

复介电常数的 K-K 修正对金属纳米球阵列结构光学特性的影响

江天润^{1,2**}, 张桂菊^{1,2*}, 延英^{1,2}

¹苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;

²江苏省先进光学制造技术重点实验室与教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 对金属的复介电常数虚部进行了 Kawabata-Kubo(K-K)修正, 定量描述了表面等离激元产生的光学散射和吸收特性; 利用米氏理论和电偶极子理论计算并分析了光入射到单个椭球状金属纳米微粒产生的消光特性; 建立了椭球状纳米微粒周期阵列分布的光学偏振结构模型, 利用 COMSOL 软件模拟计算了可见光到近红外波段的偏振光输出特性。以椭球的有效半径替代球半径, 将 K-K 修正应用于金属椭球阵列结构的有限元模拟。修正后的金属纳米椭球阵列的透过率减小, 消光光谱带宽增大, 这与实验中单个金属颗粒的宽带强吸收特性趋势一致。

关键词 测量; 金属纳米结构; Kawabata-Kubo 修正; 米氏理论; 偏振特性

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0212002

Influence of K-K Correction of Complex Permittivity on Optical Properties of Metal Nano-Ellipsoid Array Structure

Jiang Tianrun^{1,2**}, Zhang Guiju^{1,2*}, Yan Ying^{1,2}

¹ School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

² Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province & Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Ministry of Education, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract The imaginary part of the complex permittivity of the metal nanoparticle is modified by Kawabata-Kubo (K-K) correction. The optical scattering and absorption characteristics of surface plasmons are quantitatively described. The extinction characteristics of light incident on a single ellipsoid metal nanoparticle are calculated and analyzed by Mie theory and the electric dipole theory. A optical polarization structure model of periodic array of ellipsoidal nanoparticles is established. The output characteristics of polarized light from visible to near infrared bands are simulated and calculated by COMSOL software. K-K correction is applied to finite element simulation of the metal ellipsoid arrays by replacing spherical radius with effective radius of ellipsoid. The modified metal nano-ellipsoid arrays have lower transmittance and wider extinction spectrum bandwidth, which is consistent with the experimental trend of broadband strong absorption characteristics of single metal particles.

Key words measurement; metal nanostructures; Kawabata-Kubo correction; Mie theory; polarization characteristics

OCIS codes 120.3688; 120.7000; 160.4760; 260.5430

1 引 言

随着纳米光子学和微纳加工技术的发展, 含有金属微纳结构的超材料^[1-7]的发展前景愈发广阔。金属是一种重要的色散介质, 在数值仿真和模拟计算中需要用色散模型确定其相应的参数, 色散模型

的准确建立对金属薄膜、金属光栅和纳米球阵列等波导结构的特性有着至关重要的作用。Bouillard 等^[8]通过建立金属色散模型中等离子体频率和碰撞频率与温度的对应关系, 解释了低温下金属纳米结构的吸收特性变化。Urii 等^[9]针对含有金纳米长方块的超材料, 利用金属纳米方块的

收稿日期: 2018-07-23; 修回日期: 2018-09-02; 录用日期: 2018-09-17

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目、江苏省自然科学基金青年基金(BK20150308)

