

基于柱面透镜 Otto 结构 SPR 效应的金属薄膜厚度测量方法

李桂运^{1,2}, 谷利元^{1,2}, 胡敬佩¹, 朱玲琳¹, 曾爱军^{1,2*}, 黄惠杰^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于柱面透镜修正 Otto 结构产生的表面等离子体共振 (SPR) 效应, 提出一种测量金属薄膜厚度的方法。该方法无需用 s 偏振光提取背景光强, 可直接利用在 p 偏振光入射条件下得到的单幅 SPR 吸收图像拟合背景光强, 进而得到竖直方向上的归一化反射率曲线。从而建立光学薄膜模型并拟合了反射率曲线, 反演出待测金属薄膜的厚度参数。实验对一个纳米级厚度的 Au 膜样品进行测量, 测量结果表明, Au 膜的平均厚度与商用光谱椭偏仪的测量结果之差为 0.1 nm, 验证了该方法的有效性。

关键词 表面等离子体共振效应; 柱面透镜; 金属薄膜; 厚度测量

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0204010

Thickness Measurement Method of Metallic Thin Film Based on SPR Effect Generated by Cylindrical Lens with Otto Configuration

Li Guiyun^{1,2}, Gu Liyuan^{1,2}, Hu Jingpei¹, Zhu Linglin¹, Zeng Aijun^{1,2*}, Huang Huijie^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the surface plasmon resonance (SPR) effect caused by a modified Otto structure of cylindrical lens, a method for measuring the thickness of metallic thin films is proposed. For this proposed method, the background intensity can be fitted only with the single SPR absorption image obtained under the p-polarized light incidence, no need using the s-polarized light. Hence, the normalized reflectivity curve in the vertical direction is obtained. The reflectivity curve is fitted by establishing a model of the optical thin film and the thickness parameters of the metallic thin film are derived. In the experiment, a sample of Au film with a thickness in the nanometer range is measured. The measurement results show that the difference between the measured average thickness of Au film and the result obtained by commercial spectroscopic ellipsometer is only 0.1 nm, which verifies the effectiveness of this method.

Key words surface plasmon resonance effect; cylindrical lens; metallic thin film; thickness measurement

OCIS codes 120.2830; 310.3915; 240.6680; 220.3630

1 引言

金属薄膜是一种重要的功能材料, 在光学和电子学等领域具有广泛的应用^[1-3], 而金属薄膜的厚度对光学性质和电学性质等具有很大影响^[4-13], 因此

精确快速地测定厚度参数具有重要意义。目前, 对金属薄膜厚度有多种表征方法。例如, 原子力显微镜测量技术^[14]能够实现纳米级厚度的精确测量, 但是该仪器设备十分昂贵, 且对样品表面会造成损伤; 椭偏测量技术^[15-16]是一种常用测量薄膜厚度参数的

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2018-10-22; 录用日期: 2018-11-20

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0110600)、国家自然科学基金(51605473)、上海市国际科技合作基金(16520710500)、上海市科技人才计划(17YF1429500)、上海市青年科技英才扬帆计划(18YF1426500)、青促会资助

* E-mail: aijunzeng@siom.ac.cn

方法,通过探测偏振光与薄膜样品作用前后的偏振态变化对薄膜厚度的参数进行反演,具有精度高和非破坏性等优点,然而,该方法的数据处理过程复杂,计算量较大;表面等离子体共振(SPR)技术^[17]是一种基于 SPR 效应的测量技术,通过拟合反射率曲线获取待测样品厚度参数,其比椭偏方法的数据处理简单,能够实现金属薄膜厚度参数的精确快速测量,具有重要的研究意义。

