

基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控

闫昕 梁兰菊 张璋 杨茂生 韦德泉 王猛 李院平 吕依颖 张兴坊 丁欣 姚建铨

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

Yan Xin Liang Lan-Ju Zhang Zhang Yang Mao-Sheng Wei De-Quan Wang Meng Li Yuan-Ping

Lü Yi-Ying Zhang Xing-Fang Ding Xin Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 118102 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180125

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[空间盘绕型声学超材料的亚波长拓扑谷自旋态](#)

Subwavelength topological valley-spin states in the space-coiling acoustic metamaterials

物理学报.2017, 66(22): 228101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.228101>

[基于电阻型频率选择表面的宽带雷达超材料吸波体设计](#)

Design and fabrication of broadband radar metamaterial absorber based on the resistor FSS

物理学报.2015, 64(21): 218102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.218102>

[基于开口椭圆环的高效超宽带极化旋转超表面](#)

High-efficiency ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on split elliptical ring resonators

物理学报.2015, 64(17): 178101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178101>

[基于编码超表面的太赫兹宽频段雷达散射截面缩减的研究](#)

A coding metasurfaces used for wideband radar cross section reduction in terahertz frequencies

物理学报.2015, 64(15): 158101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.158101>

[基于科赫分形的新型超材料双频吸收器](#)

Study on a novel dual-band metamaterial absorber by using fractal Koch curves

物理学报.2014, 63(11): 118102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.118102>

基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束 多功能动态调控*

闫昕¹⁾²⁾³⁾ 梁兰菊^{1)2)3)†} 张璋¹⁾²⁾³⁾ 杨茂生¹⁾³⁾ 韦德泉¹⁾³⁾ 王猛¹⁾³⁾
李院平¹⁾³⁾ 吕依颖¹⁾³⁾ 张兴坊¹⁾³⁾ 丁欣²⁾ 姚建铨²⁾

1)(枣庄学院光电工程学院, 枣庄 277160)

2)(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

3)(山东省光电信息处理与显示实验室, 枣庄 277160)

(2018年1月17日收到; 2018年3月28日收到修改稿)

提出了一种基于石墨烯带的太赫兹波段的1 bit 编码超构材料, 可以实现太赫兹波束的数目、频率、幅度等参数多功能动态调控. 该结构由金属薄膜、聚酰亚胺、硅、二氧化硅、石墨烯带组成. 通过对石墨烯带施加两种不同的电压, 可以实现一定频率范围内相位差接近 180° 的“0”和“1”数字编码单元, 进而构成1 bit 动态可控的编码超构材料. 全波仿真结果表明, 不同序列的编码超构材料能够实现波束数目从单波束、双波束、多波束到宽波束的调控. 相同序列的编码超构材料, 通过施加石墨烯带的不同电压能够实现宽频段波束频率的偏移. 对于000000或者111111周期序列的编码超构材料, 通过施加石墨烯带的不同电压还能够实现波束幅度的调控. 因此这种基于石墨烯带的编码超构材料为灵活调控太赫兹波提供了一种新的途径, 将在雷达隐身、成像、宽带通信等方面具有重要的意义.

关键词: 石墨烯, 太赫兹, 编码超构材料, 动态调控

PACS: 81.05.xj, 42.25.Fx, 87.50.U-, 73.22.Pr

DOI: 10.7498/aps.67.20180125

1 引言

太赫兹波(Terahertz, THz)是指频率为0.1—10 THz范围内的电磁辐射, 处于电子学到光子学的过渡区域, 也是宏观经典理论向微观量子理论的过渡区域^[1]. THz波特殊的频谱位置决定了其波段具有瞬态性、带宽宽、频率高、低能量、高透射等独特特性, 将在宽带通信、军事雷达、生物医学、安检等领域显现出广阔的应用前景^[2–6]. 但是随着THz应用的需求, THz波发展在某些技术方面还存在一些不足, 除了THz辐射源功率能量、探测器的灵敏度以及频谱窄等问题之外, THz波的调控也

是影响其应用的瓶颈之一^[7–8].

电磁超构材料是一种由亚波长单元结构周期或非周期排布在二维平面上形成的平面型人工复合电磁材料, 可以通过等效电阻抗、磁阻抗以及突变相位来实现对电磁波灵活多样的调控, 得到国际学术界和工业界的高度关注^[9–14]. 但是目前利用电磁超构材料调控THz波的研究仍面临许多挑战, 如难以实现实时动态调控、结构复杂、可调范围小. 近年来研究表明, 利用石墨烯相结合的超构材料为动态调控THz波束提供了新的发展机遇, 已成为THz领域新的研究热点^[15–19].

石墨烯新型材料具有带隙可调、响应速度快、材料损耗小等特性, 结合超构材料为动态调控波

* 国家自然科学基金(批准号: 61701434, 61735010)、山东省自然基金(批准号: ZR2017MF005)、山东省高等学校科技计划(批准号: J17KA087)、中国博士后科学基金(批准号: 2015M571263)、枣庄市自主创新及成果转化专项(批准号: 2016GH19, 2016GH31)、枣庄市光电信息功能材料与微纳器件重点实验室和枣庄市太赫兹工程技术研究中心资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lianglanju123@163.com

束的发展带来了新的机遇^[20]. 2013年, 瑞士洛桑联邦理工学院 Carrasco 等^[21] 设计了基于石墨烯薄膜的可调超构材料, 通过改变石墨烯的费米能级可实现 300° 移相, 进而对 THz 波束进行调控. 2016年, 南京大学冯一军教授课题组设计了能灵活操控 THz 波的可切换 $1/4$ 波片, 实现了透射电磁波极化特性的动态切换^[22]. 同年, Orazbayev 等^[23] 利用多层石墨烯介电超构材料实现了一定角度范围内透射波束方向的可调. 同年, 西北工业大学赵晓鹏教授课题组^[24] 在金属膜的两面设计不同形状石墨烯超构材料产生 2π 移相, 实现了 THz 波段频率偏移和分束功能. 这些研究结果使得基于石墨烯超构材料对 THz 波束动态调控的研究越来越引起人们的关注, 但目前仍面临调制单一、频带窄、幅度小等问题.

2014年, Della 和 Engheta^[25] 提出了由不同电磁特性的材料粒子构成的“数字超构材料 bit 位”, 进而通过空间混合“数字超构材料 bit 位”构建“超构材料字节”, 然而, 这些超构材料仍然是用等效媒质参数来描述. 同年, 东南大学崔铁军教授课题组^[26] 在相位突变调控的基础上提出相位编码超构材料, 并且设计制作了一款 1 bit 数字超构材料, 通过偏置二极管实现“0”或“1”编码单元, 能够在 FPGA 的实时控制下实现不同的编码超构材料序列, 进而可构造数字编程超构材料实现多种调控功能. 2016年, 刘硕等^[27] 利用不同频率之间的正交性, 设计了一款双频双功能的 1 bit 编码超构材料, 并实验验证了其对不同频率 THz 的独立调控. 同年, Liu 等^[28] 将数字信号处理中的卷积运算引入到编码超表面的设计中. 2017年, Cui^[29] 介绍了微波波段从被动超构材料到数字超构材料, 最后到可编程超构材料调控电磁波所取得的进展, 结果表明编码超构材料能够实时调控电磁波, 并且不同序列的编码能够实现不同的调控功能. 同年, Zhang^[30] 在编码超构材料的基础上, 重点介绍了信息超构材料和超表面以及未来发展趋势. Liu 和 Cui^[31] 综述了近年来在编码和可编程超材料方面的发展, 重点介绍了编码和可编程超材料的基本概念、工作原理、设计方法、制作方法和实验验证. 编码超构材料具有宽频段、设计简单、灵活调控波束等优势^[32–34], 外加二极管使得该结构在微波波段实现波束的多功能动态调控. 这种编码超构材料不需要宏观的媒质参数描述其电磁特性, 只需要调控编码

单元的序列就可以调控电磁波. 然而由于材料性质和加工能力的限制, 在传统微波波段所使用的成熟理论及技术并不能被简单地移植到 THz 波段进行直接运用.

