

基于石墨烯光电探测器研究进展

王兰霞

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2023年4月10日; 录用日期: 2023年5月17日; 发布日期: 2023年5月25日

摘要

光电探测器日渐改变着人们的生活, 从医疗检测到航空航天, 从安全检测到遥感卫星, 从食品安全到生物监测, 光电探测器的影子无处不在。传统的探测器面临只能在低温环境中工作、响应率与频率之间相互制衡等问题。石墨烯的出现极大地激发了研究者在探测器方向的研究兴趣, 有望克服这些弊端。石墨烯具有优异的物理性质、较强的光吸收能力、以及非线性光学性质, 在探测器应用中有着极强的优势, 可产生快速响应与宽谱响应等优异性能。本文介绍了石墨烯性质、探测器性能评价指标、石墨烯探测器探测机理以及石墨烯探测器研究进展。除了使用石墨烯单一材料制备器件外, 还可制备各种异质结型、金属增强结构等器件提高石墨烯探测器性能。

关键词

石墨烯, 光电探测器

Research Progress of Graphene-Based Photodetectors

Lanxia Wang

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 10th, 2023; accepted: May 17th, 2023; published: May 25th, 2023

Abstract

Photodetectors are changing people's life day by day, from medical detection to aerospace, from security inspection to remote sensing satellite, from food safety to biological monitoring, the shadow of photodetectors is everywhere. Traditional detectors face problems such as only working in low-temperature environments and the trade-off between response rate and frequency. The emergence of graphene has greatly stimulated researchers' interest in the direction of detectors that

are expected to overcome these drawbacks. Graphene has excellent physical properties, strong light absorption ability, and nonlinear optical properties, which are highly advantageous in detector applications and can produce excellent performance such as fast response and broad-spectrum response. In this paper, we introduce graphene properties, detector performance evaluation index, graphene detector detection mechanism and the progress of graphene detector research. In addition to using graphene as a single material to prepare devices, various heterojunction-type and metal-reinforced structures can be prepared to improve the performance of graphene detectors.

Keywords

Graphene, Photodetector

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 2004 年 Geim 团队使用胶带成功从石墨上剥离出单层石墨烯并研究其特性[1], 石墨烯因具有独特而优良的电子和光学性能[2] [3] [4], 如超宽光谱范围、超快载流子迁移率[5] [6]和高导热率[7]而成为探测器研究的热门材料之一。石墨烯原子厚度很大, 但它们与光有很强的相互作用[8], 单层石墨烯(厚度为 0.335 nm 左右)可以吸收 2.3% [9], 这种强烈的光吸收是必不可少的, 但应用在探测器这还远远不够, 因为需要更高的光吸收来提高量子效率。在后摩尔时代, 器件倾向于达到最小化的极限, 而石墨烯由于其独特的光学和电学性能, 有望成为后摩尔时代的重要材料。

光电探测器的研究和应用促进了社会的进步和发展, 在医学成像、光通信、安全检查等方面发挥着重要作用[10] [11]。虽然传统的硅基光电检测技术已经相对成熟, 但在工作波长、响应率和速度等方面都已进入瓶颈期。硅基半导体的制造技术已经接近了摩尔定律的极限[12]。其他传统材料, 包括 HgCdTe、InGaAs、InSb 和 II 型超晶格可探测红外光谱范围, 但是, 这些类型的光电探测器只能在低温工作条件下获得高灵敏度的检测, 并面临着复杂的制造技术[12]。石墨烯被人类探索之后, 它的制备与集成简化了器件的制备过程, 高迁移率和光-物质的强相互作用可以提高光电探测器的灵敏度和速度。研究者在可见光-太赫兹光波段都制备不同类型的探测器。

2. 石墨烯介绍

石墨烯带结构中能量和波矢量之间的线性色散关系使它具有有趣的电子特性, 高导热性、高导电性以及易剥离的物理性质使它在光电器件中的应用逐渐广泛[13]。

杂化的 sp^2 碳原子以蜂窝形式排列在晶格常数为 1.42 \AA 的石墨烯结构中。很明显, 碳原子共有 6 个电子, 内层 2 个, 外层 4 个[14]。在石墨烯中, 每个原子在二维平面上与其他 3 个碳原子连接(图 1(a)), 在三维空间中留下一个自由电子, 增强导电性。石墨烯的电子性质是由 π 轨道的成键和反键决定的, 这些轨道重叠并增强了碳-碳键。这些 π 电子位于石墨烯片的上方和下方, 并表现出高迁移率[15]。石墨烯的强热电响应产生了能量模式和电荷模式之间的强耦合, 从而产生了一系列新的输运和光电现象[16]。如图 1(b)所示, 石墨烯是一种几乎为零的带隙半导体(①)。在布里渊区角(狄拉克点), 价带和导带几乎相互接触。在狄拉克点上的态密度几乎为零, 因此, 电导率相当低。通过取代掺杂(含电子或空穴) (②), 可以

