

文章编号:1004-4213(2010)07-1216-7

表面等离子共振效应中传统近似理论与薄膜光学理论*

张江涛, 顾铮先[†], 邓传鲁

(上海理工大学 理学院 光电功能薄膜实验室, 上海 200093)

摘要:指出 Kretschmann 模型的传统表面等离子共振公式在求解金属薄膜的参量时存在近似性, 采用更为严密的薄膜光学理论, 通过薄膜膜系的特征矩阵, 得出表面等离子体共振衰减曲线. 结果表明, 表面等离子体共振近似理论与薄膜光学理论得到的共振角及反射率幅度存在差别; 采用等高线图, 给出了共振角差随着金属介电常量的变化规律. 进一步的实验表明, 薄膜光学理论所得模拟结果较表面等离子体共振近似理论与实验值吻合地更好, 证明薄膜光学理论应用在表面等离子体共振效应要优于常用的近似理论. 最后, 采用两种理论对表面等离子体共振传感器进行优化设计, 结果表明, 两种理论所获得的高灵敏度分布区域差异较大, 必须采用薄膜光学理论提供更精确的薄膜参量, 来优化设计高灵敏度表面等离子体共振传感器.

关键词:物理光学; 表面等离子共振; 薄膜光学理论; 特征矩阵; 共振角; 灵敏度

中图分类号: O484

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103907.1216

0 引言

自从 Liedberg 等^[1,2]将表面等离子体共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 技术用于化学传感器研究领域以来, SPR 传感器逐渐成为国际传感器领域的研究热点. 根据 SPR 谐振峰位置的漂移, 可用来测量薄膜的折射率、膜厚, 获得色散曲线等. 但后来的研究^[3-5]却发现, 反射光的吸收曲线, 并不准确地反映出表面等离子波 (Surface Plasmon Wave, SPW) 的色散关系, 尤其对那些高损耗的金属. 为了提高准确性, Hollstein T^[4]和 Barker A. S^[5]等在棱镜底面上镀制粗糙的金属膜, Bosenberg J^[6]则通过探测光电效应产生的光电流来给出吸收曲线. 他们都是认为当 SPR 的相位匹配条件满足时, 反射曲线达到最大损耗.

然而, Eric F. Y. Kou 和 Theodor Tamir^[7]发现相位匹配条件满足时, 反射率并不处在最低值, 也就是共振发生时的入射角, 不同于反射曲线最低点所对应的入射角. 尽管上述两种方法可以在一定程度上来提高测量的准确性, 但是准确性还存在更大的提升空间, 关键在于解决共振时入射角和反射率最低点入射角不对应的问题.

本文采用薄膜光学理论来解决这个问题. 首先

指出 SPR 常用计算理论中暗藏的近似性, 然后用薄膜光学理论建立 SPR 的单层金属膜系模型, 模拟出 SPR 现象. 通过实验, 验证了薄膜光学理论的精确性. 采用等高线图, 全面地给出了两种理论的共振角差随着金属介电常量变化的规律. 在此基础上, 比较了两种理论得出的 SPR 传感器灵敏度的分布及幅度差异, 指出薄膜光学理论可以为 SPR 传感器灵敏度优化设计提供更为精确的参量选择方案. 由于具有实际研究和应用价值的光与表面等离子体相互作用的结构是 Kretschmann^[8]首先设计的, 本文只针对 Kretschmann 模型进行讨论.

1 传统 SPR 理论中的近似性

图 1 是典型的 Kretschmann 结构. 棱镜和介质的介电常量分别为 ϵ_0 和 ϵ_2 , 金属薄膜的介电常量为复数 $\epsilon_1 = \epsilon_1' + i\epsilon_1''$, d 为金属膜的厚度, c 为光速, ω 为光波角频率.

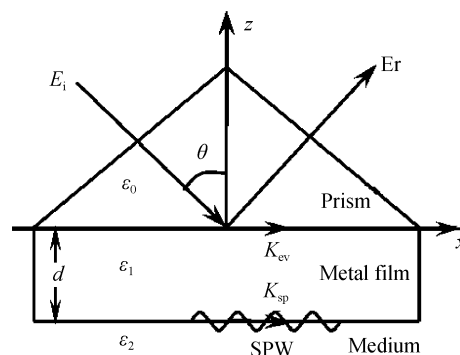


图 1 激发 SPW 的 Kretschmann 模型
Fig. 1 Kretschmann model of exciting SPW

* 国家自然科学基金(60777035)、教育部科学技术研究重点项目(208040)、上海市教育委员会科研项目(07ZZ87)和上海市重点学科建设项目(T0501)资助

[†] Tel: 021-65666454 Email: zhengtiangu@163.com
收稿日期: 2009-10-22 修回日期: 2010-01-04