目前,基于 SPR 的金属薄膜厚度多种测量方法被提出^[18-24],其中比较典型的方法有两种。一种是在 2011 年,日本的 Iwata 等^[23]提出的一种结合了 SPR 与椭偏技术的薄膜二维厚度参数测量方法。该方法采用一个由直角棱镜、大曲率柱面透镜和待测薄膜组成的修正的 Otto 结构(MOC)。将该结构应用于成像椭偏,会形成一对平行吸收线,而平行吸收线的中间区域为 SPR 区域,该区域内的椭偏参数对厚度变化更为灵敏,由于可精确确定金属膜和柱面透镜之间的空气隙厚度,所以该方法相对于无法确定空气隙厚度的 Otto 结构的传统测量方法,可实现更高精度的二维厚度参数测量,但是该方法本质上仍然是椭偏技术,需进行椭偏参数的处理,且数据处理过程较为复杂。另外一种方法是本课题组^[24]在 2015 年提出的一种基于 SPR 的薄膜厚度参数的快速测量方法,该方法采用了 Bliokh 等^[18]提出的平凸透镜的 MOC,在 p 偏振光入射下,该结构对应的共振图像为椭圆吸收环;在 s 偏振光入射下,不会产生 SPR 效应,此时可采集背景光强图像。基于上述两个图像,可得到椭圆吸收环长轴方向的归一化反射率曲线并进行拟合,拟合后无需求解椭偏方程,就可得到待测金属薄膜厚度参数。但是,该方法只对椭圆吸收环长轴位置处参数进行测量,测量范围较小,并且平凸透镜与样品之间是单点接触,结构不够

稳定。上述两种方法,虽各有不足之处,但也各有优点:一个采用柱面透镜 MOC,可实现二维区域厚度的测量,并且柱面镜的线接触使得结构更加稳定;另一个避开了椭偏参数的求解,可实现单点参数的快速测量。

综合考虑上述两种测量方式的优点,并结合成像椭偏仪的测量特点,本文提出了基于柱面透镜 MOC 产生 SPR 的金属薄膜厚度的测量方法,实验中采用了优化后的柱面透镜 MOC 来产生 SPR,为了提高测量速度,其中并未采用传统的 s 偏振光提取背景光强。而是直接利用 p 偏振光入射下得到单幅 SPR 吸收图像来拟合高斯分布的背景光强,进而得到柱面透镜直母线方向上的归一化反射率曲线。随后只需对不同位置处的竖直方向上的反射率曲线进行拟合,就可实现对金属薄膜一维厚度参数的测量。

2 基本原理

所提方法基于实验室现有大视场成像椭偏仪实现,其工作原理如图 1 所示。激光器发射出来的光束经过准直器、扩束器、起偏器和补偿器(四分之一波片)后变为椭圆偏振光,经过柱面透镜 MOC 后发生反射,反射光通过检偏器和双远心透镜组后在倾斜放置的电荷耦合器件(CCD)相机上成像。由于在该方法实施过程中,只需用 p 偏振光入射从而产生 SPR,装置中自身带有的补偿器不为必需,所以补偿器的快轴方向始终与起偏器起偏方向保持一致,从而通过补偿器的出射光为线偏光且偏振方向与起偏方向一致。为了保证全视场的清晰聚焦成像,使待测样品面、双远心透镜组主平面和 CCD 相机面的三平面相交于同一直线,即满足沙伊姆弗勒条件(Scheimpflug condition)。

