

doi: 10.3788/gzxb20174606.0616008

# 温度变化环境中 Au 纳米球光学性质的研究

罗道斌, 韩香娥, 段璐杰

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

**摘 要:** 理论分析了贵金属纳米颗粒介电函数的尺寸及温度修正, 考虑环境介质折射率的色散及随温度变化关系, 计算了温度变化环境中 Au 纳米球的光学性质. 结果表明, 体相和纳米 Au 金属介电函数实部均随着温度升高而增大, 而体相材料和纳米 Au 介电函数虚部表现出不同的温度特性; 对于纳米球的光吸收效率, 温度升高, 纳米球的吸收峰峰值增大; 对 10~100 nm 的 Au 纳米球吸收效率的温度灵敏度分析表明, Au 纳米球的光吸收效率温度灵敏度随粒径增大而减小.

**关键词:** 光散射; 吸收效率; 介电函数; Mie 理论; 金属纳米颗粒

中图分类号: O436.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0616008-7

## Study of Optical Properties of Au Nano-spheres in the Ambient Medium with Temperature Changing

LUO Dao-bin, HAN Xiang-e, DUAN Lu-jie

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Effect of temperature and size on the dielectric function of noble metal nanoparticles are analyzed theoretically, and the optical properties of the nano-spheres are calculated including the dispersion relation and temperature characteristics of refractive index. The results show that the real part of dielectric function of the bulk gold material or gold nanoparticles rise with increasing of temperature, but the imaginary part demonstrate different temperature characteristics. For the absorption efficiency of the Au nano-sphere, the peak value of the absorption efficiency increased with the increasing of temperature, and the temperature sensitivity of the absorption efficiency decreases with the particle size increasing at the range of 10~100 nm.

**Key words:** Light scattering; Absorption efficiency; Dielectric function; Mie theory; Metal nanoparticle

**OCIS Codes:** 160.4236; 290.4020; 290.5850

## 0 引言

近年来, 基于贵金属纳米材料的光学性质, 在提高光伏电池效率、传感、荧光增强、喇曼增强、生物光热治疗等领域有广泛研究及应用<sup>[1-5]</sup>. 贵金属纳米颗粒的光学性质和颗粒的材质、尺寸、形状、周围环境介质的折射率等因素有关<sup>[6-10]</sup>. 基于贵金属纳米颗粒的光吸收特性及光热效应, 可用于生物光热治疗, 贵金属的光热效应及应用引起了研究人员的广泛关注<sup>[11-13]</sup>. 贵金属纳米颗粒吸收光能转化为热量, 导致金属颗粒及颗粒周围介质环境的温度升高, 从而达到光热治疗的效果. 因此, 研究贵金属纳米颗粒在温度变化环境中的光学性质, 在光热治疗及其应用领域具有重要的意义.

金属纳米颗粒在不同温度环境下光学性质的研究, 需要考虑到金属材料介电函数的温度特性、热膨胀效应、周围环境介质的折射率随温度的变化等因素. 本文重点研究 Au 纳米颗粒介电函数的尺寸和温度修正,

基金项目: 陕西省协同创新计划项目(No. 2015XT65) 资助

第一作者: 罗道斌(1980-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为纳米光子学. Email: luodaobin@sust.edu.cn

导师(通讯作者): 韩香娥(1962-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向电磁(光)波传播与散射、激光探测技术. Email: xehan@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2016-12-26; 录用日期: 2017-03-14

<http://www.photon.ac.cn>

分析了金属 Au 表面等离子体频率及 Au 颗粒表面等离子体共振频率随温度变化的关系;考虑周围环境介质的折射率色散及环境介质折射率随温度变化的情形下,理论计算研究了 Au 纳米颗粒的光学吸收特性及吸收特性的温度灵敏度,并得出了在特定条件温度下球形纳米颗粒光吸收的优化设计。

## 1 纳米颗粒介电函数的尺寸及温度修正

根据 Mie 理论,球形金属纳米材料的吸收效率、散射效率、消光效率和颗粒的尺寸、周围环境介质的折射率、金属纳米材料的介电函数有关.而颗粒的尺寸、周围环境折射率、金属纳米材料的介电函数都与温度有关.下面分别讨论这些因素与温度的关系。

### 1.1 金属纳米颗粒的介电函数的尺寸修正

对于体相金属材料,其介电函数包括自由电子和束缚电子的贡献,因此体相介电函数可表示为

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{ib}(\omega) + \epsilon_D(\omega) \quad (1)$$

式中, $\omega$  表示入射光波频率, $\epsilon_{ib}$  表示束缚电子带内跃迁对金属介电函数的贡献,是一个复数,可表示为

$$\epsilon_{ib}(\omega) = \epsilon_{ib1}(\omega) + i\epsilon_{ib2}(\omega) \quad (2)$$

