

光辐照精确调控金纳米星枝杈长度及其光热性能探究

史娜娜 赵艳 冯超 黄杰 徐佳宇

Precise control of branch-length of light irradiated gold nanostars and associated thermal performance

Shi Na-Na Zhao Yan Feng Chao Huang Jie Xu Jia-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 086101 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.086101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.086101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I8>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 Logistic 函数模型的纳米自组装动力学分析

Kinetic study of nanorods self-assembly process based on logistic function model

物理学报.2016, 65(12): 126101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.126101>

B/N 掺杂类直角石墨烯纳米带器件引起的整流效应

Rectifying behaviors induced by B/N-doping in similar right triangle graphene devices

物理学报.2015, 64(19): 196101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.196101>

GaAs(111) 表面硅烯、锗烯的几何及电子性质研究

Atomic and electronic structures of silicene and germanene on GaAs(111)

物理学报.2015, 64(18): 186101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.186101>

虹彩环形结构氧化铝薄膜的制备与研究

Preparation and study of anodic alumina thin films with rainbow rings

物理学报.2015, 64(7): 076102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.076102>

水热法合成纳米花状二硫化钼及其微观结构表征

Synthesis and characterization of flower-like MoS<sub>2</sub> microspheres by hydrothermal method

物理学报.2015, 64(1): 016102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.016102>

# 光辐照精确调控金纳米星枝杈长度及其光热性能探究\*

史娜娜 赵艳<sup>†</sup> 冯超 黄杰 徐佳宇

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

(2016年11月28日收到; 2017年1月14日收到修改稿)

金纳米星是一种具有尖状结构的多分枝纳米颗粒. 为了使金纳米星枝杈长度可控, 利用 HEPES 作为体系的还原剂、稳定剂及形状诱导剂, 在制备过程中进行光辐照, 得到的金纳米星枝杈长度比无光辐照时的金纳米星枝杈长度短, 而且不同波长光辐照得到的金纳米星枝杈长度有显著不同. 在此基础上, 分析了金纳米星枝杈长度变化的物理过程, 提出光诱导金纳米星生长过程中枝杈长度变化的理论模型. 测量了不同枝杈长度的金纳米星在光辐照下一定时间内的温度变化, 计算了金纳米星的光热转换效率. 实验结果表明, 光辐照制备金纳米星能够精确控制金纳米星枝杈长度范围, 从而调控金纳米星的光热转换效率.

**关键词:** 金纳米星, 光辐照, 枝杈长度, 光热转换效率

**PACS:** 61.46.-w, 42.50.Ct, 63.22.Kn, 63.90.+t

**DOI:** 10.7498/aps.66.086101

## 1 引言

在现有诸多不同形状的金纳米颗粒中, 各向异性的金纳米颗粒研究已经出现了很多报道. 金纳米颗粒各向异性造成散射极化和强度的改变, 被认为在生物传感方面有着重要的应用价值<sup>[1]</sup>. 金纳米星是一种具有尖状结构的多分枝纳米颗粒<sup>[2]</sup>, 具有良好的光电性能<sup>[3,4]</sup>, 可以用来制备各种光电子器件; 且具有良好的生物相容性、低毒性, 在生物医学领域有广阔的应用前景; 良好的光热效应使其在肿瘤治疗方面也有很好的应用前景<sup>[5,6]</sup>.

目前制备金纳米星的主流方式有三种, 包括种子生长法<sup>[7]</sup>, 一步制备法<sup>[8]</sup>和电子束刻蚀法<sup>[9]</sup>. 种子生长法制备金纳米星时首先在常温下使用氯金酸(HAuCl<sub>4</sub>)和抗坏血酸预先合成金种, 然后通过添加表面活性剂还原得到金纳米星<sup>[10-12]</sup>. 该方法由于操作复杂, 反应条件苛刻, 无法直接应用于生物体系. 一步合成法最先由 Xie 等<sup>[13]</sup>报道. 该方法

利用常用的生物缓冲液试剂——HEPES (N-2-羟乙基哌嗪-N'-2-乙磺酸) 作为体系的还原剂、稳定剂以及形状诱导剂, 调节体系的 pH 值到 7.5 左右后, 直接加入一定量的氯金酸, 一段时间后即可形成金纳米星. 自上而下的电子束刻蚀也是制备金属纳米结构的一种有效方法<sup>[14]</sup>. 但是电子束刻蚀制备速度慢, 且造价昂贵. 本研究采用操作简单、可以直接应用于生物体系的一步合成法制备金纳米星.

