

LI Gang, GUAN Wen-jun, ZHANG Yan-jun, *et al.* Polarization-controlled Optical Switch Based on Surface Plasmon[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(3):0326001.

李刚,关文俊,张彦军,等. 基于表面等离激元的偏振态控制光开关[J]. 光子学报, 2020, **49**(3):0326001.

基于表面等离激元的偏振态控制光开关

李刚,关文俊,张彦军,刘艳莉,侯钰龙,单彦虎,张志东,张斌珍,薛晨阳

(中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室,太原 030051)

摘 要:利用四个 Au 纳米棒组成的类矩形纳米棒四聚体结构设计了一种基于偏振态控制的光开关,并采用有限元法研究了该结构对入射光偏振态的响应特性.研究发现,该结构的透射光谱对入射光的偏振方向具有很强的依赖性,当入射光的偏振角度变化 $\pi/2$ 时,其特征峰的开关比分别能达到 27.81 dB 和 21.65 dB.分析表明,该结构的开关效应主要由不同偏振态下所导致的水平双纳米棒和竖直双纳米棒之间的近场耦合强度不同而实现,该结构透射系数与偏振角度的关系服从 Malus law.此外,通过改变类矩形纳米棒阵列结构参数,研究了结构参数对其光开关响应特性的影响.在此基础上,通过改变阵列的周期参数,研究了入射光水平偏振和垂直偏振下周期参数对单元结构透射光谱的影响.该研究结果能够为可调谐双波长偏振光开关的设计提供理论依据.

关键词:表面等离激元;光开关;偏振;有限元分析;亚波长金属结构

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204903.0326001

Polarization-controlled Optical Switch Based on Surface Plasmon

LI Gang, GUAN Wen-jun, ZHANG Yan-jun, LIU Yan-li, HOU Yu-long, SHAN Yan-hu,
ZHANG Zhi-dong, ZHANG Bin-zhen, XUE Chen-yang

(*Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China,
Taiyuan 030051, China*)

Abstract: An optical switch based on polarization state control is designed by using a rectangular-like nanorods tetramer composed of four Au nanorods. The finite element method is used to study the response characteristics of the structure to incident light polarization. It is found that the transmission spectrum of the structure dependent strongly on the polarization direction of the incident light. When the polarization angle of the incident light changes by $\pi/2$, the switching ratio of the characteristic peaks can reach 27.81 dB and 21.65 dB, respectively. The analysis shows that the switching effect is mainly caused by the different near-field coupling strength between the horizontal double rod and the vertical double rod at the different polarization states. The relationship between the transmittance and the polarization angle of the structure obeys the Malus law. In addition, the influence of structural parameters on the response characteristics of optical switches is studied by changing the structural parameters of the rectangular-like nanorod array. On this basis, the influence of the periodic parameters on the transmission spectrum of the unit structure under the horizontal and vertical polarization of the incidence light is studied by changing the period parameters of the array. These results can provide a theoretical basis for the design of tunable dual-wavelength polarization-controlled optical switch.

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61605177,U1637212,61704158),国家自然科学基金杰出青年基金(No.61525107),山西省“1331工程”重点学科建设项目(No.1331KSC),山西省自然科学基金(Nos.201801D221212,201801D221200)

第一作者:李刚(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为微纳光学器件等. Email:ligang2332@163.com

导师(通讯作者):张志东(1985—),男,副教授,博士,主要研究方向为表面等离激元及微纳光学等. Email:zdzhang@nuc.edu.cn

收稿日期:2019-09-27; **录用日期:**2019-12-13

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Surface plasmon polaritons; Optical switch; Polarization; Finite element method; Subwavelength metallic structure

OCIS Codes: 240.6680; 260.3910; 260.5430

0 引言

随着光子集成技术的发展,以光子替代电子作为微芯片系统中信息交换处理的载体是未来信息通信技术发展的必然趋势.目前,微芯片系统正朝着集成光路方向发展,集成光路的发展必然要求光子学器件的小型化、集成化、低功耗等^[1,2].因此,开发新型光子学器件是集成光路的迫切发展目标,但当器件尺寸达到纳米量级时,由于光学衍射极限的存在,光子学器件难以继续小型化发展^[3,4].表面等离子激元(Surface Plasmon, SP)作为一种光与贵金属表面自由电子相互作用产生的电磁模式^[5,6],具有突破传统光学衍射极限的能力,它的出现为解决这一瓶颈提供了可能的途径^[7,8].

目前,基于 SP 的各种光学器件已经被广泛研究,包括光波解复用器^[9]、纳米透镜^[10]、光学放大器^[11]、布拉格光栅^[12]、滤波器^[13]、传感器^[14,15]等.其中,光开关作为基本的光子器件,基于不同原理的光开关已经被设计并研究^[16,17].近年来,研究者们提出了各种调制原理的纳米光开关,基于 Kerr 非线性效应的光开关已被广泛研究^[18],如 LIU Zheng-qi 等设计了高折射率非线性电介质的全电介质谐振结构,通过低强度控制光即可实现了低至亚纳米带宽及高 Q 值的开关设计^[19].另外, DONG Gao-neng 等设计了一种基于 Fano 效应的全光开关,该开关由一个侧面耦合的 Fabry-Perot 谐振器和一个纳米束腔组成,利用 Fano 共振具有尖锐不对称线形的特点实现光开关的快速响应^[20].CAI Ming 等提出了一种空气-石墨烯-基板-电介质结构^[21],通过改变施加在石墨烯上的电压对其介电特性进行调制,从而实现了对光开关的调控.然而, Fano 光开关虽具有较高的调制速度,但 Fano 共振本身实现较难,且对周围介质环境非常敏感,易导致开关特性不稳定等问题.而采用电压调制的电光开关调制方式简单,但器件尺寸大、响应慢且能耗高.偏振态作为光的一个基本要素,在光与物质相互作用过程中对其光学特性起着决定性的作用,基于 SPP 波的偏振态光学调控已有相关研究^[22,23],如果可以通过光的偏振态实现对光的开关控制将具有非常重要的研究意义.