$\epsilon_D(\omega)$  表示自由电子气的金属自由电子气的 Drude 模型,表示自由电子对介电函数的贡献,可表示为<sup>[14]</sup>

$$\epsilon_D = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma_{bulk}\omega} \quad (3)$$

$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi Ne^2}{m^*}}$  表示等离子体频率, $N$  为金属自由电子数密度, $e$  表示电子的电荷量, $m^*$  表示电子的有效质量; $\gamma$  表示衰减系数或碰撞频率,对于体相材料, $\gamma_{bulk} = v_f/l_\infty$ , $v_f$  是自由电子的费米速率, $l_\infty$  是自由电子平均自由程。

当颗粒的尺寸小于自由电子的平均自由程时,自由电子与颗粒表面的碰撞加强,自由电子的表面散射不可忽略,颗粒的有效平均自由程减小,碰撞频率增大.因此,当自由电子表面散射变得重要时,碰撞频率修正为<sup>[14-15]</sup>

$$\gamma = \gamma_{bulk} + A v_f / L_{eff} \quad (4)$$

式中, $A$  是无量纲参量, $L_{eff}$  是有效的自由电子平均自由程,对于球形颗粒,有效平均自由程  $L_{eff} = 4R/3$  及参量  $A = 1$ <sup>[16]</sup>.因此,纳米颗粒的介电函数,考虑尺寸对介电函数的修正时,金属纳米颗粒的介电函数可表示为

$$\epsilon_{r,nano}(\omega, L_{eff}) = \epsilon_{r,bulk}(\omega) + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega v_f / l_\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega(v_f / l_\infty + A v_f / L_{eff})} \quad (5)$$

### 1.2 金属纳米材料介电函数的温度修正

对于金属材料,温度变化时,由于金属材料的热效应,其体积和半径变化,导致纳米颗粒自由电子的密度变化,而金属的等离子体频率与电子数密度有关,因此,等离子体频率与温度有关.根据式(5),颗粒半径、等离子体频率等因素均是金属纳米材料介电函数的重要因素,因此温度会对纳米金属的介电函数产生影响.而颗粒半径的温度变化关系和材料的膨胀系数有关,因此,金属材料的温度膨胀系数是研究温度对介电函数影响的一个重要物理量.下面讨论纳米颗粒半径、等离子体频率以及介电函数随温度的变化关系。

#### 1.2.1 球形纳米颗粒的半径随温度变化关系

在不同的温度下,材料的膨胀系数不同,对于贵金属,如金和银,膨胀系数与温度的关系可表示为<sup>[17]</sup>

$$\beta(T) = \frac{192\rho k_b}{r_0\varphi(16\rho - 7Tk_b)^2} \quad (6)$$

$k_b$  为玻尔兹曼常量,对于贵金属 Au, Morse 势参量  $\rho = 0.4759 \text{ eV}$ 、 $\varphi = 15.830 \text{ nm}^{-1}$ 、 $r_0 = 0.30242 \text{ nm}$ .对于 Au 纳米球,根据膨胀系数与温度的关系式(6),可导出体积与温度的关系为

$$V(T) = V_0 \exp \left[ \frac{192\rho}{7r_0\varphi} \times \left( \frac{1}{16\rho - 7k_b T} - \frac{1}{16\rho - 7k_b T_0} \right) \right] \quad (7)$$

$V_0$  表示温度  $T_0$  下纳米球的体积.因此,球纳米颗粒半径随温度的变化关系可表示为

$$R(T) = R_0 \left\{ \exp \left[ \frac{192\rho}{7r_0\varphi} \times \left( \frac{1}{16\rho - 7k_b T} - \frac{1}{16\rho - 7k_b T_0} \right) \right] \right\}^{1/3} \quad (8)$$

#### 1.2.2 纳米颗粒的等离子体频率与温度的关系

因为金属的等离子体频率与该金属的自由电子数浓度有,当温度升高时,金属的体积膨胀变化,导致自

由电子数的浓度变化,结合式(7),金属的等离子体频率与温度的关系可表示为

$$\omega_p(T) = \omega_p(T_0) \exp \left[ \frac{96\rho}{7r_0\varphi} \times \left( \frac{1}{16\rho - 7k_b T} - \frac{1}{16\rho - 7k_b T_0} \right) \right] \quad (9)$$

### 1.2.3 纳米颗粒介电函数中的衰减系数与温度的关系

对于体相的金属材料,电子-声子散射率和温度有关,随着温度升高,声子数量增多,因此电子和声子之间的碰撞散射几率增大,因此碰撞频率和温度有关系. Drude 模型中的碰撞频率会随温度变化,其关系可表示为<sup>[17-19]</sup>

$$\gamma_{\text{bulk}}(T) = K' T^5 \int_0^{\theta/T} \frac{z^4 dz}{e^z - 1} \quad (10)$$

$\theta$  表示材料的 Debye 温度,对于金,Debye 温度  $\theta = 355 \text{ K}$ <sup>[20]</sup>,  $K'$  是一常量,可以通过常温下  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  时,已知  $\gamma_{\text{bulk}}$  的值反推计算  $K'$  的值. 常温  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  下,  $\gamma_{\text{bulk}}(T_0) = \frac{v_f}{l_\infty}$ ,  $l_\infty = 42 \text{ nm}$ <sup>[21]</sup>,  $v_f = 1.4 \times 10^6 \text{ m/s}$ <sup>[22]</sup>, 计算得到  $\gamma_{\text{bulk}} = 0.138125 \text{ eV}$ , 由此得出  $K' = 3.211 \times 10^{-12}$ .