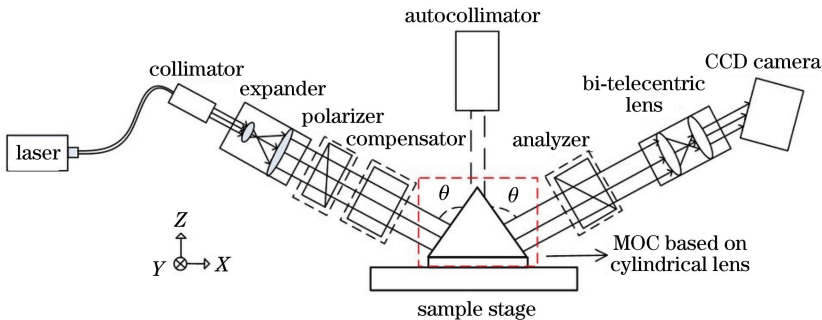


图 1 基于 SPR 效应的成像椭偏仪原理图

Fig. 1 Schematic of SPR-based imaging ellipsometer

基于柱面透镜的产生 SPR 的 MOC 如图 2 所示,该结构由等腰直角棱镜、柱面透镜和待测薄膜样品组成。柱面透镜与等腰直角棱镜紧密接触,其中柱面透镜的直母线平行于等腰直角棱镜底面的长边。该放置方式是对 Iwata 等^[23]所提出结构的一种优化,本实验产生的是一对平行于柱面透镜水平方向的吸收线,可认为是椭圆吸收环长轴的扩展,这种优化可消除斜入射造成的吸收线位置畸变。在实验中,将待测金属薄膜放置在柱面透镜下方,与柱面透镜成线接触,之间则会产生一个由柱面透镜的曲率半径 R 控制的渐变空气隙,即垂直直母线方向且与接触线距离为 s 的位置处的空气隙厚度 d 随曲率半径 R 改变而变化($d = s^2/2R$)。

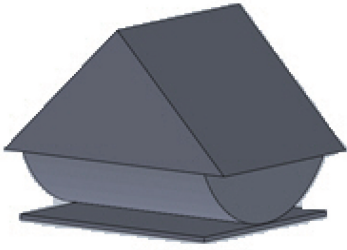


图 2 基于柱面透镜的产生 SPR 的 MOC

Fig. 2 MOC for SPR generation based on cylindrical lens

上述基于柱面透镜产生 SPR 的 MOC 可看成四个层模型,即棱镜、空气间隙、待测薄膜和基底。根据薄膜光学理论^[23], p 偏振光入射下的单层薄膜的特征矩阵为

$$m_j = \begin{bmatrix} \cos(k_0 N_j z_j \cos \theta_j) & -i \sin(k_0 N_j z_j \cos \theta_j) / q_j \\ -i q_j \sin(k_0 N_j z_j \cos \theta_j) & \cos(k_0 N_j z_j \cos \theta_j) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: k_0 为入射光波大小; j 为某一介质层的标记, N_j 为该介质层的复折射率; z_j 为该介质层的厚度; $q_j = \cos \theta_j \sqrt{\mu_j / \epsilon_j}$,其中 μ_j 为该介质层的磁导率, ϵ_j 为该介质层的介电常数; θ_j 为入射光在该介质层的入射角度,该角度可由菲涅耳折射定律 $N_j \sin \theta_j = N_{j-1} \sin \theta_{j-1}$ 逐层计算得到。

多层介质的总的特征矩阵 M 可由各单层介质的特征矩阵 m_j 直接相乘得到,即为

$$M = m_1 m_2 \cdots m_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据(2)式及菲涅耳反射定律,可得 p 偏振光入射条件下的光强反射率为

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} q_k) q_1 - (m_{21} + m_{22} q_k)}{(m_{11} + m_{12} q_k) q_1 + (m_{21} + m_{22} q_k)}, \quad (3)$$

式中, $q_i = \cos \theta_i \sqrt{\mu_i / \epsilon_i}$, $i = 1, k$, 其中 $\mu_1, \epsilon_1, \theta_1$ 分别为入射介质层的磁导率,介电常数和入射角度, $\mu_k, \epsilon_k, \theta_k$ 分别是表示为出射介质层的磁导率,介电常数和入射角度。

