



论文

基于三重等离激元诱导透明效应的二进制编码、传感与慢光研究

成昱轩¹, 许辉^{1,2*}, 于鸿飞¹, 王晓静¹, 张小姣¹, 董玉兰¹, 贺龙辉^{1,2}, 侯海良^{1,2}, 陈智全^{1,2}

1. 湖南工商大学微电子与物理学院, 长沙 410205

2. 湘江实验室, 长沙 410205

*联系人, E-mail: xuhui@hutb.edu.cn

收稿日期: 2025-06-24; 接受日期: 2025-09-14; 网络出版日期: 2025-12-19

湘江实验室重点项目(编号: 23XJ02001)、湖南省自然科学基金(编号: 2023JJ40218, 2022JJ30201)、长沙市自然科学基金(编号: kq2202298)和湖南省教育厅资助科研项目(编号: 21B0574, 21B0556)资助

摘要 本文提出了一种基于三重等离激元诱导透明(Plasmonic Induced Transparency, PIT)的多功能器件. 我们利用耦合模理论推导了三重PIT现象的机理, 并使用时域有限差分法进行了仿真验证, 发现两者的结果基本一致. 该器件可通过栅极电压控制实现在29.01和34.74 THz的二进制编码. 最大消光比和调制深度分别达到15.16 dB和96.95%, 最小插入损耗达到0.11 dB. 该器件还具有出色的传感性能, 灵敏度与品质因子分别高达4.21 THz/RIU和112.67. 此外, 当石墨烯的费米级控制在1.00 eV时, 该器件的群折射率可达484.93. 结果表明, 此研究有望为大赫兹编码、传感、慢光、光开关和光存储等潜在应用提供理论基础.

关键词 等离激元诱导透明, 二进制编码, 传感, 慢光, 超材料

PACS: 78.40.-q, 78.66.-w, 42.25.Bs, 42.70.-a

1 引言

超材料是一类不存在于自然界中, 具有超常物理性质的人工复合材料或复合结构^[1-3]. 通过人工设计微观结构单元, 并按照特定规律在一维、二维或三维空间进行排列组合, 可以得到不同性能并具有独特物理特性的超材料^[4,5]. 十多年来, 太赫兹人工超材料因其更宽的频域与其更低的延迟^[6], 已成为研究人员广

泛探讨的主题. 这将成为光信号取代电信号打破物理极限的一个潜在应用方案^[7-9].

光信号相较于电信号拥有更大的带宽, 其频率远高于电信号频率^[10], 并且光信号有更高的并行处理能力, 这使得光学系统能够在更短的时间内完成更多的计算^[11,12]. 在各种光学信号的研究中, 光学表面等离激元(Surface Plasmons, 以下简称等离激元)能够实现亚波长的传输效果, 为光基芯片的发展提供一种可行

引用格式: 成昱轩, 许辉, 于鸿飞, 等. 基于三重等离激元诱导透明效应的二进制编码、传感与慢光研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 224211
Cheng Y, Xu H, Yu H, et al. 2-bit encoding, sensing and slow light based on triple plasmonic induced transparency effect (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 224211, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0276

的思路^[13-15]. 此外, 基于等离激元的光学器件不仅能够降低元件的制造成本, 还能够提供一种监视与控制光的方法.

多年以来, 研究者对表面等离激元^[16-19]的研究一直在持续. 从贵金属到二维材料的等离激元的研究, 等离激元越来越受到研究者青睐. 通过合理设计金属或石墨烯等离激元微纳结构, 可以实现不同辐射特性的明模式和暗模式; 当它们在近场发生耦合时会产生相消干涉, 从而在原本不透明的共振频段内形成一个透明窗口, 即类电磁诱导透明效应(Electromagnetically Induced Transparency, EIT), 也称为等离激元诱导透明效应(Plasmonic Induced Transparency, PIT). 其中, 明暗模式充当了EIT中三能级量子态的作用效果. 相比EIT系统复杂昂贵、难以芯片化集成、工作条件苛刻(低温/真空)等特点^[20,21], PIT系统具有显著优势: 室温稳定工作、结构可定制化设计、易集成、支持电/光动态调控, 故而PIT在超灵敏传感、可调滤波器和慢光器件等领域展现出重要应用价值.

随后, 研究人员发现二维材料石墨烯^[22-24]在表面等离激元中表现出强大的特性. 石墨烯通过简单的方式就能有效激发其表面电子. 虽然贵金属等离激元诱导透明器件在慢光与传感领域表现出一定的潜力, 但受限于其固有特性, 诸多应用存在透明窗口的带宽限制和动态调谐能力的不足^[25]. 此外, 现有的多数PIT器件, 仍面临缺乏多模式耦合的灵活性、应用环境单一等问题^[26]. 而本器件表现的三重等离激元诱导透明效应解决了传统贵金属器件需要改变物理结构调节PIT效应的痛点, 同时拥有多模式耦合的多频段调谐与多功能集成的优点, 解决了灵活性差、应用环境单一等难题. 如今, 研究者通过调节费米能级^[27-29]已实现了多种对表面等离激元的光学器件的应用, 如光学传感^[30,31]、慢光^[32]、光学开关^[33,34]、太赫兹编码^[35]等功能^[36-38].

本文提出的动态可调的太赫兹等离激元器件, 通过两个明模式与两个暗模式的相互耦合, 能够实现三重等离激元诱导透明效应. 目前, 单/双重PIT正在逐步展现出巨大的研究潜力, 但其始终存在透明窗口与带宽的限制^[26], 进而影响其潜在的应用环境. 此外, 在三重等离激元诱导透明的研究中, 多使用复杂的石墨烯图案设计器件^[39]. 而本文提出的三重等离激元诱导透明器件拥有简单的结构设计, 无需复杂的图案化单元,

大大降低了器件制备复杂度. 通过多谐振器协同耦合实现多频段调谐, 所提器件在灵敏度与功能集成上也远超单/双重PIT. 本文基于三重等离激元诱导透明效应提出了一种太赫兹二进制编码器, 将透射谱中的高透射率定义为逻辑“1”, 将诱导透明窗口处的低透射率定义为逻辑“0”, 通过调节费米能级实现29.01和34.74 THz的太赫兹编码, 消光比(Extinction Ratio, ER)与调制深度(Modulation Depth, MD)最大值分别为15.16 dB与96.95%, 插入损耗(Insertion Loss, IL)最小能达到0.11 dB. 本器件同时拥有优秀的传感性能, 其不同环境折射率下透射谱出现红移现象, 传感器的两个重要性能参数灵敏度与品质因子(Figure of Merit, FOM)分别最高能够达到4.21 THz/RIU和112.67. 此外, 本器件也有不俗的慢光性能, 群折射率峰值随着石墨烯费米能级的提高而提高, 当石墨烯费米能级为1.00 eV时, 群折射率峰值达到484.93. 本研究有望为太赫兹编码、传感与慢光领域提供理论上的支持, 也为多功能器件的集成化提供了一种潜在方案.

2 结构设计和理论模型

2.1 石墨烯等离激元诱导透明结构分析

本文所述器件的周期单元如图1所示, 其与不连续的单层结构相比, 连续的石墨烯设计更容易实现对石墨烯费米能级的调节.