金属纳米颗粒介电函数的衰减系数与体相衰减系数  $\gamma_\infty$  和有效平均自由程  $L_{\text{eff}}$  有关,而  $\gamma_\infty$  和  $L_{\text{eff}}$  均与温度有关,结合式(4)、式(8)及式(10),纳米颗粒衰减因子的温度和尺寸修正可表示为

$$\gamma(T) = \gamma_\infty(T) + A \frac{v_f}{L_{\text{eff}}(T)} \quad (11)$$

### 1.3 介电函数的温度修正

综合温度对半径、等离子体频率及衰减因子的影响,基于纳米颗粒介电函数尺寸修正的模型基础上,考虑自由电子对介电函数贡献的考虑温度修正,其修正结果可表示为

$$\epsilon(\omega, T) = \epsilon_{\text{bulk}}(\omega) + \frac{\omega_p^2(T)}{\omega^2 + i\omega\gamma_{\text{bulk}}(T)} - \frac{\omega_p^2(T)}{\omega^2 + i\omega[\gamma_{\text{bulk}}(T) + A v_f / L_{\text{eff}}(T)]} \quad (12)$$

式中  $\omega_p(T)$ 、 $\gamma_{\text{bulk}}(T)$  均由前面分析的(9)式和(10)式结果表示.

