

基于偏置纳米线的石墨烯表面等离激元调制器

孔祥壮¹, 李金花¹, 罗晓曼¹, 姜成凯¹, 韩张华², 马佑桥^{1*}¹南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044;²山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250358

摘要 开发高性能的电光调制器对于构建片上光子回路非常重要。鉴于纳米线结构具备独特的电场横向束缚特点,设计一种基于纳米线的混合表面等离激元波导电光调制器,该调制器由偏置双硅纳米线、双石墨烯层以及置于双石墨烯层之间的银纳米线构成。利用二维时域有限差分算法计算分析结构参数对器件调制性能的影响。模拟结果表明,所设计的调制器在 1550 nm 的工作波长下可以实现较为出色的调制性能,其 3 dB 调制带宽高达 250 GHz,调制深度和功耗分别高于 0.15 dB/ μm 和低于 11.5 fJ/bit,该调制器可为新一代高性能集成电光调制器的开发提供设计思路。

关键词 光学器件; 纳米线; 混合表面等离激元; 石墨烯; 调制器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1923001

Graphene Surface Plasmon Polariton Modulator Based on Biased Nanowires

Kong Xiangzhuang¹, Li Jinhua¹, Luo Xiaoman¹, Jiang Chengkai¹, Han Zhanghua², Ma Youqiao^{1*}

¹*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;*

²*School of Physics and Electronic Science, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250358, China*

Abstract It is very important to develop high performance electro-optic modulator to construct on-chip photonic circuits. A novel surface isoplasmon waveguide electro-optic modulator based on graphene mixing is designed, which consists of bias-silicon nanowires, double graphene layers, and silver nanowires placed between the two graphene layers. A two-dimensional finite-difference time-domain algorithm is used to calculate and analyze the influence of structural parameters on the modulation performance of the device. The simulation results show that the designed modulator can achieve excellent modulation performance at the operating wavelength of 1550 nm, and its 3 dB modulation bandwidth is as high as 250 GHz. The modulation depth and power consumption are higher than 0.15 dB/ μm and lower than 11.5 fJ/bit, respectively. This modulator can provide design ideas for the development of a new generation of high-performance integrated electro-optic modulators.

Key words optical devices; nanowires; hybrid surface plasmon polariton; graphene; modulators

OCIS codes 230.3120; 240.6680; 250.4110

1 引言

表面等离激元 (Surface Plasmon Polariton,

SPP) 是电磁波与金属表面自由电子集体振荡耦合产生的一种新型电磁模式,其电磁场能量被束缚在金属表面的深亚波长尺度范围内,且场强在垂直于

收稿日期: 2021-03-11; 修回日期: 2021-04-06; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(11605090)、江苏自然科学基金(BK20191396)、南京信息工程大学人才启动基金(1521132101009)

通信作者: *mayouqiao188@hotmail.com

金属-介质界面的方向上呈指数衰减^[1-2]。由于 SPP 能够突破传统的光学衍射极限^[3],并且具备很强的局域场增强效应,因此,利用 SPP 技术可以在纳米尺度下对光子进行调控与处理,为发展新一代高度集成的纳米器件和回路提供了技术可能性^[4]。然而,由于金属存在欧姆热效应,因此,SPP 波能够传输的距离非常短(约几十至几百微米),而且更为苛刻的是,随着 SPP 波模式的进一步局域化,其电磁能量将高度集中于金属表面附近,所以 SPP 波的模式损耗也将进一步增大。也就是说,SPP 波的模式损耗和模式面积之间存在一种相互制约的关系。所熟知的金属材料,如金、银、铝和铂等目前均被广泛应用于 SPP 光子器件中^[5-7]。但是,这些波导器件始终无法避免欧姆损耗所引起的传输衰减^[8]。为了解决 SPP 的高损耗技术难题,同时有效平衡其与 SPP 模式面积之间的制约关系,近年来研究者们提出了多种解决方案。首先通过寻找新的 SPP 激发材料,比如半导体、超导体或石墨烯,然后通过掺杂和外界激励等手段来调控材料的介电常数,从而降低 SPP 波的模式损耗^[9-11]。又如在 SPP 波导结构中引入增益材料,通过能量转移交换等方式来补偿 SPP 模式的传输损耗^[12-14]。除了从材料自身研究出发,科学家还通过优化 SPP 波导(SPPW)结构来有效调控 SPP 的模场分布,通过优化电磁能量在金属表面的分布特性来达到降低模式损耗的目的,例如纳米线波导、脊状波导或楔形波导等^[15-17]。基于这些新型 SPP 波导结构,研究者已经从理论和实验上论证并制备了各种 SPP 纳米光子器件,例如激光器、传感器、滤波器和调制器等^[18-22]。

