

等离激元材料和器件的动态调控研究进展

束方洲 范仁浩 王嘉楠 彭茹雯 王牧

Advances in dynamically tunable plasmonic materials and devices

Shu Fang-Zhou Fan Ren-Hao Wang Jia-Nan Peng Ru-Wen Wang Mu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 147303 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190469

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190469>

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>

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>

平面金属等离激元材料对光学Tamm态及相关激射行为的增强作用

Optical Tamm state and related lasing effect enhanced by planar plasmonic metamaterials

物理学报. 2015, 64(11): 114202 <https://doi.org/10.7498/aps.64.114202>

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>

D3h和D4h等离激元超分子的Fano共振光谱的子集合分解解释

Subgroup decomposition analyses of D3h and D4h plasmonic metamolecule Fano resonance spectrum

物理学报. 2016, 65(5): 057302 <https://doi.org/10.7498/aps.65.057302>

介质填充型二次柱面等离激元透镜的亚波长聚焦

Subwavelength light focusing using quadric cylinder surface plasmonic lens with gold film slits filled with dielectric

物理学报. 2016, 65(13): 137301 <https://doi.org/10.7498/aps.65.137301>

专题： 等离激元增强光与物质相互作用

等离激元材料和器件的动态调控研究进展*

束方洲 范仁浩 王嘉楠 彭茹雯[†] 王牧[‡]

(南京大学固体微结构物理国家重点实验室和物理学院, 南京 210093)

(2019年4月1日收到; 2019年5月23日收到修改稿)

等离激元学连接着光子学和电子学, 在光产生、显微显示、数据存储、光集成和光子芯片、传感技术和纳米制造技术等方面展示出重要应用, 极大地促进既拥有纳米电子学的尺寸又兼有介电光子学速度的新一代信息材料和器件的发展. 但是, 传统上绝大部分等离激元材料和器件都是基于静态的设计, 即一旦被制备, 其性能也就确定, 人们无法根据需求进行实时的主动调控. 因此, 近年来人们开始从应用需求出发, 致力于研制动态调控的等离激元材料和器件. 本文总结等离激元材料和器件的动态调控研究进展, 给出动态调控等离激元材料和器件的基本原理, 即通过动态改变材料中金属微纳结构的等效介电函数、动态调节系统外部环境、动态控制结构中的耦合效应等, 实现对等离激元材料和器件性能的实时动态控制. 在此基础上, 分别以等离激元材料、等离激元超构材料、等离激元超构表面等为例, 展示在电、光、力、温度、环境等外部作用下相关材料性能和器件性能的实时改变和动态控制, 期望推动发展新型亚波长光电功能材料和器件.

关键词: 等离激元材料和器件的动态调控, 等离激元超构材料, 等离激元超构表面

PACS: 73.20.Mf, 78.67.Pt, 78.67.-n

DOI: 10.7498/aps.68.20190469

1 引言

我们知道, 等离激元学将传统光学微观结构从光的波长量级压缩到亚波长尺度, 在光产生、光集成、数据存储、显微技术和纳米印刷技术等众多领域呈现出重要的应用^[1-6]. 例如, 表面等离激元具有场局域和场增强等特性, 从而等离激元材料可以应用于单分子成像^[7]、纳米激光器^[8,9]、传感器^[10,11]、纳米回路^[12-16]、非线性效应增强^[17-19]、拉曼增强^[20,21]、荧光增强^[22,23]及其他领域^[24-27]. 又如, 等离激元超构材料通过设计人工微结构来构造介电函数和磁导率的特殊空间分布, 从而可以实现负折射^[28,29]、超透镜^[30]、隐身斗篷^[31,32]、模拟引力透镜^[33]、模拟光学黑洞^[34]、完美吸收^[35,36]等效应. 再如, 等

离激元超构表面利用人工微结构来构造平面光场的振幅、相位和偏振分布, 从而实现异常反射和折射^[37]、平透镜^[38,39]、全息^[40]、光涡旋^[41]、波片^[42,43]、光自旋霍尔效应^[44]等. 目前, 等离激元学正连接着电子学和光子学, 为构筑既拥有纳米电子学的尺寸、又兼有介电光子学速度的新一代信息材料和器件提供科学原理和有效的材料体系. 但是, 传统上绝大部分等离激元材料和器件都是基于静态的设计, 即一旦被制备其性能也就确定, 人们无法根据需求进行实时的主动调控. 因此, 近年来人们开始从应用需求出发, 致力于研制动态调控的等离激元材料和器件^[45-48].

本文总结和归纳国内外关于等离激元材料和器件的动态调控研究进展, 给出动态调控等离激元材料和器件的基本原理, 即通过动态改变材料中金

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0303702) 和国家自然科学基金 (批准号: 11634005, 11674155) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: rwpeng@nju.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: muwang@nju.edu.cn

属微纳结构的等效介电函数、动态调节系统外部环境、动态控制结构中的耦合效应等,实现对等离激元材料和器件性能的实时动态控制;然后,举例说明如何利用这些原理动态调控等离激元材料、等离激元超构材料和等离激元超构表面以及相关器件;最后对等离激元材料和器件的动态调控研究做了一些讨论和展望,并对全文进行总结.

2 动态调控等离激元材料和器件的基本原理

在金属纳米结构中,表面等离激元共振与金属的介电函数直接相关.例如,对于一个孤立的球形金属纳米颗粒,局域表面等离激元共振波长为^[12]

$$\lambda_{LSP} = \lambda_p \sqrt{2\epsilon_d + 1}, \quad (1)$$

其中 λ_p 为金属的等离子体波长,与金属介电函数有关; ϵ_d 为系统所处环境的介电函数.因此,动态改变材料中金属微纳结构的等效介电函数可以实现等离激元光学器件在响应频段的动态调控.介电函数可动态调节的材料包括钇^[49]、镁^[50–54]、石墨烯^[55–64]、半导体^[65,66]、透明导电氧化物^[67,68]等.如图1(a)所示,Duan等^[51]通过镁与氢气的化学反应来动态调控等离激元纳米结构中的手性;又如图1(b)所示,Fei等^[58]实现电调控石墨烯等离激元.

由(1)式可知,在金属纳米结构中,表面等离激元共振波长与系统外部环境的介电函数(ϵ_d)也相关.因此,动态调节系统外部环境也可以实现等离激元光学器件的动态控制.周围环境介电函数可动态调节的材料包括石墨烯^[69–78]、液晶^[79–90]、透明导电氧化物^[91–99]、半导体^[100–109]、聚合物^[110–120]、锗碲^[121–133]、二氧化钒^[134–146]等.例如相变材料锗碲^[121],如图1(c)所示,其常温时为非晶相,高温时为晶相,可以实现介电函数的改变.

金属纳米结构之间相互耦合也可以影响表面等离激元的共振波长.因此,动态控制结构中的耦合效应也可实现等离激元光学器件的动态调控.结构中耦合效应的控制可以通过使用柔性衬底^[147–154]或施加力^[155–165]等方法实现.例如,Gao等^[155]通过施加外力调控纳米结构中空气间隙,实现等离激元诱导光透射的动态调控,如图1(d)所示.

综上,可以归纳出目前实现动态调控等离激元

材料和器件常采用的三种方案,即动态改变材料中金属微纳结构的等效介电函数、动态调节系统外部环境、动态控制结构中的耦合效应等.

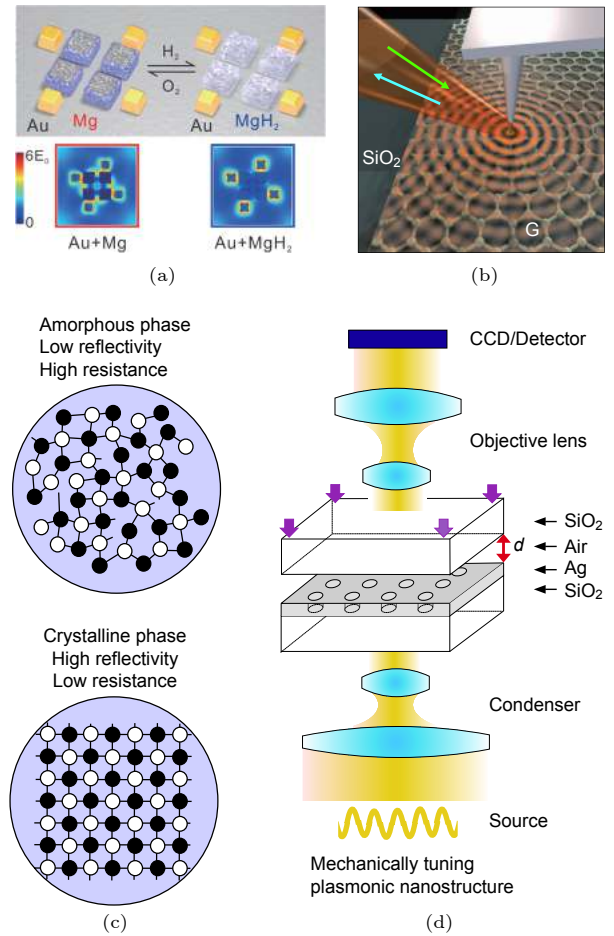


图1 动态可调等离激元材料和器件示意 (a)通过氢气调控手性光学响应的工作原理^[51]; (b)通过红外纳米成像观察石墨烯中电调控等离激元^[58]; (c)相变材料锗碲常温时为非晶相,高温时为晶相^[121]; (d)亚波长小孔后等离激元诱导的光透射动态调控^[155]

Fig. 1. Schematic of active plasmonic materials and devices: (a) Working principle of hydrogen regulation to the chiroptical response^[51]; (b) gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging^[58]; (c) GeSbTe is amorphous at room temperature, and crystalline at high temperature^[121]; (d) tunable interference of light behind sub-wavelength apertures^[155].

3 动态调控等离激元材料和器件

3.1 表面等离激元材料和相关器件

表面等离激元是电磁波与金属表面自由电子耦合而形成的一种近场电磁模式^[7–27].表面等离激元可分为传播型表面等离激元和局域型表面等离激元.传播型表面等离激元可在金属与介质界面传

播, 其垂直界面的场强呈指数衰减; 局域型表面等离子激元则局域在金属纳米结构边缘. 对于传播型表面等离子激元, 其波矢为^[12]

$$K_{\text{SPP}} = K_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}, \quad (2)$$

其中 K_0 为自由空间入射光的波矢, ϵ_m 为金属的介电函数, ϵ_d 为系统所处环境的介电函数. 由于传播型表面等离子激元的波矢与自由空间入射光的波矢不匹配, 因此需要额外的波矢补偿才能激发传播型表面等离子激元. 利用光栅耦合来激发传播型表面等离子激元是一种常用的方式. 对于正入射一维光栅耦合激发的传播型表面等离子激元, 其激发波长为^[12]

$$\lambda = \frac{P}{i} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}, \quad (3)$$

其中 P 为光栅周期, i 是正整数. 对于局域型表面等离子激元, 其激发波长与金属纳米颗粒的几何尺寸有关, 而且也依赖于金属纳米颗粒之间的耦合^[12].

对于孤立的球形金属纳米颗粒, 局域型表面等离子激元激发波长由 (1) 式确定. 由于表面等离子激元具有场局域和场增强特性, 因此可以被用于单分子成像^[7]、纳米激光器^[8,9]、传感器^[10,11]、纳米回路^[12–16]、非线性效应增强^[17–19]、拉曼增强^[20,21]、荧光增强^[22,23]及其他方面^[24–27]. 尽管人们可以通过改变几何参数来调节这些器件的光学性质, 但由于目前大部分等离子激元器件是静态不可调控的, 一旦被制备完成, 其性能也就确定了. 人们无法根据需求对其进行主动的控制. 然而在实际应用中, 人们希望这些器件的光学性质是动态可调的. 根据表面等离子激元的分类, 动态可调表面等离子激元器件可分为动态可调传播型表面等离子激元器件和动态可调局域型表面等离子激元器件.

首先, 传播型表面等离子激元可以被外场动态调控. 比如, Chen 等^[57] 使用具有红外波段近场扫描功能的近场散射显微镜发射并探测锥形石墨烯纳

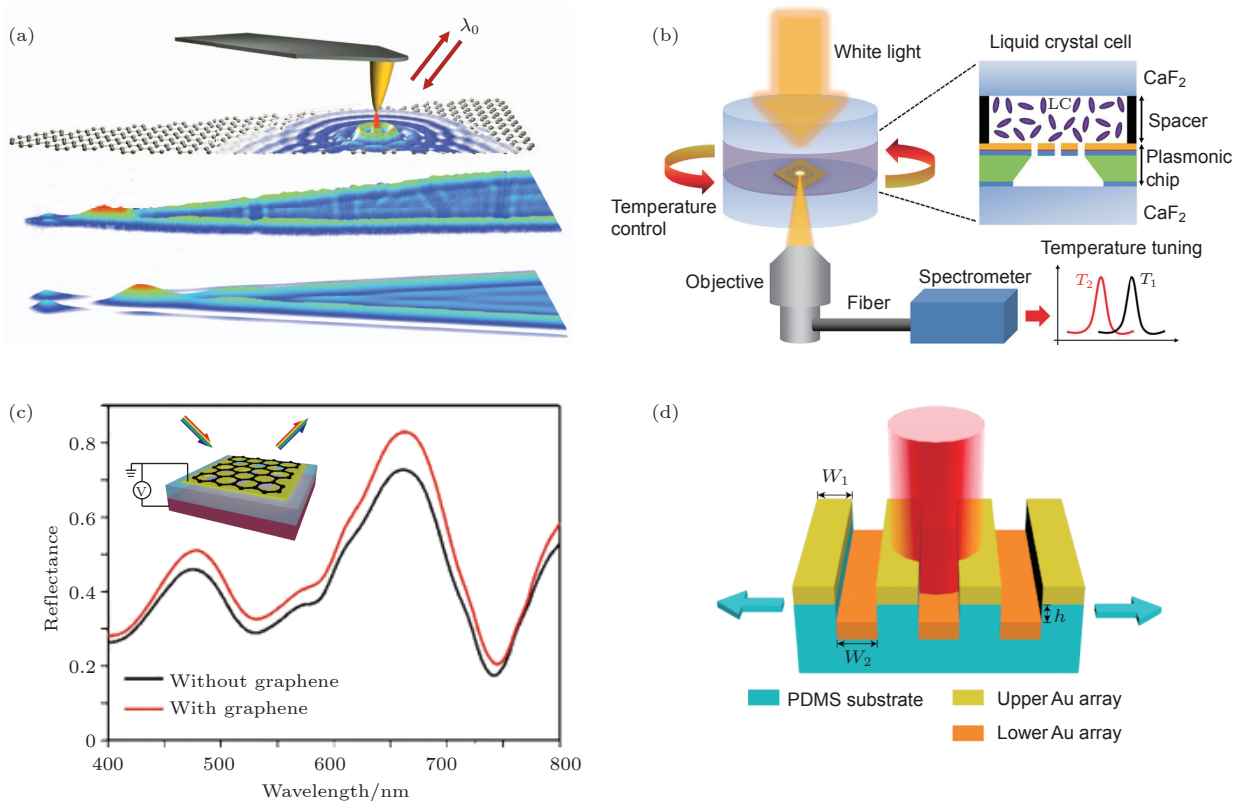


图 2 动态调节传播型表面等离子激元 (a) 通过散射扫描近场光学显微镜对传播型和局域型石墨烯等离子激元成像^[57]; (b) 利用液晶实现对表面等离子激元的热调控^[82]; (c) 通过石墨烯接触调控等离子激元波导的色散关系^[70]; (d) 用于调控表面等离子激元的平面外设计的柔性超构表面^[154]

Fig. 2. Dynamically tune propagating surface plasmons: (a) Imaging propagating and localized graphene plasmons by scattering-type scanning near-field optical microscopy^[57]; (b) thermal tuning of surface plasmon polaritons using liquid crystals^[82]; (c) tuning the dispersion relation of a plasmonic waveguide via graphene contact^[70]; (d) out-of-plane designed soft metasurface for tunable surface plasmon polariton^[154].