本文基于石墨烯的可调电导率特性, 设计了一种 THz 波段动态可控的 1 bit 编码超构材料. 仿真和计算结果表明, 利用不同电压调控不同列的 bit 单元能够动态调控编码序列, 实现 1.7–2.2 THz 宽频段范围内波束数目以及宽度等参数的调控. 对于 010101 周期序列, “0”和“1”单元施加不同的电压, 可实现双波束频率的偏移. 分析结果还表明, 对于 00000 周期序列, 在不同列施加不同的电压, 可以实现特定频率下波束幅度的变化. 因此本文设计的石墨烯编码超构材料能够灵活多功能动态调控 THz 波, 将在雷达隐身、成像、宽带通信等方面具有重要的意义.

2 基于石墨烯编码超构材料动态调控 THz 波束的机理

2.1 THz 波段石墨烯材料的特性

单层石墨烯可以用一个无限薄且具有复数电导率 $\sigma_s(\omega, \mu_c, \Gamma, T)$ 的电导层模型来进行表征, 其中 ω 为角频率, μ_c 为石墨烯化学势, Γ 为散射率, 由电子弛豫时间 τ 决定 ($2\Gamma = \hbar/\tau$), T 是环境温度. 根据 Kubo 公式, 其表面电导率模型可表示为复数形式:

$$\sigma_s = \sigma^{\text{intra}} + \sigma^{\text{inter}}, \quad (1)$$

即石墨烯的电导率由带内 σ^{intra} 和带间 σ^{inter} 组成. 在 THz 波段, 石墨烯的电导率带间部分相对于带内部分可忽略不计, 所以其电导率可用类似 Drude 模型即 (2) 式来描述^[35]:

$$\sigma^{\text{intra}}(\omega, E_F, \Gamma, T) = j \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + j\Gamma)} \left[\frac{E_F}{k_B T} + 2 \ln(e^{-\frac{E_F}{k_B T}} + 1) \right], \quad (2)$$

其中 E_F 为费米能级, 由电掺杂或化学掺杂决定; 常温情况下 μ_c 与费米能级 E_F 近似相等; e , $\hbar$ 和 k_B 分别为电子电荷、普朗克常数和玻尔兹曼常数; 本文取 $\tau = 0.33$ ps, $T = 300$ K. 石墨烯的相对介电常数可表示为

$$\varepsilon_g = 1 + j \frac{\sigma_g}{\omega \varepsilon_0 \Delta}, \quad (3)$$

其中 ε_0 为真空中介电常数, Δ 为石墨烯的厚度.

由 (1) 和 (2) 式可知, 其石墨烯的电导率可由化学势控制, 而化学势又可通过加载偏置电压调节. 由 (3) 式得到石墨烯的介电常数随着电导率的变化而变化, 这就为实现电导率或者介电常数可调的石墨烯提供一个有效途径.

2.2 编码超构材料调控电磁波的机理

编码超构材料调控电磁波的机理是借助反射阵天线的基本原理^[26]. 图 1 为编码超构材料结构的示意图, 由 $N \times N$ 个大小相等边长均为 D 的栅格构成. 每个栅格是由“0”或“1”编码单元构成. 第 (m, n) 个单元的散射相位设为 $\varphi(m, n)$, 其取值为 0° 或 180° .

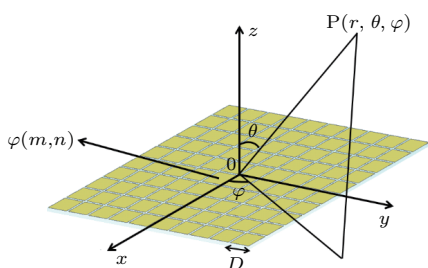


图 1 编码超构材料结构示意图, 包含 $N \times N$ 个边长为 D 的栅格, 每个栅格为“0”或者“1”编码单元组成

Fig. 1. The diagram of the coding metamaterial, which contains $N \times N$ lattices with dimension D , in which each lattices is occupied by “0” or “1” elements.

在垂直平面波的照射下, 编码超构材料表面散射的远场函数可表示为

$$f(\theta, \varphi) = f_e(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \exp \left\{ -i \left[\varphi(m, n) + KD \sin \theta \left[(m - 1/2) \cos \varphi + (n - 1/2) \sin \varphi \right] \right] \right\}, \quad (4)$$

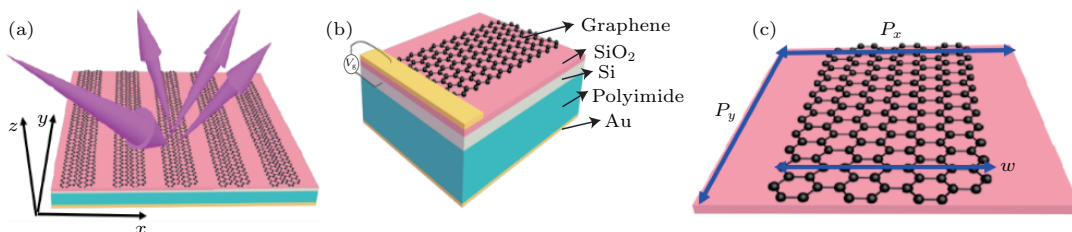


图 2 设计的编码超构材料结构 (a) 基于石墨烯带的编码超构材料示意图; (b) 基于石墨烯带的超构材料单元结构示意图; (c) 超构材料的单元结构, 参数设置为 $P_x = P_y = 60 \mu\text{m}$, $w = 40 \mu\text{m}$.

Fig. 2. The designed metamaterial: (a) Schematic of graphene coding metamaterial; (b) unit structure of graphene metamaterial; (c) designed metamaterial with geometrical parameters $P_x = P_y = 60 \mu\text{m}$, $w = 40 \mu\text{m}$.

其中 θ 和 φ 为入射角和方位角, $f_e(\theta, \varphi)$ 为单个栅格远场的辐射函数. 方向图函数表示为

$$\text{Dir}(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} |f(\theta, \varphi)|^2 d\varphi} \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (5)$$

因为“0”和“1”编码单元相位为 0° 或者 180° , 两单元的散射特性相消, $f_e(\theta, \varphi)$ 的辐射特性基本为 0. 从 (4) 和 (5) 式看出, 控制电磁编码超构材料远场散射特性主要通过编码栅格单元的不同序列方式实现.

