

激光与光电子学进展

基于金纳米笼的被动调 Q 钬镨共掺光纤激光器

周立强^{1,2,3**}, 韦晨^{3***}, 黄华¹, 张晗^{2*}¹四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;²四川大学生物医学工程学院, 四川 成都 610065;³电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731

摘要 报道了一种基于金纳米笼可饱和吸收体的 3 μm 被动调 Q 光纤激光器。采用结构紧凑的线型腔设计, 在钬镨共掺光纤中实现了稳定的调 Q 脉冲激光运转。当泵浦功率达到 99.7 mW 时, 开始出现稳定调 Q 状态, 重复频率为 82.0 kHz。当泵浦功率达到 347.1 mW 时, 得到的最大平均输出功率为 50.7 mW, 最短脉冲宽度为 2.21 μs, 对应的重复频率为 169.5 kHz。实验结果表明, 金纳米笼在中红外波段光纤激光器中具有良好的应用前景。

关键词 激光光学; 可饱和吸收体; 光纤激光器; 被动调 Q; 金纳米笼

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2114008

Passively Q-Switched Ho³⁺/Pr³⁺ Co-Doped Fiber Laser Based on Au Nanocages Saturable Absorber

Zhou Liqiang^{1,2,3**}, Wei Chen^{3***}, Huang Hua¹, Zhang Han^{2*}¹College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;²College of Biomedical Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;³School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract A 3 μm passively Q-switched Ho³⁺/Pr³⁺ co-doped fiber laser by using Au nanocages as saturable absorber is demonstrated. Stable Q-switched pulse trains with a repetition rate of 82.0 kHz are initially obtained as the pump power increases to 99.7 mW. When the pump power increases to 347.1 mW, the largest output power of 50.7 mW with a pulse duration of 2.21 μs and a corresponding repetition rate of 169.5 kHz is obtained. This study indicates that Au nanocages have a great potential as an outstanding optical modulator for mid-infrared pulses generation.

Key words laser optics; saturable absorber; fiber laser; passively Q-switched; Au nanocages

OCIS codes 140.3480; 140.3510; 140.3540

1 引言

3 μm 中红外波段的脉冲激光在科研和工业领域均有广泛应用, 包括分子光谱学、激光手术、材料

加工、远程探测以及中红外超连续谱光源等^[1-5]。与其他中红外脉冲激光器相比, 光纤激光器具有结构灵活、能量转换率高、光束质量好和稳定性高等优点。产生 ns~μs 量级脉冲激光的方法主要有主动

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-03-06; 录用日期: 2021-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(61875033, 61775031, 61421002)、四川省科技计划资助(2020YJ0087)

通信作者: *hanz@scu.edu.cn; **zhouliqiang@stu.scu.edu.cn; ***cwei@uestc.edu.cn

调 Q、被动调 Q 以及增益调制^[6-8]。其中被动调 Q 借助可饱和吸收体(SAs)控制腔内损耗从而实现脉冲输出,具有结构精简、操作便捷等优点。现已被使用在 3 μm 波段光纤激光器的可饱和吸收体有半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[9-11]和低维材料如黑磷(BP)^[12]、石墨烯^[13]、单壁碳纳米管(SWCNTs)^[14-15]、过渡金属硫化物(TMDs)^[16]以及拓扑绝缘体(TIs)^[17-18]。SESAM 应用最为广泛,但其工作波段窄、反应时间慢、损伤阈值低且制备复杂。近年来低维材料凭借宽带非线性吸收性能以及超快恢复时间在中红外光纤激光器中得到广泛应用,但也面临着各种各样的问题。例如 BP 结构不稳定,易被氧化,石墨烯单层吸收弱,且调制深度低。SWCNTs 需要在较宽的工作波段和较高的不饱和损耗之间做出平衡,而 TMDs 和 TIs 的制备工艺复杂,限制了其在光电设备上的应用。

最近,金纳米材料凭借其宽带吸收、超快光学响应以及由区域表面等离子共振(LSPR)所引起的较高三阶非线性系数等特性吸引了研究人员的广泛关注^[19-23]。通过改变金纳米粒子的形状、大小以及内部结构等,可以调节其 LSPR 吸收峰^[24-28]。和其他金纳米材料相比,金纳米笼借助其内部镂空、外部多孔的不规则结构,以及具有吸收横截面大、光热稳定性好、损伤阈值高以及散射性能优良等优点,成为更具

