

表面等离激元光热效应研究进展

王善江 苏丹 张彤

Research progress of surface plasmons mediated photothermal effects

Wang Shan-Jiang Su Dan Zhang Tong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 144401 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190476

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190476>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

表面等离激元量子信息应用研究进展

Recent progress of the application of surface plasmon polariton in quantum information processing

物理学报. 2017, 66(14): 144202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.144202>

表面等离激元结构光照明显微成像技术研究进展

Research progress of plasmonic structure illumination microscopy

物理学报. 2017, 66(14): 148701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.148701>

基于含时密度泛函理论的表面等离激元研究进展

Progress of surface plasmon research based on time-dependent density functional theory

物理学报. 2015, 64(7): 077303 <https://doi.org/10.7498/aps.64.077303>

柱状磁光颗粒的局域表面等离激元共振及尺寸效应

Localized surface plasmon resonance and the size effects of magneto-optic rods

物理学报. 2016, 65(11): 114202 <https://doi.org/10.7498/aps.65.114202>

阴极荧光在表面等离激元研究领域的应用

Research progress of plasmonic cathodoluminescence characterization

物理学报. 2017, 66(14): 144201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.144201>

利用石墨烯等离激元与表面声子耦合增强量子摩擦

Enhancement of quantum friction via coupling of surface phonon polariton and graphene plasmons

物理学报. 2016, 65(23): 236801 <https://doi.org/10.7498/aps.65.236801>

专题： 等离激元增强光与物质相互作用

表面等离激元光热效应研究进展*

王善江 苏丹 张彤†

(东南大学电子科学与工程学院, 南京 210096)

(2019年4月1日收到; 2019年5月5日收到修改稿)

表面等离激元微纳结构能够将光场束缚在亚波长尺度, 实现突破光学衍射极限的光操控, 并显著增强光与物质的相互作用. 在基于表面等离激元机理的光电器件研究中, 微纳结构的自身光吸收通常被认为是损耗, 而通过光热效应, 光吸收则可有效利用并转换成热能, 其中的物理过程研究和应用是当前等离激元学领域的热点方向. 本文回顾了近年来表面等离激元微纳结构光热效应的相关工作, 聚焦于表面等离激元热效应的物理过程、热产生和热传导调控方式的研究进展. 在此基础上, 介绍了表面等离激元微纳结构在微纳加工、宽谱光热转换等方面的应用.

关键词: 表面等离激元, 光与物质相互作用, 光热效应**PACS:** 44.10.+i, 71.45.Gm, 42.79.-e, 73.20.Mf**DOI:** 10.7498/aps.68.20190476

1 引言

近二十年以来, 表面等离激元学 (plasmonics) 作为纳米光子学的一个重要分支, 在亚波长光传输^[1-3]、光学传感^[4-6]、超分辨成像^[7-9]等研究方向取得了一系列重要进展和突破. 表面等离激元 (surface plasmons, SPs) 是导体中自由电子的集体振荡, 具有显著的近场局域增强和纳米聚焦等特性, 可实现纳米尺度下的光场传输与局域^[10-12]. 在诸多表面等离激元研究工作中, 人们主要聚焦在光学特性的探索及其应用研究方面, 而系统中的热效应往往被认为是负面的, 需加以抑制. 近年来, 随着表面等离激元相关研究的逐步深化, 如何理解并有效利用表面等离激元光吸收产生的热能引起了学术界的极大兴趣^[13-15]. 一方面, 由于表面等离激元微纳结构高效的光耦合特性, 在相同的光照条件下, 微纳结构中产生的热量可达体材料的几十到上千倍, 从而在纳米尺度实现极高的温度梯度^[16-18]. 另一方面, 表面等离激元的热效应可通过材料、结

构、光源特性进行调控, 进而实现热源功率和温度分布的人工设计^[19-21]. 因此, 表面等离激元微纳结构作为纳米尺度的可控热源, 不仅在亚波长光热利用方面获得了广泛的研究兴趣, 同时还催生了一系列纳米尺度下热能和其他形式能量转换的研究. 本文从表面等离激元微纳结构光热效应的基本过程出发, 描述了表面等离激元微纳结构热产生和热传递过程的调控方式及相应的物理图像. 在此基础上, 介绍了光热效应的应用. 最后, 我们探讨了该领域存在的问题, 并对其发展前景进行了展望.

2 表面等离激元光热效应的物理过程

2.1 表面等离激元的激励及弛豫

表面等离激元的光热效应包含光吸收、载流子弛豫及热耗散过程, 理解其中的光子、电子及声子的相互作用是光热研究的关键所在. 目前关于这方面的理论主要出自于莱斯大学 Naomi J. Halas 及加州理工学院 Harry A. Atwater 等的观点. 图 1 展

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2017YFA0205800) 和国家自然科学基金 (批准号: 61875241, 11734005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tzhang@seu.edu.cn

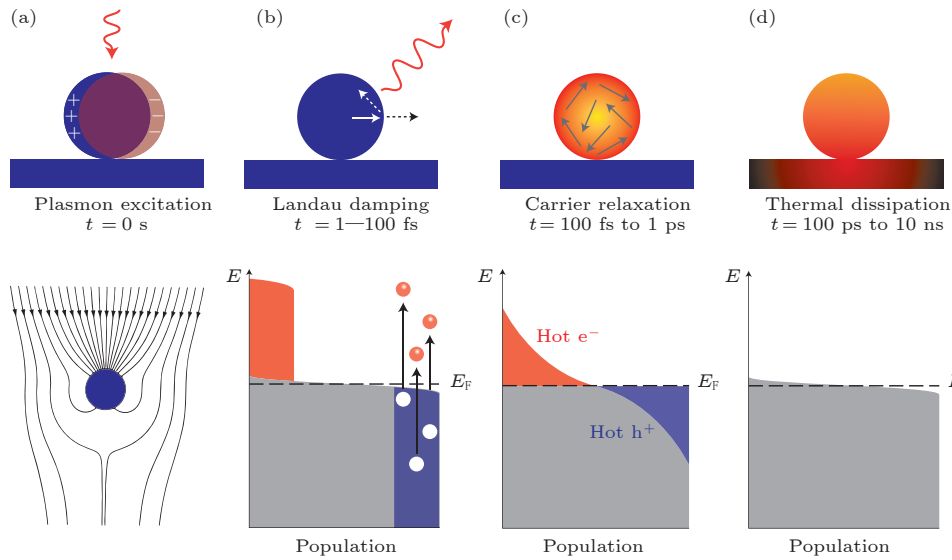


图 1 表面等离激元弛豫产生热的过程及相应时间域 (a)—(d) 分别是表面等离激元激发 ($t = 0$ s)、朗道阻尼 ($t = 1-100$ fs)、热载流子弛豫 ($t = 100$ fs—1 ps) 及热耗散的过程 ($t = 100$ ps—10 ns)^[22]

Fig. 1. Process and time scale of heat generation from SPs decaying: (a)–(d) Illustrates the process of heat generation by excitation of SPs ($t = 0$ s), Landau damping ($t = 1-100$ fs), decaying of hot carriers ($t = 100$ fs–1 ps), and final heat diffusion to surroundings ($t = 100$ ps–10 ns)^[22].

