005. 49~54  
玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 49~54
- 16 Raether H. Surface Plasmon on Smooth and Rough Surface and on Gratings [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 16~18
- 17 Zhao Chengqiang, Xu Wendong, Hong Xiaogang *et al.*. Probe inducing surface plasmon resonance nanolithographic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 473~477  
赵成强, 徐文东, 洪小刚等. 探针诱导表面等离子体共振纳米光刻系统[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 473~477