

基于石墨烯超材料深度可调的调制器

刘元忠 张玉萍 曹妍妍 李悦 徐世林 张会云

山东科技大学电子通信与物理学院青岛市太赫兹技术重点实验室, 山东 青岛 266510

摘要 目前人们已经实现了很高的调制深度,但是缺少对如何实现调制深度可调的研究,不利于实现波整形。利用石墨烯的电调谐性以及石墨烯超材料的表面等离激元(SPP)共振特性,设计了一种能够在某一频率实现调制深度可调的调制器,且调制深度为极大值,便于取样及检测,并运用谐振子模型对透射规律进行了理论分析。基于三维电磁场仿真软件时域求解器仿真,得到了对应频率为11.85 THz的一系列的调制深度,其中最大调制深度可达到96%以上。这一系列的调制深度可以通过电压调节石墨烯的费米能级来进行调制转换,将极大地促进调制器在波整形中的应用,如生成正弦波、三角波及方波等。此外,这种结构可以实现类电磁感应透明(EIT)现象,不仅能够实现透射峰的频移和展宽,而且可以使展宽前后的中心频率保持一致。

关键词 材料; 石墨烯; 超材料; 调制深度; 可调性

中图分类号 TN15; TP214 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1016002

Modulator of Tunable Modulation Depth Based on Graphene Metamaterial

Liu Yuanzhong Zhang Yuping Cao Yanyan Li Yue Xu Shilin Zhang Huiyun

Qingdao Key Laboratory of Terahertz Technology, College of Electronic Communication and Physics,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China

Abstract At present, we have achieved a very high modulation depth, but it is unable to realize wave shaping for the lack of research on tunable modulation depth. On the basis of electrical tuning of graphene and the resonance property of graphene metamaterial surface plasmon polaritons (SPP), a graphene metamaterial modulator of tunable modulation depth at a frequency is proposed and the modulation depth is the maximum value, which is convenient for sampling and testing. The transmission law is theoretically analyzed by using the harmonic oscillator model. Based on the simulation of three-dimensional simulation software time domain solver, the series of modulation depth corresponding to the frequency of 11.85 THz is obtained, where the maximum modulation depth is greater than 96%. The series of the modulation depth can be modulated and transformed by bias voltage regulating graphene Fermi level. This will greatly promote the application of modulator in the wave shaping, such as generating sine wave, triangle wave and square wave. In addition, this structure can achieve a similar electromagnetically induced transparency (EIT) phenomenon. It can not only achieve the frequency shift and the transmission peak broadening, but also keep the center frequency the same before and after broadening center frequency.

Key words materials; graphene; metamaterial; modulation depth; tunable

OCIS codes 160.3900; 230.4110; 240.6680; 300.6495

1 引 言

自2004年石墨烯由剥离法^[1]被发明以来,科学家在其制备方法、机械特性、导电导热特性、电磁特性及非线性等方面已进行了广泛深入的研究^[2-8]。石墨烯具有对称的锥型零带隙结构^[9-10],拥有极高的电子及空穴迁移率^[10],且可以通过施加电场或磁场来调节石墨烯中的载流子浓度^[11]进而改变石墨烯的电导率,实现

收稿日期: 2016-07-01; **收到修改稿日期:** 2016-07-07

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2012FM011)、青岛市创新领军人才项目(13-CX-25)、中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金(201401)、青岛经济技术开发区重点科技计划项目(2013-1-64)、国家留学基金

作者简介: 刘元忠(1988—),男,硕士研究生,主要从事超材料方面的研究。E-mail: 1164776013@qq.com

导师简介: 张玉萍(1976—),女,博士,副教授,主要从事太赫兹与激光技术及超材料等方面的研究。

E-mail: sdust_thz@163.com(通信联系人)

对器件的电磁波吸收、透射及共振频率等的调制^[11-12]。石墨烯的独特性质使其在吸波体^[13-14]、滤波器^[15-16]、传感器^[17-18]和调制器^[10,19]等器件上都有着广阔的应用前景。

超材料是一种人工复合材料,具有超高等效折射率^[15,20]、负电磁参数^[21]和负折射率^[22]等天然材料所不具备的超常物理特性,已被广泛应用在电磁隐身^[23]、频带展宽^[24]、传感器^[25]及调制器^[26]等领域。当入射光与超材料结构相互作用时,会激发金属表面电子的集体振荡,导致共振吸收。且当石墨烯在介电常数虚部大于0时会表现为金属性^[27],因此可以考虑将石墨烯电导率的可调性与超材料结构的共振吸收特性相结合。

光调制器作为光信号处理系统中的关键功能器件,广泛应用于通信、传感、成像等领域。按材料分类^[19],光调制器分为无机物光调制器(如铌酸锂光调制器)、III-V族半导体光调制器(如硅基光调制器)和聚合物光调制器。铌酸锂光调制器体积较大,电极结构复杂,调制电压较高且难于集成;硅基光调制器主要利用硅的等离子色散效应对光信号进行调制,调控的手段有限;聚合物光调制器在热稳定性与化学稳定性方面有较大局限。为了克服以上光调制器的局限,石墨烯被应用到光调制器的设计中。2011年Liu M等^[28]完成首个石墨烯光调制器,将石墨烯平铺在光波导的上面,对石墨烯层加偏压实现调制。同年,Sensale-Rodriguez B等^[10]提出了基于石墨烯的太赫兹调制器,使调制器的调制深度大于90%,信号衰减小于5%。Kim K等^[29]提出将石墨烯层置于波导中间的光调制器结构,提高了光调制器的消光比。2012年Liu M等^[30]又提出了双层石墨烯光调制器的结构,该设计消除了存在于硅中的光子的光学损耗,提高了消光比,降低了能耗及插入损耗。2013年Sensale-Rodriguez B等^[31]进行了石墨烯调制器阵列实现太赫兹成像的研究,揭示了采用单探测器开发可靠的低成本太赫兹成像系统的可能性。2014年Li W等^[32]提出了一种超快全光石墨烯调制器,在光纤外部包裹一层石墨烯,通过外加控制光影响带间跃迁的泡利阻塞效应实现调控。2015年Liang G Z等^[33]提出了集成太赫兹石墨烯调制器,调制深度达到100%,调制速率达到100 MHz。结合新材料、新结构研究光调制器已然成为了一种新的趋势。