示了表面等离激元微纳结构吸收光子后在不同时间尺度下热产生的物理图像, 其具体过程如下^[22,23]: 当光入射到金属表面时, 将激发表面电子的集体振荡 (图 1(a)), 此时, 微纳结构的局域电场可增强几十到数百倍, 并强烈地吸收入射光能. 在 5—20 fs 的时间范围, 表面等离激元通过电子-电子散射、表面-电子散射及辐射阻尼的方式迅速衰退, 并在结构中激发出高能电子 (图 1(b)). 随后, 高能电子以费米速度 (约 10^6 m/s) 迅速扩散^[23], 在约 100 fs 时间内将动能再分布到整个结构的电子中, 该过程通常被认为是“非热”(non-thermal) 的. 在 100 fs 到 1 ps 的时间范围, 电子能量通过电子-电子散射过程实现再分布 (图 1(c)), 随后电子将能量转移给晶格 (约几皮秒). 最后, 在 100 ps 到 10 ns 时间, 能

量以热能的形式向周围环境介质中耗散 (图 1(d)). 表面等离激元的激发-热耗散的过程与表面等离激元弛豫产生的高能电子的产生、输运及能量转移等过程相关, 已有综述性文献对这一过程进行了充分的归纳总结^[22-25]. 我们则聚焦在表面等离激元微纳结构内部的热载流子弛豫产生热及其与周围环境之间发生热交换的过程.

2.2 表面等离激元的热产生

通过分析不同时间尺度下表面等离激元的弛豫过程, 可以看出光能向热能的转换主要依赖于表面等离激元微纳结构的局域电场增强及光吸收过程^[26-28] (见图 2(b)), 其热产生功率 Q 可通过热源密度 $q(r)$ 对微纳结构进行体积分得到:

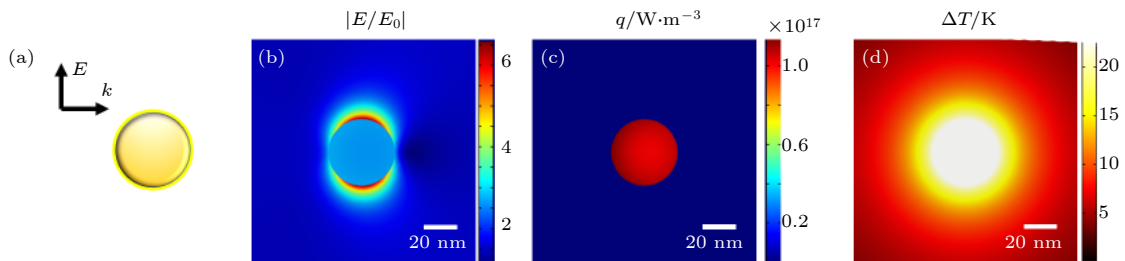


图 2 (a) 直径为 40 nm 金纳米球; (b) 金纳米球电场分布特性, (c) 金纳米球热源密度分布; (d) 金纳米球稳态条件下的温度场分布, 其中入射光波长为 525 nm

Fig. 2. (a) The gold nanosphere with a diameter of 40 nm; (b) electromagnetic distribution of the gold nanosphere, (c) thermal density distribution of the gold nanosphere; (d) steady-state temperature field distribution of the gold nanosphere (the incident light wavelength is 525 nm).

$Q = \int_V q(\mathbf{r}) d^3r = \int_V \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{J}^*(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r})] d^3r$, 其中 $\mathbf{J}(\mathbf{r})$ 是电流密度, $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 是电磁场强度, 且有 $\mathbf{J}(\mathbf{r}) = i\omega\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{P} = \varepsilon_0\varepsilon(\omega)\mathbf{E}$. 该公式可最终简化为 $q(\mathbf{r}) = \frac{\omega}{2} \text{Im}(\varepsilon(\omega))\varepsilon_0|\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2$. 可以看出, 热源密度 $q(\mathbf{r})$ 与表面等离子激元微纳结构内部电场强度的平方成正比, 当表面等离子激元微纳结构的尺度远小于入射波长时, 微纳结构内部的电场近似均匀, 因而热源密度也相对均匀 (图 2(c)).

由于金属的热导率一般远远大于周围介质的热导率^[29], 其内部产生的热能将以极短的时间扩散, 因此可近似地认定金属微纳结构中温度是均匀的 (如图 2(d) 所示). 其温度分布可表示为 $\Delta T(r) = Q/(4\pi K_m r)$, 式中 r 是距离微纳结构中心的距离, K_m 是微纳结构与周围环境 (假定其是均匀介质) 之间的热传导系数.

3 表面等离子激元热过程的调控

3.1 热产生过程调控

表面等离子激元微纳结构的总热产生量是其热源密度的函数, 且正比于其内部电场增强幅度的平方. 因而, 通过设计特殊形貌的表面等离子激元微纳结构和调节外部激励光场 (偏振、波长及脉冲宽度) 等参数, 可实现对局域电场强度及热产生过程的精确调控. Baffou 等^[30] 利用电子束光刻的方式, 在金三角板上构造了密集纳米孔洞结构 (图 3(a)), 这些孔洞结构之间表面等离子激元模式的相互耦合带来了显著的局域电场增强, 从而使得其温度提升效率相比于无孔结构提高了 40%. de Abajo 等^[31] 研究了由金纳米球组成的二聚体结构 (图 3(b)) 与入射光场偏振相关的热分布特性, 发现在特定偏振

