

金微纳阵列表面等离子激元中红外波段光谱特性

司纪宗¹, 刘艳红², 孙 诚^{1,3*}

1. 大连大学物理科学与技术学院, 辽宁 大连 116622
2. 大连大学旅游学院, 辽宁 大连 116622
3. 辽宁省光电信息技术工程实验室, 辽宁 大连 116622

摘 要 表面等离子激元是金属表面自由电子在入射光激发下产生的电子集体振荡行为及其相应的电磁场分布。目前,金微纳颗粒表面等离子激元除了在可见光波段内被大量研究和应用外,在中红外波段内也显示出独特的光谱特性,具备设计生产优良传感器的潜力,因而同样备受瞩目。研究表明,在中红外波段内设计表面等离子激元传感器的关键问题在于如何有效地调节共振谱的共振波长、峰值吸收率以及半峰宽等主要特征参数。相比于单个微纳颗粒而言,阵列结构由于拥有良好的周期性,从而能够在上述参数的宽光谱调节方面具有独特的优势。基于此,提出一种基于金微纳颗粒组成的阵列结构,利用时域有限差分方法,在4~18 μm 波段范围内,通过分别改变该阵列的结构参数,包括颗粒半径、高度、间距及颗粒形状等,系统地研究了该微纳阵列结构在中红外波段对入射光的反射光谱、透射光谱和吸收光谱等特性的影响。研究发现,在8~10 μm 光谱内,入射光能够与其所激发的金微纳阵列表面等离子激元产生共振效应,表现出明显的共振峰特性。可以通过分别改变上述结构参数来有效调节吸收率谱线共振峰的共振波长、峰值吸收率和半峰宽等主要特征参数。研究结果对中红外光谱内基于金微纳阵列结构传感器的科学研究和实际设计具有独特的理论应用价值。

关键词 中红外;金微纳颗粒;时域有限差分;表面等离子激元

中图分类号: O433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)01-0087-09

引 言

金属表面的自由电子和光子相互作用时会产生自由电子的集体振荡,该电子集体振荡行为及其电磁场,能够形成具有特定能量和振荡频率的表面等离子激元(surface plasmons, SPs)。当表面等离子激元振荡频率和入射光频率相同时会产生共振效应,在这种共振效应下,入射光子和表面等离子激元被有效耦合,能量和动量会在两者之间高效转移,形成一种特殊的电磁场特性,这种现象被称为表面等离子激元共振(surface plasmons resonance, SPR)。近年来,随着微纳工艺技术和仿真计算方法的发展,人们对表面等离子激元机理和应用的研究逐步深入,且在表面拉曼增强、亚波长光学、传感器件、数据存储、新型光源、光子器件、显微镜和生物医学等领域展现出重要的应用前景^[1-2]。由于被激发的表面等离子激元存

在于金属表面,所以合理设计金属表面结构能够有效调节表面等离子激元能量和动量的输运行为,使其成为一种在特定波段内控制电磁波传播特性的有效手段,该手段目前已在生物物理传感器、光学滤波器、光学镊子以及光纤交换开关等器件的设计中得到广泛应用^[3]。

迄今为止,人们已经发现一些贵金属(如金和银等)微纳结构在可见光波段具有良好的表面等离子激元性质,尤其在可见光波段的太阳能电池应用中,人们在实验和理论两方面都对其表面等离子激元开展了深入的研究工作。例如,在太阳能电池表面上设计银微纳结构,利用其在可见光波段的陷光效应来提高电池光电流^[4-6]。通过优化贵金属微纳阵列周期和尺寸,来大幅提高太阳能电池在可见光波段的光转换效率^[7]。此外,太阳能电池在可见光波段的陷光效率在各种贵金属微纳结构参数条件下相应的变化规律也已被系统报道^[8-11]。

收稿日期:2017-12-07, 修订日期:2018-04-18

基金项目:国家自然科学基金项目(31400718),辽宁省自然科学基金项目(20170540044),辽宁省“百千万人才工程”项目(辽百千万立项【2017】5号),辽宁省高等学校创新人才支持计划项目(LR2016046),大连市支持高层次人才创新创业项目(2016RQ075)资助

作者简介:司纪宗,1994年生,大连大学物理科学与技术学院硕士研究生 e-mail:915984137@qq.com

* 通讯联系人 e-mail:suncheng@dlu.edu.cn

除可见光波段外,由于中红外波段能够为光电传感器设计提供优良的光谱平台,近年来,国内外学者针对贵金属微纳结构表面等离子激元在中红外波段内的光谱性质也已开展一定程度的研究。例如,国内湖南大学的王玲玲团队系统研究了基于银纳米带中红外波段表面等离子激元的石墨烯对耦合谐振器的性质^[12]。国际上,Kusa等报道了金纳米棒表面等离子激元在中红外波段内的光谱响应性质^[13]。目前为止,在表面等离子激元传感器的设计研究中,如何通过合理设计贵金属的微纳结构,从而有效调节其共振谱的共振波长、峰值吸收率及半峰宽等主要特征参数,仍然是该领域内的一个重要问题,需要进行深入研究。然而,在已有的针对中红外波段内贵金属的报道中,研究工作主要集中在单个微纳颗粒的性质方面,而有关表面等离子激元在波长调节及宽光谱等方面的研究均显一定的限制和不足。由于具有良好的周期性,由多个颗粒构成的阵列结构则在上述性质调节方面展现出独特的优势。设计了一种基于金微纳颗粒的阵列结构,利用时域有限差分方法,在 $4\sim 18\ \mu\text{m}$ 波段内,通过分别改变该阵列的主要参数,系统研究其表面等离子激元在中红外波段内的光谱性

质,这对在中红外光谱内基于金微纳阵列结构传感器的实际设计具有独特的理论价值。

1 模拟计算方法

时域有限差分方法(FDTD)是对麦克斯韦方程组的一种差分表示,主要用来解决电磁波在电磁介质中传播和反射问题。利用基于时域有限差分方法的FDTD Solutions软件^[14],针对所提出的金微纳阵列结构(如图1所示)计算完成。图1(a)中,入射光电场分量沿 x 方向偏振。在计算中, x 和 y 方向上均使用周期性边界条件,用来模拟实际阵列的无限延伸性。 z 方向上使用完全匹配层(PML)边界条件。入射光的波长范围为 $4\sim 18\ \mu\text{m}$ 。此外,在光源上方和 SiO_2 介质中分别放置 x - y 平面监视器,用来分别获得入射光的反射率和透射率谱线(出于简洁,没有在图1中给出)。本工作实际计算中的网格为 $10\ \text{nm}$,以确保所有计算中的网格选取均小于最短波长的 $1/10$,从而避免由该模拟方法引起的误差。