近年来,基于石墨烯超材料的研究也已广泛开展,实现了石墨烯超材料吸波体^[12]的吸收峰的调谐及展宽。但目前调制器方面,相关研究还很少见。有关石墨烯-半导体-二维电子气(2DEG)-半导体结构调制器的优异特性和石墨烯-电介质-石墨烯结构调制器的可行性解释的研究^[10],以及有关石墨烯超材料可调谐吸波体的研究,都表明石墨烯与超材料结构的结合可以应用到调制器中,实现更加优异的性能。

基于以上研究背景,本文设计了一种石墨烯超材料深度可调的调制器。通过CST软件时域求解器仿真,得到了对应频率为11.85 THz的一系列调制深度,其中最大调制深度可达到96%以上,实现了调制深度的调制转换以及波的正弦整形、三角整形和矩形整形。这种结构还可以实现类电磁感应透明(EIT)现象,不仅能够使透射峰的发生频移和展宽,而且可以使展宽前后的中心频率保持一致。

2 理论模型及分析

设计的基于单层及双层石墨烯互补型开口环调制器,如图1所示。单层石墨烯互补型开口环调制器由三层结构组成,由上到下依次为:石墨烯互补型开口环结构(G)-电介质1(N_1)-电介质2(N_2)。双层石墨烯互补型开口环调制器由五层结构组成,由上到下依次为:石墨烯互补型开口环结构(G)-电介质1(N_1)-电介质2(N_2)-电介质1(N_1)-石墨烯互补型开口环结构(G)。材料参数为:电介质1的折射率为1.5,为无色散材料。电介质2的折射率为2.0,为无色散材料。图中结构参数为: $A=2\ \mu\text{m}$, $D=1\ \mu\text{m}$, $W=0.17\ \mu\text{m}$, $T=0.14\ \mu\text{m}$, $T_G=0.001\ \mu\text{m}$, $T_{N_1}=0.2\ \mu\text{m}$, $T_{N_2}=0.3\ \mu\text{m}$ 。利用CST微波工作室对设计的调制器进行时域仿真。

在数值模拟计算中,石墨烯可以被看作厚度 $T_G=0.001\ \mu\text{m}$ 的薄层,其相对介电常数^[28]

$$\epsilon_g = 1 + i\sigma_g / (\epsilon_0 \omega T_G), \quad (1)$$

式中, T_G 为石墨烯的厚度,石墨烯的电导率为 σ_g ,用德鲁德模型表示为^[12]

$$\sigma_g = ie^2 E_F / [\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})], \quad (2)$$

式中, E_F 代表费米能级, $\tau = \mu E_F / e v_F^2$ 是弛豫速率,电子迁移率 $\mu = 10^4\ \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,费米速度 $v_F \approx 10^6\ \text{m/s}$ 。如图1(b)所示,在石墨烯和电介质1间加偏压 V 来实现对石墨烯费米能级的调节。石墨烯的费米能级与载流子

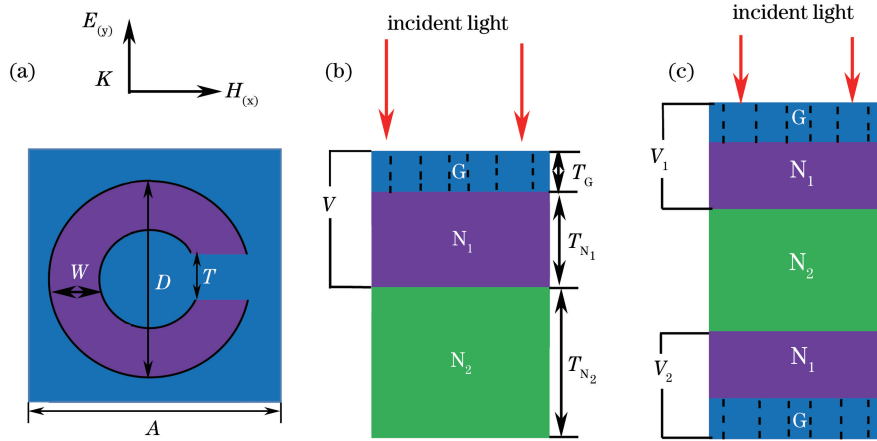


图 1 互补型开口环调制器的示意图。(a)单层和双层石墨烯互补型开口环调制器俯视图；
(b)单层石墨烯互补型开口环调制器左视图；(c)双层石墨烯互补型开口环调制器左视图

Fig. 1 Sketch map of complementary split ring modulator. (a) Top view of single and double layer graphene complementary split ring modulator; (b) left view of single layer graphene complementary split ring modulator; (c) left view of double layer graphene complementary split ring modulator

浓度的关系为^[11]

$$|E_F| = \hbar \nu_F (\pi N)^{1/2}, \quad (3)$$

式中, ν_F 是费米速度, N 是石墨烯层的载流子浓度。为了简化过程, 将偏压加在石墨烯层和电介质 1 看作平行板电容器模型, 则石墨烯中的载流子浓度可表示为

$$N = \epsilon |V| / (e T_{N_1}), \quad (4)$$

式中, e 是电子电量, T_{N_1} 是平行板电容器模型的电介质层的厚度即图 1(b) 中电介质 1 的厚度, ϵ 是电介质 1 的介电常数。因此, (1) 式可表示为

$$|E_F| \approx \hbar \nu_F [\pi \epsilon |V| / (e T_{N_1})]^{1/2} \propto |V|^{1/2}. \quad (5)$$