在这个周期性单元结构中, 从 z 轴的负方向入射一束平面太赫兹光作为激发光源, 如图1(a)所示. 如图1(b)所示, 本模型为对称结构, 为了后文能够更好地分析不同石墨烯层所产生的明暗模式, 可将石墨烯层自上而下、从左至右依次命名为G-1, G-2, G-3, G-4, G-5, G-6, G-7. 如图1(c)所示, 该器件由多层硅与多层石墨烯层相互覆盖组成, 并加入金属电极放置于石墨烯层边缘以调控石墨烯费米能级. 本文中所有的仿真模拟数据均基于时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)计算, 其中 x 和 y 方向采用周期性边界条件, z 方向设置为完美匹配层. 此外, 在单个周期单元中, y 方向的尺寸远远大于 x 和 z 方向的尺寸, 因此在实际设置中可以将模型设置为二维模式以此减少仿真计算时间.

本器件相较于复杂的图案化石墨烯器件主要采用简单的条带型石墨烯设计, 因此在器件的制备上使用

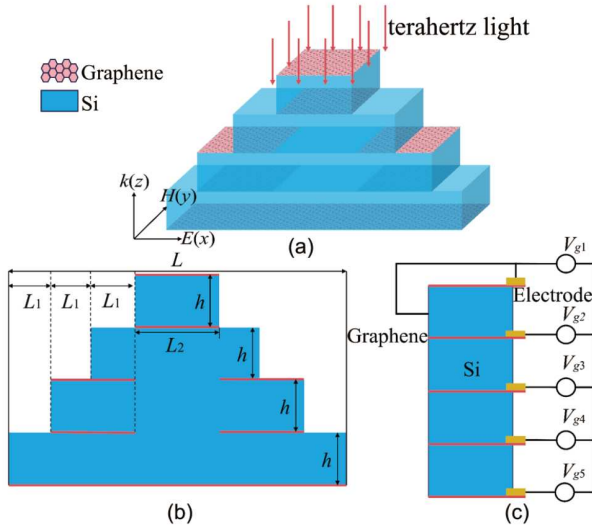


图 1 (网络版彩图) (a) 三重等离子激元诱导透明结构图. (b) 器件周期单元横截面. (c) 器件侧视图与电压调节图. 其中 $L = 160$ nm, $L_2 = 2L_1 = 40$ nm, $h = 25$ nm
Figure 1 (Color online) (a) Structure diagram of triple plasmonic induced transparency. (b) The cross-section of the device periodic unit. (c) Device side view and voltage regulation diagram. Here, $L = 160$ nm, $L_2 = 2L_1 = 40$ nm, $h = 25$ nm.

化学气相沉积法存在较大的优势. 在此提供一种理论可行的器件制备方案: 首先, 单层石墨烯在合适的温度下通过化学气相沉积法在铜箔上合成, 并利用聚甲基丙烯酸甲酯转移到硅基底座上^[40]. 随后, 使用丙酮清除其表面残留的光刻胶, 最后, 将硅精确地沉积在石墨烯上^[41], 以此相同的步骤逐层完成器件的制备. 此外, 如图1(c)所示, 通过离子凝胶连接石墨烯条带特定位置, 再将金属沉积在离子凝胶处用作金属电极, 以此实现对石墨烯费米能级的控制.

2.2 石墨烯光学电导率

本器件中主要由介质硅(介电常数 $\epsilon = 11.69$, 数据源自Palik数据库)^[42]与石墨烯两种材料构成. 其中, 介质硅可以为器件提供稳定的介电基底; 而石墨烯由于独特的二维能带结构, 在实验中能轻易通过电场或者电压实现对其费米能级的精确调节^[43,44], 展现出优异的光电可调性. 目前单层石墨烯的费米能级在实验环境中能够做到0.20–1.20 eV^[45,46]的大范围调节, 因此在本实验中将石墨烯的费米能级合理控制在0.85–1.20 eV之间.

在室温条件下($T = 300$ K), 由于石墨烯单层的费米能级远大于光子能量和热能标度($E_F \gg (\hbar\omega, k_B T)$),

此时其光学响应主要由带内电子-光子散射过程主导, 带间电子跃迁影响可忽略不计. 基于此条件, 体系的光学电导率可通过Kubo公式准确描述^[47]:

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

式中, i 为虚数单位, e 为基本电荷, $\hbar$ 为约化普朗克常数, ω 表示入射光角频率, τ 表示石墨烯弛豫时间($\tau = \mu E_F / (e V_F^2)$, 其中 μ 为载流子迁移率). 此外, 本结构的迁移率设置为 $1 \text{ m}^2/(\text{V s})$.

如图1(c)所示, 电极一端与石墨烯层相连, 另一端与介质硅上的金属电极薄层相连, 此时二者可等效于一个平行板电容器. 间距为 d_c . 当外接电压为 V_g 时, 石墨烯层与介质层之间的电场则可表示为 $E = V_g/d_c$. 在电场的作用下, 石墨烯层上出现电子的积累, 进而改变石墨烯的载流子浓度与费米能级. 此时的外接电压与石墨烯载流子浓度满足以下关系:

$$n_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{Si}} V_g}{d_c e}, \quad (2)$$

式中, ϵ_0 与 ϵ_{Si} 为真空介电常数与介质硅的相对介电常数.

此外, 石墨烯载流子浓度 n_s 与费米能级 E_F 满足以下关系:

$$E_F = \left[\pi (\hbar V_F)^2 n_s - (\pi k_B T)^2 / 3 \right]^{1/2} \approx \hbar V_F \sqrt{\pi n_s}, \quad (3)$$

式中, V_F 为石墨烯费米速度(约为 10^6 m/s).

因此, 根据式(2)和(3)即可求得外接电压与石墨烯费米能级的关系式^[48,49]:

$$E_F = \hbar V_F \left(\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_{\text{Si}} V_g}{d_c e} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

2.3 耦合模理论

为了能够更加深入地研究本器件产生的三重PIT现象, 本文使用耦合模理论(Coupled Mode Theory, CMT)^[50,51]探讨不同模式之间的相互作用对整个系统的影响. 如图2所示, 假设在本模型中产生的三重PIT存在4个等效共振腔, 每个等效共振腔对应一个独立的等离子激元模式(明模式或暗模式), 各模式之间的能量交换用耦合系数表示, A_1, A_2, A_3, A_4 表示4个模式的复振幅.

在耦合模式理论框架下, 定义 S 参数表征各模式的能量传输特性(下标“in”与“out”分别表示入射波与出

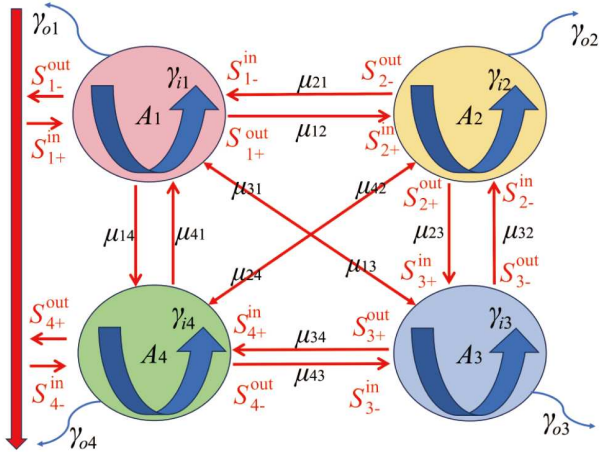


图 2 (网络版彩图)三重等离激元诱导透明的耦合模式理论模型

Figure 2 (Color online) Coupled mode theory model of triple plasmonic induced transparency.

射波, $\pm$ 号指示波的传播方向). 系统损耗包含两部分: γ_{in} 表示第 n 个模式的内部损耗, γ_{on} 描述第 n 个模式的能量辐射损耗, 即外部损耗($n = 1, 2, 3, 4$). 此外, 两个模式间的耦合强度由系数 μ_{nm} 量化, 其中 n 和 m ($m = 1, 2, 3, 4, m \neq n$)代表不同模式的编号.