发展高性能的电光调制器对于光电子集成、未来光通信以及光信息处理至关重要。传统的光调制器大都利用晶体的电光效应,通过改变材料的折射率来实现对激光强度、频率、相位和偏振等多方面的调制。然而,普通材料的非线性效果较弱,因此要实现较强的非线性效应,需要较厚的非线性晶体,但这会导致器件尺寸较大,难以整合至片上应用^[23]。石墨烯的出现有效解决了这一问题,进一步推动了集成 SPP 光电调制器的快速发展。石墨烯是六方晶格中的单层碳原子,具备出色的光电特性,例如在室温下具有极高的电子迁移率和超带宽的光学响应,由此引起了人们广泛的兴趣^[24-26]。同时,石墨烯的面内介电常数可通过改变化学势来调节,也就是说,研究人员可以通过施加驱动电压来调节石墨烯的化学势,从而有效调节波导光场的分布^[27]。可以说石

墨烯在电光调制领域的应用前景非常广阔,尤其是基于 SPP 的石墨烯光电调制器,不仅结合了石墨烯和 SPP 各自的优点,用来增强石墨烯与电场之间的相互作用,而且能够提供较高的调制深度和较小的占位面积^[28-30]。例如,近年来 Fan 等^[28]提出并分析了基于双条纹氮化硅波导的石墨烯电吸收光调制器,通过在双条纹氮化硅波导中嵌入 4 个石墨烯层和石墨烯层的共电极设计,可以获得约为 $0.16 \text{ dB}/\mu\text{m}$ 的调制深度。Lu 等^[29]设计了一种特别结构来区分 TM (Transverse Magnetic) 和 TE (Transverse Electric) 两种模式,并通过调整脊宽和低折射率层的高度来优化其性能,最终获得 $0.24 \text{ dB}/\mu\text{m}$ 的调制深度。Chen 等^[30]提出了对宽带偏振不敏感的石墨烯调制器,TE (TM) 模式下的调制深度为 $0.474 \text{ dB}/\mu\text{m}$ ($0.462 \text{ dB}/\mu\text{m}$)。尽管近年来已经提出了各种基于石墨烯的电光调制器,但是寻求新的方案以优化调制性能仍然十分重要。

鉴于纳米线结构具备独特的电场横向束缚特点,本文提出一种基于纳米线的混合 SPP 石墨烯波导调制器,该调制器由两根硅纳米线和置于它们中间的银纳米线构成,在银和硅纳米线之间分别引入上下两层石墨烯层。通过设计硅纳米线的直径,可以有效控制波导模式的混合特性,从而将电场高度限制于硅纳米线之间的齿槽区域,同时,银纳米线的引入改变了电场调制模式,充分利用了亚波长混合 SPP 波导局域光模场的突出优势。进一步改变银和硅纳米线的间距以及它们之间位置的相对偏置,可以明显增强平行于石墨烯表面的电场分量,调控 SPP 模场与石墨烯之间的相互作用面积和强度,可以提高石墨烯对 SPP 模式的调制性能。通过优化结构参数,发现所提的调制器在 1550 nm 波长下能够实现 $0.15 \text{ dB}/\mu\text{m}$ 的调制深度,并且拥有出色的调制带宽(大于 250 GHz)和相对较低的功耗(小于 11.5 fJ/bit)。

2 结构和理论模型

图 1(a)和图 1(b)分别为所设计的宽带波导调制器的结构和截面,其中上下两根 Si 纳米线的半径分别为 R_1 和 R_2 ,石墨烯之间的间距为 d ,上(下)Si 纳米线和上(下)石墨烯层之间的间距设置为 d_1 (d_2),上(下)Si 纳米线与银纳米线之间的水平偏置距离为 L_1 (L_2)。该调制器由二氧化硅(SiO_2)包裹着的双圆形硅(Si)纳米线、双层石墨烯以及石墨烯之间的银(Ag)纳米线组成。在这项研究中,将选取

通信波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 来研究调制器的调制特性。在该波长下,材料 Si、SiO₂ 和 Ag 的折射率分别为 3.47、1.53 和 $0.14 + 11.37i$,整个波导的长度设为 $L = 3 \mu\text{m}$ 。为了更清晰地解释结构的几何特征,图 1(b)为调制器的二维横截面图。同时,考虑到实际制备工艺,银纳米线的半径选取为 $R = 3 \text{ nm}$ 。在 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、 $d = 2R = 6 \text{ nm}$ 、 $R_1 = 65 \text{ nm}$ 、 $R_2 = 120 \text{ nm}$ 、 $d_1 = d_2 = 1 \text{ nm}$ 、 $L_1 = L_2 = 90 \text{ nm}$ 的情况下,归一化的电场分布如图 1(c)所示。由于金属表面具备高度局域场,SPP 模场被紧紧地束缚在银和硅纳米线之间,这意味着石墨烯离银纳米线越近,电光调制性能越好。鉴于此,在下面的讨论中,石墨烯与 Ag 纳米线之间的间距将设置为 0,即 $d = 2R = 6 \text{ nm}$ 。