* E-mail: gjzhang@suda.edu.cn; ** E-mail: 2570404544@qq.com

局域表面等离子共振(LSPR)特性的温度依赖性,通过修正 Drude 模型中的等离子频率和碰撞频率,建立其与温度的对应关系来控制 LSPR 共振峰的位置和大小,增大了含有金属纳米单元的设计自由度,实现了整个超材料的透过率和透光频段的主动控制。在含有金属薄膜结构的介质光栅复合结构或含有金属的一维光子晶体中^[10-11],Drude 模型中的复介电常数公式能很好地描述金属的色散性质。当入射光照射在含有金属纳米颗粒的波导结构时,内部自由电子振荡产生的 LSPR 使波导表现出明显的光学散射和吸收等特性。金属纳米颗粒的吸收光谱主要和本身的 LSPR 特性相关。与理论计算相比,实验中的金属纳米颗粒具有更大的共振吸收光谱线宽^[12]。金属的 LSPR 特性与其形状、尺寸、材料和周围介质密切相关,需使用离散傅里叶变换(DFT)和含时密度泛函(TDDFT)等计算物理方法和介观物理理论对其进行严格分析。工程应用中常使用 Mie 散射理论和 Drude 模型中的介电常数公式来描述光波与物质的关系,然而 Drude 模型本身不能描述金属纳米颗粒的 LSPR 特性,因此在不跳出理论框架的前提下,可以通过修正复介电常数引入相关的物理参量,如颗粒尺寸大小、周围介质折射率等,来等效描述 LSPR 特性对光波传输的影响。简单的 Drude 模型中没有描述 LSPR 对金属色散特性的影响的参量^[13]。因此,引入含有尺寸参量的修正模型可以更加精确地对含有金属纳米结构的波导结构进行模拟计算,并且能够提高含有金属纳米结构的超材料的设计精度。

当金属纳米结构的尺寸远小于入射光波长时,入射光的电场分量会使金属纳米结构上的电荷发生极化,电荷随入射电场的变化而发生集体振荡,即 LSPR^[14]。当球形微粒尺寸为几纳米或几十纳米且入射光波段位于可见光或近红外波段时,由于入射光的远场激发,纳米颗粒的表面将会产生局域化的等离子共振,而经典的 Drude 模型未涉及描述表面等离子共振对金属材料的影响的参数。实验中金属纳米颗粒的吸收光谱带宽大于 Drude 模型计算出的带宽,展现出宽带强吸收的特性^[12,15]。Averitt 等^[16-17]通过修正 Drude 模型中的平均电子自由程来等效描述 LSPR 特性对金属纳米球壳吸收光谱的影响。虽然通过减少模型中的平均电子自由程或修正碰撞频率可以解释这种带宽增大的现象,但是这些研究仍未考虑表面等离子共振带来的量

子效应。Kawabata-Kubo(K-K)修正^[15,18]认为纳米尺寸下的金属颗粒的吸收效应主要源于束缚在有限体积内的本征态电子的能级跃迁,而不是金属纳米颗粒的表面散射作用;金属颗粒的吸收可以用金属复介电常数的虚部表示,与将金属纳米颗粒等效为电偶极子的方法保持了理论上的一致性。K-K 修正利用量子理论通过修正复介电常数虚部来描述纳米颗粒的 LSPR 特性,虽然后来经过了不同形式的修改,但是 K-K 修正仍保证了物理上的正确性^[18],因此为了简明,本文采用了最原始的版本。通过 K-K 修正单个椭球状纳米颗粒的复介电常数,定量描述光场激发的 LSPR 对金属纳米颗粒吸收的影响。利用 Mie 理论和电偶极子理论分析光入射到椭球状金属纳米颗粒时产生的散射与吸收特性^[19],及结构参数和材料对椭球状金属纳米颗粒的消光影响;用椭球的有效半径替代球半径,将 K-K 修正应用于椭球状金属阵列结构的有限元方法(FEM)模拟;建立椭球状纳米结构周期阵列分布的功能型光学器件模型,利用 COMSOL 仿真软件模拟分析该模型的透射光谱特性和偏振特性。修正后的金属纳米椭球阵列的透过率减小,消光光谱带宽增大,这与实验中单个金属颗粒的宽带强吸收特性趋势一致。

2 模型与理论

图 1 所示为具有周期性金属纳米椭球阵列分布的光学结构器件模型,其中 XYZ 为坐标系。在透明介质(如玻璃材料)中置入具有有序阵列分布的椭球状金属纳米结构,玻璃的介电常数为 ϵ_g ,金属的复介电常数为 $\epsilon = \epsilon_1 - i\epsilon_2$,其中 ϵ_1 为实部, ϵ_2 为虚部。金属纳米椭球的赤道半径分别为 a 和 b ,极半径为 c ,体积为 V 。阵列结构是周期为 $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm} \times 50 \text{ nm}$ 的立方体单元,即单元的长和宽 a_T 和 b_T 为 100 nm ,高 c_T 为 50 nm 。