图 1(a)和(c)表明,在 532 nm 和 632.8 nm 的入射波长下,体相和半径为 20 nm 的 Au 介电函数实部,均

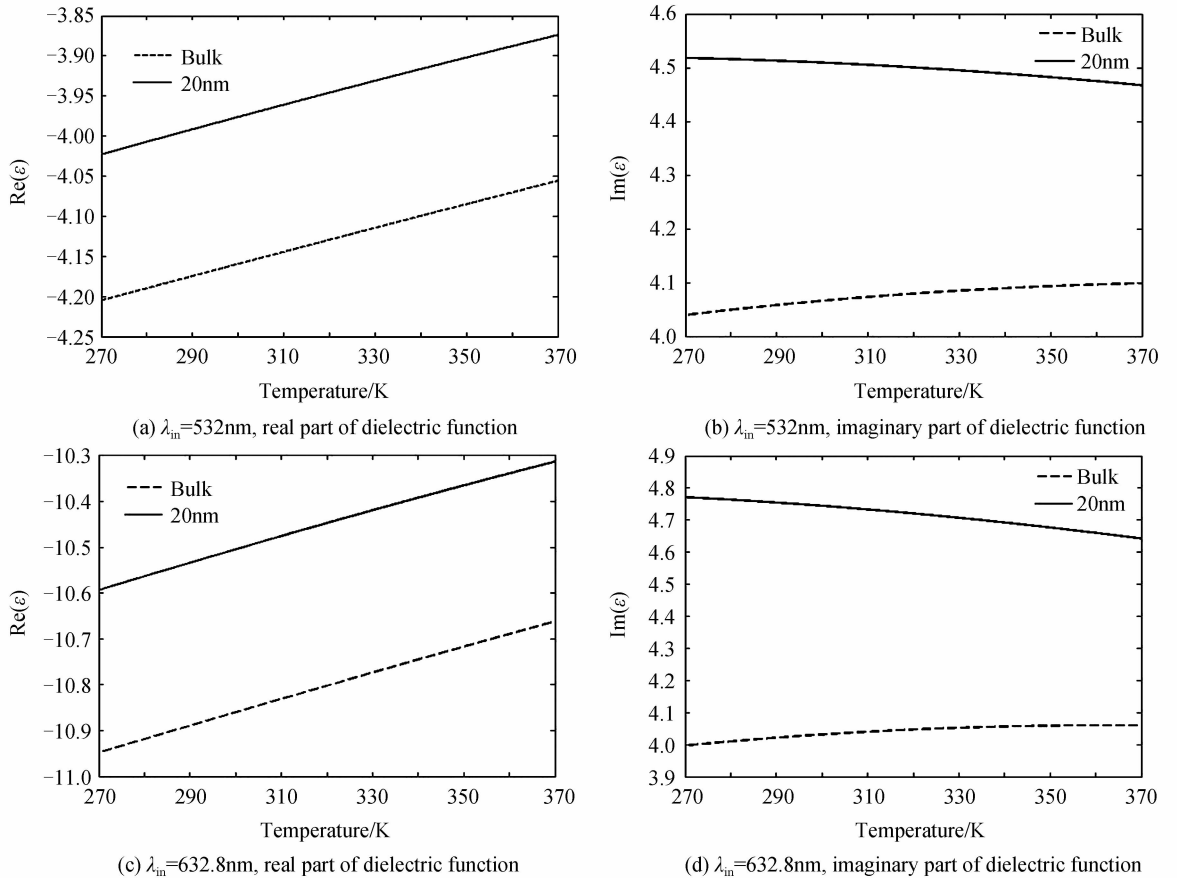


图 1 介电函数随温度的变化关系

Fig. 1 Relationship between dielectric function and temperature

随着温度升高而增大,而对于介电函数的虚部,图 1(b)、(d)所示,体相 Au 随温度升高介电函数虚部略微增大,而半径为 20 nm Au 介电函数虚部,随着温度的升高而减小,体相和纳米颗粒的介电函数虚部受温度影响表现出不同的变化规律,根据式(3)Drude 模型,实部  $\epsilon_{Dr} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}$ ,虚部  $\epsilon_{Di} = \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)}$ ,而介电函数的尺寸和温度修正均是基于 Drude 模型的基础上,当温度升高,纳米颗粒的半径增大,导致等离子体频率  $\omega_p$  减小,与此同时,温度升高,体相材料和纳米颗粒的碰撞频率均增大,所以体相和纳米颗粒的介电函数实部随温度升高而增大;但对介电函数的虚部,由于纳米颗粒的碰撞频率  $\gamma$  受温度及尺寸的双重影响,与等离子体频率  $\omega_p$  相比较,纳米颗粒的碰撞频率  $\gamma$  对介电函数的影响占据主导,所以纳米颗粒的介电函数虚部随温度升高而减小.此外,对于体相的 Au 材料,不同的波长下,介电函数的实部和虚部均是随温度的升高而增大的,理论计算的结果和参考文献[23]实验结果的变化规律是一致的.

## 2 等离子体共振频率随温度的变化

当纳米颗粒的介电函数实部  $\epsilon_1$  和其所处的周围介质环境的介电函数  $\epsilon_m$  满足

$$\epsilon_1 = -2\epsilon_m \quad (13)$$

此时,金属的局域表面等离子体产生共振,其共振频率为

$$\omega_{sp}(T) = \sqrt{\frac{\omega_p^2(T)}{1 + 2\epsilon_m(T) + \epsilon_{ib1}} - \gamma^2(T)} \quad (14)$$

式中,  $\epsilon_{ib1}$  是带内跃迁介电函数的实部. 下面讨论 Au 纳米颗粒在真空或水的环境中,温度变化时的等离子体共振频率特性. 体相的 Au 材料的介电函数采用文献[24]中的数据,由体相材料的介电函数,结合 Drude 模型,可以获得  $\epsilon_{ib1}$ .

由图 2 可以发现,对于纳米颗粒,真空中的等离子体共振频率大于水中的,即随着环境折射率增大,等离子体共振频率减小;对于同一种介质环境,随着温度升高, Au 的等离子体共振频率均减小. 对于真空和水中结果分析,因为真空不存在环境折射率随温度变化,但真空和水中等离子体共振频率均随温度减小. 因此,可分析出造成这种变化的主要原因不是环境折射率随温度变化规律导致的,主要原因是温度升高纳米颗粒的体积膨胀及温度对金属介电函数中碰撞频率的影响导致的结果.

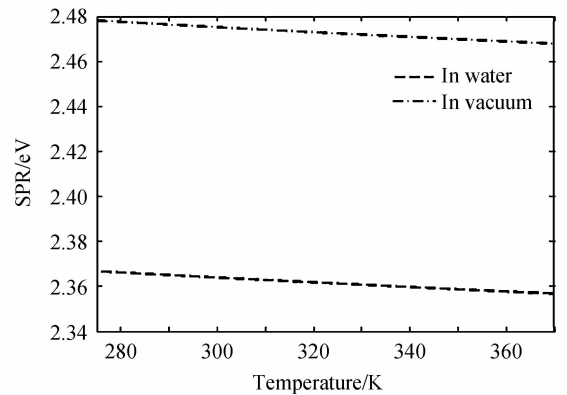


图 2 半径为 20 nm 的 Au 纳米球等离子体共振频率随温度的变化关系  
Fig. 2 The relationship between the resonance frequency and the temperature of Au nano spheres with a radius of 20 nm

## 3 Au 纳米颗粒的光吸收特性随温度的变化规律

### 3.1 真空环境中 Au 纳米颗粒的光吸收的温度特性

由于纳米颗粒的光学特性与材料的介电函数、纳米材料的尺寸、纳米材料周围环境的折射率等因素有关. 基于前面的分析,材料的介电函数、环境的折射率、颗粒的尺寸均与温度有关,因此温度对纳米颗粒的光学性质的影响是综合的.

