

综述

波导集成的碳基红外探测器研究进展*

吕晓炜¹⁾²⁾ 张家振¹⁾ 陈俊宇¹⁾ 刘子卓¹⁾ 赵文超²⁾
吴秋诗³⁾ 徐浩^{1)†} 陈效双^{4)‡}

1) (电子科技大学物理学院, 成都 611731)

2) (湖州学院电子信息学院, 湖州 313000)

3) (北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

4) (中国科学院上海技术物理研究所, 红外科学与技术全国重点实验室, 上海 200083)

(2025年6月25日收到; 2025年8月12日收到修改稿)

碳基材料因其独特且优异的光、热、电、磁、力等物理特性在红外光电探测领域备受关注, 这些特性使其在通信、军事、成像、能源、生物等领域具有广泛的应用前景. 然而, 在面向工程化应用的实际场景中, 碳基材料仍面临诸多挑战, 如富勒烯、石墨烯和单根碳纳米管在红外波段吸收弱、灵敏度不足、响应慢等. 碳基材料与波导集成, 一方面可限域光场, 有效抑制光传输的环境耗散, 提升光与物质的耦合效率, 从而提高探测器的信噪比、灵敏度、响应速度与工作带宽; 另一方面, 其工艺兼容 CMOS 加工工艺, 有望实现低成本、高密度集成, 可满足下一代红外光电探测器的发展需要. 本文围绕多种波导材料集成的碳基红外光电探测器展开综述, 详细介绍分析了器件的性能增强策略与发展瓶颈, 最后展望了波导集成的碳基红外探测器的发展方向.

关键词: 碳基材料, 石墨烯, 波导集成, 红外探测器

PACS: 81.05.U-, 81.05.ue, 42.82.Et, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.74.20250830

CSTR: 32037.14.aps.74.20250830

1 引言

20 世纪下半叶, 随着纳米科学与技术的发展, 多种碳的同素异形体如富勒烯、碳纳米管 (carbon nanotubes, CNT)、石墨烯等碳基纳米材料被陆续发现, 涵盖从零维到二维的多种低维度凝聚态形态 (如图 1 所示)^[1,2]. 碳基材料因其优越的光学、电学、热学性能, 被广泛认为是下一代光电子材料中最具潜力的方案之一^[3-8]. 近年来, 碳基材料已充分应用到光电探测与传感领域, 如基于悬空 CNT 薄膜的热辐射型光电探测器^[9]、单壁 CNT 光热探测器^[10]、基于石墨烯的光电探测器^[11]、具有

不对称金属电极的石墨烯光电探测器^[12]. 尽管碳基材料在光电探测器领域有着优异的表现, 但是与传统半导体材料相比存在诸多不足, 其中关键问题之一就是由于其低维度的物理形态所决定的, 与入射光极小的相互作用体积, 从而导致整体光吸收率较低. 例如, 石墨烯仅有 0.34 nm 的单原子层厚度, 对光的吸收效率仅为 2.3%^[13]. 对于单层致密的碳纳米管薄膜, 由于单根管的横截面直径极小 (1—2 nm), 其对入射光子的吸收率也仅约为 4%^[14]. 对于富勒烯基材料, 其本征吸收主要集中于紫外-可见光区, 在红外波段的吸收能力有限, 这限制了其作为主要红外吸收材料的应用, 通常需要通过分子功能化或构建异质结来拓展其红外响应^[3].

* 四川省海聚计划 (批准号: 2024JDHJ0007) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hao.xu.15@uestc.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xschen@mail.sitp.ac.cn

碳基光电探测器对光信号较低的吸收率导致其具有较低的灵敏度,大大限制了此类探测器的实际性能^[15].因此,如何提升碳基材料的光吸收效率,提升光电探测器的灵敏度,已成为该领域的一个重要研究方向^[16].

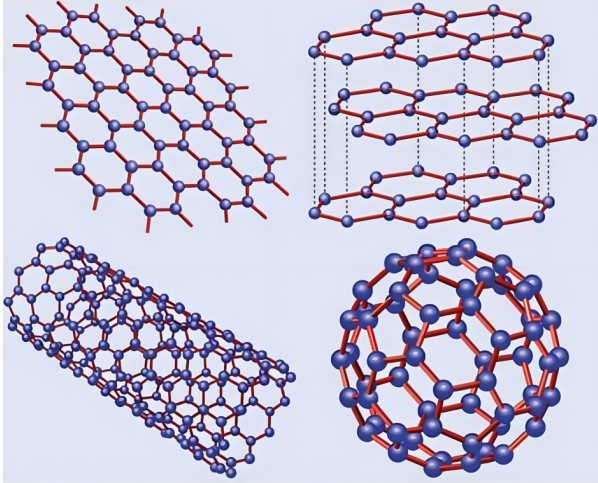


图1 碳原子的几种低维同素异形体,出自文献^[2],已获得授权

Fig. 1. Several low-dimensional allotropes of carbon atoms. Reproduced with permission from Ref.^[2].

为了提升碳基材料光电探测器的灵敏度,研究人员提出了多种解决方案.例如,在CNT基光电探测器领域,研究人员提出通过CNT薄膜增强光吸收^[17,18]、利用非对称电极与CNT复合构建肖特基结型光电探测器^[19]、将CNT与其他半导体材料结合形成异质结^[20-22]、基于微腔结构设计CNT光电探测器^[14]等多种方式提升探测器性能.在石墨烯基光电探测器的研究中,研究人员提出将石墨烯与等离子体纳米结构相结合^[23]、将石墨烯与法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)谐振腔集成^[24]、在石墨烯上覆盖胶体量子点薄膜^[25]、利用石墨烯双层异质结构^[26]等方式提高光电响应度.以上方案虽然能够在一定程度上提高响应度,但是探测器带宽、工作速度会受到限制,同时也存在制备工艺复杂、后续实际应用成本高昂等问题.在此研究基础上,片上波导集成的碳基光电探测器^[27],不仅兼顾了探测器灵敏度、响应带宽等关键指标,同时兼容CMOS工艺,成为最有潜力的解决方案之一.本文详细地综述了波导集成的碳基红外光电探测器的发展脉络与研究进展,并详细介绍分析了器件的性能增强策略与发展瓶颈.

2 波导集成的碳基红外探测器工作原理

2.1 碳基光电探测器光电转换机理

2.1.1 光电导效应

碳基材料可利用光电导效应(photoconductive effect, PCE)引起的电导率变化,实现光电转化,从而实现光电探测.当光子能量高于材料的带隙宽度($E_{ph} > E_g$)时,入射光子可被价带电子吸收,由价带跃迁到导带,成为自由电子,从而增大材料内的载流子浓度($\Delta n > 0$),表现为电导率升高($\sigma_{ph} = \Delta\sigma = \Delta n e \mu > 0$, μ 为载流子迁移率),为正光电导(positive photoconductivity, PPC)(图2, $\sigma_{ph} > 0$).对于现实中的碳基材料,一方面,尽管碳-碳键能较大,通常难以断裂成悬挂键,但限于生长、后处理工艺,难免存在结构缺陷,产生晶格缺陷;另一方面,碳基材料在空气中可物理/化学吸附氧气、水蒸气等分子,与吸附物发生电荷转移,形成局域态.这些缺陷态和局域态所束缚的载流子在吸收入射光子能量($E_{ph} > E_b$)后,能够越过吸附势垒,重新变为自由载流子.当所束缚的载流子为多数载流子时,材料载流子浓度增大($\Delta n > 0$),表现为PPC;而当所束缚的载流子为少数载流子时,材料载流子浓度降低($\Delta n < 0$),表现为负光电导(negative photoconductivity, NPC)^[28](图2, $\sigma_{ph} < 0$).

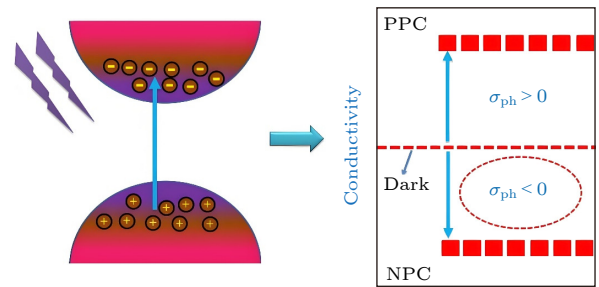


图2 正负PCE原理图,出自文献^[28],已获得授权

Fig. 2. Schematic diagram of positive and negative PCE. Reproduced with permission from Ref. ^[28].

2.1.2 光伏效应

当碳基材料与半导体/金属材料接触时,材料间的费米能级差异在界面处诱导能带弯曲,产生内建电场,驱使载流子漂移(图3(a)),形成PN结或肖特基结,表现为非线性(或整流特性)输出特性(图3(b)).当入射光子能量高于材料带隙宽

度 ($E_{ph} > E_g$) 时, 光生电子-空穴对可在内建电场中分离并漂移, 形成光电流. 碳基材料可利用该光伏效应 (photovoltaic effect, PVE) 产生的光电流 (光电压) 实现光电探测, 且光电信号无需偏置电场参与, 存在短路电流 (I_{sc}) 和开路电压 (V_{oc})^[29], 可用于自驱动光电探测^[30,31]. 利用内建电场可实现低功耗、低暗电流和高灵敏光电探测; 当反向偏置电场足够强时, 显著加速的光生载流子还可在结区轰击出更多的自由载流子, 导致高增益甚至是雪崩倍增, 可用于弱光或单光子探测^[29].

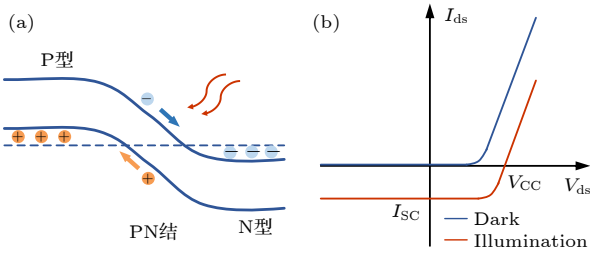


图 3 (a) PVE 原理示意图; (b) 有无照明下 PN 结的两个典型 $I-V$ 曲线
 Fig. 3. (a) Schematic images of PVE; (b) two typical $I-V$ curves of a P-N junction with and without illumination.