通过经典电磁理论与数学方法相结合可精确计算出光的散射。Mie 理论研究了光波经过球状纳米微粒的散射特性,给出了麦克斯韦方程的精确解,完整地描述了任意大小的球状纳米颗粒的消光光谱与谐振波长的关系。当球状微粒小于光入射波长 λ 时,Mie 理论的精确解可等效为在均匀电场中放入一个电偶极子的解。通过电偶极子理论,可解得不同长径比的椭球状纳米微粒在不同波段内具有偏振效应^[19]。当介质中颗粒的体积密度小到可以忽略颗粒的诱导偶极矩之间的相互作用时,这种复合材

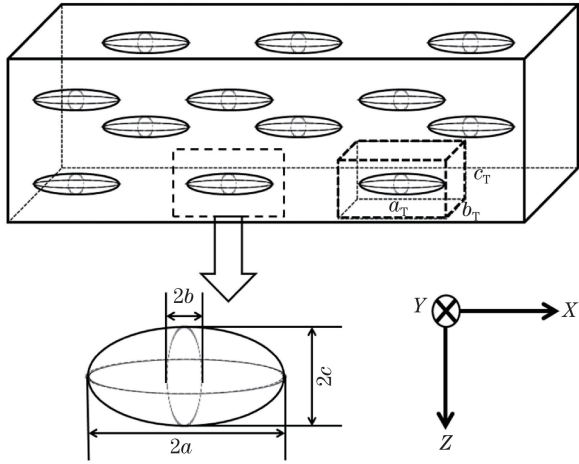


图1 玻璃基金属纳米椭球阵列结构模型
Fig. 1 Structural model of glass-based metal nano-ellipsoid arrays

料的吸收截面可表示为

$$C_{\text{abs}} = \frac{18\pi V \epsilon_g^{3/2}}{\lambda} \frac{\epsilon_2}{(2\epsilon_g + \epsilon_1)^2 + \epsilon_2^2} \quad (1)$$

在外电场一定的情况下,金属颗粒的极化强度仅与退极化因子相关,而退极化因子由颗粒形状决定。本研究中的金属颗粒为椭球形,与球状颗粒各个方向上的退极化因子均为 1/3 不同,其退极化因子 L 与入射光的偏振方向相关,故含有椭球状金属颗粒的玻璃介质的吸收截面^[17]可表示为

$$C_{\text{abs}} = \frac{2\pi V \epsilon_g^{3/2}}{L^2 \lambda} \frac{\epsilon_2}{[(1/L - 1)\epsilon_g + \epsilon_1]^2 + \epsilon_2^2} \quad (2)$$

本研究只考虑入射光的偏振方向与金属颗粒的长轴方向平行及垂直时的情况。当入射光的光矢量平行于 X 轴和 Y 轴时,退极化因子均为关于长径比 $m (m = a/b)$ 的函数^[20],即

$$L_{\parallel} = L_1 = \frac{1}{m^2 - 1} \left\{ \frac{m}{2(m^2 - 1)^{1/2}} \times \ln \left[\frac{m + (m^2 - 1)^{1/2}}{m - (m^2 - 1)^{1/2}} \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

$$L_{\perp} = L_2 = \frac{m^2}{2(m^2 - 1)} + \frac{m}{4(m^2 - 1)^{3/2}} \times \ln \left[\frac{m - (m^2 - 1)^{1/2}}{m + (m^2 - 1)^{1/2}} \right]. \quad (4)$$