潜力的中红外光纤激光器中优良的可饱和吸收体。

本文报道了金纳米笼在 2.9 μm 处的非线性吸收特性,并作为 SA 在钛镨共掺光纤激光器中产生了中心波长为 2865.4 nm 的稳定调 Q 脉冲输出。当泵浦功率为 347.1 mW 时,得到最短脉冲宽度为 2.21 μs 、重复频率为 169.5 kHz 的脉冲,其最大输出功率为 50.7 mW。

2 金纳米笼可饱和吸收体的制备及表征

实验中的金纳米笼通过银纳米立方体和氯金酸(HAuCl_4)的电流置换反应制备,由南京先丰纳米材料科技有限公司提供。制备好的金纳米笼溶于柠檬酸盐水溶液,质量密度为 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。之后将金纳米笼溶液以 2000 r/min 的转速离心分离 1 h,并取上清液滴涂于一金镜上,室温干燥 12 h 后制成金纳米笼可饱和吸收体。图 1(a)为金纳米笼的透射电子显微镜(TEM)成像。可看出金纳米笼的平均直径约为 100 nm,结构为多孔薄壁^[29-30]。这样的结构使金纳米笼拥有较快的热扩散速度、较高的热耐受性以及较高的光热稳定性^[31-32]。利用傅里叶红外吸收光谱仪(Nicolet iS50R,美国)测得金纳米笼的吸收光谱如图 1(b)所示,可看出其在 3 μm 附近有一吸收峰。这一吸收峰可能是由金纳米笼叠加形成聚集体而引起^[33-35]。

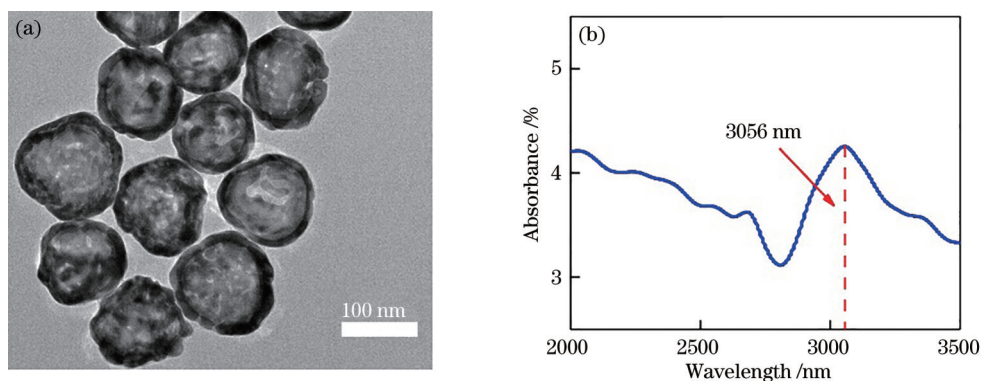


图 1 金纳米笼的测量结果。(a)金纳米笼的 TEM 图像;(b)金纳米笼吸收光谱

Fig. 1 Measurement results of Au nanocages. (a) TEM image of Au nanocages; (b) absorption spectrum of Au nanocages

利用一个以 SESAM 为可饱和吸收体、重复频率为 17.6 MHz 且脉宽为 22 ps 的 2850 nm 光纤激光器作为光源,通过平衡双臂探测法测得金纳米笼 SA 的调制深度 $\Delta T=10.83\%$,饱和强度 $I_{\text{sat}}=2.38 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,非饱和损耗 $T_{\text{ns}}=3.24\%$,如图 2 所示。结果说明,金纳米笼可用于 2.9 μm 波段的被动调 Q 激光器。

3 实验装置

图 3 为基于金纳米笼 SA 的被动调 Q 钛镨共掺氟化物(ZBLAN)光纤激光器的实验装置图。激光器的泵浦源为 1150 nm 半导体激光器(LD),其出射的泵浦光通过一个焦距为 20 mm 的平凸透镜(L1)耦合进线型腔内。采用 5.5 m 的钛镨共掺氟