在本文的研究中,采用时域有限差分 (FDTD) 算法来计算并分析电光调制性能。在仿真过程中,石墨烯的材料特性通过表面电导率 σ_g 来描述,由电子的带间和带内跃迁构成,具体表达式为^[31]

$$\sigma_g = \sigma_{\text{inter}} + \sigma_{\text{intra}} = \frac{2ie^2 T k_B}{\hbar^2 \pi (\omega + i/\tau)} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{\mu_c}{2T k_B} \right) \right] + \left\{ \frac{e^2}{4\hbar} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{\hbar\omega - 2\mu_c}{2T k_B} \right) - \frac{i}{2\pi} \ln \left[\frac{(\hbar\omega + 2\mu_c)^2}{(\hbar\omega - 2\mu_c)^2 + (2T k_B)^2} \right] \right\} \right\}, \quad (1)$$

式中: σ_{inter} 表示带间电导率; σ_{intra} 表示带内电导率; e 表示电子电荷量; T 表示温度; k_B 表示玻尔兹曼常数; ω 表示角频率; \hbar 表示约化普朗克常数; μ_c 表示石墨烯材料的化学势; τ 表示带间弛豫时间 ($\tau = 0.1 \text{ ps}$)。根据复表面电导率与复介电常数 ϵ_g 的关系,可以得到^[31]

$$\epsilon_g = 1 + \frac{i\sigma_g}{\omega\epsilon_0 d_g}, \quad (2)$$

式中: ϵ_0 和 d_g 分别表示真空介电常数和石墨烯层的厚度。图 2 为室温条件 ($T = 300 \text{ K}$) 下,当波长为 1550 nm 时,石墨烯的介电常数与化学势 μ_c 之间的依赖关系,其中 $\text{Im}(\epsilon_g)$ 表示 ϵ_g 的虚部, $\text{Re}(\epsilon_g)$ 表示 ϵ_g 的实部, $\text{Abs}(\epsilon_g)$ 表示 ϵ_g 的绝对值。从图 2 可以看到,石墨烯的介电常数强烈依赖于其自身化学势的大小,尤其是当化学势从 0.3 eV 增加至 0.5 eV 时,介电常数的虚部发生急剧变化,因此可以通过调节 μ_c 值来实现对模式损耗的调节,从而实现对 SPP 波导开关的调制。

3 结果和讨论

首先研究石墨烯的化学势以及工作波长对波导

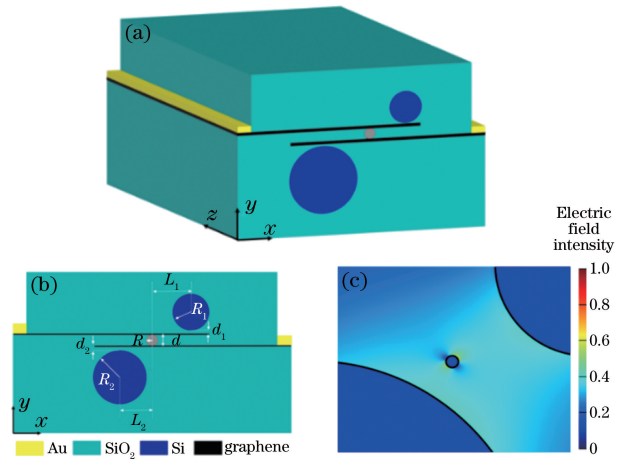


图 1 宽带波导调制器。(a)三维结构;(b)在 x - y 平面内的横截面结构;(c)归一化电场分布示意图

Fig. 1 Wideband waveguide modulator. (a) Three-dimensional structure; (b) cross-sectional structure in x - y plane; (c) schematic of normalized electric field distribution

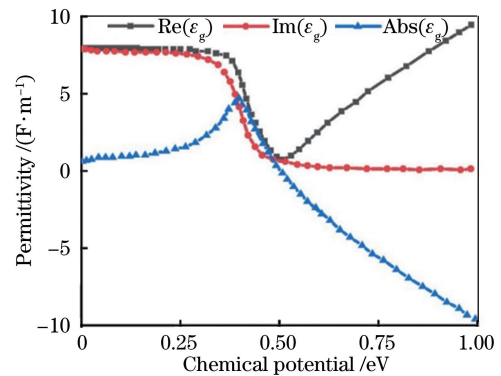


图 2 室温条件下石墨烯的介电常数与化学势的关系
Fig. 2 Relationship between permittivity and chemical potential of graphene at room temperature

