

# 基于石墨烯等离子体的宽带透射式红外光调制器

袁志豪<sup>1,2</sup>, 徐俞<sup>3</sup>, 曹冰<sup>1,2\*</sup>, 王钦华<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;

<sup>2</sup>教育部现代光学技术重点实验室, 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

<sup>3</sup>中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123

**摘要** 石墨烯作为一种特殊的二维材料,具有十分优异的物理性质,将石墨烯和微纳器件相结合已经成为当今的研究热点之一。在中红外到太赫兹波段,石墨烯可以激发表面等离子体,用于实现多功能可调谐器件。将石墨烯等离子体与硅基亚波长金属光栅相结合,提出了工作于红外波段的透射式宽带光调制器。通过施加偏置电压改变石墨烯的费米能级,实现在 7~22  $\mu\text{m}$  宽带内对透射光的调制,调制深度最高可以达到 99.96%(33.77 dB)。

**关键词** 光学器件; 光调制器; 石墨烯; 可调谐性; 微纳光学; 红外光

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.232301

## Broadband Transmission Infrared Light Modulator Based on Graphene Plasma

Yuan Zhihao<sup>1,2</sup>, Xu Yu<sup>3</sup>, Cao Bing<sup>1,2\*</sup>, Wang Qinhu<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

<sup>2</sup>Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

<sup>3</sup>Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China

**Abstract** Graphene is a special two-dimensional material, and has excellent physical properties. Combining graphene with micro-nano devices has become a hot research topic. In the mid-infrared to terahertz band, surface plasma can be excited in graphene, which can be applied to multi-functional tunable devices. In this paper, we propose a broadband light modulator working in the infrared waveband, which combines graphene plasma with silicon based subwavelength metallic gratings. By applying a bias voltage on graphene to change the Fermi level, the transmission light can be modulated within the wavelength range from 7 to 22  $\mu\text{m}$ , and the modulation depth can reach up to 99.96% (33.77 dB).

**Key words** optical devices; light modulator; graphene; tunability; micro-nano optics; infrared light

**OCIS codes** 230.4110; 230.0250; 230.3990

## 1 引言

随着微纳光子学的发展,超表面在诸多光学相关领域发挥着越来越重要的作用。通过设置合理的结构参数,超表面能够实现许多新颖的功能,如超透镜光学成像<sup>[1-2]</sup>、波前整形、完美吸收<sup>[3-4]</sup>以及光调制<sup>[5-6]</sup>等。但是对于大多数的超表面器件来说,一旦

其结构参数确定,其功能将固定,无法更改,这极大地限制了器件的应用范围。为了克服这一限制,器件的可调谐性正在成为超表面设计时需要考虑的因素之一。

石墨烯自从 2004 年被 Novoselov<sup>[7]</sup>发现以来,凭借其优异的物理性质一直备受关注。石墨烯作为一种二维材料,由单层碳原子以蜂窝状晶格结构排

收稿日期: 2020-03-20; 修回日期: 2020-04-10; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0404100)

\* E-mail: bcao2006@163.com; \*\* E-mail: chinhua.wang@suda.edu.com

布而成,其柔性可弯曲的特点使其能够与超表面结构相结合;而且石墨烯具备超宽的调控带宽[从近红外(NIR)<sup>[8-9]</sup>到太赫兹波段<sup>[10-14]</sup>],为实现超表面的可调谐性提供了可能。目前已经有大量关于石墨烯可调谐性的研究取得了丰富的成果。2012年Fei等<sup>[15]</sup>利用红外纳米成像技术成功激发出石墨烯表面的等离子体,并通过改变栅极电压成功地改变了石墨烯表面等离子体的振幅和频率。同年,Yan等<sup>[16]</sup>通过石墨烯/绝缘体交替堆叠的圆盘微结构阵列再次验证了石墨烯可以在远红外波段和太赫兹波段产生表面等离子体,而且石墨烯表面等离子体具有可调谐性。然而,石墨烯超薄的特性限制了其对电磁场的调控能力,研究者们又提出了将谐振腔或光子晶体结构与石墨烯相结合,通过腔内多次反射或光子局域等方式来增强光与石墨烯的相互作用<sup>[17-19]</sup>。2015年Cai等<sup>[20]</sup>将石墨烯引入金属狭缝-介质-金属的谐振腔结构中,设计了一个工作于近红外波段的完美吸收器。谐振腔和金属狭缝局域了电磁场,通过电压改变石墨烯的介电常数,从而实现了电场分量垂直于栅线方向的横磁模(TM)入射光的反射调制,在1950 nm波长处实现了反射率在45%和6%的开关调制,红外波段共振吸收波长位置的最高偏移达258.2 nm。Dabidian等<sup>[21]</sup>提出并通过实验制备了一个工作于5.5~8.5 μm的反射式光调制器,通过单层石墨烯与双法诺共振耦合来提高对电磁场的约束能力,通过实时调控栅极电压可以使与金属线方向一致的线偏振入射光的反射光峰值的调制深度(MD)达到90%(10 dB)以上。在透射式石墨烯光调制器的研究方面,2011年,Liu等<sup>[22]</sup>将单层石墨烯与硅波导耦合,通过调节石墨烯的费米能级,在1.35~1.60 μm近红外波段实现了40 μm波导长度内~0.1 dB/μm的调制深度。2018年,王少亮等<sup>[23]</sup>将石墨烯铺在硅和银组成的复合波导上,利用硅和银之间的空气狭缝增强了对表面等