故而4个模式之间相互耦合的关系式为

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & -i\mu_{12} & -i\mu_{13} & -i\mu_{14} \\ -i\mu_{21} & \gamma_{22} & -i\mu_{23} & -i\mu_{24} \\ -i\mu_{31} & -i\mu_{32} & \gamma_{33} & -i\mu_{34} \\ -i\mu_{41} & -i\mu_{42} & -i\mu_{43} & \gamma_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\gamma_{o1}^{1/2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma_{o2}^{1/2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma_{o3}^{1/2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma_{o4}^{1/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{1+}^{in} + S_{1-}^{in} \\ S_{2+}^{in} + S_{2-}^{in} \\ S_{3+}^{in} + S_{3-}^{in} \\ S_{4+}^{in} + S_{4-}^{in} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中, $\gamma_{nm} = -(i\omega_n + \gamma_{in} + \gamma_{on} - i\omega)$, ω_n 为第 n 个模式的角频率, $\gamma_{in} = \omega_n/(2Q_{in})$, $\gamma_{on} = \omega_n/(2Q_{on})$. 在谐振系统分析中, 第 n 个模式的品质特性由3个关键参数表征, 即总品质因子 Q_m 、内部损耗因子 Q_{in} 和外部损耗因子 Q_{on} . 其中, 总品质因子可通过谐振峰特征参数直接计算获得, 其表达式为 $Q_m = f/\Delta f$, 这里 f 代表谐振频率, Δf 为半高全宽(FWHM). 内部损耗因子符合 $Q_{in} = \text{Re}(n_{\text{eff}})/\text{Im}(n_{\text{eff}})$, 其中 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 与 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 分别表示实部与虚部折射率.

基于电磁场能量守恒原理, 4个谐振腔模式的入射波与出射波满足以下关系:

$$S_{n+}^{in} = S_{(n-1)+}^{out} e^{i\varphi_{n-1}}, \quad S_{(n-1)-}^{in} = S_{n-}^{out} e^{i\varphi_{n-1}}, \quad (6)$$

$$n = 2, 3, 4,$$

$$S_{n+}^{out} = S_{n+}^{in} - \gamma_{on}^{1/2} A_n, \quad S_{n-}^{out} = S_{n-}^{in} - \gamma_{on}^{1/2} A_n, \quad (7)$$

$$n = 1, 2, 3, 4.$$

此外, 考虑到4个模式都位于同一波阵面上, 因此可将4个模式的等离元波初始相位差 φ_{n-1} ($n = 2, 3, 4$)取值为0.

基于对耦合模理论的分析, 在仅由第一谐振模式激励的条件下, 该系统的透射系数与反射系数满足如下数学关系:

$$r = \frac{S_{1-}^{out}}{S_{1+}^{in}} = -\gamma_{o1}^{1/2} A - \gamma_{o2}^{1/2} e^{i\varphi_1} B - \gamma_{o3}^{1/2} e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} C - \gamma_{o4}^{1/2} e^{i(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)} D, \quad (8)$$

$$t = \frac{S_{4+}^{out}}{S_{1+}^{in}} = e^{i(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)} - \gamma_{o1}^{1/2} e^{i(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)} A - \gamma_{o2}^{1/2} e^{i(\varphi_2 + \varphi_3)} B - \gamma_{o3}^{1/2} e^{i\varphi_3} C - \gamma_{o4}^{1/2} D, \quad (9)$$

式中,

$$A = \frac{A_1}{S_{1+}^{in}}, \quad B = \frac{A_2}{S_{1+}^{in}}, \quad C = \frac{A_3}{S_{1+}^{in}}, \quad D = \frac{A_4}{S_{1+}^{in}}. \quad (10)$$

因此根据上述公式能够求出透射率 $T = |t|^2$, 反射率 $R = |r|^2$ 以及吸收率 $A = 1 - T - R$.

3 结果与讨论

3.1 石墨烯等离激元诱导透明器件透射谱图分析

类电磁诱导透明效应的产生机制通常不尽相同, 如Tamm等离激元的强耦合、明暗模式的干涉等^[52,53]. 等离激元诱导透明效应是由原子能级和电场之间不同激发路径的耦合产生的. 通常, 耦合涉及到两个或多个光学模式的相互作用, 其中最常见的是明模式和暗模式. 根据数据与结果, 本器件产生了2个明模式与2个暗模式. 如图3(a)所示, 其中黑色点线与红色点线对应石墨烯层G-1与G-2所产生的暗模式, 在透射谱中表现出一个透射率接近1的曲线, 显然暗模式不能被入射光激发; 绿色实线与蓝色实线则对应石墨烯层G-3, G-4与G-5, G-6, G-7所产生的明模式, 显然明模式能够被入射光直接激发, 在透射谱中表现出一个透射率较低的透射谷.

结合图3(b)-(e)所示共振频率处的电场分布图能够明显地看出, 在共振频率为27.28和29.88 THz处电场能

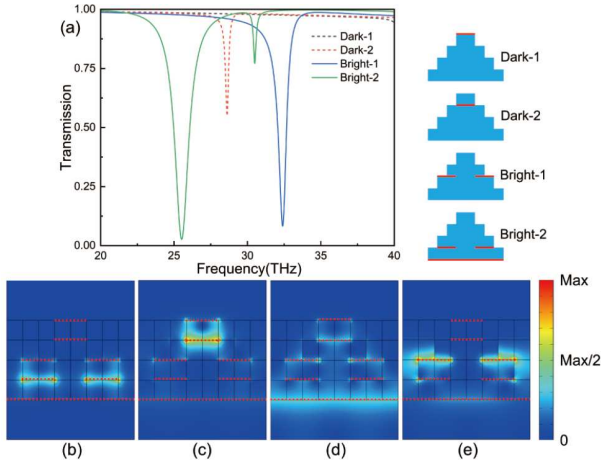


图 3 (网络版彩图) (a) 明暗模式透射率曲线图. (b)–(e) 石墨烯费米能级为 0.85 eV 时, 三重等离子体诱导透明的 4 处透明窗口对应频率下的电场模, 共振频率分别为 24.94, 27.28, 29.88 和 33.44 THz, 红色点线表示石墨烯位置

Figure 3 (Color online) (a) Transmission diagram of bright mode and dark mode. (b)–(e) When the Fermi level of graphene is 0.85 eV, the electric field modes at the resonance frequencies corresponding to the four transparency windows in the triple PIT are 24.94, 27.28, 29.88, and 33.44 THz, respectively, the red dotted lines indicate the positions of the graphene layer.

量集中在对应暗模式的石墨烯层 G-1 和 G-2 中, 显然这是由于明模式与暗模式之间的相互作用导致暗模式被间接激发. 因此本文的耦合模理论模型能够很好地解释三重等离子体诱导透明效应的机理, 三重等离子体诱导透明效应是由 4 个模式之间的相互耦合作用所产生的.