因此,本文提出了一种基于 SP 共振的偏振态控制光开关,即通过改变入射光的偏振方向来实现对其开关控制,该偏振态控制光开关是由四个纳米棒组成的一种类矩形纳米棒四聚体结构.首先,利用有限元法研究了该结构的透射光谱,着重研究了其对入射光偏振态的依赖特性,并通过分析其表面电场分布和电荷分布阐明了该结构产生开关特性的机理.同时,通过研究结构参数对其透射光谱的影响,揭示了结构参数对其开关特性的影响规律,这些结果将为亚波长尺寸的光开关设计提供理论依据.

1 结构与计算方法

图 1 (a)为类矩形纳米棒四聚体结构周期性排列组成的阵列图,图 1(b)为结构单元的俯视图,该结构单元由四个尺寸相同的 Au 纳米棒组成,整个结构置于厚度 $H=100$ nm 的 SiO_2 衬底上.类矩形纳米棒四聚体结构中水平纳米棒长度为 l_1 ,竖直纳米棒长度为 l_2 ,且它们上下间距为 d_1 ;两竖直纳米棒的左右间距 $d_2=80$ nm;此外,所有的纳米棒具有相同的宽度 $b=80$ nm 和厚度 $h=50$ nm.该单元结构在 x 和 y 方向上的周期参数分别为 P_x 、 P_y .

本论文中,所有的数值仿真均采用 COMSOL Multiphysics 5.2a 软件中的波动光学模块完成.此外,在光的传播方向上选用完美匹配层(Perfect Matching Layer, PML)边界条件;其余传播方向上选用周期性边界条件(Periodic Boundary Condition, PBC),因此,只需对结构单元进行数值仿真. Au 的介电常数选用 Drude 色散模型^[24]

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (1)$$

式中,高频相对介电常数 $\epsilon_\infty=7$,等离子体频率 $\omega_p=1.37 \times 10^{16}$ rad/s,碰撞频率 $\gamma=4.08 \times 10^{13}$ rad/s.

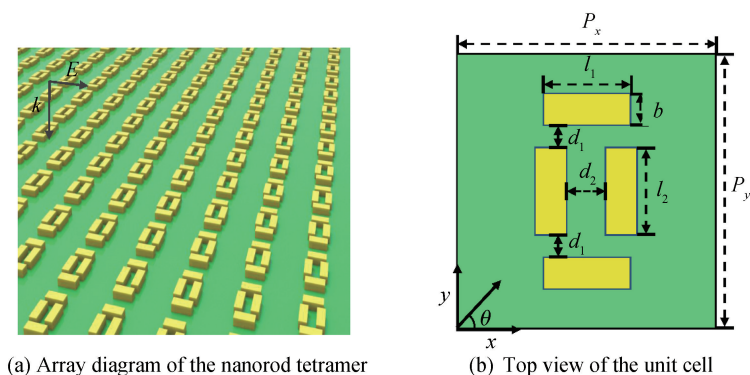


图1 类矩形纳米棒四聚体结构示意图
Fig.1 Schematic of the rectangular-like nanorod tetramer

2 结果与讨论

2.1 偏振角度改变产生的开关效应

图2(a)给出了在 $l_1=l_2=200\text{ nm}$, $d_1=40\text{ nm}$ 时,类矩形纳米棒四聚体在入射光偏振角度 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 时的透射光谱,他们分别在 $\lambda_1=1.26\text{ }\mu\text{m}$ 和 $\lambda_2=1.29\text{ }\mu\text{m}$ 处产生了明显的透射谷.其中,在 $\lambda_1=1.26\text{ }\mu\text{m}$ 处,当 $\theta=0^\circ$ 时,其透射率为 0.14% (II),而 $\theta=90^\circ$ 时,透射率高达 84.53% (I);也就是说,相同波长时,偏振方向改变 90° ,可实现光的开关特性,且开关比可达 27.81 dB ;对于, $\lambda_2=1.29\text{ }\mu\text{m}$, $\theta=0^\circ$ 时,其透射率为 84.81% (III),而 $\theta=90^\circ$ 时,透射率仅为 0.58% (IV),开关比可达 21.65 dB .

为研究该类矩形纳米棒四聚体结构产生偏振态控制光开关特性的物理机理,图2(b)分别给出了入射波长 $\lambda_1=1.26\text{ }\mu\text{m}$ 和 $\lambda_2=1.29\text{ }\mu\text{m}$,在偏振角度 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 时的电场及电荷分布图.当 $\lambda_1=1.26\text{ }\mu\text{m}$ 的入射光以偏振角 $\theta=90^\circ$ 入射时(I),从该四聚体结构的电场分布来看,其没有形成共振,即入射光几乎不与该结构发生任何相互作用,而直接发生透射,因此,入射光的透射率很高.当 $\lambda_1=1.26\text{ }\mu\text{m}$ 的入射光以偏振角 $\theta=0^\circ$ 入射时(II),电场主要分布在水平双纳米棒的两端、竖直双纳米棒左右两侧表面以及他们之间的间隙,水平双纳米棒与竖直双纳米棒产生明显的偶极振动,形成超辐射共振模式,这是由类矩形纳米棒四聚体与入射光的强烈作用以及竖直双纳米棒间的近场耦合作用所致;超辐射共振模式产生的电场辐射损耗使得类矩形纳米棒四聚体具有非常低的透射率.当 $\lambda_2=1.29\text{ }\mu\text{m}$ 的入射光以偏振角 $\theta=0^\circ$ 入射时(III),类矩形纳米棒四聚体中仅在水平双纳米棒两端出现微弱的电场分布,且每个Au纳米棒几乎不产生电荷振荡,因此入射光具有很高的透射率.当 $\lambda_2=1.29\text{ }\mu\text{m}$ 的入射光以偏振角 $\theta=90^\circ$ 入射时(IV),类矩形纳米棒四聚体中竖直双纳米棒被入射光激发产生偶极振动,水平双纳米棒在竖直双纳米棒的近场耦合作用下产生偶极振动,其电场主要分布在竖直双纳米棒的两端、水平双纳米棒上下两侧表面以及水平双纳米棒与竖直双纳米棒之间的间隙,水平双纳米棒与竖直双纳米棒的同相偶极振动将产生强电场辐射损耗,故其透射率较小.