离激元的约束能力,在理论上实现了1550 nm处的0.197 dB/μm的调制深度,当波导长度为15 μm时可以实现3 dB/μm的调制深度。利用波导可增强石墨烯的调制能力,将石墨烯表面等离子体与超表面相结合,可提高石墨烯与光的相互作用。2012年,Gao等<sup>[24]</sup>将单层石墨烯平铺在硅光栅上,利用导模共振并通过给石墨烯施加偏置电压实现对TM光的透射调制,当费米能级从0.4 eV增加到0.9 eV时,共振峰频率可以从1000 cm<sup>-1</sup>迁移到1400 cm<sup>-1</sup>(约为7~10 μm),调制深度可达10 dB。上述所有基于石墨烯的光调制器的机理不同,但器件结构和制备都具有一定的复杂性,同时对入射光的偏振特性都有强烈的依赖性。

本文提出了一种基于石墨烯的硅基双层金属光栅的透射式红外光调制器。将石墨烯的局域表面等离子体与硅纳米光栅耦合,利用其双层金属光栅的优异偏振特性和对石墨烯局域表面等离子体较强的场约束能力,实现了一种可支持自然光入射、结构和制备相对简单、具有较大的调制深度和调制带宽的透射光调制器。该结构对横电模(TE)线偏振入射光具有强反射,对TM线偏振入射光可实现在7~22 μm波段范围内的透射调制,调制深度大于94.57%(12.65 dB),最高可以达到99.96%(33.77 dB)。

## 2 结构设计

特殊的能带结构使得在石墨烯两端施加偏置电压时,其表面电导率 $\sigma$ 会发生很大的改变,从而会影响石墨烯的介电常数 $\epsilon_g$ :

$$\epsilon_g = 1 + \frac{i\sigma}{\epsilon_0 \omega t}, \quad (1)$$

式中: $\epsilon_0$ 为真空介电常数; $\omega$ 为角频率; $t$ 为石墨烯的厚度。通过局部随机相位近似计算得到石墨烯的表面电导率约为<sup>[25]</sup>

$$\sigma(\omega) = \frac{2e^2 T}{\pi \hbar} \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}} \ln \left[ 2 \cosh \left( \frac{E_f}{2k_B T} \right) \right] + \frac{e^2}{4\hbar} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left( \frac{\hbar\omega - 2E_f}{2k_B T} \right) - \frac{i}{2\pi} \ln \frac{(\hbar\omega + 2E_f)^2}{(\hbar\omega - 2E_f)^2 + (2k_B T)^2} \right], \quad (2)$$

式中: $e$ 表示元电荷; $k_B$ 表示玻尔兹曼常量; $\hbar$ 表示约化的普朗克常量; $T$ 表示温度, $T = 300$  K; $E_f$ 表示石墨烯的费米能级; $\tau$ 表示载流子弛豫时间, $\tau = 0.25$  ps; $\tau^{-1}$ 为载流子散射率, $\tau^{-1} = 4$  THz<sup>[26]</sup>。

图1(a)、(b)为透射光调制器的结构原理图。以硅作为基底,将多层石墨烯覆盖于硅基底之上,然后在石墨烯上面制作硅光栅,最后在硅光栅和石墨烯上蒸镀均匀的金属铝薄膜。入射光从下至上垂直

入射。入射光为自然光,可以分解为电场振动方向垂直于栅线方向的 TM 线偏振光和电场振动方向平行于栅线方向的 TE 线偏振光。在石墨烯和硅基底上制作电极,在石墨烯上施加垂直方向的直流偏置电压<sup>[27]</sup>。硅光栅周期为  $P$ ,光栅的宽度为  $W$ ,高度为  $H_1$ ,金属铝的厚度为  $H_2$ 。

光调制器的性能可由光的调制深度决定。中红外到太赫兹波段的入射光可激发石墨烯表面的等离子激元效应<sup>[28]</sup>,产生石墨烯表面等离子体共振。当给石墨烯施加一个直流偏置电压时,其费米能级会发生改变,影响其表面电导率,从而引起其共振峰的

频率和透射率的变化。在共振峰的频率位置,入射光 TM 分量和 TE 分量均被强烈反射,因而透射率接近于 0,表现为透射的“OFF”状态;当直流偏置电压为零时或者远离共振峰频率时,入射光 TM 分量可以通过调制器(TE 分量保持高反射),因而 TM 光透射率接近于 1,表现为透射光的“ON”状态。调制器的调制深度可以定义为<sup>[29]</sup>

$$M_D = \left| \frac{T_{\text{on}} - T_{\text{off}}}{T_{\text{on}}} \right| \times 100\%, \quad (3)$$

