

基于石墨烯的红外探测机理与器件结构研究进展

杨 旗^{1,2}, 申 钧^{1,2}, 魏兴战^{1,2}, 史浩飞^{1,2}

- (1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 微纳制造与系统集成研究中心, 重庆 400714;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 石墨烯具有超高载流子迁移率、零带隙、宽波段响应等性质, 是具有潜力的红外光电探测材料。通过分析石墨烯基红外探测器的发展历程, 综述了石墨烯红外光电响应的机理, 对石墨烯基探测器的响应度、波段、速度等性能和器件结构进行了梳理, 并围绕石墨烯基探测器在材料制备、工艺兼容性等方面的挑战进行了探讨和展望。

关键词: 石墨烯; 红外探测器; 探测机理

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0103003

Recent progress on the mechanism and device structure of graphene-based infrared detectors

Yang Qi^{1,2}, Shen Jun^{1,2}, Wei Xingzhan^{1,2}, Shi Haofei^{1,2}

- (1. Center for Nanofabrication and System Integration, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Graphene has some unique properties, such as ultra-high carrier mobility, zero band gap, broadband response, which make it a promising material in infrared photodetection. In this review, the development history of graphene-based infrared detectors was analyzed, and the mechanism of relevant photoelectric response was summarized. The responsivity, wave-band, response speed and device structure were sorted out. The challenges of material preparation and process compatibility of graphene-based detectors were also discussed and prospected.

Key words: graphene; infrared detector; detection mechanism

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(11574308); 国家重点研发计划(2017YFE0131900)

作者简介: 杨旗(1990-), 男, 博士生, 主要从事石墨烯基红外探测器件的研究。Email: yangqi@cigit.ac.cn

导师简介: 史浩飞(1982-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事石墨烯等二维材料的规模生长及光电探测应用等方面的研究。

Email: shi@cigit.ac.cn

0 引言

自 2004 年石墨烯被发现以来,由于其超高的载流子迁移率、零带隙和费米能级易调控等性质,在红外光电探测领域展现了很好的应用潜力。2009 年 Park 等报道了基于石墨烯晶体管的光电流探测研究^[1-2],同年发现了石墨烯的超快光电响应^[3]和超宽波段响应现象^[4],开启了石墨烯基探测器的研究热潮。这些研究展示了石墨烯光电探测器的前景,但是同时暴露出石墨烯在探测器中应用的问题:比如,石墨烯吸光度只有 2.3%,难以获得高的量子效率;石墨烯超短的载流子寿命导致光生载流子快速复合,限制了光生电流或电压的效率^[5]。针对这些问题,有研究提出将石墨烯与其他材料复合^[3, 6],以增加其综合性能。随着研究的深入,近年来石墨烯复合材料光电探测器领域的研究取得了很好的进展^[7],并实现了基于焦平面阵列的器件原型^[8]。

文中针对不同的光电转化机制,对基于石墨烯的红外探测器进行了分类介绍,并对其关键性能如响应度、响应速度、光谱范围等方面提升的研究成果进行了综述,对石墨烯基探测器红外成像的研究探索进行了讨论。最后,对石墨烯基红外探测的机遇和挑战进行了分析,并对其发展前景进行了展望。

1 石墨烯基红外探测器光电转换机理

红外探测器的关键性能指标包括响应度、噪声等效功率、比探测率、响应光谱范围、响应时间、增益等。基于不同的结构和机理,各项性能指标的侧重点也有所差异,本节介绍 5 类典型的石墨烯红外探测器光电转化机理:光伏效应 (Photovoltaic Effect, PV)、光诱导局域场调控效应 (Photogating Effect, PG)、光热电效应 (Photothermoelectric Effect, PTE)、测辐射热效应 (Bolometer Effect, BE) 和光致热电子激发效应 (Photo-thermionic effect, PTI)。

1.1 PV

PV 指光照使不同掺杂半导体界面或异质 PN 结处产生电势差的现象。早在 1954 年,美国贝尔实验室首次利用 PV 制成了单晶硅太阳能电池。2010 年,基于 PV 的石墨烯基红外探测器出现,它利用不同掺杂石墨烯之间功函数的不同在界面处形成电荷转

移,费米能级拉平后能带弯曲形成内建电场。在平衡状态,不同掺杂的能带不连续产生势垒,电荷在界面处的流动受到限制。光照时,光生电子空穴对借助内建电场分离形成光电信号。典型的结构示意图如图 1(a)图所示,p-n 异质结型探测器光生载流子在能带中输运如图 1(b)所示。这类 p-n 结探测器有 3 种工作模式:零偏压、适度反向偏压和较大反向偏压,一般在零偏置下表现为典型的光伏模式,此时具有最低的暗电流,可以有较高的探测率和灵敏度,但由于缺乏内部增益,响应度通常较低。光伏模式下,光电流的方向决定于内建电场的方向,当结区电场由 p-n 型转换为 n-p 型,或者由 p⁺-p 转换为 p-p⁺时,光电流方向发生反转^[9]。

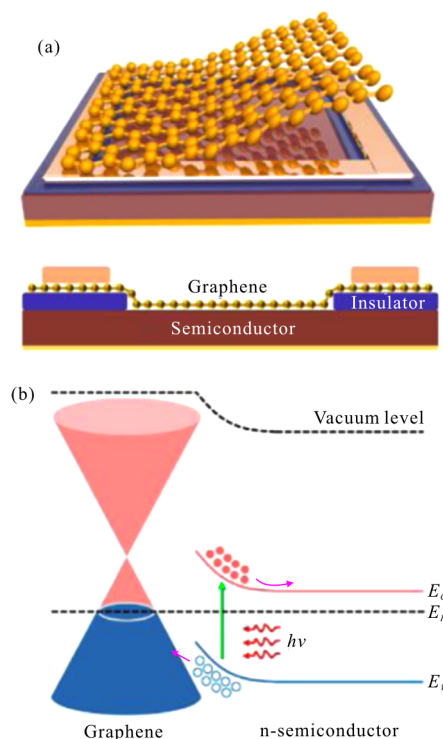


图 1 (a) 石墨烯/半导体异质结光伏模式结构图;(b) 石墨烯/n 型半导体异质结在光照下的能带图^[7]

Fig.1 (a) Structure diagram of graphene/semiconductor heterojunction on photovoltaic mode; (b) The energy band diagram of graphene/n-type semiconductor heterojunction under illumination^[7]

1.2 PG

光诱导局域场调控又称“Photogating”,由 Drain 于 1989 年首次提出,指利用光照产生载流子在材料电荷陷阱处积累产生电势,通过电势形成类栅压效

果,调控晶体管沟道材料载流子浓度,进而间接调控电导率的光电转换机制^[10]。2012年该机理应用在石墨烯基探测器上:用石墨烯复合量子点(QDs)形成了超高增益的探测器。基于该机理石墨烯基探测器结构通常是石墨烯/半导体材料构成的光电晶体管,如图2(a)所示,其中石墨烯由于高迁移率作为沟道导电材料。PG型探测器依据石墨烯或者复合材料吸光分为两类。以半导体等复合材料吸光为例,在这种类型的晶体管受光照时,半导体材料产生电子空穴对,其中一种载流子转移到石墨烯中,另一种载流子被束缚在半导体或者纳米粒子、量子点或其他二维材料的电荷陷阱中积累形成局域栅电极,有效地调制石墨烯的费米能级,诱导石墨烯中产生更多的载流子,通过改变其载流子浓度进而改变其电导率。石墨烯中的载流子在与半导体中载流子复合前,在其寿命内可在外电路中多次循环形成增益,石墨烯的较高迁移率决定了超短的沟道渡越时间 $\tau_t(\tau_t=L^2/\mu V_{ds})$,其与束缚在半导体中载流子较长的载流子寿命 τ_1

(可达ms甚至s量级)具有数量级的差异^[11],因此可以形成巨大的光电流增益 $G=\tau_1/\tau_t$ 。当然,较长的束缚载流子寿命同时决定了较长的响应时间,不能同时获得高增益和快速响应。此外,由于外加栅压 V_g 作用,光电流可能会出现负值,如图2(b)所示。不同于光伏型和光热电型探测器,光照直接提升载流子浓度,PG效应间接通过光生电势调节沟道材料的光电导。该作用方式往往可以通过低维材料的复合直接形成,如不同二维材料间杂化、二维材料和零维量子点杂化、二维材料和一维纳米线杂化等,因此,PG效应在石墨烯基探测领域应用十分普遍^[7]。

随着对 Photogating 型石墨烯基探测器研究的深入,Hu等提出了一种能够同时提升响应度和加快响应时间的广义光诱导局域场调控效应^[12-13],这种器件主要利用“光伏场效应晶体管”的机制,同时获得了高增益和快速响应。利用该原理制作 p-Si/氧化层/石墨烯的结构,通过 p-Si/氧化层界面的光生电势调控石墨烯沟道电导,获得了 1 000 A/W 的响应度,同时响应速度达到了 400 ns^[14]。

1.3 PTE

1821年,德国物理学家 Seebeck 发现,在两种不同的金属所组成的闭合回路中,光照在接触区时,光生热载流子会由于温度差异扩散而形成电势差,这种光电转换现象被称为 Seebeck 效应或 PTE。2010年,Xu等发现这种效应在不同掺杂的石墨烯中同样发挥重要作用^[15-19]。PTE效应典型结构示意图如图3(a)所示。入射光引起载流子温度变化,光生热载流子由于温度梯度而扩散,导致光电流产生,如图3(b)~(d)所示^[20]。由于石墨烯较大的光学声子能量为 $\sim 200\text{ meV}$ ^[21-22],并且费米速度和声学波速的失配比 $V_F:V_s$ 达到 100,意味着本征声子只能在有限的相空间进行散射,这些特征造成石墨烯中的电子-声子耦合与其他材料体系相比十分微弱^[23]。而光生热载流子的温度 T_e 比晶格温度高,并可以保持若干皮秒以上,故热载流子通过和声学声子之间的散射使热电子和晶格温度达到平衡^[24-25],尽管无序碰撞会引起载流子明显加速^[26-28],但该平衡过程仍能在几纳秒内完成^[24],因此 PTE 效应可以用作制作超快响应的石墨烯探测器。

具体来说,光生热电子通过扩散产生电压 $V_{PTE} =$

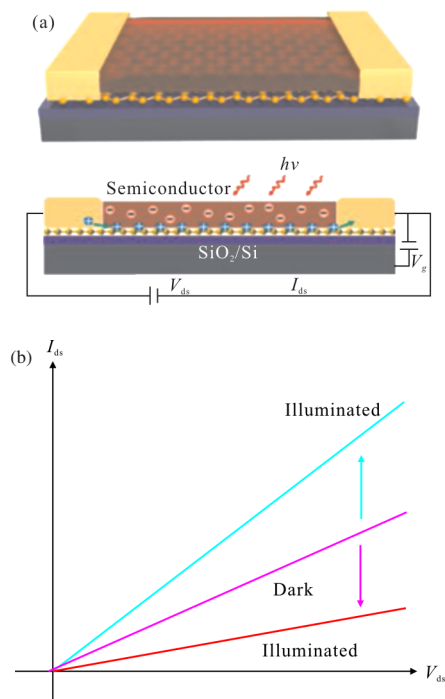


图 2 (a)石墨烯/半导体光电晶体管 photogating 模式结构和工作原理图;(b)不同 V_g 区域下光电流的方向发生变化^[7]

Fig.2 (a) Structure and working principle diagram of graphene/semiconductor phototransistor on photogating mode; (b) Direction of photocurrent in different V_g regions^[7]

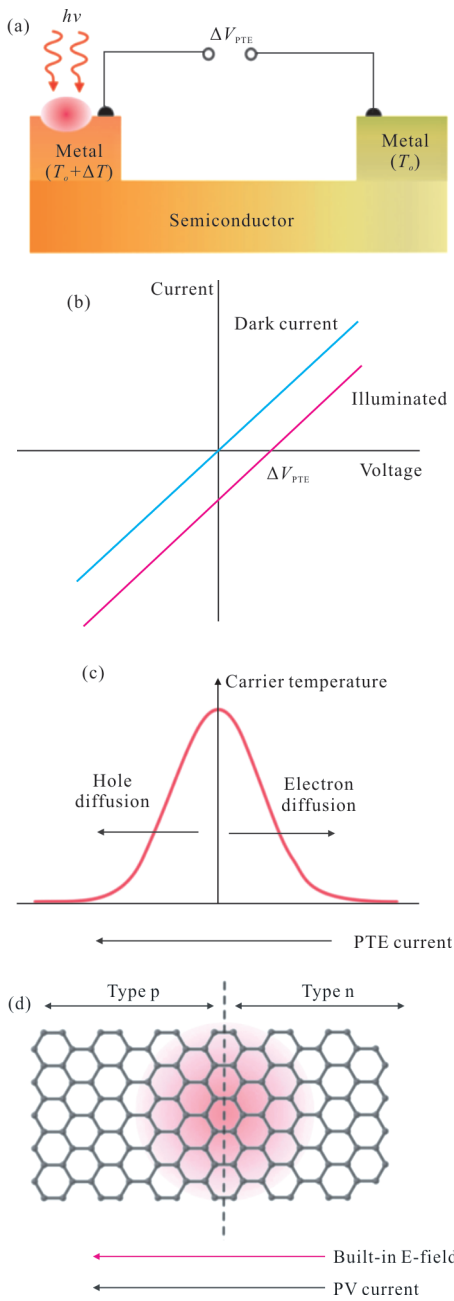


图 3 (a) PTE 效应结构示意图; (b) 有无光照时的 $I-V$ 特性曲线^[20]; (c) 光强影响载流子浓度分布, 载流子扩散形成 PTE 电流; (d) PTE 效应中 p-n 结中的内建电场分离载流子从 n 型向 p 型流动^[31]