3 仿真计算结果及分析

通过上面的分析得到通过调节偏压可以改变石墨烯的费米能级。首先研究了石墨烯费米能级及结构参数对单层石墨烯互补型开口环调制器透射率的影响。图 2 是单层石墨烯互补型开口环调制器在不同的费米能级的情况下, 透射率随频率的变化情况, 其结构参数: $A = 2 \mu\text{m}$, $D = 1 \mu\text{m}$, $W = 0.17 \mu\text{m}$, $T = 0.14 \mu\text{m}$, $T_G = 0.001 \mu\text{m}$, $T_{N_1} = 0.2 \mu\text{m}$, $T_{N_2} = 0.3 \mu\text{m}$ 。从图 2 中可知, 透射率达到的最小值随石墨烯费米能级的增大而减小。共振频率(透射率达到最小值主要是由石墨烯结构中载流子共振导致, 其对应的频率称为共振频率)随石墨烯费米能级的增大发生明显的移动, 费米能级由 0.60 eV 逐渐增加到 0.90 eV, 共振频率则由

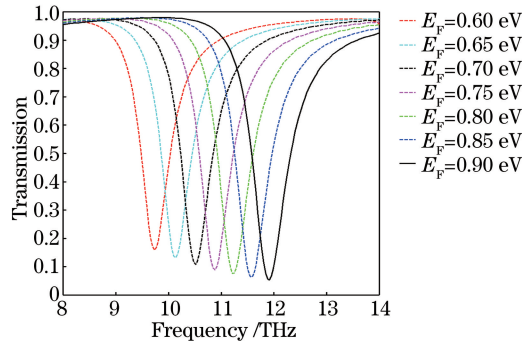


图 2 单层石墨烯互补型开口环调制器在不同的费米能级的情况下, 透射率和共振频率的变化情况

Fig. 2 Relationship between transmission and resonance frequency of single graphene complementary split ring modulator at different Fermi levels

10.50 THz逐渐增加到 12.88 THz,即发生了明显的蓝移。

图 3 是当石墨烯费米能级为 0.70 eV 时,石墨烯超材料结构参数改变时,共振频率的变化情况,其结构参数: $A=2 \mu\text{m}$, $D=1 \mu\text{m}$, $T_G=0.001 \mu\text{m}$, $T_{N_1}=0.2 \mu\text{m}$, $T_{N_2}=0.3 \mu\text{m}$ 。由图 3(a)与(b)可知,随着石墨烯超材料结构参数 W 的增大,共振频率发生了明显的蓝移。随着石墨烯超材料结构参数 T 的增大,共振频率发生了红移,但频移不明显。结构参数的变化对于共振频率的影响,取决于具体结构所对应的谐振方程,可根据 Delgado V 等^[34] 提出的 LC 谐振电路模型解释结构参数对共振频率的影响。该谐振电路模型给出了共振频率与环宽度与环开口宽度的函数关系式

$$\omega_s \approx \frac{1}{\sqrt{L_{\text{kin}}(C_{\text{gap}} + C_{\text{surf}})}}, \quad (6)$$

式中, ω_s 为共振频率; L_{kin} 、 C_{gap} 及 C_{surf} 分别为与环宽度及环开口宽度相关的动态电感、开口电容、表面电容。

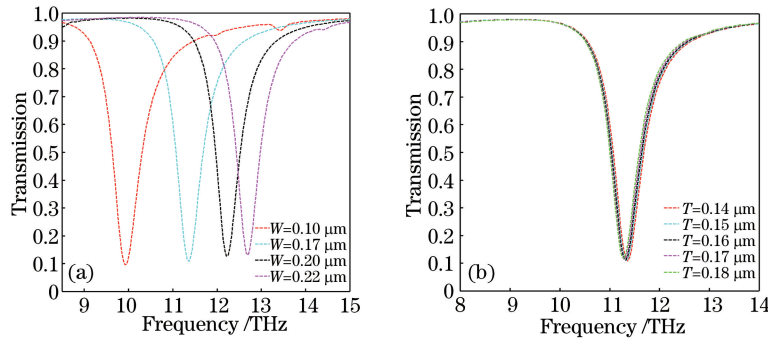


图 3 (a)单层石墨烯互补型开口环调制器在石墨烯费米能级为 0.70 eV, T 为 $0.14 \mu\text{m}$ 时共振频率随互补开口环宽度 W 的变化情况;(b)单层石墨烯互补型开口环调制器在石墨烯费米能级为 0.70 eV, W 为 $0.17 \mu\text{m}$ 时共振频率随互补开口环开口宽度 T 的变化情况

Fig. 3 (a) Relationship between resonance frequency of single graphene complementary split ring modulator and width W of the complementary split ring at Fermi level 0.70 eV, when T is $0.14 \mu\text{m}$; (b) relationship between resonance frequency of single graphene complementary split ring modulator and opening width T of the complementary split ring at Fermi level 0.70 eV, when W is $0.17 \mu\text{m}$

接下来研究费米能级对双层石墨烯互补型开口环调制器透射率的影响。如图 1(c)所示,双层石墨烯互补型开口环调制器可以通过分别调节偏压 V_1 与 V_2 来改变顶层与底层石墨烯的费米能级。图 4(a)表明通过调节顶层与底层石墨烯的费米能级的大小可以实现类 EIT 现象的透射峰的移动,其结构参数: $A=2 \mu\text{m}$, $D=1 \mu\text{m}$, $W=0.17 \mu\text{m}$, $T=0.14 \mu\text{m}$, $T_G=0.001 \mu\text{m}$, $T_{N_1}=0.2 \mu\text{m}$, $T_{N_2}=0.3 \mu\text{m}$ 。从图 4(a)可知,石墨烯的费米能级由 0.80 eV(0.55 eV)增大到 1.00 eV(0.75 eV)时,透射峰的中心频率由 11.14 THz 移动至 12.65 THz。图 4(b)则表明通过调节顶层与底层石墨烯的费米能级的大小可以实现类 EIT 现象的透射峰