由(1)~(3)式可仿真出不同薄膜厚度下基于柱面透镜 MOC 产生的 SPR 图像,如图 3(a)所示。仿真中设定光波长为 633 nm,所有光学材料介质的相对磁导率取 1,采用相同材质 BK7 玻璃的柱面透镜、等腰直角棱镜和基底,折射率均为 1.515、柱面透镜的曲率半径为 25 cm,将光从空气中垂直入射到棱镜上。Au 膜的厚度分别设定为 14 nm 和 15 nm,在仿真中 Au 膜的光学常数取为 $0.183 + 3.433i$,介电常数为 1.260,而 Au 膜的光学常数的不同会影响到仿真结果的变化。从图 3(a)中仿真结果可以看出,在左右厚度不同的两个金属薄膜区域里,待测金属薄膜产生的 SPR 对于光的吸收是关于待测金属薄膜接触的圆柱棱镜的母线对称,即在相同厚度区域里产生的 SPR 图案均为平行吸收线,将不同 Au 膜厚度的(标记 YY'-1 和 YY'-2 的两位置处分别对应的 Au 膜厚度为 14 nm 和 15 nm)仿真结果拼接在一起可对应不同吸收线的宽度和光强信息。由于 p 偏振光穿透介质-空气界面产生的隐失波(倏逝波)和空气-金属界面的表面等离子体激元共振吸收产生 SPR,在产生 SPR 的同时隐失波会沿着垂直于空气-金属界面的方向继续穿透到金属中,而金属对于进入其中的电磁波会随着穿透距离的增加而呈指数衰减。由于金属薄膜厚度较薄,即隐失波穿透金属薄膜时没有被完全衰减吸收,所以金属薄膜的不同厚度就代表了隐失波在金属薄膜中不同的衰减距离,从而导致不同的 p 偏振光能量的损失并在 SPR 图像中表现出来。对吸收线上任一位置而言,利用该位置处垂直圆柱棱镜母线方向(YY'方向)的归一化反射率曲线可反演出该处薄膜的厚度参数。进一步地,当吸收线上每个位置的厚度参数都获得后,还可实现平行于直母线方向上的一维厚度测量。吸收图中的 YY'方向上两个对应金属膜不同厚度位置 YY'-1 和 YY'-2 处的反射率曲线如图 3(b)所示。

进行实际测量时,先设置好起偏器、补偿器以及检偏器的位置以保证 p 偏振光入射。当 p 偏振光入射到基于柱面透镜 MOC 产生 SPR,对应的光强图像被 CCD 相机采集。由于光源的强度分布不均匀,采集得到的 SPR 图像并不能直接用于数据处理,所以还需进行归一化操作。传统的归一化方案是:旋转偏振器件保证 s 偏振光入射,并采集对应图像,利

用该图像的强度值作为背景光强进行归一化。该方案可取得不错的测量效果,但需要旋转偏振器件,会导致测量速度的降低。因此考虑到入射的激光束的光强分布是高斯分布,在实验中采用拟合背景光强的归一化方案,可直接根据 p 偏振光入射时得到的

单幅 SPR 图像拟合出背景光强。得到背景光强后,可计算出归一化反射率曲线,并对(1)~(3)式产生的归一化反射率曲线进行分析拟合即可获得拟合结果,进而可反演出待测金属薄膜的厚度参数。

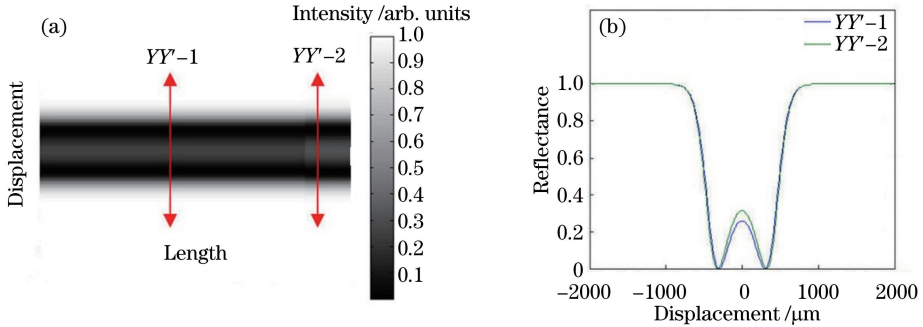


图 3 不同厚度 Au 膜反射率的仿真结果。(a)基于柱面透镜 MOC 产生 SPR 的数值仿真图;
(b)垂直于圆柱棱镜母线 YY' 方向的反射率曲线

Fig. 3 Simulation results of reflectivity curves for Au films with different thicknesses. (a) Numerical simulation results of SPR generated by cylindrical lens with MOC; (b) reflectivity curves of two positions whose direction YY' is orthogonal to cylinder axis, respectively

