

激光与光电子学进展

基于石墨烯的双功能可切换宽带太赫兹偏振转换器

易南宁, 宗容, 钱蓉蓉*, 段韬

云南大学信息学院, 云南 昆明 650000

摘要 提出了一种基于石墨烯-金属混合的超表面, 该超表面可以通过调节石墨烯的费米能级实现在四分之一波片和二分之一波片之间的自由切换。数值仿真结果表明: 当石墨烯的费米能级为 0 eV 时, 所提出的超表面可以在 1.465~3.44 THz 的频率范围内实现线性极化波到右旋圆极化波的转换, 相对带宽为 96.5%, 绝对带宽为 1.975 THz。当石墨烯的费米能级等于 1 eV 时, 超表面变为宽带交叉偏振转换器, 即二分之一波片, 可以在 1.173~3.44 THz 的频率范围内实现偏振转换率大于 80%, 相对带宽为 98.7%, 绝对带宽为 2.267 THz。此外, 所提出的宽带可切换超表面对入射角的稳定性较强。因此可以在传感、成像等领域有很好的应用前景。

关键词 光学器件; 超材料; 太赫兹; 石墨烯; 可切换; 偏振转换

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2323001

Graphene-Based Dual-Function Switchable Broadband Terahertz Polarization Converter

Yi Nanning, Zong Rong, Qian Rongrong*, Duan Tao

School of Information, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650000, China

Abstract This paper proposed a metasurface based on the hybrid graphene-metal which can be switched freely between a quarter wave plate and a half wave plate by adjusting the Fermi level of graphene. Numerical simulation results show that when the Fermi level of graphene is 0 eV, the proposed metasurface can realize the conversion from linearly polarized waves to right-handed circularly polarized waves in the frequency range of 1.465-3.44 THz, with a relative bandwidth of 96.5%, and the absolute bandwidth is 1.975 THz. When the Fermi energy level of graphene is 1 eV, the metasurface becomes a broadband cross-polarization converter, that is, one-half wave plate, which can achieve a polarization conversion rate greater than 80% in the frequency range of 1.173-3.44 THz. The relative bandwidth is 98.7%, and the absolute bandwidth is 2.267 THz. In addition, the proposed broadband switchable metasurface has a strong robustness to the angle of incidence. Therefore, it has a good application prospects in the fields of sensing and imaging.

Key words optical devices; metamaterial; terahertz; graphene; switchable; polarization conversion

OCIS codes 230.5440; 160.3918; 300.6495; 260.5430

1 引言

由于有效的太赫兹源和灵敏探测器的出现, 近

年来对太赫兹波的研究变得越来越火热。如今, 太赫兹技术在成像、生物医学、传感等领域具有广泛的应用^[1-5]。而超材料的出现又一次将太赫兹技术

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-03-17; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(61701433); 云南省科技厅面上项目(2018FB099)

通信作者: *r.qiang@ynu.edu.cn

推向研究前沿。超材料作为一种具有亚波长尺寸的周期性结构的人工复合材料,它具有自然界中材料所不具备的杰出特性,如负介电常数以及负折射率。2018年,Fan等^[6]提出了一种栅形结构的偏振转换器,该结构可以将入射太赫兹波的电场方向旋转90°,但是转化效率较低。2019年,Lu等^[7]提出了一种L型超材料太赫兹偏振转换器,可以在4.2~5.2 THz的频率范围内实现98%以上的偏振转换效率。但是以上结构都有一定的缺点,例如功能单一,工作频带窄等。所以设计一种具有多功能并且性能可调的偏振转换器仍然是值得研究的热点。

石墨烯,一种排列在六方晶格二维材料中的单层碳原子结构,具有出色的机械、电学和光学特性,包括快速的载流子迁移率,高的光学透明性和可调性。石墨烯在太赫兹频段内可以支持表面等离子激元的传播,在偏振转换器,吸波器和调制器等领域都有良好的应用潜力^[8-11]。2016年,Yang等^[12]提出了一种基于石墨烯的镂空矩形交叉偏振转换器,该偏振转换器可以将入射的线偏振波转换为其正交方向上的线偏振波,且偏振转换率大于90%。2020年,Zhang等^[13]提出了一种基于石墨烯-金属混合的双功能超表面,可以通过调节石墨烯的费米能级来实现四分之一波片到二分之一波片之间的切换。

本文提出了一种基于金属-石墨烯混合的双功能可切换偏振转换器。该偏振转换器具有经典的三层结构,可以通过调节石墨烯的费米能级实现在四分之一波片和二分之一波片之间的自由切换。为了进一步了解所提出的偏振转换器的性能,本文对一些重要的结构参数进行了扫参分析,发现不同的介质层厚度和顶层的谐振环半径对偏振转换性能的影响较大。此外,为了验证该偏振转换器在实际应用中的可行性,还探究了在不同斜入射条件的入射角下超表面作为四分之一波片(QWP)时的椭圆率和作为二分之一波片(HWP)时的偏振转换率的变化光谱,发现该超表面对入射角的稳定性较强。这些足以说明所设计的偏振转换器可以被广泛的应用于高性能的太赫兹器件中。

2 理论模型

在数值仿真中,将利用化学沉积气相工艺

(CVD)制备的单层石墨烯定义为无厚度的二维表面阻抗层^[14,16]。在太赫兹频率范围内,石墨烯的表面电导率可以根据Kubo公式导出,该公式指出石墨烯的表面电导率由带内电导率和带间电导率组成^[17]:

$$\sigma_g(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \sigma_{\text{inter}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) + \sigma_{\text{intra}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T), \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{inter}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2}{4\pi\hbar} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - (\omega - j2\Gamma)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega - j2\Gamma)\hbar} \right], \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{intra}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi\hbar^2 (\omega - j2\Gamma)} \left\{ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left[\exp\left(-\frac{\mu_c}{k_B T}\right) + 1 \right] \right\}. \quad (3)$$

事实上,在太赫兹频段和室温条件下,根据Pauli排斥原理,即当 $E_F \gg \hbar\omega$ 且 $E_F \gg k_B T$ 时,石墨烯的表面电导率主要由带内电导率决定,即带间电导率的贡献可以忽略不计^[18-19],其中(\hbar 为约化普朗克常数, E_F 为石墨烯的费米能级, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度)。因此,石墨烯的表面电导率可以简化为Drude形式:

$$\sigma_g(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi\hbar^2 (\omega - j2\Gamma)} \left\{ \frac{E_F}{k_B T} + 2 \ln \left[\exp\left(-\frac{E_F}{k_B T}\right) + 1 \right] \right\}, \quad (4)$$