米结构中的传播型表面等离子激元, 如图 2(a) 所示. 他们提供了等离子激元场的空间图像, 并发现其等离子激元的波长非常短, 仅为入射波长的 $1/40$. 他们利用这种强大的光场受限将石墨烯纳米结构转变成具有极小模式体积的可调等离子激元微腔, 通过对石墨烯施加电压来调控腔共振, 实现等离子激元模式开关, 从而为基于石墨烯的光学晶体管的实现铺平了道路. Cetin 等^[82] 通过在小孔阵列上覆盖一层液晶来实现更广的光谱调节范围, 如图 2(b) 所示. 通过小孔阵列激发的表面等离子激元可以实现异常透射, 其对周围环境折射率变化非常敏感. 当温度由 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到 $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 液晶折射率的变化为 0.0317 , 其等离子激元波长移动 19 nm . 特别在相变温度附近, 温度改变 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 折射率的变化为 0.02 , 其等离子激元波长移动 12 nm . 因此, 控制液晶取向为动态调节光谱提供了一个非常有效的方案. Zhou 等^[70] 研究了石墨烯覆盖的等离子激元平板波导的色散关系, 如图 2(c) 所示. 在没有石墨烯的情况下, 光波照射纳米结构波导时, 由于表面电荷振荡和光的电磁场之间的相互作用, 表面等离子激元始终在金属介质界面处被激发; 但是在具有石墨烯的平板波导中, 石墨烯的存在可以调节波导在可见光范围内的色散关系, 而且等离子激元平板波导的色散关系可以通过石墨烯掺杂和非线性效应来调节. 该研究提供了一种在硅芯片上动态控制等离子激元波导色散关系的方法, 并有利于开发与石墨烯相关的有源光学器件. Liu 等^[154] 设计了一个具有平面外结构的软表面来调控表面等离子激元, 如图 2(d) 所示. 利用机械形变, 他们在可见光和近红外范围内实现了连续可调的等离子激元共振. 与平面参照物相比, 他们的柔性和双层超结构通过面外相互作用展现出多样的可调性和显著的场增强.

其次, 局域型表面等离子激元也可以被动态调控. 例如, Sterl 等^[50] 设计的镁纳米盘结构, 如图 3(a) 所示. 当结构暴露于氢气中时, 金属镁颗粒转化为介质二氧化镁颗粒, 并且介质二氧化镁颗粒可以在氧气存在的条件下还原为金属镁颗粒. 等离子激元纳米结构的消光光谱可以被重复地开关或保持在任意中间状态, 这为可调等离子激元超构材料提供新的视角. Abb 等^[91] 在透明导电氧化物 (ITO) 衬底上

实现了单个等离子激元纳米天线皮秒全光控制, 如图 3(b) 所示. 他们观察到天线-ITO 混合系统的皮秒响应, 这与在非导电玻璃衬底上观察到的金天线的瞬态漂白明显不同. 该现象可以通过 ITO 中自由载流子的显著非线性来解释, 其通过从金纳米天线到导电氧化物的等离子激元激发的热电子注入而增强. Ou 等^[156] 设计了一种新型的电可调等离子激元超构材料, 如图 3(c) 所示. 对等离子激元超构分子施加几伏电压后, 产生的静电力可以驱动这种超构材料. 这些皮克质量的弹簧以兆赫兹频率被驱动从而重构超构分子, 并显著改变超构材料的透射和反射光谱. Garcia 等^[67] 研究了透明导电氧化物纳米晶薄膜中局域型等离子激元, 如图 3(d) 所示, 即通过电化学调节透明导电氧化物纳米晶薄膜中电子浓度, 从而动态且可逆地调节局域型等离子激元. Jain 等^[66] 也研究了半导体硫化铜纳米棒中的局域型等离子激元, 如图 3(e) 所示. 该研究利用硫化铜的氧化还原反应动态调节局域型等离子激元: 氧化反应使得纳米棒中形成铜空位, 导致局域型等离子激元共振蓝移并且强度增加; 而还原反应使得铜空位被填充, 导致局域型等离子激元共振红移并且强度减少.

基于可动态调控的传播型等离子激元和局域型等离子激元, 人们可以构造一系列可动态调控的等离子激元器件. 接下来分别以等离子激元彩色显示、等离子激元天线和等离子激元调制器为例作一些说明.

近年来等离子激元彩色显示已经带来了彩色显示科学的变革, 这归功于其前所未有的亚波长分辨率和高密度的光数据存储^[166]. 然而, 通常等离子激元结构一旦被制备完成, 它们的光学性质也就固定了, 从而限制了其潜在的应用. 最近人们开始发展等离子激元彩色显示的动态控制. 例如, Chen 等^[52] 利用镁纳米颗粒实现了动态可调等离子激元彩色显示, 如图 4(a) 所示. 镁纳米颗粒作为动态可调的像素点, 人们通过控制其氢化和脱氢过程, 可实现动态等离子激元彩色显示. 在选择像素点进行信息编码时, 光学显微镜和扫描电子显微镜下都无法分辨, 只能通过氢气作为钥匙来解码, 这可用于新的信息加密和防伪. 又如, Xu 等^[117] 通过在金属纳米狭缝阵列上覆盖一层聚合物实现了电致变色开关, 如图 4(b) 所示. 通过改变排列周期可以实现全色

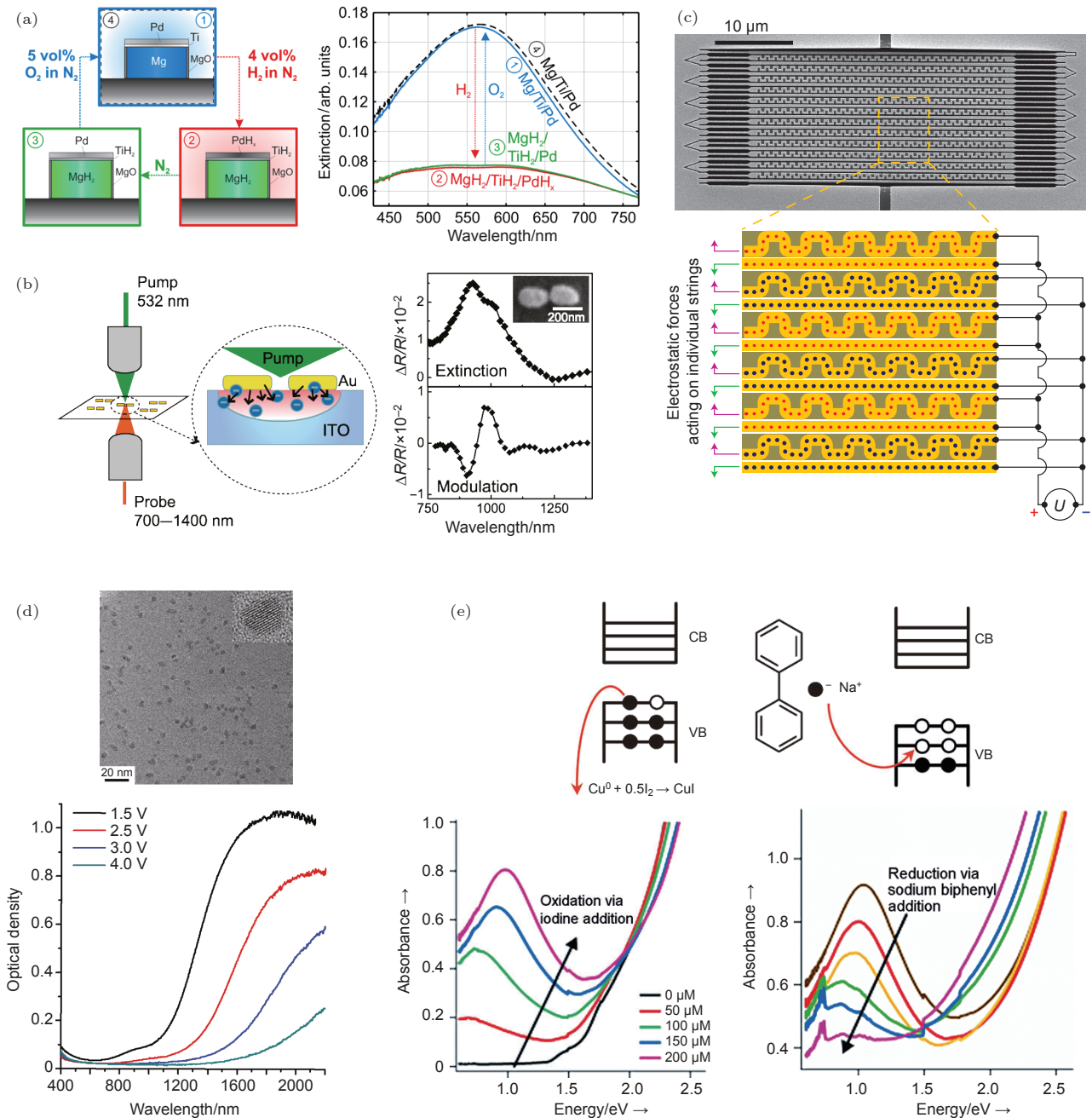


图 3 动态调控局域型表面等离子激元 (a) 借助 10 nm 的钯催化层和 5 nm 的钛缓冲剂将镁颗粒转换成氢化镁, 反之亦然^[50]; (b) 全光控制单个等离子激元纳米天线-ITO 混合结构^[91]; (c) 一种在近红外频段下工作的电力驱动可重构的等离子激元超构材料^[156]; (d) 动态调节掺杂纳米晶中表面等离子激元共振^[67]; (e) 掺杂纳米晶作为氧化还原化学反应的等离子激元探头^[66]

Fig. 3. Dynamically tune localized surface plasmons: (a) Switching of magnesium particles to magnesium hydride and vice versa with the aid of a 10 nm catalytic Pd layer and 5 nm Ti buffer^[50]; (b) all-optical control of a single plasmonic nanoantenna-ITO hybrid^[91]; (c) an electromechanically reconfigurable plasmonic metamaterial operating in the near-infrared^[156]; (d) dynamically modulating the surface plasmon resonance of doped semiconductor nanocrystals^[67]; (e) doped nanocrystals as plasmonic probes of redox chemistry^[66].

响应, 而且具有较快的开关速度和较高的对比度。再如, Shu 等^[145] 在二氧化钒薄膜上设计了银纳米盘阵列来实现动态可调色彩, 如图 4(c) 所示。银纳米盘阵列可以激发局域型表面等离子激元, 白光入射时反射光呈某种颜色。当温度改变时, 由于二氧化

钒介电函数的变化, 局域型表面等离子激元的共振波长也随之变化, 从而导致反射光的色彩改变。此外银纳米盘阵列也可以用来设计图案, 改变温度可重构图案色彩。Tseng 等^[151] 还通过将铝纳米结构阵列和柔性衬底结合实现连续调节的等离子激元色彩,