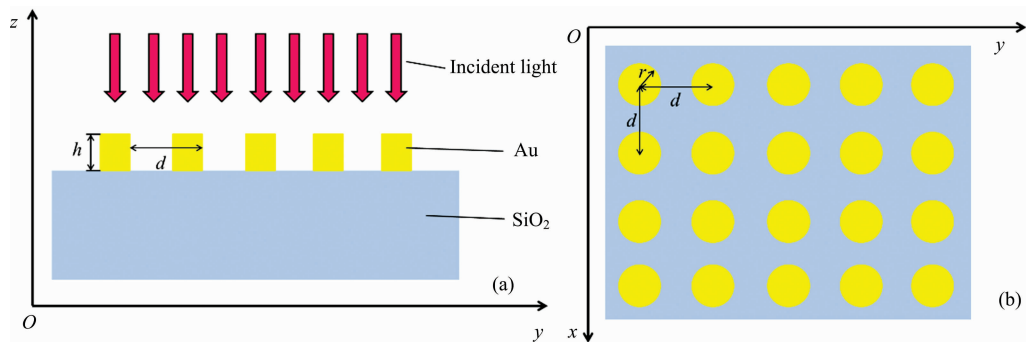


图1 以 SiO_2 为基底的金微纳阵列结构图

(a): 侧视图; (b): 俯视图

图中: h 为颗粒高度, d 为相邻颗粒间距, r 为圆柱体颗粒半径;平面波入射光沿 z 轴负方向垂直入射;金微纳颗粒在 x - y 平面内等间距周期排列,形成无限阵列;在 x 方向和 y 方向上,相邻颗粒间距均为 d

Fig. 1 Structure of a gold micro-nano array on a SiO_2 substrate

(a): Cross section; (b): Top view

h : the height of particles, d : the distance between adjacent particles, r : the radius of the cylinders; A plane-wave light is normally incident along the $-z$ axis; The gold particles are evenly distributed in the x - y plane, forming an infinite array; Both distances between adjacent particles along the x axis and y axis are d

2 结果与讨论

首先,采用金圆柱体颗粒组成的阵列结构作为研究对象,分别改变其颗粒半径、高度和间距,研究该阵列结构表面等离子激元在中红外波段的光谱特性。图2中分别给出了两组固定间距和高度组合时,不同半径下金微纳阵列对入射光的反射率谱线。

首先,从图2(a)和(b)中均可看到,随着半径逐渐增大,反射率谱线的基线逐渐升高。直至极端情况下,如图2(a)中 $r=500\ \text{nm}$ 和图2(b)中 $r=1\ 000\ \text{nm}$ 时(即对应着金颗粒几乎铺满整个 x - y 平面的情形),反射率谱线在整个波长范围内均接近于1。当半径小于间距一半时,图2中观察到的基

线随半径增大而升高的原因,主要是由于在入射光平面内,金颗粒横截面积随半径增大而增加,导致其组成阵列对入射光的反射在整个波段内逐渐增大。此外,观察图2还可发现,当入射光波长在 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 范围内时,该阵列对光的反射相较于其他波长产生了更为明显的变化。比如图2(a)中 $r=60\ \text{nm}$ 的谱线在 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 内出现一个峰值,而 $r=450\ \text{nm}$ 的谱线则出现一个谷值。众所周知,贵金属微纳颗粒在入射光的激发下,会在其表面产生自由电子的集体振荡,与其相应的电磁场形成表面等离子激元。该激元在合适条件下会与入射光产生共振,与入射光有效地转移能量和动量。图2中观察到反射率在 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 波段内急剧变化的现象,很可能是入射光与其激发的金阵列表面等离子激元共振时的一种外在表现。值得注意的是,该谱线呈现了一种非对称的线型,有可能是

一种 Fano 谱线，即可能存在不同模式间的相互作用。为了更好地理解该体系的模式特性，比如是否有高阶模式存在等，

进一步计算了共振时的电场分布特性，由图 3 中给出。

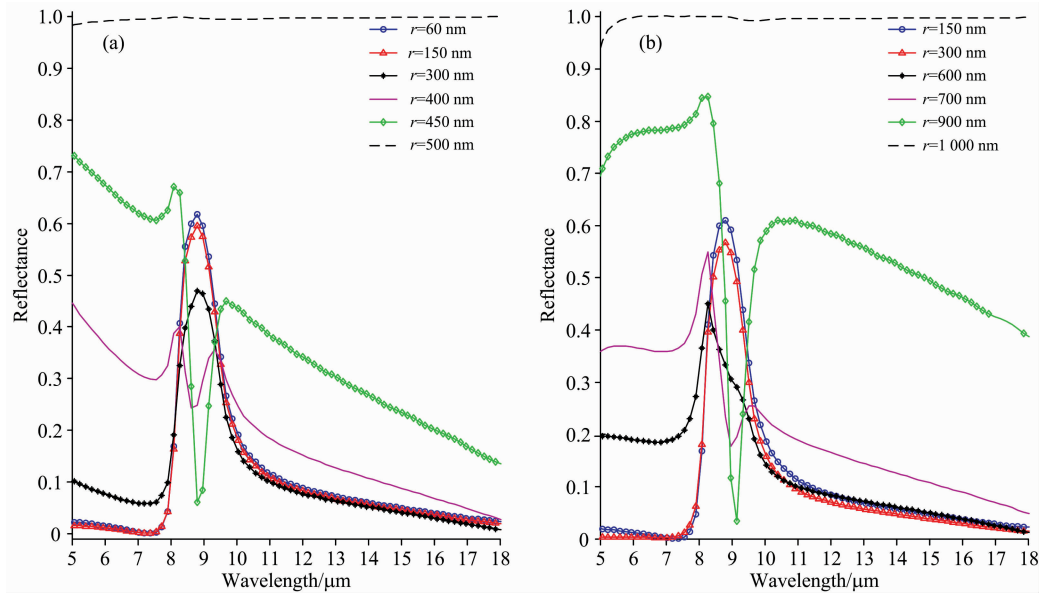


图 2 不同颗粒半径下的反射率谱线

金圆柱体的颗粒间距和颗粒高度分别固定为：(a) $d=1\ 000\ \text{nm}$, $h=500\ \text{nm}$ ；(b) $d=2\ 000\ \text{nm}$, $h=1\ 000\ \text{nm}$