本器件相比于其他等离子体器件具有连续的石墨烯层结构的优势, 可以轻易地通过外在电压来对电子传输特性进行调控, 从而改变石墨烯的费米能级. 通过对耦合模理论的分析, 能够求出不同石墨烯费米能级下透射率的理论计算数值. 当石墨烯的费米能级分别为 0.85, 0.90, 0.95 和 1.00 eV 时, 根据上述耦合模理论公式能够求出其品质因子的具体数值, 如下所示: $Q_{i1} = (37.75, 64.01, 67.86, 70.78)$, $Q_{i2} = (37.61, 63.77, 67.73, 70.66)$, $Q_{i3} = (37.56, 62.69, 67.55, 70.54)$, $Q_{i4} = (37.47, 62.51, 67.43, 70.31)$; $Q_{o1} = (133.25, 145.84, 159.61, 178.71)$, $Q_{o2} = (145.17, 158.83, 173.98, 194.66)$, $Q_{o3} = (157.55, 172.34, 188.67, 211.11)$, $Q_{o4} = (170.13, 186.07, 203.77, 245.36)$. 此外, 总损耗因子、内部损耗因子与外部损耗因子三者满足关系式: $Q_{in}^{-1} = Q_{in}^{-1} + Q_{on}^{-1}$, 根据此关系式即可求得外部损耗因子具体数值为 $Q_{o1} = (52.67, 114.08, 118.05, 117.19)$, Q_{o2}

$= (50.77, 116.55, 110.90, 110.92)$, $Q_{o3} = (49.31, 98.51, 105.23, 105.93)$, $Q_{o4} = (48.05, 94.13, 100.78, 98.54)$. 如图 4 所示, 其中黑色曲线表示 FDTD 模拟曲线, 红色点线表示通过耦合模理论计算出的理论数值. 对比两类数据能够清晰地看到两者高度吻合, 因此本文的耦合模理论能够很好地解释本器件所产生的三重 PIT 现象与光学性质.

在实际使用环境中, 器件在一定程度上会受到偏振光角度的影响. 由于本文中的激发光源为平面光, 在此主要考虑线偏振光对器件的影响. 假设入射光能量是归一化的, 即随着偏振角度的增加 (即和 x 方向的夹角 ϕ 增加) x 方向的电场分量会逐渐减小, 故而器件中各模式共振的强度也会慢慢降低. 如图 5 所示, 当入射光偏振角度为 30° 时, 器件的透射光谱共振位置不变, 共振强度有一定的减小, 此时三重等离子体诱导透明效应受到的影响有限; 当入射光偏振角度达到 60° 时, 共振强度进一步减小; 当入射光偏振角度达到 90° 时, x 方向电场能量为 0, 此时共振已基本不存在, 等离子体诱导透明效应完全消失. 因此, 本器件对入射光偏振角度的变化表现出了一定的敏感性, 但是只有在偏振角度为 y 方向时, 共振才会消失, 故而在实际应用中只要入射光角度确保在 x 方向, 入射光偏振角度出现一定的偏差时也不会对器件的性能造成较大影响.

3.2 二进制编码

本器件中的石墨烯为连续图案排列, 可通过对石墨烯费米能级的调节实现三重 PIT 的大范围调谐, 以此基础进行二进制编码实现对太赫兹波的高效调控与信息加载. 如图 6(a) 所示, 当石墨烯费米能级为 1.15 eV 时, PIT 透射窗口在 29.01 和 34.74 THz 处于低透射率状态, 可以将此状态定义为逻辑“00”. 当调低石墨烯的费米能级为 1.02 eV 时透射率出现红移, 此时透射谱中 29.01 和 34.74 THz 正处于高透射率状态, 将此状态定义为逻辑“11”. 同理, 逻辑“01”与逻辑“11”也可以通过调节石墨烯费米能级得到.

此外, 根据式 (4) 将正负极之间的距离 d_c 设为 25 nm, 即可得到与费米能级相对应的电压数值. 石墨烯栅极电压与费米能级的关系如图 6(b) 所示. 当石墨烯的费米能级分别为 1.15, 1.02, 0.96 和 0.92 eV 时, 对应的栅极电压分别为 37.5, 29.5, 26.2 和 24.0 V. 以此便可以通过电压控制石墨烯的费米能级实现太赫兹二进制编码.

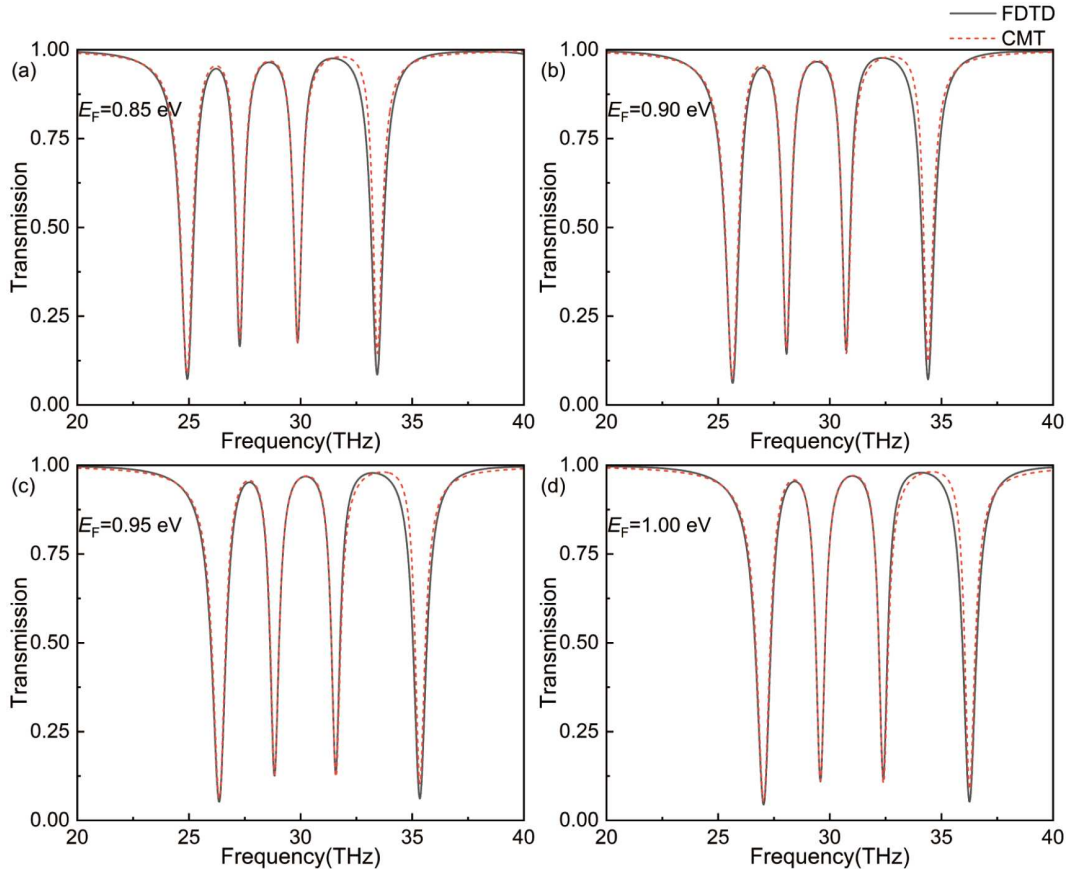


图 4 (网络版彩图)三重诱导透明的透射谱图, 黑色曲线表示FDTD数值模拟结果, 红色点线表示基于CMT理论求得的结果. (a) $E_F = 0.85$ eV, (b) $E_F = 0.90$ eV, (c) $E_F = 0.95$ eV, (d) $E_F = 1.00$ eV

Figure 4 (Color online) Displays the triple PIT transmission spectra, with the FDTD simulation data depicted by black solid curves and the coupled-mode theory (CMT) predictions indicated by red dotted lines. (a) $E_F = 0.85$ eV, (b) $E_F = 0.90$ eV, (c) $E_F = 0.95$ eV, (d) $E_F = 1.00$ eV.