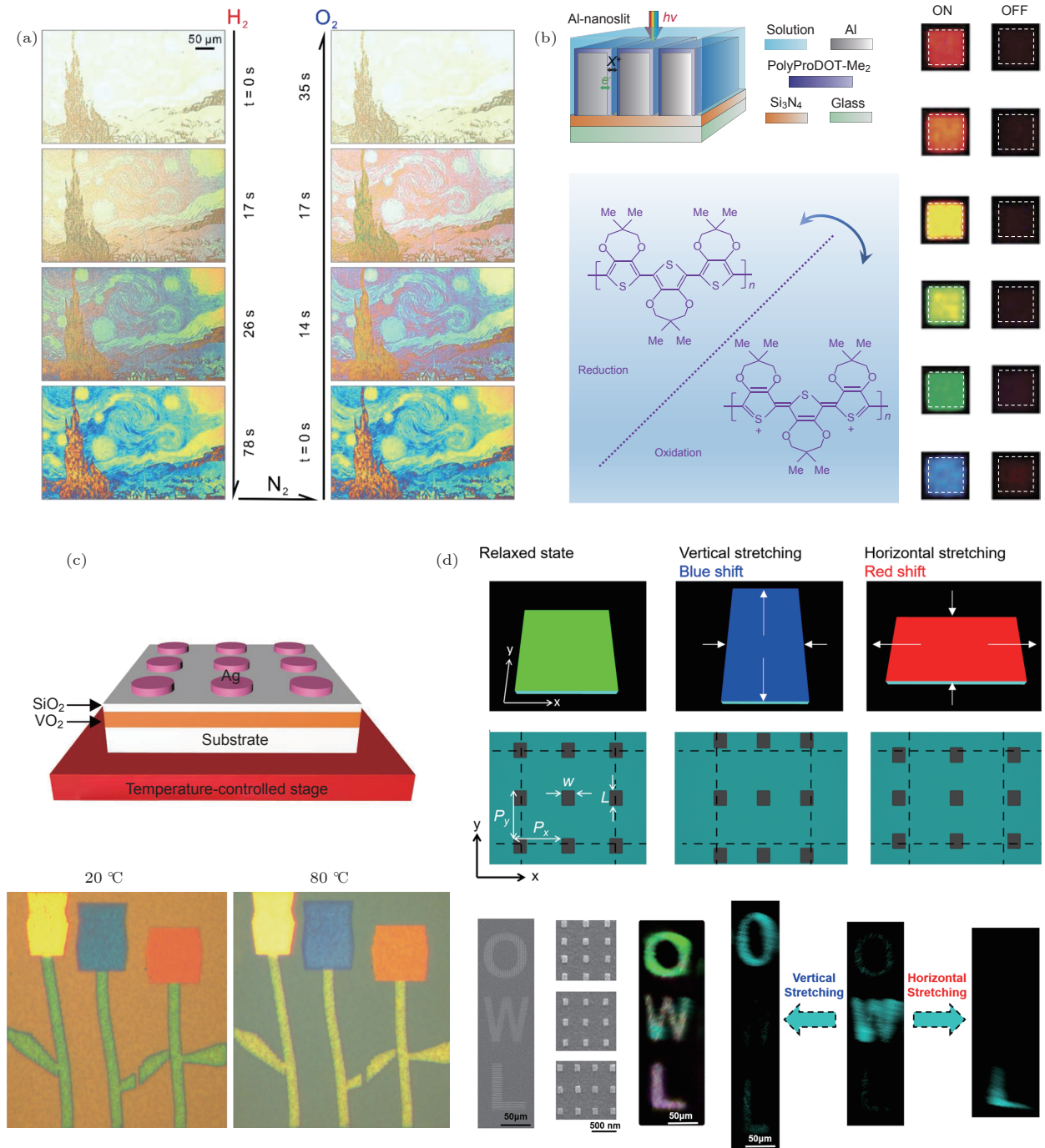


图 4 动态调控等离激元色彩 (a) 绘画作品的动态显示, 展示了黑/白显示和彩色显示之间的转换^[52]; (b) 利用液晶介电函数变化实现快速高对比度的电致变色开关^[117]; (c) 基于二氧化钒相变动态可调等离激元彩色显示^[145]; (d) 二维动态调控铝等离激元阵列实现全光谱响应^[151]

Fig. 4. Dynamically tune plasmonic colors: (a) Dynamic display of the artwork, showing transformations between black/white printing and color printing^[52]; (b) high-contrast and fast electrochromic switching enabled by the variation in permittivity of liquid crystals^[117]; (c) dynamic plasmonic color generation based on phase transition of vanadium dioxide^[145]; (d) two-dimensional active tuning of an aluminum plasmonic array for full-spectrum response^[151].

如图 4(d) 所示. 通过沿不同方向拉伸衬底, 结构散射颜色可以变化到蓝色或红色, 跨过了整个可见光谱. 他们使用不超过 35% 的应力平缓动态地调制色彩. 利用该结构也可实现图案色彩开关, 这种设

计方案有潜力为下一代柔性光学器件打开大门.

等离激元天线也有很重要的应用. 等离激元天线可以使得光由自由空间转换到亚波长尺度, 反之亦然, 这促进了人们在纳米尺度上进行光操纵^[167].

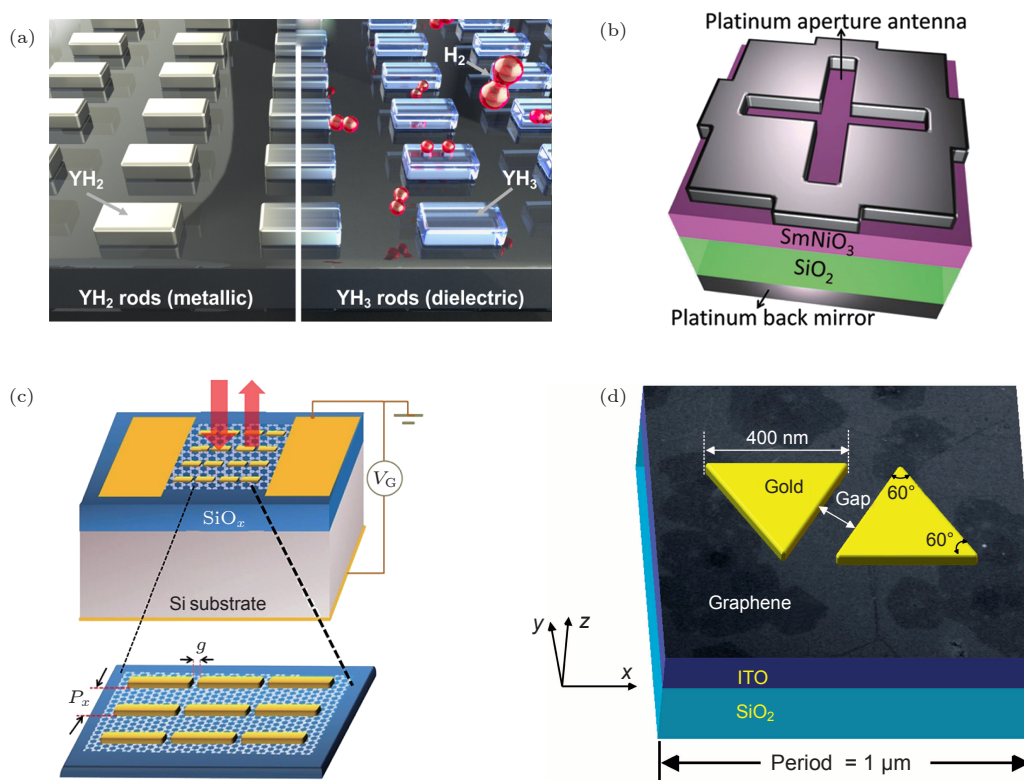


图 5 动态可调纳米天线 (a) 利用二氧化钇与氢气反应实现纳米天线开关^[49]; (b) 在 SmNiO_3 薄膜上设计等离激元超构表面实现对红外反射率的窄带调控^[168]; (c) 石墨烯复合等离激元天线的宽带电调控^[69]; (d) 超薄非线性超构表面中的动态超快可调慢光效应^[19]

Fig. 5. Active plasmonic nanoantennas: (a) Switchable nanoantennas by the interaction of yttrium dihydride with hydrogen^[49]; (b) narrowband tuning of infrared reflectivity in devices consisting of plasmonic metasurfaces patterned on SmNiO_3 thin films^[168]; (c) broad electrical tuning of graphene-loaded plasmonic antennas^[69]; (d) an actively ultrafast tunable giant slow-light effect in ultrathin nonlinear metasurfaces^[19].

在许多应用中,人们都希望动态控制天线的性质,包括生物化学传感、可重构超构表面和微型光电器件等.最近,Strohofeldt 等^[49]利用氢气可逆地调节钇纳米天线的等离激元共振,如图 5(a) 所示.氢气可导致金属相二氧化钇和绝缘体相三氯化钇之间的相变.尽管二氧化钇纳米结构表现出等离激元共振现象,但转变成三氯化钇后其共振行为完全消失. Li 等^[168]在钙钛矿 SmNiO_3 上设计铂纳米孔天线,如图 5(b) 所示.当钙钛矿处于光学透明态时,入射红外光在纳米孔天线中激发强的等离激元共振;当钙钛矿处于光学不透明态时,强的光学损耗使等离激元共振衰减较大. Yao 等^[69]通过结合金属结构和石墨烯实现电调控等离激元器件,如图 5(c) 所示.石墨烯在天线间隙作为电调控负载可以调控天线的性质,对于石墨烯加载的天线,其电调控的波长范围在中红外区域达到 650 nm 宽(共振频率的 10%),他们使用双共振天线阵列来实现中红外光强调制,最大调制深度超过 30%,带宽为 600 nm

(共振频率 8%). Lu 等^[19]在氧化锌纳米颗粒层与石墨烯之间设计金纳米天线实现强的慢光效应,如图 5(d) 所示.该超构材料中与电磁感应透明相关的等离激元模式因为光场强烈受限,使得在透明窗口群速度大大减少.泵浦光的强度只需 $1.5 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 就可以在透明窗口中心实现 120 nm 的可调波长范围,而且响应时间只需 42.3 ps.

等离激元调制器也很受人们关注.我们知道,实现芯片尺度的光连接需要高速并且高效的光调制器,但是目前使用的金属氧化物半导体 (CMOS) 调制器由于硅兼容材料中弱的非线性光学效应阻碍了其尺寸的进一步减小^[17],而等离激元学为设计高效的小型化调制器^[17]提供了思路.例如, Dicken 等^[169]在金属-介质等离激元干涉仪中通过使用电光材料钛酸钡作为介质层实现对传播型等离激元波矢的控制,如图 6(a) 所示; Kim 等^[144]利用相变材料二氧化钒来动态调控表面等离激元的传播方向,如图 6(b) 所示,即利用二氧化钒的介电

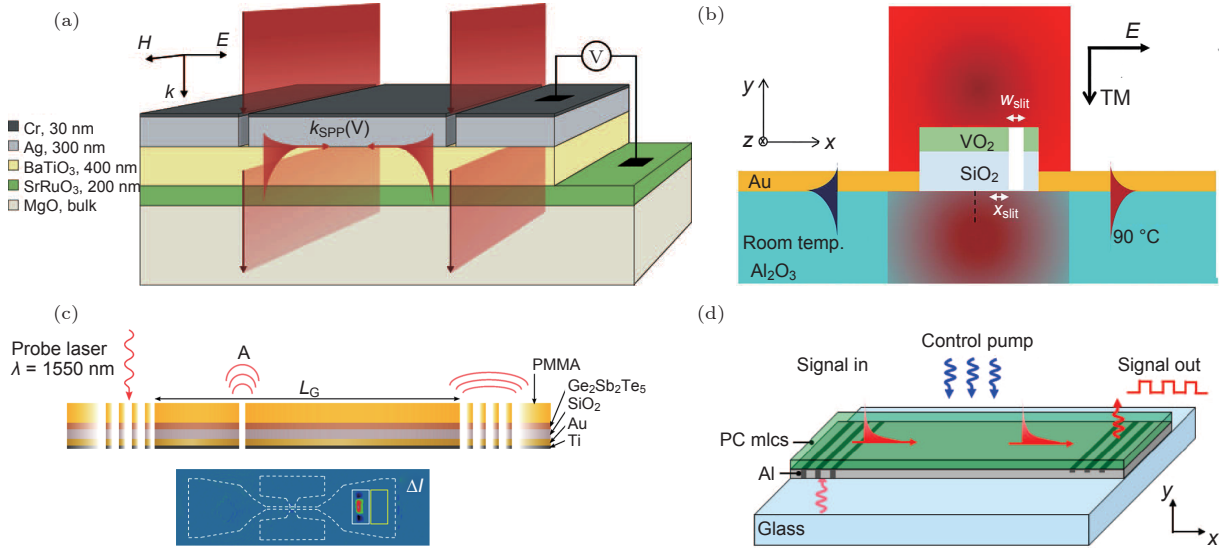


图 6 等离子体调制器 (a) 钛酸钡薄膜等离子体干涉仪中电光调制^[169]; (b) 通过二氧化钒相变调控表面等离子体传播方向^[144]; (c) 基于锗碲相变动态控制表面等离子体波导^[125]; (d) 利用光致变色分子实现非易失性等离子体开关^[111]

Fig. 6. Plasmonic modulators: (a) Electrooptic modulation in thin film barium titanate plasmonic interferometers^[169]; (b) active directional switching of surface plasmon polaritons using the phase transition of vanadium dioxide^[144]; (c) active control of surface plasmon waveguides based on the phase transition of GeSb₂Te₅^[125]; (d) a nonvolatile plasmonic switch employing photochromic molecules^[111].

函数在相变前后变化较大, 从而通过外部热激发做动态调控; Rudé等^[125]利用相变材料锗碲调控 Au/SiO₂ 界面传播型等离子体, 如图 6(c) 所示, 通过光栅耦合, 波长 1.55 μm 的垂直入射光转换成金波导中传播型表面等离子体, 该研究将脉冲激光 (波长 975 nm) 入射到处于器件顶部的锗碲薄膜, 锗碲发生相变, 即由非晶相转变为晶相, 其折射率和吸收系数都相应地增加, 从而抑制等离子体模式的传播; Pala 等^[111]还将等离子体纳米结构和光致变色分子结合, 实现表面等离子体波导的全光开关, 如图 6(d) 所示, 通过泵浦光激发, 系统中分子在透明态和吸收态之间可逆切换, 动态改变光信号实现光开关. 相关研究为研制高效的小型化调制器提供了新思路.

3.2 等离子体超构材料和相关器件

超构材料是近年来发展起来的一类人工微结构材料, 该类材料可以通过人工设计介电函数和磁导率的空间分布来实现自然界不存在的现象, 例如负折射^[28,29]、超透镜^[30]、隐身斗篷^[31,32]、模拟引力透镜^[33]、模拟光学黑洞^[34]、完美吸收^[35,36]等效应. 许多超构材料基于金属微纳结构的设计, 比如利用金属条带中电共振来设计介电函数, 利用开口环或平行金属条带中磁共振来设计磁导率. 因此, 超构

材料可以在光频及红外波段融合等离子体的部分性质, 从而成为等离子体超构材料. 但大部分等离子体超构材料一旦被制备后其性质也就确定了, 因此发展动态可调的等离子体超构材料将会大大丰富相关器件的性能及应用范围.

由于等离子体超构材料的设计核心是设计介电函数和磁导率的空间分布, 因而动态调节介电函数和磁导率是动态可调等离子体超构材料的基础. 比如, Xiao 等^[81]在可见光波段实现热调控超构材料的负磁导率, 如图 7(a) 所示. 通过在耦合金属纳米条上覆盖一层液晶, 当温度由 20 °C 增加到 50 °C 时, 超构材料中磁共振波长由 650 nm 移动到 632 nm, 从而实验证实超构材料的负磁导率波长在可见光区域的可调控特性. Cao 等^[123]在金属渔网结构中插入相变材料锗碲, 如图 7(b) 所示. 当锗碲由非晶相转变为晶相时介电函数发生较大变化, 因此渔网结构中的磁共振波长也发生较大变化, 最终整个结构的负折射率波长发生较大变化 (1300 nm), 从理论上展示了超构材料的负折射率波长在中红外区域的可调控特性.

