

基于石墨烯表面等离子激元波导的同或/异或门

周利强, 张杰, 丁健, 陈伟伟

宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211

摘要 设计了一种基于石墨烯表面等离子激元波导的同或/异或逻辑门,其采用了上下话路型微环谐振器为基本单元。通过调节石墨烯化学势来控制石墨烯表面等离子激元的传输状态,器件的两个不同输出端口同时获得同或和异或逻辑运算结果。仿真分析结果表明:当工作频率为 30 THz,石墨烯化学势为 0.677 eV 和 0.95 eV 时,基于石墨烯表面等离子激元波导的上下话路型微环谐振器可实现开启与关闭;所构建的同或/异或逻辑门在‘00’、‘01’、‘10’、‘11’四组逻辑操作数下的最差串扰为-10.60 dB。

关键词 集成光学; 同或/异或门; 微环谐振器; 石墨烯; 表面等离子激元; 波导

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0213001

Design of Graphene-Based Plasmonic XNOR/XOR Logic Gates

Zhou Liqiang, Zhang Jie, Ding Jian, Chen Weiwei

Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract A graphene-based plasmonic XNOR/XOR logic gate where the add-drop-channel micro-ring resonators are used as the basic unit is designed. The transmission states of graphene-based surface plasmonics can be controlled by tuning the chemical potential of graphene, and so that the XNOR and XOR operation results can be obtained simultaneously at the two output ports of this device. The simulation results show that the opening and closing of the add-drop-channel micro-ring resonators of graphene-based plasmonic waveguide can be realized when the chemical potentials are 0.677 eV and 0.95 eV, and the working frequency is 30 THz. In addition, the minimum crosstalk of the designed XNOR/XOR logic gates is -10.60 dB when the input logic states are ‘00’, ‘01’, ‘10’ and ‘11’.

Key words integrated optics; XNOR/XOR gate; micro-ring resonator; graphene; surface plasmon polariton; waveguide

OCIS codes 130.3120; 130.3750; 240.6680

1 引 言

表面等离子激元是金属表面自由电子与光子相互作用形成的一种特殊电磁波^[1],在空间尺寸上远小于自由空间传播的电磁波波长,具有高度局域性。石墨烯是一种具有蜂窝状晶格结构的二维材料。独特的零带隙能带结构使石墨烯具备了优越的电学性能,可通过化学掺杂和外加电压等方式调节化学势,支持太赫兹到红外波段的表面等离子激元传输^[2-4]。相较于普通金属,石墨烯具备较强的表面等离子激元束缚能力,且损耗也较低^[5-9]。因此,基于石墨烯

的表面等离子激元波导在制备高集成度光子芯片方面具有巨大的潜在优势^[10-12]。

光逻辑器件是光计算和光信息处理的关键器件之一。近年来,基于石墨烯的表面等离子激元波导的光逻辑器件已被相继提出。Ooi 等^[13]利用石墨烯纳米带形成马赫-曾德尔干涉仪结构,并利用两两石墨烯纳米带之间的耦合,通过外加电压方式改变了石墨烯化学势,实现了或非/与(NOR/AND)门,与非/或(NAND/OR)门,以及同或/异或(XNOR/XOR)门。该类型器件结构简单,不利于实现复杂的功能器件。Yarahmadi 等^[14]提出了一种基于 Y

收稿日期: 2017-09-01; **收到修改稿日期:** 2017-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(61675108,61474068,61307071)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20133305120004)、集成光电子学国家重点联合实验室开放课题(IOSKL2015KF03)

作者简介: 周利强(1990—),男,硕士研究生,主要从事集成光电子器件方面的研究。E-mail: zhouliqiang_nbu@163.com

导师简介: 陈伟伟(1986—),女,博士,副教授,主要从事集成光电子器件及其系统层面应用方面的研究。

E-mail: chenweiwei@nbu.edu.cn

分叉结构的石墨烯表面等离子激元波导光开关,并以此为基本单元实现了与门和或门。该器件串扰性能较好,但是尺寸相对较大,不利于后续集成发展。微环作为一种基本的光学结构,具有灵活紧凑、集成度高、易于扩展等特点。基于微环结构,利用硅材料的热光效应或载流子色散效应,OR/NOR、AND/NAND以及XNOR/XOR门已被实现^[15-16]。虽然该类型器件具有与互补金属氧化物半导体工艺相兼容的优势,但是受限于光学衍射极限,器件尺寸难以进一步缩小。