对于大块金属,Drude 模型(即自由电子气模型)是描述金属复介电常数的经典模型。它将金属的复介电常数^[21]近似表示为

$$\epsilon_c = \epsilon_{\infty} - A\lambda^2 + iB\lambda^3, \quad (5)$$

式中: ϵ_{∞} 为金属在高频极限的介电常数; A 、 B 为系数。 ϵ_{∞} 、 A 、 B 可以通过金属自由电子理论计算得出,也可以通过实验数据拟合得到^[22-23]。本研究先进行实验数据拟合再对复介电常数虚部进行修正。实验拟合的银的复介电常数实部 $\epsilon_{1b} = 5 - 55\lambda^2$,复介电常数虚部 $\epsilon_{2b} = 0.06 + 27\lambda \exp(-29\lambda^2) + 1.6\lambda^3$,下标 b 表示大块金属,波长单位均为 μm 。 ϵ_{2b} 中第一部分为束缚电子的贡献,第二部分为只存在于紫外波段的带间跃迁,第三部分为自由电子的贡献。

金属纳米颗粒的复介电常数除了与入射光频率相关,还与颗粒尺寸相关。当颗粒尺寸为纳米级时,在金属颗粒表面会发生 LSPR,物理表现为对入射光吸收的增强。Drude 模型中的复介电常数虚部描述了金属的吸收能力,因此 LSPR 的存在会对复介电常数虚部的数值产生影响。因此需对椭球状金属纳米颗粒的复介电常数的虚部进行 K-K 修正^[15,18],即

$$\epsilon_2 = \epsilon_{2b} + \frac{3.2e^2}{\pi^2 \epsilon_F} \frac{g(v)}{\sqrt{ab^2}}, \quad (6)$$

式中: e 为元电荷; ϵ_F 为费米能量,表达式为 $\epsilon_F =$

$\frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}$, \hbar 为普朗克常量, n 为金属的单位电子

密度; v 为金属的费米速度,表达式为 $v = \frac{\hbar\omega}{\epsilon_F}$, ω 为入射光角频率; $g(v)$ 为 K-K 修正函数,其表达式为

$$g(v) = v^{-4} \int_{v_0}^1 [x^3(x+v)]^{1/2} dx, v_0 = \begin{cases} 1-v, v < 1 \\ 0, v > 1 \end{cases}, \quad (7)$$

式中 v_0 为关于金属费米速度的分段函数,其大小由入射光频率决定。由于入射光波段为 400~1400 nm,在此范围内 $v < 1$,故 v_0 取为 $1-v$ 。

图 2 所示为银纳米颗粒的复介电常数虚部与波长的对应关系曲线。利用(6)式和(7)式计算出修正后的复介电常数虚部。设置长径比为 1:2,观察椭球短半轴 b 的数值变化对复介电常数虚部的影响。由图 2 可知:修正后的 Ag 的复介电常数虚部整体大于块状金属的测量数据;金属纳米颗粒的粒径越小,复介电常数虚部越大;波长越大,修正对虚部的影响越大。随着纳米颗粒粒径的增大,纳米颗粒的复介电常数虚部越来越接近块状金属的,这符合纳米颗粒的尺寸效应规律,并且与通过修正自由电子的平均自由程^[24-25]的方法得到的结果一致。

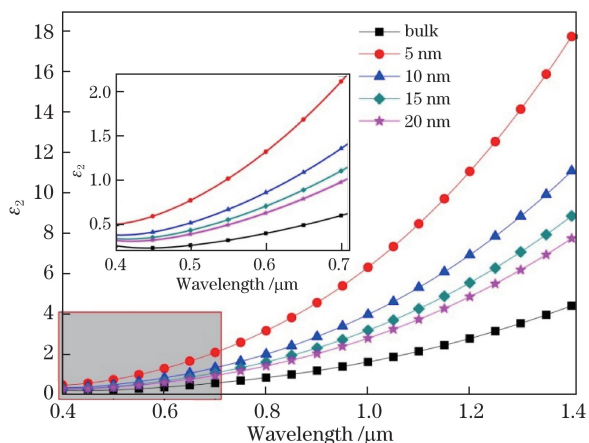


图 2 不同尺寸下椭球状银纳米颗粒的复介电常数虚部的修正曲线

Fig. 2 Correction curves of imaginary part of complex permittivity of ellipsoidal Ag nanoparticles with different sizes