改变费米能级(E_f)的位置,从而改变石墨烯的电学性质,进而产生更好的电导性。然而,掺杂石墨烯层会使费米能级向上或向下移动,从而降低了电子和空穴的迁移率。石墨烯的两层图掺杂(③)和图(④)掺杂也可以改变其隙带结构。此外,通过将石墨烯塑造成纳米带的形状或对两层石墨烯施加垂直电场,可以打开带隙。考虑到这这些,石墨烯的能隙可以从 0 eV 到 0.2 eV 不等[14]。

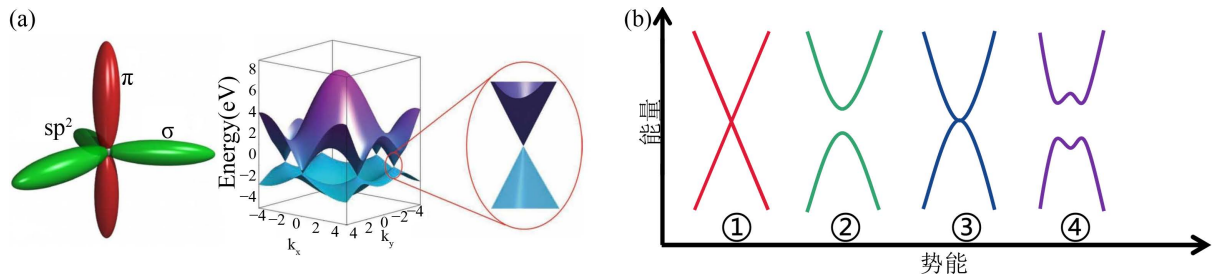


Figure 1. (a) Graphene electronic structure; (b) Graphene band structure modification
图 1. (a) 石墨烯电子结构; (b) 石墨烯能带结构修正

3. 探测器性能评价标准

3.1. 响应率

探测器的响应度定义为输出电压 V_{ph} 或电流 I_{ph} 与探测器上入射光辐射的平均光功率之比, $R_V = \frac{V_{ph}}{P_{in}}$ 或 $R_A = \frac{I_{ph}}{P_{in}}$, 它描述了探测器的输出信号与输入辐射之间的关系。

3.2. 量子效率

当光通过样品传播时,并不是所有的光子都被吸收。对于反射率为 R 的材料,在该材料中不同位置 z 处的吸收功率 P_z 为:

$$P_z = P_{in} (1 - R) (1 - e^{-\alpha z}) \quad (1)$$

其中, α 为材料的吸收系数。如果每个被吸收的光子产生一对光载流子,那么对于一个反射率为 R 的特定半导体,每一个入射光子数的光载流子数为:

$$\eta = (1 - R) (1 - e^{-\alpha d}) \quad (2)$$

式中, d 为材料的厚度,探测器量子效率 η 表示每个入射光子产生的电子-空穴对数且满足 $0 \leq \eta \leq 1$ 。

3.3. 噪声等效功率

噪声等效功率(NEP)也称为最小可探测功率,其定义为当信噪比为 1 时(信号与噪声大小相等时)所需的入射光功率。它可以表示为:

$$\text{NEP} = \frac{V_n}{R_V} = \frac{I_n}{R_I} \quad (3)$$

其中, V_n 和 I_n 分别表示为 1 Hz 带宽下的噪声电压和噪声电流。NEP 的单位通常用 $\text{W/Hz}^{1/2}$ 表示。

3.4. 探测率

探测率 D 被定义为

$$D = \frac{1}{NEP} \tag{4}$$

Jones 发现 NEP 和探测率是探测器面积和带宽的函数，因此归一化探测率定义为

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} \tag{5}$$

其中 A_d 是器件的面积。 D^* 的测量单位为 $\text{cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ (Jones)。它描述了探测器材料探测弱光的能力。

3.5. 光导增益

探测器中，器件的光导增益被定义为

$$G = \frac{\tau_{life}}{\tau_{tran}} \tag{6}$$

其中 τ_{life} 为载流子寿命， τ_{tran} 为载流子漂移时间，这取决于器件沟道的长度、沟道中载流子迁移率和施加的偏置电压 V_{bias} ， G 是由单个入射光子产生的载流子数。从公式中可以看出，较长的载波寿命可以增加增益，但这也意味着器件的响应时间也会随之增加。

$$\tau_{tran} = \frac{l^2}{\mu V_{bias}} \tag{7}$$

3.6. 响应时间

响应时间通常被定义为净光电流的 10% 到 90% 所需要的时间。探测器的响应时间与材料和探测机制有关。对于光导器件，响应时间与载流子迁移率、通道长度和应用偏置有关；对于光伏器件，响应时间与探测器沟道材料的厚度和载流子迁移率有关；对于测辐射热计，响应时间与其热阻和热容有关。此外，材料本身的缺陷也会影响器件的响应时间。