Fig. 2 Reflectance spectra with a variety of gold particle radii

The interparticle distance and the particle height of the gold cylinders are fixed to be:

(a) $d=1\ 000\ \text{nm}$, $h=500\ \text{nm}$ ；(b) $d=2\ 000\ \text{nm}$, $h=1\ 000\ \text{nm}$

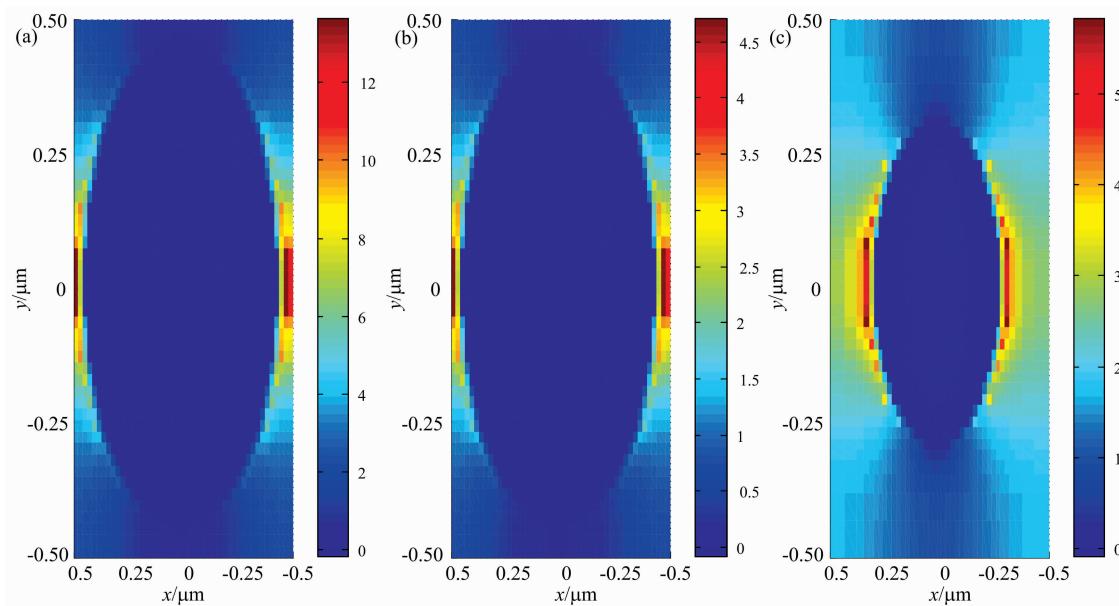


图 3 对应图 2(a)中 $r=450$ 和 $300\ \text{nm}$ 时，在金微纳颗粒上表面(即 $h=500\ \text{nm}$)处，入射光平面内沿偏振方向电场分量(E_x)分布图

(a)和(b)分别对应 $r=450\ \text{nm}$ 共振时波谷($\lambda=8.9\ \mu\text{m}$)和波峰($\lambda=8.2\ \mu\text{m}$)处的电场分布；

(c)对应 $r=300\ \text{nm}$ 共振时波峰($\lambda=8.8\ \mu\text{m}$)处的电场分布

Fig. 3 Distributions of electric-fields (E_x) along the polarization of the incident light in the x - y plane, at the top surface of the gold micro-nano particles (i. e., $h=500\ \text{nm}$), under the conditions of $r=450\ \text{nm}$ and $r=300\ \text{nm}$ in Fig. 2

(a) $\lambda=8.9\ \mu\text{m}$ for $r=450\ \text{nm}$ ；(b) $\lambda=8.2\ \mu\text{m}$ for $r=450\ \text{nm}$ ；(c) $\lambda=8.8\ \mu\text{m}$ for $r=300\ \text{nm}$

比较图 3(a), (b)和(c)可知, 在不同结构参数下发生表面等离子共振时, 入射光偏振方向上均只有偶极模式存在, 没有出现高阶模式, 即不存在不同模式间的相互作用。因此, 图 2 中谱线的产生机制主要是由入射光与其激发的金

微纳阵列表面等离子激元之间的共振效应。为了深入研究该表面等离子激元共振效应对入射光在中红外波段的影响, 进一步对入射光的透射率谱线进行了研究, 具体结果如图 4 所示。

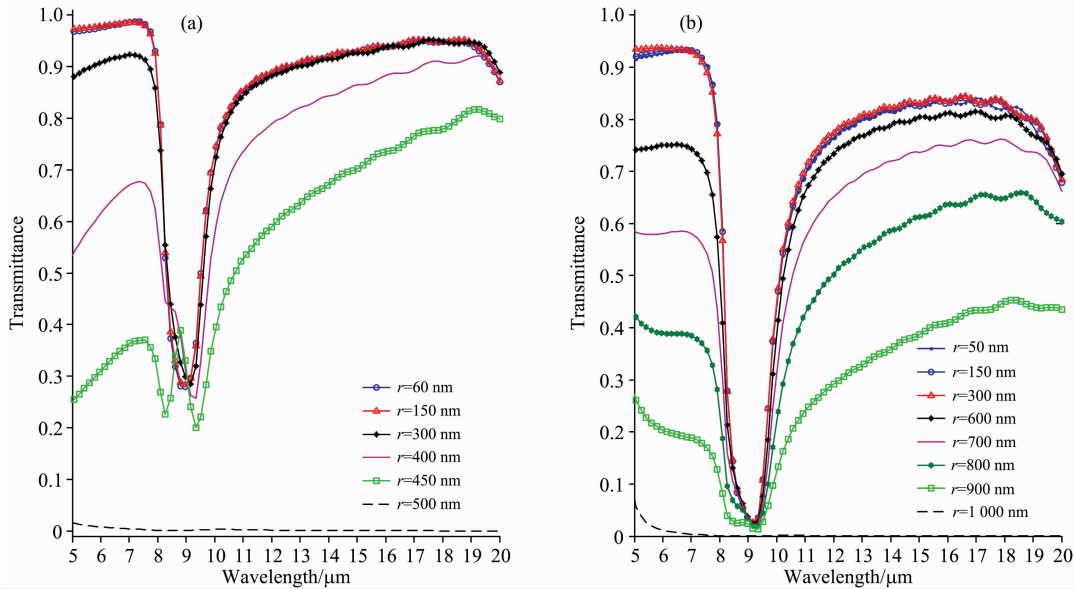


图 4 不同颗粒半径下的透射率谱线

金圆柱体的颗粒间距和颗粒高度分别固定为: (a) $d=1000$ nm, $h=500$ nm; (b) $d=2000$ nm, $h=1000$ nm

Fig. 4 Transmittance spectra with a variety of gold particle radii

The interparticle distance and the particle height of the gold cylinders are fixed to be:

