



论文

集成石墨烯的全介质超表面的光吸收调制和图像显示功能研究

聂国政^{1,3*}, 谢明鑫¹, 李宗霖³, 陈智全¹, 李德琼^{2*}, 许辉¹, 兰林锋⁴

1. 湖南工商大学微电子与物理学院, 长沙 410205;

2. 湖南工商大学理学院, 长沙 410205;

3. 湖南科技大学物理与电子科学学院, 湘潭 411201;

4. 华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广州 510640

*联系人, 聂国政, E-mail: gzhnie@hnust.edu.cn; 李德琼, E-mail: ldqmath@hutb.edu.cn

收稿日期: 2024-05-21; 接受日期: 2024-08-16; 网络出版日期: 2024-09-03

国家自然科学基金(编号: 62175062, 62173135), 湖南省教育厅自然科学基金(编号: 23A0454, 21B0581, 22A0433, 22A0435), 湖南省自然科学基金(编号: 2022JJ30301, 2023JJ30195)和长沙市自然科学基金(编号: kp2208059)资助项目

摘要 在单层二维(2D)材料中实现完美吸收对于新一代片上集成光子元器件至关重要。然而, 基于表面等离子体共振和法布里-珀罗腔的完全吸收机制存在着调谐能力差, 稳定性低以及制备过程复杂等问题。连续体中的束缚态(BICs)被认为是增强光-物质相互作用的理想平台。为此, 本文提出了一种在近红外区域支持对称保护的BIC(SP-BIC)的全介质超表面, 打破超表面的面内对称性使其转换成具有非凡 Q 因子的准BIC(qBIC)模式, 此时将单层石墨烯引入以组成临界耦合吸收系统。在不改变结构参数的情况下, 仅通过控制入射波的偏振角实现了93.8%的光吸收调制效率。基于此石墨烯-超表面理想吸收体, 实现了光学数字“0-1”开关和超表面图像显示功能, 有望为新一代片上集成光学元器件提供理论指导。

关键词 连续体束缚态, 石墨烯, 光吸收调制, 图像显示**PACS:** 78.40.-q, 78.66.-n, 42.25.-p, 42.70.-a

1 引言

自从Konstantin Novoselov和Andre Geim等人^[1]在2004年首次发现石墨烯以来, 由于其独特的能带结构和电学性质, 石墨烯引起了极大的关注。然而, 其原子级的厚度和低光吸收效率(单层石墨烯光吸收效率约为2.3%)限制了它在不同领域的潜在应用^[2]。在以往的

研究中, 通过在石墨烯表面引入金属纳米结构来增强其光吸收效率。当这些纳米结构与入射光相互作用时, 能够激发表面等离子体极化子(SPPs)并将能量传递给石墨烯^[3-5]。然而, 金属纳米结构在光学范围内固有的欧姆损耗阻碍了能量的有效转换和传输^[6]。因此, 迫切需要一种新型的由高折射率全介电材料组成的超表面, 它能在没有SPP的情况下有效控制光。此外, 全介

引用格式: 聂国政, 谢明鑫, 李宗霖, 等. 集成石墨烯的全介质超表面的光吸收调制和图像显示功能研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 114211
Nie G Z, Xie M X, Li Z L, et al. Optical absorption modulation and image display capabilities of all-dielectric metasurface featuring integrated graphene (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 114211, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0181

电超表面, 特别是全硅超表面与互补金属氧化物半导体(CMOS)制造工艺兼容^[7,8], 可以与现有的电子组件集成, 实现更为紧凑的光学系统. 这种集成提高了光电转换效率和光信号处理效率, 在光通信^[9,10]、生物医学和环境监测^[11–13]等领域具有广泛的应用.

连续体中的束缚态(BICs)已被证明是许多基本振荡现象的基础^[14–18], 它们源于辐射波之间的几何对称或相消干涉, 被表征为非辐射腔模式, 在系统中能够保持完美局域化的状态, 可以在电介质超表面中形成共振来促进光的激发和传输. 但这种BIC状态具有理论上无限的 Q 因子(Q -factor)以及极强的稳定性, 无法通过外界场的调控来改变其性质. 为了破坏BIC的完美局域化使其与散射态耦合, 一种策略是引入扰动来打破结构的面内对称性, 构造与外界对称的辐射通道, 从而将SP-BIC转换为可辐射到外部连续谱的qBIC模式^[19–21], qBIC的谐振线宽度和 Q 因子都变得有限. 具有高 Q 值的qBIC可以显著增强近场的相互作用, 这一特性使它们在传感器^[22,23]、完美吸收器^[24,25]和激光器^[26,27]等应用中展现出巨大的潜力.

本文提出了一种在近红外光谱区支持SP-BIC的全介电超表面. 为实现单层石墨烯的完美吸收, 将qBIC机制应用于增强石墨烯光吸收效率, 这种机制将光场局域在石墨烯表面, 从而增强了电场强度和光与物质的相互作用. 通过调整超表面结构参数, 可以有效控制吸收峰的位置和强度, 实现对光学性质的精确控制. 对超表面的光子能带结构进行分析, 发现其支持一个SP-BIC. 引入微扰打破结构的面内对称性以获得有限且巨大 Q 因子的qBIC模式, 并通过修改不对称设计, 可以调节qBIC的 Q 因子超过5个数量级, 最大值超过472731. 进一步计算其多极分解和远场分布, 在相同的波长下, 多极矩的散射功率可以通过入射波的偏振角度来调节. 将单层石墨烯引入以组成石墨烯-超表面临界耦合吸收系统, 并分析了不同破缺和不同能级石墨烯系统的临界耦合条件, 均实现了增强的临界耦合完全吸收. 此外, 由于超表面的偏振敏感特性, 石墨烯-超表面临界耦合吸收系统的光调制效率高达93.8%, 基于此偏振调制机制, 我们展示了其在光学数字“0-1”开关和近场图像显示的应用.