本文采用上下话路型微环谐振器为基本单元,设计了一种基于石墨烯表面等离子激元波导的XNOR/XOR逻辑门。通过调节石墨烯化学势,使石墨烯复表面电导率和在平面方向上的介电常数发生变化,改变了石墨烯表面等离子体波的传播常数,切换了上下话路型微环谐振器在工作波长下的失谐与谐振状态,继而在逻辑器件的不同输出端口同时获取同或/异或逻辑运算结果。同时,采用COMSOL协同CST软件仿真方式,分析了不同石墨烯化学势下所设计的基于石墨烯表面等离子激元波导XNOR/XOR逻辑门的性能,为进一步优化基于石墨烯表面等离子激元波导的光逻辑器件设计提供了参考。

2 设计原理与结构

石墨烯的复表面电导率包括带间和带内两部分,可通过Kubo公式描述。在 $k_B T \ll |\mu_c|$ 且 $k_B T \ll \hbar\omega$ 的情况下,带内电导率和带间电导率^[17]分别为

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{ie^2}{4\pi\hbar} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - \hbar(2\pi f + i\tau^{-1})}{2|\mu_c| + \hbar(2\pi f + i\tau^{-1})} \right], \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{ie^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (2\pi f + i\tau^{-1})} \times \left\{ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left[\exp \left(-\frac{\mu_c}{k_B T} \right) + 1 \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 σ_{inter} 是带内电导率, σ_{intra} 是带间电导率, e 为电子电荷, T 是石墨烯所处环境温度, \hbar 是约化普朗克常量, μ_c 是石墨烯的化学势, k_B 是玻尔兹曼常量, f 是与石墨烯相互作用的光波频率, ω 是与石墨烯相互作用的光波角频率, τ 是电子弛豫时间。假定石墨烯为一种厚度非常小的薄膜,石墨烯在平面方向上的介电常数 ϵ 与复表面电导率 σ 之间的关系^[18]为

$$\epsilon = 1 + \frac{i\sigma}{\omega\epsilon_0\Delta}, \quad (3)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数, Δ 是石墨烯厚度。

所设计的基于石墨烯表面等离子激元波导的XNOR/XOR逻辑门如图1所示。该XNOR/XOR逻辑门由两个上下话路型微环谐振器(MRR 1、MRR 2)级联而成,虚框所示的是截面结构。其中,硅(Si)层上方是二氧化硅(SiO_2)层, SiO_2 层上方是单层石墨烯纳米带,而在单层石墨烯纳米带的上方依次覆盖着等宽的 SiO_2 层与Si层。石墨烯纳米带的宽度为 W , SiO_2 和Si层的厚度均为 t 。当微环谐振腔有效周长与石墨烯支持的表面等离子体波波长存在整数倍关系时,谐振现象发生,谐振频率 f_{res} ^[19]满足

$$f_{\text{res}} = \frac{Nc}{2\pi r n_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

式中 N 为任意正整数, c 为自由空间中的光速, r 是微环谐振腔的半径, n_{eff} 为微环谐振腔的有效折射率。由(1)~(4)式可知,通过改变石墨烯的化学势 μ_c ,可使石墨烯复表面电导率 σ 和在平面方向上的介电常数 ϵ 发生变化,从而石墨烯所支持表面等离子体波的传播常数得到调节,进而控制上下话路型微环谐振器在工作波长下的失谐与谐振状态。

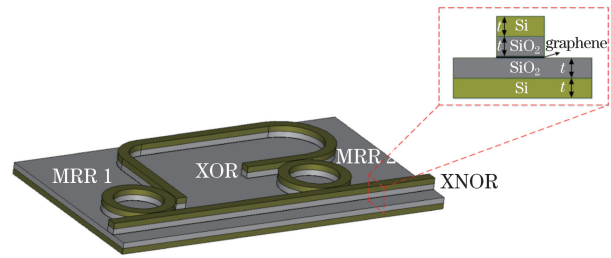


图1 基于石墨烯表面等离子激元波导的XNOR/XOR逻辑门结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of graphene-based plasmonic XNOR/XOR logic gate

当石墨烯化学势为 μ_{c1} 时,微环谐振腔在工作波长 λ_w 处产生谐振,表面等离子体波耦合进入微环谐振腔。此时,定义该逻辑操作数为‘0’。而当微环谐振腔中石墨烯的化学势为 μ_{c2} 时,微环谐振腔在工作波长 λ_w 处处于失谐状态,表面等离子体波不能耦合进入微环谐振腔。此时,定义该逻辑操作数为‘1’。如图1所示,当上下话路型微环谐振器MRR 1和MRR 2中的石墨烯化学势为 μ_{c1} 时,即逻辑操作数为‘0’和‘0’,此时,MRR 1和MRR 2处于谐振状态,表面等离子体波耦合进入微环谐振腔并从MRR 1的下载端输出,经波导传输后,耦合进入MRR 2,并最终在端口XNOR处输出。此时,定义该输出为逻辑结果‘1’。同时,由于XOR端口没有