基于等离子体超构材料可以实现许多功能性器件. 我们知道, 增强光吸收可以提高光伏、探测器和传感器等器件的性能. 最近几年利用超构材料实现完美吸收受到了广泛关注^[170]. 目前大多数基

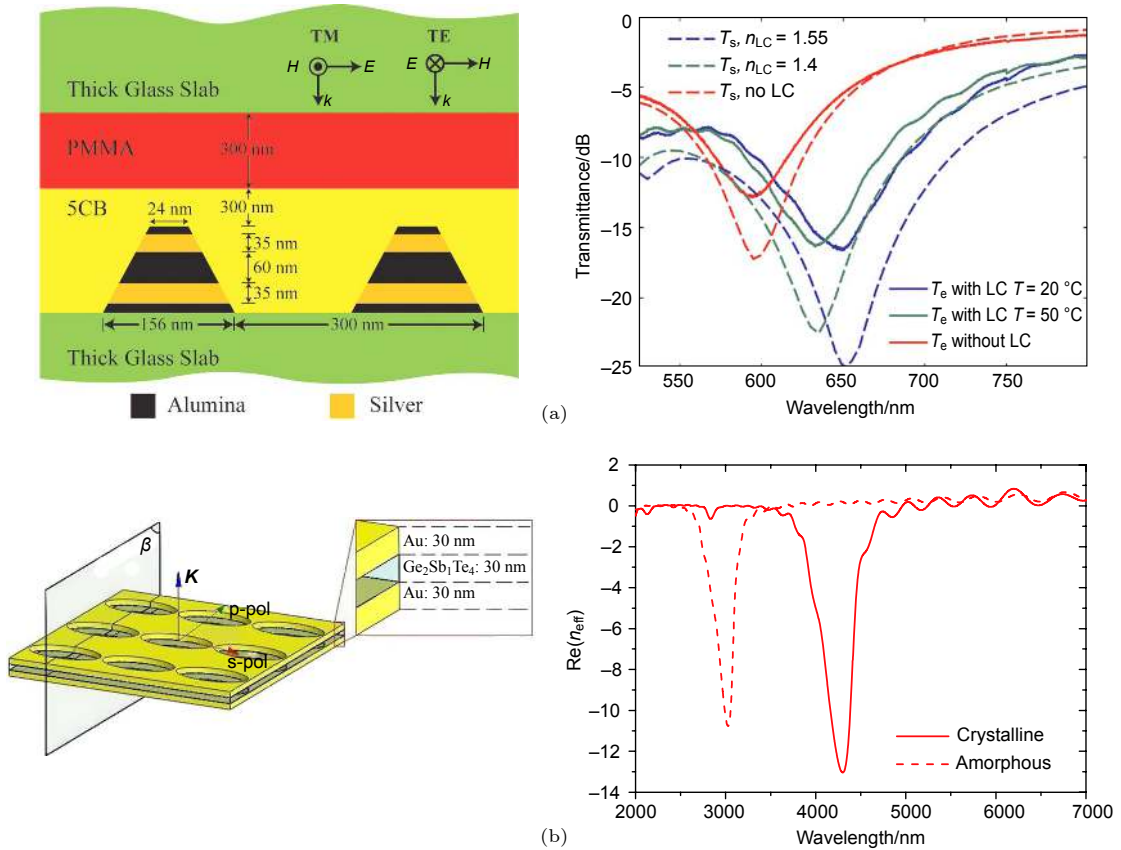


图 7 动态可调负折射率 (a) 超构材料中可调磁响应^[81]; (b) 基于相变材料可调负折射率超构材料^[123]

Fig. 7. Dynamically tunable negative refractive index: (a) Tunable magnetic response of metamaterials^[81]; (b) tunable negative index metamaterials based on phase-change materials^[123], reprinted with permission from Ref. [123] © The Optical Society.

于超构材料的吸收器件都依赖于结构中的共振效应, 因此常常只能在较窄的波段增强吸收. 发展动态可调吸收器将会扩大吸收峰的波长范围. 例如, Fang 等^[60] 设计了石墨烯纳米盘阵列实现了电调控的光吸收, 如图 8(a) 所示. 相比于石墨烯, 该结构在红外波段的吸收由不到 3% 增加到 30%, 而且吸收可以通过电压来调节, 从而实验证实电调控红外光吸收, 展示了石墨烯纳米结构在红外电光器件上可能的重要应用前景. Wang 等^[141] 利用二氧化钒相变实现超构材料吸收开关, 如图 8(b) 所示. 当二氧化钒处于绝缘体相时, 由于结构中的磁共振激发, 在波长 5 μm 附近存在完美吸收峰; 当二氧化钒处于金属相时, 由于顶部和底部金属结构短路, 磁共振不能被激发, 波长选择性吸收关闭, 理论给出了热调控中红外光吸收, 促进了可动态开关的超构材料在能源和传感领域中的应用. Qu 等^[132] 在等离激元超构材料中插入锗碲实现动态调节热辐射, 如图 8(c) 所示. 当锗碲由非晶相转变为晶相时, 典型的共振模式 (源于高阶磁共振与抗反射

共振耦合) 由 6.51 μm 移动到 9.33 μm , 实验证实了热调控中红外区域的热辐射, 为动态控制热辐射在基础科学领域和能量采集应用上铺平了道路.

利用超构材料也可以有效地控制光的偏振态. 我们知道, 光通信、激光科学、显微学和计量学对光偏振的控制有很大需求, 偏振还可用于化学和生物系统探测等. 传统上, 人们可以通过使用宏观各向异性晶体实现光的某些偏振态. 超构材料和超构表面最近已被用于制备亚波长尺度高效的被动偏振元件^[41], 但是动态控制的偏振器件到目前为止主要集中在微波和太赫兹波段. 最近, Fan 等^[161] 设计了一种三层金属光栅结构来动态调节太赫兹波的偏转态, 如图 9(a) 所示. 通过施加外力旋转这三层金属光栅, 可以将线偏振的太赫兹波旋转到任意线偏振方向, 偏振旋转主要来源于三层金属光栅中的多波干涉, 而且这样的偏振转换是宽带和高效的, 从而实验证实外部机械力可高效调控太赫兹波的偏振态, 在材料分析、无线通讯以及太赫兹成像等领域具有许多潜在的应用. 此外, Wang 等^[87] 在金属线栅和石墨烯之间插入液晶实现了可调太赫

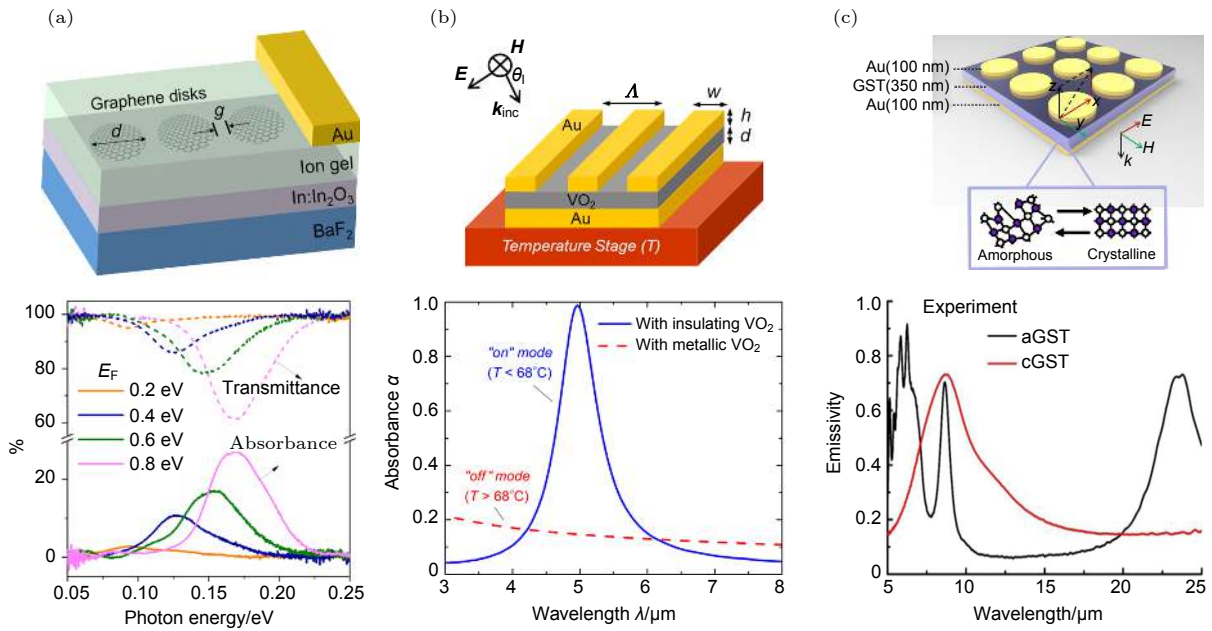


图 8 动态可调吸收 (a) 石墨烯纳米盘阵列实现动态可调吸收增强^[60]; (b) 通过相变空间层实现可开关的超材料吸收器/发射器^[141]; (c) 基于相变材料锗碲超薄膜等离子元超构材料实现动态热辐射调控^[132]
 Fig. 8. Dynamically tune optical absorption: (a) Active tunable absorption enhancement with graphene nanodisk arrays^[60]; (b) switchable wavelength-selective and diffuse metamaterial absorber/emitter with a phase transition spacer layer^[141]; (c) dynamic thermal emission control based on ultrathin plasmonic metamaterials including phase-changing material GST^[132].

兹波片, 如图 9(b) 所示. 通过堆积两组结构, 他们实现了电调控 1/4 波片, 证实在太赫兹区域电调控偏振态, 可用于发展各种基于液晶动态可调的太赫兹器件. Nicholls 等^[171] 通过设计金纳米棒阵列实现了可见光偏振全光开关, 偏振椭圆在皮秒时间可达到 60° 的旋转, 如图 9(c) 所示. 利用双曲超构材料中强各向异性和非线性效应, 通过改变控制光的强度可以调节信号光的偏振态, 而且这个效应具有普遍性, 可以在任何共振的、各向异性的、非线性的纳米天线和超构表面中实现, 适用于各种需要超快控制偏振的光学应用和材料表征技术, 实验证实在可见光区域超快调控偏振态, 将会在高分辨单分子成像、量子信息处理、以及传感等领域具有潜在的应用前景. Jia 等^[146] 将二氧化钒覆盖在各向异性的金属纳米结构上来动态调控反射光的偏振态, 如图 9(d) 所示. 当线偏振光垂直入射时, 室温下反射光偏振沿某一方向, 高温时反射光偏振沿另一方向, 从而实现了通过温度改变动态调控反射光的偏振态, 实验证实了热调控中红外光的偏振态, 将在各种光调制器、分子探测以及偏振成像等领域具有许多潜在的应用.

超构材料还可以被用来控制材料的手性. 手性是现代化学中非常重要的研究方向, 自然界分子的

手性可以通过外部激发重构分子结构来调节. 动态控制等离子元超构材料的手性有潜力成为偏振敏感成像器件和立体显示技术的关键元件^[172], 但是通常很难实现, 这是因为其涉及到超构分子的重构, 即由左手对映体到右手对映体或右手对映体到左手对映体. 最近, Zhu 等^[95] 在超构材料中实现了全光可调手性, 如图 10(a) 所示. 超构分子由两个扭曲的 L 形状纳米天线中间插入非线性透明导电氧化物构成. 在弱的泵浦光 (40 kW/cm²) 激发下, 圆二色谱中峰向短波长方向移动 45 nm, 实验证实了在近红外区域全光调控手性, 不仅为实现超低能量超快全光可调的手性创造可能, 也为构建超高速芯片集成的生物化学传感提供了一种方法. Cao 等^[127] 通过设计非手性相变超构材料在中红外区域实现超快调节圆二色性, 如图 10(b) 所示. 该结构在斜入射时表现出强手性, 并且通过锗碲在非晶相和晶相切换在中红外区域实现宽的可调波长范围, 从理论上给出在中红外区域调控圆二色性的共振频率, 将会在超薄偏振旋转器、调制器和圆偏振器等有许多应用. DNA 已被证明是构建复杂的三维机构功能最多并且稳定的堆积块之一. Kuzyk 等^[163] 设计了一种可重构三维等离子元的超构分子, 在纳米尺度实现了 DNA 调制的构象变化, 如图 10(c)