4. 探测器探测机制

二维材料探测器一般可以分为光子探测器和热探测器两类。一种与光学跃迁对自由载流子的激发有关，包括光导效应和光伏效应。另一种是热效应，包括热效应和光热电效应(PTE)效应。

4.1. 光电导效应

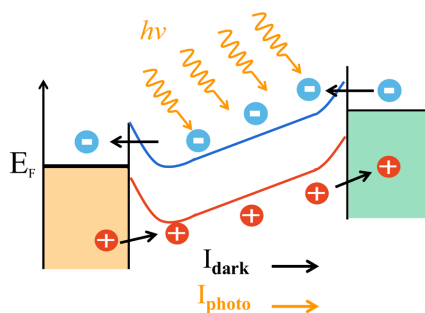


Figure 2. Schematic diagram of photoconductive effect
图 2. 光电导效应示意图

两种最常用的光电探测器的操作示意图如图 2 所示。光导探测器本质上是一个具有两个金属触点的辐射敏感电阻器。一个能量大于带隙能量的光子被吸收，产生电子 - 空穴(e-h)对，从而改变材料的电导

率。产生的电子空穴对被外部电场分开，产生光电流。光电导效应是一种双载流子运输机制[17]。

4.2. 光致栅控效应

光致栅控效应是光电导效应的一种特殊形式，如图 3 所示，当电子或空穴其中一种载流子被缺陷局域，另一种载流子进入二维材料产生电流。该效应下，由于载流子寿命过长，提高灵敏度时，光响应速度会相应的变慢。光电二极管中，由于耗尽区电场使少数载流子分离，光电效应通常等于 1。然而，在二维材料光电探测器的混合组合中，光敏电阻和载流子输运发生在单独优化的区域：一个用于有效的光吸收，另一个用于提供快速的电荷移动。通过这种方式，每个光子高达 10^8 个电子的超高增益和短波长红外光电探测器的特殊响应率已被证明[18] [19]。

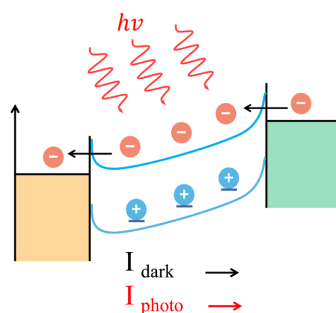


Figure 3. Schematic diagram of photogating effect
图 3. 光致栅控效应示意图

4.3. 光伏效应

光伏探测器中光电流的产生是基于由半导体材料制成的 p-n 结的光吸收。能量大于半导体能带隙能量的入射光子产生 e-h 对。半导体内部的电场与 p-n 结或肖特基势垒的存在有关，将不同类型的载流子分开。

4.4. 光热电探测器

光热电探测器是基于光热电(PTE)效应来产生一个由热电子到金属接触点的热扩散引起的电场。这种效应也称塞贝克效应，电子加热是通过吸收热电材料上的光来实现的(图 4)。光诱导的温度梯度可以通过不均匀的照明或在全局照明[20]下对器件不同部分的吸收的强烈差异来获得。

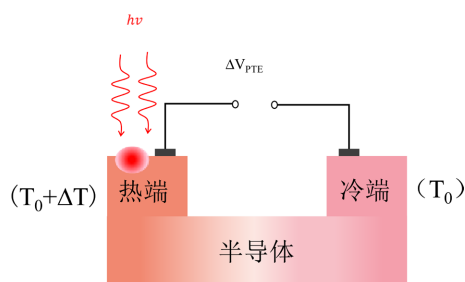


Figure 4. Schematic diagram of photothermoelectric effect
图 4. 光热电效应示意图

4.5. 测辐射热效应

测辐射热计的关键参数是耐热性和热容。热探测器的低频电压响应率($\omega \ll 1/\tau_{th}$ ，其中 τ_{th} 为热响应

时间)与热阻 R_{th} 成正比, 而不依赖于热电容。另一方面, 对于高频 ($\omega \gg 1/\tau_{th}$), 电压响应率不依赖于 R_{th} , 并与热容成反比。从探测器到外部世界的热导率(热阻)应该很小(高)。当探测器与真空环境完全隔离, 且探测器与散热器外壳[21]之间只有辐射热交换时, 其热导率可能最小。

4.6. 场效应晶体管探测器

纳米尺度场效应晶体管通道中等离子体波激发(电子密度波)的非线性特性使它们的响应频率明显高于由电子弹道传输引起的器件截止频率。在弹道状态下, 动量弛豫时间比电子传递时间长。如图 5 所示, 场效应晶体管探测器可以同时用于谐振(调谐到一定的波长)和非谐振(宽带)太赫兹检测, 并可以通过改变栅极电压[22]直接调谐。场效应晶体管的非线性特性引起了由入射辐射引起的交流电流的整流, 光响应表现在源极和漏极之间的直流电压, 与辐射强度成正比。在共振状态中, 等离子体波被微弱地阻尼(当在源极发射的等离子体波可以在比动量弛豫时间短的时间内到达漏极时), 检测机制利用等离子体波在腔内的干扰, 导致共振增强响应[23]。