2 结构设计与数值模拟

设计的近红外光谱区的全介电超表面如图1(a)所

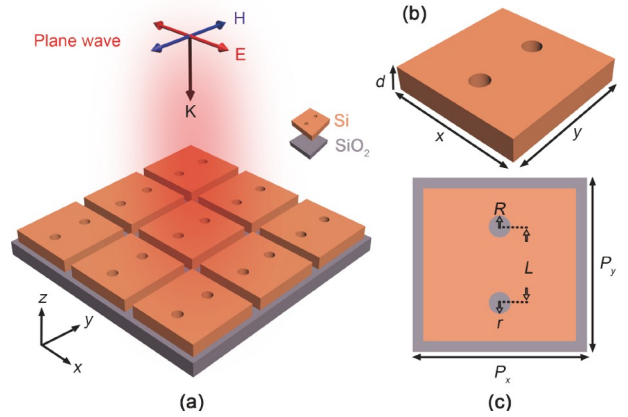


图 1 (网络版彩图) (a) 提出的全介电超表面示意图. (b) 超表面单个晶胞的结构参数: $x=y=700$ nm, $d=130$ nm. (c) 刻蚀空气孔示意图: $r=R=50$ nm, $L=350$ nm, $P_x=P_y=800$ nm

Figure 1 (Color online) (a) Schematic of the proposed all-dielectric metasurface. (b) Unit cell parameters: $x=y=700$ nm, $d=130$ nm. (c) Schematic diagram of etched air holes: $r=R=50$ nm, $L=350$ nm, $P_x=P_y=800$ nm.

示, 在二氧化硅基底上, 具有两个圆形空气孔的硅纳米立方体周期性排列. 单个晶胞如图1(b)所示, 在厚度为 d 的Si纳米立方体结构中刻蚀出两个半径为 R 和 r 的圆形孔, 纳米立方体的长和宽为固定值700 nm, 且两个圆孔中心距离 $L=350$ nm. 在图1(c)中, 为了打破结构的面内对称性, 其中一个空气柱半径被放大. 该结构的光学特性基于时域有限差分法(FDTD)进行模拟仿真分析, 为了便于模拟, 将Si和SiO₂的折射率设为常数3.44和1.46, 在 x 和 y 方向上设置周期性边界条件, 在 z 方向上设置完美匹配层(PML), 晶胞的周期 $P_x=P_y=800$ nm. 为了确保模拟的准确性和稳定性, 在仿真中将收敛参数设置为“Auto shutoff min =1E-5”, 并且为了激发显著的共振响应, 采用沿着“- z ”轴入射的 x 偏振平面波激励.

为了找到系统本征模式的位置, 使用偶极子云激发并在 x 和 y 方向上设置Bloch边界条件. 图2(a)显示了其光子能带结构, 由于超表面特殊的设计使其能够在特定频率下支持SP-BIC^[28]. 并因为超表面理想悬浮状态, 其对应的频率低于给定周期性结构的衍射极限. 图2(b)显示了SP-BIC在 x - y 平面归一化的电场和电流分布, 揭示了沿着“- z ”轴的明显的磁偶极(MD)特征, 并且位移电流沿着空气柱的径向方向, 这可以被识别为电四极(EQ). 由于结构的高度对称性, 超表面的零能级辐射通道关闭, 无法与自由空间中的模式耦合, 从而导致理论上无限大的 Q 因子^[29]. 通过引入微扰破坏结

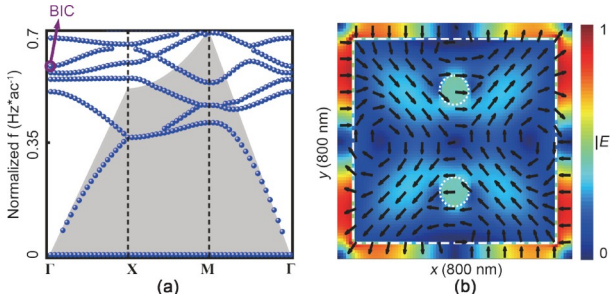


图 2 (网络版彩图) (a) 超表面的光子能带结构, BIC位置由紫色圆圈标记. (b) BIC本征模在 x - y 平面归一化的电场和电流分布

Figure 2 (Color online) (a) The band structure of the silicon nanocube array, with BIC positions marked by purple circles. (b) Electric field and current distributions of the BIC eigenmode normalized in the x - y plane.

构的面内对称性, 从而构造与外界的辐射通道, 将SP-BIC转换成qBIC模式.

相较于仅支持TD谐振的纳米盘^[30,31], 纳米立方体在超表面配置中提供更强的相邻元件耦合. 为了研究所提出的超表面中的共振情况, 在二氧化硅衬底上沉积了具有对称破缺的纳米立方体. 值得注意的是, 将超薄超表面沉积在衬底上时, 衬底的厚度通常比超表面厚得多, 以确保足够的稳定性和机械强度. 因此在软件模拟中将衬底的厚度设为无穷大以模拟实际情况. 虽然衬底的存在会导致一定的能量损耗和散射, 但是由于超表面特殊的周期性亚波长结构, 仍然可以在衬底上保持稳定, 这意味着超表面对电磁场的控制能力不会得到削弱, 并产生强烈的干涉效应, 从而保持高的 Q 因子. 品质因子 Q 描述了谐振器的能量损失率, 是定义纳米光子器件性能指标的关键^[32].