(a) $d=1000$ nm, $h=500$ nm; (b) $d=2000$ nm, $h=1000$ nm

观察图 4(a)和(b)可知, 首先, 随着半径增大, 透射率谱线在整个波段内整体逐渐减小。当半径增大到能使其组成的阵列几乎铺满整个 $x-y$ 平面时[即图 4(a)中 $r=500$ nm 和图 4(b)中 $r=1000$ nm], 透射率几乎为 0。这一现象与图 2 中观察到的反射率谱线随半径增大而增加的规律相一致, 均是由金颗粒横截面积在入射光平面内随其半径增大而增加的原因所造成的。其次, 类似于图 2 中观察到的现象, 图 4 中透射率谱线在 $8\sim 10$ μm 波段内也观察到相较于其他波段的明显变化。比如, 图 4(a)中 $r=60$ nm 和图 4(b)中 $r=50$ nm 所对应谱线分别呈现出一个谷值。这一现象产生的原因与图 2 中讨论相一致, 是入射光在 $8\sim 10$ μm 波段内, 与其激发出的金阵列表面等离子激元产生共振, 在透射率谱线上的外在表现。仔细比较图 4(a)和(b)还可发现, 对于大部分半径而言, 当阵列中颗粒间距和半径较大时[即图 4(b)对应情形], 其共振产生的谷值较低, 例如, 图 4(b)中 $r=50$ nm 曲线的最小值测量为 0.02。而当间距和半径固定为较小值时[即图 4(a)情形], 该谱线谷值较高, 即图 4(a)中 $r=60$ nm 的最小值测得为 0.26。这一现象表明, 较大的颗粒间距和半径能够产生更加明显的表面等离子激元共振效应。

此外, 在图 2 和图 4 中, 还观察到随颗粒半径的改变, 反射率(R)和透射率(T)谱线给出峰值或谷值的波长位置以及峰宽度也发生相应变化。为了明确该变化规律, 通过计算整个波段范围内的吸收率谱线, 来进一步加以研究。吸收率

谱线由式(1)计算给出, 具体结果如图 5 所示。

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda) \quad (1)$$

其中, $R(\lambda)$ 和 $T(\lambda)$ 分别为入射光波长为 λ 时对应的反射率和透射率。

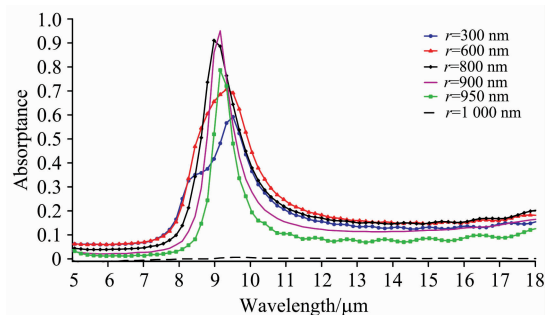


图 5 不同半径时的吸收率谱线

金圆柱体的颗粒间距和高度分别固定为 $d=2000$ nm 和 $h=1000$ nm

Fig. 5 Absorbance spectra with a variety of gold particle radii

The interparticle distance and the particle height of the gold cylinders are fixed to be $d=2000$ nm and $h=1000$ nm

图 5 给出的吸收率谱线清晰地表明, 在由不同半径金颗粒组成的阵列中, 由于表面等离子激元共振的存在, 在 $8\sim 10$ μm 波段内, 均出现一个明显的共振吸收峰, 且该吸收峰的峰值波长、峰值吸收率和半峰宽等参数均随颗粒半径的改变而

发生变化。通过测量上述吸收峰的三个主要参数(在表 1 中列出),进一步给出了金颗粒半径大小变化情况下,其表面等离激元共振效应在中红外波段对入射光吸收率谱线的影响。

表 1 图 5 中不同颗粒半径下吸收率谱线共振峰的波长位置、峰值吸收率和半峰宽

Table 1 The resonance wavelength, peak intensity, and full width at half maximum intensity (FWHM) of the resonance peak of the absorptance spectra shown in Fig. 5, with a number of gold particle radii

Radius /nm	Resonance wavelength/ μm	Absorptance peak intensity	FWHM / μm
300	9.5	0.60	2.10
600	9.3	0.71	2.03
800	9.0	0.91	1.29
900	9.2	0.95	0.85
950	9.2	0.79	0.72

由表 1 可知,当金颗粒半径从 300 nm 逐渐增大到 950 nm 时,吸收率谱线的共振峰波长先减小后增大,而对应的峰值吸收率则是先增大后减小。此外,该共振峰的半峰宽随半径增大而逐渐减小。此现象可被用于中红外波段设计光电传感器件,基于图 5 和表 1 给出的结果,金颗粒半径可作为一个有效调节参数,用来改变该器件的峰值吸收率及半峰宽,从而优化工作效率。

上文讨论了设计的金圆柱体颗粒组成的阵列结构中,固定颗粒间距和高度,改变半径的条件下,入射光在 5~18 μm

波段内反射率、透射率和吸收率谱线的变化规律。下文进一步研究了固定间距和半径,逐渐改变高度时,该阵列结构对入射光在中红外波段内的影响,其结果由图 6 给出。

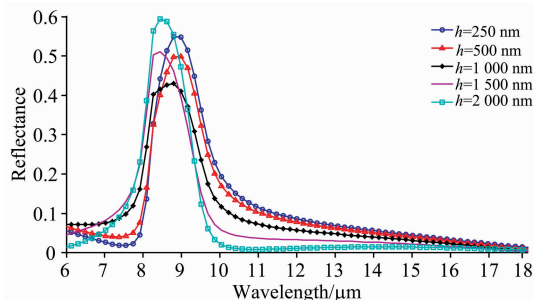


图 6 不同高度下的反射率谱线

金圆柱体的颗粒间距和半径分别固定为 $d=2000\text{ nm}$ 和 $r=500\text{ nm}$
Fig. 6 Reflectance spectra with a number of gold particle heights
The interparticle distance and the particle radius of the gold cylinders are fixed to be $d=2000\text{ nm}$ and $r=500\text{ nm}$