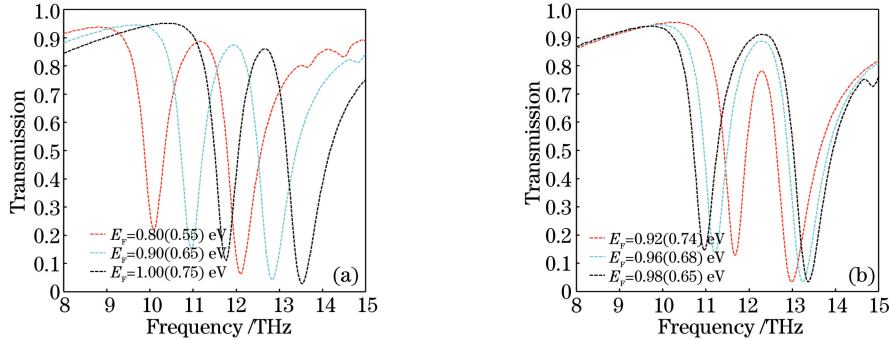


图 4 (a)与(b)为双层石墨烯互补型开口环调制器对应顶层石墨烯费米能级(底层石墨烯费米能级)类 EIT 现象的透射率-频率曲线图

Fig. 4 (a) and (b) are transmission-frequency curves of double layer graphene complementary split ring modulator at different graphene Fermi levels of top and bottom layer

的展宽。从图 4(b) 可以看到, 对应中心频率 12.28 THz 的透射峰在石墨烯的费米能级由 0.92 eV (0.74 eV) 变为 0.98 eV (0.65 eV) 后有明显展宽。双层石墨烯互补型开口环调制器的透射情况可以简单看作是两个单层石墨烯互补型开口环叠加得到的, 由图 2 可知单层石墨烯互补型开口环调制器的透射情况, 一个双层石墨烯互补型开口环调制器的透射曲线可以简单看作是对应两个费米能级情况下单层石墨烯互补型开口环调制器得到的透射曲线的组合, 即取二者透射率小的部分组合得到的曲线。两条透射曲线的交点可以近似看作是双层石墨烯互补型调制器可实现调控的透射率极大值点。根据图 2 单层石墨烯互补型开口环透射率随频率的变化规律, 要保证双层石墨烯互补型开口环调制器透射峰对应的频率不变, 顶层与底层石墨烯费米能级需向大小两端变化, 这同时引起了透射率大小与带宽的变化。

图 5 表明双层石墨烯互补型开口环调制器通过调节顶层与底层石墨烯的费米能级的大小在某一特定频率处可以实现一系列不同的透射率(或调制深度), 事实上这一特定频率也可通过调节 V_1 与 V_2 实现移动, 其结构参数: $A=2 \mu\text{m}$, $D=1 \mu\text{m}$, $W=0.17 \mu\text{m}$, $T=0.14 \mu\text{m}$, $T_G=0.001 \mu\text{m}$, $T_{N_1}=0.2 \mu\text{m}$, $T_{N_2}=0.3 \mu\text{m}$ 。从图 5 可以看出, 在特定频率 11.85 THz 处, 顶层石墨烯费米能级(底层石墨烯费米能级)分别取 0.10 eV (0.10 eV)、1.04 eV (0.73 eV)、1.01 eV (0.79 eV)、0.99 eV (0.81 eV)、0.96 eV (0.85 eV)、0.95 eV (0.87 eV)、0.94 eV (0.88 eV)、0.87 eV (0.87 eV), 对应的透射率分别为 0.985、0.882、0.802、0.740、0.516、0.351、0.240、0.016, 则相应的调制深度分别 0.969、0.866、0.786、0.724、0.500、0.335、0.224、0。从结果看, 最大调制深度已达到 96.9%, 得到了一系列离散分布的透射率或调制深度。这一系列透射率或调制深度能够通过调节偏压 V_1 与 V_2 改变顶层与底层石墨烯费米能级进行调制转换, 使调制器运用到波的整形。

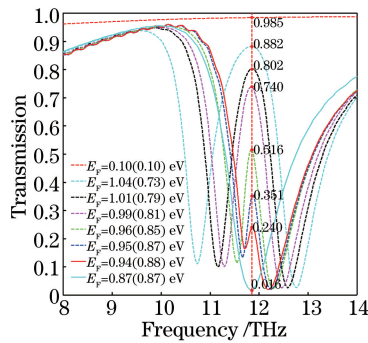


图 5 双层石墨烯互补型开口环调制器对应顶层石墨烯费米能级(底层石墨烯费米能级)透射率-频率曲线图

Fig. 5 Transmission-frequency curves of double layer graphene complementary split ring modulator at different graphene Fermi levels of top and bottom layer

图 6 是根据图 5 得到的一系列透射率通过调节偏压 V_1 与 V_2 实现对顶层与底层石墨烯费米能级的调控得到的波形图, 其结构参数: $A=2 \mu\text{m}$, $D=1 \mu\text{m}$, $W=0.17 \mu\text{m}$, $T=0.14 \mu\text{m}$, $T_G=0.001 \mu\text{m}$, $T_{N_1}=0.2 \mu\text{m}$, $T_{N_2}=0.3 \mu\text{m}$ 。图 6 给出了各具有两个周期的正弦波、三角波及矩形波。理论上讲, 双层石墨烯互补型开口环调制器可通过调节偏压实现任意波形任意周期的波整形。

双层石墨烯互补型开口环调制器与单层石墨烯互补型开口环调制器相比, 不仅进一步增大了调制深度, 而且可以通过调控偏压 V_1 与 V_2 实现类 EIT 现象, 得到的透射峰虽没有 Shi X 等^[35] 给出的峰值大, 但是该调制器得到的相对峰值(透射峰与透射谷的比值)要高得多。此外, 最重要的一点是可以调节偏压 V_1 与 V_2 实现对某一特定频率处调制深度的调控, 且保证调制深度为极大值便于检测与提取, 并运用于波整形。