Fig.3 (a) Structure schematic diagram of photothermoelectric effect; (b) $I-V$ characteristic curve with or without illumination^[20]; (c) Light intensity affects carrier concentration distribution, diffusion of carrier forms PTE current; (d) During PTE effect, built-in electric field separates carriers from n-type to p-type in p-n junction^[31]

$(S_1 - S_2)\Delta T_e$, 其中 S_1, S_2 是两个不同掺杂的石墨烯区域中的热电功率 (Seebeck 系数), ΔT_e 是两区域之间的电子温度差。 V_{PTE} 可通过由光诱导的温度梯度所产生的局部电场与空间变化的 Seebeck 系数来计算: $V_{PTE} = \int S \nabla T_e dx$ 。 热功率 S 与电导 σ 相关, 公式

为 $S = \frac{\pi^2 K_B^2 T_e}{3q\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$, 其中 q 是电子电荷数值, 电导率 σ 对能量 ε 的导数必须在费米能量下求出, 即在 $\varepsilon = \varepsilon_F = \hbar v_F k_F$ 时, \hbar 为约化普朗克常数, v_F 为费米速度 (石墨烯费米速度为 $\sim 10^6 \text{ ms}^{-1}$)^[29], k_F 为费米波矢, 该式适用于 $k_B T \ll \varepsilon_F$ ^[30]。

1.4 BE

1881 年美国科学家 S.P 发明测辐射热计, 其通常由惠斯通电桥构成, 如图 4(a) 所示, 基本原理是在被电磁波辐照时, 热敏材料温度变化引起电阻发生变化, 测量这种电阻变化即可得出辐射电磁波功率^[32-33], 机理如图 4(b) 所示。测辐射热计主要由半导体^[34]或超导体材料^[35]制成, 并广泛用于亚毫米 (THz) 波长范围, 该波段测辐射热计是最灵敏的探测器之一。测辐射热计的热容 C_h 确定器件的响应时间

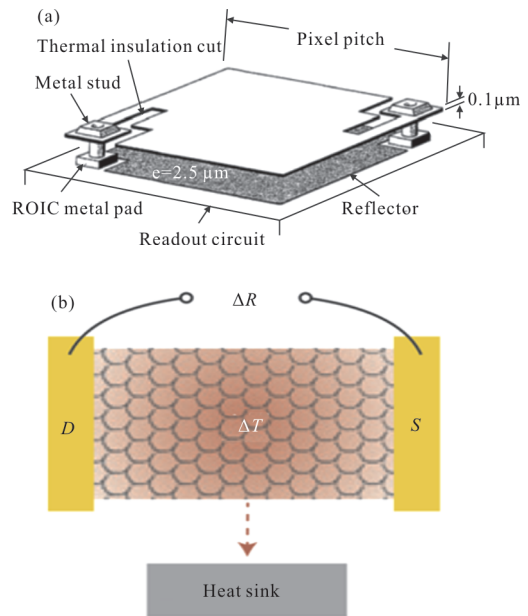


图 4 (a) 惠斯通电桥结构图^[32]; (b) 测辐射热计的原理示意图^[30]
Fig.4 (a) Structure diagram of the Wheatstone bridge^[32]; (b) Schematic diagram of the bolometer^[30]

$\tau=R_h C_h$ [35], 热阻 R_h 限定器件的灵敏度, 特定面积的石墨烯具有较小体积和较低的态密度, 所以 C_h 很低, 导致石墨烯基测辐射热计能够实现快速响应。由于石墨烯声子费米面较小, 用声学声子冷却热电子较为低效, 用光学声子又要求较高的 T_e ($k_B T_e > 0.2$ eV), 故 R_h 相对较高, 所以石墨烯具有较高的测辐射热灵敏度 [30]。

由于 BE 是基于光诱导的电导变化, 而不是直接产生光电流, 需要施加外部偏压, 可以在均匀的石墨烯上实现, 而不需要引入 p-n 结。由入射光引起的电导变化可归因于两个机制: 由于温度变化引起的载流子迁移率或载流子数量的变化。

1.5 PTI

PTI 是指在金属内, 光生载流子和金属内载流子散射, 使部分热化电子的温度较高, 能量高于势垒, 使低能光子入射也能激发电子到导带, 形成光电流的物理过程。经典金属/半导体模型能带图如图 5(a) 所示, 在该模型中光生载流子与其他载流子散射热化电子, 形成热载流子温度 (T_e) 的统计分布。随着 T_e 的增加, 更多的载流子可以克服肖特基势垒, 通过金属中热电子发射产生电流, 即使能量低于肖特基势垒高度的光子也能导致 T_e 增加, 进而导致载流子发射。然而要达到高的 T_e , 热载流子必须弱耦合于周围的声子。2013 年, Wang 等把这种机制应用在石墨烯基探测器上, 实现了响应波段的拓宽 [36]。作为半金属, 石墨烯是将光子转化为热载流子的优良平台 [37], 能高效地形成热载流子氛围。石墨烯具有很强的电子-电子相互作用, 导致载流子在 50 fs 内热化 [38-39], 其中光激发载流子初始能量的很大一部分

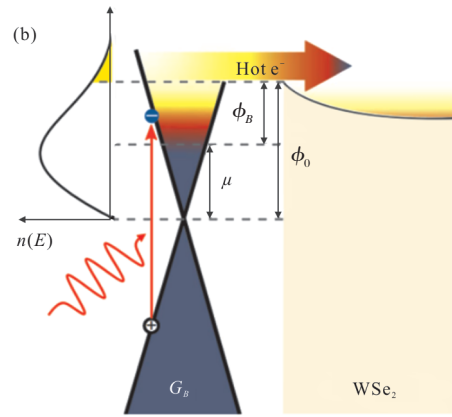
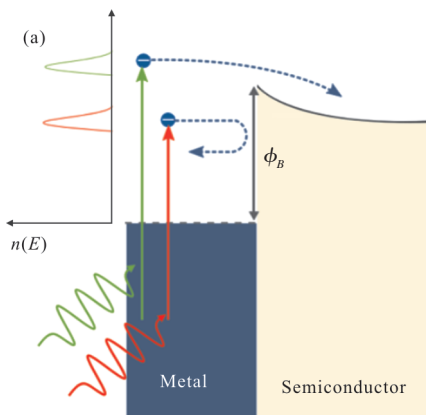


图 5 (a)金属中 PTI 原理图; (b)石墨烯基探测器中 PTI 原理图 [42]

Fig.5 (a) Schematic diagram of PTI in metal; (b) Schematic diagram of PTI in graphene-based detector [42]

(>50 %)用来形成热化电子。同时, 由于晶格与电子的弱耦合, 其寿命相对较长 (大于 1 ps) [27]。因此, 在连续波激发下 [17], 这些热化载流子温度可以明显高于声子温度 ($T_e > T_{ph}$)。此外, 石墨烯费米能量的可调谐性可对肖特基势垒的高度加以控制, 与高的热载流子温度结合, 可以实现较高的热发射效率。由于这些原因, 石墨烯被认为是一种高效且可调谐的 PTI 理想材料 [40-42]。

就一般的石墨烯红外探测器而言, 上述这 5 种光电转换效应往往并非独立存在。例如, PV 效应和 PTE 效应因为都是二极管的结构, 常常是同时出现, 共同特点是光致载流子浓度升高, 两者都可以通过光激发后持续存在的电子-声子相互作用产生热电子, 并都依靠电子-电子散射来主导光生载流子能量弛豫, 过程中还可能与热电子作用产生光生载流子倍增现象 [18, 43], 因此不容易辨别。Gabor 等提出可依据这两种效应在单极结 pp⁺和 nn⁻中表现出相反的极性来识别石墨烯与氮化硼介质器件中光电流为热电效应产生 [17]。Marcus 等通过测量石墨烯/Si/SiO₂ 的 EFT 结构中光电导, 依据两种效应产生的光电导极性不同, 指出在低静电掺杂下是 PV 效应主导, 在 n 型和 p 型掺杂中, 测辐射热效应占主导地位 [44]。PTE 效应在石墨烯 p-n 结 [15, 17] 中或在悬浮石墨烯 [45] 中占据支配地位, 因为此时是热电子产生光电响应而非晶格加热。

光电导和测辐射热计的区别可以通过结合光学和运输的方法进行鉴别,不同的电流和温度会影响到电阻变化是由光加热主导或电加热主导,通过实验证明,在温度为 20~40 K 时是由光加热导致电阻变化即光电导模式,在更低温度下电加热导致电阻变化即测辐射热计模式主导^[46]。对均匀石墨烯加偏置的本征光响应中,PTE 效应作用小,而主要由光伏和光诱导的测辐射热效应支配光响应。

2 高性能石墨烯红外探测器件

追求高性能的石墨烯基探测器是研究人员的终极目标。为了克服石墨烯吸光度低的局限,近年来各研究组陆续提出了基于等离子激元、天线、波导、孔洞等局域光场增强吸收的石墨烯基红外探测器。为了实现高增益,石墨烯复合量子点等材料做成 PG 机理的探测器、石墨烯与热释电材料结合做成 BE 机理的探测器、特殊结构形成局域场增强光吸收都是有效的解决方案。实现高速响应可利用 p-n 结加适度偏压或 PTE 的机理优势实现,石墨烯结合波导也具有出色的快速响应效果。拓展石墨烯基探测器的响应光谱范围,可发挥石墨烯的零带隙优势,使用 PTE 或 PTI 效应响应到远红外甚至是太赫兹。凭借石墨烯的诸多优势和巧妙设计,研究人员已经取得了许多具有较好性能的石墨烯基红外探测器成果,分类讨论如下。

2.1 局域光场增强器件

基于局域光场增强吸收是解决石墨烯吸光度低的有效方案之一,尤其是针对基于石墨烯吸光形成光电流的红外探测器。具有代表性的局域光场增强吸收结构是微腔、波导、天线、等离子激元。

2012 年,一种基于石墨烯的法布里-珀罗微腔被提出,结构如图 6(a)所示,微腔诱导增强了吸光率,在波长 855 nm 处光吸收率相比纯石墨烯增强了 26 倍,达到了 60%^[47]。

使用微腔和等离子激元共振虽然可以提升响应,但是限制了吸收光谱范围。硅波导结合石墨烯光电探测器不仅提高了响应度,而且摆脱了吸收谱的限制。2013 年,Xu 等提出了石墨烯复合 Si 波导结构, Si 波导可吸收平行于波导的入射光,结构如图 7 所

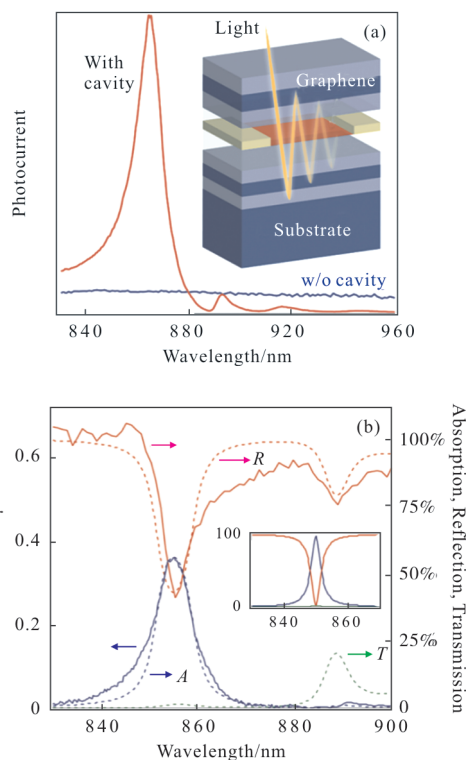


图 6 (a)使用微腔结构增强石墨烯光吸收;
(b)有无微腔的响应度对比^[47]

Fig.6 (a) To enhance graphene light absorption by using microcavity structure; (b) Responsivity comparison with and without microcavity^[47]

示,该器件不但能响应 1.55 μm 红外光还能够响应远超出 Si 的截止波长的 2.75 μm 中红外短波,主要原因是后者运用了 PTI 形成了光电流。其红外响应达到 0.13 A/W,相比纯石墨烯探测器提升了数个数量级^[36]。

2013 年,Pospischil 等提出了单层或双层石墨烯结合 Si 波导的结构并兼容 CMOS 工艺,结构如图 8(a)、(b)所示,该结构不仅能通过波导尺寸调节增强光吸收,提升量子效率,还可以探测到超出 Si 的截止波长的波段,并表现出了 3 dB 截止频率达到 18 GHz 的高速响应能力^[48]。

2013 年,Gan 等通过石墨烯和金属接触掺杂,使集成硅波导的近红外探测器工作在零偏置的光伏模式下实现了近红外(1 450 nm 和 1 590 nm)响应度提升两个数量级,同时带宽高达 20 GHz,结构和性能如图 9 所示^[49]。