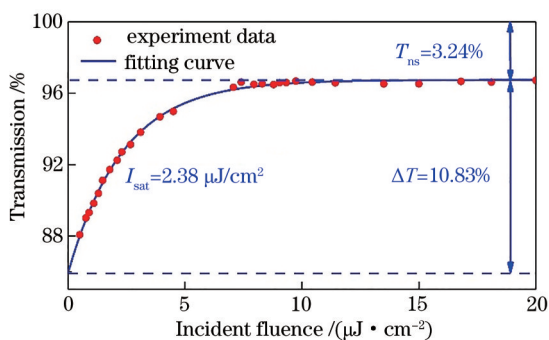


图 2 金纳米笼 SA 可饱和吸收特性

Fig. 2 Saturable absorption of Au nanocages SA

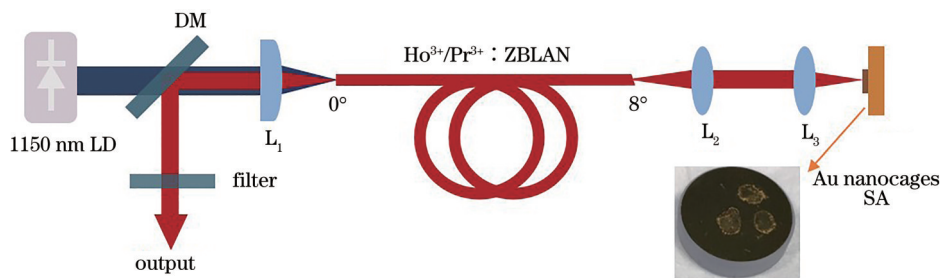


图 3 基于金纳米笼 SA 的被动调 Q 钬镨共掺 ZBLAN 光纤激光器装置图

Fig. 3 Schematic diagram of passively Q-switched Ho³⁺/Pr³⁺ co-doped ZBLAN fiber laser using Au nanocages-based SA

4 实验结果与讨论

图 4(a) 为泵浦功率为 99.7 mW 和 347.1 mW

化光纤作为增益光纤, 纤芯直径为 10 μm (NA=0.2), 包层直径为 125 μm (NA=0.5)。光纤靠近泵浦源的一端直切以作为谐振腔一端来提供反馈, 另一端 8° 角斜切以消除菲涅耳反射的影响。采用两个焦距都为 6 mm 的物镜 (L2 和 L3) 来准直并聚焦激光至金纳米笼 SA 上。通过一个在 1150 nm 处 96% 透过率且在 2.9 μm 处 98% 反射率的定制二色镜 (DM) 来控制激光输出方向, 并利用带通滤波器滤除 1150 nm 残余的泵浦光。实验采用功率计、光谱分析仪、示波器和频谱分析仪对输出激光进行测量。

时调 Q 脉冲序列图。当泵浦功率增大至 99.7 mW 时开始出现稳定调 Q 脉冲, 其重复频率为 82.0 kHz; 待泵浦功率增至 347.1 mW 时重复频率

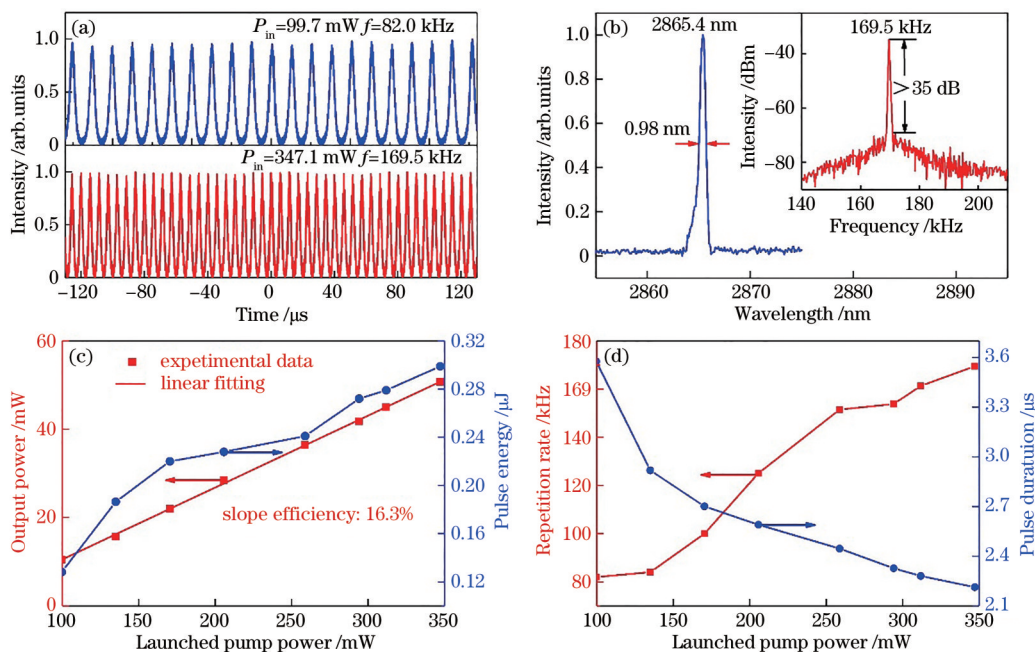


图 4 基于金纳米笼 SA 的光纤激光器性能。(a) 脉冲序列; (b) 输出光谱 (插图: 频谱); (c) 输出功率和单脉冲能量随泵浦功率的变化; (d) 脉冲重复频率和脉冲宽度随泵浦功率的变化