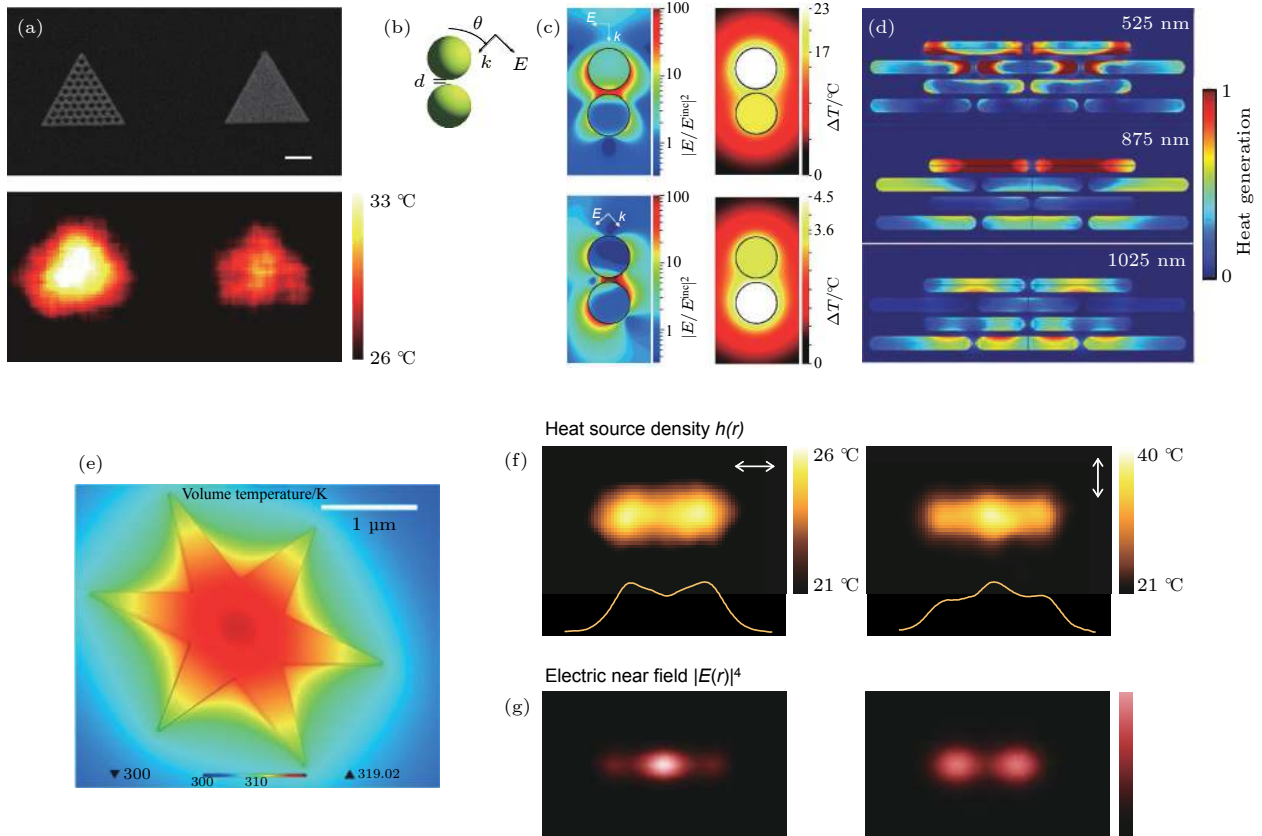


图 3 (a) 纳米光刻技术构建的多孔和无孔金三角板的热分布^[28]; (b), (c) 金纳米球二聚体结构在不同偏振下的电磁分布和对应的热分布^[29]; (d) 不同激励波长下, 叠层银纳米板的热分布^[30]; (e) 纳米星结构的热分布仿真结果^[35]; (f), (g) 金纳米棒二聚体结构的热分布及相应的局域电场分布^[28]

Fig. 3. (a) Thermal distribution of porous and non-porous gold nanoplates constructed by e-beam lithography^[28]; (b), (c) electromagnetic distribution and corresponding thermal distribution of gold nanosphere dimers under different polarizations^[29]; (d) thermal distribution of the tandem silver nanoplates at different excitation wavelengths^[30]; (e) simulation of thermal distribution of star-shaped nanostructure^[35]; (f), (g) thermal distribution and corresponding electromagnetic distribution of gold nanorod dimers^[28].

角度下, 由两个金纳米球带来的局域电场的“屏蔽效应”(shadowing effect), 可巧妙地调控任意金纳米球单元结构的局域电场, 从而获得不同的温度分布 (图 3(c)). Zhang 等 [32] 研究了不同激励波长下银纳米板三维叠层结构的热分布特性 (图 3(d) 所示). 当波长较短时, 银纳米板产生热量主要集中在表层; 而当波长较长时, 表面等离子共振发生在表层以下更深的位置, 并在该位置产生热量.

值得一提的是, 热源密度与光学“热点”(即电场强度最大处) 无必然联系 [33–36]. 这是由于热仅在表面等离子共振微纳结构内部产生, 而电场最强的位置处于表面等离子共振微纳结构与介质的界面. 例如, 在纳米星结构中 [37], 热源密度主要集中于纳米星结构的中间部分, 而不是处于纳米星的尖端处, 如图 3(e) 所示. Baffou 等 [30] 开展了类似的研究工作, 他们研究了金纳米棒组成的二聚体结构的热分布与局域电场增强的对应关系, 在两种不同的偏振条件下, 均发现局域电场增强幅度最大的位置并非具有最强的热源功率 (图 3(f) 和图 3(g)), 这是由于在介质中电流密度接近于零, 因此产生的焦耳热较小.

此外, 表面等离子共振微纳结构中的热产生还与外部激励光源的脉冲宽度相关 [38–41], 尤其是当激励光源的脉冲宽度被压缩到皮秒乃至飞秒量级以下时, 表面等离子共振微纳结构中的光吸收和晶格热化过程就不能看作是连续的. 此时, 宏观的表述连续激光与物质相互作用的热传导方程已不再适

用. 为清晰地描述这一不连续的过程, 目前广泛使用的物理模型为超短脉冲激光与物质相互作用的双温度模型 [42]. 在这一模型中, 电子和晶格声子被看作为两个相互独立的子系统, 并通过电子-电子相互碰撞、电-声相互作用以及声子-声子散射等过程在不同时间域中达到各自的热平衡. 由于超短脉冲激光在达到电-声系统热平衡 (若干皮秒到几十皮秒) 前就停止了辐照, 其带来的瞬间大量自由电子累积能够破坏微纳结构表面晶格原子的共价键, 从而促使微纳结构表面的晶格原子发生“熔融”(melting) [43]. 相比于传统的热加工方式, 超短脉冲激光直接加速了微纳结构表面原子之间相互作用的活跃度而不增加其热能, 因而可被用来实现高度局域的“非热”微纳加工 [44,45].