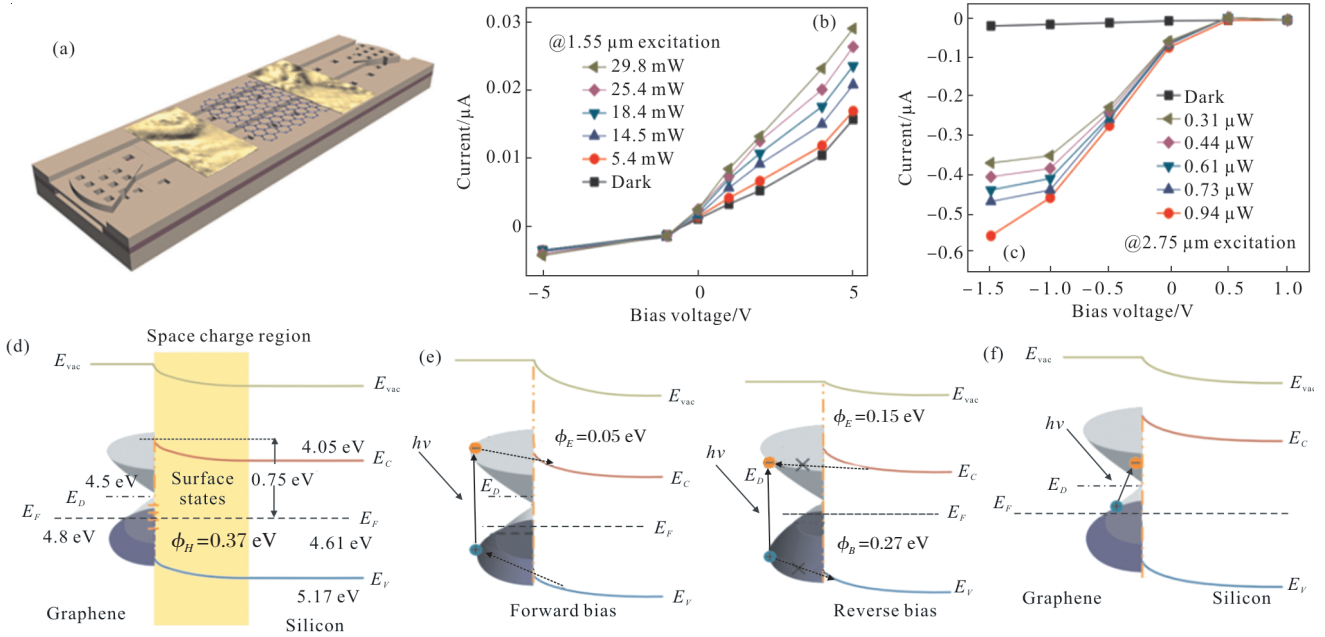


图 7 (a) 石墨烯复合 Si 波导近红外探测器结构示意图; (b) 不同功率的 1.55 μm 激光下, 器件的光电流; (c) 不同功率的 2.75 μm 激光下, 器件的光电流; (d) 石墨烯/Si 的能级关系图; (e) 1.55 μm 激光下光电流产生机制; (f) 2.75 μm 激光下光电流产生机制^[36]

Fig.7 (a) Schematic diagram of graphene composite Si waveguide near-infrared detector; (b) Photocurrent of the device under different power of 1.55 μm laser; (c) Photocurrent of the device under different power of 2.75 μm laser; (d) Energy level diagram of graphene/Si; (e) Photocurrent-generation mechanism under 1.55 μm laser; (f) Photocurrent-generation mechanism under 2.75 μm laser^[36]

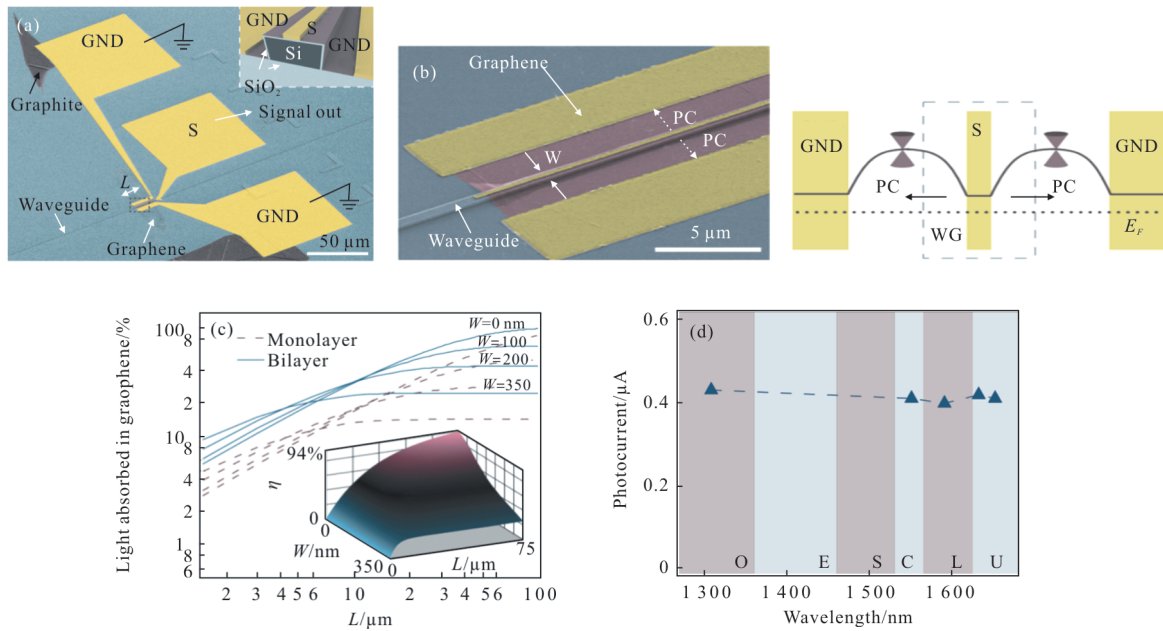


图 8 (a)、(b) 单层或双层石墨烯结合 Si 波导的结构和原理图; (c) 单/双层石墨烯光吸收率随 Si 波导宽度的变化关系; (d) 器件在不同波长的光电流及其对应的吸收能带^[48]

Fig.8 (a), (b) Structure and schematic diagram of single-layer/bilayer graphene combined with Si waveguide; (c) Relationship between light absorption of single-layer/bilayer graphene and width of Si waveguide; (d) Photocurrent of different wavelengths of the device and its corresponding absorption energy band^[48]

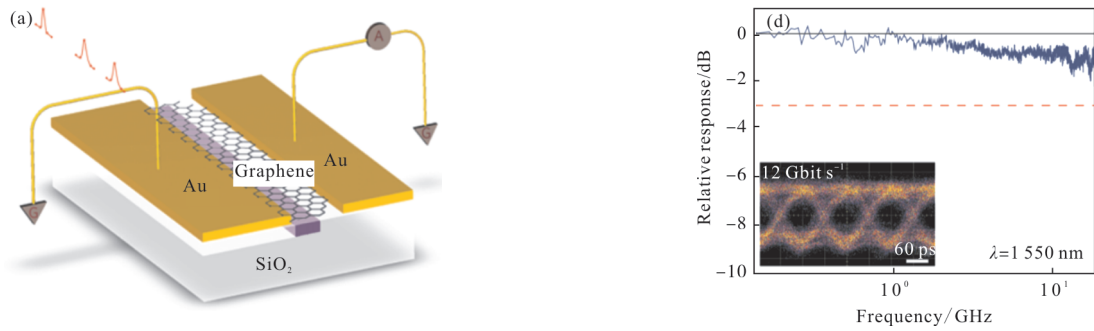


图 9 (a)、(b) 石墨烯/Si 波导近红外探测器的结构示意图；(c) 不同波长的响应度；(d) 1 550 nm 光源下器件带宽^[49]
 Fig.9 (a), (b) Schematic diagram of graphene/Si waveguide near-infrared detector; (c) Responsivity of different wavelengths; (d) Device bandwidth under 1 550 nm laser^[49]

2019 年, Lee 等提出一项利用石墨烯声波等离子体谐振器的两级耦合 (自由空间光耦合到传统的石墨烯等离子体, 然后耦合到超细化的声波等离子体), 实现了中红外光入射 94% 的吸率, 结构和性能如图 10 所示^[50]。

此外, 石墨烯基红外探测器表面等离激元增强吸收的结构还包括: 等离激元量子点/纳米材料增强^[51-52]、金属阵列增强^[53]、天线增强^[54-55]、牛眼结构

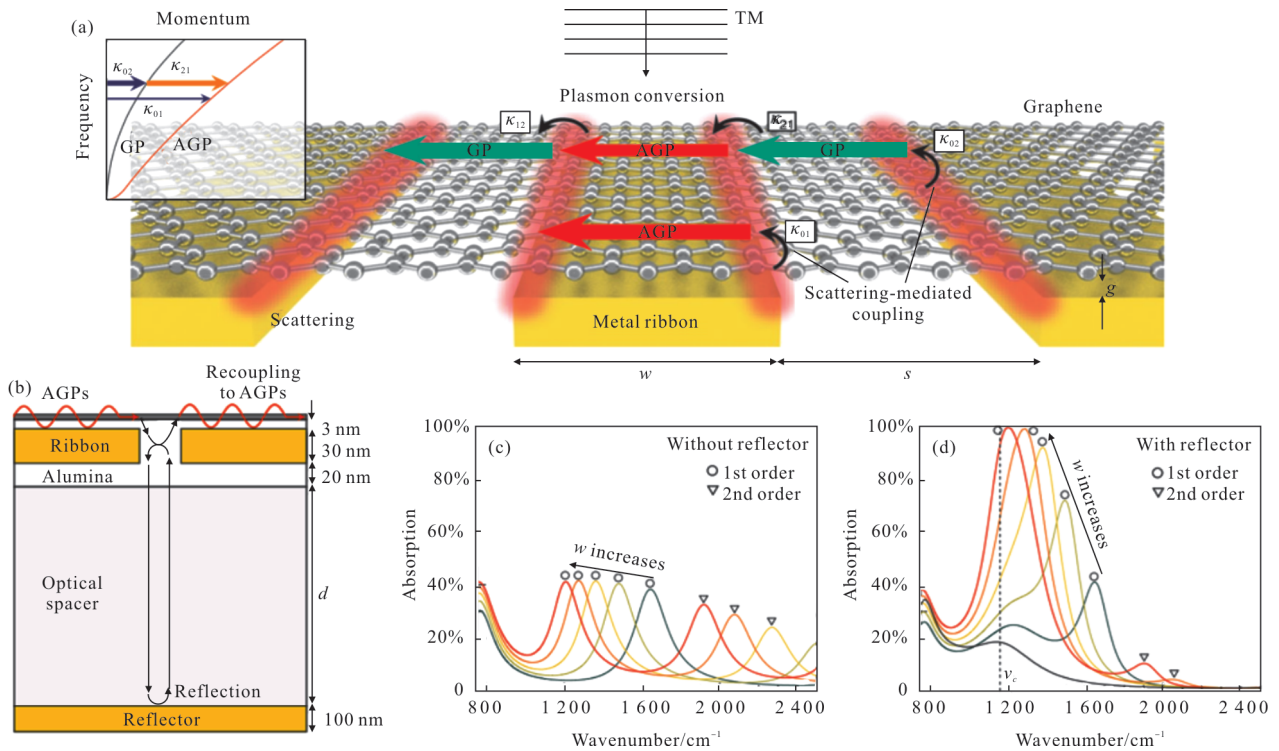


图 10 (a) 石墨烯声波等离子体谐振器结构原理示意图；(b) 反射腔设计；(c)、(d) 有无反射层的吸收增强效果对比^[50]

Fig.10 (a) Schematic diagram of the structure principle of graphene sonic plasmon resonator; (b) Reflection cavity design; (c), (d) Comparison of absorption enhancement effect with or without reflection layer^[50]

增强^[56]等局域光场增强吸收的石墨烯基红外探测器。随着研究的深入,局域光场增强光吸收的波段从近红外向中远红外甚至 THz 波段延伸^[57-58]。

2.2 高增益器件

利用 Photogating 效应是实现高增益的方案之一,在 Konstantatos 等2012的工作中,利用石墨烯复合 PbS 胶体量子点做成近红外探测器,结构如图11(a)所示。因为 PbS 量子点具有高吸光率,表面具有高浓度的载流子俘获中心,光生电子空穴对中的空穴转移到石墨烯中,电子在量子点俘获中心中的寿命长达 20 ms,在石墨烯中空穴与束缚在量子点中的电子复合前,已经在高迁移率的石墨烯沟道中多次

循环,因此,实现了每个入射光子产生 10^8 个电子的超高增益,近红外响应度达到 10^7 A/W,见图 11(b), D^* 达到了 $7 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,此外,这种探测器的响应波段可以依据量子点的尺寸大小进行调节^[11]。

2016 年, Nikitskiy 等利用如图 12(a)、(b)所示结构结合量子点二极管和石墨烯晶体管做成探测器,

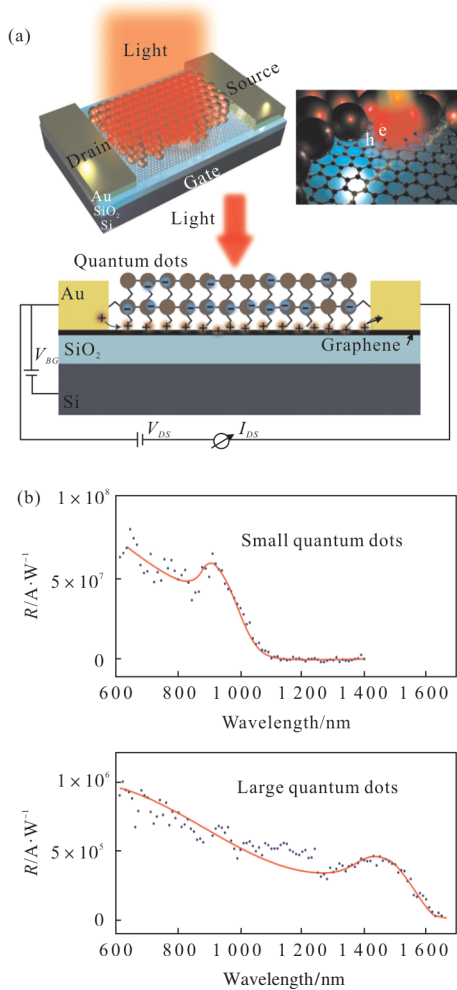


图 11 (a) PbS 胶体量子点/石墨烯探测器结构原理图;(b)胶体量子点的大小变化对不同波段响应的影响^[11]

Fig.11 (a) Schematic diagram of PbS colloidal quantum dots/graphene detector structure; (b) Effect of size change of colloidal quantum dots on different wavelengths response range^[11]