图3(a)分析了具有对称破缺超表面的透射光谱. 当超表面处于原始对称情况下时, 谐振线宽消失, 这意味着此时处于具有理论上无限的 Q 因子的BIC模式. 然而, 当引入微扰来打破面内对称性时, 透射谱中会出现不对称的线性变化. 此外, 随着 R 的增大, 谐振线宽变宽, 这意味着Fano谐振由qBIC激发^[33,34]. 图3(b)示出了模式的 Q 因子和超表面不对称参数 α 的关系, 其中 $\alpha = (S_0 - S_1)S_0^{-1}$ (S_0 是原始对称情况下纳米立方体的顶面积, S_1 是有破缺的纳米立方体的顶面积), Q 因子被绘制为 α 的函数(在 $\log_{10}$ - $\log_{10}$ 标度下, 用于直观地表示出 Q 和 α 之间的关系), 结果表明 Q 因子与非对称性参数的关系满足反二次律^[35].

$$Q_{\text{rad}} \propto \alpha^{-2}. \quad (1)$$

利用BIC和qBIC的产生和诱导机制, 可以通过控制辐射阻尼率来实现不同的Fano谐振的 Q 值. 当 α 从0.07减小到 2.65×10^{-5} 时, Q 因子从45.15显著增加到 4.72×10^5 跨越了5个量级, α 足够小时 Q 因子将进一步提高. 因此, 对于qBIC模式, 超表面的谐振模式和 Q 因子可以通过改变结构的非对称参数直接调谐.

为了找出高 Q 光学共振的物理根源, 进一步研究了qBIC模式的性质. 用对数坐标表示的多极展开分析结果如图3(c)所示, 笛卡尔坐标中的多极分解方法用于计算不同类型的多极激励的散射功率. 用于推导干涉中涉及的Mie谐振的公式表示如下^[36,37]:

$$ED = \frac{1}{i\omega} \int j d^3r, \quad (2)$$

$$MD = \frac{1}{2c} \int (r \cdot j) j d^3r, \quad (3)$$

$$TD = \frac{1}{10c} \int [(r \cdot j)r - 2(r \cdot r)j] d^3r, \quad (4)$$

$$EQ = \frac{1}{i2\omega} \int [r_\alpha j_\beta + r_\beta j_\alpha - \frac{2}{3}(r \cdot j)\delta_{\alpha\beta}] d^3r, \quad (5)$$

$$MQ = \frac{1}{3c} \int [(r \cdot j)_\alpha r_\beta + (r \cdot j)_\beta r_\alpha] d^3r, \quad (6)$$

其中, r 为位置矢量, c 为光速, ω 为角频率, α 和 β 代表笛卡尔坐标分量 xyz . 电流密度如公式(7)所示:

$$J(r) = -i\omega\epsilon_0 [\epsilon_r(r) - \epsilon_{r,d}] E(r). \quad (7)$$

图3(c)展示了不同多极模式的散射功率, 可以观察到每个多极模式的峰值和位置, 这些峰值和位置对应于不同的多极矩阶数. 此外, 在波长 $\lambda = 1384.7 \text{ nm}$ 处可以观察到 EQ 和 MD 模式突出的峰值, 这是由于高折射率Mie谐振腔与等离子体激元系统相比具有较低的非辐射衰减, 并产生了混合模式的单向发射, 这与Mie散射的多极特性有关. 并且 EQ 和 MD 模式的强度相近, 由于两个模式之间存在相位差导致它们相消干涉. 此外, 单向发射模式的强度和频率可以通过调节光学结构的几何形状和材料参数来控制.

为了理解多极分量 EQ 和 MD 的干扰之间的相关性, 在图3(e)中呈现 EQ 和 MD 模式的杂交辐射图案, EQ 的辐射图案呈现为“花瓣形”, 而 MD 的辐射图案呈现为“甜甜圈形”. EQ 和 MD 的干涉导致位移电流方向相同的位置相互增强, 方向相反的位置相互抵消^[38], 获得