通过改变金纳米星枝杈长度来改变其光学性能, 不仅可以使其成为组装表面增强拉曼光谱(surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS) 基底的理想材料<sup>[15]</sup>, 同时也可以改善其光热性能<sup>[16]</sup>, 使金纳米星在生物医疗应用中发挥更好的作用. Qian 等<sup>[17]</sup>通过调节 HAuCl<sub>4</sub> 与 HEPES 的浓度比, 实现枝杈长度从 5 nm 到 25 nm 的可控制备. Tuan Vo-Dinh 课题组通过控制种子溶液的加入体积, 得到了不同尺寸和形态的金纳米星<sup>[18]</sup>. Pinchuk 等<sup>[19]</sup>研究了不同尺寸金纳米颗粒表现出的光热性

\* 国家自然科学基金(批准号: 51475014)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: zhaoyan@bjut.edu.cn

能差异, 得出了尺寸越小、光热转换效率越高的结论. 董守安等<sup>[20]</sup>研究了晶种媒介的金纳米棒光化学二次生长及其长径比的调控, 当纵向等离子体共振带达到最大之后, 进一步采用紫外光照射, 使金纳米棒变短.

从国内外文献调研中发现, 枝杈长度较短的纳米颗粒的光热转换效率较高. 但是目前调控金纳米星枝杈长度的方法仅限于化学制备法, 通过调节反应物的浓度来实现. 该方法不仅操作步骤繁琐, 而且难以达到精确控制. 光辐照调控金纳米星枝杈长度的方法操作简单, 并且可以达到精确控制, 从而能够实现金纳米星光热转换效率的控制.

本文采用氙灯系统作为光源, 使用不同波长的滤光片得到各波长的光. 采用光辐照一步法制备不同枝杈长度的金纳米星. 使用透射电子显微镜、分光光度计和X射线衍射仪对产物特性进行表征, 分析了金纳米星枝杈变短的物理过程, 提出光诱导金纳米星生长过程中枝杈长度变化的理论模型. 通过自行搭建的光热测量装置, 选用670 nm氙灯作为光源, 测量了不同枝杈长度的金纳米星在光辐照下30 min内的温度变化, 并计算了金纳米星的光热转换效率.

## 2 实验材料与方法

### 2.1 金纳米星的制备及表征

#### 2.1.1 使用原料

超纯水, 氯金酸( $\text{AuCl}_3 \cdot \text{HCl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 质量分数大于47.8%, 下同), N-2-羟乙基哌嗪-N'-2-乙磺酸(HEPES, 纯度大于99%), 氢氧化钠( $\text{NaOH}$ , 纯度大于99.0%).

#### 2.1.2 制备过程

将0.48 g HEPES粉末溶于20 mL超纯水中, 配制5 mL浓度为1 mol/L的 $\text{NaOH}$ 溶液, 配制浓度为10 mmol/L的 $\text{HAuCl}_4$ 溶液5 mL. 在HEPES中逐滴加入 $\text{NaOH}$ 溶液调节HEPES的pH为7.5. 然后, 将HEPES暴露于350 nm波长的光下, 加入0.6 mL  $\text{HAuCl}_4$ 溶液, 辐照5 h. 采用同样的方法, 使溶液分别在450, 550, 650 nm以及无光辐照的条件下进行反应. 将得到的金纳米星分别标记为样品1 (350 nm), 样品2 (450 nm), 样品3 (550 nm), 样品4 (650 nm), 样品5 (无光辐照).

#### 2.1.3 表征方法

采用紫外可见近红外分光光度计(Shimadzu UV-3600)对样品1—5进行光吸收测试, 采用透射电子显微镜(TEM, FEI Tecnai G2F30)对样品进行测试. 采用X射线衍射仪(Bruker D8 advance)对不同波长光辐照制备的金纳米星晶体材料作晶化度分析.

## 2.2 光热测量装置

图1所示为金纳米星光热性能的测量装置<sup>[21]</sup>. 光源选用入射功率为4.8 W的平行氙灯光源. 将待测金纳米星溶液盛放在一个尺寸为1 cm × 1 cm × 4 cm的石英比色皿中, 比色皿中放置磁振子搅拌, 使溶液温度分布均匀. 比色皿通光面外层包覆塑料泡沫, 以减少热量耗散. 使用K型热电偶温度计记录溶液温度随时间的变化, 使用功率计分别测量光通过金纳米星溶液之前和之后的功率.

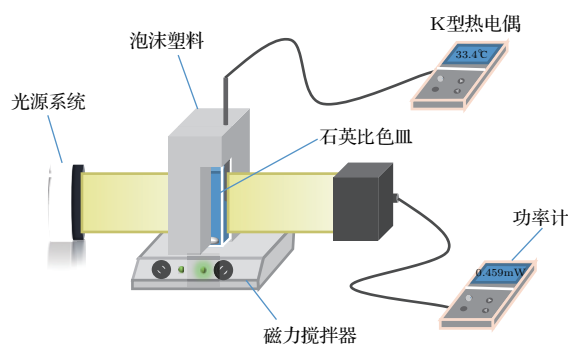


图1 光热测量装置

Fig. 1. The device for photo-thermal measurement.