式中:  $T_{\text{on}}$  和  $T_{\text{off}}$  分别为调制器打开(ON)状态和关闭(OFF)状态的透射率。

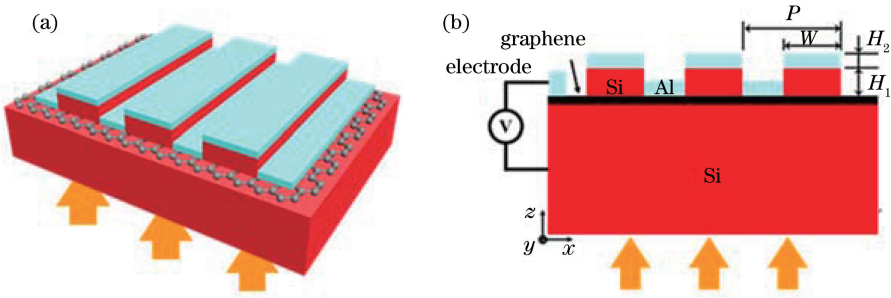


图 1 石墨烯硅基双层金属光栅红外光调制器结构图。(a)三维立体图;(b)剖面图

Fig. 1 Diagrams of Si-based double layer metal grating infrared light modulator based on graphene.

(a) Three-dimensional diagram; (b) cross-section diagram

### 3 分析与讨论

为了具体理解调制器的工作机理,下面对器件结构各个部分的作用进行分析。图 2 给出了调制器有铝层覆盖和无铝层覆盖时透射光的透射率、调制深度及调制带宽。调制器的结构参数为:硅光栅高度  $H_1 = 700$  nm,光栅的宽度  $W = 110$  nm,铝层高度  $H_2 = 50$  nm,光栅周期  $P = 150$  nm,石墨烯的层数为 15 层。数值模拟软件为 FDTD Solutions 2018a,版本号为 8.19.1584。由于自然光可以分解为两个电场分量相互垂直的线偏振光,因此将分别对电场分量垂直于栅线方向的 TM 线偏振光和电场分量平行于栅线方向的 TE 线偏振光进行讨论,将其透射率分别表示为 TM-T 和 TE-T。

图 2(a)、(b)分别为调制器结构中无铝层覆盖时, TM 入射和 TE 入射光对应的透射曲线。调制器的结构参数为:  $H_1 = 700$  nm,  $W = 110$  nm,  $H_2 = 50$  nm,  $P = 150$  nm,石墨烯层数为 15 层。TM 偏振入射对应的透射曲线如图 2(a)所示,当无偏置电压时(即费米能级  $E_f$  为 0 eV),在所观察的波段内, TM 光没有表现出强烈的共振特性,透射率在 0.7 以上。当在石墨烯上施加偏置电压(即费米能级  $E_f$

为 0.1, 0.3, 1.0 eV)时, TM 光表现出强烈的共振特性,在  $10 \sim 30 \mu\text{m}$  波段内出现强烈的共振峰,共振峰的位置随偏置电压的变化而变化。当费米能级  $E_f = 1.0$  eV 时,波长  $10 \mu\text{m}$  附近的共振峰透射率接近于 0,此时光调制器处于“OFF”状态;当费米能级  $E_f$  为 0 eV、0.1 eV 或 0.3 eV 时,  $10 \mu\text{m}$  波长处的 TM 光透射率大于 0.7,此时光调制器处于“ON”状态;对于 TE 光入射,如图 2(b)所示,在不同的费米能级时,透射光均具有较高的透射率,因而该结构对 TE 光的透射调制能力较差,进而影响其对自然光或任意线偏振入射光的透射调制能力。图 2(c)、(d)给出了调制器结构中有铝层覆盖时 TM 入射光和 TE 入射光的透射曲线。如图 2(c)所示,对于 TM 入射光,当无偏置电压(即  $E_f$  为 0 eV)时,与裸硅光栅一样, TM 光没有表现出强烈的共振特性,透射率在 0.6 以上。当在石墨烯上施加偏置电压(即  $E_f$  为 0.1, 0.3, 1.0 eV)时, TM 光表现出强烈的共振特性。与图 2(a)相比,图 2(c)中石墨烯局域表面等离子体共振得到进一步加强,共振峰变窄,并且共振峰蓝移至  $7 \sim 22 \mu\text{m}$ 。图 2(d)给出了 TE 光入射时不同费米能级的透射率谱线,用  $T_{\text{TE-T}}$  表示 TE-T 的值。可以看出,在 TE 光入射的情况下,无论费米