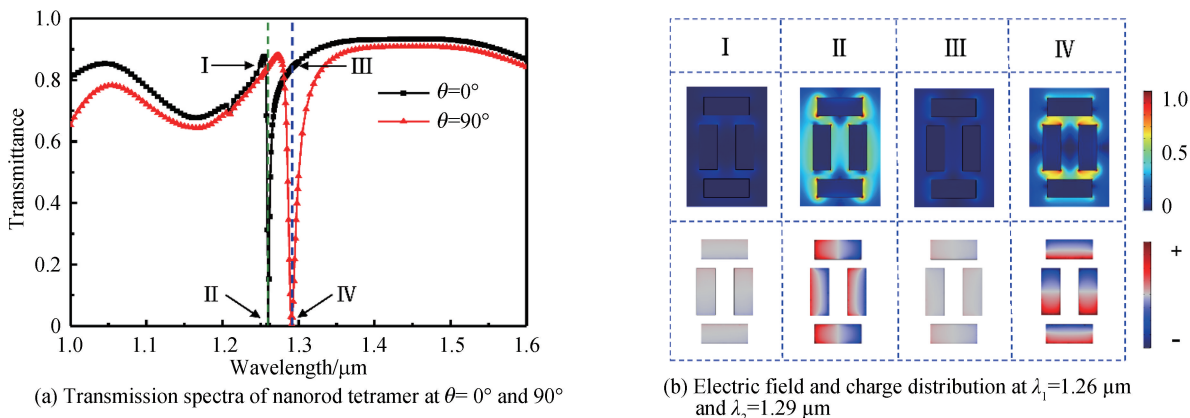
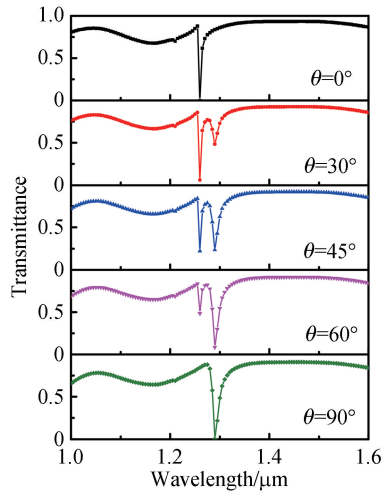


图2 类矩形纳米棒四聚体的透射谱、电场分布

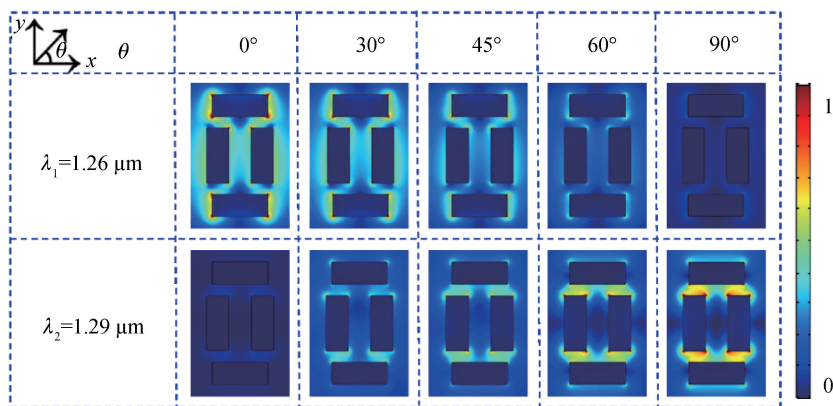
Fig.2 Transmission spectra, electric field and charge distribution of the rectangular-like nanorod tetramer

2.2 不同偏振角度对光开关调控效果

为进一步研究类矩形纳米棒四聚体结构的透射特性与入射光偏振角度的关系,图 3(a)给出了偏振角 θ 从 0° 变化到 90° 时结构的透射光谱.随着偏振角度的增大, $\lambda_1=1.26 \mu\text{m}$ 处的透射谷逐渐消失,而 $\lambda_2=1.29 \mu\text{m}$ 处逐渐产生一个明显的透射谷.为研究偏振角度对透射光谱的调制特性,图 3(b)分别给出了 $\lambda_1=1.26 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_2=1.29 \mu\text{m}$ 时,类矩形纳米棒四聚体结构在不同偏振角度下的电场分布图.当 θ 从 0° 变化到 90° 时,在 $\lambda_1=1.26 \mu\text{m}$ 光入射下,类矩形纳米棒四聚体结构在 $\theta=0^\circ$ 时出现较强的电场分布,其电场主要集中在水平双纳米棒的端面和垂直双纳米棒的侧面,这是由于入射光与水平双纳米棒和垂直双纳米棒发生耦合作用产生偶极子振动模式而形成的近电场.随着偏振角度的增大,由于入射光波矢与纳米棒模式尺寸失配,使得入射光与类矩形纳米棒四聚体相互耦合作用逐渐减弱,故在透射光谱中表现为透射谷逐渐消失.而在 $\lambda_2=1.29 \mu\text{m}$ 光入射下,随着偏振角度的增大,类矩形纳米棒四聚体结构与入射光的耦合逐渐增强,垂直双纳米棒的纵向振动偶极子模式增强,在其两端出现较强的增强电场;而水平双纳米棒在垂直双纳米棒纵向偶极子振动近电场的作用下,其横向偶极振动模式被激发而随着偏振角度的增大耦合逐渐增强,故在其透射光谱中表现为一个新的透射谷出现且逐渐变深.



(a) Transmission spectra of varying with polarization angle



(b) Electric field distribution at different polarization angles at $\lambda_1=1.26 \mu\text{m}$ and $\lambda_2=1.29 \mu\text{m}$

图 3 类矩形纳米棒四聚体结构随偏振角度变化的透射光谱及电场分布

Fig.3 Transmittance spectra and electric field distribution of rectangular-like nanorod tetramer varying with polarization angle

为了研究类矩形纳米棒四聚体结构开关调控效果,结合 Malus law 分析了透射系数与偏振角度的关系^[25-27].通过实验结果与 Malus law 对比,得到清晰的调控效果.在 $\lambda_1=1.26 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_2=1.29 \mu\text{m}$ 处分别计算了偏振角度 θ 从 0° 到 90° (变化间隔 15°) 的透射系数,并与 Malus law 相对比,如图 4 所示,结果表明,偏振态开关调控服从 Malus Law,数值及振幅的差距主要是由于金属固有损耗及四聚体结构和 SiO_2 衬底对入射光具有一定的吸收及反射.