其中, ω 为角频率, E_F 为费米能级, $\Gamma = 1/2\tau$,其中 $\tau = \mu E_F / e v_F^2$ 为在电子迁移率 $\mu = 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的弛豫时间, $v_F \approx 1.1 \times 10^6 \text{ m/s}$ 为费米速度。 T 为环境温度(一般为300 K), \hbar 和 e 分别为约化普朗克常量($\hbar = h/2\pi$)和电荷量。由(4)式可知,石墨烯的表面电导率可以通过费米能级和弛豫时间调节,在实际操作中,石墨烯的费米能级可以通过化学掺杂或者改变外加的偏置电压来实现。通常情况下,石墨烯的费米能级与外部偏置电压的关系可以表示为^[20]:

$$E_F = \hbar v_F \sqrt{\pi a_0 V_{\text{bias}}}, \quad (2)$$

其中, $v_F = 10^6 \text{ m/s}$ 为费米速度, a_0 的估算值为 $9 \times 10^{16} \text{ m}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$, V_{bias} 为偏置电压。

3 超材料的设计与仿真

所提出的基于混合石墨烯-金属超材料的宽带可切换双功能偏振转换器的结构示意图如图1所示,结构的各项具体参数如图1(a)和(b)中标识。

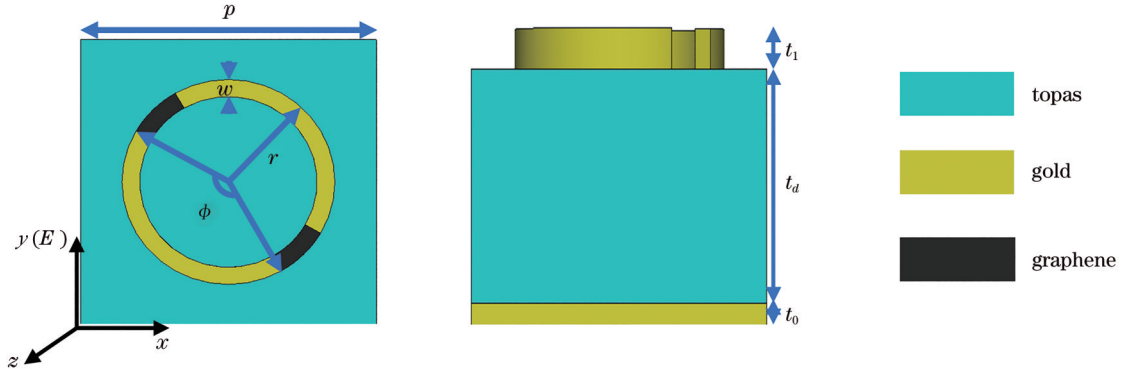


图 1 混合石墨烯-金属超表面结构示意图。(a)主视图;(b)侧视图

Fig. 1 Schematic diagram of the metasurface structure of mixed graphene-metal. (a) Top view; (b) side view

从图 1 中可知,所提出的超表面分为三层,其中顶层是由石墨烯和金组成的圆环。中间的介质层选用的是有损的聚乙烯环烯烃共聚物(TOPAS),TOPAS 是由 TOPAS Advanced Polymers GmbH 在德国,美国和其他国家/地区生产的环烯烃共聚物(COC)的商品名^[21]。与以常规的结晶聚烯烃相反,它具有一些出色的性能,如太赫兹/光信号的低损耗,低双折射^[22]。其复介电常数为 $\epsilon_r = 2.35 + 0.01i$ ^[23-24],厚度 $t_d = 22 \mu\text{m}$ 。底面金属为有损的金,其电导率为 $\sigma_{Au} = 4.561 \times 10^7 \text{ S/m}$,厚度 $t_0 = 0.2 \mu\text{m}$ 。其余各结构参数为:单个晶胞单元的周期 $p = 50 \mu\text{m}$,金环的宽度 $w = 3 \mu\text{m}$,厚度为 $t_1 = 0.6 \mu\text{m}$,圆弧所对应的圆心角为 $\phi = 150^\circ$ 。使用 CST Microwave Studio 中的频域求解器,对提出的偏振转换性能进行了数值仿真模拟。在 x 和 y 方向上应用晶胞边界条件(unit cell),并在 z 方向上设置开放边界,并采用自适应四面体网格细化用于加速收敛。

4 结果与讨论

4.1 QWP 和 HWP 的性能分析

当石墨烯的费米能级为 0 时,假设入射波为 y 偏振波入射波经过超表面反射后,反射波可以表示为 $E_r = E_{xr} \vec{e}_x + E_{yr} \vec{e}_y = r_{xy} e^{j\varphi_{xy}} E_{yi} \vec{e}_x + r_{yy} e^{j\varphi_{yy}} E_{yi} \vec{e}_y$ ^[25], 其中 $r_{xy} = |E_{xr}/E_{yi}|$ 和 $r_{yy} = |E_{yr}/E_{yi}|$ 分别表示 y 偏振到 x 偏振和 y 偏振到 y 偏振的反射系数,如图 2(a)所示。从图中可以看到在 1.465~3.44 THz 的频率范围内反射系数的幅度值几乎相等,带宽比为 $\frac{2(f_{\max} - f_{\min})}{f_{\max} + f_{\min}} = 96.5\%$,绝对带宽为 1.975 THz。 φ_{xy} 和 φ_{yy} 分别是其对应的相位,如图 2(b)所示。可以观察到在该频率范围内反射系数所对应的相位

差接近于 -90° 或 270° 。这表明反射波为右旋圆偏振波^[26]。为了进一步量化 QWP 的性能,引入了斯托克斯参量来分析超表面的圆偏振性能。与 S 参数相关的斯托克斯参量可以表示为^[27]:

$$\begin{aligned} S_0 &= |r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2 \\ S_1 &= |r_{yy}|^2 - |r_{xy}|^2 \\ S_2 &= 2|r_{yy}||r_{xy}| \cos \Delta\varphi \\ S_3 &= 2|r_{yy}||r_{xy}| \sin \Delta\varphi \end{aligned} \quad (3)$$

定义归一化椭圆率为 $e = S_3/S_0 = 2|r_{yy}||r_{xy}| \sin \Delta\varphi / (|r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2)$ 来表征圆偏振转换的性能。具体地说, $e = \pm 1$ 分别表示反射波是左旋圆偏振波(LHCP)和右旋圆偏振波(RHCP),定义 $|e| > 0.9$ 表示高效的圆偏振程度。根据(3)式,图 2(a)和(b),可以得到与频率相关的椭圆率,如图 2(c)所示。从图中可以看到在 1.465~3.44 THz 的频率范围内椭圆率接近于 -1 ,这进一步说明了反射波是右旋圆偏振波。