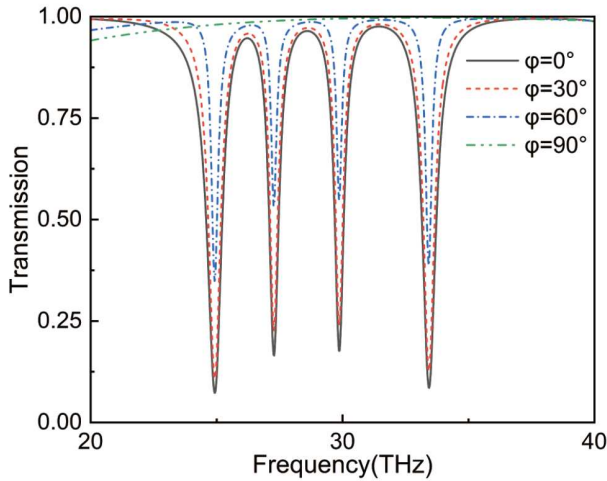


图 5 (网络版彩图)不同偏振角度下的透射谱图

Figure 5 (Color online) Transmission spectra at different polarization angles.

为了能够验证二进制编码效果, 对器件的消光比(ER)、调制深度(MD)与插入损耗(IL)进行了计算, 其公式如下:

$$ER = 10 \times \log_{10} \left(\frac{T_{on}}{T_{off}} \right), \quad (11)$$

$$MD = \frac{(T_{on} - T_{off})}{T_{on}} \times 100\%, \quad (12)$$

$$IL = -10 \log_{10} T_{on}, \quad (13)$$

式中, T_{on} 与 T_{off} 分别为29.01和34.74 THz处逻辑为“1”与“0”的透射率.

经过计算, 本器件的太赫兹编码性能参数如表1所示. 能够看出频率处于29.01 THz时消光比与调制深度最大值分别为15.16 dB和96.95%, 插入损耗最小能达到0.26 dB. 当频率处于34.74 THz时消光比与调制深度

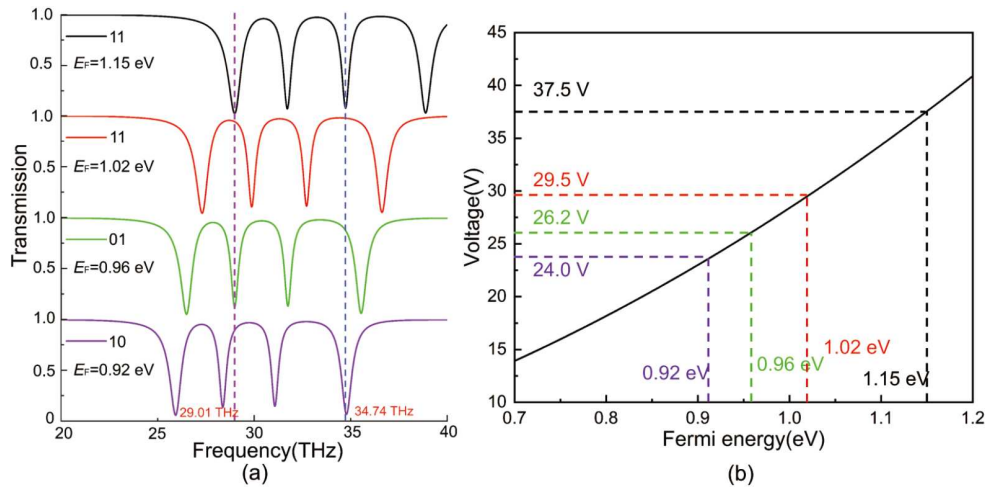


图 6 (网络版彩图) (a) 逻辑“00”“11”“01”和“10”的透射光谱. (b) 与石墨烯费米级对应的栅极电压

Figure 6 (Color online) (a) The transmission spectrum of logic “00”, “11”, “01”, and “10”. (b) The bias voltage corresponding to the Fermi level of graphene.

表 1 编码器性能参数

Table 1 Encoder performance parameters

Frequency (THz)	ER _{max} (dB)	MD _{max} (%)	IL _{min} (dB)
29.01	15.16	96.95	0.26
34.74	10.81	91.71	0.11

最大值分别为10.81 dB和91.71%，插入损耗最小能达到0.11 dB. 根据上述分析，显然本器件也能通过对石墨烯费米能级的调控实现光电开关与光电调制器的应用.

3.3 传感性能分析

等离激元的共振频率大小与环境介质折射率呈高度相关, 故而本器件能够实现优秀的传感性能. 且石墨烯表面激发的等离激元对外界介电环境变化十分敏感, 可利用此特性实现高灵敏度折射率传感. 当待测物质填满器件周围时, 环境折射率发生改变, 从而导致石墨烯等离激元共振频率出现显著的偏移, 具体表现为共振峰位移或PIT透明窗口的变化, 通过监测这种光学响应变化即可实现折射率检测. 本研究设计的周期性石墨烯微纳结构, 通过优化结构参数增强了局域场效应, 并利用石墨烯独特的光电可调特性实现了传感性能的动态调控, 最终达到亚波长尺度的高精度折射率测量, 为生物分子检测、化学气体环境监测等应用的实现提供了新方案.

如图7所示, 本文通过FDTD模拟器件处于不同环

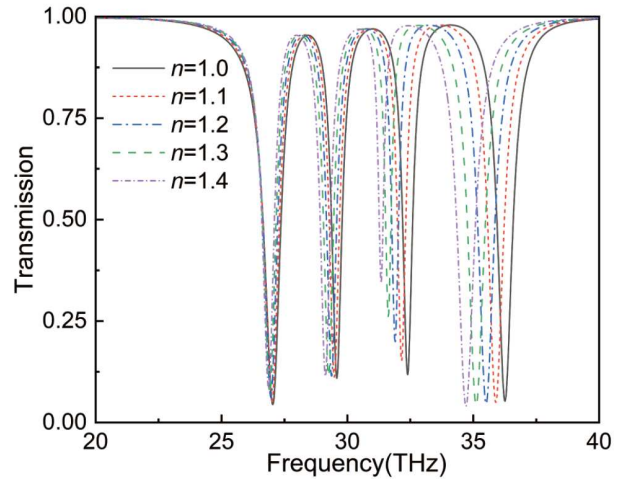


图 7 (网络版彩图)不同环境折射率下的透射光谱

Figure 7 (Color online) The transmission spectrum in different environmental refractive indices.

境介质折射率下的透射谱的变化来展示其传感性能. 当折射率 n 分别为1.0, 1.1, 1.2, 1.3和1.4时, 其对应的环境待测介质分别为空气、二氧化硅气凝胶、全氟己烷、甲醇和乙二醇. 能够明显看到, 三PIT特征峰位随介质折射率的增大而发生显著红移, 位移量与 Δn 呈正相关关系.

在传感器件中, 传感性能主要由灵敏度和品质因子两个关键参数表征. 灵敏度定义为共振频率偏移量与折射率变化的比值: $S = \Delta F / \Delta n$, 其中 ΔF 表示相邻介质引起的共振频移, Δn 表示介质折射率差值, 本文中

两个相邻介质的折射率差值为0.1.

此外, FOM表达式如下:

$$\text{FOM} = \frac{\Delta T}{T\Delta n} = \frac{T(f, n+\Delta n) - T(f, n)}{T(f, n)\Delta n}, \quad (14)$$

式中, ΔT 表示相邻折射率介质在固定频率下的透射强度差异.

如表2和图8所示, 本器件拥有非常优秀的传感性能, 其中灵敏度与品质因子随环境折射率的提高而增高. 当 $n = 1.4$ 时, 灵敏度与FOM在第4个透射谷处达到最高值, 分别为4.21 THz/RIU和112.67. 如表3所示, 本器件与其他太赫兹传感器的品质因子相比, 本文所提

出的结构表现出了更加优秀的传感性能, 同时灵敏度也要优于多数太赫兹传感器.