2.1.3 辐射热效应

碳基材料如 CNT、还原石墨烯氧化物等, 存在光子与声子间耦合, 所诱导的温度变化将进一步改变材料电阻 (电阻温度因子, $TCR \neq 0$)^[32]. 在非零偏置电压下, 基于该辐射热效应 (photobolometric effect, PBE) 的光电探测器可实现光热转化, 并以光电流的形式输出 (图 4(a)). CNT 和石墨烯等碳基材料通常具有 10^2-10^3 W/(m·K) 量级高热导率^[33]、热容低, 因此能够快速响应, 是具有潜力的光热材料之一^[34].

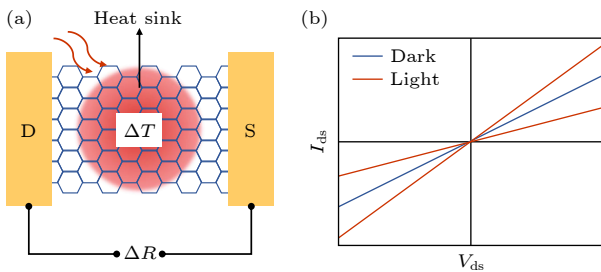


图 4 (a) PBE 物理机制的示意图; (b) 测辐射热型探测器在有光照和无光照时的 $I-V$ 曲线图
 Fig. 4. (a) Schematic diagram of the PBE physical mechanism; (b) plot of $I-V$ curves for a bolometric detector under both illuminated and non-illuminated conditions.

吸收光子后, 材料温度可发生变化, 材料电阻随之变化. 在非零偏置电压下, 光照导致碳基材料的电阻变化, 将以光电流信号的形式输出. PBE 的基本原理是: 当热敏材料受到电磁波辐射时, 其温度发生变化, 进而引起电阻的改变, 通过检测电阻的变化可以确定辐射电磁波的功率^[35,36]. 其物理机制如图 4(a) 所示. 测辐射热计通常由半导体材料^[37]或超导体材料^[38]构成, 广泛应用于太赫兹波段, 在该波段中, 测辐射热计是灵敏度最高的探测器之一. 测辐射热计的响应时间由热容 C_h 和热阻 R_h 决定, 其关系为 $\tau = R_h C_h$ ^[38]. 其中, 热阻 R_h 决定了器件的灵敏度, 而石墨烯因其较小的体积和低态密度, 具有极低的热容 C_h , 因此基于石墨烯的测辐射热计能够实现快速响应. 此外, 由于石墨烯的声子费米面较小, 热阻 R_h 较高, 从而具备较高的测辐射热灵敏度^[34].

与下文的光热电效应相比, PBE 的光电探测机制主要基于光引起的材料电阻变化, 而非直接在沟道中产生光电流. 因此, 这一机制可以直接应用于基础材料体系, 而无需引入诸如 PN 结等复杂结构. 然而, 为实现工作状态, 仍需在源漏之间施加偏压提供工作电压. 如图 4(b) 所示, 测辐射热型探测器的 $I-V$ 曲线在有光照和无光照条件下存在明显区别. 从图 4(b) 中可以看出, 在零偏压条件下, $I-V$ 曲线未展现出光电流特征, 而当热阻 R_h 为负时, 其 $I-V$ 曲线表现出与光电导型探测器相似的特性^[39].

2.1.4 光热电效应

光热电效应 (photothermoelectric effect, PTE) 典型器件结构如图 5(a) 所示^[40], 其本质在于光激发产生的热载流子, 在器件内部形成的温度梯度驱动下发生定向迁移, 进而在器件两端产生光电流或光电压^[41]. PTE 原理图如图 5(b) 所示^[34], 该温度梯度 (ΔT) 的形成源于对器件的局部光照或沟道材料本身吸收光能的不均匀性. 尤其在红外波段, 光的热效应较为显著, 因此 PTE 机制常在该波段起主导作用. 以石墨烯为例, 其光生载流子温度在激发后显著高于晶格温度, 并能在较长时间内维持这种状态; 随后, 这些载流子通过与声子的散射过程逐渐与晶格达到热平衡. 这种特性使得基于 PTE 机制可构建具有超快响应速度的石墨烯光电探测器. 其产生的光热电势差 (ΔV_{PTE}) 由材料不同区域的塞贝克系数 (S) 差异及温度梯度 (ΔT)

共同决定, 表达式为 $\Delta V_{\text{PTE}} = (S_1 - S_2) \Delta T$. 其中, 塞贝克系数 S 定义为 $S = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left. \frac{d \ln(\sigma(E))}{dE} \right|_{E=E_F}$, 式中 e 为电子电量, k_B 为玻尔兹曼常数, σ 为石墨烯电导率, E_F 为费米能级. 由于电子间的热传递速度极快, 光激发后电子系统达到热平衡所需时间极短 (约为飞秒量级). 这一特性不仅保证了基于 PTE 的石墨烯光电探测器的高响应速度, 也使其能够实现自驱动工作模式, 这对于波导集成应用尤为重要 [42,43].

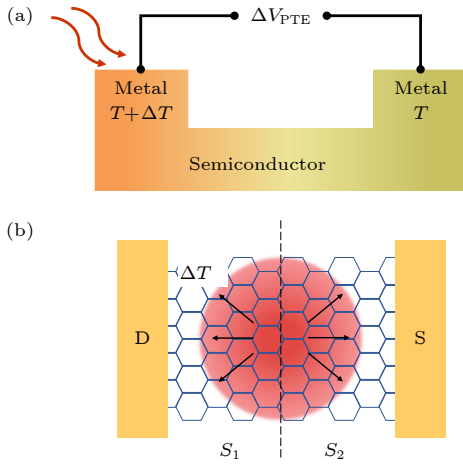


图 5 (a) PTE 结构示意图; (b) PTE 原理示意图
Fig. 5. (a) Structure schematic diagram of PTE; (b) schematic diagram of PTE principle.

2.2 碳基材料集成波导工作原理

波导集成碳基红外光电探测器的工作机制依赖于红外光在波导结构中的有效限制和局域化, 以及碳基材料在光电转换中的优异性能. 当红外光入射到波导集成的碳基探测器上时, 光场在波导内部得到增强, 提高了与碳基材料的相互作用效率 [44]. 这一过程中, 红外光子的能量被碳基材料中的电子吸收, 导致电子从价带激发到导带, 产生光生载流子对. 碳基材料的特性, 如 CNT 的高载流子迁移率和饱和速度, 使得光生载流子能够有效地产生、分离并收集, 从而提高探测器的探测效率.

波导集成提升碳基材料红外光电探测器工作特点主要体现在以下几个方面.

1) 波导集成结构在红外探测性能方面起到了至关重要的作用, 它通过精确控制红外光在探测器中的传播路径和局域化, 显著地提升了光与碳基材料之间的相互作用效率. 这种结构利用波导模式的局域场增强效应, 使得红外光在波导的特定区域内

集中, 从而增加了光与探测器材料的相互作用截面, 提高了光吸收率和光生载流子的产生效率.

2) 波导集成结构的设计还考虑到了载流子的传输特性, 通过优化波导的几何形状和材料属性, 实现了载流子的有效分离和快速传输. 例如, 波导结构中的设计可以使得光生电子和空穴在正交于光吸收方向的电场作用下快速分离, 减少了载流子的复合损失, 从而提高了红外探测器的转换效率和响应速度.

3) 波导集成设计在实现高集成度和小型化红外探测器方面展现出显著优势. 通过将多个光学和电子功能集成到单一的波导平台上, 可以实现更紧凑的器件设计, 减少器件的占地面积, 同时保持甚至提升性能. 这种集成化的设计方法不仅有助于提高系统的可靠性和稳定性, 还为实现更复杂的光子集成电路提供了可能性, 这对于推动红外探测技术在传感、通信和成像等领域的应用具有重要意义.

波导集成碳基红外光电探测器的性能参数, 如探测率、光谱响应范围和噪声特性, 受到波导集成结构和碳基材料特性的影响. 探测率与光生载流子的产生效率和收集效率直接相关, 而光谱响应范围则取决于碳基材料的带隙和光吸收特性. 通过优化波导结构和提高碳基材料的质量, 可以降低噪声特性, 提升探测器的整体性能. 例如, 通过设计优化的波导耦合结构, 可以显著提高探测器的光电响应度, 同时, 通过精细调控碳基材料的带隙结构, 可以实现对特定波长范围内红外光的高灵敏度探测. 此外, 碳基材料的高吸收系数和可调谐的带隙特性使其在红外探测领域具有广泛的应用前景, 特别是在需要高灵敏度和快速响应速度的场合. 通过这些技术创新, 波导集成碳基红外光电探测器在实现高性能光电探测方面展现了巨大的潜力, 为未来光电子技术的发展提供了新的方向.

3 波导集成的碳基红外探测器研究进展

为提高低维材料光电探测器的光吸收率, 相关研究人员开发了多种基于面入射的光学增强结构. 其中, 微腔结构 (如 F-P 微腔) 是一种常用技术, 通过将低维材料置于高品质因子的谐振腔内, 利用腔内光场的多次反射来显著增强光与材料的相互作用.

用. Furchi 等^[24] 通过将石墨烯与微腔单片集成, 实现了 26 倍的光吸收增强, 使吸收率超过 60%, 如图 6(a) 所示; Liang 等^[14] 也利用微腔结构将单根碳纳米管探测器的光吸收提升了约 6 倍, 其结构如图 6(b) 所示. 另一类主流方法是利用等离激元效应或超构表面. 通过光栅结构激发表面等离极化激元, 将收集的光子能量引导至探测器的活性区域, Echtermeyer 等^[45] 利用此方法将器件的光敏长度和响应度分别提升了 1000% 和 400%, 其结构如图 6(c) 所示. 此外, 通过设计金属纳米结构, 如分形超构表面或金属纳米孔阵列, 可以在纳米尺度上产生局域电热点以增强吸收; Fang 等^[46] 设计的分形超构表面在整个可见光谱范围内实现了对光电压一个数量级的增强, 如图 6(d) 所示. 然而, 这些面入射器件普遍存在一些局限. 例如, 微腔和多数等离激元谐振结构本质上是共振的, 导致其工作带宽较窄, 不利于宽谱探测. 与这些在垂直方向上增强光场强度或利用谐振效应的器件不同, 波导集

成器件通过延长光与材料在水平方向上的相互作用长度来提升总吸收. 波导集成方案的核心优势在于, 它利用倏逝波与碳基材料耦合, 使光沿波导传输数十甚至数百微米, 极大地增加了有效作用距离, 从而能够实现宽带、高效的吸收. 更为关键的是, 波导结构是硅基光子学的基本单元, 与 CMOS 工艺完全兼容, 这使得探测器能够与其他片上光子器件 (如调制器、光源等) 单片集成, 为构建复杂、多功能的光电集成系统提供了平台优势.