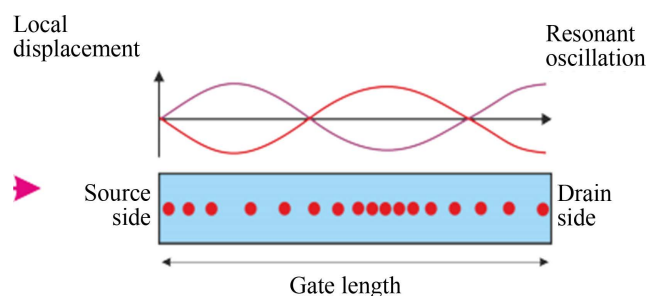


Figure 5. Plasma oscillation in a field effect transistor
图 5. 场效应晶体管中的等离子体振荡

5. 石墨烯探测器研究进展

石墨烯的零带隙特性导致传统石墨烯探测器的高暗电流显著降低了光电探测器的灵敏度[22], 限制了石墨烯光电探测器的进一步发展。在实际研究中, 研究者使用栅极调控、纳米带以及使用天线结构增强光吸收等方式提高器件性能。

中红外(MIR)光和太赫兹光可激发石墨烯中的等离子体波, 用于相关的光谱检测。Qiushi Guo 等人[24]制备了一种由准一维纳米带连接的等离子体谐振器阵列组成的 MIR 探测器。与纳米带无序相关的局域势垒产生载流子输运体现出显著温度依赖性, 这很大程度上受等离子体吸收的影响(图 6(a))。因此, 在附近的石墨烯谐振器中的等离子体衰变是可能的。该器件室温下在 $12.2 \mu\text{m}$ 处响应率达 16 mA/W , NEP 为 $1.3 \text{ nW/Hz}^{1/2}$ 。目前, 在场效应晶体管(FET)中使用等离子体整流效应是探测太赫兹最有效的方法之一。入射的太赫兹波激发通道中的等离子体波, 从而调制栅极和源/漏极之间的电位差, 以及通过 FET 中的非线性耦合和传输特性而被整流的等离子体波。Hua Qin 等人[25]提出一种基于双层石墨烯场效应晶体管(图 6(b))的室温、低阻抗和高灵敏度探测器, 响应率为 30 V/W , 0.33 THz 下的 NEP 为 $163 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ 。Gregory Auton 等人[26]提出的石墨烯弹道整流器(图 6(c))集成的太赫兹探测器具有不对称的四端交叉结, 它依赖于载流子的弹道运动将交流信号整流为直流输出。与传统的整流器不同, 该装置的阈值电压为零。该装置在 n 型和 p 型传输条件下运行, 在室温下高响应出 764 V/W , 相应的 NEP 为 $34 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ 。Semih Cakmakyapan 等人[27]提出了基于镀金石墨烯纳米条纹的光导纳米结构(图 6(d)), 能够同时实现宽带光检测和超快光检测, 具有高响应率。镀金石墨烯纳米条纹可以利用增强的载流子多激发, 这发生在较高的光子能级, 以补偿在较低波长下较低的光吸收。由于避免使用任何缺陷态或量子点, 镀金石墨烯纳米条纹可以在不牺

牲超快宽带操作的情况下实现高响应的光电检测。从可见光到红外光探测的响应率为 0.6 A/W，在 20 μm 时为 11.5 A/W，工作速度超过 50 GHz。在 1 kHz 以上的光斩波频率下，计算出的 3 μm ~20 μm 的 NEP 水平为 1 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$ ~20 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