3 结果与分析

3.1 单个金属纳米球消光截面特性

图 3 所示为椭球状银纳米微粒对应的平行和垂直于椭球长轴两个不同方向的消光截面曲线。由 (2) 式可知, 椭球状金属纳米颗粒的吸收截面与长径比及金属的复介电常数有关, 将 (3)、(4)、(6) 式代入 (2) 式中, 分别得出在不同长径比条件下, 入射光平行和垂直于椭球长轴时, 单个椭球状银颗粒的吸收截面与入射波长的关系。当颗粒半径远小于入射波长时, 消光截面可近似为吸收截面, 即 $C_{ext} \approx C_{abs}$ 。设置长径比分别为 1:2、1:3、1:4、1:5 和 1:6, 椭球的短半轴 $b=c=5$ nm, 长半轴分别为 10, 15, 20, 25, 30 nm。

结果表明, 随着椭球长径比的增大, 入射光偏振方向平行于椭球长轴的消光峰值增大, 入射光偏振方向垂直于椭球长轴的消光截面大小基本不变且数值很小。即不同长径比的单个椭球状银纳米颗粒具有一定的起偏效果, 长径比越小, 对短波长入射光的起偏效果越好。

图 4 所示为不同尺寸的银纳米椭球颗粒经过 K-K 修正前后的消光截面曲线, 其中 bc 代表修正前, ac 代表修正后, 下文同。金属椭球颗粒的消光光谱峰位置和椭球的长径比相关, 而消光光谱的谱宽和峰值与椭球的尺寸大小相关, 因此固定长径比能够保证消光峰位置不变, 同时通过对比可以看出尺寸变化时 K-K 修正对消光光谱谱宽和峰值的影响。为了观察可见光波段, 令长径比为 1:2。若需

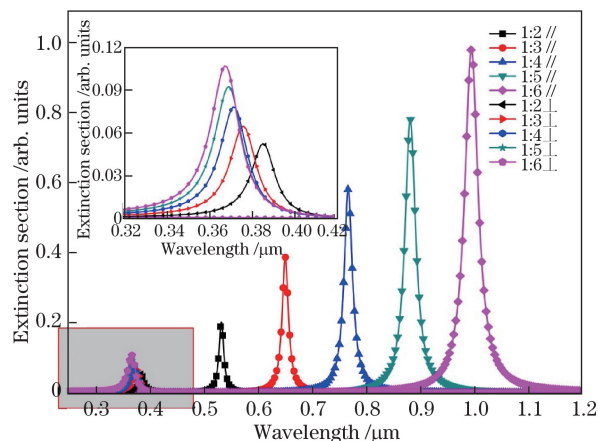


图 3 不同长径比下椭球状银纳米颗粒的消光截面曲线
Fig. 3 Curves of extinction section of ellipsoidal Ag nanoparticles under different aspect ratios

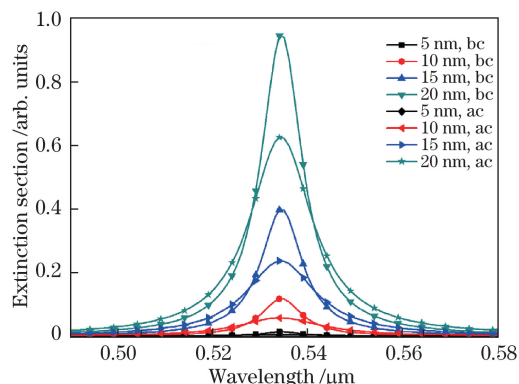


图 4 不同尺寸的椭球状银纳米颗粒修正前后消光截面曲线
Fig. 4 Extinction section curves of Ag ellipsoidal nanoparticles before and after K-K correction