根据波导核心材料的不同, 目前主流的集成平台主要包括绝缘体上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 波导、氮化硅 (silicon nitride, SiN_x) 波导, 以及基于先进异质结构 (如等离子体、槽波导、二维材料异质结等) 的波导. 这些平台在材料特性、工艺兼容性、光场局域能力及最终探测器性能上展现出各自的特点与优势. 下文将系统地梳理和评述近些年来基于这三类波导平台的碳基红外探测器研究进展、性能突破及关键技术挑战.

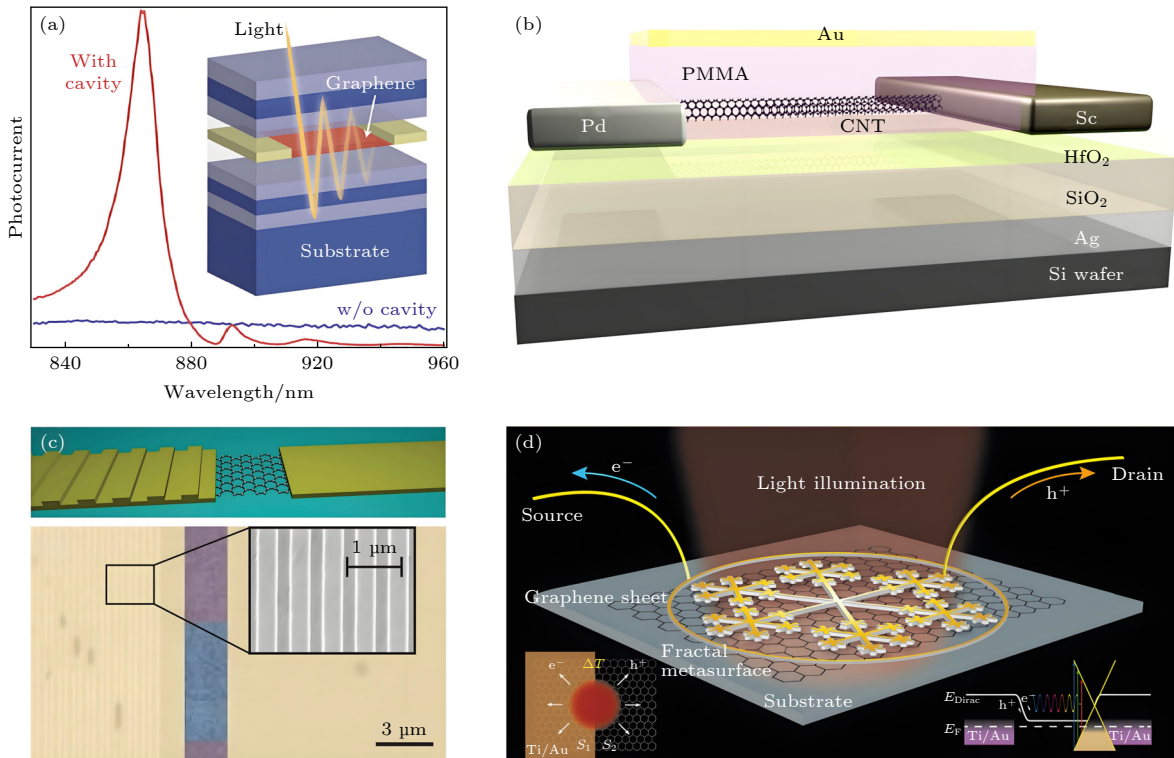


图 6 (a) 石墨烯微腔光电探测器示意图, 出自文献^[24], 已获得授权; (b) F-P 微腔集成的单管二极管型光电探测器示意图, 出自文献^[14], 已获得授权; (c) 带有等离激元光栅耦合器的金属-石墨烯-金属光电探测器, 出自文献^[45], 已获得授权; (d) 基于分形超表面的增强型石墨烯光电探测器, 出自文献^[46], 已获得授权

Fig. 6. (a) Schematic drawing of a graphene microcavity photodetector, reproduced with permission from Ref.[24]; (b) schematic representation of a single-tube diode-type photodetector integrated with F-P microcavity, reproduced with permission from Ref.[14]; (c) metal-graphene-metal photodetector with plasmonic grating coupler, reproduced with permission from Ref.[45]; (d) enhanced graphene photodetector with fractal metasurface, reproduced with permission from Ref.[46].

3.1 集成 SOI 波导

SOI 波导以顶层硅、埋氧层和硅衬底构成三维结构, 凭借硅/二氧化硅的高折射率差 ($\approx 3.5/1.48$) 实现强光场局域化和低传输损耗 (< 0.1 dB/cm)^[47,48]. 其 CMOS 兼容工艺支持晶圆级制造和光电子单片集成^[49], 同时具备宽带透明特性. 这些特性使 SOI 波导成为集成石墨烯、CNT 等碳基材料的理想平台, 为高性能红外光电探测器的发展奠定基础.

集成 SOI 波导的碳基光电探测器研究, 在初期以 PVE 为核心机制, 致力于解决碳基材料本征吸收率低的瓶颈. 这一阶段的研究大多采用机械剥离法制备高质量的石墨烯样品, 虽然该方法制备的石墨烯晶体质量高、电学性能优异, 但其尺寸小、产率低, 难以满足规模化应用的需求. 2013 年, 研究人员在基于 SOI 波导集成的石墨烯探测器方面取得了关键突破. Gan 等^[47] 利用非对称金属电极在石墨烯沟道中诱导产生内建电场, 借助 SOI 波导的倏逝场增强了光与石墨烯的相互作用, 在 1.55 μm 通信波段实现了超过 0.1 A/W 的响应度和高达 20 GHz 的带宽. Pospischil 等^[48] 则着眼于工艺兼容性与工作波段的拓展, 采用全 CMOS 兼容工艺, 通过优化电极构型以减少金属的寄生光吸收, 实现了覆盖从 O 到 U 所有光通信波段 (1310 — 1650 nm) 的均匀响应和约 18 GHz 的零偏压带宽. 这些早期工作充分验证了 PVE 机制结合 SOI 波导集成方案在提升响应度方面的巨大优势, 并证实了其 CMOS 兼容性, 为该技术路线奠定了基础.

与此同时, 研究者们也探索了不同的 PVE 实现方式以优化特定性能. Wang 等^[50] 利用石墨烯与硅波导直接接触形成的异质结势垒来分离光生载流子, 这种结构不仅有效地抑制了暗电流, 还将探测范围拓展至中红外波段 (2.75 μm), 并揭示了不同波长下由直接跃迁和间接跃迁主导的两种光电响应机制, 深化了对器件物理内涵的理解. 在此基础上, 研究向着提升速度和工艺实用性方向发展, 制备工艺转向了采用可规模化生产的 CVD 石墨烯. Schall 等^[49] 采用晶圆级化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD) 石墨烯, 通过优化金属-石墨烯结, 成功制备了数据传输速率高达 50 Gbit/s 的探测器, 有力地展示了其在高速光通信中的巨大潜力, 结构如图 7(a) 所示. CVD 方法可实现晶圆级石墨烯的制备, 但后续的湿法转

移过程不可避免地会引入聚合物残留、褶皱、晶界和缺陷, 这些都可能影响器件的均匀性和整体性能. Youngblood 等^[51] 则通过在双层石墨烯结构中构建 P-I-N 结, 在单个器件上同时实现了高效光电探测与电光调制两种功能, 进一步证实了 PVE 机制的多功能性与可调控性, 结构如图 7(b) 所示.

PVE 机制同样被成功应用于集成 SOI 波导的 CNT 探测器中, 并推动了器件的系统级集成. 2020 年, Ma 等^[52] 在单芯片上集成了 CNT 光电系统, 其巧妙地设计了蛇形接触电极结构, 如图 7(c) 所示, 利用光电压倍增效应提升输出电压, 以匹配逻辑电路的控制需求, 迈出了系统集成的关键一步. 为进一步提升 CNT 探测器的综合性能, Zhao 等^[53] 通过系统性地优化非对称 Pd/Hf 电极与波导的相对位置, 在低暗电流 (-2 V 时为 0.157 μA) 和高带宽 (48 GHz) 之间取得了出色的平衡, 结构如图 7(d) 所示. 针对 CNT 在波导边缘因台阶而悬浮导致的散热不佳这一工程难题, 该团队进一步开发了波导平面化工艺, 显著改善了器件的热稳定性, 为实现高可靠性的高速光互连器件扫清了障碍^[54], 其结构如图 7(e) 所示. 这些进展表明, 基于 PVE 的集成 SOI 波导碳基光电探测器研究已经从器件原理验证, 逐步走向性能优化、功能拓展和解决关键工程问题的成熟阶段.

PTE 是集成 SOI 波导碳基光电探测器的另一核心工作机制, 其利用光生热载流子在塞贝克系数不均匀的沟道中产生的温差电动势, 能够实现零偏压、无暗电流工作, 并将直接将光功率转换为电压信号, 为低功耗、低噪声的高速探测提供了极具吸引力的解决方案. 为了提升 PTE 的效率, 研究者们从材料和结构两方面进行了深度优化. Shiue 等^[55] 采用六方氮化硼 (hexagonal boron nitride, hBN) 封装石墨烯形成二维异质结, 极大地提升了石墨烯的载流子迁移, 并通过电解质顶栅精细调控费米能级, 实现了高达 0.36 A/W 的响应度和 42 GHz 的 3 dB 带宽, 如图 7(f) 所示. 而在结构设计方面, Wang 等^[56] 设计了一种悬空石墨烯集成的硅基槽缝波导. 该结构不仅利用槽缝区域的光场增强效应提升了光吸收, 同时有效抑制了石墨烯热电子通过衬底声子的冷却通道, 从而显著提升了电子温度和 PTE 转换效率, 获得了 0.273 A/W 的高响应度.