3.2 热传递过程调控

在表面等离子共振微纳结构中产生大量的热能以后, 如何对随后的热传递过程进行精细设计与控制, 是实现表面等离子共振光热高效利用的重要条件, 通过改变金属-介质界面的导热性能, 可以加速和减缓热的传递过程. 如图 4(a) 和图 4(b) 所示, Kohane 等 [46] 分别在金纳米壳和金纳米棒周围包裹了一层还原氧化石墨烯 (rGO), 相比于单一的表面等离子共振微纳结构和 rGO 结构, 复合结构展现出更强的光吸收能力, 另外由于 rGO 导热系数高, 因此该复合结构可实现快速热扩散. 另一方面, 为

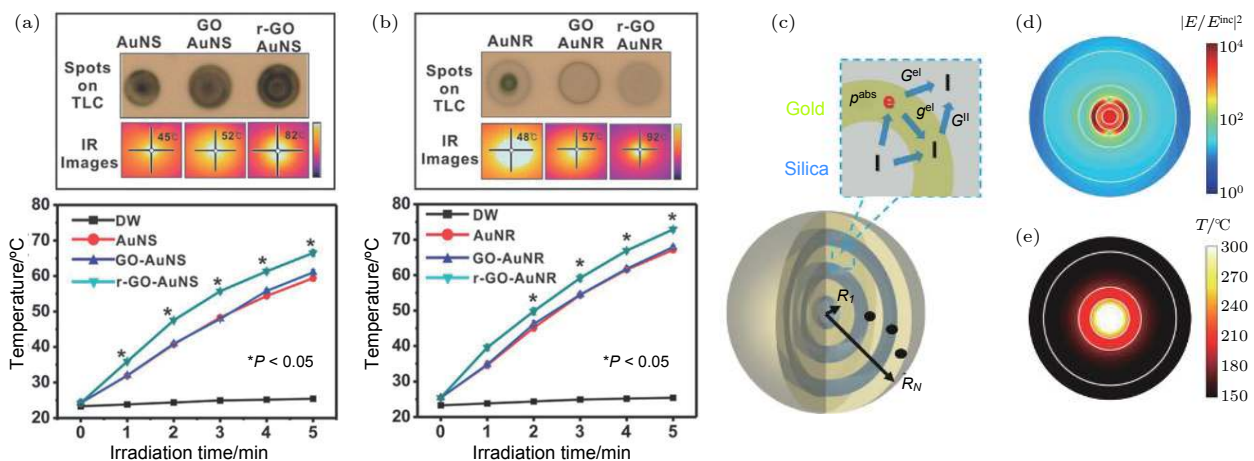


图 4 (a), (b) 金纳米壳 (棒)、金纳米壳 (棒)@氧化石墨烯 (GO) 以及金纳米壳 (棒)@还原氧化石墨烯 (rGO) 的红外温度像及不同辐照时间下温度提升速率 [46]; (c)–(e) 金@硅多层壳结构、局域电场及其温度场分布 [49]

Fig. 4. (a), (b) Infrared temperature images of gold nanoshells (nanorods), gold nanoshells (nanorods)@graphene oxide (GO), and gold nanoshells (nanorods)@reduced graphene oxide (RGO) and the temperature-rising rate under different irradiation time [46]; (c)–(e) gold@silicon multilayer shells structure and their electromagnetic distribution and temperature field distributions [49].

了实现高度的局域热效应, 选择将表面等离子激元微纳结构置于低热传导系数 K_m 的介质环境, 或者在表面等离子激元微纳结构与周围环境介质之间修饰一层“热阻”(thermal resistivity) 材料, 使得热能从表面等离子激元微纳结构内部向周围环境介质中扩散的速度减慢, 从而将热能有效地局域在狭小的空间内, 降低热损耗 [47,48]. de Abajo 等 [49] 设计了一种由金和硅交替包裹的多层壳“纳米烘箱”(nano-oven) 结构(如图 4(c) 所示). 并发现这种独特的结构具有显著的热局域效应, 这是由金属-介质之间的热“势垒”以及共振条件下表面等离子激元的近场增强引起的(图 4(d) 和图 4(e)).

4 表面等离子激元光热效应的应用

4.1 纳米焊接、塑形和组装

表面等离子激元微纳结构可作为亚波长热源, 突破传统加热方式难以局域化的瓶颈, 并具有高光热转换效率的特点, 在诸多领域都有重要的应用前景. 利用局部可控的温度场, 可在极短的时间长度下改变材料特性, 实现微纳结构的构建.

相比于传统的热焊接技术, 基于金属微纳结构光热效应的纳米焊接技术展现了独特的优势: 1) 加热“自限”效应 (self-limited) [50], 即加热效应仅仅发生在金属微纳结构的“热点”处, 且该效应随着焊接完成自动减弱, 进而终止烧结过程, 因而不会

对周围的结构造成影响; 2) “熔点降低”特性 [51–53], 相比于块体材料, 当尺寸缩小到纳米尺度的范围时, 其存在的大量高能量的自由原子使得其熔融时所需焓变远小于块体材料, 从而导致其熔点和表面熔化温度均显著降低, 使得微纳结构能够在常温下进行焊接. 在大多数的光热焊接工作中, 所选用的光源多为宽波段的连续光 [54,55]. 一些非连续光源, 如脉冲宽度短至纳秒乃至飞秒下的激光 [56–58], 可使得微纳结构仅仅在表面局域处发生连接, 不会改变其原始形态, 而这与连续光下带来的烧结现象有显著的区别.

更为特别的是, 相比于稳态条件下更为均一的热分布特性, 超快激光诱导的瞬时加热效应能够在微纳结构的光学“热点”处带来更高的温度提升, 因此, 还可用来实现微纳结构单元的“各向异性”塑形(连续激光下塑形通常是各向同性的). 图 5(a)–(c) 展示了飞秒激光对金纳米棒结构进行塑形的过程 [59], 在共振激发条件下, 纳米棒尖端处局域电场增强带来大量的电荷积累, 电子与电子之间碰撞带来的电子热效应使得纳米棒尖端相比于其他部位具有更低的热稳定性, 从而率先发生溶解, 这种塑形使得微纳结构的基本形貌得到了保证, 同时还使得响应光谱具有更窄的线宽. 图 5(d)–(f) 则展示了典型“热点”效应诱导的自组装过程 [60], 即在金纳米棒两端修饰特定热响应分子材料, 利用超快激光在纳米棒间隙“热点”产生的局部瞬时高温, 进而形成特