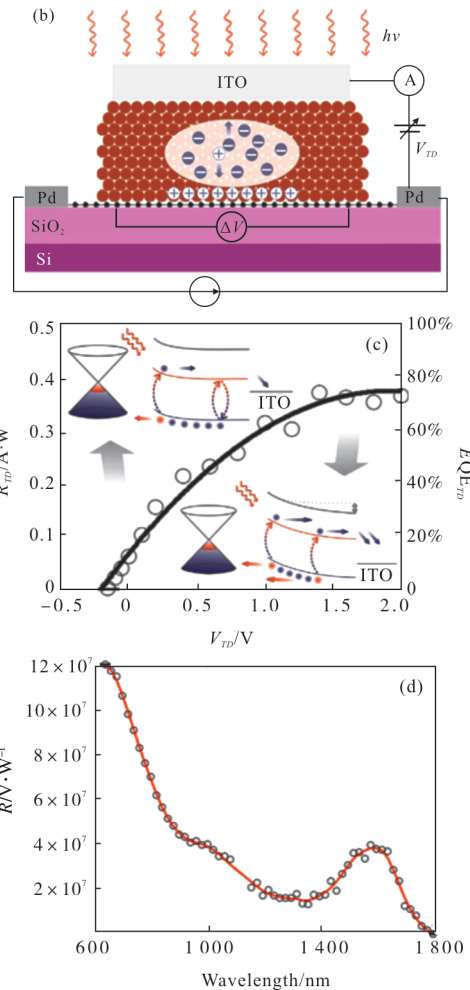
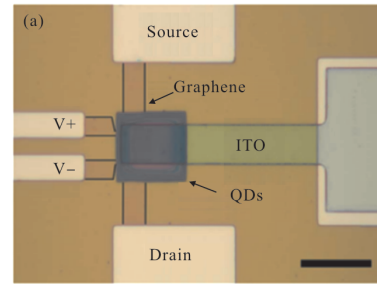


图 12 (a)、(b)结合胶体量子点和石墨烯晶体管探测器器件结构和工作原理;(c)、(d)器件探测性能^[59]

Fig.12 (a), (b) Structure and working principle of hybrid detector colloidal quantum dot with graphene transistor; (c), (d) Device detection performance^[59]

克服了晶体管量子效率低、响应慢、线性动态范围有限的缺点,实现了超过 70%的量子效率,得到了超过 10^5 的增益,线性动态范围在 110 dB,器件 3 dB 带宽为 1.5 kHz^[59]。

利用等离激元增强可进一步扩大复合结构的 PG 机理探测器的增益,2017 年,Ni 等提出了硼掺杂的硅 QDs 与石墨烯结合的探测器,结构如图 13(a)、(b)所示,利用量子点等离激元增强可见光~中红外的吸收,获得了高达 10^{12} 的增益,响应度达到 10^9 A/W,比探测率达到了 $10^{13} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

2017 年,Xu 等通过 Au 纳米点阵提升了石墨烯/Si 探测器的性能,结构如图 14(a)、(b)所示,图 14(a)下左图为 Au 纳米点阵,下右图为在两个指向的激发下模拟类三角形 Au 的近场电场强度;增加 Au 点阵后,器件在 1550 nm 波段光电流增益扩大 10 倍。这里一方面利用金点阵的光陷阱效应增加光吸收,另一方面用石墨烯/Si 形成的内建电场把光生电子扫入 Si 中,延长了光生电子寿命,形成高增益,利用这个

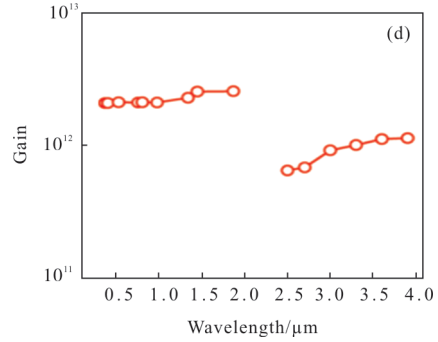
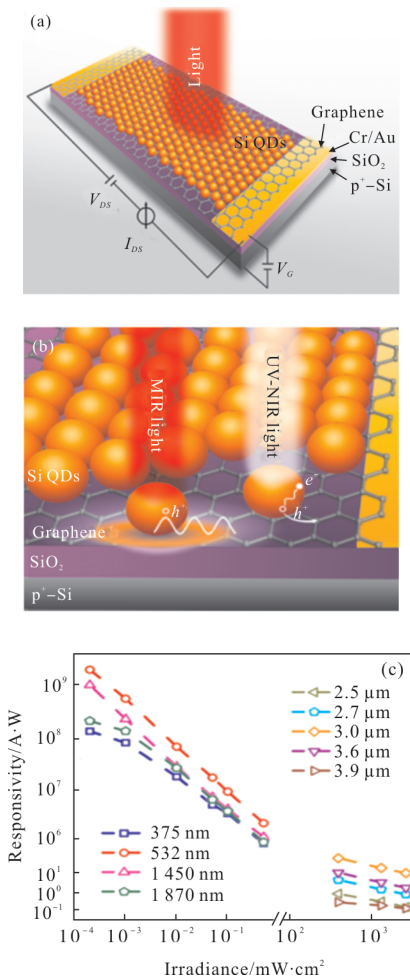
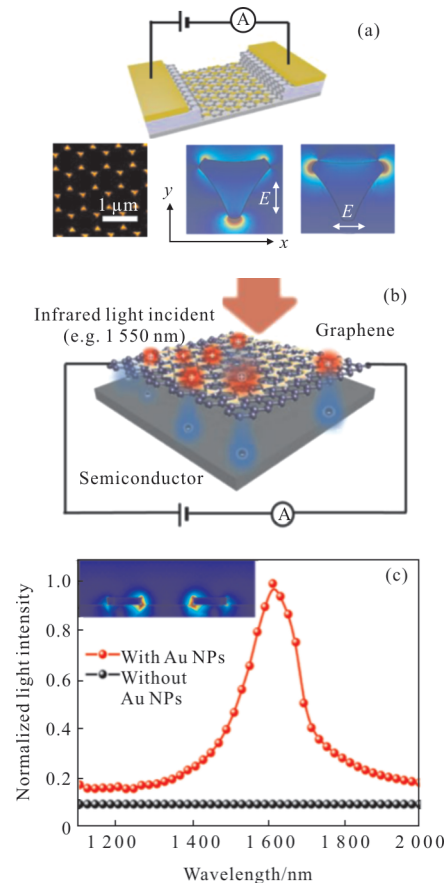


图 13 (a)、(b)等离激元增强 Si 量子点/石墨烯探测器结构原理图; (c) 器件响应度随不同入射光波长和功率变化关系; (d) 器件在不同入射波长的增益^[51]

Fig.13 (a), (b) Schematic diagram of plasmon-enhanced Si quantum dot/graphene detector structure; (c) Device responsivity as a function of wavelength and power of different incident light; (d) Gain of the device at different incident wavelengths^[51]

机制,器件还具有低于 600 ns 的上升沿快速响应^[60]。

石墨烯与热释电材料结合,构成 BE 型的红外探测器,也能实现较高的增益。电阻温度系数 (TCRs)决定红外探测器性能,目前最好的辐射热



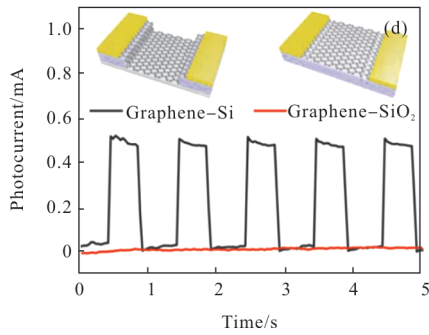


图 14 (a) Au 纳米点阵/石墨烯/Si 探测器;(b)器件工作机理;
(c)有无 Au 纳米点阵的器件在不同波长的归一化光吸收强度;(d)有无石墨烯/Si 内建电场的光电流对比^[60]
Fig.14 (a) Schematic diagram of Au nano lattice/graphene/Si detector; (b) Device operating mechanism; (c) Normalized light absorption intensity at different wavelengths of devices with or without Au nano-lattice; (d) Comparison of photocurrent with or without graphene/Si built-in electric field^[60]

计 TCRs 值为 $2\sim 4\%K^{-1}$, 而石墨烯具有较高的 TCRs($4\sim 11\%K^{-1}$), 认为是一种理想的测辐射热计材料。2016 年, U. Sassi 等提出了利用石墨烯 TCRs 优势, 使用热释电材料 $LiNbO_3$ 调制石墨烯电阻形成了 200 的增益, 他们巧妙设计了悬浮的金属栅结构, 如图 15(a)、(b)所示, 该结构将热释电荷集中在石墨烯通道的顶栅电容器上, 使石墨烯的 TCRs 增大到 $900\%K^{-1}$, 该探测器可室温下分辨 $15\ \mu K$ 的温度变化^[61]。

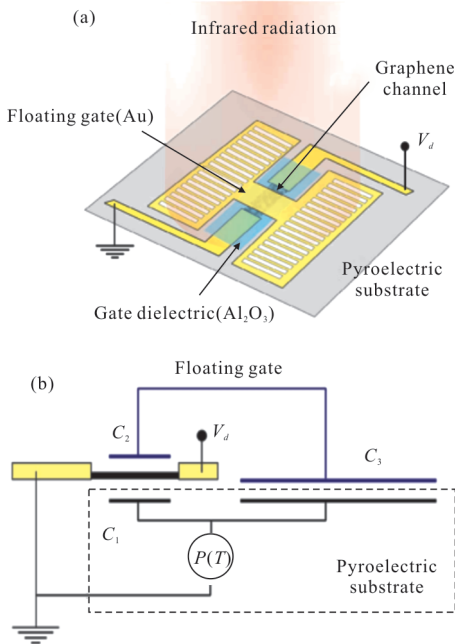
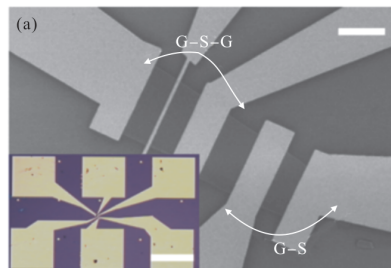


图 15 (a)、(b)金属栅调制的石墨烯基热释电 $LiNbO_3$ 中红外探测器结构示意图;(c)、(d)器件探测性能^[61]
Fig.15 (a), (b) Schematic diagram of a metal gate-modulated graphene-based pyroelectric $LiNbO_3$ mid-infrared detector; (c), (d) Device detection performance^[61]

2.3 高速响应器件

探测器的响应时间往往和材料的迁移率直接相关, 石墨烯的超高迁移率决定了石墨烯可以作为超快的光电探测器件。2009 年, Xia 等利用如图 16(a)结构的单层或多层石墨烯探测器, 凭借石墨烯超高载流子迁移率, 在 V_{ds} 为 0 时得到器件带宽达 40 GHz (衰减 1 dB), 而理论上本征石墨烯探测器的带宽可以达到 500 GHz^[3]。2010 年, 该课题组使用金属/石墨烯/金属结构 (MGM) 非对称电极构成红外探测器, 如图 17 所示, 响应范围达到 $0.3\sim 6\ \mu m$, 能够在 $1.55\ \mu m$ 通信波段产生超快的 10 Gbit/s 串行通讯速率, 器件的 3 dB 带宽达到 16 GHz^[62]。



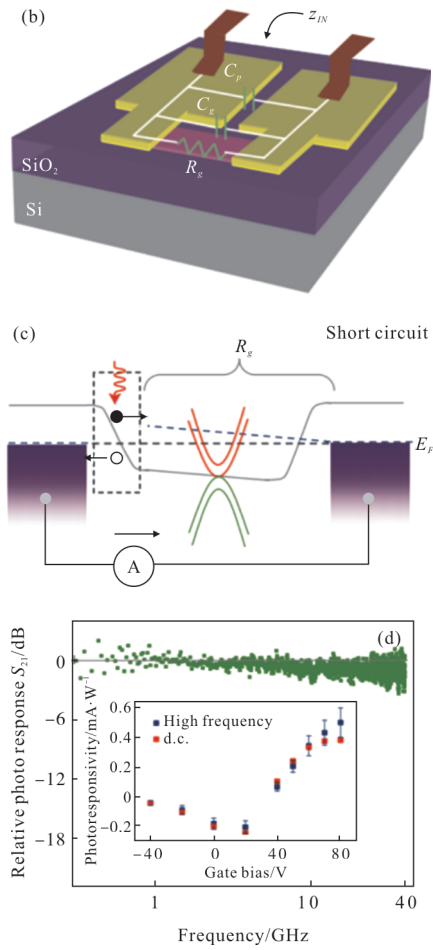


图 16 (a)、(b)石墨烯超快探测器结构图；
(c)工作机理图；(d)高频响应性能^[3]

Fig.16 (a),(b) Structure diagram of ultrafast graphene detector;
(c) Working mechanism diagram; (d) High-frequency response performance^[3]

2011 年, Urich 等同样使用 MGM 结构制作的本征石墨烯红外探测器在 1.55 μm 超快激光、0 V 偏压下工作, 响应时间达到了 2.1 ps, 带宽为 262 GHz, 结构和性能如图 18 所示^[63]。