能级的高低,其透射率都非常低,这一特性与图 2(b)形成了鲜明对比。图 2(d)显示的特性表明,有金属覆盖的结构可有效降低对入射光偏振态的严格要求。图 2(e)给出了有/无铝层覆盖时,共振峰的半峰全宽(FWHM)随费米能级的变化情况。从图 2(e)中可以看出,无论有/无铝层覆盖,随着费米能级的增加,共振峰的 FWHM 逐渐减小,并趋于平稳;但是相比于裸硅光栅,即无铝层覆盖时,有铝层覆盖时的共振峰的 FWHM 更小。无铝层覆盖时,FWHM 的值在 10~13  $\mu\text{m}$  范围内变化,而有铝层覆盖时,FWHM 的值在 5~8  $\mu\text{m}$  范围内变化,这表示有双层金属的结构对于共振峰的调控能力相比于

无金属层时进一步增强,共振峰的变窄进一步增强了器件的波长选择性。在波长 7  $\mu\text{m}$  附近,当费米能级  $E_f=1.0$  eV 时, TM 光的透射率接近于 0,此时光调制器为“OFF”状态;当费米能级  $E_f$  为 0 eV、0.1 eV 或 0.3 eV 时,10  $\mu\text{m}$  处的透射率均大于 0.7,此时光调制器处于“ON”状态;当费米能级  $E_f$  为 0.3 eV 时,在 7.07  $\mu\text{m}$  共振波长处, TM 光的调制深度最大可以达到 99.96% (33.77 dB)。对于 TE 入射光,如图 2(d)所示,调制器表现为强反射,透射强度接近 0。该特性说明基于石墨烯的双层金属亚波长光栅结构可实现自然光入射时对透射光的调制。

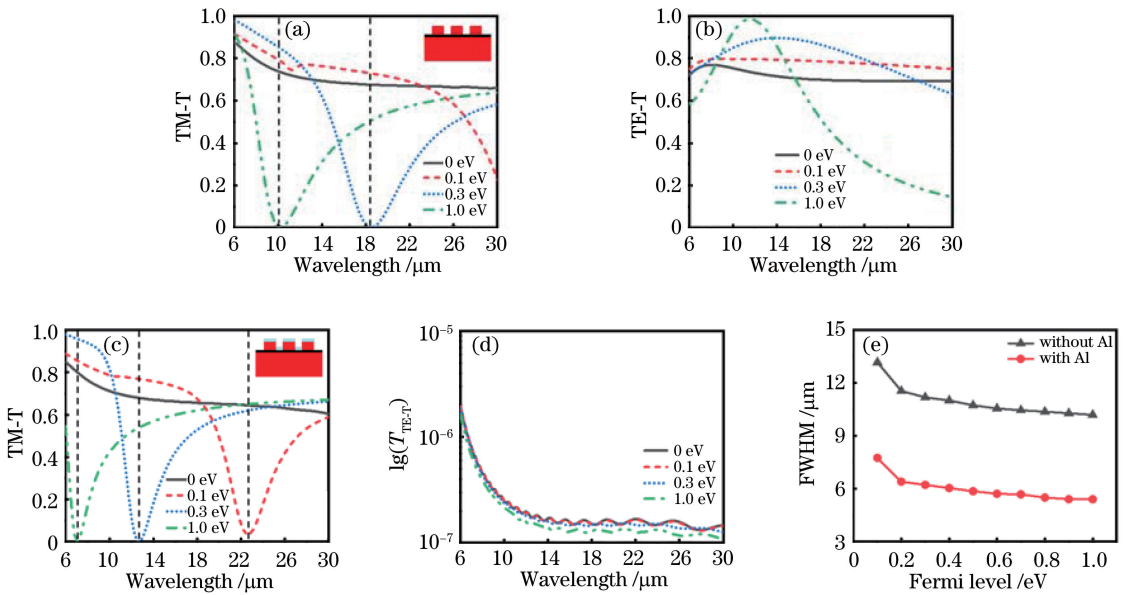


图 2 有、无铝层覆盖的调制器的透射率谱线。无铝层覆盖的调制器在(a)TM 入射光和(b)TE 入射光下不同费米能级的透射率谱线;有铝层覆盖的调制器在(c)TM 入射光和(d)TE 入射光下不同费米能级的透射率谱线;(e)有/无铝层覆盖时,共振峰的 FWHM 随费米能级的变化

Fig. 2 Transmission spectra of modulators without and with Al film on top. Transmission spectra of modulator without Al film on top for (a) TM incident light and (b) TE incident light under different Fermi levels; transmission spectra of modulator with Al film on top for (c) TM incident light and (d) TE incident light under different Fermi levels; (e) FWHM of resonant peak versus Fermi level with or without Al film

石墨烯硅基双层金属光栅红外光调制器的调制机理可由石墨烯在红外波段所激发的局域表面等离子体共振来解释。由于 TE 光不可能激发局域表面等离子体共振效应,因此下面只讨论 TM 光对调制器的作用。图 3 给出了 TM 入射下,费米能级  $E_f=0.3$  eV 时,无铝层覆盖和有铝层覆盖的光调制器在共振峰[图 3(a)和 3(c)中的共振波长分别为 18.5  $\mu\text{m}$  和 13.5  $\mu\text{m}$ ]处和远离共振峰[图 3(b)和 3(d)中的共振峰位于 7  $\mu\text{m}$  波长]处的结构内部电场分布图。从图 3(a)、(c)可以看出,共振峰处的内