输出信号,因此 XOR 端口输出被定义为逻辑结果‘0’。同理可知,当 MMR 1、MMR 2 分别处于谐振、失谐状态,即逻辑操作数为‘0’和‘1’时,表面等离子体波耦合进入微环谐振腔并从 MRR 1 的下载端输出,经波导传输后从 XOR 端口输出,得到逻辑结果‘1’。而此时 MMR 2 处于失谐状态,故在端口 XNOR 处无法得到输出光信号,即逻辑结果为‘0’。当 MMR 1、MMR 2 分别处于失谐、谐振状态,即逻辑操作数为‘1’和‘0’时,表面等离子体波从 MRR 1 的直通端输出,经 MMR 2 时,由于谐振,光信号耦合进入微环谐振腔,最终从 XOR 端口输出,得到逻辑结果‘1’。与此同时,在 XNOR 端口没有输出光信号,即逻辑结果为‘0’。当 MMR 1、MMR 2 皆处于失谐状态,即逻辑操作数为‘1’和‘1’时,表面等离子体波沿着直波导向前传输,并从 XNOR 端口输

出,得到逻辑结果‘1’。此时,在端口 XOR 处未获得输出光信号,即逻辑结果为‘0’。

3 仿真结果与分析

为了更好地优化所提出的基于石墨烯表面等离子激元波导的 XNOR/XOR 逻辑门,对作为基本单元的上下话路型微环谐振器进行传输特性仿真分析。基于石墨烯表面等离子激元波导的上下话路型微环谐振器示意图如图 2 所示,其中 G_0 为耦合间距。仿真过程中,温度 $T=300$ K,电子弛豫时间 $\tau=0.765$ ps, SiO_2 的介电常数为 2.09,Si 的介电常数为 11.9^[18]。为了满足单模条件,石墨烯纳米带的宽度 $W=30$ nm^[19]。石墨烯厚度 $\Delta=1$ nm, SiO_2 和 Si 层的厚度 $t=20$ nm。上下话路型微环谐振器半径 $r=100$ nm。

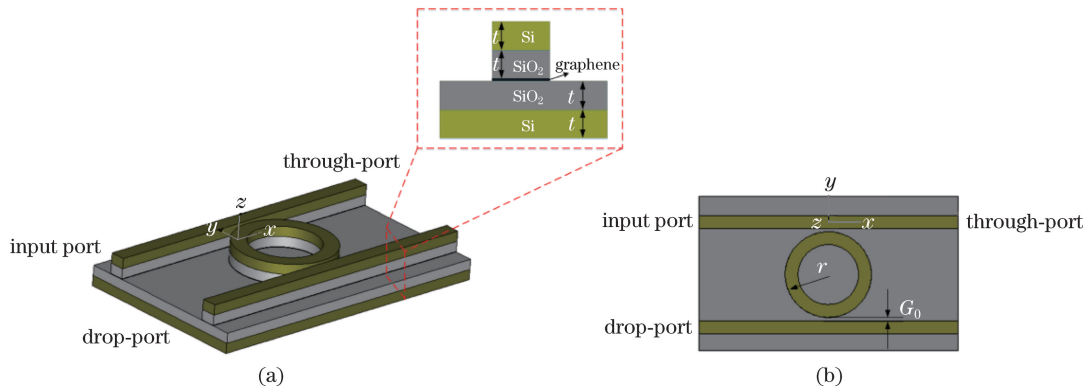


图 2 基于石墨烯表面等离子激元波导的上下话路型微环谐振器。(a)三维示意图;(b)俯视图

Fig. 2 Add-drop-channel micro-ring resonator of graphene-based plasmonic waveguide.