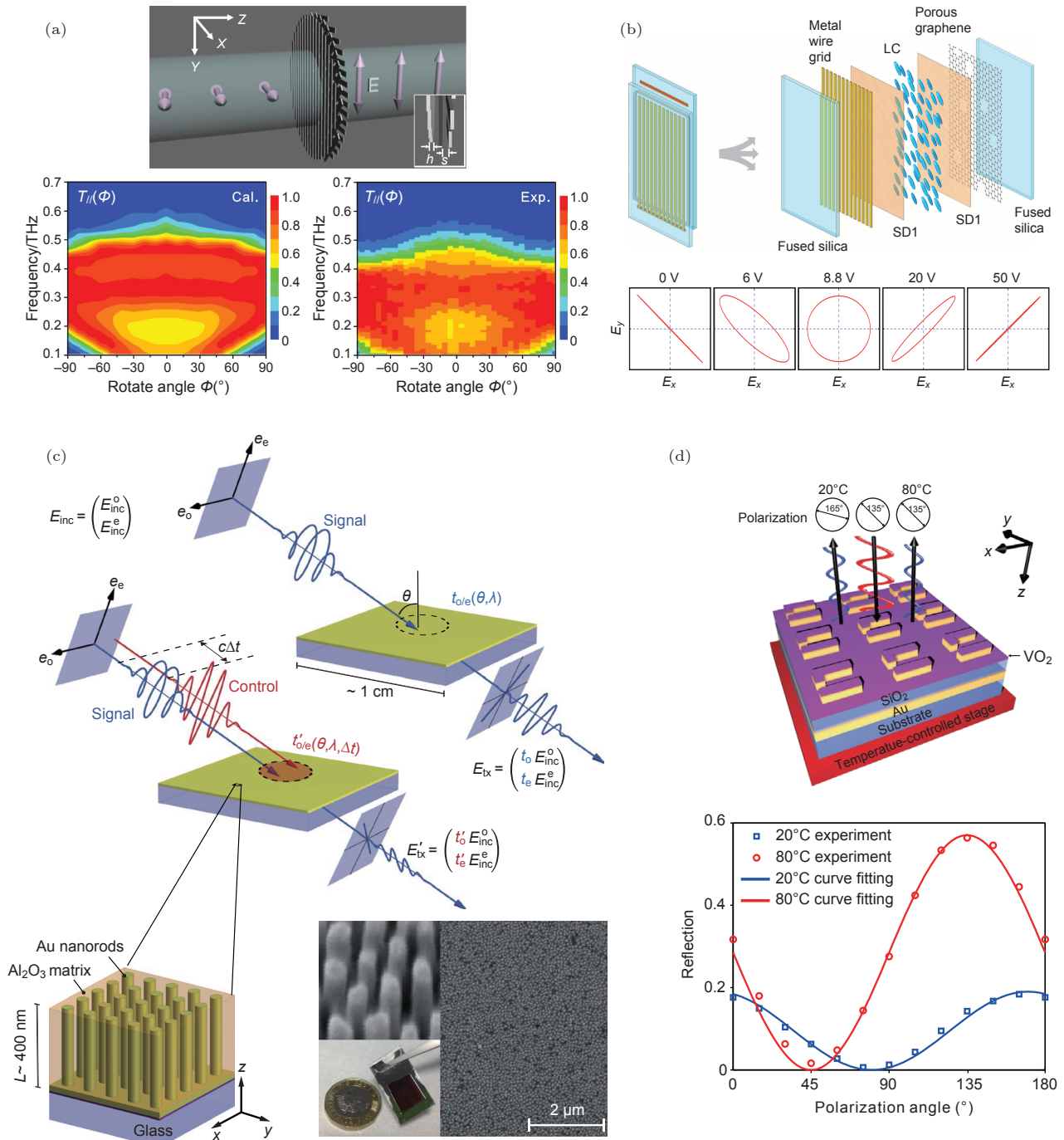


图 9 动态可调偏振态 (a) 自由可调宽带太赫兹波偏振旋转器^[161]; (b) 石墨烯电极驱动的宽带可调液晶太赫兹波片^[87]; (c) 非线性各向异性超构材料实现超快产生与转换光的偏振态^[171]; (d) 利用二氧化钒相变动态转换光的偏振态^[146]

Fig. 9. Dynamically tune the polarization states of light: (a) Feely tunable broadband polarization rotator for terahertz waves^[161]; (b) broadband tunable liquid crystal terahertz waveplates driven with porous graphene electrodes^[87]; (c) ultrafast synthesis and switching of light polarization in nonlinear anisotropic metamaterials^[171]; (d) dynamically switching the polarization state of light based on the phase transition of vanadium dioxide^[146].

所示. DNA 既充当组成材料来组装三维等离激元纳米颗粒, 同时也作为燃料激发超构分子到不同的构象态. 当两个金纳米棒按照某一角度堆积时, 呈现某一种手性; 按另一角度堆积时, 呈现另一种手性, 证实在可见光区域动态调控手性, 将会在生物

化学和生命科学等领域有重要的应用.

3.3 等离激元超构表面和相关器件

超构表面是通过在二维平面上设计微纳结构, 实现对平面内光场振幅、相位和偏振的分布进行人

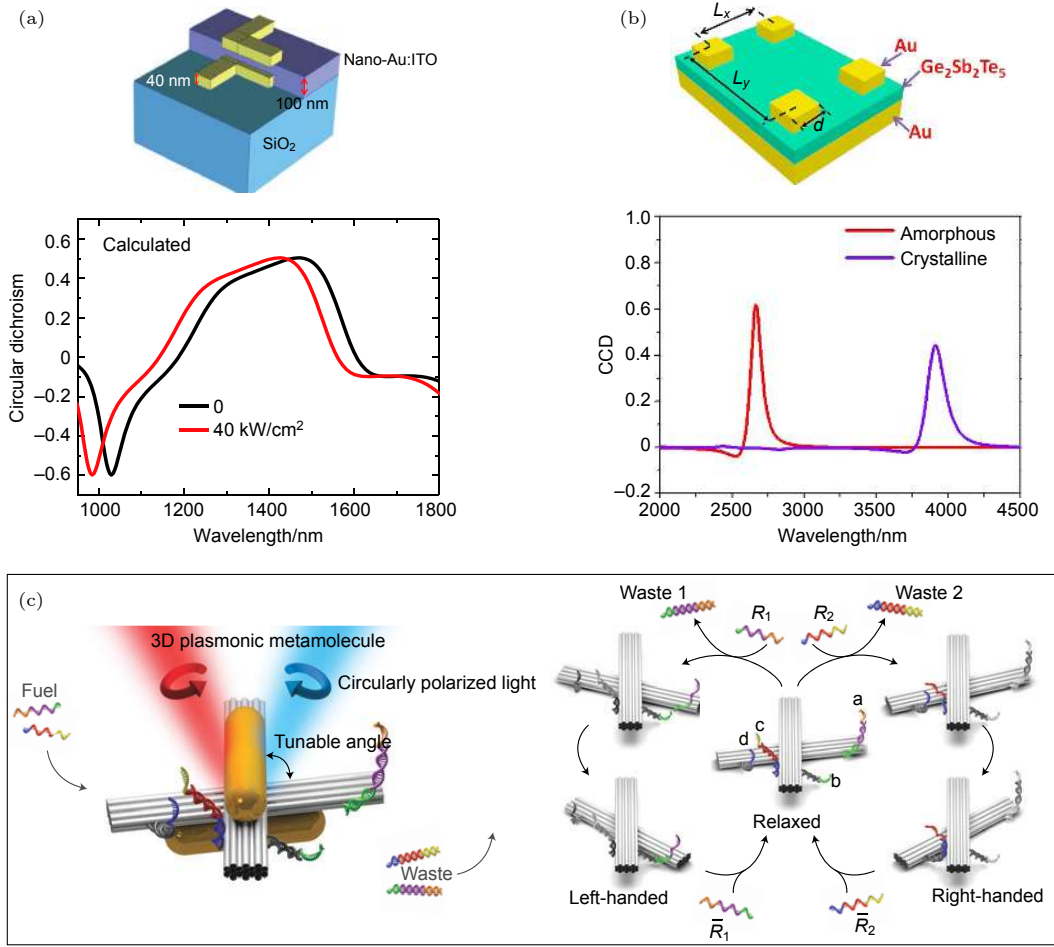


图 10 动态可调手性 (a) 动态调控非线性超构材料中手性^[95]; (b) 非手性相变超构材料实现超快调节圆二色性^[127]; (c) 可重构的三维等离激元超构分子^[163]

Fig. 10. Dynamically tunable chirality: (a) Active control of chirality in nonlinear metamaterials^[95]; (b) achiral phase change metamaterials for ultrafast tuning of giant circular conversion dichroism^[127]; (c) reconfigurable 3D plasmonic metamolecules^[163].

工设计的二维及准二维的光学器件, 可以具有异常反射和折射^[37]、平透镜^[38,39]、全息^[40]、光涡旋^[41]、波片^[42,43]、光自旋霍尔效应^[44]等特性. 在光频及红外波段, 超构表面通常采用金属纳米结构, 通过金属纳米结构中局域表面等离激元共振来设计平面内光场振幅、相位和偏振分布. 超构表面由于融合了等离激元的部分性质从而通常被称为等离激元超构表面. 然而, 大部分等离激元超构表面一旦被制备完成, 其性质也就确定了, 因此发展动态可调的等离激元超构表面将会大大丰富相关器件的性能以及应用范围.

我们知道, 等离激元超构表面可以实现异常反射和折射, 这些功能的实现需要在一个周期单元里设计一系列纳米结构. 这些纳米结构反射光或透射光的振幅和偏振相同, 而相位按一定梯度分布. 其异常反射角为^[41]

$$\theta_t = \arcsin \left(\sin \theta_i + \frac{1}{n_i k_0} \frac{d\varphi}{dx} \right), \quad (4)$$

而异常折射角为^[41]

$$\theta_t = \arcsin \left(\frac{n_i}{n_t} \sin \theta_i + \frac{1}{n_t k_0} \frac{d\varphi}{dx} \right), \quad (5)$$

其中 θ_i 为入射角, n_i 为入射光区域介质折射率, n_t 为折射光区域介质折射率, k_0 为入射光波矢, $d\varphi/dx$ 为相位梯度^[41]. 为了实现动态可调的异常反射和折射, 需要设计动态可调的相位梯度. 最近, Zou 等^[124]设计了一种基于相变材料(锗碲碲)的可调反射阵列, 实现了在一个光源和两个接收器之间的动态光学连接, 如图 11(a) 所示. 通过在锗碲碲的两个态之间切换, 该反射阵列可以在两个接收器中切换光学连接. 他们在可调反射阵列中使用两种天线实现完全控制反射光的波前, 并在光通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 实现光束方向控制, 从而理论给出了在

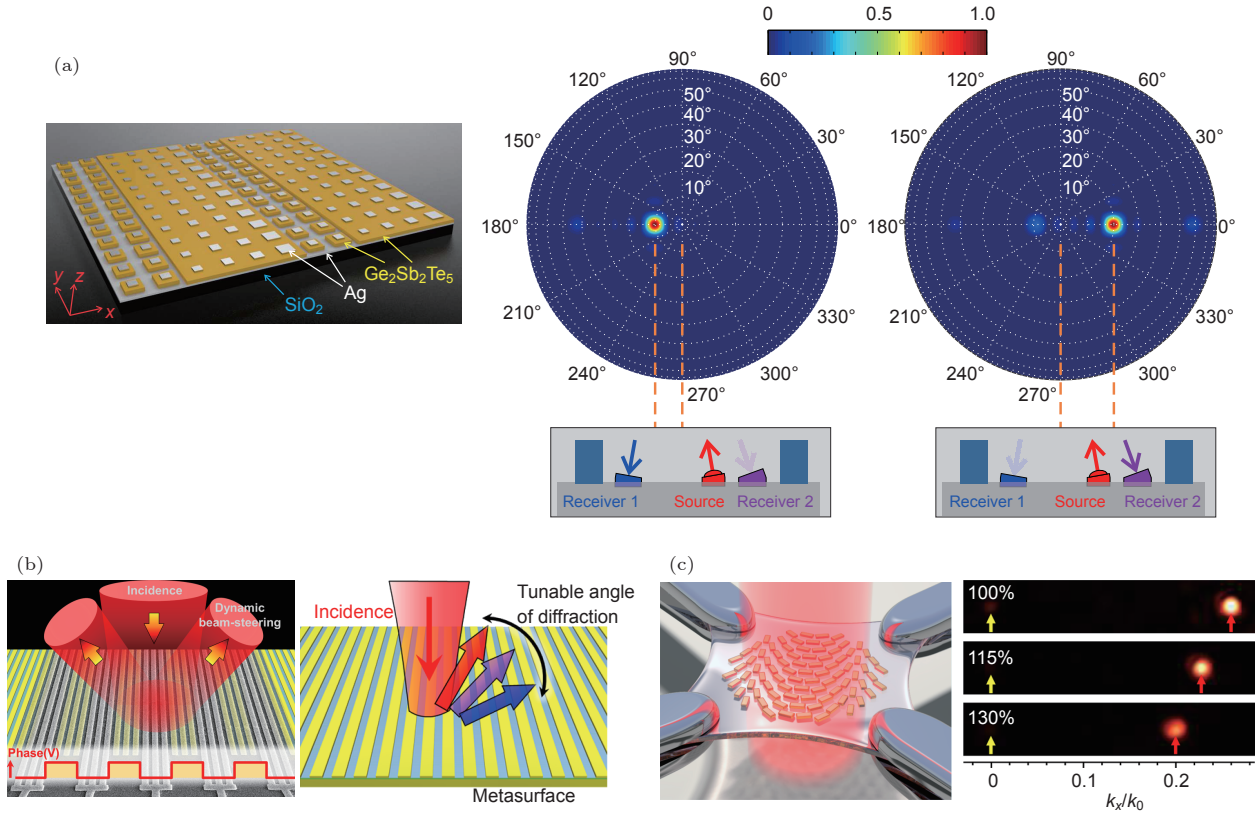


图 11 动态可调异常反射和折射 (a) 基于相变材料的可调反射阵列^[124]; (b) 电调控导电氧化物超构表面^[97]; (c) 可拉伸衬底上的可调超构表面^[148]

Fig. 11. Dynamically tunable anomaly reflection and refraction: (a) Phase change material based tunable reflectarray^[124], reprinted with permission from Ref.[124] © The Optical Society; (b) gate-tunable conducting oxide metasurfaces^[97]; (c) tunable metasurface on a stretchable substrate^[148].

近红外区域调控反射方向, 为基于相变材料光学天线和天线阵列实现动态光学开关和路由创造了可能. Huang 等^[97] 设计了电调控超构表面能够电控制反射平面波的相位和振幅, 如图 11(b) 所示. 他们利用场效应调制透明导电氧化物的复折射率实现可调功能. 通过电控制超构表面的结构单元可以调节衍射光的方向, 从而实验证实了电调控近红外光的衍射方向, 为超薄光学器件在成像和传感技术上的应用铺平了道路. Ee 等^[148] 将金纳米棒阵列构造在可拉伸的聚合物衬底上, 如图 11(c) 所示. 通过对超构表面的机械拉伸可以改变结构的排列周期, 从而在可见光频率范围连续调节波前方向: 衬底的拉伸导致波长为 632.8 nm 的光的异常折射角由 11.4° 变化到 14.9°, 实验证实了机械力调控可见光的折射方向, 将会在信息技术、集成光学和光通信等有许多应用.