常温下半径分别为 10 nm、20 nm、30 nm、40 nm 的球形 Au 纳米颗粒在真空环境中的吸收效率与温度的关系如图 3 所示,图 3(a)到(d)半径增大,峰值增大,峰位置红移;同一半径在不同的温度下,随着温度升高,吸收峰峰值增大,且吸收峰的位置红移,其主要原因是金属介电函数及颗粒半径随温度变化导致. 对比文献[18]中 Cu 纳米颗粒的研究中,随着温度升高,Cu 纳米颗粒的共振峰也有红移现象. 因此,在这一性质方面,贵金属纳米颗粒具有共同的变化规律.

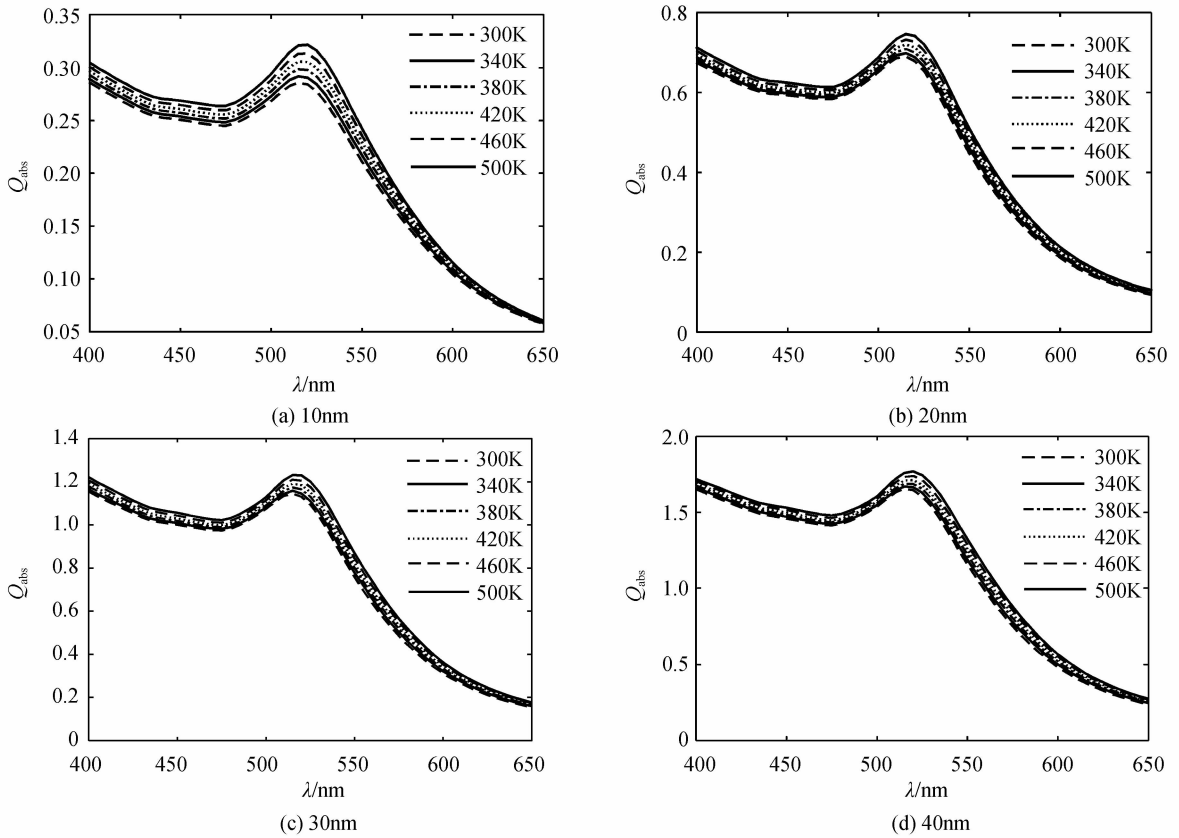


图 3 真空中 Au 纳米颗粒在不同温度下的吸收效率

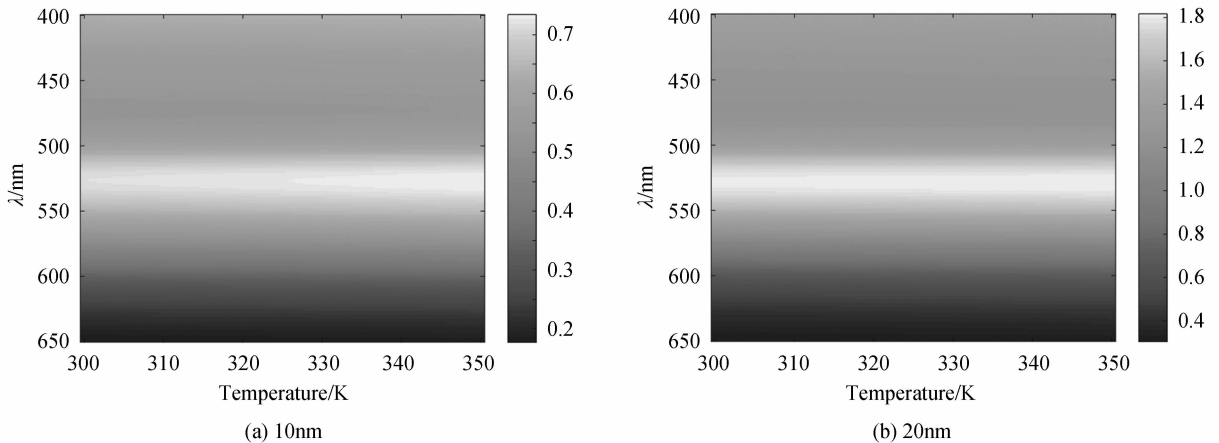
Fig. 3 Absorption efficiency of Au nanoparticles at different temperatures in vacuum

### 3.2 水中纳米颗粒光吸收的温度特性及温度灵敏度

考虑水的折射率色散关系及随温度的变化由于水的折射率随着温度变化而变化,计算中水的折射率随温度变化采用文献[25]的数据, Au 纳米颗粒在水中吸收效率与波长、温度的变化关系,如图 4 所示。

