

石墨烯 /2D-hBN 异质结构强耦合机制融入半导体物理课程的教学实践

黄加耀, 黄春栩, 谢嘉宁*

佛山大学, 物理与光电工程学院, 广东 佛山 528225

DOI: 10.61369/ETR.2026120002

摘 要 : 半导体物理是光源与照明、光电信息科学与工程等专业本科人才培养中的核心课程, 对于学生建立半导体能带结构、载流子输运规律和界面物理等基本理论框架具有重要作用。但在实际教学过程中, 普遍存在理论内容抽象、知识体系跨度较大以及课堂教学与科研前沿结合不够紧密等问题。针对上述问题, 本文以石墨烯 / 二维 hBN 异质结构中的强耦合机制为切入点, 探索将前沿科研成果融入半导体物理课程教学的改革路径。结合相关研究进展, 构建了理论讲解、数值计算与仿真实践于一体的教学内容体系, 将 MATLAB 数值计算和严格耦合波分析 (RCWA) 方法引入课程教学, 形成“基础理论—前沿案例—仿真分析—能力提升”的教学实施模式。同时, 借助学习分析方法, 对教学改革实施效果进行系统评价。结果表明, 该教学实践有助于增强学生的工程实践能力、科研素养和创新意识, 为半导体物理课程教学改革提供了可借鉴的思路与参考。

关 键 词 : 半导体物理; 2D-hBN 异质结构; 强耦合机制; 严格耦合波分析方法

Integrating Recent Advances into Semiconductor Physics Education: A Case Study of Strong Coupling in Graphene/2D-hBN Heterostructures

Huang Jiayao, Huang Chunxu, Xie Jianing*

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong 528225

Abstract : Semiconductor Physics is a core course in the undergraduate training of majors such as Light Sources and Illumination and Optoelectronic Information Science and Engineering. It plays an essential role in helping students establish fundamental theoretical frameworks, including semiconductor band structures, carrier transport mechanisms, and interface physics. However, in actual teaching practice, there are still several common problems, such as the abstract nature of theoretical content, the scope of the knowledge system, and the insufficient integration of classroom teaching with frontier scientific research. To address these issues, this paper takes the strong coupling mechanism in graphene/two-dimensional hBN heterostructures as an entry point and explores a reform pathway for integrating frontier research achievements into the teaching of Semiconductor Physics. Based on relevant research progress, an integrated teaching content system combining theoretical instruction, numerical calculation, and simulation practice was constructed. MATLAB-based numerical computation and the rigorous coupled-wave analysis (RCWA) method were introduced into the course, thereby forming a teaching implementation model of "fundamental theory - frontier cases - simulation analysis - competency improvement." Meanwhile, with the aid of learning analytics methods, the effectiveness of the teaching reform was systematically evaluated. The results show that this teaching practice helps enhance students' engineering practice ability, scientific research literacy, and innovation awareness, and provides useful ideas and references for the reform of Semiconductor Physics teaching..

Keywords : Semiconductor physics; 2D-hBN heterostructure; strong coupling mechanism; rigorous coupled wave analysis method

基金项目:

广东省质量工程课程教研室项目: 光学与照明设计课程群虚拟教研室 (粤教高函〔2024〕30号 No.302);

广东省质量工程产教融合实践教学基地项目: 半导体光学工程产教融合实践教学基地 (粤教高函〔2023〕4号) No.97);

广东省示范性教师教育实践基地项目: 佛山科学技术学院-顺德莘村中学教师教育实践基地 (粤教高函〔2023〕12号)。

作者简介:

黄加耀 (1993—), 男, 汉族, 广东佛山人, 博士, 讲师。研究方向: 微纳光学。

黄春栩 (2005—), 女, 汉族, 广东茂名, 本科, 助教。研究方向: 光与物质相互作用。

谢嘉宁 (1971—), 女, 汉族, 广东潮州人, 博士, 教授。研究方向: 光与物质相互作用。

引言

在当前全球科技竞争日益激烈的背景下,半导体产业作为国家科技自主创新的核心领域,战略地位愈加凸显。随着中美科技竞争的加剧,我国在高端芯片、先进光电器件等关键领域面临“卡脖子”风险,引发了全社会对集成电路及材料领域自主可控能力的高度关注。在此背景下,教育部提出“新工科”发展战略,强调以产业需求为导向,构建以“工程+前沿+实践+交叉”为核心的教育教学新体系,全面提升人才培养质量,尤其对高层次复合型科技创新人才的培养提出更高要求^[1]。半导体物理课程涵盖了半导体能带结构、载流子输运、p-n 结特性等内容,是连接微电子、材料物理和器件工程的重要桥梁。然而,由于课程内容高度抽象、理论推导复杂,传统教学模式以公式讲解与板书推演为主,缺乏实践环节与应用场景。尤其是在当前学时紧缩和内容压缩的现实下,课程面临“两难”困境:既要完成系统性的理论教学,又要兼顾前沿应用和工程实践的拓展。为此,基于“以学生为中心、以成果为导向”(OBE)理念的教学改革被广泛倡导,强调从学生未来发展的需求出发,构建“知识—能力—素养”协同发展的完备教学体系^[2]。石墨烯/二维六方氮化硼(2D-hBN)异质结构作为近年来材料科学的研究热点,因其在光子、声子、等离激元等耦合机制中的优异性能而被广泛应用于红外热辐射调控、纳光子器件以及分子传感等前沿领域^[3]。将石墨烯/2D-hBN 结构的耦合调控机制引入半导体物理课程,不仅契合学科发展前沿,也有助于激发学生的科研兴趣与问题导向意识。

基于上述背景,本文提出以“石墨烯/2D-hBN 异质结构中强耦合机制”为教学案例。在教学实施上,依托 MATLAB 平台,引导学生学习如何通过复杂介电函数建模、严格耦合波分析法(Rigorous Coupled-Wave Analysis, RCWA)等方法进行红外频域内的电磁响应计算与调控机制模拟。本文的研究目标具体如下:(1)在半导体物理课程中引入石墨烯/二维 hBN 异质结构中的强耦合机制,构建融合前沿科研成果的教学模块;(2)设计结合 MATLAB 数值计算与严格耦合波分析(RCWA)方法的模拟仿真教学环节,提升学生的工程应用能力与科研素养;(3)通过修改 2D-hBN 原子层数,引导学生开展参数调控与结果分析,增强其实验设计与科研探索能力。

一、石墨烯/2D-hBN 异质结构的物理基础与强耦合机制

石墨烯在中红外与太赫兹频段支持强等离激元而备受关注^[4-6]。石墨烯中的表面等离激元具有高度的局域性和波长可调性,波长可达激发光波长的1/100以下,有效突破传统光学系统的衍射极限。这种显著的场压缩与局域增强特性为发展高灵敏度红外探测器件、光热调控元件及亚波长尺度的集成光路提供了坚实的物理基础^[7,8]。从电磁响应建模角度来看,石墨烯的光学响应可通过其面电导率进行描述。依据 Kubo 公式,石墨烯的电导率由“Drude 项”和“互补跃迁项”构成,反映其载流子浓度、温度与频率的函数依赖性^[9]。通过引入石墨烯相关内容,可有效拓展学生对二维材料电子结构与光学响应关系的理解,强化其对前沿半导体材料在光电应用中的工程认知与建模能力^[10]。

2D-hBN 是一种具有宽禁带、高热稳定性和极性键结构的二维绝缘体,其中红外频段支持声子极化激元,特别是“双曲型声子激元”因其能在亚波长尺度内高效传播而广泛用于红外纳米光学^[11]。2D-hBN 的各向异性介电常数导致其在两个红外透射窗口(称为 Reststrahlen 带)内呈现出典型的双曲色散行为,分别为金属型($\text{Re}(\epsilon)<0$)与介质型($\text{Re}(\epsilon)>0$)。这使得 hBN 支持大量的高波矢声子激元模式,能够以极低损耗在亚波长尺度内传播并被局域,从而显著增强光与物质的相互作用^[12]。在教学过程中引入 2D-hBN 材料的各向异性介电张量特性及其双曲色散行为的相关分析,可进一步培养学生在新型光电功能材料分析中的理论基础与工程感知能力^[13]。