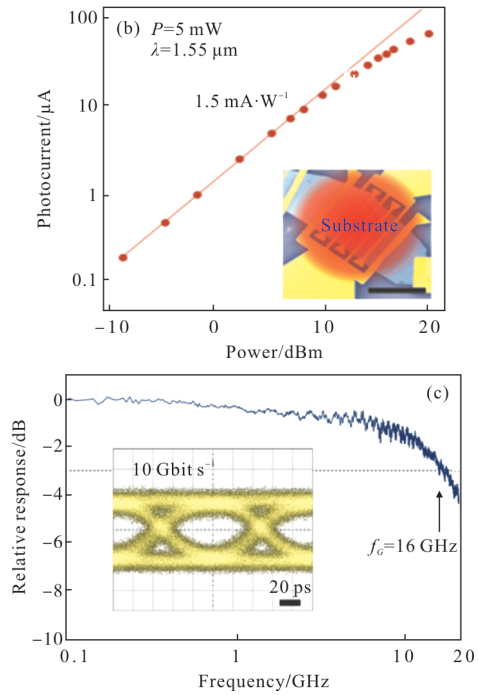
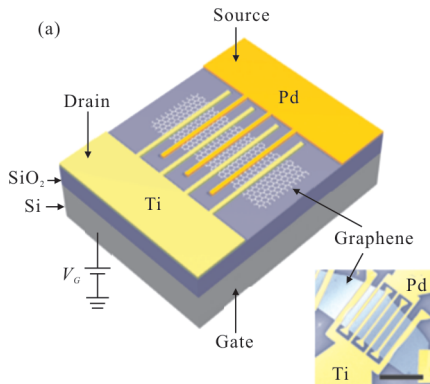
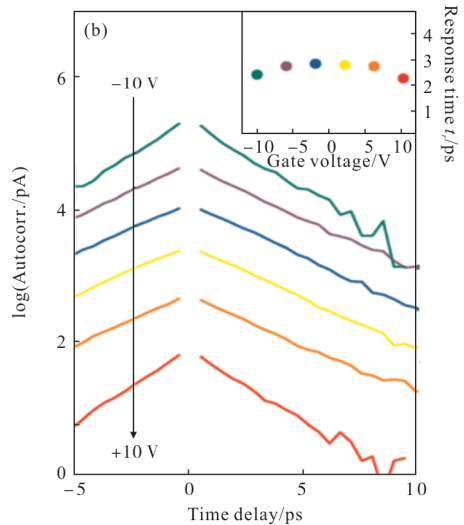
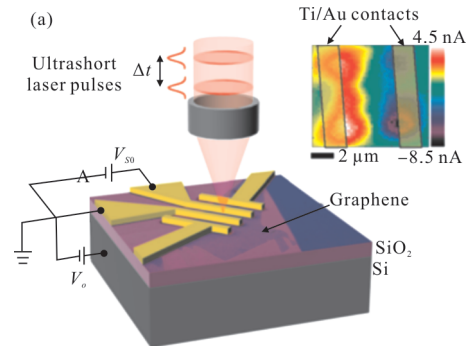


图 17 (a)金属/石墨烯/金属结构非对称电极探测器结构图；
(b)、(c)器件响应度和高频探测性能^[62]

Fig.17 (a) Structure diagram of metal/graphene/metal structure (MGM) asymmetric electrode detector; (b), (c) Device responsivity and high frequency detection performance^[62]



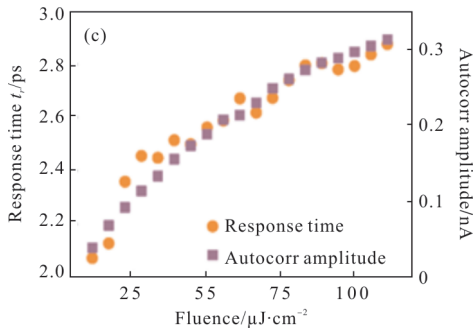


图 18 (a) MGM 探测器结构示意图;(b)在栅极电压-10~10 V 下测量到的相对光电流,在曲线之间引入一个恒定的偏移量,以便进行更好的比较。插图为从自相关光电流的斜率中提取相应的响应时间 t_r ;(c) 激光功率对响应时间和振幅自相关光电流的影响(V_g 为 0 V)^[63]

Fig.18 (a) Schematic diagram of the MGM detector; (b) Relative photocurrent measured at a gate voltage of -10~+10 V, introducing a constant offset between the curves for better comparison. The illustration is to extract the corresponding response time t_r from the slope of the autocorrelation photocurrent; (c) The effect of laser power on response time and amplitude autocorrelation photocurrent (V_g is 0 V)^[63]

结合波导的石墨烯探测器不但能够形成局域场增强光吸收,还能形成波长可调的高速响应。2016年, Schuler 等提出的波导沟道双栅调制的石墨烯红外探测器,利用 PTE 效应获得高速宽光谱响应,响应波段从 1~10 μm 可调谐,3 dB 截止带宽达到 65 GHz,如图 19 所示^[64]。2017年, Schall 等提出一种基于 BE 的石墨烯复合 Si 波导探测器,结构如图 20 所示,能够实现带宽高达 76 GHz 的高速响应,3 dB 截止带宽为 67 GHz,在 1 550 nm 的通讯波段可以实现超过 100 Gbit s⁻¹ 的单信道串行通讯速率,响应时间达到了 7.2 ps^[65]。

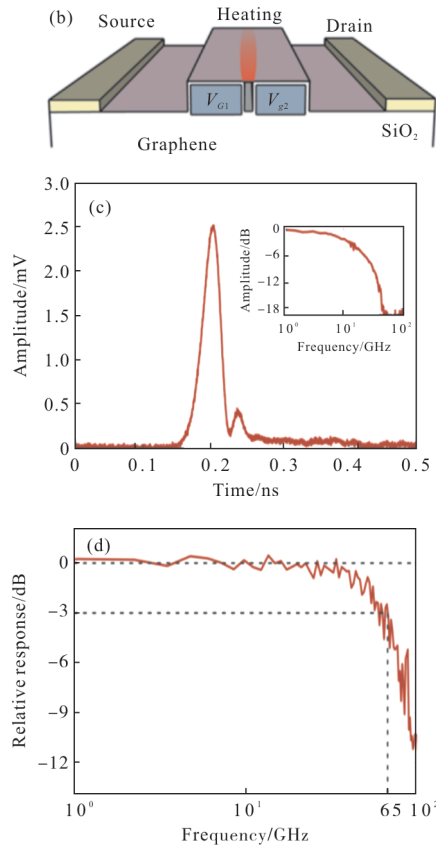
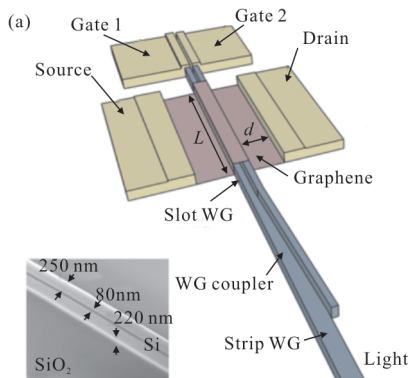
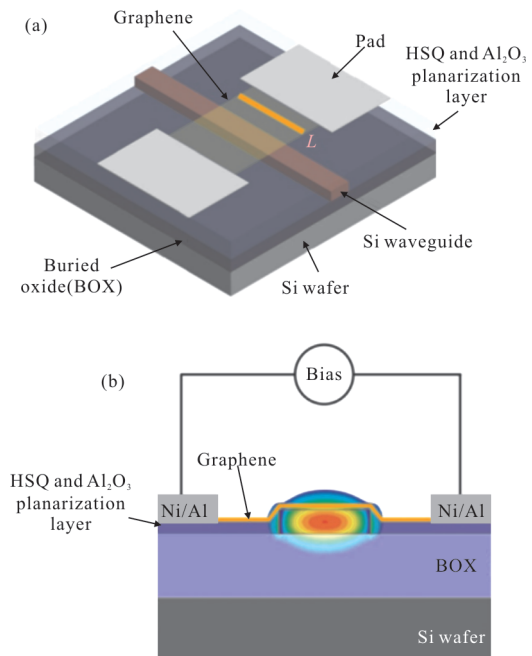


图 19 (a)、(b)波导沟道双栅调制的石墨烯探测器结构原理图;(c)、(d)器件性能^[64]

Fig.19 (a), (b) Schematic diagram of the waveguide channel double-gate modulation graphene detector; (c), (d) Device performance^[64]



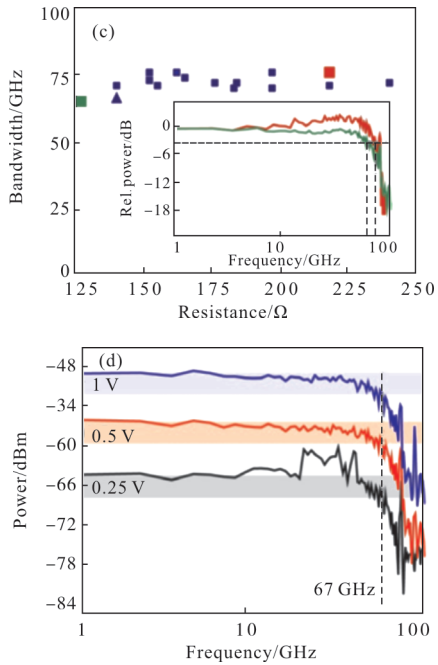


图 20 (a)、(b) 石墨烯复合 Si 波导结构红外探测器结构图；
(c)、(d) 1 550 nm 激光下的高速探测性能^[65]
Fig.20 (a), (b) Structure diagram of the hybrid infrared detector of graphene with Si waveguide; (c), (d) High-speed detection performance under 1 550 nm laser^[65]

2.4 宽波段器件

中远红外到太赫兹波段是电磁波谱的重要波段,该波段的探测一直被基于碲镉汞、II 类超晶格等材料的探测器主导,目前最先进的红外探测器的响应时间和灵敏度接近理论极限,但它们需要在低温下工作。利用石墨烯的本征吸收或者等离子体增强吸收的器件有机会实现中远红外和 THz 波段的室温探测^[66]。

2014 年, Liu 等使用石墨烯之间插入 Si 隧穿层的方式,实现了覆盖中波红外的宽光谱响应。其结构如图 21(a)所示,这里上层石墨烯光激发热载流子形成电势,通过介质层调节下层的石墨烯的

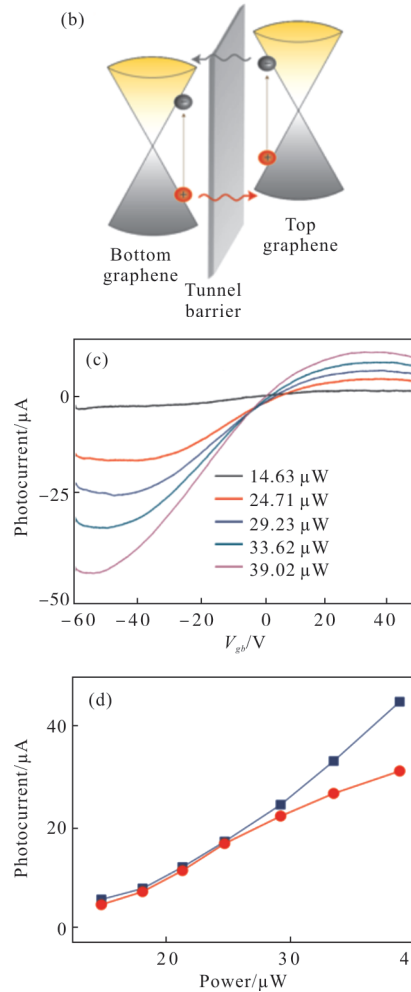
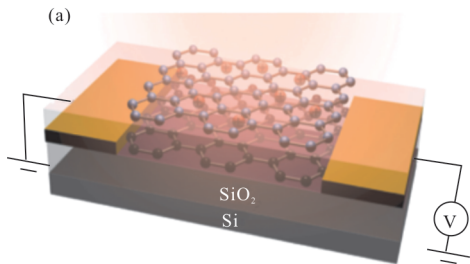


图 21 (a)、(b) 石墨烯/介质层/石墨烯结构及能带结构示意图；
(c)、(d) 3.2 μ m 下光电流随栅压和光功率的变化规律^[67]
Fig.21 (a), (b) Structure and energy band diagram graphene/dielectric layer/graphene; (c), (d) Photocurrent changes with gate voltage and optical power under 3.2 μ m light^[67]

Photogating 效果,在中红外波长 3.2 μ m 实现了 1.1 A/W 的室温响应^[67]。

2014 年, Herring 等利用双栅调节石墨烯掺杂 p-n 结探测器实现了从 0.83~10.6 μ m 的光谱响应,结构如图 22(a)所示,该探测利用光热电机理工作,并指出不同的介质材料对器件性能的影响,如图 22(b)所示^[68]。

在拓宽石墨烯基红外探测的领域中,较有成效的一种方式是使用量子的石墨烯场效应晶体管红外探测器。2013 年, Zhang 等用纯石墨烯做成量子点,工艺流程如图 23 所示。通过能带结构工程对石墨烯引入中间能级和电子束缚中心,形成宽光谱高

增益的红外探测器，响应波段从 532 nm 到 10.3 μm，响应度达到 8.6 A/W^[57]。

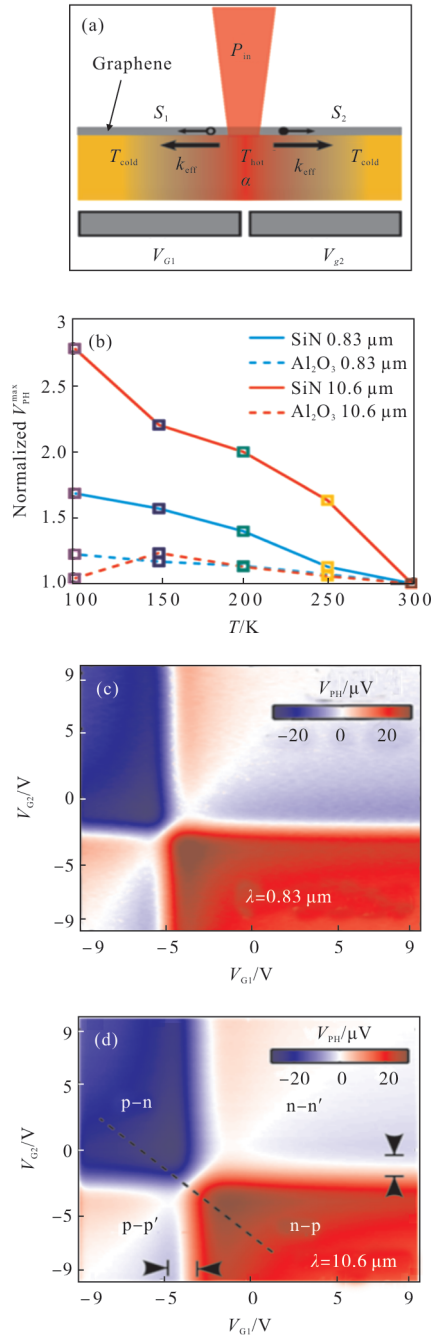


图 22 (a) 双栅调节的石墨烯中远红外探测器; (b) 不同介质层最大 VPH 值随温度的变化关系; (c)、(d) 探测器对不同波长入射光的响应^[68]