3 实验结果与讨论

成像椭偏仪的实物图如图 4(a)所示,光源采用的是光纤耦合输出的激光器,激光器中心波长为 633 nm。经过准直镜和扩束镜组后,光束尺寸能达到 13 mm。起偏器和检偏器均选用的是康宁公司的同种偏振玻璃,消光比大于 10000:1。补偿器采用的是胶合零级波片,适用波长范围为 400~2100 nm。相机采用的是 Imperx 的工业 CCD 相机,分辨率为 1000 pixel×1000 pixel,每个像素的成

像面积为 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 。基于柱面透镜 MOC 的实物图如图 4(b)所示,等腰直角棱镜的尺寸为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。柱面透镜直接加工在等腰直角棱镜的底面上,其曲率半径为 0.5 m。待测样品为非掺杂 Au 膜样品,Au 膜的标称厚度为 15 nm,沉积在半径为 30 mm 的圆形石英玻璃基底上。为了确定 Au 膜的实际厚度,采用美国 J. A. Woollam 公司的 VASE 椭偏仪对待测 Au 膜样品进行测量,测得其平均厚度为 16.7 nm,标准偏差为 0.01 nm。

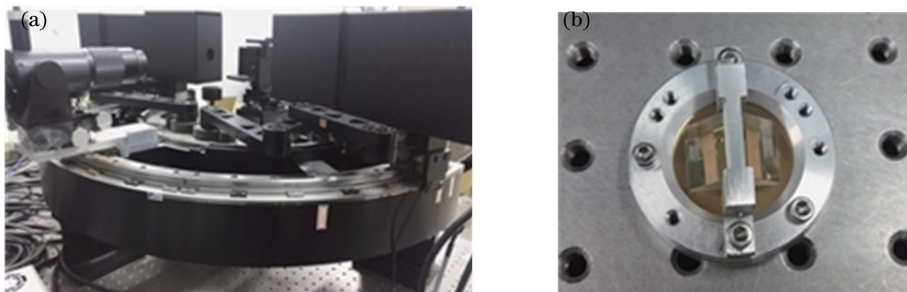


图 4 实验装置图。(a)成像椭偏仪;(b)基于柱面透镜 MOC 产生 SPR 的 Au 膜实物样品

Fig. 4 Experimental setup. (a) Imaging ellipsometer; (b) Au film sample for SPR generation by cylindrical lens with MOC

为了使产生的 SPR 效果更加显著,实验装置经过优化调节,入射角被设置为 41° 。当入射到基于柱面透镜 MOC 的光束为 p 偏振光时,可得到如图 5(a)所示的 SPR 图像。为了得到待测金属薄膜的厚度,对该 SPR 图像的 YY' 方向上 5 个位置处的

归一化反射率曲线进行建模拟合。以位置 3 处作为代表,其归一化曲线拟合结果如图 5(b)所示,具体拟合过程是将 CCD 相机所采集的图像沿着图 5(a)中的直线方向进行灰度值数据提取并进行归一化,即可获得在 Au 膜空气界面 p 偏振光入射

产生的 SPR 现象时的归一化反射率曲线,并对(1)~(3)式产生的归一化反射率曲线进行分析拟合即可获得拟合结果,如图 5(b)所示,从而可得到 Au 膜的测量厚度。从图 5(b)中可看到实际反射率曲线与拟合反射率曲线重合度很高。实验中通过拟合得到的 5 个位置处的厚度分别为 16.6, 16.4, 16.3, 16.7, 16.9 nm, 其平均厚度为 16.58 nm, 标准偏差为 0.21 nm。因此,本实验中