为了更好地了解偏振转换的物理机制,将入射波分解为两个正交方向上的分量(即 u 和 v 轴分量),如图 2(d)中所示。值得说明的是, u - v 坐标轴就是笛卡尔坐标轴(x - y 坐标轴)绕着 z 轴旋转 45° 后得到的。则反射波在 u - v 坐标轴下表示为 $\vec{E}_r = \{r_{uu} E_i e^{j(-kz + \phi_{uu})} + r_{vu} E_i e^{j(-kz + \phi_{vu})}\} \vec{e}_u + \{r_{uv} E_i e^{j(-kz + \phi_{uv})} + r_{vv} E_i e^{j(-kz + \phi_{vv})}\} \vec{e}_v$, 其中 r_{uu} , r_{vu} , r_{uv} 和 r_{vv} 分别为 u 到 u , u 到 v , v 到 u 和 v 到 v 偏振的反射系数,如图 2(e)所示; ϕ_{uu} 和 ϕ_{vv} 为 r_{uu} 和 r_{vv} 相对应的相位(图中只给出了需要考虑的两个相位及它们的相位差),如图 2(f)所示。当 $|r_{vu}| = |r_{uv}| = 0$, $|r_{uu}| = |r_{vv}|$ 且 $\Delta\phi = \phi_{vv} - \phi_{uu} = 2m\pi \pm \pi/2$ (m 为任意的整数)时,反射波为圆偏振波^[28]。从图 2(e)和(f)中可以看到在 1.8~3.4 THz 的频率范围内 $|r_{vu}| = |r_{uv}| = 0$ 且 $|r_{uu}| = |r_{vv}|$, 并且它们之间的相位差接近于 90° 或

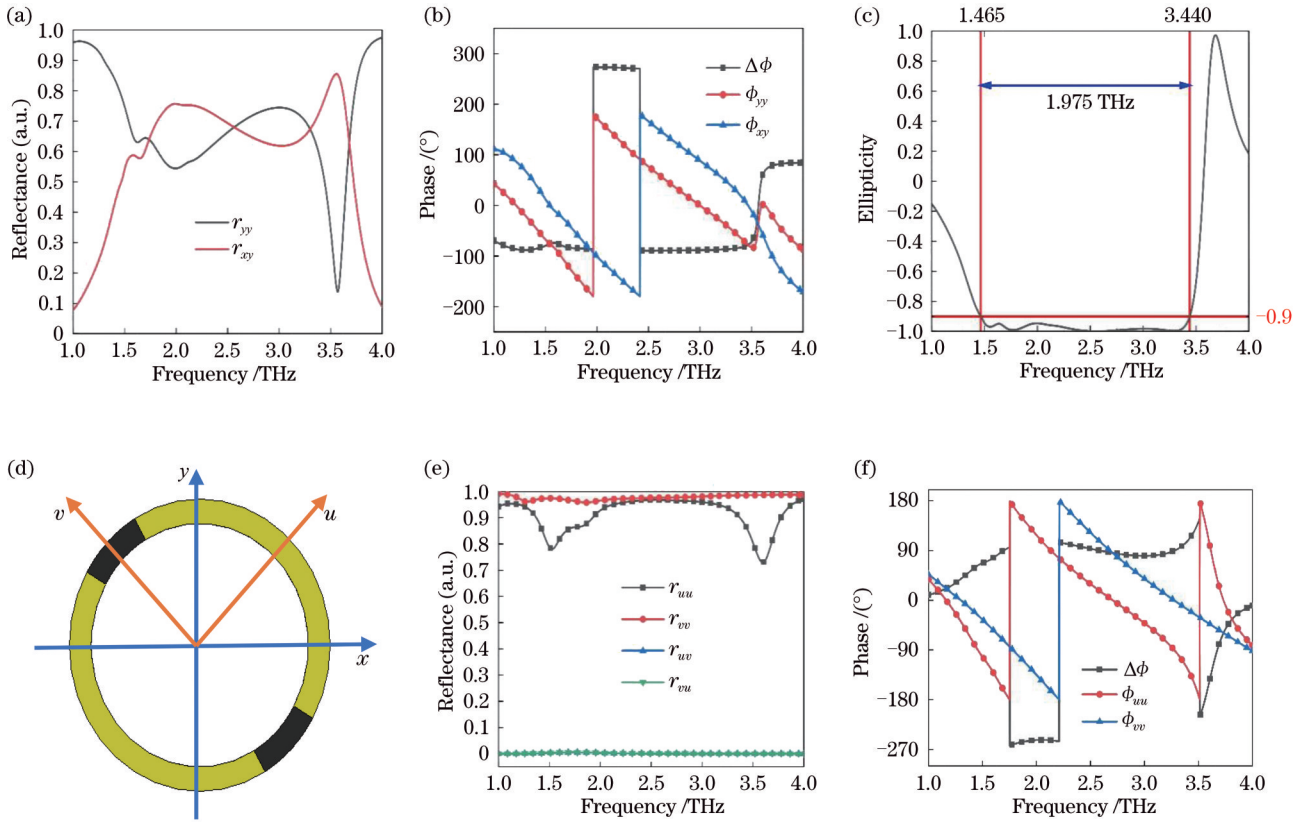


图 2 所提出的超材料在石墨烯的费米能级固定为 0 eV 时, (a) 在具有 y 偏振的法向入射波下的同偏振和交叉偏振反射幅度的模拟光谱。(b) 反射系数对应的相位及相位差 (c) 椭圆率的计算光谱。(d) 入射波电场的分解图示意图。垂直入射的 u 和 v 偏振太赫兹波下工作时, (e) 反射幅度和 (f) 相位的模拟光谱。

Fig. 2 When the Fermi level of graphene is fixed at 0 for the proposed metamaterial, (a) simulated spectra of the co-polarization and cross-polarization reflection amplitudes under normally incident wave with y-polarization. (b) Phase and phase difference corresponding to reflection coefficient (c) spectra of ellipticity. (d) Schematic diagram of the exploded view of the incident wave electric field. When working under vertically incident u and v polarized terahertz waves, the simulated spectrum of (e) reflection amplitude and (f) spectra of phase.

-270°。这进一步的表明线性偏振入射波经过超表面后被转化成了圆偏振波。

当石墨烯的费米能级为 1 eV 时, 所提出的超表面变为 HWP。而对于线性偏振波, 可以通过计算偏振转换率 (PCR) 来判断超表面在作为 HWP 时的偏振转换性能的优劣。根据数值仿真软件 CST 可以得到与频率相关的 S 参数, 从而计算得到 PCR 的表达式^[15, 29]:

$$\frac{r_{xy}^2}{r_{xy}^2 + r_{yy}^2} \quad (4)$$

其中 $r_{yy} = \frac{|E_{yr}|}{|E_{yi}|}$ 为共偏振反射系数, $r_{xy} = \frac{|E_{xr}|}{|E_{yi}|}$ 为交叉偏振反射系数。如图 3(a) 所示, 给出了反射系数和 PCR 随频率的变化光谱。从图中可以看到共偏振反射系数 (如图中红色曲线) 在 1.58 THz, 2.344 THz 和 3.333 THz 处取得极小值, 分别为 0.052, 0.035

和 0.086。而与此同时交叉偏振反射系数 (如图中蓝色曲线) 在这三个频率点处取得极大值 0.907, 0.935 和 0.887。在这三个谐振频率点处的 PCR 值均超过了 99%。此外还可以观察到 PCR 在 1.173~3.44 THz 的频率范围内大于 80%, 相对带宽为 $\frac{2(f_{\max} - f_{\min})}{f_{\max} + f_{\min}} = 98.7\%$, 绝对带宽为 2.267 THz。