Fig.22 (a) Double-gate-modulated graphene Mid- and Far-infrared detector; (b) Maximum VPH value of different dielectric layers as a function of temperature; (c), (d) Detector response to incident light at different wavelengths^[68]

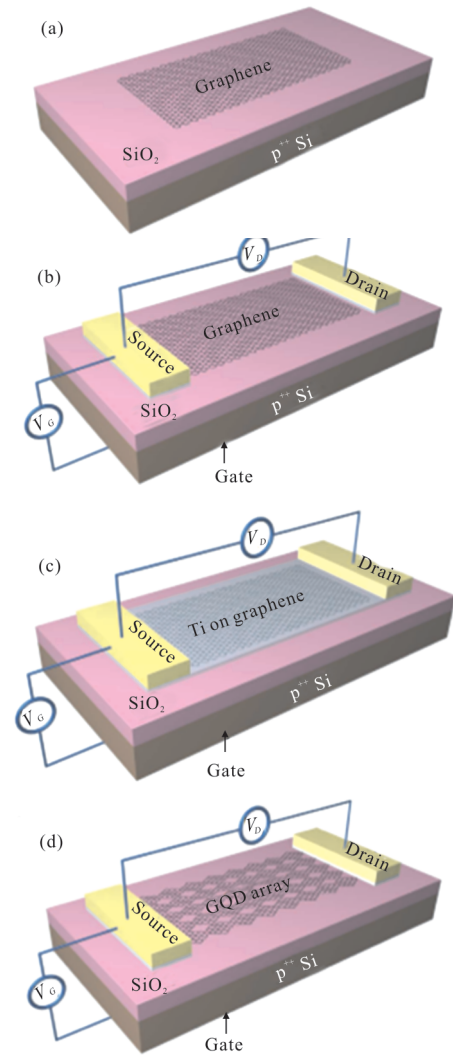


图 23 石墨烯量子点探测器工艺加工流程图^[57]

Fig.23 Process flow chart of graphene quantum dot detector^[57]

2018 年, Ren 等提出了一种基于等离激元的石墨烯纳米条带/MoS₂ 异质结探测器, 结构如图 24(a)~(c)所示, 实现红外波段可调的超灵敏探测, 红外调节范围可依据栅压从 6~16 μm 调整, 室温响应度达到了 1×10⁷ A/W, 这种高响应不同于石墨烯同胶体量量子点^[69]、MoS₂^[70]、Si^[12]等形成异质结, 其响应波段不受材料带隙的限制^[58]。

由于石墨烯零带隙、高迁移率的特点, 使它有潜力在室温下探测整个 THz 波段(0.1~10 THz)。目前, 较为有效的 THz 探测器是在石墨烯 FET 中应用等离子体整流效应, 入射的太赫兹波激发沟道中等离激元波以调制栅与源漏极的电位差, 并通过 EFT 中的非线性耦合和传输特性对通道中的等离子体波进

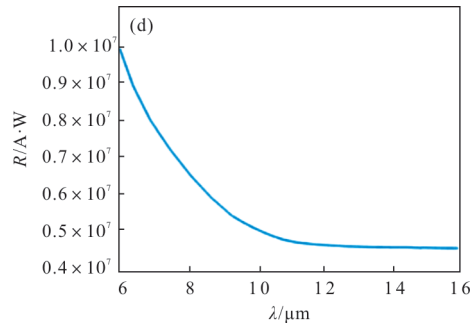
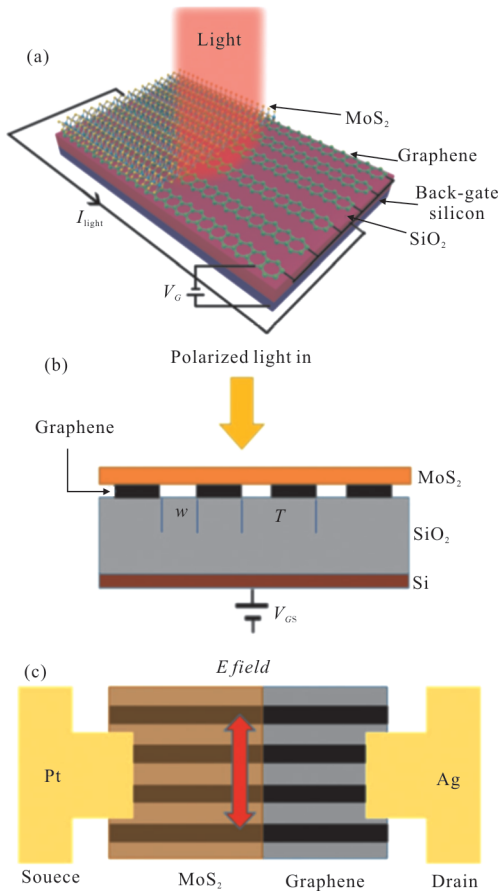


图 24 (a)~(c)石墨烯纳米条带/MoS₂异质结示意图;

(d) 宽光谱高响应红外探测性能^[58]

Fig.24 (a)~(c) Graphene nanoribbon / MoS₂ heterojunction diagram; (d) Wide spectrum high response infrared detection performance^[58]

行校正。图 25 将基于石墨烯的 FET 室温探测器的 NEP 值与现有的市场上占主导的太赫兹光子探测器进行比较,图 26 对比了微测辐射热计探测器并画出了趋势线^[20]。由对比可以看出,石墨烯基 FET 等离子体整流效应探测器与基于 CMOS 和基于硅、SiGe 和 InGaAs 制成的等离子体探测器相比,其在波段拓展方面具有较大优势,性能上还有提升空间。

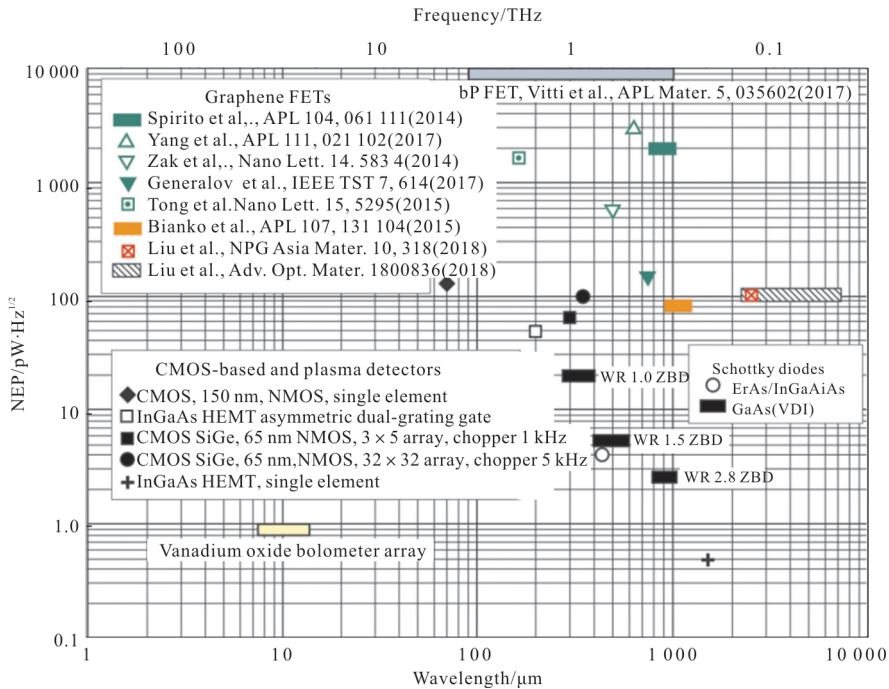


图 25 不同波长下石墨烯基 FET 探测器和不同光子 THz 探测器(基于 CMOS 的肖特基二极管)的 NEP 对比^[20]

Fig.25 NEP comparison of graphene FET detectors and different photon THz detectors (CMOS-based Schottky diodes) at different wavelengths^[20]

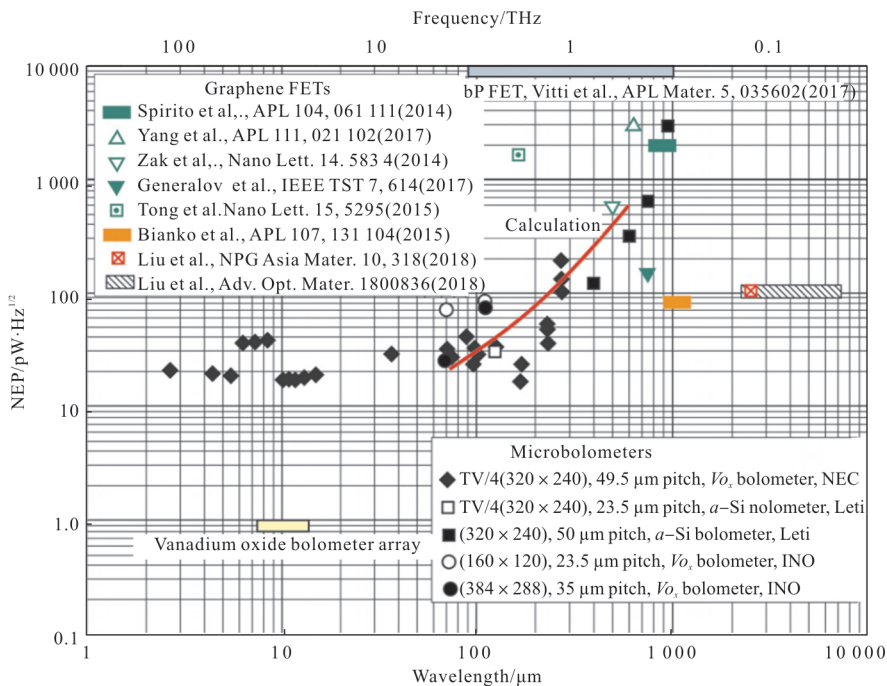


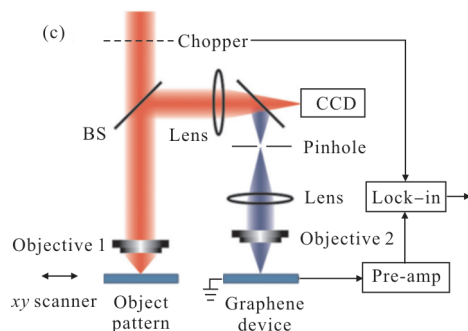
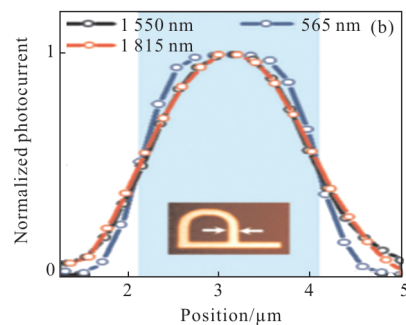
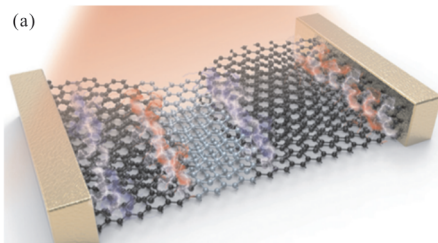
图 26 不同波长下石墨烯基 FET 探测器和微测辐射热计 THz FPA 的 NEP 对比图^[20]

Fig.26 NEP comparison of graphene FET detectors and microbolometer THz FPA at different wavelengths^[20]

3 石墨烯探测器器件成像研究

随着石墨烯基红外探测器性能的不不断提升，在其红外成像方面也开展了相应的探索研究。2016 年，Hu 等报道了多层石墨烯探测器，结构如图 27(a)所示，该器件在光伏和光热电两种机理下工作，在近红外无偏压条件下实现了接近迈克尔逊常数理论极限的高分辨率成像应用：器件在 1 815、1 550 nm 波段的迈克尔逊常数分别为 0.996、0.994，光学分辨率分别达到 877、657 nm。成像线路图和效果如图 27(c)~(d)所示，基于单点器件，通过激光在物体上逐行扫描反射到透镜上，再聚焦到石墨烯基探测器上进行成像^[71]。

在 THz 成像方面，2012 年，Vicarelli 等使用顶栅结构的石墨烯 FET 结合 THz 波接收天线构成探测器，结构如图 28(a)~(c)所示，利用低分流的电容器天线对入射波耦合吸收的不对称性形成电流信号，可以室温探测到 0.3 THz 波段，分辨率达到 0.5 μm，并可用来对未开封的包装盒里的物体或对树叶逐点扫描探测成像，成像效果如图 28(d)、(e)所示^[72]。



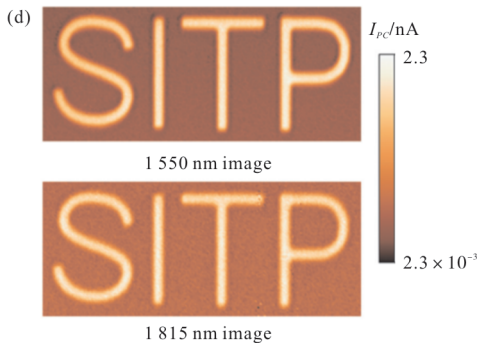


图 27 (a) 多层石墨烯探测器结构图;(b) 不同波长激光扫描金属图案, 反射光信号入射到器件形成光电流;(c) 探测器扫描成像工作线路图;(d)金属图案在 1 550、1 815 nm 的激光扫描下的成像效果^[71]