设 TM 光波从左侧以入射角 θ 入射, 激发表面等离子体共振的光波在 X 轴方向的波矢分量(见图 1)为

$$K_{ev} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta$$

同时, 在金属和介质的交界面处, 金属表面的自由电子气将被激发, 产生集体振荡, 从而形成表面等离子波, 其波矢为

$$K_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$$

根据 Maxwell 方程组, Kretschmann 给出 TM 光的反射系数公式^[3]

$$r_{012} = \frac{r_{01} + r_{12} \exp(2ik_{1z}d)}{1 + r_{01}r_{12} \exp(2ik_{1z}d)} \quad (1)$$

式中

$$r_{01} = \frac{\epsilon_1 k_{0z} - \epsilon_0 k_{1z}}{\epsilon_1 k_{0z} + \epsilon_0 k_{1z}}, \quad r_{12} = \frac{\epsilon_2 k_{1z} - \epsilon_1 k_{2z}}{\epsilon_2 k_{1z} + \epsilon_1 k_{2z}},$$

$$k_{iz} = \sqrt{\left[\frac{\omega}{c}\right]^2 \epsilon_i - k_{0x}^2}, \quad k_{0x} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta, \quad i=0, 1, 2.$$

由式(1)可以求出表面等离子波的衰减全反射谱 $R(\theta)$, 如图 2 所示的共振吸收峰. 其中 θ_{sp} 为共振角, W_θ 为吸收峰宽度, 而 R_{min} 为反射率极小值, 此时表面等离子波被光激发, 入射光的能量转移到金属薄膜与介质的界面上. SPR 曲线的半宽度反映了能量的耗散, 即由金属介电常量的虚部引起的能量的吸收.

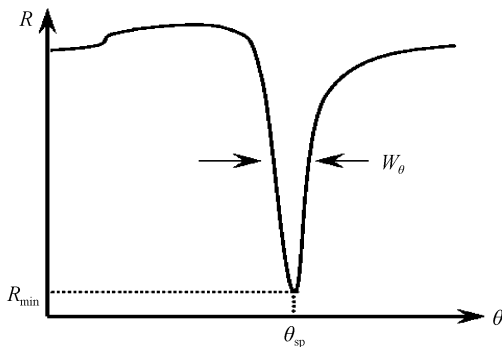


图 2 表面等离子波的衰减全反射谱

Fig. 2 Attenuated total reflection spectrum of SPW

由于金属薄膜的介电常量和厚度是与实验条件有关的参量, 因此在实验中, 往往需要通过测量 SPR 衰减峰来确定这两个参量. 一般认为当共振条件 $K_{sp} = K_{ev}$ 满足时, 金属表面等离子体波矢将与入射光波矢 X 分量发生耦合, 入射光波能量迅速转移给表面等离子体, 反射光强度急剧下降达到最小 R_{min} , 发生表面等离子体共振. 然而, K_{ev} 作为光波波矢的分量, 是个实数; K_{sp} 中含有金属的介电常量 $\epsilon_1 = \epsilon_1' + i\epsilon_1''$, 是个复数. 显而易见, 不管从数学还是物理意义上来说, 共振条件是不可能满足的. 因此仅

存在近似的匹配, 即有

$$K_{ev} = \text{Re}(K_{sp})$$

共振角

$$\theta_{sp} = \arcsin \left[\frac{\text{Re}(K_{sp})}{\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0}} \right]$$

根据测量的 θ_{sp} 和 R_{min} , 常采用双波长激发法^[9] 或双介质法^[10] 等, 来计算出金属薄膜的厚度和介电常量. 这两种测量方法均会得到欠耦合和过耦合两组解, 且两组解均可导出良好的拟合曲线. 通过反演, 与实验曲线最佳吻合的理论拟合曲线, 代表了待测金属膜的实际参量解.

采用传统的 SPR 理论来计算薄膜的参量存在近似性是不精确的. $K_{ev} = K_{sp}$ 决定共振角, 共振条件的近似匹配, 使衰减峰的位置并不处于共振发生时的入射角. Eric F. Y. Kou 等^[7] 指出, 准确的共振角, 要大于该 SPR 近似理论中衰减峰所对应的入射角.

2 薄膜光学理论处理 SPR 效应

薄膜光学理论是一套完整且精确的理论. 依据该理论可以测定薄膜的光学参量, 常用的方法有光度法、椭圆偏振法^[11-12]、光波导法、布鲁斯特角法、干涉法、 p -偏振光双面反射法^[13-14] 以及泄漏波导法^[15] 等. 激发表面等离子波的 Kretschmann 结构, 可视为由三层膜系结构: 棱镜层, 金属膜层和介质层构成. SPR 研究的对象是金属薄膜的光学特性, 因此以薄膜光学理论为依据, 可以建立起单层金属膜两个界面的数学模型, 如图 3.