(a) Three dimensional view; (b) top view

利用(1)~(3)式计算不同频率、不同化学势下的石墨烯介电常数,并将其导入 CST 软件中,仿真获得基于石墨烯表面等离子激元波导的上下话路型微环谐振器的传输谱线。图 3 所示是在不同耦合间距 G_0 下,当频率为 30 THz 时,微环谐振器输出响应随石墨烯化学势的变化情况。从图 3 可以发现,随着耦合间距 G_0 的增大,微环谐振器的串扰逐渐增大。当耦合间距 $G_0=2$ nm 时,微环谐振器的串扰在石墨烯化学势为 0.677 eV 时达到最佳。此时,定义微环谐振器处于开启状态。当频率为 30 THz,石墨烯化学势为 0.677 eV 时,下载端输出为 -2.96 dB,直通端输出为 -17.11 dB。图 4 所示是微环谐振器传输谱随频率的变化情况。从图 4 可以发现,当频率为 30 THz,微环谐振腔中石墨烯化学势为 0.95 eV 时,下载端输出为 -15.20 dB,直通端输出为 -1.24 dB。此时,定义

微环谐振器处于关闭状态。因此,当微环谐振腔中的石墨烯化学势在 0.677 eV 与 0.95 eV 之间切换时,微环谐振器下载端和直通端的消光比分别可达 12.24 dB 和 15.87 dB。图 5 所示是微环谐振腔中石墨烯化学势分别为 0.677 eV 和 0.95 eV,微环谐振器频率为 30 THz 时的磁场强度分布图。由图 5(a)、(b)可以发现,当化学势为 0.677 eV 时,微环处于谐振状态,表面等离子激元耦合进入微环谐振腔并从下载端输出,而当化学势为 0.95 eV 时,微环处于失谐状态,表面等离子激元从直通端输出。同时,利用 COMSOL 软件对石墨烯表面等离子激元波导进行模式分析。当石墨烯化学势为 0.677 eV 和 0.95 eV 时,可计算得到石墨烯复表面电导率 σ 分别为 $(2.95 \times 10^{-6} + 4.19 \times 10^{-4}i)$ S 和 $(4.12 \times 10^{-6} + 5.90 \times 10^{-4}i)$ S。当石墨烯复表面电导率 σ 的虚部大于 0 时,微环谐振腔支持横磁模式^[4,17,20-22]。

图 6 所示是石墨烯表面等离子激元波导的电场和磁场分布图。从图 6 可知,石墨烯表面等离子激元波导处于单模工作状态,且该模式为对称边缘模

式^[18]。当石墨烯化学势为 0.677 eV 和 0.95 eV 时,等效模式折射率分别为 $56.058 + 0.26007i$ 和 $45.073 + 0.21478i$ 。

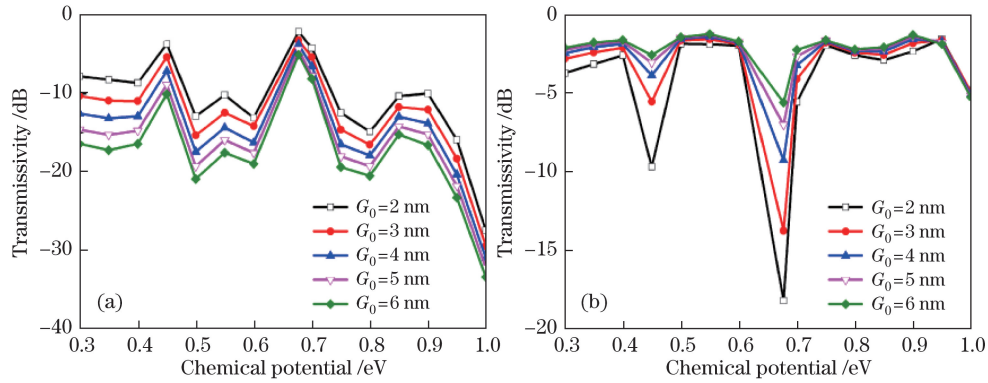


图 3 当频率为 30 THz,耦合间距为 2~6 nm 时,上下话路型微环谐振器的输出响应随石墨烯化学势的变化。(a)直通端;(b)下载端

Fig. 3 (a) Output response of add-drop-channel micro-ring resonators versus chemical potential of graphene when coupling gap is 2-6 nm and frequency is 30 THz. (a) Through-port; (b) drop-port