部电场均集中分布于石墨烯与硅光栅的界面处,但是图 3(c)中的电场强度(有金属铝覆盖)明显强于图 3(a)(没有金属铝层覆盖)。出现该现象的原因是:铝限制了表面等离子体沿石墨烯表面的传播,将电磁场局域在石墨烯附近,增强了石墨烯局域表面等离子体及其对电磁场的约束能力。在远离共振峰区域(7  $\mu\text{m}$  波长处),如图 3(b)、(d)所示,石墨烯附近的电场明显减弱,由于硅光栅的透射增强,光栅狭缝中形成了较强的电场,有铝层覆盖时,狭缝中的电场强度要高于无铝层覆盖时的电

场强度,这与图 2 中观察到的结果完全一致。同时,从图 2 (a)和(c)也可以看出,当在石墨烯上施加偏置电压后,远离共振峰时的 TM 光的透射率

要高于未施加偏置电压的 TM 光的透射率。此现象说明石墨烯的偏置电压可实现对远离共振峰的 TM 光的透射增强。

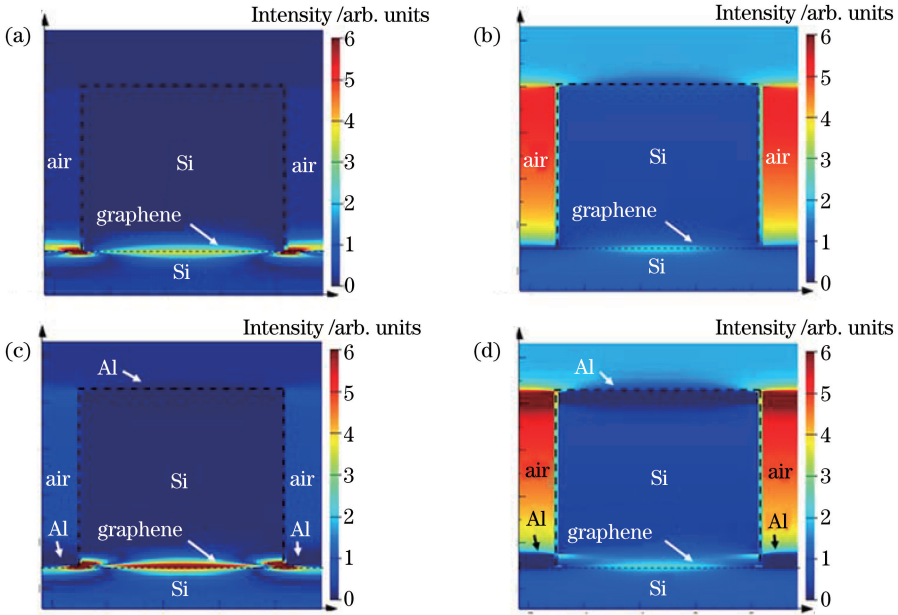


图 3 有、无铝层覆盖结构的电场分布图。(a)无铝层覆盖结构在费米能级  $E_f=0.3$  eV、共振波长  $\lambda=18.5 \mu\text{m}$  时的电场分布图;(b)无铝层覆盖结构在费米能级  $E_f=0.3$  eV、波长  $\lambda=7 \mu\text{m}$ (远离共振峰)时的电场分布图;(c)有铝层覆盖结构在费米能级  $E_f=0.3$  eV、共振波长  $\lambda=13.5 \mu\text{m}$  时的电场分布图;(d)有铝层覆盖结构在费米能级  $E_f=0.3$  eV、波长  $\lambda=7 \mu\text{m}$ (远离共振峰)时的电场分布图

Fig. 3 Distributions of electric field of structures with and without Al film on top. (a) Electric field of structure without Al film on top when Fermi level  $E_f=0.3$  eV and resonant wavelength  $\lambda=18.5 \mu\text{m}$ ; (b) electric field of structure without Al film on top when Fermi level  $E_f=0.3$  eV and  $\lambda=7 \mu\text{m}$  (away from the resonance peak); (c) electric field of structure with Al film on top when Fermi level  $E_f=0.3$  eV and resonant wavelength  $\lambda=13.5 \mu\text{m}$ ; (d) electric field of structure with Al film on top when Fermi level  $E_f=0.3$  eV and  $\lambda=7 \mu\text{m}$  (away from the resonance peak)