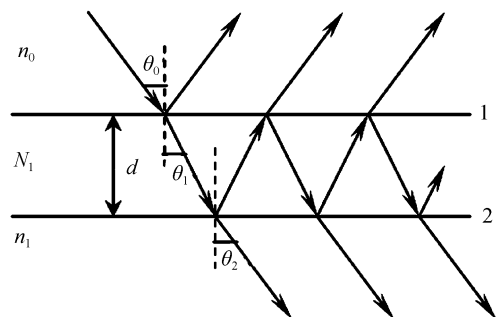


图 3 单层金属薄膜的多束光干涉

Fig. 3 Multi-beam interference of single metal film

根据 Maxwell 方程, 可以用下面的矩阵方程来描述单色平面偏振电磁波在单层金属薄膜内的传播情况. 膜系的特征方程^[16] 为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & i \sin \delta_1 \\ i \eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}$$

式中: B 是入射光波电场振幅, C 是磁场振幅, 膜层的位相厚度 $\delta_1 = 2\pi N_1 d \cos \theta_1 / \lambda$. 对于 TM 波, 导纳

$\eta_1 = N_1 / \cos \theta_1$, $\eta_2 = N_2 / \cos \theta_2$, $N_1 = n_1 - ik_1$ 是金属薄膜复数折射率, 与介电常量的关系为: $\epsilon_1' = n_1^2 - k_1^2$, $\epsilon_1'' = 2n_1 k_1$; d 是金属薄膜厚度, θ_0 , θ_1 和 θ_2 是波长为 λ 的入射光在各薄膜层中的入射角.

金属薄膜的两个界面可以用一个等效界面来表示, 其组合导纳为 $Y = C/B$, 相应的振幅反射系数为

$$r = \frac{(\eta_0 - Y)}{(\eta_0 + Y)}$$

相应的强度反射率为

$$R = |r|^2 = \left| \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right|^2 \quad (2)$$

当不考虑金属膜层引起的波的非均匀性时, 在界面 1 处折射定律为 $n_0 \sin \theta_0 = N_1 \sin \theta_1$, 界面 2 处折射定律为 $N_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, 全反射临界角 θ_c 可以简单地由 $\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_0)$ 求得. 当发生全反射即 $\theta_0 > \theta_c$ 时, 有

$$\cos \theta_2 = \pm (1 - \sin^2 \theta_2)^{1/2} = \pm i \left(\frac{n_0^2 \sin^2 \theta_0}{n_2^2} - 1 \right)^{1/2}$$

式中只有取负号才有物理意义, 它表示了电磁场在 n_2 介质中是一指数衰减的衰减场, 即消逝波, 它是 SPR 的真正激发源. 由式(2), 可以求出反射率曲线.

3 理论模拟比较

在 632.8 nm 波长下, 取金属薄膜介电常量为 $\epsilon_1 = -18 + i0.7$, 厚 $d = 50$ nm, 棱镜 $\epsilon_0 = 3.24$, 介质为空气 $\epsilon_2 = 1$. 代入参量进行单层金属膜模型的数据模拟, 分别由式(1)和(2)模拟出 SPR 近似理论和薄膜光学理论计算的反射曲线, 如图 4(a)、(b). 经过比较, 可见两种理论的曲线图基本一致, 薄膜光学理论的曲线同样出现明显的 SPR 衰减峰.

式(1)和(2)均出自电磁场理论, 在相同的参量下得到的反射率曲线应该是一致的, 但实际上并非如此. 这是因为理论公式必须通过编程软件来计算结果, 由于计算机只能对有限位字长的数值进行计算, 当算式中含有大量的除法运算时, “舍入误差”是难以避免的. 而矩阵相乘运算, 则可以有效地避免“舍入误差”的累积效应. 式(1)(SPR 近似理论)中采用了相除运算(分式), 而式(2)(薄膜光学理论)则采用的是矩阵相乘运算. 因此由 SPR 近似理论获得的模拟结果并不精确, 其反射率曲线与薄膜光学理论得出的曲线并不完全吻合. 将图 4(a)、(b)的两条反射曲线的衰减峰放到一起进行放大比较, 如图 5. 可以明显看出, SPR 近似理论和薄膜光学理论所得到的反射曲线, 在衰减峰值位置及峰值存在差别.