从图 4 可以发现, Au 球形纳米颗粒在 500~550 nm 区间有一相对较强的吸收带,随着颗粒半径的增大,吸收带红移,吸收带的带宽增大;在吸收带区间内,吸收效率随着颗粒半径增大而增大。

图 5 计算分析了水的环境介质中不同颗粒半径的吸收效率随温度的关系及吸收效率的温度灵敏度. 计算结果图 5(a)表明,当纳米颗粒的有效平均自由程接近体相材料电子的平均自由程时,吸收效率随温度升高而减小,温度升高纳米颗粒的体积膨胀,体积的增大,等离子体频率减小,而介电函数中的碰撞频率受颗粒尺寸的影响较小,因此表现出吸收效率随温度升高减小;当颗粒电子的有效平均自由程小于体相的电子平均自由程时,吸收效率随温度升高而增大,此时纳米颗粒介电函数的碰撞频率受尺寸及温度的约束,表现出吸收效率随温度升高而增大的现象. 纳米颗粒的吸收效率的温度灵敏度可定义为  $S=dQ_{abs}/dT$ ,从图 5(b)



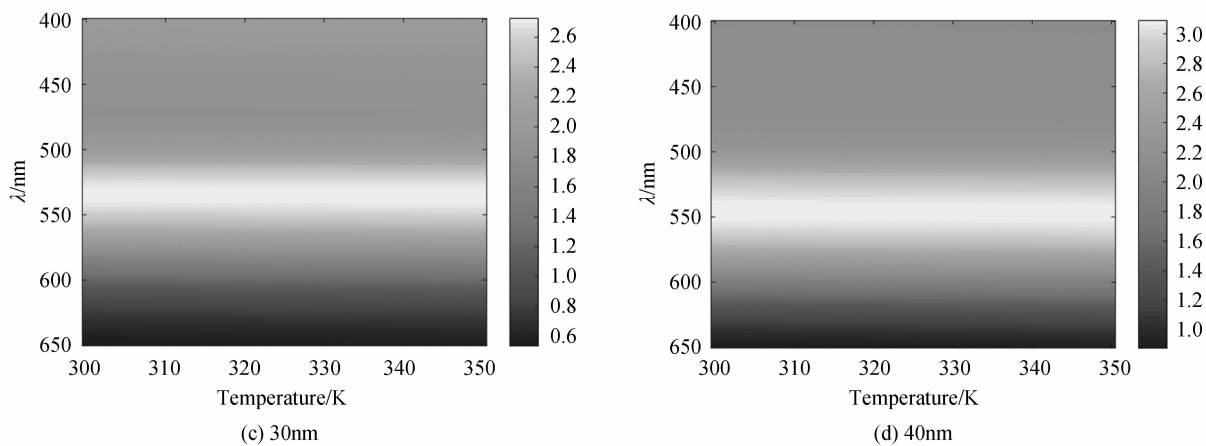
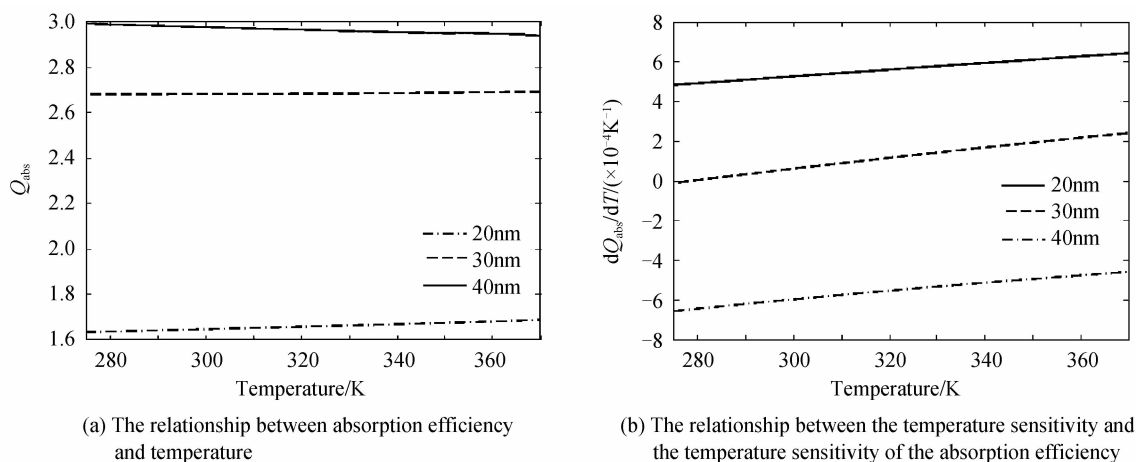