为开展石墨烯/2D-hBN 异质结构中等离激元与声子极化激元强耦合行为的物理建模以及光谱分析,需要依托具备高精度频域求解能力的电磁数值方法提供支持。严格耦合波分析法(RCWA)作为一类经典的半解析型算法,为周期性微纳结构中的电磁波传

播问题提供了高效而准确的求解路径^[14]。该算法为半解析型数值方法可高效求解 Maxwell 方程,适用于周期性微纳结构的反射率与电场分布计算。仿真中所采用的开源代码由 Zhuomin Zhang 教授团队开发(<http://zhang-nano.gatech.edu/>),具有良好的资源开放性,算法免费提供且为使用者提供算法说明介绍,便于高校在“新工科”背景下推广应用。

二、实验具体步骤——石墨烯/2D-hBN 异质结构模型的构建

为了系统性探究石墨烯/2D-hBN 异质结构在中红外波段下的极化激元强耦合行为,本实验依托 RCWA 数值方法作为建模与仿真的核心工具。首先需基于材料本征参数,完成二维材料在频域内的介电常数与电导率响应建模;随后结合 RCWA 对周期性结构电磁行为的精确求解能力,构建具备多层异质特征与可调控结构参数的仿真模型。通过该流程,学生可在 MATLAB 平台上完成从物理模型设定、结构划分到光谱响应计算的全过程模拟,深刻理解等离激元与声子极化激元之间的能量耦合机制与调控路径。该环节不仅强化了电磁理论与材料物理的融合教学,也促进了学生数值建模与科研能力的协同提升,契合“新工科”背景下课程内容与教学方法的双重改革目标。

石墨烯作为一种具备金属态响应特征的二维碳基材料,具备线性色散关系与高迁移率载流子的物理特征,其中红外波段表现出类似金属的光学响应行为。与传统金属不同,石墨烯的光学性质并不源自其体积电子密度,而是由其频率相关电导率 $\sigma(\omega)$ 所决定。该电导率反映了其能带结构与载流子动力学行为之间的耦合机制,包含两个部分:Drude 项(描述自由载流子贡献)与互补项(描述价带至导带跃迁),整体表达形式源自 Kubo 公式^[8]。

[9], [15]:

$$\begin{aligned}\sigma_G(\omega) &= \sigma_{intra}(\omega) + \sigma_{inter}(\omega) \\ &= i \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})} \left[\mu_c + 2 \ln \left(\exp \left(-\frac{\mu_c}{k_B T} \right) + 1 \right) \right] \\ &\quad + i \frac{e^2}{4\pi \hbar} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - \hbar(\omega + i\tau^{-1})}{2|\mu_c| + \hbar(\omega + i\tau^{-1})} \right]\end{aligned}\quad (1)$$

基于上述理论, 学生 MATLAB 中设温度 $T=300\text{ K}$ 、费米能级 $\mu_c=0.28\text{ eV}$ 与电子弛豫时间 $\tau=10^{-13}\text{ s}$ 等参数计算得到石墨烯在中红外区域下的复电导率随频率变化曲线。再进一步引入石墨烯等效相对介电常数表达式^[9]

$$\varepsilon_{gra} = 1 + i \frac{\sigma_G(\omega)}{\varepsilon_0 \omega} \quad (2)$$

其中石墨烯的等效厚度通常取为 $t \approx 0.34\text{ nm}$, 对应于单层碳原子的垂直空间尺度。通过该建模过程, 学生不仅能够理解石墨烯在电场作用下的频率响应机制, 还可为后续发射率仿真提供精确的材料输入参数。