Fig. 4 Performance of fiber laser based on Au nanocages SA. (a) Pulse trains; (b) optical spectrum (inset: frequency spectrum); (c) output power and pulse energy versus pump power; (d) repetition rate and pulse duration versus pump power

为 169.5 kHz, 此时调 Q 脉冲开始随着功率的继续增大而逐渐不稳定。一旦泵浦功率超过 594.6 mW, 调 Q 脉冲就会消失且此时即使降低功率也无调 Q 脉冲输出, 说明金纳米笼 SA 已被过高的光热效应所损坏。图 4(b) 为泵浦功率为 347.1 mW 时的光谱和频谱。可以看出此时光谱的中心波长为 2865.4 nm, 半峰全宽为 0.98 nm; 频谱的中心频率为 169.5 kHz, 激光器的信噪比高于 35 dB, 说明此时调 Q 脉冲为稳定状态。

为了进一步得到激光器的输出特性, 测量了调 Q 光纤激光器的输出功率、单脉冲能量、脉冲重复频率和脉冲宽度随泵浦功率的变化关系, 结果如图 4(c) 和 (d) 所示。当泵浦功率从 99.7 mW 增至 347.1 mW 时, 输出功率以近似线性的方式从 10.5 mW 增至 50.7 mW, 其斜率效率为 16.3%; 单脉冲能量由 0.13 μJ 增加到 0.30 μJ ; 脉冲重复频率从 82.0 kHz 增至 169.5 kHz; 脉冲宽度由 3.58 μs 降至 2.21 μs 。实验过程中未观察到稳定的连续锁模脉冲, 这可能是由未优化的谐振腔结构所造成。此外, 金纳米笼的形状、大小、壁厚以及多孔率都会影响其光学性能^[31-32]。因此可以通过减小腔内损耗并优化金纳米笼的结构来探究光纤激光器中锁模脉冲的产生。

5 结 论

本文报道了一种基于金纳米笼的被动调 Q 铽掺共掺光纤激光器。采用电流置换反应制备金纳米笼, 并作为可饱和吸收体, 测得其在 2850 nm 处的调制深度为 10.83%, 饱和强度为 2.38 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$, 非饱和和损耗为 3.24%。当泵浦功率由 99.7 mW 增至 347.1 mW 时, 获得了中心波长为 2865.4 nm 的稳定调 Q 脉冲激光, 其输出功率从 10.5 mW 近似线性地增至 50.7 mW, 单脉冲能量由 0.13 μJ 增加到 0.30 μJ , 脉冲宽度由 3.58 μs 降至 2.21 μs , 以及对应的重复频率从 82.0 kHz 增至 169.5 kHz。实验结果证实了金纳米笼可以作为可饱和吸收体应用于 2.9 μm 波段的光纤激光器中。

参 考 文 献

- [1] Zlatanovic S, Park J S, Moro S, et al. Mid-infrared wavelength conversion in silicon waveguides using ultracompact telecom-band-derived pump source[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 561-564.
- [2] Skorczakowski M, Swiderski J, Pichola W, et al. Mid-infrared Q-switched Er: YAG laser for medical applications[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(7): 498-504.
- [3] Vogel A, Venugopalan V. Mechanisms of pulsed laser ablation of biological tissues[J]. Chemical Reviews, 2003, 103(2): 577-644.
- [4] Werle P, Slemr F, Maurer K, et al. Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 37(2/3): 101-114.
- [5] Petersen C R, Møller U, Kubat I, et al. Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4-13.3 μm molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre[J]. Nature Photonics, 2014, 8(11): 830-834.
- [6] Zhang J, Zhang D, Liu H W, et al. Actively Q-switched fiber laser with narrow linewidth, narrow pulse width, and high repetition rate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0101002.
张骥, 张东, 刘昊炜, 等. 一种窄线宽的高重复频率窄脉宽主动调 Q 光纤激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0101002.
- [7] Zhang K L, Chen H W, Lu B L, et al. Passively Q-switched erbium-doped fiber laser based on HfSe₂ saturable absorber[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1314001.
张凯龙, 陈浩伟, 陆宝乐, 等. 基于二硒化铪可饱和吸收体的被动调 Q 掺铒光纤激光器的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1314001.
- [8] Sun X, Jia D F, Li Z H, et al. Generation of square pulses in passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser with long cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0101003.
孙旭, 贾东方, 李梓豪, 等. 长腔被动锁模掺铽光纤激光器的方波脉冲产生[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0101003.
- [9] Li J, Hudson D D, Liu Y, et al. Efficient 2.87 μm fiber laser passively switched using a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3747-3749.
- [10] Li J F, Luo H Y, He Y L, et al. Semiconductor saturable absorber mirror passively Q-switched 2.97 μm fluoride fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9135: 913504.
- [11] Shen Y L, Wang Y S, Luan K P, et al. Watt-level passively Q-switched heavily Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26659.