为了进一步突破性能瓶颈并拓展工作波长, Guo 等^[57] 提出了一种超薄宽脊硅-石墨烯混合等

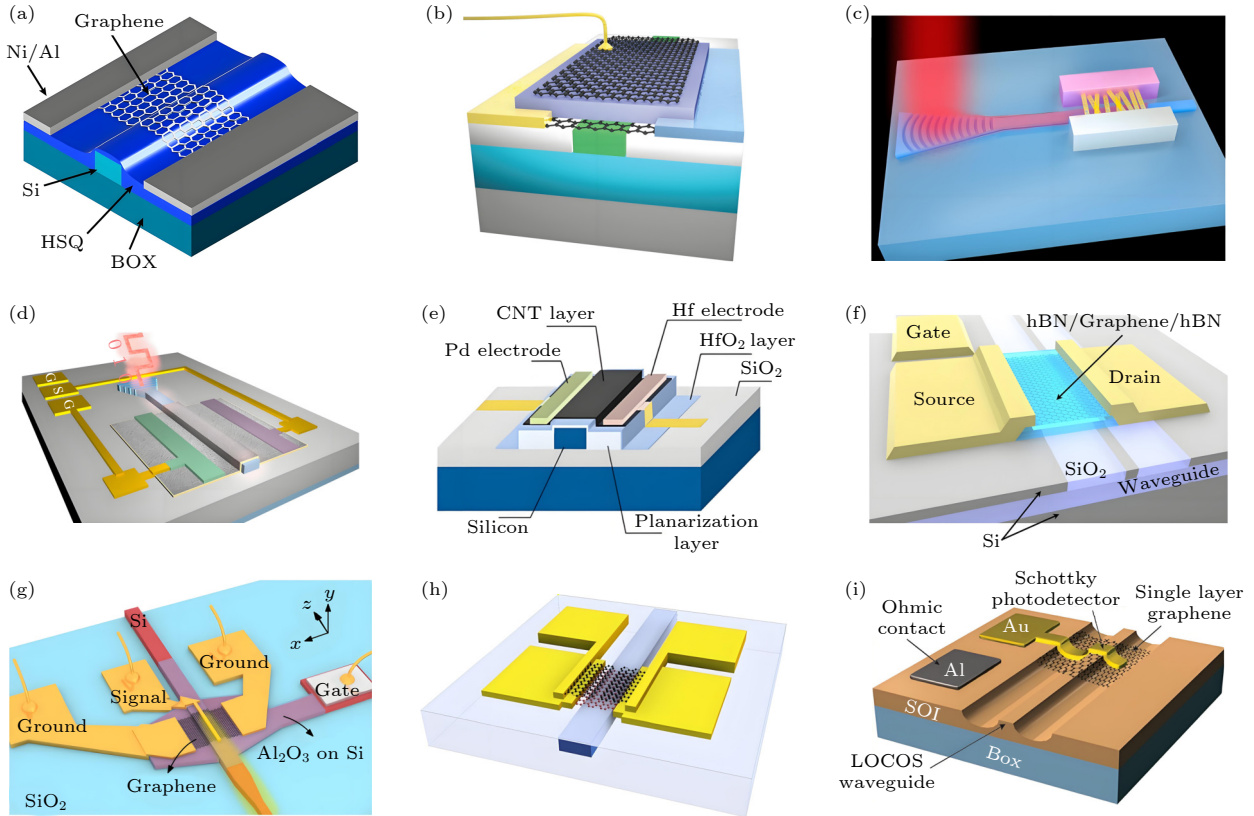


图 7 (a) 非对称接触配置下硅波导上集成的石墨烯光电探测器, 出自文献 [49], 已获得授权; (b) 平面化波导上集成的双层石墨烯调制器/探测器的示意图, 出自文献 [51], 已获得授权; (c) 波导集成碳纳米管光电二极管结构示意图, 出自文献 [52], 已获得授权; (d) 低暗电流、48 GHz 带宽的硅波导集成 CNT 光电探测器, 出自文献 [53], 已获得授权; (e) 基于平面化硅波导的高速 CNT 光电探测器, 出自文献 [54], 已获得授权; (f) 埋入硅波导上的 hBN/SLG/hBN 光电探测器, 出自文献 [55], 已获得授权; (g) 高性能硅-石墨烯混合等离激元波导光电探测器的结构, 出自文献 [57], 已获得授权; (h) PTE 石墨烯光电探测器的 3D 示意图, 出自文献 [58], 已获得授权; (i) 硅-石墨烯等离激元肖特基光电探测器, 出自文献 [59], 已获得授权

Fig. 7. (a) Graphene photodetector integrated on a silicon waveguide with asymmetric contact configuration, reproduced with permission from Ref. [49]; (b) schematic illustration of the dual layer graphene modulator/detector integrated on a planarized waveguide, reproduced with permission from Ref. [51]; (c) schematic diagram showing the structure of a waveguide-integrated carbon nanotube photodiode, reproduced with permission from Ref. [52]; (d) silicon waveguide-integrated carbon nanotube photodetector with low dark current and 48 GHz bandwidth, reproduced with permission from Ref. [53]; (e) high-speed carbon nanotube photodetector based on a planarized silicon waveguide, reproduced with permission from Ref. [54]; (f) the hBN/SLG/hBN photodetector on a buried silicon waveguide, reproduced with permission from Ref. [55]; (g) structures of the high-performance silicon-graphene hybrid plasmonic waveguide photodetectors, reproduced with permission from Ref. [57]; (h) 3D schematic of the PTE graphene photodetector, reproduced with permission from Ref. [58]; (i) silicon-Graphene plasmonic Schottky photodetector, reproduced with permission from Ref. [59].

离激元波导, 如图 7(g) 所示. 该设计在增强石墨烯光吸收的同时有效抑制了金属的寄生吸收, 并在 $2\ \mu\text{m}$ 中红外波段实现了超过 20 GHz 的带宽和 $70\ \text{mA/W}$ 的响应度, 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段更是获得了 $0.4\ \text{A/W}$ 的高响应度. 该工作还系统地区分了零偏压下的 PTE 与偏压下的 PBE 和 PCE, 深化了对器件工作机理的理解. 面向下一代超高速光通信的系统级应用需求, Marconi 等 [58] 聚焦于 PTE 探测器的工程化挑战, 通过采用双层石墨烯分裂栅结构和精密的阻抗匹配设计 (约 $50\ \Omega$), 成功研制出带宽超过 65 GHz 的 PTE 探测器, 实现了

105 Gbit/s NRZ 和 120 Gbit/s PAM4 的超高速信号直接探测, 结构如图 7(h) 所示.

除以上机制外, 研究人员还探索了基于石墨烯-硅肖特基结的内部光电发射 (internal photoemission effect, IPE) 机制. 2016 年, Goykhman 等 [59] 设计了一种硅-石墨烯等离激元肖特基探测器, 如图 7(i) 所示. 该探测器通过在金属/石墨烯/硅界面构建的波导结构来支持表面等离激元模式, 极大地增强了光场在肖特基结界面的局域化效应. 在高反向偏压下, 器件还展现了约 2 倍的雪崩增益现象, 最终实现了 $0.37\ \text{A/W}$ 的响应度. 这项工作

成功地将等离激元光学、石墨烯与硅光子学相结合,为通过 IPE 机制实现高性能、高增益的片上集成探测器开辟了一条全新的技术途径。

在追求更高通信速率的道路上,研究人员不断挑战石墨烯光电探测器的速度极限。近期, Rieben 等^[60]通过将石墨烯与等离激元纳米谐振结构相结合,在 SOI 波导平台上展示了一款超高速光电探测器。该器件通过等离激元共振效应极大地增强了光场与石墨烯的相互作用,同时优化了器件的电学特性,实现了高达 155 GHz 的 3 dB 带宽。在全等离激元光传输链路测试中,该探测器成功实现了 192 GBaud (2-PAM) 和 96 GBaud (4-PAM) 的创纪录符号率,展示了石墨烯探测器在未来 200 G 及以上速率光通信系统中的巨大应用潜力。这一突破性的成果将石墨烯光电探测器的性能推向了新的高度。

综上所述,基于 SOI 波导的碳基红外探测器研究已取得显著进展。研究者们围绕 PVE, PTE 及 IPE 等核心机制,通过创新性的结构设计(如非对称电极、异质结、等离激元增强及槽波导等)、关键材料优化(如 hBN 封装与 CVD 石墨烯)以及面向应用的工艺改进(如晶圆级集成、波导平面化与阻抗匹配),成功克服了低吸收率、高暗电流、热管

理和阻抗匹配等关键挑战。这些研究显著提升了探测器的核心性能指标,包括响应度、工作带宽、光谱范围以及暗电流抑制能力,同时普遍保持了与 CMOS 工艺的良好兼容性。以上进展共同为碳基光电探测器在高性能光通信、高速互连、中红外传感及片上集成系统中的应用奠定了坚实基础。表 1 从结构、性能等维度对这些代表性工作进行了系统性比对。

3.2 集成 SiN_x 波导

SiN_x 波导因其宽光谱透明窗口(覆盖可见光至中红外波段)、CMOS 兼容性、优异的光学非线性特性及低传播损耗(<1 dB/cm@1550 nm),成为高性能碳基光电探测器理想的集成载体^[61-63]。其较高的折射率差(Δn 约为 0.5)可实现强光场局域化,而约 5 eV 的宽带隙特性可避免硅材料在红外波段的双光子吸收效应^[64],同时其化学惰性表面为石墨烯等二维材料的无损转移提供了基础。相较于传统硅光平台, SiN_x 波导在保持低制备成本的同时,有效规避了硅在近红外波段的吸收损耗,显著提升了探测器光耦合效率^[65]。此外, SiN_x 的化学稳定性与表面平整度有利于等离子体纳米结构的构建,可进一步增强光-物质相互作用^[66]。

表 1 集成 SOI 波导的碳基红外探测器性能比对

Table 1. Performance comparison of carbon based infrared detectors with integrated SOI waveguides.