要比较红外波段 K-K 修正对消光光谱谱宽和峰值的影响, 可以设定更大的长径比。在长径比为 1:2 且入射光偏振方向平行于椭球长轴的情况下, 计算修正后金属颗粒短轴分别为 5, 10, 15, 20 nm 时椭球状银纳米颗粒的消光截面, 并分别与未修正时的消光截面进行对比。结果表明, 颗粒的尺寸越小, 复介电常数修正对金属纳米颗粒的消光截面的影响越大, 修正后的消光截面带宽比未修正时的大, 而消光峰峰值偏小。

图 5 所示为三种不同贵金属 Ag、Cu 和 Au 的椭球纳米颗粒的消光截面特性曲线, 通过对比研究复介电常数虚部的修正对消光截面的影响。K-K 修正中通过费米能量 ϵ_F 来描述不同金属材料对复介电常数虚部的影响。三种金属纳米椭球的长径比均为 1:2, 椭球短轴均为 5 nm。Ag、Cu 和 Au 三种金属材料的费米能量分别为 5.49, 7, 5.53 eV。

结果表明: 在结构参数相同的情况下, Ag 椭球的消光截面明显大于 Cu 和 Au 的; Cu 和 Au 两

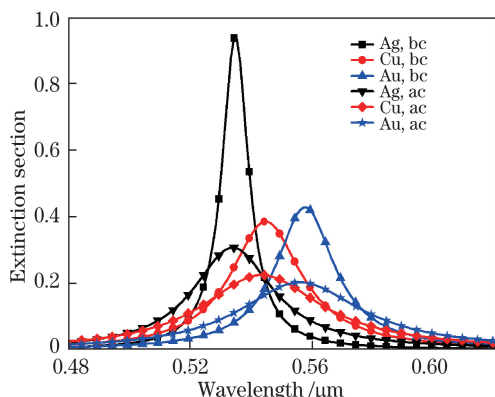


图 5 Ag, Cu, Au 三种椭球状纳米颗粒修正前后消光截面对比图

Fig. 5 Extinction sections of Ag, Cu and Au ellipsoidal nanoparticles before and after K-K correction

种材料的纳米椭球颗粒的消光峰相比于 Ag 的均发生了红移,且 Au 的红移程度大于 Cu 的;未修正复介电常数虚部的 Ag 的消光峰峰值比 Cu 和 Au 的大,修正后 Ag 的消光峰峰值依然大于 Cu 和 Au 的,但是峰值差距减小;未修正的 Cu 的消光峰峰值大于 Au 的,而修正后 Cu 的消光峰峰值小于 Au 的,这说明表面等离激元对 Au 的影响大于对 Cu 的影响。复介电常数虚部的修正会使其他金属材料纳米椭球的消光截面带宽增大,消光峰峰值减小。

3.2 金属纳米球阵列的消光特性

利用 COMSOL 仿真软件建立玻璃基银纳米椭球阵列结构模型,计算并分析该结构的光谱输出特性。设置立方体单元的周期为 $100\text{ nm} \times 100\text{ nm} \times 50\text{ nm}$,即 $a_T = b_T = 100\text{ nm}$, $c_T = 50\text{ nm}$;设置银纳米颗粒长径比为 1:2,短轴的长度 $b = c = 15\text{ nm}$;设置银纳米椭球的层数为 20;设置玻璃基为折射率为 1.5 的 SiO_2 。入射光分别设置为与椭球长轴平行和垂直的线偏振光,波长范围为 $400 \sim 700\text{ nm}$ 。模拟计算复介电常数经过 K-K 修正前后的玻璃基银纳米椭球阵列模型的透射率和消光比。图 6 所示为复介电常数修正前后的垂直和平行方向的光谱透射率。可以看出,修正后该结构在 $400 \sim 700\text{ nm}$ 波段的透射率均有所减小,但有效消光波段的透射率均大于 70%,其中 $544 \sim 562\text{ nm}$ 波段的透过率大于 90%。修正使复介电常数虚部增大,颗粒的吸收增强,整个模型的透射率减小。图 7 所示为修正前后该结构的消光比曲线,可以看出,有效消光波段的带宽增大, $475 \sim 585\text{ nm}$ 范围内的消光比均大于 40 dB,且 $487 \sim 545\text{ nm}$ 波段范围内的消光比大于 95 dB。