模式损耗的调制关系。设定波导结构参数 $R_1 = 65 \text{ nm}$ 、 $R_2 = 120 \text{ nm}$ 、 $d_1 = d_2 = 1 \text{ nm}$ 、 $L_1 = L_2 = 0$ 和 $R = 3 \text{ nm}$,不同工作波长 λ 下 (λ 分别为 $1400, 1550, 1800 \text{ nm}$) 模式损耗 α 与化学势 μ_c 的关系如图 3 所示,其中模式损耗 $\alpha = 40\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})/\lambda \ln 10$,式中 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 代表模式有效折射率 n_{eff} 的虚部。从图 3 可以看到,模式损耗随着工作波长的增大而减小,这是由于波导模式在两根 Si 纳米线之间齿槽区域的束

束缚能力随着波长的增加而减弱,从而造成波导模式与石墨烯的相互作用面积减小。另外,随着 μ_c 值的增加,不同波长下的模式损耗呈现出相似的变化趋势,如当 μ_c 值从 0.3 eV 增加至 0.5 eV 时,模式损耗急剧下降,而当 $\mu_c < 0.3$ eV 或 $\mu_c > 0.5$ eV 时,模式损耗的变化则趋于平坦。这是因为模式损耗与材料的吸收特性密切相关,因此,模式损耗表现出了与石墨烯的介电常数虚部一致的变化趋势(如图 2 所示)。为了更好地描述调制状态,将调制器在 $\mu_c = 0.3$ eV 和 $\mu_c = 0.5$ eV 情况下的工作状态分别定义为“关”和“开”,由此调制深度(MD)就是调制器从“关闭”到“开启”的模式损耗之间的差异,即

$D_{MD} = \alpha_{off} - \alpha_{on}$, 其中 α_{off} 和 α_{on} 分别表示“关”和“开”状态下调制器的模式损耗。图 3(b)为调制器在 $\mu_c = 0.3$ eV 和 $\mu_c = 0.5$ eV 的情况下,模式损耗 α 以及调制深度 MD 对工作波长(1300 nm 至 1800 nm)的依赖关系。从图 3(b)可以看到,模式损耗随着波长的增加呈现出明显的下降趋势,而调制深度先增加后减小,当 $\lambda = 1400$ nm 时,调制深度取得最大值,即 $D_{MD} = 0.18$ dB/ μm 。从图 3(b)可以看到,在 1300~1800 nm 的工作波长下,所提的调制器能够实现大于 0.1 dB/ μm 的光调制深度,具备较好的宽带工作特性。

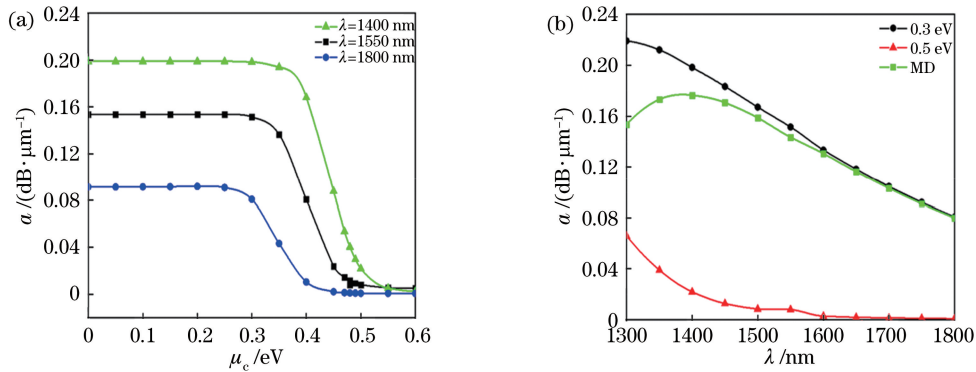


图 3 模式损耗与不同参数的关系。(a)化学势;(b)波长

Fig. 3 Relationship between mode loss and different parameters. (a) Chemical potential; (b) wavelength