图 4 给出了石墨烯硅基双层金属光栅光调制器在不同结构参数时对器件性能的影响。图 4(a)为  $W=110 \text{ nm}$ 、 $H_2=50 \text{ nm}$ 、 $P=150 \text{ nm}$  时不同硅光栅的高度  $H_1$  对应的 TM 光透射率图。可以看出,硅光栅的高度变化不影响共振峰的位置。当硅光栅的高度  $H_1$  增大时,对应于费米能级  $E_f=0.5 \text{ eV}$  的位于  $10 \mu\text{m}$  处共振峰的频率保持不变,但共振峰逐渐变窄,这有利于波长的选择;当费米能级变化为  $E_f=0 \text{ eV}$  或  $0.3 \text{ eV}$  时,位于  $10 \mu\text{m}$  附近的透射率随  $H_1$  的增大而增大。根据(3)式:当  $H_1=700 \text{ nm}$  时,波长  $\lambda=9.87 \mu\text{m}$  处的调制深度最大为  $99.91\%$  ( $30.69 \text{ dB}$ )。图 4 (b) 为  $H_1=700 \text{ nm}$ 、 $H_2=50 \text{ nm}$ 、 $P=150 \text{ nm}$  时不同硅光栅宽度  $W$  对应的透射率。可以看到,共振峰随硅光栅宽度  $W$  的变化而变化,这也是局域表面等离激元的基本特征<sup>[30]</sup>。当改变硅光栅的宽度  $W$  时,可以观察到随着  $W$  的增

大,共振峰向长波方向移动,当  $W$  从  $90 \text{ nm}$  变化到  $130 \text{ nm}$  时,对应于  $0.3 \text{ eV}$  和  $0.5 \text{ eV}$  的共振峰之间的波长间隔从  $2.52 \mu\text{m}$  ( $8.70 \sim 11.22 \mu\text{m}$ ) 增大到  $3.16 \mu\text{m}$  ( $10.95 \sim 14.11 \mu\text{m}$ )。这表明随着  $W$  的增大,共振峰位置红移,调控带宽逐渐增大。图 4(c)为  $H_1=700 \text{ nm}$ 、 $W=110 \text{ nm}$ 、 $P=150 \text{ nm}$  时不同铝层厚度  $H_2$  对应的 TM 光的透射率。当铝的厚度  $H_2$  从  $20 \text{ nm}$  增加到  $80 \text{ nm}$  时,透射率和共振峰对铝厚度的改变并不敏感,此时在  $\lambda=9.87 \mu\text{m}$  时的 TM 光的调制深度均可以达到  $99.8\%$  以上。图 4(d)为  $H_1=700 \text{ nm}$ 、 $W=110 \text{ nm}$ 、 $H_2=50 \text{ nm}$  时,不同光栅周期时的 TM 光的透射率;可以看到,共振峰基本上不随结构周期的变化而变化。这一现象再次说明共振现象的主要机理源自局域的表面等离激元。随着  $P$  的增加,共振峰逐渐变宽,“ON”状态的透射率也在逐渐减小,因此,为了增大调制深度

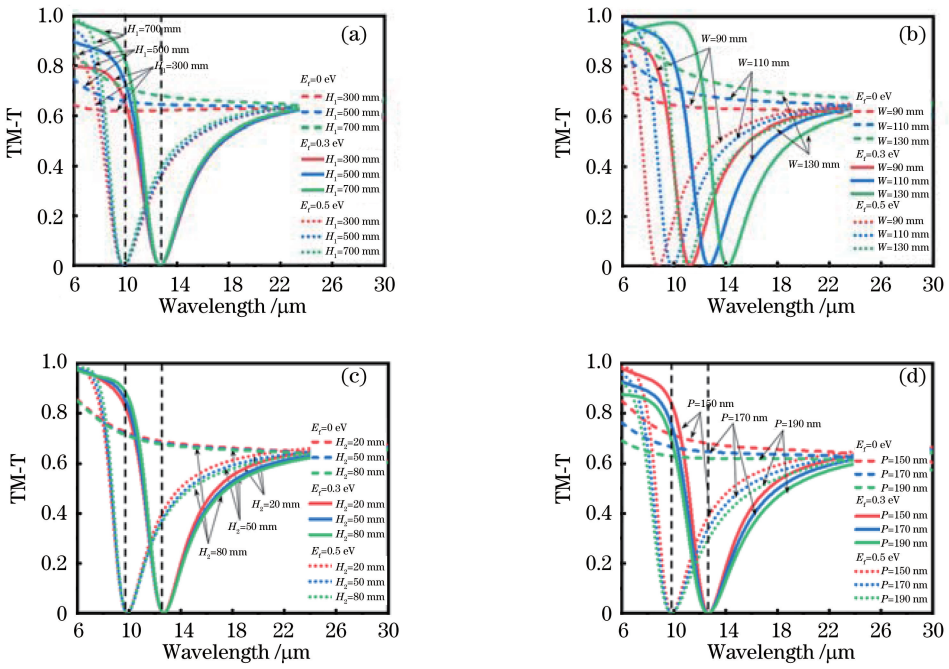


图 4 不同结构参数对所提结构性能的影响。(a)  $W=110\text{ nm}$ 、 $H_2=50\text{ nm}$ 、 $P=150\text{ nm}$  时, TM 光的透射率随  $H_1$  的变化; (b)  $H_1=700\text{ nm}$ 、 $H_2=50\text{ nm}$ 、 $P=150\text{ nm}$  时, TM 光的透射率随  $W$  的变化; (c)  $H_1=700\text{ nm}$ 、 $W=110\text{ nm}$ 、 $P=150\text{ nm}$  时, TM 光的透射率随  $H_2$  的变化; (d)  $H_1=700\text{ nm}$ 、 $W=110\text{ nm}$ 、 $H_2=50\text{ nm}$  时, TM 光的透射率随光栅周期  $P$  的变化