如上述 QWP 的分析一样, 图 3(b), (c) 和 (d) 给出了在垂直 u 和 v 偏振太赫兹波入射条件下的反射系数曲线以及对应的相位。可知在 1.6~3.2 THz 的频率范围内 $|r_{uu}|$ 与 $|r_{vv}|$ 几乎相等, 交叉反射系数相等且几乎等于 0, 并且同偏振反射系数所对应的相位的相位差接近于 ±180°。值得注意的是, 相位差的无色散是由圆环谐振结构的几何对称性引起的^[13]。以上结果表明完美的交叉偏振转换完成了。

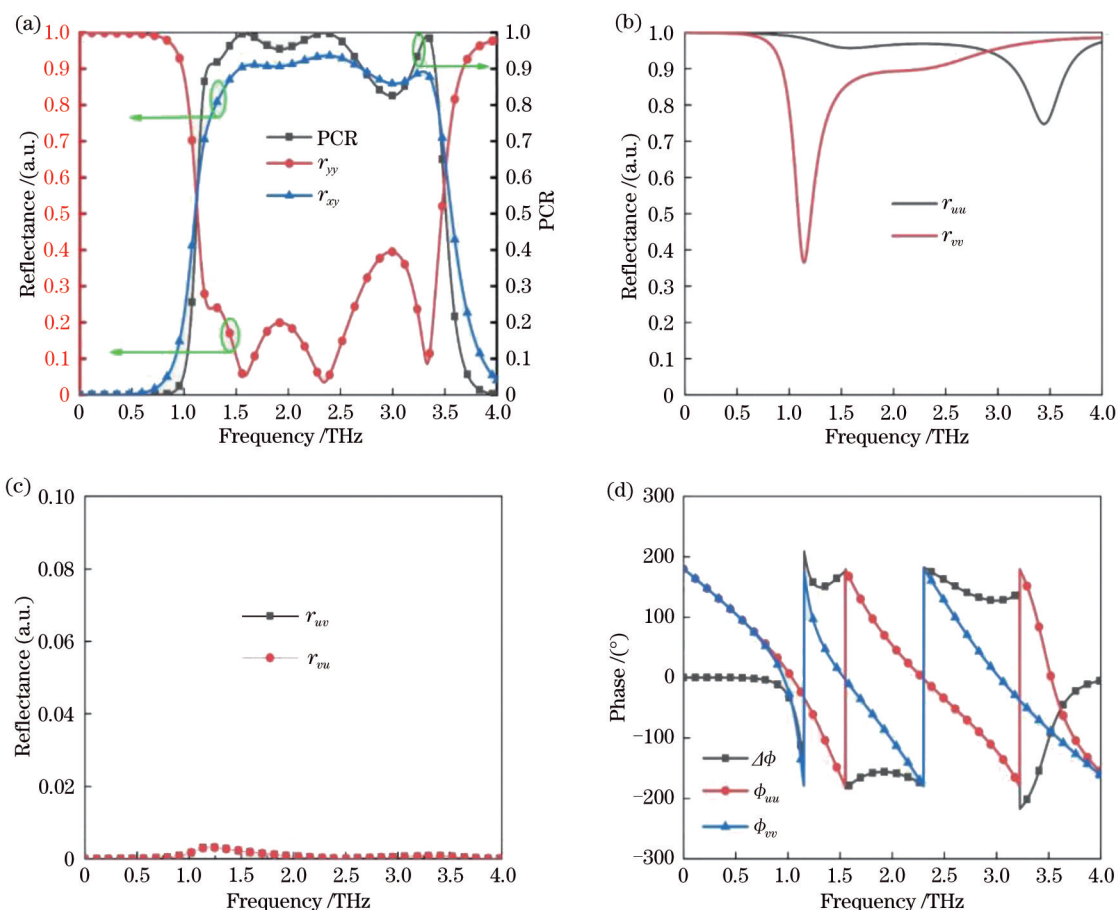


图3 所提出的超材料在石墨烯的费米能级固定为 1 eV 时, (a) 在具有 y 极化的法向入射波下的同极化和交叉极化反射幅度的模拟光谱。垂直入射的 u 和 v 极化太赫兹波下工作时, (b), (c) 反射幅度和 (d) 相位的模拟光谱。

Fig.3 When the Fermi level of graphene is fixed at 1 eV for the proposed metamaterial, (a) simulated spectra of the co-polarization and cross-polarization reflection amplitudes under normally incident wave with y -polarization. When working under vertically incident u and v polarized terahertz waves, the simulated spectrum of (b) and (c) reflection amplitude and (d) phase.

4.2 物理机制分析

为了进一步了解所设计的具有宽带转换性能的 QWP/HWP 背后的物理机理, 图 4 给出了当石墨烯的费米能级固定为 0 时, 在 u - v 坐标轴系下顶层圆环谐振器和底面金膜上的表面电流分布情况。在此处选取了对应图 2(a) 中反射系数相等的三个谐振频率点, 分别为 1.708 THz, 2.582 THz 和 3.277 THz。从图 4 中可以看到在 u 偏振波入射条件下三个谐振频率点处顶层圆环谐振器和底面金膜表面上的表面电流的流向相反, 从而在介质腔中形成了电流环, 引起了磁谐振。而在 v 偏振波入射条件下, 如图 4(b), (d) 所示。在 1.708 THz 和 2.582 THz 处顶层圆环谐振器和底面金膜表面上的表面电流的流向相反, 引起磁谐振。但是在 3.277 THz 处顶层圆环谐振器和底面金膜表面上的表面电流的流向相同, 这说明在介质腔中形成了电流环从而引起了

等效的电谐振^[30], 如图 4(e) 所示。电磁谐振沿 u 轴和 v 轴控制反射电场的大小和相位, 当反射场的 u 分量和 v 分量具有相等的幅度并且相位差为 90° 或 270° 时, 将实现理想的 QWP。因此, 所获得的 QWP 的宽带性能应源自三个共振的叠加。

为了更好地了解超表面作为四分之一玻片时的偏振转换机制, 图 5(a), (b), (c) 分别给出了三个谐振频率点 1.708 THz, 2.582 THz 和 3.277 THz 处的电场分布。从图中可以观察到在 1.708 THz 和 2.582 THz 处电场主要集中在两个圆弧型的石墨烯上, 这表明由于石墨烯的存在引起了强烈的局域性表面等离子体共振, 从而导致高效的圆偏振转换效率。而在 3.277 THz 处, 电场主要集中在金属圆环的裂缝处, 这说明谐振环的共振效应是引起偏振转换的主要原因。