3.4 慢光性能分析

慢光是指光脉冲以低于真空光速的群速度进行传播的现象. 当光脉冲与介质发生强烈相互作用时, 就会出现慢光. 本器件使用的石墨烯材料本身具有优秀的色散特性, 这种色散效应在PIT透射谷处尤为明显, 表现为明模式与暗模式的相互作用会导致能量的耦合和交换, 此时相位会出现剧烈的波动. 相位可以通过耦合模理论计算出的透射系数来求得 $\theta = \arg(t)$. 基于相位

表 2 不同背景折射率下4个透射窗口处的共振频率与灵敏度

Table 2 Resonant frequencies and sensitivities at the four transparent windows with different background refractive indices

ΔF_1 (THz)	ΔF_2 (THz)	ΔF_3 (THz)	ΔF_4 (THz)	S_1 (THz/RIU)	S_2 (THz/RIU)	S_3 (THz/RIU)	S_4 (THz/RIU)
27.00	29.48	32.16	35.90	0.41	1.01	2.41	3.59
26.96	29.38	31.90	35.52	0.39	1.00	2.61	3.81
26.92	29.26	31.62	35.12	0.41	1.18	2.79	3.99
26.88	29.12	31.34	34.70	0.40	1.41	2.83	4.21

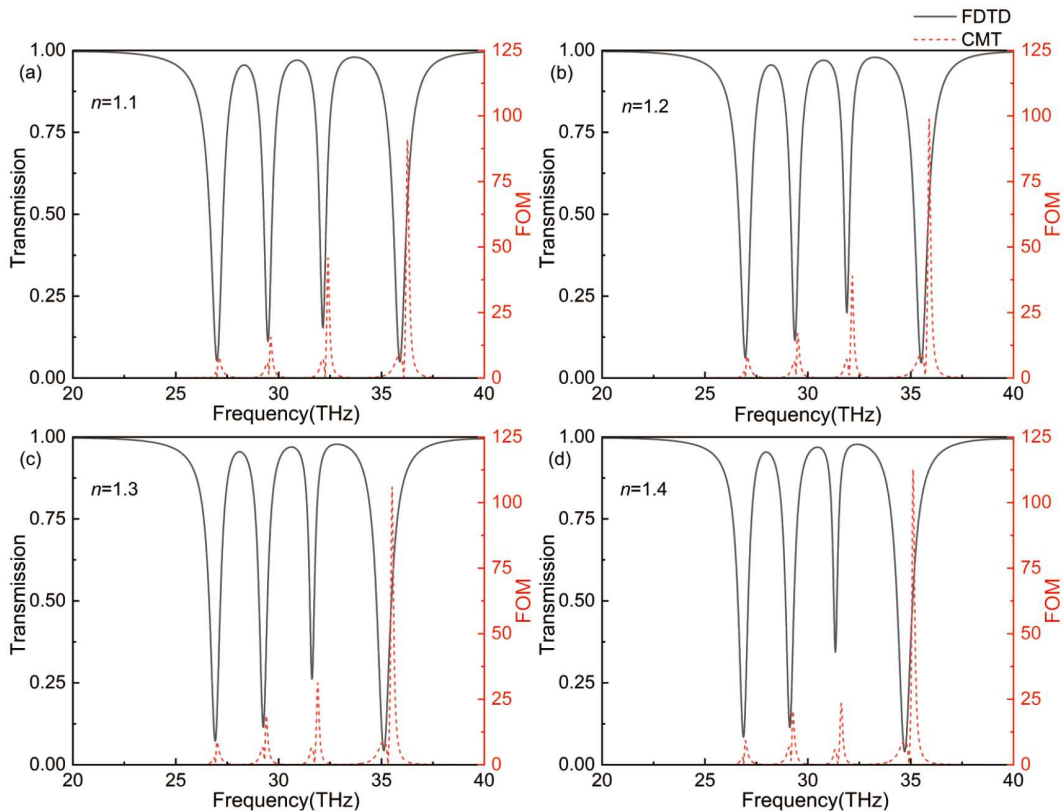


图 8 (网络版彩图)不同环境折射率下的品质因子. (a) $n = 1.1$, (b) $n = 1.2$, (c) $n = 1.3$, (d) $n = 1.4$

Figure 8 (Color online) FOM under different environmental refractive indices. (a) $n = 1.1$, (b) $n = 1.2$, (c) $n = 1.3$, (d) $n = 1.4$.

表 3 与其他文献传感器的灵敏度比较

Table 3 Comparison of sensitivity with other sensors

文献	灵敏度
Our work	1.892
[54]	0.196
[27]	0.5028
[55]	1.05
[56]	0.188

的变化, 可以进一步推导出群折射率, 其表达式为

$$\tau_g = \frac{d\theta}{d\omega}, \quad n_g = c \frac{dk}{d\omega} = \frac{c}{l_s} \tau_g, \quad (15)$$

式中, c 为真空中的光速, l_s 为石墨烯系统的厚度 (100 nm).

图9清晰地展示了群折射率与相位随费米能级变化的关系. 能够发现电磁波的相位在PIT透射窗口处呈现出较大的波动, 群折射率随着相位的波动也出现改变, 在透射谱中形成了3个具有一定频谱宽度的高群

折射率峰值.

此外, 通过对比4个不同石墨烯费米能级的群折射率, 发现随着石墨烯费米能级的增高, 群折射率峰值出现蓝移且群折射率峰值提高. 当费米能级达到1.00 eV时, 群折射率达到最高值484.93. 因此本器件可通过调控石墨烯的费米能级来实现对群折射率的调控, 以此控制慢光效应. 综合分析, 本器件能够实现宽频谱上的慢光效应, 且慢光性能较为优秀, 能够为慢光器件的实现提供一种思路.

4 结论

综上所述, 本文对三重等离激元诱导透明效应进行了数值上的模拟与理论上的计算. 连续石墨烯层结构为外加栅极电压实现对石墨烯载流子的调控提供了便利条件. 本文通过对石墨烯费米能级的调节, 能够实现在29.01和34.74 THz处逻辑“00”“11”“01”与“10”的太