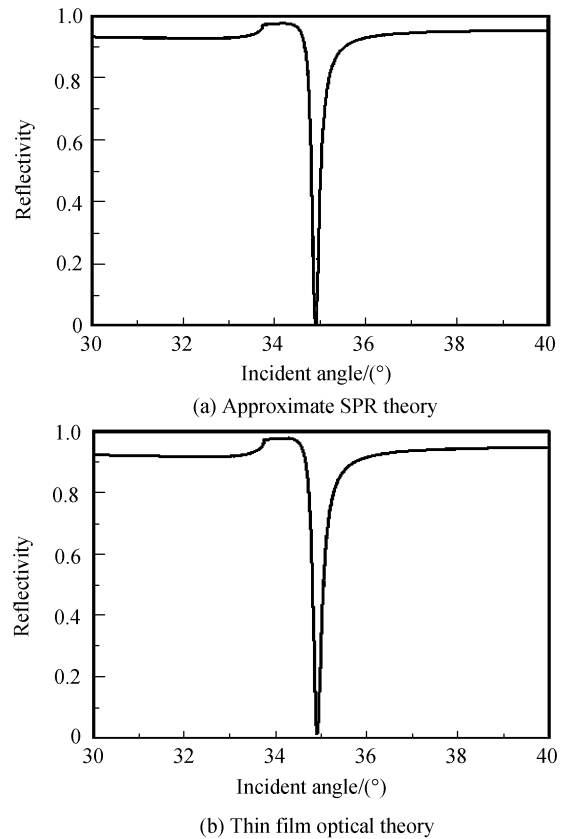


图 4 反射曲线模拟图

Fig. 4 The reflectance of reflectance curves

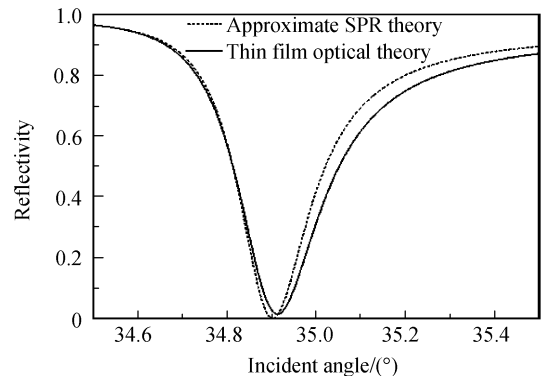


图 5 SPR 近似理论和薄膜光学理论的模拟曲线

Fig. 5 The simulation curves of approximate SPR theory and thin film optical theory

改变介电常量, 进一步分析比较两种理论的模拟曲线. 采用文献[7]提供的参量, 分别模拟 Ag、Al、Ni、Fe 四种金属膜的反射曲线. 波长为 632.8 nm, 棱镜 $\epsilon_0 = 4$, 测量介质 $\epsilon_2 = 2.25$. 图 6 给出模拟的反射曲线.

在图 6(a)、(d)中, 薄膜光学理论的衰减峰值要高于 SPR 近似理论的衰减峰值; 而图 6(b)、(c)中, 薄膜光学理论的衰减峰值要低于 SPR 近似理论的衰减峰值. 随着介电常量虚部的增大, 衰减峰由尖锐趋于平缓. 图 6 中薄膜光学理论的共振角都要大于 SPR 近似理论的共振角, 这符合 Eric F. Y. Kou