所测得的 Au 膜样品的平均厚度与美国 J. A. Woollam 公司的 VASE 椭圆仪所测厚度的差值仅为 0.12 nm, 验证了该方法的有效性。从椭圆测量方法测量结果标准偏差的角度分析,本文提出的方法相较于椭圆仪的测量结果精度较差,还有待改进,比如对 CCD 相机采集的图像数据需进行进一步降噪以提高信噪比,以及对 Au 膜的光学常数需进行进一步的精确测量。

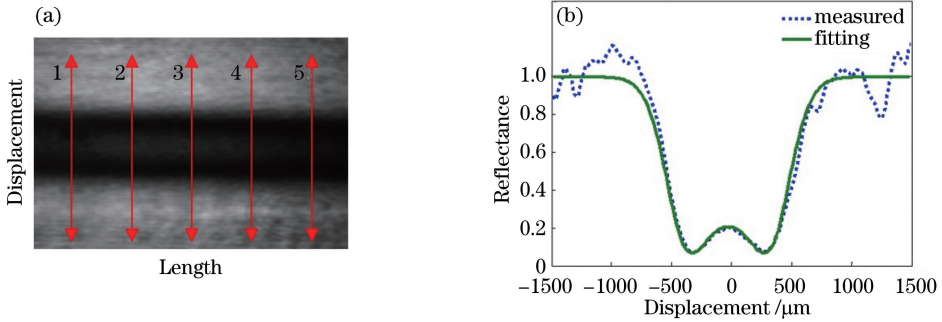


图 5 不同厚度下 Au 膜 SPR 的测量结果。(a)基于柱面透镜 MOC 产生的 SPR 的实验结果; (b)位置 3 处垂直于圆柱棱镜母线方向的 Au 膜反射率曲线

Fig. 5 Measured results of SPR for Au films with different thicknesses. (a) Experimental results of SPR produced by cylindrical lens with MOC; (b) reflectivity curves of the No.3 line whose direction is orthogonal to cylinder axis

4 结 论

提出了一种基于柱面透镜 MOC 产生 SPR 效应的快速测量金属薄膜厚度的方法,该方法只需 p 偏振光入射下采集单张 SPR 图像就可通过程序快速拟合背景光强并反演出待测金属薄膜的厚度参数,相比于传统 MOC,不需要专门测量背景光强,因此具有测量装置简单、操作方便和测量快速等优点。本文对纳米级厚度的非掺杂 Au 膜样品进行测量,测量得到的厚度参数与椭圆方法测量的厚度平均值相差很小,验证了所提方法的有效性,相比于只能进行金属膜厚单点测量的传统光谱椭圆测量技术,该方法可以对金属薄膜进行一维方向厚度的多点同时测量。从测量结果标准偏差的角度分析,本文提出的基于柱面透镜 MOC 产生 SPR 测量金属膜厚的方法在精确度方面相比于椭圆测量方法还有待进一步提高,下一步工作将从提高图像采集的信噪比、进一步准确测量金属薄膜的光学常数等方面提高该方法测量结果的准确性。

参 考 文 献

[1] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.

[2] Fang N, Lee H, Sun C, *et al.* Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.

[3] Politano A, Chiarello G. The influence of electron confinement, quantum size effects, and film morphology on the dispersion and the damping of plasmonic modes in Ag and Au thin films [J]. *Progress in Surface Science*, 2015, 90(2): 144-193.

[4] Orr B G, Jaeger H M, Goldman A M. Transition-temperature oscillations in thin superconducting films [J]. *Physical Review Letters*, 1984, 53(21): 2046-2049.

[5] Smith G B, Maarouf A I. Optical response in nanostructured thin metal films with dielectric overlayers [J]. *Optics Communications*, 2004, 242(4/5/6): 383-392.

[6] Hooper I R, Sambles J R. Some considerations on the transmissivity of thin metal films [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 17258-17267.

[7] Liu S L, Bo B X, Zou Y X, *et al.* Ultrawide-band terahertz beam-splitter based on ultrathin metallic films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1131002.

刘松林, 薄报学, 邹仪宣, 等. 基于超薄金属薄膜的超宽频太赫兹分束器 [J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1131002.