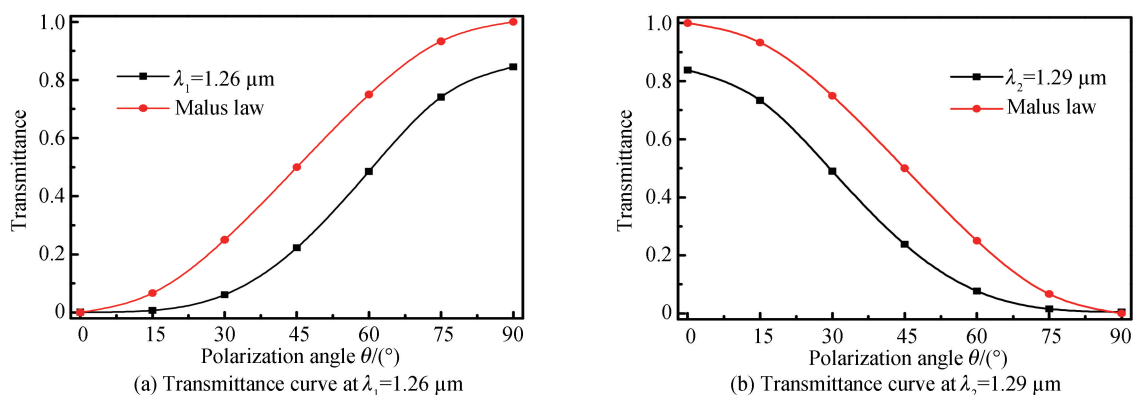


图4 透射系数与偏振角度关系

Fig.4 The relationship between the transmittance and the polarization angle

2.3 偏振光开关的性能研究

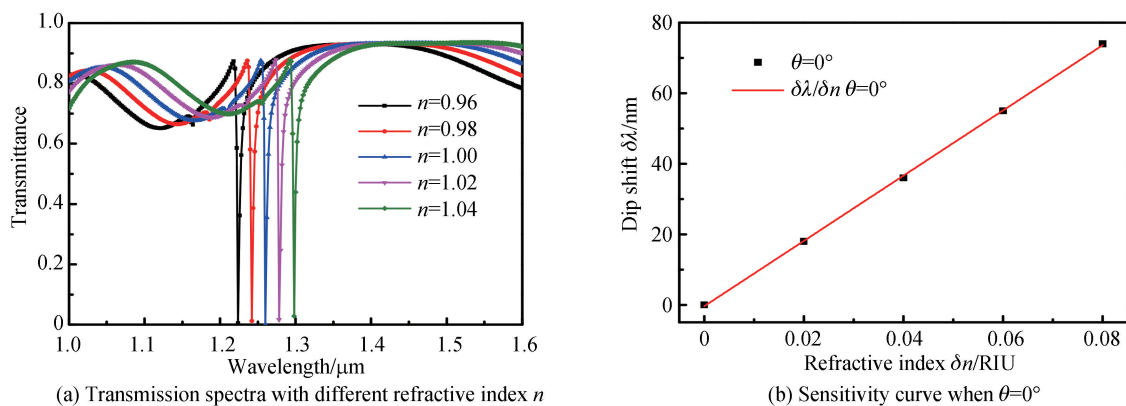
为了研究光开关的性能,分别计算了偏振光开关的开关比,灵敏度及品质因子.开关比根据式

$$\text{EXT} = 10 \log \frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{off}}} \quad (2)$$

计算,在 $\lambda_1 = 1.26 \mu\text{m}$ 处, $T_{\text{on}} = 84.53\%$, $T_{\text{off}} = 0.14\%$, 开关比 $\text{EXT}_{\lambda_1} = 27.81 \text{ dB}$. 如图 5(a) 给出了 $\lambda_1 = 1.26 \mu\text{m}$ 处透射谷随介质层折射率变化的透射谱线, 折射率 n 从 0.96 增大至 1.04 (变化间隔 0.02), 如图 5(b) 给出了光开关灵敏度曲线, 品质因子根据式

$$\text{FOM} = \frac{\delta\lambda / \delta n}{\text{FWHM}} \quad (3)$$

计算得 $\text{FOM} = 151.6$.

图5 $\theta=0^\circ$ 时,介质层折射率 n 变化的透射光谱及透射谷处灵敏度曲线Fig.5 Transmission spectra with different refractive index n and sensitivity curve when $\theta=0^\circ$

在 $\lambda_2 = 1.29 \mu\text{m}$ 处, $T_{\text{on}} = 84.81\%$, $T_{\text{off}} = 0.58\%$, 开关比 $\text{EXT}_{\lambda_2} = 21.65 \text{ dB}$. 如图 6(a) 给出了 $\lambda_2 = 1.29 \mu\text{m}$ 处透射谷随介质层折射率变化的透射谱线, 折射率 n 从 0.96 增大至 1.04 (变化间隔 0.02), 如图 6(b) 给出了光开关灵敏度曲线, 计算得 $\text{FOM} = 69.8$.

2.4 结构周期参数对透射特性的影响

表面等离子激元超表面结构周期大小对其光学特性具有重要影响, 结构周期的大小决定相邻结构单元间的相互作用. 因此, 改变结构周期参数 P 的大小并分别计算偏振角度 $\theta=0^\circ$ 和 90° 时的透射光谱, 如图 7(a) 所示. 随着结构周期参数 P 的增大, 透射谷红移, 且伴随着透射谷的线宽越来越窄. 为研究产生此现象的原因, 对比了在透射谷波长的电场分布, 通过分析其表面电场分布发现, 周期变大即相邻结构间的距离变大, 长轴沿偏振方向的纳米棒偶极子共振增强, 从而导致其与其他两根纳米棒之间的耦合增强. 因此, 在透射光谱中透射谷表现出红移现象.