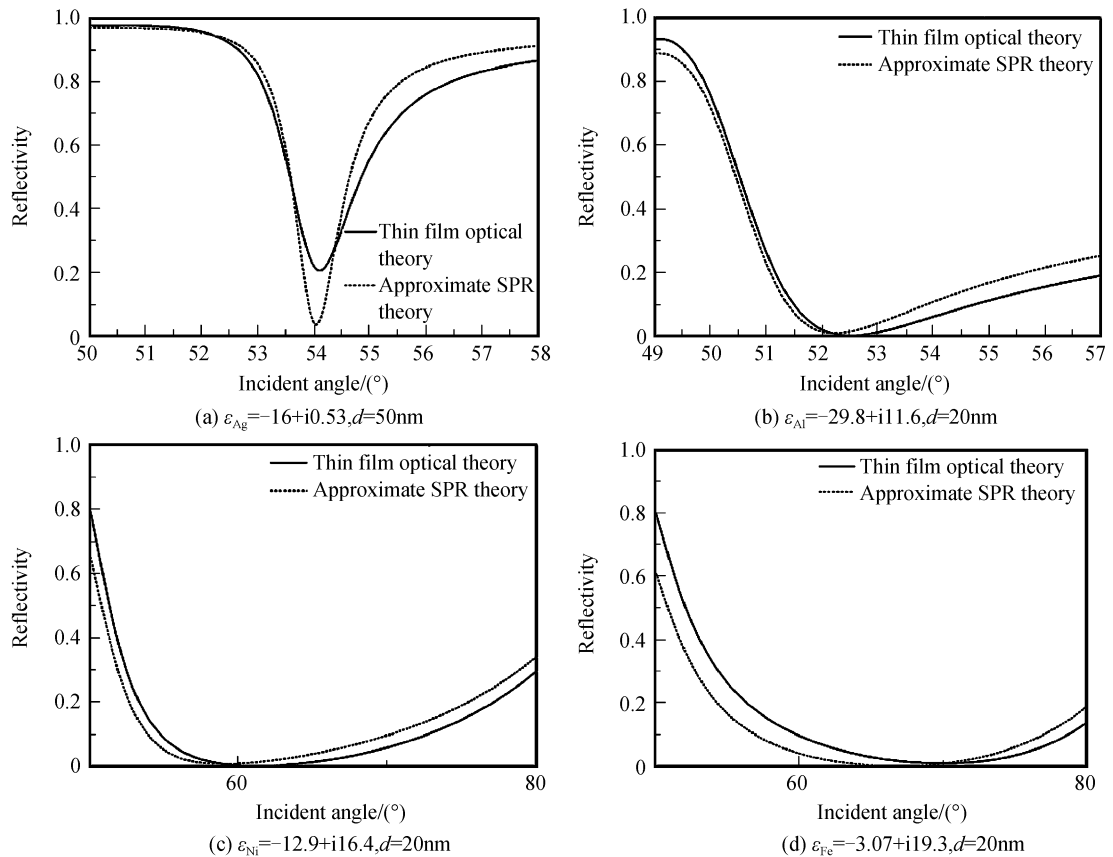


图 6 不同金属膜的模拟曲线
 Fig. 6 The simulation curves of different metal films

等^[7]指出精确的共振角要大于传统 SPR 理论共振角的观点. 图 6(a)~(d)中共振角差分别为 0.03°, 0.30°, 2.25°和 3.17°.

由前文分析可知,两种理论的共振角差是随着介电常量的变化而变化的. 图 7 给出了当膜厚为 20 nm 时,共振角差值随介电常量的实部和虚部变化的模拟图. 图 8 是图 7 的等高线图,图 8 中的 b、c、d 三点,分别对应图 6(b)~(d)的三种金属. Eric F.

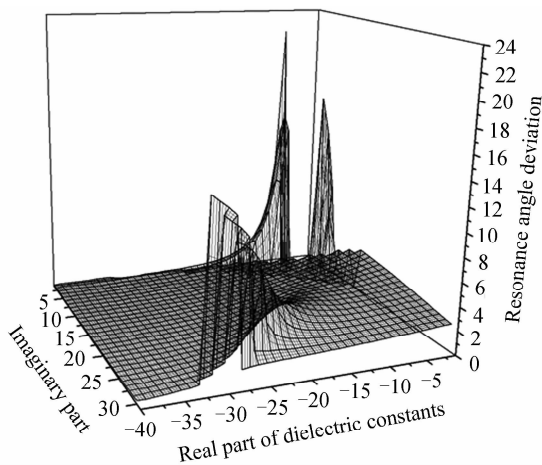


图 7 共振角差值随介电常量实部和虚部变化的模拟图
 Fig. 7 The simulation curves of resonance angle deviation with different real parts and imaginary parts of dielectric constant

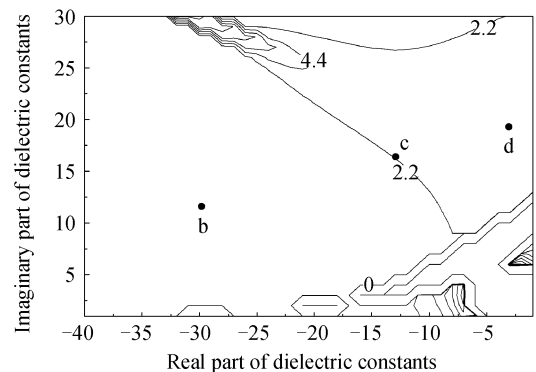


图 8 随介电常量实部和虚部变化的共振角差值等高线图
 Fig. 8 The contour of resonance angle deviation under with different real part and imaginary parts of dielectric constant

Y. Kou 等^[7]指出共振角差随金属膜介电常量的虚部增大而增大,可见并不全面,图 8 更全面的展示了共振角差随介电常量变化的规律. 图 7 的三个高峰,对应图 8 的三个等高线密集区,在这些区域共振角差值较大,若分别采用薄膜光学理论和 SPR 近似理论来计算薄膜的参量,结果将相差很大,因此必须采用更精确的理论计算才能得到准确结果. 而在等高线为 0 的区域附近,两种理论所得结果基本相同,均可用来阐述 SPR 衰减曲线和求解金属膜的光学参量.

4 实验验证

SPR 近似理论应用较为广泛和成熟,而薄膜光学理论不存在近似性,更严格更精确.金属 Ag 的介电常量虚部较小,两种理论的共振角差较小,只能通过两种理论的 SPR 衰减曲线与实验值对比,来验证两种理论的准确性.