依据振动方向与波矢关系, 2D-hBN 中的光学声子可分为两类, 分别是横向光学声子 (Transverse Optical phonons, TO phonons) 和纵向光学声子 (Longitudinal Optical phonons, LO phonons)。2D-hBN 具有类似于石墨烯的层状结构, 这导致声子模式分为面内声子模式和面外声子模式^[16]。面内声子模式是沿着 2D-hBN 层平面内部的振动模式, 主要反映了 2D-hBN 层内原子的集体振荡, 因此对平面光学特性起主要作用^[12]。为了对 2D-hBN 中的声子模式的各向异性进行建模, 我们首先选择具有两个中红外 Reststrahlen 波段的 Lorentz 模型, 其介电函数表示如下^[17]:

$$\varepsilon_{hBN,\psi} = \varepsilon_{\infty,\psi} \left(1 + \frac{\omega_{LO,\psi}^2 - \omega_{TO,\psi}^2}{\omega_{TO,\psi}^2 - i\gamma_\psi \omega - \omega^2} \right) \quad (3)$$

$\psi = \parallel, \perp$ 对应于面内声子模式和面外声子模式, 其分别贡献面内和面外的介电函数。 $\varepsilon_{\infty,\parallel} = 2.95$ 和 $\varepsilon_{\infty,\perp} = 4.87$ 是面内声子模式和面外声子模式的高频介电常数。 $\gamma_\parallel = 4\text{ cm}^{-1}$ 和 $\gamma_\perp = 5\text{ cm}^{-1}$ 是面内声子模式和面外声子模式的阻尼系数。电子屏蔽和库仑相互作用导致面内和面外声子模式分别分离为纵向光学声子模式和横向光学声子模式, 因此 $\omega_{TO,\parallel} = 780\text{ cm}^{-1}$ 和 $\omega_{LO,\parallel} = 830\text{ cm}^{-1}$ 代表面内纵向光学声子和面内横向光学声子的谐振频率, 而 $\omega_{TO,\perp} = 1370\text{ cm}^{-1}$ 和 $\omega_{LO,\perp} = 1610\text{ cm}^{-1}$ 则是面外纵向光学声子和面外横向光学声子的谐振频率^[18]。我们可以利用这个模型计算其介电函数的实部和虚部, 从而得到吸收谱、反射谱等特征峰。

完成石墨烯与 2D-hBN 的频率响应建模后, 学生依照结构图搭建异质结构模型, 完成异质结构的物理构建与仿真输入。如图 1 所示, 该异质结构由四部分组成: 顶部为石墨烯纳米带, 中间为原子层级 hBN 薄膜, 隔离层为 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 MgF_2 (作为低损红外基底材料), 底部为反射金属 Ag 基底^[19,20]。其中石墨烯的厚度 $t_G=3.4\text{ }\text{\AA}$, hBN 厚度 $t_{hBN}=3.4\text{ }\text{\AA}$, $\sigma(\omega)$ 依据 Kubo 公式计算, 考虑费米能 μ_c 、电荷迁移率 μ 与费米速度 v_F 等参数。其中具体数值设定为: 费米能 $\mu_c=0.28\text{ eV}$ 、电荷迁移率 $\mu=10^4\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 、费米速度 $v_F=10^6\text{ m/s}$ ^[9, 21]。结构尺寸设

计方面, 周期 Λ 设定为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$, 石墨烯纳米带宽度 W_G 在 $0.02\text{--}0.05\text{ }\mu\text{m}$ 之间的调节以引导模式调控, hBN 层数 N 在 $1\text{--}9$ 之间可变, 用于研究原子层数对耦合强度与模式演化的影响^[8,10,22]。通过该仿真任务, 学生能够全面理解材料本征参数如何影响异质结构的光谱响应, 掌握二维材料异质结建模的流程, 为其后续在光子晶体、等离激元调控及半导体物理研究中的深入学习与科研实践奠定坚实基础。

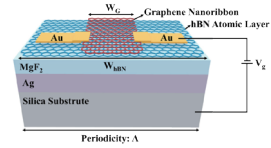


图 1. 石墨烯/2D-hBN 异质结构模型图^[23]