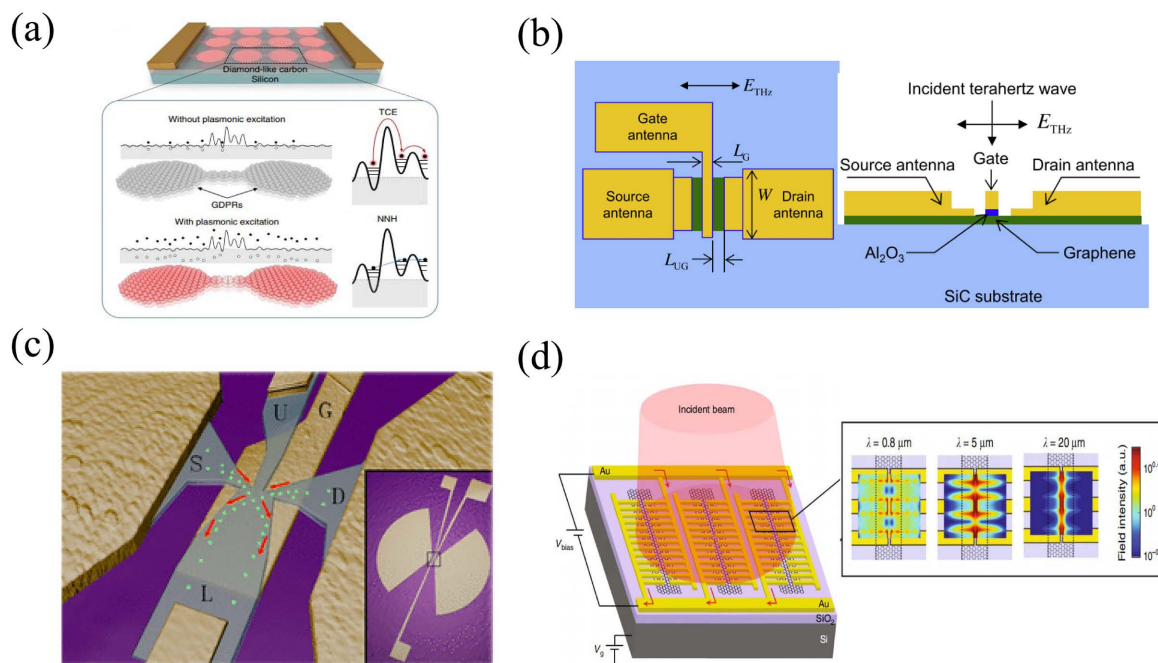


Figure 6. (a) A MIR detector composed of a quasi-one-dimensional nanoribbon-connected plasma resonator array; (b) A two-layer graphene field-effect transistor; (c) A terahertz detector integrated with a graphene ballistic rectifier; (d) High-responsivity and broadband photodetection via gold-patched graphene nano-strips

图 6. (a) 准一维纳米带连接的等离子体谐振器阵列组成的 MIR 探测器; (b) 双层石墨烯场效应晶体管; (c) 石墨烯弹道整流器集成的太赫兹探测器; (d) 通过镀金石石墨烯纳米条纹的高响应率和宽带光探测

单个石墨烯材料探测器存在光吸收低、暗电流大、探测率低等问题。因此，制造了石墨烯的异质结以进一步提高其光电探测器的性能。异质结的内置电场可以缩短探测器的响应时间。此外，在范德华结的界面处可以依次形成高能势垒，从而有效地抑制光生载流子的随机输运，从而降低暗噪声，图 7 主要介绍几种组合类器件。图 7(a)中，Xiong 等人[28]通过在光纤端面上设计微米级多层石墨烯/二硫化钨/二硫化钨异质结构薄膜，在 Au 电极上制备全光纤光电探测器，该器件在 400 nm 波长下表现出 6.6×10^7 A/W，1550 nm 波长下为 17.1 A/W。也可以通过别材料对石墨烯进行杂化从而提高探测器的探测效率，图 7(b)中展示了混合石墨烯/三氧化二钛光电探测器[29]在室温下具有 300 A/W 的高响应率，检测率为 7×10^8 Jones。Ti₂O₃ 独特的窄带隙(0.09 eV)在 MIR 区域表现出较强的光吸收，可以实现界面上的高效电荷转移，从而实现探测器的高响应率；而当入射光被 Ti₂O₃ 纳米粒子吸收时，光生电子被困在 Ti₂O₃ 纳米粒子中，空穴转移到石墨烯通道，从而促进了石墨烯杂化态的形成。如图 7(c)所示，石墨烯和碲化铋纳米线的二元杂化体[30]被用于探测近红外光波。光响应是由于热电子从纳米线转移到石墨烯层而发生的，在波长 1060 nm 和温度 82 K 下实现了 10^6 A/W 的超高灵敏度。这些器件中 NEP 和 D^* 的理论极限分别为 10 $\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$ ~18 $\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$ 和 1011 Jones。利用掺杂硼(B)的量子点(QDs)/石墨烯混合光晶体管如图 7(d)，是利用掺杂硼(B)的等离子体硅量子点设计的[31]。B 掺杂 Si 量子点的局域表面等离子体共振增强了石墨烯的 MIR 吸收。B 掺杂 Si 量子点基于电子过渡的亚带隙光吸收将量子点/石墨烯混合光晶体管的光检测从通常的紫外-可见区域扩展到 NIR 区域。由此得到的量子点/石墨烯混合光晶体管的 UV-MIR 超宽带光检测的

超高响应率为 10^9 A/W, D^* 高达 10^{13} Jones。将石墨烯和传统半导体薄膜或传统半导体材料相结合的探测器的制造过程相对简单、可重复性好, 并与 CMOS 工艺兼容。而且这些探测器大多具有较好的性能和快速的响应时间。