工作机制	文献	年份	碳基材料	类型	波长/nm	响应率/(mA·W ⁻¹)	带宽/GHz	暗电流	创新点
PVE	[47]	2013	石墨烯	机械剥离	1450—1590	108	20	极低(零偏压)	非对称金属电极构建内建电场,实现零偏压高速探测
	[48]	2013	石墨烯	机械剥离	1310—1650	30—50	18	极低(零偏压)	CMOS兼容工艺,全波段覆盖
	[50]	2013	石墨烯	机械剥离	1550—2750	130	—	低(异质结抑制)	石墨烯/硅异质结结合悬浮波导,将探测范围拓展至2.75 μm
	[51]	2014	石墨烯	湿法转移	1550	57	3	零偏压无暗电流	调制-探测双功能集成
	[49]	2014	石墨烯	湿法转移	1550	7	41	零偏压无暗电流	晶圆级CVD材料+50 Gbit/s链路
	[52]	2020	CNT	—	1530	12.5	—	<1 nA(@ -0.5 V)	单片集成、零偏压工作、光电子系统兼容性作
	[53]	2023	CNT	—	1550	73.62	48	0.157 μA(@ -2 V)	电极位置优化、实现高带宽与低暗电流的平衡
	[54]	2024	CNT	—	1550	51.04	34	0.389 μA(@ -3 V)	波导平面化工艺、热稳定性提升
PTE	[55]	2015	石墨烯	湿法转移	1500—1800	360	42	零偏压无暗电流	hBN封装提升性能+自相关功能
	[56]	2016	石墨烯	湿法转移	1550	273	—	极低	槽波导光场局域化,悬浮石墨烯抑制声子散射
	[57]	2020	石墨烯	湿法转移	1500—2000	400	>40	低偏压下暗电流可控	混合等离子体波导平衡吸收与损耗,支持中红外
	[58]	2021	石墨烯	湿法转移	1550	3500	>65	零暗电流	光热效应实现零偏压超高速,50 Ω阻抗匹配
IPE	[59]	2016	石墨烯	湿法转移	1550	370	—	低	等离子体波导增强光吸收,雪崩增益
PBE	[60]	2025	石墨烯	湿法转移	1550—1640	68—200	155	低	等离激元谐振增强;实现155 GHz带宽和创纪录的192 GBaud数据传输

2015年, Wang等^[64]在Si₃N₄波导上集成了CVD石墨烯光导型探测器, 利用PTE和PBE在1550 nm波段实现了126 mA/W的内部响应度, 但动态响应受限于约1 kHz. 为克服响应度不足, Gao等^[67]于2018年在Si₃N₄波导集成探测器中引入约200 nm间距的叉指电极显著缩短载流子渡越距离, 并利用金属-石墨烯结在零偏压下实现了约33 GHz的超高带宽, 同时在1 V偏压光导模式下获得了约2.36 A/W高响应度(1550 nm), 解决了石墨烯探测器高速与高响应难以兼得的关键问题. 进一步地, Muench等^[66]设计了等离子体增强结构, 利用金裂栅电极构建静电PN结并引导间隙波导模式, 显著局域化并增强了石墨烯沟道中的光-物质相互作用和光吸收, 从而在零暗电流、零源漏偏压下实现了高达约12.2 V/W的外电压响应度和约42 GHz的3 dB带宽(1550 nm), 为低功耗、高集成度光接收机提供了可行路径, 如图8(a)所示. 提升CVD石墨烯的质量及其转移工艺也逐渐成为研究焦点, Muench等^[66]的工作中便采用了半干法转移, 以期更好地保持CVD石墨烯的质量.

2020年, Mišelkis等^[65]在Si₃N₄波导上实现了基于双层石墨烯的光电探测器, 利用聚合物栅介质PVA在保持石墨烯高质量的同时形成可控PN结, 显著增强了PTE, 使得器件在零偏压、零暗电流下实现了高达67 GHz的平坦频率响应(无滚降)和约6 V/W的电压响应度, 如图8(b)所示. 近年, 晶圆级石墨烯-Si₃N₄集成工艺亦取得突破,

Giambra等^[68]运用转移技术与hBN封装技术, 在150 mm晶圆上实现逾80%覆盖率的单晶石墨烯集成, 室温迁移率达约5000 cm²·V⁻¹·s⁻¹, 接触电阻约500 Ω·μm, 为波导集成碳基红外探测器的大规模制备提供了关键技术支撑.

集成SiN_x波导的碳基红外光电探测器取得了显著进展, 研究者们通过创新器件结构(如叉指电极、等离子体增强裂栅、双层石墨烯PN结)和优化工艺(如晶圆级集成、hBN封装), 成功克服了早期器件在响应度、带宽或工作模式上的局限. 表2总结了本节所述代表性SiN_x波导集成碳基红外探测器的关键性能参数.

3.3 集成先进异质结构波导

先进异质结构波导通过协同设计不同光学材料(如硅-等离子体、硫系玻璃-介质等)的界面特性, 实现了亚波长尺度下的光场局域与模式调控, 为碳基材料的光吸收增强和载流子高效分离提供了新范式^[69,70]. 此类波导不仅能突破传统硅基平台的光谱限制, 还可通过异质结内建电场优化探测器响应速度^[71,72]. 近年来, 研究者通过创新异质波导构型, 显著提升了碳基红外探测器在通信及中红外波段的关键性能, 其进展主要体现在以下典型工作中.

2016年, Schuler等^[69]提出硅slot波导双栅控结构, 利用高质量的机械剥离石墨烯, 通过波导两侧硅条带作为独立栅极, 在石墨烯吸收区形成

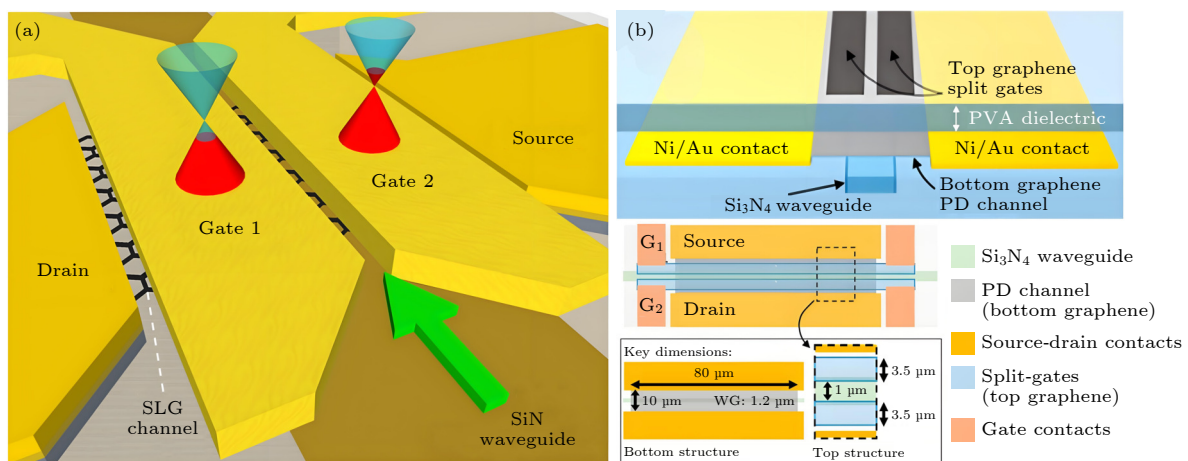


图8 (a) 波导集成等离子体增强石墨烯光电探测器, 出自文献^[66], 已获得授权; (b) 无源光子波导上具有聚合物栅极电介质的超快、零偏压石墨烯光电探测器, 出自文献^[65], 已获得授权

Fig. 8. (a) Waveguide-integrated, plasmonic enhanced graphene photodetectors, reproduced with permission from Ref.[66]; (b) ultra-fast, zero-Bias, graphene photodetectors with polymeric gate dielectric on passive photonic waveguides, reproduced with permission from Ref.[65].

表 2 集成 SiN_x 波导的碳基红外探测器性能比对

Table 2. Performance comparison of carbon-based infrared detectors integrated with SiN_x waveguides.

工作机制	文献	年份	碳基材料	类型	波长/nm	响应率	带宽/GHz	暗电流	创新点
PTE(零偏压)+PBE(偏压)	[64]	2015	石墨烯	湿法转移	1550	126 mA/W	—	—	实现氮化硅波导集成石墨烯探测器, CMOS兼容性
PVE(零偏压)+PBE(偏压)	[67]	2018	石墨烯	湿法转移	1550	2.36 A/W	33	20 μA	叉指电极减小载流子传输距离, 实现高响应率与高带宽
PTE	[66]	2019	石墨烯	湿法转移	1500—1600	12.2 V/W	42	零暗电流	等离子体波导增强光吸收, 零偏压高响应率与高带宽
	[65]	2020	石墨烯	湿法转移	1550	6 V/W	67	零暗电流	零偏置操作、聚合物介电优化、超高带宽

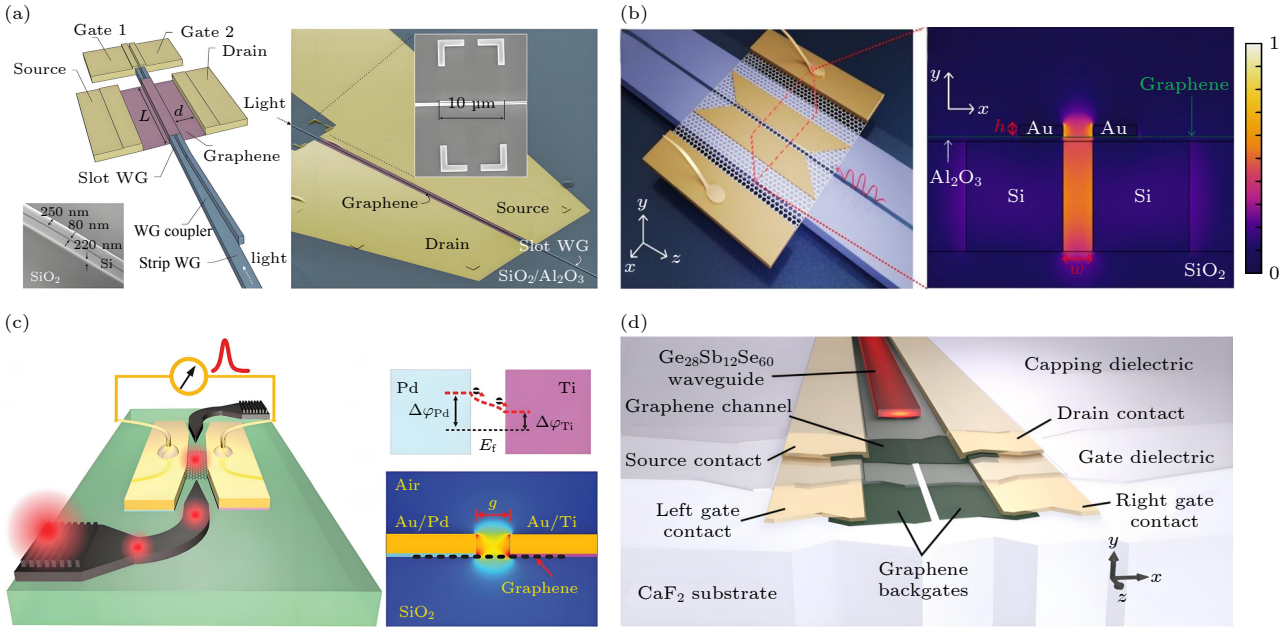


图 9 (a) 基于缝隙波导的石墨烯光电探测器, 出自文献 [69], 已获得授权; (b) 基于双槽结构的光电探测器, 出自文献 [70], 已获得授权; (c) 石墨烯等离子体集成光电探测器, 出自文献 [74], 已获得授权; (d) 在可扩展硫系玻璃平台上使用石墨烯进行波导集成, 出自文献 [72], 已获得授权

Fig. 9. (a) The graphene photodetector based on a slot-waveguide, reproduced with permission from Ref.[69]; (b) graphene photodetector employing double slot structure, reproduced with permission from Ref.[70]; (c) the graphene-plasmonic integrated photodetector, reproduced with permission from Ref.[74]; (d) waveguide-integrated mid-infrared photodetection using graphene on a scalable chalcogenide glass platform, reproduced with permission from Ref.[72].