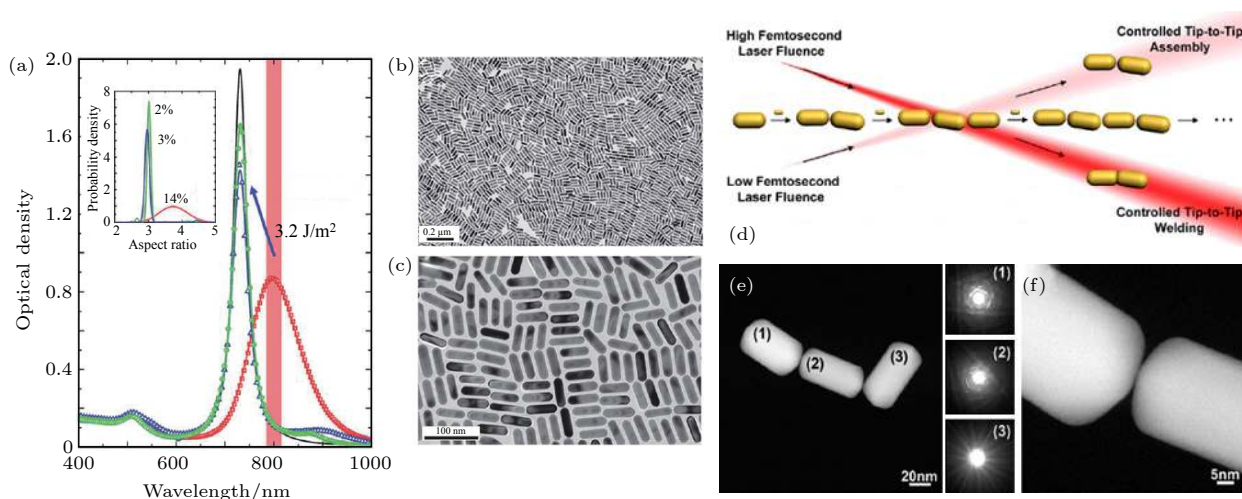


图 5 (a)–(c) 飞秒激光诱导的光热微纳结构“塑形”, (a) 光谱线宽变化及 (b), (c) 金纳米棒塑形后形貌基本保持不变 [59]; (d)–(f) “热点”自组装机制及高分辨透射电镜成像 [60]

Fig. 5. (a)–(c) The “shaping” of the nanostructure induced by femtosecond laser, (a) the spectral line width changes and (b), (c) the morphology of the gold nanorods remained basically unchanged after shaping [59]; (d)–(f) “hot spot” self-assembly process and high-resolution transmission electron microscopy imaging [60].

定排布的定向组装体.

4.2 宽谱光热转换器件

表面等离子激元微纳结构之间的光耦合和热“累加效应”(accumulation effects)^[61]拓宽了微纳结构的光吸收范围并提高了热功率,在宽光谱光热转换器件中得到了广泛的应用(如图 6(a)所示).在近期的一些报道中^[62–64]提出通过构建特定排布的表面等离子激元微纳结构和特殊的光传输通道实现太阳光谱中光-热的高效利用和转换. Zhang 等^[65]研究了一种基于二维银纳米板团簇结构的超宽谱表面等离子激元完美吸收体薄膜结构(在 400–1100 nm 范围内光吸收率接近 100%),其中纳米板的尖端结

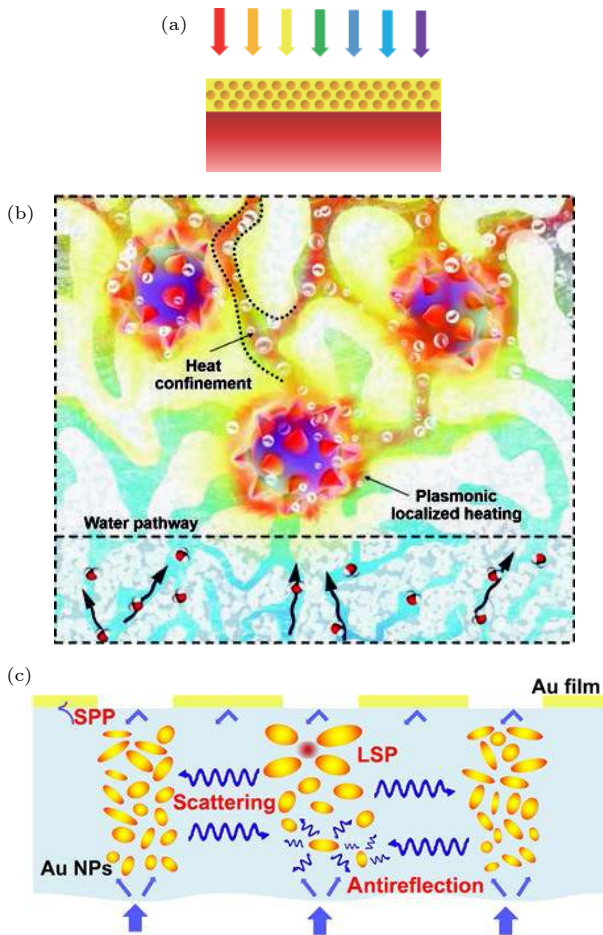


图 6 (a) 宽谱光吸收原理图; (b) 金纳米星@多孔硅复合结构的宽谱光热转换器件^[66]; (c) 金纳米球/三维多孔氧化铝复合结构的宽谱光吸收器件^[67]

Fig. 6. (a) The scheme of broad-spectrum optical absorption; (b) the broad-spectrum photothermal-conversion device of gold nanostar@porous silicon composite structure^[66]; (c) broad-spectrum optical absorption device with gold nanosphere/three-dimensional porous alumina composite structures^[67].

构以及单元微纳结构之间的耦合效应可显著提升光能的吸收. Ho 等^[66]报道了一种由金纳米星与多孔硅组成的太阳能热收集装置,能够吸收 400–1200 nm 波段的光并高效地转换成热,其中低导热性的多孔硅结构将产生的热能限制在金纳米星周围,有效地避免了与周围环境接触带来的热损耗(图 6(b)).此外, Zhu 等^[67]通过物理气相沉积技术将金纳米颗粒沉积在三维多孔氧化铝的孔道中(图 6(c)),构建了 0.4–10.0 μm 宽带的光吸收结构.

4.3 表面等离子激元热效应与其他形式能量的转换

利用表面等离子激元光热效应产生的极高温度梯度特性,光热可以进一步转换为力、电等其他形式的能量,应用于光热操控和传输领域,其中最成熟的应用是利用光-热-力能量转换作为一种新的捕获粒子机制,即通过热势阱实现操纵微小颗粒的“热镊”(如图 7(a)所示).在局部对流和热泳作用下,处于温度场中的微纳颗粒沿着温度梯度朝向或背离热源中心运动.通过优化表面等离子激元结构,利用近场增强效应改变温度分布,进而对表面张力和应力进行调控^[68].与传统光镊技术相比,基于表面等离子激元光热效应的热镊对捕获物有更大的作用力和更远的操控范围,已经用于实现纳米颗粒、DNA 及生物分子的无损捕获、聚集、定位和操纵^[69].