采用离子束溅射法将 Ag 膜镀制在 K9 光学玻璃棱镜($n=1.5163$)上.镀膜前玻璃棱镜先经过酸液碱液清洗,再用去离子水和乙醇超声清洗,置于烘箱内烘干.镀膜时,真空度为 1.6×10^{-3} Pa,氩气压力为 2×10^{-2} Pa,屏栅电压 350 V,灯丝电压 8 V,加速电压 60 V,膜厚由石英振子控制.入射光波长为 632.8 nm,逐步改变入射角度,测出反射率的数值,如图 9 中的点线.

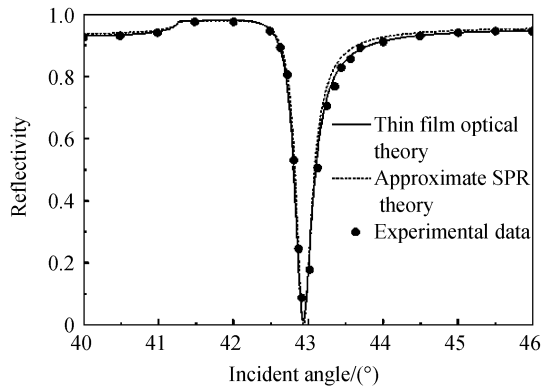


图 9 实验值与反射曲线比较图

Fig. 9 The comparison of experimental data and reflectance curves

分别采用薄膜光学理论和 SPR 近似理论进行模拟.当金属薄膜参量取 $d=54$ nm、 $n=0.068$ 、 $k=4.07$ 时,薄膜光学理论模拟的结果(图 9 实线)与实验值符合得较好;采用 SPR 近似理论,当薄膜参量 $d=53.5$ nm、 $n=0.067$ 、 $k=4.03$ 时,模拟的曲线(图 9 虚线)最接近于实验值.但相比薄膜光学理论,仍与实验值相差较大.

比较可知,相比于 SPR 近似理论,实验值与薄膜光学理论的曲线能够更好地吻合.在达到共振角之前,实验值和两条反射曲线能够很好地吻合;在达到共振角之后,薄膜光学理论的曲线相比 SPR 近似理论曲线靠下,与实验值更接近.这从实验上验证了,薄膜光学理论更能反映 SPR 衰减曲线,比 SPR 近似理论更精确.

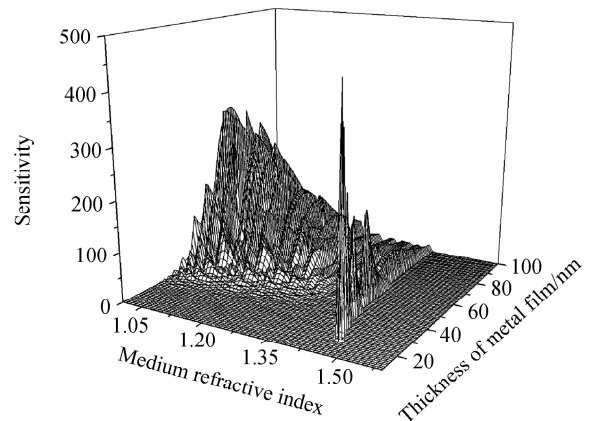
5 SPR 传感器优化设计

在实际设计高灵敏度传感器时,不仅要考虑灵敏度的大小,更要关注高灵敏度所需结构参量组合分布.为了表征 SPR 传感器灵敏度的高低,定义反

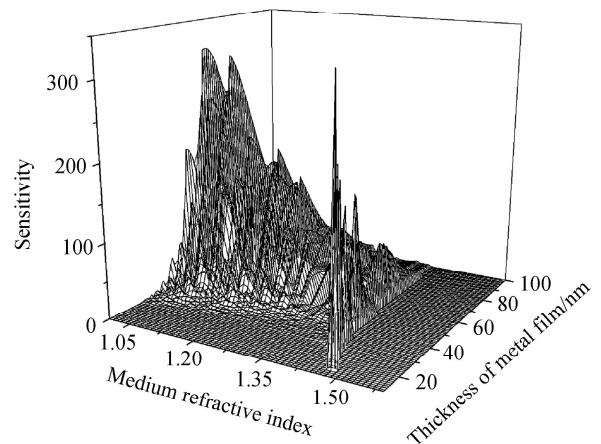
射率 R 的梯度与待测介质折射率 n_2 的梯度之比的绝对值 S_n ,为传感器对待测介质折射率的灵敏度.即