可控 PN 结, 解决了 PTE 区域受限问题, 在零偏压下实现 35 mA/W 响应度与 65 GHz 带宽 (3 dB), 其结构如图 9(a) 所示. Li 等 [71] 设计的石墨烯-硅 P-I-N 异质结, 将石墨烯覆盖于平面光子晶体波导的本征区, 通过硅同质结的静电掺杂在石墨烯中诱导横向 P-I-N 结, 显著扩展耗尽区至 5 μm, 结合载流子垂直分离与横向输运, 实现 15 ps 响应时间及 52.9 dB 高信噪比 (40 GHz). Ding 等 [74] 于 2020 年结合等离子体狭缝波导, 利用 120 nm 窄缝局域光场增强光-石墨烯相互作用, 并通过非对称金属接触 (Pd/Au 与 Ti/Au) 构建内建电场, 在 2.7 μm 超小尺寸实现 >110 GHz 带宽与 360 mA/W 高响应度, 如图 9(c) 所示.

为进一步解决等离子体结构中金属欧姆损耗限制响应度提升的瓶颈, Yan 等 [70] 提出了硅/等离子体双异质槽波导结构, 如图 9(b) 所示, 将石墨烯置于硅槽波导与金属槽波导之间, 通过协同优化光场局域显著抑制金属吸收至 0.2 dB/μm, 同时将通信波段 (1550 nm) 响应度提升至 603.92 mA/W 并保持 78 GHz 高带宽. 此外, 为突破硅基平台在中红外波段 (>4 μm) 的限制, Goldstein 等 [72] 开发了基于硫系玻璃 (GSSe)/CaF₂ 异质衬底的可扩展平台, 如图 9(d) 所示, 集成了分栅控石墨烯光热电探测器; 该设计利用透明 CaF₂ 衬底和双石墨烯背栅在沟道中心形成可调 PN 结, 成功将工作波长拓展至 5.2 μm, 在零偏压下实现了 1.1 nW/Hz^{1/2} 的

表3 集成先进异质结构波导的碳基红外探测器性能对比

Table 3. Performance comparison of carbon based infrared detectors integrated with advanced heterostructure waveguides.

工作机制	文献	年份	碳基材料	类型	波长/ μm	响应率	带宽/GHz	暗电流	创新点
PTE	[69]	2016	石墨烯	机械剥离	1550	35 mA/W	65	无	实现石墨烯PN结与硅波导集成, 突破性提升带宽
	[72]	2022	石墨烯	湿法转移	520	10 mA/W(零偏压), 1.5 V/W(偏压)	>1	较高	硫系玻璃波导扩展至中红外, 分裂栅PN结
	[71]	2018	石墨烯	湿法转移	400—1600	11 mA/W	>50	零偏压下 可忽略	石墨烯-P-I-N异质结 结合光子晶体波导
PVE	[74]	2020	石墨烯	湿法转移	1550	360 mA/W	>110	—	等离子体超强光限制, 超短载流子路径
	[70]	2022	石墨烯	湿法转移	1550	603.92 mA/W	78	—	双槽结构平衡光吸收与金属损耗

约翰逊噪声极限噪声等效功率及>1 MHz (预测带宽>1 GHz) 的响应速度, 为长波长中红外集成气体传感与光谱分析提供了新途径。

为了进一步拓展探测器的光谱范围至中红外波段并提升其性能, 研究人员不仅在实验上取得进展, 也在理论设计上进行了新的探索. 在Goldstein等[72]利用硫系玻璃(GSSe)波导将石墨烯探测波长拓展至5.2 μm 的实验工作基础上, 最近Hashemnezhad和Noori[73]从理论上提出了一种性能增强方案. 他们设计了一种基于硫系玻璃($\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$)- CaF_2 平台的双芯波导结构, 并在其中集成了两层石墨烯通道. 模拟结果表明, 这种双通道设计能够更充分地利用光场, 使器件的电压响应度(在5.2 μm 处达到6.3 V/W)相比单通道结构提升近1倍. 该理论工作在零偏压下, 基于光热电效应, 预测了1.54 GHz的带宽. 这类针对中红外波段的器件优化设计, 为未来在气体传感、环境监测等领域的应用开发高灵敏度探测器指明了新的方向。

先进异质结构波导通过材料界面设计与模式调控, 为碳基红外探测器提供了超越传统硅基平台的光场局域能力和载流子管理新策略. 表3系统对比了上述代表性工作的核心机制及关键性能参数, 为面向不同应用场景的碳基探测器设计提供参考。

4 总结和展望

在波导集成的光电探测器领域, 除碳基材料外, 研究人员也对过渡金属硫族化合物(transition metal dichalcogenides, TMDs)、黑磷(black phosphorus, BP)和量子点(quantum dots, QDs)等其他低维材料进行了广泛探索, 它们各自展现出独特的性能和挑战. 波导集成的TMDs光电探测

器, 如 MoS_2 和 PdSe_2 , 其显著优势在于存在本征带隙, 这使得器件可以实现非常低的暗电流和极高的开关比. 例如, 基于 PdSe_2 的波导集成探测器已展现出高达560.1 mA/W的本征响应度和超过17.5 GHz的带宽[75], 但大多数TMDs材料(如 MoS_2)的带隙较宽, 使其本征吸收仅限于可见光及近红外波段, 若要实现红外探测则需依赖热电子效应等额外机制, 这在一定程度上限制了其在红外波段的响应度[76,77]. BP凭借高载流子迁移率和0.3至1.5 eV的可调带隙, 特别适合中红外探测, 其波导集成器件兼具低暗电流、高响应度(在4 μm 波段可达2 A/W)和超过3 GHz的工作带宽, 然而其空气稳定性差, 易氧化降解, 限制了实用性[78-80]. QDs则凭借其尺寸可调的带隙实现了从近红外到中红外波段的宽光谱覆盖, 并且可通过低成本的溶液法制备. 但与波导集成时, 其较低的载流子迁移率通常导致响应速度受限, 同时在波导内极高的光功率密度下容易出现饱和效应, 限制了器件的线性动态范围[81]. 相比之下, 以石墨烯为代表的碳基材料波导集成光电探测器具有其独特的优势. 首先, 石墨烯的零带隙特性赋予了其超宽带光谱响应能力, 可覆盖从可见光至远红外的广阔范围. 其次, 得益于极高的载流子迁移率, 碳基材料光电探测器具备实现超高速运行的潜力. 此外, 碳材料优异的化学稳定性和机械鲁棒性也使其在器件长期工作的可靠性方面, 相较于稳定性较差的BP等材料更具优势. 尽管石墨烯的零带隙导致暗电流较大, 信噪比受限, 但其在宽带探测、高速响应和集成便利性方面的综合优势, 使其在红外探测领域展现出更大潜力。

将石墨烯与其他二维材料(如TMDs)结合构建范德瓦耳斯异质结, 也是目前具有前景的研究方向. 这种策略可以结合不同材料的优点, 实现更优

异的器件性能. 例如, Yang 等^[82] 最近报道了一种基于石墨烯/MoTe₂/石墨烯垂直异质结的波导光电探测器. 在该器件中, MoTe₂ 作为中心的光吸收层, 上下两层石墨烯则用作高效的透明电极. 通过在 MoTe₂ 中引入应变, 其工作波长被成功拓展至 1550 nm 通信窗口; 垂直的器件结构将载流子输运距离缩短至纳米尺度, 使其带宽达到了 4.81 GHz. 这项工作充分展示了通过异质结能带工程和结构设计, 可以有效结合石墨烯的优异电学特性与其他二维材料的光学特性, 为开发高性能光电探测器提供了一种协同解决方案.

波导集成的碳基红外探测器作为突破碳基材料本征红外吸收弱瓶颈的关键技术路径, 近年来在材料、结构、工艺协同创新驱动下取得了显著进展. 本文系统综述了 SOI 波导、SiN_x 波导及先进异质结构波导 (如等离子体、槽波导、二维材料异质结等) 三大主流波导平台集成的碳基红外探测器研究现状. 核心进展在于: 通过波导的倏逝场强耦合效应, 显著延长了光与碳基材料的相互作用长度, 有效克服了其原子级厚度或纳米尺度截面导致的低吸收率限制, 将器件响应度提升数个量级; 同时, 创新性结构设计 (如非对称电极、分裂栅 PN 结、异质结能带工程) 结合 CMOS 兼容工艺 (晶圆级 CVD 石墨烯转移、hBN 封装、波导平面化), 在实现高响应度的同时, 兼顾了超高工作带宽、低暗电流及宽光谱响应, 为高速光通信、片上光谱分析、中红外气体传感等应用奠定了坚实基础.

尽管现有研究的成果较为丰硕, 但该领域仍面临若干关键挑战亟待突破. 其一, 光耦合效率与集成工艺的平衡. 如 CNT 探测器波导高度差导致的局部悬浮问题虽经平面化工艺 (高度差降至 55 nm) 缓解, 但热管理及与波导的界面耦合效率仍需优化; 异质集成中材料转移的界面缺陷、应力控制亦影响器件均一性与良率. 其二, 中长波红外 (>3 μm) 高效探测的普适性方案缺乏. 当前工作波长多集中于通信波段及部分中红外, 面向分子指纹区的长波红外探测, 亟须探索具有低损耗、宽透明窗口的新型波导材料, 并研究其与碳基材料的能带/模式匹配新机制. 其三, 多光谱/宽谱探测能力受限. 现有器件光谱响应调控灵活性不足, 难以实现单器件多波段同步高灵敏度识别. 其四, 大规模集成与系统级封装. 晶圆级制造中碳基材料均匀性、电极接触电阻一致性, 以及探测器与调制器、

光源的片上单片集成, 仍是实现实用化芯片级系统的关键瓶颈.