2.3 基于石墨烯带的 THz 编码超构材料

本文设计的编码超构材料结构如图 2 所示, 该结构从下到上依次为金属薄膜、聚酰亚胺、硅、二氧化硅、石墨烯带组成. 金的厚度为 200 nm , 介质层聚酰亚胺 ($\varepsilon_1 = 3.1$, $\tan \delta = 0.05$) 的厚度为 $h_1 = 21 \mu\text{m}$, 硅 ($\varepsilon_2 = 11.9$, $\sigma = 2.5 \times 10^{-4} \text{ S/m}$) 的厚度为 $h_2 = 0.7 \mu\text{m}$, 二氧化硅 ($\varepsilon_r = 3.75$, $\tan \delta = 0.004$) 的厚度为 $h_3 = 0.3 \mu\text{m}$. 单元结构的周期 $P_x = P_y = 60 \mu\text{m}$, 石墨烯的宽度为 $w = 40 \mu\text{m}$, 长度为 $P_y = 60 \mu\text{m}$. 若在由石墨烯带与硅构成的电极结构上施加直流偏置电压, 石墨烯的化学势也将随之变化, 相应地对石墨烯表面电导率进行动态控制. 费米能级 E_F 和偏压 V_g 之间存在如下关系式^[36]:

$$E_F = \mu_c \approx \hbar v_f \sqrt{\frac{\pi \varepsilon_r \varepsilon_0 V_g}{e t_s}}, \quad (6)$$

其中 ε_r 与 ε_0 分别为二氧化硅的相对介电常数与真空介电常数, V_g 表示偏置电压, t_s 为二氧化硅绝缘层厚度, v_f 表示费米速度 (石墨烯为 $1.1 \times 10^6 \text{ m/s}$). 石墨烯的费米能级一般可以在较大范围内进行调节 ($0-1 \text{ eV}$).

为了进一步分析石墨烯编码超构材料动态调控 THz 波束的机理, 利用 CST microwave studio 进行超构材料的全波数值仿真. 在 CST 仿真中, 假设石墨烯的厚度为 1 nm, 其相对介电参数可由 (3) 式计算并导入. 在数值计算中, 激励源采用平面波的形式, 对图 2(b) 的结构进行周期单元仿真, 边界条件设置为 unitecell, 端口设置为 Floquet 端口, 入射波沿着 z 轴的负方向传播, 电场沿着 x 轴方向, 所有的网格都设置成自适应加密.

图 3 分析了不同频率、不同的石墨烯费米能级 E_F 条件下石墨烯超构材料的反射相位、反射率的特性. 从图 3(a) 看出, 在 1 THz 与 2 THz 附近, 通过改变 E_F , 其超构材料的反射相位相应改变, 能够从 -150° 变化到 150° , 变化最大值为 300° . 因此当选择不同的石墨烯费米能级 E_F 时, 不同列的石墨烯超构结构能够产生某个频段的相位差达到 180° , 这为设计编码超构材料提供了可行性. 另外从图 3(b) 看出, 在频率 1 THz 和 2 THz 附近, 通过改变 E_F 其反射率相应会发生改变, 特别是在频率 1 THz 附近, 反射率变化较大, 能够从 1 变化到 0. 本文主要设计反射式的编码超构材料, 反射系数不能太低. 为此, 本文主要研究 2 THz 附近的编码超构材料特性. 为了进一步表征石墨烯材料特性, 给出了频率 2 THz 处石墨烯的介电常数随费米能级变化的曲线, 如图 4 所示. 从图 4 看出, 随着石墨烯的费米能级从 0 eV 增加到 1.0 eV, 介电常数的实部从 -2688 降低到 -79115 , 介电常数的虚部从 709 增加到 19156, 石墨烯的金属性不断增强, 这为设计编码超构材料以及可调特性提供了有利因素.

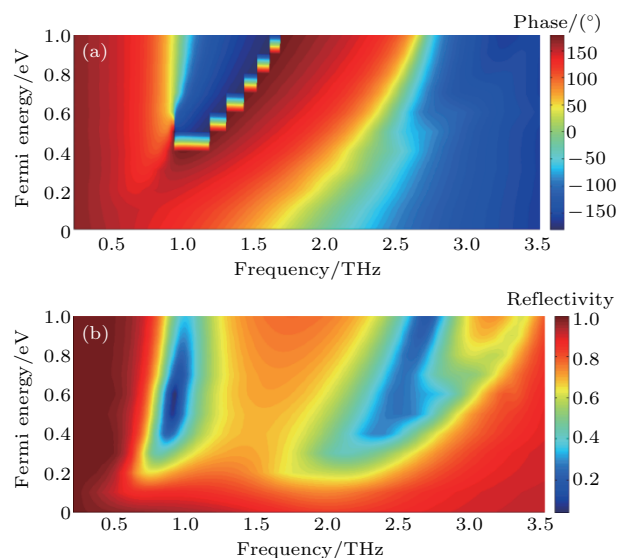


图 3 不同频率、不同 E_F 条件下其石墨烯超构材料的反射相位和反射率 (a) 反射相位变化; (b) 反射率变化

Fig. 3. Reflected phase and reflectivity of coding meta-material as a function of graphene E_F and THz frequency: (a) Reflected phase; (b) reflectivity.

图 5 计算了 $E_F = 1.0$ eV 与 $E_F = 0.0$ eV 条件下, 不同列的石墨烯超构材料的反射相位及相位差. 从图 4(b) 看出, 在 1.75—2.6 THz 带宽范围内, 其 $E_F = 1.0$ eV 与 $E_F = 0$ eV 的两种情况对应的反射相位差为 $180^\circ \pm 30^\circ$, 并且由图 3(b) 和图 5(d) 还可以得到 1.75—2.2 THz 频率范围内反射率相差不大, 频率 2.0 THz 处反射相位差正好为 180° . 因此可把 $E_F = 0$ eV 和 $E_F = 1.0$ eV 对应的超构材料作为编码超构材料的数字单元. 另外, 为了尽力消除单元与单元之间的电磁耦合, 把其相邻的 4 个石墨烯带即子阵列共用一个偏置电压, $E_F = 0$ eV

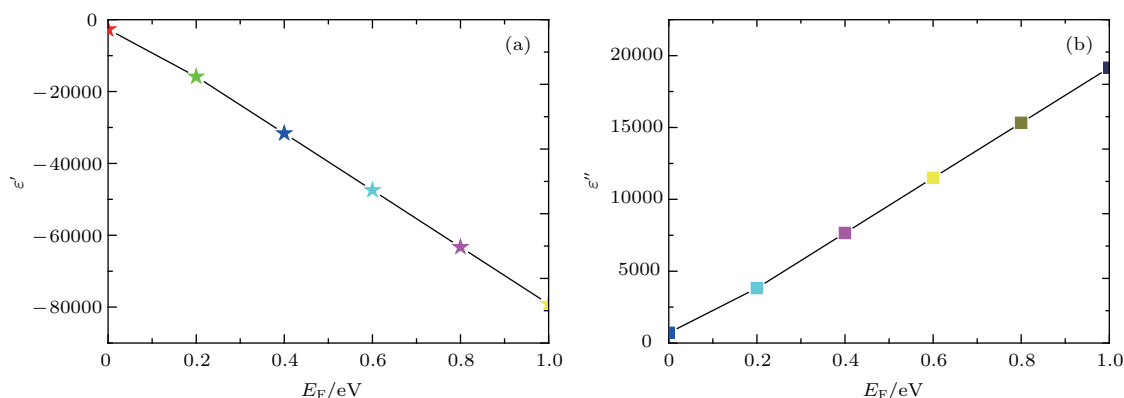


图 4 频率 2 THz 处, 石墨烯的介电常数随费米能级变化的曲线 (a) 介电常数实部; (b) 介电常数虚部

Fig. 4. The permittivity of graphene as the function of E_F with 2 THz frequency: (a) Real of permittivity; (b) imaginary of permittivity.