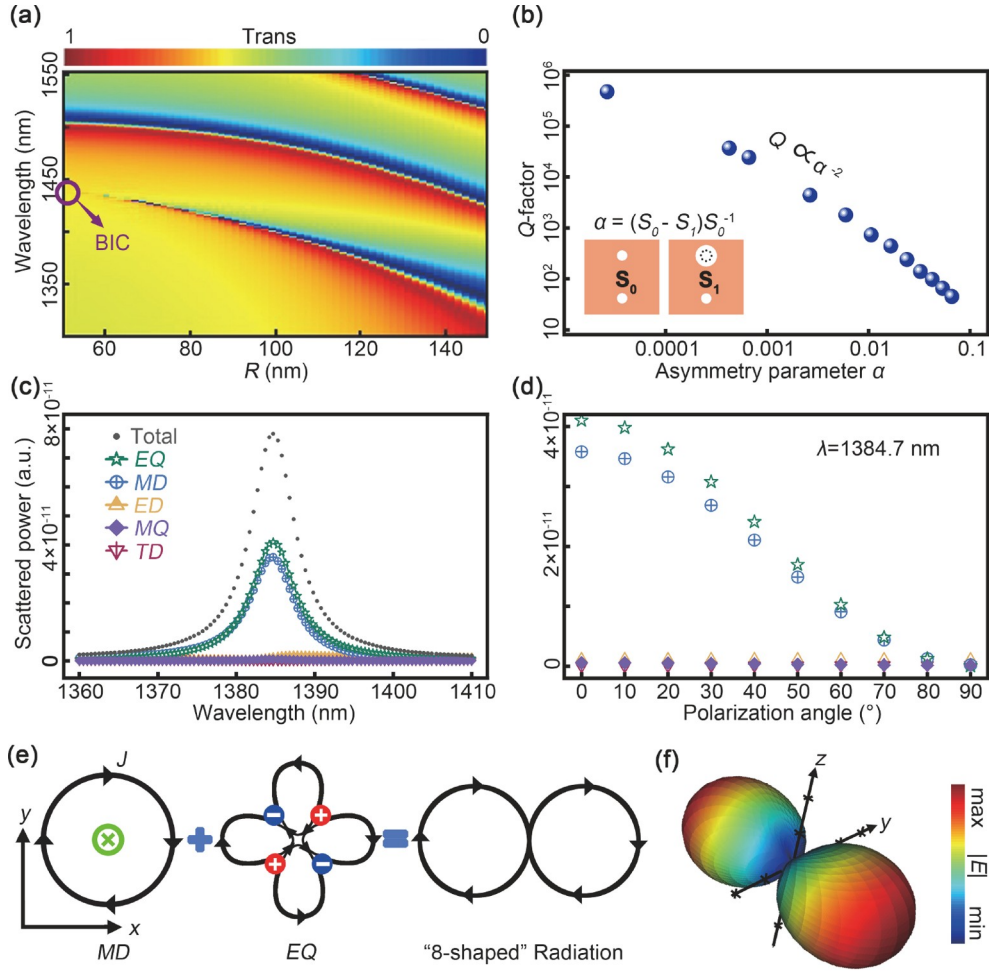


图 3 (网络版彩图) (a) 打破面内对称性的超表面的透射谱. (b) Q 因子与不对称参数 α 的函数关系(在 $\log_{10}$ – $\log_{10}$ 标度下). (c) 各种多极矩的辐射功率. (d) 入射波不同偏振角下散射功率的强度比较. (e) MD 和 EQ 的杂交模式示意图. (f) “8字形”远场辐射图案

Figure 3 (Color online) (a) Transmission spectrum of metasurface when in-plane symmetry is broken. (b) Q -factor as a function of the asymmetry parameter α (on $\log_{10}$ – $\log_{10}$ scale). (c) Radiated power for various multipole moments. (d) Comparison of the intensity of the radiated power at different polarization angles. (e) Schematic of hybridization of MD and EQ modes. (f) The “figure-of-eight” far-field radiation pattern.

了“8字形”辐射图案如图3(f). 进一步评估了不同入射波的偏振角度下多极子(偶极和四极)对远场散射的贡献, 在图3(d)中, 当偏振角为 0° 时, EQ 和 MD 分量对远场散射的贡献占据主导位置, 而当偏振角逐渐增加到 90° 时, 单向发射模式的峰值逐渐下降, 这是由于偏振角的变化导致了光场的对称性改变, 影响多极矩的方向和大小, 进而影响不同模式的强度和位置.

基于前文已探讨过的理论机理和仿真分析, 研究全介电超表面对单层石墨烯光吸收效率的影响, 设计了如图4(a)所示的石墨烯-超表面谐振系统, 在该系统中, 单层石墨烯被平铺在整个结构顶部. 得益于qBIC模

式独特的局域场增强性质, 可以显著增强石墨烯光吸收效率^[39,40]. 并且可以通过改变超表面的结构参数对qBIC进行调谐, 使其满足临界耦合吸收体的耦合条件.

此外, 比较了不同能级的石墨烯在1335–1435 nm波长范围内的电导率实部值. 如图4(b)所示, 作为“片状”结构, 单层石墨烯(MG厚度小于1 nm)的主要物理参数是电导率 σ . 根据Kubo模型^[41]:

$$\sigma(\omega, E_F, \Gamma, T) = N_g(\sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}), \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{-ie^2}{\pi\hbar(\omega + 2i\Gamma)} \int_0^\infty \xi \left[\frac{\partial f_d(\xi)}{\partial \xi} + \frac{\partial f_d(-\xi)}{\partial \xi} \right] d\xi, \quad (9)$$

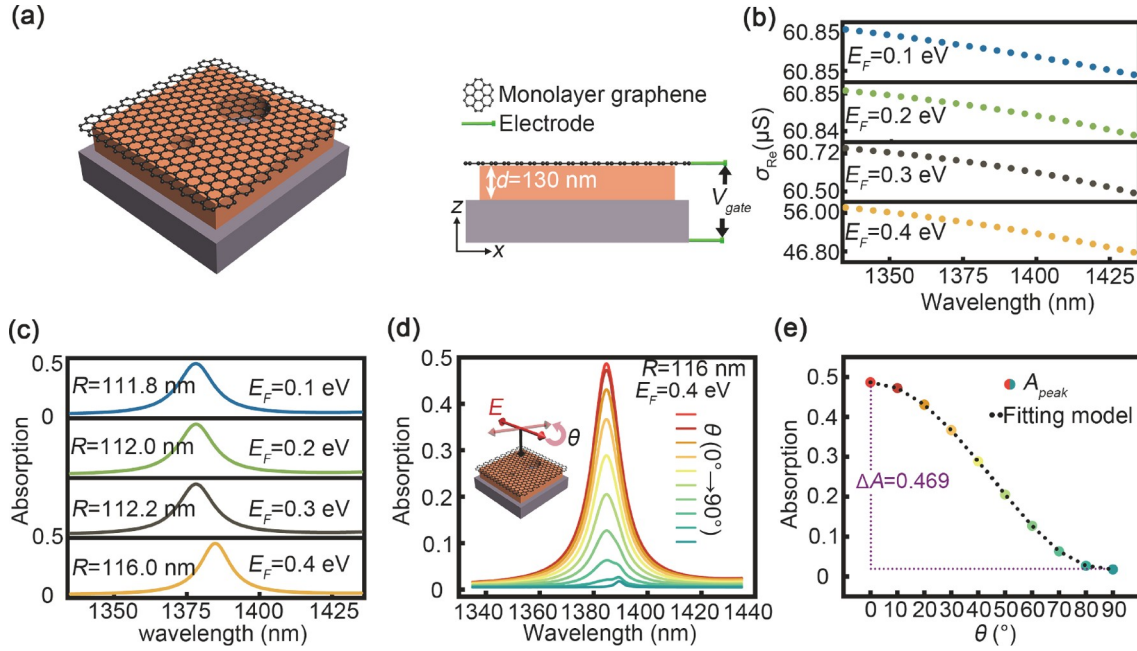


图 4 (网络版彩图) (a) 设计的石墨烯-超表面临界耦合系统的示意图, 单层石墨烯被放置在硅超表面的顶部. (b) 不同能级石墨烯的电导率值实部. (c) 不同能级($E_F=0.1, 0.2, 0.3$ 和 0.4 eV)石墨烯-超表面的临界耦合吸收光谱. (d) 临界耦合系统($R=116$ nm, $E_F=0.4$ eV)在入射光偏振角 θ 从 0° 到 90° 变化时的吸收光谱. (e) 图(d)中的最大吸收强度值下降曲线, 并拟合为三阶函数(光吸收调制效率: $\Delta A/0.5=93.8\%$)