## 3 实验结果及分析

### 3.1 光辐照制备金纳米星

图2为样品1—5的TEM图像. 从图2可以看出, 经过光辐照制备的金纳米星(图2(a)—(d))的枝杈长度均小于无光辐照制备的金纳米星(图2(e))枝杈长度, 且不同波长条件下制备得到的产物的枝杈长度不同. 图2(f)为不同光辐照条件下金纳米星的吸收光谱, 每条谱线分别有两个吸收峰, 这两个LSRP峰分别与金纳米星枝杈直径和长度有关, 近红外波段中LSRP峰位会随着金纳米星枝杈增长而发生红移<sup>[13]</sup>. 不同波长光辐照制备

的金纳米星吸收光谱的近红外LSRP峰位置不同,表明不同辐照波长条件下制备产物的枝杈长度不同. 进一步分析峰位得知, 经过光辐照制备的金纳米星的枝杈长度均小于无光辐照制备的金纳米星,

且350和650 nm辐照条件下制备的产物枝杈长度小于450和550 nm辐照条件下制备的产物枝杈长度. 不同波长下制备的金纳米星的平均枝杈长度如表1所示.

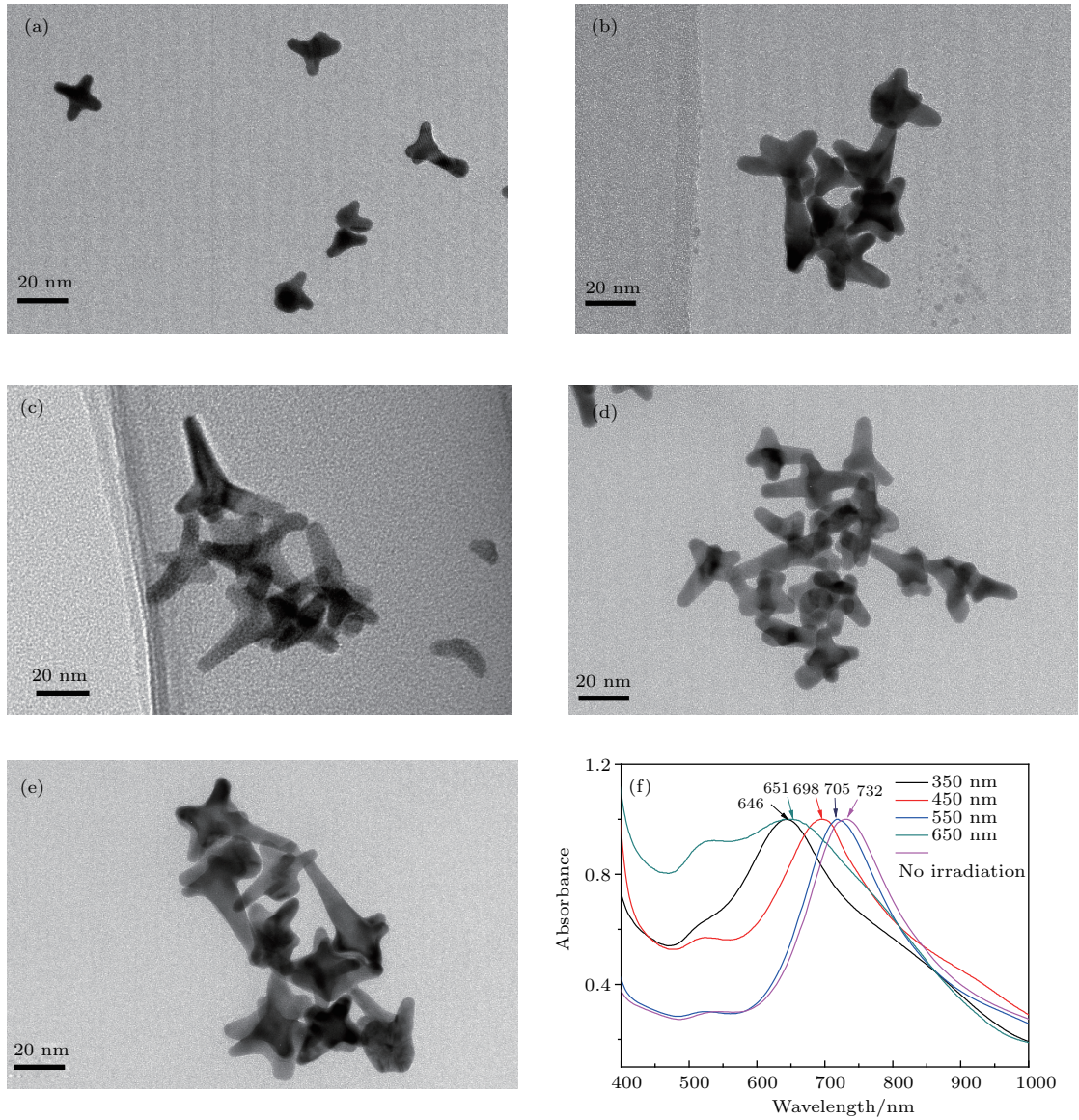


图2 (网刊彩色) 不同波长光辐照制备的金纳米星的TEM图 (a) 350 nm; (b) 450 nm; (c) 550 nm; (d) 650 nm; (e) 无光辐照; (f) 不同波长光辐照制备金纳米星的吸收光谱