平透镜也是超构表面的一个重要应用. 为了实现平透镜, 超构表面空间相位分布需要满足^[152]

$$\varphi = \pm k \left(\sqrt{r^2 + f^2} - f \right), \quad (6)$$

其中 k 为波矢, r 为径向位置, f 为焦距^[152]. 为了实现动态可调平透镜, 需要动态调节相位分布. 近年来, Wang 等^[74] 将超构表面和石墨烯结合实现了中红外动态可调的透镜. 通过调节石墨烯上门电压, 可以动态控制透镜的焦距, 从理论上提出电调控中红外光的聚焦透镜, 将会在三维光学成像、探测和传感等有许多应用. Yu 等^[142] 通过设计金和二氧化钒纳米圆环结构实现中红外焦距可调的等离激元透镜, 如图 12(a) 所示. 当用径向偏振光照射时, 通过改变温度可以在近场和远场之间动态调节完美圆对称焦点, 而且总是可以在超越衍射极限下被聚焦, 从理论上提出热调控中红外光的聚焦透镜, 将会在光数据存储、超分辨成像和微型光学器件等领域有重要的应用. Chen 等^[126] 在光栅狭缝中填充锗碲实现可调的透镜, 如图 12(b) 所示. 通过改变锗碲的结晶程度, 每个狭缝的共振波长会发生变化, 导致波长 1.55 μm 的电磁波相位调制

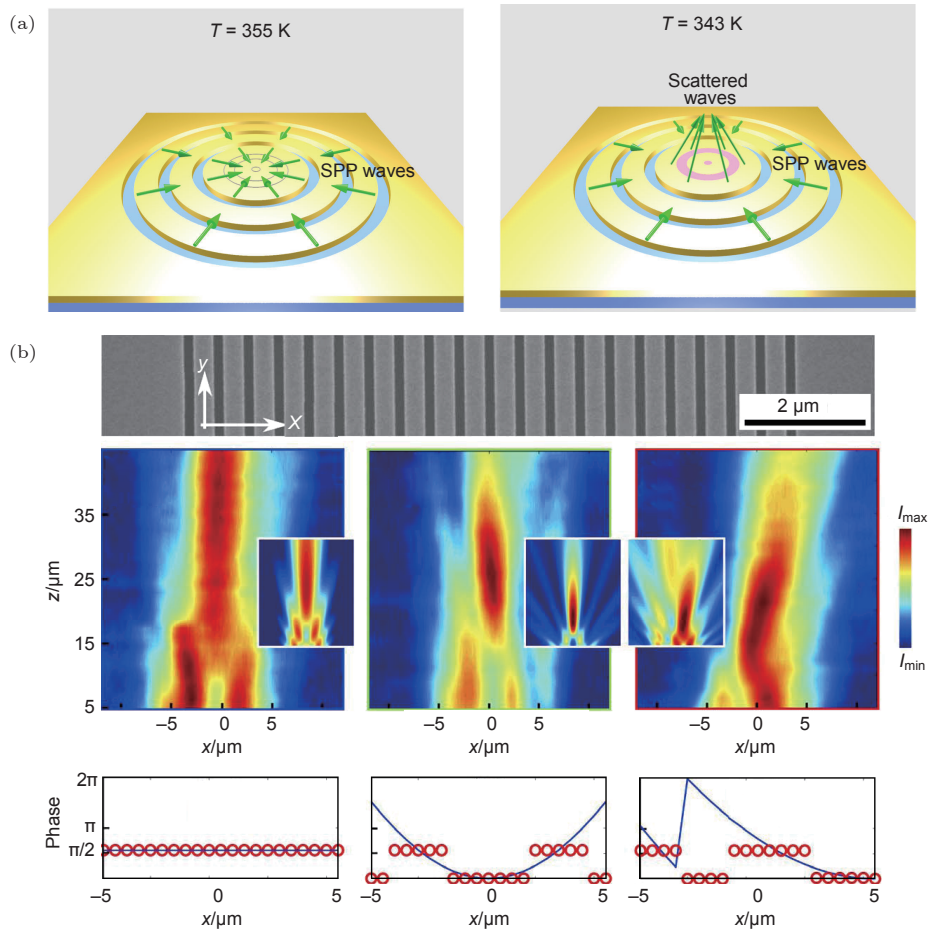


图 12 动态可调透镜 (a) 基于径向偏振光照射的复合纳米环的在近场和远场之间的动态可调的等离子激元透镜^[142]; (b) 基于相变材料的平面透镜调控光的相前^[126]

Fig. 12. Active plasmonic metalenses: (a) dynamically tunable plasmonic lens between the near and far fields based on composite nanorings illuminated with radially polarized light^[142]; (b) engineering the phase front of light with phase-change material based planar lenses^[126].

高达 0.56π 。基于该几何固定的平台, 通过控制每个狭缝中锗碲碲的结晶程度来构建不同的相前, 可以实现各种远程聚焦图案, 在实验上证实了近红外区域光调控透镜, 将会在光学回路和成像上有重要的应用。

利用超构表面也可以有效地调控光的偏振态。相比于超构材料, 超构表面的厚度更薄且易于集成。例如, Cheng 等^[59] 通过将石墨烯设计成 L 形状纳米结构实现中红外波长可调的宽带偏振转换, 如图 13(a) 所示。该结构可以将线偏振光旋转 90° , 而且通过改变石墨烯的费米能级可以动态调节偏振转换实现宽带效应。该工作理论证实了电调控中红外光的偏振态, 将会在光学、分析化学、分子生物学等领域有重要的应用。而且 Ren 等^[119] 提出新的光重构混合超构表面, 实现了在可见光频率下的偏振调节, 如图 13(b) 所示。他们通过光激发开关

等离子激元模式和乙醛红开关层中双同质异构态的耦合条件实现调节功能, 通过 $4\ \text{mW}$ 光能量实现透射偏振方位角变化超过 20° , 实验证实了在可见光区域全光调控偏振态, 将为微型化偏振调制器件、光显示器件以及编码器等应用带来突破。

超构表面的另一个重要应用是发展全息技术。传统的多像素超构表面通过控制入射光的偏振可以产生不同的全息图案。但是, 人们通过扫描入射光的偏振很容易解密全息图案。这阻碍了超构表面全息在数据安全和光信息加密等方面的应用。最近 Yu 等^[54] 利用 Janus 超构表面实现了可动态调控的全息, 解决了上述难题, 如图 14(a) 所示。他们使用两组像素点设计相位分布实现两种不同的全息图案, 加氢气前后样品产生不同的全息图案, 加密信息不能通过扫描入射光的偏振态来破解, 氢气成为解码关键。该工作在实验上证实了在可见光区

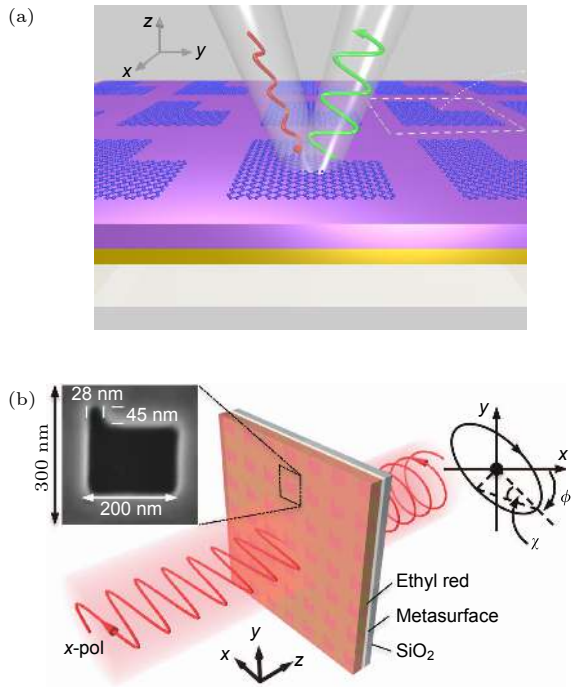


图 13 动态可调偏振态 (a) 基于石墨烯纳米结构动态可调的宽带中红外偏振变换器^[59]; (b) 通过光调控实现光偏振态转换的可重构超构表面^[119]

Fig. 13. Dynamically tune the polarization states of light: (a) Dynamically tunable broadband mid-infrared cross polarization converter based on graphene nanostructures^[59]; (b) reconfigurable metasurfaces that enable light polarization control by light^[119].

域通过化学反应调控全息, 将会在新的数据存储、光通讯、现代加密和安全上有重要的应用. 另外, Malek 等^[150]通过在可拉伸的聚合物衬底上构造金纳米棒也实现了可重构的超构表面全息, 如图 14(b) 所示. 超构表面全息具有三个成像平面, 当对衬底拉伸时全息图像变大并且成像平面的位置也发生改变. 通过拉伸样品, 多个不同全息成像的开关显示可以被实现, 从而实验证实了机械力调控可见光区域的全息, 为动态重构光通信和显示创造了可能性.

4 讨论与展望

值得提到的是, 以上涉及的动态可调等离激元材料和器件的工作波段包括可见光区、近红外、中远红外以及太赫兹波段等, 各工作频段主要选用的材料如下: 在可见光波段, 主要采用镁、石墨烯、二氧化钒、液晶、透明导电氧化物、各种半导体、各种聚合物等材料; 在近红外波段, 主要采用钇、锗铋

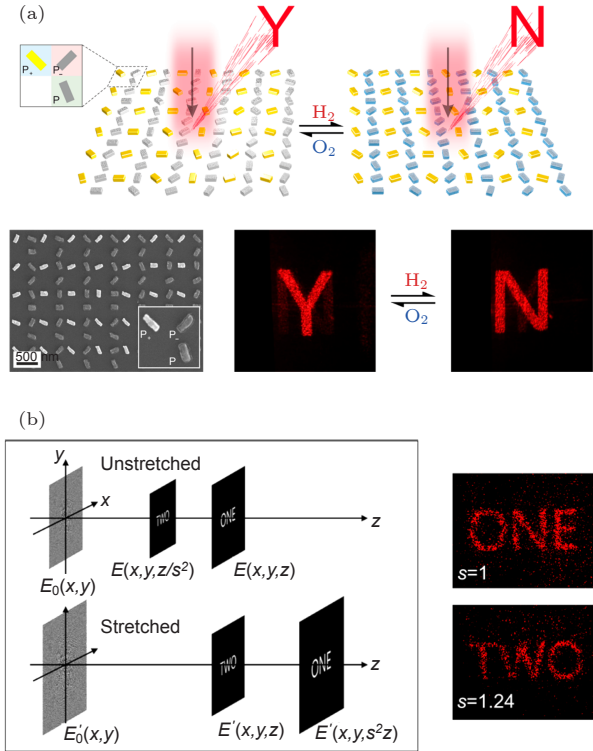


图 14 动态可调全息 (a) 可见光谱下的动态 Janus 超构表面全息^[54]; (b) 可拉伸衬底上的应变多重超构表面全息^[150]

Fig. 14. Dynamically tunable holograms: (a) Dynamic Janus metasurface holograms in the visible spectral region^[54]; (b) strain multiplexed metasurface holograms on a stretchable substrate^[150].

碲、二氧化钒、液晶、透明导电氧化物、各种半导体、各种聚合物等材料; 在中远红外波段, 主要采用石墨烯、锗铋碲、二氧化钒、透明导电氧化物、各种半导体等材料; 在太赫兹波段, 主要采用石墨烯、二氧化钒、液晶、各种半导体等材料.

迄今为止, 通过引入多种调制方式和多种结构成分, 可以实现多种可动态调控的等离激元材料和器件, 并且业已实现的那些等离激元结构具有较高的设计灵活性, 但是未来构建高性能动态可调的等离激元结构仍然存在许多挑战^[45,47,48]. 第一, 材料受限. 比如, 已有的可作为周围环境的材料在可见光和红外波段介电函数的变化相对较小, 导致动态调控器件性能的幅度不大; 又如, 利用相变材料实现动态可调等离激元材料的大部分概念目前只证实能在两态之间切换, 导致可动态改变的性质很受限; 再比如, 目前人们通常使用金属材料, 从而总是伴随着内禀损耗, 影响器件性能. 第二, 制备技术受限. 尽管目前刻蚀技术可以精确控制金属纳米结构的几何, 但金属纳米结构的制备步骤复杂,

制作成本高且耗时长, 不能满足大面积制造的要求. 第三, 动态调控的效率受限. 比如, 虽然强的光泵浦可以提供超快的等离子体调控, 适合某些特定应用, 但存在功耗高和破坏性热累积等缺点.

为了克服这些局限性和挑战性, 未来的研究期望可以在以下几个方面做些努力. 第一, 探索新型亚波长材料, 特别是发展一些金属/介电等复合微结构材料, 包括研制新型纯介质微结构材料, 用于构造动态调控等离子体器件的多方面需求. 当前, 低损耗、高折射率的介质或半导体纳米结构正成为研究热点, 相关研究在实现光学器件的多功能以及与 CMOS 兼容等方面具有优势^[173]. 可以预期, 未来有关动态调控金属、介质、半导体 (包括某些二维材料) 等复合微纳结构的光学性质将备受关注, 多种材料的引入以及多种结构的组合必将提供更多的调控自由度. 第二, 发展动态调控新原理, 比如多个等离子体结构协同作用以促进多功能调控和性能优化. 目前大部分动态可调的等离子体器件是针对整个样品进行调控的, 未来将逐渐过渡到多功能集成, 并且各功能单元可以进行独立的动态控制, 从而实现对等离子体集成器件的动态协同操控. 另外, 还可以将动态可调等离子体结构从经典电动力学扩展到量子力学领域, 例如发展动态可调量子等离子体材料和器件^[48], 在等离子体学和电子学之间建立更紧密的关联. 第三, 发展可以制作大面积动态可调等离子体结构的先进新技术和新方法. 除了聚焦离子束刻蚀和电子束光刻等微纳结构制备技术以外, 近年来激光干涉刻蚀^[174]、自组装^[175,176]、纳米压印^[177]等技术逐渐应用于制备等离子体结构, 这些技术具有运用灵活、成本较低、并且适合大面积制作等特点, 但是在深度亚波长等离子体结构的大面积制备方面仍然存在问题. 可以预期, 随着微纳加工和制备新技术的飞速发展, 动态调控等离子体材料和器件的研究必将得到更加蓬勃的发展.

5 结 论

本文总结了工作频段处于可见光至太赫兹波段的范围内等离子体材料和器件的动态调控研究进展 (由于文章篇幅限制, 没有涉及电磁波谱的其他频段), 阐述了动态调控等离子体材料和器件的基本原理, 即通过动态改变材料中金属微纳结构的

等效介电函数、动态调节系统外部环境、动态控制结构中的耦合效应等, 实现对等离子体材料和器件性能的实时动态控制. 并且分别以等离子体材料、等离子体超构材料、等离子体超构表面等为例, 展示在电、光、力、温度、环境等外部作用下相关材料和器件性能的实时改变和动态控制. 相关研究目前还处于起步阶段, 期望借此能推动发展新型亚波长光电功能材料和器件, 应用于在动态显微显示、动态数据存储、光动态集成和新型光子芯片、实时传感技术等领域.