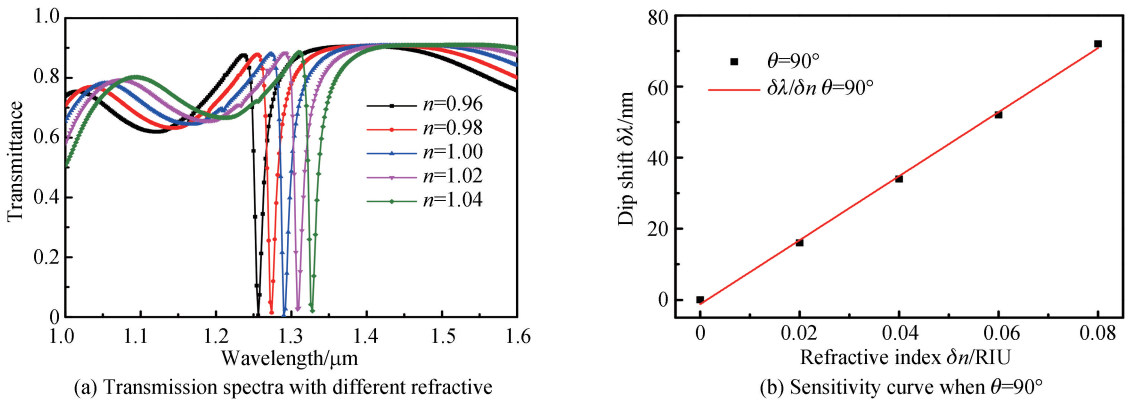


图 6 $\theta=90^\circ$ 时, 介质层折射率 n 变化的透射光谱及透射谷处灵敏度曲线
Fig.6 Transmission spectra with different refractive index n and sensitivity curve when $\theta=90^\circ$

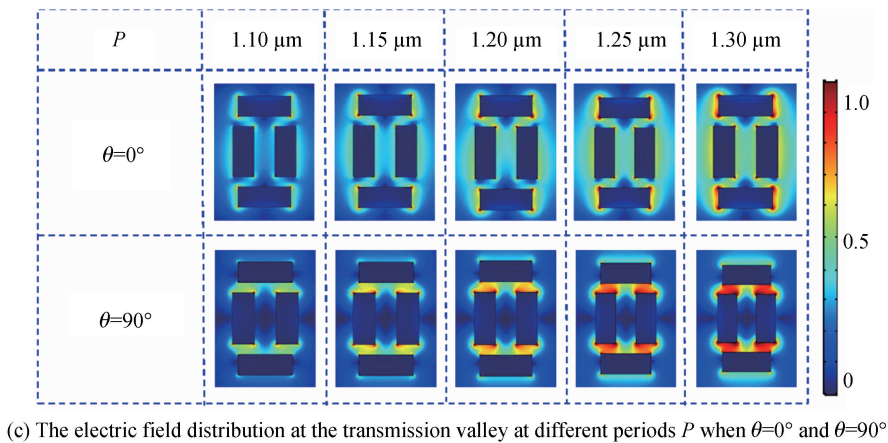
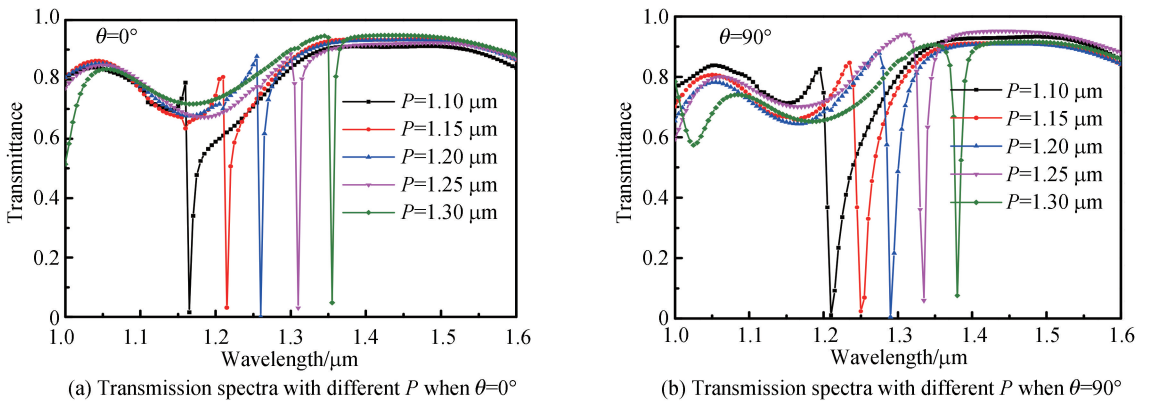


图 7 不同周期大小 P 下的透射谱及透射谷处的电场分布

Fig.7 Transmission spectra and the electric field distribution at the transmission valley with different periods P

为了进一步研究周期参数 P 对透射谱线及器件性能的影响, 当 $\theta=0^\circ$ 时, 固定纵向周期参数 $P_y = 1.20 \mu\text{m}$, 横向周期参数 P_x 从 $1.10 \mu\text{m}$ 增大至 $1.30 \mu\text{m}$ (变化间隔 50 nm), 如图 8(a). 研究发现, 当 $\theta=0^\circ$ 时, 横向周期参数 P_x 的变化对透射谱线几乎没有影响. 而对于 $\theta=90^\circ$ 时, 固定横向周期参数 $P_x = 1.20 \mu\text{m}$, 纵向周期参数 P_y 从 $1.10 \mu\text{m}$ 增大至 $1.30 \mu\text{m}$ (变化间隔 50 nm), 研究发现, 随着 P_y 的增大, 透射谷发生红移, 且线宽越来越窄. 为此, 研究其电荷分布, 当 $\theta=0^\circ$ 时, 水平纳米棒被激发产生偶极振动, 电荷主要分布在水平纳米棒两端, 竖直纳米棒也产生了水平横向偶极振动模式, 随着 P_y 增大, 水平纳米棒和竖直纳米棒的偶极振动均有增强, 且单元结构内部纳米棒之间的耦合增强.