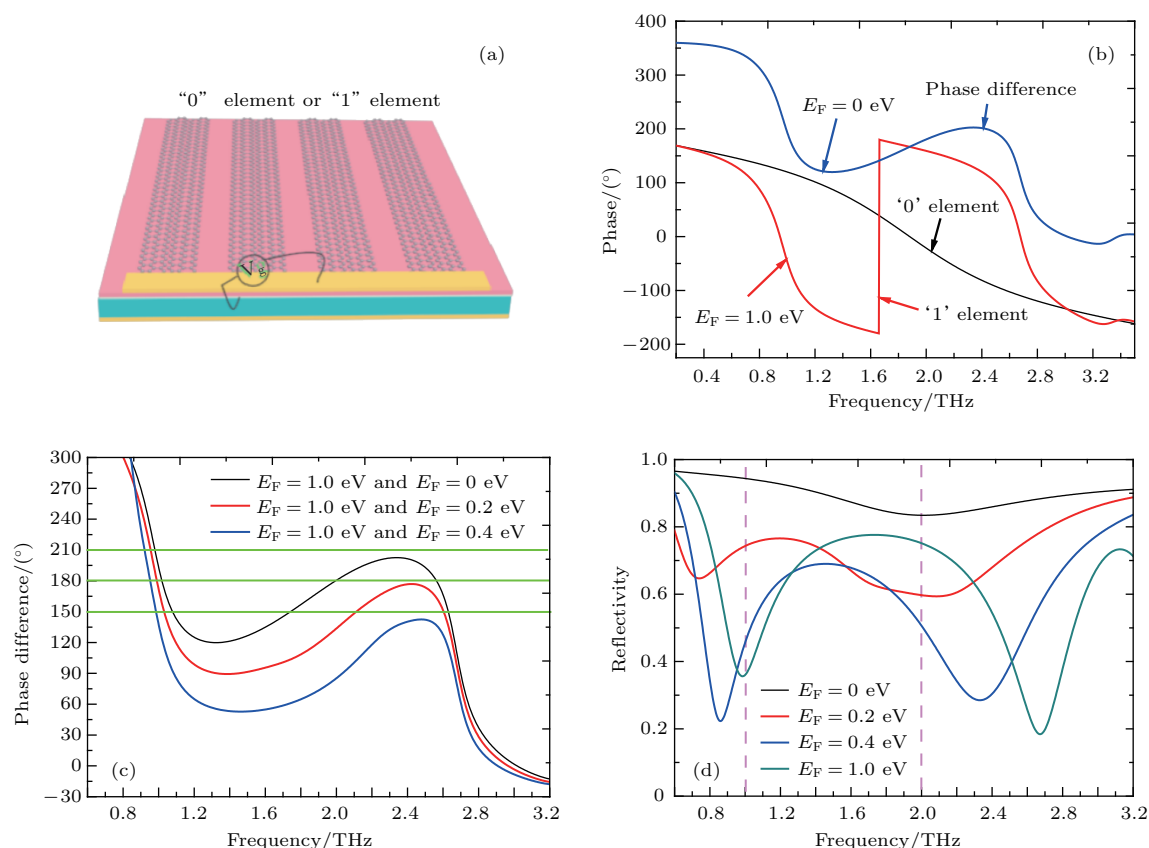


图5 石墨烯超构材料的反射相位及相位差 (a) “0”或者“1”单元编码示意图; (b) 石墨烯的费米能级为 $E_F = 0$ eV 和 $E_F = 1.0$ eV 情况下, “0”或者“1”单元的反射相位; (c) 三种不同石墨烯费米能级情况下, “0”或者“1”单元的反射相位差; (d) 不同石墨烯费米能级情况下, 超构材料的反射率

Fig. 5. The reflected phase and phase difference of graphene metamaterial: (a) Schematic of “0” or “1” element; (b) reflected phase of the “0” and “1” element in THz frequencies under the graphene for the $E_F = 0$ eV and $E_F = 1.0$ eV; (c) reflected phase difference of the “0” and “1” element in THz frequencies under three different conditions for graphene Fermi energy; (d) reflectivity of metamaterial under the difference conditions graphene E_F .

对应的超构材料定义为“0”数字编码单元, $E_F = 1.0$ eV 对应的超构结构作为“1”数字编码单元, 如图5(a)所示. 如果选择不同列的石墨烯费米能级处于不同的 E_F , 则其超构材料的反射相位差为 $180^\circ \pm 30^\circ$ 的带宽范围不一样, 如图5(c)所示. 如果费米能级为 $E_F = 1.0$ eV 和 $E_F = 0.2$ eV 两种情况, 则其带宽范围为2.0—2.4 THz. 如果费米能级为 $E_F = 1.0$ eV 和 $E_F = 0.4$ eV 两种情况, 则其带宽范围为零. 因此, 这种超构材料利用对不同列的石墨烯带加载不同的电压来实现序列动态变化和频率的偏移, 进一步对THz波束动态调控.

2.4 不同的石墨烯弛豫时间对THz编码超构材料特性的影响

前面的研究中假定了石墨烯的弛豫时间 $\tau = 0.33$ ps, 而不同工艺过程制备的石墨烯样品弛豫时间可能会有所不同. 本文编码超构材

料的特性主要与反射相位以及石墨烯处于不同的费米能级其反射相位差有很大关系. 为此研究了图2(b)中结构在石墨烯费米能级为 $E_F = 0$ eV 和 $E_F = 1.0$ eV 情况下, 弛豫时间 τ 对超构材料反射相位的影响, 如图6(a)和图6(b)所示. 从图中得到石墨烯的弛豫时间 τ 对超构材料反射相位影响不大, 特别是在 $E_F = 0$ eV 情况下, 在频率0.3—3.3 THz之间, 其超构材料的反射相位基本不随弛豫时间 τ 的变化而变化. 在 $E_F = 1$ eV 情况下, $\tau = 0.1$ ps 与其他弛豫时间反射相位有些变化. 为了进一步研究石墨烯的弛豫时间 τ 对编码超构材料的特性影响, 计算了不同的弛豫时间 τ 对 $E_F = 0$ eV 和 $E_F = 1.0$ eV 之间其超构材料反射相位差的影响, 如图6(c)所示. 从图中看出, 在 $\tau = 0.1$ ps, 其超构材料反射相位差为 $180^\circ \pm 30^\circ$ 的带宽范围为1.56—2.2 THz, 随着弛豫时间 τ 的增加, 其超构材料反射相位差为 $180^\circ \pm 30^\circ$ 的带宽范

围基本不变化,都基本在1.75—2.6 THz之间.在石墨烯的弛豫时间 $\tau = 0.1$ ps时,仍然在较宽的范围内保持超构材料的相位差满足 $180^\circ \pm 30^\circ$ 的关系.因此,石墨烯的弛豫时间对本文设计的编码超构材料性能影响不大.