观察图 6 不难发现,对于不同高度的反射率谱线在 8~10 μm 波段内均展现出一个共振峰,这与前文讨论的表面等离激元共振效应相一致。与图 2 中改变半径时反射率谱线既有峰值也有谷值的特性不完全相同的是,在图 6 中,当高度从 250 nm 逐渐增大到 2000 nm,反射率谱线共振一直呈现为峰值特性。这一峰值特性及其基线随高度变化不大的现象,均是由于当仅改变高度时,在入射光平面内金颗粒的横截面积由于其半径固定而没有发生变化,从而使入射光激发的表面等离激元对颗粒高度的变化不十分敏感,在图 6 的反射率谱线上表现为虽有变化但变化不大的特征。为了研究高

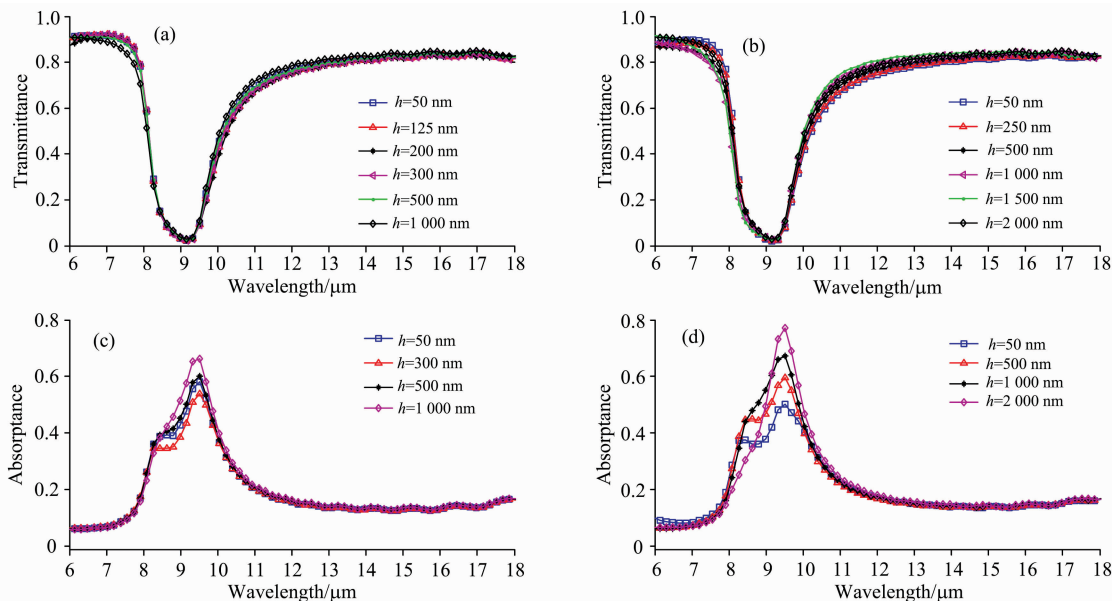


图 7 不同颗粒高度下的 (a) 和 (b) 透射率谱线,以及 (c) 和 (d) 吸收率谱线

金圆柱体的颗粒间距和半径分别固定为 (a) 和 (c) $d=1000\text{ nm}$, $r=250\text{ nm}$,
以及 (b) 和 (d) $d=2000\text{ nm}$, $r=500\text{ nm}$

Fig. 7 (a) and (b) Transmittance spectra, as well as (c) and (d) absorptance spectra with a number of gold particle heights

The interparticle distance and the particle radius of the gold cylinders are fixed to be:
(a) and (c) $d=1000\text{ nm}$, $r=250\text{ nm}$, as well as; (b) and (d) $d=2000\text{ nm}$, $r=500\text{ nm}$

度对共振峰的影响规律, 计算了两组不同颗粒间距和半径组合情况下, 入射光的透射率谱线随高度的变化, 同时依据式(1)给出了相应的吸收率谱线, 具体结果在图 7(a)–(d)中分别给出。

首先, 由图 7(a)和(b)可见, 在不同高度下, 透射率谱线均呈现出共振峰特性, 这与反射率谱线(图 6)给出的结果相一致。此外, 通过对不同高度的结果相比较后不难发现, 透射率谱线[图 7(a)]在整个波段内随高度改变没有明显变化。这一结果也与前文对于图 6 中反射率谱线随高度变化不大的现象相类似, 都是由于仅改变高度对表面等离子共振效应影响不大的原因所造成的。而相比于反射率(图 6), 透射率对高度的改变更不敏感。

其次, 从图 7(c)和(d)中, 可以得到金阵列在不同高度

下对红外波段入射光吸收率谱线的影响结果。通过观察上述吸收率谱线相对应的共振峰波长、峰值吸收率以及半峰宽的测量结果(由表 2 给出), 在两组固定间距和半径组合情况下, 对不同的高度, 共振峰的波长没有变化, 均为 $\lambda = 9.5 \mu\text{m}$ 。此外, 随着高度逐渐增大, 峰值吸收率均逐渐增大, 同时半峰宽逐渐减小。由图 7(c)和(d)以及结合表 2 可以看到, 在设计的金微纳圆柱体颗粒组成的阵列结构中, 颗粒高度可以作为一种在保持共振波长不变的前提下, 用来调节实际光电传感器峰值吸收率和半峰宽的主要结构参数。

在上述改变半径和高度的研究基础上, 下面通过改变颗粒间距, 进一步研究了间距对中红外光谱的影响, 具体结果由图 8 给出。

表 2 图 7(c)和(d)中不同颗粒高度下吸收率谱线共振峰的波长位置、峰值吸收率和半峰宽

Table 2 The resonance wavelength, peak intensity, and FWHM of the resonance peak in the absorptance spectra shown in Fig. 7(c) and Fig. 7(d), with different gold particle heights

$d=1\ 000\ \text{nm}, r=250\ \text{nm}$				$d=2\ 000\ \text{nm}, r=500\ \text{nm}$			
Height /nm	Resonance Wavelength/ μm	Absorptance peak intensity	FWHM / μm	Height /nm	Resonance Wavelength/ μm	Absorptance peak intensity	FWHM / μm
50	9.5	0.58	2.20	50	9.5	0.50	2.78
300	9.5	0.54	2.34	500	9.5	0.60	2.29
500	9.5	0.60	2.16	1 000	9.5	0.67	2.07
1 000	9.5	0.66	1.98	2 000	9.5	0.77	1.50