图4 Au不同温度及波长下水中的吸收效率

Fig. 4 Absorption efficiency of Au with different temperature and wavelengths

可以发现,不同的粒径吸收效率对温度的灵敏度不同,颗粒尺寸小的对温度的灵敏度高,此外,随温度升高,纳米颗粒的吸收效率温度灵敏度  $S$  增大。



(a) The relationship between absorption efficiency and temperature

(b) The relationship between the temperature sensitivity and the temperature sensitivity of the absorption efficiency

图5 入射波长为 532 nm,环境介质为水中

Fig. 5 The incident wavelength is 532 nm, and the environment medium is water

### 3.3 特定温度条件下金纳米颗粒的吸收优化设计

光热治疗局部环境温度一般在  $42^{\circ}\text{C}$  ( $315\text{K}$ ),能有效杀死癌细胞.在此温度条件下,我们对水介质环境中纳米 Au 球进行优化设计,半径在  $10\sim 100\text{ nm}$  之间,计算时环境介质水的折射率不同波长在  $42^{\circ}\text{C}$  取值参照文献[25],金属材料的介电函数考虑到温度及尺寸修正因素,计算结果获得最佳的光吸收效果.如图 6 所示,粒径在  $30\sim 50\text{ nm}$ ,入射波长在  $520\sim 570\text{ nm}$  之间,有一相对较强的吸收区,且粒径为  $40\text{ nm}$  的 Au 纳米颗粒在入射光波为  $547.4\text{ nm}$  的波长下,获得了最佳的吸收效率。

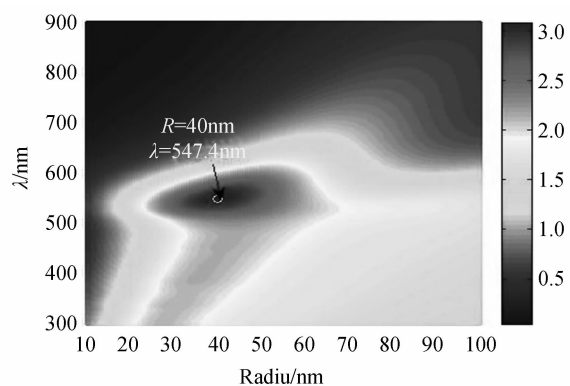


图6 温度为 315 K 吸收效率

Fig. 6 Absorption efficiency at the temperature of 315 K

## 4 结论

对比分析了体相材料和纳米材料介电函数随温度的变化规律,体相和纳米 Au 金属介电函数实部随着温度升高而增大,而虚部表现出不同的温度变换规律,体相材料虚部随温度升高而增大,  $20\text{ nm}$  的 Au 纳米球,虚部随温度升高而减小;考虑环境介质折射率的色散及折射率随温度变化关系,计算了温度变化环境中

球形 Au 颗粒的光学性质,温度升高,纳米颗粒的吸收峰峰值增大,对 10~100 nm 的 Au 纳米颗粒吸收效率的温度灵敏度分析表明,粒径小的纳米颗粒有较大的吸收效率温度灵敏度,吸收效率温度灵敏度随粒径增大而减小;在温度为 315 K 的温度下,优化设计得到粒径为 40 nm 的金纳米在入射波长为 547.4 nm 获得最佳的吸收效率. 温度变化环境中贵金属纳米颗粒的光学性质研究,在光热治疗、温度传感等方面具有重要的应用.