Fig. 2. (color online) TEM images of gold nanostars prepared by light irradiation at different wavelengths: (a) 350 nm; (b) 450 nm; (c) 550 nm; (d) 650 nm; (e) no light irradiation; (f) absorption spectra of gold nanostars prepared by light irradiation at different wavelengths.

表1 不同波长光辐照制备金纳米星的枝杈长度

Table 1. The branch-lengths of gold nanostars prepared by light irradiation at different wavelengths.

辐照波长/nm	350	450	550	650	无光辐照
平均枝杈长度/nm	10.98 ± 2.00	14.75 ± 2.00	17.82 ± 2.00	14.05 ± 2.00	21.56 ± 2.00

通过多次实验测量, 在无光辐照时金纳米星的平均枝杈长度为 21.56 nm, 光辐照条件下制备的金纳米星的枝杈长度均小于无光辐照时制备的金纳米星, 且在 350 和 650 nm 光辐照条件下制备的金纳米星枝杈较短, 分别为 10.98 和 14.05 nm, 450 和 550 nm 光辐照条件下制备的金纳米星的枝杈较长, 分别为 14.75 和 17.82 nm. 该结果表明利用光辐照制备金纳米星时改变光的波长可以精确控制金纳米星枝杈的长度范围.

### 3.2 不同枝杈长度金纳米星的理论模型

图 3 是在 350 nm 光辐照下不同时间金纳米星的吸收光谱, 从图中可以看出随着时间的增加近红外 LSPR 峰先发生红移再发生蓝移, 从而可以判断实验中金纳米星的枝杈经历了先增长再变短的过程.

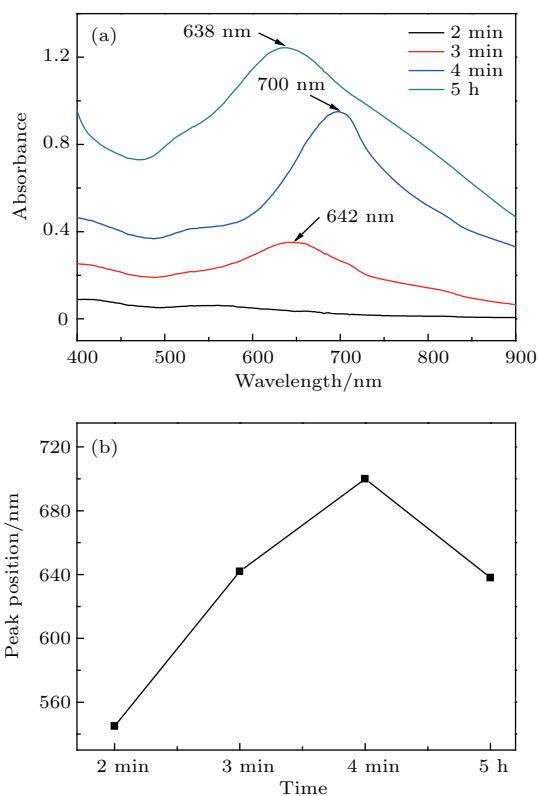


图 3 (网刊彩色) (a) 350 nm 光辐照下不同时间金纳米星的吸收光谱; (b) (a) 中吸收峰位置与时间的关系  
Fig. 3. (color online) (a) Absorption spectra of gold nanostars at different time under 350 nm light irradiation; (b) relationship between the absorption peak position and the time in (a).

#### 3.2.1 枝杈生长过程

图 4(a) 所示为实验中金纳米星的生长过程, 在 HEPES 中滴加氯金酸后, 金原子的浓度随着前

驱物的分解而增加, 当原子浓度达到过饱和状态时, 开始团簇成晶核并快速长大, 如图 4(b) 所示. 原子浓度很快下降到过饱和的最低值, 成核阶段停止, 反应生成的原子会在晶核上的特定晶面上选择性生长, 形成金纳米星 [22].