$$S_n = \left| \frac{\partial R}{\partial n_2} \frac{n_2}{R} \right|$$

图 10(a)、(b)分别是 SPR 近似理论和薄膜光学理论,模拟得到的在金属膜厚 10~100 nm、待测介质折射率 1~1.6 范围内的灵敏度三维分布图.所用到的参量波长 632.8 nm, K9 玻璃上镀 Ag 膜 $n=0.068$ 、 $k=4.07$.从图中观察可知,相同参量时,两种理论的灵敏度分布区域与幅度均有一定区别,甚至在某些特定参量时,灵敏度幅度大小相差甚大.图 10(b)中显示的最高灵敏度为 457.022,对应的参量 $d=21$ nm、 $n_2=1.47$,而在相同的参量组合下,图 10(a)的灵敏度却只有 0.075;图 10(a)的最高灵敏度为 335.796,所对应的参量为 $d=15$ nm、 $n_2=1.48$,此参量组合时图 10(b)的灵敏度只有 0.152,两者相差极大.采用 SPR 近似理论求解薄膜参量并不精确,因此用来得到高灵敏度 SPR 传感器的参量并不切实际;薄膜光学理论更加精确,必须采用由此理论得到的参量组合来设计高灵敏 SPR 传感器.



(a) Approximate SPR theory



(b) Thin film optical theory

图 10 灵敏度随介质折射率和金属膜厚的三维图

Fig. 10 3D graph of sensitivity with medium refractive index and thickness of metal film

图 11(a)、(b)分别是图 10(a)、(b)的灵敏度为 100 时的 SPR 传感器灵敏度等高线图。等高线所围部分即是灵敏度不小于 100 的参量分布。显然,两图中的高灵敏度分布区域存在明显的差异,对 SPR 传感器设计有一定的影响。对于特定的待测介质折射率进行传感设计时,合适的金属薄膜厚度是实现高灵敏度 SPR 传感器的关键。当待测介质折射率为 1.10 时,要获得不小于 100 的灵敏度,金属薄膜的厚度范围应该是薄膜光学理论给出的 63~92 nm,而不是 SPR 近似理论给出的 53~62 nm。可见,薄膜光学理论是实现高灵敏度 SPR 传感器优化设计较为重要的理论基础。

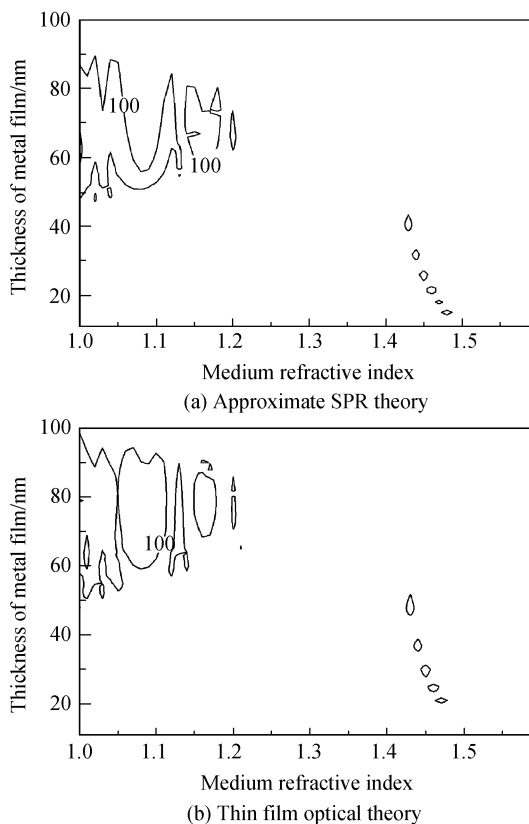


图 11 灵敏度为 100 的等高线图

Fig. 11 Contours when the sensitivity is 100

6 结论

传统的 SPR 理论的衰减峰值对应的入射角不是准确的共振角,在求解薄膜的参量时存在近似性;薄膜光学理论是一套精确的理论,从膜系的角度分析了 Kretschmann 模型,精确地给出了 SPR 衰减峰。经过实验验证,相比 SPR 近似理论,薄膜光学理论的曲线和实验值吻合得更好。

本文采用两种理论模拟 SPR 传感器的灵敏度与结构参量的关系,发现两者的高灵敏度对应的等高线分布区域存在较大的差异,必须采用薄膜光学理论进行结构优化设计。

因而,采用薄膜光学理论求解金属薄膜的介电常量、厚度等重要光学参量,将更大程度地提高参量的准确性,并且可以为高灵敏度 SPR 传感器的优化设计提供更精确的参量组合。