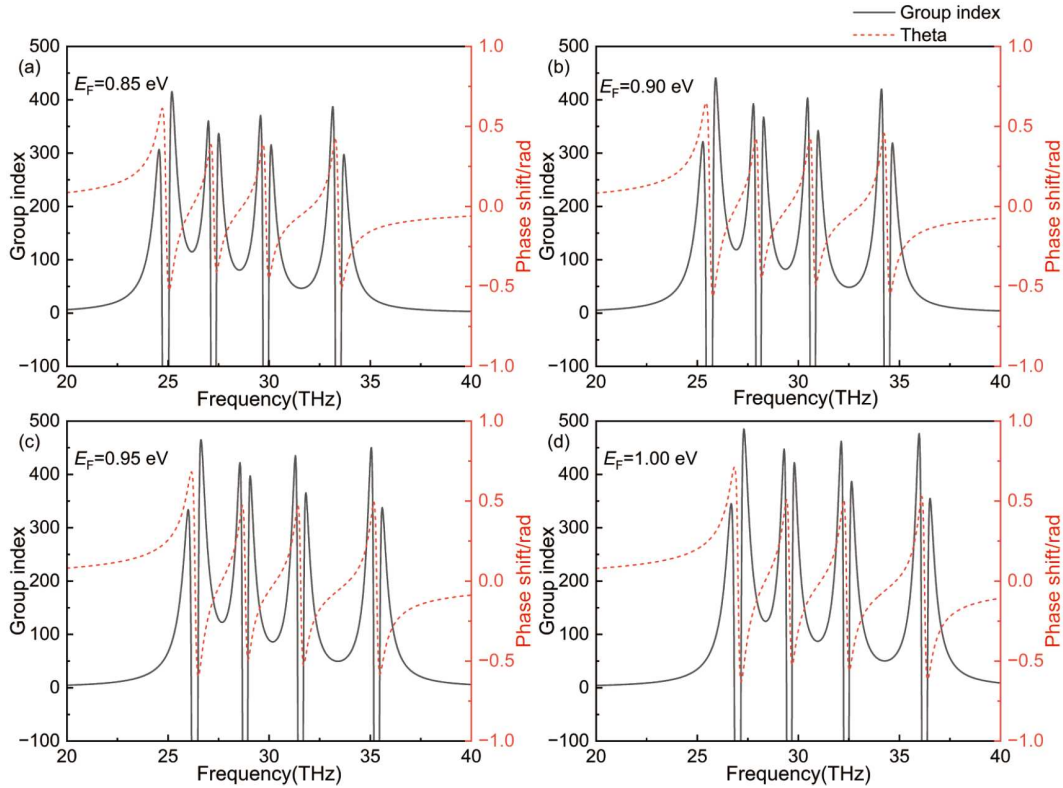


图 9 (网络版彩图) 器件在不同石墨烯费米能级下的相位差与群折射率关系. (a) $E_F = 0.85$ eV, (b) $E_F = 0.90$ eV, (c) $E_F = 0.95$ eV, (d) $E_F = 1.00$ eV

Figure 9 (Color online) The relationship between the phase difference and the group refractive index of the device at different graphene Fermi levels. (a) $E_F = 0.85$ eV, (b) $E_F = 0.90$ eV, (c) $E_F = 0.95$ eV, (d) $E_F = 1.00$ eV.

赫兹二进制编码, 其消光比与调制深度最大值分别为 15.16 dB 和 96.95%, 插入损耗最小能达到 0.11 dB. 此外, 本器件也拥有优秀的传感与慢光性能. 其灵敏度与品质因子最大值可达 4.21 THz/RIU 和 112.67. 当石墨烯费米能级为 1.00 eV 时, 群折射率达到最高值 484.93.

尽管本研究设计并验证了一种高性能的可调谐等离子激元器件, 但其仍有一定局限性. 首先, 目前的耦合模理论虽能对三重等离子激元诱导透明效应进行定性描述, 但对其进行精准的纯物理理论建模仍非常困难. 此外, 本工作目前为数值仿真与理论计算, 受限于石墨烯

微纳结构的加工费用等难度, 暂未进行实验的制备与测试. 针对这些局限性, 未来的研究工作将致力于实现结构的制备, 以实验验证仿真结果.

本研究通过对器件的合理设计, 使器件产生了多个暗模式的相互耦合, 实现了三重等离子激元诱导透明效应. 本研究在太赫兹编码、慢光效应与高灵敏度传感等方面都表现出了优秀的性能与应用潜力, 有望为未来对传感、慢光、调制等多功能集成芯片的研究提供一种可行的方案, 并为高速光通信、生物医学实时监测、太赫兹成像等功能的实现奠定理论基础.

参考文献

- 1 Ju L, Geng B, Horng J, et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials. *Nat Nanotech*, 2011, 6: 630–634
- 2 Zheludev N I, Kivshar Y S. From metamaterials to metadevices. *Nat Mater*, 2012, 11: 917–924
- 3 Zhou J, Wang Y, Zhang G J. State-of-the-art strategies of surface plasmon resonance biosensors in clinical analysis: A comprehensive review. *Coord Chem Rev*, 2024, 520: 216149
- 4 Kadic M, Milton G W, van Hecke M, et al. 3D metamaterials. *Nat Rev Phys*, 2019, 1: 198–210
- 5 Xu H, Xu H, Yang X, et al. Polarization-sensitive asynchronous switch and notable slow-light based on tunable triple plasmon-induced transparency effect. *Phys Lett A*, 2024, 504: 129401
- 6 Xu C, Ren Z, Wei J, et al. Reconfigurable terahertz metamaterials: From fundamental principles to advanced 6G applications. *iScience*, 2022, 25: 103799
- 7 Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, et al. Plasmon lasers at deep subwavelength scale. *Nature*, 2009, 461: 629–632
- 8 Yang H, Ou K, Wan H, et al. Metasurface-empowered optical cryptography. *Mater Today*, 2023, 67: 424–445
- 9 Zia R, Schuller J A, Chandran A, et al. Plasmonics: The next chip-scale technology. *Mater Today*, 2006, 9: 20–27
- 10 Willner A E, Khaleghi S, Chitgarha M R, et al. All-optical signal processing. *J Lightwave Technol*, 2013, 32: 660–680
- 11 Madsen L S, Laudenbach F, Askarani M F, et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. *Nature*, 2022, 606: 75–81
- 12 Slussarenko S, Pryde G J. Photonic quantum information processing: A concise review. *Appl Phys Rev*, 2019, 6: 041303
- 13 Cheben P, Halir R, Schmid J H, et al. Subwavelength integrated photonics. *Nature*, 2018, 560: 565–572
- 14 Kwon H, Sounas D, Córdaro A, et al. Nonlocal metasurfaces for optical signal processing. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 173004
- 15 Wang Y, Yu J, Mao Y F, et al. Stable, high-performance sodium-based plasmonic devices in the near infrared. *Nature*, 2020, 581: 401–405
- 16 Hong M, Dawkins R B, Bertoni B, et al. Nonclassical near-field dynamics of surface plasmons. *Nat Phys*, 2024, 20: 830–835
- 17 Yang H, Ou K, Liu Q, et al. Metasurface higher-order poincaré sphere polarization detection clock. *Light Sci Appl*, 2025, 14: 63
- 18 Yang H, Peng M, He H, et al. Polarization-independent dispersive complex-amplitude modulation via anisotropic metasurfaces. *Laser Photon Rev*, 2025, 19: 2401398
- 19 Wang Y, Lu Y, Luo H Y, et al. Study on THz SPPs excitation and field distributions of graphene microribbons (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2021, 51: 054209 [汪云, 卢毅, 罗昊宇, 等. 石墨烯微米带THz SPPs的激发及场分布特性研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 054209]
- 20 Duan G, Chen Y, Zhu H, et al. The construction of versatile terahertz metamaterial having tunable dual-band electromagnetically induced transparency based on two falling asymmetric T-shaped graphene resonators. *Opt Laser Tech*, 2024, 172: 110545
- 21 Yin X, Wu M, Liu Y, et al. A planar metamaterial based on metallic rectangular-ring pair for narrow electromagnetically induced transparency-like effect. *J Appl Phys*, 2020, 128: 065105
- 22 Xu H, Li M, Yang X J, et al. Dynamically tunable terahertz slow light device based on triple plasmonic induced transparency (in Chinese). *Sci*