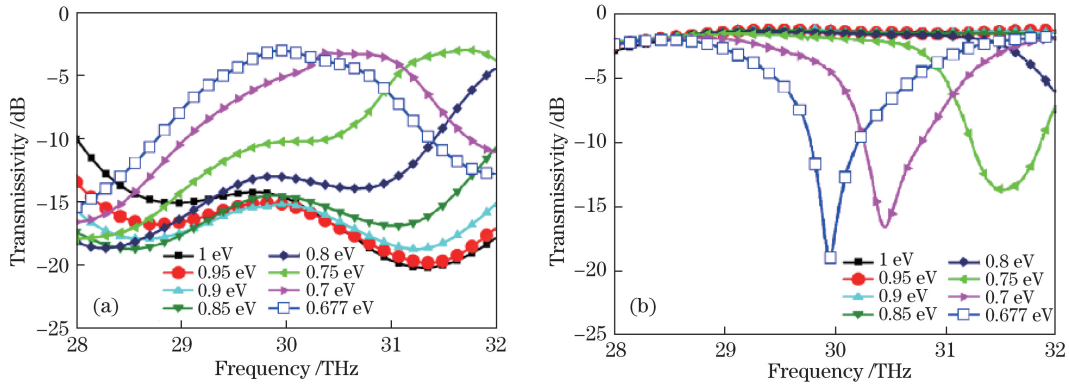


图 4 当耦合间距为 2 nm 时,上下话路型微环谐振器的传输随频率的变化。(a)直通端;(b)下载端

Fig. 4 Transmission of add-drop-channel micro-ring resonators versus frequency when coupling gap is 2 nm. (a) Through-port; (b) drop-port

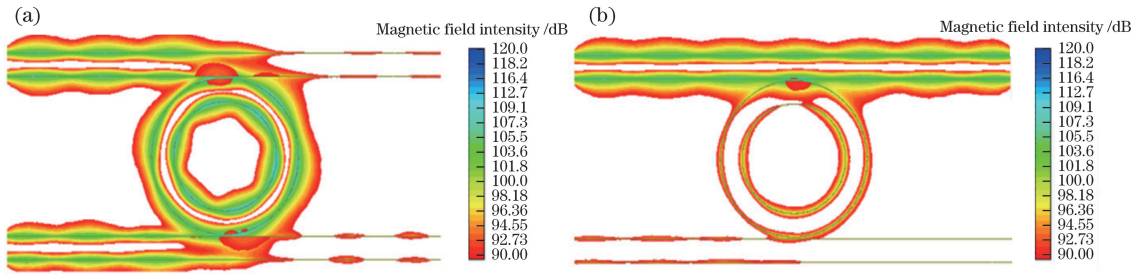


图 5 不同微环谐振器石墨烯化学势时,上下话路型微环谐振器在频率 30 THz 处的磁场强度分布。(a) 0.677 eV; (b) 0.95 eV

Fig. 5 Magnetic field intensity distributions of add-drop-channel micro-ring resonators at frequency of 30 THz under different chemical potentials of graphene. (a) 0.677 eV; (b) 0.95 eV

在上述上下话路型微环谐振器优化基础上,对所设计的基于石墨烯表面等离子激元波导的 XNOR/XOR 逻辑门进行传输特性仿真分析,结果如图 7、8 所示。从图 7(a)可以发现,当上下话路型

微环谐振器 MMR 1 和 MMR 2 中的石墨烯化学势分别为 $\mu_{c1} = 0.677$ eV 和 $\mu_{c2} = 0.677$ eV 时,MMR 1 和 MMR 2 处于开启状态,即逻辑操作数为‘0’和‘0’,XNOR 端口输出光信号,逻辑结果为‘1’,XOR