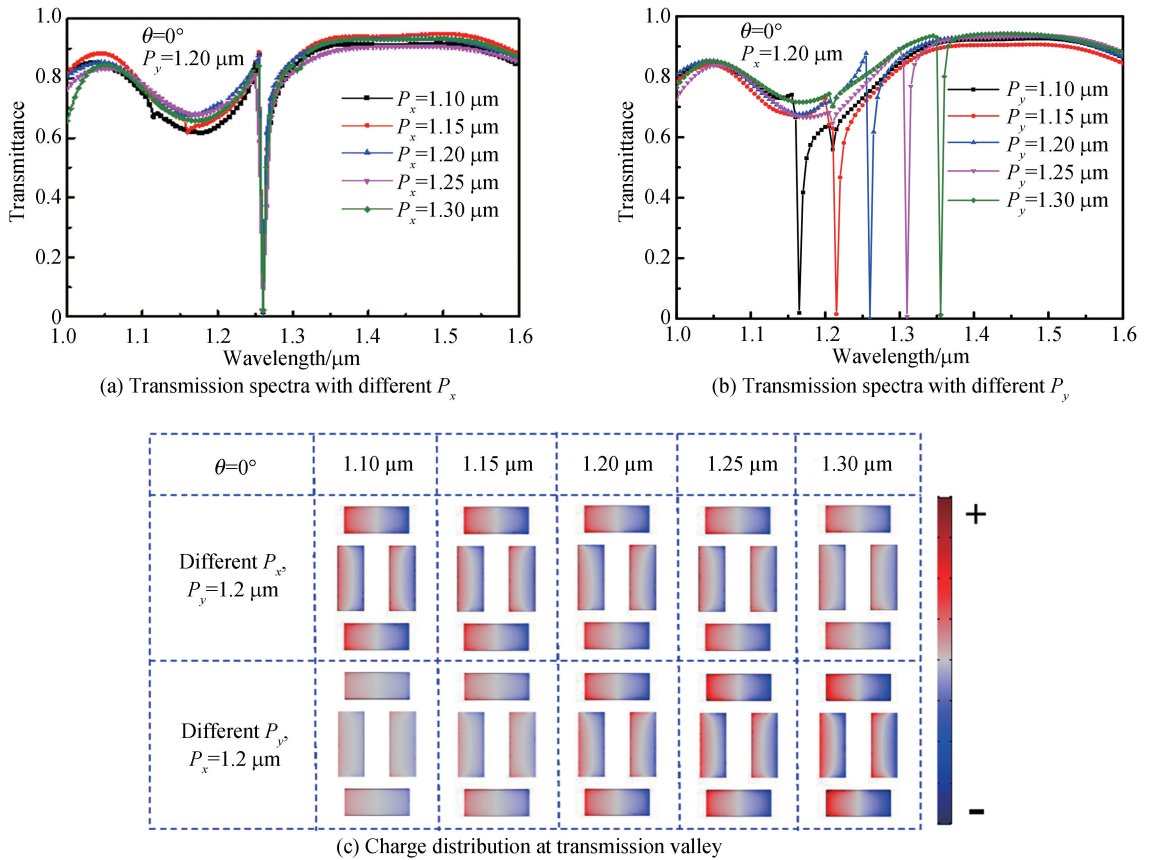
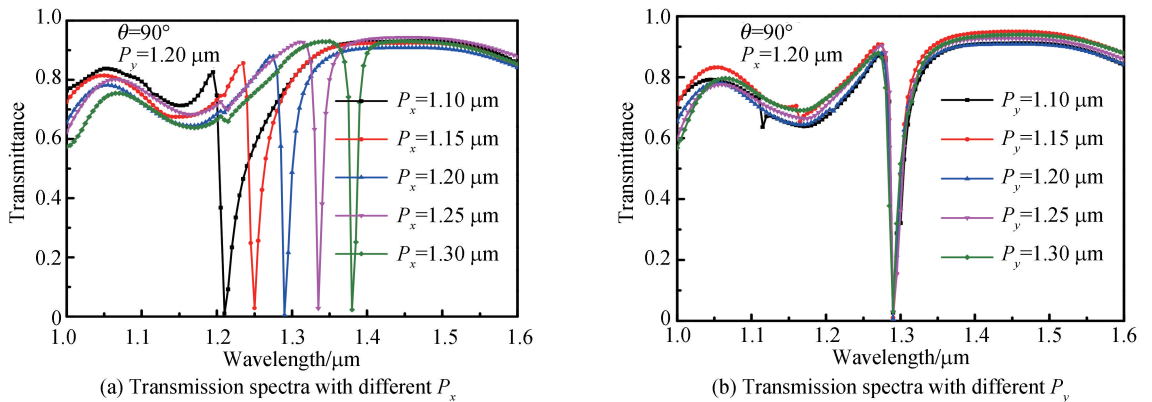


图8 $\theta=0^\circ$ 时,不同横向周期大小 P_x 和纵向周期 P_y 下的透射谱及透射谷处的电荷分布
 Fig.8 The transmission spectra with different period sizes P_x and P_y and charge distribution at transmission valley when $\theta=0^\circ$

同样,对于 $\theta=90^\circ$ 时,固定纵向周期参数 $P_y=1.20 \mu\text{m}$,横向周期参数 P_x 从 $1.10 \mu\text{m}$ 增大至 $1.30 \mu\text{m}$ (变化间隔 50 nm),透射谷红移,且线宽变窄,如图 9(a).而对于 $\theta=90^\circ$ 时,固定横向周期参数 $P_x=1.20 \mu\text{m}$,纵向周期参数 P_y 从 $1.10 \mu\text{m}$ 增大至 1.30 (变化间隔 50 nm),透射谱线几乎没有变化.如图 9(b).分析其电荷分布发现,当 $\theta=90^\circ$ 时,竖直纳米棒被激发在两端聚集大量电荷,随着 P_x 的增大,竖直纳米棒的偶极振动增强,但是,当 P_x 固定, P_y 增大时,结构单元内四根纳米棒的偶极振动几乎没有改变.



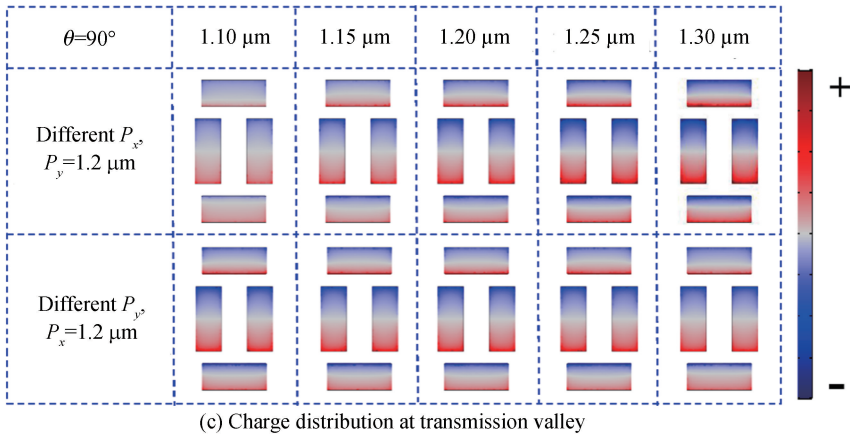


图9 $\theta=90^\circ$ 时,不同横向周期大小 P_x 和纵向周期 P_y 下透射谱及对应透射谷处的电荷分布
Fig.9 The transmission spectra with different period sizes P_x and P_y and charge distribution at transmission valley when $\theta=90^\circ$