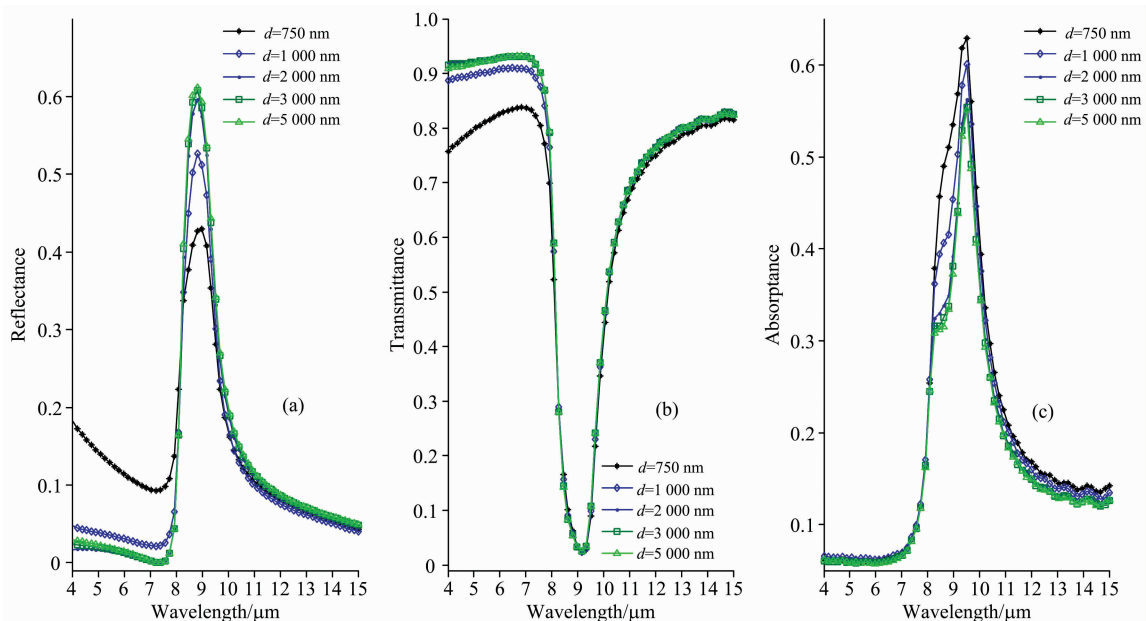


图 8 不同颗粒间距下的反射率谱线、透射率谱线和吸收率谱线

金圆柱体的颗粒高度和颗粒半径分别固定为 $h=500\ \text{nm}$ 和 $r=250\ \text{nm}$

Fig. 8 Reflectance spectra, transmittance spectra and absorptance spectra with a number of gold interparticle distance

The particle height and the particle radius of the gold cylinders are fixed to be $h=500\ \text{nm}$ and $r=250\ \text{nm}$

由图 8(a)–(c)结果可见, 对于不同间距, 入射光在 $8 \sim 10\ \mu\text{m}$ 的波段内均呈现出了共振特性, 与前所述相一致。通过对图 8c 中吸收率共振峰主要参数的进一步测量(由表 3 给

出), 可以发现, 当间距从 $750\ \text{nm}$ 逐渐增加到 $5\ 000\ \text{nm}$ 时, 峰值吸收率从 0.63 逐渐减小到 0.55 , 而共振峰波长和半峰宽在不同间距条件下, 均没有明显变化。从这一结果表明,

表 3 图 8(c)中不同颗粒间距下吸收率谱线共振峰的波长位置、峰值吸收率和半峰宽

Table 3 The resonance wavelength, peak intensity, and FWHM of the resonance peak in the absorptance spectra shown in Fig. 8(c), with a number of gold interpartical distances

Distance /nm	Resonance wavelength/ μm	Absorptance peak intensity	FWHM / μm
750	9.5	0.63	2.14
1 000	9.5	0.60	2.16
2 000	9.5	0.56	2.15
3 000	9.5	0.55	2.15
5 000	9.5	0.55	2.15

表 4 图 9(c)中不同颗粒形状下吸收率谱线共振峰的波长位置、峰值吸收率和半峰宽

Table 4 The resonance wavelength, peak intensity, and FWHM of the resonance peak in the absorptance spectra shown in Fig. 9(c), with a variety of gold particle shapes

Particle shape	Resonance wavelength/ μm	Absorptance peak intensity	FWHM / μm
Cylinder	9.3	0.37	1.56
Triangle	9.3	0.39	1.38
Rectangle	9.3	0.40	1.70
Sphere	9.3	0.34	1.46
Pyramid	9.3	0.36	1.71

在提出的金微纳阵列结构设计中, 颗粒间距可以作为用来调节共振峰峰值吸收率, 从而在实际光电传感器器件中改变其灵敏度的主要参数被加以应用。

前文针对金颗粒为圆柱体形状时进行了系统研究, 而现有文献表明, 在可见光波段, 金属颗粒的不同形状也能对入射光的光谱性质产生影响。基于此, 在中红外波段, 通过改变金颗粒的形状, 对其组成的阵列结构也进行了研究, 具体结果如图 9 所示。

通过观察图 9(a)–(c)可以发现, 不同的颗粒形状会对入射光的共振特性产生稍有不同的影响。比如, 球体和圆柱体相比, 在共振峰处反射率较小, 透射率较大, 而相应的吸收率较小, 但差别不大。造成这一稍有不同的原因主要是由于被激发的表面等离子激元的电磁场分布依赖于金属材料及其周围介质的几何形状。不同形状的金属颗粒其表面等离子激元相应的电磁场分布也不相同, 进而使整个阵列结构对入射光的影响也不相同。通过对图 9(c)中吸收率共振峰主要参数的进一步测量(结果由表 4 给出)可知, 吸收率谱线的共振峰波长位置相同, 均为 $\lambda=9.3 \mu\text{m}$, 而峰值吸收率和半峰宽在不同的形状下稍有变化, 但变化不大。这主要是因为比较的几种形状在入射光平面内横截面积的大小均保持相似, 比如圆柱体的直径为 600 nm, 同时金字塔形的底面边长也为 600 nm。在相似的横截面积下, 不同形状颗粒组成的阵列结构能够给出较为相似的共振吸收峰特性, 这一结论能够在中红外波段内为实际设计光电传感器器件提供更为便利的条件, 即可以主要考虑保持相似的横截面积, 同时可以适当忽略不同具体生产的微纳颗粒形状对其器件性质的影响。