Figure 4 (Color online) (a) Schematic diagram of graphene-metasurface critical coupling system (Monolayer graphene is placed on top of the whole structure). (b) The real part of conductivity values of four energy levels of graphene ($E_F=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ eV). (c) Critical coupling absorption spectra of graphene-metasurfaces with different energy levels. (d) Absorption spectra of the critically coupled system ($R=116$ nm, $E_F=0.4$ eV) at different polarization angles θ ($0^\circ-90^\circ$). (e) The decreasing curve of the peak absorption intensity in (d) and fitted as a third-order function (Light absorption modulation efficiency: $\Delta A/0.5=93.8\%$).

$$\sigma_{inter} = \frac{ie^2(\omega + 2i\Gamma)}{\pi\hbar} \int_0^\infty \frac{f_d(-\zeta) - f_d(\zeta)}{(\omega + 2i\Gamma) - 4\left(\frac{\zeta}{h}\right)^2} d\zeta, \quad (10)$$

$$f_d(\zeta) = \left[\exp\left(\frac{\zeta - E_F}{k_B T}\right) + 1 \right]^{-1}, \quad (11)$$

其中

$$\Gamma = \frac{ev_F^2}{2\mu E_F} \quad (12)$$

是散射率, 模型中的数量如下: $T=300$ K是温度, $N_g=1$ 是石墨烯层数, σ_{intra} 是带内电导率贡献, σ_{inter} 是带间电导率贡献, $v_F=c300^{-1}=10^6$ ms $^{-1}$ 是费米速度, $\mu=1$ m ^{2} (v·s) $^{-1}$ 是载流子迁移率, 并且 E_F 是石墨烯的费米能级. 有趣的是, 石墨烯在 $0.1-0.3$ eV波段下电导率的实部变化小于 0.35 , 其值不足以支持Mie谐振的分辨率, 可能导致这三种能级应用于可调谐吸收器中表现出相近的性质.

为了实现单模临界耦合吸收, 基于时间耦合模理论(TCMT), 我们研究了石墨烯-超表面双端口系统中

一个漏模的光吸收效率公式如下^[42-44]:

$$A = \frac{2\gamma\delta}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma + \delta)^2}, \quad (13)$$

其中 ω 是入射光的频率, ω_0 是结构的共振频率, γ 是辐射衰减率, δ 是耗散损耗率. 由于该谐振系统中单层石墨烯是唯一的有损耗介质^[45], 因此用MG的耗散损耗率来表示 δ . 当 $\gamma=\delta$ 且 $\omega=\omega_0$ 时, 谐振系统将满足临界耦合条件, 此时单个漏模具有理想最大50%光吸收.

在这项研究中, 本文考虑了4种不同能级的石墨烯-超表面谐振器. 并且, 在不改变结构参数的情况下, 通过施加外加电场来控制石墨烯的载流子浓度从而改变费米能级^[46]. 在图4(c)中, 呈现了四种系统的临界耦合吸收光谱, 我们发现, 较小的3个能级 ($0.1, 0.2, 0.3$ eV)的石墨烯-超表面谐振器在极其相近的破缺 R 下达到临界耦合条件, 这是由他们的电导率实部极度相似导致的. 而 0.4 eV的石墨烯-超表面光学谐振器在更大的破缺 R 处达到临界耦合, 这是由于石墨烯电导率

实部的减小, 导致耗散损耗率 δ 衰减, 因此, 增大结构的破缺 R 以降低系统的 γ 以满足临界耦合条件 $\gamma=\delta$.

前文已经证明了由于多极子散射功率模式依赖于入射光的偏振角, 谐振器中的激发将随着入射波的偏振变化而发生改变^[47,48]. 基于此机理, 以所提出的 $E_F=0.4$ eV, $R=116$ nm的临界耦合吸收体为例, 测试了其吸收光谱, 在图4(d)中, 我们给出了不同偏振角 θ 的平面波激发的吸收光谱, 偏振角 θ 范围从 $0^\circ-90^\circ$ (当 $\theta=0^\circ$ 时定义为TE入射, $\theta=90^\circ$ 时定义为TM入射). 结果表明, 在相同波长下, 吸收峰随 θ 的增大而严格衰减. 在TE入射下, 该单模二端口系统达到最大化的临界耦合吸收($A_{\max}=0.487$). 进一步分析了吸收峰的衰减行为, 结果如图4(e)所示, 并且在TE和TM入射下吸收峰的强度差 $\Delta A=0.469$. 为了展示吸收峰的衰减曲线, 我们将峰值吸收强度拟合为 θ 的三阶方程:

$$A_{\text{peak}} = 0.48687 + a\theta + b\theta^2 + c\theta^3, \quad (14)$$

其中系数 $a=0.03127$, $b=-0.02086$, $c=0.0013$.

3 应用讨论

一般来说, 通过BIC和准BIC机制的切换, 由于其

偏振敏感的性质, 可用于制作高效的光电探测器^[49,50]和高灵敏度光学传感器等^[51-53]. 基于我们所提出的石墨烯-超表面偏振调谐光吸收系统, 实现了光学数字“0-1”开关功能. 如图5(a), 临界耦合单元由具有不同半径空气孔($R=116$ nm)的纳米立方体周期性排列并沉积在玻璃基底上, 0.4 eV的石墨烯被平铺在整个结构的顶部, 并由法向入射的平面波激发. 将监视器放置在远离结构的正下方用于检测透射光的振幅以便监测数组的状态. 如图5(b)所示, 在原始入射情况下, 由于入射波的偏振方向(x 偏振, $\theta=0^\circ$)沿着非对称轴, 此时阵列被激发成具有局部场增强的qBIC模式促进石墨烯的光吸收效率带来最大化的临界耦合吸收, 表现出暗耦合, 我们将此状态定义为代码“0”. 而当改变入射波的偏振方向(y 偏振, $\theta=90^\circ$)时, 由于谐振模式的改变, 增强的石墨烯光吸收效果消失, 表现出明亮的透射, 将此状态定义为代码“1”. 根据这一原理, 我们可以在同一阵列中获得两个显著对比的模式, 而无需改变超表面的结构参数, 仅通过调整入射光的偏振方向, 从而实现光数字“0-1”开关功能.