材料中的温度梯度不仅可以转换为力,还可以

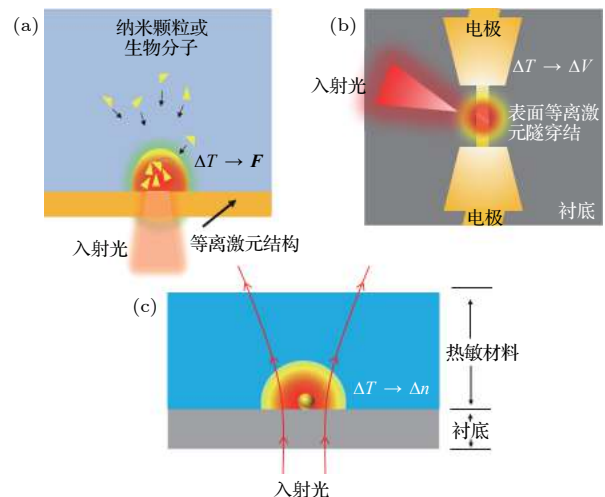


图 7 表面等离子激元诱导的 (a) 光-热-力过程, (b) 光-热-电过程及 (c) 光-热-光过程

Fig. 7. SPs induced (a) photon-thermal-mechanical process, (b) photon-thermal-electrical process and (c) photon-thermal-optical process.

产生电势差, 根据塞贝克效应 (Seebeck effect), 电势差的大小与材料塞贝克系数的差值及温差成正比^[70]. 如果温度梯度是由光激励产生, 那么材料中产生的电势差将依赖于材料的光吸收及局域产热效率. 由于表面等离子光热效应的局域温度梯度极大, 有望实现纳米尺度的高效光-热-电转换(图 7(b)), 目前已有利用金纳米线实现二维材料探测器的光-热-电响应提升的研究报道^[71], 但相关研究刚刚起步. 另一方面, 由于表面等离子纳米结构的比表面积大, 表面效应在其光电响应中扮演重要角色, 电子和声子因表面散射降低了其平均自由程, 因而微纳结构中塞贝克系数并非恒定, 有望在同一材料上实现光-热-电响应, 突破了传统概念下的材料限制^[72]. 通过构建原子尺度的隧穿结, 可显著提升表面等离子微纳结构光-热-电响应, 在 2017 年报道的一项研究中, 通过电迁移在金纳米线上形成原子级别的间隙, 进而构成隧穿结器件, 可观测到 10 mV 量级的电势差, 是单一金纳米线光-热-电响应电压的数千倍, 而其中的机理尚未明晰, 文章中推测是表面等离子结构中的光致热载流子隧穿形成的电势差提升, 为调控纳米尺度的表面等离子光热及热电子提供了重要的实验证据.

除了光热向其他能量过程的转换, 表面等离子微纳结构的光热效应还可对其他能量进行调制, 例如热光调制^[73](图 7(c)). 利用表面等离子微纳结构的亚波长纳米聚焦作用, 为实现时间及空间内光场的精细调控提供了技术手段^[74]. 除了通过改变材料折射率间接地调控光子, 表面等离子光热效应还可以调节有机荧光团的量子效率, 实现对光强的直接调节. 在较高的温度下, 荧光物质非辐射衰退通道被热激活, 这通常会导致量子效率降低, 因此可以通过引入表面等离子微纳结构控制局部荧光淬灭, 从而提高微纳成像的分辨率^[75].

5 总结和展望

本文综述了表面等离子微纳结构光热效应的研究进展, 着重介绍了表面等离子微纳结构中光-热转换的基本物理过程及调控方式, 这些研究表明表面等离子微纳结构可作为优异的热产生载体, 不仅可实现高度局域的加热, 还能作为超宽带吸收的光热转换媒介. 这种热效应还可引发一系列新的能量转换过程, 如表面等离子诱导的光-

热-力、光-热-电以及光-热-光等过程. 这些研究工作为更深入地探索光热物理本质及开发新型光电子器件开辟了崭新的途径, 具有巨大的科学意义和潜在的应用价值.

然而, 表面等离子微纳结构中的光热转换仍有很多未知问题需要探索, 未来的工作可从在以下几方面进一步拓展深入.

1) 表面等离子弛豫产热是一个复杂的过程, 其中涉及的光子、电子及声子的相互作用使得它们的模型更加错综复杂, 例如, 如何定量区分光-电和光-热贡献仍是亟待解决的关键问题^[76-78]. 此外, 目前表面等离子光热效应通常采用经典物理领域的理论模型描述, 如果结合量子光学, 有望进一步将表面等离子光热效应拓展到量子光学器件领域.

2) 目前表面等离子微纳结构热效应的表征测试大多还是对其宏观的光热效应的测试结果, 但在这些过程中表面等离子单元结构的实际温度分布是未知的, 相关的测试方法还尚未完全建立, 限制了该领域的发展. 需要研制更高时间分辨率和空间分辨率的热观测仪器, 并对表面等离子微纳结构中的热产生、传导、分布和调控加以直观表征, 深入挖掘其物理本质.

3) 目前一批更前沿的光热学科及应用方向正在兴起, 如单细胞水平的热微生物学^[79]等, 这些前沿的应用研究将进一步拓展表面等离子光热理论和应用领域. 此外, 还可以进一步通过探索新的表面等离子材料、结构及传输模式拓展其应用范围. 如在材料上, 可采用重掺杂半导体材料^[80]及类石墨烯二维材料^[81]等; 在传输模式上, 可利用基于波导结构的表面等离子极化激元^[82,83], 也为研究表面等离子光热效应内在本质的本质提供了更为丰富的材料选择.