参考文献

- [1] Ritchie R H 1957 *Phys. Rev.* **106** 874
- [2] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, Thio T, Wolff P A 1998 *Nature* **391** 667
- [3] Xu H, Bjerneld E J, Käll M, Börjesson L 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4357
- [4] Xu H, Käll M 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 246802
- [5] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [6] Ozbay E 2006 *Science* **311** 189
- [7] Zhang R, Zhang Y, Dong Z C, Jiang S, Zhang C, Chen L G, Zhang L, Liao Y, Aizpurua J, Luo Y, Yang J L, Hou J G 2013 *Nature* **498** 82
- [8] Ma R M, Oulton R F, Sorger V J, Bartal G, Zhang X 2011 *Nat. Mater.* **10** 110
- [9] Lu J, Xu C, Dai J, Li J, Wang Y, Lin Y, Li P 2015 *ACS Photonics* **2** 73
- [10] Ren M, Pan C, Li Q, Cai W, Zhang X, Wu Q, Fan S, Xu J 2013 *Opt. Lett.* **38** 3133
- [11] Chen W, Zhang S, Deng Q, Xu H 2018 *Nat. Commun.* **9** 801
- [12] Maier S A 2007 *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (New York: Springer)
- [13] Liu S D, Cheng M T, Yang Z J, Wang Q Q 2008 *Opt. Lett.* **33** 851
- [14] Guo X, Qiu M, Bao J, Wiley B J, Yang Q, Zhang X, Ma Y, Yu H, Tong L 2009 *Nano Lett.* **9** 4515
- [15] Hu Q, Xu D H, Zhou Y, Peng R W, Fan R H, Fang N X, Wang Q J, Huang X R, Wang M 2013 *Sci. Rep.* **3** 3095
- [16] Wei H, Tian X, Pan D, Chen L, Jia Z, Xu H 2015 *Nano Lett.* **15** 560
- [17] Schuller J A, Barnard E S, Cai W, Jun Y C, White J S, Brongersma M L 2010 *Nat. Mater.* **9** 193
- [18] Xue C H, Jiang H T, Lu H, Du G Q, Chen H 2013 *Opt. Lett.* **38** 959
- [19] Lu C, Hu X, Shi K, Hu Q, Zhu R, Yang H, Gong Q 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e302
- [20] Li J F, Huang Y F, Ding Y, Yang Z L, Li S B, Zhou X S, Fan F R, Zhang W, Zhou Z Y, Wu D Y, Ren B, Wang Z L, Tian Z Q 2010 *Nature* **464** 392
- [21] Li Z Y 2015 *EPL* **110** 14001
- [22] Gu Y, Huang L, Martin O J F, Gong Q 2010 *Phys. Rev. B* **81** 193103
- [23] Yi M, Lu C, Gong Y, Qi Z, Cui Y 2014 *Opt. Express* **22** 29627
- [24] Huang C P, Yin X G, Wang Q J, Huang H, Zhu Y Y 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 016402

- [25] Shi X, Han D, Dai Y, Yu Z, Sun Y, Chen H, Liu X, Zi J 2013 *Opt. Express* **21** 28438
- [26] Cheng G, Qin W, Lin M H, Wei L, Fan X, Zhang H, Gwo S, Zeng C, Hou J G, Zhang Z 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 156803
- [27] Shi W B, Liu L Z, Peng R, Xu D H, Zhang K, Jing H, Fan R H, Huang X R, Wang Q J, Wang M 2018 *Nano Lett.* **18** 1896
- [28] Liu Y, Zhang X 2011 *Chem. Soc. Rev.* **40** 2494
- [29] Xiong X, Wang Z W, Fu S J, Wang M, Peng R W, Hao X P, Sun C 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 181905
- [30] Fang N, Lee H, Sun C, Zhang X 2005 *Science* **308** 534
- [31] Ma H F, Cui T J 2010 *Nat. Commun.* **1** 21
- [32] Wu K, Cheng Q, Wang G P 2016 *J. Opt.* **18** 044001
- [33] Sheng C, Liu H, Wang Y, Zhu S N, Genov D A 2013 *Nat. Photonics* **7** 902
- [34] Bai Q, Chen J, Shen N H, Cheng C, Wang H T 2010 *Opt. Express* **18** 2106
- [35] Hao J, Wang J, Liu X, Padilla W J, Zhou L, Qiu M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 251104
- [36] Xiong X, Jiang S C, Hu Y H, Peng R W, Wang M 2013 *Adv. Mater.* **25** 3994
- [37] Sun S, He Q, Xiao S, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nat. Mater.* **11** 426
- [38] Tang D, Wang C, Zhao Z, Wang Y, Pu M, Li X, Gao P, Luo X 2015 *Laser Photonics Rev.* **9** 713
- [39] Wang S, Wu P C, Su V C, Lai Y C, Chen M K, Kuo H Y, Chen B H, Chen Y H, Huang T T, Wang J H, Lin R M, Kuan C H, Li T, Wang Z, Zhu S, Tsai D P 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 227
- [40] Xie Z, Lei T, Si G, Wang X, Lin J, Min C, Yuan X 2017 *ACS Photonics* **4** 2158
- [41] Chen H T, Taylor A J, Yu N 2016 *Rep. Prog. Phys.* **79** 076401
- [42] Jiang S C, Xiong X, Hu Y S, Hu Y H, Ma G B, Peng R W, Sun C, Wang M 2014 *Phys. Rev. X* **4** 021026
- [43] Jiang S C, Xiong X, Hu Y S, Jiang S W, Hu Y H, Xu D H, Peng R W, Wang M 2015 *Phys. Rev. B* **91** 125421
- [44] Yin X, Ye Z, Rho J, Wang Y, Zhang X 2013 *Science* **339** 1405
- [45] Zheludev N I, Kivshar Y S 2012 *Nat. Mater.* **11** 917
- [46] Fan K, Padilla W J 2015 *Mater. Today* **18** 39
- [47] Wuttig M, Bhaskaran H, Taubner T 2017 *Nat. Photonics* **11** 465
- [48] Jiang N, Zhuo X, Wang J 2018 *Chem. Rev.* **118** 3054
- [49] Strohfeldt N, Tittl A, Schäferling M, Neubrech F, Kreibig U, Griessen R, Giessen H 2014 *Nano Lett.* **14** 1140
- [50] Sterl F, Strohfeldt N, Walter R, Griessen R, Tittl A, Giessen H 2015 *Nano Lett.* **15** 7949
- [51] Duan X, Kamin S, Sterl F, Giessen H, Liu N 2016 *Nano Lett.* **16** 1462
- [52] Chen Y, Duan X, Matuschek M, Zhou Y, Neubrech F, Duan H, Liu N 2017 *Nano Lett.* **17** 5555
- [53] Li J, Kamin S, Zheng G, Neubrech F, Zhang S, Liu N 2018 *Sci. Adv.* **4** eaar6768
- [54] Yu P, Li J, Zhang S, Jin Z, Schütz G, Qiu C W, Hirscher M, Liu N 2018 *Nano Lett.* **18** 4584
- [55] Ju L, Geng B, Horng J, Girit C, Martin M, Hao Z, Bechtel H A, Liang X, Zettl A, Shen Y R, Wang F 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** 630
- [56] Yan H, Li X, Chandra B, Tulevski G, Wu Y, Freitag M, Zhu W, Avouris P, Xia F 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 330
- [57] Chen J, Badioli M, Alonso-González P, Thongrattanasiri S, Huth F, Osmond J, Spasenović M, Centeno A, Pesquera A, Godignon P, Elorza A Z, Camara N, García de Abajo F J, Hillenbrand R, Koppens F H L 2012 *Nature* **487** 77
- [58] Fei Z, Rodin A S, Andreev G O, Bao W, McLeod A S, Wagner M, Zhang L M, Zhao Z, Thiemens M, Dominguez G, Fogler M M, Castro Neto A H, Lau C N, Keilmann F, Basov D N 2012 *Nature* **487** 82
- [59] Cheng H, Chen S, Yu P, Li J, Xie B, Li Z, Tian J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 223102
- [60] Fang Z, Wang Y, Schlather A E, Liu Z, Ajayan P M, García de Abajo F J, Nordlander P, Zhu X, Halas N J 2014 *Nano Lett.* **14** 299
- [61] Ni G X, Wang L, Goldflam M D, Wagner M, Fei Z, McLeod A S, Liu M K, Keilmann F, Özyilmaz B, Castro Neto A H, Hone J, Fogler M M, Basov D N 2016 *Nat. Photonics* **10** 244
- [62] Lundeborg M B, Gao Y, Asgari R, Tan C, van Duppen B, Autore M, Alonso-González P, Woessner A, Watanabe K, Taniguchi T, Hillenbrand R, Hone J, Polini M, Koppens F H L 2017 *Science* **357** 187
- [63] Iranzo D A, Nanot S, Dias E J C, Epstein I, Peng C, Efetov D K, Lundeborg M B, Parret R, Osmond J, Hong J Y, Kong J, Englund D R, Peres N M R, Koppens F H L 2018 *Science* **360** 291
- [64] Ni G X, McLeod A S, Sun Z, Wang L, Xiong L, Post K W, Sunku S S, Jiang B Y, Hone J, Dean C R, Fogler M M, Basov D N 2018 *Nature* **557** 530
- [65] Dorfs D, Härtling T, Miszta K, Bigall N C, Kim M R, Genovese A, Falqui A, Povia M, Manna L 2011 *J. Am. Chem. Soc.* **133** 11175
- [66] Jain P K, Manthiram K, Engel J H, White S L, Fauchaux J A, Alivisatos A P 2013 *Angew. Chem. Int. Ed.* **52** 13671
- [67] Garcia G, Buonsanti R, Runnerstrom E L, Mendelsberg R J, Llordes A, Anders A, Richardson T J, Milliron D J 2011 *Nano Lett.* **11** 4415
- [68] Runnerstrom E L, Llordés A, Loum S D, Milliron D J 2014 *Chem. Commun.* **50** 10555
- [69] Yao Y, Kats M A, Genevet P, Yu N, Song Y, Kong J, Capasso F 2013 *Nano Lett.* **13** 1257
- [70] Zhou Y, Wang C, Xu D H, Fan R H, Zhang K, Peng R W, Hu Q, Wang M 2014 *EPL* **107** 34007
- [71] Zhou Y, Dong Y Q, Zhang K, Peng R W, Hu Q, Wang M 2014 *EPL* **107** 54001
- [72] Zhou Y, Dong Y Q, Fan R H, Hu Q, Peng R W, Wang M 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 041114
- [73] Miao Z, Wu Q, Li X, He Q, Ding K, An Z, Zhang Y, Zhou L 2015 *Phys. Rev. X* **5** 041027
- [74] Wang Z, Hu B, Li B, Liu W, Li X, Liu J, Wang Y 2016 *Mater. Res. Express* **3** 115011
- [75] Kim T T, Oh S S, Kim H D, Park H S, Hess O, Min B, Zhang S 2017 *Sci. Adv.* **3** e1701377
- [76] Sherrott M C, Hon P W C, Fontaine K T, Garcia J C, Ponti S M, Brar V W, Sweatlock L A, Atwater H A 2017 *Nano Lett.* **17** 3027
- [77] Zhou Y, Zhu Y Y, Zhang K, Wu H W, Peng R W, Fan R H, Wang M 2017 *Opt. Express* **25** 012081
- [78] Zeng B, Huang Z, Singh A, Yao Y, Azad A K, Mohite A D, Taylor A J, Smith D R, Chen H T 2018 *Light Sci. Appl.* **7** 51
- [79] Kossyrev P A, Yin A, Cloutier S G, Cardimona D A, Huang D, Alsing P M, Xu J M 2005 *Nano Lett.* **5** 1978
- [80] Wang X, Kwon D H, Werner D H, Khoo I C, Kildishev A V, Shalae V M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 143122
- [81] Xiao S, Chettiar U K, Kildishev A V, Drachev V, Khoo I C,