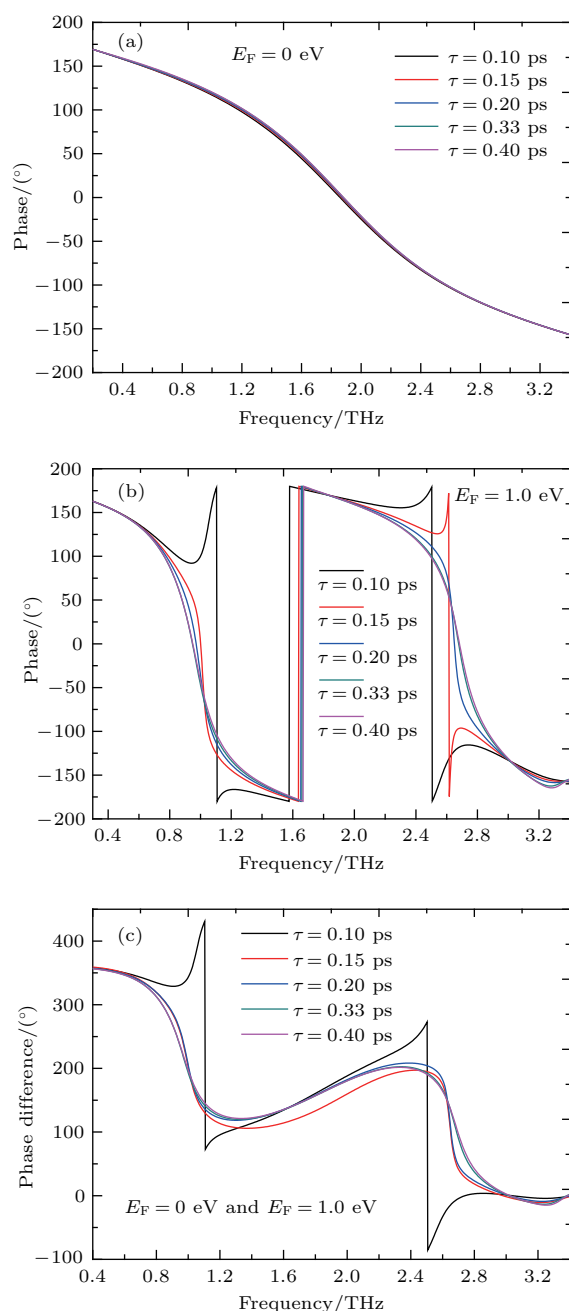


图6 (a)和(b)分别为不同的石墨烯费米能级情况,其弛豫时间 τ 对超构材料影响 (a) $E_F = 0$ eV; (b) $E_F = 1.0$ eV; (c) 费米能级位于 $E_F = 0$ eV和 $E_F = 1.0$ eV之间时, τ 反射相位差的变化

Fig. 6. The influence of graphene scattering time τ on the reflected phase and phase difference for the THz metamaterial: (a) Reflected phase at $E_F = 0$ eV; (b) reflected phase at $E_F = 1.0$ eV; (c) influence of graphene scattering time τ on the reflected phase difference for the THz metamaterial between $E_F = 0$ eV and $E_F = 1.0$ eV.

3 仿真实验分析与结果讨论

3.1 不同的编码序列对THz波束数目、形状的调控

为了研究不同的编码序列THz波束的调控特性,数值模拟研究了其不同编码序列的三维雷达散射截面(radar cross section, RCS)方向图,如图7所示.根据前面的分析,在频率2.0 THz处其对应两列石墨烯带的超构材料相位差为 180° ,并且其反射率相差不大,因此主要研究此频率的散射特性.编码超构材料主要是沿 x 方向进行编码, y 方向的编码相同,选用000000, 010101, 001011, 001111, 101111, 001001 6种周期性编码序列.对于000000编码序列,每个编码所对应的散射波相位均相同,形成与入射波方向相反的反射波束,为一单波束.对于010101编码序列,将垂直入射的电磁波主要反射到两个对称的方向,形成双波束.对于001011编码序列,将垂直入射的电磁波主要分为4个方向的波束,为多波束的散射波,并且每个方向的反射能量相对应单波束而言比较低,可以用于RCS缩减.对于100111编码序列,则产生一个比较宽的扇形波束,即形成宽波束的散射波.对于001111编码序列,与010101编码序列相同,都产生一个双波束反射,但是双波束的夹角不一样.对于001001编码序列,将垂直入射的电磁波主要分为3个方向的波束.

从上述的结果看出,当超构材料的阵列单元以一定的编码序列排布时,整个超构材料将表现相应的散射波特性,改变超构材料单元的编码序列,相应的超构材料的散射特性也随之发生改变,可动态调控为不同类型的波束,包括从单波束、双波束、三波束、多波束到宽波束的散射波.

3.2 不同石墨烯费米能级对THz波束的频率动态调控特性

为了进一步研究太赫兹波束动态调控特性,研究了不同频率处同一编码序列处于不同频率时三维RCS方向图,如图8所示.编码超构材料“0”数字单元对应 $E_F = 0$ eV情况,“1”数字单元对应 $E_F = 1.0$ eV情况,其周期性编码序列010101.从图8看出,在频率为1.75, 1.9, 2.0和2.2 THz处,

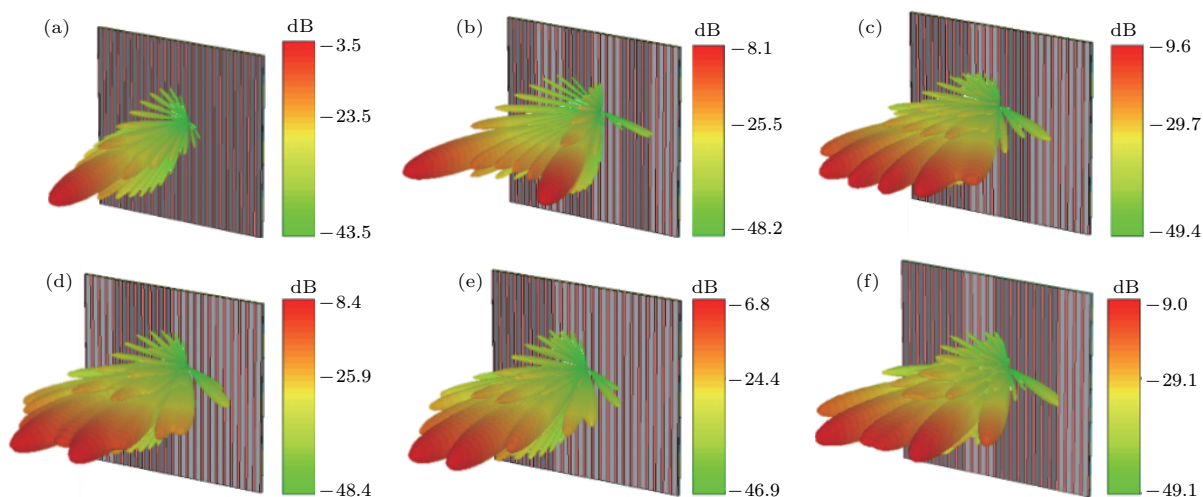


图7 在 2 THz 处, 超构材料处于不同编码时三维 RCS 方向图 (a) 000000; (b) 010101; (c) 001011; (d) 100111; (e) 001111; (f) 001001

Fig. 7. 3D RCS patterns for different coding sequence of metamaterial under normal incidence of at 2 THz: (a) 000000; (b) 010101; (c) 001011; (d) 100111; (e) 001111; (f) 001001.