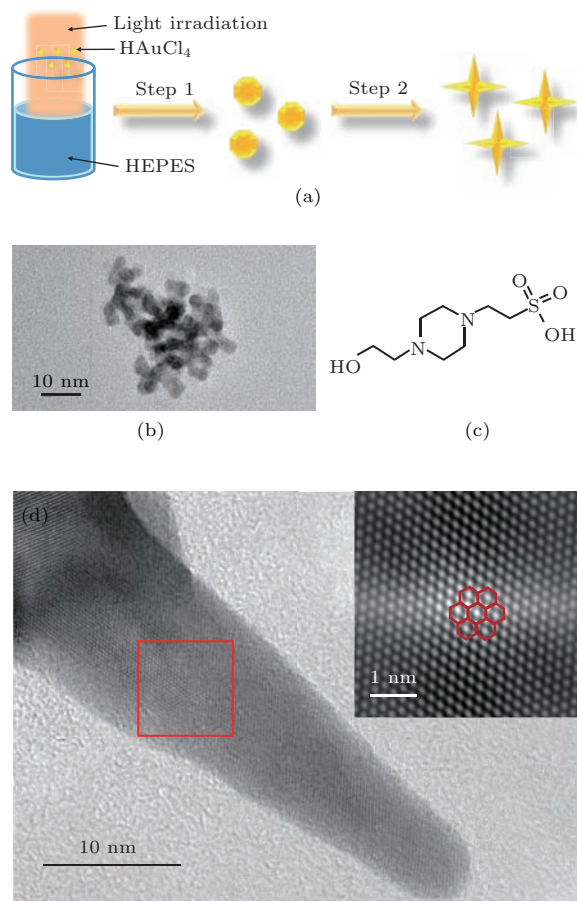


图 4 (网刊彩色) (a) 金纳米星的生长过程; (b) 金纳米星成核的 TEM 图像; (c) HEPES 分子式; (d) 金纳米星枝杈的高分辨率图像  
Fig. 4. (color online) (a) Growth of gold nanostars; (b) TEM image of gold nucleation; (c) molecular formula of HEPES; (d) high resolution image of gold nanostarbranch.

HEPES 作为体系的稳定剂、还原剂以及形状诱导剂, 在形成金纳米星的过程中起着重要的作用. HEPES 分子有三个官能团——羟基、磺酸酯和哌嗪, 如图 4(c) 所示. 前人研究得知形成金纳米星枝杈的决定因素是哌嗪 [13]. 哌嗪基团在低能晶面上吸附弱, 在 高能晶面上吸附强. 其在高能晶面上的大量吸附导致高能晶面能量下降, 使原子更趋向于在原本低能的晶面上堆积. 于是原子沿 (111) 晶面方向堆积, 形成枝杈, 如图 4(d) 所示, 原子呈六角密排状, 为 (111) 晶面.

### 3.2.2 枝杈变短过程

根据朗伯比尔定律, 溶液的吸光度与浓度成正比:

$$A = kbc, \quad (1)$$

式中  $k$  为溶液的摩尔吸收系数,  $b$  为光程长,  $c$  为溶液的浓度. 随着溶液反应时间的推移, 溶液中金纳米星的浓度增加, 溶液消光强度增大.

此外, 溶液吸光度  $A$  正比于入射光强  $I_0$  与透射光强  $I_{tr}$  之差:

$$A \propto I_0 - I_{tr}, \quad (2)$$

$$T(t) = T_0 + \frac{(I_0 - I_{tr})\eta}{m_w c_w B} [1 - \exp(-Bt)], \quad (3)$$

式中  $T(t)$  表示体系温度随时间  $t$  的变化,  $\eta$  为金纳米星的光热转换效率,  $B$  为与热量耗散有关的比例常数,  $m_w$  和  $c_w$  分别为溶液中水的质量和比热容. 根据 (2) 式和 (3) 式可知溶液的消光强度增大, 温度升高.

金纳米星受到光辐照后, 表面等离子体共振效应导致表面局域温度升高, 吸附在金纳米星表面的 HEPES 分子的哌嗪基团与金原子相互作用减弱. 部分 HEPES 分子脱离吸附 (图 5). 由于金纳米星的浓度增加, 溶液的消光强度增大, 金纳米星与周围环境持续进行热交换, 使得体系的温度升高, 分子扩散运动加快, 进一步导致 HEPES 的吸附数量减少. 吸附在高能晶面上 HEPES 开始减少, 来自枝杈顶端和溶液中的金原子开始在枝杈两侧和其他高能晶面上堆积, 从而使金纳米星的枝杈变短.

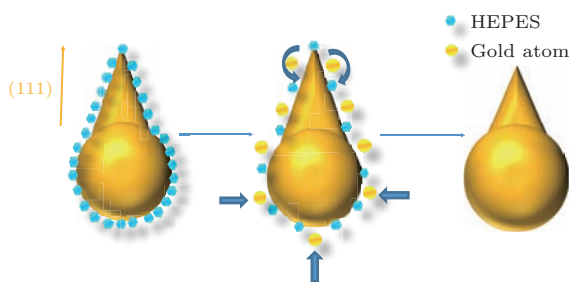


图 5 (网刊彩色) 金纳米星枝杈长度变短模型

Fig. 5. (color online) Shortening model of gold nanostar branch length.