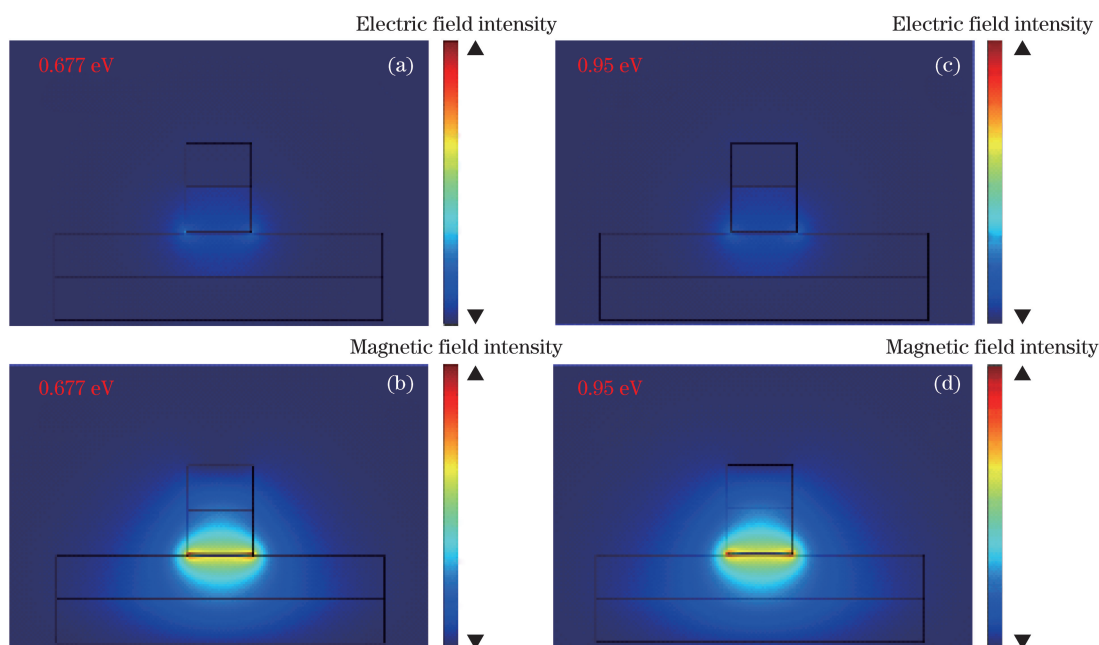


图 6 当石墨烯化学势分别为 0.677 eV 和 0.95 eV 时,石墨烯表面等离子激元波导在频率 30 THz 处的场强度分布。
(a)(c)电场; (b)(d)磁场

Fig. 6 Field intensity distributions of graphene-based plasmonic waveguide at frequency of 30 THz when chemical potential of graphene is 0.677 eV and 0.95 eV, respectively. (a) (c) Electric field; (b) (d) magnetic field

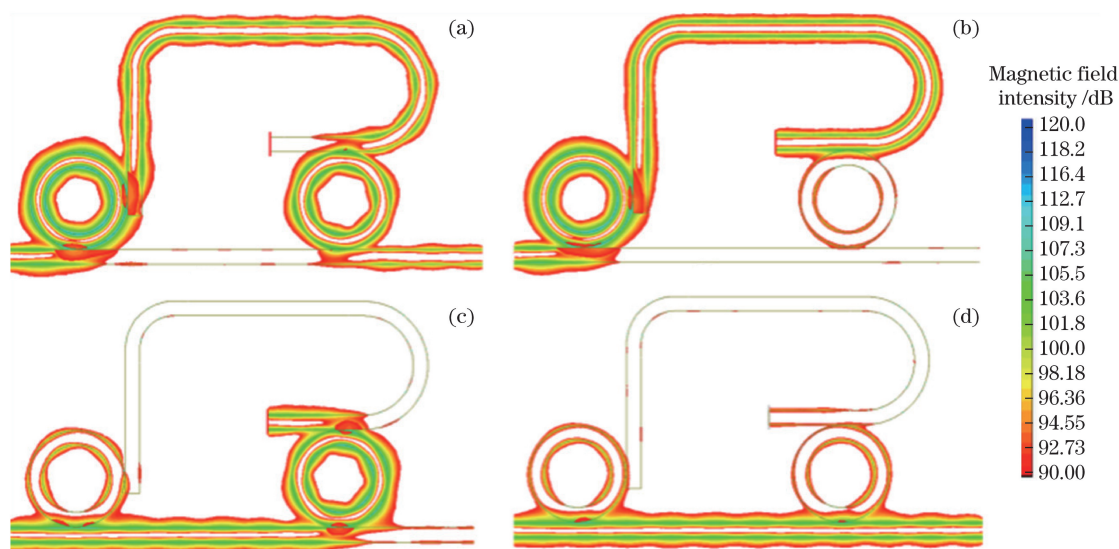


图 7 当 MRR 1 和 MRR 2 取不同逻辑操作数时,基于石墨烯表面等离子激元波导的 XNOR/XOR 逻辑门在频率 30 THz 处的磁场强度分布。(a) 00; (b) 01; (c) 10; (d) 11

Fig. 7 Magnetic field intensity distributions of XNOR/XOR logic gates of graphene-based plasmonic waveguide at frequency of 30 THz under different input logic states of MRR 1 and MRR 2. (a) 00; (b) 01; (c) 10; (d) 11

端口得到逻辑结果‘0’。结合图 8(a)可知,逻辑结果为‘1’时,XNOR 端口输出为-6.86 dB,而逻辑结果为‘0’时,XOR 端口输出为-24.92 dB,此时,串扰达到-18.06 dB。当上下话路型微环谐振器 MMR 1 和 MMR 2 谐振腔中石墨烯的化学势分别为 $\mu_{c1}=0.677$ eV 和 $\mu_{c2}=0.95$ eV 时,MMR 1 处于开启状态而 MMR 2 处于关闭状态,即逻辑操作数