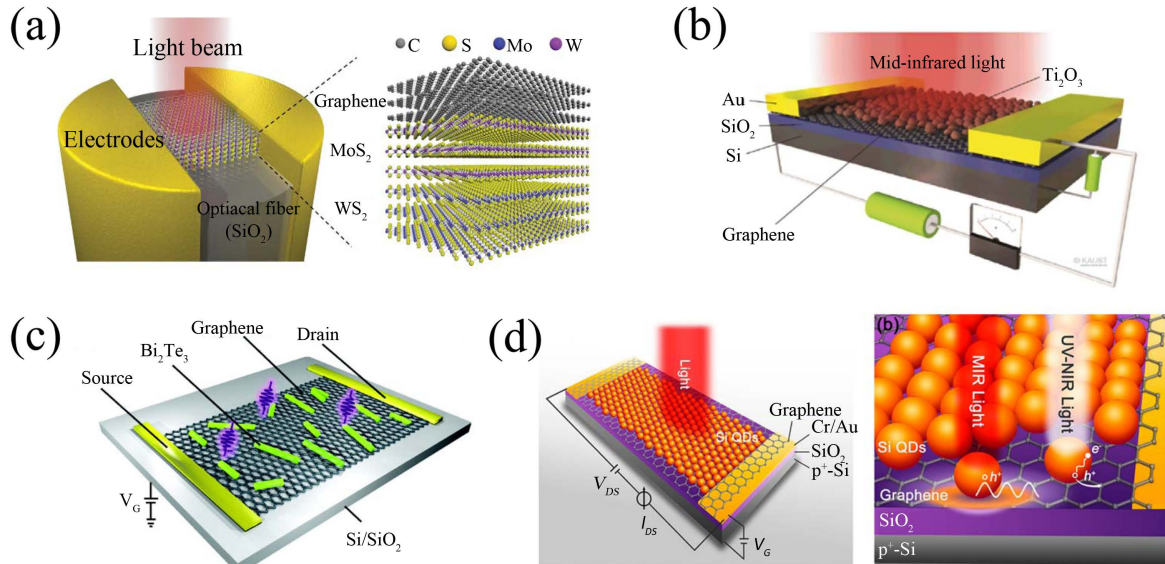


Figure 7. (a) 3D schematic view of the FPD and Schematic structure of the graphene-MoS₂-WS₂ vdW heterostructure; (b) Graphene/titanium trioxide photodetector; (c) Binary hybrid of graphene and Bi₂Te₃ nano-wires; (d) Schematic diagram of the structure of the hybrid phototransistor based on B-doped Si QDs and graphene and two different optical phenomena
图 7. (a) FPD 的三维示意图与内部的石墨烯/二硫化钼/二硫化钨异质结构; (b) 石墨烯/三氧化二钛光电探测器; (c) 石墨烯和碲化铋纳米线的二元杂化结构; (d) 基于 B 掺杂 Si 量子点和石墨烯的混合光电晶体管结构示意图以及两种不同光学现象

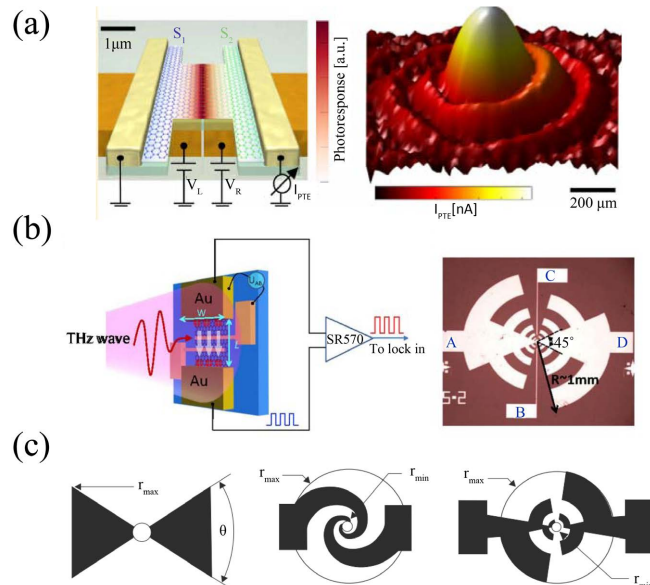


Figure 8. (a) Structure diagram of "H" dipole antenna and image of photocurrent at 3.4 THz; (b) Schematic diagram of a graphene-based THz photodetector and two paired fingers in the SEM image; (c) Other enhanced light absorption antenna structures
图 8. (a) "H" 型偶极子天线结构示意图和 3.4 THz 下光电流图像; (b) 基于石墨烯的太赫兹光电探测器示意图与对数天线结构电镜扫描图像; (c) 其它增强光吸收天线结构