参考文献

- [1] Ditlbacher H, Hohenau A, Wagner D, Kreibitz U, Rogers M, Hofer F, Aussenegg F R, Krenn J R 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 257403
- [2] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, Laluet J Y, Ebbesen T W 2006 *Nature* **440** 508
- [3] Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, Ma R M, Gladden C, Dai L, Bartal G, Zhang X 2009 *Nature* **461** 629
- [4] Lal S, Link S, Halas N J 2007 *Nat. Photon.* **1** 641
- [5] Tong L, Wei H, Zhang S, Xu H X 2014 *Sensors* **14** 7959
- [6] Pan D, Wei H, Gao L, Xu H X 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117**

166803

- [7] Fang N, Lee H, Sun C, Zhang X 2005 *Science* **308** 534
- [8] High A A, Devlin R C, Dibos A, Polking M, Wild D S, Perczel J, de Leon N P, Lukin M D, Park H 2015 *Nature* **522** 192
- [9] Su D, Zhang X Y, Ma Y L, Shan F, Wu J Y, Fu X C, Zhang L J, Yuan K Q, Zhang T 2018 *IEEE Photon. J.* **10** 1
- [10] Maier S A, Brongersma M L, Kik P G, Meltzer S, Requich A A G, Atwater H A 2001 *Adv. Mater.* **13** 1501
- [11] Maier S A 2006 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **12** 1214
- [12] Zhang T, Su D, Li R Z, Wang S J, Shan F, Xu J J, Zhang X Y 2016 *J. Photon. Energy* **6** 042504
- [13] Govorov A O, Richardson H H 2007 *Nano Today* **2** 30
- [14] Baffou G, Quidant R 2013 *Laser Photon. Rev.* **7** 171
- [15] Boriskina S V, Cooper T A, Zeng L, Ni G, Tong J K, Tsurimaki Y, Huang Y, Meroueh L, Mahan G, Chen G 2017 *Adv. Opt. Photon.* **9** 775
- [16] Hogan N J, Urban A S, Ayala-Orozco C, Pimpinelli A, Nordlander P, Halas N J 2014 *Nano Lett.* **14** 4640
- [17] Roxworthy B J, Bhuiya A M, Vanka S P, Toussaint Jr K C 2014 *Nat. Commun.* **5** 3173
- [18] Donner J S, Baffou G, McCloskey D, Quidant R 2011 *ACS Nano* **5** 5457
- [19] Zoric I, Zach M, Kasemo B, Langhammer C 2011 *ACS Nano* **5** 2535
- [20] Baffou G, Quidant R, Girard C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 153109
- [21] Chen X, Chen Y, Yan M, Qiu M 2012 *ACS Nano* **6** 2550
- [22] Brongersma M L, Halas N J, Nordlander P 2015 *Nat. Nanotech.* **10** 25
- [23] O'Brien K, Lanzillotti-Kimura N D, Rho J, Suchowski H, Yin X, Zhang X 2014 *Nat. Commun.* **5** 4042
- [24] Pan M Y, Li Q, Qiu M 2016 *Physics* **45** 379 (in Chinese) [潘美妍, 李强, 仇旻 2016 *物理* **45** 379]
- [25] Shan H Y, Zu S, Fang Z Y 2017 *Laser & Optoelectronics Progress* **54** 030002 (in Chinese) [单杭永, 祖帅, 方哲宇 2017 *激光与光电子学进展* **54** 030002]
- [26] Bell A P, Fairfield J A, McCarthy E K, Mills S, Boland J J, Baffou G, McCloskey D 2015 *ACS Nano* **9** 5551
- [27] Sanchot A, Baffou G, Marty R, Arbouet A, Quidant R, Girard C, Dujardin E 2012 *ACS Nano* **6** 3434
- [28] Baffou G, Berto P, Bermúdez Ureña E, Quidant R, Monneret S, Polleux J, Rigneault H 2013 *ACS Nano* **7** 6478
- [29] Liu H B, Ascencio J A, Perez-Alvarez M, Yacamán M J 2001 *Surf. Sci.* **491** 88
- [30] Baffou G, Girard C, Quidant R 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 136805
- [31] Baffou G, Quidant R, García de Abajo F J 2010 *ACS Nano* **4** 709
- [32] Li R Z, Hu A, Bridges D, Zhang T, Oake K D, Peng R, Tumuluri U, Wu Z, Feng Z 2015 *Nanoscale* **7** 7368
- [33] Khosravi Khorashad L, Besteiro L V, Wang Z, Valentin J, Govorov A O 2016 *J. Phys. Chem. C* **120** 13215
- [34] Liu Z, Li Q, Zhang W, Yang Y, Qiu M 2015 *Plasmonics* **10** 911
- [35] Metwally K, Mensah S, Baffou G 2017 *ACS Photon.* **4** 1544
- [36] Chen H, Shao L, Li Q, Wang J F 2013 *Chem. Soc. Rev.* **42** 2679
- [37] Ma H, Tian P, Pello J, Bendix P M, Oddershede L B 2014 *Nano Lett.* **14** 612
- [38] Boulais E, Lachaine R, Hatéf A, Meunier M 2013 *J. Photoch. Photobiol. C: Photochem. Rev.* **17** 26
- [39] Peng P, Hu A, Gerlich A P, Zou G, Liu L, Zhou Y N 2015 *ACS Appl. Mater. Inter.* **7** 12597
- [40] González-Rubio G, Guerrero-Martínez A, Liz-Marzán L M 2016 *Accounts Chem. Res.* **49** 678
- [41] Catone D, Ciavardini A, Di Mario L, Paladini A, Toschi F, Cartoni A, Fratoddi I, Venditti I, Alabastri A, Proietti Zaccaria R, O'Keeffe P 2018 *J. Phys. Chem. Lett.* **9** 5002
- [42] Schoenlein R W, Lin W Z, Fujimoto J G, Eesley G L 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1680
- [43] Hu A, Rybachuk M, Lu Q B, Duley W W 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 131906
- [44] Xing S, Lin L, Zou G, Liu L, Peng P, Wu A, Duley W W, Zhou Y N 2017 *Nanotechnology* **28** 405302
- [45] Li R Z, Peng R, Kihm K D, Bai S, Bridges D, Tumuluri U, Wu Z, Zhang T, Compagnini G, Feng Z, Hu A 2016 *Energy Environ. Sci.* **9** 1458
- [46] Lim D K, Barhoumi A, Wylie R G, Reznor G, Langer R S, Kohane D S 2013 *Nano Lett.* **13** 4075
- [47] Zolotavin P, Alabastri A, Nordlander P, Natelson D 2016 *ACS Nano* **10** 6972
- [48] Herzog J B, Knight M W, Natelson D 2014 *Nano Lett.* **14** 499
- [49] Meng L, Yu R, Qiu M, García de Abajo F J 2017 *ACS Nano* **11** 7915
- [50] Garnett E C, Cai W, Cha J J, Mahmood F, Conno S T, Christoforo M G, Cui Y, McGehee I M D, Brongersma M L 2012 *Nat. Mater.* **11** 241
- [51] Hu A, Guo J Y, Alarifi H, Patane G, Zhou Y, Compagnini G, Xu C X 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 153117
- [52] Marzbanrad E, Hu A, Zhao B, Zhou Y 2013 *J. Phys. Chem. C* **117** 16665
- [53] Yang C, Wong C P, Yuen M M F 2013 *J. Mater. Chem. C* **1** 4052
- [54] Zhang X Y, Xu J J, Wu J Y, Shan F, Ma X D, Chen Y Z, Zhang T 2017 *RSC Adv.* **7** 8
- [55] Yang H, Lu J, Ghosh P, Chen Z, Wang W, Ye H, Yu Q, Qiu M, Li Q 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 071108
- [56] Herrmann L O, Valev V K, Tserkezis C, Barnard J S, Kasera S, Scherman O A, Aizpurua J, Baumberg J J 2014 *Nat. Commun.* **5** 4568
- [57] Li R Z, Hu A, Zhang T, Oakes K D 2014 *ACS Appl. Mater. Inter.* **6** 21721
- [58] Fang L, Liu D, Wang Y, Li Y, Song L, Gong M, Li Y, Deng Z 2018 *Nano Lett.* **18** 7014
- [59] González-Rubio G, Díaz-Núñez P, Rivera A, Prada A, Tardajos G, González-Izquierdo J, Bñares L, Llombart P, Macdowel L G, Palafox M A, Liz-Marzán L M, Peña-Rodríguez O, Guerrero-Martínez A 2017 *Science* **358** 640
- [60] González-Rubio G, González-Izquierdo J, Bñares L, Tardajos G, Rivera A, Altantzis T, Bals S, Peña-Rodríguez O, Guerrero-Martínez A, Liz-Marzán L M 2015 *Nano Lett.* **15** 8282
- [61] Eaton S M, Zhang H, Herman P R, Yoshino F, Shah L, Bovatsek J, Arai A Y 2005 *Opt. Express* **13** 4708
- [62] Wang P 2018 *Environ. Sci.: Nano* **5** 1078
- [63] Yang M Q, Gao M, Hong M, Ho G W 2018 *Adv. Mater.* **30** 1802894
- [64] Gao M, Zhu L, Peh C K, Ho G W 2019 *Energy Environ. Sci.* **12** 841
- [65] Zhang X Y, Shan F, Zhou H L, Su D, Xue X M, Wu J Y, Chen Y Z, Zhao N, Zhang T 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 989
- [66] Gao M, Peh C K, Phan H T, Zhu L, Ho G W 2018 *Adv. Energy Mater.* **8** 1800711
- [67] Zhou L, Tan Y, Ji D, Zhu B, Zhang P, Xu J, Gan Q, Yu Z, Zhu J 2016 *Sci. Adv.* **2** e1501227