4 调制器的机理分析

设计的调制器能够实现上述的调制功能, 原因在于入射光与石墨烯互补型开口环中的载流子相互作用, 载流子发生集体振荡即等离激元谐振导致了波的透射随频率呈现一定的规律。载流子集体振荡与载流子浓度有关, 而载流子的浓度又与石墨烯费米能级相关, 石墨烯的费米能级又可以通过调节偏压来调节。

图 7 所示为单层石墨烯互补型开口环调制器中石墨烯费米能级取 0.60 eV 和 0.90 eV 时共振频率处的表面磁场分布。从图 7 中可知, 当费米能级由 0.60 eV 增大到 0.90 eV 时, 不仅使得共振频率由 10.5 THz 增

大到 12.88 THz, 而且石墨烯表面磁场强度增强, 即石墨烯超材料结构中的载流子集体振荡更强烈。入射波偏振方向即电场方向沿 Y 方向, 所以载流子集体振荡的方向始终沿 Y 方向。沿 Y 方向振荡的载流子产生变化的电流, 变化的电流又在石墨烯层产生磁场, 电流的方向与由变化的电流产生的石墨烯表面磁场的方向符合右手螺旋定则。因此, 当费米能级为 0.90 eV 时, 单层石墨烯互补型开口环调制器的调制深度要比费米能级为 0.60 eV 时的要大, 这一点在图 2 中可以看到。

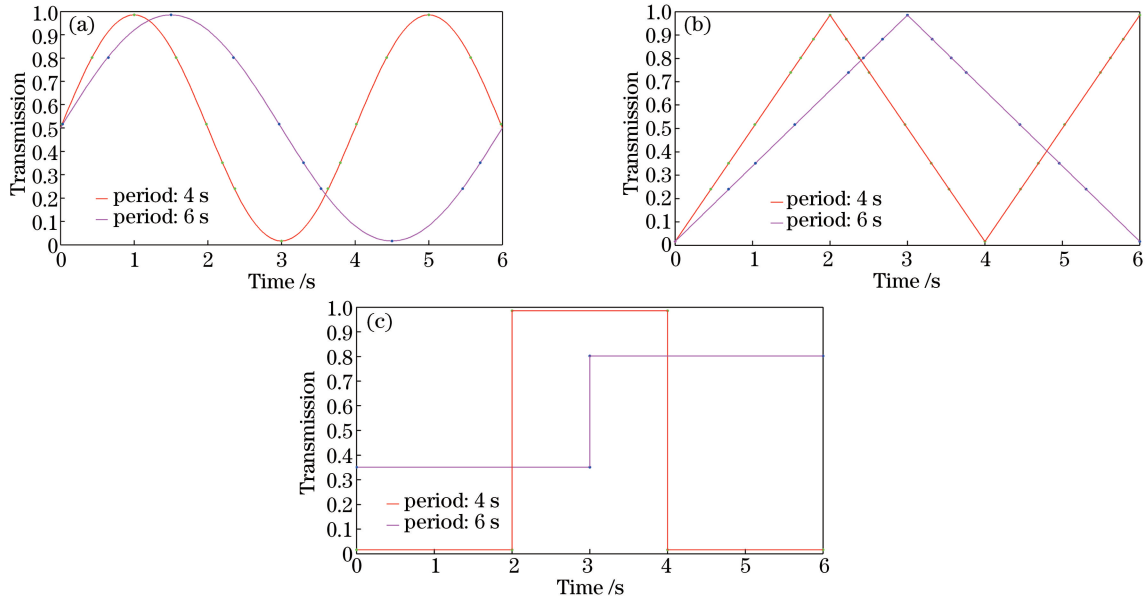


图 6 (a)调控得到的正弦波;(b)调控得到的三角波;(c)调控得到的矩形波

Fig. 6 (a)Sine wave obtained by regulating and controlling; (b) triangular wave obtained by regulating and controlling; (c) rectangular wave obtained by regulating and controlling

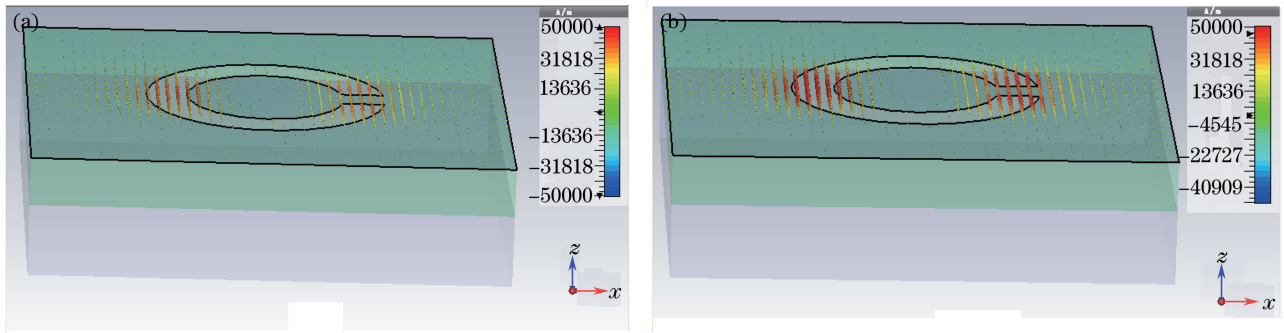


图 7 (a)单层石墨烯互补型开口环调制器当费米能级 $E_F=0.60$ eV 时, 石墨烯表面磁场在共振频率为 10.50 THz 处的分布情况;(b)当费米能级 $E_F=0.90$ eV 时, 石墨烯表面磁场在共振频率为 12.88 THz 处的分布情况

Fig. 7 (a) Surface magnetic field of single graphene complementary split ring modulator at resonance frequency 10.50 THz, when Fermi level $E_F=0.60$ eV; (b) surface magnetic field of single graphene complementary split ring modulator at resonance frequency 12.88 THz, when Fermi level $E_F=0.90$ eV