### 参考文献

- [1] SUN Chen, LI Chuan-hao, SHI Rui-ying, *et al.* A study of influences of metal nanoparticles on absorbing efficiency of organic cells[J]. *Acta Photonica sinica*, 2012, **41**(11): 1335-1341.  
孙晨, 李传皓, 石瑞英, 等. 金属纳米颗粒对有机太阳能电池光吸收效率影响的研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(11): 1335-1341.
- [2] SUN G, KHURGIN J B. Origin of giant difference between fluorescence, resonance, and nonresonance Raman scattering enhancement by surface plasmons[J]. *Physical Review A*, 2012, **85**(6): 0634101-0634108
- [3] ATWATER H A, POLMAN A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[J]. *Nature Materials*, 2010, **9**(3): 205-213.
- [4] ALEXANDRE A, LEI D Y. Plasmonic light-harvesting devices over the whole visible spectrum[J]. *Nano Letter*, 2010, **10**(7): 2574-2579.
- [5] TUERSUN P, HAN X E. Optimal design of gold nanoshells for optical imaging and photothermal therapy[J]. *Optik*, 2014, **125**(14): 3702-3706.
- [6] CAI Ceng, HUANG Zhu-qing, CAO Xiao-ling, *et al.* Application of laser backscattering method in wet steam measurement[J]. *Laser Technology*, 2014, **38**(3): 398-401.  
蔡成, 黄竹青, 曹小玲, 等. 激光后向散射法在测量湿蒸气中的应用研究[J]. 激光技术, 2014, **38**(3): 398-401.
- [7] GOVYADINOV A A, PANASYUK G Y, SCHOTLAND J C, *et al.* Theoretical and numerical investigation of the size-dependent optical effects in metal nanoparticles[J]. *Physical Review B*, 2011, **84**(15): 155461 1-12.
- [8] YANG Yi-feng, YANG Hui, ZHENG Gang, *et al.* Backscattering spectroscopy for sizing spherical sub-micron particles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1652-1656.  
杨依枫, 杨晖, 郑刚, 等. 用于亚微米颗粒测量的后向散射光谱法[J]. 光子学报, 2011, **40**(11): 1652-1656.
- [9] GUO Yong-cai, ZHANG Xiao-ming. Modeling and simulation of light scattering information of blood cell in fluid flow[J]. *Laser Technology*, 2013, **37**(4): 487-492.  
郭永彩, 张小明. 流体中红细胞光散射信息的建模与仿真[J]. 激光技术, 2013, **37**(4): 487-492.
- [10] BANSAL A, SEKHON J S, VERMA S S. Scattering efficiency and LSPR tunability of bimetallic Ag, Au, and Cu nanoparticles[J]. *Plasmonics*, 2014, **9**(1): 143-150.
- [11] ZHOU J, LU Z, ZHU X, *et al.* NIR photothermal therapy using polyaniline nanoparticles[J]. *Biomaterials*, 2013, **34**(37): 9584-9592.
- [12] KIRUI D K, KRISHNAN S, STRICKLAND A D, *et al.* PAA-derived gold nanorods for cellular targeting and photothermal therapy[J]. *Macromolecular Bioscience*, 2011, **11**(6): 779-88.
- [13] LI J L, GU M. Gold-nanoparticle-enhanced cancer photothermal therapy[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, **16**(4): 989-996.
- [14] BOHREN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. Wiley, 1983.
- [15] MOROZ A. Electron mean-free path in metal-coated nanowires[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, **28**(5): 1130-1138.
- [16] CORONADO E A, SCHATZ G C. Surface plasmon broadening for arbitrary shape nanoparticles: A geometrical probability approach[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2003, **119**(7): 3926-3934.
- [17] YESHCHENKO O A, BONDARCHUK I S, GURIN V S, *et al.* Temperature dependence of the surface plasmon resonance in gold nanoparticles[J]. *Surface Science*, 2013, **608**(5): 275-281.
- [18] YESHCHENKO O A. Temperature effects on the surface plasmon resonance in copper nanoparticles[J]. *Ukrainian Journal of Physics*, 2013, **58**(3): 251.
- [19] YESHCHENKO O A, DMITRUK I M, ALEXEENKO A A, *et al.* Size and temperature effects on the surface plasmon resonance in silver nanoparticles[J]. *Plasmonics*, 2012, **7**(3): 685-694.
- [20] KITTEL C. Introduction to solid state physics[M]. Wiley, New York, 2005.
- [21] RAKIC A D, DJURISIC A B, ELAZAR J M, *et al.* Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(22): 5271-5283.
- [22] ASHCROFT N W, MERMIN N D. Solid state physics[M]. Orlando: Harcourt, 1976.
- [23] CHEN Y J, LEE M C, WANG C M. Dielectric function dependence on temperature for Au and Ag[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, **53**(8S2): 1-3.
- [24] JOHNSON P B. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, **6**(12): 4370-4379.
- [25] THORMÄHLEN I, STRAUB J, GRIGULL U. Refractive index of water and its dependence on wavelength, temperature, and density[J]. *Journal of Physical & Chemical Reference Data*, 1985, **14**(4): 933-945.