2.5 结构参数对透射特性的影响

为了研究类矩形纳米棒四聚体结构参数与其透射特性的关系,分别研究了水平纳米棒长度 l_1 , 竖直纳米棒长度 l_2 , 以及水平与竖直纳米棒间的间距 d_1 对类矩形纳米棒四聚体结构透射特性的影响. 首先, 固定 $l_1=l_2=200$ nm, 在 $\theta=90^\circ$ 时, 计算了 d_1 从 20 nm 增大至 60 nm 的透射光谱, 如图 10. 随着 d_1 的增大, 长波长处的透射谷蓝移, 且其线宽逐渐变窄, 这是由于 d_1 增大时, 水平双纳米棒与竖直双纳米棒间的近场相互作用逐渐减弱, 偶极振动减弱导致辐射损耗减少, 而使得透射谷线宽变窄.

为研究水平纳米棒长度 l_1 对类矩形纳米棒四聚体结构透射特性的影响, 固定 $l_2=200$ nm, $d_1=40$ nm, 在 $\theta=0^\circ$ 时, l_1 从 160 nm 增大至 240 nm 的透射光谱, 如图 11. 随着 l_1 的增大, 短波长处的透射谷微弱红移, 且其线宽逐渐变宽, 这是由于 l_1 逐渐增大导致偶极子振动增强, 其辐射损耗增大使得其透射谷处线宽变宽.

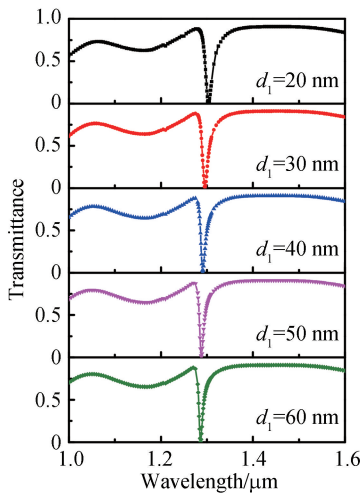


图10 不同间距 d_1 下类矩形纳米棒四聚体结构的透射谱
Fig.10 Transmission spectra of rectangular-like nanorod tetramer with different spacings d_1

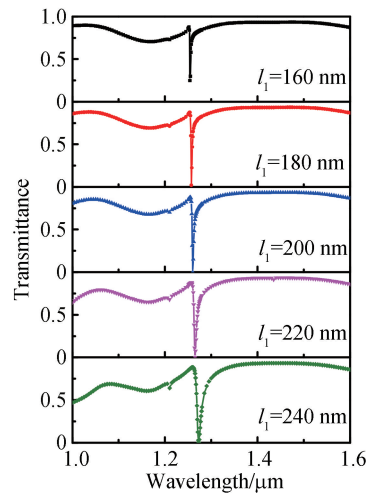
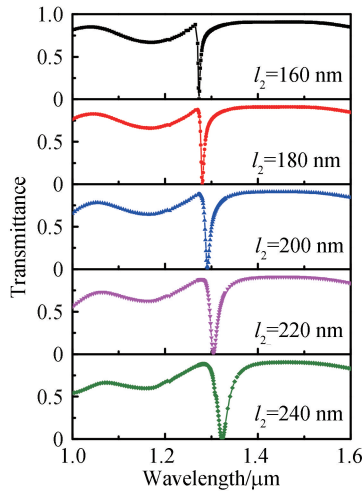


图11 不同水平纳米棒长度 l_1 下类矩形纳米棒四聚体的透射谱
Fig.11 Transmission spectra of rectangular-like nanorod tetramer with different horizontal nanorod lengths l_1

为研究竖直纳米棒长度 l_2 对类矩形纳米棒四聚体结构透射特性的影响, 固定 $l_1=200$ nm, $d_1=40$ nm, 在 $\theta=90^\circ$ 时, l_2 从 160 nm 增大至 240 nm 的透射光谱, 如图 12. 随着竖直纳米棒长度 l_2 的增大, 长波长处透射谷位置发生明显红移, 由于 l_2 增大导致偶极子振动增强, 使得偶极子能量损耗增大, 故其对应的透射谷线宽变宽.

图 12 不同竖直纳米棒长度 l_2 下类矩形纳米棒四聚体的透射谱Fig.12 Transmission spectra of rectangular-like nanorod tetramer with different vertical nanorod lengths l_2

3 结论

本文设计了一个类矩形纳米棒四聚体结构,并应用有限元法研究了其在不同偏振角度下的透射谱、电场及其表面电荷分布.研究发现,该结构的透射光谱对入射光的偏振方向具有很强的依赖性,随着入射光偏振角度的变化,该结构可实现对入射光的开关切换,当入射光的偏振角度变化 $\pi/2$ 时,开关比最高可达 27.81 dB.分析表明,该结构实现开关效应的主要原因是:不同偏振态所导致的水平双纳米棒和竖直双纳米棒之间的近场耦合强度不同;同时,研究了结构参数变化对透射光谱的影响,发现光开关的响应特性可以通过改变纳米棒间距 d_1 及纳米棒长度 l_1 、 l_2 来调节.另外,由于结构单元周期变大而使得单元结构之间影响减小,结构单元内部沿偏振方向的纳米棒偶极振动增强,由于近场耦合作用,使得水平纳米棒和竖直纳米棒之间的相互耦合作用也增强,从而导致透射谷红移,且带宽变窄.该研究结果能够为纳米光开关的研究提供理论依据,为高性能偏振态光开关的设计提供研究基础.