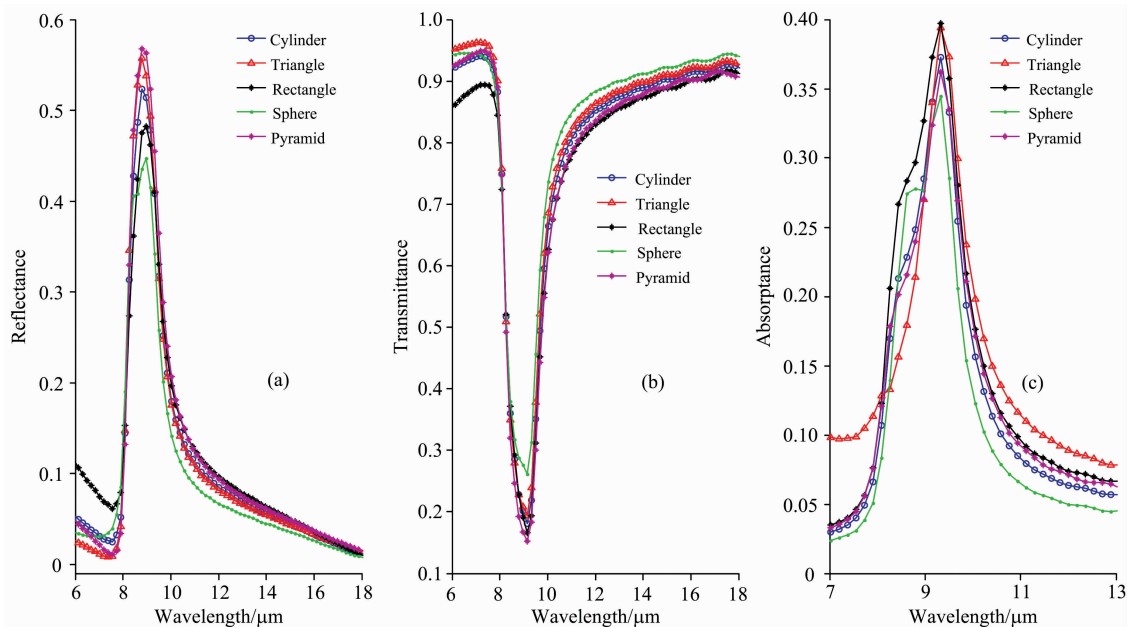


图 9 不同颗粒形状下的反射率谱线、透射率谱线和吸收率谱线

金颗粒间距和颗粒高度分别固定为 $d=1\ 000 \text{ nm}$ 和 $h=250 \text{ nm}$; 其中, 圆柱体和球体的直径均为 600 nm, 立方体、三棱柱(三角形面向下)和金字塔形(四边形面向下)的颗粒底面边长均为 600 nm

Fig. 9 Reflectance spectra, transmittance spectra and absorptance spectra with a variety of gold particle shapes

The interpartical distance and the particle height of the gold are fixed to be $d=1\ 000 \text{ nm}$ and $h=250 \text{ nm}$; The diameters of the cylinder and the sphere are both 600 nm; The bottom lengths of the rectangle, the triangle, and the pyramid are all 600 nm

3 结 论

提出了一种基于金微纳颗粒组成的阵列结构,利用时域有限差分方法,在 $4\sim 18\ \mu\text{m}$ 波段范围内,通过分别改变圆柱体金微纳颗粒的半径、高度和间距等结构参数,以及在不同颗粒形状下,系统地研究了该微纳阵列结构对入射光的反

射率、透射率和吸收率谱线等特性的影响规律。结果表明,在中红外波段内,入射光能够与其所激发的金微纳颗粒阵列表面等离激元产生共振效应,在 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 波段范围内表现出共振特性。此外,吸收率谱线的共振峰波长、峰值吸收率和半峰宽均可通过分别改变该微纳阵列结构的主要参数有效调节。本工作对在中红外波段内基于金微纳阵列结构传感器的科学研究和实际设计具有独特的应用价值。

References

- [1] Savage K J, Hawkeye M M, Esteban R, et al. *Nature*, 2012, 491(7425): 574.
- [2] Chen J N, Badioli M, Alonso-González P, et al. *Nature*, 2012, 487(7405): 77.
- [3] NONG Jin-peng, WEI Wei, ZHU Yong, et al(农金鹏, 韦 玮, 朱 永, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(4): 997.
- [4] Basch A, Beck F J, Soderstrom T, et al. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(24): 243903.
- [5] Ouyang Z, Zhao X, Varlamov S, et al. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2011, 19(8): 917.
- [6] Pillai S, Beck F J, Catchpole K R, et al. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(7): 205.
- [7] Madzharov D, Dewan R, Knipp D. *Optics Express*, 2011, 19 Suppl 2(6): A95.
- [8] Sun C, Su J, Wang X. *Plasmonics*, 2015, 10(3): 633.
- [9] Sun C, Wang X Q. *Plasmonics*, 2015, 10(6): 1307.
- [10] Sun C, Wang Z, Wang X, et al. *Plasmonics*, 2016, 11(4): 1003.
- [11] Wang Z, Sun C, Wang X. *Plasmonics*, 2016, 12(3): 589.
- [12] Li H J, Wang L L, Huang Z R, et al. *Plasmonics*, 2015, 10(1): 39.
- [13] Kusa F, Ashihara S. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116: 153103.
- [14] FDTD Solutions. www.lumerical.com.