接下来,研究调制器的结构参数对调制性能的影响。图 4 为硅纳米线和相邻石墨烯的间距 d_1 和 d_2 对调制深度 MD 的影响,其中 $R_1 = 65$ nm, $R_2 = 120$ nm, $d = 2R = 6$ nm, $L_1 = L_2 = 0$ nm, $\lambda = 1550$ nm, E 为归一化电场强度。从图 4 可以看到,当 $d_1 = d_2$ 时,硅纳米线对称分布于银纳米线上下两侧;当 d_1 从 0 变至 1 nm 时,调制深度有一个极小的增加;当 $d_1 > 1$ nm 时,调制深度则不断减小。为了更直观地解释这种物理现象,图 4 插图 I 为相关的模式电场分布。从图 4 插图 I 可以看到,当硅纳米线和银纳米线的间距为零($d_1 = 0$)时,电场被高度束缚在银纳米线上下边缘处且环绕银纳米线分布,也就是说,平行于石墨烯表面的电场强度相对减弱;当 $d_1 = d_2 = 1$ nm 时,硅纳米线和银纳米线之间出现齿槽效应,并且由于齿槽区域边界的弧形特征,平行于石墨烯表面的电场强度相对增强(如图 4 插图 II 所示);而当 d_1 值进一步变大时,虽然齿槽区域具备更明显的弧形边界,但由于电磁束缚能力以及齿槽效应的减弱(如图 4 插图 III 所示),石墨烯与电场的相互作用变弱。对于 $d_1 \neq d_2$ 的情况,令

$d_2 = 1$ nm, d_1 在 1~10 nm 之间变化,可以看出随着 d_1 值的不断增大,调制深度也不断减小,然而调制深度始终大于 $d_1 = d_2$ 的情况,这是由底部较强的齿槽效应带来的有益调制增强(如图 4 插图 IV 所示)。模拟计算结果说明所设计的调制器结构降低了对上下石墨烯与银纳米线之间间距的严格要求,更有利于器件的实验制备。

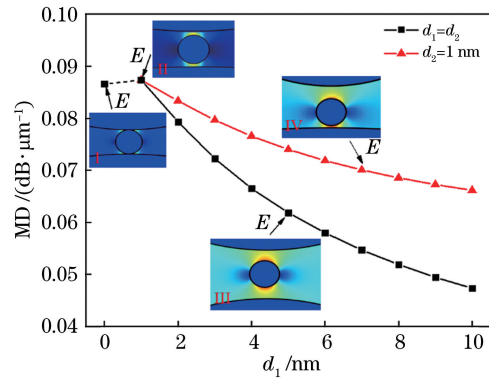


图 4 纳米线和相邻石墨烯之间间距对调制深度的影响

Fig. 4 Effect of gap between nanowires and adjacent graphenes on modulation depth

图 5 为硅纳米线的半径对调制深度 MD 的影

响,其中 $d_1=d_2=1\text{ nm}$, $d=2R=6\text{ nm}$, $L_1=L_2=0$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 。从图 5 可以看到,当 $R_1=R_2$ 时,随着 R_1 值的不断增大,调制深度先迅速增加后迅速减小,在 $R_1=120\text{ nm}$ 处,调制深度取得最大值。导致这种变化的原因:当 $R_1<120\text{ nm}$ 时,硅纳米线半径的增大提高了电磁在齿槽区域的能量分布,电场逐渐向银纳米线两侧发散,这有利于增加石墨烯与电场之间的相互作用,从而引起调制深度的迅速增加。而当 R_1 进一步增加 ($R_1>120\text{ nm}$) 时,硅纳米线的尺寸明显大于银纳米线,此时硅纳米线的介质波导效应慢慢增强,也就是说,一部分电磁场将逐渐分布于硅纳米线,相应地减弱了其于石墨烯的相互作用。接着,讨论 $R_1\neq R_2$ 的情况,在此固定下侧硅纳米线的半径,即 $R_2=120\text{ nm}$ 。从图 5 可以看到,调制深度的变化趋势和 $R_1=R_2$ 的情况不完全一样。当 R_1 值很小时,大部分光依然会被束缚于银纳米线和下侧硅纳米线之间,因此,不会出现趋于零的情况。当 R_1 值增加至 65 nm 时,银纳米线和上侧硅纳米线之间的齿槽效应增强,因此调制深度 MD 会缓慢增大。当继续增大 R_1 至其等于 R_2 时,结构在整体上趋于对称,光场逐渐均匀分布于齿槽区域,调制深度 MD 缓慢减小。当进一步增大 R_1 值时,调制深度 MD 逐渐减小,这是由硅纳米线的波导效应导致光与石墨烯的相互作用变弱。因此,综合 $R_1=R_2$ 和 $R_1\neq R_2$ 两种情况下的分析结果,在下面的讨论中,选择 $R_1=65\text{ nm}$ 和 $R_2=120\text{ nm}$ 为最佳的半径参数。