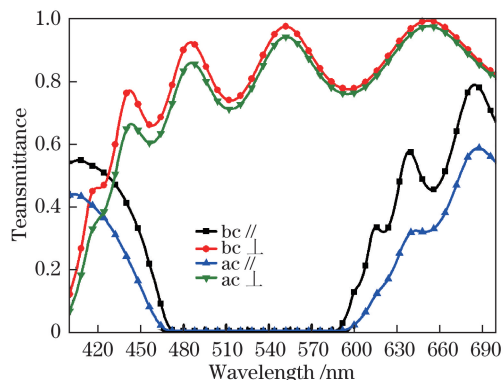


图 6 修正前后玻璃基银纳米椭球阵列模型的透射率曲线

Fig. 6 Transmittance curves of glass-based Ag nano-ellipsoid array model before and after correction

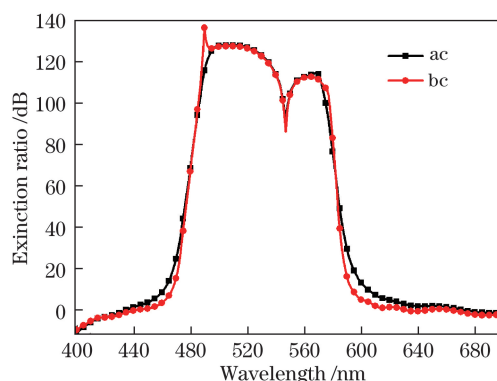


图 7 修正前后玻璃基银纳米椭球阵列模型的消光比曲线

Fig. 7 Extinction ratio curves of glass-based silver nano-ellipsoid array model before and after correction

4 结 论

基于 K-K 修正对具有不同尺寸和长径比的金属纳米颗粒的复介电常数进行了修正。研究结果表明:尺寸越小的金属纳米颗粒的复介电常数虚部越大;随着颗粒尺寸的增大,其复介电常数的虚部越来越接近块状金属;修正后消光带宽增大,与实验中单个金属颗粒的宽带强吸收特性趋势一致。将修正后的数据代入玻璃基银纳米椭球阵列模型发现,在垂直和平行两个方向上的透射率有所减小,有效消光波段带宽增大。在有效消光波段,垂直方向上的透射率均大于 70%, $544 \sim 562\text{ nm}$ 波段的透过率大于 90%。 $475 \sim 585\text{ nm}$ 范围内的消光比大于 40 dB, $487 \sim 545\text{ nm}$ 波段的消光比大于 95 dB。

参 考 文 献

- [1] Soukoulis C M, Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials[J]. Nature Photonics, 2011, 5(9): 523-530.