当石墨烯的费米能级增大到 1 eV 时, 在 u - v 坐

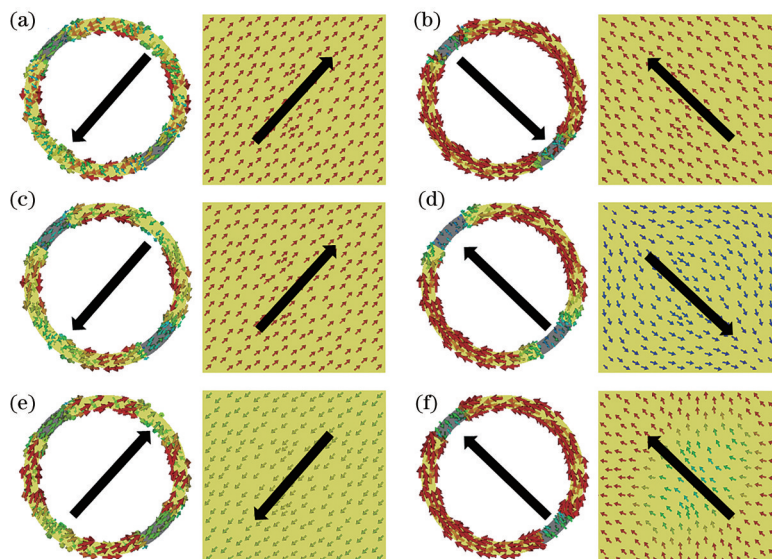


图 4 当石墨烯的费米能级固定为 0 时,弛豫时间固定为 1 ps 时,在(a),(b) 1.708 THz,(c),(d) 2.582 THz 和(e),(f) 3.277 THz 处顶层谐振环(第 1 和第 3 列)和底面金膜(第 2 和第 4 列)上的表面电流分布。(a),(c),(e) 表示 u 偏振入射波, (b),(d),(f) 表示 v 偏振入射波。图中黑色的箭头表示主导电流方向。

Fig. 4 When the Fermi level of graphene is fixed at 0 and the relaxation time is fixed at 1 ps, the values are (a) (b) 1.708 THz, (c), (d) 2.582 THz and (e), (f) 3.277 THz The surface current distribution on the top layer resonant ring (1st and 3rd column) and the bottom gold film (2nd and 4th column). (a), (c), and (e) show those for the u -polarized incident wave, and (b),(d),(f) show those for the v -polarized incident wave. The black arrow in the figure indicates the dominant current direction.

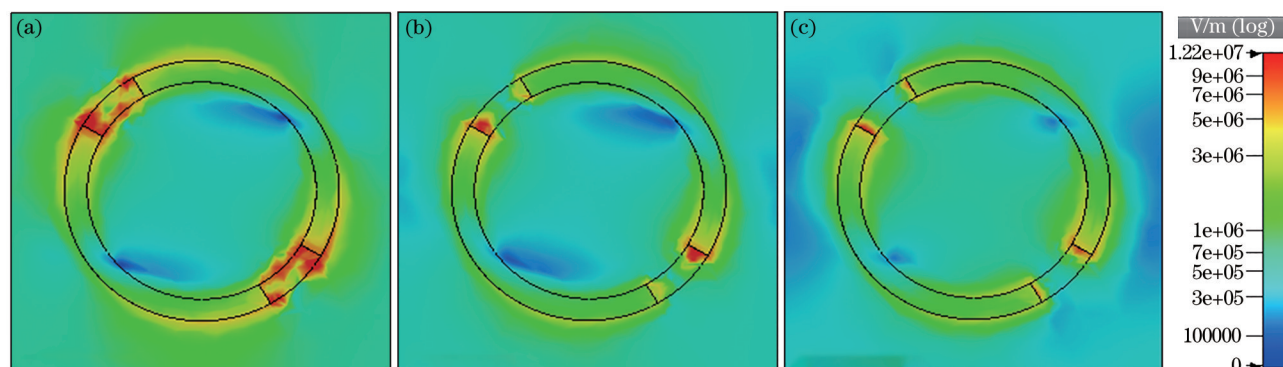


图 5 当超表面作为 QWP 时在谐振频率点(a) 1.708 THz,(b) 2.582 THz 和(c) 3.277 THz 处的电场分布

Fig. 5 Electric field distribution at resonance frequency points (a) 1.708 THz, (b) 2.582 THz and (c) 3.277 THz when the metasurface behaved as QWP

标轴系统下顶层圆环谐振器和底面金膜上的表面电流分布情况如图 6 所示。此时选取了对应于图 3(a) 中 $|r_{yy}|$ 取得极小值的三个谐振频率点,分别为 1.58 THz, 2.344 THz 和 3.333 THz。可知当在 u 偏振波入射条件下,在谐振频率点 1.58 THz 和 3.333 THz 处顶层圆环谐振器和底面金膜上的表面电流的流向相反,从而在介质腔中形成了电流环,引起了磁谐振。而在 2.344 THz 谐振频率点处顶层圆环谐振器和底面金膜上的表面电流的流向相同,在介质腔中形成了电流环,引起了电谐振。对于 v 偏振波入射条件下,在 1.58 THz 和

2.344 THz 谐振频率点处顶层圆环谐振器和底面金膜上的表面电流的电流流向相反,引起了磁谐振,而在 3.333 THz 处,顶层圆环谐振器和底面金膜表面上的表面电流流向相同,引起了电谐振。类似于 QWP,当反射场的 u 分量和 v 分量具有相等的幅度并且相位差为 180° 时,将实现理想的 HWP。因此,所获得的 HWP 的宽带性能应源自三个共振的叠加。

同样的,当超表面作为 HWP 时在三个谐振频率点 1.58 THz, 2.344 THz 和 3.333 THz 处的电场分布分别如图 7(a), (b), (c) 所示。可以观察到在

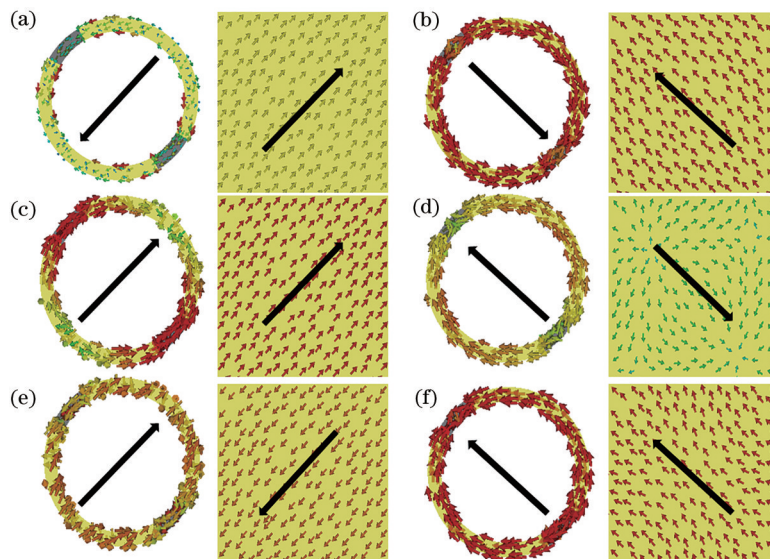


图 6 当石墨烯的费米能级固定为 1 eV 时,弛豫时间固定为 1 ps 时,在(a),(b) 1.58 THz,(c),(d) 2.344 THz 和(e),(f) 3.333 THz 处顶层谐振环(第 1 和第 3 列)和底面金膜(第 2 和第 4 列)上的表面电流分布。(a),(c),(e)表示 u 偏振波垂直入射到超材料表面,(b),(d),(f)表示 v 偏振波垂直入射到超材料表面。图中黑色的箭头表示主导电流方向。

Fig. 6 When the Fermi level of graphene is fixed at 1 eV and the relaxation time is fixed at 1 ps, the values are (a), (b) 1.58 THz, (c), (d) 2.344 THz and (e), (f) 3.333 THz. The surface current distribution on the top layer resonant ring (1st and 3rd column) and the bottom gold film (2nd and 4th column). (a), (c) and (e) indicate that the u -polarized wave is incident on the surface of the metamaterial vertically, and (b), (d), (f) indicates that the v -polarized wave is incident on the surface of the metamaterial. The black arrow in the figure indicates the dominant current direction.