图 6 为不同条件下制备的金纳米星的 X 射线衍射 (XRD) 图谱. 为了讨论光辐照条件相较于无光辐照条件时制备的金纳米星的晶面原子数变化, 根据 XRD 图谱, 计算了某一晶面与同一样品中其他晶面的强度比. 从表 2 可以看出光辐照条件下

(111) 晶面强度与其他晶面强度的比值高于其与无光辐照条件下晶面强度的比值, 表明辐照后 (111) 晶面的原子数增多, 其他晶面原子数减少.

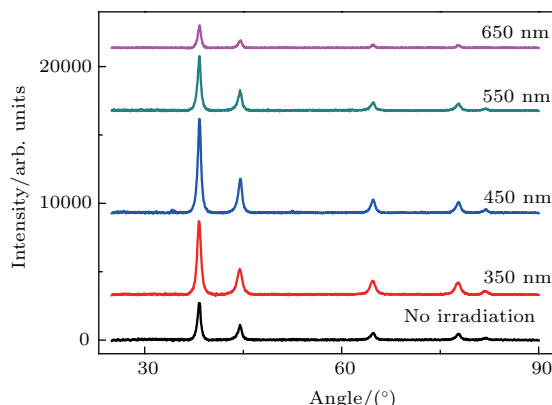


图 6 金纳米星的 XRD 图谱

Fig. 6. XRD patterns of gold nanostars.

表 2 晶面 (111) 与其他晶面强度之比

Table 2. Ratio of (111) crystal plane intensity to intensity of other crystal planes.

Wavelength/nm	(111)/(200)	(111)/(220)	(111)/(311)
No irradiation	2.43	5.18	6.10
350	2.87	5.43	6.03
450	2.31	4.45	4.53
550	2.65	6.69	7.56
650	3.27	7.59	7.96

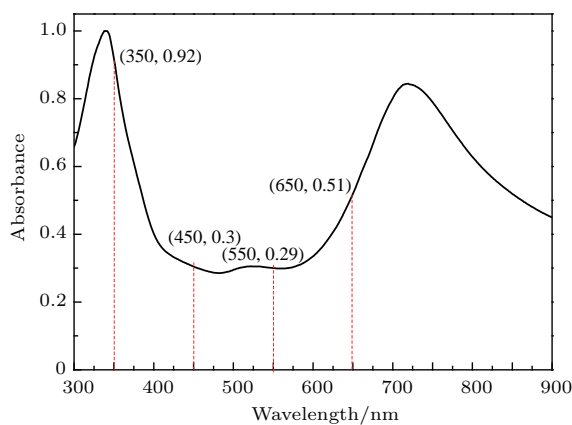


图 7 无光辐照的金纳米星的吸收光谱图

Fig. 7. Absorption spectrum of gold nanostars without light irradiation.

之所以不同波长光辐照制备的金纳米星的枝杈长度不同, 是因为金纳米星在不同波段的吸光度有差异. 从图 7 可以看出, 金纳米星的吸收光谱中在 350 和 650 nm 的吸光度较高, 在 450 和 550 nm 的吸光度较低. 当金纳米星的吸光度较高时, 体系温度升高, 吸附在高能晶面上的 HEPES 减少, 来

自于枝杈尖端和溶液的金原子开始在高能晶面上进行堆积,造成了低能晶面的扩展,从而得到的金纳米星的枝杈长度较短.相反,当金纳米星的吸光度较低时,吸附在高能晶面上的HEPES的量相对减少较少,使原子在高能晶面上堆积的量较少,从而金纳米星的枝杈长度减少的量较少,得到的枝杈长度相对较长.

### 3.3 金纳米星的光热测量

根据金纳米星的光热转换效率公式,我们对不同条件下制备的金纳米星进行了光热测量并计算了光热转换效率.溶液光热转换效率计算公式为

$$\eta = \frac{m_w c_w B \Delta T}{I_0 - I_{tr}}, \quad (4)$$

式中  $I_0$  为入射光的功率 (4.8 W),  $I_{tr}$  为透过溶液出射光的功率,  $B$  为金纳米星溶液到外部环境的恒定散热速率,  $\Delta T$  为溶液上升的温度值.