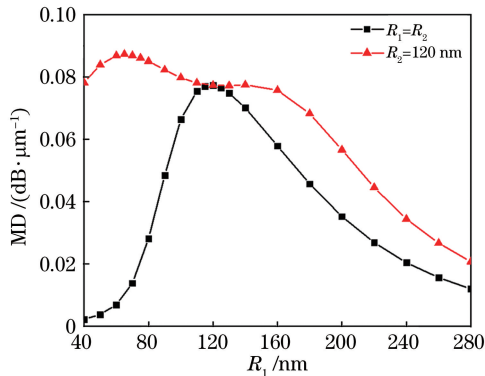


图 5 硅纳米线的半径与调制深度的关系

Fig. 5 Relationship between radius of silicon nanowire and modulation depth

影响调制性能的另一重要结构参数是上下硅纳米线与银纳米线之间的水平偏移 L_1 和 L_2 ,这是因为水平偏移会直接改变电场模式的分布特征。在这里首先讨论同步偏移的两种情况,即同向偏移

($L_1=L_2$) 和反向偏移 ($L_1=-L_2$),偏移与调制深度的关系如图 6 所示,其中 $d=2R=6\text{ nm}$, $d_1=d_2=1\text{ nm}$, $R_1=65\text{ nm}$, $R_2=120\text{ nm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 。对于同向偏移而言,随着偏移距离的增大,银纳米线慢慢地远离齿槽区域,而电场主要分布于硅纳米线之间的齿槽区域,所以激发的局域 SPP 效应减弱,然而齿槽区域内的电场分量大都与石墨烯表面垂直,因此调制性能逐渐降低,如图 6 插图 I 所示。相反,对于反向偏移而言,随着偏移距离的增大,硅纳米线之间的电磁场偏振方向逐渐趋于水平,而且银纳米线的局域 SPP 效应也得到增强,因此,相对于未偏移或同向偏移的情况,反向偏移会导致平行石墨烯表面的电场分量变大,从而引起调制深度 MD 随之增大,如图 6 插图 II 所示。当然,为了实现电磁局域的齿槽效应,硅纳米线反向偏移的距离也不能太大。接着,讨论固定下面的硅纳米线 ($L_2=90\text{ nm}$),反向偏置情况下硅纳米线的电场分量的整体变化趋势基本和反向偏移 ($L_1=-L_2$) 的变化趋势一致,如图 6 所示。因此,由上述讨论结果可知,当硅纳米线反向偏移且偏移大小为 90 nm 时,调制深度 MD 取最大值 ($D_{MD,max}\approx 0.15\text{ dB}/\mu\text{m}$)。

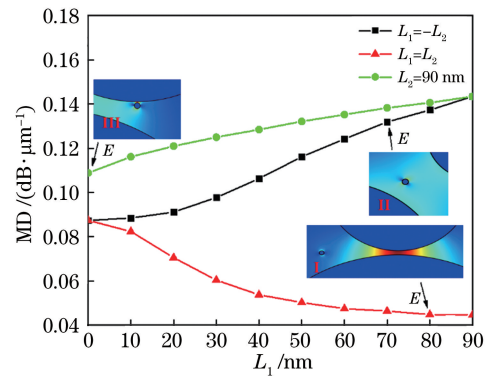


图 6 硅纳米线的水平偏移与调制深度的关系

Fig. 6 Relationship between horizontal offset of silicon nanowire and modulation depth

最后,为了表征所提调制器的整体性能,引入以下两个重要的性能评估参数,即 3 dB 调制带宽 (f_{3dB}) 和每单位比特功耗 (E_{bit})。其中, f_{3dB} 可以表示为^[32]

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi R_{total} C}, \quad (3)$$

式中: R_{total} 为电极与石墨烯之间的接触电阻 R_c 和石墨烯本身电阻 R_G 的和; C 为电容。由于 R_G 值通常情况下很小,可忽略不计,因此 R_{total} 主要由 R_c 决定且可以表示为 $R_{total} = 2R_c/L$, 结合大多实验报道,选取金和石墨烯的接触电阻 $R_c = 150\ \Omega \cdot \mu\text{m}$ ^[32]。

另一方面,双层石墨烯与它们之间的介质构成平行板电容器,其等效电容 $C = (\epsilon_0 \epsilon_r w L) / d$, 其中 w 为平行板电容器的有效正对宽度, ϵ_r 为石墨烯层之间介质的介电常数。在本结构设计中,由于银纳米线的半径很小,所以 ϵ_r 可近似取为二氧化硅的介电常数 ($\epsilon_r = 3.92$)。对于每单位比特功耗而言,其计算表达式为^[32]

$$E_{\text{bit}} = \frac{C(\Delta V)^2}{4}, \quad (4)$$

式中: ΔV 为电压差,表达式为

$$\Delta V = |V_g - V_{\text{Dirac}}| = \frac{\Delta \mu_c^2 de}{\pi \hbar^2 V_F^2 \epsilon_0 \epsilon_r}, \quad (5)$$