Fig.27 (a) Structure diagram of multi-layer graphene detector; (b) Normalized photocurrent excited by various incident wavelengths at different positions; (c) Working circuit diagram of detector scanning imaging; (d) Imaging effect of a metal pattern under 1 550 nm and 1 815 nm laser scanning^[71]

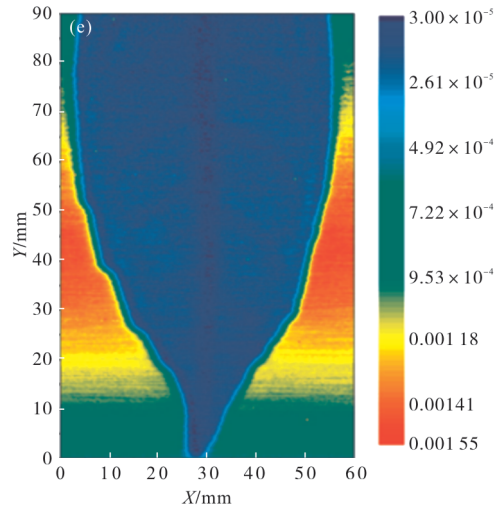
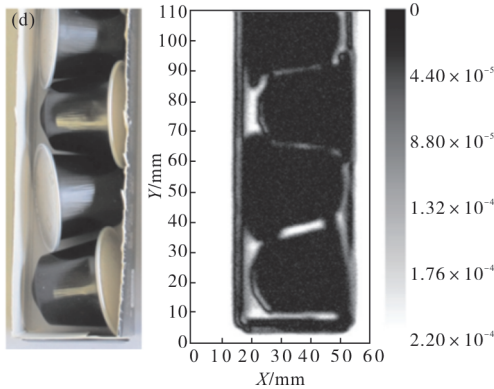
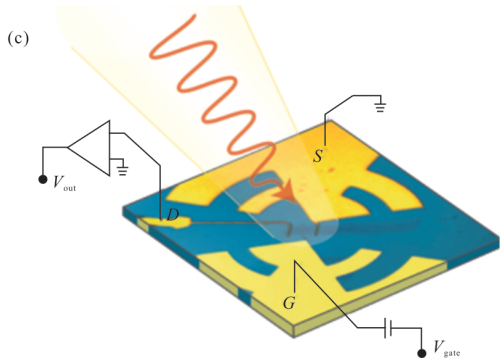
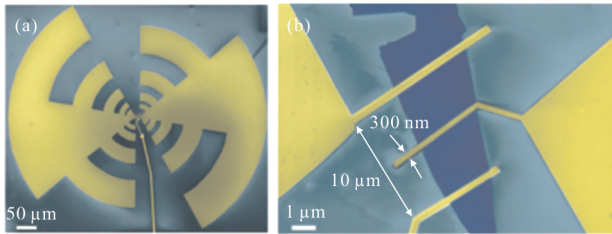
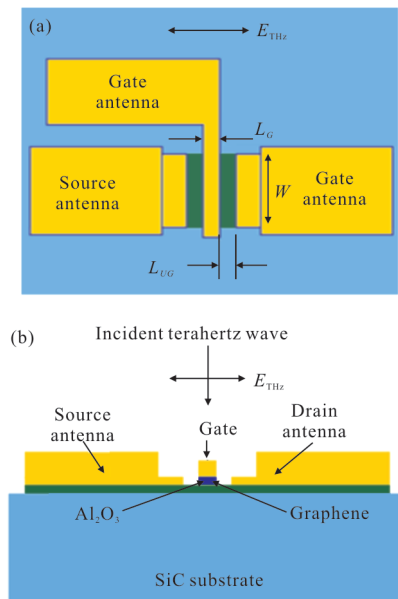


图 28 (a)石墨烯 EFT 结合 THz 接收天线探测器结构图;(b)石墨烯 EFT 结构图;(c)器件工作原理图;(d)、(e)对未拆开包装的盒内物品及树叶进行 0.3 THz 探测成像效果图^[72]

Fig.28 (a) Structure diagram of graphene EFT combined with THz receiving antenna detector;(b) Structure diagram of graphene EFT; (c) Schematic of the working principle of the device; (d), (e) 0.3 THz detection imaging effect on unwrapped box contents and leaves^[72]

2017 年, Qin 等使用双层石墨烯 FET 的 THz 探测器, 结构如图 29(a)、(b)所示, 通过使用特殊电极作为波吸收天线并有效降低源漏接触电阻, 在 0.33 THz 波段达到了 30 V/W 的响应度, 噪声等效功率达到 51 pW/Hz^{1/2}, 通过对石墨烯 FET 增加浮栅制作双端探测器, 实现了透射型太赫兹成像探测器, 对树叶 THz 成像效果如图 29(d)所示^[73]。



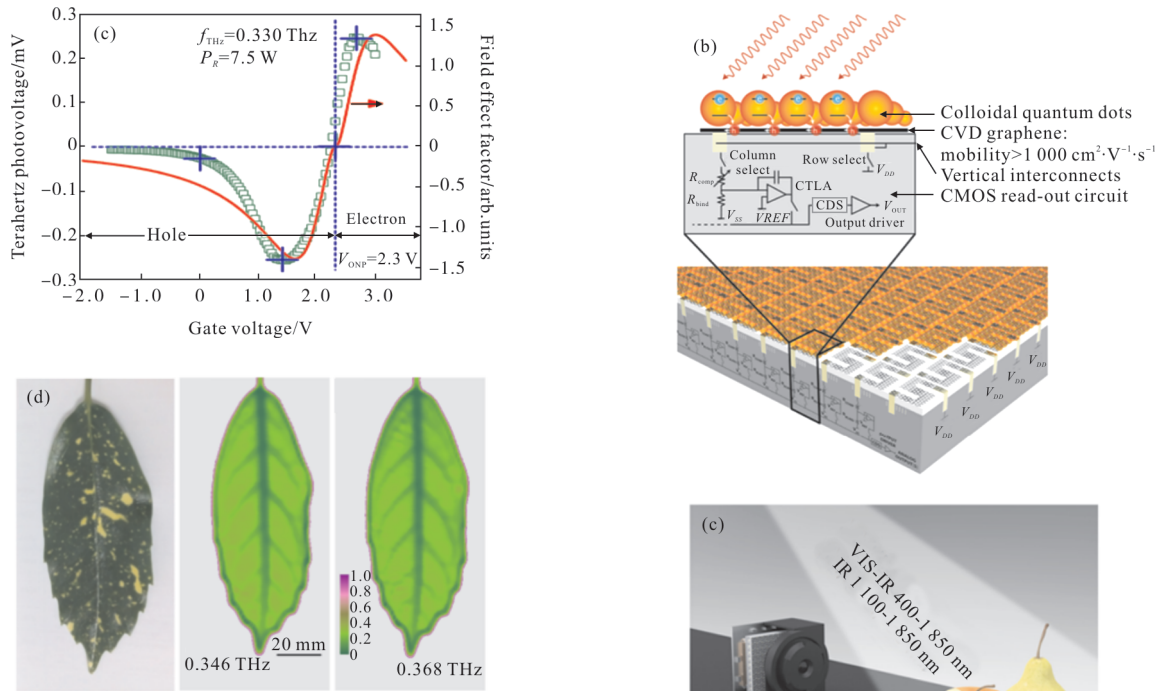


图 29 (a)、(b)带浮栅的双层石墨烯 THz 探测器结构示意图；
(c) 器件探测性能；(d) 器件在 0.346、0.368 THz 下对
树叶透射成像^[73]

Fig.29 (a),(b) Schematic diagram of bilayer graphene THz
detector with floating gate; (c) Device detection
performance; (d) Device transmission imaging of
leaves at 0.346 THz and 0.368 THz^[73]

2017 年, Konstantatos 等使用 CVD 法生长的石墨烯复合 PbS 量子点探测器集成在了工业上常用的 CMOS 读出电路, 得到 388 × 288 焦平面阵列, 如图 30(a)、(b)所示, 该探测器不仅具有较好的室温响应, 还能实现 300~2 000 nm 的宽光谱探测, 并结合光学系统实现了短波红外的成像演示, 如图 30(d)所示。

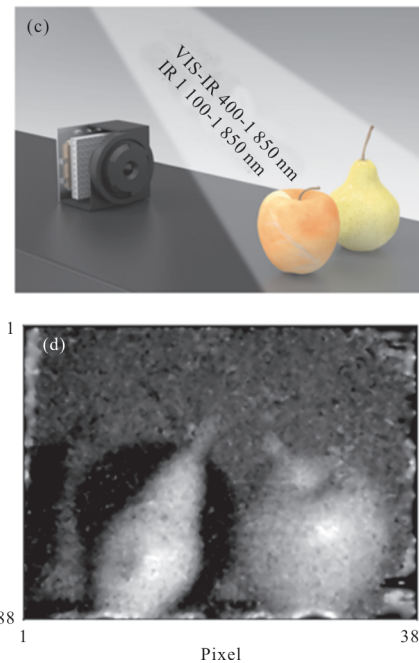
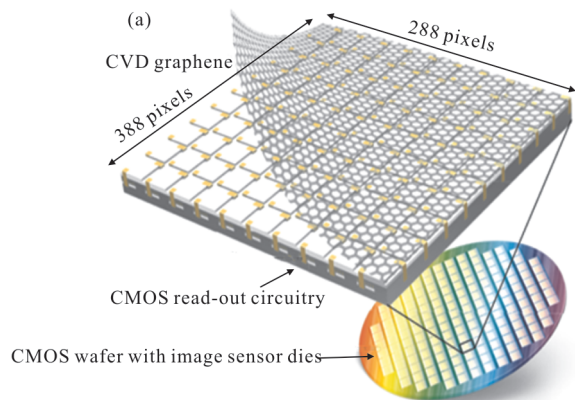


图 30 (a)、(b)石墨烯复合 PbS QDs 探测器集成 CMOS 读出电路
得到 388 × 288 焦平面阵列示意图及工作原理图；(c)、(d)焦
平面阵列在可见光和近红外成像图^[8]

Fig.30 (a), (b) Structure and working principle diagram of the
hybrid detector of graphene with PbS QDs integrated
CMOS readout circuit to obtain 388 × 288 focal plane
alignment; (c), (d) Imaging of focal plane array in
visible light and near-infrared^[8]

4 挑战与展望

基于特殊的光学、电学性能和能带结构, 石墨烯红外探测器在高响应度、快速响应、宽光谱探测等方面取得了阶段性进展。目前, 基于各种器件结构的石墨烯红外探测器在响应度、波段等方面的性

能如表 1 所示,其部分指标已经达到或者超过传统探测器的水平。然而,评价红外探测器的性能,除了上述指标,还包括噪声、线性动态范围等,综合考虑

红外探测器的技术指标体系,石墨烯与现有红外探测材料相比还有一定差距。

除了器件物理机理和设计方法,高质量石墨烯

表 1 石墨烯(Gr)基红外探测器机理和性能对比

Tab.1 Comparison of mechanism and performance of graphene (Gr) based infrared detector

Device structure	Mechanism	Gain	Specific detectivity/cm ² ·Hz ^{1/2} ·W ⁻¹	Responsivity/A·W ⁻¹	Bandwidth	Response time	Wavelength/ μ m	Reference
Ti/Gr/Pd (MGM)	PV/PTE			6.1×10 ⁻⁶	>16 GHz	200 ps	1.55 (0.3-6)	[62]
Metal/Gr/metal	PV				262 GHz	2.1 ps	1.55	[63]
Gr/Si waveguide	PV/PTI			0.13	>20 GHz		1.3-2.75	[36, 48-49]
Gr/Si	Photogating			0.435	1 kHz		0.2-1	[74]
Au nanoparticle array/Gr/Si	Photogating			83		600 ns	1.55	[60]
Si QDs/Gr	Photogating	10 ¹²		10 ⁹			1.45(0.5-4)	[51]
double-gate-regulated double-	Bolometer			10 ⁵ V/W	>1 GHz		10	[46]
Gr/PbS QDs	Photogating	10 ⁸	7×10 ¹³	10 ⁷		10-20 ms	0.3-1.6	[11]
Gr/THz antenna				1.2 V/W			1 000	[75]
single/double-layer Gr	PV	5×10 ⁻⁴			40 GHz		1.55	[3]
GrQDs	Photogating			8.61			0.5-10.3	[57]
Gr ribbons/MoS ₂	PV			10 ⁷			6-16	[58]
Gr/ MoS ₂	PV			1.26			1.44	[76]
WS ₂ /Gr/MoS ₂	PV	10 ⁶	1×10 ¹⁵	>10 ⁴ /0.1		53.6/30.3 μ s	0.4/2.4	[77]
Gr with antenna				(5-10)10 ⁻⁹		10-50 ps	30-220	[78]
Gr/Si/Gr	PTI+ Photogating			1.9/1.1			2.1/3.2	[67]

材料的可控制备是影响器件性能的关键因素之一。虽然理想的石墨烯具有高载流子迁移率,但目前的制备技术尚有较大差距。实验室机械剥离的石墨烯微片转移至 hBN 衬底后,可得到 125 000 cm²V⁻¹s⁻¹ 的迁移率^[79],但其制备工艺复杂,重复性差,且尺寸无法满足晶圆级器件应用的需求;而基于 CVD 生长的大面积石墨烯转移至 SiO₂ 衬底后,由于表面声子散射的限制,即使经过退火等工艺处理其迁移率也仅能达到 2 000~10 000 cm² V⁻¹s⁻¹^[80]。此外,石墨烯的转移制程中引入的掺杂,对石墨烯的性能也将造成较大的影响。