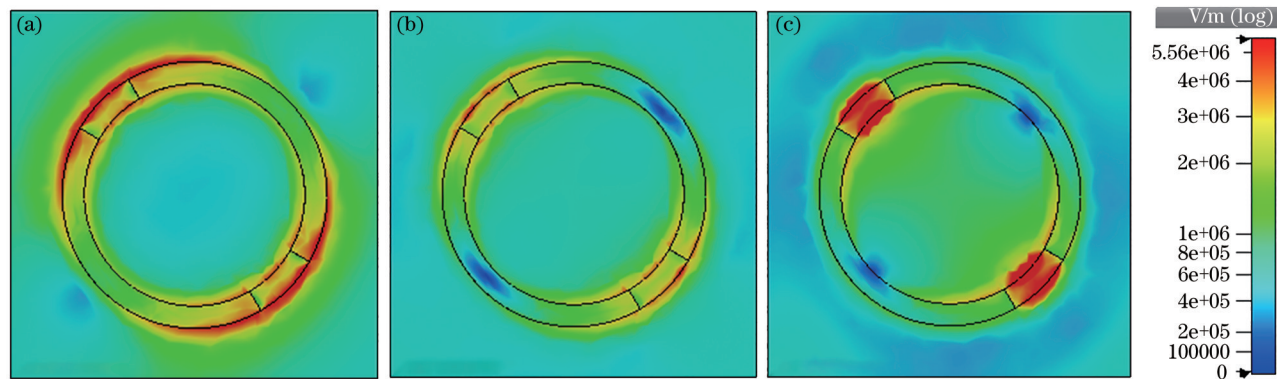


图 7 当超表面作为 HWP 时在谐振频率点(a) 1.58 THz,(b) 2.344 THz 和(c) 3.333 THz 处的电场分布

Fig. 7 Electric field distribution at resonance frequency points (a) 1.58 THz, (b) 2.344 THz and (c) 3.333 THz when the metasurface behaved as HWP

1.58 THz 处电场主要集中在石墨烯和金属谐振环的边缘,而在 2.344 THz 和 3.333 THz 处的电场主要分布在石墨烯表面,这导致了强的局域性表面等离子体共振,从而引起了高效的交叉偏振转换性能。

5 不同参数对偏振转换性能的影响

5.1 结构参数对偏振转换性能的影响

为了探究不同结构参数对所提出超表面偏振

转换性能的影响,图 8 给出了介质腔厚度 t_d 和顶层谐振环半径 r 取不同值时偏振转换性能随频率变化的光谱图。对于 QWP,可以从图 8(a)观察到随着介质腔厚度的增加,椭圆率先接近于 -1 然后慢慢增大(即远离 -1),并且在 t_d 为 22 μm 时取得最大的最优转换 ($|e| > 0.9$) 的带宽。图 8(b)给出了顶层谐振圆环半径从 15 μm 增大到 21 μm ,扫描步长为 3 μm 时,超表面作为 QWP 时的椭圆率随频率的变化光谱图。从图中可以看到随着半径的

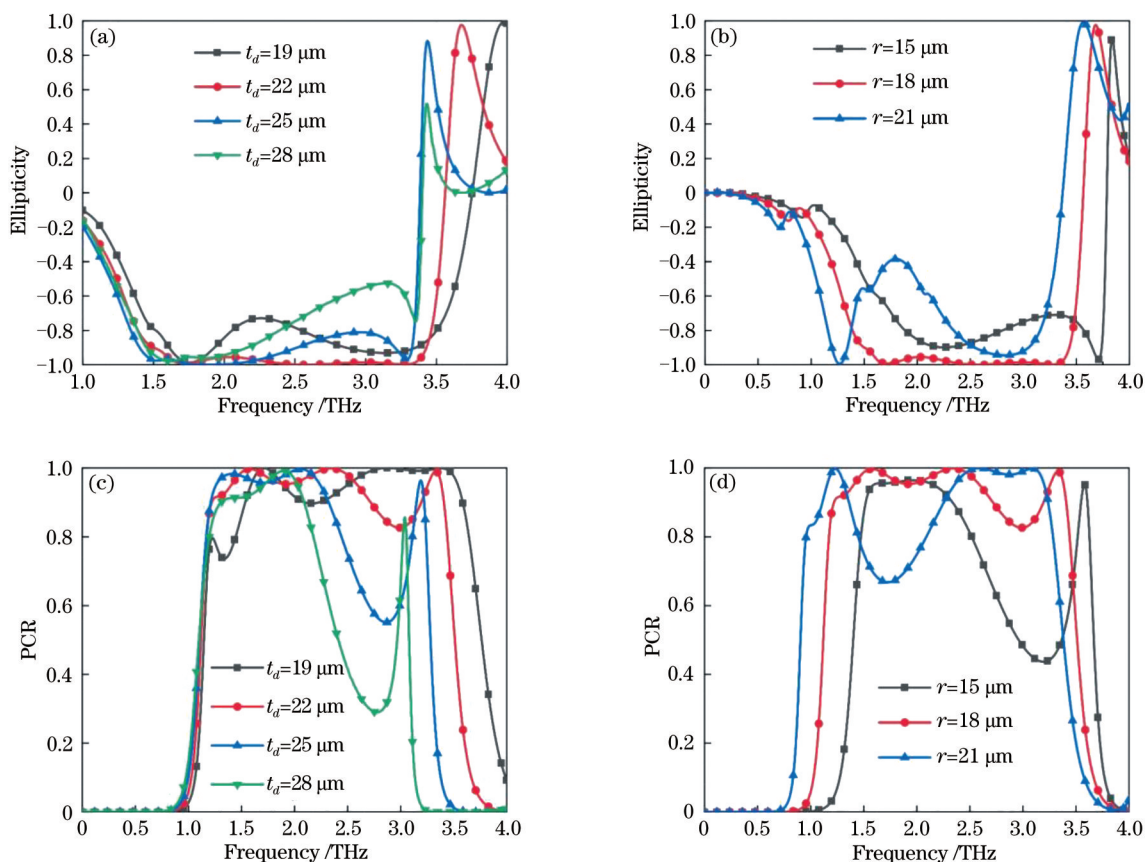


图 8 超表面作为 QWP 时的 (a) 不同介质层厚度对椭圆度的影响, (b) 不同谐振环半径对椭圆率的影响和作为 HWP 时的 (c) 不同介质层厚度对 PCR 的影响, (d) 不同谐振环半径对 PCR 的影响。

Fig. 8 When the metasurface is used as QWP (a) the influence of different dielectric layer thicknesses on ellipticity, (b) influence of different resonance ring radius on ellipticity and when it is used as HWP (c), influence of different dielectric layer thicknesses on PCR (d), the influence of different resonant ring radius on PCR.