为‘0’和‘1’;由图 7(b)可以看到,XNOR 端口获得逻辑结果‘0’,XOR 端口输出光信号,即逻辑结果为‘1’。结合图 8(b)可知,逻辑结果为‘1’时,XOR 端口输出-4.69 dB,而逻辑结果为‘0’时,XNOR 端口输出-18.59 dB,此时,串扰达到-13.90 dB。当 MMR 1 和 MMR 2 谐振腔中石墨烯的化学势分别为 $\mu_{c1}=0.95$ eV 和 $\mu_{c2}=0.677$ eV 时,MMR 1 处于

关闭状态而 MMR 2 处于开启状态,即逻辑操作数为‘1’和‘0’;由图 7(c)可知,XNOR 端口的逻辑结果为‘0’,XOR 端口输出光信号,即逻辑结果为‘1’。同时,通过图 8(c)可知,逻辑结果为‘1’时,XOR 端口输出 -2.93 dB,而逻辑结果为‘0’时,XNOR 端口输出 -14.92 dB,此时,串扰达到 -11.99 dB。当 MMR 1 和 MMR 2 谐振腔中石墨烯的化学势分别

为 $\mu_{c1}=0.95$ eV 和 $\mu_{c2}=0.95$ eV 时,MMR 1 和 MMR 2 均处于关闭状态,即逻辑操作数为‘1’和‘1’;由图 7(d)可知,XNOR 端口输出光信号,即逻辑结果为‘1’,XOR 端口的逻辑结果为‘0’。结合图 8(d)可知,逻辑结果为‘1’时,XNOR 端口输出 -2.13 dB,而逻辑结果为‘0’时,XOR 端口输出 -12.73 dB,此时,串扰达到 -10.60 dB。

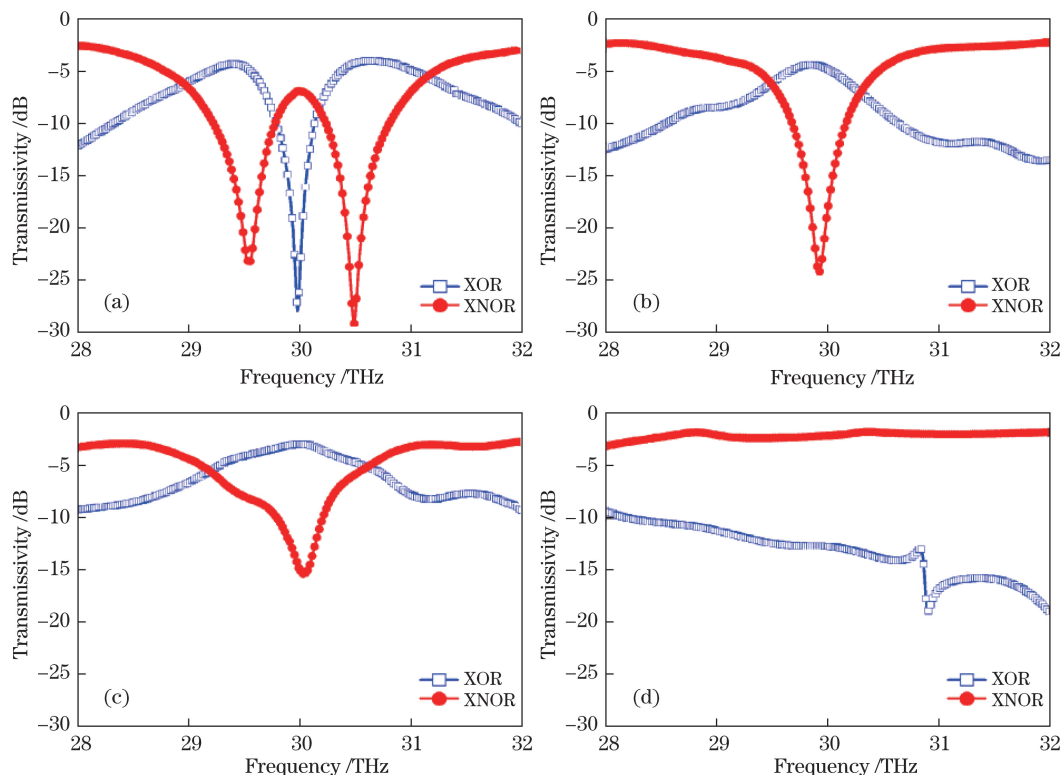


图 8 当 MMR 1 和 MMR 2 取不同逻辑操作数对时,基于石墨烯表面等离子元波导的 XNOR/XOR 逻辑门的输出谱。

(a) 00; (b) 01; (c) 10; (d) 11

Fig. 8 Transmission spectra of XNOR/XOR logic gates of graphene-based plasmonic waveguide under different input logic states of MMR 1 and MMR 2. (a) 00; (b) 01; (c) 10; (d) 11