[8] Yang Z T, Gu D, Gao Y C. An improved dispersion

- law of thin metal film and application to the study of surface plasmon resonance phenomenon [J]. *Optics Communications*, 2014, 329: 180-183.
- [9] Kosinova A, Wang D, Schaaf P, *et al.* Whiskers growth in thin passivated Au films [J]. *Acta Materialia*, 2018, 149: 154-163.
- [10] Wang P P, Xu C, Fu E G, *et al.* The study on the electrical resistivity of Cu/V multilayer films subjected to helium (He) ion irradiation[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 440: 396-402.
- [11] Lin Y Q, Feng S M, Wang K X, *et al.* Effects of film thickness less than electrical mean free path on reflectivity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(2): 263-266.
林育琼, 冯仕猛, 王坤霞, 等. 金属薄膜厚度小于电子自由程对其光反射率的影响[J]. *光子学报*, 2011, 40(2): 263-266.
- [12] Li M Y, Gu P F, Zhang J L, *et al.* Study on the property of subwavelength imaging in a metal thin-film structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(7): 4564-4569.
李明宇, 顾培夫, 张锦龙, 等. 金属薄膜亚波长近场成像特性研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(7): 4564-4569.
- [13] Ma X J, Gao D Z, Yang M S, *et al.* Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(1): 17-22.
马小军, 高党忠, 杨蒙生, 等. 应用白光共焦光谱测量金属薄膜厚度[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 17-22.
- [14] Seo Y, Jhe W. Atomic force microscopy and spectroscopy[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2008, 71(1): 016101.
- [15] Zhu H N, Liu L G, Wen Y W, *et al.* High-precision system for automatic null ellipsometric measurement [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4536-4540.
- [16] Liu H S, Yang X, Liu D D, *et al.* Spot effect in optical constant characterization of thin films fabricated by ion beam sputtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1031001.
刘华松, 杨霄, 刘丹丹, 等. 离子束溅射薄膜光学常数表征的光斑效应[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1031001.
- [17] Chu L Q, Zhang Q, Förch R. Surface plasmon-based techniques for the analysis of plasma deposited functional films and surfaces [J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2015, 12(9): 941-952.
- [18] Bliokh Y P, Vander R, Lipson S G, *et al.* Visualization of the complex refractive index of a conductor by frustrated total internal reflection [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(2): 021908.
- [19] Iwata T, Maeda S. Simulation of an absorption-based surface-plasmon resonance sensor by means of ellipsometry [J]. *Applied Optics*, 2007, 46 (9): 1575-1582.
- [20] Iwata T, Mizutani Y. Ellipsometric measurement technique for a modified Otto configuration used for observing surface-plasmon resonance [J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 14480-14487.
- [21] Hu G H, He H B, Sytchkova A, *et al.* High-precision measurement of optical constants of ultrathin coating using surface plasmon resonance spectroscopic ellipsometry in Otto-Bliokh configuration [J]. *Optics Express*, 2017, 25 (12): 13425-13434.
- [22] Shan Y, Hu G H, Gu L Y, *et al.* Measuring optical constants of ultrathin layers using surface-plasmon-resonance-based imaging ellipsometry [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(28): 7898-7904.
- [23] Iwata T, Wada Y, Nishigaki K, *et al.* Two-dimensional thickness measurement of a dielectric thin layer on a metal by use of surface-plasmon-resonance-based ellipsometry [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8169: 816913.
- [24] Hu S Y, Zeng A J, Gu L Y, *et al.* Measurement method of film parameters of metal based on imaging ellipsometry and surface-plasmon resonance [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1108001.
胡仕玉, 曾爱军, 谷利元, 等. 基于椭圆成像光路和表面等离子体共振效应的金属薄膜参数测量方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1108001.
- [25] Hu G H, He H B, Sytchkova A, *et al.* High-precision measurement of optical constants of ultrathin coating using surface plasmon resonance spectroscopic ellipsometry in Otto-Bliokh configuration [J]. *Optics Express*, 2017, 25 (12): 13425-13434.