此外, 基于此偏振调制功能, 本文还展示了一种新的qBIC超表面图像显示应用. 图5(c)展示了其图像显

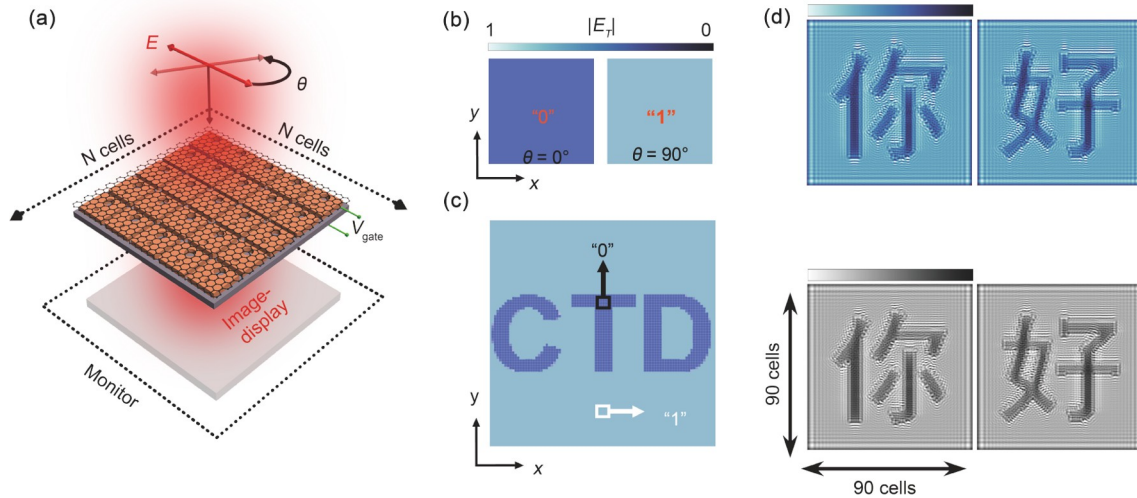


图 5 (网络版彩图) (a) 用于偏振调制“光学数字开关和图像显示”功能的石墨烯-超表面临界耦合系统示意图(由 $R=116$ nm和 $E_F=0.4$ eV的临界耦合单元组成). (b) 光学数字“0-1”开关功能(在 $\lambda=1384.82$ nm处, TE和TM入射下透射光的振幅图案分别具有显著的对比). (c) 图像显示功能设计过程示意图(“CTD”区域中的临界耦合单元按原始情况排列, 其他区域的临界耦合单元旋转 90°). (d) 石墨烯-超表面阵列显示不同汉字“你”“好”的性能(TE入射, $\lambda=1384.82$ nm)

Figure 5 (Color online) (a) Schematic diagram of the array used for the polarization modulation “optical digital switching and image display” function (consisting of a critical coupling unit with $R=116$ nm and $E_F=0.4$ eV). (b) Optical digital switching function: At $\lambda=1384.82$ nm, the amplitude patterns of transmitted light under x -polarized and y -polarized incidence have significant contrasts, respectively. (c) The design process of the image display function: the critical coupling cells in the “CTD” region are arranged according to the original situation, and the critical coupling cells in the other regions are rotated by 90° . (d) Performance of graphene-metasurface array displaying different Chinese characters ($\lambda=1384.82$ nm, x polarization).

示功能的设计过程, 基于实际需要, 可以自定义图像大小与显示内容, 将阵列中的单个晶胞视作一个像素点, 自定义的显示内容“CTD”区域中的晶胞按原始情况排列, 将其他区域的晶胞在 x - y 平面上旋转了 90° , 这使得他们在同一入射波偏振方向上实现不同谐振模式表现出具有显著明暗对比度的图案. 图5(d)展示了在临界耦合波长 $\lambda=1384.82$ nm处, 不同汉字在 90×90 个晶胞大小的阵列上清晰地呈现出来. 值得注意的是, 在模拟过程中将边界条件设置为完美匹配层(PML)以模拟实际的有限周期阵列.

值得一提的是, 研究表明通过施加单轴应变于石墨烯样品, 以平滑其表面的褶皱和波纹, 能够有效降低随机应变波动(RSFs), 这是导致电子散射的主要无序因素^[54]. 此方法对于维持石墨烯样品在实验中的稳定性能具有重要意义. 此外, Jin等人^[55]在近期研究中, 成功将单层石墨烯转移至超表面的顶层, 并提供了详

尽的制备方法. 这些成果为该研究在后续实验中的实际应用提供了理论支持.

4 结论

本文提出了一个在近红外区域支持qBIC的全介电超表面, 并将单层石墨烯引入到系统中组成临界耦合吸收系统. 由于qBIC提供的强的局部场增强可以显著增强光与物质相互作用, 从而增强石墨烯的光吸收效率. 通过优化该系统的结构参数和石墨烯的费米能级, 实现了临界耦合完全吸收. 此外, 仅通过调节入射波的偏振角便可以有效调节最大光吸收强度, 调制效率高达93.8%. 基于此偏振调制的临界耦合吸收单元, 实现了光学数字“0-1”开关和图像显示功能. 我们的研究可能为更加稳定和可靠的片上集成光学元器件提供理论指导, 从而促进光子集成电路的发展.