增大, 椭圆率先慢慢接近于 -1 , 且接近 -1 的带宽随之慢慢展宽, 然后慢慢远离 -1 并且带宽也随之减小。当半径为 $18 \mu\text{m}$ 时椭圆率的性能最优。而对于 HWP, 图 8(c) 给出了不同介质腔厚度时 PCR 随着频率的变化光谱。可以发现随着厚度的增加, PCR 的峰值慢慢增大, 而高效的转换 ($> 80\%$) 带宽先展宽后缩小, 并且谐振频率点有红移的趋势。当厚度为 $22 \mu\text{m}$ 时, 取得最优的性能。不同圆环半径对 PCR 的影响如图 8(d) 所示, 显然当半径为 $18 \mu\text{m}$ 时, 所提出的超表面具有最优的性能。

5.2 不同石墨烯费米能级对偏振转换性能的影响

由于石墨烯具有可调性, 图 9 给出了不同石墨烯费米能级条件下所提出超表面的 PCR 曲线。从图中可以看到, 随着石墨烯的费米能级逐渐增大, 高效的 PCR ($> 80\%$) 带宽逐渐展宽, 且 PCR 峰值也逐渐增大。

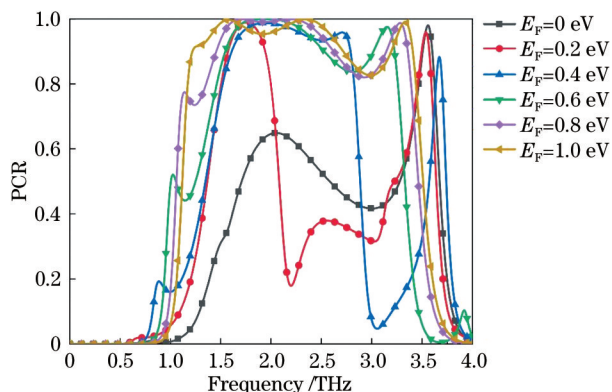


图 9 不同石墨烯费米能级条件下所提出超表面的 PCR 随着频率变化的光谱图

Fig. 9 Spectra of the proposed hypersurface PCR with frequency changes under different graphene Fermi levels

5.3 入射角对偏振转换性能的影响

在实际使用中, 还需要所设计的超表面对角度具有不敏感性。因此, 图 10 给出了在不同斜入射条件下偏振转换性能在不同入射角时随频率的变化

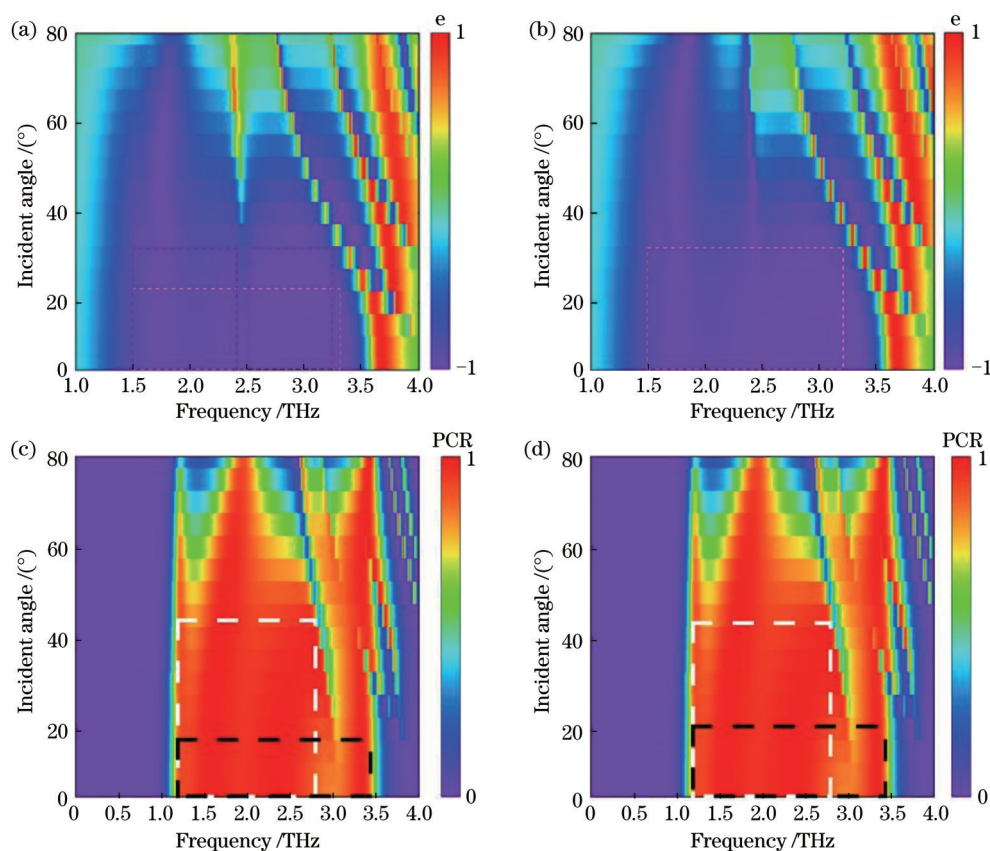


图 10 所提出超表面在作为 QWP 时, (a) 在 TE 偏振时椭圆率随入射角的变化光谱 (b) 在 TM 偏振时椭圆率随入射角的变化光谱。以及作为 HWP 时, (c) 在 TE 偏振时 PCR 随入射角的变化光谱, (d) 在 TM 偏振时 PCR 随入射角的变化光谱。

图中的黑色和白色虚线表示高效的转换带宽 ($|e| > 0.9$, $V_{PCR} > 80\%$)

Fig. 10 When the metasurface proposed behaved as a QWP, (a) spectrum of the ellipticity change with the incident angle during TE polarization (b) spectrum of the ellipticity change with incident angle during TM polarization. and when the metasurface behaved as a HWP, (c) spectrum of PCR with the angle of incidence during TE polarization, (d) spectrum of the PCR with angle of incidence during TM polarization. The black and white dash lines in the figure indicated efficient polarization conversion bandwidth ($|e| > 0.9$, $V_{PCR} > 80\%$)