运用谐振子模型^[36]对所设计的单层石墨烯互补型开口环调制器进行理论计算分析。谐振方程为

$$\ddot{x} + \gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = gE, \quad (7)$$

式中, x 、 γ 、 ω_0 分别表示载流子谐振的振幅、阻尼系数及共振角频率。 g 是描述入射场 E 对载流子激励强度的参数。该器件的远场透射可以近似看作与其近场极化率 $\tilde{\chi}_e$ 相关^[37], 其中 $\tilde{\chi}_e$ 与 x_1 成比例。远场透射率表达式如下

$$t = |c(1 + n_s) / [c(1 + n_s) - i\omega\tilde{\chi}_e]|, \quad (8)$$

式中, c 为真空中的光速, n_s 为基底的折射率。为了简化计算, n_s 取为介质 2 的折射率即 2.0。图 8(a)与(b)

为费米能级分别为 0.60 eV 与 0.90 eV 时理论计算得到的透射率与仿真得到的透射率图,理论结果与仿真结果比较符合。计算得到的费米能级为 0.60 eV 与 0.90 eV,对应的阻尼系数 γ 分别为 0.30π 与 0.12π ,这与费米能级增大引起载流子浓度增大使得载流子集体振荡的等效质量增大导致阻尼系数减小的定性判断一致。

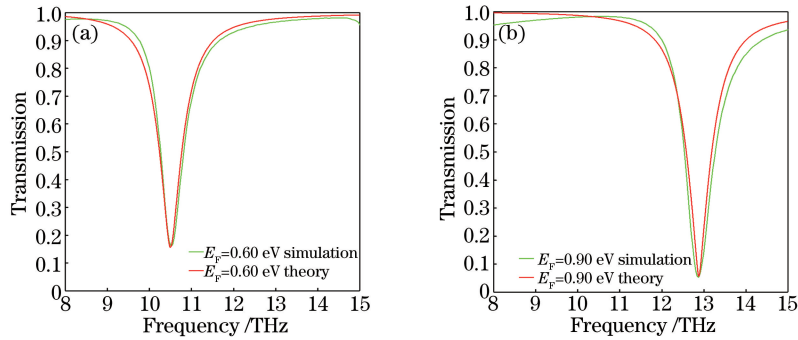


图 8 费米能级分别为(a)0.60 eV 与(b)0.90 eV 时理论计算得到的透射率与仿真得到的透射率图

Fig. 8 Transmission-frequency curves obtained by theoretical calculation and simulation when Fermi level is (a) 0.60 eV and (b) 0.90 eV, respectively

接下来分析了双层石墨烯互补型开口环调制器的调制机理。图 9 为双层石墨烯互补型开口环调制器的费米能级取 1.0 eV 和 0.75 eV 时对应 11.76、12.65、13.51 THz 频率处的磁场分布。从图 9 中可知,当频率为 11.76 THz(或 13.51 THz)时,结构中底层(或顶层)石墨烯中的磁场更强,说明此时载流子集体振荡更强烈,透射峰频率处石墨烯中的磁场与图 9(a)及图 9(e)的磁场相比较弱。

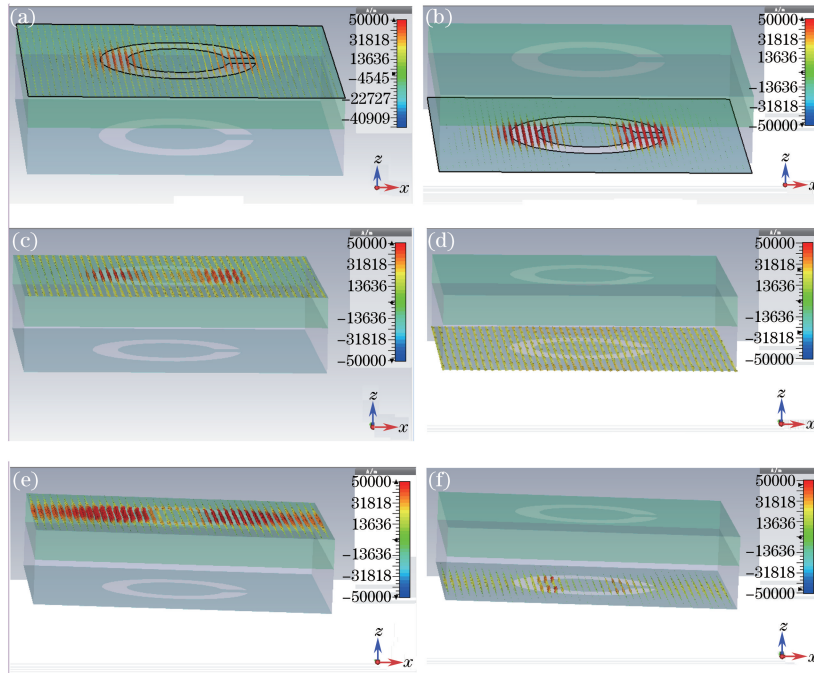


图 9 双层石墨烯互补型开口环调制器的费米能级为 1.0 eV (0.75 eV)时在频率 11.76 THz 处的 (a) 顶层和 (b) 底层

石墨烯超材料结构中的磁场分布;双层石墨烯互补型开口环调制器的费米能级为 1.0 eV (0.75 eV)时

在频率 12.65 THz 处的 (c) 顶层和 (d) 底层石墨烯超材料结构中的磁场分布;双层石墨烯互补型开口环调制器的费米能级为 1.0 eV (0.75 eV)时在频率 13.51 THz 处的 (e) 顶层和 (f) 底层石墨烯超材料结构中的磁场分布

Fig. 9 Magnetic field distribution of (a) top and (b) bottom graphene layer at 11.76 THz, when Fermi level of double layer graphene complementary split ring modulator is 1.0 eV (0.75 eV); magnetic field distribution of (c) top and (d) bottom graphene layer at 12.65 THz, when Fermi level of double layer graphene complementary split ring modulator is 1.0 eV (0.75 eV); magnetic field distribution of (e) top and (f) bottom graphene layer at 13.51 THz, when Fermi level of double layer graphene complementary split ring modulator is 1.0 eV (0.75 eV)