参考文献

- [1] PACKER A M, RUSSELL L E, DALGLEISH H W P, *et al.* Simultaneous all-optical manipulation and recording of neural circuit activity with cellular resolution in vivo[J]. *Nature Methods*, 2015, **12**(2): 140-146.
- [2] KHASHMINSKAYA S, PYATKOV F, SLOWIK K, *et al.* Fully integrated quantum photonic circuit with an electrically driven light source[J]. *Nature Photonics*, 2016, **10**(11): 727-732.
- [3] HUTTER E, FENDLER J H. Exploitation of localized surface plasmon resonance[J]. *Advanced Materials*, 2004, **16**(19): 1685-1706.
- [4] WEI Lai, LI Fang, ZHOU Jian-xin. Design of surface plasmon polariton nano-laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(10): 25-29.
魏来,李芳,周剑心.基于表面等离子体激元的纳米激光器设计[J].光子学报,2016,**45**(10):25-29.
- [5] JIANG Ya-lan, WANG Ji-cheng, WANG Yue-ke, *et al.* A MIM surface plasmon T-splitter based on a stub structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 182-186.
蒋亚兰,王继成,王跃科,等.一种带有支节的 MIM 型表面等离子体 T 型分束器[J].光子学报,2014,**43**(9):182-186.
- [6] MA Guang-hui, ZHANG Jia-bin, WANG Xiao-yi, *et al.* Gold localized surface plasmon enhanced luminescence characteristics of gallium arsenide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(5): 183-191.
马光辉,张家斌,王肖依,等.金局域表面等离子激元增强砷化镓发光特性[J].光子学报,2019,**48**(5):183-191.
- [7] ZENG Yu, CHEN Xi-fang, YI Zao, *et al.* Fabrication of pn heterostructure ZnO/Si moth-eye structures: Antireflection, enhanced charge separation and photocatalytic properties[J]. *Applied Surface Science*, 2018, **441**(5): 40-48.
- [8] ZHOU Pei, LU Qi-jing, WU Gen-zhu, *et al.* Mode properties of hybrid plasmonic waveguide based on semiconductor nanowire and metal ridge [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1460-1463.
周沛,卢启景,吴根柱,等.基于半导体纳米线和金属脊的混合表面等离子体波导模式特性分析[J].光子学报,2013,**42**(12): 1460-1463.
- [9] GUO Rui, DECKER M, SETZPFANDT F, *et al.* Plasmonic fano nanoantennas for on-chip separation of wavelength-encoded optical signals[J]. *Nano Letters*, 2015, **15**(5): 3324-3328.
- [10] HECK C, KANEHIRA Y, KNEIPP J, *et al.* Placement of single proteins within the sers hot spots of self-assembled

- silver nanolenses[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(25): 7444-7447.
- [11] NECHEPURENKO I A, ANDRIANOV E S, ZYABLOVSKY A A, *et al.* Absorption sensor based on graphene plasmon quantum amplifier[J]. *Physical Review B*, 2018, **98**(7): 075411.
- [12] LU Hua, ZENG Chao, ZHANG Qi-ming, *et al.* Graphene-based active slow surface plasmon polaritons[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(2): 8443-8449.
- [13] ZHAO Lei, ZHANG Xin, WANG Jun, *et al.* A novel broadband band-pass filter based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(10): 36069.
- [14] YI Zao, LIANG Cui-ping, CHEN Xi-fang, *et al.* Dual-band plasmonic perfect absorber based on graphene metamaterials for refractive index sensing application[J]. *Micromachines*, 2019, **10**(7): 443-453.
- [15] HUANG Jing, NIU Gao, YI Zao, *et al.* High sensitivity refractive index sensing with good angle and polarization tolerance using elliptical nanodisk graphene metamaterials[J]. *Physica Scripta*, 2019, **94**(8): 085805.
- [16] REN Zhi-bin, SUN Ya-hui, ZHANG Shu-qing, *et al.* Active optical switches based on polarization-tuned guided-mode resonance filters for optical communication[J]. *Optics Communications*, 2018, **426**(11): 383-387.
- [17] YANG Hui-zhan, KUAN Yun-xin, XIANG Tuo-wen, *et al.* Broadband polarization-insensitive optical switch on silicon-on-insulator platform[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(11): 14340-14345.
- [18] HU Xiao-yong, JIANG Ping, DING Cheng-yuan, *et al.* Picosecond and low-power all-optical switching based on an organic photonic-bandgap microcavity[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(3): 185-189.
- [19] LIU Zheng-qi, FU Guo-lan, HUANG Zhen-ping, *et al.* Multi-band ultra-sharp transmission response in all-dielectric resonant structures containing Kerr nonlinear media[J]. *Plasmonics*, 2017, **12**(3): 577-582.
- [20] DONG Gao-neng, WANG Yi-lun, ZHANG Xin-liang. High-contrast and low-power all-optical switch using Fano resonance based on a silicon nanobeam cavity[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(24): 5977-5980.
- [21] CAI Ming, WANG Shu-long, GAO Bo, *et al.* a new electro-optical switch modulator based on the surface plasmon polaritons of graphene in mid-infrared band[J]. *Sensors*, 2019, **19**(1): 89-97.
- [22] HUANG Xiao-ping, CHEN Kai, QI Ming-xi, *et al.* Nanostructured grating patterns over a large area fabricated by optically directed assembly[J]. *Nanoscale*, 2016, **8**(27): 13342-13351.
- [23] HUANG Xiao-ping, CHEN Kai, QI Ming-xi, *et al.* Plasmonic field guided patterning of ordered colloidal nanostructures[J]. *Nanophotonics*, 2019, **8**(3): 505-512.
- [24] LING Yong-hong, HUANG Li-rong, HONG Wei, *et al.* Polarization-controlled dynamically switchable plasmon-induced transparency in plasmonic metamaterial[J]. *Nanoscale*, 2018, **10**(41): 19517-19523.
- [25] LIU Xiao-shan, LIU Gui-qiang, FU Gao-lan, *et al.* Monochromatic filter with multiple manipulation approaches by the layered all-dielectric patch array[J]. *Nanotechnology*, 2016, **27**(12): 125202.
- [26] LIU Xiao-shan, LIU Gui-qiang, TANG Peng, *et al.* Quantitatively optical and electrical-adjusting high-performance switch by graphene plasmonic perfect absorbers[J]. *Carbon*, 2018, **140**(12): 362-367.
- [27] LIU Zheng-qi, TANG Peng, WU Biao, *et al.* Split graphene nano-disks with tunable, multi-band, and high-Q plasmon modes[J]. *Optical Materials*, 2019, **89**(3): 18-24.