Fig. 4 Influences of structural parameters on properties of proposed structure. (a) Transmissivity of TM light varying with  $H_1$  when  $W=110\text{ nm}$ ,  $H_2=50\text{ nm}$ , and  $P=150\text{ nm}$ ; (b) transmissivity of TM light varying with  $W$  when  $H_1=700\text{ nm}$ ,  $H_2=50\text{ nm}$ , and  $P=150\text{ nm}$ ; (c) transmissivity of TM light varying with  $H_2$  when  $H_1=700\text{ nm}$ ,  $W=110\text{ nm}$ , and  $P=150\text{ nm}$ ; (d) transmissivity of TM light varying with  $P$  when  $H_1=700\text{ nm}$ ,  $W=110\text{ nm}$ , and  $H_2=50\text{ nm}$

和透射率, 需要选择较小的周期。

本文所提的双层金属光栅结构中, 无需刻蚀金属铝, 只需要进行硅的刻蚀, 这大大减小了实验的难度。为了进一步考察硅光栅刻蚀的高度对器件性能的影响, 图 5 给出了 3 个不同硅光栅高度 ( $H_1$  分别为 500, 600, 700 nm) 时的器件性能, 其他结构参数为:  $W=110\text{ nm}$ ,  $H_2=50\text{ nm}$ ,  $P=150\text{ nm}$ , 石墨烯

层数为 15 层。如图 5 所示, 硅光栅的高度  $H_1$  分别为 500, 600, 700 nm 时, 调制深度和调制带宽几乎不受影响, 仅“ON”状态时的 TM 光的绝对透射率发生变化。对于 TM 光, 调制器在 7~12  $\mu\text{m}$  波长范围内的调制深度大于 99.85% (28.10 dB), 最大调制深度达 99.96% (33.77 dB), 在 12~22  $\mu\text{m}$  波长范围内的调制深度大于 94.57% (12.65 dB)。

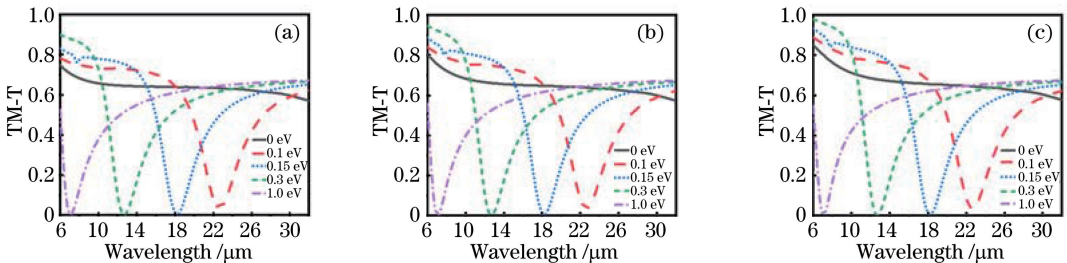


图 5  $H_1$  对器件性能的影响。(a)  $H_1=500\text{ nm}$ ; (b)  $H_1=600\text{ nm}$ ; (c)  $H_1=700\text{ nm}$   
Fig. 5 Influence of  $H_1$  on property of device. (a)  $H_1=500\text{ nm}$ ; (b)  $H_1=600\text{ nm}$ ;  
(c)  $H_1=700\text{ nm}$

## 4 结 论

提出了工作于红外波段的石墨烯硅基双层金属光栅宽波段透射式光调制器,分析了调制器的结构参数对调制深度和调制带宽的影响。利用硅基的双层金属光栅结构实现 TM 条件下多层石墨烯增强的局域表面等离子体共振,同时对 TE 光实现高反射,进而实现了一种可支持自然光入射、结构和制备相对简单且具有较大的调制深度和调制带宽的透射光调制器。通过优化结构参数,所提结构在  $7 \sim 12 \mu\text{m}$  范围内的透射率大于 80%,调制深度大于 99.85% (28.10 dB),最大可达 99.96% (33.77 dB),在  $12 \sim 22 \mu\text{m}$  范围内的透射率大于 60%,调制深度大于 94.57% (12.65 dB)。

## 参 考 文 献

[1] Khorasaninejad M, Shi Z, Zhu A Y, et al. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion[J]. Nano Letters, 2017, 17(3): 1819-1824.