光谱图。其中图 10(a), (b) 为当石墨烯的费米能级为 0 超表面作为 QWP 时椭圆率在 TE 和 TM 斜入射条件下的光谱图。可以看到在 TE 偏振模式下, 当入射角不超过 20° 时, 椭圆率的绝对值可以在 1.504~3.304 THz 的频率范围内大于 0.9 (如图 10(a) 中白色虚线所示)。随着入射角的继续增加, 椭圆率的绝对值在 2.5 THz 附近开始下降, 当入射角不超过 30° 时, 椭圆率的绝对值依然可以在 1.504~2.404 THz 和 2.513~3.24 THz 的频率范围内超过 0.9。而对于 TM 偏振模式, 当入射角不超过 30° 时椭圆率的绝对值可以在 1.5~3.2 THz 的宽带范围内维持 0.9 的高效圆偏振转换效率。当石墨烯的费米能级为 1 eV 时, 超表面作为 HWP。如图 10(c), (d) 给出了 HWP 的 PCR 随着角度的变化光谱图。从图中可以发现, 在 TE 偏振模式下, 当入射角不超过 15° 时, PCR 可以在 1.18~3.412 THz 的频率范围内实现

80% 以上的转换效率 (如图 10(c) 中的黑色虚线所示), 而随着角度的继续增加, 3 THz 附近的 PCR 值开始下降, 当入射角不超过 40° 时, PCR 依然可以在 1.18~2.84 THz 的频率范围内大于 80% (如图 10(c) 中白色虚线所示)。而对于 TM 偏振模式, 当入射角不超过 15° 时 PCR 可以在 1.18~3.44 THz 内大于 80% (如图 10(d) 中黑色虚线所示), 当入射角不大于 45° 时 PCR 可以在 1.48~2.816 THz 内大于 80% (如图 10(d) 中白色虚线所示)。综上所述, 可知所提出的超表面对角度的稳定性较强。

6 结 论

总之, 本文提出了一种基于石墨烯的宽带可调太赫兹 QWP/HWP。通过调节石墨烯的费米能级可以实现在 QWP 和 HWP 之间的自由切换。该偏振转换器采用了经典的三层结构, 具有结构简单,

制造方便的优点。数值仿真结果表明:当石墨烯的费米能级为 0 时,所提出的超表面可以在 1.465~3.44 THz 的频率范围内实现线性偏振波到右旋圆偏振波的转换,椭圆率的绝对值超过 0.9。当石墨烯的费米能级等于 1 eV 时,超表面变现为宽带交叉偏振转换器,即二分之一波片,可以实现在 1.173~3.44 THz 的频率范围内实现偏振转换率大于 80%。此外,还探究了不同结构参数,石墨烯的费米能级和角度对偏振转换性能的影响。发现不同的结构参数对其性能的影响较大,并且不同石墨烯的费米能级会使得该超表面具有不同的转换特性。当然,该设计对角度也具有较强的稳定性。具有宽带、高效、简单结构等特点的偏振转换器在太赫兹图像和通信等领域具有广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [3] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26-33.
- [4] Fan R H, Zhou Y, Ren X P, et al. Freely tunable broadband polarization rotator for terahertz waves[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(7): 1201-1206.
- [5] Hunsche S, Koch M, Brener I, et al. THz near-field imaging[J]. *Optics Communications*, 1998, 150(1/2/3/4/5/6): 22-26.
- [6] Fan R H, Liu D, Peng R W, et al. Broadband integrated polarization rotator using three-layer metallic grating structures[J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 516-524.
- [7] Lu T G, Qiu P Z, Lian J Q, et al. Ultrathin and broadband highly efficient terahertz reflective polarization converter based on four L-shaped metamaterials[J]. *Optical Materials*, 2019, 95: 109230.
- [8] Zeng F, Ye L F, Li L, et al. Tunable mid-infrared dual-band and broadband cross-polarization converters based on U-shaped graphene metamaterials[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33826-33839.
- [9] Zhu J F, Li S F, Deng L, et al. Broadband tunable terahertz polarization converter based on a sinusoidally-slotted graphene metamaterial[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(5): 1164-1173.
- [10] Li Z Y, Yu N F. Modulation of mid-infrared light using graphene-metal plasmonic antennas[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(13): 131108.
- [11] Yao Y, Shankar R, Kats M A, et al. Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(11): 6526-6532.
- [12] Yang C, Luo Y, Guo J X, et al. Wideband tunable mid-infrared cross polarization converter using rectangle-shape perforated graphene[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16913-16922.
- [13] Zhang J R, Zhang K, Cao A L, et al. Bi-functional switchable broadband terahertz polarization converter based on a hybrid graphene-metal metasurface[J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26102-26110.
- [14] Luo S W, Li B, Yu A L, et al. Broadband tunable terahertz polarization converter based on graphene metamaterial[J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 184-189.
- [15] Liu W W, Chen S Q, Li Z C, et al. Realization of broadband cross-polarization conversion in transmission mode in the terahertz region using a single-layer metasurface[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3185-3188.
- [16] Huang X, He W, Yang F, et al. Polarization-independent and angle-insensitive broadband absorber with a target-patterned graphene layer in the terahertz regime[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 25558-25566.
- [17] Hu N, Wu F L, Bian L A, et al. Dual broadband absorber based on graphene metamaterial in the terahertz range[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(12): 3899-3909.
- [18] Sun P. Characteristic analysis and application of graphene surface plasmons[D]. Qingdao: Qingdao University, 2018: 2-4.
孙鹏. 石墨烯等离激元的特性分析及其应用研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018: 2-4.
- [19] Qi X Q, Zou J L, Li C, et al. Graphene-based electrically controlled terahertz polarization switching between a quarter-wave plate and half-wave plate[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 39430.
- [20] Gómez-Díaz J S, Perruisseau-Carrier J. Graphene-based plasmonic switches at near infrared frequencies[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15490-15504.
- [21] TOPAS. [EB/OL]. [2021-03-10]. https://topas.com/sites/default/files/files/topas_product-brochure_english.pdf.

- [22] Xu K D, Li J X, Zhang A X, et al. Tunable multi-band terahertz absorber using a single-layer square graphene ring structure with T-shaped graphene strips [J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11482-11492.
- [23] Zhao Y T, Wu B, Huang B J, et al. Switchable broadband terahertz absorber/reflector enabled by hybrid graphene-gold metasurface[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7161-7169.
- [24] Walia S, Shah C M, Gutruf P, et al. Flexible metasurfaces and metamaterials: a review of materials and fabrication processes at micro- and nano-scales [J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(1): 011303.
- [25] Jiang Y N, Wang L, Wang J, et al. Ultra-wideband high-efficiency reflective linear-to-circular polarization converter based on metasurface at terahertz frequencies [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27616-27623.
- [26] Yan D X, Meng M, Li J S, et al. Vanadium dioxide-assisted broadband absorption and linear-to-circular polarization conversion based on a single metasurface design for the terahertz wave[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29843-29854.
- [27] Song Z Y, Zhang J H. Achieving broadband absorption and polarization conversion with a vanadium dioxide metasurface in the same terahertz frequencies[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 12487-12497.
- [28] Zeng L, Huang T, Liu G B, et al. A tunable ultra-broadband linear-to-circular polarization converter containing the graphene[J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 7-13.
- [29] Ako R T, Lee W S L, Bhaskaran M, et al. Broadband and wide-angle reflective linear polarization converter for terahertz waves[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(9): 096104.
- [30] Luo J, Shi X Z, Luo X Q, et al. Broadband switchable terahertz half-/quarter-wave plate based on metal-VO₂ metamaterials[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 30861-30870.