- Shalaev V M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 033115
- [82] Cetin A E, Mertiri A, Huang M, Erramilli S, Altug H 2013 *Adv. Opt. Mater.* **1** 915
- [83] Shrekenhamer D, Chen W C, Padilla W J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 177403
- [84] Si G, Zhao Y, Leong E S P, Liu Y J 2014 *Materials* **7** 1296
- [85] Abass A, Rodriguez S R, Ako T, Aubert T, Verschuuren M, Van Thourhout D, Beeckman J, Hens Z, Rivas J G, Maes B 2014 *Nano Lett.* **14** 5555
- [86] Khoo I C 2014 *Prog. Quantum Electron.* **38** 77
- [87] Wang L, Lin X W, Hu W, Shao G H, Chen P, Liang L J, Jin B B, Wu P H, Qian H, Lu Y N, Liang X, Zheng Z G, Lu Y Q 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e253
- [88] Franklin D, Chen Y, Vazquez-Guardado A, Modak S, Boroumand J, Xu D, Wu S T, Chanda D 2015 *Nat. Commun.* **6** 7337
- [89] Sautter J, Staude I, Decker M, Rusak E, Neshev D N, Brener I, Kivshar Y S 2015 *ACS Nano* **9** 4308
- [90] Bohn J, Bucher T, Chong K E, Komar A, Choi D Y, Neshev D N, Kivshar Y S, Pertsch T, Staude I 2018 *Nano Lett.* **18** 3461
- [91] Abb M, Albella P, Aizpurua J, Muskens O L 2011 *Nano Lett.* **11** 2457
- [92] Abb M, Wang Y, de Groot C H, Muskens O L 2014 *Nat. Commun.* **5** 4869
- [93] Park J, Kang J H, Liu X, Brongersma M L 2015 *Sci. Rep.* **5** 15754
- [94] Papadakis G T, Atwater H A 2015 *Phys. Rev. B* **92** 184101
- [95] Zhu Y, Hu X, Chai Z, Yang H, Gong Q 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 091109
- [96] Guo P, Schaller R D, Ketterson J B, Chang R P H 2016 *Nat. Photonics* **10** 267
- [97] Huang Y W, Lee H W H, Sokhoyan R, Pala R A, Thyagarajan K, Han S, Tsai D P, Atwater H A 2016 *Nano Lett.* **16** 5319
- [98] Park J, Kang J H, Kim S J, Liu X, Brongersma M L 2017 *Nano Lett.* **17** 407
- [99] Alam M Z, Schulz S A, Upham J, de Leon I, Boyd R W 2018 *Nat. Photonics* **12** 79
- [100] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, Lee M, Averitt R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 107401
- [101] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, Gossard A C, Taylor A J, Averitt R D 2006 *Nature* **444** 597
- [102] Zhang S, Zhou J, Park Y S, Rho J, Singh R, Nam S, Azad A K, Chen H T, Yin X, Taylor A J, Zhang X 2012 *Nat. Commun.* **3** 942
- [103] Gu J, Singh R, Liu X, Zhang X, Ma Y, Zhang S, Maier S A, Tian Z, Azad A K, Chen H T, Taylor A J, Han J, Zhang W 2012 *Nat. Commun.* **3** 1151
- [104] Iyer P P, Pendharkar M, Palmstrøm C J, Schuller J A 2017 *Nat. Commun.* **8** 472
- [105] Lu Y J, Sokhoyan R, Cheng W H, Shirmanesh G K, Davoyan A R, Pala R A, Thyagarajan K, Atwater H A 2017 *Nat. Commun.* **8** 1631
- [106] Shcherbakov M R, Liu S, Zubyuk V V, Vaskin A, Vabishchevich P P, Keeler G, Pertsch T, Dolgova T V, Staude I, Brener I, Fedyanin A A 2017 *Nat. Commun.* **8** 17
- [107] Yang Y, Kelley K, Sachet E, Campione S, Luk T S, Maria J P, Sinclair M B, Brener I 2017 *Nat. Photonics* **11** 390
- [108] Rahmani M, Xu L, Miroshnichenko A E, Komar A, Camacho-Morales R, Chen H, Zárate Y, Kruk S, Zhang G, Neshev D, Kivshar Y S 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1700580
- [109] Coppens Z J, Valentine J G 2017 *Adv. Mater.* **29** 1701275
- [110] Dintinger J, Robel I, Kamat P V, Genet C, Ebbesen T W 2006 *Adv. Mater.* **18** 1645
- [111] Pala R A, Shimizu K T, Melosh N A, Brongersma M L 2008 *Nano Lett.* **8** 1506
- [112] Leroux Y, Lacroix J C, Fave C, Stockhausen V, Félidj N, Grand J, Hohenau A, Krenn J R 2009 *Nano Lett.* **9** 2144
- [113] Stockhausen V, Martin P, Ghilane J, Leroux Y, Randriamahazaka H, Grand J, Felidj N, Lacroix J C 2010 *J. Am. Chem. Soc.* **132** 10224
- [114] Baba A, Tada K, Janmanee R, Sriwichai S, Shinbo K, Kato K, Kaneko F, Phanichphant S 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 4383
- [115] Melikyan A, Alloatti L, Muslija A, Hillerkuss D, Schindler P C, Li J, Palmer R, Korn D, Muehlbrandt S, van Thourhout D, Chen B, Dinu R, Sommer M, Koos C, Kohl M, Freude W, Leuthold J 2014 *Nat. Photonics* **8** 229
- [116] Wang Q, Liu L, Wang Y, Liu P, Jiang H, Xu Z, Ma Z, Oren S, Chow E K C, Lu M, Dong L 2015 *Sci. Rep.* **5** 18567
- [117] Xu T, Walter E C, Agrawal A, Bohn C, Velmurugan J, Zhu W, Lezec H J, Talin A A 2016 *Nat. Commun.* **7** 10479
- [118] Lu W, Jiang N, Wang J 2017 *Adv. Mater.* **29** 1604862
- [119] Ren M X, Wu W, Cai W, Pi B, Zhang X Z, Xu J J 2017 *Light Sci. Appl.* **6** e16254
- [120] Haffner C, Chelladurai D, Fedoryshyn Y, Josten A, Baeuerle B, Heni W, Watanabe T, Cui T, Cheng B, Saha S, Elder D L, Dalton L R, Boltasseva A, Shalaev V M, Kinsey N, Leuthold J 2018 *Nature* **556** 483
- [121] Wuttig M, Yamada N 2007 *Nat. Mater.* **6** 824
- [122] Michel A K U, Chigrin D N, Maß T W W, Schönauer K, Salinga M, Wuttig M, Taubner T 2013 *Nano Lett.* **13** 3470
- [123] Cao T, Simpson R E, Cryan M J 2013 *J. Opt. Soc. Am. B* **30** 439
- [124] Zou L, Cryan M, Klemm M 2014 *Opt. Express* **22** 24142
- [125] Rudé M, Simpson R E, Quidant R, Pruneri V, Renger J 2015 *ACS Photon.* **2** 669
- [126] Chen Y, Li X, Sonnefraud Y, Fernández-Domínguez A I, Luo X, Hong M, Maier S A 2015 *Sci. Rep.* **5** 8660
- [127] Cao T, Wei C, Mao L 2015 *Sci. Rep.* **5** 14666
- [128] Yin X, Schäferling M, Michel A K U, Tittel A, Wuttig M, Taubner T, Giessen H 2015 *Nano Lett.* **15** 4255
- [129] Tittel A, Michel A K U, Schäferling M, Yin X, Gholipour B, Cui L, Wuttig M, Taubner T, Neubrech F, Giessen H 2015 *Adv. Mater.* **27** 4597
- [130] Cao T, Bao J, Mao L, Zhang T, Novitsky A, Nieto-Vesperinas M, Qiu C W 2016 *ACS Photonics* **3** 1934
- [131] Yin X, Steimle T, Huang L, Taubner T, Wuttig M, Zentgraf T, Giessen H 2017 *Light Sci. Appl.* **6** e17016
- [132] Qu Y, Li Q, Du K, Cai L, Lu J, Qiu M 2017 *Laser Photonics Rev.* **11** 1700091
- [133] Tian J, Luo H, Yang Y, Ding F, Qu Y, Zhao D, Qiu M, Bozhevolnyi S I 2019 *Nat. Commun.* **10** 396
- [134] Suh J Y, Donev E U, Lopez R, Feldman L C, Haglund R F 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 133115
- [135] Dicken M J, Aydin K, Pryce I M, Sweatlock L A, Boyd E M, Walavalkar S, Ma J, Atwater H A 2009 *Opt. Express* **17** 18330
- [136] Driscoll T, Kim H T, Chae B G, Kim B J, Lee Y W, Jokerst N M, Palit S, Smith D R, Ventra M D, Basov D N 2009 *Science* **325** 1518
- [137] Huang W X, Yin X G, Huang C P, Wang Q J, Miao T F, Zhu Y Y 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 261908
- [138] Liu M, Hwang H Y, Tao H, Strikwerda A C, Fan K, Keiser G R, Sternbach A J, West K G, Kittiwatanakul S, Lu J,

- Wolf S A, Omenetto F G, Zhang X, Nelson K A, Averitt R D 2012 *Nature* **487** 345
- [139] Ferrara D W, Nag J, MacQuarrie E R, Kaye A B, Haglund R F 2013 *Nano Lett.* **13** 4169
- [140] Kats M A, Blanchard R, Genevet P, Yang Z, Qazilbash M M, Basov D N, Ramanathan S, Capasso F 2013 *Opt. Lett.* **38** 368
- [141] Wang H, Yang Y, Wang L 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 071907
- [142] Yu P, Chen S, Li J, Cheng H, Li Z, Liu W, Tian J 2015 *Plasmonics* **10** 625
- [143] Zhu Y, Hu X, Yang H, Gong Q 2015 *J. Opt.* **17** 105101
- [144] Kim S J, Yun H, Park K, Hong J, Yun J G, Lee K, Kim J, Jeong S J, Mun S E, Sung J, Lee Y W, Lee B 2017 *Sci. Rep.* **7** 43723
- [145] Shu F Z, Yu F F, Peng R W, Zhu Y Y, Xiong B, Fan R H, Wang Z H, Liu Y, Wang M 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1700939
- [146] Jia Z Y, Shu F Z, Gao Y J, Cheng F, Peng R W, Fan R H, Liu Y, Wang M 2018 *Phys. Rev. Appl.* **9** 034009
- [147] Zhu L, Kapraun J, Ferrara J, Chang-Hasnain C J 2015 *Optica* **2** 255
- [148] Ee H S, Agarwal R 2016 *Nano Lett.* **16** 2818
- [149] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, Horie Y, Faraon A 2016 *Laser Photonics Rev.* **10** 1002
- [150] Malek S C, Ee H S, Agarwal R 2017 *Nano Lett.* **17** 3641
- [151] Tseng M L, Yang J, Semmlinger M, Zhang C, Nordlander P, Halas N J 2017 *Nano Lett.* **17** 6034
- [152] She A, Zhang S, Shian S, Clarke D R, Capasso F 2018 *Sci. Adv.* **4** eaap9957
- [153] Laible F, Gollmer D A, Dickreuter S, Kern D P, Fleischer M 2018 *Nanoscale* **10** 14915
- [154] Liu X, Huang Z, Zhu C, Wang L, Zang J 2018 *Nano Lett.* **18** 1435
- [155] Gao F, Li D, Peng R W, Hu Q, Wei K, Wang Q J, Zhu Y Y, Wang M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 011104
- [156] Ou J Y, Plum E, Zhang J, Zheludev N I 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 252
- [157] Ma F, Lin Y S, Zhang X, Lee C 2014 *Light Sci. Appl.* **3** e171
- [158] Kan T, Isozaki A, Kanda N, Nemoto N, Konishi K, Takahashi H, Kuwata-Gonokami M, Matsumoto K, Shimoyama I 2015 *Nat. Commun.* **6** 8422
- [159] Dennis B S, Haftel M I, Czaplewski D A, Lopez D, Blumberg G, Aksyuk V A 2015 *Nat. Photonics* **9** 267
- [160] Kern J, Kullock R, Prangsma J, Emmerling M, Kamp M, Hecht B 2015 *Nat. Photonics* **9** 582
- [161] Fan R H, Zhou Y, Ren X P, Peng R W, Jiang S C, Xu D H, Xiong X, Huang X R, Wang M 2015 *Adv. Mater.* **27** 1201
- [162] Zheludev N I, Plum E 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** 16
- [163] Kuzyk A, Schreiber R, Zhang H, Govorov A O, Liedl T, Liu N 2014 *Nat. Mater.* **13** 862
- [164] Holsteen A L, Raza S, Fan P, Kik P G, Brongersma M L 2017 *Science* **358** 1407
- [165] Manjappa M, Pitchappa P, Singh N, Wang N, Zheludev N I, Lee C, Singh R 2018 *Nat. Commun.* **9** 4056
- [166] Kristensen A, Yang J K W, Bozhevolnyi S I, Link S, Nordlander P, Halas N J, Mortensen N A 2016 *Nat. Rev. Mater.* **2** 16088
- [167] Novotny L, van Hulst N 2011 *Nat. Photonics* **5** 83
- [168] Li Z, Zhou Y, Qi H, Pan Q, Zhang Z, Shi N N, Lu M, Stein A, Li C Y, Ramanathan S, Yu N 2016 *Adv. Mater.* **28** 9117
- [169] Dicken M J, Sweatlock L A, Pacifici D, Lezec H J, Bhattacharya K, Atwater H A 2008 *Nano Lett.* **8** 4048
- [170] Watts C M, Liu X, Padilla W J 2012 *Adv. Mater.* **24** OP98
- [171] Nicholls L H, Rodríguez-Fortuño F J, Nasir M E, Córdova-Castro R M, Olivier N, Wurtz G A, Zayats A V 2017 *Nat. Photonics* **11** 628
- [172] Wang Z, Cheng F, Winsor T, Liu Y 2016 *Nanotechnology* **27** 412001
- [173] Kuznetsov A I, Miroshnichenko A E, Brongersma M L, Kivshar Y S, Luk'yanchuk B 2016 *Science* **354** aag2472
- [174] Xia D, Ku Z, Lee S C, Brueck S R J 2011 *Adv. Mater.* **23** 147
- [175] Klinkova A, Choueiri R M, Kumacheva E 2014 *Chem. Soc. Rev.* **43** 3976
- [176] Chen F, Li J, Yu F, Zhao D, Wang F, Chen Y, Peng R W, Wang M 2016 *Adv. Mater.* **28** 7193
- [177] Guo L J 2007 *Adv. Mater.* **19** 495

SPECIAL TOPIC—Plasmon-enhanced light-matter interactions

Advances in dynamically tunable plasmonic materials and devices^{*}Shu Fang-Zhou Fan Ren-Hao Wang Jia-Nan Peng Ru-Wen[†] Wang Mu[‡]*(National Laboratory of Solid State Microstructures and School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)*

(Received 1 April 2019; revised manuscript received 23 May 2019)

Abstract

As is well known, plasmonics bridges the gap between nanoscale electronics and dielectric photonics, and is expected to be applied to light generation, photonic integration and chips, optical sensing and nanofabrication technology. So far, most of plasmonic microstructures and nanostructures cannot dynamically tune the properties once their structures are fabricated. Therefore, developing active plasmonic materials and devices is especially desired and necessary. Recently, dynamically tunable plasmonic materials and devices have been intensively investigated with the aim of practical applications. Here in this paper, we review recent research advances in active plasmonic materials and devices. Firstly we summarize three approaches to dynamically tuning plasmonic materials and devices. The first approach is to dynamically change the effective permittivity of metallic microstructures and nanostructures. The second approach is to dynamically adjust the ambient environments of the materials and devices. The third approach is to real-time tune the coupling effects in the nanostructures. Then we take ordinary plasmonic materials, plasmonic metamaterials, and plasmonic metasurfaces for example to show how to make them dynamically tunable. With external fields (such as electrical field, light field, thermal field, and mechanical force field, etc.), various approaches have been demonstrated in dynamically tuning the physical properties of plasmonic systems in real time. We anticipate that this review will promote the further development of new-generation subwavelength materials and optoelectronic devices with new principles and better performances.

Keywords: dynamically tunable plasmonic materials and devices, active plasmonic metamaterials, active plasmonic metasurfaces

PACS: 73.20.Mf, 78.67.Pt, 78.67.-n

DOI: [10.7498/aps.68.20190469](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190469)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0303702) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11634005, 11674155).

[†] Corresponding author. E-mail: rwpeng@nju.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: muwang@nju.edu.cn