参考文献

- Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, 306: 666–669, arXiv: [cond-mat/0410550](#)
- Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*, 2008, 320: 1308
- Cai Y, Zhu J, Liu Q H. Tunable enhanced optical absorption of graphene using plasmonic perfect absorbers. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 043105
- Zeng S, Hu S, Xia J, et al. Graphene-MoS₂ hybrid nanostructures enhanced surface plasmon resonance biosensors. *Sens Actuators B Chem*, 2015, 207: 801–810
- Liu B, Yu W, Yan Z, et al. The light absorption enhancement in graphene monolayer resulting from the diffraction coupling of surface plasmon polariton resonance. *Nanomaterials*, 2022, 12: 216
- Qi Y P, Hu B B, Zhang X W, et al. Enhanced optical transmission of composite subwavelength rectangular-hole array based on metal silver thin-film (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 014201 [祁云平, 胡兵兵, 张雪伟, 等. 金属银膜复合亚波长矩形孔阵列的增强透射. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 014201]
- Mikheeva E, Claude J B, Salomoni M, et al. CMOS-compatible all-dielectric metalens for improving pixel photodetector arrays. *APL Photonics*, 2020, 5: 116105
- Deng Y, Wang X, Gong Z, et al. All-silicon broadband ultraviolet metasurfaces. *Adv Mater*, 2018, 30: 1802632
- Cui T, Bai B, Sun H. Tunable metasurfaces based on active materials. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1806692
- Yang Q, Chen X, Xu Q, et al. Broadband terahertz rotator with an all-dielectric metasurface. *Photon Res*, 2018, 6: 1056–1061
- Palermo G, Rippa M, Conti Y, et al. Plasmonic metasurfaces based on pyramidal nanoholes for high-efficiency SERS biosensing. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 43715–43725
- Ahmed R, Ozen M O, Karaaslan M G, et al. Tunable fano-resonant metasurfaces on a disposable plastic-template for multimodal and multiplex biosensing. *Adv Mater*, 2020, 32: 1907160
- Li R, Wang Z, Zhang Z, et al. Deep learning-based multicapturer SERS platform on plasmonic nanocube metasurfaces for multiplex detection of organophosphorus pesticides in environmental water. *Anal Chem*, 2022, 94: 16006–16014
- Marinica D C, Borisov A G, Shabanov S V. Bound states in the continuum in photonics. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 183902
- Hsu C W, Zhen B, Stone A D, et al. Bound states in the continuum. *Nat Rev Mater*, 2016, 1: 1–13

- 16 Fan K, Shadrivov I V, Padilla W J. Dynamic bound states in the continuum. *Optica*, 2019, 6: 169–173
- 17 Sadrieva Z, Frizyuk K, Petrov M, et al. Multipolar origin of bound states in the continuum. *Phys Rev B*, 2019, 100: 115303, arXiv: 1903.00309
- 18 Stoller M D, Magnuson C W, Zhu Y, et al. Interfacial capacitance of single layer graphene. *Energy Environ Sci*, 2011, 4: 4685–4689
- 19 Koshelev K, Bogdanov A, Kivshar Y. Meta-optics and bound states in the continuum. *Sci Bull*, 2019, 64: 836–842
- 20 Zhen B, Hsu C W, Lu L, et al. Topological nature of optical bound states in the continuum. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 257401, arXiv: 1408.0237
- 21 Overvig A, Yu N, Alù A. Chiral quasi-bound states in the continuum. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 073001, arXiv: 2006.05484
- 22 Romano S, Zito G, Torino S, et al. Label-free sensing of ultralow-weight molecules with all-dielectric metasurfaces supporting bound states in the continuum. *Photon Res*, 2018, 6: 726–733
- 23 Wang P, He F, Liu J, et al. Ultra-high- Q resonances in terahertz all-silicon metasurfaces based on bound states in the continuum. *Photon Res*, 2022, 10: 2743–2750
- 24 Gao E, Jin R, Fu Z, et al. Ultrawide dynamic modulation of perfect absorption with a Friedrich-Wintgen BIC. *Photon Res*, 2023, 11: 456–462
- 25 Masoudian Saadabad R, Huang L, Miroshnichenko A E. Polarization-independent perfect absorber enabled by quasibound states in the continuum. *Phys Rev B*, 2021, 104: 235405
- 26 Wen D, Cadusch J J, Fang Z, et al. Reconsidering metasurface lasers. *Nat Photonics*, 2021, 15: 337–338
- 27 Zhang H, Wang T, Tian J, et al. Quasi-BIC laser enabled by high-contrast grating resonator for gas detection. *Nanophotonics*, 2022, 11: 297–304, arXiv: 2105.08885
- 28 Yang J H, Huang Z T, Maksimov D N, et al. Low-threshold bound state in the continuum lasers in hybrid lattice resonance metasurfaces. *Laser Photon Rev*, 2021, 15: 2100118, arXiv: 2007.03233
- 29 Sayanskiy A, Kupriyanov A S, Xu S, et al. Controlling high- Q trapped modes in polarization-insensitive all-dielectric metasurfaces. *Phys Rev B*, 2019, 99: 085306, arXiv: 1811.11396
- 30 Hasebe H, Sugimoto H, Hinamoto T, et al. Coupled toroidal dipole modes in silicon nanodisk metasurface: Polarization independent narrow band absorption and directional emission. *Adv Opt Mater*, 2020, 8: 2001148
- 31 Liu S D, Fan J L, Wang W J, et al. Resonance coupling between molecular excitons and nonradiating Anapole modes in silicon nanodisk-J-aggregate heterostructures. *ACS Photonics*, 2018, 5: 1628–1639
- 32 Chen X, Zhang Y, Cai G, et al. All-dielectric metasurfaces with high Q -factor Fano resonances enabling multi-scenario sensing. *Nanophotonics*, 2022, 11: 4537–4549
- 33 Zhou C, Huang L, Jin R, et al. Bound states in the continuum in asymmetric dielectric metasurfaces. *Laser Photon Rev*, 2023, 17: 2200564
- 34 Limonov M F, Rybin M V, Poddubny A N, et al. Fano resonances in photonics. *Nat Photon*, 2017, 11: 543–554
- 35 Koshelev K, Lepeshov S, Liu M, et al. Asymmetric metasurfaces with high- Q resonances governed by bound states in the continuum. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 193903, arXiv: 1809.00330
- 36 Alaei R, Rockstuhl C, Fernandez-Corbaton I. An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation. *Optics Commun*, 2018, 407: 17–21, arXiv: 1701.00755
- 37 Kivshar Y, Miroshnichenko A. Meta-optics with Mie resonances. *OPN*, 2017, 28: 24–31
- 38 Kruk S, Kivshar Y. Functional meta-optics and nanophotonics governed by Mie resonances. *ACS Photonics*, 2017, 4: 2638–2649
- 39 Al-Ani I A M, As'Ham K, Huang L, et al. Enhanced strong coupling of TMDC monolayers by bound state in the continuum. *Laser Photon Rev*, 2021, 15: 2100240
- 40 Sang T, Dereshgi S A, Hadibrata W, et al. Highly efficient light absorption of monolayer graphene by quasi-bound state in the continuum. *Nanomaterials*, 2021, 11: 484
- 41 Sang T, Qi H, Wang X, et al. Ultrabroadband absorption enhancement via hybridization of localized and propagating surface plasmons. *Nanomaterials*, 2020, 10: 1625
- 42 Li Q, Lu J, Gupta P, et al. Engineering optical absorption in graphene and other 2D materials: Advances and applications. *Adv Opt Mater*, 2019, 7: 1900595
- 43 Ziegler K. Minimal conductivity of graphene: Nonuniversal values from the Kubo formula. *Phys Rev B*, 2007, 75: 233407
- 44 Fan S, Suh W, Joannopoulos J D. Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20: 569–572
- 45 Xiao S, Liu T, Wang X, et al. Tailoring the absorption bandwidth of graphene at critical coupling. *Phys Rev B*, 2020, 102: 085410