Spectral Characteristics at Mid-Infrared Wavelength Regime of Gold Micro-Nano Arrays Surface Plasmons

SI Ji-zong¹, LIU Yan-hong², SUN Cheng^{1,3*}

1. College of Physical Science and Technology, Dalian University, Dalian 116622, China

2. College of Tourism, Dalian University, Dalian 116622, China

3. Liaoning Engineering Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Dalian 116622, China

Abstract Surface plasmons are collective oscillations of surface electrons in metal, as well as the related electro-magnetic fields, which are induced by incident lights. So far, the spectral characteristics of the surface plasmons of gold micro-nano particles have been widely studied and applied, at the visible light regime. In addition, the spectral properties in the mid-infrared wavelength region have also drawn great attention in the community, due to its great potential in the research of good-quality sensors. So far, to systematically adjust the paramters including the resonance wavelength, the maximum absorptance and the full width at half maximum intensity, etc. in the design of the surface plasmon-based photoelectric sensing devices, is still a key issue in the community. Compared with single paticles, array-based structures possess great advantages in tuning the above mentioned parameters due to the characteristics of periodicity. Therefore, in this work, an array structure based on gold micro-nano particles is proposed. With the finite difference time domain method, the reflectance spectrum, transmittance spectrum and absorptance spectrum in a wavelength range of $4\sim 18\ \mu\text{m}$ are systematically studied, by varying the structural parameters of the gold array including the particle radius, the particle height, the particle separation, and the particle shape. The results in this work reveal a resonance characteristics within the wavelength range of $8\sim 10\ \mu\text{m}$ that occurs when the incident light resonates with the induced surface plasmons of the gold micro-nano array. The results also indicate that the resonance wavelength, the absorptance peak intensity and the full width at half maximum intensity of the resonance spectrum can effectively be adjusted by tuning the structural parameters of the gold array. Based on the spectral characteristics demonstrated in this work, the proposed gold micro-nano array structure may be utilized in the future design of photoelectric sensors at the mid-infrared wavelength regime.

Keywords Mid-infrared; Gold micro-nano particles; Finite-difference-time-domain method; Surface plasmons

* Corresponding author

(Received Dec. 7, 2017; accepted Apr. 18, 2018)

《光谱学与光谱分析》投稿简则

《光谱学与光谱分析》是由中国科协主管,中国光学学会主办,钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的专业学术期刊。国内外公开发行人,从 2004 年起为月刊,大 16 开本,2019 年仍为月刊,每期 332 页。《光谱学与光谱分析》主要报道我国光谱学与光谱分析领域内具有创新性科研成果,及时反映国内外光谱学与光谱分析的进展和动态;发现并培育人才;推动和促进光谱学与光谱分析的发展。为科教兴国服务。读者对象为从事光谱学与光谱分析的科研人员、教学人员、分析测试人员和科研管理干部。

栏目设置和要求

1. 研究报告 要求具有创新性的研究成果,一般文章以 8000 字(包括图表、参考文献、作者姓名、单位和中文、英文摘要,下同)为宜。

2. 研究简报 要求在前人研究的基础上有重大改进或阶段性研究成果,一般不超过 5000 字。

3. 评述与进展 要求评述国内外本专业的发展前沿和进展动态,一般不超过 10000 字。

4. 新仪器装置 要求介绍新型光谱仪器的研制、开发、使用性能和应用,一般不超过 5000 字。

5. 来稿摘登 要求测试手段及方法有改进并有应用交流价值,一般以 3000~4000 字为宜。

稿件要求

1. 投稿者请经本刊编委(或历届编委)一人或本专业知名专家推荐,并附单位保密审查意见及作者署名顺序,主要作者介绍。文章有重大经济效益或有创新者,请说明,同时注明受国家级基金或国家自然科学基金资助情况。

2. 来稿要观点明确、数据真实可靠、层次分明、言简意明、重点突出。来稿必须是网上在线投稿(含各种符号和外文字母大写、小写、正体、斜体;希腊字母、拉丁字母;上角、下角标位置应标清楚)。中文摘要以 800 字为宜,英文摘要(建议经专业英语翻译机构润色)与中文摘要要对照;另附关键词。要求来稿应达到“齐、清、定”,中文、英文文字通顺,方可接受送审。

3. 为了进一步统一和完善投稿方式、缩短论文发表周期,本刊只接收网上在线投稿,不接收以邮寄方式或 e-mail 方式的投稿,严禁“一稿多投”,对侵权、抄袭、剽窃等学术不端行为,一经发现,取消三年投稿资格。

4. 文中插图要求完整,图中坐标、线条、单位、符号、图注等应标注准确、完整。如作者特殊要求需出彩色插图者,必须在投稿时事先加以说明,并承担另加的彩印费用。图幅大小:单栏图 7.5cm(宽)×6cm(高);双栏图:14cm(宽)×6cm(高);图中数字、图题、表题全部用中文、英文对照,图中数字、中文、英文全用 6 号字。电子文档中除实物图外,曲线图要用 Matlab, Excel, Visio 或 Origin 等软件制作,稿件中图片的原图并转成相应(可编辑)的文件格式(.fig, .xls, .vsd, .opj),非“.jpg”格式的文档,随电子版修改稿一同发送到本刊的修改稿专用邮箱。

5. 文中出现的单位必须按“中华人民共和国计量标准”及有关 GB 标准规定缮写。物理量符号一律用斜体,单位符号和词头用正体字母。

6. 名词术语,请参照全国科学技术名词规定缮写。

7. 参考文献,采用顺序编码制,只列主要文献;以 15~20 条为宜。内部资料、私人通讯、未经公开发表的一律不能引用。日文、俄文等非英文文献,请用英文表述;中文文献和中文图书采用中、英文对照表述,文献缮写格式请参照本刊。

8. 请在投稿第一页左下角写明投稿联系人的电话和两个 e-mail,以便及时联系。

稿件处理

1. 自收到稿件之日起,一个月内作者会收到编辑部的稿件处理意见。请根据录用通知中所提出的要求认真修改,希望修改稿在 30 天内寄回编辑部,并作为作者最终定稿(当作者接到校样时,以此修改稿为准进行校对,请勿再做大的改动),若二个月内编辑部没收到修改稿,将视为自行撤稿处理。

2. 有重大创新并有基金资助者可优先发表;不录用的稿件,编辑部将尽快通知作者,底稿一律不退,请自留底稿。

3. 来稿一经发表将酌致稿酬并送样刊 2 册。

4. 遵照《中华人民共和国著作权法》,投稿作者须明确表示,该文版权(含各种媒体的版权)授权给《光谱学与光谱分析》期刊社。国内外各大文献检索系统摘录本刊刊出的论文;凡不同意被检索刊物无稿酬摘引者,请在投稿时事先声明,否则,本刊一律认为已获作者授权认可。

5. 修改稿请寄:100081 北京市海淀区学院南路 76 号(南院西北门),《光谱学与光谱分析》期刊社(收)

电话:010-62182998 或 62181070 传真:010-62181070

e-mail: chngpxygpfx@vip.sina.com; 修改稿专用邮箱: gp2008@vip.sina.com 网址: http://www.gpxygpfx.com