参考文献

- [1] NYLANDER C, LIEBERG B, LIND T. Gas detection by means of surface plasmons resonance [J]. *Sensors and Actuators B*, 1982, **3**: 79-88.
- [2] LIEBERG B, NYLANDER C, LUNDSTROM I. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing [J]. *Sensors and Actuators*, 1983, **4**: 299-304.
- [3] KRETSCHMANN E. The determination of the optical constants of metals by excitation of surface plasmons[J]. *Z Phys*, 1971, **241**: 313-324.
- [4] HOLLSTEIN T, KREIBIG U, LEIS F. Optical properties of Cu and Ag in the intermediate region between pure drude and interband absorption[J]. *Phys Status Solidi B*, 1977, **82**(2): 545-556.
- [5] BARKER A S. Response functions for surface polaritons at interfaces in solids[J]. *Surf Sci*, 1973, **34**(1): 62-72.
- [6] BOSENBERG J. Photoelectrons from optically excited nonradiative surface plasma oscillations[J]. *Phys Lett*, 1971, **37A**(5): 439-440.
- [7] KOU E F Y, TAMIR T. Incidence angles for optimized ATR excitation of surface plasmons[J]. *Appl Opt*, 1988, **27**(19): 4098-4103.
- [8] KRETSCHMANN E, RAETHER H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light [J]. *Z Naturforsch*, 1968, **23A**: 2135-2136.
- [9] CHEN W P, CHEN J M. Use of surface plasma waves for determination of the thickness and optical constants of thin metallic film[J]. *J Opt Soc Am*, 1981, **71**(2): 189-191.
- [10] YANG Fu-zi, CAO Zhuang-qi, FANG Jun-xin. Method of two-dielectric coating for determination of thickness and optical constants of thin metallic films [J]. *Acta Optica Sinica*, 1986, **6**(10): 948-953.
杨傅子,曹庄琪,方俊鑫.用双介质法测定金属薄膜的厚度和光学常量[J].*光学学报*,1986,**6**(10):948-953.
- [11] FAN Zheng-xiu, YANG Ben-qi. Computation method for analyzing ellipsometric equation of optical thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(10): 939-945.
范正修,杨本祺.分析光学薄膜的椭圆方程的计算方法[J].*光学学报*,1984,**4**(10):939-945.
- [12] HOR Y S, CHANG C S, LUE J T. Ellipsometry study of thin metallic films under constraint by the side effect[J]. *Appl Phys A*, 1998, **67**(5): 531-539.
- [13] GU Zheng-tian, LIANG Pei-hui, LIU Xiao-lin, et al. Optimization of optical parameters of the film sensor based on p-polarized reflectance[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1556-1562.
顾铮先,梁培辉,刘晓林,等.基于 p 偏振光双面反射的薄膜传感器光学参量的优化[J].*光学学报*,1999,**19**(11):1556-1562.
- [14] GU Zheng-tian, LIANG Pei-hui, LIU Xiao-lin, et al. Influence of glass surface layer on measurement of optical parameters of thin films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(5): 465-472.
顾铮先,梁培辉,刘晓林,等.玻璃表面层对薄膜光学参量测量的影响[J].*光子学报*,1999,**28**(5):465-472.
- [15] XIAO Bing-gang, SONG Jun, HE Sai-ling. Theoretical and experimental analysis for measuring the refractive index and

thickness of a film in a leakage waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 586-589.
 肖丙刚, 宋军, 何赛灵. 泄漏波导法精确测量薄膜参量的理论和实验研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(4): 586-589.

[16] LIN Yong-chang, LU Wei-qiang. Principles of optical thin

films[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990: 56-90.
 林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 56-90.

Traditional Approximate Theory and Thin Film Optical Theory in SPR

ZHANG Jiang-tao, GU Zheng-tian, DENG Chuan-lu

(Laboratory of Photo-electric Functional Films, College of science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to solve the problem that traditional SPR theory is approximate when determining parameters of metal film based on Kretschmann geometry, the strict thin film optical theory is introduced. SPR attenuation curve is obtained with characteristic matrix of film system. The results show that there exists differences in resonance angle and amplitude of reflectivity between approximate SPR theory and thin film optical theory. Contour map of resonance angle deviation shows variation of resonance angle deviation under different dielectric constants of metal film. Further experimental study shows that the simulation result of thin film optical theory is more consistent with experimental data than of approximate SPR theory. Finally the sensitivity of SPR sensor is discussed using approximate SPR theory and thin film optical theory respectively, and as a result, there is great difference in distribution region of sensitivity. Optical parameters of metal film can be determined more exactly using thin film optical theory, and accurate parameter combinations must be benefit to design high sensitivity SPR sensors.

Key words: Physical optics; Surface plasmon resonance; Thin film optical theory; Characteristic matrix; Resonance angle; Sensitivity



ZHANG Jiang-tao was born in 1983. He is pursuing the M. S. degree and his research interests focus on the theory and the application of SPR long-period fiber grating sensor coated with thin films.



GU Zheng-tian received his Ph. D. degree from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences in 2000. Now he is a professor, and his main research interests focus on optical functional thin films, opto-chemical sensor, and optoelectronic engineering.