同样的除了与其它材料组合对石墨烯进行掺杂提高载流子浓度而提高器件性能之外借助金属辅助结构提高与光的耦合能力也成为提高器件性能的方式之一。在图 7(d)中探测器借助纳米金属结构嵌套达到一个高的响应性能, 除此之外利用各种天线结构提高光吸收增大器件响应率的结构。图 8(a)为 Sebastian Castilla 等人[32]提出的用“H”型偶极子天线结构, 该器件中窄间隙天线局域光场的同时在位于天线上方的石墨烯通道中创建一个 pn 结, 并将入射辐射强烈地集中在 pn 结处并产生光响应。室温下, 在 1.8 THz~4.2 THz 的一个宽频范围内 NEP 达到 80 pW/Hz^{1/2}, 响应时间低于 30 ns。Cahnglong Liu 等人[33]提出一种基于对数周期天线耦合 CVD 石墨烯晶体管的增强太赫兹探测器(图 8(b))。该设计通过不同的接触控制太赫兹场与石墨烯通道中自由热载流子之间的相互作用, 实现了可切换的光探测模式。在 0.12 THz 下, 响应率可达 280 V/W, 在室温下, NEP 为 100 pW/Hz^{1/2}。同样的还可以使用其它天线结构增强光吸收, 如图 8(c) [22]。

6. 总结

本文首先介绍了石墨烯特性与探测器性能评价指标, 并总结了石墨烯探测器探测机理与各种探测机制所面临的不足与挑战。对于石墨烯以及石墨烯与其它材料所制备的异质结构以及各种结构增强光吸收的石墨烯探测器做简要概述。单层石墨烯探测器响应率高, 频率响应范围大, 响应时间快, 结合金属结构辅助增强光吸收等优势, 成为未来探测器实现集成化、宽谱依赖、快速响应等高性能的最有潜力的材料。

参考文献

- [1] Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V. and Firsov, A.A. (2004) Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, **306**, 666-669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- [2] Autere, A., Jussila, H., Dai, Y., Wang, Y., Lipsanen, H. and Sun, Z. (2018) Nonlinear Optics with 2D Layered Materials. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1705963. <https://doi.org/10.1002/adma.201705963>
- [3] Sun, Z., Martinez, A. and Wang, F. (2016) Optical Modulators with 2D Layered Materials. *Nature Photonics*, **10**, 227-238. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.15>
- [4] Liu, X., Guo, Q. and Qiu, J. (2017) Emerging Low-Dimensional Materials for Nonlinear Optics and Ultrafast Photonics. *Advanced Materials*, **29**, Article ID: 1605886. <https://doi.org/10.1002/adma.201605886>
- [5] Morozov, S.V., Novoselov, K.S., Katsnelson, M.I., Schedin, F., Elias, D.C., Jaszczak, J.A. and Geim, A.K. (2008) Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer. *Physical Review Letters*, **100**, Article ID: 016602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.016602>
- [6] Zhang, Y., Tan, Y.W. and Stormer, H.L. (2005) Experimental Observation of the Quantum Hall Effect and Berry's Phase in Graphene. *Nature*, **438**, 201-204. <https://doi.org/10.1038/nature04235>
- [7] Li, X., Liu, Y., Zheng, Q., et al. (2017) Anomalous Thermal Anisotropy of Two-Dimensional Nanoplates of Vertically Grown MoS₂. *Applied Physics Letters*, **111**, Article ID: 163102. <https://doi.org/10.1063/1.4999248>
- [8] Liu, X., Galfsky, T., Sun, Z., Xia, F., et al. (2015) Strong Light-Matter Coupling in Two-Dimensional Atomic Crystals. *Nature Photonics*, **9**, 30-34. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.304>
- [9] Nair, R.R., Blake, P., Grigorenko, A.N., et al. (2008) Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene. *Science*, **320**, 1308-1308. <https://doi.org/10.1126/science.1156965>
- [10] Yotter, R.A. and Wilson, D.M. (2003) A Review of Photodetectors for Sensing Light-Emitting Reporters in Biological Systems. *IEEE Sensors Journal*, **3**, 288-303. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2003.814651>
- [11] Li, J., Niu, L., Zheng, Z. and Yan, F. (2014) Photosensitive Graphene Transistors. *Advanced Materials*, **26**, 5239-5273. <https://doi.org/10.1002/adma.201400349>
- [12] Zhang, K., Zhang, L., Han, L., et al. (2021) Recent Progress and Challenges Based on Two-Dimensional Material Photodetectors. *Nano Express*, **2**, Article ID: 012001. <https://doi.org/10.1088/2632-959X/abd45b>
- [13] Xia, F., Yan, H. and Avouris, P. (2013) The Interaction of Light and Graphene: Basics, Devices and Applications. *Proceedings of the IEEE*, **101**, 1717-1731. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2250892>