式中: V_F 为费米速度 ($V_F = 1.1 \times 10^6$ m/s); V_g 为外界施加电压; V_{Dirac} 为由石墨烯的自然掺杂引起的偏移电压。因此,对于所提调制器,其等效电容 $C = 6.33$ fF, 调制状态从“开”到“关”所需的偏置电压差 $\Delta V = 2.7$ V。根据(3)式和(4)式,计算得出调制带宽和能耗分别为 251 GHz 和 11.5 fJ/bit。将所提调制器的性能与最近几年报道的石墨烯调制器进行比较,比较结果如表 1 所示。从表 1 可以看到,所提调制器具备相对适中的能耗以及较宽的调制带宽,然而其调制深度却相对较小,原因是所提调制器基本接近于全介质结构,金属纳米线在整体结构中所占的区域相对较小。当然,所提调制器的调制性能仍然有可能进一步得到优化,例如通过降低石墨烯层间介质的介电常数,可以有效减少等效电容,从而增加 3 dB 调制带宽并降低功耗。另外,所提调制器在加工制备上也具有可行性,例如整体结构可采用化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 技术从下至上依次沉积实现^[33], 其中硅和银纳米线可分别利用 CVD 和多元醇技术制备^[34-35], 并且可通过原子力或静电力显微镜探针来精确操控它们的位置^[36]。

表 1 所提调制器与最近报道的石墨烯光调制器的性能比较

Table 1 Performance comparison of proposed modulator with recently reported graphene modulators

| Modulator | MD / (dB· μm^{-1}) | $f_{3\text{dB}}$ / (GHz) | E_{bit} / (fJ·bit $^{-1}$) |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---|
| Ref. [28] | 0.1658 | 30.6 | 780.50 |
| Ref. [29] | 0.2400 | 80.0 | 108.00 |
| Ref. [30] | 0.4600 | 101.0 | 271.00 |
| Proposed modulator | 0.1500 | 251.0 | 11.50 |

4 结 论

本文提出了一种混合表面等离激元波导电光调制器,该调制器由硅纳米线、银纳米线以及石墨烯构成,系统地研究了包括衰减损耗、调制深度、3 dB 带宽和功耗在内的调制特性。数值研究表明,由于硅纳米线之间的增强电场齿槽效应以及银纳米线的局域 SPP 效应,优化设计后的调制器在 1550 nm 的工作波长下,最佳调制深度约为 0.15 dB/ μm , 3 dB 带宽高于 250 GHz, 功耗低于 11.5 fJ/bit。同时,所提调制器在 1300~1800 nm 的工作波长下能够实现高于 0.1 dB/ μm 的调制深度。综上所述,所提的石墨烯光电调制器具有良好的调制性能,可以为集成光电调制器件的开发提供一定的理论参考。

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] Zayats A V, Smolyaninov I I, Maradudin A A. Nano-optics of surface plasmon polaritons [J]. *Physics Reports*, 2005, 408(3/4): 131-314.
- [3] Chen J J, Sun C W, Li H Y, et al. Ultra-broadband unidirectional launching of surface plasmon polaritons by a double-slit structure beyond the diffraction limit [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(22): 13487-13493.
- [4] Maier S A. Plasmonics: the promise of highly integrated optical devices [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(6): 1671-1677.
- [5] Chen N, Zhang X D, Chang M, et al. Broadband plasmonic polarization filter based on photonic crystal fiber with dual-ring gold layer [J]. *Micromachines*, 2020, 11(5): 470.
- [6] Liu Q, Ma Z, Wu Q, et al. The biochemical sensor based on liquid-core photonic crystal fiber filled with gold, silver and aluminum [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 130: 106363.
- [7] Jia Y, Li Z F, Wang H Q, et al. Sensitivity enhancement of a surface plasmon resonance sensor with platinum diselenide [J]. *Sensors*, 2019, 20(1): E131.
- [8] Wang Y, Yu J, Mao Y F, et al. Stable, high-performance sodium-based plasmonic devices in the near infrared [J]. *Nature*, 2020, 581(7809): 401-405.
- [9] Epstein I, Chaves A J, Rhodes D A, et al. Highly confined in-plane propagating exciton-polaritons on