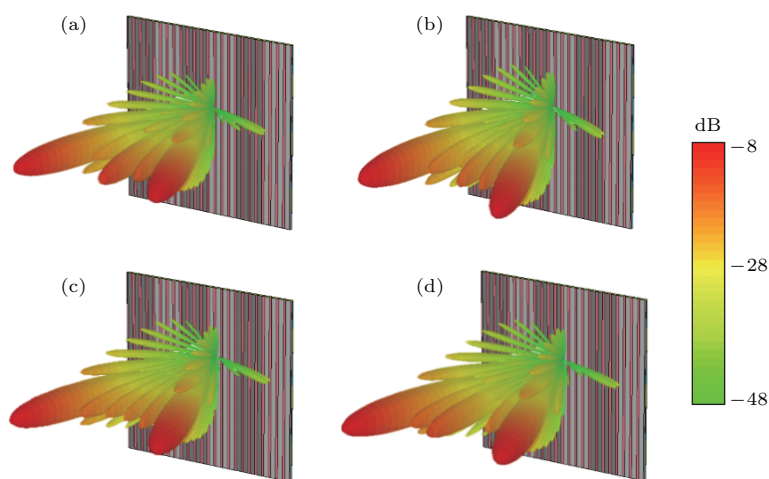


图8 对于序列 010101, 编码超构材料处于不同频率时三维 RCS 方向图 (a) 1.75 THz; (b) 1.9 THz; (c) 2.0 THz; (d) 2.2 THz

Fig. 8. 3D RCS patterns for different THz frequencies of coding metamaterial under normal incidence of at 010101 sequence: (a) 1.75 THz; (b) 1.9 THz; (c) 2.0 THz; (d) 2.2 THz.

编码超表面都可将垂直入射的电磁波主要反射到两个对称的方向, 形成两个主要反射瓣即双波束, 不同频率处的反射波束的其他旁瓣有所不同. 这是因为从图 3(b) 和 (c) 得到, 在频率为 1.7—2.6 THz 范围内, 其“0”单元与“1”单元的反射相位差为 $180^\circ \pm 30^\circ$, 并且在 1.75—2.2 THz 范围内反射率相差不大. 因此, 由上述分析结果得到, 只要两个编码单元的反射相位差为 $180^\circ \pm 30^\circ$, 就能实现对 THz 波束调控基本一致. 由图 4(c) 分析结果还得到, 若利用 $E_F = 1.0$ eV 与 $E_F = 0.2$ eV 两种条件构成的编码单元, 则其结构的反射相位差为 $180^\circ \pm 30^\circ$, 带宽范围为 2.0—2.4 THz, 此频率范围

内同样能实现对 THz 波束调控基本一致. 因此, 对于编码序列相同的超构材料, 利用加载在数字编码单元不同电压, 还可以实现宽频段波束的频率的调控.

3.3 不同石墨烯费米能级对 THz 波束的幅度动态调控特性

为了研究石墨烯费米能级对 THz 波束的幅度动态调控特性, 首先对超构材料的反射谱与石墨烯费米能级之间的关系进行模拟, 接着对 000000 周期性编码超构材料处于不同石墨烯费米能级时, 研

究其结构的三维RCS方向图.

图9(a)为不同石墨烯的费米能级情况下图2(b)超构材料结构的反射谱. 从图中可以看出, 随着石墨烯费米能级的增加, 出现两个谐振频率 f_1 和 f_2 , 谐振频率处的反射率逐渐变小, 谐振逐渐增强并且谐振频率逐渐蓝移, 特别在2 THz附近, 共振频率的改变非常显著. 石墨烯的费米能级与谐振频率之间的关系如图9(d)所示, 星号和圆点分别表示数值模拟的 f_1 和 f_2 谐振频率变化的曲线, 红色线和蓝色线为相应频率变化拟合的曲线. 两个谐振频率随着石墨烯的费米能级变化基本呈线性关系, 分别为 $f_1 = 0.6857 + 0.329E_F$ 和 $f_2 = 1.882 + 0.868E_F$. 当 $E_F = 0.1$ eV时, $f_1 = 0.69$ THz和 $f_2 = 1.88$ THz; 当 $E_F = 1.0$ eV时, $f_1 = 0.99$ THz和 $f_2 = 2.70$ THz, 频率偏移

量分别为0.30 THz和0.82 THz. 为了分析其机理, 数值模拟了 $E_F = 1.0$ eV情况下, 谐振频率 $f_1 = 0.99$ THz和 $f_2 = 2.70$ THz的表面电流[见图9(b), (c)]和磁场分布 $|H_y|$ [见图9(e), (f)].

从图9(b), (c), (e), (f)得到, f_1 的表面电流主要分布在石墨烯结构表面, f_2 的表面电流主要分布相邻石墨烯结构之间. f_1 的磁场位于石墨烯结构表面上, f_2 的磁场主要分布在石墨烯表面和相邻石墨烯结构之间. 因此, 频率 f_1 主要是基模共振, 频率 f_2 主要来自单元石墨烯结构之间的耦合为高阶谐振, 频率 f_2 对石墨烯的电导率变化更明显. 因此, 随着石墨烯费米能级 E_F 的增加, 共振频率 f_2 相比 f_1 其改变更加明显. 另外, 随着石墨烯费米能级 E_F 的增加, 由类似电介质特性变成金属特性, 导致谐振逐渐增强并且谐振频率发生变化.