- [12] Qin Z P, Xie G Q, Zhang H, et al. Black phosphorus as saturable absorber for the Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24713-24718.
- [13] Wei C, Zhu X S, Wang F, et al. Graphene Q-switched 2.78 μm Er³⁺-doped fluoride fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3233-3236.
- [14] Lü Y, Wei C, Zhang H, et al. Wideband tunable passively Q-switched fiber laser at 2.8 μm using a broadband carbon nanotube saturable absorber[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(1): 14-18.
- [15] Wei C, Lü Y J, Shi H X, et al. Mid-infrared Q-switched and mode-locked fiber lasers at 2.87 μm based on carbon nanotube[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(4): 1-6.
- [16] Wei C, Luo H Y, Zhang H, et al. Passively Q-switched mid-infrared fluoride fiber laser around 3 μm using a tungsten disulfide (WS₂) saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(10): 105108.
- [17] Li J F, Luo H Y, Wang L L, et al. 3 μm mid-infrared pulse generation using topological insulator as the saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3659-3662.
- [18] Tang P H, Wu M, Wang Q K, et al. 2.8 μm pulsed Er³⁺:ZBLAN fiber laser modulated by topological insulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1573-1576.
- [19] Elim H I, Yang J, Lee J Y, et al. Observation of saturable and reverse-saturable absorption at longitudinal surface plasmon resonance in gold nanorods[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(8): 083107.
- [20] de Boni L, Wood E L, Toro C, et al. Optical saturable absorption in gold nanoparticles[J]. *Plasmonics*, 2008, 3(4): 171-176.
- [21] Baida H, Mongin D, Christofilos D, et al. Ultrafast nonlinear optical response of a single gold nanorod near its surface plasmon resonance[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(5): 057402.
- [22] Olesiak-Banska J, Gordel M, Kolkowski R, et al. Third-order nonlinear optical properties of colloidal gold nanorods[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116(25): 13731-13737.
- [23] Yu Y, Fan S S, Dai H W, et al. Plasmon resonance enhanced large third-order optical nonlinearity and ultrafast optical response in Au nanobipyramids[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(6): 061903.
- [24] Huang H T, Li M, Liu P, et al. Gold nanorods as the saturable absorber for a diode-pumped nanosecond Q-switched 2 μm solid-state laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2700-2703.
- [25] Luo H Y, Kang Z, Gao Y, et al. Large aspect ratio gold nanorods (LAR-GNRs) for mid-infrared pulse generation with a tunable wavelength near 3 μm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4886-4896.
- [26] Duan W C, Nie H K, Sun X L, et al. Passively Q-switched mid-infrared laser pulse generation with gold nanospheres as a saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1179-1182.
- [27] Zhang W, Feng G Y, Dai S Y, et al. Q-switched mid-infrared Er³⁺: ZBLAN fiber laser based on gold nanocrystals[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(9): 095104.
- [28] Yang L L, Kang Z, Huang B, et al. Gold nanostars as a Q-switcher for the mid-infrared erbium-doped fluoride fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5459-5462.
- [29] Yang J P, Shen D K, Zhou L, et al. Spatially confined fabrication of core-shell gold nanocages@mesoporous silica for near-infrared controlled photothermal drug release[J]. *Chemistry of Materials*, 2013, 25(15): 3030-3037.
- [30] Tu M H, Sun T, Grattan K T V. LSPR optical fibre sensors based on hollow gold nanostructures[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 191: 37-44.
- [31] Skrabalak S E, Chen J, Au L, et al. Gold nanocages for biomedical applications[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(20): 3177-3184.
- [32] Chen J, Wiley B, Li Z Y, et al. Gold nanocages: engineering their structure for biomedical applications [J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(18): 2255-2261.
- [33] Demeritte T, Fan Z, Sinha S S, et al. Gold nanocage assemblies for selective second harmonic generation imaging of cancer cell[J]. *Chemistry - A European Journal*, 2014, 20(4): 1017-1022.
- [34] Park K, Biswas S, Kanel S, et al. Engineering the optical properties of gold nanorods: independent tuning of surface plasmon energy, extinction coefficient, and scattering cross section[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014, 118(11): 5918-5926.
- [35] Fontana J, Nita R, Charipar N, et al. Widely tunable infrared plasmonic nanoantennas using directed assembly[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(21): 1700335.