- 46 Avetisyan A A, Partoens B, Peeters F M. Electric-field control of the band gap and Fermi energy in graphene multilayers by top and back gates. [Phys Rev B](#), 2009, 80: 195401
- 47 Zhou M, You S, Xu L, et al. Bound states in the continuum in all-dielectric metasurfaces with scaled lattice constants. [Sci China-Phys Mech Astron](#), 2023, 66: 124212
- 48 Feng S, Liu T, Chen W, et al. Enhanced sum-frequency generation from etchless lithium niobate empowered by dual quasi-bound states in the continuum. [Sci China-Phys Mech Astron](#), 2023, 66: 124214, arXiv: [2305.18693](#)
- 49 Hu Y, Wang X, Luo X, et al. All-dielectric metasurfaces for polarization manipulation: principles and emerging applications. [Nanophotonics](#), 2020, 9: 3755–3780
- 50 Shi H, Zhu X, Zhang S, et al. Plasmonic metal nanostructures with extremely small features: new effects, fabrication and applications. [Nanoscale Adv](#), 2021, 3: 4349–4369
- 51 Mitrofanov O, Hale L L, Vabishchevich P P, et al. Perfectly absorbing dielectric metasurfaces for photodetection. [APL Photonics](#), 2020, 5: 101304
- 52 Tian J, Luo H, Li Q, et al. Near-infrared super-absorbing all-dielectric metasurface based on single-layer germanium nanostructures. [Laser Photon Rev](#), 2018, 12: 1800076
- 53 Chen W, Li M, Zhang W, et al. Dual-resonance sensing for environmental refractive index based on quasi-BIC states in all-dielectric metasurface. [Nanophotonics](#), 2023, 12: 1147–1157
- 54 Wang L, Makk P, Zihlmann S, et al. Mobility enhancement in graphene by in situ reduction of random strain fluctuations. [Phys Rev Lett](#), 2020, 124: 157701, arXiv: [1909.13484](#)
- 55 Jin R, Huang L, Zhou C, et al. Toroidal dipole BIC-driven highly robust perfect absorption with a graphene-loaded metasurface. [Nano Lett](#), 2023, 23: 9105–9113

Optical absorption modulation and image display capabilities of all-dielectric metasurface featuring integrated graphene

NIE GuoZheng^{1,3*}, XIE MingXin¹, LI ZongLin³, CHEN ZhiQuan¹, LI DeQiong^{2*},
XU Hui¹ & LAN LinFeng⁴

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

² School of Science, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China;

³ School of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

⁴ Luminescence Materials and Devices National Key Laboratory, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

*Corresponding authors (NIE GuoZheng, email: gzhnie@hnust.edu.cn; LI DeQiong, email: ldqmath@hutb.edu.cn)

Perfect absorption in monolayer two-dimensional (2D) materials is critical for the next generation of on-chip devices. However, absorption mechanisms based on surface plasmon polaritons (SPPs) and Fabry-Perot cavities (FPCs) are limited by tuning capability, low stability, and complex fabrication processes. Bound states in the continuum (BICs) are considered ideal platforms for enhancing light-matter interactions. In this context, we propose an all-dielectric metasurface that supports symmetry-protected bound states in the continuum (SP-BIC) in the near-infrared spectral region. By breaking the symmetry of the metasurface, it is transformed into the quasi-bound state in the continuum (qBIC) with exceptional quality factors (Q -factor), while monolayer graphene is introduced into the system to form a critically coupled absorption system. Remarkably, we achieved a modulation efficiency of 93.8% for light absorption by solely controlling the polarization angle of the incident wave without altering the structural parameters. Based on this graphene-metasurface ideal absorber, optical digital “0-1” switching and metasurface image display functionalities have been successfully achieved, and they hold promise to provide theoretical guidance for next-generation integrated optical components on chips.

bound states in the continuum, grapheme, optical absorption modulation, image display

PACS: 78.40.-q, 78.66.-n, 42.25.-p, 42.70.-a

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0181](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0181)