- [68] Lin L, Peng X, Wang M, Scarabelli L, Mao Z, Liz-Marzán L M, Becker M F, Zheng Y 2016 *ACS Nano* **10** 9659
- [69] Furube A, Hashimoto S 2017 *NPG Asia Mater.* **9** e454
- [70] Buscema M, Barkelid M, Zwiller V, van der Zant H S, Steele G A, Castellanos-Gomez A 2013 *Nano Lett.* **13** 358
- [71] Echtermeyer T J, Milana S, Sassi U, Eiden A, Wu M, Lidorikis E, Ferrari A C 2015 *Nano Lett.* **16** 8
- [72] Zolotavin P, Evans C, Natelson D 2017 *J. Phys. Chem. Lett.* **8** 1739
- [73] Heber A, Selmke M, Cichos F 2014 *ACS Nano* **8** 1893
- [74] Chen X, Xia Q, Cao Y, Min Q, Zhang J, Chen Z, Chen H Y, Zhu J J 2017 *Nat. Commun.* **8** 1498
- [75] Pellegrotti J V, Cortés E, Bordenave M D, Caldarola M, Kreuzer M P, Sanchez A D, Ojea I, Bragas A V, Stefani F D 2016 *ACS Sensors* **1** 1351
- [76] Kamarudheen R, Castellanos G W, Kamp L P J, Clercx H J H, Baldi A 2018 *ACS Nano* **12** 8447
- [77] Zhang X, Li X, Reish M E, Zhang D, Su N Q, Gutiérrez Y, Moreno F, Yang W, Everitt H O, Liu J 2018 *Nano Lett.* **18** 1714
- [78] Zhou L, Swearer D F, Zhang C, Robotjazi H, Zhao H, Henderson L, Dong L, Christopher P, Carter E A, Nordlander P, Halas N J 2018 *Science* **362** 69
- [79] Baffou G, Rigneault H, Marguet D, Jullien L 2014 *Nat. Methods* **11** 899
- [80] Agrawal A, Singh A, Yazdi S, Singh A, Ong G K, Bustillo K, Johns R W, Ringe E, Milliron D J 2017 *Nano Lett.* **17** 2611
- [81] Li X, Zhu J, Wei B 2016 *Chem. Soc. Rev.* **45** 3145
- [82] Bernardi M, Mustafa J, Neaton J B, Louie S G 2015 *Nat. Commun.* **6** 7044
- [83] Evans C I, Zolotavin P, Alabastri A, Yang J, Nordlander P, Natelson D 2017 *Nano Lett.* **17** 5646

SPECIAL TOPIC—Plasmon-enhanced light-matter interactions

Research progress of surface plasmons mediated photothermal effects*

Wang Shan-Jiang Su Dan Zhang Tong[†]

(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(Received 1 April 2019; revised manuscript received 5 May 2019)

Abstract

Plasmonic nanostructure can efficiently manipulate light on a subwavelength scale, which can break through the optical diffraction limit and significantly enhance the interaction between light and matter. In the study of photoelectric devices based on the plasmonic mechanism, the absorption of light in surface plasmons is usually considered as loss, which needs to be suppressed. However, based on the photothermal effect, the light absorption of plasmonic nanostructure can be effectively utilized and converted into heat. The research of this new type of nano-heat source is a hot topic in the field of plasmonics. In this paper, we review the recent progress of the study of photothermal effects of plasmonic nanostructure, focusing on the physical process of heating effects, and the methods to control the temperature distribution in both the process of heat generation and the process of delivery of heat. Finally, the applications of nano-heat source in the fields of nano-fabrication and broad-spectrum photothermal conversion are also presented.

Keywords: surface plasmons, interaction between light and matter, photothermal effect

PACS: 44.10.+i, 71.45.Gm, 42.79.-e, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.68.20190476

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0205800) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61875241, 11734005).

[†] Corresponding author. E-mail: tzhang@seu.edu.cn