对于双层石墨烯互补型开口环调制器的分析,简单地将双层石墨烯互补型开口环调制器看成两个单层石墨烯互补型开口环调制器的组合,并运用两个谐振子模型叠加来进行理论分析。费米能级为 0.75 eV 与 1.0 eV 对应的谐振方程分别表示为

$$\ddot{x}_1 + \gamma_1 \dot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 = g_1 E, \quad (9)$$

$$\ddot{x}_2 + \gamma_2 \dot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 = g_2 E, \quad (10)$$

式中, x_1 、 x_2 、 γ_1 、 γ_2 、 ω_1 与 ω_2 分别表示费米能级为 0.75 eV 与 1.0 eV 对应的谐振方程的振幅、阻尼系数及共振频率。 g_1 与 g_2 均为描述入射场 E 对载流子激励强度的参数。则对应的远场透射率表达式分别为

$$t_1 = |c(1+n_s)/[c(1+n_s) - i\omega \widetilde{\chi}_{e_1}]|, \quad (11)$$

$$t_2 = |c(1+n_s)/[c(1+n_s) - i\omega \widetilde{\chi}_{e_2}]|. \quad (12)$$

两个谐振子模型叠加后的远场透射率可简化为取频域中 t_1 与 t_2 较小值,则双层石墨烯互补型开口环调制器的远场透射率表达式为

$$t_{12} = \min(t_1 + t_2). \quad (13)$$

图 10 为理论计算得到的与仿真得到的双层石墨烯互补型开口环调制器的透射率曲线,由图可知,理论计算结果与仿真结果基本一致,说明双谐振子叠加模型对于描述双层石墨烯互补型开口环调制器的透射规律是有效的,由于采用简化为取频域中 t_1 与 t_2 较小值,导致有些部分理论计算结果与仿真结果存在偏差。理论计算得到的费米能级为 0.75 eV 与 1.0 eV 对应的谐振方程的谐振频率分别为 11.76 THz 及 13.51 THz,其对应的阻尼系数 γ_1 与 γ_2 分别为 0.24π 与 0.08π ,结合单层石墨烯互补型开口环谐振器费米能级为 0.60 eV 与 0.90 eV 所对应的阻尼系数分别为 0.30π 及 0.12π ,再一次说明理论计算的阻尼系数随费米能级的变化规律与费米能级增大引起载流子浓度增大使得载流子集体振荡的等效质量增大导致阻尼系数减小的定性判断一致。

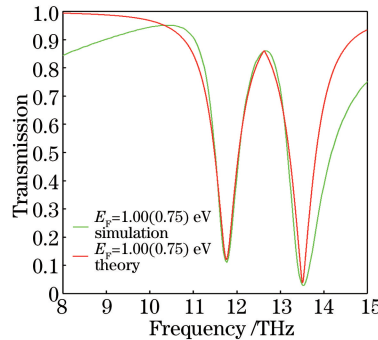


图 10 费米能级为 1.0 eV (0.75 eV) 时,双层石墨烯互补型开口环调制器理论计算得到的与仿真得到的透射率曲线图

Fig. 10 Transmission-frequency curves obtained by theoretical calculation and simulation when Fermi level is 1.0 eV (0.75 eV)

5 结 论

设计并研究了一种单层及双层石墨烯互补型开口环调制器,并基于谐振子模型及双谐振子叠加模型解释了该调制器的机理。该调制器不仅实现了调制深度达到 96% 以上,对共振频率进行调谐,而且能够调控一系列调制深度间的转换,并应用于正弦波,三角波及矩形波的整形。由于调控得到的透射率都是极值,便于波的提取及检测。另外,采用互补型开口环超结构也便于在实验中加偏压。也可采用工字型、一字型、双开口环等超材料结构来替换互补型开口环结构尝试实现在其他频域的相应调制。

参 考 文 献

- 1 Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.