另一方面的挑战来自石墨烯器件加工方法与大规模集成电路工艺的兼容性。例如,半导体加工

中常用的硅化钛、硅化铜等欧姆接触方式难以在石墨烯中实现,因为石墨烯是单原子层,无法形成金属化合物,从而造成较大的接触电阻,对器件性能产生不利影响;另外,光刻时变性的残胶会对石墨烯的迁移率和费米能级带来负面影响,退火以及经典的掺杂清洗对其性能的改善有限。迫切需要发展成套的石墨烯材料器件加工工艺和技术。

综上所述,石墨烯具有零带隙、超高载流子迁移率、费米能级易于调控、容易形成热载流子等特点,是有望实现宽光谱吸收、超快速响应、高比探测率的新型红外探测材料。目前,研究人员在石墨烯的光电响应机理和红外探测器件等方面开展了卓有成效的研究,在探测器件的增益、响应度、波段等主要

性能方面取得了阶段性突破。虽然其综合性能与经典的红外探测器还有差距,相信随着石墨烯红外探测结构中新现象、新机理、新理论研究的深入,以及材料制备方法和器件加工技术的进步,石墨烯材料一定能为红外探测技术的发展提供新的解决方案。

参考文献:

- [1] Park J, Ahn Y H, Ruiz -Vargas C. Imaging of photocurrent generation and collection in single-layer graphene[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(5): 1742-1746.
- [2] Xia F N, Mueller T, Golizadeh -Mojarad R, et al. Photocurrent imaging and efficient photon detection in a graphene transistor [J]. *Nano Letters*, 2009, 9 (3): 1039-1044.
- [3] Xia F, Mueller T, Lin Y M, et al. Ultrafast graphene photodetector [J]. *Nature Nanotechnology*, 2009, 4(12): 839-843.
- [4] Ryzhii V, Ryzhii M. Graphene bilayer field-effect phototransistor for terahertz and infrared detection [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(24): 245311.
- [5] Bao W, Jing L, Velasco J, Jr, et al. Stacking-dependent band gap and quantum transport in trilayer graphene[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(12): 948-952.
- [6] Sonde S, Giannazzo F, Raineri V, et al. Electrical properties of the graphene/4H-SiC (0001) interface probed by scanning current spectroscopy [J]. *Physical Review B*, 2009, 80(24): 241406.
- [7] Xie C, Wang Y, Zhang Z X, et al. Graphene/semiconductor hybrid heterostructures for optoelectronic device applications [J]. *Nano Today*, 2018, 19: 41-83.
- [8] Goossens S, Navickaite G, Monasterio C, et al. Broadband image sensor array based on graphene - CMOS integration [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(6): 366-371.
- [9] Xia F, Mueller T, Golizadeh -Mojarad R, et al. Photocurrent imaging and efficient photon detection in a graphene transistor [J]. *Nano Letters*, 2009, 9 (3): 1039-1044.
- [10] Drain C M, Christensen B, Mauzerall D. Photogating of ionic currents across a lipid bilayer [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1989, 86(18): 6959-6962.
- [11] Konstantatos G, Badioli M, Gaudreau L, et al. Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(6): 363-368.
- [12] Fang H, Hu W. Photogating in low dimensional photodetectors [J]. *Advanced Science*, 2017, 4 (12): 1700323.
- [13] Hu Weida, Li Qing, Chen Xiaoshuang, et al. Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(12): 120701. (in Chinese) 胡伟达, 李庆, 陈效双, 等. 具有变革性特征的红外光电探测器[J]. 物理学报, 2019, 68(12): 120701.
- [14] Guo X, Wang W, Nan H, et al. High-performance graphene photodetector using interfacial gating [J]. *Optica*, 2016, 3(10): 1066-1070.
- [15] Lemme M C, Koppens F H L, Falk A L, et al. Gate-activated photoresponse in a graphene p-n junction[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(10): 4134-4137.
- [16] Xu X, Gabor N M, Alden J S, et al. Photo-thermoelectric effect at a graphene interface junction[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(2): 562-566.
- [17] Gabor N M, Song J C W, Ma Q, et al. Hot carrier-assisted intrinsic photoresponse in graphene[J]. *Science*, 2011, 334(6056): 648-652.
- [18] Song J C W, Rudner M S, Marcus C M, et al. Hot carrier transport and photocurrent response in graphene [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(11): 4688-4692.
- [19] Sun D, Aivazian G, Jones A M, et al. Ultrafast hot-carrier-dominated photocurrent in graphene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(2): 114-118.
- [20] Rogalski A, Kopytko M, Martyniuk P. Two-dimensional infrared and terahertz detectors: Outlook and status[J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(2): 021316.
- [21] Piscanec S, Lazzeri M, Mauri F, et al. Kohn anomalies and electron-phonon interactions in graphite [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(18): 185503.
- [22] Lazzeri M, Piscanec S, Mauri F, et al. Electron transport and hot phonons in carbon nanotubes [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(23): 236802.
- [23] Low T, Avouris P. Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2): 1086-1101.
- [24] Bistrizter R, MacDonald A H. Electronic cooling in graphene [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(20): 206410.
- [25] Tse W K, Das Sarma S. Energy relaxation of hot dirac fermions in graphene [J]. *Physical Review B*, 2009, 79 (23): 235406.
- [26] Song J C W, Reizer M Y, Levitov L S. Disorder-

- assisted electron-phonon scattering and cooling pathways in graphene [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(10): 106602.
- [27] Graham M W, Shi S F, Ralph D C, et al. Photocurrent measurements of supercollision cooling in graphene[J]. *Nature Physics*, 2013, 9(2): 103–108.
- [28] Betz A C, Jhang S H, Pallecchi E, et al. Supercollision cooling in undoped graphene [J]. *Nature Physics*, 2013, 9(2): 109–112.
- [29] Castro Neto A H, Guinea F, Peres N M R, et al. The electronic properties of graphene[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(1): 109–162.
- [30] Koppens F H, Mueller T, Avouris P, et al. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(10): 780–793.
- [31] Xia F, Yan H, Avouris P. The interaction of light and graphene: Basics, devices, and applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(7): 1717–1731.
- [32] Tissot J L, Trouilleau C, Fieque B, et al. Uncooled microbolometer detector: Recent developments at ulis [J]. *Opto-Electronics Review*, 2006, 14(1): 25–32.
- [33] Gong Yuguang, Li Wei, Cai Haihong, et al. Simulation of microbolometers based on a-Si:H thin films with thermal and mechanical performance [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(8): 1122–1126. (in Chinese)
- 龚宇光, 李伟, 蔡海洪, 等. 非晶硅微测辐射热计热学和力学仿真研究[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(8): 1122–1126.
- [34] Soref R A. Silicon-based optoelectronics [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1993, 81(12): 1687–1706.
- [35] Richards P L. Bolometers for infrared and millimeter waves[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(1): 1–24.
- [36] Wang X, Cheng Z, Xu K, et al. High-responsivity graphene/silicon-heterostructure waveguide photodetectors[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 888–891.
- [37] Voisin C, Placais B. Hot carriers in graphene preface[J]. *Journal of Physics-Condensed Matter*, 2015, 27(16): 160301.
- [38] Brida D, Tomadin A, Manzoni C, et al. Ultrafast collinear scattering and carrier multiplication in graphene[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1987.
- [39] Breusing M, Kuehn S, Winzer T, et al. Ultrafast nonequilibrium carrier dynamics in a single graphene layer[J]. *Physical Review B*, 2011, 83(15): 153410.
- [40] Rodriguez-Nieva J F, Dresselhaus M S, Levitov L S. Thermionic emission and negative dI/dV in photoactive graphene heterostructures [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 1451–1456.
- [41] Liang S J, Ang L K. Electron thermionic emission from graphene and a thermionic energy converter[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 3(1): 014002.
- [42] Massicotte M, Schmidt P, Vialla F, et al. Photo-thermionic effect in vertical graphene heterostructures [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12174.
- [43] Kim R, Perebeinos V, Avouris P. Relaxation of optically excited carriers in graphene [J]. *Physical Review B*, 2011, 84(7): 075449.
- [44] Freitag M, Low T, Xia F, et al. Photoconductivity of biased graphene[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(1): 53–59.
- [45] Freitag M, Low T, Avouris P. Increased responsivity of suspended graphene photodetectors [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(4): 1644–1648.
- [46] Yan J, Kim M H, Elle J A, et al. Dual-gated bilayer graphene hot-electron bolometer [J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(7): 472–478.
- [47] Furchi M, Urich A, Pospischil A, et al. Microcavity-integrated graphene photodetector [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 2773–2777.
- [48] Pospischil A, Humer M, Furchi M M, et al. CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 892–896.
- [49] Gan X, Shiue R J, Gao Y, et al. Chip-integrated ultrafast graphene photodetector with high responsivity [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 883–887.
- [50] Lee I H, Yoo D, Avouris P, et al. Graphene acoustic plasmon resonator for ultrasensitive infrared spectroscopy [J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(4): 313–319.
- [51] Ni Z, Ma L, Du S, et al. Plasmonic silicon quantum dots enabled high-sensitivity ultrabroadband photodetection of graphene-based hybrid phototransistors[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(10): 9854–9862.
- [52] Sun T, Wang Y, Yu W, et al. Flexible broadband graphene photodetectors enhanced by plasmonic Cu_{3-x}P colloidal nanocrystals [J]. *Small*, 2017, 13(42): UNSP 1701881.
- [53] Zhao B, Zhao J M, Zhang Z M. Enhancement of near-infrared absorption in graphene with metal gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(3): 031905.
- [54] Yao Y, Shankar R, Rauter P, et al. High-responsivity mid-infrared graphene detectors with antenna-enhanced

- photocarrier generation and collection[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(7): 3749–3754.
- [55] Fang Z, Liu Z, Wang Y, et al. Graphene–antenna sandwich photodetector [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3808–3813.
- [56] Azar N S, Shrestha V R, Crozier K B. Bull’s eye grating integrated with optical nanoantennas for plasmonic enhancement of graphene long–wave infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(9): 091108.
- [57] Zhang Y, Liu T, Meng B, et al. Broadband high photoresponse from pure monolayer graphene photodetector[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1811.
- [58] Liu Y, Gong T, Zheng Y, et al. Ultra–sensitive and plasmon–tunable graphene photodetectors for micro–spectrometry[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(42): 20013–20019.
- [59] Nikitskiy I, Goossens S, Kufer D, et al. Integrating an electrically active colloidal quantum dot photodiode with a graphene phototransistor [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11954.
- [60] Chen Z, Li X, Wang J, et al. Synergistic effects of plasmonics and electron trapping in graphene short–wave infrared photodetectors with ultrahigh responsivity [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(1): 430–437.
- [61] Sassi U, Parret R, Nanot S, et al. Graphene–based mid–infrared room–temperature pyroelectric bolometers with ultrahigh temperature coefficient of resistance [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14311.
- [62] Mueller T, Xia F, Avouris P. Graphene photodetectors for high–speed optical communications [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 297–301.
- [63] Urich A, Unterrainer K, Mueller T. Intrinsic response time of graphene photodetectors[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(7): 2804–2808.
- [64] Schuler S, Schall D, Neumaier D, et al. Controlled generation of a p–n junction in a waveguide integrated graphene photodetector [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7107–7112.
- [65] Schall D, Porschatis C, Otto M, et al. Graphene photodetectors with a bandwidth >76 GHz fabricated in a 6” wafer process line [J]. *Journal of Physics D – Applied Physics*, 2017, 50(12): 124004.
- [66] Li Z Q, Henriksen E A, Jiang Z, et al. Dirac charge dynamics in graphene by infrared spectroscopy [J]. *Nature Physics*, 2008, 4(7): 532–535.
- [67] Liu C H, Chang Y C, Norris T B, et al. Graphene photodetectors with ultra–broadband and high responsivity at room temperature [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(4): 273–278.
- [68] Herring P K, Hsu A L, Gabor N M, et al. Photoresponse of an electrically tunable ambipolar graphene infrared thermocouple[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2): 901–907.
- [69] Konstantatos G, Badioli M, Gaudreau L, et al. Hybrid graphene–quantum dot phototransistors with ultrahigh gain[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(6): 363–368.
- [70] Roy K, Padmanabhan M, Goswami S, et al. Graphene–MoS₂ hybrid structures for multifunctional photoresponsive memory devices [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(11): 826–830.
- [71] Guo N, Hu W, Jiang T, et al. High–quality infrared imaging with graphene photodetectors at room temperature[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(35): 16065–16072.
- [72] Vicarelli L, Vitiello M S, Coquillat D, et al. Graphene field–effect transistors as room–temperature terahertz detectors[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(10): 865–871.
- [73] Qin H, Sun J, Liang S, et al. Room–temperature, low–impedance and high–sensitivity terahertz direct detector based on bilayer graphene field–effect transistor [J]. *Carbon*, 2017, 116: 760–765.
- [74] An X, Liu F, Jung Y J, et al. Tunable graphene–silicon heterojunctions for ultrasensitive photodetection [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(3): 909–916.
- [75] Spirito D, Coquillat D, De Bonis S L, et al. High performance bilayer–graphene terahertz detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(6): 061111.
- [76] Mittendorff M, Winnerl S, Kamann J, et al. Ultrafast graphene–based broadband THz detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(2): 021113.
- [77] Vabbina P, Choudhary N, Chowdhury A A, et al. Highly sensitive wide bandwidth photodetector based on internal photoemission in CVD grown p–type MoS₂/graphene schottky junction [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(28): 15206–15213.
- [78] Long M, Liu E, Wang P, et al. Broadband photovoltaic detectors based on an atomically thin heterostructure[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2254–2259.
- [79] Zomer P J, Dash S P, Tombros N, et al. A transfer technique for high mobility graphene devices on commercially available hexagonal boron nitride [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(23): 232104.
- [80] Gammelgaard L, Caridad J M, Cagliani A, et al. Graphene transport properties upon exposure to PMMA processing and heat treatments [J]. *2D Materials*, 2014, 1(3): 035005.