- [Sin-Phys Mech Astron](#), 2024, 54: 234211 [许辉, 李铭, 杨肖杰, 等. 基于三重表面等离子体诱导透明的动态可调太赫兹慢光器件. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 234211]
- 23 Hashim H S, Fen Y W, Omar N A S, et al. Surface plasmon resonance sensor based on gold-graphene quantum dots thin film as a sensing nanomatrix for phenol detection. [Opt Laser Tech](#), 2024, 168: 109816
 - 24 Yang X, Xu H, Xu H, et al. Terahertz refractive index sensor based on dual plasmon-induced transparency in a graphene metasurface. [Phys Scr](#), 2024, 99: 055518
 - 25 Deng H, Tian L, Xiong R, et al. Review on plasmon induced transparency based on metal-dielectric-metal waveguides. [J Cent South Univ](#), 2020, 27: 698–710
 - 26 Tao L, Deng X H, Zhang P, et al. Multifunctional graphene metamaterials based on polarization-insensitive plasmon-induced transparency. [Opt Express](#), 2024, 32: 2097–2105
 - 27 Gao W, Chen F, Yi Z, et al. Applications based on dynamically plasmon-induced transparency in bilayer borophene metamaterials structure. [Appl Mater Today](#), 2024, 41: 102498
 - 28 Li M, Xu H, Yang X, et al. Tunable plasma-induced transparency of a novel graphene-based metamaterial. [Results Phys](#), 2023, 52: 106798
 - 29 Zhu J, Xiong J. Tunable terahertz graphene metamaterial optical switches and sensors based on plasma-induced transparency. [Measurement](#), 2023, 220: 113302
 - 30 Cheng Y, Xu H, Yu H, et al. Tri-band terahertz sensing and slow light based on graphene artificial microstructure. [Acta Phys Sin](#), 2025, 74: 067801
 - 31 D'Agata R, Bellasai N, Spoto G. Exploiting the design of surface plasmon resonance interfaces for better diagnostics: A perspective review. [Talanta](#), 2024, 266: 125033
 - 32 Sandtke M, Kuipers L. Slow guided surface plasmons at telecom frequencies. [Nat Photon](#), 2007, 1: 573–576
 - 33 Pohl M, Belotelov V I, Akimov I A, et al. Plasmonic crystals for ultrafast nanophotonics: Optical switching of surface plasmon polaritons. [Phys Rev B](#), 2012, 85: 081401
 - 34 Zhu J, Xiong J. Logic operation and all-optical switch characteristics of graphene surface plasmons. [Opt Express](#), 2023, 31: 36677–36690
 - 35 Zhu A, Li Z, Hou W, et al. A 2-bit graphene encoder based on the plasmon-induced transparency effect and its sensing characteristics. [Results Phys](#), 2024, 59: 107608
 - 36 Wang S J, Zhang T, Zhang D M, et al. Applications of metasurfaces in terahertz radiation generation and manipulation (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2025, 55: 250013 [王顺甲, 张腾, 张杜萌, 等. 超构表面在太赫兹辐射产生与调控中的应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 250013]
 - 37 Li Z, Nie G, Wang J, et al. Polarization-modulating switchable and selectable image display through an ultrathin quasi-bound-state-in-the-continuum metasurface. [Phys Rev Appl](#), 2024, 21: 034039
 - 38 Gao E, Xu H, Cao G, et al. Ultranarrow and multiband perfect absorbers based on dual quasi-bound states in the continuum in near infrared. [Chin J Phys](#), 2025, 95: 1058–1068
 - 39 Lei P, Nie G, Li H, et al. Tunable triple plasmon-induced transparency in E-type graphene metamaterials. [Opt Express](#), 2024, 32: 25435–25450
 - 40 Deng B, Liu Z, Peng H. Toward mass production of CVD graphene films. [Adv Mater](#), 2019, 31: 1800996
 - 41 Müller M, Bouša M, Hájková Z, et al. Transferless inverted graphene/silicon heterostructures prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition of amorphous silicon on CVD graphene. [Nanomaterials](#), 2020, 10: 589
 - 42 Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids. New York: Academic Press, 1998
 - 43 Geim A K. Graphene: Status and prospects. [Science](#), 2009, 324: 1530–1534
 - 44 Grigorenko A N, Polini M, Novoselov K S. Graphene plasmonics. [Nat Photon](#), 2012, 6: 749–758
 - 45 Balci S, Balci O, Kakenov N, et al. Dynamic tuning of plasmon resonance in the visible using graphene. [Opt Lett](#), 2016, 41: 1241–1244
 - 46 Efetov D K, Kim P. Controlling electron-phonon interactions in graphene at ultrahigh carrier densities. [Phys Rev Lett](#), 2010, 105: 256805
 - 47 Ziegler K. Minimal conductivity of graphene: Nonuniversal values from the Kubo formula. [Phys Rev B](#), 2007, 75: 233407
 - 48 Chen P Y, Argyropoulos C, Farhat M, et al. Flatland plasmonics and nanophotonics based on graphene and beyond. [Nanophotonics](#), 2017, 6: 1239–1262
 - 49 Chen P Y, Farhat M, Bağcı H. Graphene metascreen for designing compact infrared absorbers with enhanced bandwidth. [Nanotechnology](#), 2015, 26: 164002

- 50 Haus H A, Huang W. Coupled-mode theory. *Proc IEEE*, 1991, 79: 1505–1518
- 51 Tsakmakidis K L, Shen L, Schulz S A, et al. Breaking Lorentz reciprocity to overcome the time-bandwidth limit in physics and engineering. *Science*, 2017, 356: 1260–1264
- 52 He Y, Zhang J, Xu W, et al. Graphene plasmonically induced analogue of tunable electromagnetically induced transparency without structurally or spatially asymmetry. *Sci Rep*, 2019, 9: 20312
- 53 Lu H, Shi S, Li D, et al. $\lambda/20$ -Thick cavity for mimicking electromagnetically induced transparency at telecommunication wavelengths. *Adv Photon*, 2024, 6: 036001
- 54 Pan Y, Chen F, Yang J, et al. High-sensitivity sensor based on plasmon-induced transparency in terahertz borophene metasurface. *Plasmonics*, 2024, 19: 901–911
- 55 Wang Y, Luo G, Yan Z, et al. Silicon ultraviolet high- Q plasmon induced transparency for slow light and ultrahigh sensitivity sensing. *J Lightwave Technol*, 2024, 42: 406–413
- 56 Yang Y, Kravchenko I I, Briggs D P, et al. All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency. *Nat Commun*, 2014, 5: 5753

2-bit encoding, sensing and slow light based on triple plasmonic induced transparency effect

CHENG Yuxuan¹, XU Hui^{1,2*}, YU Hongfei¹, WANG Xiaojing¹, ZHANG Xiaojiao¹,
DONG Yulan¹, HE Longhui^{1,2}, HOU Hailiang^{1,2} & CHEN Zhiqun^{1,2}

¹ School of Microelectronics and Physics, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

² Xiangjiang Laboratory, Changsha 410205, China

*Corresponding author (email: xuhui@hutb.edu.cn)

In this study, a multifunctional device based on triple plasmonic induced transparency (PIT) is proposed. We employed coupled mode theory to derive the underlying mechanism of the triple plasmonic induced transparency phenomenon. The theoretical findings were then verified using the finite-difference time-domain simulations. The results from both approaches were found to be largely consistent. The device can realize the 2-bit coding at 29.01 and 34.74 THz by voltage. The maximum extinction ratio and modulation depth can reach 15.16 dB and 96.95%, respectively, and the minimum insertion loss can reach 0.11 dB. The device also has excellent sensing performance, with sensitivity and figure of merit of up to 4.21 THz/RIU and 112.67. In addition, the group refractive index of the device can reach 484.93 when the Fermi level of graphene is controlled to 1.00 eV. Therefore, these results reveal that our research is expected to provide a theoretical basis for potential applications such as terahertz coding, sensing, slow light, optical switching, and optical storage.

plasmonic induced transparency, 2-bit encoding, sensing, slow light, metamaterials

PACS: 78.40.-q, 78.66.-w, 42.25.Bs, 42.70.-a

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0276](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0276)