- [14] Rogalski, A., Kopytko, M. and Martyniuk, P. (2020) 2D Material Infrared and Terahertz Detectors: Status and Outlook. *Opto-Electronics Review*, **28**, 107-154.
- [15] Yang, G., Li, L., Lee, W.B. and Ng, M.C. (2018) Structure of Graphene and Its Disorders: A Review. *Science and Technology of Advanced Materials*, **19**, 613-648. <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1494493>
- [16] Xia, F., Wang, H., Xiao, D., Dubey, M. and Ramasubramaniam, A. (2014) Two-Dimensional Material Nanophotonics. *Nature Photonics*, **8**, 899-907. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.271>
- [17] Shiraishi, Y., Okazaki, R., Taniguchi, H., *et al.* (2015) Photo-Seebeck Effect in ZnS. *Japanese Journal of Applied Physics*, **54**, Article ID: 031203. <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.031203>
- [18] Konstantatos, G., Badioli, M., Gaudreau, L., *et al.* (2012) Hybrid Graphene-Quantum Dot Phototransistors with Ultra-high gain. *Nature Nanotechnology*, **7**, 363-368. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.60>
- [19] Koppens, F.H.L., Mueller, T., Avouris, P., Ferrari, A.C., Vitiello, M.S. and Polini, M. (2014) Photodetectors Based on Graphene, Other Two-Dimensional Materials and Hybrid Systems. *Nature Nanotechnology*, **9**, 780-793. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.215>
- [20] Buscema, M., Island, J.O., Groenendijk, D.J., *et al.* (2015) Photocurrent Generation with Two-Dimensional van der Waals Semiconductors. *Chemical Society Reviews*, **44**, 3691-3718. <https://doi.org/10.1039/C5CS00106D>
- [21] Rogalski, A. (2019) Graphene-Based Materials in the Infrared and Terahertz Detector Families: A Tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, **11**, 314-379. <https://doi.org/10.1364/AOP.11.000314>
- [22] Rogalski, A. and Sizov, F. (2011) Terahertz Detectors and Focal Plane Arrays. *Opto-Electronics Review*, **19**, 346-404. <https://doi.org/10.2478/s11772-011-0033-3>
- [23] Guo, Q., Yu, R., Li, C., *et al.* (2018) Efficient Electrical Detection of Mid-Infrared Graphene Plasmons at Room Temperature. *Nature Materials*, **17**, 986-992. <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0157-7>
- [24] Rogalski, A., Kopytko, M. and Martyniuk, P. (2019) Two-Dimensional Infrared and Terahertz Detectors: Outlook and Status. *Applied Physics Reviews*, **6**, Article ID: 021316. <https://doi.org/10.1063/1.5088578>
- [25] Qin, H., Sun, J., Liang, S., *et al.* (2017) Room-Temperature, Low-Impedance and High-Sensitivity terahertz Direct Detector Based on Bilayer Graphene Field-Effect Transistor. *Carbon*, **116**, 760-765. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.02.037>
- [26] Auton, G., But, D.B., Zhang, J., *et al.* (2017) Terahertz Detection and Imaging Using Graphene Ballistic Rectifiers. *Nano Letters*, **17**, 7015-7020. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b03625>
- [27] Lu, L. (2018) A Fiber Optoacoustic Guide with Augmented Reality for Precision Breast-Conserving Surgery. *Light: Science & Applications*, **7**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0006-0>
- [28] Xiong, Y.F., Chen, J.H., Lu, Y.Q., *et al.* (2019) Heterostructures: Broadband Optical-Fiber-Compatible Photodetector Based on a Graphene-MoS₂-WS₂ Heterostructure with a Synergetic Photogenerating Mechanism. *Advanced Electronic Materials*, **5**, Article ID: 1970005. <https://doi.org/10.1002/aelm.201970005>
- [29] Yu, X., Li, Y., H. X., *et al.* (2018) Narrow Bandgap Oxide Nanoparticles Coupled with Graphene for High Performance Mid-Infrared Photodetection. *Nature Communications*, **9**, Article No. 4299. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06776-z>
- [30] Islam, S., Mishra, J.K., Kumar, A., *et al.* (2019) Ultra-Sensitive Graphene-Bismuth Telluride Nano-Wire Hybrids for Infrared Detection. *Nanoscale*, **11**, 1579-1586. <https://doi.org/10.1039/C8NR08433E>
- [31] Ni, Z., Ma, L., D. S., *et al.* (2017) Plasmonic Silicon Quantum Dots Enabled High-Sensitivity Ultrabroadband Photodetection of Graphene-Based Hybrid Phototransistors. *ACS Nano*, **11**, 9854-9862. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b03569>
- [32] Castilla, S., Terrés, B., Autore, M., *et al.* (2019) Fast and Sensitive Terahertz Detection Using an Antenna-Integrated Graphene pn Junction. *Nano Letters*, **19**, 2765-2773. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b04171>
- [33] Liu, C., Du, L., Tang, W., Wei, D., Li, J., Wang, L., Chen, G., Chen, X. and Lu, W. (2018) Towards Sensitive Terahertz Detection via Thermoelectric Manipulation Using Graphene Transistors. *NPG Asia Materials*, **10**, 318-327. <https://doi.org/10.1038/s41427-018-0032-7>