4 结 论

提出了一种基于石墨烯表面等离子激元波导的 XNOR/XOR 逻辑门,并利用 COMSOL 协同 CST 软件对该 XNOR/XOR 逻辑门进行了仿真分析。结果表明:通过切换微环谐振腔中石墨烯的化学势,可实现石墨烯表面等离子激元传输状态的开启与关闭。当工作频率为 30 THz,石墨烯化学势为 0.677 eV 和 0.95 eV 时,调节微环谐振腔中的石墨烯化学势,基于石墨烯表面等离子激元波导的上下话路型微环谐振器下载端和直通端的消光比分别为 12.24 dB 和 15.87 dB。而在不同的逻辑操作数作用下,采用该微环谐振器为基本单元的 XNOR/XOR 逻辑门的最差串扰为 -10.60 dB,最优串扰可达 -18.06 dB。

上述结果为基于石墨烯表面等离子激元波导的光逻辑器件的优化设计提供了一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- [2] Wang F, Zhang Y, Tian C, *et al.* Gate-variable optical transitions in graphene[J]. Science, 2008, 320(5873): 206-209.
- [3] Gan C H, Chu H S, Li E P. Synthesis of highly confined surface plasmon modes with doped graphene sheets in the midinfrared and terahertz frequencies[J]. Physical Review B, 2012, 85(12): 125431.
- [4] Jablan M, Buljan H, Soljačić M. Plasmonics in graphene at infrared frequencies[J]. Physical Review

- B, 2009, 80(24): 245435.
- [5] Lu W B, Zhu W, Xu H J, *et al.* Flexible transformation plasmonics using graphene[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10475-10482.
- [6] Grigorenko A N, Polini M, Novoselov K S. Graphene plasmonics[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(11): 749-758.
- [7] Yan H, Low T, Zhu W, *et al.* Damping pathways of mid-infrared plasmons in graphene nanostructures[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 394-399.
- [8] Woessner A, Lundberg M B, Gao Y, *et al.* Highly confined low-loss plasmons in graphene-boron nitride heterostructures[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(4): 421-425.
- [9] Li Y, Zhang H F, Fan T X, *et al.* Theoretical analysis of double dielectric loaded graphene surface plasmon polariton[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0724001.
李勇,张惠芳,范天馨,等. 双介质加载石墨烯表面等离子激元波导的理论分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0724001.
- [10] Bahadori-Haghighi S, Ghayour R, Sheikhi M H. Three-dimensional analysis of an ultrashort optical cross-bar switch based on a graphene plasmonic coupler[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(11): 2211-2217.
- [11] Menendez G A, Maes B. Frequency comb generation using plasmonic resonances in a time-dependent graphene ribbon array[J]. *Physical Review B*, 2017, 95(14): 144307.
- [12] Kim M, Kang P, Leem J, *et al.* A stretchable crumpled graphene photodetector with plasmonically enhanced photoresponsivity[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(12): 4058-4065.
- [13] Ooi K J A, Chu H S, Bai P, *et al.* Electro-optical graphene plasmonic logic gates[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1629-1632.
- [14] Yarahmadi M, Moravvej-Farshi M K, Yousefi L. Subwavelength graphene-based plasmonic THz switches and logic gates[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(5): 725-731.
- [15] Tian Y, Zhao Y, Chen W, *et al.* Electro-optic directed XOR logic circuits based on parallel-cascaded micro-ring resonators[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26342-26355.
- [16] Tian Y, Zhang L, Ji R, *et al.* Proof of concept of directed OR/NOR and AND/NAND logic circuit consisting of two parallel microring resonators[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1650-1652.
- [17] Hanson G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(6): 064302.
- [18] He S, Zhang X, He Y. Graphene nano-ribbon waveguides of record-small mode area and ultra-high effective refractive indices for future VLSI[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30664-30673.
- [19] Hu J, Lu W, Wang J. Highly confined and tunable plasmonic waveguide ring resonator based on graphene nanoribbons[J]. *Europhysics Letters*, 2014, 106(4): 48002.
- [20] Mikhailov S A, Ziegler K. New electromagnetic mode in graphene[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(1): 016803.
- [21] Hwang E H, Sarma S D. Dielectric function, screening, and plasmons in two-dimensional graphene[J]. *Physical Review B*, 2007, 75(20): 205418.
- [22] Vakil A, Engheta N. Transformation optics using graphene[J]. *Science*, 2011, 332(6035): 1291-1294.