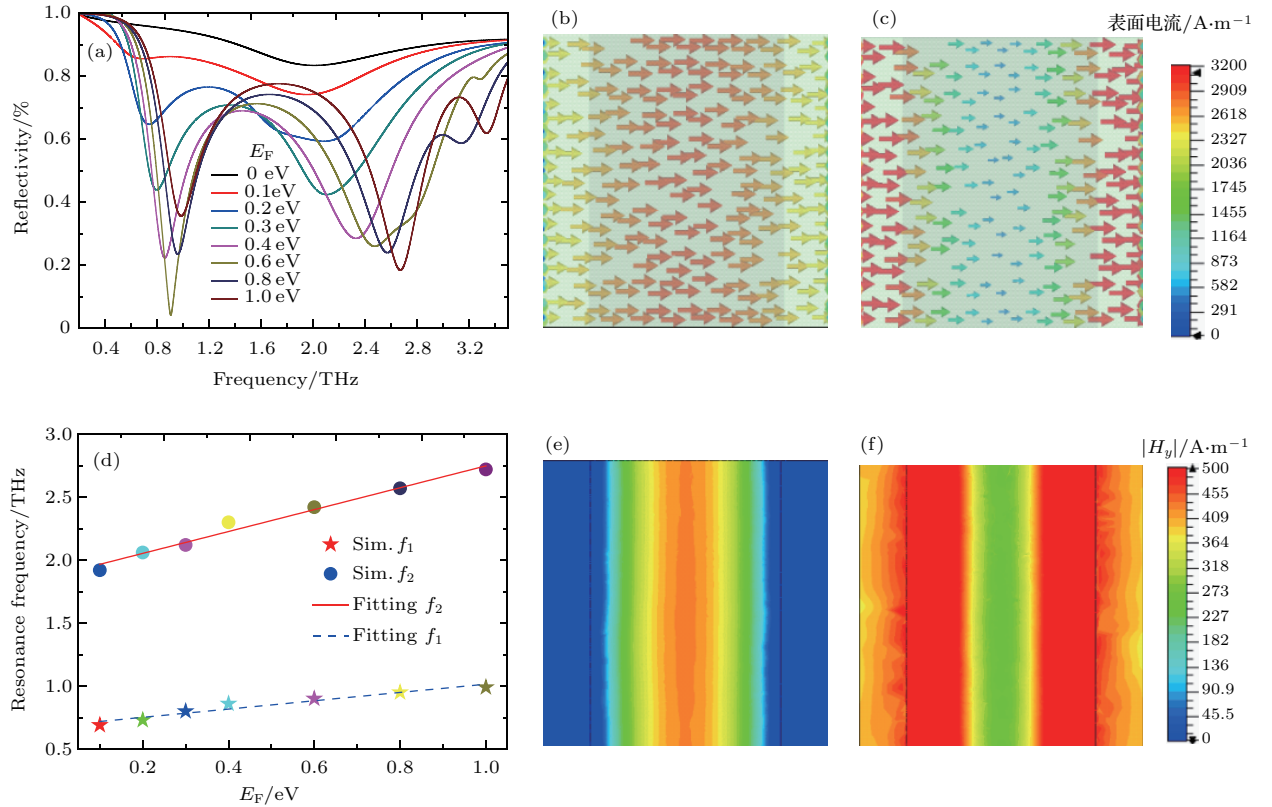


图9 (a) 石墨烯处于不同费米能级情况下, 超构材料的反射谱; (b) $E_F = 1.0$ eV时, 谐振频率 $f_1 = 0.99$ THz的表面电流; (c) $E_F = 1.0$ eV时, 谐振频率 $f_2 = 2.70$ THz的表面电流; (d) 石墨烯的费米能级与谐振频率之间的关系; (e) $E_F = 1.0$ eV时, 谐振频率 $f_1 = 0.99$ THz的磁场分布 $|H_y|$; (f) $E_F = 1.0$ eV时, 谐振频率 $f_2 = 2.70$ THz的磁场分布 $|H_y|$

Fig. 9. THz amplitude dynamic adjustment performance of graphene Fermi energy: (a) Reflection diagram of metamaterial under the difference graphene E_F ; (b) surface current distribution at $f_1 = 0.99$ THz under $E_F = 1.0$ eV; (c) surface current distribution at $f_2 = 2.70$ THz under $E_F = 1.0$ eV; (d) resonance frequency with the different graphene E_F ; (e) magnetic field distribution $|H_y|$ at $f_1 = 0.99$ THz under $E_F = 1.0$ eV; (f) magnetic field distribution at $f_2 = 2.70$ THz under $E_F = 1.0$ eV.

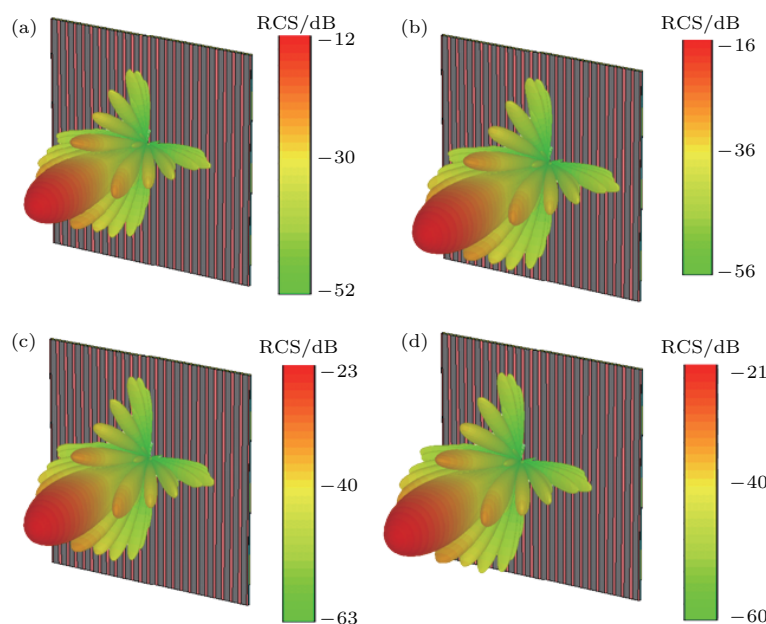


图 10 对于周期性序列 000000 编码超构材料, 在频率 $f_1 = 1$ THz 处, 不同 E_F 时其结构的 3D RCS 方向图 (a) $E_F = 0$ eV; (b) $E_F = 0.3$ eV; (c) $E_F = 0.6$ eV; (d) $E_F = 1.0$ eV

Fig. 10. 3D RCS patterns for different E_F of 000000 sequence coding metamaterial at $f_1 = 1$ THz: (a) $E_F = 0$ eV; (b) $E_F = 0.3$ eV; (c) $E_F = 0.6$ eV; (d) $E_F = 1.0$ eV.

图 10 为周期性序列 000000 编码超构材料, 在频率 $f_1 = 1$ THz 处, 不同石墨烯费米能级时其结构的 RCS 方向图. 从模拟结果得到, 随着石墨烯费米能级 E_F 的变化, 其 RCS 的最大值发生变化, 当 $E_F = 0.6$ eV 时为最小值, 这与反射率的变化曲线一致, 并且其变化值从 -12 dB 到 -23 dB, 改变了 11 dB. 因此, 通过改变石墨烯的费米能级, 对于相同序列的编码超构材料, 能够对反射波束的幅度进行调控.

4 结 论

本文设计的基于石墨烯带的编码超构材料, 能够对 THz 波束进行多功能参数的动态调控. 仿真结果表明, 通过在不同列的石墨烯带上加不同电压, 能够调控超构材料的编码序列, 不同序列的编码超构材料能够实现宽频段波束数目从单波束、双波束、三波束、多波束到宽波束的调控. 对于同样序列的编码超构材料, 施加石墨烯带的电压不同能够实现宽频段波束频率的偏移, 宽频段的范围从 1.75—2.2 THz 变化到 2.2—2.4 THz. 对于 000000 或者 111111 周期编码超构材料, 施加石墨烯带的电压不同还能够实现波束幅度的调控. 这种编码超构材料将在雷达隐身、成像、宽带通信等方面具有重要的意义.

参考文献

- [1] Tonouchi M 2007 *Nat. Photon.* **1** 97
- [2] Pawar A Y, Sonawane D D, Erande K B, Derle D V 2013 *Drug Invent. Today* **5** 157
- [3] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C 2016 *Nat. Photon.* **10** 371
- [4] Alves F, Grbovic D, Kearney B, Karunasiri G 2012 *Opt. Lett.* **37** 1886
- [5] Benz A, Rall M, Schwarz S, Dietze D, Detz H, Andrews A M, Schrenk W 2014 *Sci. Rep.* **4** 4269
- [6] Chen S, Hu W D 2017 *Radio Commun. Technol.* **43** 01 (in Chinese) [陈实, 胡伟东 2017 无线电通信技术 **43** 01]
- [7] Shen H P, Koschny T T, Soukoulis C M 2014 *Phys. Rev. B* **90** 115437
- [8] Dabidian N, Gupta S D, Kholmanov I, Lai K, Lu F, Lee J W, Jin M Z, Trendafilov S, Khanikaev A, Fallahazad B, Tutuc E, Belkin M A, Gennady S 2016 *Nano Lett.* **16** 3607
- [9] Zheludev N I 2010 *Science* **328** 582
- [10] Sun S, He Q, Xiao S, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nat. Mater.* **11** 426
- [11] Han J F, Cao X Y, Gao J, Li S J, Zhang C 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 044201 (in Chinese) [韩江枫, 曹祥玉, 高军, 李思佳, 张晨 2016 物理学报 **65** 044201]
- [12] Wang G D, Liu M H, Hu X W, Kong L H, Cheng L L, Chen Z Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017802
- [13] Jia S L, Wan X, Su P, Zhao Y J, Cui T J 2016 *AIP Advan.* **6** 045024
- [14] Zhang Y, Feng Y J, Jiang T, Cao J, Zhao J M, Zhu B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 204101 (in Chinese) [张银, 冯一军, 姜田, 曹杰, 赵俊明, 朱博 2017 物理学报 **66** 204101]