波导集成碳基红外探测器研究将向以下方向深化拓展: 材料层面, 开发高质量、大面积、带隙可调的碳基新材料 (如定向 CNT 薄膜、掺杂石墨烯) 及其异质结构 (如与量子点、过渡金属二硫属化合物结合), 以拓宽响应光谱并增强光吸收; 结构设计层面, 深化超构表面、光子晶体等人工微结构对波导光场的动态调控, 实现波长选择性增强吸收与载流子定向输运; 工艺层面, 发展低温、无损、高精度的异质集成技术 (如范德瓦耳斯力辅助转印、选区外延), 提升界面质量与器件可靠性; 系统层面, 推动与硅基/氮化硅光子平台的深度融合, 探索基于智能算法的光谱重构与信号处理, 构建多功能集成的“探测-处理”一体芯片. 随着上述技术的协同突破, 波导集成的碳基红外探测器有望在高速光互连、便携式环境监测、微型化生物医学传感及智能红外成像等领域率先实现规模化应用, 引领新一代高性能、低功耗、小型化红外光电系统的发展潮流.

参考文献

- [1] Weiss N O, Zhou H L, Liao, L, Liu Y, Jiang S, Huang Y, Duan X F 2012 *Adv. Mater.* **24** 5782
- [2] Castro Neto A H, Guinea F, Peres N M, Novoselov K S, Geim A K 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 109
- [3] Richter M, Heumüller T, Matt G J, Heiss W, Brabe C J 2017 *Adv. Energy Mater.* **7** 1601574
- [4] Cheng Z P, Li Z P, Li M Y, Wen X Y, Ding X M, Xu H, Lee J, Lu H F, Liu S S 2024 *J. Mater. Chem. A* **12** 1685
- [5] Na W, Zhang J, Cui F, Li X, Shen K, Wu J, Zou G, Xu H 2024 *24th International Conference on Transparent Optical Networks, Italy, Jul 14–18, 2024* p1
- [6] Lin Q H, Zhao C X, Li M Y, Xu H 2024 *Chemosensors* **12** 255
- [7] Li X, Dai X, Xu H, Shen K, Guo J, Li C, Zou G, Choy K L, Parkin I P, Guo Z X, Liu H Y, Wu J 2021 *Sci. Chin. Mater.* **64** 1964
- [8] Xu H, Han X Y, Dai X, Liu W, Wu J, Zhu J T, Kim D Y, Zou G F, Sablon K A, Sergeev A S, Guo Z X 2018 *Adv. Mater.* **30** 1706561
- [9] Itkis M E, Borondics F, Yu A, Haddon R C 2006 *Science* **312** 413
- [10] St-Antoine B C, Ménard D, Martel R 2011 *Nano Lett.* **11** 609
- [11] Xia F N, Mueller T, Lin Y M, Valdes-Garcia A, Avouris P 2009 *Nat. Nanotechnol.* **4** 839
- [12] Mueller T, Xia F N, Avouris P 2010 *Nat. Photonics* **4** 297
- [13] Yang Q R, Zhang C, Wu S L, Li S J, Bao Q L, Giannini V, Maier S A, Li X F 2018 *Nano Energy* **48** 161
- [14] Liang S, Ma Z, Wu G T, Wei N, Huang L, Huang H X, Liu H P, Wang S, Peng L M 2016 *ACS Nano* **10** 6963
- [15] Cao X X, Peng L, Liu L X, Lv J H, Li Z W, Tian F, Dong Y F, Liu X Y, Shen Y, Sun H Y, Xu Y, Fang W Z, Gao C 2022

Carbon **198** 244

- [16] Jin Y H, Zhang T F, Zhao J, Zhao Y X, Liu C, Song J, Hao X P, Wang J P, Jiang K L, Fan S S, Li Q Q **2021** *Carbon* **178** 616
- [17] Bosnick K, Gabo N, McEuen P **2006** *Appl. Phys. Lett.* **89** 163121
- [18] Lee J U, Gipp P P, Heller C M **2004** *Appl. Phys. Lett.* **85** 145
- [19] Liu Y, Han J, Wei N, Qiu S, Li H B, Li Q W, Wang S, Peng L M **2016** *Nanoscale* **8** 17122
- [20] Pradhan B, Setyowati K, Liu H Y, Waldeck D H, Chen J **2008** *Nano Lett.* **8** 1142
- [21] Park S, Kim S J, Nam J H, Pitner G, Lee T H, Ayzner A L, Wang H, Fong S W, Vosgueritchian M, Park Y J, Brongersma M L, Bao Z **2014** *Adv. Mater.* **27** 759
- [22] Arnold M S, Zimmerman J D, Renshaw C K, Xu X, Lunt R R, Austin C M, Forrest S R **2009** *Nano Lett.* **9** 3354
- [23] Echtermeyer T J, Britnell L, Jasnos P K, Lombardo A, Gorbachev R V, Grigorenko A N, Geim A K, Ferrari A C, Novoselov K S **2011** *Nat. Commun.* **2** 458
- [24] Furchi M, Urich A, Pospischil A, Lilley G, Unterrainer K, Detz H, Klang P, Andrews A M, Schrenk W, Strasser G, Mueller T **2012** *Nano Lett.* **12** 2773
- [25] Konstantatos G, Badioli M, Gaudreau L, Osmond J, Bernechea M, De Arquer F P, Gatti F, Koppens F H **2012** *Nat. Nanotechnol.* **7** 363
- [26] Liu C H, Chang Y C, Norris T B, Zhong Z H **2014** *Nat. Nanotechnol.* **9** 273
- [27] Koester S J, Li M **2013** *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20** 84
- [28] Tailor N K, Aranda C A, Saliba M, Satapathi S **2022** *ACS Mater. Lett.* **4** 2298
- [29] Long M S, Wang P, Fang H H, Hu W D **2019** *Adv. Funct. Mater.* **29** 1803807
- [30] Xu J Y, Zhang Z L, Zhang W, Chen Z S **2024** *Processes* **12** 1728
- [31] Periyanaounder D, Gnanasekar P, Varadhan P, He J H, Kulandaivel J **2018** *J. Mater. Chem. C* **6** 9545
- [32] Cai X, Wang S, Peng L M **2023** *Nano Res. Energy* **2** e9120058
- [33] Fugallo G, Cepellotti A, Paulatto L, Lazzeri M, Marzari N, Mauri F **2014** *Nano Lett.* **14** 6109
- [34] Koppens F H, Mueller T, Avouris P, Ferrari A C, Vitiello M S, Polini M **2014** *Nat. Nanotechnol.* **9** 780
- [35] Tissot J L, Trouilleau C, Fieque B, Crastes A, Legras O **2006** *Opto-Electron. Rev.* **14** 25
- [36] Gong Y G, Li W, Cai H H, Li Z, Chen C, Jiang Y D **2009** *Chin. J. Sens. Actuators* **22** 1122 (in Chinese) [龚宇光, 李伟, 蔡海洪, 李志, 陈超, 蒋亚东 **2009** *传感技术学报* **22** 1122]
- [37] Soref R A **2002** *Proc. IEEE* **81** 1687
- [38] Richards P L **1994** *J. Appl. Phys.* **76** 1
- [39] He X W, Léonard F, Kono J **2015** *Adv. Opt. Mater.* **3** 989
- [40] Yang Q, Shen J, Wei X Z, Shi H F **2020** *Infrared Laser Eng.* **49** 0103003 (in Chinese) [杨旗, 申钧, 魏兴战, 史浩飞 **2020** *红外与激光工程* **49** 0103003]
- [41] Gabor N M, Song J C, Ma Q, Nair N L, Taychatanapat T, Watanabe K, Taniguchi T, Levitov L S, Jarillo-Herrero P **2011** *Science* **334** 648
- [42] Song J C, Tielrooij K J, Koppens F H, Levitov L S **2013** *Phys. Rev. B* **87** 155429
- [43] Tielrooij K J, Song J C, Jensen S A, Centeno A, Pesquera A, Zurutuza Elorza A, Bonn M, Levitov L S, Koppens F H **2013** *Nat. Phys.* **9** 248
- [44] Li H, Anugrah Y, Koester S J, Li M **2012** *Appl. Phys. Lett.* **101** 111110
- [45] Echtermeyer T J, Milana S, Sassi U, Eiden A, Wu M, Lidorikis E, Ferrari A C **2016** *Nano Lett.* **16** 8
- [46] Fang J R, Wang D, DeVault C T, Chung T F, Chen Y P, Boltasseva A, Shalaev V M, Kildishev A V **2017** *Nano Lett.* **17** 57
- [47] Gan X T, Shiue R J, Gao Y D, Meric I, Heinz T F, Shepard K, Hone J, Assefa S, Englund D **2013** *Nat. Photonics* **7** 883
- [48] Pospischil A, Humer M, Furchi M M, Bachmann D, Guider R, Fromherz T, Mueller T **2013** *Nat. Photonics* **7** 892
- [49] Schall D, Neumaier D, Mohsin M, Chmielak B, Bolten J, Porschatis C, Prinzen A, Matheisen C, Kuebart W, Junginger B, Templ W, Giesecke A L, Kurz H **2014** *ACS Photonics* **1** 781
- [50] Wang X M, Cheng Z Z, Xu K, Tsang H K, Xu J B **2013** *Nat. Photonics* **7** 888
- [51] Youngblood N, Anugrah Y, Ma R, Koester S J, Li M **2014** *Nano Lett.* **14** 2741
- [52] Ma Z, Yang L, Liu L J, Wang S, Peng L M **2020** *ACS Nano* **14** 7191
- [53] Zhao H Y, Yang L J, Wu W F, Cai X, Yang F, Xiu H J, Wang Y J, Zhang Q, Xin X J, Zhang F, Peng L M, Wang S **2023** *ACS Nano* **17** 7466
- [54] Zhao H Y, Yang L J, Xiu H J, Deng M, Wang Y J, Zhang Q **2024** *Appl. Opt.* **63** 4435
- [55] Shiue R J, Gao Y D, Wang Y F, Peng C, Robertson A D, Efetov D K, Assefa S, Koppens F H, Hone J, Englund D **2015** *Nano Lett.* **15** 7288
- [56] Wang J Q, Cheng Z Z, Chen Z F, Wan X, Zhu B Q, Tsang H K, Shu C, Xu J B **2016** *Nanoscale* **8** 13206
- [57] Guo J S, Li J, Liu C Y, Yin Y L, Wang W H, Ni Z H, Fu Z L, Yu H, Xu Y, Shi Y C, Ma Y G, Gao S M, Tong L M, Dai D X **2020** *Light: Sci. Appl.* **9** 29
- [58] Marconi S, Giambra M A, Montanaro A, Mišeikis V, Soresi S, Tirelli S, Galli P, Buchali F, Templ W, Coletti C, Soriano V, Romagnoli M **2021** *Nat. Commun.* **12** 806
- [59] Goykhman I, Sassi U, Desiatov B, Mazurski N, Milana S, De Fazio D, Eiden A, Khurgin J, Shappir J, Levy U, Ferrari A C **2016** *Nano Lett.* **16** 3005
- [60] Rieben D, Blatter T, Koepfli S M, Kulmer L, Horst Y, Moor D, Nashashibi S, Homs M, Bisang D, Baumann M, Fedoryshyn Y, Leuthold J **2025** *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2025)* pTh3E.4
- [61] Muñoz P, Micó G, Bru L A, Pastor D, Pérez D, Doménech J D, Fernández J, Baños R, Gargallo B, Alemany R, Sánchez A M, Cirera J M, Mas R, Domínguez C **2017** *Sensors* **17** 2088
- [62] Blumenthal D J, Heideman R, Geuzebroek D, Leinse A, Roeloffzen C **2018** *Proc. IEEE* **106** 2209
- [63] Bauters J F, Heck M J, John D, Dai D X, Tien M C, Barton J S, Leinse A, Heideman R G, Blumenthal D J, Bowers J E **2011** *Opt. Express* **19** 3163
- [64] Wang J Q, Cheng Z Z, Chen Z F, Xu J B, Tsang H K, Shu C **2015** *J. Appl. Phys.* **117** 144504
- [65] Mišeikis V, Marconi S, Giambra M A, Montanaro A, Martini L, Fabbri F, Pezzini S, Piccinini G, Forti S, Terrés B, Goykhman I, Hamidouche L, Legagneux P, Soriano V, Ferrari A C, Koppens F H, Romagnoli M, Coletti C **2020** *ACS Nano* **14** 11190
- [66] Muench J E, Ruocco A, Giambra M A, Mišeikis V, Zhang D K, Wang J J, Watson H F, Park G C, Akhavan S, Soriano V, Midrio M, Tomadin A, Coletti C, Romagnoli M, Ferrari A C, Goykhman I **2019** *Nano Lett.* **19** 7632
- [67] Gao Y, Tao L, Tsang H K, Shu C **2018** *Appl. Phys. Lett.* **112**