- monolayer semiconductors [J]. *2D Materials*, 2020, 7(3): 035031.
- [10] Kalthor S, Ghanaatshoar M, Delfanazari K. Guiding of terahertz photons in superconducting nano-circuits [C]//2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET), August 20-21, 2020, Glasgow, UK. New York: IEEE Press, 2020: 20030975.
- [11] Rufangura P, Folland T G, Agrawal A, et al. Towards low-loss on-chip nanophotonics with coupled graphene and silicon carbide: a review [J]. *Journal of Physics: Materials*, 2020, 3(3): 032005.
- [12] Yang L, Ma L H, Zhong Y H, et al. Simulation design of silicon based quantum well nanolaser based on surface plasmon polariton [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(9): 095002.
- [13] Chubchev E D, Nechepurenko I A, Dorofeenko A V, et al. Nanostructured optical waveguide with a highly confined mode [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37: 2732-2737.
- [14] Lafmejani S R, Khatir M. Miniaturized plasmonic magneto-optic Mach-Zehnder isolator using graphene and optical gain medium [J]. *Optik*, 2021, 228: 166200.
- [15] Hasan K B M R, Islam M A, Alam M S. Design of a broadband single mode hybrid plasmonic waveguide incorporating silicon nanowire [J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(11): 2783-2799.
- [16] Wang Z B, Yin S J, Duan X N, et al. Hybrid surface-plasmon waveguide with symmetrical triangular ribs [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0313001.
王志斌, 尹少杰, 段晓宁, 等. 带有对称三角肋的混合表面等离子体波导 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0313001.
- [17] Huong N T, Hoang C M. Modal characteristics and the tunability of horizontal hybrid gap plasmonic waveguide [J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(2): 27.
- [18] Yang L, Duan Z Y, Ma L H, et al. Surface plasmon polariton nanolasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202409.
杨琳, 段智勇, 马刘红, 等. 表面等离子体纳米激光器综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202409.
- [19] Roy B, Majumder S, Chakraborty R. Design of low loss surface plasmon polariton waveguide and its use as hybrid Tamm sensor with improved sensitivity [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(1): 017108.
- [20] Dong G X, Li X P, Liu Y M, et al. Variable operating frequencies spoof SPP filter based on double-layers structure [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(3): 131-134.
- [21] Shirdel M, Mansouri-Birjandi M A. A broadband graphene modulator based on plasmonic valley-slot waveguide [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 52(1): 36.
- [22] Teng D, Zhao Y Z, Wang Y C, et al. Graphene plasmonic waveguide based on silicon-on-insulator structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0323001.
滕达, 赵永哲, 王云成, 等. 基于硅-绝缘体结构的石墨烯等离激元波导 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0323001.
- [23] Sun D H, Zhang Y W, Wang D Z, et al. Microstructure and domain engineering of lithium niobate crystal films for integrated photonic applications [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 197.
- [24] Wang Y, Li S S, Yang H Y, et al. Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: a review [J]. *RSC Advances*, 2020, 10(26): 15328-15345.
- [25] Olabi A G, Abdelkareem M A, Wilberforce T, et al. Application of graphene in energy storage device: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110026.
- [26] Tiwari S K, Sahoo S, Wang N N, et al. Graphene research and their outputs: status and prospect [J]. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2020, 5(1): 10-29.
- [27] Mao D, Cheng C, Wang F F, et al. Device architectures for low voltage and ultrafast graphene integrated phase modulators [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(2): 20018555.
- [28] Fan M Y, Yang H M, Zheng P F, et al. Multilayer graphene electro-absorption optical modulator based on double-stripe silicon nitride waveguide [J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21619-21629.
- [29] Lu Y, Cai K S, Li Y E, et al. A high speed optical modulator based on graphene-on-graphene hybrid nanophotonic waveguide [J]. *Optik*, 2019, 179: 216-221.
- [30] Chen W, Xu Y, Gao Y, et al. A broadband polarization-insensitive graphene modulator based on dual built-in orthogonal slots plasmonic waveguide [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1897.
- [31] Ma Y Q, Li J H, Han Z H, et al. All-dielectric graphene-induced T-slot waveguide electro-optic modulator with polarization-independent operation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum*

- Electronics, 2021, 27(3): 20316875.
- [32] Ye L F, Sui K H, Zhang Y, et al. Broadband optical waveguide modulators based on strongly coupled hybrid graphene and metal nanoribbons for near-infrared applications[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(7): 3229-3239.
- [33] Gao Y, Zhou G D, Zhao N, et al. High-performance chemical vapor deposited graphene-on-silicon nitride waveguide photodetectors[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1399-1402.
- [34] Wittemann J V, Münchgesang W, Senz S, et al. Silver catalyzed ultrathin silicon nanowires grown by low-temperature chemical-vapor-deposition [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(9): 096105.
- [35] Li J, Li W, Peng J, et al. Progress of silver nanowire prepared by polyol method [J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(2): 11-14.
李津, 李伟, 彭军, 等. 多元醇法制备银纳米线的研究进展[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(2): 11-14.
- [36] Moreno-Moreno M, Ares P, Moreno C, et al. AFM manipulation of gold nanowires to build electrical circuits[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(8): 5459-5468.