为帮助学生掌握基于 MATLAB 平台构建石墨烯/2D-hBN 异质结构的数值建模方法, 教师在教学过程中系统讲解如何正确调用 RCWA 算法编写结构仿真程序, 其代码如图 2 所示。每次循环迭代均包含以下五个核心计算步骤: (1) 几何参数设定: 当前循环下的光栅条带宽度从 Width_dd(L) 提取。结构共包含三层材料, 自上而下依次为石墨烯、hBN 与 MgF_2 , 结构周期统一设定为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。(2) 光栅结构构建: width 用于设置各层光栅的条带宽度, 其中第一层为变化参数, 后两层为完全填充。各层的填充因子以条带所占周期长度的归一化比例表示, 通过定义条带左端起始位置为 0, 右端为填充因子, 实现周期性分布的结构构建。

(3) 电磁参数与初始化: 为保持仿真环境的一致性, 入射角设为 0 度。材料介电常数在主程序中预定义, 分别对应于金属层 e_d、介质层 e_d 和入射区域 e。此阶段同步初始化用于存储反射率与透射率的空矩阵 Ref 和 Tran。(4) RCWA 主函数调用: 主程序使用 TM 极化模式, 调用封装好的多层 RCWA 主函数, 求解各波长条件下的反射率与透射率。该函数内部依次完成傅里叶变换矩阵构建、边界匹配条件处理与特征值问题求解, 以获得完整的光谱响应特性。(5) 发射率计算与存储: 根据能量守恒公式, 假设无吸收或散射损耗, 发射率可由 $\text{Emissivity_N}(L, :) = 1 - \text{Ref}$ 得出, 并存入对应矩阵中, 用于形成二维参数-波长图谱。最终, 发射率矩阵 Emissivity_N 将作为二维色图绘制基础, 直观展示结构参数对红外发射特性的调控能力。

```
Num_ord = 50; % 设置 RCWA 中傅里叶展开的最大衍射级数
j=1;
plot_num=100;% 扫描步数, 即不同结构参数设置的数量
Emissivity_N = zeros(plot_num + 1, length(lambda));
% 预分配发射率矩阵, 用于存储每次扫描的结果
% 设置扫描参数范围: 光栅宽度 H 从 0.0 μm 扫描至 0.05 μm
Width_start=0.0;
Width_end=0.05;
Width_dd=Width_start:(Width_end-Width_start)/plot_num:Width_end;
% 构建光栅宽度的等间距取值向量
% 启动并行循环, 遍历每组光栅宽度
parfor L=1:1:plot_num+1
L % 输出当前迭代步数, 用于调试与进度监控
width_dd=Width_dd(L); % 当前循环下的光栅宽度参数
d1 = [0.34e-3 3*0.34e-3 1.4]; % 定义结构中各层厚度 (单位: μm)
N = length(d1); % 层数 N, 用于多层结构构建
```



```
Period = [0.1,0.1,0.1]; % 各层结构的周期设置（单位： $\mu\text{m}$ ）
width = [Width_dd(L) Period(1) Period(1)];
% 设置各层光栅条带宽度（单位： $\mu\text{m}$ ）
psi = width/Period(1); % 计算各层的填充因子
f1 = [0 0 0]; % 设置金属条左端归一化起始位置
f2 = [psi]; % 设置金属条右端归一化终止位置
Ref = zeros(size(lambda)); % 初始化反射率结果数组（与波长维度一致）
Tran = zeros(size(lambda)); % 初始化透射率结果数组（与波长维度一致）
% 调用 RCWA 主函数，计算当前波长下的反射率与透射率（TE/TM 模式）
[Ref(ind), Tran(ind)] = RCWA_Multi_TM(N, e_m, e_d, f1, f2, Period,
d1, e, lambda(ind), theta, Num_ord);
end
Emissivity_N(L,:) = 1 - Ref; % 计算当前参数下的发射率
End
```