- [2] Jahani S, Jacob Z. All-dielectric metamaterials[J]. Nature Nanotechnology, 2016, 11(1): 23-36.
- [3] Chen Y H, Liu G Q, Huang K, *et al.* Investigation of optical transparent properties of sub-wavelength complex structure of a metal ellipsoid periodic array and a metal film[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 071602.
陈元浩, 刘桂强, 黄宽, 等. 亚波长金属椭球周期阵列: 金属薄膜复合结构的光透明特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 071602.
- [4] Wang K. Study on third-order nonlinear optical properties of noble metal nanoparticle arrays[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
王凯. 贵金属纳米颗粒阵列的三阶非线性光学特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [5] Han H, Wu D W, Liu J J, *et al.* A terahertz metamaterial analog of electromagnetically induced transparency[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0423003.
韩昊, 武东伟, 刘建军, 等. 一种太赫兹类电磁诱导透明超材料谐振器[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0423003.
- [6] Bai Z Y, Jiang X W, Zhang L. Ultra-thin metamaterial absorber for electromagnetic window shielding[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0816003.
白正元, 姜雄伟, 张龙. 超薄电磁屏蔽光窗超材料吸波器[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0816003.
- [7] Xiao G L, Liu X G, Yang H Y, *et al.* Refractive index sensing property based on extraordinary optical transmission of metal circular arc hole array[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0224001.
肖功利, 刘小刚, 杨宏艳, 等. 基于金属圆弧孔阵列强透射的折射率传感特性[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0224001.
- [8] Bouillard J S G, Dickson W, O'Connor D P, *et al.* Low-temperature plasmonics of metallic nanostructures[J]. Nano Letters, 2012, 12(3): 1561-1565.
- [9] Uiri S A, Tashima T, Zhang X, *et al.* Active control of a plasmonic metamaterial for quantum state engineering[J]. Physical Review A, 2018, 97(5): 053810.
- [10] Zhang D Y, Zhao L, Wang X X, *et al.* A refractive index sensor based on composite structure of dielectric grating with metal films[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1124001.
张东阳, 赵磊, 王向贤, 等. 一种基于介质光栅金属薄膜复合结构的折射率传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1124001.
- [11] Lu S Q, Chao X G, Chen X F, *et al.* TE polarization perfect absorption with dual-band in metal-photonic crystal-metal structure[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0116003.
陆苏青, 巢小刚, 陈宪锋, 等. 金属-光子晶体-金属结构中的双波 TE 偏振完美吸收[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0116003.
- [12] Tam F, Chen A L, Kundu J, *et al.* Mesoscopic nanoshells: Geometry-dependent plasmon resonances beyond the quasistatic limit[J]. The Journal of Chemical Physics, 2007, 127(20): 204703.
- [13] Gai H F, Wang J, Tian Q. Modified Debye model parameters of metals applicable for broadband calculations[J]. Applied Optics, 2007, 46(12): 2229-2233.
- [14] Kreibig U, Zacharias P. Surface plasma resonances in small spherical silver and gold particles[J]. Zeitschrift Für Physik A Hadrons & Nuclei, 1970, 231(2): 128-143.
- [15] Kawabata A, Kubo R. Electronic properties of fine metallic particles. II. plasma resonance absorption[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1966, 21(9): 1765-1772.
- [16] Averitt R D, Westcott S L, Halas N J. Linear optical properties of gold nanoshells[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1999, 16(10): 1824-1832.
- [17] Cong C. Study on the local surface plasmon resonance characteristics of noble metal nanoparticles[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.
丛超. 贵金属纳米颗粒的局域表面等离子共振特性研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [18] Barma M, Subrahmanyam V. Optical absorption in small metal particles[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1989, 1(41): 7681-7688.
- [19] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1998: 57-165.
- [20] Zhang K, Zhang G J, Zou K S, *et al.* Investigation of optical polarization properties on Ag nanorods array polarizing glass[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(9): 9062-9066.
张柯, 张桂菊, 邹快盛, 等. 银纳米颗粒有序阵列光学偏振玻璃特性研究[J]. 功能材料, 2015, 46(9): 9062-9066.
- [21] Seward III T P. Coloration and optical anisotropy in silver-containing glasses[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1980, 40(1/2/3): 499-513.
- [22] Su J, Sun C, Wang X Q. A metallic dispersion model for numerical simulation[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(2): 408-414.
苏杰, 孙诚, 王晓秋. 一个适用于数值计算的金属色散模型分析研究[J]. 光电子 • 激光, 2013, 24(2):

- 408-414.
- [23] Jiang H L, Liu Q N. Optical Tamm states with three dispersion models of metals dielectric constant [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2016, 33(5): 547-553.
蒋和伦, 刘启能. 金属介电常数的色散模型对光学 Tamm 态的影响 [J]. 计算物理, 2016, 33(5): 547-553.
- [24] Wu X Y. Efficient broadband absorber based on surface plasmon nanoparticles [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
吴雪彦. 基于表面等离激元纳米颗粒的高效宽带吸收体 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [25] Stookey S D, Beall G H, Pierson J E. Full-color photosensitive glass [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(10): 5114-5123.