[2] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible [J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(3): 227-232.

[3] Qian Q Y, Sun T, Yan Y, et al. Large-area wide-incident-angle metasurface perfect absorber in total visible band based on coupled Mie resonances [J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(13): 1700064.

[4] Suen J Y, Fan K B, Padilla W J. A zero-rank, maximum nullity perfect electromagnetic wave absorber[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(8): 1801632.

[5] Liu A, Jones R, Liao L, et al. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor [J]. Nature, 2004, 427(6975): 615-618.

[6] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, et al. Silicon optical modulators [J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 518-526.

[7] Novoselov K S. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.

[8] Fang Z Y, Liu Z, Wang Y M, et al. Graphene-antenna sandwich photodetector [J]. Nano Letters, 2012, 12(7): 3808-3813.

[9] Yao Y, Kats M A, Genevet P, et al. Broad electrical tuning of graphene-loaded plasmonic antennas [J]. Nano Letters, 2013, 13(3): 1257-1264.

[10] Li Q, Tian Z, Zhang X Q, et al. Active graphene-silicon hybrid diode for terahertz waves [J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 7082.

[11] Li Q, Tian Z, Zhang X Q, et al. Dual control of active graphene-silicon hybrid metamaterial devices [J]. Carbon, 2015, 90: 146-153.

[12] Valmorra F, Scalari G, Maissen C, et al. Low-bias active control of terahertz waves by coupling large-area CVD graphene to a terahertz metamaterial [J]. Nano Letters, 2013, 13(7): 3193-3198.

[13] Arezoomandan S, Condori Quispe H O, Ramey N, et al. Graphene-based reconfigurable terahertz plasmonics and metamaterials [J]. Carbon, 2017, 112: 177-184.

[14] Yuan Y H, Chen X Y, Hu F R, et al. Terahertz amplitude modulator based on metasurface/ion-gel/graphene hybrid structure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614016.  
袁莹辉, 陈懿宇, 胡放荣, 等. 基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调制器件 [J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614016.

[15] Fei Z, Rodin A S, Andreev G O, et al. Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging [J]. Nature, 2012, 487(7405): 82-85.

[16] Yan H, Li X, Chandra B, et al. Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks [J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(5): 330-334.

[17] Furchi M, Urich A, Pospischil A, et al. Microcavity-integrated graphene photodetector [J]. Nano Letters, 2012, 12(6): 2773-2777.

[18] Liu J T, Liu N H, Li J, et al. Enhanced absorption of graphene with one-dimensional photonic crystal [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(5): 052104.

[19] Wang L, Luan K Z, Zuo Y F, et al. Graphene optical modulator based on optical tamm states [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1106001.  
王磊, 栾开智, 左依凡, 等. 基于光学 Tamm 态的石墨烯光调制器 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1106001.

[20] Cai Y J, Zhu J F, Liu Q H, et al. Enhanced spatial near-infrared modulation of graphene-loaded perfect absorbers using plasmonic nanoslits [J]. Optics Express, 2015, 23(25): 32318-32328.

[21] Dabidian N, Kholmanov I, Khanikaev A B, et al. Electrical switching of infrared light using graphene integration with plasmonic Fano resonant metasurfaces [J]. ACS Photonics, 2015, 2(2): 216-

- 227.
- [22] Liu M, Yin X, Ulin-Avila E, et al. A graphene-based broadband optical modulator [J]. *Nature*, 2011, 474(7349): 64-67.
- [23] Wang S L, Ye Z W, Peng X L, et al. Study of highly-efficient composite waveguide modulator based on graphene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0513003.  
王少亮, 叶子威, 彭希亮, 等. 基于石墨烯的高效复合波导调制器研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0513003.
- [24] Gao W L, Shu J, Qiu C Y, et al. Excitation of plasmonic waves in graphene by guided-mode resonances[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(9): 7806-7813.
- [25] Falkovsky L, Pershoguba S S. Optical far-infrared properties of a graphene monolayer and multilayer [J]. *Physical Review B*, 2007, 76(15): 153410.
- [26] Petrone N, Dean C R, Meric I, et al. Chemical vapor deposition-derived graphene with electrical performance of exfoliated graphene [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 2751-2756.
- [27] Liu W G, Hu B, Huang Z D, et al. Graphene-enabled electrically controlled terahertz meta-lens[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(7): 703-708.
- [28] Cheng J R, Fan F, Chang S J. Recent progress on graphene-functionalized metasurfaces for tunable phase and polarization control [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(3): 398.
- [29] Wang W, Meng Z, Liang R S, et al. A dynamically tunable plasmonic multi-functional device based on graphene nano-sheet pair arrays [J]. *Optics Communications*, 2018, 415: 130-134.
- [30] Zhu A J, Qian Q Y, Yan Y, et al. Ultrathin plasmonic quarter waveplate using broken rectangular annular metasurface [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 92: 120-125.