图2. 石墨烯/2D-hBN 异质结构建模逻辑代码

三、实验具体结果及其分析——石墨烯/2D-hBN 异质结构强耦合

如图3所示，为验证石墨烯/2D-hBN 异质结构中极化激元强耦合行为的建模结果，本节基于 RCWA 方法所输出的发射率和吸收率图像，围绕强耦合体系的典型特征进行分析。这些现象体现了石墨烯支持的表面等离激元与 hBN 中 TO 和 LO 光学声子模式之间在频域和空间中的能量交换机制^[13]。上述特征在光谱响应中表现为多峰吸收、带隙分裂与模式漂移，能够作为判断系统是否成功进入强耦合区的判据^[24]。在图 3(a) 中，通过调节 hBN 层的厚度至其为零，仅保留石墨烯光栅，从而获得石墨烯单模式激发下的仿真结果。该结构在发射率色图中呈现出一条随石墨烯带宽增加而向长波方向移动的高强度色带，对应于石墨烯支持的 SPPs 模式。图 3(b) 展示了该条件下的发射率色图，其中一条固定不变的高发射率窄带出现在波长 $\lambda \approx 7.3 \mu\text{m}$ 附近。图 3(c) 展示了石墨烯/2D-hBN 异质结构在中红外波段下的强耦合仿真结果。通过引入石墨烯化学势作为电学调控维度，能够实现对耦合行为的动态调节，其仿真结果如图 3(d) 所示。图中显示，随着化学势从 0.1 eV 增加至 0.7 eV，石墨烯所支持的 SPPs 模式逐渐由低频向高频漂移^[9]。从教学角度来看，不仅为学生提供了直观理解材料参数对极化激元耦合行为影响的视觉平台，还有助于其掌握“结构层数 - 介电属性 - 耦合响应”之间的物理调控逻辑。

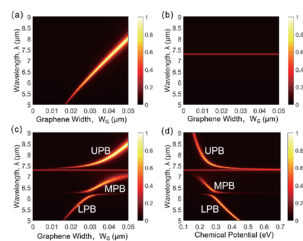


图3. 极化激元耦合行为的光吸收谱图（a）单层石墨烯；（b）单层2D-hBN；（c）石墨烯宽度调控下石墨烯/2D-hBN 异质结构；（d）化学势调控下的石墨烯/2D-hBN 异质结构

四、结语

本教学实践以“石墨烯/2D-hBN 异质结构中的极化激元强

耦合行为”为核心载体，将前沿光电子研究成果有机融入半导体物理课程体系之中。学生在 MATLAB 平台上通过使用 RCWA 算法，完成了从电导率建模到频域光谱响应分析的全过程，深入理解了光学参数对耦合强度、模式劈裂与带宽调控等物理机制的影响。本案例不仅强化了学生对材料本征特性、结构调控参数与模式演化之间相互关系的认知，也有效提升了其跨学科建模能力与数值仿真素养。本教学模式为半导体物理类课程的教学改革与研究导向型人才培养提供了可推广的范式与实践参考。