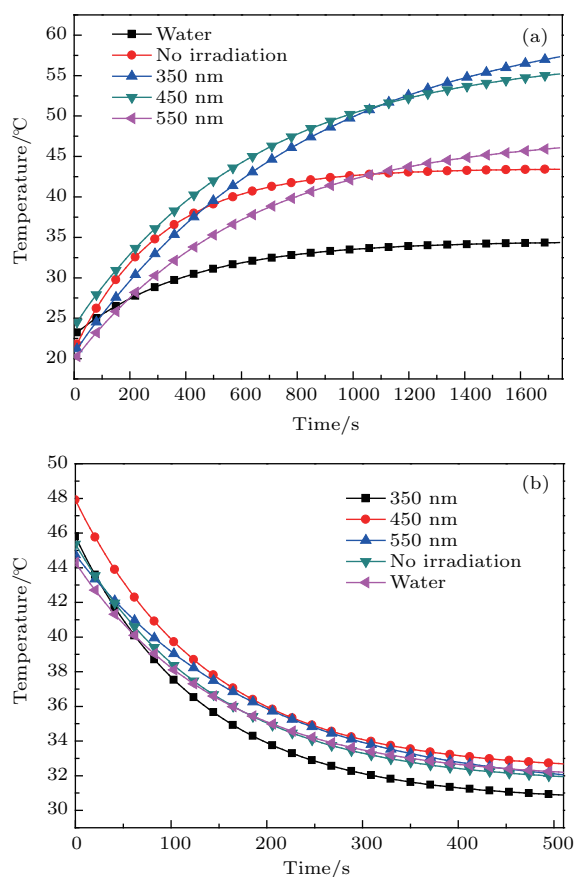


图8 (网刊彩色) 超纯水, 无光辐照制备的金纳米星以及分别在 550, 450, 350 nm 光辐照下制备的金纳米星的 (a) 升温曲线和 (b) 降温曲线

Fig. 8. (color online) (a) The heating curves and (b) the cooling curves of pure water and different gold nanostars prepared without irradiation and under irradiation at 550, 450, 350 nm wavelengths.

图8(a)是对水, 无光辐照制备的金纳米星以及分别在 550, 450, 350 nm 光辐照下制备的金纳米星的升温测量曲线, 测量在 30 min 内各溶液在 670 nm 光源辐照下温度的变化. 以上溶液辐照 30 min 后, 关闭光源, 测量溶液的降温曲线, 如图8(b)所示. 通过图8(a)可以得到溶液温度的变化值  $\Delta T$ , 通过图8(b)可以求得不同溶液的恒定散热效率  $B$ . 代入理论模型公式, 求得不同溶液的光热转换效率, 如表3所示. 通过对比金纳米星的枝杈长度及光热转换效率, 发现枝杈长度越短对应金纳米星的光热转换效率越高.

表3 不同条件制备金纳米星的光热转换效率  
Table 3. Photothermal conversion efficiency of gold nanostars prepared under different conditions.

	350 nm	450 nm	550 nm	No irradiation	Water
枝杈长度/nm	10.98	14.75	17.82	21.56	0
光热转换效率/%	99.1	70.1	58.4	49.1	29.6

## 4 结论

采用光辐照辅助制备金纳米星, 得到的金纳米星枝杈长度短于无光辐照的金纳米星枝杈长度, 不同波长的光辐照条件下产物的枝杈长度不同. 在此基础上, 分析了金纳米星枝杈长度变化的物理过程, 对不同枝杈长度的金纳米星进行了光热测量, 得出如下结论:

- 1) 制备过程中金纳米星枝杈经历先变长后变短的过程, 通过理论分析可得到生长模型;
- 2) 不同光辐照条件下得到的金纳米星枝杈长度有差异, 原因可以归结为其在特定波长下的吸光度差异;
- 3) 光辐照制备金纳米星可精确调控枝杈长度, 可以实现光热转换效率的调控.

## 参考文献

[1] El-Sayed I H, Huang X H, El-Sayed M A 2005 *Nano Lett.* **5** 829  
 [2] Freddi S, Sironi L, D'Antuono R, Morone D, Dona A, Cabrini E, D'Alfonso L, Collini M, Pallavicini P, Baldi G, Maggioni D, Chirico G 2013 *Nano Lett.* **13** 2004  
 [3] Jain S, Hirst D G, O'Sullivan J M 2012 *Br. J. Radiol.* **85** 101