- [15] Lee S H, Choi M, Kim T T, Lee S, Liu M, Yin X B, Choi H K, Lee S S, Choi C G, Choi S Y, Zhang X, Min B 2012 *Nat. Mater.* **11** 936
- [16] Shen N H, Koschny T, Soukoulis C M, Tassin P 2014 *Phys. Rev. B* **90** 115437
- [17] Dabidian N, Dutta-Gupta S, Kholmanov I, Lai K, Lu F, Jongwon L, Jin M Z, Trendafilov S, Khanikaev A, Fallahazad B, Tutuc E, Shvets G 2016 *Nano Lett.* **16** 3607
- [18] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Kelly M M, Fang T, Tahy K, Hwang W S, Debdeep J, Liu L, Xing H G 2012 *Nat. Commun.* **3** 780
- [19] Gao H, Yan F P, Tian S Y, Bai Y 2017 *Chinese J. Lasers* **44** 0703024 (in Chinese) [高红, 延凤平, 谭思宇, 白燕 2017 中国激光 **44** 0703024]
- [20] Sherrott M C, Hon P W C, Fountaine K T, Garcia J C, Ponti S M, Brar V W, Sweatlock L A, Atwater H A 2017 *Nano Lett.* **17** 3027
- [21] Carrasco E, Tamagnone M, Perruisseau-Carrier J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 104103
- [22] Zhang Y, Feng Y J, Zhu B, Zhao J M, Jiang T 2016 *Opt. Express* **23** 27230
- [23] Orazbayev B, Beruete M, Khromova I 2016 *Opt. Express* **24** 8848
- [24] Su Z X, Chen X, Yin J B, Zhao X P 2016 *Opt. Lett.* **16** 3799
- [25] Della G C, Engheta N 2014 *Nat. Mater.* **13** 1115
- [26] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light: Sci. Appl.* **3** e218
- [27] Liu S, Zhang L, Yang Q L, Xu Q, Yang Y, Noor A, Zhang Q, Shahid I, Wan X, Tian Z, Tang W X, Cheng Q, Han J G, Zhang W L 2016 *Adv. Opt. Mater.* **4** 1965
- [28] Liu S, Cui T J, Zhang L, Xu Q, Wang Q, Wan X, Gu J Q, Tang W X, Qi M Q, Han J G, Zhang W L, Zhou X Y, Cheng Q 2016 *Adv. Sci.* **3** 1600156
- [29] Cui T J 2017 *J. Opt.* **19** 084004
- [30] Zhang L 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 3644
- [31] Liu S, Cui T J 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1700624
- [32] Liang L J, Qi M Q, Yang J, Shen X P, Zhai J Q, Xu W Z, Jin B B, Liu W W, Feng Y J, Zhang C H, Lu H, Chen H T, Kang L, Xu W W, Chen J, Cui T J, Wu P H, Liu S G 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 1374
- [33] Yan X, Liang L J, Liu W W, Ding X, Yang J, Xu D G, Zhang Y T, Cui T J, Yao J Q 2015 *Opt. Express* **23** 29128
- [34] Yan X, Liang L J, Zhang Y T, Ding X, Yao J Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 158101 (in Chinese) [闫昕, 梁兰菊, 张雅婷, 丁欣, 姚建铨 2015 物理学报 **64** 158101]
- [35] Hanson G W 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 064302
- [36] Gómez-Díaz J S, Perruisseau-Carrier J 2013 *Opt. Express* **21** 15490

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial*

Yan Xin¹⁾²⁾³⁾ Liang Lan-Ju¹⁾²⁾³⁾† Zhang Zhang¹⁾²⁾³⁾ Yang Mao-Sheng¹⁾³⁾
 Wei De-Quan¹⁾³⁾ Wang Meng¹⁾³⁾ Li Yuan-Ping¹⁾³⁾ Lü Yi-Ying¹⁾³⁾
 Zhang Xing-Fang¹⁾³⁾ Ding Xin²⁾ Yao Jian-Quan²⁾

1) (School of Opt-Electronic Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

2) (College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

3) (Laboratory of Optoelectronic Information Processing and Display of Shandong, Zaozhuang 277160, China)

(Received 17 January 2018; revised manuscript received 28 March 2018)

Abstract

Terahertz (THz) waves have aroused tremendous research interest due to its some unique features and widespread applications in broadband communication, military radar, non-destructive detection, biomedical, security check, etc. With the development of THz applications, dynamic control beam of THz wave with wide bandwidth and multifunction has become a key issue in the field THz technology. The metamaterial with a kind of artificial material provides an approach to controlling the terahertz beam. However, the characteristics of metamaterials based on the equivalent medium parameters are limited by the structural configuration, which usually causes disadvantageous problems including the real-time dynamic control, narrow bandwidth, modulating efficiency, complicated design, etc. The coding metamaterial based digital elements provide an approach to wideband and flexible control terahertz wave by different sequences. However, the THz waves are still hard to tune in dynamic ways due to the limitation of material properties and processing capability. Graphene with a new two-dimensional material has excellent photoelectric properties such as tunable band gap, flexibly dynamic performance, and low material loss. Therefore, the graphene with coding metamaterial can offer a new way of dynamically controlling beam. In this paper, we design a 1 bit coding metamaterial based on graphene ribbon, which can be expected to realize multi-modulation to the number of beams, frequency and amplitude of THz wavers. The mechanism of controlling electromagnetic wave by coding metamaterial can be explained by the reflective array antenna. And the characteristics of the proposed metamaterial based on the graphene ribbon and the far-field scattering of coding metamaterial are simulated using the CST Microwave Studio. A composite structure which consists of gold metal, polyimide, silicon, silicon dioxide, graphene ribbon is designed and characterized in the THz range. The simulation results show that by gating different graphene ribbons, the coding state (digital element) on each column can be independently controlled as well, thus the '0' and '1' digital elements with a phase difference of 180° in a certain frequency range can be realized, and then the coding sequence on metamaterials is dynamically modulated. Full-wave simulation results also show that different-sequence coding metamaterials can achieve the control of the number of scattering THz beams, from one, double, multi scattering in a wide frequency range (from 1.7 to 2.2 THz). For coding sequence '010101...' realized by gating different voltages on coding elements '0' and '1', the frequency at which double scattering beams are produced, presents shift. For the coding metamaterial of periodic sequence of 000000 or 111111 with different voltage for different graphene ribbon, which can be expected to realize amplitude modulation from -12 dB to -23 dB of THz beam steering at $f_1 = 1$ THz. Therefore, this graphene coding metamaterial can control the THz beam flexibly and may offer widespread applications in stealth, imaging, and broadband communication of THz frequencies.

Keywords: graphene, terahertz, coding metamaterial, dynamic control

PACS: 81.05.xj, 42.25.Fx, 87.50.U-, 73.22.Pr

DOI: 10.7498/aps.67.20180125

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61701434, 61735010), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2017MF005), the Project of Shandong Province Higher Education Science and Technology Program, China (Grant No. J17KA087), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2015M571263), the Program of Independent and Achievement Transformation Plan for Zaozhuang, China (Grant Nos. 2016GH19, 2016GH31), the Key Laboratory of Optoelectronic Information Functional Materials and Micro-nano Devices in Zaozhuang, China, and the Zaozhuang Engineering Research Center of Terahertz, China.

† Corresponding author. E-mail: lianglanju123@163.com