- 2 Yu Hailing, Zhu Jiaqi, Cao Wenxin, *et al.* Process in preparation of metal-catalyzed graphene[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(2): 028201.
于海玲, 朱嘉琦, 曹文鑫, 等. 金属催化制备石墨烯的研究进展[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 028201.
- 3 Zhou Yin, Hou Zhaoxia, Wang Shaohong, *et al.* Preparation methods and development and application prospects of graphene[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2012, 35(3): 86-90.
周 银, 侯朝霞, 王少洪, 等. 石墨烯的制备方法及应用发展概述[J]. *兵器材料科学与工程*, 2012, 35(3): 86-90.
- 4 Wang Wenrong, Zhou Yuxiu, Li Tie, *et al.* Research on synthesis of high-quality and large-scale graphene films by chemical vapor deposition[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(3): 038702.
王文荣, 周玉修, 李 铁, 等. 高质量大面积石墨烯的化学气相沉积制备方法研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(3): 038702.
- 5 Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. *Nat Mater*, 2007, 6(3): 183-191.
- 6 Novoselov K S, Fal V I, Colombo L, *et al.* A roadmap for graphene[J]. *Nature*, 2012, 490(7419): 192-200.
- 7 Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, *et al.* Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nat Photonics*, 2010, 4(9): 611-622.
- 8 Zhao Xin, Yan Xiaoqing, Ma Qiang, *et al.* Optical nonlinearities of reduced graphene oxide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0719001.
赵 欣, 鄢小卿, 马 强, 等. 还原氧化石墨烯光学非线性[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0719001.
- 9 Liang Xianqing. The approximate calculation of the tight binding band structure of graphene[J]. *Guangxi Physics*, 2011, 32(1): 7-10.
梁先庆. 石墨烯能带结构的紧束缚近似计算[J]. *广西物理*, 2011, 32(1): 7-10.
- 10 Sensale-Rodriguez B, Fang T, Yan R, *et al.* Unique prospects for graphene-based terahertz modulators[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 99(11): 113104.
- 11 Ye C Y, Zhu Z H, Xu W, *et al.* Electrically tunable absorber based on nonstructured graphene[J]. *J Optics*, 2015, 17(12): 125009.
- 12 Zhang Huiyun, Huang Xiaoyan, Chen Qi, *et al.* Tunable terahertz absorber based on complementary graphene metasurface[J]. *Acta Phys Sin*, 2016, 65(1): 018101.
张会云, 黄晓燕, 陈 琦, 等. 基于石墨烯互补超表面的可调谐太赫兹吸波体[J]. *物理学报*, 2016, 65(1): 018101.
- 13 Liu Yi, Peng Xiaoyu, Wang Zuobin, *et al.* Terahertz-wave absorber based on metamaterial[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 756-763.
刘 毅, 彭晓昱, 王作斌, 等. 基于超材料的太赫兹波吸波材料[J]. *红外技术*, 2015, 37(9): 756-763.
- 14 Amin M, Farhat M, Bağcı H. An ultra-broadband multilayered graphene absorber[J]. *Opt Express*, 2013, 21(24): 29938-29948.
- 15 Sheng Shiwei, Li Kang, Kong Fanmin, *et al.* Tooth-shaped plasmonic filter based on graphene Nanoribbon[J]. *Acta Phys Sin*, 2015, 64(10): 108402.
盛世威, 李 康, 孔繁敏, 等. 基于石墨烯纳米带的齿形表面等离子体滤波器的研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(10): 108402.
- 16 Rycerz A, Tworzydło J, Beenakker C W J. Valley filter and valley valve in graphene[J]. *Nat Phys*, 2007, 3(3): 172-175.
- 17 Zhang B, Cui T H. An ultrasensitive and low-cost graphene sensor based on layer-by-layer nano self-assembly[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98(7): 073116.
- 18 Liao Guozhen, Zhang Jun, Cai Xiang, *et al.* All-fiber temperature sensor based on graphene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706004.
廖国珍, 张 军, 蔡 祥, 等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706004.
- 19 Tang Linfeng, Ye Shengwei, Zheng Xiu, *et al.* Recent development in graphene-based optical modulator[J]. *Laser Journal*, 2013, 34(6): 1-4.
唐琳峰, 叶胜威, 郑 秀, 等. 石墨烯光调制器研究进展[J]. *激光杂志*, 2013, 34(6): 1-4.
- 20 Sheng S W, Li K, Kong F M, *et al.* Analysis of a tunable band-pass plasmonic filter based on graphene nanodisk resonator[J]. *Opt Commun*, 2015, 336: 189-196.
- 21 Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(4): 509.
- 22 Houck A A, Brock J B, Chuang I L. Experimental observations of a left-handed material that obeys Snell's law[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 90(13): 137401.

- 23 Liu Ye, Li Zhuying, Zhang Wangzhou, *et al.* Design and emulation of combined-shaped electromagnetic stealthy cloak made of metamaterials[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(15): 2235-2238.
刘 冶, 李竹影, 张旺洲, 等. 组合型电磁隐身斗篷的超材料设计与仿真[J]. *功能材料*, 2013, 44(15): 2235-2238.
- 24 Zou Taobo, Hu Fangrong, Xiao Jing, *et al.* Design of a polarization-insensitive and broadband terahertz absorber using metamaterials[J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(17): 178103.
邹涛波, 胡放荣, 肖 靖, 等. 基于超材料的偏振不敏感太赫兹宽带吸波体设计[J]. *物理学报*, 2014, 63(17): 178103.
- 25 Zhang Yuping, Li Tongtong, Lv Huanhuan, *et al.* Research on sensing characteristics of I-shaped terahertz metamaterial absorber[J]. *Acta Phys Sin*, 2015, 64(11): 117801.
张玉萍, 李彤彤, 吕欢欢, 等. 工字形太赫兹超材料吸波体的传感特性研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(11): 117801.
- 26 Chen H T, Padilla W J, Cich M J, *et al.* A metamaterial solid-state terahertz phase modulator[J]. *Nat Photonics*, 2009, 3(3): 148-151.
- 27 Vakil A, Engheta N. Transformation optics using graphene[J]. *Science*, 2011, 332(6035): 1291-1294.
- 28 Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, *et al.* A graphene-based broadband optical modulator[J]. *Nature*, 2011, 474(7349): 64-67.
- 29 Kim K, Choi J Y, Kim T, *et al.* A role for graphene in silicon-based semiconductor devices[J]. *Nature*, 2011, 479(7373): 338-344.
- 30 Liu M, Yin X B, Zhang X. Double-layer graphene optical modulator[J]. *Nano Lett*, 2012, 12(3): 1482-1485.
- 31 Sensale-Rodriguez B, Rafique S, Yan R S, *et al.* Terahertz imaging employing graphene modulator arrays[J]. *Opt Express*, 2013, 21(2): 2324-2330.
- 32 Li W, Chen B G, Meng C, *et al.* Ultrafast all-optical graphene modulator[J]. *Nano Lett*, 2014, 14(2): 955-959.
- 33 Liang G Z, Hu X N, Yu X C, *et al.* Integrated terahertz graphene modulator with 100% modulation depth[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(11): 1559-1566.
- 34 Delgado V, Sydoruk O, Tatartschuk E, *et al.* Analytical circuit model for split ring resonators in the far infrared and optical frequency range[J]. *Metamaterials*, 2009, 3(2): 57-62.
- 35 Shi X, Han D Z, Dai Y Y, *et al.* Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in nanostructure graphene[J]. *Opt Express*, 2013, 21(23): 28438-28443.
- 36 Zhao X L, Yuan C, Lv W H, *et al.* Plasmon induced transparency in metamaterial based on graphene and split-ring resonators[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2015, 27(12): 1321-1324.
- 37 Gu J Q, Singh R J, Liu X J, *et al.* Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nat Commun*, 2012, 3(4): 1151.