- [4] Ravi S, Vipul B, Minakshi C, Atanu B, Ramesh R B, Murali S 2005 *Langmuir* **21** 10644
- [5] El-Said W A, Kim S U, Choi J W 2015 *J. Mater. Chem. C* **3** 3848
- [6] Jo H, Youn H, Lee S, Ban C 2014 *J. Mater. Chem. B* **2** 4862
- [7] Liu X L, Wang J H, Liang S, Yang D J, Nan F, Ding S J, Zhou L, Hao Z H, Wang Q Q 2014 *J. Phys. Chem. C* **118** 9659
- [8] Chirumamilla M, Gopalakrishnan A, Toma A, Zaccaria R P, Krahne R 2014 *Nanotechnology* **25** 235303
- [9] Chirumamilla M, Toma A, Gopalakrishnan A, Das G, Zaccaria R P, Krahne R, Rondanina E, Leoncini M, Liberale C, De Angelis F, Di Fabrizio E 2014 *Adv. Mater.* **26** 2353
- [10] Guerrero-Martinez A, Barbosa S, Pastoriza-Santos I, Liz-Marzan L M 2011 *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* **16** 118
- [11] Kawamura G, Nogami M 2009 *J. Cryst. Growth* **311** 4462
- [12] Sau T K, Murphy C J 2004 *J. Am. Chem. Soc.* **129** 1733
- [13] Xie J P, Lee J Y, Wang D I C 2007 *Chem. Mater.* **19** 2823
- [14] Gopalakrishnan A, Chirumamilla M, de Angelis F, Toma A, Zaccaria R P, Krahne R 2014 *ACS Nano* **8** 7986
- [15] El-Said W A, Kim S U, Choi J W 2015 *J. Mater. Chem. B* **3** 3848
- [16] Wang X C, Li G H, Ding Y, Sun S Q 2014 *RSC Adv.* **4** 30375
- [17] Su Q Q, Ma X Y, Dong J, Jiang C Y, Qian W P 2011 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **3** 1873
- [18] Khoury C G, Vo-Dinh T 2008 *J. Phys. Chem. C* **112** 18849
- [19] Jiang K, Smith D A, Pinchuk A 2013 *J. Phys. Chem. C* **117** 27073
- [20] Dong S A, Yang F L, He X G, Zhang S W, Fang W 2013 *Precious Met.* **34** 1 (in Chinese) [董守安, 杨辅龙, 何晓光, 张世文, 方卫 2013 贵金属 **34** 1]
- [21] Wang X C 2014 *M. S. Thesis* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [王小翠 2014 硕士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [22] Bai Y, Long R, Wang C M, Xiong Y J 2013 *J. Univ. Sci. Technol. B* **43** 889 (in Chinese) [柏戡, 龙冉, 王成名, 熊宇杰 2013 中国科学技术大学学报 **43** 889]

# Precise control of branch-length of light irradiated gold nanostars and associated thermal performance\*

Shi Na-Na Zhao Yan<sup>†</sup> Feng Chao Huang Jie Xu Jia-Yu

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

( Received 28 November 2016; revised manuscript received 14 January 2017 )

## Abstract

Gold nanostars are multi-branched nanoparticles with tip structures. Nanostars have excellent photoelectric properties, which make them able to be used in a variety of optoelectronics devices. Moreover, these stars have good biocompatibility and low toxicity, which opens broad application prospect in the biomedical field. Gold nanostars with admirable optical as well as thermal properties, are thought as a good candidate in cancer treatment that is a hot research topic in recent years. Gold nanostars with different branch-lengths were prepared by the photo-assisted method, and the effect of light was well studied in relation with gold nanostar branch-length. In the solution system, HEPES was used as the reducing agent, stable agent and shape-inducing agent. Under light irradiation, a certain amount of chloroauric acid solution ( $\text{HAuCl}_4$ ) was added to the HEPES solution. After a period of time, gold nanostars were prepared. Different wavelengths of irradiating light were selected in this experiment. The wavelength has different effects on the growth of branches associated with gold nanostars. The transmission electron microscope and the ultraviolet-visible-near infrared spectrophotometer were used to analyze the morphology and absorption spectra of gold nanostars. Meanwhile, a nano-measurer software was used to determine branch-lengths of gold nanostars under light irradiation of different wavelengths. The results indicate that the branches of the nanostars under irradiation were shorter than those of nanostars without irradiation. Different branch lengths correspond to different irradiation wavelengths. Based on these results, the physical process of shortening nanostars branches was analyzed, and a theoretical model of changing branch-length in the process of light-induced nanostars growth was proposed. The model indicates that there are two steps when the branch-length is changing. Firstly, the branch-length grows longer with the overall growth of the nanostar. Secondly, the nanostar becomes shorter because of the insatiability of HEPES molecules that are adsorbed on the nanostar surface with the increasing solution temperature. Through a photothermal measurement, a xenon lamp (wavelength 670 nm) was used as a light source to measure the temperature change within 30 min, and then the photothermal conversion efficiency of the gold nanostars was calculated. The results show that the branch-length of gold nanostars can be precisely controlled by light irradiation with slight variation in wavelength. The photothermal conversion efficiency of gold nanostars can also be regulated.

**Keywords:** gold nanostars, light irradiation, branch length, photothermal conversion efficiency

**PACS:** 61.46.-w, 42.50.Ct, 63.22.Kn, 63.90.+t

**DOI:** 10.7498/aps.66.086101

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51475014).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhaoyan@bjut.edu.cn