- 211107
- [68] Giambra M A, Mišėikis V, Pezzini S, Marconi S, Montanaro A, Fabbri F, Soriano V, Ferrari A C, Coletti C, Romagnoli M *2021 ACS Nano* **15** 3171
- [69] Schuler S, Schall D, Neumaier D, Dobusch L, Bethge O, Schwarz B, Krall M, Mueller T *2016 Nano Lett.* **16** 7107
- [70] Yan S Q, Zuo Y, Xiao S S, Oxenlōwe L K, Ding Y H *2022 Opto-Electron. Adv.* **5** 210159
- [71] Li T T, Mao D, Petrone N W, Grassi R, Hu H, Ding Y H, Huang Z H, Lo G Q, Hone J C, Low T, Wong C W, Gu T Y *2018 npj 2D Mater. Appl.* **2** 36
- [72] Goldstein J, Lin H T, Deckoff-Jones S, Hempel M, Lu A Y, Richardson K A, Palacios T, Kong J, Hu J J, Englund D *2022 Nat. Commun.* **13** 3915
- [73] Hashemzhad H, Noori M *2025 Opt. Laser Technol.* **181** 111852
- [74] Ding Y H, Cheng Z, Zhu X L, Yvind K, Dong J J, Galili M, Galili M, Hu H, Mortensen N A, Xiao S S, Oxenlōwe L K *2020 Nanophotonics* **9** 317
- [75] Jian J L, Wu J H, Zhong C Y, Ma H, Sun B S, Ye Y T, Luo Y, Wei M L, Lei K H, Liu R Z, Chen Z Q, Li G Y, Dai H, Tang R J, Sun C L, Li J Y, Li W, Li M, Lin H T, Li L *2023 ACS Photonics* **10** 3494
- [76] Li Z W, Hu S Q, Zhang Q, Tian R J, Gu L P, Zhu Y S, Yuan Q S, Yi R X, Li C, Liu Y, Hao Y, Gan X T, Zhao J L *2022 ACS Photonics* **9** 282
- [77] Hlushchenko D, Olszewski J, Martynkien T, Łukomski M, Genza K, Karasinski P, Zięba M, Baraniecki T, Duda Ł, Bachmatiuk A, Guzik M, Kudrawiec R *2024 ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 28874
- [78] Youngblood N, Chen C, Koester S J, Li M *2015 Nat. Photonics* **9** 247
- [79] Yin Y L, Cao R, Guo J S, Liu C Y, Li J, Feng X L, Wang H D, Du W, Qadir A, Zhang H, Ma Y G, Gao S M, Xu Y, Shi Y C, Tong L M, Dai D X *2019 Laser Photonics Rev.* **13** 1900032
- [80] Huang L, Dong B, Guo X, Chang Y H, Chen N, Huang X, Liao W G, Zhu C X, Wang H, Lee C K, Ang K W *2018 ACS Nano* **13** 913
- [81] Pang C, Deng Y H, Kheradmand E, Poonkottil N, Petit R, Elsinger L, Detavernier C, Geiregat P, Hens Z, Thourhout D V *2023 ACS Photonics* **10** 4215
- [82] Yang C M, Liu Z Y, Cai H J, Li D H, Yu Y, Zhang X L *2025 ACS Nano* **19** 8661

REVIEW

Research progress of waveguide integrated carbon based infrared detectors^{*}

LYU Xiaowei¹⁾²⁾ ZHANG Jiazhen¹⁾ CHEN Junyu¹⁾ LIU Zizhuo¹⁾
 ZHAO Wenchao²⁾ WU Qiushi³⁾ XU Hao^{1)†} CHEN Xiaoshuang^{4)‡}

1) (*School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

2) (*School of Electronic Information, Huzhou College, Huzhou 313000, China*)

3) (*Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China*)

4) (*State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

(Received 25 June 2025; revised manuscript received 12 August 2025)

Abstract

Carbon-based materials, such as graphene and carbon nanotubes (CNTs), have garnered significant attention for next-generation infrared photodetection due to their unique and excellent physical properties, including ultra-high carrier mobility and exceptionally broad spectral absorption. These characteristics present vast application prospects in fields such as optical communications, military sensing, biomedical imaging, and energy. However, a critical bottleneck for their practical application is the inherently weak light-matter interaction stemming from their low-dimensional nature. For example, a single layer of graphene absorbs only 2.3% of incident light, which severely limits the sensitivity and overall performance of photodetectors.

To overcome this fundamental limitation, integrating carbon-based materials with photonic waveguides has emerged as a highly effective and promising strategy. This approach confines light within the waveguide and utilizes the evanescent field to couple with the carbon material over a long interaction length, greatly enhancing the total light absorption. Furthermore, its intrinsic compatibility with CMOS fabrication processes paves the way for low-cost, high-density, and large-scale manufacturing, meeting the stringent demands of future optoelectronic systems.

This paper comprehensively reviews the latest developments in waveguide-integrated carbon-based infrared photodetectors, systematically summarizing and analyzing the progress made in three major integration aspects: silicon-on-insulator (SOI), silicon nitride (SiN_x), and advanced heterostructures such as plasmonic and slot waveguides). Various performance enhancement strategies are detailed by exploring different photodetection mechanisms, including the photovoltaic effect (PVE), photothermoelectric effect (PTE), photobolometric effect (PBE), and internal photoemission effect (IPE). Key breakthroughs are highlighted, such as achieving ultra-high bandwidths exceeding 150 GHz on SOI, realizing a superior balance of high responsivity (~ 2.36 A/W) and high speed (~ 33 GHz) on SiN_x , and enhancing responsivity to over 600 mA/W while extending the detection range to the mid-infrared ($5.2 \mu\text{m}$) using advanced heterostructure waveguides.

Finally, the current development bottlenecks are discussed, including challenges in material transfer, interface quality control, and thermal management. Future research directions are also suggested, such as the development of novel carbon-based heterostructures, deeper integration with on-chip photonic systems, and the exploration of new waveguide materials for long-wave infrared applications. This work provides a clear roadmap for the continuously developing high-performance, waveguide-integrated carbon-based infrared detectors.

Keywords: carbon-based materials, graphene, waveguide integration, infrared detector

PACS: 81.05.U-, 81.05.ue, 42.82.Et, 85.60.Gz

DOI: [10.7498/aps.74.20250830](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250830)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250830](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250830)

^{*} Project supported by the Haiju Project of Sichuan Province Science and Technology Plan, China (Grant No. 2024JDHJ0007).

[†] Corresponding author. E-mail: hao.xu.15@uestc.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: xschen@mail.sitp.ac.cn



波导集成的碳基红外探测器研究进展

吕晓炜 张家振 陈俊宇 刘子卓 赵文超 吴秋诗 徐浩 陈效双

Research progress of waveguide integrated carbon based infrared detectors

LYU Xiaowei ZHANG Jiazhen CHEN Junyu LIU Zizhuo ZHAO Wenchao WU Qiushi XU Hao
CHEN Xiaoshuang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 208101 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250830

CSTR: 32037.14.aps.74.20250830

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250830>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

人工微纳结构增强长波及甚长波红外探测器

Artificial micro- and nano-structure enhanced long and very long-wavelength infrared detectors

物理学报. 2022, 71(11): 110703 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220380>

基于纳米金属阵列天线的石墨烯/硅近红外探测器

Quaternary nanoparticle array antenna for graphene/silicon near-infrared detector

物理学报. 2024, 73(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231657>

带有垂直石墨烯的金属热电堆红外探测器

Metal thermopile infrared detector with vertical graphene

物理学报. 2023, 72(3): 038101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221564>

石墨烯谐振式力学量传感器研究进展

Research progress of electromechanical graphene resonant sensors

物理学报. 2022, 71(12): 126801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220215>

基于石墨烯纳米条波导边耦合矩形腔的等离子体诱导透明效应

Plasmon induced transparency effect based on graphene nanoribbon waveguide side-coupled with rectangle cavities system

物理学报. 2022, 71(2): 024201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211397>

可调谐的声学型石墨烯等离子体增强纳米红外光谱

Tunable acoustic graphene plasmon enhanced nano-infrared spectroscopy

物理学报. 2024, 73(13): 138101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240489>