参考文献

- [1] 李安明, 张红卫, 王俊利, 唐亚楠, 等. "新工科"背景下地方应用型高校"半导体物理"课程教学改革研究[J]. 工业和信息化教育, 2024: 11-15.
- [2] 卢宏, 张玉亭. 基于 OBE 理念的'半导体物理学'多元化教学模式改革[J]. 科教文汇, 2022: 45-48.
- [3] A. T. Costa, M. I. Vasilevskiy, J. Fernández-Rossier, and N. M. R. Peres, "Strongly Coupled Magnon - Plasmon Polaritons in Graphene-Two-Dimensional Ferromagnet Heterostructures," Nano Lett., pp. 4510 - 4515, 2023.
- [4] Y. Wu et al., "Emerging probing perspective of two-dimensional materials physics: terahertz emission spectroscopy," Light Sci. Appl., pp. 146, 2024.
- [5] T. Yang, G.-Q. Wang, Y.-Q. Dai, X.-H. Zheng, X.-J. Ye, and C.-S. Liu, "Two-Dimensional TOD-Graphene in a Honeycomb - Kagome Lattice: A High-Performance Anode Material for Potassium-Ion Batteries," J. Phys. Chem. C, pp. 9413 - 9421, 2024.
- [6] A. K. Geim and K. S. Novoselov, "The rise of graphene," Nat. Mater., pp. 183 - 191, 2007.
- [7] J. Olivo, H. Ferrari, and M. Cuevas, "Surface recoil force on dielectric nanoparticle enhancement via graphene acoustic surface plasmon excitation: non-local effect consideration," Opt. Lett., pp. 1249, 2024.
- [8] H. Lu, X. Gan, D. Mao, and J. Zhao, "Graphene-supported manipulation of surface plasmon polaritons in metallic nanowaveguides," Photonics Res., pp. 162, 2017.
- [9] G. W. Hanson, "Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene," J. Appl. Phys., 2008.
- [10] Y. M. Qing, H. F. Ma, and T. J. Cui, "Theoretical Analysis of Tunable Multimode Coupling in a Grating-Assisted Double-Layer Graphene Plasmonic System," ACS Photonics, pp. 2884 - 2893, 2019.
- [11] M. Chen et al., "Van der Waals isotope heterostructures for engineering phonon polariton dispersions," Nat. Commun., pp. 4782, 2023.
- [12] K. Zhang, Y. Feng, F. Wang, Z. Yang, and J. Wang, "Two dimensional hexagonal boron nitride (2D-hBN): synthesis, properties and applications," J. Mater. Chem. C, pp. 11992 - 12022, 2017.
- [13] H. Arianfar, J. Wu, S. Juodkazis, and D. J. Moss, "Optical Analogs of Rabi Splitting in Integrated Waveguide - Coupled Resonators," Adv. Phys. Res. (2023).
- [14] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, "Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction," J. Opt. Soc. Am., pp. 811, 1981.
- [15] K. Ziegler, "Minimal conductivity of graphene: Nonuniversal values from the Kubo formula," Phys. Rev. B, pp. 233407, 2007.
- [16] A. Kumar, D. Solanki, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. K. Sood, and A. Das, "Interlayer Phonon Coupling and Enhanced Electron - Phonon Interactions in Doubly Aligned hBN/Graphene/hBN Heterostructures," ACS Nano, pp. 16415 - 16423, 2025.
- [17] B. Gil, G. Cassabois, R. Cusco, G. Fugallo, and L. Artus, "Boron nitride for excitonics, nano photonics, and quantum technologies," Nanophotonics, pp. 3483 - 3504, 2020.
- [18] B. Zhao, J.-H. Song, M. Brongersma, and S. Fan, "Atomic-Scale Control of Coherent Thermal Radiation," ACS Photonics, pp. 872 - 878, 2021.
- [19] B. Zhao and Z. M. Zhang, "Strong Plasmonic Coupling between Graphene Ribbon Array and Metal Gratings," ACS Photonics, pp. 1611 - 1618, 2015.
- [20] Y. Shi, W. Li, A. Raman, and S. Fan, "Optimization of Multilayer Optical Films with a Memetic Algorithm and Mixed Integer Programming," ACS Photonics, pp. 684 - 691, 2018.
- [21] Y. M. Qing, H. F. Ma, and T. J. Cui, "Investigation of strong multimode interaction in a graphene-based hybrid coupled plasmonic system," Carbon N. Y. pp. 596 - 602, 2019.
- [22] L. Qiu, D. Li, and H.-M. Cheng, "Structural Control of Graphene-Based Materials for Unprecedented Performance," ACS Nano, pp. 5085 - 5092, 2018.
- [23] J. Huang, F. Deng, F. Ye, H. Y. Fu, S. Zhang, and Q. Li, "Strong plasmon - phonon coupling for graphene/hBN thermal emitter atomic system," Carbon N. Y., pp. 118210, 2023.
- [24] D. S. Dovzhenko, S. V. Ryabchuk, Y. P. Rakovich, and I. R. Nabiev, "Light - matter interaction in the strong coupling regime: configurations, conditions, and applications," Nanoscale, pp. 3589 - 3605, 2018.